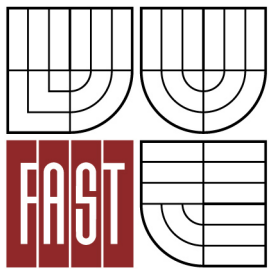


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

VERIFICATION OF NONLINEAR MATERIAL MODELS OF CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

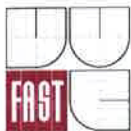
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. PETR KRÁL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR HRADIL, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3608T001 Pozemní stavby
Pracoviště Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant Bc. Petr Král


Název Verifikace nelineárních materiálových modelů betonu


Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Hradil, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce 31. 3. 2014

Datum odevzdání diplomové práce 16. 1. 2015

V Brně dne 31. 3. 2014


.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu


.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

- [1] Algaard W.: Perforation of Composite floors, 5th European LS-DYNA users conference
- [2] Malvar J., Simons, D. : Concrete material modeling in explicit computations , Workshop on Recent Advances in Computational Structural Dynamics and High Performance Computing USAE Waterways Experiment Station April 24-26 1996
- [3] Unoson M.: Constitutive equation for concrete materials subjected to high rate of loading, ISSN 0280-7971
- [4] Schwer, L. Malvar, J.: Simplified Concrete modelling with MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3
- [5] Holmquist T., J., Johnson G. R., Cook W.H.: A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures.
- [6] Broadhouse J.: The Winfrith Concrete Model in LS-DYNA 3D
- [7] Schwer, L.: An Introduction to the Winfrith Concrete Model, 2010
- [8] Schwer, L.: Winfrith Concrete Model Strain Rate Options, 2010
- [9] Broadhouse, B., Nelson, A,: Modelling reinforced concrete structures in DYNA 3D,
- [10] Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159, 2007
- [11] Users Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159, 2007
- [12] Ls-dyna keyword user's manual volume II material models, February 2013, version r7.0

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Seznamte se s programovým systémem LS-DYNA. Prostudujte nelineární materiálové modely betonu implementované do systému. U vybraných materiálových modelů popište jejich parametry a proveďte testovací výpočty. Výsledky prezentujte v diplomové práci. Systém má k dispozici značný počet materiálových modelů. Pro modelování betonových konstrukcí jsou k dispozici následující materiálové modely:

MAT_CONCRETE_DAMAGE, MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3,
MAT_SOIL_CONCRETE, MAT_WINFRITH_CONCRETE,
MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE, MAT_CONCRETE_EC2,
MAT_CONCRETE_BEAM, MAT_DAMAGE_PLASTIC_MODEL, MAT_CSCM.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Petr Hradil, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na popis parametrů nelineárních materiálových modelů betonu, které jsou implementovány ve výpočetním systému LS-DYNA, v interakci s provedením nelineárních testovacích výpočtů v systému LS-DYNA na vybraných úlohách, jež jsou tvořeny především simulacemi zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku a tahu na válcích s uplatněním různých okrajových podmínek a simulací ohybu desky, s následným srovnáním některých výsledků testovacích výpočtů s výsledky experimentu. Obsahem práce je vytvoření vhodných geometrických modelů vybraných úloh, pokrytí těchto geometrických modelů sítí konečných prvků, popis parametrů a aplikace nelineárních materiálových modelů betonu na vybrané úlohy, aplikace zatížení a okrajových podmínek na vybrané úlohy a provedení nelineárních výpočtů ve výpočetním systému LS-DYNA. Vyhodnocení výsledků je provedeno na základě pracovních a zatěžovacích diagramů vycházejících z nelineárních výpočtů se zohledněním vlivu rychlosti deformace a na základě hysterézních křivek vycházejících z nelineárních výpočtů v případě aplikace cyklického zatěžování na vybrané úlohy. Verifikace nelineárních materiálových modelů betonu je provedena na základě srovnání některých výsledků testovacích výpočtů s výsledky získanými z experimentu.

Abstract

Diploma thesis is focused on the description of the parameters of nonlinear material models of concrete, which are implemented in a computational system LS-DYNA, interacting with performance of nonlinear test calculations in system LS-DYNA on selected problems, which are formed mainly by simulations of tests of mechanical and physical properties of concrete in uniaxial compressive and tensile on cylinders with applying different boundary conditions and by simulation of bending slab, with subsequent comparison of some results of test calculations with results of the experiment. The thesis includes creation of appropriate geometric models of selected problems, meshing of these geometric models, description of parameters and application of nonlinear material models of concrete on selected problems, application of loads and boundary conditions on selected problems and performance of nonlinear calculations in a computational system LS-DYNA. Evaluation of results is made on the basis of stress-strain diagrams and load-displacement diagrams based on nonlinear calculations taking into account strain rate effects and on the

basis of hysteresis curves based on nonlinear calculations in case of application of cyclic loading on selected problems. Verification of nonlinear material models of concrete is made on the basis of comparison of some results of test calculations with results obtained from the experiment.

Klíčová slova

Nelineární materiálový model betonu, zkouška mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci, zkouška mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válci, betonový válec, betonová deska, ocelové podložky, metoda konečných prvků, LS-PrePost, LS-DYNA, geometrický model, konečné prvky, síť konečných prvků, okrajové podmínky, zatížení, zatěžovací křivka, nelineární výpočet, napětí, deformace, posun, pracovní diagram, zatěžovací diagram, vliv rychlosti deformace, kvazi-statické zatěžování, cyklické zatěžování, hysterézní křivka, ohybové momenty, experiment, numerická simulace.

Keywords

Nonlinear material model of concrete, test of mechanical and physical properties of concrete in uniaxial compressive on cylinder, test of mechanical and physical properties of concrete in uniaxial tensile on cylinder, concrete cylinder, concrete slab, steel washers, finite element method, LS-PrePost, LS-DYNA, geometric model, finite elements, mesh, boundary conditions, load, load curve, nonlinear calculation, stress, strain, displacement, stress-strain diagram, load-displacement diagram, strain rate effects, quasi-static loading, cyclic loading, hysteresis curve, bending moments, experiment, numerical simulation.

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Petr KRÁL. *Verifikace nelineárních materiálových modelů betonu*. Brno, 2014. 237 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Petr Hradil, Ph.D..

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 1. 2015



.....
podpis autora
Bc. Petr Král

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Hradilovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce a za odborné rady a připomínky, kterých se mi po celou dobu naší vzájemné spolupráce dostávalo. Chtěl bych svému vedoucímu diplomové práce také poděkovat za množství podkladů, které mi poskytnul a které velmi pozitivně ovlivnily kvalitu a rozsah mé práce.

Poděkování patří také mé rodině, přátelům a přítelkyni za podporu, toleranci a trpělivost při tvorbě mé práce.

Obsah

| | |
|--|------------|
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Cíle práce..... | 4 |
| 3 Vybrané úlohy pro řešení | 5 |
| 3.1 Úlohy používající modely z prostorových konečných prvků typu SOLID | 5 |
| 3.1.1 Zkouška mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci bez ocelových podložek..... | 6 |
| 3.1.2 Zkouška mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci s ocelovými podložkami | 9 |
| 3.1.3 Zkouška mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válci | 12 |
| 3.2 Úloha používající model ze skořepinových konečných prvků typu SHELL..... | 15 |
| 4 Výpočetní systém LS-DYNA | 17 |
| 4.1 Popis systému LS-DYNA | 17 |
| 4.2 Popis programu LS-PrePost..... | 18 |
| 5 Nelineární materiálové modely betonu v programu LS-DYNA..... | 22 |
| 5.1 Vymezení použití nelineárních materiálových modelů betonu pro výpočty | 22 |
| 5.2 Popis a zadání parametrů nelineárních materiálových modelů betonu použitých pro výpočty | 23 |
| 5.2.1 *MAT_CSCM | 24 |
| 5.2.2 *MAT_WINFRITH_CONCRETE..... | 32 |
| 5.2.3 *MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL | 41 |
| 5.2.4 *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 51 |
| 5.2.5 *MAT_CONCRETE_DAMAGE..... | 66 |
| 5.2.6 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE | 78 |
| 5.2.7 *MAT_CONCRETE_EC2 | 85 |
| 5.3 Popis parametrů nelineárních materiálových modelů betonu nepoužitých pro výpočty..... | 98 |
| 5.3.1 *MAT_SOIL_CONCRETE | 98 |
| 5.3.2 *MAT_CONCRETE_BEAM..... | 103 |
| 6 Výpočtové modely | 108 |
| 6.1 Vytvoření geometrických modelů | 108 |
| 6.2 Pokrytí geometrických modelů sítí konečných prvků | 110 |
| 6.3 Nastavení materiálových modelů..... | 117 |
| 6.4 Nastavení okrajových podmínek a zatížení | 118 |
| 7 Nelineární výpočet | 127 |

| | |
|--|------------|
| 8 Vyhodnocení výsledků..... | 130 |
| 8.1 Experiment..... | 131 |
| 8.2 Vyhodnocení výsledků získaných z testovacích výpočtů..... | 135 |
| 8.2.1 Kvazi-statické zatěžování..... | 135 |
| 8.2.2 Vyšší rychlosti zatěžování..... | 176 |
| 8.2.3 Cyklické zatěžování..... | 197 |
| 8.2.4 Testování závislosti výsledků na síti konečných prvků..... | 205 |
| 8.2.5 Srovnání výsledků | 209 |
| 8.3 Srovnání výsledků získaných z testovacích výpočtů s výsledky získanými z experimentu | 210 |
| 9 Závěr | 212 |
| Seznam použitých zdrojů | 215 |
| Seznam použitých symbolů..... | 217 |
| Seznam obrázků a tabulek..... | 223 |

Kapitola 1

Úvod

Numerické modelování konstrukcí nebo dílčích konstrukčních prvků pro vyšetření jejich chování prostřednictvím výpočetních systémů založených na metodě konečných prvků, ve kterých je možné aplikovat na konstrukce nebo konstrukční prvky analýzy různých typů, je dnes již běžným postupem při návrhu konstrukce nebo konstrukčního prvku. Výpočetní systémy založené na metodě konečných prvků, ať už se jedná o implicitní, explicitní nebo kombinované řešiče, v dnešní době nabízejí nepřehledné množství materiálových modelů umožňujících modelování jak například lineárního, bilineárního či multilineárního chování materiálu, tak také silně nelineárního nebo zcela uživatelsky definovaného chování materiálu aj. Tyto materiálové modely umožňují uživateli vymodelovat v programu konstrukce nebo konstrukční prvky v podstatě z jakéhokoliv materiálu.

V praxi se nejčastěji vyšetřuje chování, tedy vnitřní síly, napjatost a deformace, konstrukcí nebo konstrukčních prvků s uvážením lineárního chování materiálu neboli materiálové linearity, kdy platí Hookův zákon, s následným posouzením dle platných norem. Pro analýzu konstrukce nebo konstrukčního prvku v programu je tedy v praxi nejčastěji používán lineární izotropní materiálový model, který je definován pouze modulem pružnosti materiálu a součinitelem příčné kontrakce materiálu neboli Poissonovým číslem. Nejinak je tomu také u betonových konstrukcí. Nicméně existují situace, kdy je skutečností, že chování betonu je nelineární, nutné nebo vhodné využít. Jedná se například o situaci, kdy bychom se uvážením lineárního chování betonu při analýze konstrukce s následným posouzením dle platné betonářské normy dopustili nepřiměřené chyby, která by mohla mít za následek porušení a následný kolaps konstrukce. Tato situace se týká především problémových konstrukcí, jakými jsou například hrázové přehrady z betonu. Další situací, kdy je vhodné využít skutečnost nelineárního chování betonu, je situace, kdy je betonový prvek vyráběn a distribuován ve velkém množství a nalezení jeho mezního stavu únosnosti za předpokladu nelineárního chování betonu umožní prvek navrhnout z ekonomického hlediska hospodárněji, než je tomu v případě návrhu prvku na základě mezního stavu únosnosti dle platné betonářské normy, která je v tomhle ohledu konzervativní, čímž je vzhledem k množství vyráběných betonových prvků

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

dosaženo výrazného zlevnění celé výroby. Příkladem takovéto situace může být například výroba pražců z předpjatého betonu pro výstavbu železnic. V takovýchto situacích je tedy nutné pro analýzu konstrukce nebo konstrukčního prvku v programu použít některý z nelineárních modelů vhodných pro beton. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že i nelineární materiálové modely betonu implementované v programech pro analýzu betonových konstrukcí nebo betonových konstrukčních prvků mají v praxi své místo.

Základní a společnou vlastností pro všechny materiálové modely implementované ve výpočetních systémech je to, že každý materiálový model je definován prostřednictvím příslušných parametrů, které musí uživatel v programu zadat a které určují příslušné chování materiálu a tím také chování konstrukčního prvku nebo celé konstrukce. Tyto parametry se pro různé materiálové modely liší a mohou se také lišit i u materiálových modelů, které slouží pro modelování stejného materiálu. Nejinak je tomu také u nelineárních materiálových modelů betonu. Parametry nelineárních materiálových modelů betonu jsou, stejně jako v případě materiálových modelů pro jiné materiály, definovány prostřednictvím číselných hodnot, které v případě nelineárních materiálových modelů betonu mohou vyjadřovat například mechanicko fyzikální vlastnosti betonu, parametry betonu pro popis lomového chování aj., přičemž v případě explicitního řešiče jsou nelineární materiálové modely betonu často obohaceny také o další parametry, které mají význam právě při použití explicitního řešiče a kterými jsou například parametry, jejichž číselné hodnoty udávají vliv rychlosti deformace na mechanicko fyzikální a lomové vlastnosti betonu, aj. V případě, že uživatel v programu vhodně zadá číselné hodnoty parametrů vybraného nelineárního materiálového modelu betonu, bude chování výpočtového modelu betonové konstrukce nebo betonového konstrukčního prvku blízké skutečnému chování betonové konstrukce nebo betonového konstrukčního prvku, což je žádoucí. Zadávání číselných hodnot parametrů nelineárních materiálových modelů betonu bývá ovšem mnohdy velmi problematické, jelikož často nemáme k dispozici číselné hodnoty daných parametrů a musíme je tedy mnohdy sami zjišťovat pomocí provádění různých experimentů, přičemž je důležitá také vysoká znalost teorie týkající se příslušného nelineárního materiálového modelu betonu. Vhodnost zadaných číselných hodnot parametrů nelineárních materiálových modelů betonu se pak často ověřuje srovnáním výsledků provedených nelineárních testovacích výpočtů s výsledky experimentu.

Tato diplomová práce bude tedy zaměřena na popis parametrů nelineárních materiálových modelů betonu, které jsou implementovány ve výpočetním systému LS-DYNA, což je kombinovaný explicitní a implicitní řešič, v interakci s provedením

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

nelineárních testovacích výpočtů v systému LS-DYNA na vybraných úlohách, jež budou tvořeny především simulacemi zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku a tahu na válcích s uplatněním různých okrajových podmínek a simulací ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky. Nelineární testovací výpočty budou provedeny v explicitním řešiči, přičemž, jak už vyplývá z kontextu, uvažována je pouze materiálová nelinearita. Vyhodnocení výsledků bude provedeno na základě pracovních a zatěžovacích diagramů vycházejících z nelineárních výpočtů se zohledněním vlivu rychlosti deformace a na základě hysterézních křivek vycházejících z nelineárních výpočtů v případě aplikace cyklického zatěžování na vybrané úlohy. Vyhodnocena bude také závislost výsledků na síti konečných prvků, jejíž vyhodnocení je v případě nelineárních materiálových modelů betonu implementovaných ve výpočetním systému LS-DYNA na místě vzhledem k tomu, že tyto materiálové modely většinou zahrnují tahové, případně i tlakové, změkčování. Verifikace nelineárních materiálových modelů betonu bude provedena prostřednictvím srovnání některých výsledků testovacích výpočtů s výsledky získanými z experimentu, jež budou také vyhodnoceny.

Kapitola 2

Cíle práce

- Vytvoření výpočtových modelů vybraných úloh, jež tvoří betonové válce bez ocelových podložek a s ocelovými podložkami pro simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku a tahu a betonová deska pro simulaci ohybu desky.
- Popis parametrů nelineárních materiálových modelů betonu implementovaných ve výpočtním systému LS-DYNA, dosazení číselných hodnot parametrů a aplikace těchto materiálových modelů na výpočtové modely vybraných úloh s následným provedením nelineárních testovacích výpočtů v explicitním řešiči LS-DYNA.
- Vyhodnocení výsledků získaných z experimentu.
- Vyhodnocení výsledků získaných z provedených nelineárních testovacích výpočtů na základě pracovních a zatěžovacích diagramů se zohledněním vlivu rychlosti deformace a na základě hysterézních křivek v případě aplikace cyklického zatěžování na vybrané úlohy.
- Testování závislosti výsledků na síti konečných prvků.
- Srovnání výsledků od jednotlivých nelineárních materiálových modelů betonu.
- Srovnání některých výsledků získaných z testovacích výpočtů s výsledky získanými z experimentu.

Kapitola 3

Vybrané úlohy pro řešení

Tato kapitola je zaměřena na popis úloh, které jsou v rámci této práce řešeny nelineárně s použitím nelineárních materiálových modelů betonu implementovaných ve výpočetním systému LS-DYNA. V následujícím textu bude také vysvětlen důvod, proč byly zvoleny právě níže popsané úlohy.

3.1 Úlohy používající modely z prostorových konečných prvků typu SOLID

Bezmála všechny nelineární materiálové modely betonu implementované ve výpočetním systému LS-DYNA jsou k dispozici pouze pro prostorové konečné prvky typu SOLID. Z tohoto důvodu byly jako úlohy k řešení vybrány simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku a tahu na válcích s různými okrajovými podmínkami, což jsou úlohy, které zahrnují prvky jako betonové válce nebo kruhové ocelové podložky, jež je vhodné modelovat z prostorových konečných prvků typu SOLID. Tyto úlohy mají navíc, jak už název napovídá, velkou vypovídací hodnotu o mechanicko fyzikálních vlastnostech betonu, tedy o chování betonu a v tom důsledku také o chování zatěžovaného betonového prvku, jelikož tvar křivky zatěžovacího diagramu (závislost síly na posunutí), jenž je u těchto úloh sledován, v podstatě odpovídá tvaru křivky pracovního diagramu (závislost napětí na poměrné deformaci), jenž obecně popisuje chování betonu, což lze považovat za další důvod, proč byly pro řešení vybrány právě zmíněné úlohy.

V následujících podkapitolách budou popsány dva typy zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích lišící se v použití ocelových podložek a v okrajových podmínkách a zkouška mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válci. Budou tedy popsány zkoušky, jež byly v rámci této práce numericky simulovány s použitím nelineárních materiálových modelů betonu ve výpočetním systému LS-DYNA.

3. 1. 1 Zkouška mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci bez ocelových podložek

Jedná se o zkoušku, kdy je normované betonové zkušební těleso (betonový válec) umístěno ve zkušebním lisu mezi jeho tlačnými deskami a stlačováno až za mez porušení, kdy dojde k destrukci zkušební tělesa. Tato zkouška tedy spadá do skupiny destruktivních zkoušek betonu. V praxi se tato zkouška používá pro zjištění pevnosti betonu v tlaku, přičemž v případě použití betonového válce jako zkušební tělesa se jedná o válcovou pevnost betonu v tlaku. V průběhu této zkoušky se sledují veličiny v podobě poměrné deformace (poměrného zkrácení) zkušební tělesa (betonového válce) měřené tenzometrem, dále v podobě tlakové síly, kterou musí vyvíjet zkušební lis až za mez porušení válce, a v podobě svislého posunu podstavy válce. Sledované veličiny se v průběhu zkoušky mění v čase, přičemž poslední dvě zmíněné umožňují sestavit zatěžovací diagram válce v tlaku, tedy graf závislosti tlakové síly ve zkušebním lisu na svislém posunutí podstavy válce, jenž je pro tento typ zkoušky stěžejní, poněvadž z něj lze stanovit pevnost betonu v tlaku (válcovou) a také z něj lze jednoduše vyčíst chování zkoušeného betonu v tlaku. Jelikož normálové napětí σ je obecně dáno vztahem

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ [MPa]}$$

kde F síla [N],

A plocha [mm^2],

tak maximální tlakové napětí v betonu neboli pevnost betonu v tlaku R_c , v tomhle případě válcovou pevnost, lze stanovit ze vztahu

$$R_c = \frac{F_{c,\max}}{A_c} \text{ [MPa]}$$

kde $F_{c,\max}$ maximální hodnota tlakové síly ve zkušebním lisu [N],

A_c plocha podstavy zkušební tělesa (betonového válce) [mm^2].

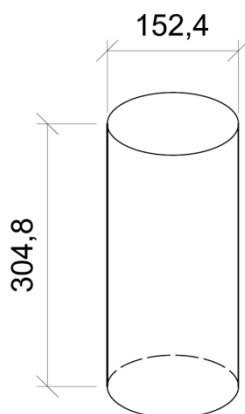
Hodnota tlakové síly ve zkušebním lisu se vzhledem k nelineárnímu chování betonu v průběhu zkoušky v čase nelineárně mění. Na základě zmíněného vztahu pro stanovení maximálního tlakového napětí v betonu lze tedy samozřejmě stanovit také tlakové napětí v betonu v jakémkoliv okamžiku průběhu zkoušky, což umožňuje vynesení pracovního diagramu betonu v tlaku, tedy grafu závislosti tlakového napětí v betonu na poměrné deformaci (poměrném zkrácení) betonu, který určuje příslušné mechanicko fyzikální vlastnosti zkoušeného betonu v tlaku. Zkouška má tedy velkou vypovídací hodnotu o mechanicko fyzikálních vlastnostech betonu v tlaku, tedy o chování betonu v tlaku.

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

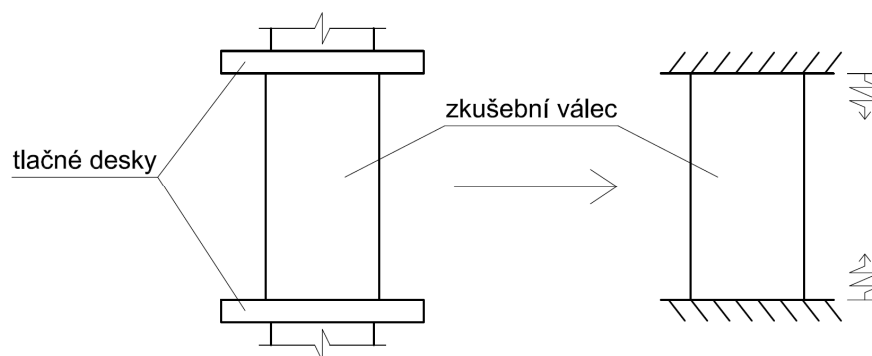
Pro účely této práce lze zkoušku mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci bez ocelových podložek popsat takto:

- Zkušebním tělesem je betonový válec o výšce 304,8 mm s průměrem podstavy 152,4 mm (obr. 3. 1. 1). [1]
- Válec je umístěn mezi tlačnými deskami zkušebního lisu, přičemž je předpokládáno, že tření mezi povrchem podstav válce a povrchem tlačných desek je tak velké, že neumožňuje v průběhu stlačování válce jakékoliv vodorovné posunutí ani pootočení podstav válce. Tento předpoklad umožňuje při numerickém modelování v programu modelovat pouze zkušební válec s příčně podepřenými uzly podstav bez tlačných desek [1] → idealizace okrajových podmínek. Schematicky lze tento předpoklad znázornit v podobě válce s vetknutými podstavami, přičemž vetknutí mají volnost ve svislém směru (obr. 3. 1. 2).
- Válec je v průběhu zatěžování stlačován konstantní rychlostí z obou stran. Svislé posunutí obou podstav válce v čase tedy narůstá lineárně a stejnoměrně, přičemž je válec zatěžován až za mez jeho porušení (obr. 3. 1. 3). [1]

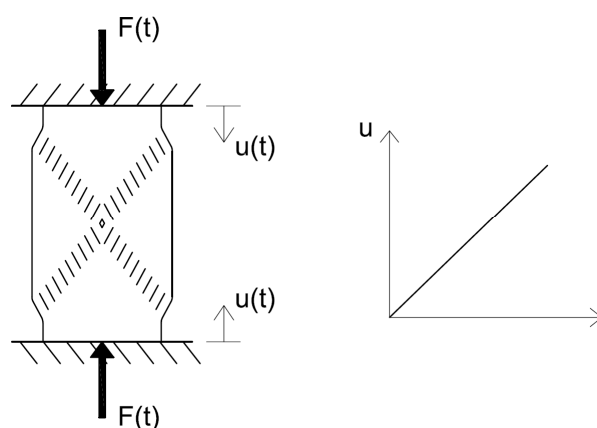
Numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek s použitím nelineárních materiálových modelů betonu ve výpočetním systému LS-DYNA byly v rámci této práce provedeny dle výše zmíněného popisu těchto zkoušek definovaného pro účely této práce, přičemž informace o modelování zkušebního válce, zadávání materiálových modelů, okrajových podmínkách, zatěžování a dosažených výsledcích jsou uvedeny v příslušných kapitolách této práce.



Obr. 3. 1. 1 Geometrie zkušebního betonového válce → rozměry v [mm]



Obr. 3. 1. 2 Idealizace okrajových podmínek v případě zkoušky mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci bez ocelových podložek



Obr. 3. 1. 3 Průběh zatěžování zkušebního válce s možným tvarem porušení [1] při zkoušce mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci bez ocelových podložek

Součástí této práce je také doplňková zkouška testující odezvu betonového zkušebního válce na cyklické namáhání. Vzhledem k tomu, že tato zkouška vychází pro účely této práce ze stejné geometrie zkušebního válce a stejných okrajových podmínek jako zkouška mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci bez ocelových podložek definovaná pro účely této práce a jediným rozdílem mezi zmíněnými zkouškami je tedy samozřejmě způsob zatěžování válce, jenž je v tomhle případě cyklicky se měnící, není této zkoušce věnována samostatná podkapitola a je tedy zmíněna přímo zde v této podkapitole.

Numerické simulace zkoušek testujících odezvu betonových zkušebních válců na cyklické namáhání s použitím nelineárních materiálových modelů betonu ve výpočetním systému LS-DYNA byly v rámci této práce provedeny dle výše zmíněného popisu zkoušky mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci bez ocelových podložek

definovaného pro účely této práce se zohledněním zmíněné odlišnosti ve způsobu zatěžování, přičemž informace o modelování zkušebního válce, zadávání materiálových modelů, okrajových podmínkách, cyklickém zatěžování a dosažených výsledcích jsou uvedeny v příslušných kapitolách této práce.

3. 1. 2 Zkouška mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci s ocelovými podložkami

Jedná se o zkoušku, jejíž význam, princip, provedení a způsob zpracování výsledků odpovídá zkoušce mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci bez ocelových podložek s jediným rozdílem, kterým je umístění dostatečně tuhé kruhové ocelové podložky mezi každou podstavu zkušebního válce a každou tlačnou desku zkušebního lisu. Obecný popis této zkoušky tedy odpovídá obecnému popisu zkoušky mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci bez ocelových podložek uvedenému na straně 6 této práce se zohledněním přítomnosti ocelových podložek a z tohoto důvodu není v této podkapitole uveden. Pro shlednutí obecných informací o zkoušce mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci s ocelovými podložkami proto odkazují na stranu 6 této práce, přičemž je nutné při nahlížení do uvedených informací uvážit zmíněnou přítomnost ocelových podložek.

Pro účely této práce lze zkoušku mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci s ocelovými podložkami popsat takto:

- Zkušebním tělesem je betonový válec o výšce 304,8 mm s průměrem podstavy 152,4 mm, který má ke každé své podstavě přiloženou kruhovou ocelovou podložku o průměru 165,1 mm a výšce 12,7 mm (obr. 3. 1. 4). [1]
- Válec je i s ocelovými podložkami umístěn mezi tlačnými deskami zkušebního lisu, přičemž idealizace okrajových podmínek je uvažována ve třech variantách:
 - 1) Tření mezi povrchem horní tlačné desky a povrchem horní ocelové podložky je předpokládáno jako zanedbatelné, horní ocelová podložka se tedy může v průběhu stlačování válce volně vodorovně posouvat po horní tlačné desce a pootáčet, a tření mezi povrchem spodní tlačné desky a povrchem spodní ocelové podložky je předpokládáno tak velké, že neumožňuje v průběhu stlačování válce jakékoliv vodorovné posunutí ani pootočení spodní ocelové podložky. Tyto předpoklady umožňují při numerickém modelování v programu modelovat pouze zkušební válec společně s ocelovými podložkami, přičemž mezi podstavami válce a ocelovými

podložkami je nutné nadefinovat tření, bez tlačných desek pouze s příčně podepřenými uzly spodní ocelové podložky [1]. Schematicky lze tyto předpoklady znázornit v podobě válce s ocelovými podložkami, vetknutím v místě spodní podložky a posuvným vetknutím v místě horní podložky, přičemž je v obou typech vetknutí uvažována volnost ve svislém směru a v posuvném vetknutí je uvažována také volnost ve vodorovném směru (obr. 3. 1. 5).

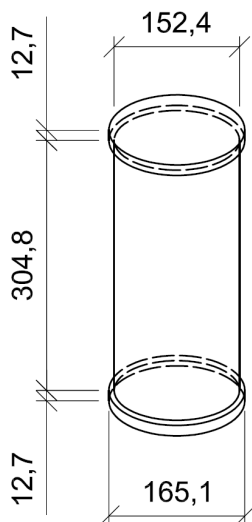
2) Tření mezi povrchem horní tlačné desky a povrchem horní ocelové podložky i tření mezi povrchem spodní tlačné desky a povrchem spodní ocelové podložky je předpokládáno tak velké, že neumožňuje v průběhu stlačování válce jakékoliv vodorovné posunutí ani pootočení spodní ani horní ocelové podložky. Tento předpoklad umožňuje při numerickém modelování v programu modelovat pouze zkušební válec společně s ocelovými podložkami, přičemž mezi podstavami válce a ocelovými podložkami je nutné nadefinovat tření, bez tlačných desek pouze s příčně podepřenými uzly spodní a horní ocelové podložky [1]. Schematicky lze tento předpoklad znázornit v podobě válce s ocelovými podložkami a vetknutím v místě spodní i horní podložky, přičemž je ve vetknutích uvažována volnost ve svislém směru (obr. 3. 1. 5).

3) Tření mezi povrchem horní tlačné desky a povrchem horní ocelové podložky i tření mezi povrchem spodní tlačné desky a povrchem spodní ocelové podložky je předpokládáno jako zanedbatelné, ocelové podložky se tedy můžou v průběhu stlačování válce volně vodorovně posouvat po tlačných deskách a pootáčet. Tento předpoklad umožňuje při numerickém modelování v programu modelovat pouze zkušební válec společně s ocelovými podložkami, přičemž mezi podstavami válce a ocelovými podložkami je nutné nadefinovat tření, bez tlačných desek a bez jakéhokoliv dalšího podepření [1]. Schematicky lze tento předpoklad znázornit v podobě válce s ocelovými podložkami a posuvným vetknutím v místě spodní i horní podložky, přičemž je v posuvných vetknutích uvažována volnost ve svislém a vodorovném směru (obr. 3. 1. 5).

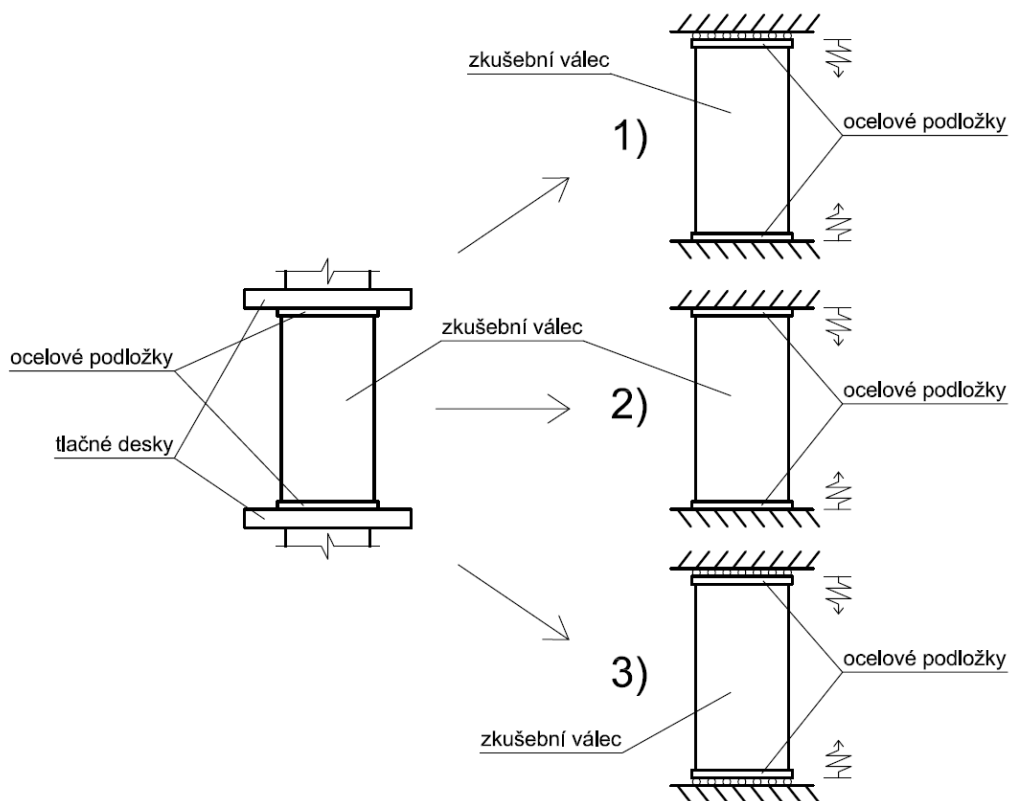
→ Válec je i s ocelovými podložkami v průběhu zatěžování stlačován konstantní rychlostí z obou stran. Svislé posunutí obou ocelových podložek v čase tedy narůstá lineárně a stejnoměrně. Válec je zatěžován až za mez jeho porušení (obr. 3. 1. 6). [1]

Numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích s ocelovými podložkami s použitím nelineárních materiálových modelů betonu ve výpočetním systému LS-DYNA byly v rámci této práce provedeny dle výše

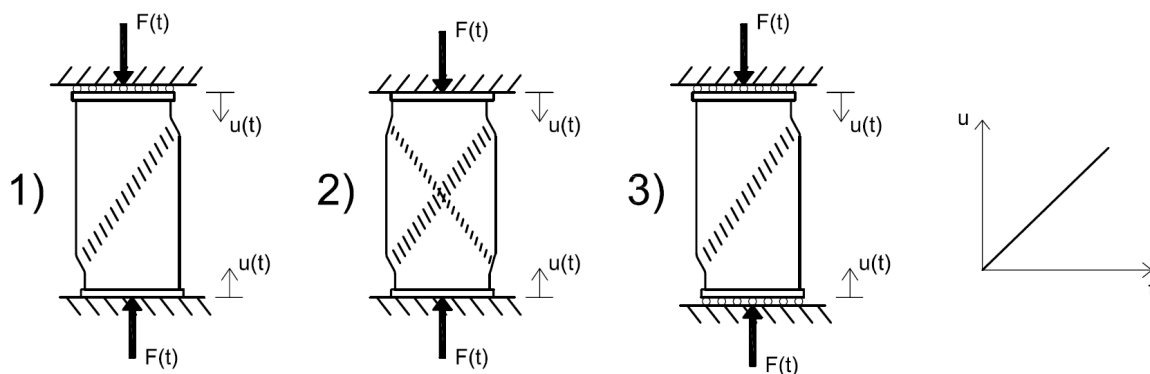
zmíněného popisu těchto zkoušek definovaného pro účely této práce, přičemž informace o modelování zkušebního válce a podložek, zadávání materiálových modelů, okrajových podmínkách, zatěžování a dosažených výsledcích jsou uvedeny v příslušných kapitolách této práce.



Obr. 3. 1. 4 Geometrie zkušebního betonového válce a ocelových podložek → rozměry v [mm]



Obr. 3. 1. 5 Tři varianty idealizace okrajových podmínek v případě zkoušky mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci s ocelovými podložkami



Obr. 3. 1. 6 Průběh zatěžování zkušebního válce s možnými tvary porušení [1] při zkoušce mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci s ocelovými podložkami

3. 1. 3 Zkouška mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válci

Jedná se o zkoušku, kdy je normované betonové zkušební těleso (betonový válec) upnuto v trhacím stroji, přičemž upnutí do trhacího stroje je realizováno prostřednictvím kloubového zařízení, se kterým je zkušební těleso spojeno pomocí pro spojení upravených kruhových ocelových desek, jež jsou přilepeny ke dvěma protilehlým podstavám zkušebního tělesa, a natahováno až za mez porušení, kdy dojde k destrukci zkušebního tělesa. Tato zkouška tedy spadá do skupiny destruktivních zkoušek betonu. V praxi se tato zkouška používá pro zjištění pevnosti betonu v prostém tahu, ovšem vzhledem k tomu, že tato zkouška vyžaduje přilepení ocelových kruhových desek ke dvěma protilehlým podstavám zkušebního tělesa, přičemž přilepení musí mít perfektní geometrii a pevnost vyšší než je pevnost zkoušeného betonu v tahu, čehož je mnohdy problematické dosáhnout, se tato zkouška v praxi provádí spíše výjimečně. Mnohem běžnějšími zkouškami pro zjišťování pevnosti betonu v tahu jsou v praxi zkoušky mechanicko fyzikálních vlastností betonu v příčném tahu a v tahu za ohybu. V průběhu zkoušky mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válci se sledují veličiny v podobě poměrné deformace (poměrného prodloužení) zkušebního tělesa (betonového válce) měřené tenzometrem, dále v podobě tahové síly, kterou musí vyvíjet trhací stroj až za mez porušení válce, a v podobě svislého posunu podstavy válce. Sledované veličiny se v průběhu zkoušky mění v čase, přičemž poslední dvě zmíněné umožňují sestavit zatěžovací diagram válce v tahu, tedy graf závislosti tahové síly v trhacím stroji na posunutí podstavy válce, jenž je pro tento typ zkoušky stěžejní, poněvadž z něj lze stanovit pevnost betonu v prostém tahu a také z něj

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

Lze jednoduše vyčíst chování zkoušeného betonu v tahu. Jelikož normálové napětí σ je obecně dáno, jak již bylo zmíněno, vztahem

$$\sigma = \frac{F}{A} \text{ [MPa]}$$

kde F síla [N],

A plocha [mm^2],

tak maximální tahové napětí v betonu neboli pevnost betonu v prostém tahu R_t lze stanovit ze vztahu

$$R_t = \frac{F_{t,\max}}{A_c} \text{ [MPa]}$$

kde $F_{t,\max}$ maximální hodnota tahové síly v trhacím stroji [N],

A_c plocha podstavy zkušební tělesa (betonového válce) [mm^2].

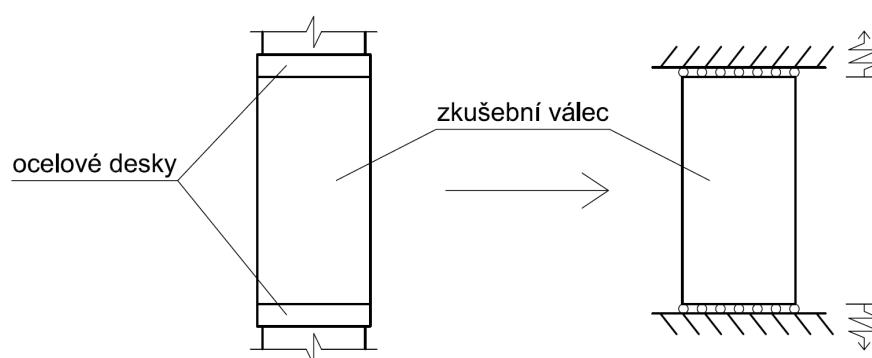
Hodnota tahové síly v trhacím stroji se vzhledem k nelineárnímu chování betonu v průběhu zkoušky v čase nelineárně mění. Na základě zmíněného vztahu pro stanovení maximálního tahového napětí v betonu lze tedy samozřejmě stanovit také tahové napětí v betonu v jakémkoliv okamžiku průběhu zkoušky, což umožňuje vynesení pracovního diagramu betonu v tahu, tedy grafu závislosti tahového napětí v betonu na poměrné deformaci (poměrném prodloužení) betonu, který určuje příslušné mechanicko fyzikální vlastnosti zkoušeného betonu v tahu. Zkouška má tedy velkou vypovídací hodnotu o mechanicko fyzikálních vlastnostech betonu v tahu, tedy o chování betonu v tahu.

Pro účely této práce lze zkoušku mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válci popsat takto:

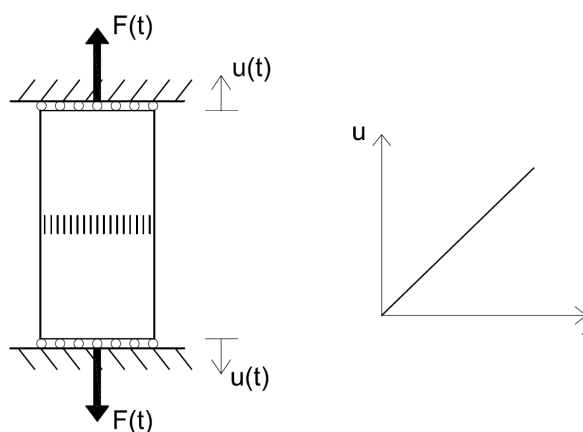
- Zkušebním tělesem je betonový válec o výšce 304,8 mm s průměrem podstavy 152,4 mm (obr. 3. 1. 1). [1]
- Válec je upevněn v kloubovém zařízení trhacího stroje prostřednictvím kruhových ocelových desek přilepených k protilehlým podstavám válce, přičemž je předpokládáno, že v průběhu natahování válce přilepení nikterak neomezuje příčné deformace a potočení válce v místě podstav. Tento předpoklad umožňuje při numerickém modelování v programu modelovat pouze zkušební válec bez kruhových ocelových desek, bez přilepení a bez jakéhokoliv dalšího podepření [1] → idealizace okrajových podmínek. Schematicky lze tento předpoklad znázornit v podobě válce s posuvně vetknutými podstavami, přičemž posuvná vetknutí mají volnost ve svislém a vodorovném směru (obr. 3. 1. 7).

→ Válec je v průběhu zatěžování natahován konstantní rychlostí z obou stran. Svislé posunutí obou podstav válece v čase tedy narůstá lineárně a stejnoměrně, přičemž je válec zatěžován až za mez jeho porušení (obr. 3. 1. 8). [1]

Numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válcích s použitím nelineárních materiálových modelů betonu ve výpočetním systému LS-DYNA byly v rámci této práce provedeny dle výše zmíněného popisu těchto zkoušek definovaného pro účely této práce, přičemž informace o modelování zkušebního válece, zadávání materiálových modelů, okrajových podmínkách, zatěžování a dosažených výsledcích jsou uvedeny v příslušných kapitolách této práce.



Obr. 3. 1. 7 Idealizace okrajových podmínek v případě zkoušky mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válci



Obr. 3. 1. 8 Průběh zatěžování zkušebního válece s možným tvarem porušení [1] při zkoušce mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válci

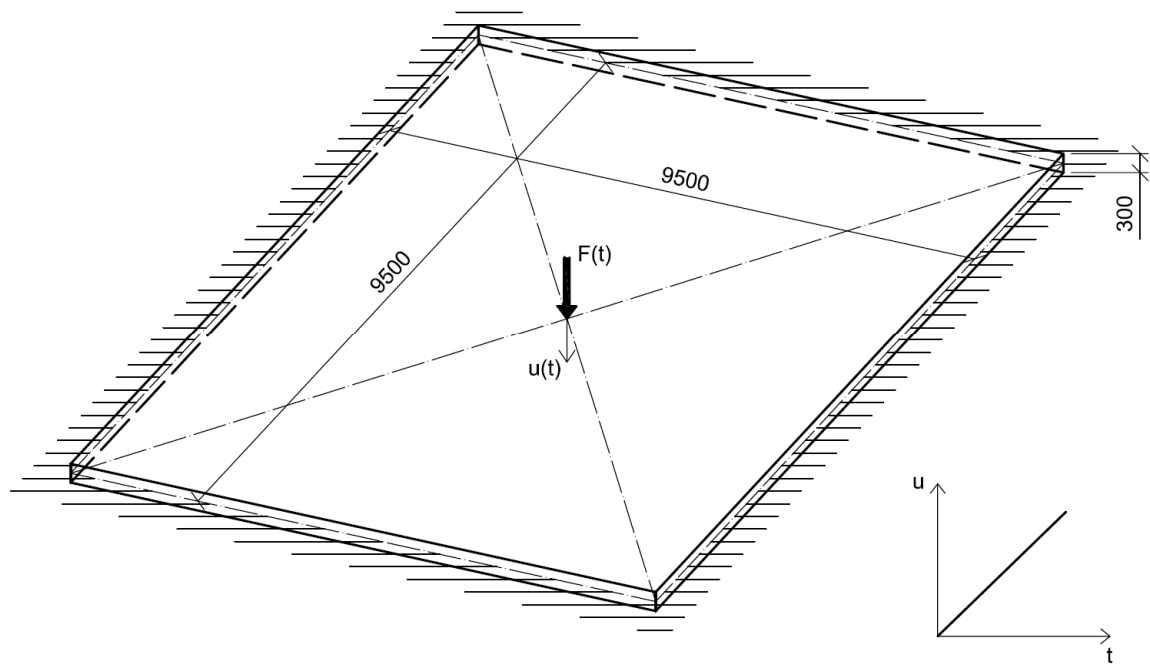
3.2 Úloha používající model ze skořepinových konečných prvků typu SHELL

Vzhledem k tomu, že ve výpočetním systému LS-DYNA je implementován také jeden nelineární materiálový model betonu, který je k dispozici pro skořepinové konečné prvky typu SHELL, byla jako úloha k řešení vybrána také simulace ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky, což je úloha, která zahrnuje prvek v podobě čtvercové betonové desky, jenž může být modelována ze skořepinových konečných prvků typu SHELL, jelikož tloušťka desky je výrazně menší než zbývající dva rozměry desky. Tato úloha je pouze doplňková a její význam tedy spočívá pouze ve skutečnosti, že zahrnuje betonový prvek, který je možné modelovat prostřednictvím skořepinových konečných prvků typu SHELL, pro něž je možná aplikace zmíněného nelineárního materiálového modelu betonu, což bylo důvodem, proč byla pro řešení vybrána právě tato úloha.

Úlohu ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky lze pro účely této práce popsat takto:

- Zatěžovaným prvkem je nevyztužená betonová deska, která má půdorys tvaru čtverce s délkou strany 9,5 m a tloušťku 300 mm (obr. 3. 2. 1).
- Deska je, co se týče okrajových podmínek, po všech stranách vetknutá (obr. 3. 2. 1).
- Deska je zatěžována ve svém středu lokálním posunem kolmým ke střednicové rovině desky, přičemž tento posun narůstá v čase lineárně. Deska je tedy ohýbána konstantní rychlostí (obr. 3. 2. 1). Zatížení vlastní tíhou desky není uvažováno.

Numerická simulace ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky s použitím nelineárního materiálového modelu betonu, který je k dispozici pro skořepinové konečné prvky typu SHELL, ve výpočetním systému LS-DYNA byla v rámci této práce provedena dle výše zmíněného popisu úlohy ohybu desky definovaného pro účely této práce, přičemž informace o modelování desky, zadání materiálového modelu, okrajových podmínkách, zatěžování a dosažených výsledcích jsou uvedeny v příslušných kapitolách této práce.



Obr. 3. 2. 1 Geometrie, okrajové podmínky a průběh zatěžování betonové desky → rozměry v [mm]

Kapitola 4

Výpočetní systém LS-DYNA

Tato kapitola je zaměřena na popis výpočetního systému LS-DYNA, ve kterém jsou implementovány nelineární materiálové modely betonu, u nichž je popis jejich parametrů v interakci s provedením nelineárních testovacích výpočtů v systému LS-DYNA na úlohách popsaných v minulé kapitole hlavním cílem této práce.

V následujících podkapitolách bude uveden popis a oblasti využití systému LS-DYNA a popis programu LS-PrePost, jenž byl v rámci této práce používán pro pre-processing vstupních a post-processing výstupních souborů výpočetního systému LS-DYNA.

4.1 Popis systému LS-DYNA

Program LS-DYNA je multifyzikální řešič založený na metodě konečných prvků. Je používán například v automobilovém, leteckém, stavebním, vojenském, výrobním nebo bioinženýrském průmyslu. Program umožňuje simulovat složité silně nelineární fyzikální děje a rychlé dynamické děje. Pod pojmem "nelineární fyzikální děj" si lze představit úlohu, u které se uplatňuje minimálně jedna, nebo také všechny, z následujících komplikací:

- změna okrajových podmínek v čase,
- velké deformace,
- nelineární materiály, které nevykazují ideálně lineární chování v čase.

Rychlé dynamické děje lze definovat jako velmi rychlé krátkodobé akce, při nichž dochází k velkým deformacím ve velmi krátkém časovém úseku a při nichž má tudíž vliv setrvačných sil zásadní význam. Typické využití těchto dějů je například při simulacích různých nárazových zkoušek (crash testů), vývoji bezpečnostních prvků a částí aut, simulacích výbuchů a dále také při simulacích úloh technické praxe z oblasti průmyslové výroby, jimiž může být válcování, lisování, kování atd. Program LS-DYNA je primárně určen pro řešení úloh, jež vyžadují explicitní integraci pohybových rovnic, nicméně s jistými omezeními ho lze použít také jako implicitní řešič. Program je tedy kombinovaným explicitním a implicitním řešičem s větším důrazem kladeným na explicitní řešič. Z tohoto

ohledu ho lze považovat za velmi mocný nástroj v oblasti nelineární mechaniky, jelikož při řešení nelineárních problémů využívá explicitní implementaci, jejíž výhodou je velká stabilita i v oblasti velkých nelinearit, což umožňuje řešit silně nelineární úlohy, jež by v implicitním řešiči špatně konvergovaly.

Výpočetní systém LS-DYNA umožňuje provádět analýzy různých typů a simulovat úlohy z různých oblastí, přičemž nabízí velké množství různých typů konečných prvků, materiálových modelů a kontaktů. Pro představu lze uvést některé možnosti a oblasti využití programu:

- lineární statika,
- nelineární dynamika,
- dynamika tuhých těles,
- silně nelineární kvazi-statické simulace,
- simulace složitých kontaktních úloh,
- simulace rychlých dynamických dějů,
- simulace post-stabilitních úloh,
- simulace úloh zahrnujících materiály s degradací a porušováním,
- teplotní analýza,
- elektromagnetická analýza,
- analýza proudění tekutin,
- analýza poruch,
- analýza šíření trhlin,
- akustická analýza aj.

Program LS-DYNA je produktem firmy LSTC a v současné době patří mezi přední programy na trhu v oblasti dynamických výpočtů. Je možné ho nalézt také jako součást jiných komerčních programů, jakými jsou například ANSYS nebo DYTRAN.

Informace uvedené v této podkapitole byly čerpány ze zdrojů [2], [3] a [4].

4.2 Popis programu LS-PrePost

Firma LSTC vyvíjí také další programy, které dále rozšiřují možnosti programu LS-DYNA. Jedním z takových programů je program LS-PrePost, který slouží pro pre-processing vstupních (příprava výpočtového modelu) a post-processing výstupních (vizualizace výsledků) souborů programu LS-DYNA. Pro částečný, v některých případech

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

také úplný, pre-processing vstupních souborů programu LS-DYNA, tedy například pro tvorbu geometrického modelu, vytvoření sítě konečných prvků nebo stanovení okrajových podmínek, lze použít také jiné komerční programy, jakými jsou například Abaqus, CAE, ANSYS/LS-DYNA, Hypermesh aj. Nejvhodnějším programem pro pre-processing vstupních souborů programu LS-DYNA nicméně zůstává program LS-PrePost, jelikož je produkován stejnou firmou jako program LS-DYNA a je tedy vyvíjen na míru tomuto programu. Je možné jej nalézt také jako součást jiných komerčních programů, např. jako součást programu ANSYS.

Program LS-PrePost nabízí pro pre-processing vstupních a post-processing výstupních souborů programu LS-DYNA řadu funkcí, kterými mohou být například:

Pre-processing

- funkce pro:
- vytvoření geometrického modelu,
 - vytvoření sítě konečných prvků,
 - vizualizaci výpočtového modelu,
 - editaci výpočtového modelu,
 - speciální aplikace (např. tváření kovů, návrh airbagů),

Post-processing

- funkce pro:
- 3D animaci výstupního souboru D3PLOT,
 - nastavení vlastního módu animace,
 - vykreslení výsledků v časové závislosti do grafu,
 - vykreslení ASCII výsledků do grafu,
 - nastavení legendy výsledků,
 - vizualizaci proudění tekutin.

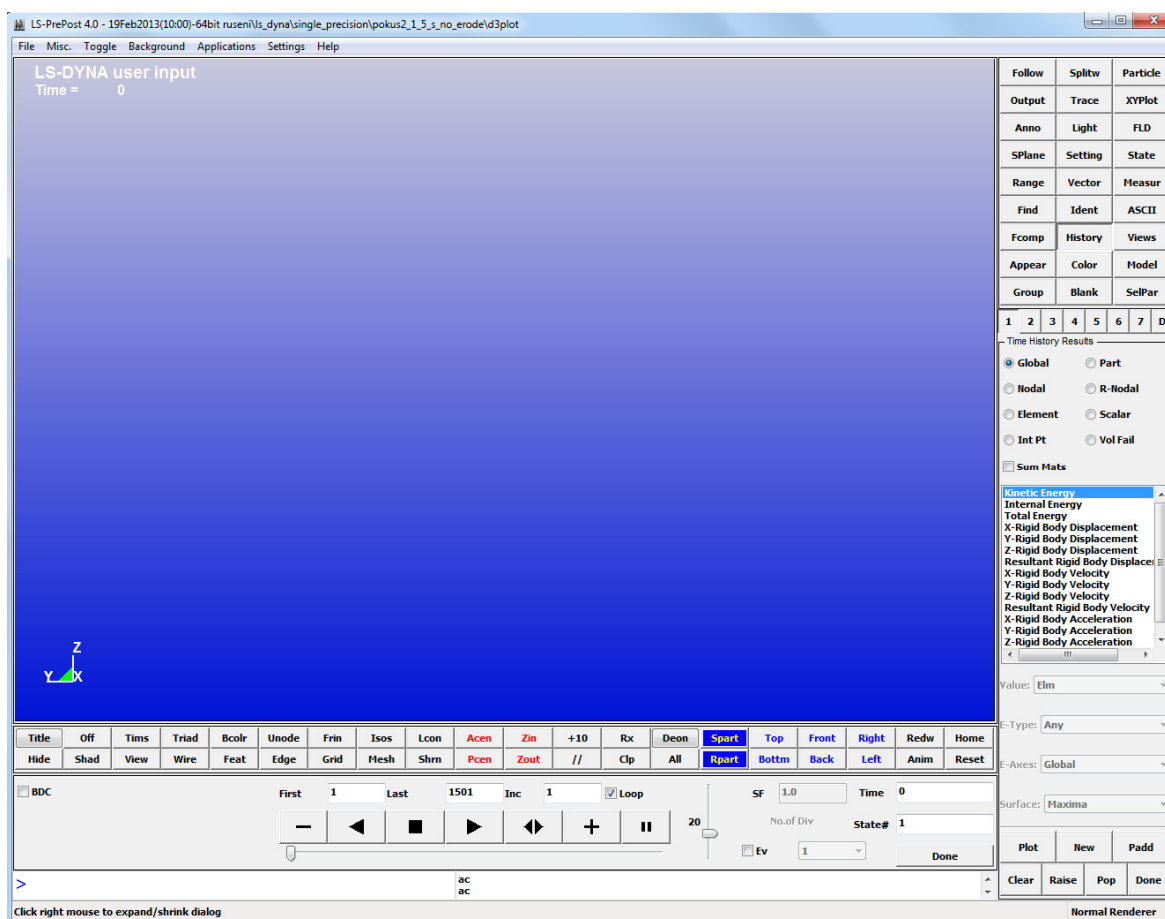
Nicméně pro zvládnutí ovládání programu musí uživatel opravdu důkladně prostudovat dostupné podklady, které v tomhle případě sestávají hlavně z návodů poskytovaných výrobcem, přičemž výhodou je, že pro začínající uživatele výrobce volně poskytuje ukázky základních úloh, příspěvky z konferencí a tipy, jak program ovládat. Nezbytnou součástí pro zvládnutí programu jsou také teoretické znalosti uživatele. Uživatelské rozhraní programu je navrženo tak, aby bylo efektivní a intuitivní (obr. 4. 2. 1).

Vstupní soubor programu LS-DYNA vytvořený v programu LS-PrePost má příponu *.k a k jeho editaci nebo ladění před výpočtem je možné použít nejen program LS-PrePost, ale také běžný textový editor, ve kterém je možné vstupní soubor upravovat prostřednictvím změn parametrů funkčních karet, kdy každá karta má svůj vlastní formát, náležitých klíčovým slovům (KEYWORDS, označené vždy hvězdičkou *), jež představují

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

vlastnosti výpočtového modelu ovlivňující jeho chování. V programu LS-PrePost je vstupní soubor upravován také prostřednictvím změn parametrů funkčních karet, které jsou zde ovšem zobrazeny v grafickém prostředí. Příklad vzhledu funkční karty, jak jej uvádí manuál [5], je na obr. 4. 2. 2, v grafickém prostředí programu LS-PrePost v. 4.0 na obr. 4. 2. 3, v textovém editoru PSPad na obr. 4. 2. 4. Editace vstupního souboru v textovém editoru se může uživateli z počátku zdát nezvyklá a neobratná, z praktického hlediska je však mnohem pohodlnější a rychlejší než v programu LS-PrePost. Zvolený způsob editace vstupního souboru nicméně záleží na vkusu a schopnostech každého uživatele.

Informace uvedené v této podkapitole byly čerpány ze zdrojů [2], [3] a [4].



Obr. 4. 2. 1 Uživatelské rozhraní programu LS-PrePost v. 4.0

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|---|
| Card 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | MID | RO | E | PR | DA | DB | K | |
| Type | A8 | F | F | F | F | F | F | |
| Default | none | none | none | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |

Obr. 4. 2. 2 Příklad vzhledu funkční karty, jak jej uvádí manuál [5]

*MAT_ELASTIC_FLUID_(TITLE) (001_FLUID) (0)

TITLE

| | | | | | | | |
|----------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 1 | <u>MID</u> | <u>RO</u> | <u>E</u> | <u>PR</u> | <u>DA</u> | <u>DB</u> | <u>K</u> |
| | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Obr. 4. 2. 3 Příklad vzhledu funkční karty v grafickém prostředí programu LS-PrePost v. 4.0

```
*MAT_ELASTIC_FLUID
$#      mid      ro      e      pr      da      db      k
                0.000    0.000    0.000    0.000
```

Obr. 4. 2. 4 Příklad vzhledu funkční karty v textovém editoru PSPad

Kapitola 5

Nelineární materiálové modely betonu v programu LS-DYNA

Tato kapitola je zaměřena na popis parametrů nelineárních materiálových modelů betonu implementovaných ve výpočetním systému LS-DYNA, které byly v rámci této práce aplikovány na výpočtové modely úloh popsanych v kapitole 3 za účelem provedení nelineárních testovacích výpočtů ve výpočetním systému LS-DYNA, a také na popis parametrů nelineárních materiálových modelů betonu implementovaných ve výpočetním systému LS-DYNA, které v rámci této práce aplikovány nebyly.

Následující podkapitoly budou obsahovat informace o tom, které nelineární materiálové modely betonu byly použity pro výpočty a které pro výpočty použity nebyly, přičemž v tomhle případě bude vysvětlen důvod, proč nebyly tyto modely betonu použity. Dále bude obsažen popis parametrů všech implementovaných nelineárních materiálových modelů betonu včetně uvedení dosazených číselných hodnot těchto parametrů u těch modelů betonu, které byly použity pro výpočty.

5.1 Vymezení použití nelineárních materiálových modelů betonu pro výpočty

Ve výpočetním systému LS-DYNA je implementováno celkem devět typů nelineárních materiálových modelů betonu. Jsou to *MAT_CONCRETE_EC2 (typ 172), *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (typ 111), *MAT_CSCM (typ 159), *MAT_WINFRITH_CONCRETE (typ 84 a 85), *MAT_CONCRETE_DAMAGE (typ 72), *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (typ 72R3), *MAT_SOIL_CONCRETE (typ 78), *MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL (typ 273) a *MAT_CONCRETE_BEAM (typ 195). Z uvedených názvů nelineárních materiálových modelů betonu je vidět, že název materiálového modelu je definován v programu LS-DYNA klíčovým slovem, které přiřazuje materiálovému modelu příslušné funkční karty obsahující příslušné parametry. Tyto karty, které jsou společně s názvem materiálového modelu (klíčovým slovem) součástí vstupního souboru programu LS-DYNA, je možné editovat v programu LS-PrePost nebo v textovém editoru.

V rámci této práce byly pro výpočty použity následující nelineární materiálové modely betonu:

- *MAT_CSCM
- *MAT_WINFRITH_CONCRETE
- *MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL
- *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3
- *MAT_CONCRETE_DAMAGE
- *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE
- *MAT_CONCRETE_EC2

Nebyly tedy použity modely *MAT_SOIL_CONCRETE a *MAT_CONCRETE_BEAM. Důvodem, proč tyto nelineární modely betonu nebyly pro výpočty použity, je skutečnost, že obsahují ve svých funkčních kartách některé parametry, pro které nebyly k dispozici potřebné podklady, aby je bylo možné zadat, a bez zadání těchto parametrů nebylo možné dosáhnout rozumných výsledků. V podkapitolách 5. 3. 1 a 5. 3. 2 bude na tyto parametry upozorněno.

5.2 Popis a zadání parametrů nelineárních materiálových modelů betonu použitých pro výpočty

Tato podkapitola je zaměřena na popis parametrů nelineárních materiálových modelů betonu použitých pro výpočty a uvedení jejich zadání (dosazení) pro účely této práce. Společně s popisem parametrů a jejich zadáním budou v následujících podkapitolách uvedeny také základní informace o použitých nelineárních modelech betonu, přičemž každému nelineárnímu modelu betonu bude věnována jedna podkapitola.

5. 2. 1***MAT_CSCM**

Jedná se o materiálový model, který je v programu LS-DYNA implementován jako typ 159. Tento nelineární materiálový model je definován jako model založený na podmínce plasticity, kterou lze v meridiální rovině znázornit jako plochu vymezenou (ohraničenou) hladkou křivkou (obr. 5. 2. 1) a kterou lze realisticky popsat pevnost materiálu v tlaku, tahu i smyku. Podmínka plasticity se skládá ze dvou částí a to z podmínky smykového porušení a podmínky zpevnění (v meridiální rovině jsou části znázorněny jako smyková plocha a plocha zpevnění). Funkce podmínky zpevnění se může stahovat nebo rozpínat, přičemž tato skutečnost závisí na uživatelském nastavení, které je realizováno prostřednictvím parametru ITRETRC, viz *MAT_CSCM_CONCRETE → popis parametrů funkčních karet. Prostorové znázornění podmínky plasticity je na obr. 5. 2. 2. Materiálový model je k dispozici pouze pro konečné prvky typu SOLID a jeho vlastnosti jsou následující:

→ umožňuje zohlednit změnu mechanicko fyzikálních vlastností materiálu v závislosti na rychlosti deformace (rate effects),

→ je založený, jak již bylo zmíněno, na podmínce plasticity (yield criterion), jejíž matematické vyjádření je následující [5]:

$$f(J_1, J_2', J_3', \kappa) = J_2' - \mathfrak{R}^2 F_f^2 F_c$$

$$\begin{aligned} \text{kde} \quad J_1 &= 3P & F_f(J_1) &= \alpha - \lambda \exp^{-\beta J_1} + \theta J_1 \\ J_2' &= \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} & F_c(J_1, \kappa) &= 1 - \frac{[J_1 - L(\kappa)][|J_1 - L(\kappa)| + J_1 - L(\kappa)]}{2 [X(\kappa) - L(\kappa)]^2} \\ J_3' &= \frac{1}{3} S_{ij} S_{jk} S_{ki} & L(\kappa) &= \begin{cases} \kappa & \text{if } \kappa > \kappa_0 \\ \kappa_0 & \text{otherwise} \end{cases} \\ & & X(\kappa) &= L(\kappa) + R F_f [L(\kappa)] \end{aligned}$$

$f(J_1, J_2', J_3', \kappa)$ funkce podmínky plasticity,

$F_f(J_1)$ funkce podmínky smykového porušení,

$F_c(J_1, \kappa)$ funkce podmínky zpevnění,

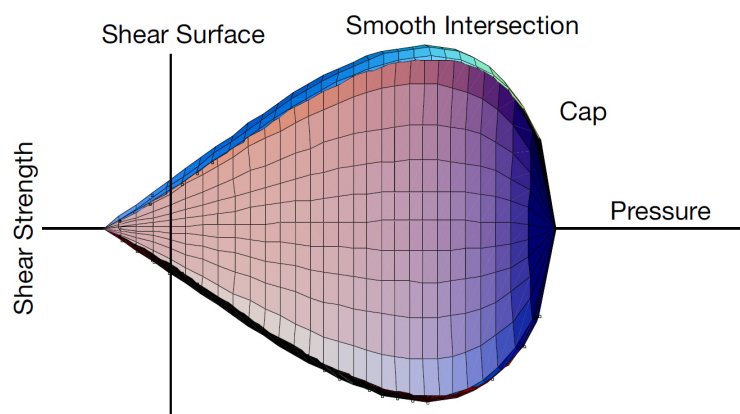
J_1 první invariant tenzoru napětí,

J_2' druhý invariant deviatorické části tenzoru napětí (platí Einsteinovo sumační pravidlo),

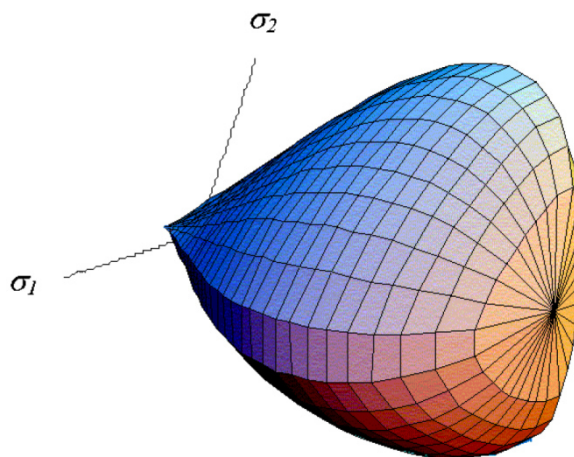
J_3' třetí invariant deviatorické části tenzoru napětí (platí Einsteinovo sumační pravidlo),

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

- \mathfrak{R} funkce měřítka dle Rubina,
 $\alpha, \beta, \lambda, \theta$ parametry získané z experimentálních testů trojosé komprese na betonových válcích,
 κ parametr zpevnění,
 R koeficient eliptičnosti funkce podmínky zpevnění,
→ umožňuje modelovat porušení materiálu (damage effects),
→ umožňuje modelovat rozdílné mechanicko fyzikální vlastnosti materiálu v tlaku a v tahu,
→ při jeho použití je možné provádět výpočty s dvojitou i jednoduchou přesností, obě varianty poskytují stabilní řešení.



Obr. 5. 2. 1 Podmínka plasticity znázorněná v meridiální rovině [5], *MAT_CSCM



Obr. 5. 2. 2 Podmínka plasticity znázorněná v prostoru [6], *MAT_CSCM

Při použití materiálového modelu *MAT_CSCM může uživatel modelovat buď vlastní silikátový materiál (např. beton) s uživatelsky definovanými vlastnostmi, nebo

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

může modelovat beton se standardní pevností v tlaku mezi 28 MPa až 58 MPa (v intervalovém vyjádření (28; 58) MPa) s výchozími vlastnostmi implementovanými v materiálovém modelu, které závisí na jednoosé pevnosti betonu v tlaku. V případě, že chce uživatel modelovat vlastní silikátový materiál, musí název materiálového modelu zadat ve vstupním souboru programu LS-DYNA klíčovým slovem *MAT_CSCM. V případě, že chce modelovat beton, může název modelu zadat jako *MAT_CSCM, přičemž dále musí uživatelsky definovat vlastnosti betonu, nebo může název modelu zadat jako *MAT_CSCM_CONCRETE a využít tak výchozích vlastností betonu implementovaných v materiálovém modelu, které závisí na jednoosé pevnosti betonu v tlaku, přičemž tato pevnost musí být mezi 28 MPa až 58 MPa. Zadané klíčové slovo je rozhodující z hlediska přiřazení funkčních karet materiálovému modelu, které obsahují příslušné parametry, jež musí uživatel zadat pro správnou funkci nelineárního modelu. Zadat klíčové slovo a parametry příslušných funkčních karet může uživatel buď v programu LS-PrePost nebo v textovém editoru. Vzhledem k tomu, že v rámci této práce byl materiálový model *MAT_CSCM použit pro modelování betonu s pevností v tlaku 43 MPa, přičemž bylo využito výchozích implementovaných vlastností betonu, jsou v této podkapitole uvedeny pouze funkční karty a popsány pouze parametry náležící klíčovému slovu *MAT_CSCM_CONCRETE. Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_CSCM_CONCRETE, jak je uvádí manuál [5], jsou znázorněny na obr. 5. 2. 3.

| | | | | | | | | |
|----------|-----|----|-------|------|-------|-------|-------|---------|
| Card 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | MID | RO | NPLOT | INCR | IRATE | ERODE | RECOV | ITRETRC |
| Type | A8 | F | I | F | I | F | F | I |

| | | | | | | | | |
|----------|------|---|---|---|---|---|---|---|
| Card 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | PRED | | | | | | | |
| Type | F | | | | | | | |

Card 3 for CONCRETE keyword option.

| | | | | | | | | |
|----------|-----|------|-------|---|---|---|---|---|
| Card 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | FPC | DAGG | UNITS | | | | | |
| Type | F | F | I | | | | | |

Obr. 5. 2. 3 Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_CSCM_CONCRETE [5]

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

***MAT_CSCM_CONCRETE → popis parametrů funkčních karet [5]**

Použité jednotky: MPa, mm, s, Mg/mm³, N

| Parametr | Popis |
|-----------------|---|
| MID | <p>Identifikační číslo materiálového modelu. Unikátní číslo, které může obsahovat maximálně 8 číslic a které musí být zadáno z důvodů propojení materiálového modelu s příslušným partem (*PART).</p> <p>Dosazení: MID = 1</p> |
| RO | <p>Objemová hmotnost betonu (hustota). → nutné zadat</p> <p>Dosazení: RO = 2,4E-9 Mg/mm³ (prostý beton)</p> |
| NPLOT | <p>Tento parametr určuje, co se zapíše jako komponenta 7 do výstupního souboru D3PLOT. V programu LS-PrePost lze tuto komponentu zobrazit graficky v závislosti na čase v záložce 1, sekci History, ve výsledcích pro konečný prvek (Element) při zobrazení efektivní plastické deformace (Effective Plastic Strain) → místo závislosti efektivní plastické deformace na čase se zobrazí závislost komponenty 7 na čase.</p> <p>Pro zapsání do komponenty 7 je na výběr celkem sedm možností:</p> <p>1: Maximum z hodnot křehkého a tvárného porušení (výchozí nastavení), $d = \max(d_k; d_t)$, $d \in \langle 0; 1 \rangle$.</p> <p>2: Maximum z hodnot křehkého a tvárného porušení s upřednostňováním hodnoty křehkého porušení.</p> <p>3: Hodnota křehkého porušení, $d = d_k \in \langle 0; 1 \rangle$.</p> <p>4: Hodnota tvárného porušení, $d = d_t \in \langle 0; 1 \rangle$.</p> <p>5: κ → parametr zpevnění, průsečík (intersection) smykové části podmínky plasticity (shear surface) s částí zpevnění (cap) podmínky plasticity (obr. 5. 2. 1).</p> <p>6: X0 → průsečík (intersection) části zpevnění (cap) podmínky plasticity s vodorovnou osou, která udává tlak (pressure axis) (obr. 5. 2. 1).</p> <p>7: ϵ_v^p → hodnota plastické objemové deformace (plastic volume strain).</p> <p>Dosazení: NPLOT = 3</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|-------|--|
| INCRE | <p>Maximální přírůstek poměrné deformace při subinkrementaci poměrné deformace. Tento parametr může být zadán buď uživatelsky požadovanou hodnotou přírůstku deformace, nebo hodnotou 0, nebo tento parametr může zůstat nevyplněn. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota max. přírůstku deformace INCRE stanovena automaticky v průběhu inicializace na základě smykové pevnosti betonu a tuhosti.</p> <p>Dosazení: INCRE = 0</p> |
| IRATE | <p>Parametr určuje, zda-li rychlost deformace ovlivňuje mechanicko fyzikální vlastnosti betonu.</p> <p>Na výběr jsou dvě možnosti:</p> <p>0: Rychlost deformace neovlivňuje mechanicko fyzikální vlastnosti betonu → kvazi-statika (výchozí nastavení).</p> <p>1: Rychlost deformace ovlivňuje mechanicko fyzikální vlastnosti betonu.</p> <p>Dosazení: IRATE = 0 (při kvazi-statickém zatěžování); 1 (při vyšších rychlostech zatěžování)</p> |
| ERODE | <p>Parametr umožňuje modelovat porušení betonu prostřednictvím vypadávání porušených konečných prvků z výpočtu. Pokud je ERODE < 1, prvky z výpočtu nevypadávají. Pokud je ERODE > 1, prvky z výpočtu vypadávají ve chvíli, kdy je porušení prvků $d > 0,99$ a zároveň maximální hlavní poměrná deformace na prvcích překročí hodnotu ERODE-1. Pokud je ERODE = 1, prvky z výpočtu vypadávají ve chvíli, kdy je porušení prvků $d > 0,99$ bez závislosti na maximální hlavní poměrné deformaci na prvcích. → nutné zadat</p> <p>Dosazení: ERODE = 0 (při výpočtech bez efektu porušení betonu); 1 (při výpočtech s efektem porušení betonu)</p> |
| RECOV | <p>Parametr určuje degradaci modulu pružnosti v tlaku a jeho význam se projevuje při cyklickém zatěžování (při odtížení a opětovném zatížení).</p> <p>Jsou dvě možnosti, jak lze tento parametr zadat:</p> <p>1) RECOV \in (0; 1). Pokud je RECOV = 0 (výchozí nastavení), modul pružnosti v tlaku nedegraduje (je obnovován). Pokud je RECOV \in (0; 1), modul pružnosti v tlaku degraduje částečně (částečně je obnovován). Pokud je RECOV = 1, modul pružnosti v tlaku degraduje v závislosti na</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|---------|--|
| RECOV | <p>křehkém porušení. Obnova modulu pružnosti závisí pouze na znaménku invariantu napětí. Hodnotu $RECOV \in (0; 1)$ nelze zadat v programu LS-PrePost, lze ji zadat pouze v textovém editoru.</p> <p>2) $RECOV \in \langle 10; 11 \rangle$. V tomhle případě $RECOV = RECOV - 10$. Pokud je $RECOV = 10$, modul pružnosti v tlaku nedegraduje (je obnovován). Pokud je $RECOV \in (10; 11)$, modul pružnosti v tlaku degraduje částečně (částečně je obnovován). Pokud je $RECOV = 11$, modul pružnosti v tlaku degraduje v závislosti na křehkém porušení. Obnova modulu pružnosti závisí na znaménku napětí a objemové deformace. Tuto možnost nelze zadat v programu LS-PrePost, lze ji zadat pouze v textovém editoru.</p> <p>Dosazení: $RECOV = 1$ (při všech výpočtech); 0 (při cyklickém zatěžování)</p> |
| ITRETRC | <p>Parametr určuje, zda-li se funkce podmínky zpevnění stahuje.</p> <p>Na výběr jsou dvě možnosti:</p> <p>0: Funkce podmínky zpevnění se nestahuje (výchozí nastavení).</p> <p>1: Funkce podmínky zpevnění se stahuje.</p> <p>Dosazení: $ITRETRC = 0$</p> |
| PRED | <p>Tímto parametrem lze definovat počáteční úroveň (hodnotu) porušení d. Hodnota parametru se zadává z intervalu $0 \leq PRED = d < 1$. Tento parametr může být zadán buď uživatelsky požadovanou počáteční hodnotou porušení z intervalu $(0; 1)$, nebo hodnotou 0 (žádné počáteční porušení), nebo tento parametr může zůstat nevyplněn. V případě nevyplnění parametru je počáteční hodnota porušení nastavena automaticky na $PRED = 0$.</p> <p>Dosazení: $PRED = 0$</p> |
| FPC | <p>Pevnost betonu v jednoosém tlaku f_c. Hodnota parametru se musí pohybovat mezi 28 MPa až 58 MPa \rightarrow beton se standardní pevností v tlaku. Na základě tohoto parametru jsou určovány (počítány) další vlastnosti betonu implementované v materiálovém modelu. V případě zadání hodnoty 0 nebo nevyplnění tohoto parametru je hodnota pevnosti betonu v jednoosém tlaku automaticky nastavena na $FPC = 30$ MPa.</p> <p>Dosazení: $FPC = f_c = f_{cm} = 43$ MPa (beton C 35/45)</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|-------|--|
| DAGG | <p>Maximální velikost kameniva v betonu. V případě zadání hodnoty 0 nebo nevyplnění tohoto parametru je hodnota maximální velikosti kameniva v betonu automaticky nastavena na DAGG = 19 mm.</p> <p>Dosazení: DAGG = 16 mm</p> |
| UNITS | <p>Volba používaných jednotek.</p> <p>Na výběr jsou čtyři možnosti:</p> <p>0: GPa, mm, ms, kg/mm³, kN (výchozí nastavení).</p> <p>1: MPa, mm, ms, g/mm³, N.</p> <p>2: MPa, mm, s, Mg/mm³, N.</p> <p>3: Psi, inch, s, lbf-s²/inch⁴, lbf.</p> <p>4: Pa, m, s, kg/m³, N.</p> <p>Dosazení: UNITS = 2</p> |

Podrobnější informace o materiálovém modelu *MAT_CSCM, především z hlediska teorie modelu, lze nalézt například v literatuře [5] a [6]. Různá zadání parametrů náležících klíčovému slovu (názevu modelu) *MAT_CSCM_CONCRETE ve vstupních souborech programu LS-DYNA neboli různá nastavení materiálového modelu pro účely této práce jsou na obr. 5. 2. 4, 5. 2. 5, 5. 2. 6 a 5. 2. 7.

```

*MAT_CSCM_CONCRETE
$#      mid      ro      nplot      incre      irate      erode      recov      itretc
      1 2.4000E-9      3      0.000      0      0.000 1.000000      0
$#      pred
      0.000
$#      fpc      dagg      units
43.000000 16.000000      2
    
```

Obr. 5. 2. 4 *MAT_CSCM_CONCRETE → parametry materiálového modelu při kvazi-staticém a cyklickém zatěžování (soubor *.k, PSPad)

```

*MAT_CSCM_CONCRETE
$#      mid      ro      nplot      incre      irate      erode      recov      itretc
      1 2.4000E-9      3      0.000      1      0.000 1.000000      0
$#      pred
      0.000
$#      fpc      dagg      units
43.000000 16.000000      2
    
```

Obr. 5. 2. 5 *MAT_CSCM_CONCRETE → parametry materiálového modelu při vyšších rychlostech zatěžování (soubor *.k, PSPad)

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

```
*MAT_CSCM_CONCRETE
$#   mid      ro      nplot   incre   irate   erode   recov   itretrc
      1 2.4000E-9      3     0.000     1     1.000  1.000000      0
$#   pred
      0.000
$#   fpc      dagg     units
      43.000000 16.000000      2
```

Obr. 5. 2. 6 *MAT_CSCM_CONCRETE → parametry materiálového modelu při výpočtech s efektem porušení betonu (soubor *.k, PSPad)

```
*MAT_CSCM_CONCRETE
$#   mid      ro      nplot   incre   irate   erode   recov   itretrc
      1 2.4000E-9      3     0.000     0     0.000  0.000000      0
$#   pred
      0.000
$#   fpc      dagg     units
      43.000000 16.000000      2
```

Obr. 5. 2. 7 *MAT_CSCM_CONCRETE → parametry materiálového modelu při cyklickém zatěžování (soubor *.k, PSPad)

Informace uvedené v této podkapitole byly čerpány ze zdrojů [5] a [6].

5. 2. 2***MAT_WINFRITH_CONCRETE**

Jedná se o materiálový model, který je v programu LS-DYNA implementován jako typ 84 a zároveň jako typ 85, přičemž pouze typ 84 umožňuje zohlednit vliv rychlosti deformace. Typ modelu *MAT_WINFRITH_CONCRETE volí uživatel prostřednictvím parametru RATE, viz *MAT_WINFRITH_CONCRETE → popis parametrů funkčních karet. Tento nelineární materiálový model je určen k modelování prostého a vyztuženého betonu. Model je definován jako model rozetřených trhlin a rozetřené výztuže a je k dispozici pouze pro 8-uzlové konečné prvky typu SOLID s jedním integračním bodem (nastavení ELFORM = 1 v *SECTION_SOLID). Byl vyvinut pány Broadhousem a Neilsonem v roce 1987. Vlastnosti materiálového modelu jsou následující:

→ umožňuje zohlednit změnu mechanicko fyzikálních vlastností betonu v závislosti na rychlosti deformace (rate effects) → pouze typ 84,

→ je založen na Ottosenově podmínce plasticity (yield criterion), jejíž matematické vyjádření je následující [7]:

$$F(I_1, J_2, \cos 3\theta) = a \frac{J_2}{(f'_c)^2} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f'_c} + b \frac{I_1}{f'_c} - 1$$

kde $J_2 = 0.5 S_{ij} S_{ij} = \frac{1}{3} I_1^2 - I_2$

$$I_1 = \sigma_{kk} = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$$

$$I_2 = 0.5 (\sigma_{ii} \sigma_{jj} - \sigma_{ij} \sigma_{ji})$$

$$= \sigma_{11} \sigma_{22} + \sigma_{22} \sigma_{33} + \sigma_{33} \sigma_{11} - \sigma_{12}^2 - \sigma_{23}^2 - \sigma_{31}^2$$

$F(I_1, J_2, \cos 3\theta)$ funkce Ottosenovy podmínky plasticity,

a, b konstanty, které závisí na poměru f'_c/f'_t ,

λ funkce, která závisí na $\cos 3\theta \rightarrow \lambda = \lambda(\cos 3\theta)$,

$\cos 3\theta$ závisí na druhém a třetím invariantu deviatorické části tenzoru napětí,

I_1 první invariant tenzoru napětí (platí Einsteinovo sumační pravidlo),

I_2 druhý invariant tenzoru napětí (platí Einsteinovo sumační pravidlo),

J_2 druhý invariant deviatorické části tenzoru napětí (platí Einsteinovo sumační pravidlo),

f'_c pevnost betonu v jednoosém tlaku,

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

- je určen pro modelování betonu, tudíž umožňuje modelovat rozdílné mechanicko fyzikální vlastnosti materiálu v tlaku a v tahu,
- umožňuje modelovat vyztužení betonu,
- při jeho použití je doporučeno provádět výpočty s dvojitou přesností, jelikož jednoduchá přesnost může poskytovat nestabilní řešení.

Při použití materiálového modelu *MAT_WINFRITH_CONCRETE může uživatel modelovat buď prostý beton, nebo vyztužený beton. V případě, že chce uživatel modelovat prostý beton, stačí, když název materiálového modelu zadá ve vstupním souboru programu LS-DYNA klíčovým slovem *MAT_WINFRITH_CONCRETE. V případě, že chce modelovat vyztužený beton, musí název modelu zadat jako *MAT_WINFRITH_CONCRETE_REINFORCEMENT (typ 84), čímž je materiálový model obohacen oproti *MAT_WINFRITH_CONCRETE o parametry pro modelování vyztužení betonu. Zadané klíčové slovo je rozhodující z hlediska přiřazení funkčních karet materiálovému modelu, které obsahují příslušné parametry, jež musí uživatel zadat pro správnou funkci nelineárního modelu, a které v tomhle případě určí, zda-li bude modelován prostý, nebo vyztužený beton. Zadat klíčové slovo a parametry příslušných funkčních karet může uživatel buď v programu LS-PrePost nebo v textovém editoru. Vzhledem k tomu, že v rámci této práce byl materiálový model *MAT_WINFRITH_CONCRETE použit pro modelování prostého betonu, jsou v této podkapitole uvedeny pouze funkční karty a popsány pouze parametry náležící klíčovému slovu *MAT_WINFRITH_CONCRETE. Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_WINFRITH_CONCRETE, jak je uvádí manuál [5], jsou znázorněny na obr. 5. 2. 8 a 5. 2. 9.

| | | | | | | | | |
|----------|-----|----|----|----|-----|-----|----|-------|
| Card 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | MID | RO | TM | PR | UCS | UTS | FE | ASIZE |
| Type | A8 | F | F | F | F | F | F | F |

| | | | | | | | | |
|----------|---|----|----|--------|------|------|------|------|
| Card 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | E | YS | EH | UELONG | RATE | CONM | CONL | CONT |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | F |

Obr. 5. 2. 8 Funkční karty 1 a 2 pro klíčové slovo *MAT_WINFRITH_CONCRETE [5]

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Card 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | EPS1 | EPS2 | EPS3 | EPS4 | EPS5 | EPS6 | EPS7 | EPS8 |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | F |

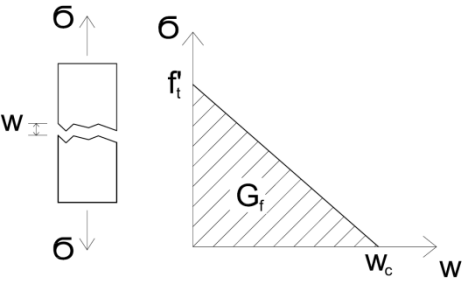
| | | | | | | | | |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Card 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | F |

Obr. 5. 2. 9 Funkční karty 3 a 4 pro klíčové slovo *MAT_WINFRITH_CONCRETE [5]

*MAT_WINFRITH_CONCRETE → popis parametrů funkčních karet [5]

Použité jednotky: MPa, mm, s, Mg/mm³, N

| Parametr | Popis |
|----------|---|
| MID | Identifikační číslo materiálového modelu. Unikátní číslo, které může obsahovat maximálně 8 číslic a které musí být zadáno z důvodů propojení materiálového modelu s příslušným partem (*PART). Dosazení: MID = 1 |
| RO | Objemová hmotnost betonu (hustota). → nutné zadat Dosazení: RO = 2,4E-9 Mg/mm ³ (prostý beton) |
| TM | Počáteční tangentský modul pružnosti betonu. → nutné zadat Dosazení: TM = E _s = 1,05.E _{cm} = 1,05.33500 = 35175 MPa (C 35/45) |
| PR | Součinitel příčné kontrakce (Poissonovo číslo) betonu. → nutné zadat Dosazení: PR = ν = 0,2 |
| UCS | Pevnost betonu v jednoosém tlaku. → nutné zadat Dosazení: UCS = f' _c = f _{cm} = 43 MPa (beton C 35/45) |
| UTS | Pevnost betonu v jednoosém tahu. → nutné zadat Dosazení: UTS = f' _t = f _{ctm} = 3,2 MPa (beton C 35/45) |
| FE | Tento parametr závisí na parametru RATE a musí být zadán. Jsou dvě možnosti, jak lze tento parametr zadat: 1) Pokud je RATE = 0 → zadá se lomová energie betonu G _f . 2) Pokud je RATE = 1 → zadá se šířka trhliny w _c , při které tahové napětí |

| | |
|-------|--|
| FE | <p>v betonu nabude nulové hodnoty (obr. 5. 2. 10).</p>  <p>Obr. 5. 2. 10 Závislost tahového napětí v betonu na otevření trhliny</p> <p>Dosazení: FE = $G_f = 0,081556 \text{ N/mm}$ (při RATE = 0); FE = $w_c = 0,131 \text{ mm}$ (při RATE = 1) [7]</p> |
| ASIZE | <p>Velikost kameniva v betonu (poloměr). → nutné zadat</p> <p>Dosazení: ASIZE = 8 mm</p> |
| E | <p>Youngův modul pružnosti výztuže. Tento parametr má význam pouze pro klíčové slovo *MAT_WINFRITH_CONCRETE_REINFORCEMENT, kdy je nutné parametr zadat uživatelsky požadovanou hodnotou. Pro klíčové slovo *MAT_WINFRITH_CONCRETE nemá tento parametr význam a v takovém případě je tedy možné jej zanechat nevyplněný, nebo je možné zadat hodnotu 0.</p> <p>Dosazení: E = 0 MPa</p> |
| YS | <p>Mez kluzu výztuže. Tento parametr má význam pouze pro klíčové slovo *MAT_WINFRITH_CONCRETE_REINFORCEMENT, kdy je nutné parametr zadat uživatelsky požadovanou hodnotou. Pro klíčové slovo *MAT_WINFRITH_CONCRETE nemá tento parametr význam a v takovém případě je tedy možné jej zanechat nevyplněný, nebo je možné zadat hodnotu 0.</p> <p>Dosazení: YS = 0 MPa</p> |
| EH | <p>Modul zpevnění výztuže. Tento parametr má význam pouze pro klíčové slovo *MAT_WINFRITH_CONCRETE_REINFORCEMENT, kdy je nutné parametr zadat uživatelsky požadovanou hodnotou. Pro klíčové slovo *MAT_WINFRITH_CONCRETE nemá tento parametr význam a v takovém případě je tedy možné jej zanechat nevyplněný, nebo je možné zadat hodnotu 0.</p> <p>Dosazení: EH = 0 MPa</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|--------|--|
| UELONG | <p>Mezní poměrné přetvoření výztuže. Tento parametr má význam pouze pro klíč. slovo *MAT_WINFRITH_CONCRETE_REINFORCEMENT, kdy je nutné parametr zadat uživatelsky požadovanou hodnotou. Pro klíčové slovo *MAT_WINFRITH_CONCRETE nemá tento parametr význam a v takovém případě je tedy možné jej zanechat nevyplněný, nebo je možné zadat hodnotu 0.</p> <p>Dosazení: UELONG = 0</p> |
| RATE | <p>Parametr určuje, zda-li rychlost deformace ovlivňuje mechanicko fyzikální vlastnosti betonu.</p> <p>Na výběr jsou dvě možnosti:</p> <p>0: Rychlost deformace ovlivňuje mechanicko fyzikální vlastnosti betonu (výchozí nastavení). → typ 84</p> <p>1: Rychlost deformace neovlivňuje mechanicko fyzikální vlastnosti betonu (kvazi-statika). → typ 85</p> <p>Dosazení: RATE = 1 (při kvazi-statickém zatěžování); 0 (při vyšších rychlostech zatěžování)</p> |
| CONM | <p>Tento parametr slouží pro převod jednotek a musí být zadán.</p> <p>Jsou dvě možnosti, jak lze tento parametr zadat:</p> <p>1) Je možné vybrat používané jednotky, které se automaticky převedou:</p> <ul style="list-style-type: none"> -1: hmotnost, délka, čas → lbf . s²/in, inch, s. -2: hmotnost, délka, čas → g, cm, μs. -3: hmotnost, délka, čas → g, mm, ms. -4: hmotnost, délka, čas → Mg, mm, s. -5: hmotnost, délka, čas → kg, mm, ms. <p>2) V případě, že ve výběru používaných jednotek (bod 1)) není kombinace jednotek používaná uživatelem, se zde zadá převodní faktor pro převod jednotky hmotnosti používané uživatelem na kilogramy.</p> <p>Dosazení: CONM = -4</p> |
| CONL | <p>Parametr slouží pro převod jednotky délky používané uživatelem na metry. V případě, že je CONM = převodní faktor pro převod jednotky hmotnosti používané uživatelem na kilogramy, je zde nutné zadat</p> |

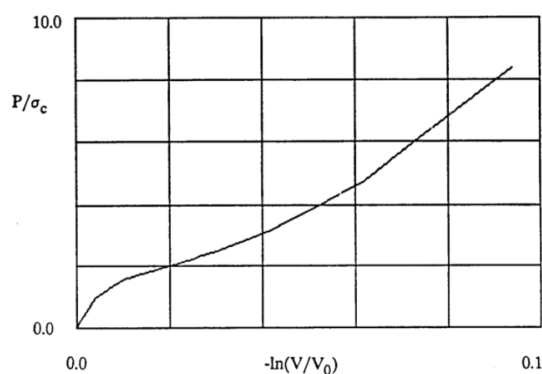
VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|---|---|
| CONL | <p>převodní faktor pro převod jednotky délky používané uživatelem na metry. V případě, že je CONM = -1 - -5, je tento parametr ignorován a je tedy možné jej nevyplňovat, nebo je možné zde zadat hodnotu 0.</p> <p>Dosazení: CONL = 0</p> |
| CONT | <p>Parametr slouží pro převod jednotky času používané uživatelem na sekundy. V případě, že je CONM = převodní faktor pro převod jednotky hmotnosti používané uživatelem na kilogramy, je zde nutné zadat převodní faktor pro převod jednotky času používané uživatelem na sekundy. V případě, že je CONM = -1 - -5, je tento parametr ignorován a je tedy možné jej nevyplňovat, nebo je možné zde zadat hodnotu 0.</p> <p>Dosazení: CONT = 0</p> |
| EPS1, EPS2, EPS3, EPS4, EPS5, EPS6, EPS7, EPS8 | <p>Parametry udávající hodnoty objemové deformace, která je dána ve formě přirozeného logaritmu relativního objemu ($\ln(V/V_0)$) a je záporná v tlaku. Tyto parametry mohou být zadány buď uživatelsky požadovanými hodnotami objemové deformace, nebo hodnotami 0, nebo mohou tyto parametry zůstat nevyplněny. V případě hodnot 0 nebo nevyplnění parametrů jsou pro tyto parametry automaticky použity výchozí hodnoty objemové deformace implementované v materiálovém modelu (Volumetric Strain na obr. 5. 2. 11). Výchozí hodnoty objemové deformace společně s výchozími hodnotami tlaku tvoří výchozí křivku pro beton implementovanou v materiálovém modelu, která slouží pro určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu (obr. 5. 2. 12).</p> <p>Dosazení: EPS1 - EPS8 = 0 (využití výchozích hodnot)</p> |
| P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 | <p>Parametry udávající hodnoty tlaku, který se zadává se znaménkem (+). Tyto parametry mohou být zadány buď uživatelsky požadovanými hodnotami tlaku, nebo hodnotami 0, nebo mohou tyto parametry zůstat nevyplněny. V případě hodnot 0 nebo nevyplnění parametrů jsou pro tyto parametry automaticky použity výchozí hodnoty tlaku implementované v materiálovém modelu (Pressure na obr. 5. 2. 11). Výchozí hodnoty objemové deformace společně s výchozími hodnotami tlaku tvoří výchozí křivku pro beton implementovanou v materiálovém modelu, která slouží pro určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu (obr. 5. 2. 12).</p> <p>Dosazení: P1 - P8 = 0 (využití výchozích hodnot)</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| Volumetric Strain | Pressure |
|-------------------|-------------|
| $-p_1/K$ | $1.00xp_1$ |
| -0.002 | $1.50xp_1$ |
| -0.004 | $3.00xp_1$ |
| -0.010 | $4.80xp_1$ |
| -0.020 | $6.00xp_1$ |
| -0.030 | $7.50xp_1$ |
| -0.041 | $9.45xp_1$ |
| -0.051 | $11.55xp_1$ |
| -0.062 | $14.25xp_1$ |
| -0.094 | $25.05xp_1$ |

Obr. 5. 2. 11 Výchozí hodnoty objemové deformace (Volumetric Strain) a tlaku (Pressure) implementované v materiálovém modelu *MAT_WINFRITH_CONCRETE [5]



Obr. 5. 2. 12 Výchozí křivka pro beton implementovaná v materiálovém modelu *MAT_WINFRITH_CONCRETE, která slouží pro určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu [8]

Výchozí hodnoty objemové deformace a tlaku pro beton C 35/45, jenž byl použit v rámci této práce, jsou následující (tab. 5. 2. 1):

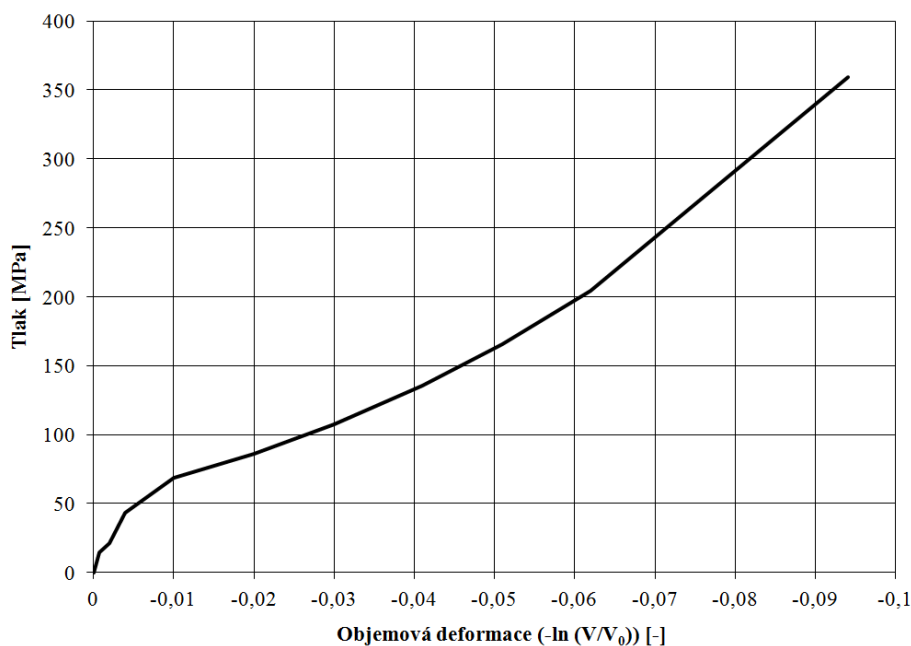
Tlak: $p_1 = f_c/3 = 43/3 = 14,33$ MPa

Objemový modul pružnosti: $K = E_s/(3 \cdot (1-2 \cdot \nu)) = 35175/(3 \cdot (1-2 \cdot 0,2)) = 19541,67$ MPa

| Objemová deformace [-] | Tlak [MPa] |
|------------------------|------------|
| -0,000733 | 14,33 |
| -0,002 | 21,5 |
| -0,004 | 43 |
| -0,01 | 68,8 |
| -0,02 | 86 |
| -0,03 | 107,5 |
| -0,041 | 135,45 |
| -0,051 | 165,55 |
| -0,062 | 204,25 |
| -0,094 | 359,05 |

Tab. 5. 2. 1 Výchozí hodnoty objemové deformace a tlaku pro beton C 35/45, *MAT_WINFRITH_CONCRETE

Výchozí křivka pro beton C 35/45, která slouží pro určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu je na obr. 5. 2. 13.



Obr. 5. 2. 13 Výchozí křivka pro beton C 35/45, která slouží pro určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu, *MAT_WINFRITH_CONCRETE

Podrobnější informace o materiálovém modelu *MAT_WINFRITH_CONCRETE, především z hlediska teorie modelu, lze nalézt například v literatuře [5] a [7]. Různá zadání parametrů náležících klíčovému slovu (názevu modelu) *MAT_WINFRITH_CONCRETE ve vstupních souborech programu LS-DYNA neboli různá nastavení materiálového modelu pro účely této práce jsou na obr. 5. 2. 14 a 5. 2. 15.

```
*MAT_WINFRITH_CONCRETE
$#      mid      ro      tm      pr      ucs      uts      fe      asize
      1 2.4000E-9 35175.000 0.200000 43.000000 3.200000 0.131000 8.000000
$#      e      ys      eh      uelong      rate      conm      conl      cont
      0.000      0.000      0.000      0.000 1.000000 -4.000000      0.000      0.000
$#      eps1      eps2      eps3      eps4      eps5      eps6      eps7      eps8
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      p1      p2      p3      p4      p5      p6      p7      p8
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
```

Obr. 5. 2. 14 *MAT_WINFRITH_CONCRETE → parametry materiálového modelu při kvazi-statickém a cyklickém zatěžování (soubor *.k, PSPad)

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

```
*MAT_WINFRITH_CONCRETE
$#      mid      ro      tm      pr      ucs      uts      fe      asize
      1 2.4000E-9 35175.000 0.200000 43.000000 3.200000 0.081556 8.000000
$#      e      ys      eh      uelong      rate      conm      conl      cont
      0.000      0.000      0.000      0.000 0.000000 -4.000000      0.000      0.000
$#      eps1      eps2      eps3      eps4      eps5      eps6      eps7      eps8
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
$#      p1      p2      p3      p4      p5      p6      p7      p8
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
```

Obr. 5. 2. 15 *MAT_WINFRITH_CONCRETE → parametry materiálového modelu při vyšších rychlostech zatěžování (soubor *.k, PSPad)

Informace uvedené v této podkapitole byly čerpány ze zdrojů [5] a [7].

5. 2. 3***MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL**

Jedná se o materiálový model, který je v programu LS-DYNA implementován jako typ 273. Tento nelineární materiálový model je určen pro modelování betonu a jeho použití je autory udáváno především pro nelineární analýzy betonových konstrukcí vystavených účinkům dynamického zatížení, kdy je nutné simulovat porušení betonu a zohledňovat vliv rychlosti deformace na mechanicko fyzikální vlastnosti betonu. Model je definován jako konstitutivní plastický model s porušením založený na efektivním napětí a je k dispozici pouze pro konečné prvky typu SOLID. Obsahuje značné množství parametrů, přičemž většina z nich je již definována výchozími hodnotami, které jsou implementovány v materiálovém modelu (viz *MAT_CDPM → popis parametrů funkčních karet) a které vycházejí z experimentálních testů. Výchozí hodnoty parametrů nemusí být vhodné pro všechny druhy betonu a všechny způsoby zatěžování, nicméně tvoří dobrý výchozí bod pro případné určování těchto parametrů. V případě, že má uživatel k dispozici vlastní hodnoty parametrů, může je bez problémů použít. Vlastnosti materiálového modelu jsou následující:

- umožňuje zohlednit změnu mechanicko fyzikálních vlastností betonu v závislosti na rychlosti deformace (rate effects),
- je založen na podmínce plasticity popsané v Haigh-Westergaardových souřadnicích (yield criterion), zákonu tečení, zákonu zpevnění a dalších zákonech stanovených pro konstitutivní plastický model s porušením; matematické vyjádření podmínky plasticity je následující [5]:

$$f_p(\sigma_v, \rho, \theta, \kappa) = \left[[1 - q_1(\kappa)] \left(\frac{\rho}{\sqrt{6}f_c} + \frac{\sigma_v}{f_c} \right)^2 + \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\rho}{f_c} \right]^2 + m_0 q_1(\kappa) q_2(\kappa) \left[\frac{\rho}{\sqrt{6}f_c} r(\cos \theta) + \frac{\sigma_v}{f_c} \right] - q_1^2(\kappa) q_2^2(\kappa) .$$

kde
$$r(\cos \theta) = \frac{4(1 - e^2) \cos^2 \theta + (2e - 1)^2}{2(1 - e^2) \cos^2 \theta + (2e - 1) \sqrt{4(1 - e^2) \cos^2 \theta + 5e^2 - 4e}}$$

$$m_0 = \frac{3(f_c^2 - f_t^2)}{f_c f_t} \frac{e}{e + 1} \quad e = \frac{1 + \epsilon}{2 - \epsilon}, \quad \text{where } \epsilon = \frac{f_t}{f_b} \frac{f_b^2 - f_c^2}{f_b f_c^2 - f_t^2} \quad f_b = 1.16f_c$$

$f_p(\sigma_v, \rho, \theta, \kappa)$ funkce podmínky plasticity,

σ_v objemové efektivní napětí, závisí na prvním invariantu tenzoru efektivního napětí,

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

- θ úhel, který závisí na druhém a třetím invariantu deviatorické části tenzoru efektivního napětí,
- ρ norma deviatorického efektivního napětí, závisí na druhém invariantu deviatorické části tenzoru efektivního napětí,
- κ parametr zpevnění,
- $q_1(\kappa), q_2(\kappa)$ proměnné, které jsou závislé na parametru zpevnění κ ,
- m_0 parametr tření,
- e parametr excentricity,
- f_c pevnost betonu v jednoosém tlaku,
- f_t pevnost betonu v jednoosém tahu,
- f_b pevnost betonu ve dvojosém tlaku, která je definována v závislosti na $f_c \rightarrow f_b = 1,16.f_c$,
- je určen pro modelování betonu, tudíž umožňuje modelovat rozdílné mechanicko fyzikální vlastnosti materiálu v tlaku a v tahu,
- umožňuje modelovat porušení betonu (damage effects),
- při jeho použití je doporučeno provádět výpočty s dvojitou přesností, jelikož jednoduchá přesnost může poskytovat nestabilní řešení.

Materiálový model *MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL je, jak již bylo zmíněno, určen pro modelování betonu. V případě, že chce uživatel tento materiálový model použít, musí zadat název materiálového modelu ve vstupním souboru programu LS-DYNA klíčovým slovem *MAT_CDPM. Klíčové slovo *MAT_CDPM přiřadí materiálovému modelu příslušné funkční karty s příslušnými parametry, které musí uživatel zadat pro správnou funkci nelineárního modelu, přičemž v tomhle případě je většina parametrů již definována výchozími hodnotami, které mohou být v určitých případech použitelné. Zadání klíčového slova a parametry příslušných funkčních karet může uživatel buď v programu LS-PrePost nebo v textovém editoru. Zde je nicméně nutné zmínit, že v případě zadání materiálového modelu v programu LS-PrePost v. 4.0 je materiálový model uložen do vstupního souboru programu LS-DYNA pod klíčovým slovem *MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL, které je následně nutné přepsat v textovém editoru na *MAT_CDPM, jelikož v případě ponechání klíčového slova *MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL řešič LS-DYNA zahlásí při spuštění výpočtu chybové hlášení, že není definován materiálový model. V případě

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

klíčového slova *MAT_CDPM tento problém nenastává. Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_CDPM, jak je uvádí manuál [5], jsou znázorněny na obr. 5. 2. 16.

| Card 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|------|------|------|-----|------|-----|------|------|
| Variable | MID | RO | E | PR | ECC | QH0 | FT | FC |
| Type | A8 | F | F | F | F | F | F | F |
| Default | none | none | none | 0.2 | AUTO | 0.3 | none | none |

| Card 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|-----|------|-------|-----|--------|------|------|------|
| Variable | HP | AH | BH | CH | DH | AS | DF | FC0 |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | F |
| Default | 0.5 | 0.08 | 0.003 | 2.0 | 1.0E-6 | 15.0 | 0.85 | 10.0 |

| Card 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|------|-----|------|---------|--------|--------|---------|---|
| Variable | TYPE | BS | WF | WF1 | FT1 | STRFLG | FAILFLG | |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | |
| Default | 0.0 | 1.0 | none | 0.15*WF | 0.3*FT | 0.0 | 0.0 | |

Obr. 5. 2. 16 Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_CDPM [5]

*MAT_CDPM → popis parametrů funkčních karet [5]

Použité jednotky: MPa, mm, s, Mg/mm³, N

| Parametr | Popis |
|----------|--|
| MID | Identifikační číslo materiálového modelu. Unikátní číslo, které může obsahovat maximálně 8 číslic a které musí být zadáno z důvodů propojení materiálového modelu s příslušným partem (*PART). Dosazení: MID = 1 |
| RO | Objemová hmotnost betonu (hustota). → nutné zadat Dosazení: RO = 2,4E-9 Mg/mm ³ (prostý beton) |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|-----|---|
| E | <p>Youngův modul pružnosti betonu. → nutné zadat</p> <p>Dosazení: $E = E_{cm} = 33500 \text{ MPa}$ (beton C 35/45)</p> |
| PR | <p>Součinitel příčné kontrakce (Poissonovo číslo) betonu. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou Poissonova čísla betonu, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota Poissonova čísla betonu automaticky nastavena na $PR = 0,2$ (výchozí hodnota).</p> <p>Dosazení: $PR = 0,2$</p> |
| ECC | <p>Parametr excentricity $ECC = e$. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru excentricity automaticky stanovena prostřednictvím vztahu:</p> $e = \frac{1 + \epsilon}{2 - \epsilon}, \quad \text{where } \epsilon = \frac{f_t f_b^2 - f_c^2}{f_b f_c^2 - f_t^2} \quad f_b = 1.16f_c$ <p>$f_c = FC$ pevnost betonu v jednoosém tlaku, $f_t = FT$ pevnost betonu v jednoosém tahu.</p> <p>Dosazení: $ECC = 0$ (využití automatického stanovení parametru excentricity, viz obr. 5. 2. 17)</p> <p align="center">*** Warning 10910 (KEY+910) ECC = 0.0. COMPUTED ECC = 0.517</p> <p>Obr. 5. 2. 17 Automaticky stanovený parametr excentricity (soubor messag)</p> |
| QH0 | <p>Parametr určuje počátek zpevnování a je definován jako poměr FC_0/FC, kde FC_0 je tlakové napětí, při jehož překročení začne docházet k rozvoji plastické deformace, a FC je pevnost betonu v jednoosém tlaku. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na $QH0 = 0,3$ (výchozí hodnota).</p> <p>Dosazení: $QH0 = 0$ (využití výchozí hodnoty)</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|----|--|
| FT | <p>Pevnost betonu v jednoosém tahu. → nutné zadat</p> <p>Dosazení: $FT = f_t = f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$ (beton C 35/45)</p> |
| FC | <p>Pevnost betonu v jednoosém tlaku. → nutné zadat</p> <p>Dosazení: $FC = f_c = f_{cm} = 43 \text{ MPa}$ (beton C 35/45)</p> |
| HP | <p>Parametr zpevnění. Parametr musí být zadán tak, aby bylo splněno $HP < 1-QH0$. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, přičemž je potřeba zkontrolovat, jestli je $HP < 1-QH0$, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru zpevnění automaticky nastavena na $HP = 0,5$ (výchozí hodnota). V případě využití výchozí hodnoty parametru je opět potřeba zkontrolovat, jestli je $HP < 1-QH0$.</p> <p>Dosazení: $HP = 0$ (využití výchozí hodnoty) → $HP = 0,5 < 1-QH0 = 1 - 0,3 = 0,7$</p> |
| AH | <p>Parametr tvárného zpevnění 1. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru tvárného zpevnění 1 automaticky nastavena na $AH = 0,08$ (výchozí hodnota).</p> <p>Dosazení: $AH = 0$ (využití výchozí hodnoty)</p> |
| BH | <p>Parametr tvárného zpevnění 2. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru tvárného zpevnění 2 automaticky nastavena na $BH = 0,003$ (výchozí hodnota).</p> <p>Dosazení: $BH = 0$ (využití výchozí hodnoty)</p> |
| CH | <p>Parametr tvárného zpevnění 3. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru tvárného zpevnění 3 automaticky nastavena na $CH = 2$ (výchozí hodnota).</p> <p>Dosazení: $CH = 0$ (využití výchozí hodnoty)</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|------|---|
| DH | <p>Parametr tvárného zpevnění 4. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru tvárného zpevnění 4 automaticky nastavena na $DH = 1E-6$ (výchozí hodnota).</p> <p>Dosazení: $DH = 0$ (využití výchozí hodnoty)</p> |
| AS | <p>Parametr tvárnosti v průběhu porušování. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru tvárnosti v průběhu porušování automaticky nastavena na $AS = 15$ (výchozí hodnota).</p> <p>Dosazení: $AS = 0$ (využití výchozí hodnoty)</p> |
| DF | <p>Parametr charakterizující zákon tečení. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na $DF = 0,85$ (výchozí hodnota).</p> <p>Dosazení: $DF = 0$ (využití výchozí hodnoty)</p> |
| FC0 | <p>Parametr závislosti na rychlosti deformace. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru závislosti na rychlosti deformace automaticky nastavena na $FC0 = 10$ (výchozí hodnota).</p> <p>Dosazení: $FC0 = 0$ (využití výchozí hodnoty)</p> |
| TYPE | <p>Tento parametr určuje formulaci porušení (funkci tahového změkčení). Na výběr jsou tři možnosti:</p> <p>0: Lineární formulace porušení → lineární funkce tahového změkčení (výchozí nastavení)</p> <p>1: Bilineární formulace porušení → bilineární funkce tahového změkčení</p> <p>2: Bez porušení</p> <p>Dosazení: $TYPE = 0$ (při tlakovém zatěžování a cyklickém zatěžování); 1 (při tahovém zatěžování)</p> |

| | |
|-----|---|
| BS | <p>Parametr udává mocnitel tvárnosti v průběhu porušování. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na $BS = 1$ (výchozí hodnota).</p> <p>Dosazení: $BS = 0$ (využití výchozí hodnoty)</p> |
| WF | <p>Šířka trhliny w_f, při které tahové napětí v betonu nabude nulové hodnoty, pro lineární formulaci porušení (obr. 5. 2. 18). → nutné zadat</p> <div data-bbox="758 667 1101 913" style="text-align: center;"> </div> <p>Obr. 5. 2. 18 Závislost tahového napětí v betonu na otevření trhliny (lineární formulace porušení) [5]</p> <p>Dosazení: $WF = 0,131$ mm (viz *MAT_WINFRITH_CONCRETE)</p> |
| WF1 | <p>Šířka trhliny w_{f1} pro bilineární formulaci porušení (obr. 5. 2. 19). Tento parametr má význam pouze při $TYPE = 1$. V jiném případě nemusí být zadán nebo může být zadán hodnotou 0.</p> <div data-bbox="718 1339 1141 1709" style="text-align: center;"> </div> <p>Obr. 5. 2. 19 Závislost tahového napětí v betonu na otevření trhliny (bilineární formulace porušení) [9]</p> <p>V případě $TYPE = 1$ je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou šířky trhliny w_{f1}, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo</p> |

| | |
|--------|---|
| WF1 | <p>nevyplnění parametru je hodnota šířky trhliny w_{f1} automaticky stanovena dle vztahu $WF1 = 0,15 \cdot WF$.</p> <p>Dosazení: $WF1 = 0$ (využití automatického stanovení šířky trhliny w_{f1}, viz obr. 5. 2. 20, při $TYPE = 1$); 0 (při $TYPE = 0$)</p> <pre> *** Warning 10911 (KEY+911) DAMAGE TYPE = 1 (BI-LINEAR) BUT WF1 = 0. USING DEFAULT VALUE 0.15*WF = 0.020 </pre> <p>Obr. 5. 2. 20 Automaticky stanovená šířka trhliny w_{f1} (soubor messag)</p> |
| FT1 | <p>Tahové napětí σ_1 pro bilineární formulaci porušení (obr. 5. 2. 19). Tento parametr má význam pouze při $TYPE = 1$. V jiném případě nemusí být zadán nebo může být zadán hodnotou 0.</p> <p>V případě $TYPE = 1$ je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou tahového napětí σ_1, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota tahového napětí σ_1 automaticky stanovena dle vztahu $FT1 = 0,3 \cdot FT$.</p> <p>Dosazení: $FT1 = 0$ (využití automatického stanovení tahového napětí σ_1, viz obr. 5. 2. 21, při $TYPE = 1$); 0 (při $TYPE = 0$)</p> <pre> *** Warning 10912 (KEY+912) DAMAGE TYPE = 1 (BI-LINEAR) BUT FT1 = 0. USING DEFAULT VALUE 0.3*FT = 0.960 </pre> <p>Obr. 5. 2. 21 Automaticky stanovené tahové napětí σ_1 (soubor messag)</p> |
| STRFLG | <p>Parametr určuje, zda-li rychlost deformace ovlivňuje mechanicko fyzikální vlastnosti betonu (závislost na rychlosti deformace).</p> <p>Na výběr jsou dvě možnosti:</p> <p>0: Rychlost deformace neovlivňuje mechanicko fyzikální vlastnosti betonu (kvazi-statika) → nezávislost na rychlosti deformace (výchozí nastavení).</p> <p>1: Rychlost deformace ovlivňuje mechanicko fyzikální vlastnosti betonu → závislost na rychlosti deformace.</p> <p>Dosazení: $STRFLG = 0$ (při kvazi-statickém zatěžování); 1 (při vyšších rychlostech zatěžování)</p> |

| | |
|---------|---|
| FAILFLG | <p>Parametr umožňuje modelovat porušení betonu prostřednictvím vypadávání porušených konečných prvků z výpočtu. Pokud je FAILFLG = 0, prvky z výpočtu nevypadávají. Efektivní napětí v integračním bodě prvku je v případě konstitutivního plastického modelu s porušením dáno vztahem $\sigma = (1-w_t)\cdot\sigma_t+(1-w_c)\cdot\sigma_c$, kde σ_t a σ_c jsou pozitivní a negativní části efektivního napětí a w_t a w_c jsou parametry porušení, které mohou nabývat hodnot od 0 do 1 včetně. Pokud je FAILFLG $\in (0; 1)$, prvky z výpočtu vypadávají ve chvíli, kdy parametry porušení w_t a w_c dosáhnou hodnoty 1 ($\sigma = 0$) ve FAILFLG.100 % integračních bodů na prvcích.</p> <p>Příklad: Pokud je FAILFLG = 0,6, tak v 60 % integračních bodů na prvcích musí parametry w_t a w_c dosahovat hodnoty 1 ($\sigma = 0$) neboli 60 % integračních bodů na prvcích musí selhat předtím, než dojde k vypadávání porušených konečných prvků z výpočtu.</p> <p>V případě nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na FAILFLG = 0 (výchozí hodnota).</p> <p>Dosazení: FAILFLG = 0</p> |
|---------|---|

Podrobnější informace o konstitutivním plastickém materiálovém modelu s porušením *MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL, především z hlediska teorie modelu, lze nalézt například v literatuře [5], [9] a [10]. Různá zadání parametrů náležících klíčovému slovu (názvu modelu) *MAT_CDPM ve vstupních souborech programu LS-DYNA neboli různá nastavení materiálového modelu pro účely této práce jsou na obr. 5. 2. 22, 5. 2. 23, 5. 2. 24 a 5. 2. 25.

```

*MAT_CDPM
$#      mid      ro      e      pr      ecc      qh0      ft      fc
        1 2.4000E-9 33500.000 0.200000 0.000 0.000 3.200000 43.000000
$#      hp      ah      bh      ch      dh      as      df      fc0
0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
$#      type      bs      wf      wf1      ft1      strflg      failflg
0.000 0.000 0.131000 0.000 0.000 0.000 0.000
    
```

Obr. 5. 2. 22 *MAT_CDPM → parametry materiálového modelu při kvazi-statickém (tlakovém) a cyklickém zatěžování (soubor *.k, PSPad)

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

```
*MAT_CDPM
$#   mid      ro      e      pr      ecc      qh0      ft      fc
      1 2.4000E-9 33500.000 0.200000 0.000 0.000 3.200000 43.000000
$#   hp      ah      bh      ch      dh      as      df      fc0
      0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
$#   type     bs      wf      wf1     ft1     strflg   failflg
      0.000 0.000 0.131000 0.000 0.000 1.000 0.000
```

Obr. 5. 2. 23 *MAT_CDPM → parametry materiálového modelu při vyšších rychlostech (tlakového) zatěžování (soubor *.k, PSPad)

```
*MAT_CDPM
$#   mid      ro      e      pr      ecc      qh0      ft      fc
      1 2.4000E-9 33500.000 0.200000 0.000 0.000 3.200000 43.000000
$#   hp      ah      bh      ch      dh      as      df      fc0
      0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
$#   type     bs      wf      wf1     ft1     strflg   failflg
      1.000000 0.000 0.131000 0.000 0.000 0.000 0.000
```

Obr. 5. 2. 24 *MAT_CDPM → parametry materiálového modelu při kvazi-staticém (tahovém) zatěžování (soubor *.k, PSPad)

```
*MAT_CDPM
$#   mid      ro      e      pr      ecc      qh0      ft      fc
      1 2.4000E-9 33500.000 0.200000 0.000 0.000 3.200000 43.000000
$#   hp      ah      bh      ch      dh      as      df      fc0
      0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
$#   type     bs      wf      wf1     ft1     strflg   failflg
      1.000000 0.000 0.131000 0.000 0.000 1.000 0.000
```

Obr. 5. 2. 25 *MAT_CDPM → parametry materiálového modelu při vyšších rychlostech (tahového) zatěžování (soubor *.k, PSPad)

Informace uvedené v této podkapitole byly čerpány ze zdrojů [5], [9] a [10].

5. 2. 4***MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3**

Jedná se o materiálový model, který je v programu LS-DYNA implementován jako typ 72R3 a nejčastěji bývá uváděn pod názvem The Karagozian&Case (K&C) Concrete Model - Release III. Je určen pro modelování betonu a jeho použití je autory udáváno především pro nelineární analýzy železobetonových konstrukcí vystavených účinkům impulzního zatížení. Model je definován jako tří invariantní model založený na třech podmínkách smykového porušení, jenž umožňuje zohlednit vliv rychlosti deformace na mechanicko fyzikální vlastnosti betonu a je vhodný pro modelování porušování betonu. Vychází z materiálového modelu *MAT_PSEUDO_TENSOR (typ 16 v programu LS-DYNA) a je k dispozici pouze pro konečné prvky typu SOLID. Oproti starší verzi Release I (*MAT_CONCRETE_DAMAGE → viz následující podkapitola) poskytuje Release III uživateli výrazné vylepšení možností pro zadávání parametrů materiálového modelu, jelikož zahrnuje schopnost generovat parametry, která je založena výhradně na pevnosti betonu v jednoosém tlaku. Pokud má uživatel k dispozici hodnoty parametrů tohoto modelu, může je bez problémů zadat. Nicméně se předpokládá, že tento model bude používán spíše za účelem využití jeho schopnosti generovat parametry. Vlastnosti materiálového modelu jsou následující:

- umožňuje zohlednit změnu mechanicko fyzikálních vlastností betonu v závislosti na rychlosti deformace (rate effects),
- je založený, jak již bylo zmíněno, na třech podmínkách smykového porušení (na mezi vzniku plastických deformací, na mezi pevnosti a na mezi reziduální pevnosti), jejichž matematické vyjádření je uvedeno u příslušných parametrů materiálového modelu, které se ve funkcích těchto podmínek uplatňují, viz *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 → popis parametrů funkčních karet,
- je určen pro modelování betonu, tudíž umožňuje modelovat rozdílné mechanicko fyzikální vlastnosti materiálu v tlaku a v tahu,
- umožňuje modelovat porušení betonu (damage effects),
- při jeho použití je možné provádět výpočty s dvojitou i jednoduchou přesností, obě varianty poskytují stabilní řešení.

Materiálový model *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 je, jak již bylo zmíněno, určen pro modelování betonu. V případě, že chce uživatel tento materiálový model použít, musí zadat název materiálového modelu ve vstupním souboru programu LS-DYNA klíčovým slovem *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3. Klíčové slovo

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 přiřadí materiálovému modelu příslušné funkční karty s příslušnými parametry. Při zadávání parametrů modelu může uživatel postupovat dvěma způsoby:

- 1) V případě, že uživatel do parametru A0 materiálového modelu (viz *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 → popis parametrů funkčních karet) dosadí hodnotu parametru a_0 , který je jedním z parametrů popisujících funkci podmínky smykového porušení na mezi pevnosti, musí dále zadat také hodnoty všech ostatních parametrů materiálového modelu. V tomhle případě vyžaduje materiálový model dále také zadání parametrů funkčních karet, které náležejí klíčovému slovu *EOS_TABULATED_COMPACTION, neboli parametrů stavové rovnice, která udává závislost tlaku (znaménko +) na objemové deformaci (přirozený logaritmus relativního objemu $\ln(V/V_0)$, záporná v tlaku) a na základě níž lze vynést křivku, která slouží pro určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu. Parametry náležící klíčovému slovu *EOS_TABULATED_COMPACTION musí uživatel v tomhle případě zadat, jinak řešič LS-DYNA zahlásí při spuštění výpočtu, že není definována stavová rovnice.
- 2) V případě, že uživatel do parametru A0 materiálového modelu dosadí zápornou hodnotu pevnosti betonu v jednoosém tlaku $-f'_c$, se aktivuje schopnost materiálového modelu generovat parametry a uživatel musí tedy dále zadat pouze parametry, které je nutné zadat, přičemž ale může zadat také další parametry dle potřeby (viz *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 → popis parametrů funkčních karet). V rámci schopnosti materiálového modelu generovat parametry nejsou generovány pouze parametry materiálového modelu, ale také parametry stavové rovnice náležící klíčovému slovu *EOS_TABULATED_COMPACTION. Tudíž v případě využití schopnosti modelu generovat parametry uživatel nemusí zadávat parametry stavové rovnice, jelikož jsou generovány automaticky. Tento způsob použití materiálového modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 je doporučený.

Zadat klíčová slova a parametry příslušných funkčních karet může uživatel buď v programu LS-PrePost nebo v textovém editoru. Vzhledem k tomu, že v rámci této práce bylo při použití tohoto materiálového modelu využito schopnosti modelu generovat parametry, přičemž tedy nebylo potřeba zadávat parametry stavové rovnice, jsou v této podkapitole uvedeny pouze funkční karty a popsány pouze parametry náležící klíčovému slovu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3. Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, jak je uvádí manuál [5], jsou znázorněny na obr. 5. 2. 26 a 5. 2. 27.

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|---|---|---|---|---|
| Card 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | MID | R0 | PR | | | | | |
| Type | A8 | F | F | | | | | |
| Default | none | none | none | | | | | |

| | | | | | | | | |
|----------|------|-----|-----|-----|-----|-------|-----|---|
| Card 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | FT | A0 | A1 | A2 | B1 | OMEGA | A1F | |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | |
| Default | none | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | none | 0.0 | |

| | | | | | | | | |
|----------|------|------|-------|-------|------|--------|--------|------|
| Card 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | Sλ | NOUT | EDROP | RSIZE | UCF | LCRATE | LOCWID | NPTS |
| Type | F | F | F | F | F | I | F | F |
| Default | none | none | none | none | none | none | none | none |

| | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Card 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | λ01 | λ02 | λ03 | λ04 | λ05 | λ06 | λ07 | λ08 |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | F |
| Default | none | none | none | none | none | none | none | none |

| | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| Card 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | λ09 | λ10 | λ11 | λ12 | λ13 | B3 | A0Y | A1Y |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | F |
| Default | none | none | none | none | none | none | 0.0 | 0.0 |

Obr. 5. 2. 26 Funkční karty 1, 2, 3, 4 a 5 pro klíčové slovo

*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 [5]

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | | | | | | | | |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Card 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | η_{01} | η_{02} | η_{03} | η_{04} | η_{05} | η_{06} | η_{07} | η_{08} |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | F |
| Default | none | none | none | none | none | none | none | none |

| | | | | | | | | |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----|-----|-----|
| Card 7 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | η_{09} | η_{10} | η_{11} | η_{12} | η_{13} | B2 | A2F | A2Y |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | F |
| Default | none | none | none | none | none | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Obr. 5. 2. 27 Funkční karty 6 a 7 pro klíčové slovo

*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 [5]

***MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 → popis parametrů funkčních karet [5]**

Použité jednotky: MPa, mm, s, Mg/mm³, N

| Parametr | Popis |
|----------|---|
| MID | Identifikační číslo materiálového modelu. Unikátní číslo, které může obsahovat maximálně 8 číslic a které musí být zadáno z důvodů propojení materiálového modelu s příslušným partem (*PART). Dosazení: MID = 1 |
| RO | Objemová hmotnost betonu (hustota). → nutné zadat Dosazení: RO = 2,4E-9 Mg/mm ³ (prostý beton) |
| PR | Součinitel příčné kontrakce (Poissonovo číslo) betonu. Pokud je A0 = a_0 , parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je A0 = $-f'_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou Poissonova čísla betonu, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota Poissonova čísla betonu automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f'_c (doporučeno). Dosazení: PR = 0,2 |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|----|--|
| FT | <p>Pevnost betonu v jednoosém tahu. Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou pevnosti betonu v jednoosém tahu, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota pevnosti betonu v jednoosém tahu automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: $FT = f_{ctm} = 3,2$ MPa (beton C 35/45)</p> |
| A0 | <p>Tento parametr je možné zadat buď hodnotou parametru a_0 popisujícího funkci podmínky smykového porušení na mezi pevnosti, nebo zápornou hodnotou pevnosti betonu v jednoosém tlaku $-f_c$. → nutné zadat</p> <p>Funkce podmínky smykového porušení na mezi pevnosti [11]:</p> $\Delta\sigma_m = a_0 + \frac{p}{a_1 + a_2 p} \quad (\text{maximum failure surface})$ <p>Pokud uživatel zadá $A0 = a_0$ → musí dále zadat také hodnoty všech ostatních parametrů.</p> <p>Pokud uživatel zadá $A0 = -f_c$ → aktivuje se schopnost modelu generovat parametry (doporučeno), uživatel dále musí zadat pouze parametry, které je nutné zadat, přičemž ale může zadat také další parametry dle potřeby.</p> <p>Dosazení: $A0 = -f_c = -f_{cm} = -43$ MPa (beton C 35/45) → aktivace schopnosti modelu generovat parametry</p> |
| A1 | <p>Parametr a_1 popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi pevnosti (viz A0). Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru a_1 automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: $A1 =$ nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> |
| A2 | <p>Parametr a_2 popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi pevnosti (viz A0). Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|-------|--|
| A2 | <p>požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru a_2 automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f'_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: A2 = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> |
| B1 | <p>Parametr měřítka pro tlakové porušování b_1. Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f'_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru b_1 automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f'_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: B1 = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> |
| OMEGA | <p>Frakční roztažnost ω. Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f'_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota frakční roztažnosti ω automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f'_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: OMEGA = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> |
| A1F | <p>Koeficient a_{1f} popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi reziduální pevnosti.</p> <p>Funkce podmínky smykového porušení na mezi reziduální pevnosti [11]:</p> $\Delta\sigma_r = \frac{p}{a_{1f} + a_{2f}p} \quad (\text{residual failure surface})$ <p>Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f'_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota koeficientu a_{1f} automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f'_c (doporučeno).</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| A1F | Dosazení: A1F = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry) | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--|--------------------------------------|----------|-------------|---|--|--------------------------------------|---|---|-----------------------|---|--|----------------------|---|--|------------------------------|
| Sλ | <p>Parametr tažnosti s pro λ. Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru tažnosti s automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: Sλ = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> | | | | | | | | | | | | | | | |
| NOUT | <p>Volba výstupu pro efektivní plastickou deformaci.</p> <p>Na výběr jsou čtyři možnosti [5]:</p> <table border="1" data-bbox="456 864 1286 1084"> <thead> <tr> <th>NOUT</th> <th>Function</th> <th>Description</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td></td> <td>Current shear failure surface radius</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>$\delta = 2\lambda / (\lambda + \lambda_m)$</td> <td>Scaled damage measure</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>$\dot{\sigma}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}$</td> <td>Strain energy (rate)</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>$\dot{\sigma}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}^p$</td> <td>Plastic strain energy (rate)</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné zadat dle výběru možností. Pokud je $A0 = -f_c$, je možné tento parametr zadat buď hodnotou dle výběru možností, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru zvolena automaticky a vygenerována (doporučeno).</p> <p>Dosazení: NOUT = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> | NOUT | Function | Description | 1 | | Current shear failure surface radius | 2 | $\delta = 2\lambda / (\lambda + \lambda_m)$ | Scaled damage measure | 3 | $\dot{\sigma}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}$ | Strain energy (rate) | 4 | $\dot{\sigma}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}^p$ | Plastic strain energy (rate) |
| NOUT | Function | Description | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | Current shear failure surface radius | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | $\delta = 2\lambda / (\lambda + \lambda_m)$ | Scaled damage measure | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | $\dot{\sigma}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}$ | Strain energy (rate) | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | $\dot{\sigma}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}^p$ | Plastic strain energy (rate) | | | | | | | | | | | | | | |
| EDROP | <p>Parametr N^α. Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru N^α automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: EDROP = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> | | | | | | | | | | | | | | | |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|--------|--|
| RSIZE | <p>Převodní faktor pro jednotku délky (palce/jednotka délky používaná uživatelem). → nutné zadat</p> <p>Příklad: Pokud je jednotka délky používaná uživatelem metr (1 m = 39,37 palců), tak RSIZE = 39,37.</p> <p>Dosazení: RSIZE = 0,03937 (používaná jednotka délky je milimetr [mm])</p> |
| UCF | <p>Převodní faktor pro jednotku mechanického napětí (psi/ jednotka mechanického napětí používaná uživatelem). → nutné zadat</p> <p>Příklad: Pokud je jednotka mechanického napětí používaná uživatelem megapascal (1 MPa = 145 psi), tak UCF = 145.</p> <p>Dosazení: UCF = 145 (používaná jednotka mechanického napětí je megapascal [MPa])</p> |
| LCRATE | <p>Do tohoto parametru se zadává identifikační číslo křivky pro zohlednění vlivu rychlosti deformace (LCID). Křivka udává závislost násobitele smykové pevnosti, který určuje nárůst smykové pevnosti při dané efektivní rychlosti deformace, na efektivní rychlosti deformace. Při definování křivky se efektivní rychlost deformace zadává od záporných hodnot (tah) do kladných hodnot (tlak) a násobitel smykové pevnosti se zadává se znaménkem (+) a jeho hodnota při nulové efektivní rychlosti deformace musí být 1.</p> <p>V případě, že chce uživatel zohlednit změnu mechanicko fyzikálních vlastností betonu v závislosti na rychlosti deformace (vliv rychlosti deformace), musí křivku pro zohlednění vlivu rychlosti deformace ve vstupním souboru programu LS-DYNA definovat a dále zadat její identifikační číslo do tohoto parametru. V případě, že uživatel nechce zohlednit vliv rychlosti deformace (kvazi-statika), může tento parametr zadat hodnotou 0, nebo jej může zanechat nevyplněný.</p> <p>Dosazení: LCRATE = nevyplněno (při kvazi-statickém zatěžování); 3 (LCID = 3, při vyšších rychlostech zatěžování)</p> <p>Zadané hodnoty efektivní rychlosti deformace a násobitele smykové pevnosti definující křivku pro zohlednění vlivu rychlosti deformace byly převzaty z literatury [5] a jejich zadání ve vstupním souboru programu LS-DYNA (*.k) je na obr. 5. 2. 28. Grafické znázornění křivky je na</p> |

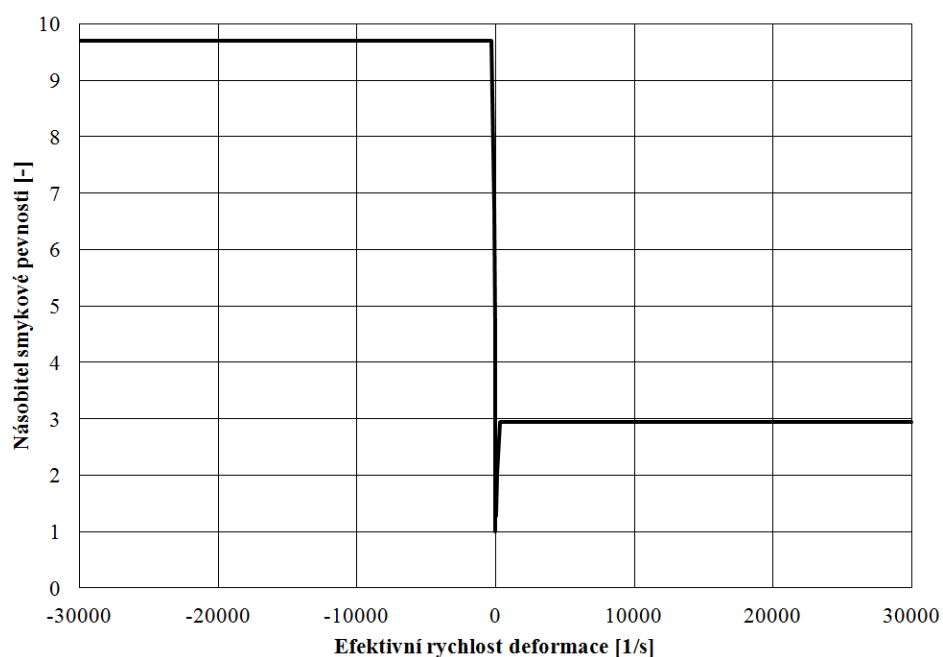
LCRATE

obr 5. 2. 29.

```

*DEFINE_CURVE
$#   lcId      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      3         0  1.000000  1.000000  0.000      0.000      0
$#           a1         o1
      -30000.000      9.700000
      -300.000      9.700000
      -100.000      6.720000
      -30.000      4.500000
      -10.000      3.120000
      -3.000      2.090000
      -1.000      1.450000
      -1.000000e-001      1.360000
      -1.000000e-002      1.280000
      -1.000000e-003      1.200000
      -1.000000e-004      1.130000
      -1.000000e-005      1.060000
      0.000      1.000000
      3.000000e-005      1.000000
      1.000000e-004      1.030000
      1.000000e-003      1.080000
      1.000000e-002      1.140000
      1.000000e-001      1.200000
      1.000      1.260000
      3.000      1.290000
      10.000      1.330000
      30.000      1.360000
      100.000      2.040000
      300.000      2.940000
      30000.000      2.940000
    
```

Obr. 5. 2. 28 Hodnoty efektivní rychlosti deformace (a1 [1/s]) a násobitele smykové pevnosti (o1 [-]) definující křivku pro zohlednění vlivu rychlosti deformace (soubor *.k, PSPad)



Obr. 5. 2. 29 Křivka pro zohlednění vlivu rychlosti deformace

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|--|---|
| LOCWID | <p>Trojnásobek maximální velikosti kameniva v betonu (3 x max. průměr kameniva → zadat v jednotkách používaných uživatelem). Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: LOCWID = 3.16 = 48 mm</p> |
| NPTS | <p>Parametr udává počet hodnot λ a η a musí mít hodnotu 13. Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné zadat hodnotou 13. Pokud je $A0 = -f_c$, je možné tento parametr zadat buď hodnotou 13, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky vygenerována na hodnotu 13 (doporučeno).</p> <p>Dosazení: NPTS = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> |
| $\lambda_{01}, \lambda_{02},$ $\lambda_{03}, \lambda_{04},$ $\lambda_{05}, \lambda_{06},$ $\lambda_{07}, \lambda_{08},$ $\lambda_{09}, \lambda_{10},$ $\lambda_{11}, \lambda_{12},$ λ_{13} | <p>Parametry udávající hodnoty funkce porušení ("modifikované" efektivní plastické deformace) $\lambda_1 - \lambda_{13}$ ($\lambda_n < \lambda_{n+1}$). Pokud je $A0 = a_0$, parametry je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f_c$, je možné tyto parametry zadat buď uživatelsky požadovanými hodnotami, nebo hodnotami 0, nebo je možné tyto parametry zanechat nevyplněné. V případě hodnot 0 nebo nevyplnění parametrů jsou hodnoty parametrů automaticky vygenerovány na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f_c (doporučeno). Hodnoty λ společně s hodnotami η tvoří křivku, která udává závislost η na λ.</p> <p>Dosazení: $\lambda_{01} - \lambda_{13}$ = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> |
| B3 | <p>Koeficient měřítka pro porušování při tříosém tahu b_3. Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota koeficientu b_3 automaticky</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|---|---|
| B3 | <p>vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: B3 = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> |
| A0Y | <p>Koeficient a_{0y} popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi vzniku plastických deformací.</p> <p>Funkce podmínky smykového porušení na mezi vzniku plastických deformací [11]:</p> $\Delta\sigma_y = a_{0y} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y}p} \quad (\text{yield failure surface})$ <p>Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota koeficientu a_{0y} automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: A0Y = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> |
| A1Y | <p>Koeficient a_{1y} popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi vzniku plastických deformací (viz A0Y). Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota koeficientu a_{1y} automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: A1Y = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> |
| <p>$\eta_{01}, \eta_{02},$ $\eta_{03}, \eta_{04},$ $\eta_{05}, \eta_{06},$ $\eta_{07}, \eta_{08},$ $\eta_{09}, \eta_{10},$</p> | <p>Parametry udávající hodnoty faktorů měřítka $\eta_1 - \eta_{13}$ ($\eta \in \langle 0; 1 \rangle$). Pokud je $A0 = a_0$, parametry je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f_c$, je možné tyto parametry zadat buď uživatelsky požadovanými hodnotami, nebo hodnotami 0, nebo je možné tyto parametry zanechat nevyplněné. V případě hodnot 0 nebo nevyplnění parametrů jsou hodnoty parametrů</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|--|---|
| <p>$\eta_{11}, \eta_{12},$ η_{13}</p> | <p>automaticky vygenerovány na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f'_c (doporučeno). Hodnoty λ společně s hodnotami η tvoří křivku, která udává závislost η na λ.</p> <p>Dosazení: $\eta_{01} - \eta_{13} =$ nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> |
| <p>B2</p> | <p>Mocnitel měřítka pro tahové porušování b_2. Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f'_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota mocnitele b_3 automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f'_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: B2 = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> |
| <p>A2F</p> | <p>Koeficient a_{2f} popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi reziduální pevnosti (viz A1F). Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f'_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota koeficientu a_{2f} automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f'_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: A2F = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> |
| <p>A2Y</p> | <p>Koeficient a_{2y} popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi vzniku plastických deformací (viz A0Y). Pokud je $A0 = a_0$, parametr je nutné uživatelsky zadat. Pokud je $A0 = -f'_c$, je možné tento parametr zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota koeficientu a_{2y} automaticky vygenerována na základě hodnoty pevnosti betonu v jednoosém tlaku f'_c (doporučeno).</p> <p>Dosazení: A2Y = nevyplněno (využití schopnosti modelu generovat parametry)</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

Podrobnější informace o nelineárním materiálovém modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, především z hlediska teorie modelu, lze nalézt například v literatuře [5] a [11]. Různá zadání parametrů náležících klíčovému slovu (názvu modelu) *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 ve vstupních souborech programu LS-DYNA neboli různá nastavení materiálového modelu pro účely této práce jsou na obr. 5. 2. 30 a 5. 2. 31. Vygenerované parametry materiálového modelu a stavové rovnice při hodnotě pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f'_c = 43$ MPa jsou na obr. 5. 2. 32. Vygenerovaná křivka pro beton C 35/45, která slouží pro určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu, je na obr. 5. 2. 33.

```
*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3
$#   mid      ro      pr
      1 2.4000E-9 0.200000
$#   ft      a0      a1      a2      b1      omega      a1f
      3.200000-43.000000
$# slambda      nout      edrop      rsize      ucf      lcrate      locwidth      npts
      0.039370 145.00000
$# lambda1      lambda2      lambda3      lambda4      lambda5      lambda6      lambda7      lambda8
$# lambda09      lambda10      lambda11      lambda12      lambda13      b3      a0y      a1y
$#   eta1      eta2      eta3      eta4      eta5      eta6      eta7      eta8
$#   eta09      eta10      eta11      eta12      eta13      b2      a2f      a2y
```

Obr. 5. 2. 30 *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 → parametry materiálového modelu při kvazi-statickém a cyklickém zatěžování (soubor *.k, PSPad)

```
*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3
$#   mid      ro      pr
      1 2.4000E-9 0.200000
$#   ft      a0      a1      a2      b1      omega      a1f
      3.200000-43.000000
$# slambda      nout      edrop      rsize      ucf      lcrate      locwidth      npts
      0.039370 145.00000      3 48.000000
$# lambda1      lambda2      lambda3      lambda4      lambda5      lambda6      lambda7      lambda8
$# lambda09      lambda10      lambda11      lambda12      lambda13      b3      a0y      a1y
$#   eta1      eta2      eta3      eta4      eta5      eta6      eta7      eta8
$#   eta09      eta10      eta11      eta12      eta13      b2      a2f      a2y
```

Obr. 5. 2. 31 *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 → parametry materiálového modelu při vyšších rychlostech zatěžování (soubor *.k, PSPad)

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

```

-----
Updated Release III K&C concrete model
by K&C/Javier Malvar (9/99 updated 4/12)
based on LRDA/K&C f3dm16w.f (8/7/95)
LS-DYNA Release III of Mat072 by
Len Schwer (May 04) & Y.Wu (April, 12)
-----

pressure phi      0.00000E+00    5.00000E-01
pressure phi      1.43333E+01    6.11628E-01
pressure phi      3.29667E+01    6.37453E-01
pressure phi      1.29000E+02    7.53000E-01
pressure phi      3.63350E+02    1.00000E+00
f c fyc ft       =    4.30000E+01    1.92873E+01    3.20000E+00
Ec               =    3.10402E+04

$----- MATERIAL CARDS -----
$ LS-DYNA Keyword Generated Input for Release III
$ [Default values = K&C generic f'c=6580 psi concrete]
*MAT_Concrete_Damage_Rel3
$ MATID          RO          PR
   72 2.400E-09 2.000E-01
$ ft            A0          A1          A2          B1          OMEGA          A1F
3.200E+00 1.271E+01 4.463E-01 1.879E-03 1.600E+00 5.000E-01 4.417E-01
$ sLambda       NOUT       EDROP       RSIZE       UCF       LCRate       LocWidth       NPTS
1.000E+02 2.000E+00 1.000E+00 3.937E-02 1.450E+02 0.000E+00 4.800E+01 1.300E+01
$ Lambda01      Lambda02     Lambda03     Lambda04     Lambda05     Lambda06     Lambda07     Lambda08
0.000E+00 8.000E-06 2.400E-05 4.000E-05 5.600E-05 7.200E-05 8.800E-05 3.200E-04
$ Lambda09      Lambda10     Lambda11     Lambda12     Lambda13     B3          AOY          A1Y
5.200E-04 5.700E-04 1.000E+00 1.000E+01 1.000E+10 1.150E+00 9.598E+00 6.250E-01
$ Eta01         Eta02         Eta03         Eta04         Eta05         Eta06         Eta07         Eta08
0.000E+00 8.500E-01 9.700E-01 9.900E-01 1.000E+00 9.900E-01 9.700E-01 5.000E-01
$ Eta09         Eta10         Eta11         Eta12         Eta13         B2          A2F          A2Y
1.000E-01 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 0.000E+00 1.350E+00 2.751E-03 5.988E-03
$----- EOS-8 CARDS -----
$ Generated EOS 8 (Tabulated Compaction)
*EOS_Tabulated_Compaction
$ EOSID         Gamma         EO         Vol0
   72 0.000E+00 0.000E+00 1.000E+00
$ VolStrain01   VolStrain02   VolStrain03   VolStrain04   VolStrain05
0.000000000E+00 -1.50000001E-03 -4.30000015E-03 -1.00999996E-02 -3.05000003E-02
$ VolStrain06   VolStrain07   VolStrain08   VolStrain09   VolStrain10
-5.13000004E-02 -7.25999996E-02 -9.43000019E-02 -1.73999995E-01 -2.08000004E-01
$ Pressure01    Pressure02    Pressure03    Pressure04    Pressure05
0.000000000E+00 2.58668671E+01 5.63897705E+01 9.05340347E+01 1.72014664E+02
$ Pressure06    Pressure07    Pressure08    Pressure09    Pressure10
2.59444467E+02 3.68085510E+02 5.63121704E+02 3.28767871E+03 5.02851904E+03
$ Multipliers of Gamma*E
.000000000E+00 .000000000E+00 .000000000E+00
.000000000E+00 .000000000E+00 .000000000E+00
$ BulkUnld01    BulkUnld02    BulkUnld03    BulkUnld04    BulkUnld05
1.72445781E+04 1.72445781E+04 1.74860039E+04 1.83654766E+04 2.18488789E+04
$ BulkUnld06    BulkUnld07    BulkUnld08    BulkUnld09    BulkUnld10
2.53495312E+04 2.88329355E+04 3.14713555E+04 7.08062344E+04 8.62228906E+04

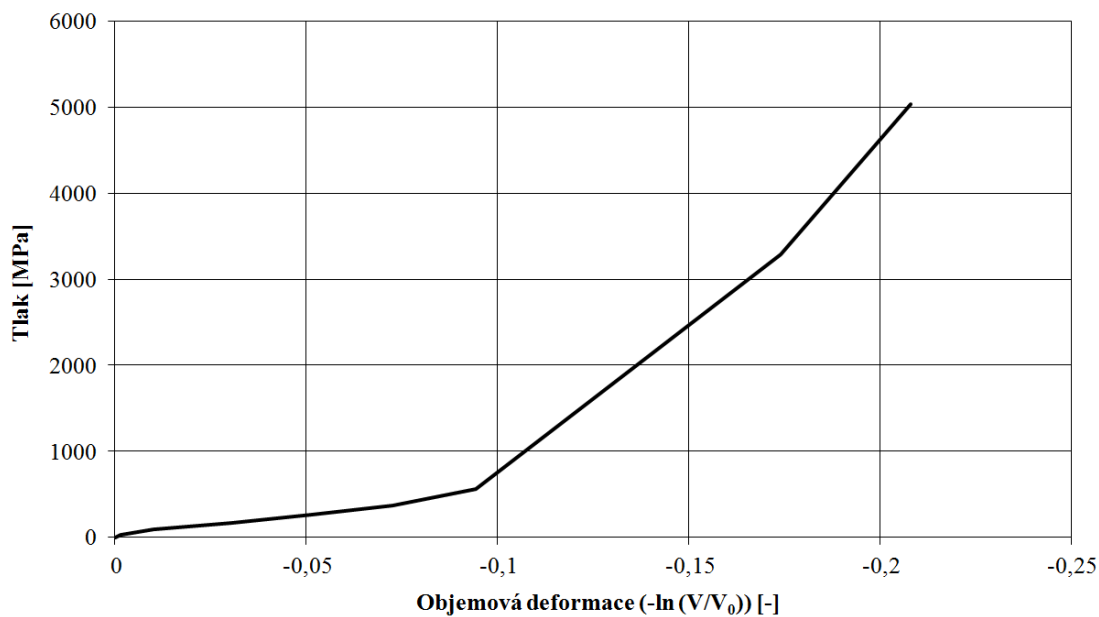
```

Obr. 5. 2. 32 Vygenerované parametry materiálového modelu

*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 a stavové rovnice

*EOS_TABULATED_COMPACTTION při hodnotě pevnosti betonu v jednoosém tlaku

$f'_c = 43 \text{ MPa}$ (soubor messag, PSPad)



Obr. 5. 2. 33 Vygenerovaná křivka pro beton C 35/45, která slouží pro určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu (Objemová deformace → VolStrain na obr. 5. 2. 32; Tlak → Pressure na obr. 5. 2. 32), *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3

Informace uvedené v této podkapitole byly čerpány ze zdrojů [5] a [11].

5. 2. 5***MAT_CONCRETE_DAMAGE**

Jedná se o materiálový model, který je v programu LS-DYNA implementován jako typ 72. Je určen pro modelování prostého a vyztuženého betonu a jeho použití je autory udáváno především pro nelineární analýzy železobetonových konstrukcí vystavených účinkům impulzního zatížení. Model je definován jako tří invariantní model založený na třech podmínkách smykového porušení, jenž umožňuje zohlednit vliv rychlosti deformace na mechanicko fyzikální vlastnosti betonu a výztuže a je vhodný pro modelování porušování betonu. Vychází z materiálového modelu *MAT_PSEUDO_TENSOR (typ 16 v programu LS-DYNA) a je k dispozici pouze pro konečné prvky typu SOLID. V programu LS-DYNA je k dispozici také jeho novější verze *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (viz předchozí podkapitola). Vlastnosti materiálového modelu jsou následující:

- umožňuje zohlednit změnu mechanicko fyzikálních vlastností betonu a výztuže v závislosti na rychlosti deformace (rate effects),
- je založený, jak již bylo zmíněno, na třech podmínkách smykového porušení (na mezi vzniku plastických deformací, na mezi pevnosti a na mezi reziduální pevnosti), jejichž matematické vyjádření je uvedeno u příslušných parametrů materiálového modelu, které se ve funkcích těchto podmínek uplatňují, viz *MAT_CONCRETE_DAMAGE
 - popis parametrů funkčních karet,
- je určen pro modelování betonu, tudíž umožňuje modelovat rozdílné mechanicko fyzikální vlastnosti materiálu v tlaku a v tahu,
- umožňuje modelovat porušení betonu (damage effects),
- umožňuje modelovat vyztužení betonu,
- při jeho použití je možné provádět výpočty s dvojitou i jednoduchou přesností, obě varianty poskytují stabilní řešení.

Materiálový model *MAT_CONCRETE_DAMAGE je, jak již bylo zmíněno, určen pro modelování prostého a vyztuženého betonu. V případě, že chce uživatel tento materiálový model použít, musí zadat název materiálového modelu ve vstupním souboru programu LS-DYNA klíčovým slovem *MAT_CONCRETE_DAMAGE. Klíčové slovo *MAT_CONCRETE_DAMAGE přiřadí materiálovému modelu příslušné funkční karty s příslušnými parametry, které musí uživatel zadat pro správnou funkci nelineárního modelu. Materiálový model *MAT_CONCRETE_DAMAGE vyžaduje dále také zadání parametrů funkčních karet, které náleží klíčovému slovu *EOS_TABULATED_COMPACTION,

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

neboli parametrů stavové rovnice, která udává závislost tlaku (znaménko +) na objemové deformaci (přirozený logaritmus relativního objemu $\ln(V/V_0)$, záporná v tlaku) a na základě níž lze vynést křivku, která slouží pro určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu. Parametry náležící klíčovému slovu *EOS_TABULATED_COMPACTION musí uživatel zadat spolu s parametry materiálového modelu, jinak řešič LS-DYNA zahlásí při spuštění výpočtu, že není definována stavová rovnice. Zadání klíčových slov a parametrů příslušných funkčních karet může uživatel buď v programu LS-PrePost nebo v textovém editoru. Funkční karty pro klíčová slova *MAT_CONCRETE_DAMAGE a *EOS_TABULATED_COMPACTION, jak je uvádí manuál [5], jsou znázorněny na obr. 5. 2. 34, 5. 2. 35 a 5. 2. 36.

| Card 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|------|------|------|---|---|---|---|---|
| Variable | MID | R0 | PR | | | | | |
| Type | A8 | F | F | | | | | |
| Default | none | none | none | | | | | |

| Card 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|------|-----|-----|-----|---|---|---|---|
| Variable | SIGF | A0 | A1 | A2 | | | | |
| Type | F | F | F | F | | | | |
| Default | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | | | |

| Card 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Variable | A0Y | A1Y | A2Y | A1F | A2F | B1 | B2 | B3 |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | F |
| Default | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

Obr. 5. 2. 34 Funkční karty 1, 2 a 3 pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_DAMAGE [5]

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | | | | | | | | |
|----------|-----|-----|-----|------|------|------|------|---|
| Card 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | PER | ER | PRR | SIGY | ETAN | LCP | LCR | |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | |
| Default | 0.0 | 0.0 | 0.0 | none | 0.0 | none | none | |

| | | | | | | | | |
|----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Card 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | λ | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 | λ_6 | λ_7 | λ_8 |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | F |
| Default | none | none | none | none | none | none | none | none |

| | | | | | | | | |
|----------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---|---|---|
| Card 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | λ_9 | λ_{10} | λ_{11} | λ_{12} | λ_{13} | | | |
| Type | F | F | F | F | F | | | |
| Default | none | none | none | none | none | | | |

| | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Card 7 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | η_1 | η_2 | η_3 | η_4 | η_5 | η_6 | η_7 | η_8 |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | F |
| Default | none | none | none | none | none | none | none | none |

| | | | | | | | | |
|----------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|---|---|
| Card 8 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | η_9 | η_{10} | η_{11} | η_{12} | η_{13} | | | |
| Type | F | F | F | F | F | | | |
| Default | none | none | none | none | none | | | |

Obr. 5. 2. 35 Funkční karty 4, 5, 6, 7 a 8 pro klíčové slovo

*MAT_CONCRETE_DAMAGE [5]

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

This is Equation of state Form 8.

| | | | | | | | | |
|----------|-------|------|----|----|---|---|---|---|
| Card 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | EOSID | GAMA | E0 | V0 | | | | |
| Type | A8 | F | F | F | | | | |

Parameter Card Pairs. Include one pair of the following two cards for each of VAR = ε_{v_i} , C_i , T_i , and K_i . These cards consist of four additional pairs for a total of 8 additional cards.

| | | | | | | | | | | |
|----------|--------|---|--------|---|--------|---|--------|---|--------|----|
| Card 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Variable | [VAR]1 | | [VAR]2 | | [VAR]3 | | [VAR]4 | | [VAR]5 | |
| Type | F | | F | | F | | F | | F | |

| | | | | | | | | | | |
|----------|--------|---|--------|---|--------|---|--------|---|---------|----|
| Card 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Variable | [VAR]6 | | [VAR]7 | | [VAR]8 | | [VAR]9 | | [VAR]10 | |
| Type | F | | F | | F | | F | | F | |

Obr. 5. 2. 36 Funkční karty pro klíčové slovo *EOS_TABULATED_COMPACTION [5]

*MAT_CONCRETE_DAMAGE → popis parametrů funkčních karet [5]

Použité jednotky: MPa, mm, s, Mg/mm³, N

| Parametr | Popis |
|----------|--|
| MID | Identifikační číslo materiálového modelu. Unikátní číslo, které může obsahovat maximálně 8 číslic a které musí být zadáno z důvodů propojení materiálového modelu s příslušným partem (*PART). Dosazení: MID = 1 |
| RO | Objemová hmotnost betonu (hustota). → nutné zadat Dosazení: RO = 2,4E-9 Mg/mm ³ (prostý beton) |
| PR | Součinitel příčné kontrakce (Poissonovo číslo) betonu. → nutné zadat Dosazení: PR = 0,2 |
| SIGF | Maximální hlavní napětí na mezi porušení. → nutné zadat Dosazení: SIGF = f_{ctm} = 3,2 MPa (beton C 35/45) |
| A0 | Parametr a_0 popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi pevnosti. → nutné zadat |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|-----|--|
| A0 | <p>Funkce podmínky smykového porušení na mezi pevnosti [11]:</p> $\Delta\sigma_m = a_0 + \frac{p}{a_1 + a_2 p} \quad (\text{maximum failure surface})$ <p>Dosazení: A0 = 12,71 MPa (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, obr. 5. 2. 32)</p> |
| A1 | <p>Parametr a₁ popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi pevnosti (viz A0). → nutné zadat</p> <p>Dosazení: A1 = 0,4463 (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, obr. 5. 2. 32)</p> |
| A2 | <p>Parametr a₂ popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi pevnosti (viz A0). → nutné zadat</p> <p>Dosazení: A2 = 0,001879 MPa⁻¹ (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, obr. 5. 2. 32)</p> |
| A0Y | <p>Koeficient a_{0y} popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi vzniku plastických deformací. → nutné zadat</p> <p>Funkce podmínky smykového porušení na mezi vzniku plastických deformací [11]:</p> $\Delta\sigma_y = a_{0y} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y} p} \quad (\text{yield failure surface})$ <p>Dosazení: A0Y = 9,598 MPa (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, obr. 5. 2. 32)</p> |
| A1Y | <p>Koeficient a_{1y} popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi vzniku plastických deformací (viz A0Y). → nutné zadat</p> <p>Dosazení: A1Y = 0,625 (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, obr. 5. 2. 32)</p> |
| A2Y | <p>Koeficient a_{2y} popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi vzniku plastických deformací (viz A0Y). → nutné zadat</p> <p>Dosazení: A2Y = 0,005988 MPa⁻¹ (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, obr. 5. 2. 32)</p> |
| A1F | <p>Koeficient a_{1f} popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi reziduální pevnosti. → nutné zadat</p> <p>Funkce podmínky smykového porušení na mezi reziduální pevnosti [11]:</p> $\Delta\sigma_r = \frac{p}{a_{1f} + a_{2f} p} \quad (\text{residual failure surface})$ |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|-----|---|
| A1F | <p>Dosazení: A1F = 0,4417 (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, obr. 5. 2. 32)</p> |
| A2F | <p>Koeficient a_{2f} popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi reziduální pevnosti (viz A1F). → nutné zadat</p> <p>Dosazení: A2F = 0,002751 MPa⁻¹ (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, obr. 5. 2. 32)</p> |
| B1 | <p>Parametr měřítka pro tlakové porušování b_1. → nutné zadat</p> <p>Dosazení: B1 = 1,6 (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, obr. 5. 2. 32)</p> |
| B2 | <p>Mocnitel měřítka pro tahové porušování b_2. → nutné zadat</p> <p>Dosazení: B2 = 1,35 (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, obr. 5. 2. 32)</p> |
| B3 | <p>Koeficient měřítka pro porušování při třísém tahu b_3. → nutné zadat</p> <p>Dosazení: B3 = 1,15 (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, obr. 5. 2. 32)</p> |
| PER | <p>Parametr udává procentuální množství výztuže. Parametr lze zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou procentuálního množství výztuže, nebo hodnotou 0 (bez vyztužení), nebo lze tento parametr zanechat nevyplněný. V případě nevyplnění parametru je hodnota procentuálního množství výztuže automaticky nastavena na hodnotu 0 (bez vyztužení).</p> <p>Dosazení: PER = 0 (bez vyztužení)</p> |
| ER | <p>Modul pružnosti výztuže. Parametr lze zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou modulu pružnosti výztuže, nebo hodnotou 0 (bez vyztužení), nebo lze tento parametr zanechat nevyplněný. V případě nevyplnění parametru je hodnota modulu pružnosti výztuže automaticky nastavena na hodnotu 0 (bez vyztužení).</p> <p>Dosazení: ER = 0 MPa (bez vyztužení)</p> |
| PRR | <p>Součinitel příčné kontrakce (Poissonovo číslo) výztuže. Parametr lze zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou Poissonova čísla výztuže, nebo hodnotou 0 (bez vyztužení), nebo lze tento parametr zanechat nevyplněný. V případě nevyplnění parametru je hodnota Poissonova čísla výztuže automaticky nastavena na hodnotu 0 (bez vyztužení).</p> <p>Dosazení: PRR = 0 (bez vyztužení)</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|------|---|
| SIGY | <p>Mez kluzu výztuže. Parametr lze zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou meze kluzu výztuže, nebo hodnotou 0 (bez vyztužení), nebo lze tento parametr zanechat nevyplněný. V případě nevyplnění parametru je hodnota meze kluzu výztuže automaticky nastavena na hodnotu 0 (bez vyztužení).</p> <p>Dosazení: SIGY = 0 MPa (bez vyztužení)</p> |
| ETAN | <p>Modul zpevnění výztuže. Parametr lze zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou modulu zpevnění výztuže, nebo hodnotou 0 (bez vyztužení), nebo lze tento parametr zanechat nevyplněný. V případě nevyplnění parametru je hodnota modulu zpevnění výztuže automaticky nastavena na hodnotu 0 (bez vyztužení).</p> <p>Dosazení: ETAN = 0 MPa (bez vyztužení)</p> |
| LCP | <p>Do tohoto parametru se zadává identifikační číslo křivky (LCID) pro zohlednění vlivu rychlosti deformace na vlastnosti hlavního materiálu (beton). Křivka udává závislost násobitele smykové pevnosti, který určuje nárůst smykové pevnosti při dané efektivní rychlosti deformace, na efektivní rychlosti deformace. Při definování křivky se efektivní rychlost deformace zadává od záporných hodnot (tah) do kladných hodnot (tlak) a násobitel smykové pevnosti se zadává se znaménkem (+) a jeho hodnota při nulové efektivní rychlosti deformace musí být 1.</p> <p>V případě, že chce uživatel zohlednit změnu mechanicko fyzikálních vlastností betonu v závislosti na rychlosti deformace (vliv rychlosti deformace), musí křivku pro zohlednění vlivu rychlosti deformace ve vstupním souboru programu LS-DYNA definovat a dále zadat její identifikační číslo do tohoto parametru. V případě, že uživatel nechce zohlednit vliv rychlosti deformace (kvazi-statika), může tento parametr zadat hodnotou 0, nebo jej může zanechat nevyplněný.</p> <p>Dosazení: LCP = 0 (při kvazi-statickém zatěžování); 3 (LCID = 3, při vyšších rychlostech zatěžování)</p> <p>Zadané hodnoty efektivní rychlosti deformace a násobitele smykové pevnosti definující křivku pro zohlednění vlivu rychlosti deformace byly převzaty z literatury [5] a jejich zadání ve vstupním souboru programu LS-DYNA (*.k) je na obr. 5. 2. 28. Grafické znázornění křivky je na</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|---|--|
| LCP | obr 5. 2. 29. Viz *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3. |
| LCR | <p>Do tohoto parametru se zadává identifikační číslo křivky (LCID) pro zohlednění vlivu rychlosti deformace na vlastnosti výztuže.</p> <p>V případě, že chce uživatel zohlednit změnu mechanicko fyzikálních vlastností výztuže v závislosti na rychlosti deformace (vliv rychlosti deformace), musí křivku pro zohlednění vlivu rychlosti deformace ve vstupním souboru programu LS-DYNA definovat a dále zadat její identifikační číslo do tohoto parametru. V případě, že uživatel nechce zohlednit vliv rychlosti deformace (kvazi-statika), může tento parametr zadat hodnotou 0, nebo jej může zanechat nevyplněný. V případě, že uživatel modeluje prostý beton (bez vyztužení), může tento parametr zadat hodnotou 0, nebo jej může zanechat nevyplněný.</p> <p>Dosazení: LCR = 0 (bez vyztužení)</p> |
| $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3,$ $\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6,$ $\lambda_7, \lambda_8, \lambda_9,$ $\lambda_{10}, \lambda_{11},$ $\lambda_{12}, \lambda_{13}$ | <p>Parametry udávající hodnoty funkce porušení ("modifikované" efektivní plastické deformace) $\lambda_1 - \lambda_{13}$ ($\lambda_n < \lambda_{n+1}$). → nutné zadat</p> <p>Hodnoty λ společně s hodnotami η tvoří křivku, která udává závislost η na λ.</p> <p>Dosazení: $\lambda_1 = 0$; $\lambda_2 = 8E-6$; $\lambda_3 = 2,4E-5$; $\lambda_4 = 4E-5$; $\lambda_5 = 5,6E-5$; $\lambda_6 = 7,2E-5$; $\lambda_7 = 8,8E-5$; $\lambda_8 = 3,2E-4$; $\lambda_9 = 5,2E-4$; $\lambda_{10} = 5,7E-4$; $\lambda_{11} = 1$; $\lambda_{12} = 10$; $\lambda_{13} = 1E10$ (hodnoty převzaty z vygenerovaných parametrů modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, obr. 5. 2. 32)</p> |
| $\eta_1, \eta_2, \eta_3,$ $\eta_4, \eta_5, \eta_6,$ $\eta_7, \eta_8, \eta_9,$ $\eta_{10}, \eta_{11},$ η_{12}, η_{13} | <p>Parametry udávající hodnoty faktorů měřítka $\eta_1 - \eta_{13}$ ($\eta \in \langle 0; 1 \rangle$). → nutné zadat</p> <p>Hodnoty λ společně s hodnotami η tvoří křivku, která udává závislost η na λ.</p> <p>Dosazení: $\eta_1 = 0$; $\eta_2 = 0,85$; $\eta_3 = 0,97$; $\eta_4 = 0,99$; $\eta_5 = 1$; $\eta_6 = 0,99$; $\eta_7 = 0,97$; $\eta_8 = 0,5$; $\eta_9 = 0,1$; $\eta_{10} = 0$; $\eta_{11} = 0$; $\eta_{12} = 0$; $\eta_{13} = 0$ (hodnoty převzaty z vygenerovaných parametrů modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, obr. 5. 2. 32)</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

***EOS_TABULATED_COMPACTION → popis parametrů funkčních karet [5]**

Použité jednotky: MPa, mm, s, Mg/mm³, N, mJ

| Parametr | Popis |
|---|--|
| EOSID | Identifikační číslo stavové rovnice. Unikátní číslo, které může obsahovat maximálně 8 číslic a které musí být zadáno z důvodů propojení stavové rovnice s příslušným partem (*PART). Dosazení: EOSID = 1 |
| GAMA | Součinitel γ . → nutné zadat Stavová rovnice udávající závislost tlaku p na objemové deformaci ϵ_v [5]: $p = C(\epsilon_v) + \gamma T(\epsilon_v)E$ Dosazení: GAMA = 0 (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů stavové rovnice *EOS_TABULATED_COMPACTION, obr. 5. 2. 32, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) |
| E0 | Počáteční vnitřní energie. → nutné zadat Dosazení: E0 = 0 mJ (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů stavové rovnice *EOS_TABULATED_COMPACTION, obr. 5. 2. 32, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) |
| V0 | Počáteční relativní objem V/V_0 . → nutné zadat Dosazení: V0 = 1 (hodnota převzata z vygenerovaných parametrů stavové rovnice *EOS_TABULATED_COMPACTION, obr. 5. 2. 32, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) |
| EV1, EV2, EV3, EV4, EV5, EV6, EV7, EV8, EV9, EV10 | Parametry udávající hodnoty objemové deformace ϵ_v , která je dána ve formě přirozeného logaritmu relativního objemu ($\ln(V/V_0)$) a je záporná v tlaku. → nutné zadat Dosazení: EV1 = 0; EV2 = -0,0015; EV3 = -0,0043; EV4 = -0,0101; EV5 = -0,0305; EV6 = -0,0513; EV7 = -0,0726; EV8 = -0,0943; EV9 = -0,174; EV10 = -0,208 (hodnoty převzaty z vygenerovaných parametrů stavové rovnice *EOS_TABULATED_COMPACTION, obr. 5. 2. 32, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) |
| C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, | Parametry udávající hodnoty funkce $C(\epsilon_v)$ (viz GAMA). → nutné zadat Dosazení: C1 = 0 MPa; C2 = 25,866867 MPa; C3 = 56,389771 MPa; C4 = 90,534035 MPa; C5 = 172,01466 MPa; C6 = 259,44467 MPa; |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|--|--|
| C10 | C7 = 368,08551 MPa; C8 = 563,1217 MPa; C9 = 3287,679 MPa; C10 = 5028,519 MPa (hodnoty převzaty z vygenerovaných parametrů stavové rovnice *EOS_TABULATED_COMPACTION, obr. 5. 2. 32, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) |
| T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10 | Parametry udávající hodnoty funkce $T(\epsilon_v)$ (viz GAMA). → nutné zadat Dosažení: T1 = 0; T2 = 0; T3 = 0; T4 = 0; T5 = 0; T6 = 0; T7 = 0; T8 = 0; T9 = 0; T10 = 0 (hodnoty převzaty z vygenerovaných parametrů stavové rovnice *EOS_TABULATED_COMPACTION, obr. 5. 2. 32, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) |
| K1, K2, K3, K4, K5, K6, K7, K8, K9, K10 | Parametry udávající hodnoty objemového modulu pružnosti K. → nutné zadat Dosažení: K1 = 17244,578 MPa; K2 = 17244,578 MPa; K3 = 17486,002 MPa; K4 = 18365,477 MPa; K5 = 21848,881 MPa; K6 = 25349,529 MPa; K7 = 28832,936 MPa; K8 = 31471,355 MPa; K9 = 70806,242 MPa; K10 = 86222,891 MPa (hodnoty převzaty z vygenerovaných parametrů stavové rovnice *EOS_TABULATED_COMPACTION, obr. 5. 2. 32, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) |

Podrobnější informace o materiálovém modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE, především z hlediska teorie modelu, lze nalézt například v literatuře [5] a [11]. Různá zadání parametrů náležících klíčovému slovu (názevu modelu) *MAT_CONCRETE_DAMAGE ve vstupních souborech programu LS-DYNA neboli různá nastavení materiálového modelu pro účely této práce jsou na obr. 5. 2. 37 a 5. 2. 38. Zadání parametrů náležících klíčovému slovu *EOS_TABULATED_COMPACTION ve vstupním souboru programu LS-DYNA neboli nastavení stavové rovnice pro účely této práce je na obr. 5. 2. 39. Křivka pro beton C 35/45, která slouží pro určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu, odpovídá vygenerované křivce uvedené v podkapitole *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 a je tedy znázorněna na obr. 5. 2. 33.

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

```

*MAT_CONCRETE_DAMAGE
$#      mid      ro      pr
      1 2.4000E-9 0.200000
$#      sigf      a0      a1      a2
      3.200000 12.710000 0.446300 0.001879
$#      a0y      a1y      a2y      a1f      a2f      b1      b2      b3
      9.598000 0.625000 0.005988 0.441700 0.002751 1.600000 1.350000 1.150000
$#      per      er      prr      sigy      etan      lcp      lcr
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      0      0
$#lambda-1 lambda-2 lambda-3 lambda-4 lambda-5 lambda-6 lambda-7 lambda-8
      0.000 8.0000E-6 2.4000E-5 4.0000E-5 5.6000E-5 7.2000E-5 8.8000E-5 3.2000E-4
$#lambda-9 lambda-10 lambda-11 lambda-12 lambda-13
      5.2000E-4 5.7000E-4 1.000000 10.0000001.0000E+10
$#      nu-1      nu-2      nu-3      nu-4      nu-5      nu-6      nu-7      nu-8
      0.000 0.850000 0.970000 0.990000 1.000000 0.990000 0.970000 0.500000
$#      nu-9      nu-10      nu-11      nu-12      nu-13
      0.100000      0.000      0.000      0.000      0.000
    
```

Obr. 5. 2. 37 *MAT_CONCRETE_DAMAGE → parametry materiálového modelu při kvazi-statickém a cyklickém zatěžování (soubor *.k, PSPad)

```

*MAT_CONCRETE_DAMAGE
$#      mid      ro      pr
      1 2.4000E-9 0.200000
$#      sigf      a0      a1      a2
      3.200000 12.710000 0.446300 0.001879
$#      a0y      a1y      a2y      a1f      a2f      b1      b2      b3
      9.598000 0.625000 0.005988 0.441700 0.002751 1.600000 1.350000 1.150000
$#      per      er      prr      sigy      etan      lcp      lcr
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000      3      0
$#lambda-1 lambda-2 lambda-3 lambda-4 lambda-5 lambda-6 lambda-7 lambda-8
      0.000 8.0000E-6 2.4000E-5 4.0000E-5 5.6000E-5 7.2000E-5 8.8000E-5 3.2000E-4
$#lambda-9 lambda-10 lambda-11 lambda-12 lambda-13
      5.2000E-4 5.7000E-4 1.000000 10.0000001.0000E+10
$#      nu-1      nu-2      nu-3      nu-4      nu-5      nu-6      nu-7      nu-8
      0.000 0.850000 0.970000 0.990000 1.000000 0.990000 0.970000 0.500000
$#      nu-9      nu-10      nu-11      nu-12      nu-13
      0.100000      0.000      0.000      0.000      0.000
    
```

Obr. 5. 2. 38 *MAT_CONCRETE_DAMAGE → parametry materiálového modelu při vyšších rychlostech zatěžování (soubor *.k, PSPad)

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

```
*EOS_TABULATED_COMPACTION
$#   eosid      gama      e0      vo
      1      0.000      0.000  1.000000
$#   ev1      ev2      ev3      ev4      ev5
      0.000     -0.001500    -0.004300    -0.010100    -0.030500
$#   ev6      ev7      ev8      ev9      ev10
     -0.051300    -0.072600    -0.094300    -0.174000    -0.208000
$#   c1      c2      c3      c4      c5
      0.000     25.866867     56.389771     90.534035    172.01466
$#   c6      c7      c8      c9      c10
     259.44467     368.08551     563.12170    3287.6790    5028.5190
$#   t1      t2      t3      t4      t5
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
$#   t6      t7      t8      t9      t10
      0.000      0.000      0.000      0.000      0.000
$#   k1      k2      k3      k4      k5
     17244.578     17244.578     17486.002     18365.477     21848.881
$#   k6      k7      k8      k9      k10
     25349.529     28832.936     31471.355     70806.242     86222.891
```

Obr. 5. 2. 39 *EOS_TABULATED_COMPACTION → zadané parametry stavové rovnice (soubor *.k, PSPad)

Informace uvedené v této podkapitole byly čerpány ze zdrojů [5] a [11].

5. 2. 6***MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE**

Jedná se o materiálový model, který je v programu LS-DYNA implementován jako typ 111. Tento nelineární materiálový model je určen pro modelování betonových konstrukcí, které jsou vystaveny velkým deformacím, vysokým rychlostem deformace a vysoce intenzivnímu zatížení. Je k dispozici pouze pro konečné prvky typu SOLID. Vlastnosti materiálového modelu jsou následující:

- zohledňuje změnu mechanicko fyzikálních vlastností betonu v závislosti na rychlosti deformace (rate effects),
- je určen pro modelování betonu, tudíž umožňuje modelovat rozdílné mechanicko fyzikální vlastnosti materiálu v tlaku a v tahu,
- umožňuje modelovat porušení betonu (damage effects),
- při jeho použití je možné provádět výpočty s dvojitou i jednoduchou přesností, obě varianty poskytují stabilní řešení.

POPIS MODELU [12]

Ekvivalentní pevnost je v rámci modelu definována jako funkce závislá na tlaku, rychlosti deformace a porušení. Tlak je definován jako funkce závislá na objemové deformaci a zahrnuje efekt permanentního drcení. Akumulace porušení je definována jako funkce závislá na plastické objemové deformaci, ekvivalentní plastické deformaci a tlaku. Kohezivní složka ekvivalentní pevnosti degraduje s akumulací porušení. Normalizované ekvivalentní napětí σ^* je definováno jako:

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{f_c} = [A \cdot (1-D) + B \cdot P^{*N}] \cdot [1 + C \cdot \ln(\dot{\epsilon}^*)]$$

- kde
- σ aktuální ekvivalentní napětí,
 - f_c kvazi-statická pevnost betonu v jednoosém tlaku,
 - A normalizovaná kohezivní pevnost,
 - B normalizovaný koeficient zpevnění,
 - P^* normalizovaný tlak, $P^* = P/f_c$,
 - P aktuální tlak,
 - N mocnitel zpevnění,
 - C koeficient rychlosti deformace,
 - $\dot{\epsilon}^*$ bezrozměrná rychlost deformace, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$,
 - $\dot{\epsilon}$ aktuální rychlost deformace,
 - $\dot{\epsilon}_0$ referenční rychlost deformace, $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$.

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

Parametr porušení D ($0 \leq D \leq 1$) je definován jako:

$$D = \Sigma \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{D1 \cdot (P^* + T^*)^{D2}}$$

kde $\Delta \varepsilon_p$ ekvivalentní plastická deformace,
 $\Delta \mu_p$ plastická objemová deformace,
 $D1$ konstanta porušení 1,
 $D2$ konstanta porušení 2,
 T^* normalizované maximální hydrostatické tahové napětí, $T^* = T/f'_c$,
 T maximální hydrostatické tahové napětí.

Tlak P pro zcela stlačený beton (všechny vzduchové dutiny jsou odstraněny) je definován jako:

$$P = K1 \cdot \mu' + K2 \cdot \mu'^2 + K3 \cdot \mu'^3$$

kde $K1$ konstanta 1 (objemový modul 1),
 $K2$ konstanta 2 (objemový modul 2),
 $K3$ konstanta 3 (objemový modul 3),
 μ' modifikovaná objemová deformace, $\mu' = (\mu - \mu_{lock}) / (1 + \mu_{lock})$,
 μ standardní objemová deformace, $\mu = \rho / \rho_0 - 1$,
 μ_{lock} objemová deformace (locking), $\mu_{lock} = \rho_{grain} / \rho_0 - 1$,
 ρ aktuální hustota,
 ρ_0 počáteční hustota,
 ρ_{grain} hustota zrn kameniva.

Pevnost DS je definována v tlaku, kdy $P^* > 0$, jako:

$$DS = f'_c \cdot \min[SFMAX; A \cdot (1-D) + B \cdot P^{*N}] \cdot [1 + C \cdot \ln(\varepsilon^*)]$$

a v tahu, kdy $P^* < 0$, jako:

$$DS = f'_c \cdot \max \left[0; A \cdot (1-D) - A \cdot \left(\frac{P^*}{T} \right) \right] \cdot [1 + C \cdot \ln(\varepsilon^*)]$$

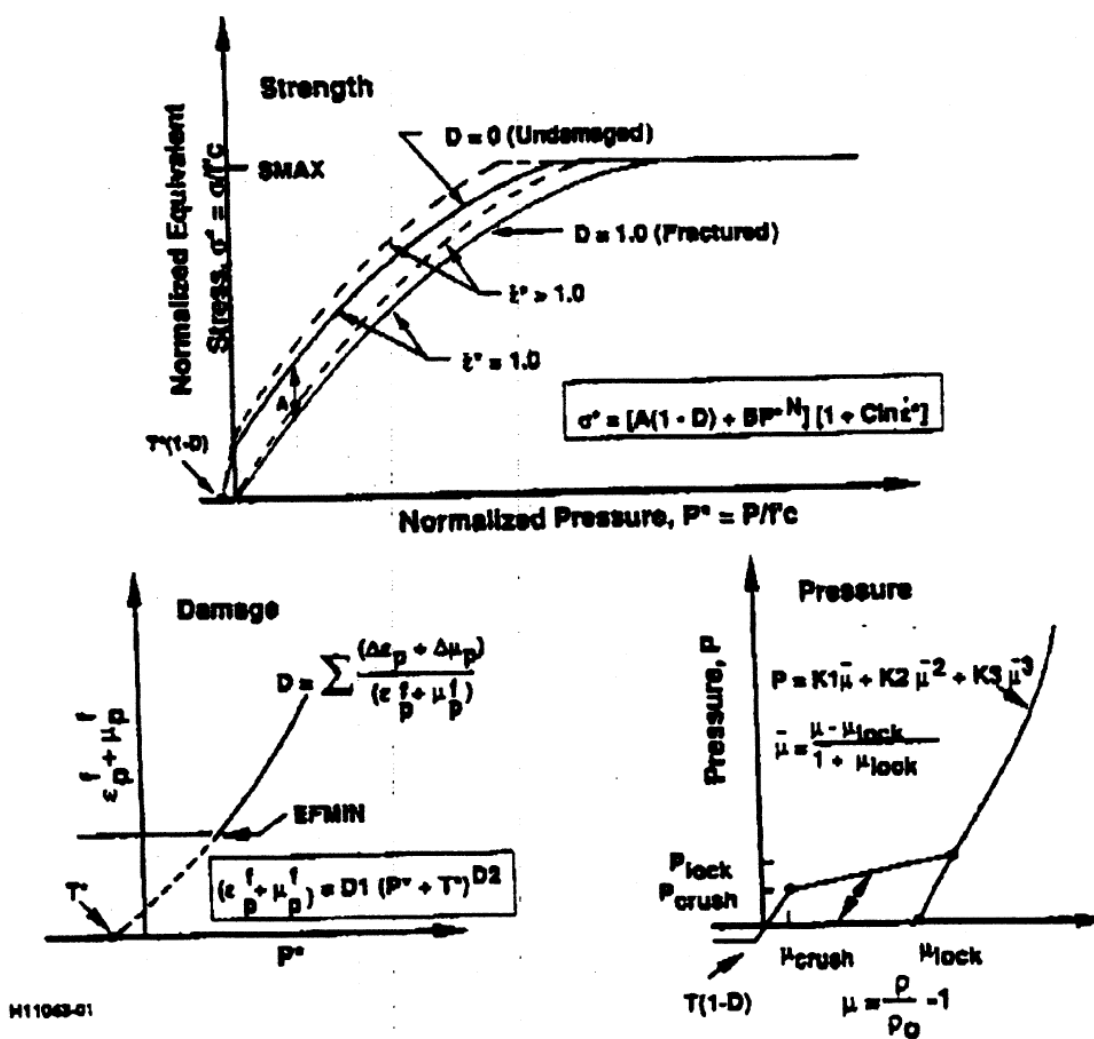
kde $SFMAX$ normalizovaná maximální pevnost.

Uvedené vztahy popisují chování materiálového modelu. Konstanty v uvedených vztazích tvoří parametry materiálového modelu a určují se na základě experimentálních testů. Více informací o experimentálním určování parametrů materiálového modelu lze nalézt v literatuře [12]. Grafický popis modelu je na obr. 5. 2. 40.

Materiálový model *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE je, jak již bylo zmíněno, určen pro modelování betonu. V případě, že chce uživatel tento materiálový

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

model použít, musí zadat název materiálového modelu ve vstupním souboru programu LS-DYNA klíčovým slovem *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE. Klíčové slovo *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE přiřadí materiálovému modelu příslušné funkční karty s příslušnými parametry, které musí uživatel zadat pro správnou funkci nelineárního modelu. Zadání klíčového slova a parametry příslušných funkčních karet může uživatel buď v programu LS-PrePost nebo v textovém editoru. Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE, jak je uvádí manuál [5], jsou znázorněny na obr. 5. 2. 41.



Obr. 5. 2. 40 Grafický popis modelu *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE [12]

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | | | | | | | | |
|----------|-----|----|---|---|---|---|---|----|
| Card 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | MID | RO | G | A | B | C | N | FC |
| Type | A8 | F | F | F | F | F | F | F |

| | | | | | | | | |
|----------|---|------|-------|-------|----|----|----|----|
| Card 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | T | EPS0 | EFMIN | SFMAX | PC | UC | PL | UL |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | F |

| | | | | | | | | |
|----------|----|----|----|----|----|----|---|---|
| Card 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | D1 | D2 | K1 | K2 | K3 | FS | | |
| Type | F | F | F | F | F | F | | |

Obr. 5. 2. 41 Funkční karty pro klíčové slovo

*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE [5]

***MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE → popis parametrů funkčních karet [5]**

Použité jednotky: MPa, mm, s, Mg/mm³, N

| Parametr | Popis |
|----------|--|
| MID | Identifikační číslo materiálového modelu. Unikátní číslo, které může obsahovat maximálně 8 číslic a které musí být zadáno z důvodů propojení materiálového modelu s příslušným partem (*PART). Dosazení: MID = 1 |
| RO | Objemová hmotnost betonu (hustota). → nutné zadat Dosazení: RO = 2,4E-9 Mg/mm ³ (prostý beton) |
| G | Modul pružnosti betonu ve smyku. → nutné zadat Dosazení: $G = E_{cm}/(2 \cdot (1+\nu)) = 33500/(2 \cdot (1+0,2)) = 13960$ MPa (C 35/45) |
| A | Normalizovaná kohezivní pevnost. → nutné zadat Dosazení: A = 0,79 (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f'_c = 48$ MPa \approx 43 MPa a byla převzata z literatury [12]) |
| B | Normalizovaný koeficient zpevnění. → nutné zadat Dosazení: B = 1,6 (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|-------|---|
| B | jednoosém tlaku $f_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12]) |
| C | Koeficient rychlosti deformace. → nutné zadat Dosazení: $C = 0,007$ (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12]) |
| N | Mocnitel zpevnění. → nutné zadat Dosazení: $N = 0,61$ (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12]) |
| FC | Kvazi-statická pevnost betonu v jednoosém tlaku f_c . → nutné zadat Dosazení: $FC = f_c = f_{cm} = 43 \text{ MPa}$ (beton C 35/45) |
| T | Maximální hydrostatické tahové napětí. → nutné zadat Dosazení: $T = f_{ctm} = 3,2 \text{ MPa}$ (beton C 35/45) |
| EPS0 | Referenční rychlost deformace $\dot{\epsilon}'_0$. → nutné zadat Dosazení: $EPS0 = \dot{\epsilon}'_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ (hodnota převzata z literatury [12]) |
| EFMIN | Hodnota plastické poměrné deformace bezprostředně před porušením. → nutné zadat Dosazení: $EFMIN = 0,01$ (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12]) |
| SFMAX | Normalizovaná maximální pevnost. → nutné zadat Dosazení: $SFMAX = 7$ (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12]) |
| PC | Tlak P_{crush} , při jehož překročení začne docházet k drcení betonu. → nutné zadat Dosazení: $PC = 16 \text{ MPa}$ (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12]) |
| UC | Objemová deformace μ_{crush} , při jejímž překročení začne docházet k drcení betonu. → nutné zadat Dosazení: $UC = 0,001$ (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12]) |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|----|--|
| PL | <p>Tlak P_{lock} (locking). → nutné zadat</p> <p>Dosazení: PL = 800 MPa (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f'_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12])</p> |
| UL | <p>Objemová deformace μ_{lock} (locking). → nutné zadat</p> <p>Dosazení: UL = 0,1 (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f'_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12])</p> |
| D1 | <p>Konstanta porušení 1. → nutné zadat</p> <p>Dosazení: D1 = 0,04 (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f'_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12])</p> |
| D2 | <p>Konstanta porušení 2. → nutné zadat</p> <p>Dosazení: D2 = 1 (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f'_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12])</p> |
| K1 | <p>Konstanta 1 (objemový modul 1). → nutné zadat</p> <p>Dosazení: K1 = 85000 MPa (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f'_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12])</p> |
| K2 | <p>Konstanta 2 (objemový modul 2). → nutné zadat</p> <p>Dosazení: K2 = -1,71E5 MPa (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f'_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12])</p> |
| K3 | <p>Konstanta 3 (objemový modul 3). → nutné zadat</p> <p>Dosazení: K3 = 2,08E5 MPa (hodnota odpovídá kvazi-statické pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f'_c = 48 \text{ MPa} \approx 43 \text{ MPa}$ a byla převzata z literatury [12])</p> |
| FS | <p>Parametr umožňuje modelovat porušení betonu prostřednictvím vypadávání porušených konečných prvků z výpočtu. Pokud je FS < 0, prvky z výpočtu vypadávají ve chvíli, kdy pevnost DS na prvcích je menší než 0 (DS < 0). Pokud je FS = 0, prvky z výpočtu vypadávají ve chvíli, kdy je součet normalizovaného tlaku P^* s normalizovaným maximálním hydrostatickým tahem T^* na prvcích menší nebo roven 0 ($P^*+T^* \leq 0$). Pokud je FS > 0, prvky z výpočtu vypadávají ve chvíli, kdy</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|----|---|
| FS | je efektivní plastická deformace na prvcích větší než FS ($> FS$). V případě nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na hodnotu 0. Dosazení: FS = 0 (1. varianta výpočtu); 0,01 (2. varianta výpočtu) |
|----|---|

Podrobnější informace o nelineárním materiálovém modelu *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE, především z hlediska teorie modelu, lze nalézt například v literatuře [5] a [12]. Různá zadání parametrů náležících klíčovému slovu (názvu modelu) *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE ve vstupních souborech programu LS-DYNA neboli různá nastavení materiálového modelu pro účely této práce jsou na obr. 5. 2. 42 a 5. 2. 43.

```
*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE
$#      mid      ro      g      a      b      c      n      fc
      1 2.4000E-9 13960.000 0.790000 1.600000 0.007000 0.610000 43.000000
$#      t      eps0      efmin      sfmax      pc      uc      pl      ul
3.200000 1.000000 0.010000 7.000000 16.000000 0.001000 800.00000 0.100000
$#      d1      d2      k1      k2      k3      fs
0.040000 1.000000 85000.000 -1.710E+5 2.0800E+5 0.000
```

Obr. 5. 2. 42 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE → zadané parametry materiálového modelu → 1. varianta výpočtu (soubor *.k, PSPad)

```
*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE
$#      mid      ro      g      a      b      c      n      fc
      1 2.4000E-9 13960.000 0.790000 1.600000 0.007000 0.610000 43.000000
$#      t      eps0      efmin      sfmax      pc      uc      pl      ul
3.200000 1.000000 0.010000 7.000000 16.000000 0.001000 800.00000 0.100000
$#      d1      d2      k1      k2      k3      fs
0.040000 1.000000 85000.000 -1.710E+5 2.0800E+5 0.01
```

Obr. 5. 2. 43 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE → zadané parametry materiálového modelu → 2. varianta výpočtu (soubor *.k, PSPad)

Informace uvedené v této podkapitole byly čerpány ze zdrojů [5] a [12].

5. 2. 7***MAT_CONCRETE_EC2**

Jedná se o materiálový model, který je v programu LS-DYNA implementován jako typ 172. Tento nelineární materiálový model je určen pro modelování buď pouze prostého betonu, nebo pouze betonářské výztuže, nebo vyztuženého betonu (kombinace betonu a betonářské výztuže), kdy je výztuž modelována jako rozetřená, a je k dispozici pro konečné prvky typu SHELL a BEAM (Hughes-Liu beam → nastavení ELFORM = 1 v *SECTION_BEAM). Model zohledňuje efekt vzniku trhlin v betonu v oblasti tahových napětí, efekt drcení betonu v oblasti tlakových napětí, efekt plastického přetváření výztuže se zpevňováním a kolaps výztuže. Obsahuje značné množství parametrů, přičemž některé z nich jsou již definovány výchozími hodnotami, které jsou implementovány v materiálovém modelu (viz *MAT_CONCRETE_EC2 → popis parametrů funkčních karet) a které může uživatel měnit dle vlastní potřeby. V tom důsledku uživatel nemusí pro rozumnou funkci modelu zadávat všechny parametry. Rozumné výsledky může uživatel při použití tohoto modelu získat, i když zadá pouze parametry RO, FC a FT v případě modelování prostého betonu. V případě, že je modelována pouze nebo také betonářská výztuž, může uživatel získat rozumné výsledky, i když zadá pouze parametry YMREINF, SUREINF, FRACRX a FRACRY. Vlastnosti materiálového modelu jsou následující [5]:

→ chování betonu je v rámci modelu definováno takto:

- Pracovní diagram charakterizující chování betonu v tlaku a tahu je specifikován dle EC2 (Eurokód 2), viz obr. 5. 2. 44.
- Ke vzniku trhliny v betonu dochází v okamžiku, kdy maximální hlavní normálové napětí (od ohybu a od membránových účinků) překročí v daném místě pevnost betonu v jednoosém tahu FT. Od tohoto okamžiku se trhlina začne rozevírat, což způsobí v daném místě postupný pokles normálového napětí v tahu společně s přírůstkem tahové poměrné deformace (tento jev je znám jako tahové změkčování). Model popisuje tahové změkčování prostřednictvím bilineární funkce (výchozí nastavení). Nicméně v rámci modelu může být uplatněna také lineární funkce tahového změkčení a to v případě, že uživatelské nastavení parametrů je ESOFT > 0 a ECUTEN = 0. Funkce tahového změkčení jsou znázorněny na obr. 5. 2. 45.
- Chování betonu v tlaku se nejprve řídí následující funkcí, která je definována v EC2:

$$\sigma = FC_{\max} \cdot \left[\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cl}} \right) \cdot \frac{3}{2 + (\varepsilon/\varepsilon_{cl})^3} \right]$$

kde σ normálové napětí v tlaku,

ε_{cl} poměrné přetvoření, při kterém je dosažena pevnost betonu v tlaku FC_{max} ,

FC_{max} pevnost betonu v tlaku.

Počáteční modul pružnosti je dán vztahem $E = 3.FC_{max}/(2.\varepsilon_{cl})$. Po dosažení pevnosti betonu v tlaku FC_{max} začne normálové napětí v tlaku postupně lineárně klesat společně s nárůstem tlakové poměrné deformace až do dosažení nulové hodnoty napětí při mezní tlakové poměrné deformaci ε_{cu} , viz obr. 5. 2. 44. V případě víceosé napjatosti dochází k nárůstu pevnosti betonu v tlaku a k dalším změnám v rámci pracovního diagramu betonu v tlaku. Model umožňuje v rámci uživatelského nastavení parametrů tuto skutečnost zohlednit (obr. 5. 2. 46). V takovém případě se hodnoty poměrných deformací ε_{cl} , ε_{cu} a ε_{csp} (viz obr. 5. 2. 46) stanovují dle vztahů:

$$\varepsilon_{cl} = 0,002. \left[1 + 5. \left(\frac{FCC6}{FC} - 1 \right) \right]$$

$$\varepsilon_{cu} = 1,1. \varepsilon_{cl}$$

$$\varepsilon_{csp} = \varepsilon_{cu} + \frac{FCC}{E}$$

kde FC pevnost betonu v jednoosém tlaku,

$FCC6$ pevnost betonu ve víceosém tlaku.

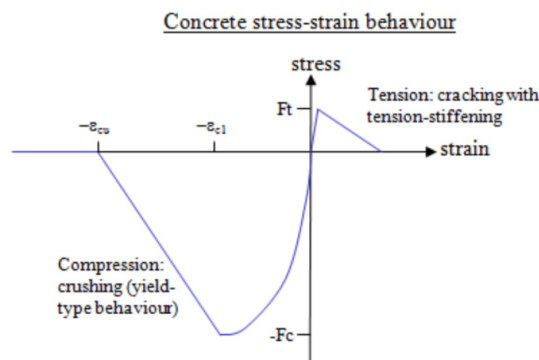
- Degradace tuhosti podrceného betonu při odtěžování v rámci modelu závisí na uživatelském nastavení parametru UNLFAC (obr. 5. 2. 47).
- Degradace pevnosti betonu v tlaku v důsledku vzniku trhlin v oblasti tahových napětí v betonu je uživatelsky volitelným prvkem modelu.,

→ umožňuje zohlednit citlivost betonu a výztuže na změnu teploty → materiálový model může být použit pro analýzu účinků požáru. Hodnoty parametrů modelu popisujících chování betonu a výztuže v tlaku a tahu se zadávají pro běžnou teplotu 20 °C. Jejich změna vlivem vyšších teplot může být zohledněna prostřednictvím uživatelského nastavení parametrů modelu, které slouží pro zohlednění vlivu teploty. Vlastnosti materiálového modelu pro zohlednění vlivu teploty jsou převzaty z EC2 (Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru). V rámci modelu je možné jejich přepsání uživatelsky definovanými vlastnostmi pro zohlednění vlivu teploty.,

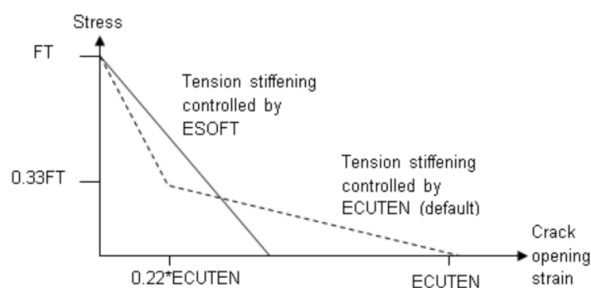
→ umožňuje modelovat vyztužení betonu, nebo pouze betonářskou výztuž,

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

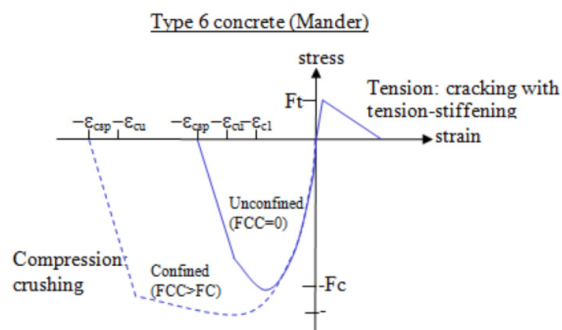
→ při jeho použití je možné provádět výpočty s dvojitou i jednoduchou přesností, obě varianty poskytují stabilní řešení.



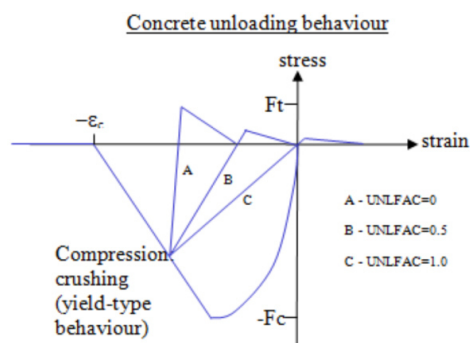
Obr. 5. 2. 44 Pracovní diagram betonu v tlaku a tahu, *MAT_CONCRETE_EC2 [5]



Obr. 5. 2. 45 Funkce tahového změkčení, *MAT_CONCRETE_EC2 [5]



Obr. 5. 2. 46 Pracovní diagram betonu v tlaku a tahu, víceosá napjatost v tlaku, *MAT_CONCRETE_EC2 [5]



Obr. 5. 2. 47 Chování betonu při odtěžování, *MAT_CONCRETE_EC2 [5]

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

Materiálový model *MAT_CONCRETE_EC2 je, jak již bylo zmíněno, určen pro modelování prostého betonu nebo vyztuženého betonu nebo betonářské výztuže. V případě, že chce uživatel tento materiálový model použít, musí zadat název materiálového modelu ve vstupním souboru programu LS-DYNA klíčovým slovem *MAT_CONCRETE_EC2. Klíčové slovo *MAT_CONCRETE_EC2 přiřadí materiálovému modelu příslušné funkční karty s příslušnými parametry, které musí uživatel zadat pro správnou funkci nelineárního modelu, přičemž v tomhle případě jsou již některé parametry definovány výchozími hodnotami, které ovšem může uživatel změnit. Zadání klíčového slova a parametry příslušných funkčních karet může uživatel buď v programu LS-PrePost nebo v textovém editoru. Klíčovému slovu (materiálovému modelu) *MAT_CONCRETE_EC2 náleží celkem osm funkčních karet, přičemž první čtyři karty jsou základní a jejich parametry musí být zadány. Aktivace zbývajících čtyř karet závisí na parametrech AOPT, ISHCHK a TYPEC, které jsou součástí prvních čtyř karet. Vzhledem k tomu, že pro účely této práce byly při použití materiálového modelu *MAT_CONCRETE_EC2 parametry AOPT, ISHCHK a TYPEC nastaveny tak, že nedocházelo k uplatnění funkčních karet 5, 6, 7 a 8, jsou v této podkapitole uvedeny pouze funkční karty 1, 2, 3 a 4 náležící klíčovému slovu *MAT_CONCRETE_EC2 a popsány pouze parametry těchto čtyř funkčních karet. Funkční karty 1, 2, 3 a 4 pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_EC2, jak je uvádí manuál [5], jsou znázorněny na obr. 5. 2. 48 a 5. 2. 49.

| Card 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|------|------|------|-----|-------|-------|--------|------|
| Variable | MID | R0 | FC | FT | TYPEC | UNITC | ECUTEN | FCC6 |
| Type | A8 | F | F | F | F | F | F | F |
| Default | none | none | none | 0.0 | 1.0 | 1.0 | 0.0025 | FC |

| Card 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|-----------|-------|-----|--------|-------------------|--------|-------|-------|
| Variable | ESOFT | LCHAR | MU | TAUMXF | TAUMXC | ECRAGG | AGGSZ | UNITL |
| Type | F | F | F | F | F | F | F | F |
| Default | See notes | 0.0 | 0.4 | 1.E20 | $1.161 \times FT$ | .001 | 0.0 | 1.0 |

Obr. 5. 2. 48 Funkční karty 1 a 2 pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_EC2 [5]

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| Card 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|---------|---------|---------|-------|--------|-------|-------|--------|
| Variable | YMREINF | PRREINF | SUREINF | TYPER | FRACRX | FRACY | LCRSU | LCALPS |
| Type | F | F | F | F | F | F | I | I |
| Default | none | 0.0 | 0.0 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | none | none |

| Card 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------|------|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Variable | AOPT | ET36 | PRT36 | ECUT36 | LCALPC | DEGRAD | ISHCHK | UNLFAC |
| Type | F | F | F | F | I | F | I | F |
| Default | 0.0 | 0.0 | 0.25 | 1.E20 | none | 0.0 | 0 | 0.5 |

Obr. 5. 2. 49 Funkční karty 3 a 4 pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_EC2 [5]

*MAT_CONCRETE_EC2 → popis parametrů funkčních karet [5]

Použité jednotky: MPa, mm, s, Mg/mm³, N

| Parametr | Popis |
|----------|--|
| MID | Identifikační číslo materiálového modelu. Unikátní číslo, které může obsahovat maximálně 8 číslic a které musí být zadáno z důvodů propojení materiálového modelu s příslušným partem (*PART). Dosazení: MID = 1 |
| RO | Objemová hmotnost betonu (hustota). → nutné zadat Dosazení: RO = 2,4E-9 Mg/mm ³ (prostý beton) |
| FC | Pevnost betonu v jednoosém tlaku (v jednotkách mechanického napětí). → nutné zadat Dosazení: FC = f_{cm} = 43 MPa (beton C 35/45) |
| FT | Pevnost betonu v jednoosém tahu neboli tahové normálové napětí, při jehož překročení dojde ke vzniku trhlin v betonu. → nutné zadat Dosazení: FT = f_{ctm} = 3,2 MPa (beton C 35/45) |
| TYPEC | Tento parametr slouží k nastavení typu kameniva v betonu, které určuje vzájemný vztah mezi napětím, poměrnou deformací a teplotou pro beton. Na výběr je osm možností: 1: Křemičité kamenivo (výchozí nastavení), vzájemný vztah z Draft EC2 |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|--------|---|
| TYPEC | <p>ANNEX.</p> <p>2: Vápenaté kamenivo, vzájemný vztah z Draft EC2 ANNEX.</p> <p>3: Kamenivo není citlivé na změnu teploty, využití parametrů ET36, PRT36 a ECUT36 (viz obr. 5. 2. 44).</p> <p>4: Lehké kamenivo.</p> <p>5: Vyztužení vlákny.</p> <p>6: Kamenivo není citlivé na změnu teploty, algoritmus dle Mandera (viz obr. 5. 2. 46).</p> <p>7: Křemičité kamenivo, vzájemný vztah z EC2 2004.</p> <p>8: Vápenaté kamenivo, vzájemný vztah z EC2 2004.</p> <p>V programu LS-PrePost v. 4.0 nelze zadat možnosti 7 a 8, lze je zadat pouze v textové editoru.</p> <p>Dosazení: TYPEC = 3</p> |
| UNITC | <p>Převodní faktor pro převod jednotky mechanického napětí používané uživatelem na megapascaly [MPa] (převodní faktor je využit v případě aktivace kontroly smykové kapacity → ISHCHK = 1).</p> <p>Příklad: Pokud je jednotka mechanického napětí používaná uživatelem pascal (1 Pa = 1E-6 MPa), tak UNITC = 1E-6.</p> <p>Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na UNITC = 1.</p> <p>Dosazení: UNITC = 1 (používaná jednotka mechanického napětí je MPa)</p> |
| ECUTEN | <p>Tahová poměrná deformace při maximálním otevření trhliny → využije se při uplatnění bilineární funkce tahového změkčení, viz obr. 5. 2. 45 (výchozí nastavení). Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na ECUTEN = 0,0025. Při ESOFT > 0 se zde dosazuje hodnota 0.</p> <p>Dosazení: ECUTEN = 0,0025 (ESOFT = 0)</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|--------|--|
| FCC6 | <p>Pevnost betonu ve víceosém tlaku. Tento parametr se uplatňuje pouze při TYPEC = 6. Parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou pevnosti betonu ve víceosém tlaku, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota pevnosti betonu ve víceosém tlaku automaticky nastavena na FCC6 = FC.</p> <p>Dosazení: FCC6 = 0 (TYPEC ≠ 6 → parametr se neuplatní)</p> |
| ESOFT | <p>Parametr pro uplatnění lineární funkce tahového změkčení → zadává se zde sklon přímky, která znázorňuje lineární tahové změkčení po vzniku trhlin, v diagramu závislosti napětí na poměrné deformaci (viz obr. 5. 2. 45). V případě, že uživatel zadá hodnotu parametru ESOFT > 0, se uplatní lineární funkce tahového změkčení při popisu chování betonu v tahu po vzniku trhlin. V případě dosazení hodnoty 0 do parametru ESOFT nebo nevyplnění parametru ESOFT se uplatní bilineární funkce tahového změkčení, přičemž musí být zadán parametr ECUTEN.</p> <p>Dosazení: ESOFT = 0 (uplatnění bilineární funkce tahového změkčení)</p> |
| LCHAR | <p>Charakteristická délka, na které se uplatňuje parametr ESOFT, neboli také vzdálenost trhlin v aggregate-interlock výpočtech. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na LCHAR = 0.</p> <p>Dosazení: LCHAR = 0</p> |
| MU | <p>Součinitel tření mezi ploškami trhliny (maximální smykové napětí = MU x tlakové normálové napětí). Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou součinitele tření, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota součinitele tření automaticky nastavena na MU = 0,4.</p> <p>Dosazení: MU = 0,4</p> |
| TAUMXF | <p>Maximální smykové napětí na ploškách trhliny. Tento parametr se uplatňuje pouze při AGGSZ = 0. Parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|--------|--|
| TAUMXF | <p>tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na TAUMXF = 1E20 MPa.</p> <p>Dosazení: TAUMXF = 1E20 MPa (AGGSZ = 0)</p> |
| TAUMXC | <p>Maximální smykové napětí po tloušťce desky po vzniku trhlin. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na TAUMXC = 1,161.FT.</p> <p>Dosazení: TAUMXC = 1,161.FT = 1,161.3,2 = 3,7152 MPa</p> |
| ECRAGG | <p>Poměrná deformace pro aggregate-interlock výpočet. Tento parametr se uplatňuje pouze při AGGSZ = 0. Parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na ECRAGG = 0,001.</p> <p>Dosazení: ECRAGG = 0,001 (AGGSZ = 0)</p> |
| AGGSZ | <p>Velikost kameniva v betonu (zadáva se v jednotkách délky; uplatňuje se v aggregate-interlock vztahu, který je převzat z norské normy NS3473).</p> <p>Pokud je AGGSZ > 0, pro stanovení maximálního smykového napětí τ_{max}, které může být přenášeno přes trhlinu, se použije aggregate-interlock vztah z norské normy NS3473. Pokud je AGGSZ = 0, pro stanovení maximálního smykového napětí τ_{max} se použije vztah:</p> $\tau_{max} = \frac{TAUMXC}{1 + \frac{\epsilon_{cro}}{ECRAGG}} + \min(MU \cdot \sigma_{comp}; TAUMXF)$ <p>ϵ_{cro} poměrná deformace při otevření trhliny, σ_{comp} tlakové normálové napětí, které je přenášeno přes trhlinu (jeho hodnota je nulová při maximálním otevření trhliny).</p> <p>Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na AGGSZ = 0.</p> <p>Dosazení: AGGSZ = 0</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|---------|--|
| UNITL | <p>Převodní faktor pro převod jednotky délky používané uživatelem na milimetry [mm] (převodní faktor je využit, pokud je $AGGSZ > 0$).</p> <p>Příklad: Pokud je jednotka délky používaná uživatelem metr (1 m = 1000 mm), tak $UNITL = 1000$.</p> <p>Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na $UNITL = 1$.</p> <p>Dosazení: $UNITL = 0$ ($AGGSZ = 0 \rightarrow$ převodní faktor není využit)</p> |
| YMREINF | <p>Modul pružnosti výztuže. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou modulu pružnosti výztuže, nebo hodnotou 0 (bez vyztužení), nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě nevyplnění parametru je hodnota modulu pružnosti výztuže automaticky nastavena na $YMREINF = 0$ (bez vyztužení).</p> <p>Dosazení: $YMREINF = 0$ MPa (bez vyztužení)</p> |
| PRREINF | <p>Součinitel příčné kontrakce (Poissonovo číslo) výztuže. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou Poissonova čísla výztuže, nebo hodnotou 0 (bez vyztužení), nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě nevyplnění parametru je hodnota Poissonova čísla výztuže automaticky nastavena na $PRREINF = 0$ (bez vyztužení).</p> <p>Dosazení: $PRREINF = 0$ (bez vyztužení)</p> |
| SUREINF | <p>Maximální možné napětí ve výztuži (mez pevnosti výztuže). Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou maximálního napětí ve výztuži, nebo hodnotou 0 (bez vyztužení), nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě nevyplnění parametru je hodnota maximálního napětí ve výztuži automaticky nastavena na $SUREINF = 0$ (bez vyztužení).</p> <p>Dosazení: $SUREINF = 0$ MPa (bez vyztužení)</p> |
| TYPER | <p>Tento parametr slouží k nastavení typu výztuže pro určení vzájemného vztahu mezi napětím, poměrnou deformací a teplotou pro výztuž.</p> <p>Na výběr je sedm možností:</p> <p>1: Za tepla válcovaná betonářská výztuž (výchozí nastavení), vzájemný</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|--------|---|
| TYPER | <p>vztah z Draft EC2 Annex.</p> <p>2: Za studena tvářená betonářská výztuž, vzájemný vztah z Draft EC2 Annex.</p> <p>3: Předpínací výztuž ze zušlechtěné oceli.</p> <p>4: Za studena tvářená předpínací výztuž.</p> <p>5: Výztuž není citlivá na změnu teploty, využití parametru LCRSU.</p> <p>7: Za tepla válcovaná betonářská výztuž, vzájemný vztah z EC2 2004.</p> <p>8: Za studena tvářená betonářská výztuž, vzájemný vztah z EC2 2004.</p> <p>V programu LS-PrePost v. 4.0 nelze zadat možnosti 7 a 8, lze je zadat pouze v textové editoru.</p> <p>Dosazení: TYPER = 1</p> |
| FRACRX | <p>Procentuální množství výztuže ve směru osy x.</p> <p>Příklad: Pokud je procentuální množství výztuže ve směru osy x 1 %, tak FRACRX = 0,01.</p> <p>Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0 (bez vyztužení), nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na FRACRX = 0 (bez vyztužení).</p> <p>Dosazení: FRACRX = 0 (bez vyztužení)</p> |
| FRACRY | <p>Procentuální množství výztuže ve směru osy y.</p> <p>Příklad: Pokud je procentuální množství výztuže ve směru osy y 1 %, tak FRACRY = 0,01.</p> <p>Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0 (bez vyztužení), nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na FRACRY = 0 (bez vyztužení).</p> <p>Dosazení: FRACRY = 0 (bez vyztužení)</p> |
| LCRSU | <p>Do tohoto parametru se zadává identifikační číslo křivky (LCID), která udává závislost násobitele parametru SUREINF na plastické poměrné deformaci a kterou musí uživatel zadat ve vstupním souboru programu LS-DYNA v případě, že je TYPER = 5 (touto křivkou se přemaže pracovní diagram výztuže z EC2, který je implementován v materiálovém</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|--------|---|
| LCRSU | <p>modelu). Pokud je TYPER \neq 5, je možné tento parametr zadat buď hodnotou 0, nebo je možné jej zanechat nevyplněný.</p> <p>Dosazení: LCRSU = 0 (TYPER \neq 5)</p> |
| LCALPS | <p>Do tohoto parametru se zadává identifikační číslo křivky (LCID), která udává závislost součinitele teplotní roztažnosti výztuže na teplotě (touto křivkou se přemaže křivka z EC2, která udává závislost součinitele teplotní roztažnosti výztuže na teplotě a která je implementována v materiálovém modelu). V případě, že uživatel chce přepsat křivku implementovanou v modelu svou vlastní křivkou, musí tuto křivku zadat ve vstupním souboru programu LS-DYNA a dále musí do tohoto parametru zadat její identifikační číslo. V případě, že uživatel nechce přepsat křivku implementovanou v modelu, může tento parametr zadat hodnotou 0, nebo jej může zanechat nevyplněný.</p> <p>Dosazení: LCALPS = 0 (ponechána křivka z EC2)</p> |
| AOPT | <p>Parametr umožňuje zadat možnosti materiálových os.</p> <p>Celkem jsou k dispozici čtyři možnosti:</p> <p>0: Lokální ortotropie s materiálovými osami stanovenými na základě uzlů 1, 2 a 4 prvku a dále otáčenými kolem normály skořepinového prvku o úhel BETA (výchozí nastavení).</p> <p>2: Globální ortotropie s materiálovými osami stanovenými na základě definovaných vektorů.</p> <p>3: Lokálně ortotropní materiálové osy stanovené rotací materiálových os kolem normály skořepinového prvku pod úhlem BETA od přímky v rovině skořepinového prvku, která je definována jako součin vektoru V s normálou skořepinového prvku.</p> <p>< 0: Parametr je ignorován.</p> <p>Dosazení: AOPT = -0,01</p> |
| ET36 | <p>Modul pružnosti betonu. Pokud je TYPEC = 3 nebo 6, tento parametr musí být zadán uživatelsky požadovanou hodnotou modulu pružnosti betonu. V jiném případě může být tento parametr zadán buď hodnotou 0, nebo může zůstat nevyplněn.</p> <p>Dosazení: ET36 = E_{cm} = 33500 MPa (beton C 35/45) (TYPEC = 3)</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|--------|---|
| PRT36 | <p>Součinitel příčné kontrakce (Poissonovo číslo) betonu. Tento parametr se uplatňuje pouze při TYPEC = 3 nebo 6. Tento parametr může být zadán buď uživatelsky požadovanou hodnotou Poissonova čísla betonu, nebo hodnotou 0, nebo může zůstat nevyplněn. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota Poissonova čísla betonu automaticky nastavena na PRT36 = 0,25.</p> <p>Dosazení: PRT36 = 0,2 (TYPEC = 3)</p> |
| ECUT36 | <p>Poměrná deformace betonu v tlaku na mezi porušení ϵ_{cu}. Tento parametr se uplatňuje pouze při TYPEC = 3 nebo 6. Tento parametr může být zadán buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo může zůstat nevyplněn. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na ECUT36 = 1E20.</p> <p>Dosazení: ECUT36 = 0,0035 (TYPEC = 3)</p> |
| LCALPC | <p>Do tohoto parametru se zadává identifikační číslo křivky (LCID), která udává závislost součinitele teplotní roztažnosti betonu na teplotě (touto křivkou se přemaže křivka z EC2, která udává závislost součinitele teplotní roztažnosti betonu na teplotě a která je implementována v materiálovém modelu). V případě, že uživatel chce přepsat křivku implementovanou v modelu svou vlastní křivkou, musí tuto křivku zadat ve vstupním souboru programu LS-DYNA a dále musí do tohoto parametru zadat její identifikační číslo. V případě, že uživatel nechce přepsat křivku implementovanou v modelu, může tento parametr zadat hodnotou 0, nebo jej může zanechat nevyplněný.</p> <p>Dosazení: LCALPC = 0 (ponechána křivka z EC2)</p> |
| DEGRAD | <p>Parametr určuje, zda-li pevnost betonu v tlaku degraduje v důsledku vzniku trhlin v oblasti tahových napětí v betonu.</p> <p>Pokud DEGRAD = 0, pevnost betonu v tlaku nedegraduje v důsledku vzniku trhlin v oblasti tahových napětí v betonu. Pokud DEGRAD \neq 0, pevnost betonu v tlaku degraduje v důsledku vzniku trhlin v oblasti tahových napětí v betonu. V případě nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na DEGRAD = 0.</p> <p>Dosazení: DEGRAD = 0</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|--------|--|
| ISHCHK | <p>Parametr slouží pro aktivaci kontroly smykové kapacity.</p> <p>Na výběr jsou dvě možnosti:</p> <p>0: Bez kontroly smykové kapacity (výchozí nastavení).</p> <p>1: Aktivace vstupních dat pro kontrolu smykové kapacity.</p> <p>Dosazení: ISHCHK = 0</p> |
| UNLFAC | <p>Faktor určující degradaci tuhosti podrceného betonu při odtěžování (viz obr. 5. 2. 47). Parametr může být zadán buď hodnotou z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$, nebo může zůstat nevyplněn. V případě nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na UNLFAC = 0,5.</p> <p>Dosazení: UNLFAC = 0,5</p> |

Podrobnější informace o materiálovém modelu *MAT_CONCRETE_EC2, především z hlediska teorie modelu, lze nalézt například v literatuře [5]. Zadání parametrů náležících klíčovému slovu (názvu modelu) *MAT_CONCRETE_EC2 ve vstupním souboru programu LS-DYNA neboli nastavení materiálového modelu pro účely této práce je na obr. 5. 2. 50.

```

*MAT_CONCRETE_EC2
$#      mid      ro      fc      ft      typec      unitc      ecuten      fcc6
      1 2.4000E-9 43.000000 3.200000 3.000000 1.000000 0.002500 0.000
$#  esoft      lchar      mu      taumxf      taumxc      ecragg      aggsz      unit1
      0      0.000 0.4000001.0000E+20 3.715200 0.001000 0.000 0.000
$# ymreinf  prreinf  sureinf      typer      fracrx      fracry      lcrsu      lcalps
      0.000 0.000 0.000 1.000000 0.000 0.000 0 0
$#  aopt      et36      prt36      ecut36      lcalpc      degrad      ishchk      unlfac
      -0.01 33500.000 0.200000 0.003500 0 0.000 0 0.500000
    
```

Obr. 5. 2. 50 *MAT_CONCRETE_EC2 → zadané parametry materiálového modelu (soubor *.k, PSPad)

Informace uvedené v této podkapitole byly čerpány ze zdroje [5].

5.3 Popis parametrů nelineárních materiálových modelů betonu nepoužitých pro výpočty

Tato podkapitola je zaměřena na popis parametrů nelineárních materiálových modelů betonu *MAT_SOIL_CONCRETE a *MAT_CONCRETE_BEAM, které v rámci této práce nebyly pro výpočty použity z důvodů zmíněných v podkapitole 5. 1. Společně s popisem parametrů budou v následujících podkapitolách uvedeny také základní informace o zmíněných nelineárních modelech betonu, přičemž každému nelineárnímu modelu betonu bude věnována jedna podkapitola.

5.3.1 *MAT_SOIL_CONCRETE

Jedná se o materiálový model, který je v programu LS-DYNA implementován jako typ 78. Tento nelineární materiálový model je určen pro modelování betonu, případně zeminy, a je k dispozici pouze pro konečné prvky typu SOLID. Vlastnosti materiálového modelu jsou následující:

- vzhledem k tomu, že je určen pro modelování betonu nebo zeminy, umožňuje modelovat rozdílné mechanicko fyzikální vlastnosti materiálu v tlaku a v tahu,
- umožňuje modelovat porušení materiálu (damage effects),
- při jeho použití je možné provádět výpočty s dvojitou i jednoduchou přesností, obě varianty poskytují stabilní řešení.

Materiálový model *MAT_SOIL_CONCRETE je, jak již bylo zmíněno, určen pro modelování betonu, případně zeminy. V případě, že chce uživatel tento materiálový model použít, musí zadat název materiálového modelu ve vstupním souboru programu LS-DYNA klíčovým slovem *MAT_SOIL_CONCRETE. Klíčové slovo *MAT_SOIL_CONCRETE přiřadí materiálovému modelu příslušné funkční karty s příslušnými parametry, které musí uživatel zadat pro správnou funkci nelineárního modelu. Zadání klíčové slovo a parametry příslušných funkčních karet může uživatel buď v programu LS-PrePost nebo v textovém editoru. Klíčovému slovu (materiálovému modelu) *MAT_SOIL_CONCRETE náleží celkem dvě funkční karty. Tyto karty obsahují parametry LCYP, LCFP a LCRP, pro které v rámci této práce nebyly k dispozici potřebné podklady, aby je bylo možné zadat, a bez zadání těchto parametrů nebylo možné dosáhnout rozumných výsledků (bližší informace o parametrech LCYP, LCFP a LCRP viz *MAT_SOIL_CONCRETE → popis parametrů funkčních karet). Tato skutečnost byla důvodem, proč tento nelineární materiálový model

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

nebyl v rámci této práce použit pro výpočty. Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_SOIL_CONCRETE, jak je uvádí manuál [5], jsou znázorněny na obr. 5. 3. 1.

| | | | | | | | | |
|----------|-----|----|---|---|------|------|------|------|
| Card 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | MID | RO | G | K | LCPV | LCYP | LCFP | LCRP |
| Type | A8 | F | F | F | F | F | F | F |

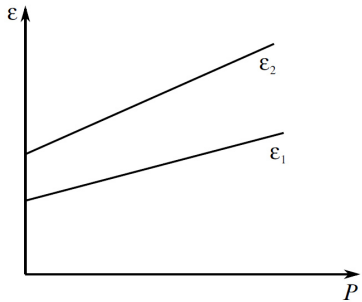
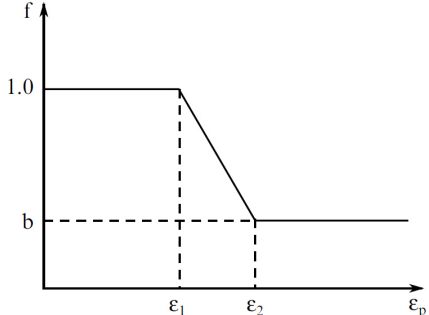
| | | | | | | | | |
|----------|----|-----|---|------|---|---|---|---|
| Card 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | PC | OUT | B | FAIL | | | | |
| Type | F | F | F | F | | | | |

Obr. 5. 3. 1 Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_SOIL_CONCRETE [5]

*MAT_SOIL_CONCRETE → popis parametrů funkčních karet [5]

| Parametr | Popis |
|----------|--|
| MID | Identifikační číslo materiálového modelu. Unikátní číslo, které může obsahovat maximálně 8 číslic a které musí být zadáno z důvodů propojení materiálového modelu s příslušným partem (*PART). |
| RO | Objemová hmotnost betonu/zeminy (hustota). → nutné zadat |
| G | Modul pružnosti betonu/zeminy ve smyku. → nutné zadat |
| K | Objemový modul pružnosti betonu/zeminy. → nutné zadat |
| LCPV | Do tohoto parametru se zadává identifikační číslo křivky (LCID), která udává závislost tlaku na objemové deformaci. Uživatel musí tuto křivku zadat ve vstupním souboru programu LS-DYNA a dále musí zadat její identifikační číslo do tohoto parametru → křivka musí být definována. Při definování křivky se tlak zadává se znaménkem (+) a objemová deformace se znaménkem (-) → objemová deformace je záporná v tlaku a je definována ve formě přirozeného logaritmu relativního objemu ($-\ln(V/V_0)$). Tato křivka slouží k určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu/zemině. |

| | |
|------|--|
| LCYP | <p>Do tohoto parametru se zadává identifikační číslo křivky (LCID), která udává buď závislost efektivního (von Misesova) napětí na tlaku, nebo závislost druhého invariantu deviatorické části tenzoru napětí na tlaku. Uživatel musí tuto křivku zadat ve vstupním souboru programu LS-DYNA a dále musí zadat její identifikační číslo do tohoto parametru → křivka musí být definována. Pokud uživatel zadá identifikační číslo křivky kladným číslem (LCID > 0), křivka musí udávat závislost efektivního napětí na tlaku. Takto definovaná křivka (funkce) se v rámci algoritmu modelu uplatní v deviatorické, perfektně plastické, mezní funkci ϕ závislé na tlaku, která je pro tento případ definována jako:</p> $\phi = \sqrt{(3 \cdot J_2) - F(p)}$ <p>F(p) funkce (křivka) udávající závislost efektivního napětí na tlaku, křivka definovaná uživatelem, J_2 druhý invariant deviatorické části tenzoru napětí, který je dán vztahem (platí Einsteinovo sumační pravidlo):</p> $J_2 = \frac{1}{2} \cdot S_{ij} \cdot S_{ij}$ <p>Pokud uživatel zadá identifikační číslo křivky záporným číslem (LCID < 0), křivka musí udávat závislost druhého invariantu deviatorické části tenzoru napětí na tlaku. Takto definovaná křivka (funkce) se v rámci algoritmu modelu uplatní v deviatorické, perfektně plastické, mezní funkci ϕ závislé na tlaku, která je pro tento případ definována jako:</p> $\phi = J_2 - F(p)$ <p>F(p) funkce (křivka) udávající závislost druhého invariantu deviatorické části tenzoru napětí na tlaku, křivka definovaná uživatelem.</p> |
| LCFP | <p>Do tohoto parametru se zadává identifikační číslo křivky (LCID), která udává závislost plastické poměrné deformace ϵ_1, při které dochází k porušení (vzniku trhlin), na tlaku. Tvar křivky, jak by ji měl uživatel zadat, je znázorněn na obr. 5. 3. 2. Pokud je parametr B > 0, uživatel musí tuto křivku zadat ve vstupním souboru programu LS-DYNA a dále musí zadat její identifikační číslo do tohoto parametru. Pokud je B = 0, je možné tento parametr zadat hodnotou 0, nebo je možné jej zanechat nevyplněný.</p> |

| | |
|------|---|
| LCRP | <p>Do tohoto parametru se zadává identifikační číslo křivky (LCID), která udává závislost plastické poměrné deformace ε_2, při které je dosažena reziduální pevnost, na tlaku. Tvar křivky, jak by ji měl uživatel zadat, je znázorněn na obr. 5. 3. 2. Pokud je parametr $B > 0$, uživatel musí tuto křivku zadat ve vstupním souboru programu LS-DYNA a dále musí zadat její identifikační číslo do tohoto parametru. Pokud je $B = 0$, je možné tento parametr zadat hodnotou 0, nebo je možné jej zanechat nevyplněný.</p>  <p>Obr. 5. 3. 2 Křivky udávající závislost plastických poměrných deformací ε_1 a ε_2 na tlaku [5]</p> |
| PC | <p>Tahové normálové napětí, při jehož překročení dojde k porušení (vznik trhlin) betonu/zeminy. → nutné zadat</p> |
| OUT | <p>Volba výstupu pro plastickou deformaci. Na výběr jsou dvě možnosti: 0: Objemová plastická deformace (výchozí nastavení). 1: Deviatorická plastická deformace.</p> |
| B | <p>Faktor b určující reziduální pevnost betonu/zeminy. Faktor b je multiplikátor pevnosti a zadává se z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$ (viz obr. 5. 3. 3). V případě nevyplnění parametru je hodnota faktoru b automaticky nastavena na $B = 0$ (nulová reziduální pevnost).</p>  <p>Obr. 5. 3. 3 Význam faktoru b [5]</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|------|---|
| FAIL | Parametr umožňuje modelovat porušení betonu/zeminy prostřednictvím vypadávání porušených konečných prvků z výpočtu. Pokud je FAIL = 0 (výchozí nastavení), prvky z výpočtu nevypadávají. Pokud je FAIL = 1, prvky z výpočtu vypadávají ve chvíli, kdy je dosaženo mezního napětí na prvcích, při jehož překročení dochází k porušení. Pokud je FAIL = 2, prvky z výpočtu nevypadávají, nicméně ztrácejí schopnost přenášet tah ve chvíli, kdy je dosaženo mezního napětí na prvcích, při jehož překročení dochází k porušení. |
|------|---|

Informace uvedené v této podkapitole byly čerpány ze zdroje [5].

5. 3. 2***MAT_CONCRETE_BEAM**

Jedná se o materiálový model, který je v programu LS-DYNA implementován jako typ 195. Tento nelineární materiálový model je určen pro modelování betonu a je k dispozici pouze pro konečné prvky typu BEAM. Umožňuje modelovat elasto-plastický materiál (beton) buď s mechanicko fyzikálními vlastnostmi, které jsou implementovány v materiálovém modelu, nebo s uživatelsky definovanými mechanicko fyzikálními vlastnostmi. Vliv rychlosti deformace může být v rámci modelu zohledněn také buď prostřednictvím vlastností implementovaných v materiálovém modelu, nebo prostřednictvím uživatelsky definovaných vlastností. Vlastnosti materiálového modelu jsou následující:

- zohledňuje změnu mechanicko fyzikálních vlastností betonu v závislosti na rychlosti deformace (rate effects),
- vzhledem k tomu, že je určen pro modelování betonu, umožňuje modelovat rozdílné mechanicko fyzikální vlastnosti materiálu v tlaku a v tahu,
- umožňuje modelovat porušení betonu (damage effects),
- při jeho použití je možné provádět výpočty s dvojitou i jednoduchou přesností, obě varianty poskytují stabilní řešení.

Materiálový model *MAT_CONCRETE_BEAM je, jak již bylo zmíněno, určen pro modelování betonu. V případě, že chce uživatel tento materiálový model použít, musí zadat název materiálového modelu ve vstupním souboru programu LS-DYNA klíčovým slovem *MAT_CONCRETE_BEAM. Klíčové slovo *MAT_CONCRETE_BEAM přiřadí materiálovému modelu příslušné funkční karty s příslušnými parametry, které musí uživatel zadat pro správnou funkci nelineárního modelu. Zadání klíčového slova a parametry příslušných funkčních karet může uživatel buď v programu LS-PrePost nebo v textovém editoru. Klíčovému slovu (materiálovému modelu) *MAT_CONCRETE_BEAM náleží celkem tři funkční karty. Karta číslo 2 obsahuje parametry LCSS a LCSR, pro které v rámci této práce nebyly k dispozici potřebné podklady, aby je bylo možné zadat, a bez zadání těchto parametrů nebylo možné dosáhnout rozumných výsledků (bližší informace o parametrech LCSS a LCSR viz *MAT_CONCRETE_BEAM → popis parametrů funkčních karet). Tato skutečnost byla důvodem, proč tento nelineární materiálový model nebyl v rámci této práce použit pro výpočty. Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_BEAM, jak je uvádí manuál [5], jsou znázorněny na obr. 5. 3. 4.

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | | | | | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|------|---------|---------|
| Card 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | MID | RO | E | PR | SIGY | ETAN | FAIL | TDEL |
| Type | A8 | F | F | F | F | F | F | F |
| Default | none | none | none | none | none | 0.0 | 10.E+20 | 10.E+20 |

| | | | | | | | | |
|----------|---|---|------|------|---|---|---|---|
| Card 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | C | P | LCSS | LCSR | | | | |
| Type | F | F | F | F | | | | |
| Default | 0 | 0 | 0 | 0 | | | | |

| | | | | | | | | |
|----------|-------|--------|-----|---|---|---|---|---|
| Card 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Variable | NOTEN | TENCUT | SDR | | | | | |
| Type | I | F | F | | | | | |
| Default | 0 | E15.0 | 0.0 | | | | | |

Obr. 5. 3. 4 Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_BEAM [5]

***MAT_CONCRETE_BEAM → popis parametrů funkčních karet [5]**

| Parametr | Popis |
|----------|--|
| MID | Identifikační číslo materiálového modelu. Unikátní číslo, které může obsahovat maximálně 8 číslic a které musí být zadáno z důvodů propojení materiálového modelu s příslušným partem (*PART). |
| RO | Objemová hmotnost betonu (hustota). → nutné zadat |
| E | Modul pružnosti betonu. → nutné zadat |
| PR | Součinitel příčné kontrakce (Poissonovo číslo) betonu. → nutné zadat |
| SIGY | Maximální tlakové normálové napětí v betonu (pevnost betonu v tlaku). → nutné zadat |
| ETAN | Počáteční tangentový modul pružnosti betonu. Pokud je LCSS = 0, tento parametr musí být zadán. Pokud je LCSS > 0, je tento parametr ignorován a je tedy možné jej zadat buď hodnotou 0, nebo je možné jej zanechat |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|------|--|
| ETAN | nevyplněný. |
| FAIL | <p>Parametr umožňuje modelovat porušení betonu prostřednictvím vypadávání porušených konečných prvků z výpočtu. Pokud je FAIL < 0, pro popis způsobu modelování porušení je volán podprogram, jenž musí být definován uživatelem. Pokud je FAIL = 0, prvky z výpočtu nevypadávají. Pokud je FAIL > 0, prvky z výpočtu vypadávají ve chvíli, kdy plastická deformace na prvcích dosáhne hodnoty FAIL. V případě nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na FAIL = 0.</p> |
| TDEL | <p>Minimální délka časového kroku pro automatické vypadávání prvků z výpočtu. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na TDEL = 10E20.</p> |
| C | <p>Koeficient rychlosti deformace C. Pokud je LCSR = 0, tento parametr musí být zadán → vliv rychlosti deformace je zohledněn prostřednictvím modelu dle Cowpera a Symondse, který násobí pevnost betonu multiplikačním faktorem, který je definován prostřednictvím koeficientů rychlosti deformace C a P jako:</p> $1+(\dot{\varepsilon}/C)^{1/P}$ <p>$\dot{\varepsilon}$ rychlost deformace definovaná jako (platí Eisteinovo sumační pravidlo):</p> $\dot{\varepsilon} = \sqrt{\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}}$ <p>Pokud je LCSS > 0, je tento parametr ignorován a je tedy možné jej zadat hodnotou 0, nebo je možné jej zanechat nevyplněný.</p> |
| P | <p>Koeficient rychlosti deformace P. Pokud je LCSR = 0, tento parametr musí být zadán → vliv rychlosti deformace je zohledněn prostřednictvím modelu dle Cowpera a Symondse, který násobí pevnost betonu multiplikačním faktorem, který je definován prostřednictvím koeficientů rychlosti deformace C a P (viz C). Pokud je LCSS > 0, je tento parametr ignorován a je tedy možné jej zadat hodnotou 0, nebo je možné jej zanechat nevyplněný.</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|--------|---|
| LCSS | <p>Do tohoto parametru se zadává identifikační číslo křivky (LCID), která udává závislost efektivního napětí na efektivní plastické deformaci při kvazi-statické rychlosti deformace. Křivka slouží pro zohlednění uživatelsky požadovaných mechanicko fyzikálních vlastností betonu. Pokud chce uživatel zohlednit vlastní nastavení mechanicko fyzikálních vlastností betonu, musí tuto křivku zadat ve vstupním souboru programu LS-DYNA a dále musí zadat její identifikační číslo do tohoto parametru. Pokud chce uživatel využít vlastnosti betonu, které jsou implementovány v materiálovém modelu, může tento parametr zadat hodnotou 0, nebo jej může zanechat nevyplněný, přičemž musí zadat parametr ETAN.</p> |
| LCSR | <p>Do tohoto parametru se zadává identifikační číslo křivky (LCID), která udává závislost multiplikačního faktoru, kterým se násobí pevnost betonu při dané rychlosti deformace, na rychlosti deformace. Křivka slouží pro zohlednění uživatelsky požadovaného vlivu rychlosti deformace. Pokud chce uživatel zohlednit vlastní nastavení vlivu rychlosti deformace, musí tuto křivku zadat ve vstupním souboru programu LS-DYNA a dále musí zadat její identifikační číslo do tohoto parametru. Pokud chce uživatel využít vliv rychlosti deformace, který je implementován v materiálovém modelu, může tento parametr zadat hodnotou 0, nebo jej může zanechat nevyplněný, přičemž musí zadat parametry C a P.</p> |
| NOTEN | <p>Parametr určuje, jakým způsobem prutové konečné prvky typu BEAM přenášejí tah.</p> <p>Na výběr jsou tři možnosti:</p> <ul style="list-style-type: none">0: Prvky přenášejí tah (výchozí nastavení).1: Prvky nepřenášejí tah.2: Prvky přenášejí tah, dokud není překročena hodnota daná parametrem TENCUT. |
| TENCUT | <p>Tahové normálové napětí, při jehož překročení dojde k porušení (vznik trhlin) betonu. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě hodnoty 0 nebo nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na $TENCUT = 1E15$.</p> |

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

| | |
|-----|--|
| SDR | Faktor určující degradaci tuhosti. Tento parametr je možné zadat buď uživatelsky požadovanou hodnotou, nebo hodnotou 0, nebo je možné tento parametr zanechat nevyplněný. V případě nevyplnění parametru je hodnota parametru automaticky nastavena na $SDR = 0$. |
|-----|--|

Informace uvedené v této podkapitole byly čerpány ze zdroje [5].

Kapitola 6

Výpočtové modely

Tato kapitola je zaměřena na popis tvorby výpočtových modelů řešených úloh popsaných v kapitole 3 neboli na popis tvorby vstupních souborů programu LS-DYNA (soubory s příponou *.k) pro řešení úlohy. V následujících podkapitolách bude popsána tvorba výpočtových modelů řešených úloh, která v rámci této práce zahrnovala vytvoření geometrických modelů prvků, které jsou zahrnuty ve řešených úlohách, dále pokrytí těchto geometrických modelů sítí konečných prvků a specifikaci materiálových modelů, okrajových podmínek a zatížení.

6.1 Vytvoření geometrických modelů

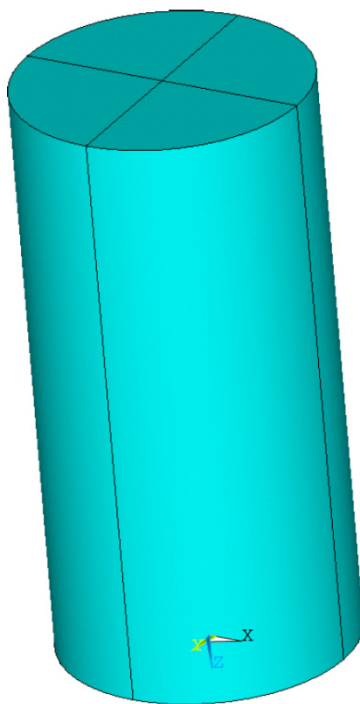
Při tvorbě výpočtových modelů řešených úloh popsaných v kapitole 3 bylo nejprve potřeba vytvořit geometrické modely prvků, které jsou zahrnuty v řešených úlohách. Mezi tyto prvky patří betonový válec, betonová nevyztužená deska a betonový válec s ocelovými podložkami, které jsou umístěny u podstav válce. Pro vytvoření geometrických modelů těchto prvků byl v rámci této práce použit program ANSYS/LS-DYNA. Všechny geometrické modely byly v programu ANSYS/LS-DYNA vytvořeny stejným způsobem a to prostřednictvím systémových funkcí pro modelování, které nabízí nástroj Preprocessor v programu ANSYS/LS-DYNA, a příkazů. Modely mají následující geometrii:

- geometrické modely válců: výška - 304,8 mm; průměr podstavy - 152,4 mm [1],
- geometrické modely podložek: výška - 12,7 mm; průměr podstavy - 165,1 mm [1],
- geometrický model desky: půdorys tvaru čtverce s délkou strany 9,5 m.

Geometrický model válce je na obr. 6. 1. 1, geometrický model válce s podložkami je na obr. 6. 1. 2 a geometrický model desky je na obr. 6. 1. 3. Při pohledu na geometrické modely válců a podložek je vidět, že se skládají vždy ze čtyř hranolů s podstavami ve tvaru kruhových výsečí příslušných pravému úhlu (čtvrtkruhy). Tato skutečnost umožňuje při tvorbě sítě konečných prvků vytvořit mnohem kvalitnější mapovanou síť, než by tomu bylo v případě, kdy by geometrické modely válců a podložek byly vytvořeny vždy pouze z jednoho celku, což bylo důvodem, proč byly geometrické modely válců a podložek vytvořeny právě tak, jak je znázorněno na obr. 6. 1. 1 a 6. 1. 2.

1
VOLUMES
TYPE NUM

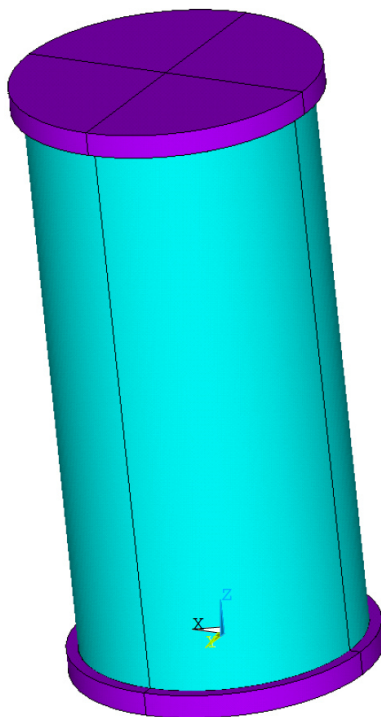
ANSYS
R15.0
Academic



Obr. 6. 1. 1 Geometrický model válce, ANSYS/LS-DYNA

1
VOLUMES
TYPE NUM

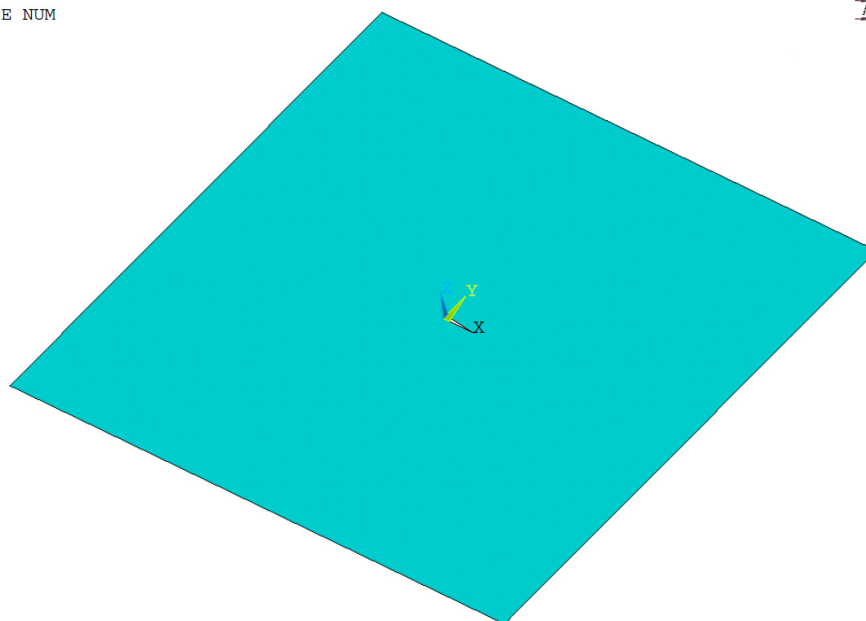
ANSYS
R15.0
Academic



Obr. 6. 1. 2 Geometrický model válce s podložkami, ANSYS/LS-DYNA

1
AREAS
TYPE NUM

ANSYS
R15.0
Academic



Obr. 6. 1. 3 Geometrický model desky, ANSYS/LS-DYNA

6. 2 Pokrytí geometrických modelů sítí konečných prvků

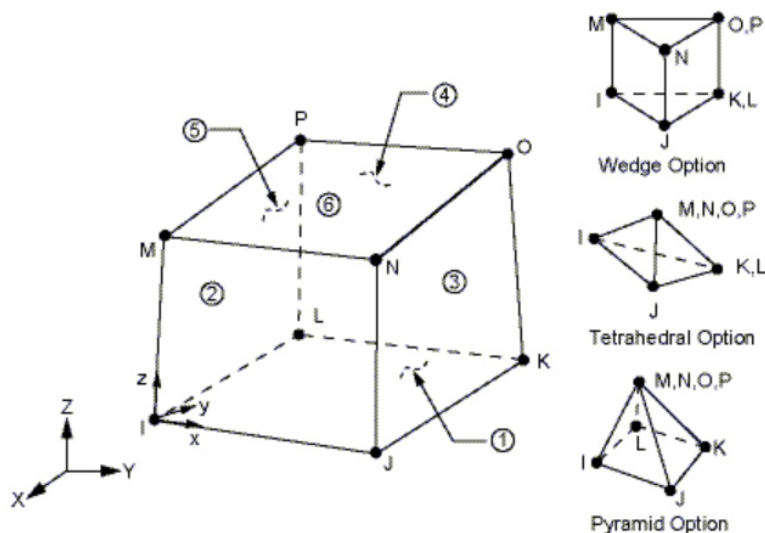
Po vytvoření geometrických modelů bylo dále potřeba při tvorbě výpočtových modelů řešených úloh tyto geometrické modely pokrýt sítí konečných prvků neboli vytvořit konečnoprvkové modely. K tomu bylo ovšem potřeba nejprve specifikovat, jaké typy konečných prvků budou použity pro tvorbu sítě. Geometrické modely válců a podložek jsou vytvořeny, jak je vidět na obr. 6. 1. 1 a 6. 1. 2, z objemů, které lze pokrýt sítí z prostorových konečných prvků typu SOLID (bricky). Geometrický model desky je vytvořen, jak je vidět na obr. 6. 1. 3, z plochy, kterou lze pokrýt sítí ze skořepinových konečných prvků typu SHELL (deskostěny). Pro pokrytí geometrických modelů sítí konečných prvků byl v rámci této práce použit program ANSYS/LS-DYNA, v tom důsledku byly použité typy konečných prvků vybrány ze sortimentu tohoto programu. Byly použity konečné prvky SOLID164 a SHELL163.

Charakteristika použitých typů konečných prvků [13]

SOLID164

Jedná se o prostorový strukturální konečný prvek typu SOLID, který je implementován v programu ANSYS/LS-DYNA. Je použitelný pouze pro explicitní

dynamické analýzy v programu LS-DYNA. Tento konečný prvek je definován osmi uzly I, J, K, L, M, N, O, P (brick). V každém uzlu má tento prvek ve třech směrech x, y a z následující volnosti: posuny, rychlosti a zrychlení. Ve výpočetním systému LS-DYNA je pro tento typ konečného prvku k dispozici celá řada materiálových modelů, od základního lineárního izotropního materiálového modelu, přes bilineární materiálové modely, až po různé nelineární materiálové modely určené například pro modelování kompozitních materiálů, betonů apod. V programu ANSYS/LS-DYNA může být konečný prvek SOLID164 formulován dvěma způsoby a to buď jako prvek, který využívá redukovanou integraci, má pouze 1 integrační bod, společně s viskózní kontrolou hourglassingu pro rychlejší formulaci prvku, nebo jako prvek, který využívá plnou integraci. Program LS-DYNA ovšem nabízí mnohem větší množství formulací a další možná nastavení pro konečný prvek typu SOLID. Tyto formulace a nastavení lze aplikovat na konečný prvek typu SOLID prostřednictvím úpravy prvku ve vstupním souboru programu LS-DYNA. Geometrie konečného prvku SOLID164, jak ji uvádí ANSYS help [13], je znázorněna na obr. 6. 2. 1.



Obr. 6. 2. 1 Geometrie konečného prvku SOLID164, ANSYS/LS-DYNA [13]

SHELL163

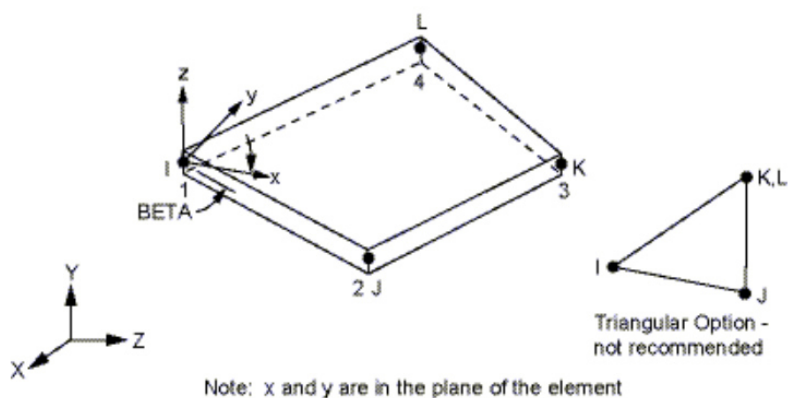
Jedná se o skořepinový strukturální konečný prvek typu SHELL, který je implementován v programu ANSYS/LS-DYNA. Je použitelný pouze pro explicitní dynamické analýzy v programu LS-DYNA. Tento konečný prvek je definován čtyřmi uzly I, J, K, L a zahrnuje deskové i skořepinové působení (deskostěna). V každém uzlu má tento

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

prvek 12 stupňů volnosti: posuny, rychlosti a zrychlení ve třech směrech x , y a z a pootočení kolem tří os x , y a z uzlového souřadnicového systému. Ve výpočetním systému LS-DYNA je pro tento typ konečného prvku k dispozici celá řada materiálových modelů, od základního lineárního izotropního materiálového modelu, přes ortotropní a anizotropní materiálové modely, až po různé nelineární materiálové modely určené například pro modelování kompozitních materiálů, betonů apod. V programu ANSYS/LS-DYNA může být konečný prvek SHELL163 formulován celkem dvanácti způsoby a to jako:

- 1) Hughes-Liu konečný prvek,
- 2) Belytschko-Tsay konečný prvek,
- 3) BCIZ trojúhelníkový prvek,
- 4) C^0 trojúhelníkový prvek,
- 5) Belytschko-Tsay membránový konečný prvek,
- 6) S/R Hughes-Liu konečný prvek,
- 7) S/R korotační Hughes-Liu konečný prvek,
- 8) Belytschko-Levithan konečný prvek,
- 9) Belytschko-Tsay membránový konečný prvek s plnou integrací,
- 10) Belytschko-Wong-Chiang konečný prvek,
- 11) Rychlý (korotační) Hughes-Liu konečný prvek,
- 12) Belytschko-Tsay konečný prvek s plnou integrací.

Program LS-DYNA ovšem nabízí mnohem větší množství formulací a další možná nastavení pro konečný prvek typu SHELL. Tyto formulace a nastavení lze aplikovat na konečný prvek typu SHELL prostřednictvím úpravy prvku ve vstupním souboru programu LS-DYNA. Geometrie konečného prvku SHELL163, jak ji uvádí ANSYS help [13], je znázorněna na obr. 6. 2. 2.



Obr. 6. 2. 2 Geometrie konečného prvku SHELL163, ANSYS/LS-DYNA [13]

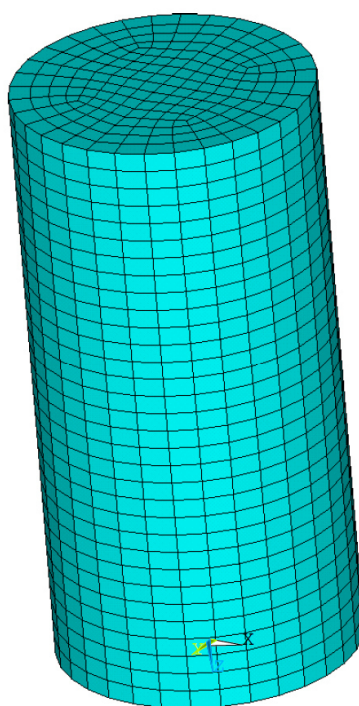
VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

Pokrytí geometrických modelů sítí konečných prvků bylo v programu ANSYS/LS-DYNA ve všech případech provedeno stejným způsobem a to s využitím systémových funkcí pro tvorbu sítě konečných prvků, které nabízí nástroj Preprocessor v programu ANSYS/LS-DYNA, a příkazů. Geometrické modely válců a podložek byly pokryty sítí z konečných prvků SOLID164 a geometrický model desky byl pokryt sítí z konečných prvků SHELL163. Počet konečných prvků v jednotlivých konečnoprvkových modelech je následující:

- konečnoprvkový model válce: 6144 konečných prvků typu SOLID,
- konečnoprvkový model podložky: 192 konečných prvků typu SOLID,
- konečnoprvkový model desky: 1444 konečných prvků typu SHELL.

Konečnoprvkový model válce je na obr. 6. 2. 3, konečnoprvkový model válce s podložkami je na obr. 6. 2. 4 a konečnoprvkový model desky je na obr. 6. 2. 5. Po vytvoření konečnoprvkových modelů byly v programu ANSYS/LS-DYNA dále vytvořeny party pro explicitní analýzu a na závěr práce s tímto programem byly vygenerovány vstupní soubory programu LS-DYNA (soubory s příponou *.k), které obsahovaly informace o veškerém do té doby provedeném modelování a nastavení. Následné nastavení materiálových modelů, okrajových podmínek a zatížení při tvorbě výpočtových modelů řešených úloh bylo již prováděno s použitím programu LS-PrePost a textového editoru PSPad.

1
ELEMENTS

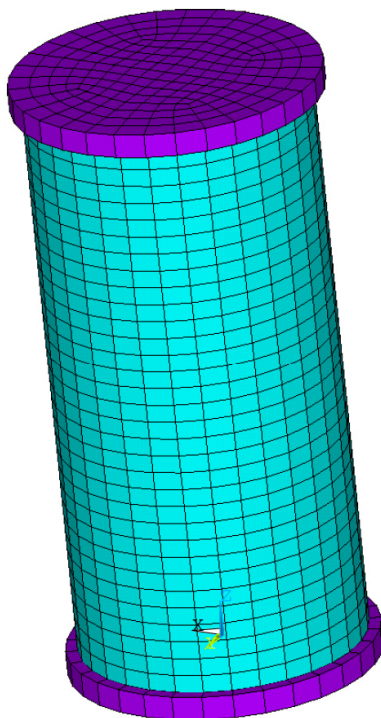


ANSYS
R15.0
Academic

Obr. 6. 2. 3 Konečnoprvkový model válce, ANSYS/LS-DYNA

1
ELEMENTS
TYPE NUM

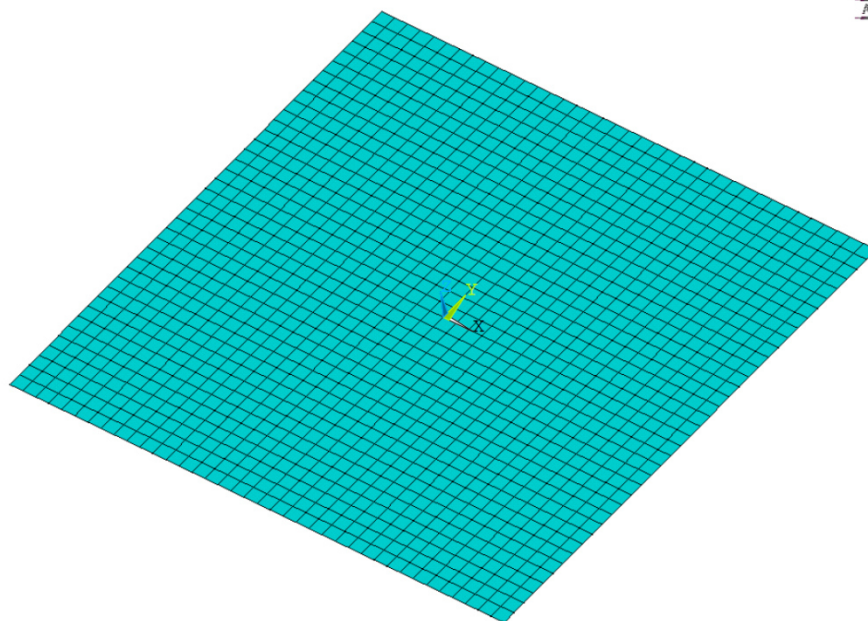
ANSYS
R15.0
Academic



Obr. 6. 2. 4 Konečnoprvkový model válce s podložkami, ANSYS/LS-DYNA

1
ELEMENTS

ANSYS
R15.0
Academic



Obr. 6. 2. 5 Konečnoprvkový model desky, ANSYS/LS-DYNA

Nastavení konečných prvků typu SOLID ve vstupním souboru programu LS-DYNA je na obr. 6. 2. 6. Tyto prvky byly v rámci této práce formulovány jako konečné

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

prvky typu SOLID s jedním integračním bodem (ELFORM = 1 → konstantní napětí na prvcích).

Nastavení konečných prvků typu SHELL ve vstupním souboru programu LS-DYNA je na obr. 6. 2. 7. Tyto prvky byly v rámci této práce formulovány jako Belytschko-Tsay konečné prvky typu SHELL (ELFORM = 2). Tloušťka konečných prvků byla nastavena na 300 mm, což odpovídá tloušťce desky ($T1 - T4 = 300$). Prvky měly nastaveny čtyři integrační body po tloušťce (NIP = 4).

```
*SECTION_SOLID
$#  secid  elform  aet
      1      1      0
```

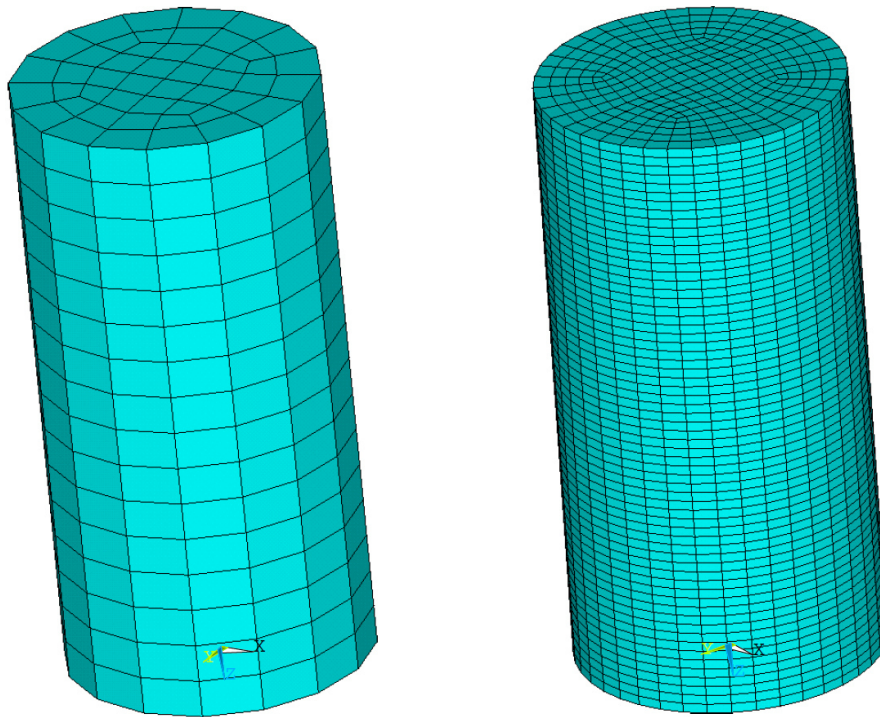
Obr. 6. 2. 6 Nastavení konečných prvků typu SOLID (soubor *.k, PSPad)

```
*SECTION_SHELL
$#  secid  elform  shrf  nip  propt  qr/irid  icomp  setyp
      1      2  0.833300  4    1    0    0    1
$#  t1      t2      t3      t4  nloc  marea  idof  edgset
300.00000 300.00000 300.00000 300.00000  0.000  0.000  0.000  0
```

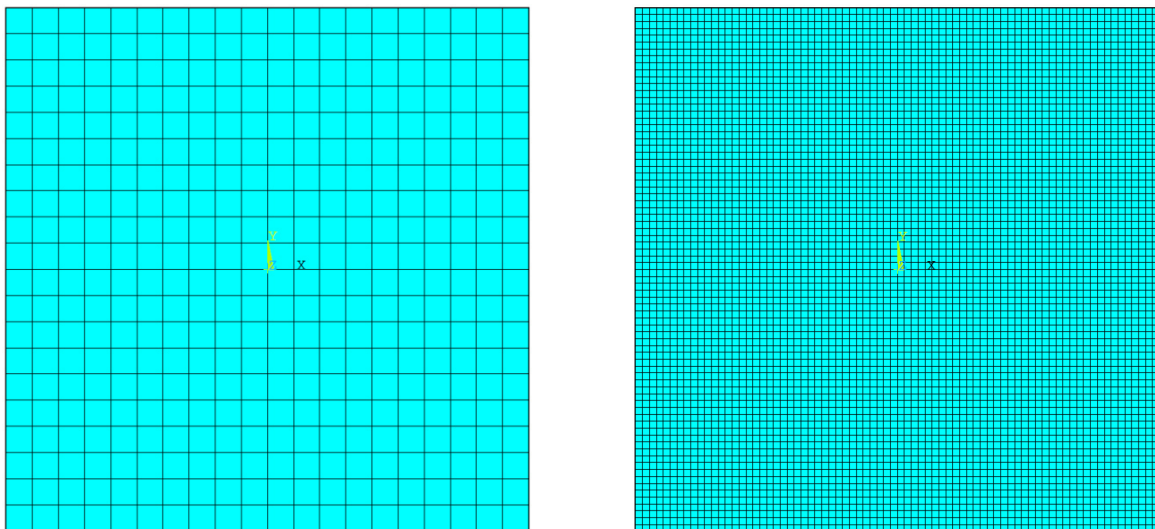
Obr. 6. 2. 7 Nastavení konečných prvků typu SHELL (soubor *.k, PSPad)

Vzhledem k tomu, že cílem této práce je také testování závislosti výsledků na síti konečných prvků, byly pro tento účel vytvořeny také další konečnoprvkové modely válců a desek s odlišnou hustotou sítě, než kterou je možné vidět na obr. 6. 2. 3 a 6. 2. 5. Počet konečných prvků v konečnoprvkových modelech je následující:

- konečnoprvkové modely válců: řídká síť - 768 konečných prvků typu SOLID; hustá síť - 19200 konečných prvků typu SOLID (obr. 6. 2. 8),
- konečnoprvkové modely desek: řídká síť - 400 konečných prvků typu SHELL; hustá síť - 5776 konečných prvků typu SHELL (obr. 6. 2. 9).



Obr. 6. 2. 8 Konečnoprvkové modely válců (vlevo - řidká síť; vpravo - hustá síť), ANSYS/LS-DYNA



Obr. 6. 2. 9 Konečnoprvkové modely desek (vlevo - řidká síť; vpravo - hustá síť), ANSYS/LS-DYNA

6.3 Nastavení materiálových modelů

Materiálové modely byly nastaveny a jejich parametry byly zadány ve vstupních souborech programu LS-DYNA s použitím programu LS-PrePost a textového editoru PSPad při tvorbě výpočtových modelů řešených úloh. Nastavení materiálové modelu a zadání jeho parametrů bylo provedeno ve všech případech stejným způsobem. Nejprve byl v programu LS-PrePost otevřen vstupní soubor programu LS-DYNA, který již obsahoval informace o konečnoprvkovém modelu. Dále byl v tomto programu v záložce 3, sekci *Mat vybrán požadovaný materiálový model (klíčové slovo) a následně byla zvolena možnost editovat (edit), čímž byly zobrazeny funkční karty materiálového modelu (náležící klíčovému slovu) s příslušnými parametry v grafickém prostředí. Parametry materiálového modelu byly zadány přímo v programu požadovanými hodnotami, případně byly ponechány výchozí hodnoty a nastavení parametrů, následně bylo zadání potvrzeno tlačítkem Accept a vstupní soubor programu LS-DYNA byl poté uložen s takto nově nastavenými informacemi. Další editace parametrů materiálového modelu byly v případě potřeby prováděny již pouze v textovém editoru PSPad, ve kterém lze bez problémů otevřít a jakkoliv editovat vstupní soubor programu LS-DYNA.

Konečnoprvkovým modelům válců a desek byly v rámci této práce přiřazeny nelineární materiálové modely betonu popsané v kapitole 5 a konečnoprvkovým modelům podložek byl přiřazen lineární izotropní materiálový model *MAT_ELASTIC. Parametry nelineárních materiálových modelů betonu byly zadávány tak, aby vystihovaly stále stejný druh betonu, což bylo závislé především na pevnosti betonu v jednoosém tlaku, za účelem, aby bylo možné následné srovnání výsledků získaných z provedených numerických simulací, při kterých byly nelineární materiálové modely betonu použity. Různá nastavení nelineárních materiálových modelů betonu pro účely této práce jsou uvedena v podkapitolách 5. 2. 1, 5. 2. 2, 5. 2. 3, 5. 2. 4, 5. 2. 5, 5. 2. 6 a 5. 2. 7. Nastavení materiálového modelu *MAT_ELASTIC pro účely této práce je na obr. 6. 3. 1. Tento materiálový model byl přiřazen konečnoprvkovým modelům podložek, jež jsou uvažovány jako ocelové, tudíž parametry modelu byly zadány tak, aby vystihovaly charakteristiky oceli (objemová hmotnost oceli $RO = 7,85E-9 \text{ Mg/mm}^3$; modul pružnosti oceli $E = 2,1E5 \text{ MPa}$; Poissonovo číslo oceli $PR = 0,3$; viz obr. 6. 3. 1).

```
*MAT_ELASTIC
$#      mid      ro      e      pr      da      db      not used
      2 7.8500E-9 2.1000E+5 0.300000 0.000 0.000 0
```

Obr. 6. 3. 1 *MAT_ELASTIC → zadané parametry materiálového modelu (soubor *.k, PSPad)

6.4 Nastavení okrajových podmínek a zatížení

Okrajové podmínky včetně zatížení byly nastaveny ve vstupních souborech programu LS-DYNA s použitím programu LS-PrePost a textového editoru PSPad při tvorbě výpočtových modelů řešených úloh. Nastavení okrajových podmínek a zatížení bylo provedeno ve všech případech stejným způsobem. Nejprve byl v programu LS-PrePost otevřen vstupní soubor programu LS-DYNA, který již obsahoval informace o konečnoprvkovém modelu, případně také o použitých materiálových modelech. Dále byly v tomto programu v záložce 3, sekci *Boundry vybrány možnosti SPC_SET (pro zadání okrajových podmínek) a PRESCRIBE_MOTION_SET (pro zadání zatížení), u kterých byla následně zvolena možnost editovat (edit), čímž byly zobrazeny funkční karty, které náleží klíčovým slovům *BOUNDRY_PRESCRIBED_MOTION_SET a *BOUNDRY_SPC_SET, s příslušnými parametry v grafickém prostředí. Parametry funkčních karet byly zadány přímo v programu tak, aby bylo vystiženo požadované zatížení a okrajové podmínky, následně bylo zadání potvrzeno vždy tlačítkem Accept a vstupní soubor programu LS-DYNA byl poté uložen s takto nově nastavenými informacemi. Další editace parametrů ovlivňujících okrajové podmínky a zatížení byly v případě potřeby prováděny již pouze v textovém editoru PSPad. Do parametrů NSID a LCID ovlivňujících okrajové podmínky a zatížení byla zadána identifikační čísla. V případě parametru NSID se jednalo o identifikační číslo výběru uzlů (*SET_NODE_LIST), na které mělo být aplikováno zatížení nebo okrajové podmínky, a v případě parametru LCID se jednalo o identifikační číslo zatěžovací křivky (*DEFINE_CURVE), která definovala zatížení v čase. Potřebné výběry uzlů a definice zatěžovacích křivek byly provedeny v programu LS-PrePost.

Nastavení okrajových podmínek a zatížení pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek je znázorněno na obr. 6. 4. 1. Okrajové podmínky byly aplikovány na uzly obou podstav konečnoprvkového modelu válce (NSID = 3) ve formě příčného podepření ve směrech os x a y (DOFX = 1; DOFY = 1) → viz idealizace okrajových podmínek v

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

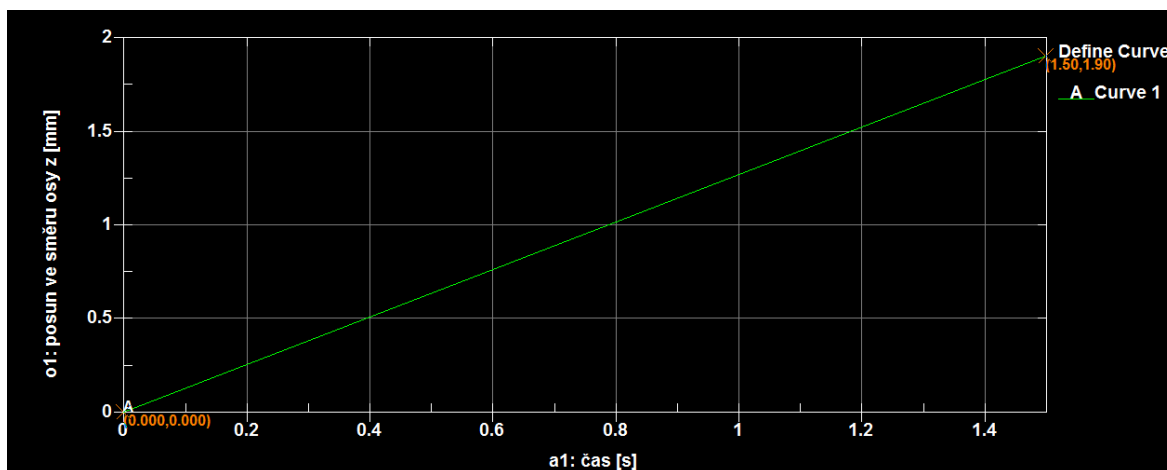
podkapitole 3. 1. 1 [1]. Zatížení bylo aplikováno na uzly obou podstav konečnoprvkového modelu válce (NSID = 1; NSID = 2) ve směru osy z (DOF = 3) v podobě posunů (VAD = 2). Zatěžovací křivky charakterizující kvazi-statické zatěžování (LCID = 1; LCID = 2) byly definovány dvěma stejnými hodnotami, ale opačného znaménka (lineární přímkou) → stlačování válce z obou stran konstantní rychlostí, viz podkapitola 3. 1. 1 [1]. Zatěžovací křivky charakterizující kvazi-statické zatěžování (stlačování) zadané ve vstupním souboru programu LS-DYNA jsou na obr. 6. 4. 2. Grafické znázornění zatěžovací křivky s kladnými hodnotami (LCID = 1), která charakterizuje kvazi-statické zatěžování, je na obr. 6. 4. 3. V rámci těchto numerických simulací byly dále aplikovány také zatěžovací křivky charakterizující vyšší rychlosti zatěžování a cyklické zatěžování. Použité zatěžovací křivky odpovídají svým tvarem křivkám, které charakterizují posuny podstav válce v závislosti na čase. Tyto křivky jsou graficky znázorněny v podkapitolách příslušných kapitole 8, tudíž pro více informací o aplikovaném zatěžování v rámci numerických simulací je nutné nahlédnout do kapitoly 8.

```
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
$#   nsid      dof      vad      lcid      sf      vid      death      birth
      1         3         2         1  1.000000      0      0.000      0.000
$#   nsid      dof      vad      lcid      sf      vid      death      birth
      2         3         2         2  1.000000      0      0.000      0.000
*BOUNDARY_SPC_SET
$#   nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry      dofrz
      3         0         1         1         0         0         0         0
```

Obr. 6. 4. 1 Nastavení okrajových podmínek a zatížení pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek (soubor *.k, PSPad)

```
*DEFINE_CURVE
$#   lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      1         0  1.000000  1.000000      0.000      0.000      0
$#
      a1         o1
      0.000         0.000
      1.500000         1.905000
*DEFINE_CURVE
$#   lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      2         0  1.000000  1.000000      0.000      0.000      0
$#
      a1         o1
      0.000         0.000
      1.500000         -1.905000
```

Obr. 6. 4. 2 Zadané zatěžovací křivky, které charakterizují kvazi-statické zatěžování, pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek (soubor *.k, PSPad) → a1: čas [s]; o1: posun ve směru osy z [mm] (VAD = 2; DOF = 3)



Obr. 6. 4. 3 Kladná zatěžovací křivka (LCID = 1), která charakterizuje kvazi-statické zatěžování, pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek (LS-PrePost v. 4.0)

Nastavení okrajových podmínek a zatížení pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích s ocelovými podložkami jsou znázorněna na obr. 6. 4. 4 a 6. 4. 5. Okrajové podmínky byly aplikovány:

- 1) na uzly jedné z podložek v konečnoprvkovém modelu válce s podložkami (NSID = 3) ve formě příčného podepření ve směrech os x a y (DOFX = 1; DOFY = 1), obr. 6. 4. 4 → viz idealizace okrajových podmínek v podkapitole 3. 1. 2 [1],
- 2) na uzly obou podložek v konečnoprvkovém modelu válce s podložkami (NSID = 3) ve formě příčného podepření ve směrech os x a y (DOFX = 1; DOFY = 1), obr. 6. 4. 4 → viz idealizace okrajových podmínek v podkapitole 3. 1. 2 [1],
- 3) nebyly aplikovány (obr. 6. 4. 5) → viz idealizace okrajových podmínek v podkapitole 3. 1. 2 [1].

Zatížení bylo aplikováno na uzly obou podložek v konečnoprvkovém modelu válce s podložkami (NSID = 1; NSID = 2) ve směru osy z (DOF = 3) v podobě posunů (VAD = 2). Zatěžovací křivky charakterizující kvazi-statické zatěžování (LCID = 1; LCID = 2) byly definovány dvěma stejnými hodnotami, ale opačného znaménka (lineární přímky) → stlačování válce s podložkami z obou stran konstantní rychlostí, viz podkapitola 3. 1. 2 [1]. Zatěžovací křivky charakterizující kvazi-statické zatěžování (stlačování) zadané ve vstupním souboru programu LS-DYNA jsou na obr. 6. 4. 6. Grafické znázornění zatěžovací křivky s kladnými hodnotami (LCID = 1), která charakterizuje kvazi-statické zatěžování, je na obr. 6. 4. 7. Použité zatěžovací křivky odpovídají svým tvarem křivkám, které charakterizují posuny podložek v závislosti na

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

čase. Tyto křivky jsou graficky znázorněny v podkapitole 8. 2. 1 příslušné kapitole 8, tudíž pro více informací o aplikovaném zatěžování v rámci numerických simulací je nutné nahlédnout do kapitoly 8.

```
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
$#   nsid      dof      vad      lcid      sf      vid      death      birth
      1         3         2         1  1.000000      0      0.000      0.000
$#   nsid      dof      vad      lcid      sf      vid      death      birth
      2         3         2         2  1.000000      0      0.000      0.000
*BOUNDARY_SPC_SET
$#   nsid      cid      dofx      dofy      dofz      dofrx      dofry      dofrz
      3         0         1         1         0         0         0         0
```

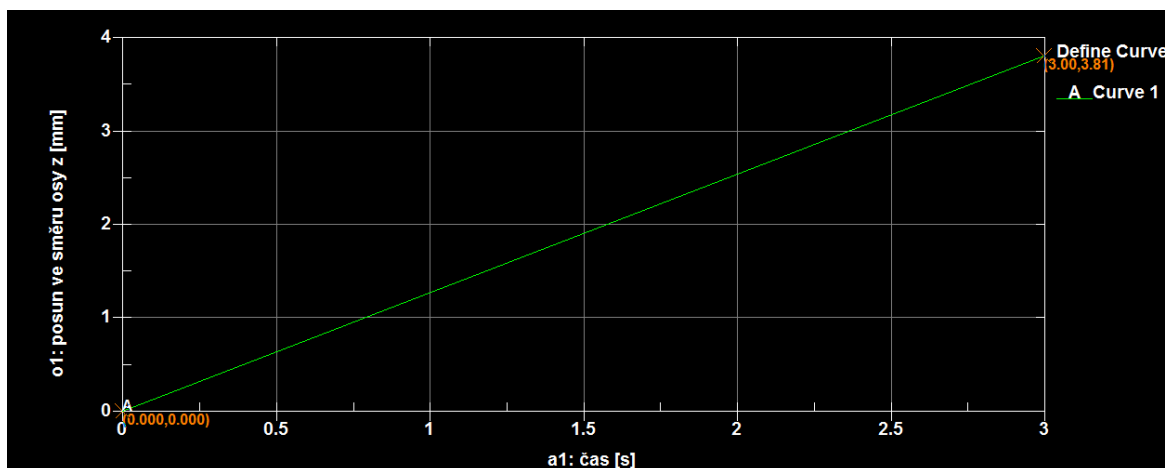
Obr. 6. 4. 4 Nastavení okrajových podmínek a zatížení pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích s ocelovými podložkami (soubor *.k, PSPad)

```
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
$#   nsid      dof      vad      lcid      sf      vid      death      birth
      1         3         2         1  1.000000      0      0.000      0.000
$#   nsid      dof      vad      lcid      sf      vid      death      birth
      2         3         2         2  1.000000      0      0.000      0.000
```

Obr. 6. 4. 5 Nastavení zatížení pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích s ocelovými podložkami, bez podepření (soubor *.k, PSPad)

```
*DEFINE_CURVE
$#   lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      1         0  1.000000  1.000000  0.000      0.000      0
$#
      a1      o1
      0.000      0.000
      3.000000      3.810000
*DEFINE_CURVE
$#   lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      2         0  1.000000  1.000000  0.000      0.000      0
$#
      a1      o1
      0.000      0.000
      3.000000      -3.810000
```

Obr. 6. 4. 6 Zadané zatěžovací křivky, které charakterizují kvazi-statické zatěžování, pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích s ocelovými podložkami (soubor *.k, PSPad) → a1: čas [s]; o1: posun ve směru osy z [mm] (VAD = 2; DOF = 3)



Obr. 6. 4. 7 Kladná zatěžovací křivka (LCID = 1), která charakterizuje kvazi-statické zatěžování, pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích s ocelovými podložkami (LS-PrePost v. 4.0)

Mezi podstavami válce a podložkami bylo nutné nadefinovat tření. Nastavení tření bylo provedeno následujícím způsobem. Nejprve byl v programu LS-PrePost otevřen vstupní soubor programu LS-DYNA, který již obsahoval informace o konečnoprvkovém modelu, případně také o použitých materiálových modelech. Dále byla v tomto programu v záložce 3, sekci *Contact vybrána možnost NODES_TO_SURFACE [1], u které byla následně zvolena možnost editovat (edit), čímž byly zobrazeny funkční karty, které náleží klíčovému slovu *CONTACT_NODES_TO_SURFACE, s příslušnými parametry v grafickém prostředí. Parametry funkčních karet byly zadány přímo v programu celkem dvakrát, zvlášť pro definici tření mezi spodní podložkou a spodní podstavou válce a zvlášť pro definici tření mezi horní podložkou a horní podstavou válce. Do parametru SSID bylo vždy zadáno identifikační číslo výběru uzlů (*SET_NODE_LIST) konečnoprvkového modelu podložky, které přiléhaly k podstavě konečnoprvkového modelu válce. Do parametru MSID bylo vždy zadáno identifikační číslo segmentu uzlů (*SET_SEGMENT) podstavy konečnoprvkového modelu válce. Potřebné výběry uzlů (SSID = 4; SSID = 5) a segmenty uzlů (MSID = 1; MSID = 2) byly definovány také přímo v programu LS-PrePost. Do parametru FS byla vždy zadána hodnota statického součinitele tření mezi ocelí a betonem a do parametru FD byla vždy zadána hodnota dynamického součinitele tření mezi ocelí a betonem. Hodnoty těchto součinitelů tření byly zadány dle manuálu [1] na FS = 0,3 a FD = 0,3. Zadané parametry byly následně potvrzeny vždy tlačítkem Accept a vstupní soubor programu LS-DYNA byl poté uložen s takto nově nastavenými informacemi. Nastavení tření mezi podstavami válce a podložkami je na obr. 6. 4. 8.

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

```
*CONTACT_NODES_TO_SURFACE
$#      cid      title
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
$#      4          1          4          0          0          0          0          0
$#      fs          fd          dc          vc          vdc          penchk      bt          dt
$#      0.300000    0.300    0.000    0.000    0.000    0          0.000    1.0000E+7
$#      sfs          sfm          sst          mst          sfst          sfmt          fsf          vsf
$#      1.000000    1.000000    0.000    0.000    1.000000    1.000000    1.000000    1.000000

*CONTACT_NODES_TO_SURFACE
$#      cid      title
$#      ssid      msid      sstyp      mstyp      sboxid      mboxid      spr      mpr
$#      5          2          4          0          0          0          0          0
$#      fs          fd          dc          vc          vdc          penchk      bt          dt
$#      0.300000    0.300    0.000    0.000    0.000    0          0.000    1.0000E+7
$#      sfs          sfm          sst          mst          sfst          sfmt          fsf          vsf
$#      1.000000    1.000000    0.000    0.000    1.000000    1.000000    1.000000    1.000000
```

Obr. 6. 4. 8 Nastavení tření mezi podstavami válce a podložkami

Nastavení zatížení pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válcích je znázorněno na obr. 6. 4. 9. Okrajové podmínky nebyly aplikovány → viz idealizace okrajových podmínek v podkapitole 3. 1. 3 [1]. Zatížení bylo aplikováno na uzly obou podstav konečnoprvkového modelu válce (NSID = 1; NSID = 2) ve směru osy z (DOF = 3) v podobě posunů (VAD = 2). Zatěžovací křivky charakterizující kvazi-statické zatěžování (LCID = 1; LCID = 2) byly definovány dvěma stejnými hodnotami, ale opačného znaménka (lineární přímky) → natahování válce z obou stran konstantní rychlostí, viz podkapitola 3. 1. 3 [1]. Zatěžovací křivky charakterizující kvazi-statické zatěžování (natahování) zadané ve vstupním souboru programu LS-DYNA jsou na obr. 6. 4. 10. Grafické znázornění zatěžovací křivky s kladnými hodnotami (LCID = 1), která charakterizuje kvazi-statické zatěžování, je na obr. 6. 4. 11. V rámci těchto numerických simulací byly dále aplikovány také zatěžovací křivky charakterizující vyšší rychlosti zatěžování. Použité zatěžovací křivky odpovídají svým tvarem křivkám, které charakterizují posuny podstav válce v závislosti na čase. Tyto křivky jsou graficky znázorněny v podkapitolách příslušných kapitole 8, tudíž pro více informací o aplikovaném zatěžování v rámci numerických simulací je nutné nahlédnout do kapitoly 8.

```
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
$#      nsid      dof      vad      lcid      sf      vid      death      birth
$#      1          3          2          2    1.000000    0      0.000    0.000
$#      nsid      dof      vad      lcid      sf      vid      death      birth
$#      2          3          2          1    1.000000    0      0.000    0.000
```

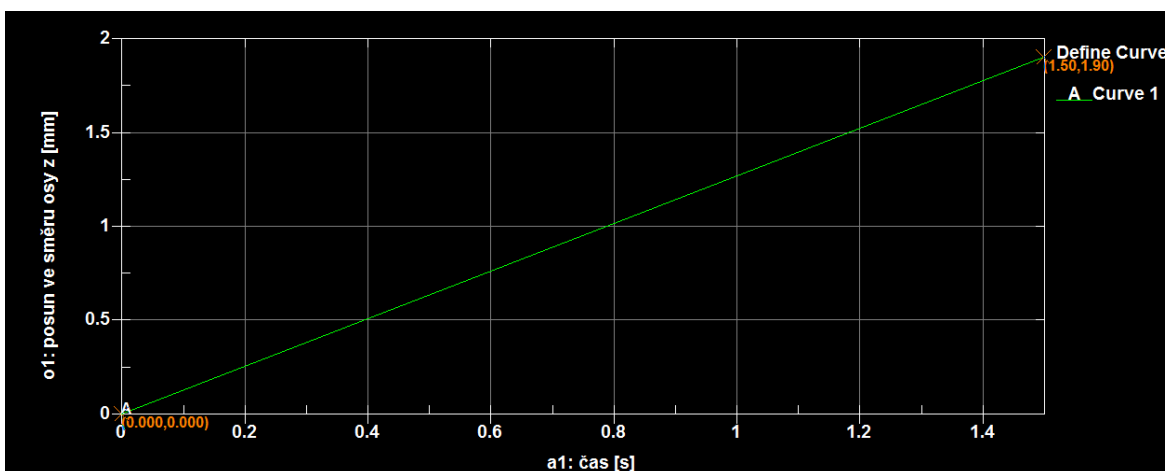
Obr. 6. 4. 9 Nastavení zatížení pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válcích, bez podepření (soubor *.k, PSPad)

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

```
*DEFINE_CURVE
$#   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp
      1     0 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$#           a1           o1
           0.000         0.000
           1.500000       1.905000

*DEFINE_CURVE
$#   lcid   sidr   sfa   sfo   offa   offo   dattyp
      2     0 1.000000 1.000000 0.000 0.000 0
$#           a1           o1
           0.000         0.000
           1.500000       -1.905000
```

Obr. 6. 4. 10 Zadané zatěžovací křivky, které charakterizují kvazi-statické zatěžování, pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válcích (soubor *.k, PSPad) → a1: čas [s]; o1: posun ve směru osy z [mm] (VAD = 2; DOF = 3)



Obr. 6. 4. 11 Kladná zatěžovací křivka (LCID = 1), která charakterizuje kvazi-statické zatěžování, pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válcích (LS-PrePost v. 4.0)

Nastavení okrajových podmínek a zatížení pro numerickou simulaci ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky je znázorněno na obr. 6. 4. 12. Okrajové podmínky byly aplikovány na obvodové uzly konečnoprvkového modelu desky (NSID = 2) ve formě vetknutí (DOFX = 1; DOFY = 1; DOFZ = 1; DOFRX = 1; DOFRY = 1; DOFRZ = 1), viz podkapitola 3. 2. Zatížení bylo aplikováno na prostřední uzel konečnoprvkového modelu desky (NSID = 1) ve směru osy z (DOF = 3) v podobě posunu (VAD = 2). Zatěžovací křivka (LCID = 1) byla definována dvěma hodnotami (lineární přímka) → deska je ohýbána konstantní rychlostí, viz podkapitola 3. 2. Zatěžovací křivka zadaná ve vstupním souboru programu LS-DYNA je na obr. 6. 4. 13.

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

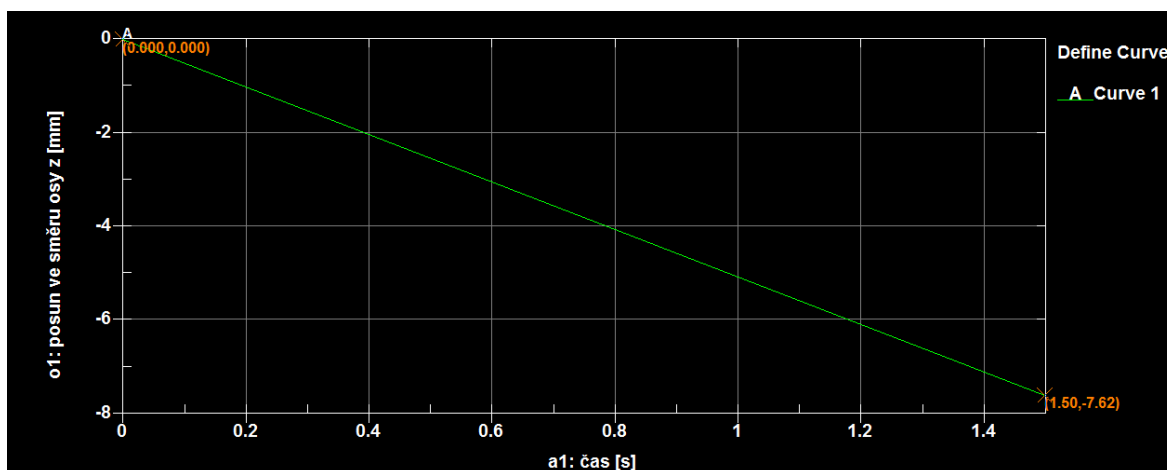
Grafické znázornění zatěžovací křivky (LCID = 1) je na obr. 6. 4. 14. Použitá zatěžovací křivka odpovídá svým tvarem křivce, která charakterizuje průhyb středu desky v závislosti na čase. Tato křivka je graficky znázorněna v podkapitole 8. 2. 1 příslušné kapitole 8, tudíž pro více informací o aplikovaném zatěžování v rámci numerických simulací je nutné nahlédnout do kapitoly 8.

```
*BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET
$#   nsid      dof      vad      lcid      sf      vid      death      birth
      1         3         2         1  1.000000      0      0.000      0.000
*BOUNDARY_SPC_SET
$#   nsid      cid      dofz      dofz      dofz      dofz      dofz      dofz
      2         0         1         1         1         1         1         1
```

Obr. 6. 4. 12 Nastavení okrajových podmínek a zatížení pro numerickou simulaci ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky (soubor *.k, PSPad)

```
*DEFINE_CURVE
$#   lcid      sidr      sfa      sfo      offa      offo      dattyp
      1         0  1.000000  1.000000  0.000      0.000      0
$#
      a1         o1
      0.000      0.000
      1.500000      -7.620000
```

Obr. 6. 4. 13 Zadaná zatěžovací křivka pro numerickou simulaci ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky (soubor *.k, PSPad) → a1: čas [s]; o1: posun ve směru osy z [mm] (VAD = 2; DOF = 3)



Obr. 6. 4. 14 Zatěžovací křivka (LCID = 1) pro numerickou simulaci ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky (LS-PrePost v. 4.0)

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

Definováním okrajových podmínek a zatížení byla tvorba výpočtových modelů řešených úloh dokončena. Na závěr bylo v každém vstupním souboru programu LS-DYNA provedeno nastavení koncového času výpočtu (*CONTROL_TERMINATION), počtu výsledků RESULT (*DATABASE_BINARY_D3PLOT), počtu výsledků TIME HISTORY (*DATABASE_BINARY_D3THDT) a požadovaných grafických výstupů. Po dokončení tohoto nastavení byly vstupní soubory programu LS-DYNA připraveny k výpočtu.

Kapitola 7

Nelineární výpočet

Veškeré nelineární testovací výpočty byly v rámci této práce provedeny v explicitním řešiči LS-DYNA, který je součástí programu ANSYS. Explicitní řešič LS-DYNA využívá, jak už název napovídá, explicitní algoritmus MKP. Princip explicitního algoritmu MKP spočívá v řešení pohybové rovnice (globální rovnice dynamické rovnováhy v maticové podobě diskretizované pomocí metody konečných prvků) ve tvaru:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}(t)$$

pro případ nestacionárního dynamického problému bez tlumení, kde:

\mathbf{M} matice hmotnosti,

\mathbf{K} matice tuhosti,

\mathbf{F} vektor zatížení,

\mathbf{U} vektor neznámých uzlových posunů.

Pohybová rovnice představuje soustavu nelineárních parciálních diferenciálních rovnic závislých na čase. Tyto rovnice nelze obecně řešit analyticky, tudíž je nutné je řešit numericky některou z explicitních metod časové integrace. Program LS-DYNA používá pro explicitní časovou integraci tzv. **metodu centrálních diferencí**.

Podstatou explicitních metod je výpočet posunů, rychlostí a zrychlení v uzlech v čase $t_{i+1} = t_i + \Delta t$ pouze ze znalosti velikostí těchto veličin v čase t_i . Pohybová rovnice bez vlivu tlumení má v čase t_i podobu:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{U}}_i + \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}_i = \mathbf{F}_i$$

K aproximaci derivací (rychlostí a zrychlení) se v programu LS-DYNA použije metoda centrálních diferencí.

1. derivace (rychlost):

$$\dot{\mathbf{U}}_i = \frac{\mathbf{U}_{i+1} - \mathbf{U}_{i-1}}{2 \cdot \Delta t}$$

2. derivace (zrychlení):

$$\ddot{\mathbf{U}}_i = \frac{\dot{\mathbf{U}}_{i+1/2} - \dot{\mathbf{U}}_{i-1/2}}{\Delta t} = \frac{\frac{\mathbf{U}_{i+1} - \mathbf{U}_i}{\Delta t} - \frac{\mathbf{U}_i - \mathbf{U}_{i-1}}{\Delta t}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{U}_{i+1} - 2 \cdot \mathbf{U}_i + \mathbf{U}_{i-1}}{\Delta t^2}$$

Poté se dosadí za druhou derivaci do pohybové rovnice v čase t_i .

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

Po úpravách je získána rovnice pro posuny v čase t_{i+1} :

$$(\mathbf{M}/\Delta t^2) \cdot \mathbf{U}_{i+1} = \mathbf{F}_i - \mathbf{K} \cdot \mathbf{U}_i + \mathbf{M} \cdot (2 \cdot \mathbf{U}_i - \mathbf{U}_{i-1}) / \Delta t^2$$

Výpočet začíná vždy v čase $t_0 = 0$ s časovým krokem Δt a počátečními podmínkami:

$$\mathbf{U}(0) = \mathbf{U}_0$$

$$\dot{\mathbf{U}}(0) = \dot{\mathbf{U}}_0$$

Metoda centrálních diferencí předpokládá, že rozdíl mezi veličinami mezi dvěma časovými úseky je natolik malý, že nemá vliv na přesnost výpočtu. Tento předpoklad je možné splnit pouze při velmi malé hodnotě časového kroku Δt . Tato skutečnost vede k extrémně vysokému počtu kroků. Z tohoto důvodu je metoda vhodná pouze pro velmi krátké děje, např. pro simulace bariérových zkoušek automobilů (crash testy). Tyto děje jsou prakticky vždy spojeny s velkými materiálovými a geometrickými nelinearitami. Při explicitní integraci není nutné provádět inverzi matice tuhosti prvků a je možné počítat s diagonální maticí hmotnosti. Nevýhodou metody centrálních diferencí je její podmíněná stabilita, která se váže k velikosti časového kroku. Aby byla metoda stabilní, musí být velikost časového kroku Δt menší nebo rovna kritické hodnotě časového kroku Δt_{krit} :

$$\Delta t \leq \Delta t_{\text{krit}}$$

Kritická velikost časového kroku se stanovuje ze vztahu:

$$\Delta t_{\text{krit}} = L/c$$

kde L charakteristický rozměr konečného prvku,

c rychlost šíření napěťové vlny v daném materiálu.

V programu LS-DYNA se velikost časového kroku stanovuje tak, že v každém kroku jsou vypočítány hodnoty časového kroku pro každý prvek. Z těchto hodnot je vybrána nejmenší hodnota, která je dále ještě přenásobena určitým koeficientem, jehož hodnota je z numerických důvodů rovna 0,9. Z uvedeného vyplývá, že pokud se v konečnoprvkové síti objeví výrazně menší prvek, byť by byl pouze jediný, dojde k výraznému prodloužení výpočtového času. V případě úloh řešených explicitním algoritmem je tedy třeba dbát na to, aby síť konečných prvků byla vždy rovnoměrná bez větších rozdílů ve velikosti prvků.

Velkou výhodou explicitního řešiče LS-DYNA, nebo obecně jakéhokoliv explicitního řešiče, je možnost kontrolovat výpočty již v jejich průběhu. Tato skutečnost umožňuje odhalit některé chyby hned na počátku, čímž se šetří čas.

Před spuštěním výpočtu byl v rámci této práce do řešiče vždy nastaven příslušný adresář, do kterého se v průběhu výpočtu ukládaly výstupní soubory programu LS-DYNA, a příslušný vstupní soubor programu LS-DYNA, který obsahoval informace pro výpočet v sintaxi programu LS-DYNA. Dále byla před spuštěním výpočtu vždy vybrána také

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

požadovaná přesnost výpočtu (jednoduchá nebo dvojitá přesnost). Přesnost výpočtu byla vybírána na základě stability řešení.

Informace uvedené v této kapitole byly převzaty ze zdrojů [3], [4] a [14].

Kapitola 8

Vyhodnocení výsledků

Tato kapitola je zaměřena na popis a vyhodnocení výsledků získaných z provedených nelineárních testovacích výpočtů neboli na popis a vyhodnocení výsledků získaných z provedených numerických simulací řešených úloh, při kterých byly aplikovány nelineární materiálové modely betonu popsané v podkapitolách příslušných kapitole 5.

V rámci následujících podkapitol bude nejprve popsán experiment, který byl v rámci této práce proveden za účelem verifikace nelineárních materiálových modelů betonu implementovaných ve výpočetním systému LS-DYNA. Výsledky získané z experimentu budou popsány a vyhodnoceny a v závěrečné podkapitole budou srovnány s výsledky získanými z provedených numerických simulací, při kterých byly použity určité typy nelineárních materiálových modelů betonu, čímž bude provedena zmíněná verifikace. Dále budou v rámci následujících podkapitol popsány a vyhodnoceny výsledky získané z provedených numerických simulací při různých způsobech zatěžování, kdy v rámci této práce byly uvažovány následující způsoby zatěžování: kvazi-statické zatěžování, vyšší rychlosti zatěžování a cyklické zatěžování. Popis a vyhodnocení těchto výsledků bude provedeno na základě pracovních a zatěžovacích diagramů v případě aplikace kvazi-statického zatěžování a vyšších rychlostí zatěžování a na základě hysterézních křivek v případě aplikace cyklického zatěžování na modely řešených úloh. Vyhodnocena bude dále také závislost výsledků na síti konečných prvků, jejíž vyhodnocení je v případě nelineárních materiálových modelů betonu implementovaných ve výpočetním systému LS-DYNA na místě vzhledem k tomu, že tyto materiálové modely většinou zahrnují tahové, případně i tlakové, změkčování. Na závěr bude provedeno srovnání příslušných výsledků od jednotlivých nelineárních materiálových modelů betonu.

Pro zobrazování a animace výsledků byl v rámci této práce používán program LS-PrePost. Souborem, který bylo vždy nutné otevřít v programu LS-PrePost pro zobrazení výsledků, byl výstupní soubor programu LS-DYNA D3PLOT.

8.1 Experiment

Za účelem verifikace nelineárních materiálových modelů betonu implementovaných ve výpočetním systému LS-DYNA byl v rámci této práce proveden experiment. V rámci experimentu byla prováděna zkouška mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci bez ocelových podložek. Zkouška byla provedena celkem třikrát na třech stejných zkušebních tělesech. Zkušebním tělesem byl, jak již napovídá název zkoušky, betonový válec o výšce cca 300 mm s průměrem podstavy cca 150 mm → reálné rozměry zkušebního válce přibližně odpovídaly rozměrům modelu válce, viz podkapitola 6. 1. Beton, ze kterého byly vyrobeny zkušební válce, byl třídy C 35/45, střední hodnota pevnosti betonu v tlaku se tedy pohybovala okolo 43 MPa → použitý beton odpovídal betonu uvažovanému v rámci numerických simulací. V každém zkušebním válci byl umístěn tenzometr pro měření poměrných deformací v průběhu zatěžování. Při zkoušce byl zkušební válec umístěn mezi dvěma ocelovými deskami (obr. 8. 1. 1). Spodní ocelová deska byla položena na uměle vytvořeném tuhém ocelovém podložení (obr. 8. 1. 2). Horní ocelová deska byla položena na zkušebním válci. Zatěžování zkušebního válce bylo realizováno prostřednictvím zkušebního přístroje, který vyvíjel tlakové namáhání (obr. 8. 1. 3). V průběhu zkoušky byl zkušební válec po dobu 1,5 s stlačován konstantní rychlostí tak, aby byl v čase 1,5 s od začátku zatěžování stlačen o cca 3,8 mm, během čehož došlo k porušení válce (obr. 8. 1. 4). Během zkoušky byly monitorovány veličiny v podobě doby trvání zkoušky (čas), poměrné deformace zkušebního válce (tenzometr), svislého posunu podstavy válce (stlačení válce) a tlakové síly, kterou musel během zkoušky vyvíjet zkušební přístroj.

Experiment byl proveden ve zkušebně Ústavu ocelových a dřevěných konstrukcí na FAST VUT v Brně.



Obr. 8. 1. 1 Betonový zkušební válec mezi ocelovými deskami



Obr. 8. 1. 2 Tuhé ocelové podložení



Obr. 8. 1. 3 Zkušební přístroj, který vyvíjel tlakové namáhání

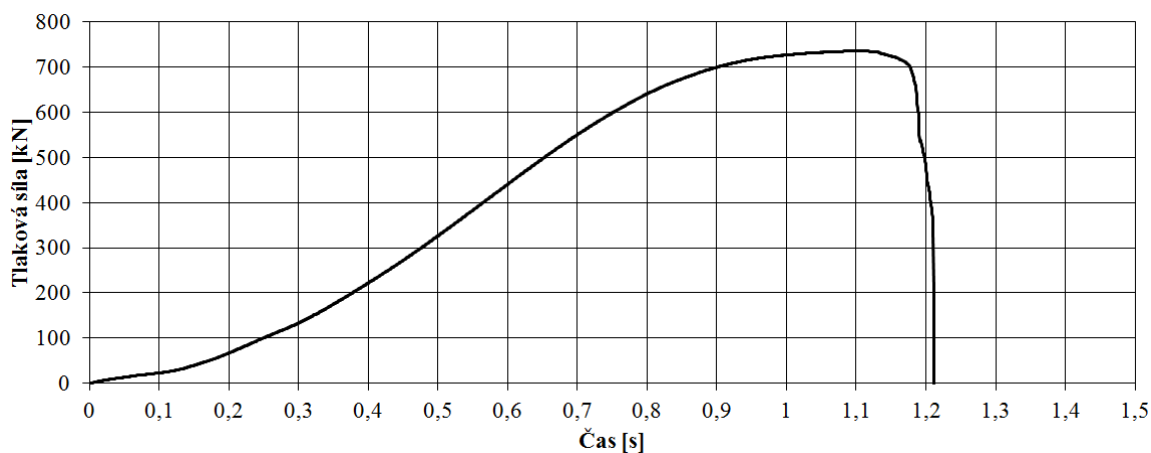


Obr. 8. 1. 4 Porušený betonový zkušební válec

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

Na základě výsledků provedeného experimentu byl vynesena zatěžovací l-t diagram betonového zkušebního válce v tlaku neboli graf závislosti tlakové síly ve zkušební přístroji na časovém průběhu zkoušky (na čase). Z tohoto diagramu lze vzhledem k tomu, že vztah mezi deformací (stlačením) válce a časem je lineární (konstantní rychlost zatěžování), jednoduše vyčíslit chování zkušební válce v průběhu tlakového zatěžování, kterému odpovídá chování betonu, ze kterého byly vyrobeny zkušební válce, v tlaku, a také z něj lze jednoduše zjistit pevnost zkoušeného betonu v tlaku. Zatěžovací l-t diagram betonového zkušební válce v tlaku získaný z výsledků experimentu je znázorněn na obr. 8. 1. 5. Z diagramu je vidět, že od počátku zatěžování, kdy začalo docházet postupně k nárůstu tlakové síly a tedy k nárůstu tlakového napětí v betonu, se betonový válec choval nejprve nelineárně pružně (deformace válce byla vratná). S dalším nárůstem tlakové síly (napětí v betonu) začal betonový válec postupně vykazovat pružnoplastické chování (vznik trvalých plastických deformací) až do okamžiku, kdy byla dosažena maximální tlaková síla neboli maximální tlaková únosnost betonového válce (pevnost betonu v tlaku), k čemuž došlo cca v čase 1,1 s od začátku zatěžování. Od tohoto okamžiku se začalo projevovat tlakové změkčení betonu, začalo tedy docházet k nárůstu deformace betonového válce při snižování tlakové síly (tlakového napětí v betonu), což bylo způsobeno porušením betonového válce při překročení pevnosti betonu v tlaku. Pokles tlakové síly na nulovou hodnotu při nárůstu deformace byl velmi prudký, z čehož vyplývá, že se beton porušil křehce.

Maximální naměřená tlaková síla v čase 1,1 s od začátku zatěžování měla hodnotu $F_{c,max} = 736,028$ kN. Plocha podstavy válce byla $A_c = \pi \cdot d^2/4 = \pi \cdot 150^2/4 \approx 17671$ mm². Naměřená pevnost betonu v tlaku tedy měla hodnotu $R_c = F_{c,max}/A_c = 736028/17671 \approx \approx 42$ MPa.



Obr. 8. 1. 5 Zatěžovací l-t diagram betonového válce v tlaku (experiment)

8. 2 Vyhodnocení výsledků získaných z testovacích výpočtů

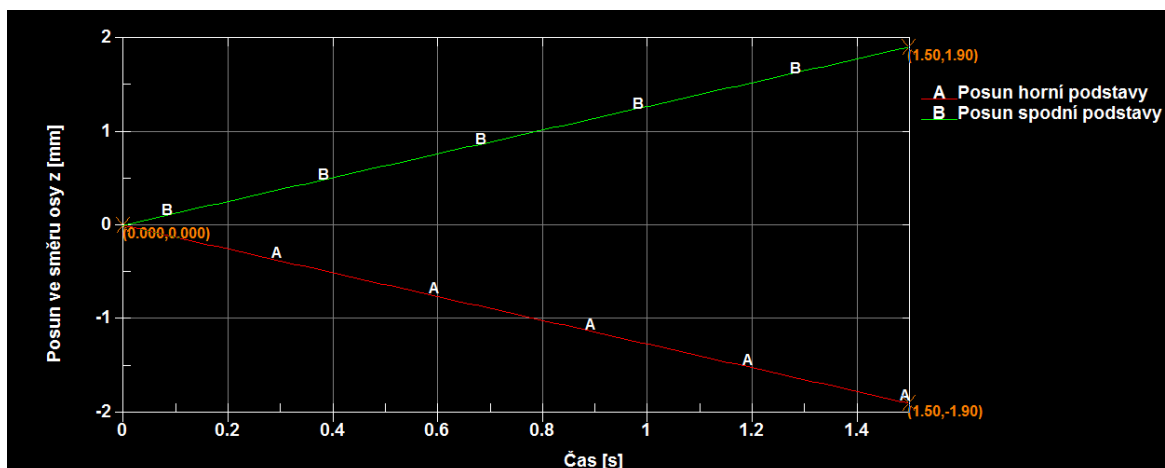
V této podkapitole budou popsány a vyhodnoceny výsledky získané z provedených numerických simulací při různých způsobech zatěžování, kdy v rámci této práce byly uvažovány následující způsoby zatěžování: kvazi-statické zatěžování, vyšší rychlosti zatěžování a cyklické zatěžování. Dále bude vyhodnocena závislost výsledků na síti konečných prvků. V neposlední řadě bude provedeno srovnání příslušných výsledků od jednotlivých nelineárních materiálových modelů betonu.

8. 2. 1 Kvazi-statické zatěžování

Kvazi-statické zatěžování je takové zatěžování, při kterém je rychlost deformace tak pomalá (pomalé přikládání zatížení), že nedochází ke změně mechanicko fyzikálních vlastností betonu při dané rychlosti deformace. Změnou mechanicko fyzikálních vlastností betonu je myšlen především nárůst pevnosti betonu. Při kvazi-statickém zatěžování tedy nedochází k nárůstu pevnosti betonu. Uvažovaným druhem betonu v rámci numerických simulací je beton C 35/45 (kvazi-statická střední hodnota pevnosti betonu v tlaku/tahu je 43/3,2 MPa).

Numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek

Při numerických simulacích zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek (kvazi-statické zatěžování) měl model válce příčně podepřené uzly obou svých podstav [1]. Uzlům obou podstav modelu válce byly tedy odebrány volnosti (posuny) ve směrech os x a y , viz podkapitola 6. 4. Pro jednotlivé numerické simulace byly na model válce aplikovány jednotlivé nelineární materiálové modely betonu. Zatížení bylo v rámci těchto numerických simulací aplikováno na uzly obou podstav modelu válce ve formě posunů ve směru osy z tak, aby výsledné stlačení válce v čase 1,5 s bylo 3,81 mm [1] (kvazi-statické stlačování válce z obou stran, koncový čas 1,5 s). Každá podstava válce se tedy v průběhu zatěžování posunula o 1,905 mm. Posuny podstav modelu válce byly v čase lineární, zatěžování tedy probíhalo konstantní rychlostí [1]. Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase jsou znázorněny na obr. 8. 2. 1.

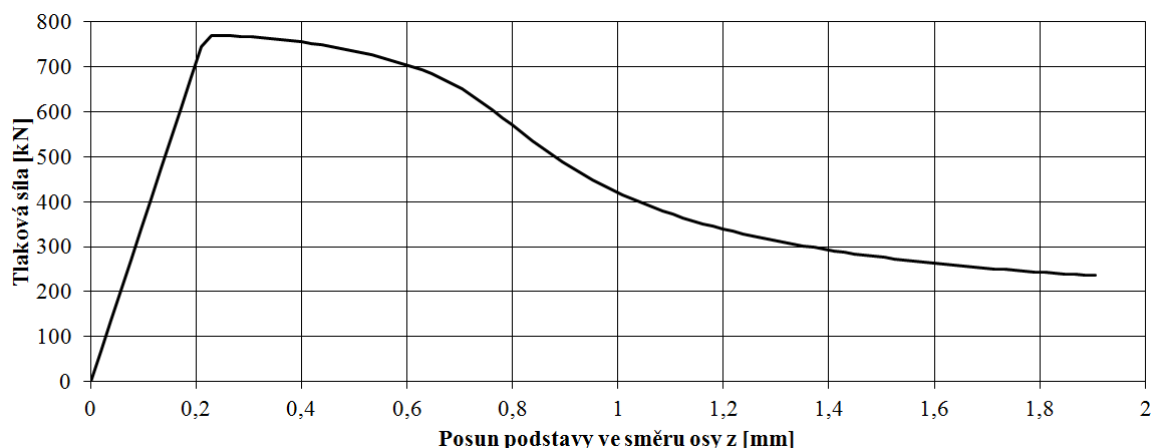


Obr. 8. 2. 1 Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, kvazi-statické stlačování válce (LS-PrePost v. 4.0)

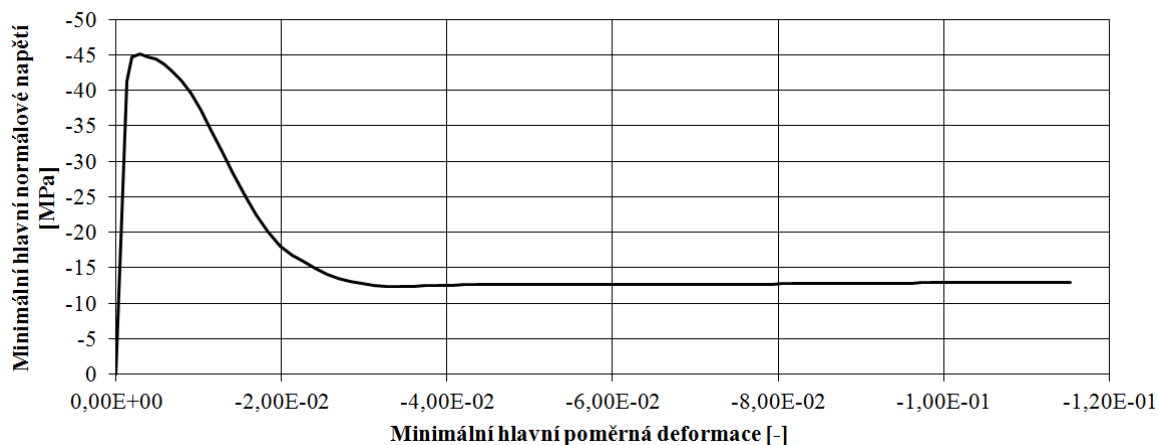
*MAT_CSCM

Zatěžovací 1-d diagram betonového (*MAT_CSCM) válce v tlaku získaný z výsledků numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování neboli graf závislosti tlakové síly, která působí na podstavu válce, na posunu podstavu válce je znázorněn na obr. 8. 2. 2. Z diagramu je vidět, že od počátku zatěžování, kdy začalo docházet k nárůstu tlakové síly a tedy k nárůstu tlakového napětí v betonu, se betonový válec choval lineárně pružně (deformace válce byla vratná). Bezprostředně před dosažením maximální tlakové síly začal betonový válec vykazovat pružnoplastické chování (vznik trvalých plastických deformací). Pružnoplastické chování vykazoval betonový válec do okamžiku, kdy byla dosažena maximální tlaková síla neboli maximální tlaková únosnost betonového válce (pevnost betonu v tlaku), k čemuž došlo v čase 0,18 s od začátku zatěžování. Od tohoto okamžiku se začalo projevovat tlakové změkčení betonu, začalo tedy docházet k nárůstu deformace (posunů podstav) betonového válce při snižování tlakové síly (tlakového napětí v betonu), což bylo způsobeno vznikem porušení v betonovém válci při překročení pevnosti betonu v tlaku. Pokles tlakové síly při nárůstu deformace byl pozvolný (nelineární tlakové změkčení) a ani v koncovém čase 1,5 s nedosáhla tlaková síla nulové hodnoty (reziduální pevnost betonu). Z uvedeného vyplývá, že se beton porušoval kvazikřehce.

Ukázka pracovního diagramu betonu (*MAT_CSCM) v tlaku na prvku modelu válce neboli grafu závislosti minimálního hlavního normálového napětí na minimální hlavní poměrné deformaci je na obr. 8. 2. 3.

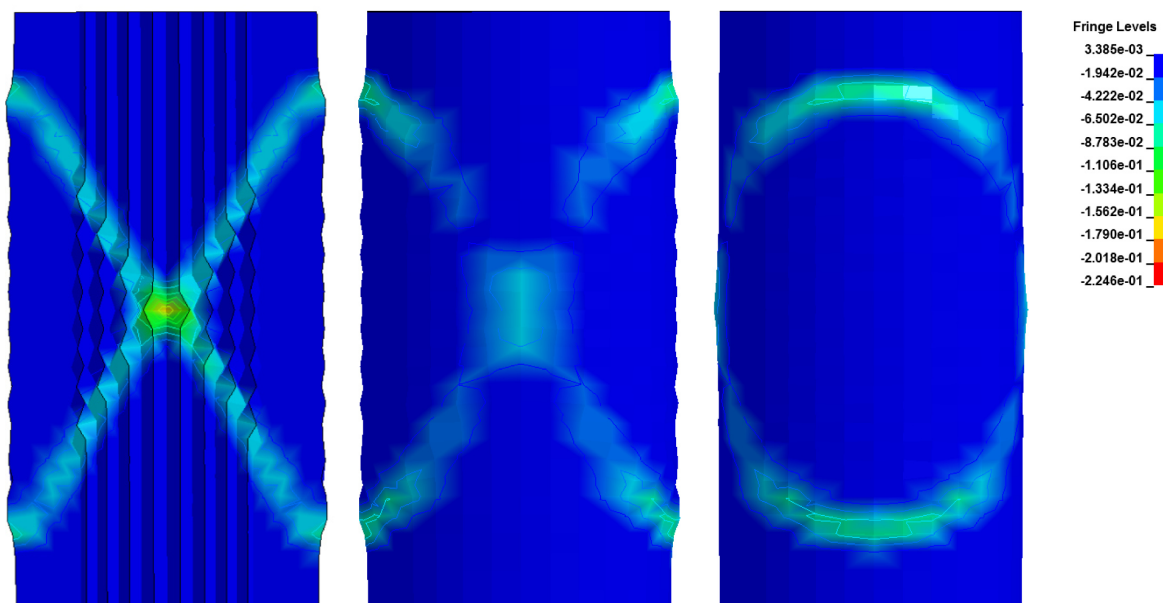


Obr. 8. 2. 2 Zatěžovací I-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CSCM

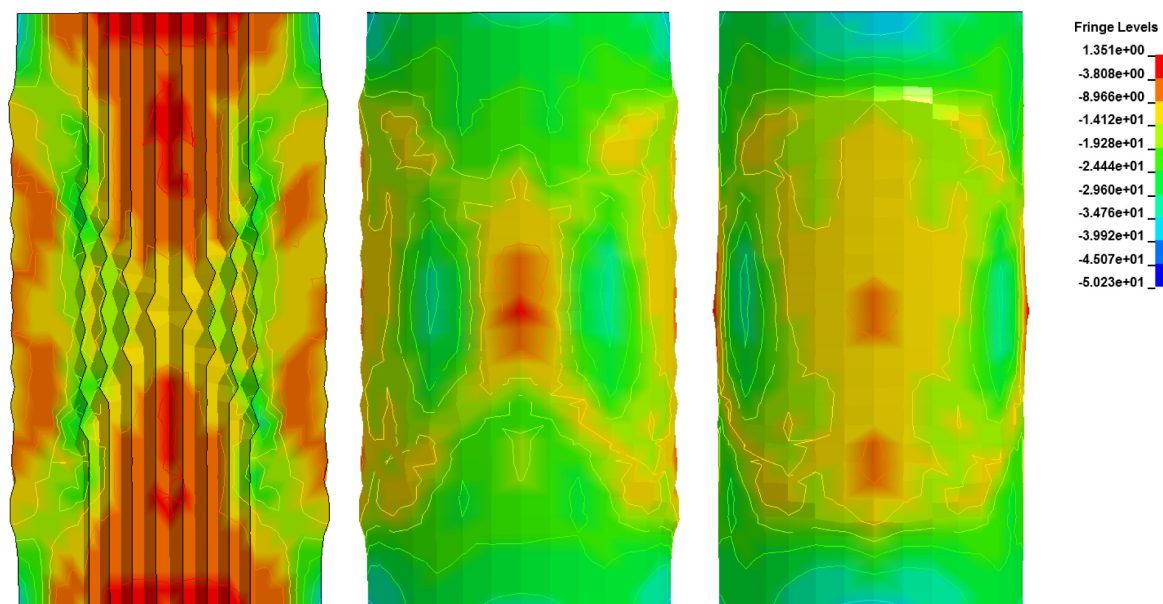


Obr. 8. 2. 3 Pracovní diagram betonu v tlaku na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CSCM

Betonový válec se po překročení pevnosti betonu v tlaku porušoval v místech, kde v čase narůstala poměrná deformace. Místa, ve kterých v čase narůstala poměrná deformace, jsou znázorněna na obr. 8. 2. 4 světle modrou a světle zelenou barvou. Na obr. 8. 2. 4 je tedy vidět, že tvar porušení betonového válce v koncovém čase 1,5 s odpovídá tvaru písmene X. Takto dosažený výsledek vykazuje dobrou shodu s výsledkem uvedeným v evaluačním manuálu [1]. Na obr. 8. 2. 4 jsou znázorněny minimální hlavní poměrné deformace [-] na válci v koncovém čase 1,5 s. Na obr. 8. 2. 5 jsou znázorněna minimální hlavní normálová napětí [MPa] na válci v koncovém čase 1,5 s.



Obr. 8. 2. 4 Minimální hlavní poměrné deformace na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_CSCM

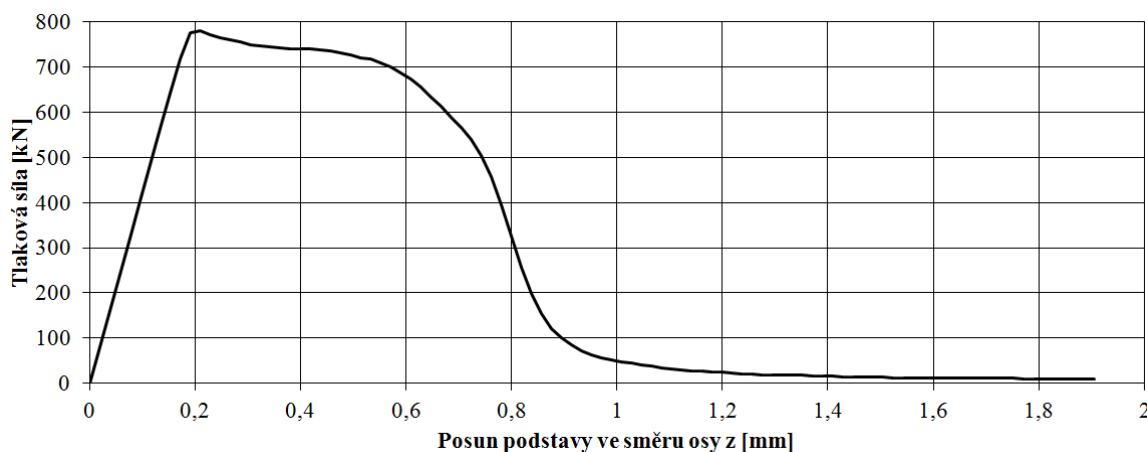


Obr. 8. 2. 5 Minimální hlavní normálová napětí na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_CSCM

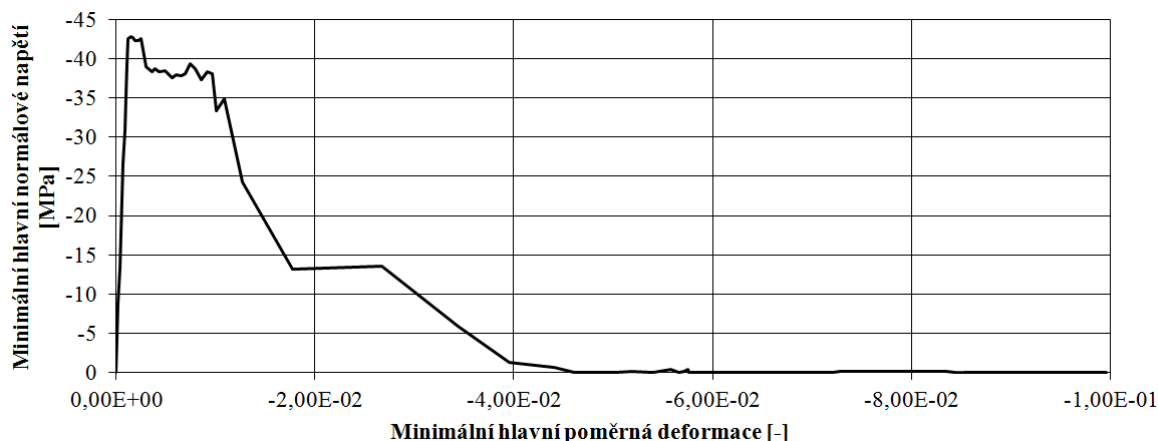
***MAT_WINFRITH_CONCRETE**

Zatěžovací I-d diagram betonového (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) válce v tlaku získaný z výsledků numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování je znázorněn na obr. 8. 2. 6. Z diagramu je vidět, že od počátku zatěžování, kdy začalo docházet k nárůstu tlakové síly a tedy k nárůstu tlakového napětí v betonu, se betonový válec choval lineárně pružně (deformace válce byla vratná). Bezprostředně před dosažením maximální tlakové síly začal betonový válec vykazovat pružnoplastické chování (vznik trvalých plastických deformací). Pružnoplastické chování vykazoval betonový válec do okamžiku, kdy byla dosažena maximální tlaková síla neboli maximální tlaková únosnost betonového válce (pevnost betonu v tlaku), k čemuž došlo v čase 0,165 s od začátku zatěžování. Od tohoto okamžiku se začalo projevovat tlakové změkčení betonu, začalo tedy docházet k nárůstu deformace (posunů podstav) betonového válce při snižování tlakové síly (napětí v betonu), což bylo způsobeno vznikem porušení v betonovém válci při překročení pevnosti betonu v tlaku. Pokles tlakové síly při nárůstu deformace byl pozvolný (nelineární tlakové změkčení) a v čase 1,2 s od začátku zatěžování dosáhla tlaková síla přibližně nulové hodnoty. Z uvedeného vyplývá, že se beton porušoval kvazikřehce.

Ukázka pracovního diagramu betonu (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) v tlaku na prvku modelu válce je na obr. 8. 2. 7.

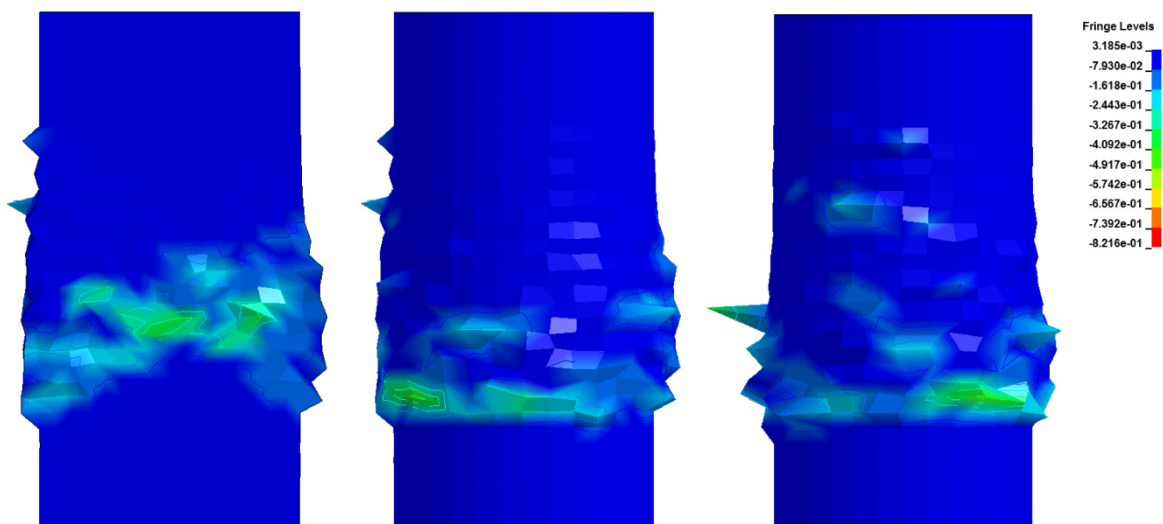


Obr. 8. 2. 6 Zatěžovací I-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_WINFRITH_CONCRETE

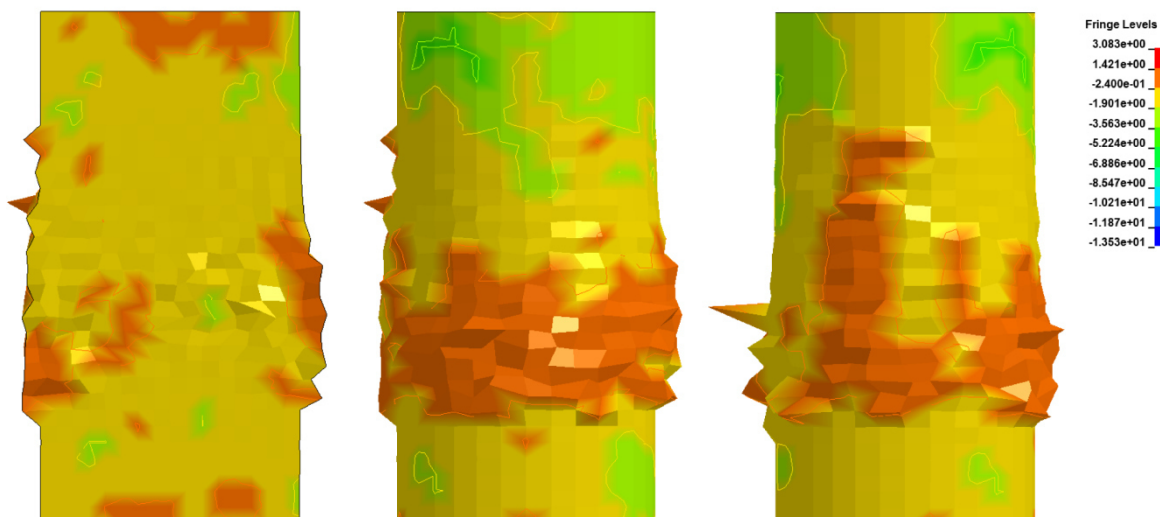


Obr. 8. 2. 7 Pracovní diagram betonu v tlaku na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_WINFRITH_CONCRETE

Betonový válec se po překročení pevnosti betonu v tlaku porušoval v místech, kde v čase narůstala poměrná deformace. Místa, ve kterých v čase narůstala poměrná deformace, jsou znázorněna na obr. 8. 2. 8 světle modrou a světle zelenou barvou. Na obr. 8. 2. 8 je tedy vidět tvar porušení betonového válce v koncovém čase 1,5 s. Na obr. 8. 2. 8 jsou znázorněny minimální hlavní poměrné deformace [-] na válci v koncovém čase 1,5 s. Na obr. 8. 2. 9 jsou znázorněna minimální hlavní normálová napětí [MPa] na válci v koncovém čase 1,5 s.



Obr. 8. 2. 8 Minimální hlavní poměrné deformace na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_WINFRITH_CONCRETE

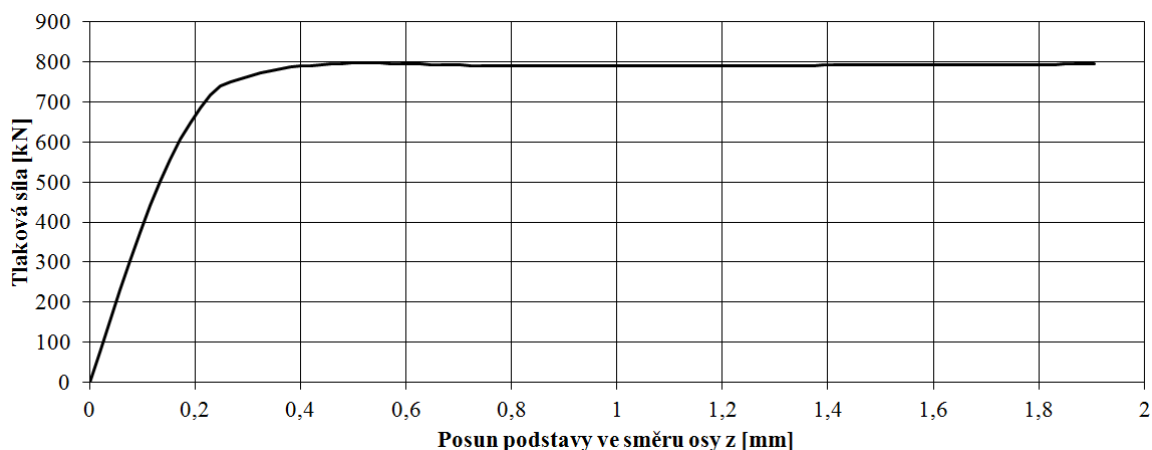


Obr. 8. 2. 9 Minimální hlavní normálová napětí na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_WINFRITH_CONCRETE

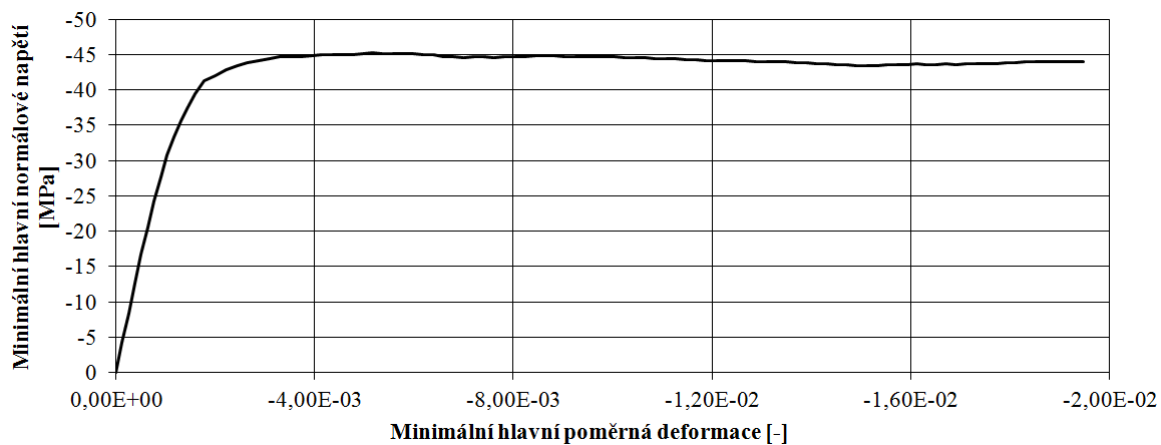
***MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL (*MAT_CDPM)**

Zatěžovací 1-d diagram betonového (*MAT_CDPM) válce v tlaku získaný z výsledků numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování je znázorněn na obr. 8. 2. 10. Z diagramu je vidět, že od počátku zatěžování, kdy začalo docházet k nárůstu tlakové síly a tedy k nárůstu tlakového napětí v betonu, se betonový válec choval lineárně pružně (deformace válce byla vratná). Přibližně v čase 0,045 s od začátku zatěžování začal betonový válec vykazovat pružnoplastické chování (vznik trvalých plastických deformací). Pružnoplastické chování vykazoval betonový válec přes okamžik, kdy byla dosažena maximální tlaková síla neboli maximální tlaková únosnost betonového válce (pevnost betonu v tlaku), k čemuž došlo v čase 0,39 s od začátku zatěžování, až do koncového času 1,5 s. Od okamžiku dosažení pevnosti betonu v tlaku tedy docházelo k nárůstu deformace (posunů podstav) betonového válce při zachování prakticky stejné tlakové síly (stejného tlakového napětí v betonu) až do koncového času 1,5 s. Z uvedeného vyplývá, že se beton plasticky přetvářel.

Ukázka pracovního diagramu betonu (*MAT_CDPM) v tlaku na prvku modelu válce je na obr. 8. 2. 11.

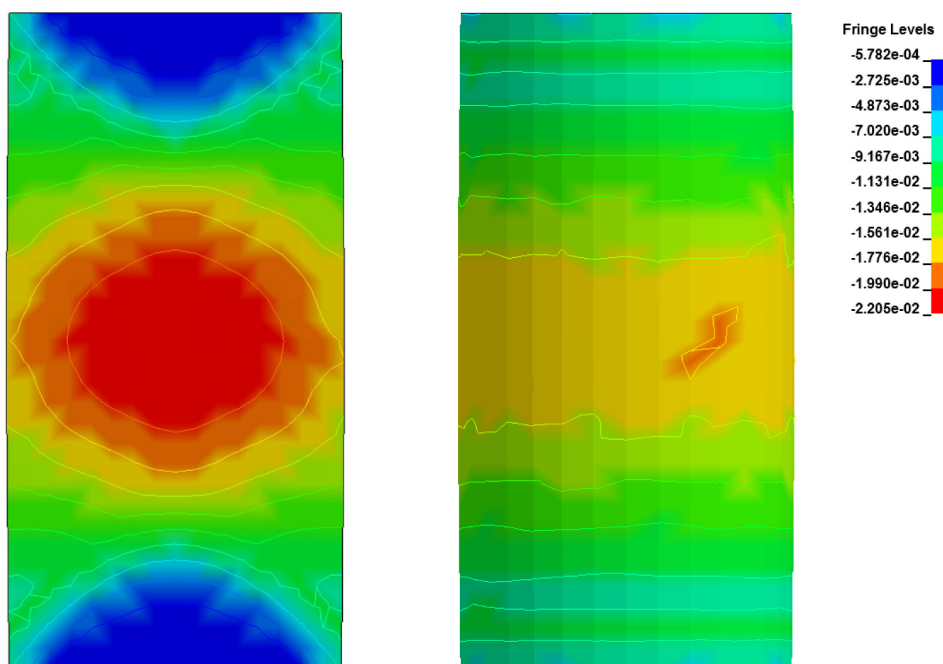


Obr. 8. 2. 10 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CDPM

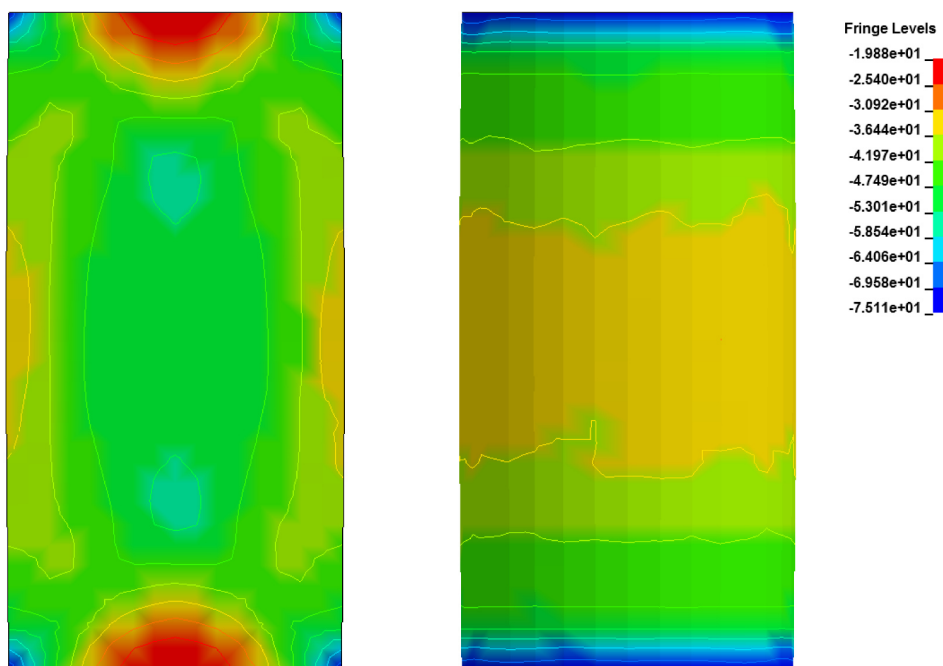


Obr. 8. 2. 11 Pracovní diagram betonu v tlaku na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CDPM

Na obr. 8. 2. 12 jsou znázorněny minimální hlavní poměrné deformace [-] na válci v koncovém čase 1,5 s. Na obr. 8. 2. 13 jsou znázorněna minimální hlavní normálová napětí [MPa] na válci v koncovém čase 1,5 s.



Obr. 8. 2. 12 Minimální hlavní poměrné deformace na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled; *MAT_CDPM

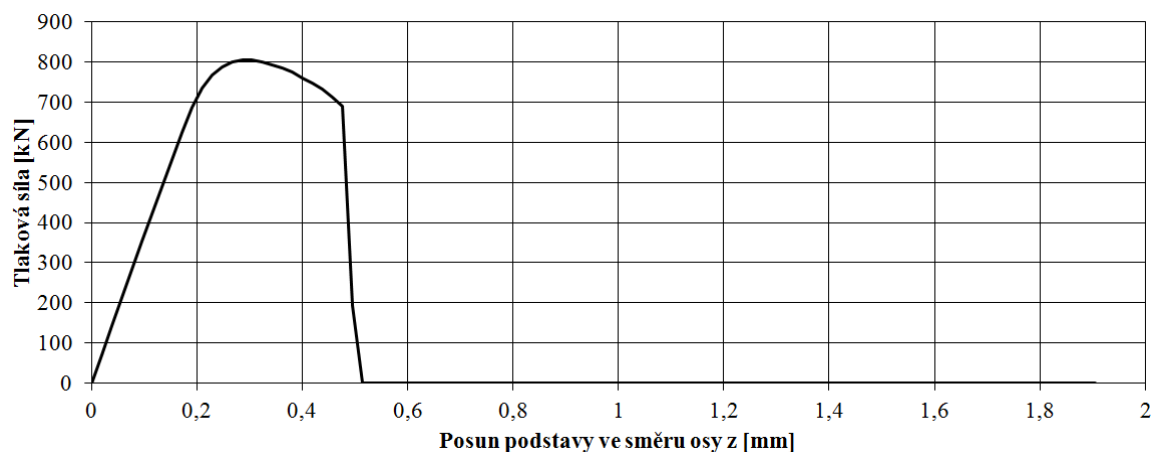


Obr. 8. 2. 13 Minimální hlavní normálová napětí na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled; *MAT_CDPM

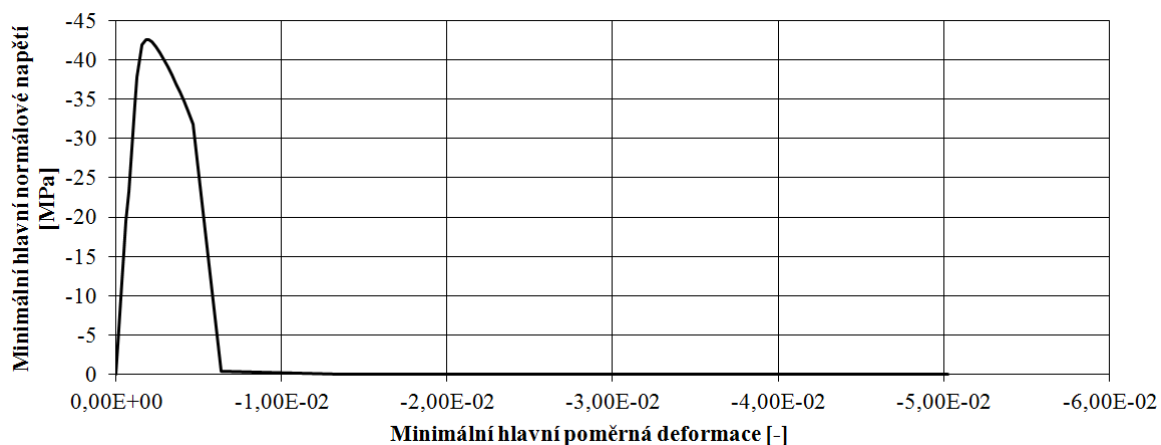
***MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3**

Zatěžovací 1-d diagram betonového (*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) válce v tlaku získaný z výsledků numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování je znázorněn na obr. 8. 2. 14. Z diagramu je vidět, že od počátku zatěžování, kdy začalo docházet k nárůstu tlakové síly a tedy k nárůstu tlakového napětí v betonu, se betonový váleček choval lineárně pružně (deformace válce byla vratná). Před dosažením maximální tlakové síly přibližně v čase 0,15 s od začátku zatěžování začal betonový váleček vykazovat pružnoplastické chování (vznik trvalých plastických deformací). Pružnoplastické chování vykazoval betonový váleček do okamžiku, kdy byla dosažena maximální tlaková síla neboli maximální tlaková únosnost betonového válce (pevnost betonu v tlaku), k čemuž došlo v čase 0,225 s od začátku zatěžování. Od tohoto okamžiku se začalo projevovat tlakové změkčení betonu, začalo tedy docházet k nárůstu deformace (posunů podstav) betonového válce při snižování tlakové síly (tlakového napětí v betonu), což bylo způsobeno vznikem porušení v betonovém válci při překročení pevnosti betonu v tlaku. Tlaková síla v čase 0,375 s od začátku zatěžování prudce klesla na nulovou hodnotu, z čehož vyplývá že se beton porušil křehce.

Ukázka pracovního diagramu betonu (*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) v tlaku na prvku modelu válce je na obr. 8. 2. 15.

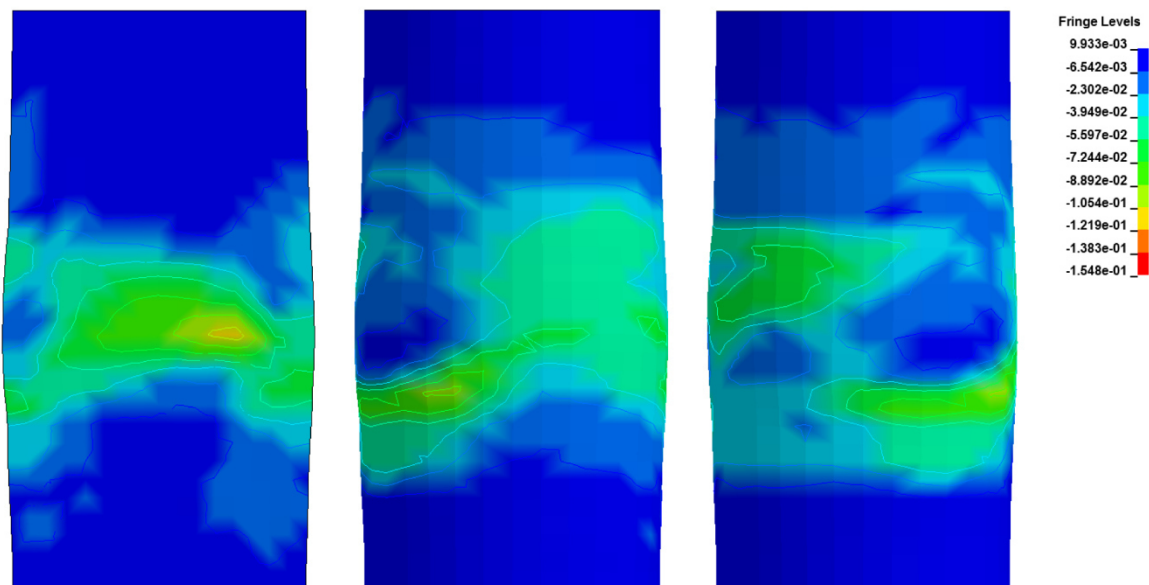


Obr. 8. 2. 14 Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3

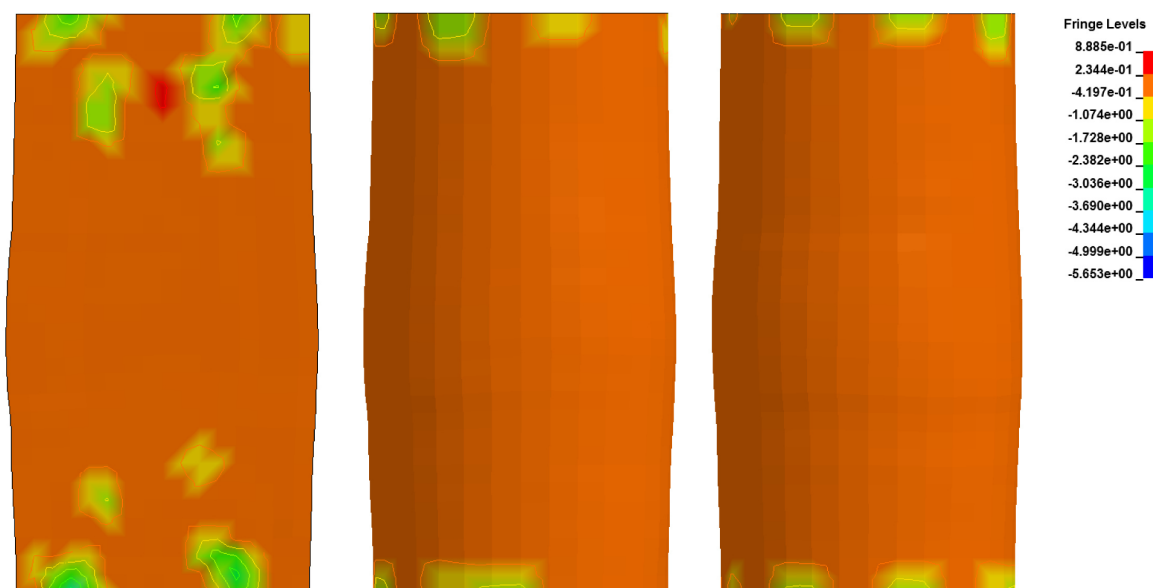


Obr. 8. 2. 15 Pracovní diagram betonu v tlaku na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3

Betonový válec se po překročení pevnosti betonu v tlaku porušoval v místech, kde v čase docházelo k nárůstu poměrné deformace. Místa, ve kterých v čase docházelo k nárůstu poměrné deformace, jsou znázorněna na obr. 8. 2. 16 světle modrou a světle zelenou barvou. Na obr. 8. 2. 16 je tedy vidět tvar porušení betonového válce v koncovém čase 1,5 s. Na obr. 8. 2. 16 jsou znázorněny minimální hlavní poměrné deformace [-] na válci v koncovém čase 1,5 s. Na obr. 8. 2. 17 jsou znázorněna minimální hlavní normálová napětí [MPa] na válci v koncovém čase 1,5 s.



Obr. 8. 2. 16 Minimální hlavní poměrné deformace na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3

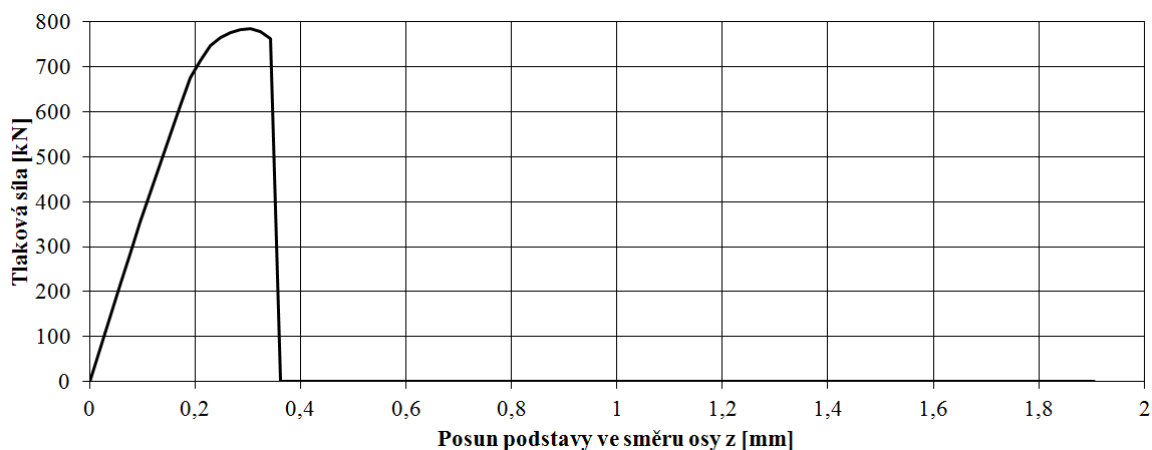


Obr. 8. 2. 17 Minimální hlavní normálová napětí na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3

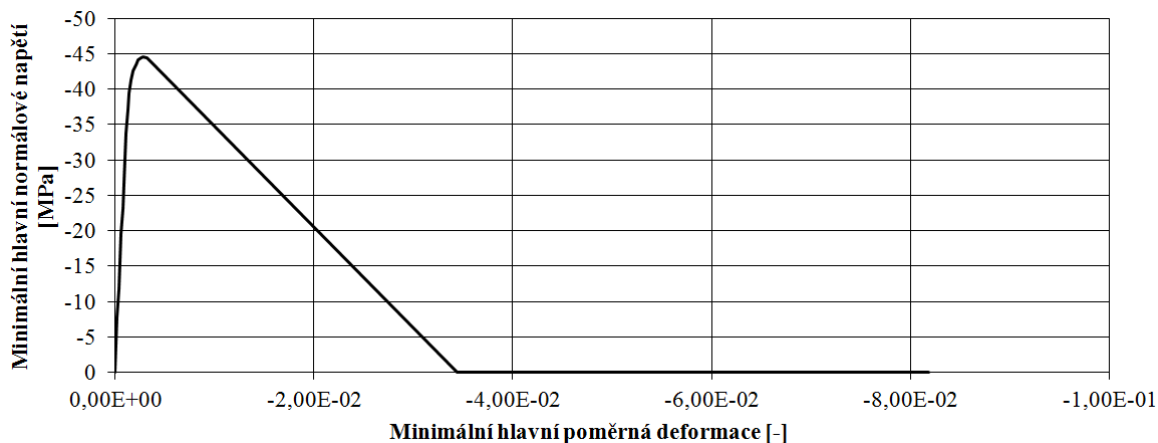
*MAT_CONCRETE_DAMAGE

Zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CONCRETE_DAMAGE) válce v tlaku získaný z výsledků numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování je znázorněn na obr. 8. 2. 18. Chování betonového válce, tedy i chování betonu, v průběhu tlakového zatěžování bylo stejné jako v případě nelineárního materiálového modelu betonu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (novější verze nelineárního materiálového modelu betonu *MAT_CONCRETE_DAMAGE, viz strana 144), z tohoto důvodu zde není rozepsáno. Maximální tlaková síla neboli maximální tlaková únosnost betonového válce (pevnost betonu v tlaku) byla dosažena v čase 0,24 s od začátku zatěžování. K prudkému poklesu tlakové síly na nulovou hodnotu došlo v čase 0,27 s od začátku zatěžování → křehké porušení betonu.

Ukázka pracovního diagramu betonu (*MAT_CONCRETE_DAMAGE) v tlaku na prvku modelu válce je na obr. 8. 2. 19.

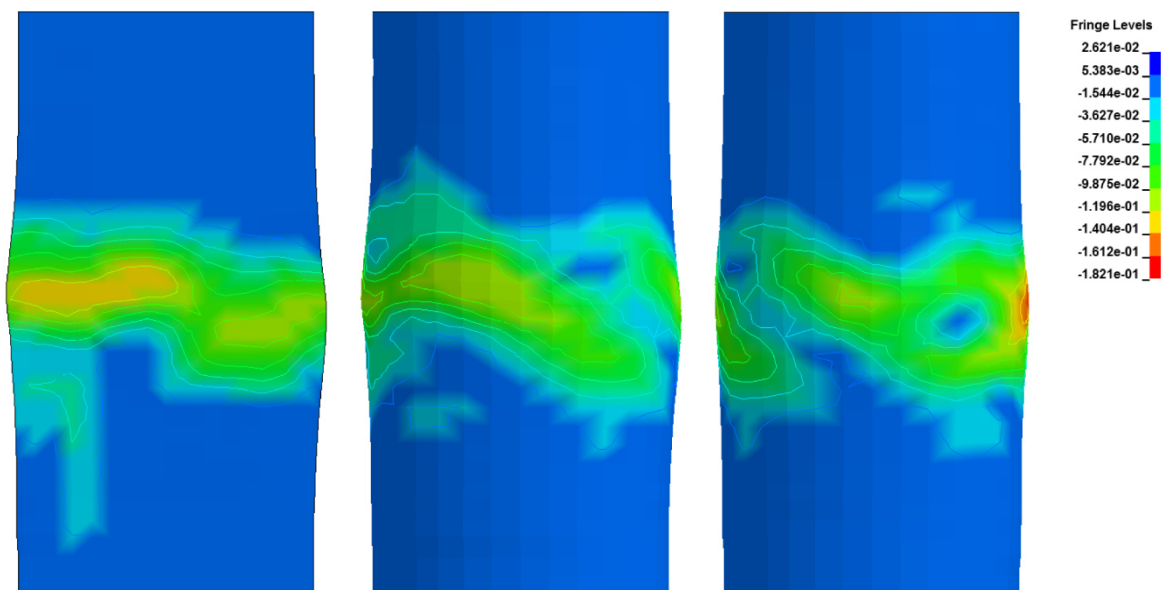


Obr. 8. 2. 18 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE

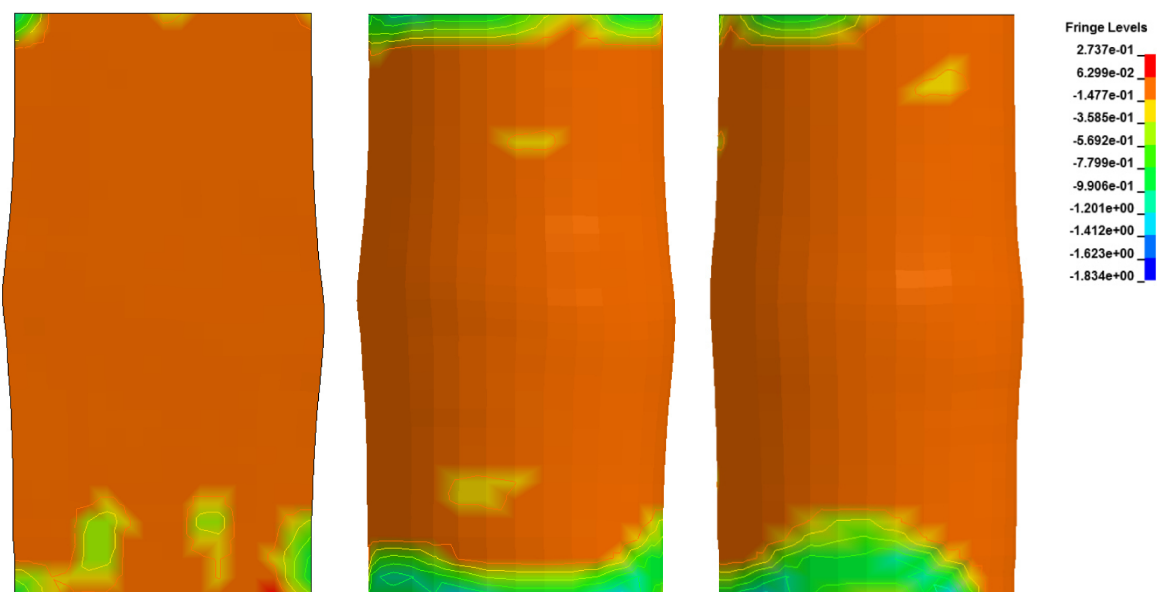


Obr. 8. 2. 19 Pracovní diagram betonu v tlaku na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE

Betonový válec se po překročení pevnosti betonu v tlaku porušoval v místech, kde v čase narůstala poměrná deformace. Místa, ve kterých v čase narůstala poměrná deformace, jsou znázorněna na obr. 8. 2. 20 světle zelenou barvou. Na obr. 8. 2. 20 je tedy vidět tvar porušení betonového válce v koncovém čase 1,5 s. Na obr. 8. 2. 20 jsou znázorněny minimální hlavní poměrné deformace [-] na válci v koncovém čase 1,5 s. Na obr. 8. 2. 21 jsou znázorněna minimální hlavní normálová napětí [MPa] na válci v koncovém čase 1,5 s.



Obr. 8. 2. 20 Minimální hlavní poměrné deformace na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_CONCRETE_DAMAGE



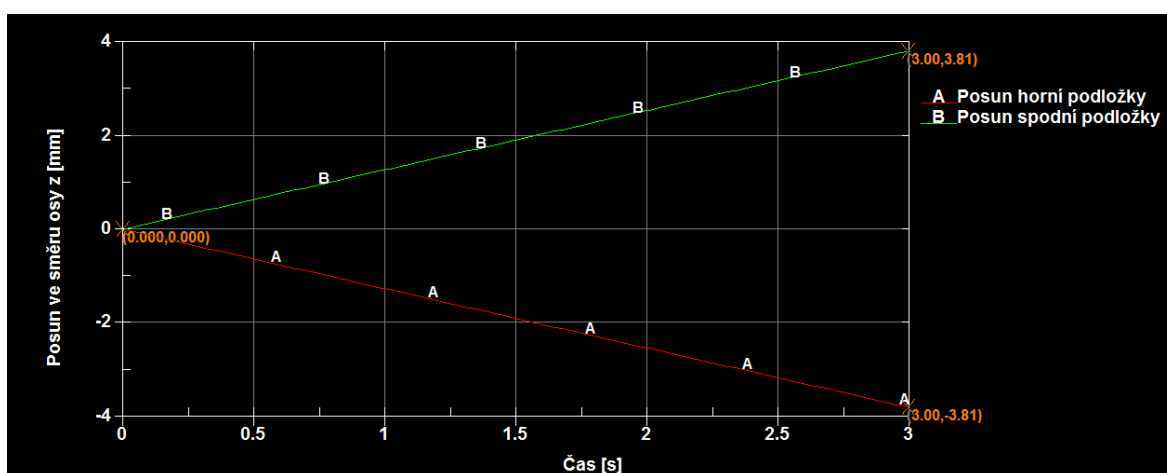
Obr. 8. 2. 21 Minimální hlavní normálová napětí na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_CONCRETE_DAMAGE

Numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích s ocelovými podložkami

Při numerických simulacích zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích s ocelovými podložkami (kvazi-statické zatěžování) měl model válce s podložkami:

- 1) příčně podepřené uzly jedné z podložek → uzlům podložky byly odebrány volnosti (posuny) ve směrech os x a y (podložka se nemohla vodorovně posouvat ani pootáčet), viz podkapitola 6. 4 [1]. (ozn. 1 podepření)
- 2) příčně podepřené uzly obou podložek → uzlům obou podložek byly odebrány volnosti (posuny) ve směrech os x a y (podložky se nemohly vodorovně posouvat ani pootáčet), viz podkapitola 6. 4 [1]. (ozn. 2 podepření)
- 3) nepodepřené uzly podložek → uzlům podložek nebyly odebrány žádné volnosti (podložky se mohly volně posouvat a pootáčet), viz podkapitola 6. 4 [1]. (ozn. bez podepření)

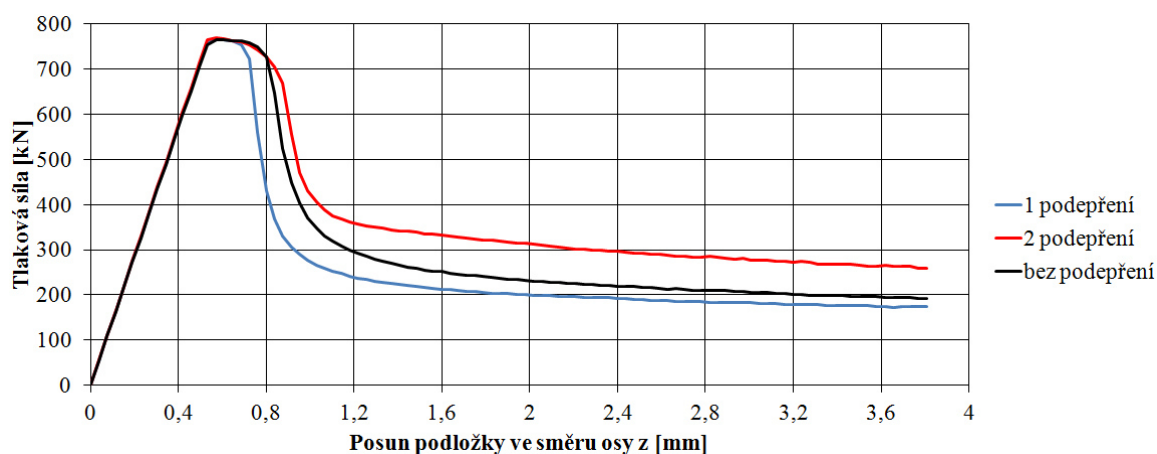
Mezi podstavami válce a podložkami bylo nadefinováno tření. Pro jednotlivé numerické simulace byly na model válce aplikovány jednotlivé nelineární materiálové modely betonu. Zatížení bylo v rámci těchto numerických simulací aplikováno na uzly obou podložek ve formě posunů ve směru osy z tak, aby výsledné stlačení válce v čase 3 s bylo 7,62 mm [1] (kvazi-statické stlačování válce s podložkami z obou stran, koncový čas 3 s). Každá podložka se tedy v průběhu zatěžování posunula o 3,81 mm. Posuny podložek byly v čase lineární, zatěžování tedy probíhalo konstantní rychlostí [1]. Křivky charakterizující posuny podložek v závislosti na čase jsou znázorněny na obr. 8. 2. 22.



Obr. 8. 2. 22 Křivky charakterizující posuny podložek v závislosti na čase, kvazi-statické stlačování válce s podložkami (LS-PrePost v. 4.0)

***MAT_CSCM**

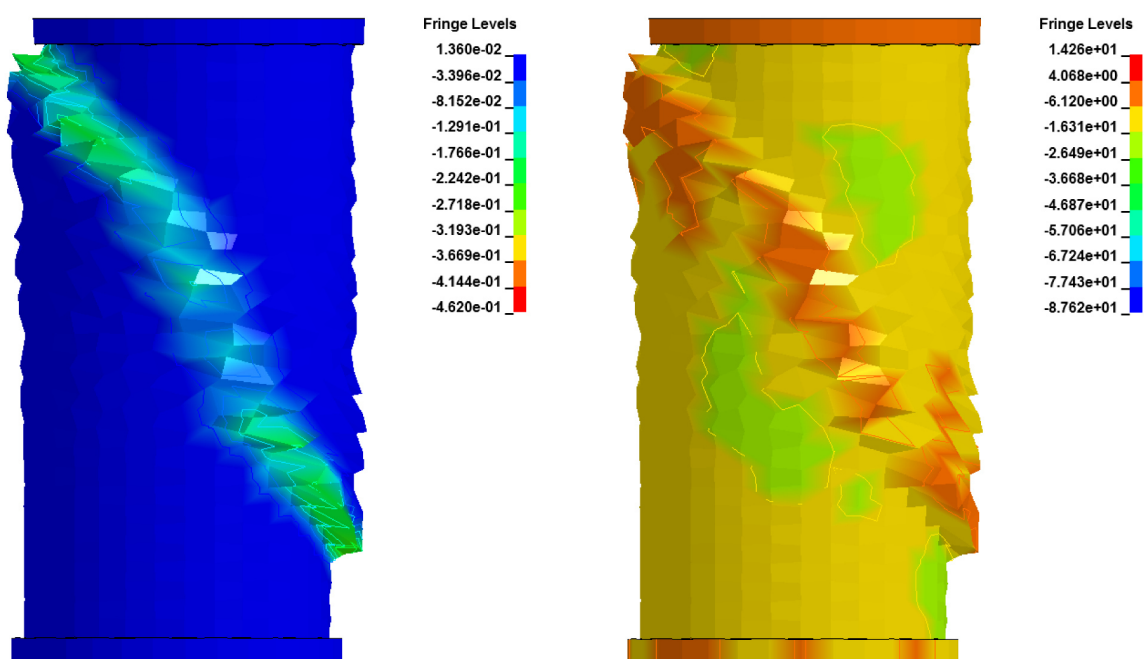
Na obr. 8. 2. 23 je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CSCM) válce v tlaku získaný z výsledků provedených numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování. Diagram zahrnuje celkem tři křivky, které charakterizují chování betonového válce, tedy i chování betonu, v průběhu tlakového zatěžování. Jednotlivé křivky odpovídají jednotlivým způsobům podepření podložek (1 podepření, 2 podepření, bez podepření) a ukazují rozdílnosti ve výsledcích pro jednotlivé způsoby podepření podložek. Chování betonového válce, tedy i chování betonu, které vycházelo z numerických simulací zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích s ocelovými podložkami (kvazi-statické zatěžování), bylo principiálně stejné jako chování betonového válce, které vycházelo z numerických simulací zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek (kvazi-statické zatěžování), z tohoto důvodu zde není rozepsáno. Maximální tlaková síla neboli maximální tlaková únosnost betonového válce (pevnost betonu v tlaku) byla dosažena při všech způsobech podepření podložek v čase 0,45 s od začátku zatěžování. Beton se při všech způsobech podepření podložek porušoval kvazikřehce, přičemž tlaková síla až do koncového času 3 s nedosáhla nulové hodnoty (reziduální pevnost betonu).



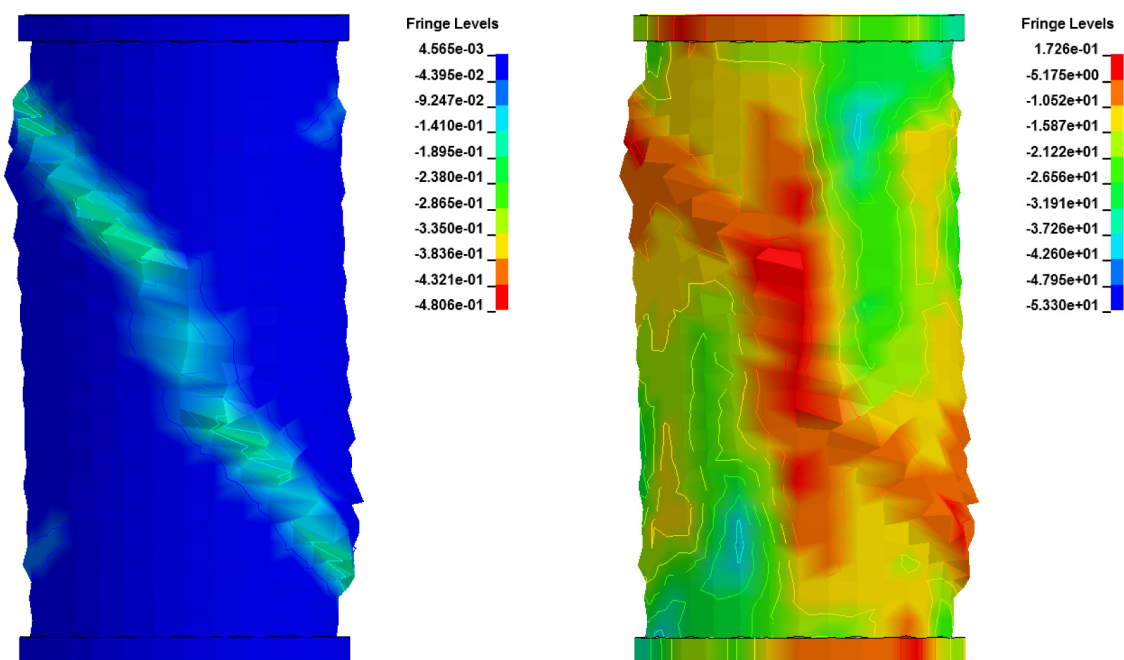
Obr. 8. 2. 23 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, *MAT_CSCM

Oblasti (místa nárůstu poměrné deformace v čase), ve kterých se betonový válec po překročení pevnosti betonu v tlaku porušoval při různých způsobech podepření podložek, jsou znázorněny na obr. 8. 2. 24, 8. 2. 25 a 8. 2. 26 vlevo světle modrou a světle zelenou barvou. Na obr. 8. 2. 24, 8. 2. 25 a 8. 2. 26 vlevo je tedy vidět, že tvar porušení betonového

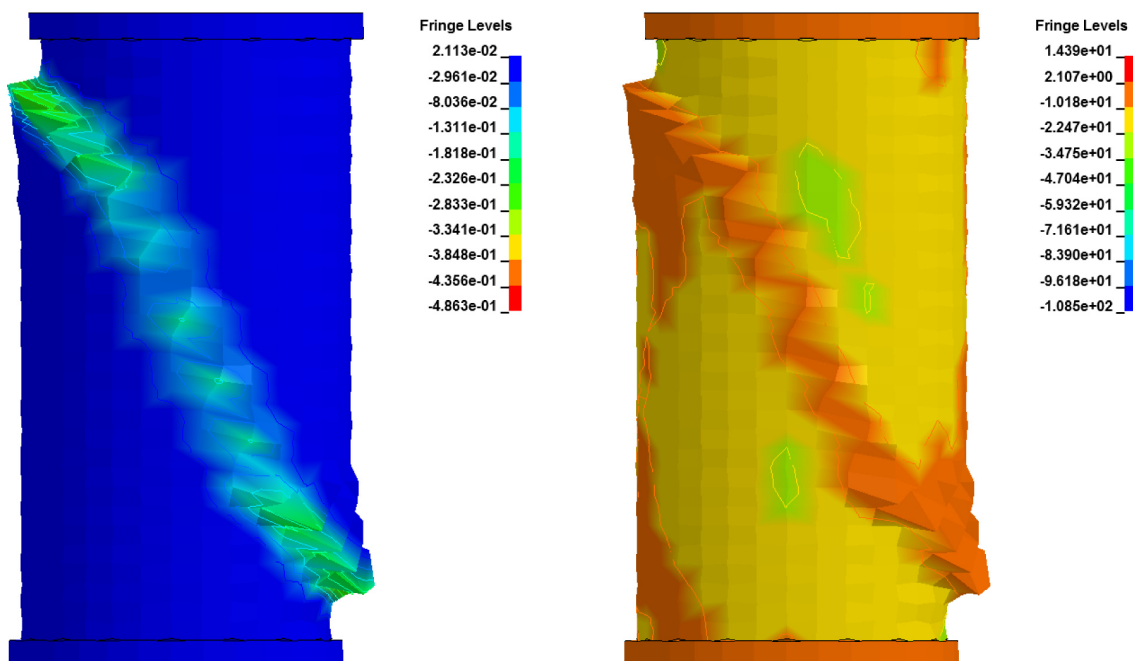
válce v koncovém čase 3 s při různých způsobech podepření podložek odpovídá diagonálnímu tvaru porušení, přičemž v případě podepření obou podložek (obr. 8. 2. 25) se tvar porušení betonového válce v koncovém čase 3 s začíná mírně podobat tvaru písmene X. Takto dosažené výsledky vykazují dobrou shodu s výsledky uvedenými v evaluačním manuálu [1]. Na obr. 8. 2. 24, 8. 2. 25 a 8. 2. 26 jsou znázorněny minimální hlavní poměrné deformace [-] a minimální hlavní normálová napětí [MPa] na válci s podložkami v koncovém čase 3 s.



Obr. 8. 2. 24 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (1 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CSCM



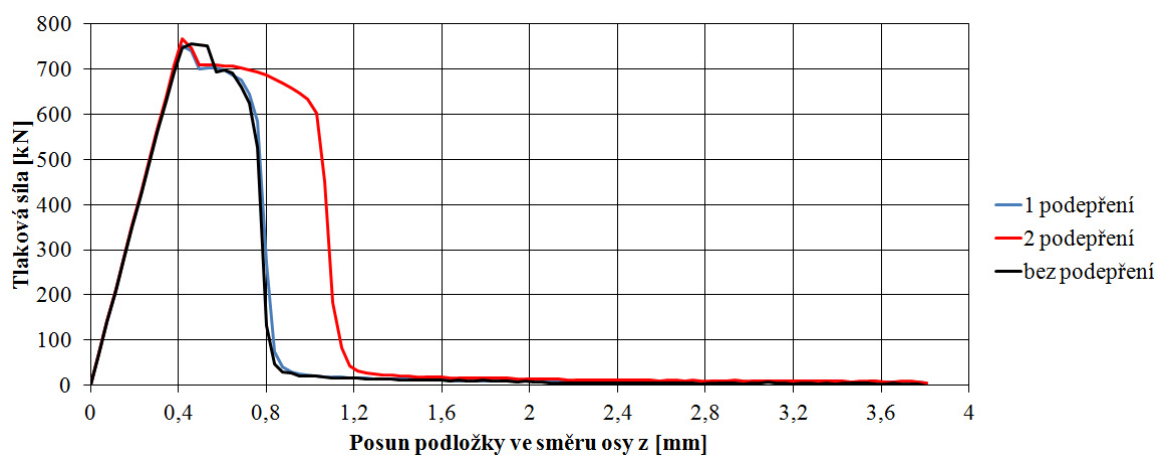
Obr. 8. 2. 25 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (2 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CSCM



Obr. 8. 2. 26 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (bez podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CSCM

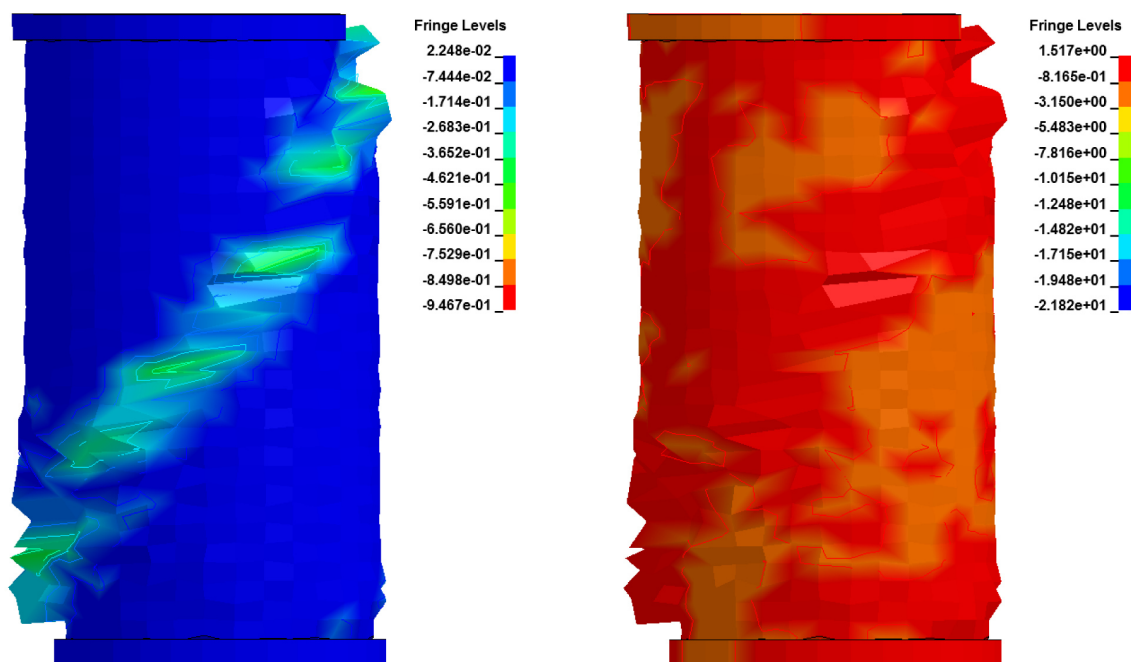
***MAT_WINFRITH_CONCRETE**

Na obr. 8. 2. 27 je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) válce v tlaku získaný z výsledků provedených numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování. Co se týče obsahu diagramu a chování betonového válce, platí stejné zásady jako u výsledků pro materiálový model *MAT_CSCM (viz strana 150). Maximální tlaková síla neboli maximální tlaková únosnost betonového válce (pevnost betonu v tlaku) byla dosažena při všech způsobech podepření podložek v čase 0,33 s od začátku zatěžování. Beton se při všech způsobech podepření podložek porušoval kvazikřehce, přičemž tlaková síla do koncového času 3 s dosáhla nulové hodnoty (nulová reziduální pevnost betonu).

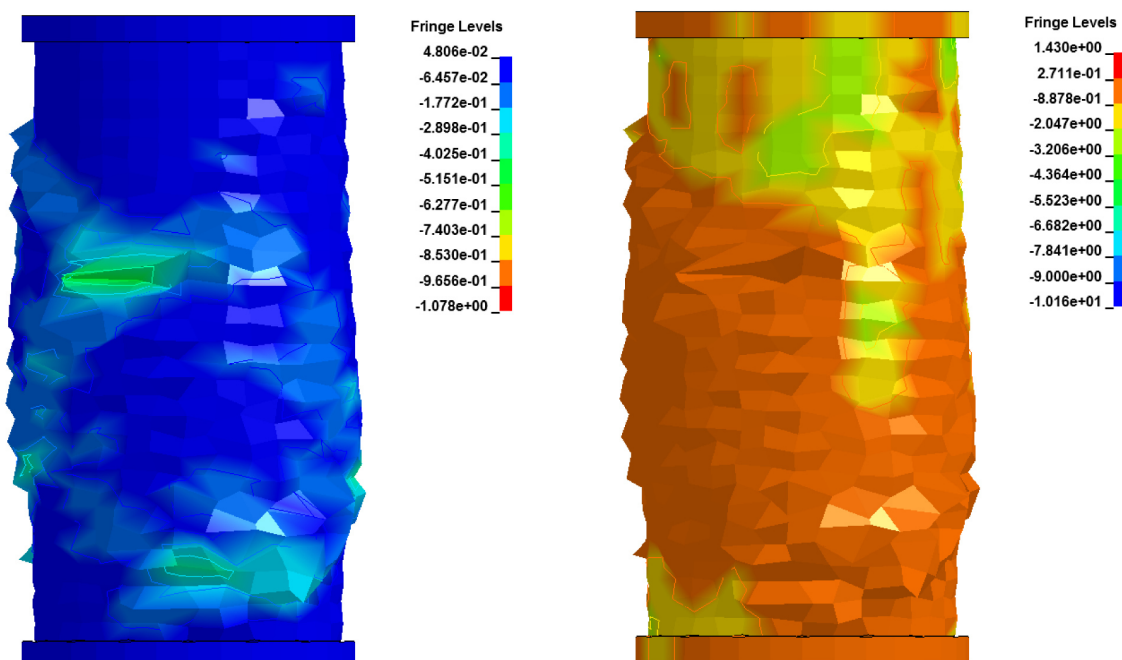


Obr. 8. 2. 27 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, *MAT_WINFRITH_CONCRETE

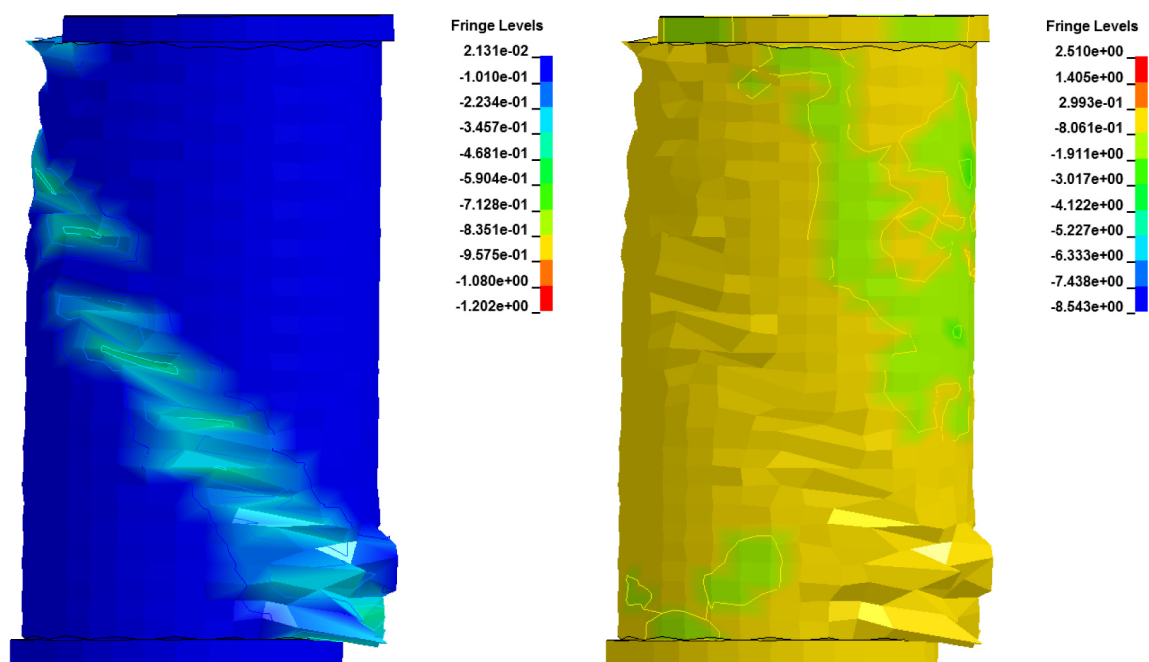
Oblasti (místa nárůstu poměrné deformace v čase), ve kterých se betonový válec po překročení pevnosti betonu v tlaku porušoval při různých způsobech podepření podložek, jsou znázorněny na obr. 8. 2. 28, 8. 2. 29 a 8. 2. 30 vlevo světle modrou a světle zelenou barvou. Na obr. 8. 2. 28, 8. 2. 29 a 8. 2. 30 vlevo je tedy vidět tvar porušení betonového válce v koncovém čase 3 s při různých způsobech podepření podložek. Na obr. 8. 2. 28, 8. 2. 29 a 8. 2. 30 jsou znázorněny minimální hlavní poměrné deformace [-] a minimální hlavní normálová napětí [MPa] na válci s podložkami v koncovém čase 3 s.



Obr. 8. 2. 28 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (1 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_WINFRITH_CONCRETE



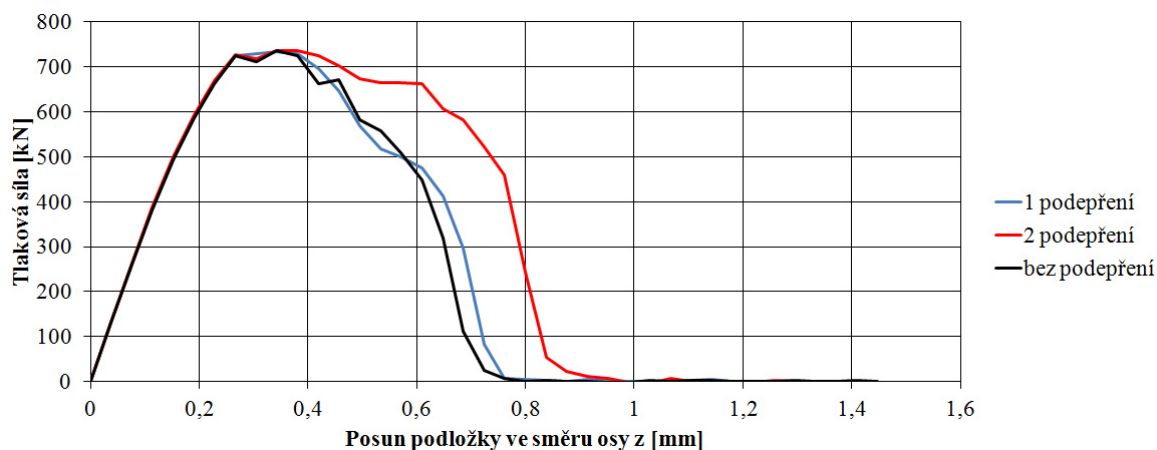
Obr. 8. 2. 29 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (2 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_WINFRITH_CONCRETE



Obr. 8. 2. 30 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (bez podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_WINFRITH_CONCRETE

***MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL (*MAT_CDPM)**

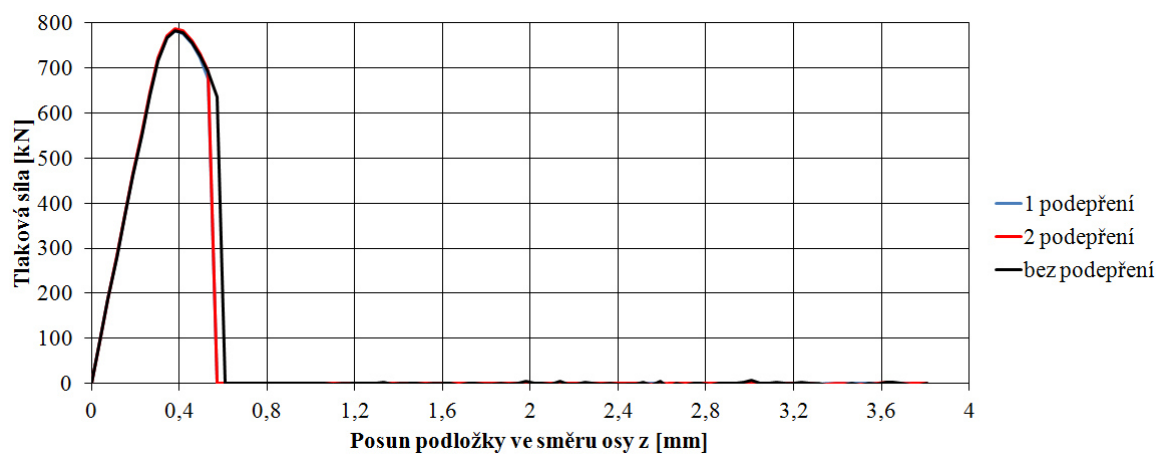
Na obr. 8. 2. 31 je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CDPM) válce v tlaku získaný z výsledků provedených numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování. Co se týče obsahu diagramu, platí stejné zásady jako u výsledků pro materiálový model *MAT_CSCM (viz strana 150). Výsledky uvedené v zatěžovacím diagramu na obr. 8. 2. 31 ovšem vycházejí z výpočtů, které byly zatíženy chybou (docházelo k nekonvergenci výpočtu), jež způsobila nárůst výpočtového času společně s výrazným nárůstem velikosti výstupních souborů. Vlivem této skutečnosti nebyly výpočty dokončeny, tudíž nebylo vyřešeno chování betonu (betonového válce) v průběhu celého tlakového zatěžování. Výsledné zatěžovací křivky mají navíc, vlivem chyb při výpočtech, rozporuplnou vypovídací hodnotu o chování betonu (betonového válce), tedy i o chování betonu. Křivky jsou nicméně znázorněny na obr. 8. 2. 31. Další výstupy zde nejsou uvedeny z důvodů nedokončení výpočtů.



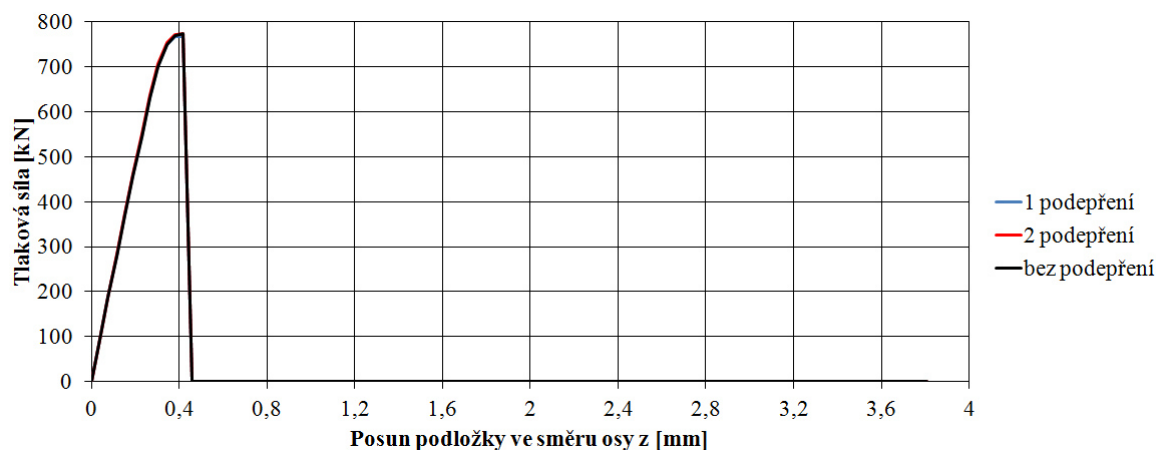
Obr. 8. 2. 31 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, *MAT_CDPM

***MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, resp. MAT_CONCRETE_DAMAGE**

Na obr. 8. 2. 32, resp. 8. 2. 33, je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, resp. *MAT_CONCRETE_DAMAGE) válce v tlaku získaný z výsledků provedených numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování. Co se týče obsahu diagramu a chování betonového válce, platí stejné zásady jako u výsledků pro materiálový model *MAT_CSCM (viz strana 150). Maximální tlaková síla neboli maximální tlaková únosnost betonového válce (pevnost betonu v tlaku) byla dosažena při všech způsobech podepření podložek v čase 0,3 s (REL3), resp. 0,33 s, od začátku zatěžování. Beton se při všech způsobech podepření podložek v určitém čase porušil křehce, tlaková síla tedy v určitém čase prudce klesla na nulovou hodnotu.

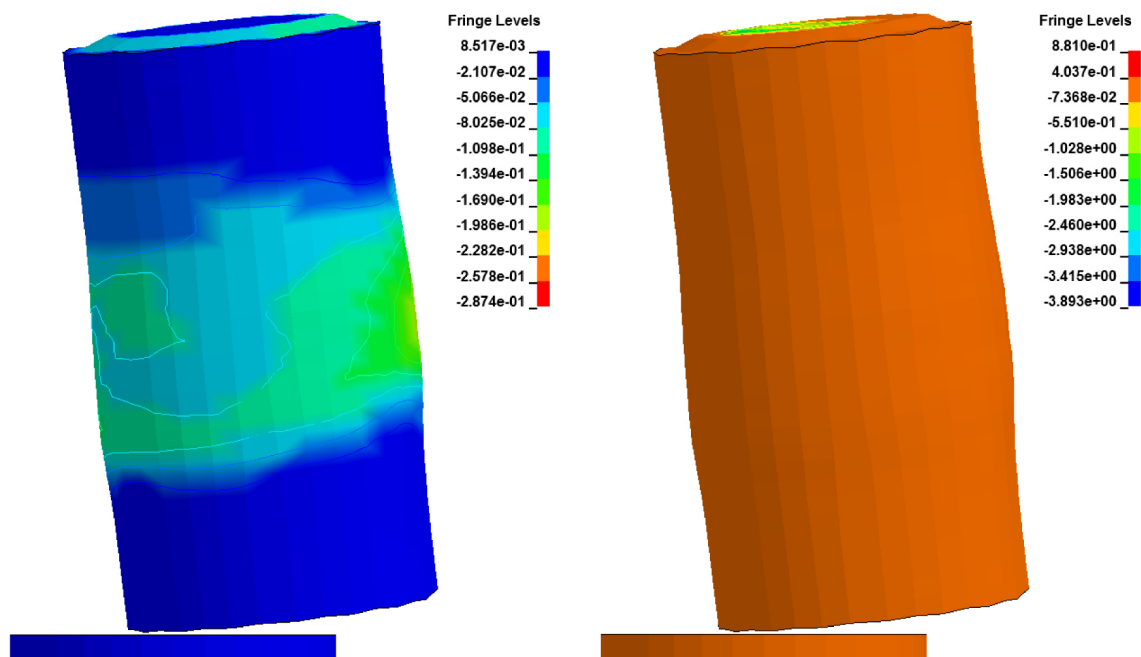


Obr. 8. 2. 32 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3

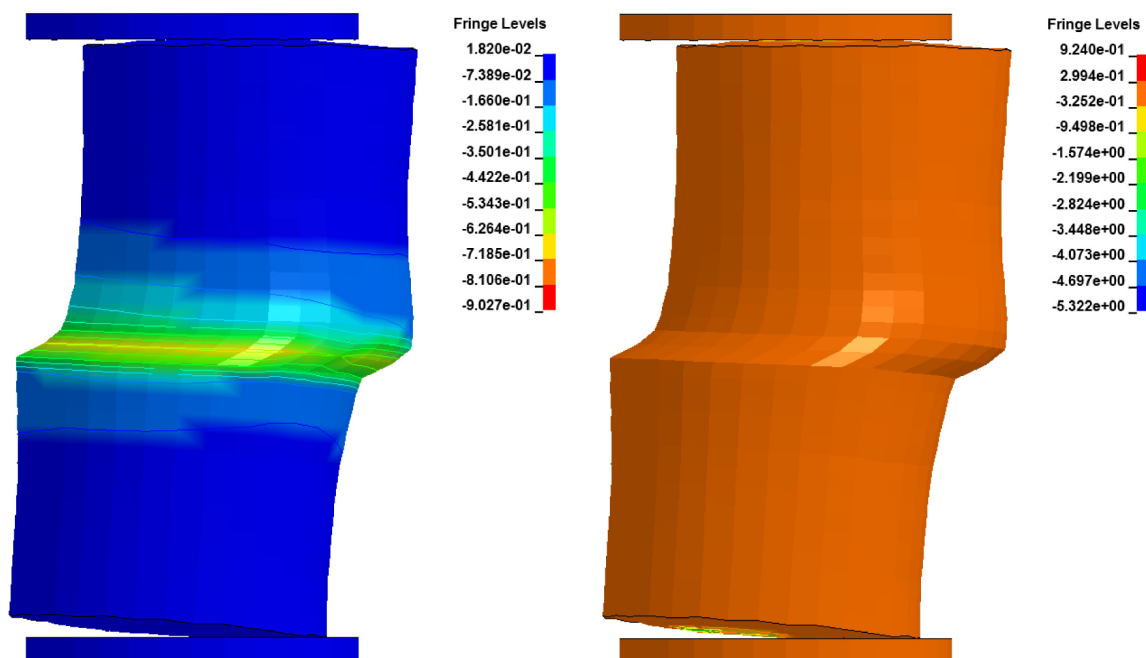


Obr. 8. 2. 33 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, *MAT_CONCRETE_DAMAGE

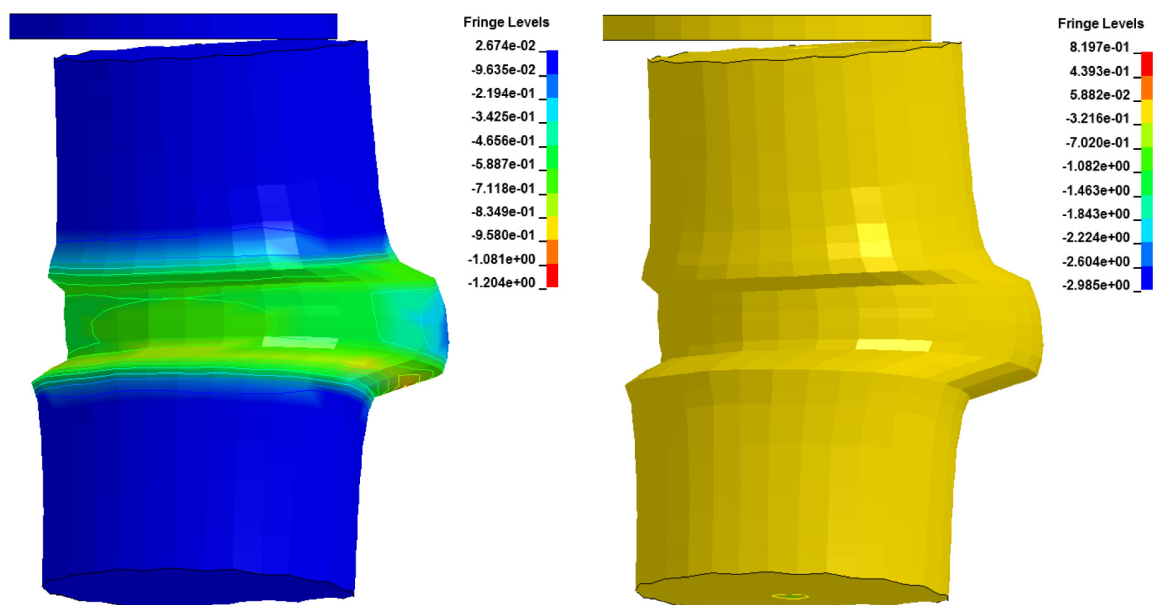
Oblasti (místa nárůstu poměrné deformace v čase), ve kterých se betonový válec po překročení pevnosti betonu v tlaku porušoval při různých způsobech podepření podložek, jsou znázorněny na obr. 8. 2. 34, 8. 2. 35 a 8. 2. 36 (REL3), resp. 8. 2. 37, 8. 2. 38 a 8. 2. 39, vlevo. Na obr. 8. 2. 34, 8. 2. 35 a 8. 2. 36, resp. 8. 2. 37, 8. 2. 38 a 8. 2. 39, vlevo je tedy vidět tvar porušení betonového válce v koncovém čase 3 s při různých způsobech podepření podložek. Na obr. 8. 2. 34, 8. 2. 35 a 8. 2. 36, resp. 8. 2. 37, 8. 2. 38 a 8. 2. 39, jsou znázorněny minimální hlavní poměrné deformace [-] a minimální hlavní normálová napětí [MPa] na válci s podložkami v koncovém čase 3 s.



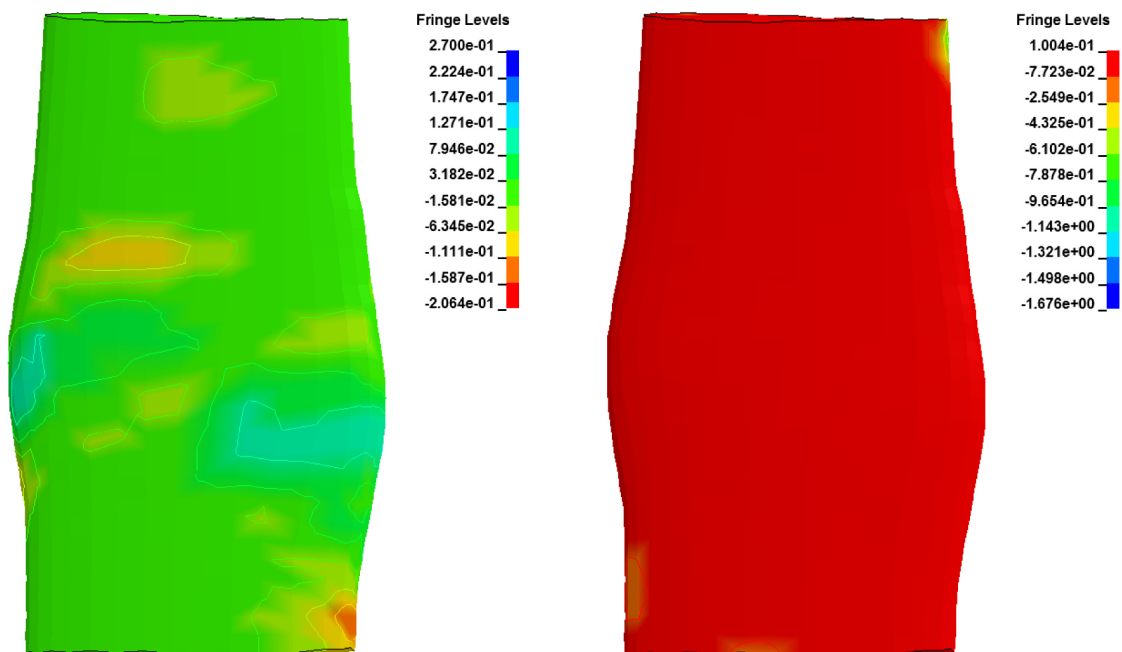
Obr. 8. 2. 34 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (1 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3



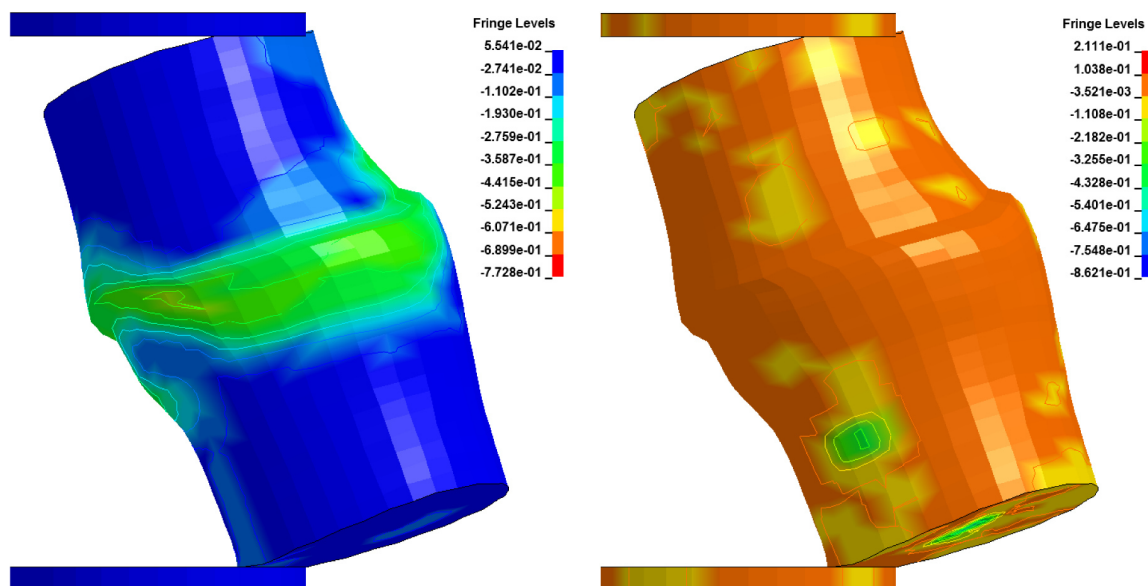
Obr. 8. 2. 35 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (2 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3



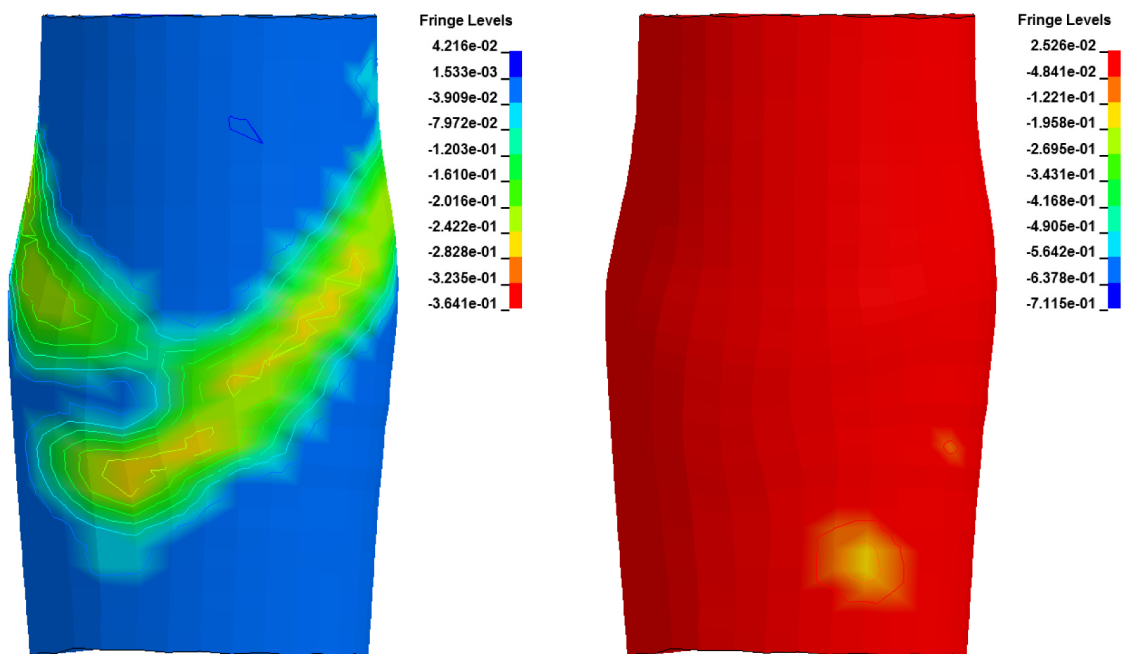
Obr. 8. 2. 36 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (bez podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3



Obr. 8. 2. 37 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (1 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CONCRETE_DAMAGE



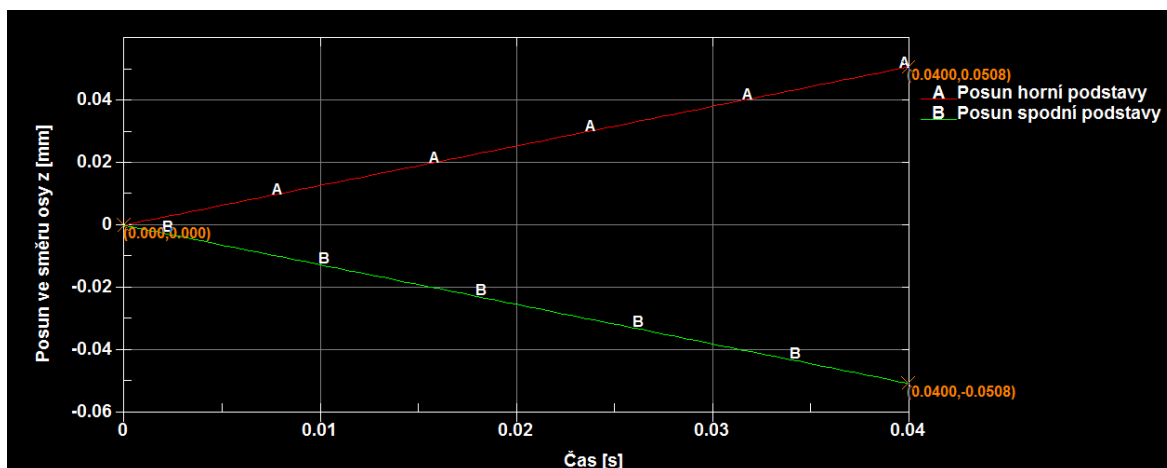
Obr. 8. 2. 38 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (2 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CONCRETE_DAMAGE



Obr. 8. 2. 39 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (bez podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CONCRETE_DAMAGE

Numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válcích

Při numerických simulacích zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válcích (kvazi-statické zatěžování) nebyly na model válce aplikovány žádné podpory (bez podepření) [1], viz podkapitola 6. 4. Pro jednotlivé numerické simulace byly na model válce aplikovány jednotlivé nelineární materiálové modely betonu. Zatížení bylo v rámci těchto numerických simulací aplikováno na uzly obou podstav modelu válce ve formě posunů ve směru osy z tak, aby výsledné natažení válce v čase 0,04 s bylo 0,1016 mm [1] (kvazi-statické natahování válce z obou stran, koncový čas 0,04 s). Každá podstava válce se tedy v průběhu zatěžování posunula o 0,0508 mm. Posuny podstav modelu válce byly v čase lineární, zatěžování tedy probíhalo konstantní rychlostí [1]. Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase jsou znázorněny na obr. 8. 2. 40.



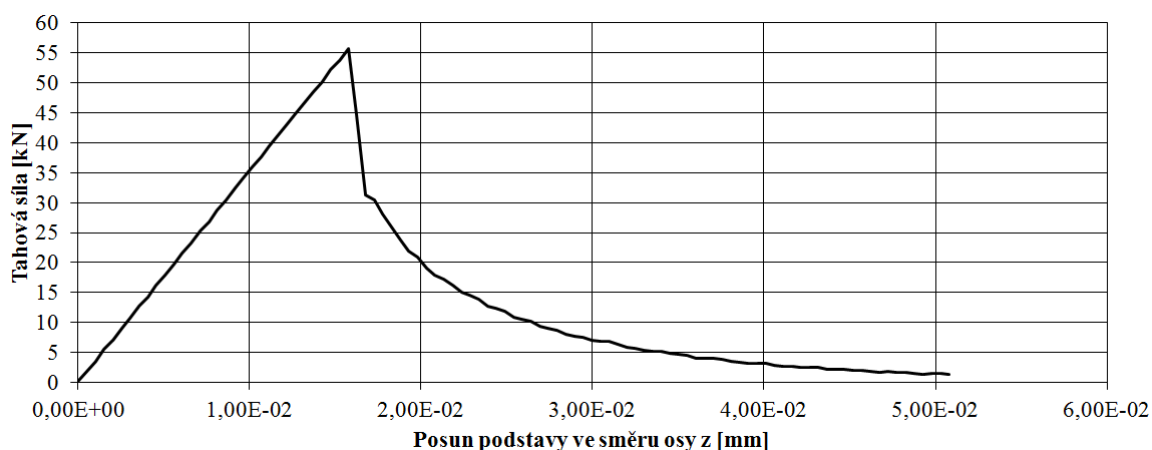
Obr. 8. 2. 40 Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, kvazi-statické natahování válce (LS-PrePost v. 4.0)

*MAT_CSCM

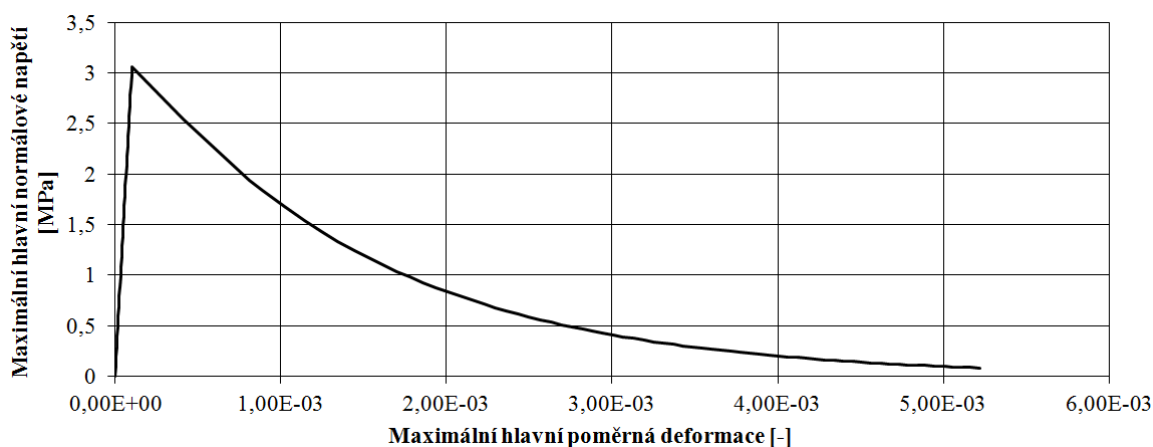
Zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CSCM) válce v tahu získaný z výsledků numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování neboli graf závislosti tahové síly, která působí na podstavu válce, na posunu podstavu válce je znázorněn na obr. 8. 2. 41. Z diagramu je vidět, že od počátku zatěžování, kdy začalo docházet k nárůstu tahové síly a tedy k nárůstu tahového napětí v betonu, se betonový válec choval lineárně pružně (deformace válce byla vratná). Lineárně pružné chování vykazoval betonový válec

až do okamžiku, kdy byla dosažena maximální tahová síla neboli maximální tahová únosnost betonového válce (pevnost betonu v tahu), k čemuž došlo v čase 0,0124 s od začátku zatěžování. Od tohoto okamžiku se začalo projevovat tahové změkčení betonu, začalo tedy docházet k nárůstu deformace (posunů podstav) betonového válce při snižování tahové síly (tahového napětí v betonu), což bylo způsobeno porušením betonového válce při překročení pevnosti betonu v tahu. Tahová síla klesala při nárůstu deformace nelineárně (nelineární tahové změkčení) a v koncovém čase 0,04 s dosáhla prakticky nulové hodnoty. Z uvedeného vyplývá, že se beton porušoval kvazikřehce.

Ukázka pracovního diagramu betonu (*MAT_CSCM) v tahu na prvku modelu válce neboli grafu závislosti maximálního hlavního normálového napětí na maximální hlavní poměrné deformaci je na obr. 8. 2. 42.

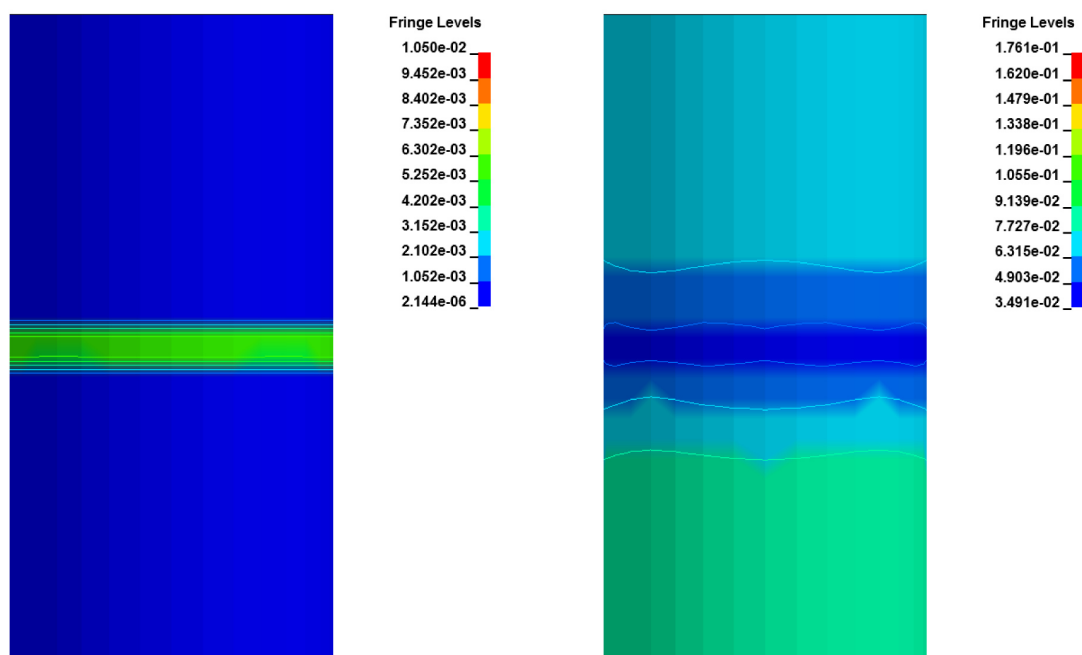


Obr. 8. 2. 41 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CSCM



Obr. 8. 2. 42 Pracovní diagram betonu v tahu na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CSCM

Betonový válec se po překročení pevnosti betonu v tahu porušoval v místě, kde v čase narůstala poměrná deformace. Místo, ve kterém v čase narůstala poměrná deformace, je znázorněno na obr. 8. 2. 43 vlevo světle zelenou barvou. Na obr. 8. 2. 43 vlevo je tedy vidět tvar porušení betonového válce v koncovém čase 0,04 s. Výsledek na obr. 8. 2. 43 vykazuje dobrou shodu s výsledkem uvedeným v evaluačním manuálu [1]. Na obr. 8. 2. 43 jsou znázorněny maximální hlavní poměrné deformace [-] a maximální hlavní normálová napětí [MPa] na válci v koncovém čase 0,04 s.



Obr. 8. 2. 43 Maximální hlavní poměrné deformace (vlevo) a maximální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci v koncovém čase 0,04 s, kvazi-statické natahování válce, pohledy; *MAT_CSCM

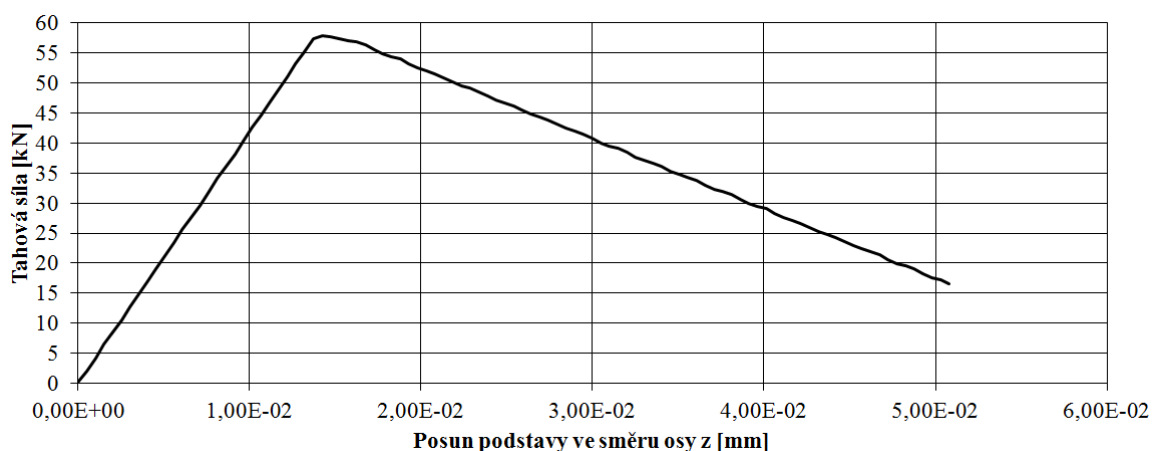
*MAT_WINFRITH_CONCRETE

Zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) válce v tahu získaný z výsledků numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování je znázorněn na obr. 8. 2. 44. Z diagramu je vidět, že od počátku zatěžování, kdy začalo docházet k nárůstu tahové síly a tedy k nárůstu tahového napětí v betonu, se betonový válec choval lineárně pružně (deformace válce byla vratná). Lineárně pružné chování vykazoval betonový válec až do okamžiku, kdy byla dosažena maximální tahová síla neboli maximální tahová únosnost betonového válce (pevnost betonu v tahu), k čemuž došlo v

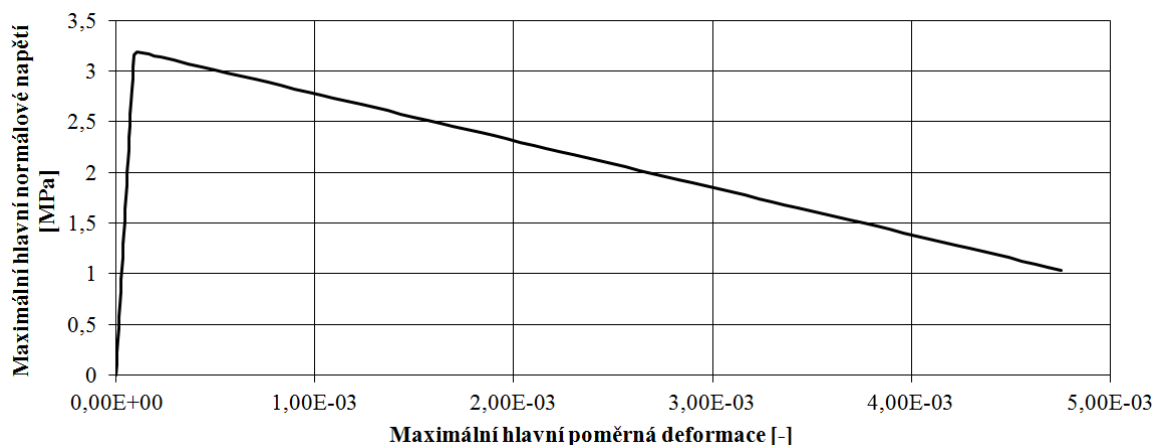
VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

čase 0,0112 s od začátku zatěžování. Od tohoto okamžiku se začalo projevovat tahové změkčení betonu, začalo tedy docházet k nárůstu deformace (posunů podstav) betonového válce při snižování tahové síly (tahového napětí v betonu), což bylo způsobeno porušením betonového válce při překročení pevnosti betonu v tahu. Tahová síla klesala při nárůstu deformace lineárně (lineární tahové změkčení) až do koncového času 0,04 s. Z uvedeného vyplývá, že se beton porušoval kvazikřehce.

Ukázka pracovního diagramu betonu (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) v tahu na prvku modelu válce je na obr. 8. 2. 45.



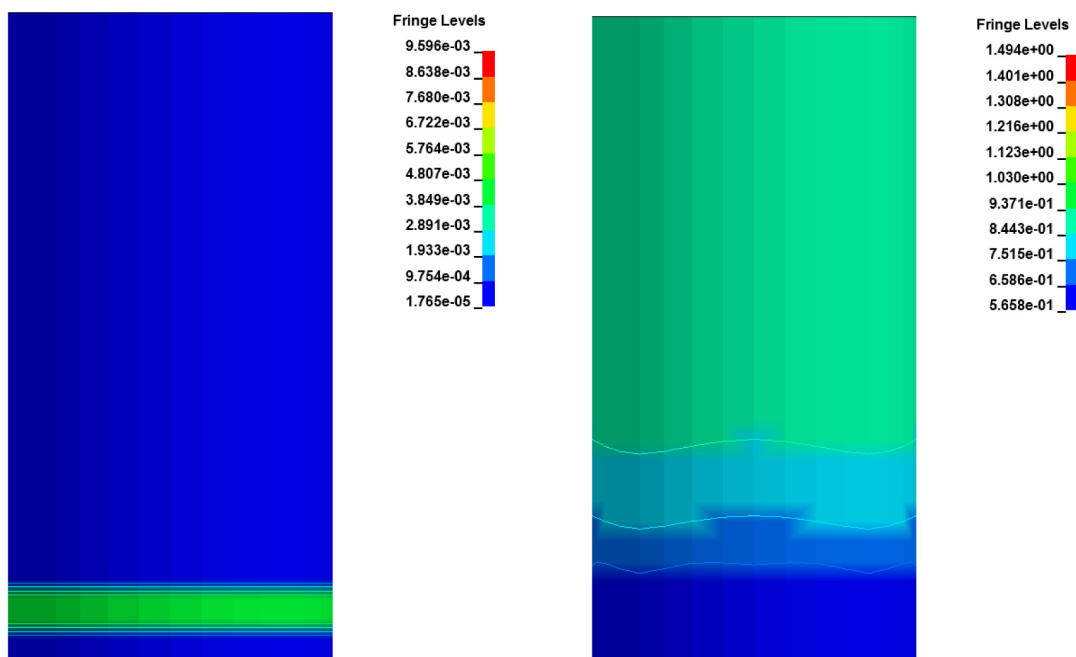
Obr. 8. 2. 44 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_WINFRITH_CONCRETE



Obr. 8. 2. 45 Pracovní diagram betonu v tahu na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_WINFRITH_CONCRETE

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

Betonový válec se po překročení pevnosti betonu v tahu porušoval v místě, kde v čase narůstala poměrná deformace. Místo, ve kterém v čase narůstala poměrná deformace, je znázorněno na obr. 8. 2. 46 vlevo světle zelenou barvou. Na obr. 8. 2. 46 vlevo je tedy vidět tvar porušení betonového válce v koncovém čase 0,04 s. Na obr. 8. 2. 46 jsou znázorněny maximální hlavní poměrné deformace [-] a maximální hlavní normálová napětí [MPa] na válci v koncovém čase 0,04 s.



Obr. 8. 2. 46 Maximální hlavní poměrné deformace (vlevo) a maximální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci v koncovém čase 0,04 s, kvazi-statické natahování válce, pohledy; *MAT_WINFRITH_CONCRETE

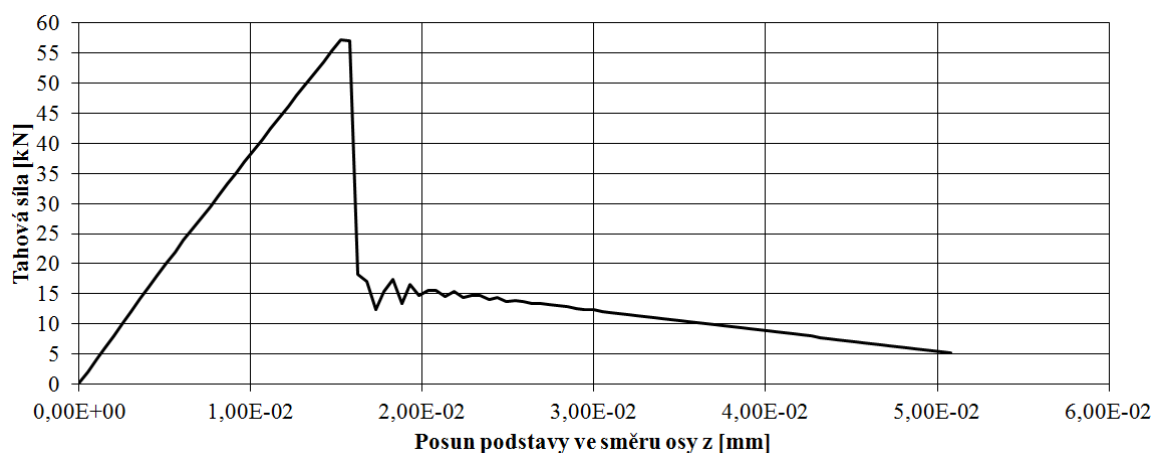
***MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL (*MAT_CDPM)**

Zatěžovací 1-d diagram betonového (*MAT_CDPM) válce v tahu získaný z výsledků numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování je znázorněn na obr. 8. 2. 47. Z diagramu je vidět, že od počátku zatěžování, kdy začalo docházet k nárůstu tahové síly a tedy k nárůstu tahového napětí v betonu, se betonový válec choval lineárně pružně (deformace válce byla vratná). Lineárně pružné chování vykazoval betonový válec až do okamžiku, kdy byla dosažena maximální tahová síla neboli maximální tahová únosnost betonového válce (pevnost betonu v tahu), k čemuž došlo v čase 0,012 s od začátku zatěžování. Od tohoto okamžiku se začalo projevovat tahové změkčení betonu,

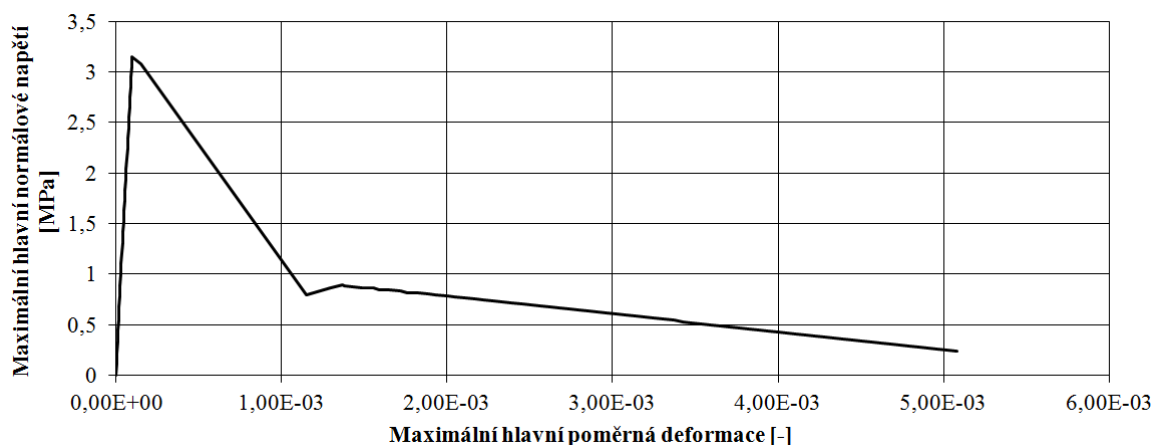
VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

začalo tedy docházet k nárůstu deformace (posunů podstav) betonového válce při snižování tahové síly (tahového napětí v betonu), což bylo způsobeno porušením betonového válce při překročení pevnosti betonu v tahu. Tahová síla klesala při nárůstu deformace nejprve prudce lineárně a poté pozvolně lineárně až do koncového času 0,04 s (bilineární tahové změkčení). Z uvedeného vyplývá, že se beton porušoval kvazikřehce.

Ukázka pracovního diagramu betonu (*MAT_CDPM) v tahu na prvku modelu válce je na obr. 8. 2. 48.



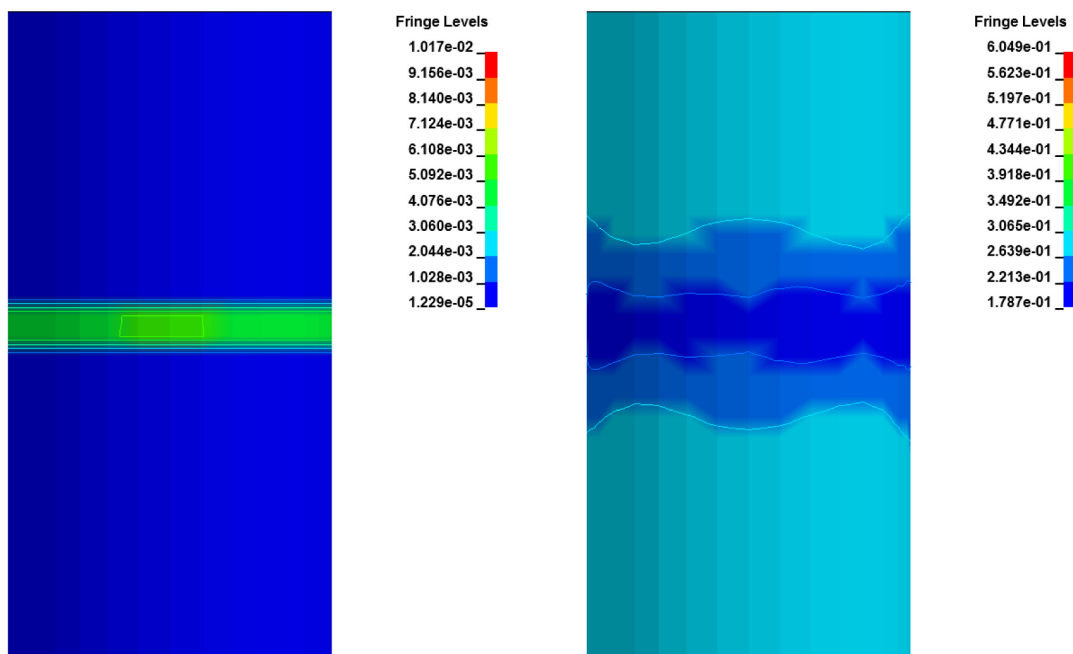
Obr. 8. 2. 47 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CDPM



Obr. 8. 2. 48 Pracovní diagram betonu v tahu na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CDPM

Betonový válec se po překročení pevnosti betonu v tahu porušoval v místě, kde v čase docházelo k nárůstu poměrné deformace. Místo, ve kterém v čase docházelo k nárůstu poměrné deformace, je znázorněno na obr. 8. 2. 49 vlevo světle zelenou barvou. Na

obr. 8. 2. 49 vlevo je tedy vidět tvar porušení betonového válce v koncovém čase 0,04 s. Na obr. 8. 2. 49 jsou znázorněny maximální hlavní poměrné deformace [-] a maximální hlavní normálová napětí [MPa] na válci v koncovém čase 0,04 s.

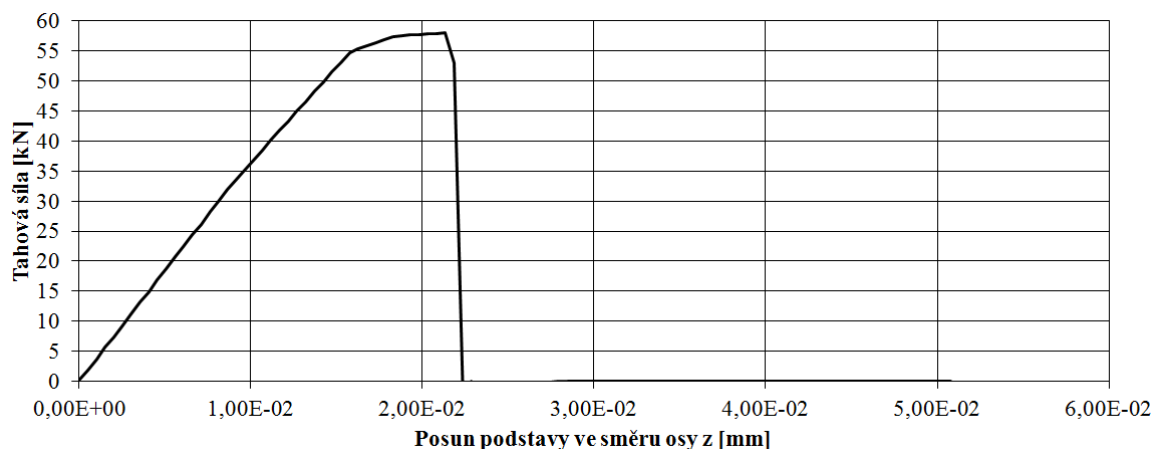


Obr. 8. 2. 49 Maximální hlavní poměrné deformace (vlevo) a maximální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci v koncovém čase 0,04 s, kvazi-statické natahování válce, pohledy; *MAT_CDPM

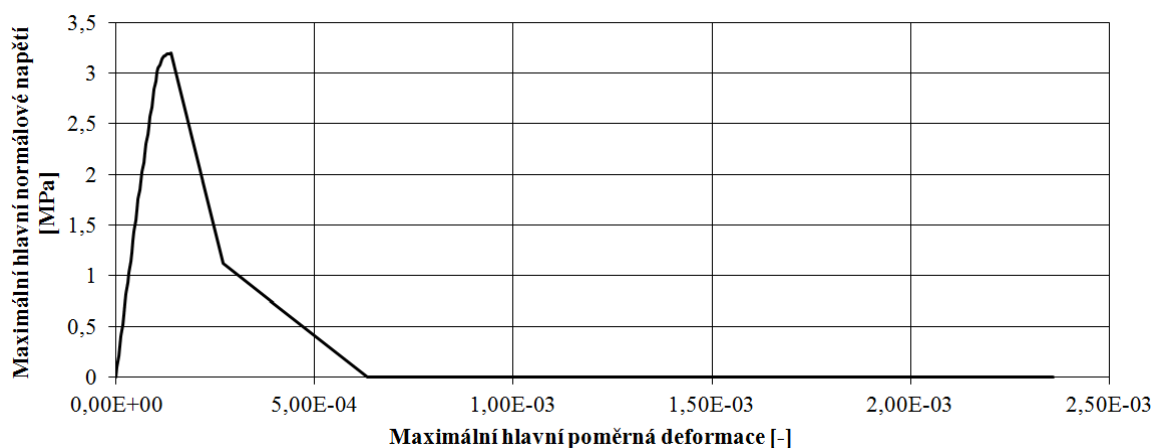
*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3

Zatěžovací 1-d diagram betonového (*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) válce v tahu získaný z výsledků numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování je znázorněn na obr. 8. 2. 50. Z diagramu je vidět, že od počátku zatěžování, kdy začalo docházet k nárůstu tahové síly a tedy k nárůstu tahového napětí v betonu, se betonový válec choval lineárně pružně (deformace válce byla vratná). Přibližně v čase 0,0068 s od začátku zatěžování začal betonový válec vykazovat pružnoplastické chování (vznik trvalých plastických deformací). Pružnoplastické chování vykazoval betonový válec do okamžiku, kdy byla dosažena maximální tahová síla neboli maximální tahová únosnost betonového válce (pevnost betonu v tahu), k čemuž došlo v čase 0,0168 s od začátku zatěžování. Po překročení pevnosti betonu v tahu tahová síla prudce klesla na nulovou hodnotu, z čehož vyplývá že se beton porušil křehce.

Ukázka pracovního diagramu betonu (*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) v tahu na prvku modelu válce je na obr. 8. 2. 51.

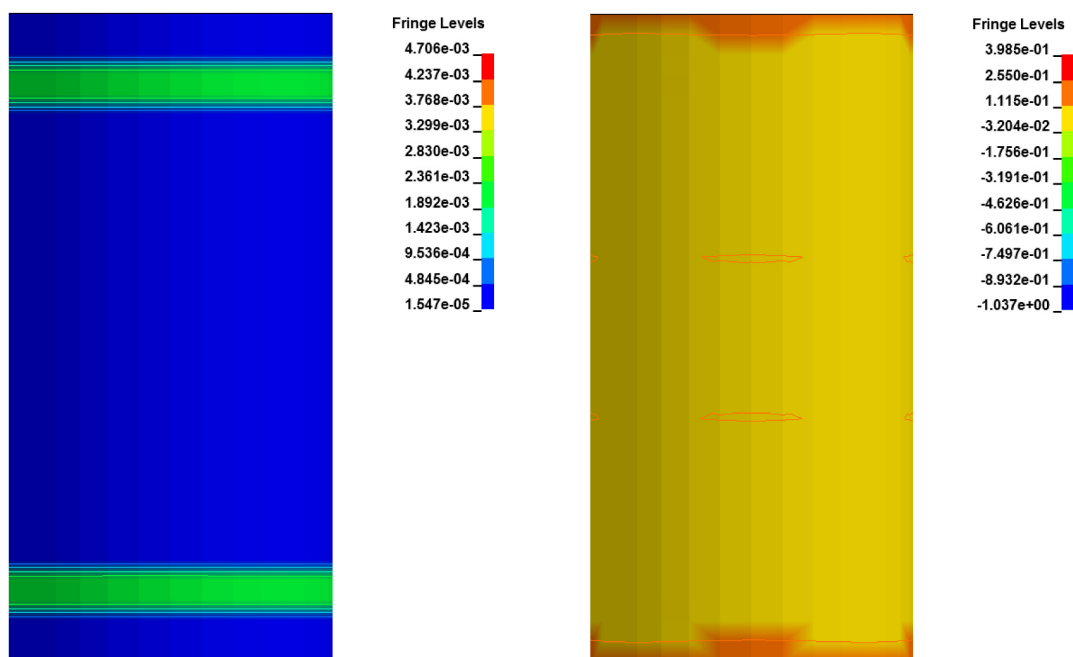


Obr. 8. 2. 50 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3



Obr. 8. 2. 51 Pracovní diagram betonu v tahu na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3

Betonový válec se po překročení pevnosti betonu v tahu porušil v místech, kde dále v čase narůstala poměrná deformace. Místa, ve kterých v čase narůstala poměrná deformace, jsou znázorněna na obr. 8. 2. 52 vlevo světle zelenou barvou. Na obr. 8. 2. 52 vlevo je tedy vidět tvar porušení betonového válce v koncovém čase 0,04 s. Na obr. 8. 2. 52 jsou znázorněny maximální hlavní poměrné deformace [-] a maximální hlavní normálová napětí [MPa] na válci v koncovém čase 0,04 s.

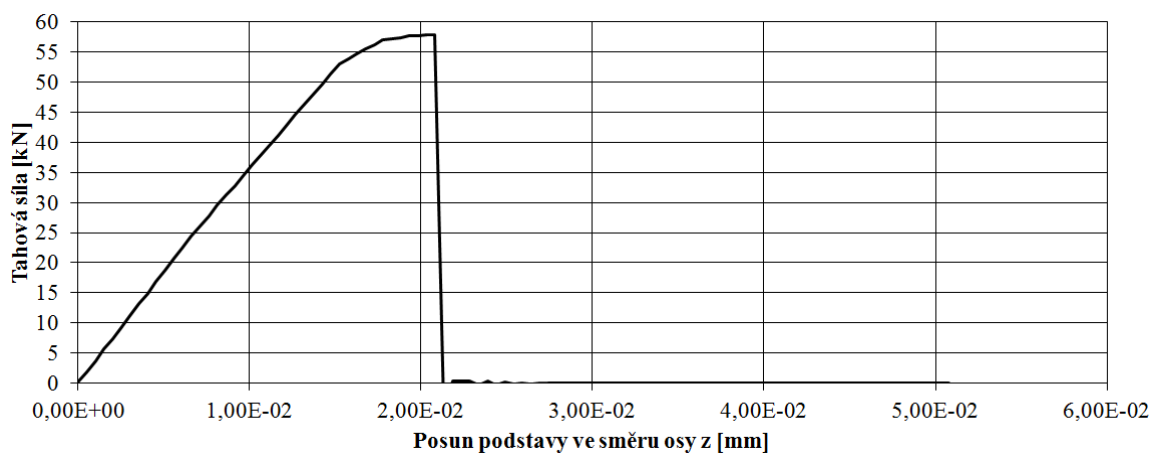


Obr. 8. 2. 52 Maximální hlavní poměrné deformace (vlevo) a maximální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci v koncovém čase 0,04 s, kvazi-statické natahování válce, pohledy;
*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3

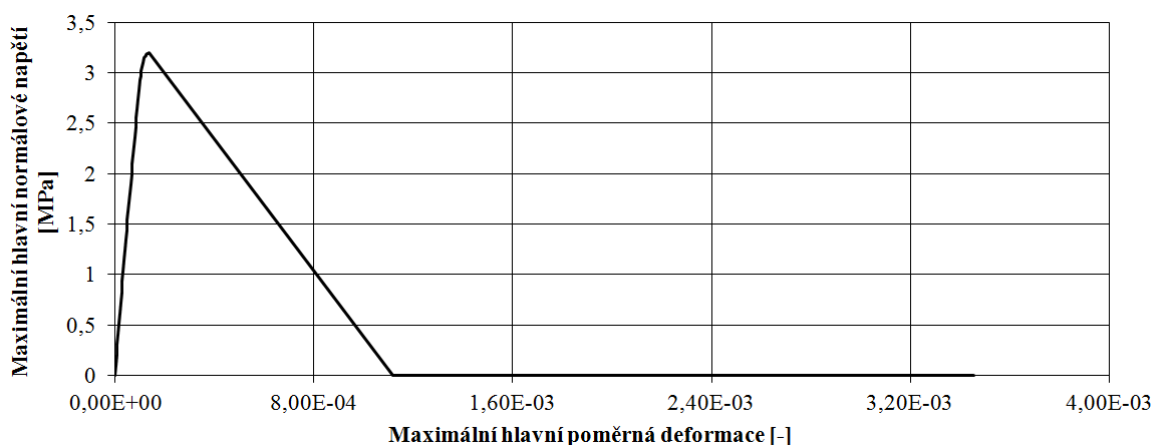
***MAT_CONCRETE_DAMAGE**

Zatěžovací 1-d diagram betonového (*MAT_CONCRETE_DAMAGE) válce v tahu získaný z výsledků numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování je znázorněn na obr. 8. 2. 53. Chování betonového válce, tedy i chování betonu, v průběhu tahového zatěžování bylo stejné jako v případě nelineárního materiálového modelu betonu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (novější verze nelineárního materiálového modelu betonu *MAT_CONCRETE_DAMAGE, viz strana 167), z tohoto důvodu zde není rozepsáno. Maximální tahová síla neboli maximální tahová únosnost betonového válce (pevnost betonu v tahu) byla dosažena v čase 0,0164 s od začátku zatěžování. Po překročení pevnosti betonu v tahu tahová síla prudce klesla na nulovou hodnotu → křehké porušení betonu.

Ukázka pracovního diagramu betonu (*MAT_CONCRETE_DAMAGE) v tahu na prvku modelu válce je na obr. 8. 2. 54.

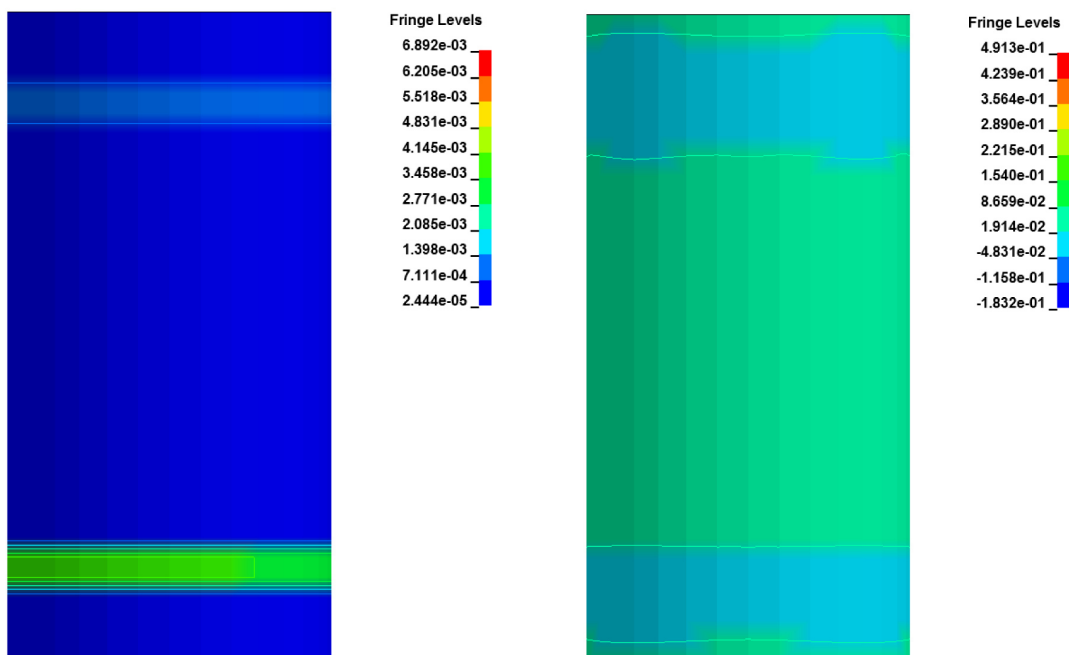


Obr. 8. 2. 53 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE



Obr. 8. 2. 54 Pracovní diagram betonu v tahu na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE

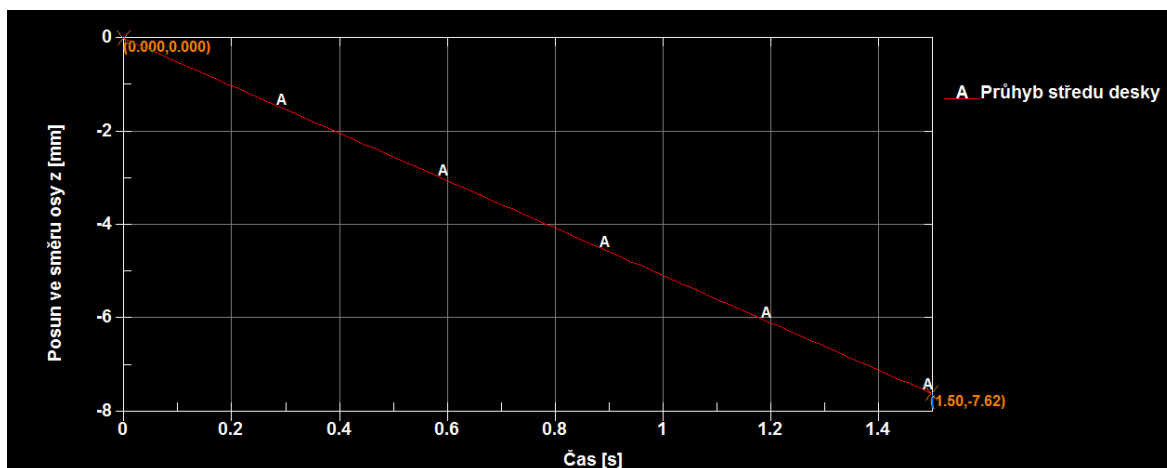
Betonový válec se po překročení pevnosti betonu v tahu porušil v místech, kde dále v čase narůstala poměrná deformace. Místa, ve kterých v čase narůstala poměrná deformace, jsou znázorněna na obr. 8. 2. 55 vlevo světle zelenou a světle modrou barvou. Na obr. 8. 2. 55 vlevo je tedy vidět tvar porušení betonového válce v koncovém čase 0,04 s. Na obr. 8. 2. 55 jsou znázorněny maximální hlavní poměrné deformace [-] a maximální hlavní normálová napětí [MPa] na válci v koncovém čase 0,04 s.



Obr. 8. 2. 55 Maximální hlavní poměrné deformace (vlevo) a maximální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci v koncovém čase 0,04 s, kvazi-statické natahování válce, pohledy; *MAT_CONCRETE_DAMAGE

Numerická simulace ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky

Při numerické simulaci ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky (kvazi-statické zatěžování) měl model desky vetknuté obvodové uzly. Obvodovým uzlům modelu desky byly tedy odebrány volnosti v podobě posunů ve směrech os x , y a z a v podobě pootočení kolem os x , y a z uzlového souřadnicového systému, viz podkapitola 6. 4. V rámci numerické simulace byl na model desky aplikován nelineární materiálový model betonu *MAT_CONCRETE_EC2. Zatížení bylo v rámci této numerické simulace aplikováno na prostřední uzel modelu desky ve formě posunu ve směru osy z tak, aby výsledný průhyb středu desky v čase 1,5 s byl 7,62 mm (kvazi-statické zatěžování desky → materiálový model *MAT_CONCRETE_EC2 nezohledňuje změnu mechanicko fyzikálních vlastností betonu v závislosti na rychlosti deformace; koncový čas 1,5 s). Průhyb středu modelu desky narůstal v čase lineárně, zatěžování tedy probíhalo konstantní rychlostí. Křivka charakterizující průhyb středu desky v závislosti na čase je znázorněna na obr. 8. 2. 56.

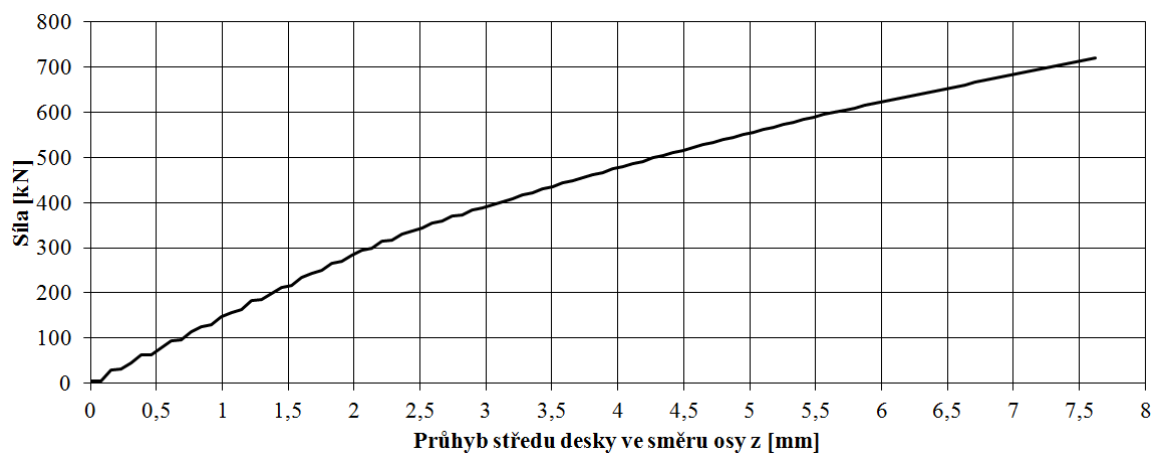


Obr. 8. 2. 56 Křivka charakterizující průhyb středu desky v závislosti na čase, kvazi-statické zatěžování desky (LS-PrePost v. 4.0)

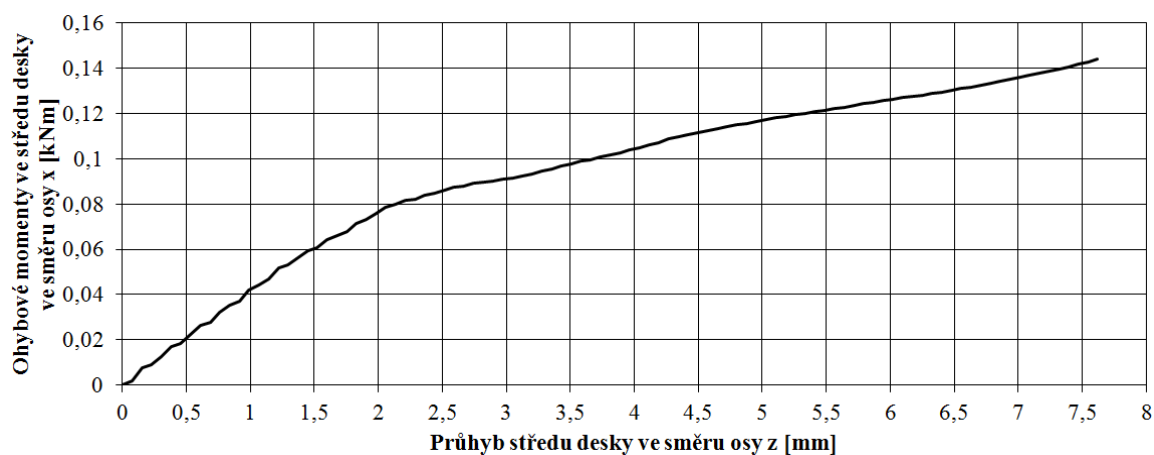
*MAT_CONCRETE_EC2

Zatěžovací 1-d diagram betonové (*MAT_CONCRETE_EC2) desky při ohybu získaný z výsledků numerické simulace při kvazi-statickém zatěžování neboli graf závislosti síly, která působí ve středu desky, na průhybu středu desky je znázorněn na obr. 8. 2. 57. Z diagramu je vidět, že od počátku zatěžování, kdy začalo docházet k nárůstu působící síly a tedy k nárůstu napjatosti v betonu, se betonová deska chovala lineárně pružně (deformace desky byla vratná). Lineárně pružné chování vykazovala betonová deska až do okamžiku, kdy byla v oblasti tahových napětí v betonu dosažena pevnost betonu v tahu, k čemuž došlo v čase 0,3 s od začátku zatěžování. Po překročení pevnosti betonu v tahu začalo docházet k nárůstu deformace (průhybu) betonové desky při nárůstu působící síly, který měl klesající tendenci, což bylo způsobeno postupným poklesem tuhosti betonové desky, jenž byl zapříčiněn porušováním betonové desky v oblasti tahových napětí v betonu při překročení pevnosti betonu v tahu, až do koncového času 1,5 s. Postupný pokles tuhosti je zřejmý také na obr. 8. 2. 58, na kterém je znázorněn graf závislosti ohybových momentů ve středu desky ve směru osy x ($x = y$) na průhybu středu desky.

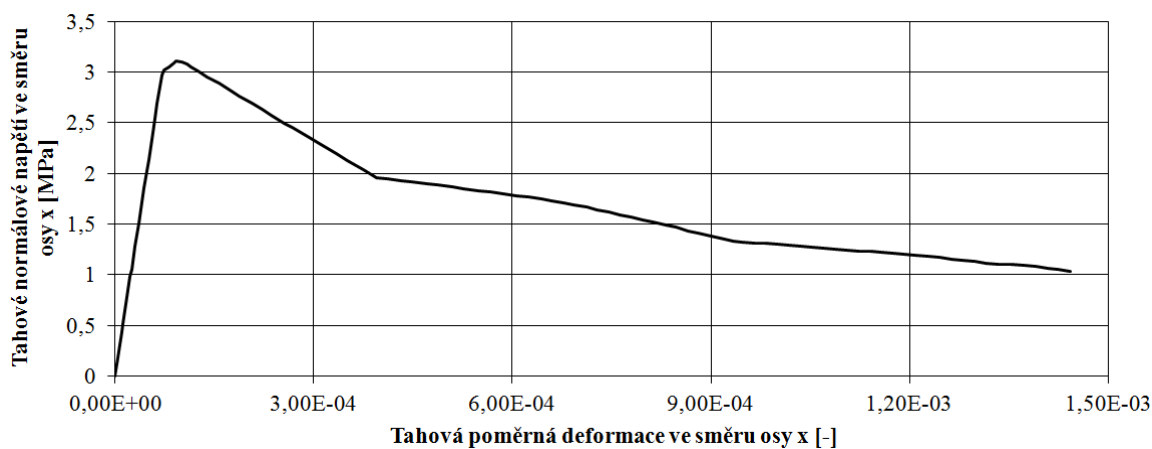
Ukázka pracovního diagramu betonu (*MAT_CONCRETE_EC2) v tahu na prvku modelu desky neboli grafu závislosti tahového normálového napětí ve směru osy x (maximální hodnota v integračním bodě) na tahové poměrné deformaci ve směru osy x ($x = y$) je na obr. 8. 2. 59. Z diagramu je vidět, že se beton v oblasti tahových napětí porušoval kvazikřehce (nelineární tahové změkčení).



Obr. 8. 2. 57 Zatěžovací I-d diagram betonové desky při ohybu (numerická simulace), kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2

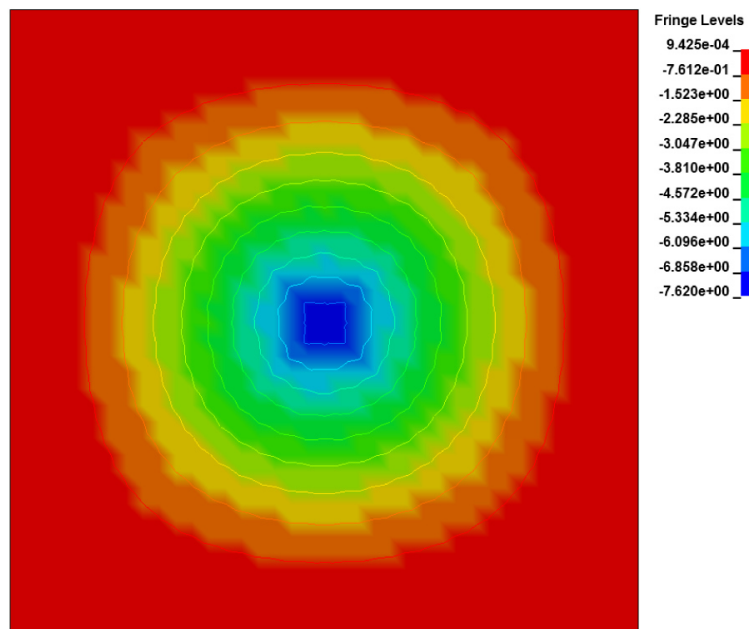


Obr. 8. 2. 58 Graf závislosti ohybových momentů ve středu desky ve směru osy x na průhybu středu desky (numerická simulace), kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2

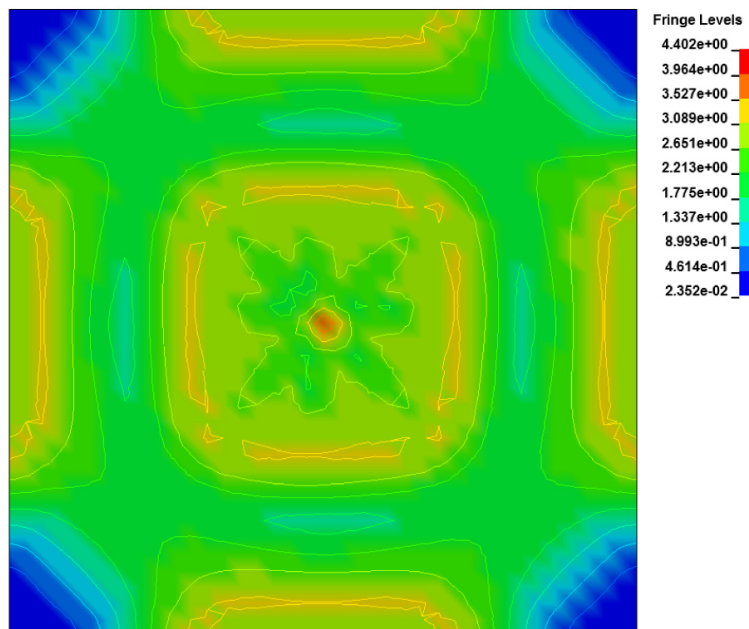


Obr. 8. 2. 59 Pracovní diagram betonu v tahu na prvku modelu desky (numerická simulace), kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2

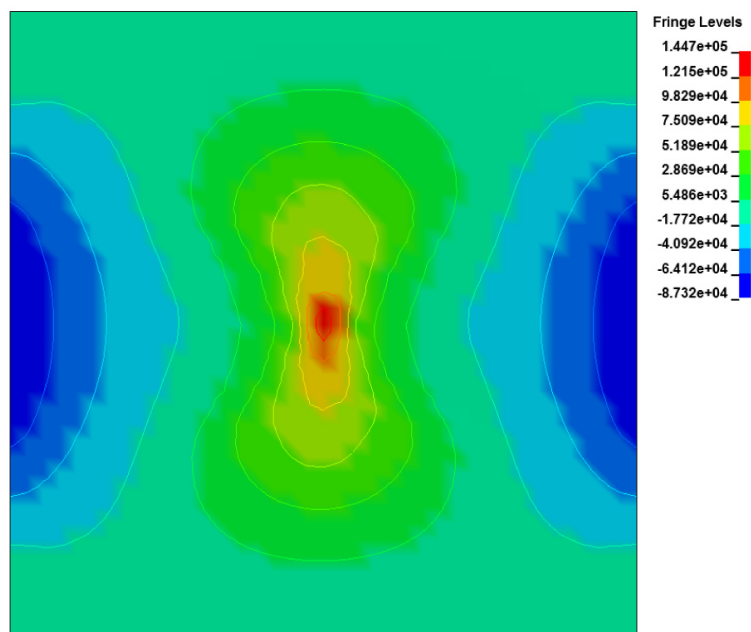
Na obr. 8. 2. 60 je znázorněn průhyb desky [mm] ve směru osy z v koncovém čase 1,5 s. Na obr. 8. 2. 61 jsou znázorněna maximální hlavní normálová napětí [MPa] na desce v koncovém čase 1,5 s. Na obr. 8. 2. 62 jsou znázorněny ohybové momenty [Nmm] ve směru osy x ($x = y$) na desce v koncovém čase 1,5 s. Na obr. 8. 2. 63 jsou znázorněny krouťící momenty [Nmm] na desce v koncovém čase 1,5 s.



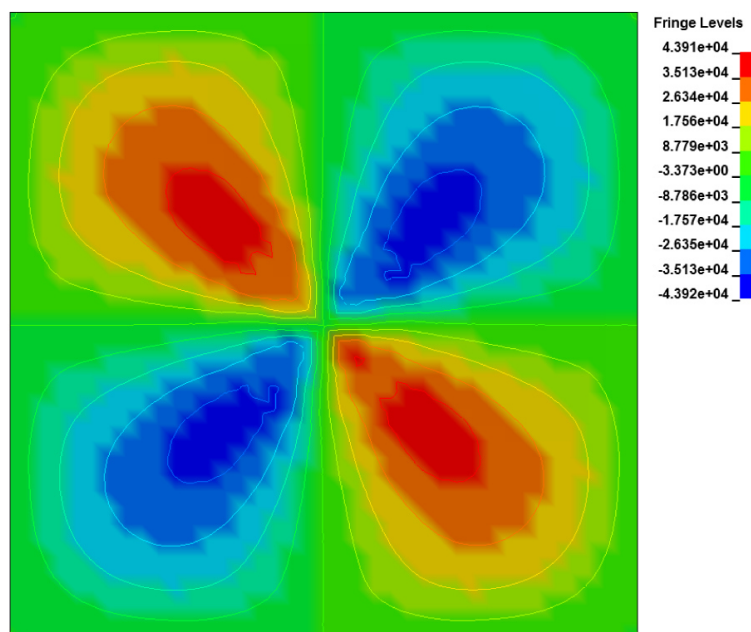
Obr. 8. 2. 60 Průhyb desky ve směru osy z v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2



Obr. 8. 2. 61 Maximální hlavní normálová napětí (maximální hodnoty v integračních bodech) na desce v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2



Obr. 8. 2. 62 Ohybové momenty ve směru osy x (\rightarrow x) na desce v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2



Obr. 8. 2. 63 Kroutící momenty na desce v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2

8. 2. 2 Vyšší rychlosti zatěžování

Beton patří mezi materiály, jejichž chování se odvíjí od rychlosti deformace. Při vyšších rychlostech deformace dochází u betonu ke změně jeho mechanicko fyzikálních vlastností. Touto změnou se myslí především nárůst pevnosti betonu. Z tohoto ohledu je zřejmé, že při vyšších rychlostech zatěžování je možné před překročením pevnosti betonu dosáhnout výraznějších deformací, než by tomu bylo v případě kvazi-statického zatěžování. Vzhledem k tomu, že většina nelineárních materiálových modelů betonu použitých v rámci této práce umožňuje zohlednit vliv rychlosti deformace na mechanicko fyzikální vlastnosti betonu, byly v rámci této práce provedeny také numerické simulace některých řešených úloh při vyšších rychlostech zatěžování, při kterých se projevil vliv rychlosti deformace na mechanicko fyzikální vlastnosti betonu, za účelem srovnání s výsledky vycházejícími z kvazi-statického zatěžování, viz podkapitola 8. 2. 1.

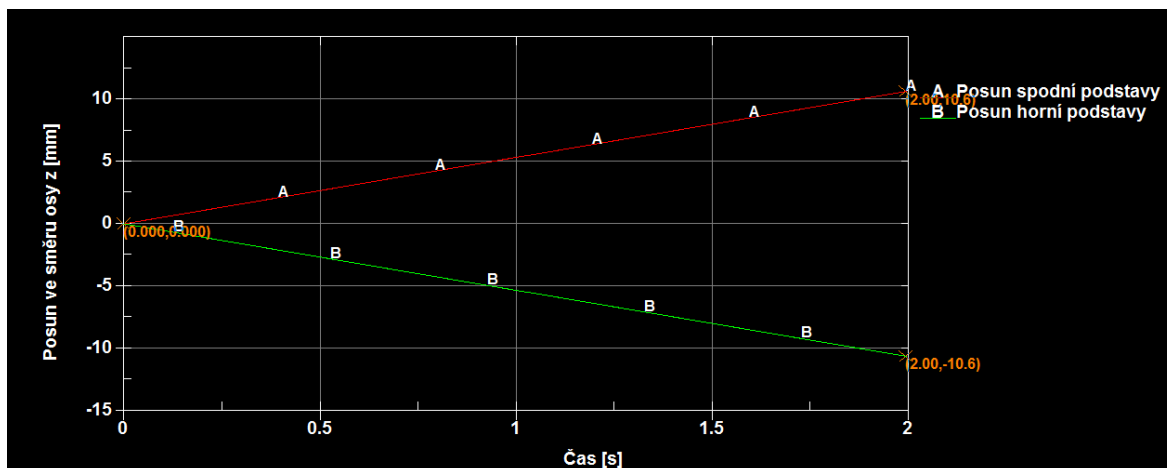
Numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek

Okrajové podmínky (podepření modelu válce) byly při numerických simulacích zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek (vyšší rychlosti zatěžování) stejné jako v případě těchto numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování, viz podkapitola 8. 2. 1. Pro jednotlivé numerické simulace byly na model válce aplikovány jednotlivé nelineární materiálové modely betonu. Zatížení bylo v rámci těchto numerických simulací aplikováno na uzly obou podstav modelu válce ve formě posunů ve směru osy z tak, aby posuny obou podstav modelu válce byly v průběhu zatěžování stejné a aby zatěžování probíhalo konstantní rychlostí.

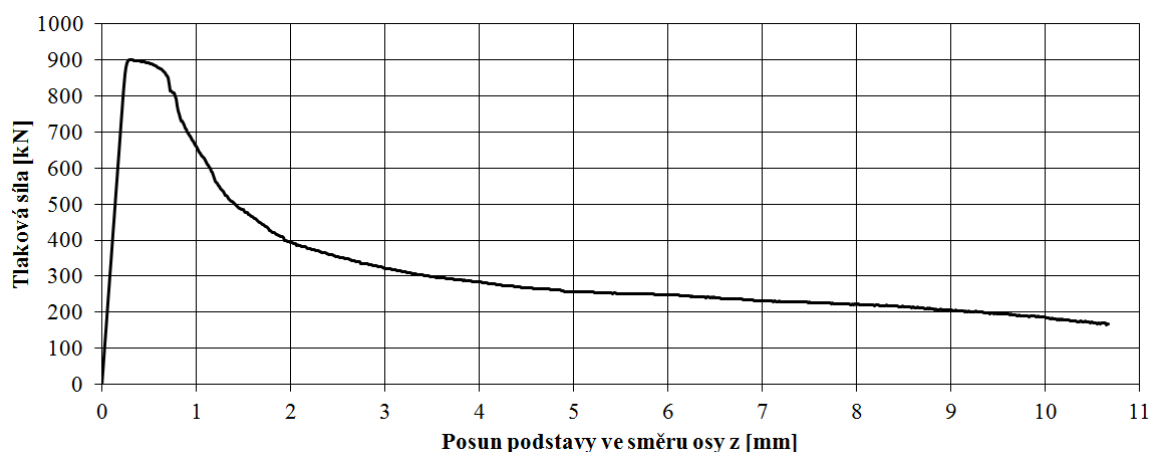
***MAT_CSCM**

Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_CSCM) válce v závislosti na čase jsou znázorněny na obr. 8. 2. 64. Na obr. 8. 2. 64 je vidět, že posuny podstav modelu válce byly v čase lineární (zatěžování konstantní rychlostí) a každá podstava válce se v průběhu zatěžování posunula o 10,667 mm (stlačování válce z obou stran). Výsledné stlačení válce v čase 2 s tedy bylo 21,334 mm (koncový čas 2 s).

Zatěžovací 1-d diagram betonového (*MAT_CSCM) válce v tlaku získaný z výsledků numerických simulací při zatěžování vyššími rychlostmi je znázorněn na obr. 8. 2. 65.

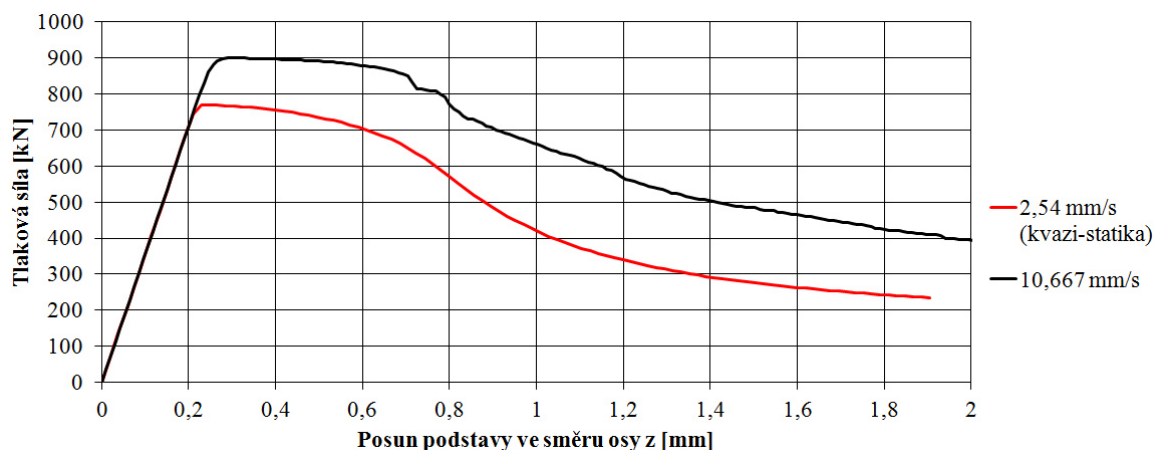


Obr. 8. 2. 64 Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, stlačování válce vyšší rychlostí, *MAT_CSCM (LS-PrePost v. 4.0)



Obr. 8. 2. 65 Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), stlačování válce vyšší rychlostí, *MAT_CSCM

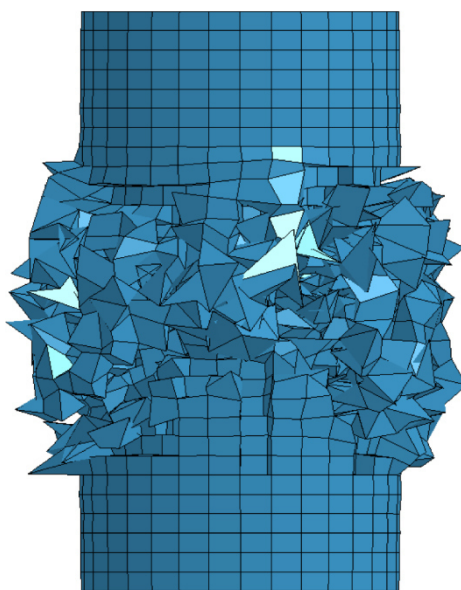
Výsledné stlačení válce v čase 2 s bylo 21,334 mm → rychlost zatěžování byla rovna $21,334/2 = 10,667$ mm/s. Při kvazi-statickém zatěžování bylo výsledné stlačení válce v čase 1,5 s 3,81 mm → kvazi-statická rychlost zatěžování byla rovna $3,81/1,5 = 2,54$ mm/s. Na obr. 8. 2. 66 je znázorněn zatěžovací 1-d diagram betonového (*MAT_CSCM) válce v tlaku, který zahrnuje celkem 2 křivky, které charakterizují chování betonového válce, tedy i chování betonu, při zmíněných rychlostech zatěžování.



Obr. 8. 2. 66 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CSCM

Maximální dosažená tlaková síla neboli maximální tlaková únosnost betonového válce byla v případě kvazi-statického zatěžování (2,54 mm/s) rovna hodnotě 770,1 kN. V případě rychlosti zatěžování 10,667 mm/s byla maximální dosažená tlaková únosnost betonového válce rovna hodnotě 899,9 kN. Z uvedeného vyplývá, že při zhruba čtyřnásobně vyšší rychlosti zatěžování, než je kvazi-statická rychlost zatěžování, se tlaková únosnost betonového válce, tedy také pevnost betonu v tlaku, zvýší přibližně o 17 % (při použití materiálového modelu *MAT_CSCM, viz obr. 8. 2. 66).

Na obr. 8. 2. 67 je znázorněno porušení betonového válce v koncovém čase 2 s, které bylo modelováno prostřednictvím vypadávání porušených konečných prvků z výpočtu, což je jedna z možností nastavení materiálového modelu *MAT_CSCM.

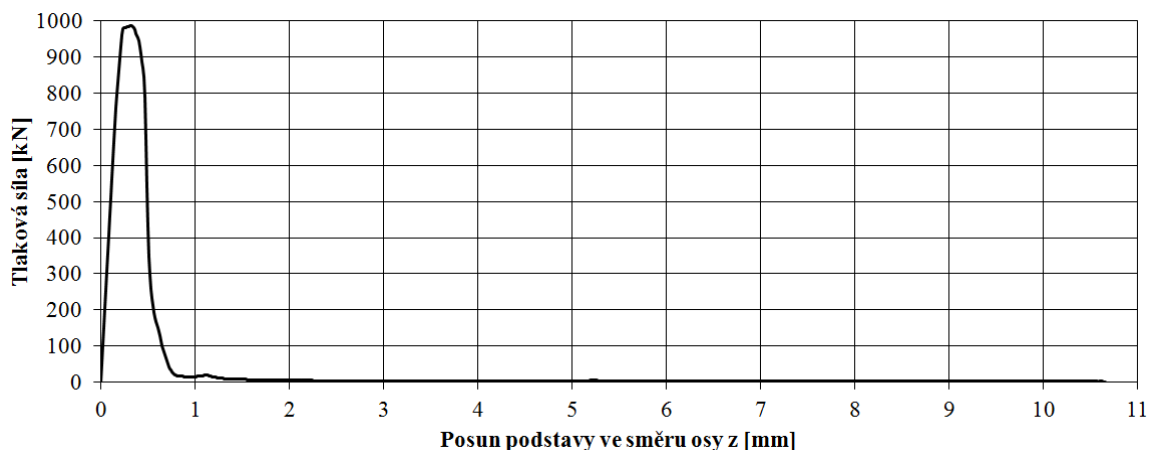


Obr. 8. 2. 67 Porušení betonového válce v koncovém čase 2 s, *MAT_CSCM

***MAT_WINFRITH_CONCRETE**

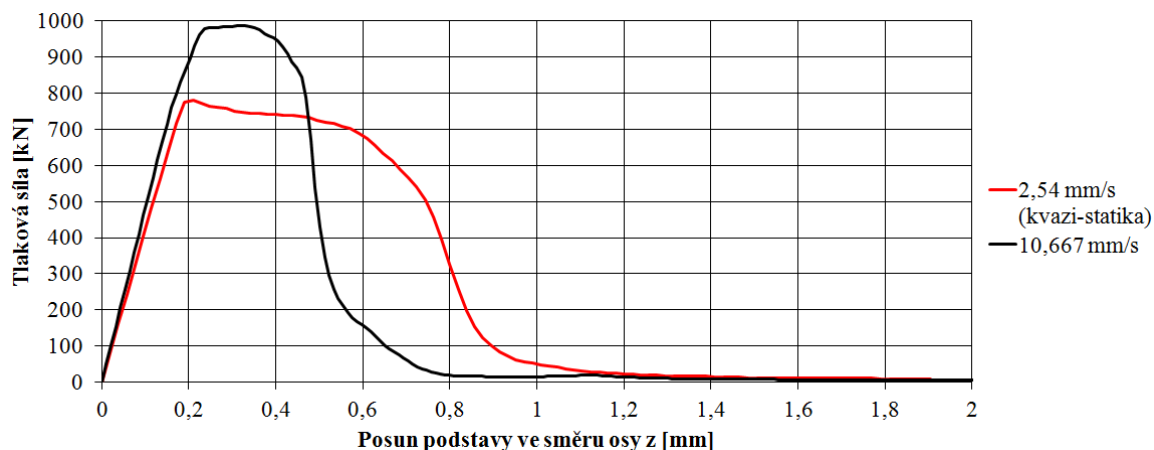
Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) válce v závislosti na čase jsou stejné jako v případě materiálového modelu *MAT_CSCM (viz strana 177) a jsou tedy znázorněny na obr. 8. 2. 64. Charakteristika křivek, jež jsou znázorněny na obr. 8. 2. 64, z hlediska jednotlivých posunů podstav modelu válce a výsledného stlačení válce je uvedena na straně 176 (*MAT_CSCM).

Zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) válce v tlaku získaný z výsledků numerických simulací při zatěžování vyššími rychlostmi je znázorněn na obr. 8. 2. 68.



Obr. 8. 2. 68 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), stlačování válce vyšší rychlostí, *MAT_WINFRITH_CONCRETE

Na obr. 8. 2. 69 je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) válce v tlaku, který zahrnuje celkem 2 křivky, které charakterizují chování betonového válce, tedy i chování betonu, při rychlostech zatěžování 10,667 mm/s a 2,54 mm/s (kvazi-statika) → rychlosti zatěžování jsou stejné jako v případě materiálového modelu *MAT_CSCM (viz strana 177).



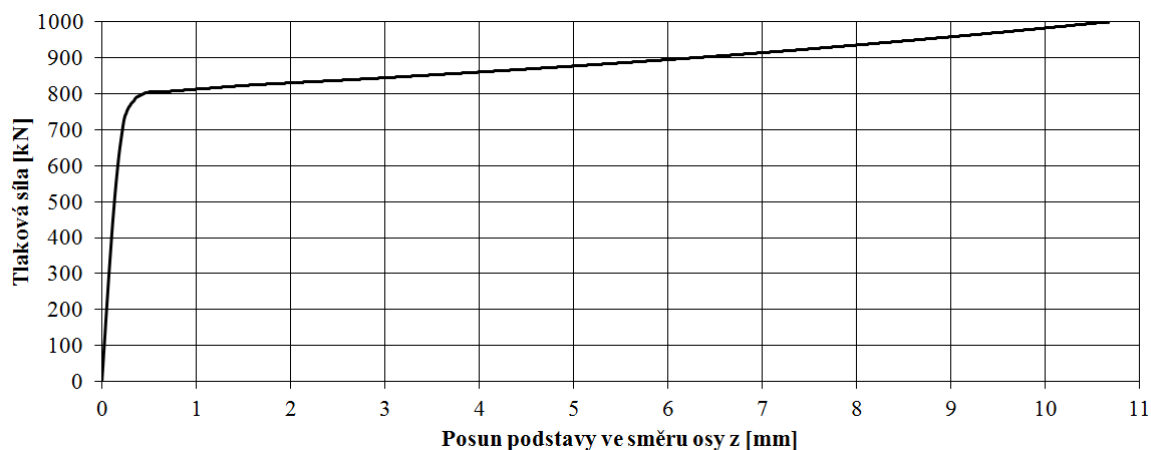
Obr. 8. 2. 69 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_WINFRITH_CONCRETE

Maximální dosažená tlaková síla neboli maximální tlaková únosnost betonového válce byla v případě kvazi-statického zatěžování (2,54 mm/s) rovna hodnotě 780 kN. V případě rychlosti zatěžování 10,667 mm/s byla maximální dosažená tlaková únosnost betonového válce rovna hodnotě 985,7 kN. Z uvedeného vyplývá, že při zhruba čtyřnásobně vyšší rychlosti zatěžování, než je kvazi-statická rychlost zatěžování, se tlaková únosnost betonového válce, tedy také pevnost betonu v tlaku, zvýší přibližně o 26 % (při použití materiálového modelu *MAT_WINFRITH_CONCRETE, viz obr. 8. 2. 69).

*MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL (MAT_CDPM)

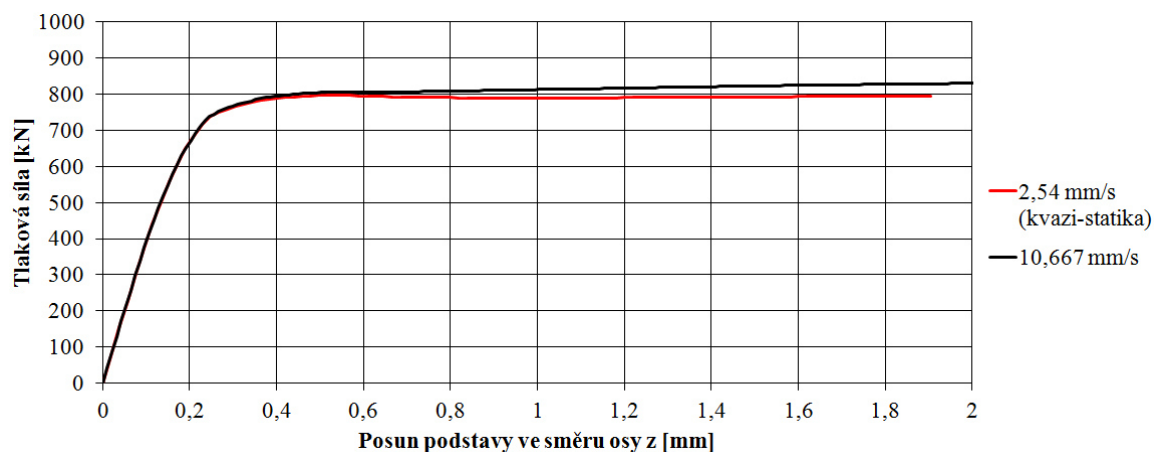
Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_CDPM) válce v závislosti na čase jsou stejné jako v případě materiálového modelu *MAT_CSCM (viz strana 177) a jsou tedy znázorněny na obr. 8. 2. 64. Charakteristika křivek, jež jsou znázorněny na obr. 8. 2. 64, z hlediska jednotlivých posunů podstav modelu válce a výsledného stlačení válce je uvedena na straně 176 (*MAT_CSCM).

Zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CDPM) válce v tlaku získaný z výsledků numerických simulací při zatěžování vyššími rychlostmi je znázorněn na obr. 8. 2. 70.



Obr. 8. 2. 70 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), stlačování válce vyšší rychlostí, *MAT_CDPM

Na obr. 8. 2. 71 je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CDPM) válce v tlaku, který zahrnuje celkem 2 křivky, které charakterizují chování betonového válce, tedy i chování betonu, při rychlostech zatěžování 10,667 mm/s a 2,54 mm/s (kvazi-statika) → rychlosti zatěžování jsou stejné jako v případě materiálového modelu *MAT_CSCM (viz strana 177).



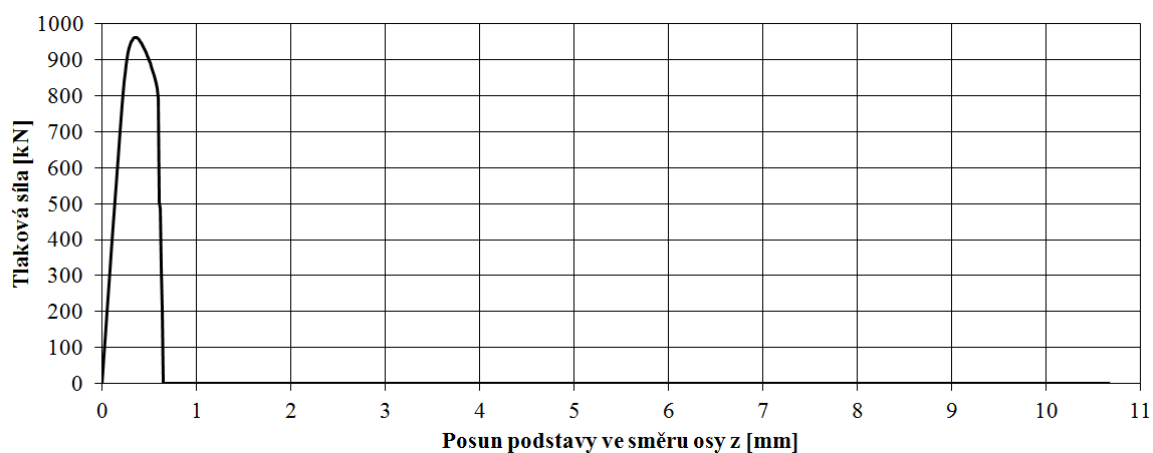
Obr. 8. 2. 71 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CDPM

Maximální dosažená tlaková síla neboli maximální tlaková únosnost betonového válce byla v případě kvazi-statického zatěžování (2,54 mm/s) rovna hodnotě 797,3 kN. V případě rychlosti zatěžování 10,667 mm/s nebyla maximální tlaková únosnost betonového válce dosažena. Dosažená tlaková síla v koncovém čase 2 s měla hodnotu 999,2 kN (při použití materiálového modelu *MAT_CDPM, viz obr. 8. 2. 70).

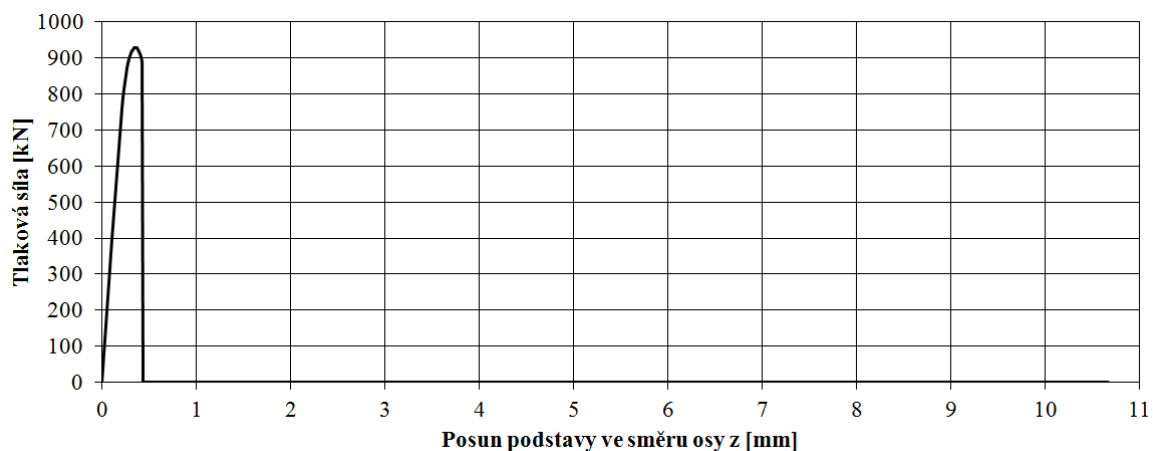
***MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, resp. *MAT_CONCRETE_DAMAGE**

Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, resp. *MAT_CONCRETE_DAMAGE) válce v závislosti na čase jsou stejné jako v případě materiálového modelu *MAT_CSCM (strana 177) a jsou tedy znázorněny na obr. 8. 2. 64. Charakteristika křivek, jež jsou znázorněny na obr. 8. 2. 64, z hlediska jednotlivých posunů podstav modelu válce a výsledného stlačení válce je uvedena na straně 176 (*MAT_CSCM).

Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku získaný z výsledků numerických simulací při zatěžování vyššími rychlostmi je znázorněn na obr. 8. 2. 72 (REL3), resp. 8. 2. 73.



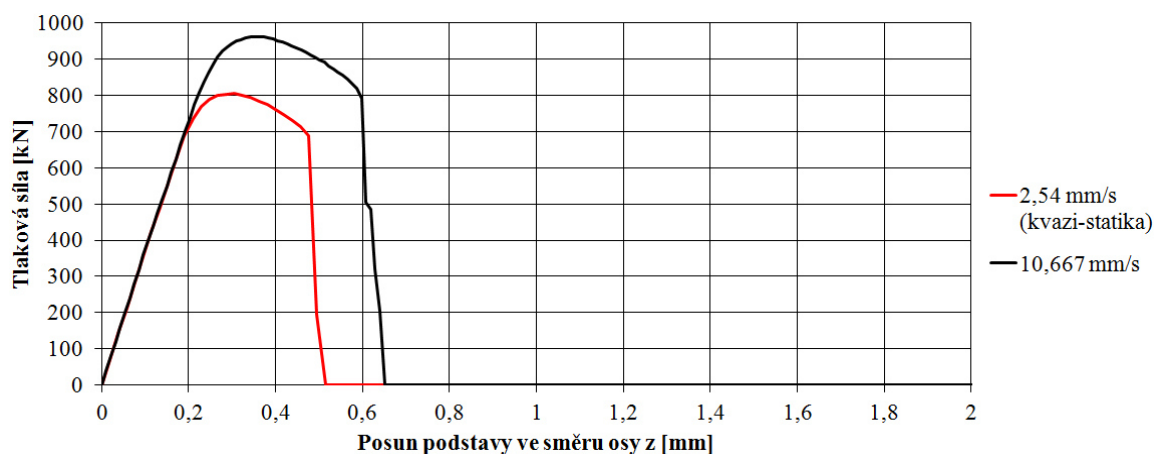
Obr. 8. 2. 72 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), stlačování válce vyšší rychlostí, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3



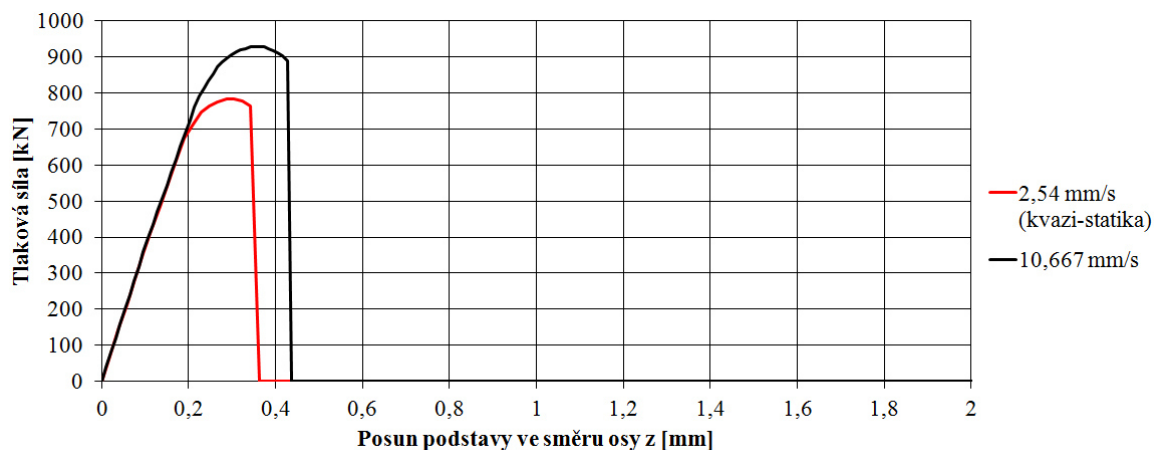
Obr. 8. 2. 73 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), stlačování válce vyšší rychlostí, *MAT_CONCRETE_DAMAGE

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

Na obr. 8. 2. 74 (REL3), resp. 8. 2. 75, je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku, který zahrnuje celkem 2 křivky, které charakterizují chování betonového válce, tedy i chování betonu, při rychlostech zatěžování 10,667 mm/s a 2,54 mm/s (kvazi-statika) → rychlosti zatěžování jsou stejné jako v případě materiálového modelu *MAT_CSCM (viz strana 177).



Obr. 8. 2. 74 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3



Obr. 8. 2. 75 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CONCRETE_DAMAGE

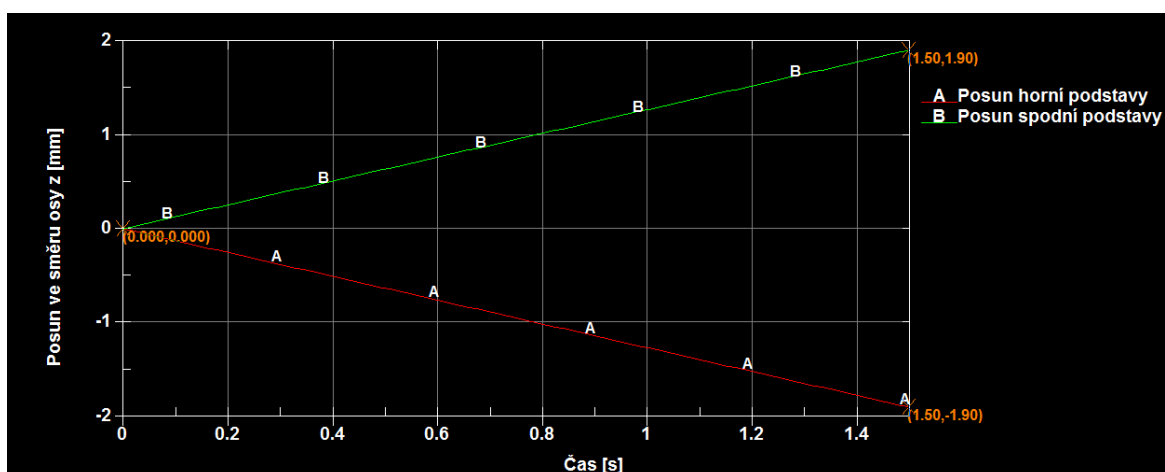
Maximální dosažená tlaková síla neboli maximální tlaková únosnost betonového válce byla v případě kvazi-statického zatěžování (2,54 mm/s) rovna hodnotě 804,3 kN (REL3), resp. 783,8 kN. V případě rychlosti zatěžování 10,667 mm/s byla maximální dosažená tlaková únosnost betonového válce rovna hodnotě 961,8 kN (REL3), resp.

928,9 kN. Z uvedeného vyplývá, že při zhruba čtyřnásobně vyšší rychlosti zatěžování, než je kvazi-statická rychlost zatěžování, se tlaková únosnost betonového válce, tedy také pevnost betonu v tlaku, zvýší přibližně o 20 % (při použití materiálového modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, viz obr. 8. 2. 74), resp. 19 % (při použití materiálového modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE, viz obr. 8. 2. 75).

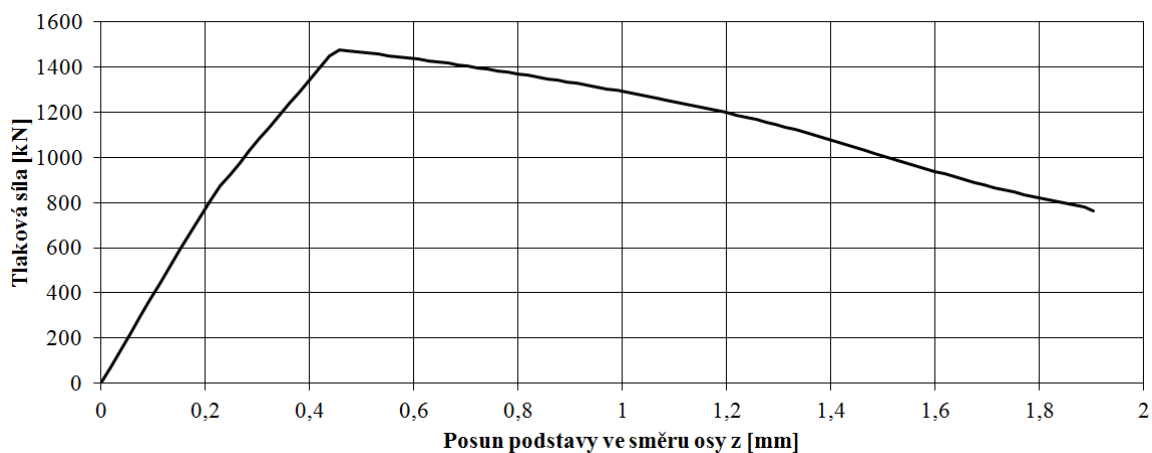
*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE

Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE) válce v závislosti na čase jsou znázorněny na obr. 8. 2. 76. Na obr. 8. 2. 76 je vidět, že posuny podstav modelu válce byly v čase lineární (zatěžování konstantní rychlostí) a každá podstava válce se v průběhu zatěžování posunula o 1,905 mm (stlačování válce z obou stran). Výsledné stlačení válce v čase 1,5 s tedy bylo 3,81 mm (koncový čas 1,5 s).

Materiálový model *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE vykazoval nárůst pevnosti betonu v tlaku již při rychlosti zatěžování (2,54 mm/s), která byla pro ostatní materiálové modely kvazi-statická. Vzhledem k popisu tohoto materiálového modelu, který je uveden v podkapitole 5. 2. 6, je zřejmé, že tento materiálový model není zcela vhodný pro úlohy řešené v rámci této práce. Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku pro tento materiálový model je znázorněn na obr. 8. 2. 77.



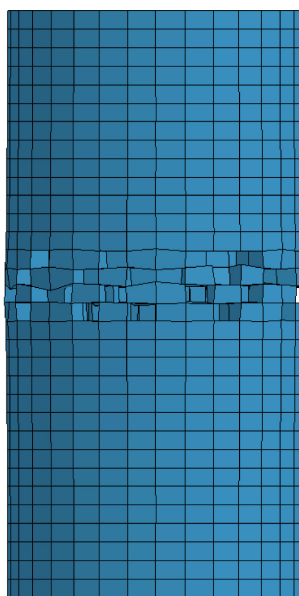
Obr. 8. 2. 76 Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, stlačování válce, *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (LS-PrePost v. 4.0)



Obr. 8. 2. 77 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), stlačování válce, *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE

Při rychlosti zatěžování 2,54 mm/s byla maximální dosažená tlaková únosnost betonového válce rovna hodnotě 1476 kN. Na obr. 8. 2. 77 je vidět, že po překročení maximální tlakové únosnosti betonového válce neboli po překročení pevnosti betonu v tlaku docházelo k tlakovému změkčování.

Na obr. 8. 2. 78 je znázorněno porušení betonového válce v koncovém čase 1,5 s, které bylo modelováno prostřednictvím vypadávání porušených konečných prvků z výpočtu, což je jedna z možností nastavení materiálového modelu *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE.



Obr. 8. 2. 78 Porušení betonového válce v koncovém čase 1,5 s, *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE

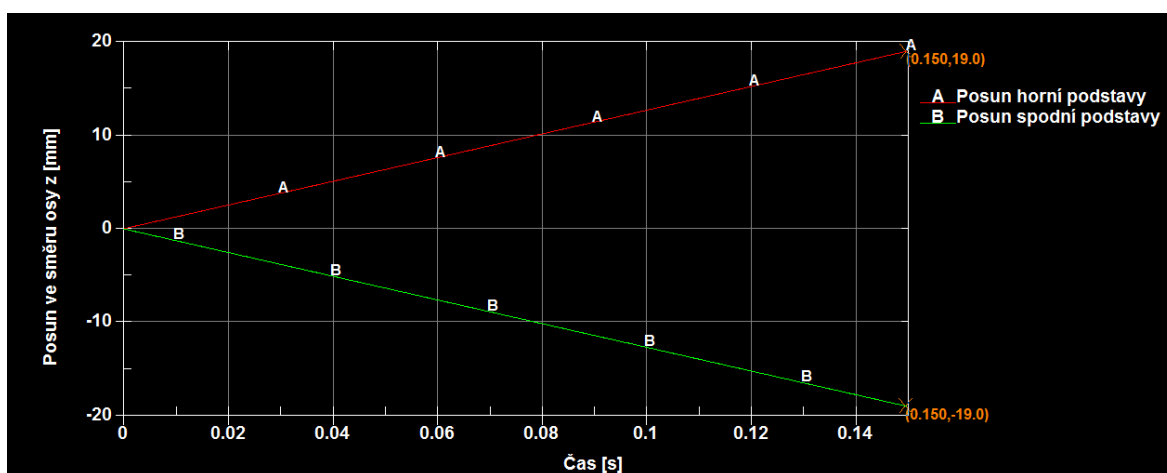
Numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válcích

Okrajové podmínky (podepření) nebyly při numerických simulacích zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válcích (vyšší rychlosti zatěžování) na model válce aplikovány stejně jako v případě těchto numerických simulací při kvazi-statickém zatěžování, viz podkapitola 8. 2. 1. Pro jednotlivé numerické simulace byly na model válce aplikovány jednotlivé nelineární materiálové modely betonu. Zatížení bylo v rámci těchto numerických simulací aplikováno na uzly obou podstav modelu válce ve formě posunů ve směru osy z tak, aby posuny obou podstav modelu válce byly v průběhu zatěžování stejné a aby zatěžování probíhalo konstantní rychlostí.

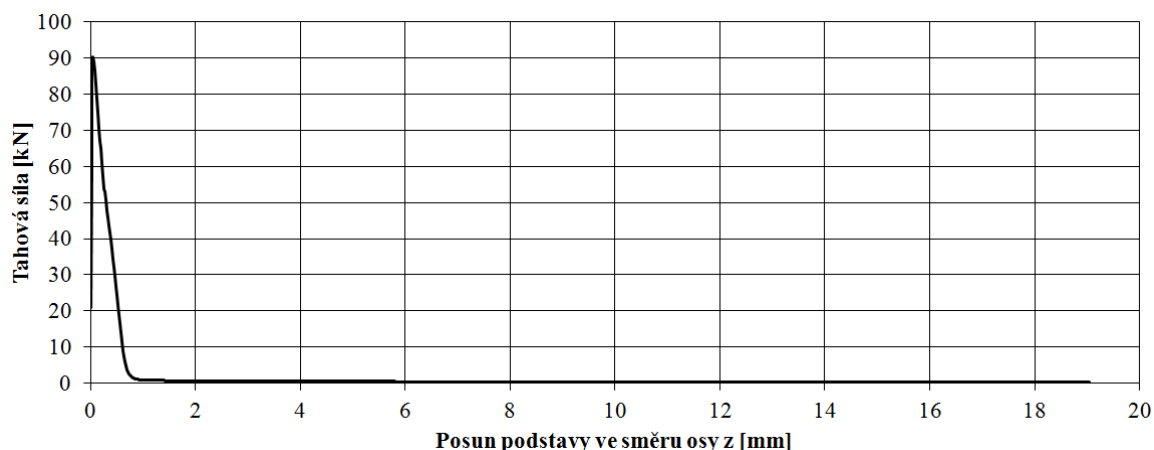
*MAT_CSCM

Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_CSCM) válce v závislosti na čase jsou znázorněny na obr. 8. 2. 79. Na obr. 8. 2. 79 je vidět, že posuny podstav modelu válce byly v čase lineární (zatěžování konstantní rychlostí) a každá podstava válce se v průběhu zatěžování posunula o 19,05 mm (natahování válce z obou stran). Výsledné natažení válce v čase 0,15 s tedy bylo 38,1 mm (koncový čas 0,15 s).

Zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CSCM) válce v tahu získaný z výsledků numerických simulací při zatěžování vyššími rychlostmi je znázorněn na obr. 8. 2. 80.

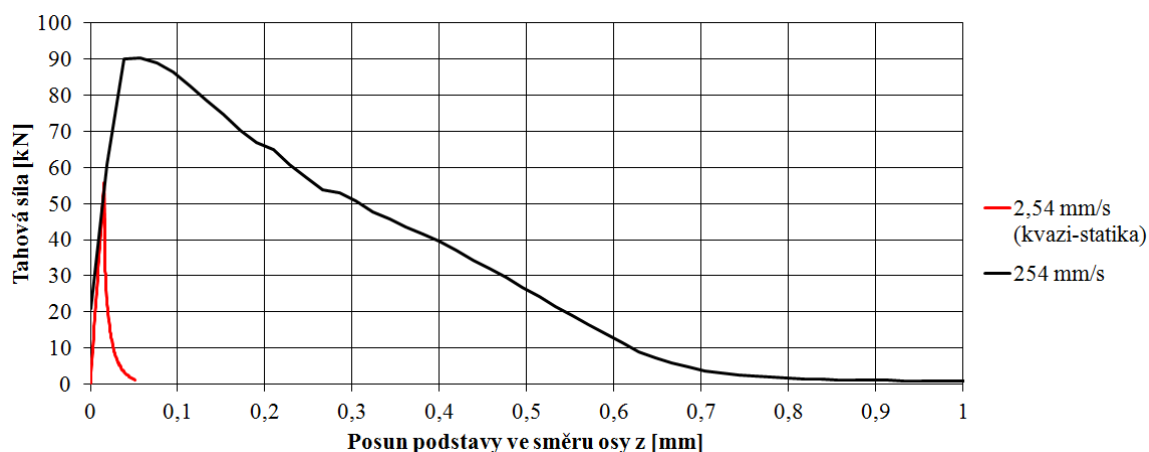


Obr. 8. 2. 79 Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_CSCM (LS-PrePost v. 4.0)



Obr. 8. 2. 80 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_CSCM

Výsledné natažení válce v čase 0,15 s bylo 38,1 mm → rychlost zatěžování byla rovna $38,1/0,15 = 254$ mm/s. Při kvazi-statickém zatěžování bylo výsledné natažení válce v čase 0,04 s 0,1016 mm → kvazi-statická rychlost zatěžování byla rovna $0,1016/0,04 = 2,54$ mm/s. Na obr. 8. 2. 81 je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CSCM) válce v tahu, který zahrnuje celkem 2 křivky, které charakterizují chování betonového válce, tedy i chování betonu, při zmíněných rychlostech zatěžování.



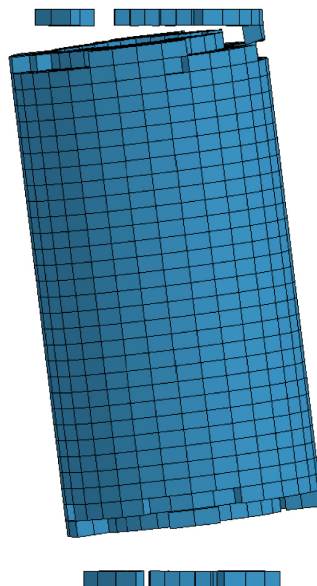
Obr. 8. 2. 81 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CSCM

Maximální dosažená tahová síla neboli maximální tahová únosnost betonového válce byla v případě kvazi-statického zatěžování (2,54 mm/s) rovna hodnotě 55,72 kN. V případě rychlosti zatěžování 254 mm/s byla maximální dosažená tahová únosnost betonového válce rovna hodnotě 90,37 kN. Z uvedeného vyplývá, že při stonásobně vyšší

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

rychlosti zatěžování, než je kvazi-statická rychlost zatěžování, se tahová únosnost betonového válce, tedy také pevnost betonu v tahu, zvýší přibližně o 62 % (při použití materiálového modelu *MAT_CSCM, viz obr. 8. 2. 81).

Na obr. 8. 2. 82 je znázorněno porušení betonového válce v koncovém čase 0,15 s, které bylo modelováno prostřednictvím vypadávání porušených konečných prvků z výpočtu, což je jedna z možností nastavení materiálového modelu *MAT_CSCM.

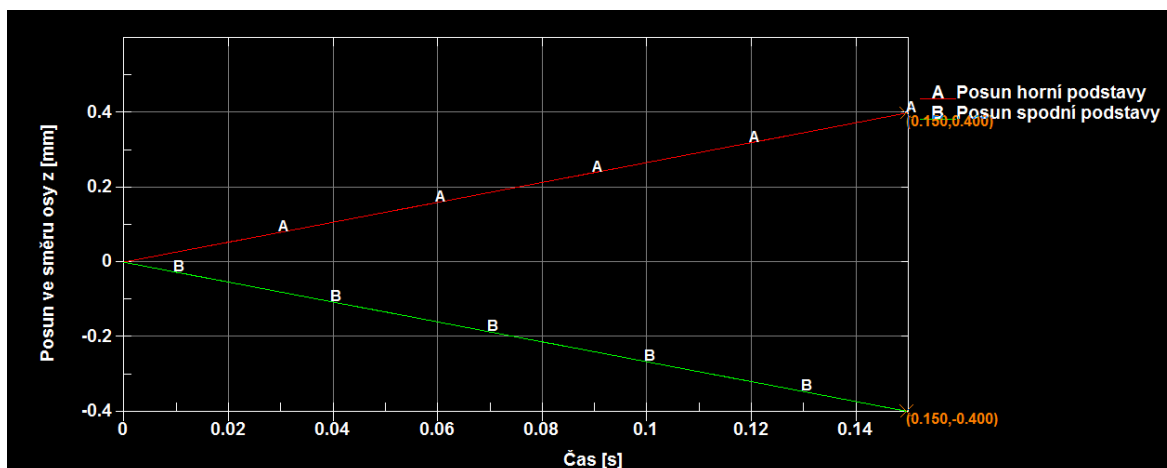


Obr. 8. 2. 82 Porušení betonového válce v koncovém čase 0,15 s, *MAT_CSCM

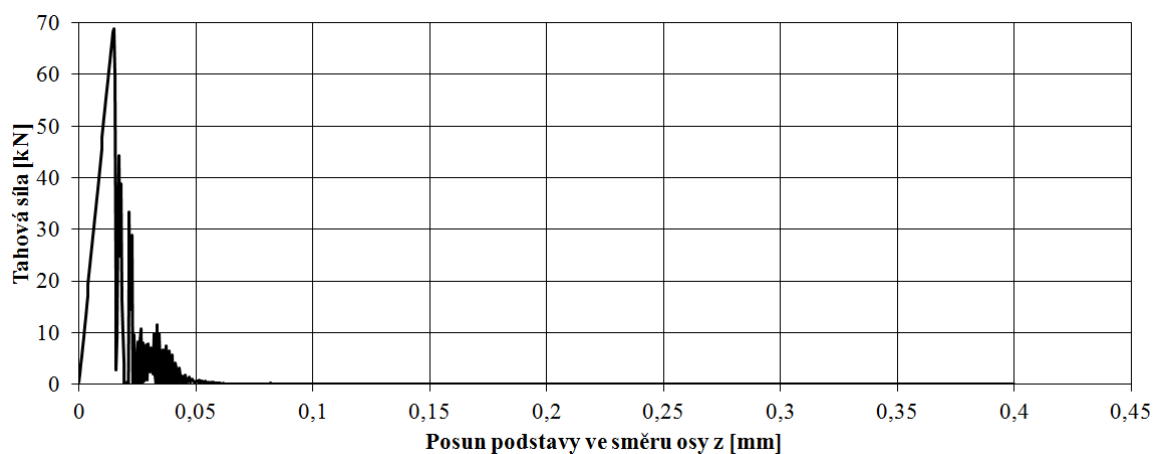
***MAT_WINFRITH_CONCRETE**

Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) válce v závislosti na čase jsou znázorněny na obr. 8. 2. 83. Na obr. 8. 2. 83 je vidět, že posuny podstav modelu válce byly v čase lineární (zatěžování konstantní rychlostí) a každá podstava válce se v průběhu zatěžování posunula o 0,4 mm (natahování válce z obou stran). Výsledné natažení válce v čase 0,15 s tedy bylo 0,8 mm (koncový čas 0,15 s).

Zatěžovací 1-d diagram betonového (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) válce v tahu získaný z výsledků numerických simulací při zatěžování vyššími rychlostmi je znázorněn na obr. 8. 2. 84.

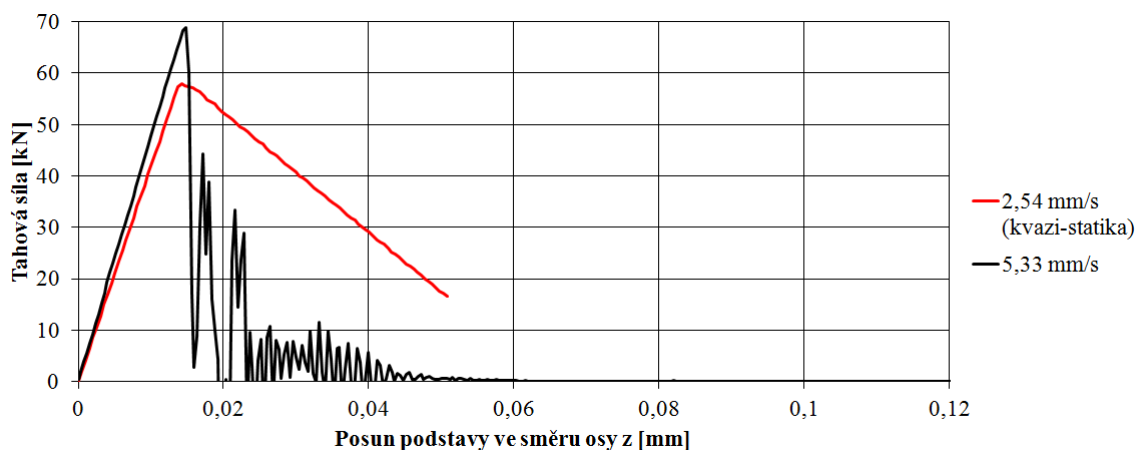


Obr. 8. 2. 83 Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_WINFRITH_CONCRETE (LS-PrePost v. 4.0)



Obr. 8. 2. 84 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_WINFRITH_CONCRETE

Výsledné natažení válce v čase 0,15 s bylo 0,8 mm → rychlost zatěžování byla rovna $0,8/0,15 = 5,33$ mm/s. Při kvazi-statickém zatěžování bylo výsledné natažení válce v čase 0,04 s 0,1016 mm → kvazi-statická rychlost zatěžování byla rovna $0,1016/0,04 = 2,54$ mm/s. Na obr. 8. 2. 85 je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) válce v tahu, který zahrnuje celkem 2 křivky, které charakterizují chování betonového válce, tedy i chování betonu, při zmíněných rychlostech zatěžování.



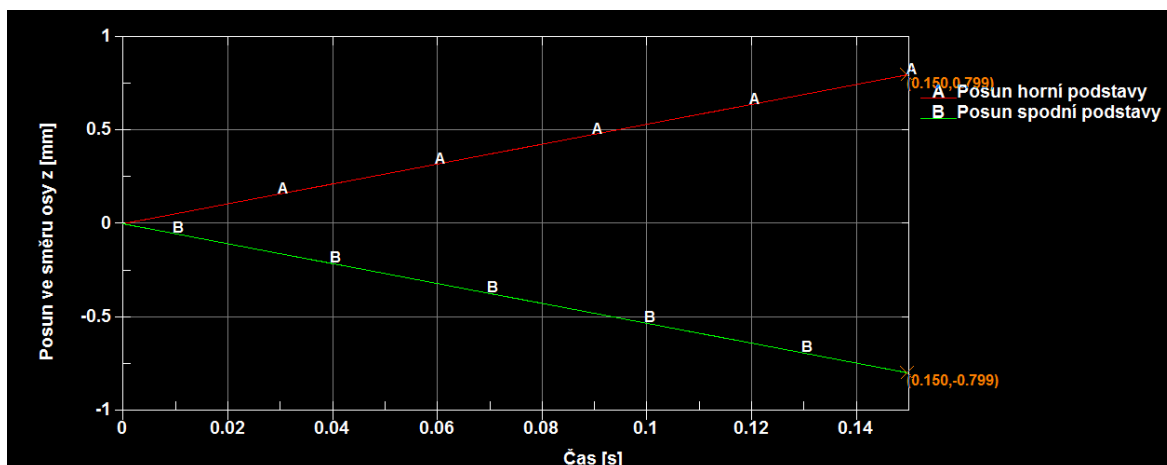
Obr. 8. 2. 85 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_WINFRITH_CONCRETE

Maximální dosažená tahová síla neboli maximální tahová únosnost betonového válce byla v případě kvazi-statického zatěžování (2,54 mm/s) rovna hodnotě 57,87 kN. V případě rychlosti zatěžování 5,33 mm/s byla maximální dosažená tahová únosnost betonového válce rovna hodnotě 68,78 kN. Z uvedeného vyplývá, že při zhruba dvojnásobně vyšší rychlosti zatěžování, než je kvazi-statická rychlost zatěžování, se tahová únosnost betonového válce, tedy také pevnost betonu v tahu, zvýší přibližně o 19 % (při použití materiálového modelu *MAT_WINFRITH_CONCRETE, viz obr. 8. 2. 85).

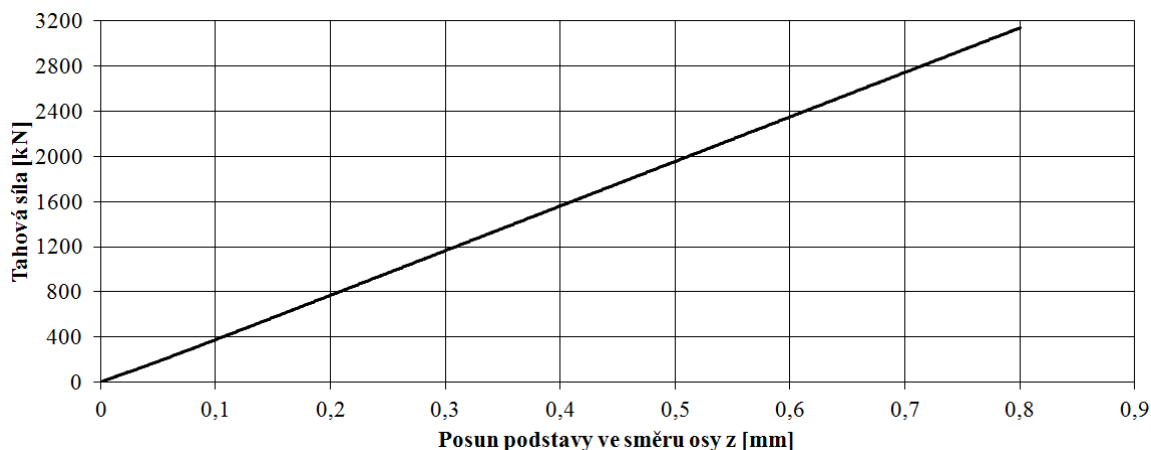
*MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL (*MAT_CDPM)

Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_CDPM) válce v závislosti na čase jsou znázorněny na obr. 8. 2. 86. Na obr. 8. 2. 86 je vidět, že posuny podstav modelu válce byly v čase lineární (zatěžování konstantní rychlostí) a každá podstava válce se v průběhu zatěžování posunula o 0,8 mm (natahování válce z obou stran). Výsledné natažení válce v čase 0,15 s tedy bylo 1,6 mm (koncový čas 0,15 s).

Zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CDPM) válce v tahu získaný z výsledků numerických simulací při zatěžování vyššími rychlostmi je znázorněn na obr. 8. 2. 87.

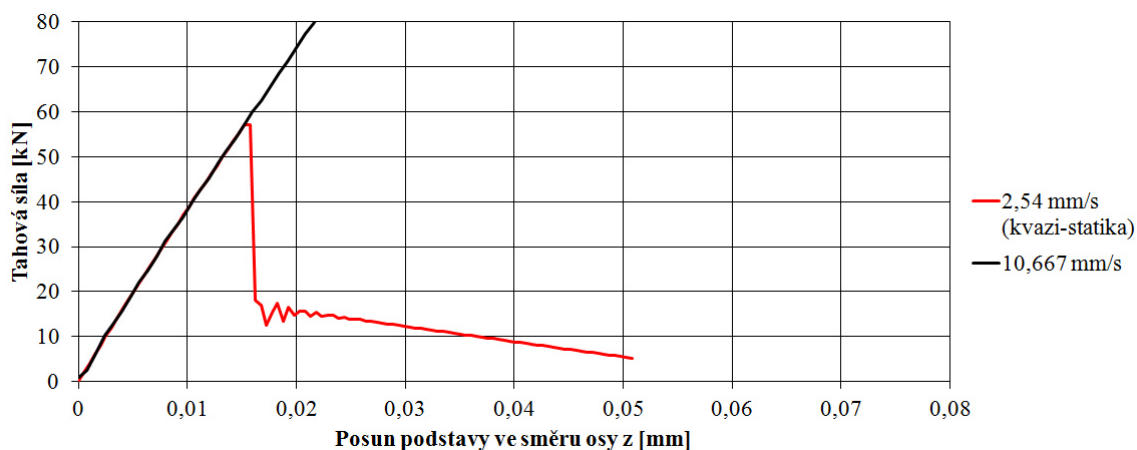


Obr. 8. 2. 86 Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_CDPM (LS-PrePost v. 4.0)



Obr. 8. 2. 87 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_CDPM

Výsledné natažení válce v čase 0,15 s bylo 1,6 mm → rychlost zatěžování byla rovna $1,6/0,15 = 10,667$ mm/s. Při kvazi-statickém zatěžování bylo výsledné natažení válce v čase 0,04 s 0,1016 mm → kvazi-statická rychlost zatěžování byla rovna $0,1016/0,04 = 2,54$ mm/s. Na obr. 8. 2. 88 je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CDPM) válce v tahu, který zahrnuje celkem 2 křivky, které charakterizují chování betonového válce, tedy i chování betonu, při zmíněných rychlostech zatěžování.



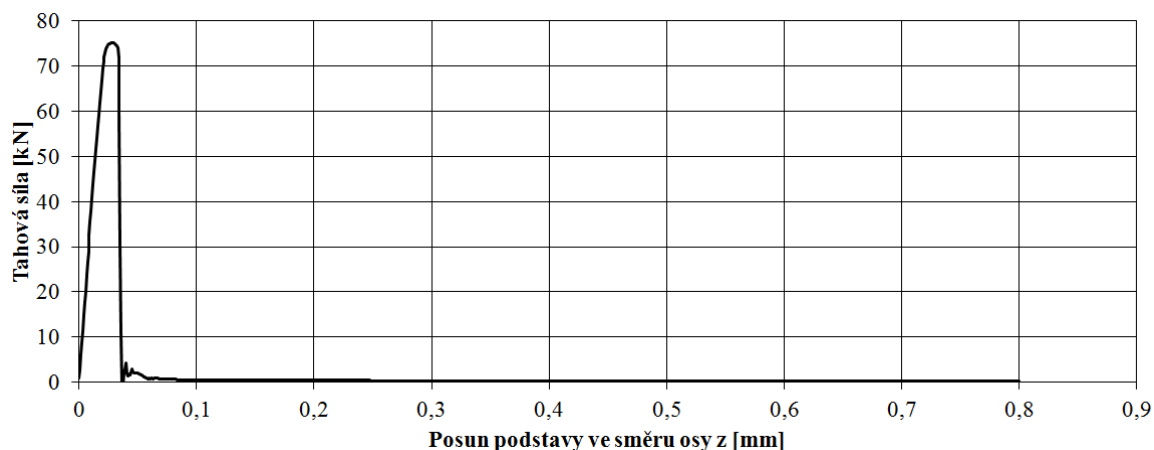
Obr. 8. 2. 88 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CDPM

Maximální dosažená tahová síla neboli maximální tahová únosnost betonového válce byla v případě kvazi-statického zatěžování (2,54 mm/s) rovna hodnotě 57,18 kN. V případě rychlosti zatěžování 10,667 mm/s nebyla maximální tahová únosnost betonového válce dosažena, válec se choval až do koncového času 0,15 s lineárně pružně, přičemž dosažená tahová síla v koncovém čase 0,15 s měla hodnotu 3137 kN (při použití materiálového modelu *MAT_CDPM, viz obr. 8. 2. 87).

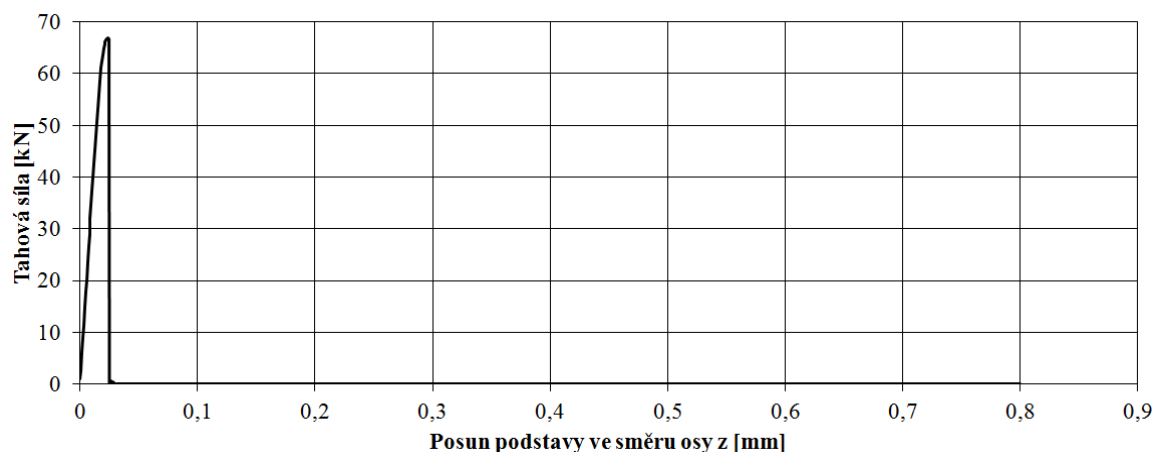
***MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, resp. *MAT_CONCRETE_DAMAGE**

Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, resp. *MAT_CONCRETE_DAMAGE) válce v závislosti na čase jsou stejné jako v případě materiálového modelu *MAT_CDPM (viz strana 191) a jsou tedy znázorněny na obr. 8. 2. 86. Charakteristika křivek, jež jsou znázorněny na obr. 8. 2. 86, z hlediska jednotlivých posunů podstav modelu válce a výsledného natažení válce je uvedena na straně 190 (*MAT_CDPM).

Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu získaný z výsledků numerických simulací při zatěžování vyššími rychlostmi je znázorněn na obr. 8. 2. 89 (REL3), resp. 8. 2. 90.

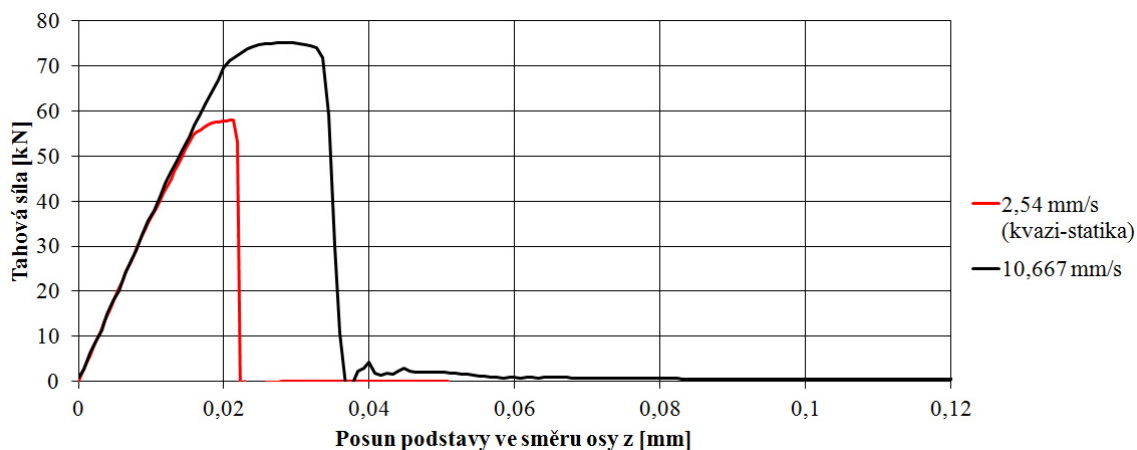


Obr. 8. 2. 89 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3

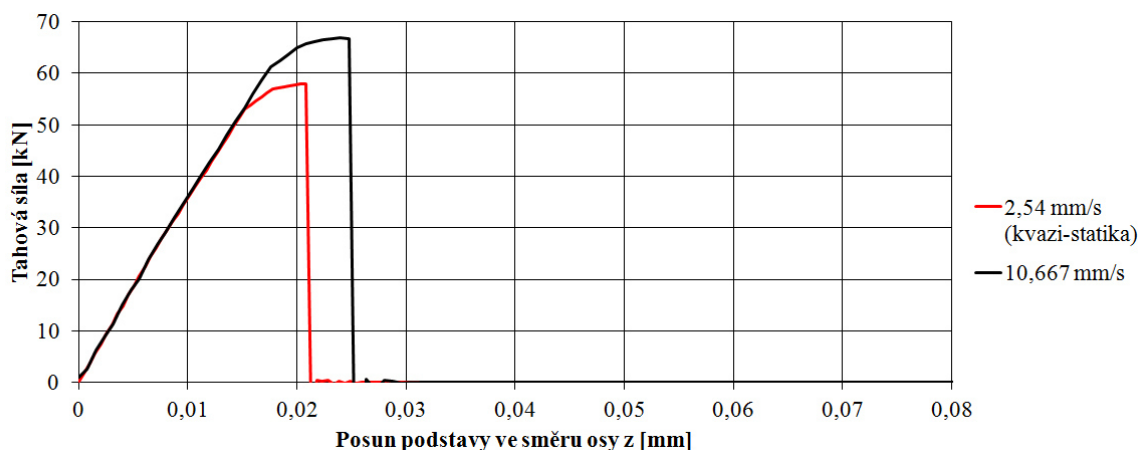


Obr. 8. 2. 90 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_CONCRETE_DAMAGE

Na obr. 8. 2. 91 (REL3), resp. 8. 2. 92, je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu, který zahrnuje celkem 2 křivky, které charakterizují chování betonového válce, tedy i chování betonu, při rychlostech zatěžování 10,667 mm/s a 2,54 mm/s (kvazi-statika) → rychlosti zatěžování jsou stejné jako v případě materiálového modelu *MAT_CDPM (viz strana 191).



Obr. 8. 2. 91 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3



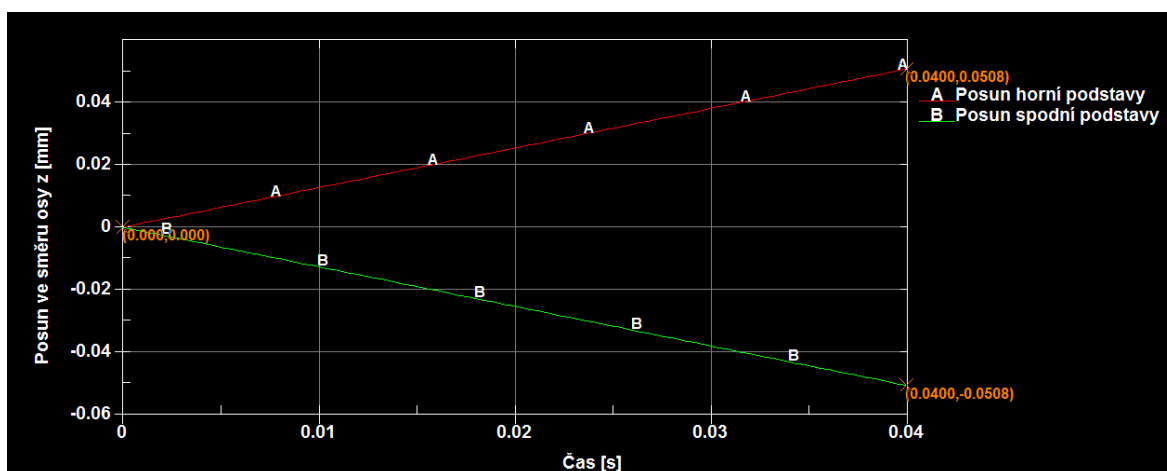
Obr. 8. 2. 92 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CONCRETE_DAMAGE

Maximální dosažená tahová síla neboli maximální tahová únosnost betonového válce byla v případě kvazi-statického zatěžování (2,54 mm/s) rovna hodnotě 57,95 kN (REL3), resp. 57,91 kN. V případě rychlosti zatěžování 10,667 mm/s byla maximální dosažená tahová únosnost betonového válce rovna hodnotě 75,22 kN (REL3), resp. 66,87 kN. Z uvedeného vyplývá, že při zhruba čtyřnásobně vyšší rychlosti zatěžování, než je kvazi-statická rychlost zatěžování, se tahová únosnost betonového válce, tedy také pevnost betonu v tahu, zvýší přibližně o 30 % (při použití materiálového modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, viz obr. 8. 2. 91), resp. 15 % (při použití materiálového modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE, viz obr. 8. 2. 92).

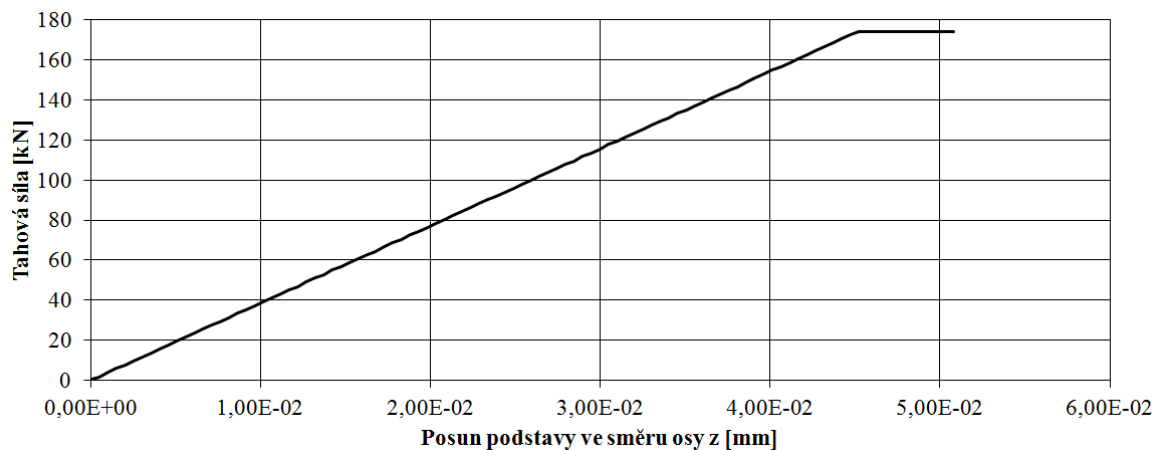
***MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE**

Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE) válce v závislosti na čase jsou znázorněny na obr. 8. 2. 93. Na obr. 8. 2. 93 je vidět, že posuny podstav modelu válce byly v čase lineární (zatěžování konstantní rychlostí) a každá podstava válce se v průběhu zatěžování posunula o 0,0508 mm (natahování válce z obou stran). Výsledné natažení válce v čase 0,04 s tedy bylo 0,1016 mm (koncový čas 0,04 s).

Materiálový model *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE vykazoval nárůst pevnosti betonu v tahu již při rychlosti zatěžování (2,54 mm/s), která byla pro ostatní materiálové modely kvazi-statická. Jak již bylo zmíněno, tento materiálový model není zcela vhodný pro úlohy řešené v rámci této práce. Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu pro materiálový model *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE je znázorněn na obr. 8. 2. 94.



Obr. 8. 2. 93 Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, natahování válce, *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (LS-PrePost v. 4.0)



Obr. 8. 2. 94 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), natahování válce, *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE

Při rychlosti zatěžování 2,54 mm/s byla maximální dosažená tahová únosnost betonového válce rovna hodnotě 174 kN. Na obr. 8. 2. 94 je vidět, že po dosažení maximální tahové únosnosti betonového válce neboli po dosažení pevnosti betonu v tahu docházelo k plastickému přetváření betonového válce.

8. 2. 3 Cyklické zatěžování

Dále byly v rámci této práce provedeny také numerické simulace zkoušek testujících odezvu betonových zkušebních válců na cyklické namáhání. Tyto numerické simulace mají v kontextu této práce spíše doplňující význam.

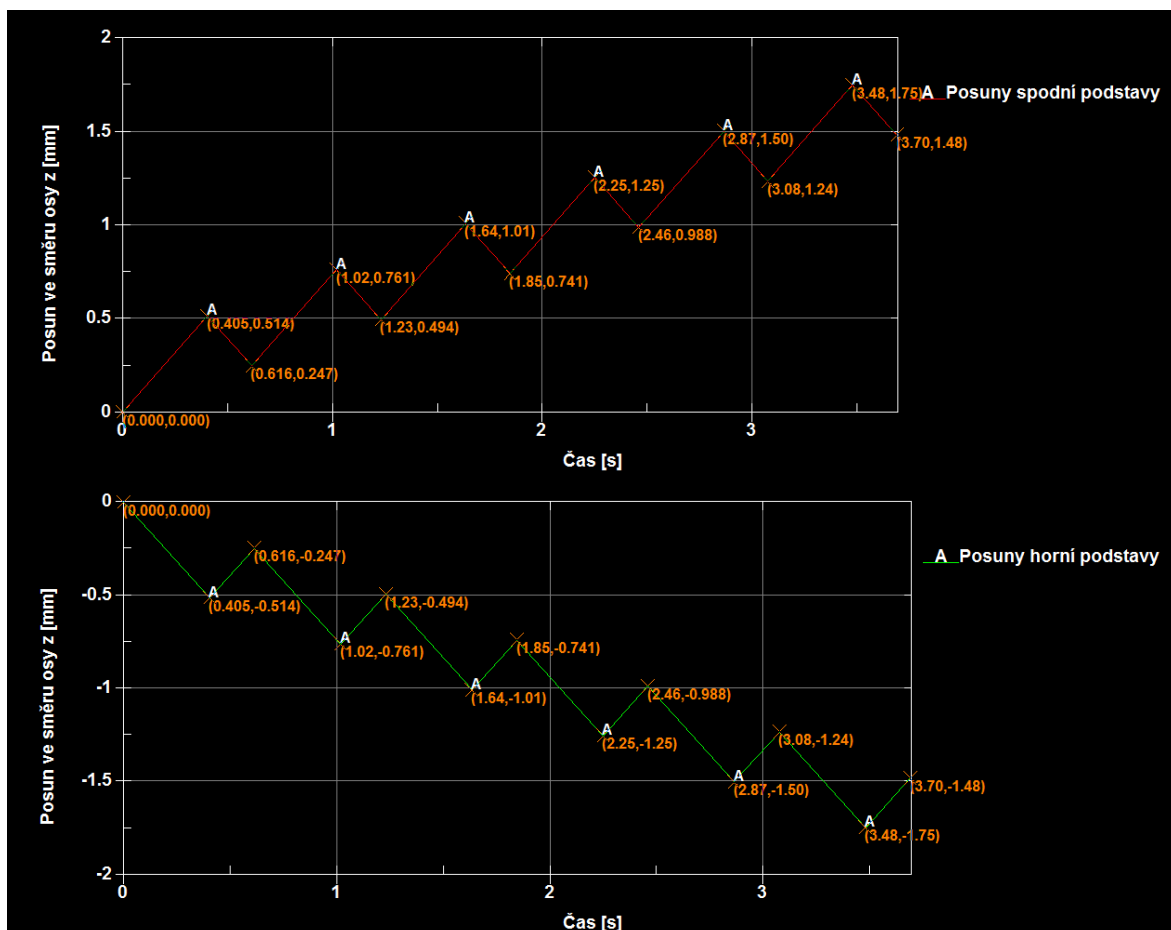
Numerické simulace zkoušek testujících odezvu betonových zkušebních válců na cyklické namáhání

Okrajové podmínky (podepření modelu válce) byly při numerických simulacích zkoušek testujících odezvu betonových zkušebních válců na cyklické namáhání stejné jako v případě numerických simulací zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek (kvazi-statické zatěžování), viz podkapitola 8. 2. 1. Pro jednotlivé numerické simulace byly na model válce aplikovány jednotlivé nelineární materiálové modely betonu. Zatížení bylo v rámci těchto numerických simulací aplikováno na uzly obou podstav modelu válce ve formě posunů ve směru osy z tak, aby posuny obou podstav modelu válce byly při zatěžování a odtěžování stejné a aby zatěžování a odtěžování probíhalo v obou případech stejnou konstantní rychlostí.

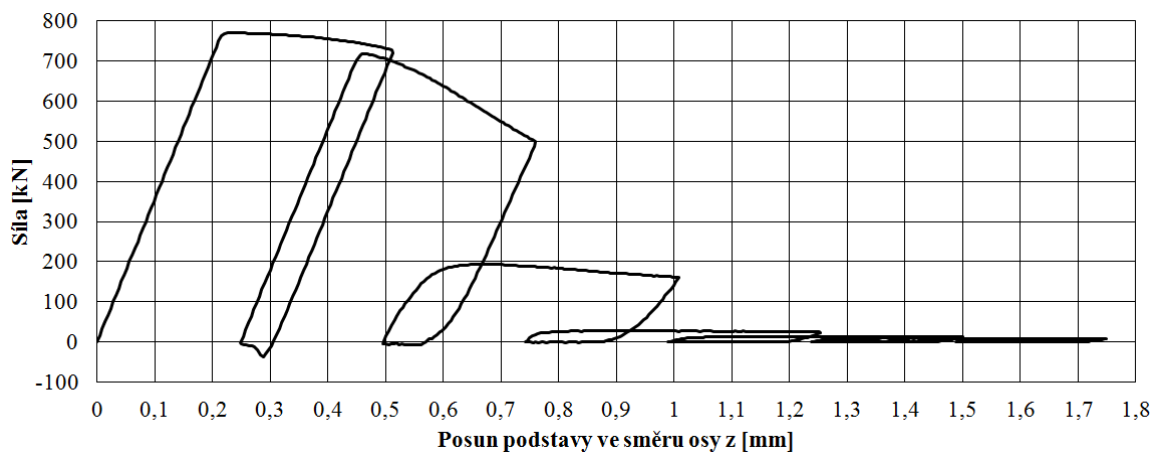
***MAT_CSCM**

Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_CSCM) válce v závislosti na čase jsou znázorněny na obr. 8. 2. 95. Na obr. 8. 2. 95 je vidět, že posuny podstav modelu válce byly při zatěžování a odtěžování v čase lineární (zatěžování a odtěžování stejnou kvazi-statickou konstantní rychlostí 2,54 mm/s) a že se obě podstavy válce v průběhu zatěžování a odtěžování posunovaly stejným způsobem proti sobě (zatěžování a odtěžování válce z obou stran). Na začátku zatěžování byl válec nejprve stlačován. Maximální stlačení válce bylo v čase 3,48 s od začátku zatěžování 3,5 mm a konečné stlačení válce bylo v čase 3,7 s 2,96 mm (koncový čas 3,7 s).

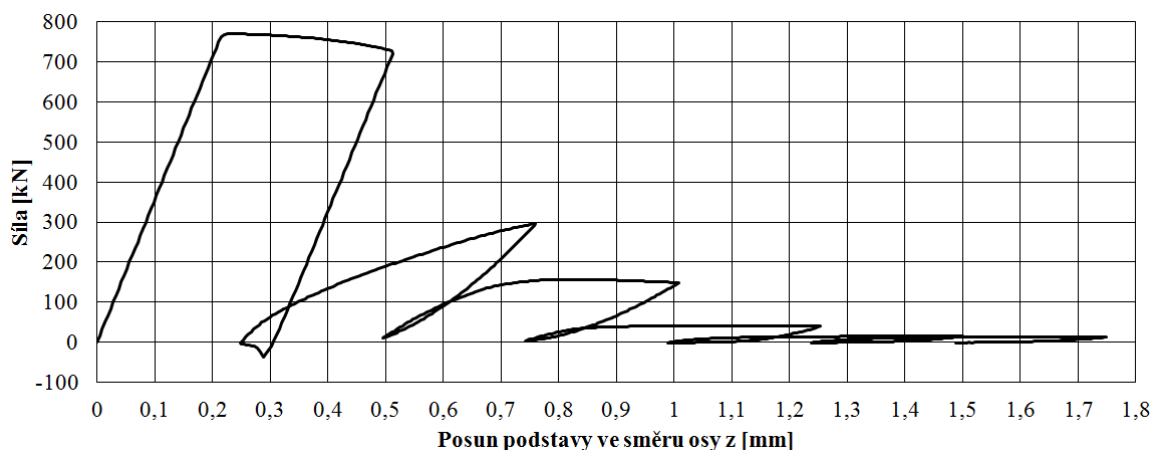
Hysterézní křivka betonového (*MAT_CSCM) válce získaná z výsledků numerických simulací při cyklickém zatěžování je znázorněna na obr. 8. 2. 96, resp. 8. 2. 97.



Obr. 8. 2. 95 Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, cyklické zatěžování válce, *MAT_CSCM (LS-PrePost v. 4.0)



Obr. 8. 2. 96 Hysterézní křivka betonového válce (numerická simulace), cyklické zatěžování válce, RECOV = 0, *MAT_CSCM



Obr. 8. 2. 97 Hysterézní křivka betonového válce (numerická simulace), cyklické zatěžování válce, RECOV = 1, *MAT_CSCM

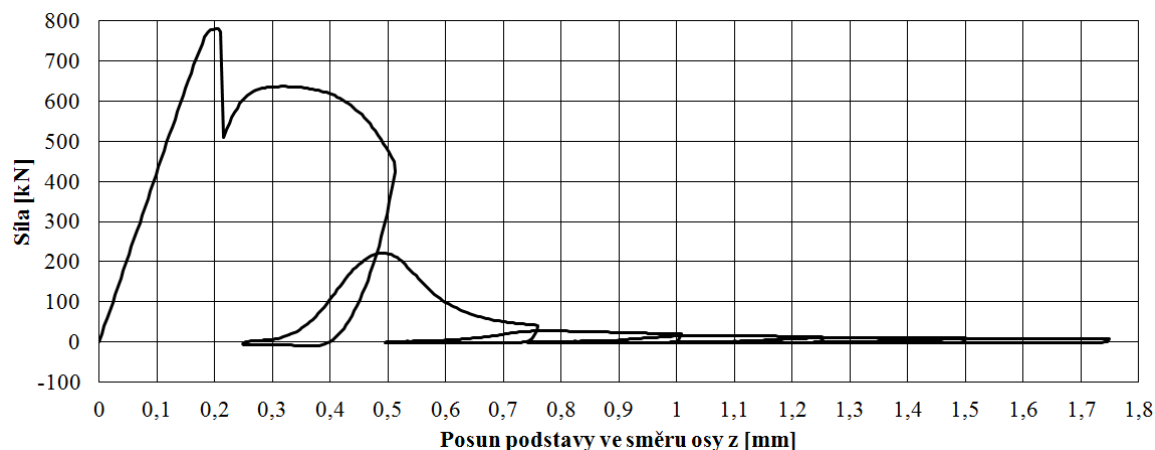
Na obr. 8. 2. 96, resp. 8. 2. 97, je vidět, že betonový válec byl od počátku zatěžování nejprve stlačován, přičemž stlačování probíhalo až za mez tlakové únosnosti válce (mez pevnosti betonu v tlaku), kdy se již projevovalo tlakové změkčení. Následně byl betonový válec odtěžován, přičemž nedocházelo k poklesu (degradaci) jeho tuhosti (plasticita). Po odtížení na nulovou hodnotu síly byl v rámci odtěžování betonový válec dále natahován až za mez jeho tahové únosnosti (mez pevnosti betonu v tahu), kdy se již projevvalo tahové změkčení. Poté byl betonový válec opět zatěžován (stlačován). Při nastavení parametru RECOV materiálového modelu *MAT_CSCM na hodnotu 0 nedocházelo při zatěžování a odtěžování betonového válce v dalších cyklech k poklesu jeho tuhosti (tuhost válce byla neustále obnovována), viz obr. 8. 2. 96. Při nastavení parametru RECOV na hodnotu 1 docházelo při zatěžování a odtěžování betonového válce v dalších cyklech k postupnému poklesu (degradaci) jeho tuhosti, viz obr. 8. 2. 97. S každým dalším cyklem postupně docházelo k degradaci únosnosti betonového válce neboli k degradaci pevnosti betonu, v každém dalším cyklu byla dosažená únosnost betonového válce menší, až již nebyl betonový válec schopen přenášet prakticky žádné zatížení.

*MAT_WINFRITH_CONCRETE

Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) válce v závislosti na čase jsou stejné jako v případě materiálového modelu *MAT_CSCM (strana 198) a jsou tedy znázorněny na obr. 8. 2. 95. Charakteristika křivek, jež jsou znázorněny na obr. 8. 2. 95, z hlediska jednotlivých posunů

podstav modelu válce a maximálního a výsledného stlačení válce je uvedena na straně 197 (*MAT_CSCM).

Hysterézní křivka betonového (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) válce získaná z výsledků numerických simulací při cyklickém zatěžování je znázorněna na obr. 8. 2. 98.



Obr. 8. 2. 98 Hysterézní křivka betonového válce (numerická simulace), cyklické zatěžování válce, *MAT_WINFRITH_CONCRETE

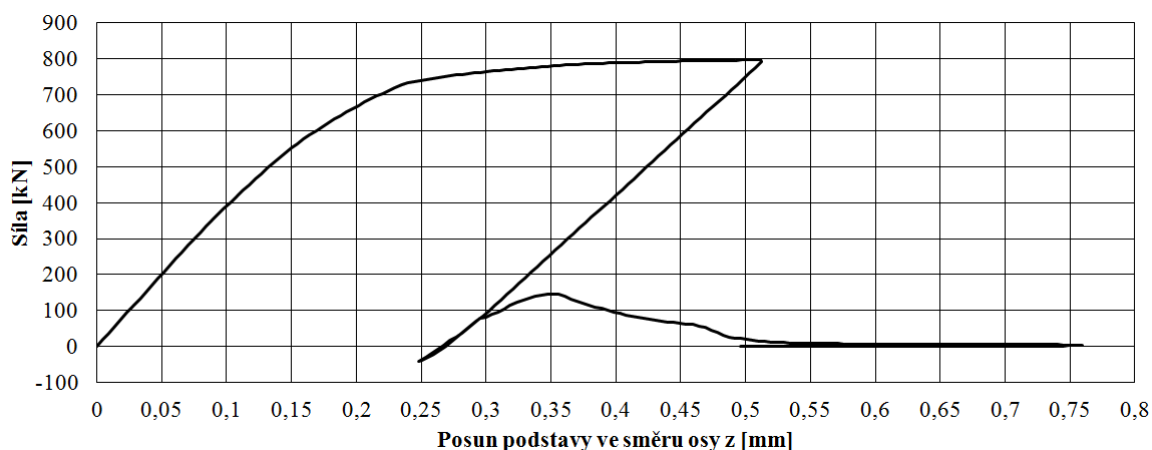
Na obr. 8. 2. 98 je vidět, že betonový válec byl od počátku zatěžování nejprve stlačován, přičemž stlačování probíhalo až za mez tlakové únosnosti válce (mez pevnosti betonu v tlaku), kdy se již projevovalo tlakové změkčení. Následně byl betonový válec odtěžován. Před dosažením nulové hodnoty síly při odtěžování došlo k poklesu (degradaci) tuhosti betonového válce. Po odtížení na nulovou hodnotu síly byl v rámci odtěžování betonový válec dále natahován až za mez jeho tahové únosnosti (mez pevnosti betonu v tahu), kdy se již projevovalo tahové změkčení. Poté byl betonový válec opět zatěžován (stlačován). Při zatěžování a odtěžování betonového válce v dalších cyklech docházelo postupně k poklesu (degradaci) jeho tuhosti. S každým dalším cyklem postupně docházelo také k degradaci únosnosti betonového válce neboli k degradaci pevnosti betonu, v každém dalším cyklu byla dosažená únosnost betonového válce menší, až již nebyl betonový válec schopen přenášet prakticky žádné zatížení.

***MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL (*MAT_CDPM)**

Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_CDPM) válce v závislosti na čase jsou stejné jako v případě materiálového modelu *MAT_CSCM (strana 198) a jsou tedy znázorněny na obr. 8. 2. 95. Charakteristika křivek, jež jsou znázorněny na

obr. 8. 2. 95, z hlediska jednotlivých posunů podstav modelu válce a maximálního a výsledného stlačení válce je uvedena na straně 197 (*MAT_CSCM).

Hysterézní křivka betonového (*MAT_CDPM) válce získaná z výsledků numerických simulací při cyklickém zatěžování je znázorněna na obr. 8. 2. 99. Hysterézní křivka uvedená na obr. 8. 2. 99 ovšem vychází z výpočtu, který byl zatížen chybou (docházelo k nekonvergenci výpočtu), jež způsobila nárůst výpočtového času společně s výrazným nárůstem velikosti výstupních souborů. Vlivem této skutečnosti nebyl výpočet dokončen, tudíž nebyla vyřešena odezva betonového válce na cyklické zatěžování v průběhu celého výpočtového času. Výsledná hysterézní křivka má navíc, vlivem chyby při výpočtu, rozporuplnou vypovídací hodnotu o chování betonového válce, tedy i o chování betonu, při cyklickém zatěžování, z tohoto důvodu zde není popsána.



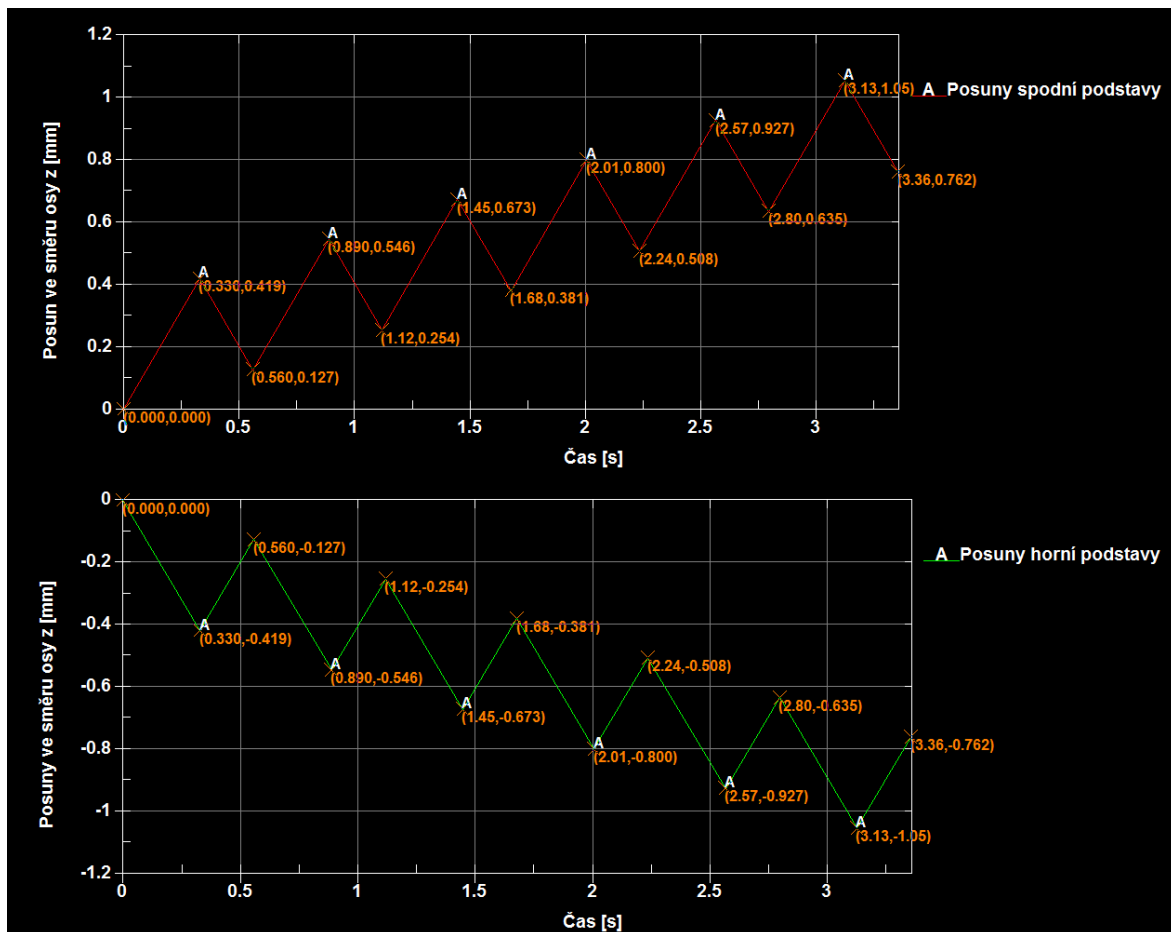
Obr. 8. 2. 99 Hysterézní křivka betonového válce (numerická simulace), cyklické zatěžování válce, *MAT_CDPM

*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3

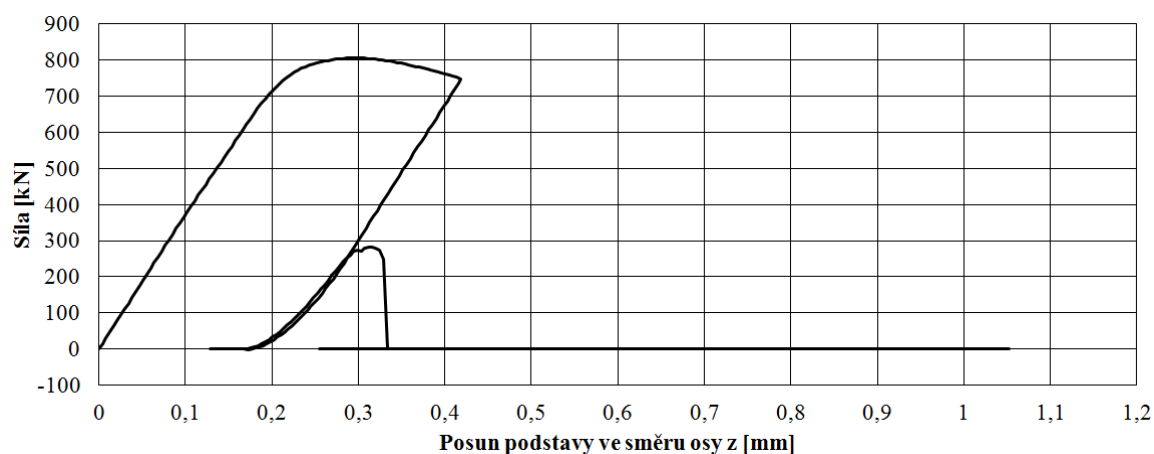
Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) válce v závislosti na čase jsou znázorněny na obr. 8. 2. 100. Na obr. 8. 2. 100 je vidět, že posuny podstav modelu válce byly při zatěžování a odtěžování v čase lineární (zatěžování a odtěžování stejnou kvazi-statickou konstantní rychlostí 2,54 mm/s) a že se obě podstavy válce v průběhu zatěžování a odtěžování posunovaly stejným způsobem proti sobě (zatěžování a odtěžování válce z obou stran). Na začátku zatěžování byl válec nejprve stlačován. Maximální stlačení válce bylo v čase 3,13 s od začátku zatěžování 2,1 mm a konečné stlačení válce bylo v čase 3,36 s 1,524 mm (koncový čas 3,36 s).

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

Hysterézní křivka betonového (*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3) válce získaná z výsledků numerických simulací při cyklickém zatěžování je znázorněna na obr. 8. 2. 101.



Obr. 8. 2. 100 Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, cyklické zatěžování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (LS-PrePost v. 4.0)



Obr. 8. 2. 101 Hysterézní křivka betonového válce (numerická simulace), cyklické zatěžování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3

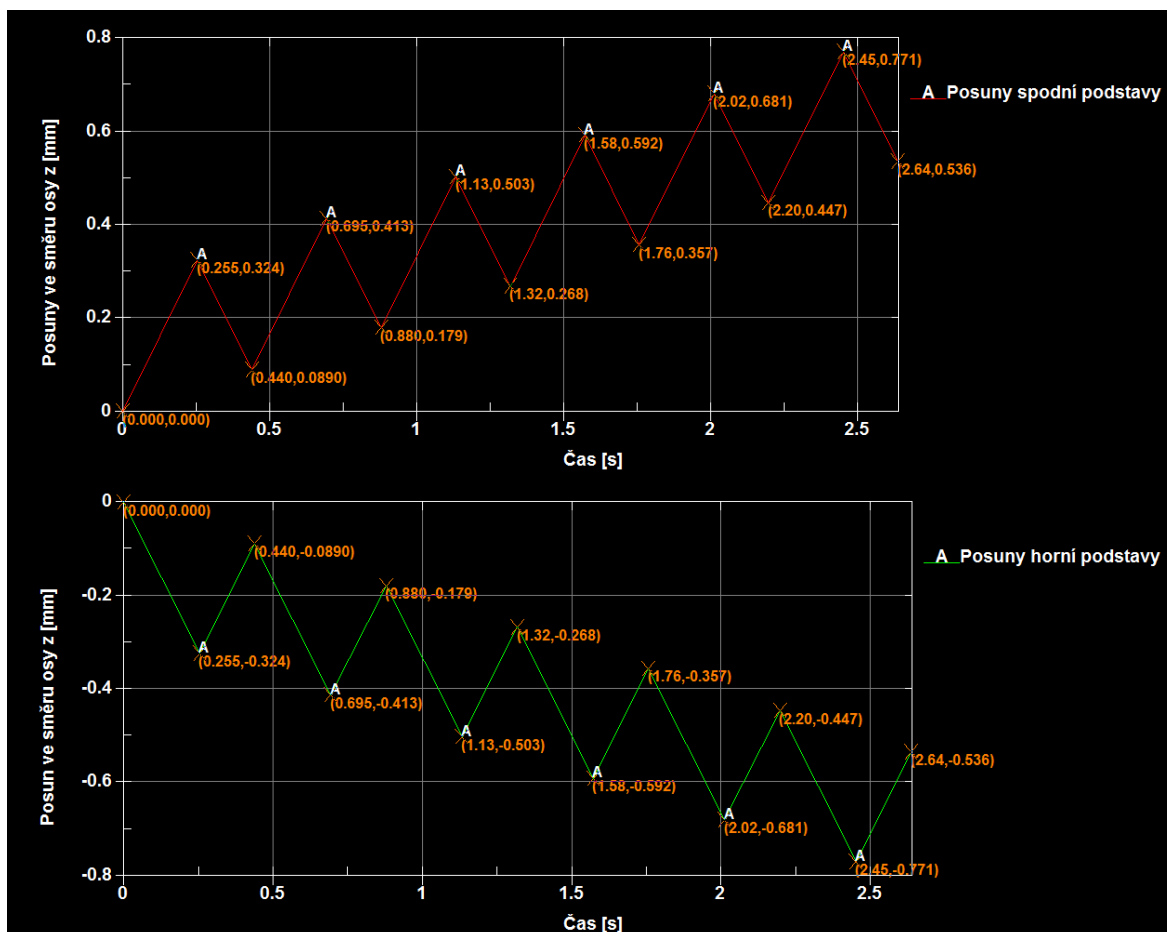
VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

Na obr. 8. 2. 101 je vidět, že betonový válec byl od počátku zatěžován nejprve stlačován, přičemž stlačování probíhalo až za mez tlakové únosnosti válce (mez pevnosti betonu v tlaku), kdy se již projevilo tlakové změkčení. Následně byl betonový válec odtěžován. Před dosažením nulové hodnoty síly při odtěžování došlo k poklesu (degradaci) tuhosti betonového válce. Po odtížení na nulovou hodnotu síly byl v rámci odtěžování betonový válec dále natahován až za mez jeho tahové únosnosti (mez pevnosti betonu v tahu), kdy síla klesla na nulovou hodnotu. Poté byl betonový válec opět zatěžován (stlačován), přičemž po dosažení určité degradované únosnosti válce v tlaku (degradované pevnosti betonu v tlaku) došlo k prudkému poklesu síly na nulovou hodnotu. Ve zbytku cyklu, ani v rámci dalších cyklů, již nebyl betonový válec schopen přenášet žádné zatížení.

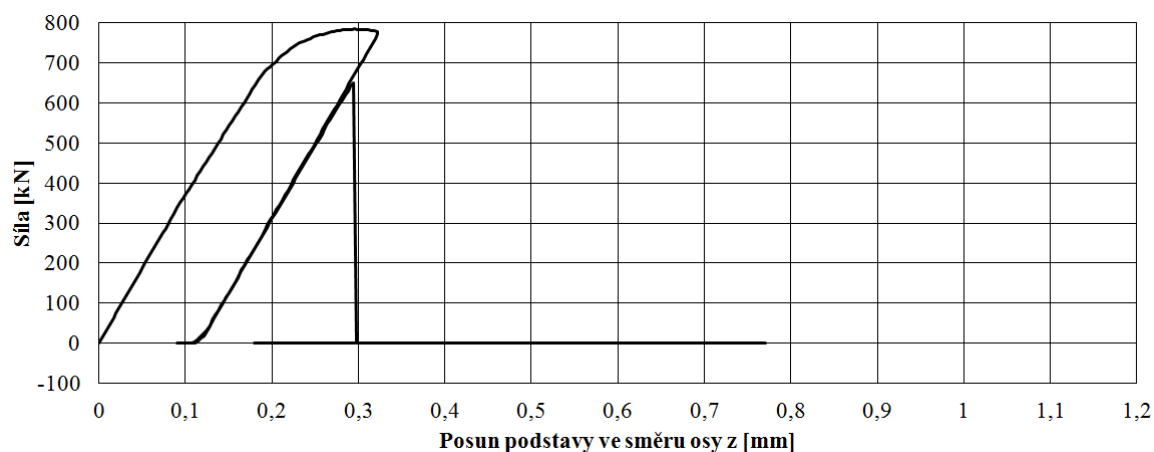
***MAT_CONCRETE_DAMAGE**

Křivky charakterizující posuny podstav betonového (*MAT_CONCRETE_DAMAGE) válce v závislosti na čase jsou znázorněny na obr. 8. 2. 102. Na obr. 8. 2. 102 je vidět, že posuny podstav modelu válce byly při zatěžování a odtěžování v čase lineární (zatěžování a odtěžování stejnou kvazi-statickou konstantní rychlostí 2,54 mm/s) a že se obě podstavy válce v průběhu zatěžování a odtěžování posunovaly stejným způsobem proti sobě (zatěžování a odtěžování válce z obou stran). Na začátku zatěžování byl válec nejprve stlačován. Maximální stlačení válce bylo v čase 2,45 s od začátku zatěžování 1,542 mm a konečné stlačení válce bylo v čase 2,64 s 1,072 mm (koncový čas 2,64 s).

Hysterézní křivka betonového (*MAT_CONCRETE_DAMAGE) válce získaná z výsledků numerických simulací při cyklickém zatěžování je znázorněna na obr. 8. 2. 103.



Obr. 8. 2. 102 Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, cyklické zatěžování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE (LS-PrePost v. 4.0)



Obr. 8. 2. 103 Hysterézní křivka betonového válce (numerická simulace), cyklické zatěžování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE

Odezva betonového válce na cyklické zatěžování vyjádřená prostřednictvím hysterézní křivky, kterou je možné vidět na obr. 8. 2. 103, je stejná jako v případě

materiálového modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (viz strana 203), z tohoto důvodu zde není popsána.

8. 2. 4 Testování závislosti výsledků na síti konečných prvků

V předchozích podkapitolách bylo vidět, že nelineární materiálové modely betonu, které byly v rámci této práce použity pro výpočty, povětšinou zahrnují tahové, případně také tlakové, změkčování. Přítomnost změkčování v nelineárních materiálových modelech betonu bývá často zdrojem problémů z hlediska tzv. lokalizace nepružných deformací (lokalizace poškození), která způsobuje závislost výsledků na síti konečných prvků. Tato závislost může být omezena přítomností tzv. omezovače lokalizace v nelineárním materiálovém modelu betonu. Vzhledem k tomu, že u nelineárních materiálových modelů betonu, které byly v rámci této práce použity pro výpočty, není známo, zda-li zahrnují některý z omezovačů lokalizace, byla v rámci této práce otestována závislost výsledků na síti konečných prvků. Testovanými nelineárními modely betonu byly:

- *MAT_CSCM
- *MAT_WINFRITH_CONCRETE
- *MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL (*MAT_CDPM)
- *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3
- *MAT_CONCRETE_DAMAGE
- *MAT_CONCRETE_EC2

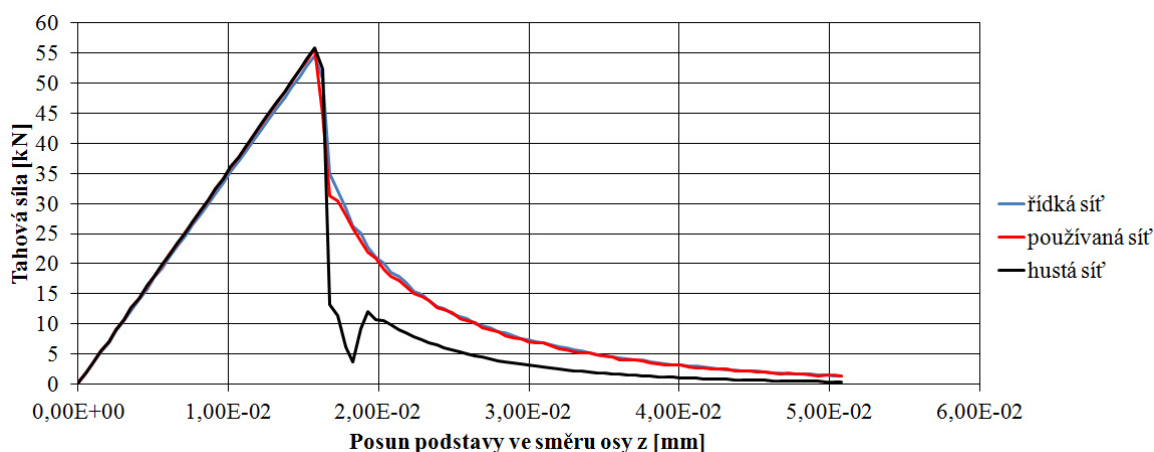
Testování závislosti výsledků na síti konečných prvků bylo provedeno v rámci numerických simulací zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válcích (kvazi-statické zatěžování) a v rámci numerické simulace ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky (kvazi-statické zatěžování) pro tři sítě konečných prvků s odlišnou hustotou:

- 1) řídká síť → válec: 768 konečných prvků; deska: 400 konečných prvků,
- 2) používaná síť → válec: 6144 konečných prvků; deska: 1444 konečných prvků,
- 3) hustá síť → válec: 19200 konečných prvků; deska: 5776 konečných prvků.

Vyhodnocení testování bylo pro každý nelineární model betonu provedeno na základě globálního zatěžovacího 1-d diagramu, viz dále. Testování závislosti výsledků na síti konečných prvků má v kontextu této práce spíše doplňující význam.

***MAT_CSCM**

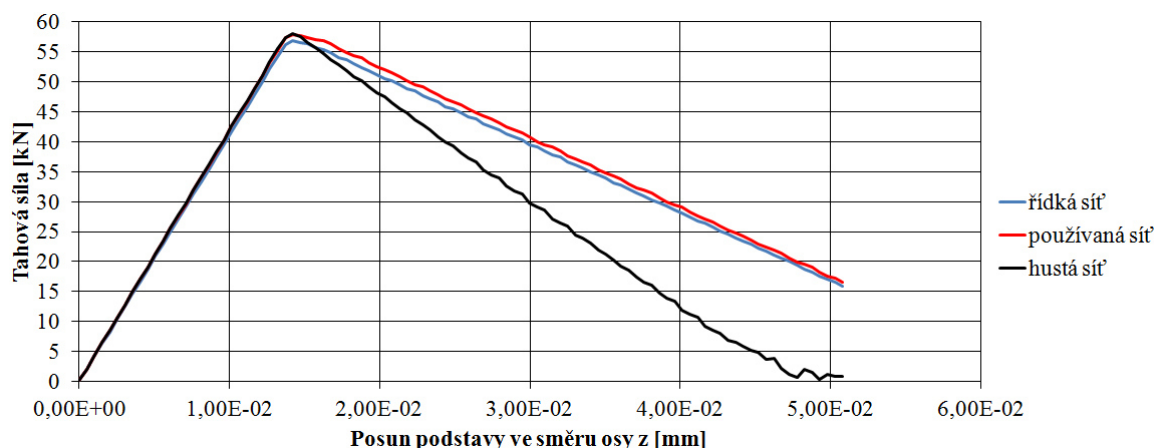
Na obr. 8. 2. 104 je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CSCM) válce v tahu, který zahrnuje celkem tři křivky pro tři sítě konečných prvků s odlišnou hustotou. Na obr. 8. 2. 104 je vidět, že výsledky pro řídkou síť a používanou síť se prakticky neliší. Odlišnost ovšem vykazuje výsledek pro hustou síť. Z výsledků pro odlišně husté sítě konečných prvků lze tedy konstatovat, že při použití materiálového modelu *MAT_CSCM jsou výsledky závislé na síti konečných prvků.



Obr. 8. 2. 104 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), testování závislosti výsledků na síti konečných prvků, *MAT_CSCM

***MAT_WINFRITH_CONCRETE**

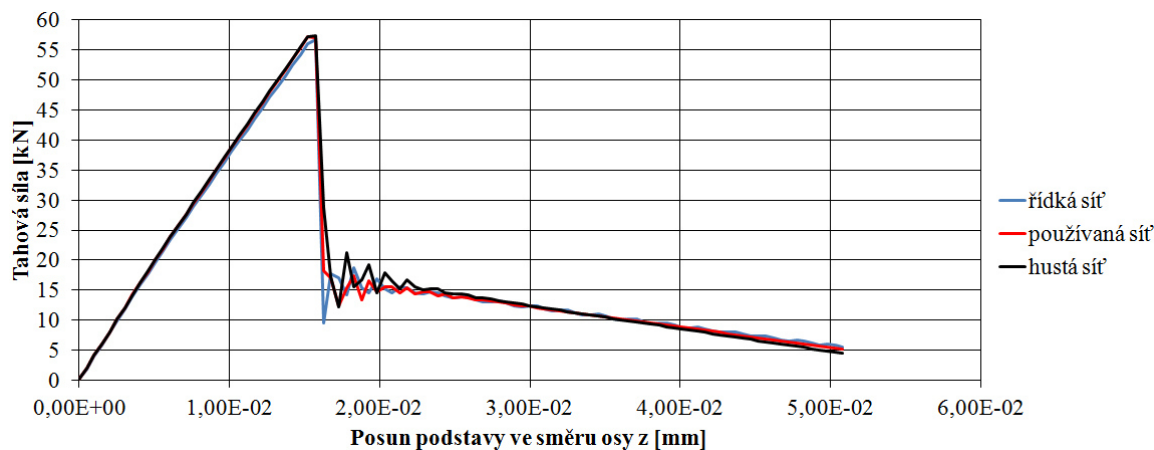
Na obr. 8. 2. 105 je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_WINFRITH_CONCRETE) válce v tahu, který zahrnuje celkem tři křivky pro tři sítě konečných prvků s odlišnou hustotou. Na obr. 8. 2. 105 je vidět, že výsledky pro řídkou síť a používanou síť jsou prakticky totožné. Výraznou odlišnost ovšem vykazuje výsledek pro hustou síť. Z výsledků pro odlišně husté sítě konečných prvků lze tedy konstatovat, že při použití materiálového modelu *MAT_WINFRITH_CONCRETE jsou výsledky závislé na síti konečných prvků.



Obr. 8. 2. 105 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), testování závislosti výsledků na síti konečných prvků, *MAT_WINFRITH_CONCRETE

***MAT_CONCRETE_DAMAGE_PLASTIC_MODEL (*MAT_CDPM)**

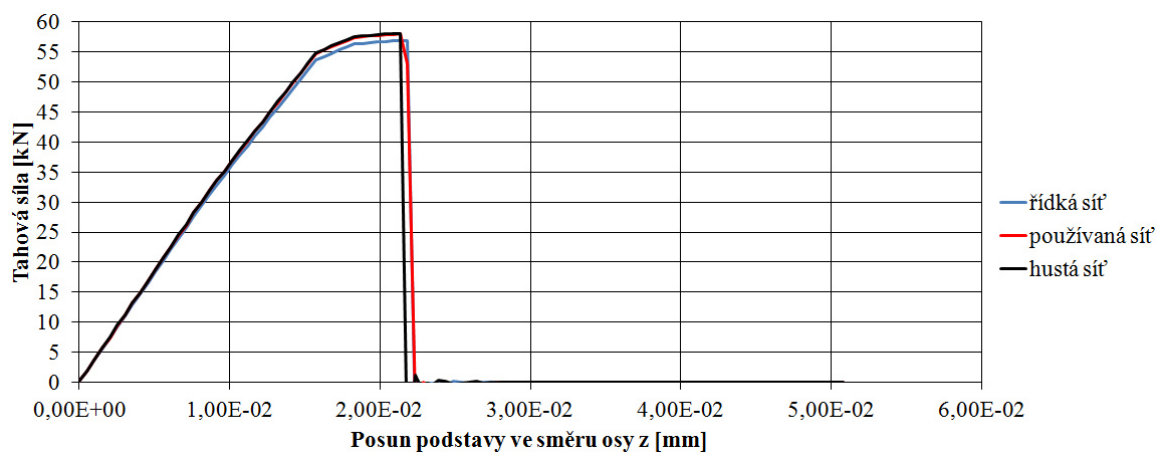
Na obr. 8. 2. 106 je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CDPM) válce v tahu, který zahrnuje celkem tři křivky pro tři sítě konečných prvků s odlišnou hustotou. Na obr. 8. 2. 106 je vidět, že se výsledky pro všechny tři testované sítě konečných prvků prakticky neliší. Z výsledků pro odlišně husté sítě konečných prvků lze tedy konstatovat, že při použití materiálového modelu *MAT_CDPM jsou výsledky nezávislé na síti konečných prvků.



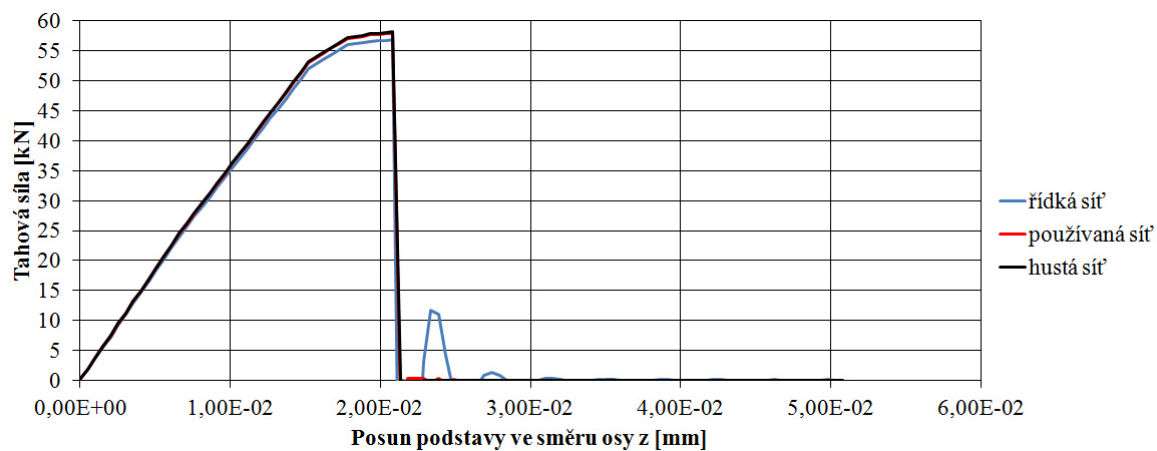
Obr. 8. 2. 106 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), testování závislosti výsledků na síti konečných prvků, *MAT_CDPM

***MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, resp. *MAT_CONCRETE_DAMAGE**

Na obr. 8. 2. 107, resp. 8. 2. 108, je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonového (*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, resp. *MAT_CONCRETE_DAMAGE) válce v tahu, který zahrnuje celkem tři křivky pro tři sítě konečných prvků s odlišnou hustotou. Na obr. 8. 2. 107, resp. 8. 2. 108, je vidět, že výsledky pro všechny tři testované sítě konečných prvků jsou prakticky totožné. Z výsledků pro odlišně husté sítě konečných prvků lze tedy konstatovat, že při použití materiálového modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3, resp. *MAT_CONCRETE_DAMAGE, jsou výsledky nezávislé na síti konečných prvků.



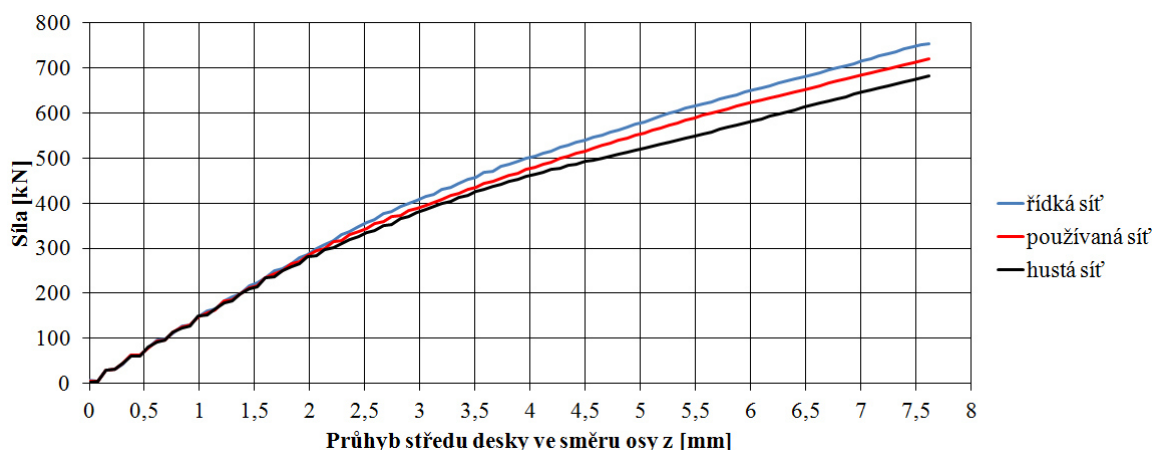
Obr. 8. 2. 107 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), testování závislosti výsledků na síti konečných prvků, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3



Obr. 8. 2. 108 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), testování závislosti výsledků na síti konečných prvků, *MAT_CONCRETE_DAMAGE

***MAT_CONCRETE_EC2**

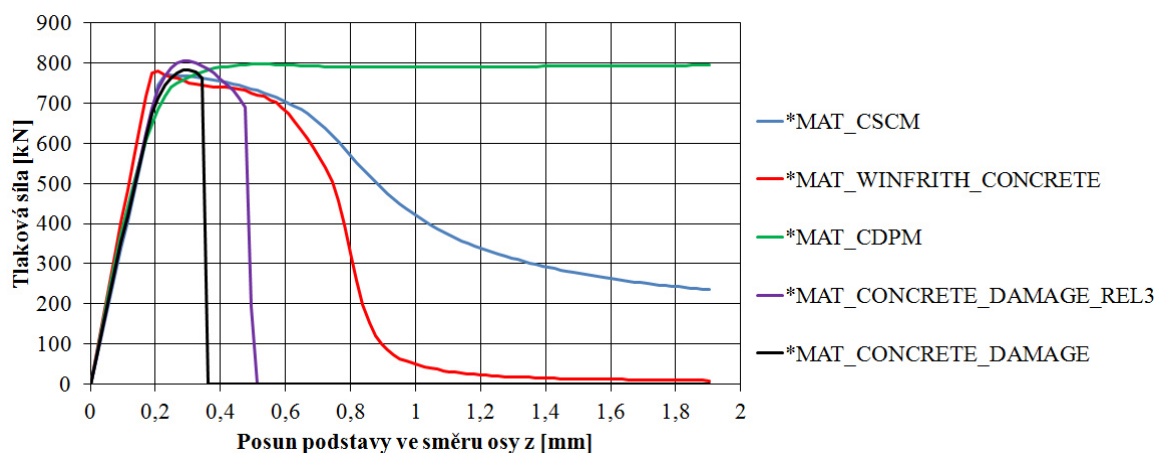
Na obr. 8. 2. 109 je znázorněn zatěžovací l-d diagram betonové (*MAT_CONCRETE_EC2) desky při ohybu, který zahrnuje celkem tři křivky pro tři sítě konečných prvků s odlišnou hustotou. Na obr. 8. 2. 109 je vidět, že se výsledky pro všechny tři testované sítě konečných prvků liší. Z výsledků pro odlišně husté sítě konečných prvků lze tedy konstatovat, že při použití materiálového modelu *MAT_CONCRETE_EC2 jsou výsledky závislé na síti konečných prvků.



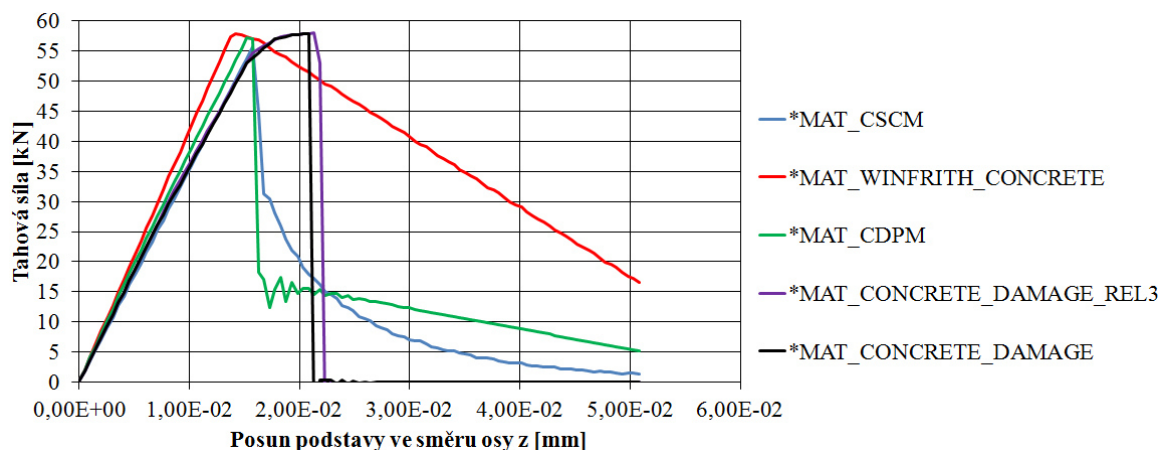
Obr. 8. 2. 109 Zatěžovací l-d diagram betonové desky při ohybu (numerická simulace), testování závislosti výsledků na síti konečných prvků, *MAT_CONCRETE_EC2

8. 2. 5 Srovnání výsledků

Rozdílnosti ve výsledcích od jednotlivých nelineárních materiálových modelů betonu v rámci stejných úloh jsou názorně ukázány na obr 8. 2. 110 a 8. 2. 111.



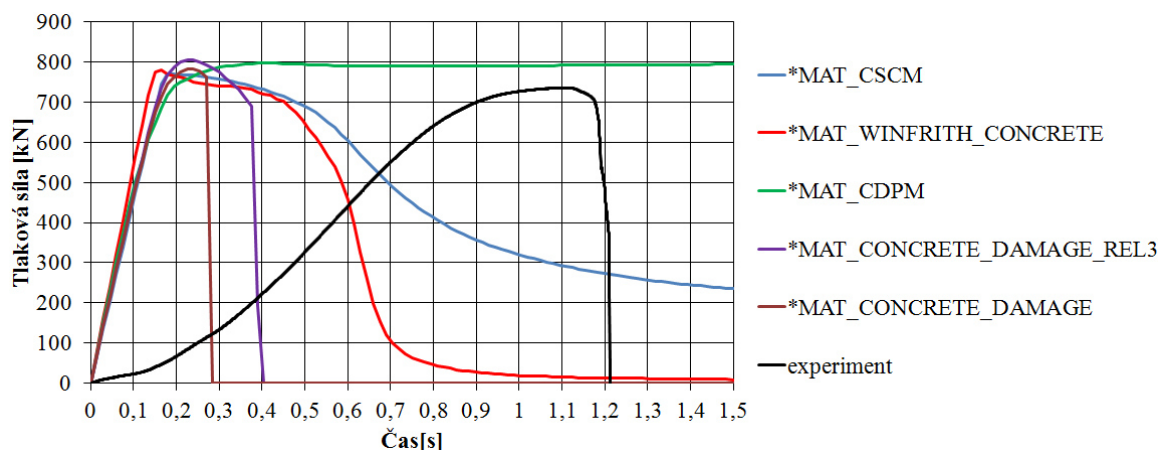
Obr. 8. 2. 110 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), srovnání výsledků od jednotlivých nelineárních materiálových modelů betonu



Obr. 8. 2. 111 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), srovnání výsledků od jednotlivých nelineárních materiálových modelů betonu

8.3 Srovnání výsledků získaných z testovacích výpočtů s výsledky získanými z experimentu

Pro verifikaci nelineárních materiálových modelů betonu implementovaných ve výpočetním systému LS-DYNA byl v rámci této práce proveden experiment. Na základě provedeného experimentu byl získán zatěžovací l-t diagram betonového válce v tlaku, viz podkapitola 8. 1. Provedenému experimentu, co se týče okrajových podmínek a zatěžování, odpovídaly numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek (kvazi-statické zatěžování), které byly provedeny v rámci této práce s použitím různých typů nelineárních materiálových modelů betonu, viz podkapitola 8. 2. 1. Na základě těchto numerických simulací byly získány zatěžovací l-d, ale také l-t, diagramy betonového válce v tlaku, které umožňovaly srovnání s experimentem. Srovnání výsledků získaných z numerických simulací s výsledky získanými z experimentu je ukázáno na obr. 8. 3. 1.



Obr. 8. 3. 1 Zatěžovací I-t diagram betonového válce v tlaku, srovnání numerických simulací s experimentem

Na obr. 8. 3. 1 je vidět, že výsledky získané z experimentu vykazují dobrou shodu s výsledky získanými z numerických simulací z hlediska chování betonového válce v tlaku, tedy i z hlediska chování betonu v tlaku, a z hlediska maximální dosažené tlakové síly neboli maximální tlakové únosnosti betonového válce (pevnosti betonu v tlaku). Co se ovšem týče času dosažení maximální tlakové síly, jsou mezi výsledky získanými z experimentu a výsledky získanými z numerických simulací výrazné rozdíly. Tyto rozdíly mohly být zapříčiněny nepřesnostmi, ke kterým mohlo dojít při přípravě a provádění experimentu. Zmíněné nepřesnosti mohly být následující:

- V geometrii betonového zkušebního válce mohly při výrobě vzniknout odchylky.
- Okrajové podmínky aplikované při experimentu nemusely být v konečném důsledku zcela v souladu s okrajovými podmínkami aplikovanými v rámci numerických simulací (okrajové podmínky aplikované v rámci numerických simulací byly idealizované).
- Zatěžování při experimentu nemuselo být zcela v souladu se zatěžováním v rámci numerických simulací.

Výsledky získané z numerických simulací byly v rámci této práce také průběžně srovnávány s výsledky uvedenými v různých citovaných zdrojích, kterými byly především různé zahraniční publikace, přičemž byly výsledky získané z numerických simulací mnohdy velmi podobné výsledkům uvedeným v těchto citovaných zdrojích.

Kapitola 9

Závěr

Na začátku této diplomové práce byly stanoveny cíle, kterých bylo v průběhu tvorby této práce postupně dosahováno. Jedním z těchto cílů byl popis parametrů nelineárních materiálových modelů betonu implementovaných ve výpočetním systému LS-DYNA, jenž byl zároveň jedním z hlavních cílů. Popis parametrů nelineárních materiálových modelů betonu byl v rámci této práce proveden, přičemž byly popsány parametry celkem devíti různých typů nelineárních materiálových modelů betonu, které nabízí výpočetní systém LS-DYNA. Z těchto devíti typů nelineárních materiálových modelů betonu bylo v rámci této práce použito celkem sedm. V rámci popisu parametrů byly uváděny také číselné hodnoty dosazované do popisovaných parametrů. Tyto hodnoty byly dosazovány do parametrů nelineárních materiálových modelů betonu za účelem dosažení přijatelné funkce nelineárních modelů betonu a za účelem provedení nelineárních testovacích výpočtů.

Aby mohly být provedeny nelineární testovací výpočty za účelem otestování nelineárních materiálových modelů betonu, bylo nutné vytvořit výpočtové modely úloh, které byly v rámci této práce vybrány pro řešení. Úlohy vybrané pro řešení sestávaly ze zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez a s ocelovými podložkami, dále ze zkoušky mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válci, zkoušky testující odezvu betonového zkušebního válce na cyklické namáhání a ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky. Vytvoření výpočtových modelů řešených úloh bylo tedy dalším stanoveným cílem v rámci této práce. Výpočtové modely řešených úloh byly vytvořeny z části v programu ANSYS/LS-DYNA, který byl použit pro vytvoření geometrických modelů prvků, které byly zahrnuty v řešených úlohách, a pro pokrytí těchto geometrických modelů sítí konečných prvků, a z části v programu LS-PrePost, který byl použit nejen pro preprocessing v podobě nastavení materiálových modelů, okrajových podmínek a zatížení, ale také pro postprocessing neboli pro zobrazování výsledků.

Po vytvoření výpočtových modelů bylo dalším stanoveným cílem v rámci této práce provedení nelineárních testovacích výpočtů neboli provedení numerických simulací

řešených úloh. Nelineární testovací výpočty byly provedeny v explicitním řešiči LS-DYNA.

Dalším a zároveň finálním stanoveným cílem v rámci této práce bylo vyhodnocení výsledků získaných z provedených nelineárních testovacích výpočtů neboli vyhodnocení výsledků získaných z provedených numerických simulací. Vyhodnocení výsledků bylo navíc jedním z hlavních cílů této práce a sestávalo ze tří významných částí.

První část byla věnována experimentu, jenž byl v rámci této práce proveden za účelem verifikace nelineárních materiálových modelů betonu implementovaných ve výpočetním systému LS-DYNA a v jehož rámci byla prováděna zkouška mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci bez ocelových podložek. Experiment byl vyhodnocen na základě zatěžovacího l-t diagramu betonového válce v tlaku, jenž byl získán z provedených zkoušek. Zatěžovací l-t diagram betonového válce v tlaku zahrnoval poznatky o chování betonového válce v tlaku a vzhledem k podstatě zkoušky, ze které diagram vycházel, také o chování betonu, ze kterého byl válec vyroben, v tlaku.

Druhá část byla věnována popisu a vyhodnocení výsledků získaných z provedených numerických simulací řešených úloh při různých způsobech zatěžování, přičemž v rámci této práce byly uvažovány celkem tři způsoby zatěžování a to kvazi-statické zatěžování, zatěžování vyššími rychlostmi a cyklické zatěžování. Popis a vyhodnocení výsledků bylo provedeno na základě pracovních a zatěžovacích l-d diagramů, které zahrnovaly poznatky o chování betonového (různé modely betonu) válce, případně také o chování betonové desky, tedy i o chování betonu, v tlaku a tahu, v případě aplikace kvazi-statického zatěžování a zatěžování vyššími rychlostmi a na základě hysterézních křivek, které zahrnovaly poznatky o chování betonového válce při zatěžování a odtěžování, v případě aplikace cyklického zatěžování na modely řešených úloh. Výsledky byly vyhodnocovány v rámci aplikace jednotlivých nelineárních materiálových modelů betonu. Ve druhé části byla dále také otestována závislost výsledků na síti konečných prvků pro jednotlivé nelineární modely betonu. Na základě tohoto testování bylo ukázáno, u kterých nelineárních materiálových modelů betonu jsou výsledky závislé a u kterých nezávislé na síti konečných prvků. Na závěr druhé části byly srovnány jednotlivé výsledky od jednotlivých nelineárních materiálových modelů betonu v rámci stejných úloh, čímž byly ukázány rozdílnosti ve výsledcích od jednotlivých nelineárních modelů betonu.

Třetí a poslední část byla věnována srovnání výsledků získaných z numerických simulací s výsledky získanými z experimentu. Výsledky byly srovnány v rámci zatěžovacího l-t diagramu betonového válce v tlaku. Na základě tohoto srovnání byla

VERIFIKACE NELINEÁRNÍCH MATERIÁLOVÝCH MODELŮ BETONU

ukázána dobrá shoda výsledků získaných z numerických simulací s výsledky získanými z experimentu z hlediska chování betonového válce v tlaku, tedy i z hlediska chování betonu v tlaku, a z hlediska maximální dosažené tlakové síly neboli maximální tlakové únosnosti betonového válce (pevnosti betonu v tlaku). Nicméně byly ukázány také rozdílnosti mezi výsledky získanými z numerických simulací a výsledky získanými z experimentu, jež mohly být zapříčiněny nepřesnostmi, ke kterým mohlo dojít při přípravě a provádění experimentu. Srovnáním výsledků získaných z numerických simulací s výsledky získanými z experimentu, ale také s výsledky uvedenými v různých citovaných zahraničních publikacích, byly nelineární materiálové modely betonu implementované ve výpočetním systému LS-DYNA verifikovány, čímž byl dosažen poslední cíl, který byl v rámci této práce stanoven.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Evaluation of LS-DYNA Concrete Material Model 159. May 2007.
- [2] Livermore Software Technology Corporation [online]. Copyright © 2011 LSTC. LS-DYNA, LS-OPT, and LS-PrePost are registered trademarks of LSTC [cit. 2014-12-7]. Dostupné z: <http://www.lstc.com>
- [3] BOŘKOVEC, Jan a Miroslav SUCHÁNEK. *Výpočtové modely tvárného porušování kovů v simulaci technologických procesů*. Závěrečná zpráva projektu FRVŠ 2842/2006/G1. Brno, 2006. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.
- [4] NEDĚLKA, Pavel. *Deformační a napjatostní analýza nárazníkové části automobilu při rázovém zatěžování*. Diplomová práce. Brno, 2011. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.
- [5] LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL. VOLUME II. Material Models. 11/30/14 (r:5876). LS-DYNA Dev.
- [6] Users Manual for LS-DYNA Concrete Material Model 159. May 2007.
- [7] SCHWER, Len. *An Introduction to the Winfrith Concrete Model*. April 2010. Schwer Engineering & Consulting Services.
- [8] BROADHOUSE, B. J. *The Winfrith Concrete Model in LS-DYNA3D*. February 1995. AEA Technology.
- [9] GRASSL, P., U. NYSTRÖM, R. REMPLING and K. GYLLTOFT. *A damage-plasticity model for the dynamic failure of concrete*. 8th International Conference on Structural Dynamics, Leuven. Belgium, 2011. University of Glasgow, Glasgow G128LT, Scotland, UK, School of Engineering. Chalmers University of Technology, S-41296 Göteborg, Sweden, Department of Civil and Environmental Engineering.

- [10] GRASSL, Peter and Milan JIRÁSEK. *Damage-plastic model for concrete failure*. May 2006. University of Glasgow, Glasgow G12 8LT, United Kingdom, Department of Civil Engineering. Czech Technical University in Prague, Czech Republic, Faculty of Civil Engineering, Department of Mechanics. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [11] MALVAR, Javier, John E. CRAWFORD, James W. WESEVICH and Don SIMONS. *A PLASTICITY CONCRETE MATERIAL MODEL FOR DYNA3D*. January 1997. Karagozian & Case, Glendale, CA 91206, U.S.A. Logicon RDA, Los Angeles, CA 90009, U.S.A.
- [12] HOLMQUIST, T. J., G. R. JOHNSON and W. H. COOK. *A COMPUTATIONAL CONSTITUTIVE MODEL FOR CONCRETE SUBJECTED TO LARGE STRAINS, HIGH STRAIN RATES, AND HIGH PRESSURES*. Quebec, Canada, September 1993. Alliant Techsystems Inc., Hopkins, Minnesota USA. Wright Laboratory, Armament Directorate, Eglin Air Force Base, Florida USA.
- [13] ANSYS 15.0. Help.
- [14] VAVERKA, Michal a Martin VRBKA. *Výpočtové nadstavby pro CAD*. 7. přednáška. Brno, 2007. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.

Seznam použitých symbolů

| | |
|------------------------------|--|
| σ | normálové napětí |
| F | síla |
| A | plocha |
| R_c | pevnost betonu v tlaku |
| $F_{c,max}$ | maximální hodnota tlakové síly ve zkušebním lisu |
| A_c | plocha podstavy zkušebního tělesa |
| R_t | pevnost betonu v prostém tahu |
| $F_{t,max}$ | maximální hodnota tahové síly v trhacím stroji |
| $f(J_1, J'_2, J'_3, \kappa)$ | funkce podmínky plasticity |
| $F_f(J_1)$ | funkce podmínky smykového porušení |
| $F_c(J_1, \kappa)$ | funkce podmínky zpevnění |
| J_1 | první invariant tenzoru napětí |
| J'_2 | druhý invariant deviatorické části tenzoru napětí |
| J'_3 | třetí invariant deviatorické části tenzoru napětí |
| \mathfrak{R} | funkce měřítka dle Rubina |
| α | parametr získaný z experimentálních testů trojosé komprese na betonových válcích |
| β | parametr získaný z experimentálních testů trojosé komprese na betonových válcích |
| λ | parametr získaný z experimentálních testů trojosé komprese na betonových válcích |
| θ | parametr získaný z experimentálních testů trojosé komprese na betonových válcích |
| κ | parametr zpevnění |
| R | koeficient eliptičnosti funkce podmínky zpevnění |
| d | míra porušení |
| d_k | míra křehkého porušení |
| d_t | míra tvárného porušení |
| X_0 | průsečík části zpevnění podmínky plasticity s vodorovnou osou, která udává tlak |
| ε_v^p | plastická objemová deformace |

| | |
|---------------------------------------|--|
| f'_c | pevnost betonu v jednoosém tlaku |
| f_{cm} | střední hodnota pevnosti betonu v tlaku |
| $F(I_1, J_2, \cos 3\theta)$ | funkce Ottosenovy podmínky plasticity |
| a | konstanta závislá na poměru pevnosti betonu v jednoosém tlaku k pevnosti betonu v jednoosém tahu |
| b | konstanta závislá na poměru pevnosti betonu v jednoosém tlaku k pevnosti betonu v jednoosém tahu |
| λ | funkce závislá na $\cos 3\theta$ |
| $\cos 3\theta$ | parametr závislý na druhém a třetím invariantu deviatorické části tenzoru napětí |
| I_1 | první invariant tenzoru napětí |
| I_2 | druhý invariant tenzoru napětí |
| J_2 | druhý invariant deviatorické části tenzoru napětí |
| E_s | počáteční tangentový modul pružnosti betonu |
| E_{cm} | střední hodnota modulu pružnosti betonu |
| ν | součinitel příčné kontrakce betonu |
| f'_t | pevnost betonu v jednoosém tahu |
| f_{ctm} | střední hodnota pevnosti betonu v tahu |
| G_f | lomová energie betonu |
| w_c | šířka trhliny, při které tahové napětí v betonu nabude nulové hodnoty |
| V | aktuální objem |
| V_0 | počáteční objem |
| p_1 | tlak |
| K | objemový modul pružnosti |
| $f_p(\sigma_v, \rho, \theta, \kappa)$ | funkce podmínky plasticity |
| σ_v | objemové efektivní napětí |
| θ | úhel |
| ρ | norma deviatorického efektivního napětí |
| $q_1(\kappa)$ | proměnná, která je závislá na parametru zpevnění |
| $q_2(\kappa)$ | proměnná, která je závislá na parametru zpevnění |
| m_0 | parametr tření |
| e | parametr excentricity |
| f_c | pevnost betonu v jednoosém tlaku |

| | |
|------------|--|
| f_t | pevnost betonu v jednoosém tahu |
| f_b | pevnost betonu ve dvojosém tlaku |
| FC_0 | tlakové napětí, při jehož překročení začne docházet k rozvoji plastické deformace |
| w_f | šířka trhliny, při které tahové napětí v betonu nabude nulové hodnoty, pro lineární formulaci porušení |
| w_{f1} | šířka trhliny pro bilineární formulaci porušení |
| σ_1 | tahové napětí pro bilineární formulaci porušení |
| σ | efektivní napětí |
| σ_c | negativní část efektivního napětí |
| σ_t | pozitivní část efektivního napětí |
| w_t | parametr porušení |
| w_c | parametr porušení |
| a_0 | parametr popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi pevnosti |
| a_1 | parametr popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi pevnosti |
| a_2 | parametr popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi pevnosti |
| b_1 | parametr měřítka pro tlakové porušování |
| ω | frakční roztažnost |
| a_{1f} | koeficient popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi reziduální pevnosti |
| s | parametr tažnosti |
| N^α | parametr modelu |
| λ | "modifikovaná" efektivní plastická deformace |
| b_3 | koeficient měřítka pro porušování při tříosém tahu |
| a_{0y} | koeficient popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi vzniku plastických deformací |
| a_{1y} | koeficient popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi vzniku plastických deformací |
| η | faktor měřítka |
| b_2 | mocnitel měřítka pro tahové porušování |
| a_{2f} | koeficient popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi reziduální pevnosti |
| a_{2y} | koeficient popisující funkci podmínky smykového porušení na mezi vzniku plastických deformací |

| | |
|--------------------|---|
| γ | součinitel |
| p | tlak |
| ϵ_v | objemová deformace |
| $C(\epsilon_v)$ | funkce závislá na objemové deformaci |
| $T(\epsilon_v)$ | funkce závislá na objemové deformaci |
| σ^* | normalizované ekvivalentní napětí |
| σ | aktuální ekvivalentní napětí |
| f_c | kvazi-statická pevnost betonu v jednoosém tlaku |
| A | normalizovaná kohezivní pevnost |
| B | normalizovaný koeficient zpevnění |
| P^* | normalizovaný tlak |
| P | aktuální tlak |
| N | mocnitel zpevnění |
| C | koeficient rychlosti deformace |
| $\dot{\epsilon}^*$ | bezrozměrná rychlost deformace |
| $\dot{\epsilon}$ | aktuální rychlost deformace |
| $\dot{\epsilon}_0$ | referenční rychlost deformace |
| D | parametr porušení |
| $\Delta\epsilon_p$ | ekvivalentní plastická deformace |
| $\Delta\mu_p$ | plastická objemová deformace |
| $D1$ | konstanta porušení 1 |
| $D2$ | konstanta porušení 2 |
| T^* | normalizované maximální hydrostatické tahové napětí |
| T | maximální hydrostatické tahové napětí |
| $K1$ | konstanta 1 (objemový modul 1) |
| $K2$ | konstanta 2 (objemový modul 2) |
| $K3$ | konstanta 3 (objemový modul 3) |
| μ' | modifikovaná objemová deformace |
| μ | standardní objemová deformace |
| μ_{lock} | objemová deformace (locking) |
| ρ | aktuální hustota |
| ρ_0 | počáteční hustota |
| ρ_{grain} | hustota zrn kameniva |

| | |
|----------------------|--|
| DS | pevnost v tlaku nebo v tahu v závislosti na normalizovaném tlaku |
| SFMAX | normalizovaná maximální pevnost |
| P_{crush} | tlak, při jehož překročení začne docházet k drcení betonu |
| μ_{crush} | objemová deformace, při jejímž překročení začne docházet k drcení betonu |
| P_{lock} | tlak (locking) |
| σ | normálové napětí v tlaku |
| ϵ_{c1} | poměrné přetvoření, při kterém je dosažena pevnost betonu v tlaku |
| FC_{max} | pevnost betonu v tlaku |
| E | počáteční modul pružnosti |
| ϵ_{cu} | mezní tlaková poměrná deformace |
| ϵ_{csp} | poměrné přetvoření při víceosé napjatosti v tlaku |
| FC | pevnost betonu v jednoosém tlaku |
| FCC6 | pevnost betonu ve víceosém tlaku |
| τ_{max} | maximální smykové napětí, které může být přenášeno přes trhlinu |
| ϵ_{cro} | poměrná deformace při otevření trhliny |
| σ_{comp} | tlakové normálové napětí, které je přenášeno přes trhlinu |
| ϕ | deviatorická, perfektně plastická, mezní funkce |
| F(p) | funkce udávající závislost efektivního napětí na tlaku |
| ϵ_1 | plastická poměrná deformace, při které dochází k porušení |
| ϵ_2 | plastická poměrná deformace, při které je dosažena reziduální pevnost |
| b | multiplikátor pevnosti určující reziduální pevnost betonu/zeminy |
| P | koeficient rychlosti deformace |
| ϵ' | rychlost deformace |
| M | matice hmotnosti |
| K | matice tuhosti |
| F | vektor zatížení |
| U | vektor neznámých uzlových posunů |
| t | čas |
| Δt | časový krok |
| U | posun |
| \dot{U} | rychlost |
| \ddot{U} | zrychlení |
| U₀ | vektor počátečních uzlových posunů |

| | |
|--------------------------|---|
| Δt_{krit} | kritická velikost časového kroku |
| L | charakteristický rozměr konečného prvku |
| c | rychlost šíření napěťové vlny v daném materiálu |
| d | průměr podstavy betonového zkušebního válce |

Seznam obrázků a tabulek

| | | |
|--------------|--|----|
| Obr. 3. 1. 1 | Geometrie zkušebního betonového válce → rozměry v [mm] | 7 |
| Obr. 3. 1. 2 | Idealizace okrajových podmínek v případě zkoušky mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci bez ocelových podložek | 8 |
| Obr. 3. 1. 3 | Průběh zatěžování zkušebního válce s možným tvarem porušení [1] při zkoušce mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci bez ocelových podložek | 8 |
| Obr. 3. 1. 4 | Geometrie zkušebního betonového válce a ocelových podložek → rozměry v [mm] | 11 |
| Obr. 3. 1. 5 | Tři varianty idealizace okrajových podmínek v případě zkoušky mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci s ocelovými podložkami | 11 |
| Obr. 3. 1. 6 | Průběh zatěžování zkušebního válce s možnými tvary porušení [1] při zkoušce mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válci s ocelovými podložkami | 12 |
| Obr. 3. 1. 7 | Idealizace okrajových podmínek v případě zkoušky mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válci | 14 |
| Obr. 3. 1. 8 | Průběh zatěžování zkušebního válce s možným tvarem porušení [1] při zkoušce mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válci | 14 |
| Obr. 3. 2. 1 | Geometrie, okrajové podmínky a průběh zatěžování betonové desky → rozměry v [mm] | 16 |
| Obr. 4. 2. 1 | Uživatelské rozhraní programu LS-PrePost v. 4.0 | 20 |
| Obr. 4. 2. 2 | Příklad vzhledu funkční karty, jak jej uvádí manuál [5] | 21 |
| Obr. 4. 2. 3 | Příklad vzhledu funkční karty v grafickém prostředí programu LS-PrePost v. 4.0 | 21 |
| Obr. 4. 2. 4 | Příklad vzhledu funkční karty v textovém editoru PSPad | 21 |
| Obr. 5. 2. 1 | Podmínka plasticity znázorněná v meridiální rovině [5], *MAT_CSCM .. | 25 |
| Obr. 5. 2. 2 | Podmínka plasticity znázorněná v prostoru [6], *MAT_CSCM | 25 |
| Obr. 5. 2. 3 | Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_CSCM_CONCRETE [5] | 26 |
| Obr. 5. 2. 4 | *MAT_CSCM_CONCRETE → parametry materiálového modelu při kvazi-statickém a cyklickém zatěžování (soubor *.k, PSPad) | 30 |

| | | |
|---------------|---|----|
| Obr. 5. 2. 5 | *MAT_CSCM_CONCRETE → parametry materiálového modelu při vyšších rychlostech zatěžování (soubor *.k, PSPad) | 30 |
| Obr. 5. 2. 6 | *MAT_CSCM_CONCRETE → parametry materiálového modelu při výpočtech s efektem porušení betonu (soubor *.k, PSPad) | 31 |
| Obr. 5. 2. 7 | *MAT_CSCM_CONCRETE → parametry materiálového modelu při cyklickém zatěžování (soubor *.k, PSPad) | 31 |
| Obr. 5. 2. 8 | Funkční karty 1 a 2 pro klíčové slovo *MAT_WINFRITH_CONCRETE [5] | 33 |
| Obr. 5. 2. 9 | Funkční karty 3 a 4 pro klíčové slovo *MAT_WINFRITH_CONCRETE [5] | 34 |
| Obr. 5. 2. 10 | Závislost tahového napětí v betonu na otevření trhliny | 35 |
| Obr. 5. 2. 11 | Výchozí hodnoty objemové deformace (Volumetric Strain) a tlaku (Pressure) implementované v materiálovém modelu *MAT_WINFRITH_CONCRETE [5] | 38 |
| Obr. 5. 2. 12 | Výchozí křivka pro beton implementovaná v materiálovém modelu *MAT_WINFRITH_CONCRETE, která slouží pro určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu [8] | 38 |
| Tab. 5. 2. 1 | Výchozí hodnoty objemové deformace a tlaku pro beton C 35/45, *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 38 |
| Obr. 5. 2. 13 | Výchozí křivka pro beton C 35/45, která slouží pro určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu, *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 39 |
| Obr. 5. 2. 14 | *MAT_WINFRITH_CONCRETE → parametry materiálového modelu při kvazi-statickém a cyklickém zatěžování (soubor *.k, PSPad) | 39 |
| Obr. 5. 2. 15 | *MAT_WINFRITH_CONCRETE → parametry materiálového modelu při vyšších rychlostech zatěžování (soubor *.k, PSPad) | 40 |
| Obr. 5. 2. 16 | Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_CDPM [5] | 43 |
| Obr. 5. 2. 17 | Automaticky stanovený parametr excentricity (soubor messag) | 44 |
| Obr. 5. 2. 18 | Závislost tahového napětí v betonu na otevření trhliny (lineární formulace porušení) [5] | 47 |
| Obr. 5. 2. 19 | Závislost tahového napětí v betonu na otevření trhliny (bilineární formulace porušení) [9] | 47 |
| Obr. 5. 2. 20 | Automaticky stanovená šířka trhliny w_{fl} (soubor messag) | 48 |
| Obr. 5. 2. 21 | Automaticky stanovené tahové napětí σ_1 (soubor messag) | 48 |

| | | |
|---------------|---|----|
| Obr. 5. 2. 22 | *MAT_CDPM → parametry materiálového modelu při kvazi-statickém (tlakovém) a cyklickém zatěžování (soubor *.k, PSPad) | 49 |
| Obr. 5. 2. 23 | *MAT_CDPM → parametry materiálového modelu při vyšších rychlostech (tlakového) zatěžování (soubor *.k, PSPad) | 50 |
| Obr. 5. 2. 24 | *MAT_CDPM → parametry materiálového modelu při kvazi-statickém (tahovém) zatěžování (soubor *.k, PSPad) | 50 |
| Obr. 5. 2. 25 | *MAT_CDPM → parametry materiálového modelu při vyšších rychlostech (tahového) zatěžování (soubor *.k, PSPad) | 50 |
| Obr. 5. 2. 26 | Funkční karty 1, 2, 3, 4 a 5 pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 [5] | 53 |
| Obr. 5. 2. 27 | Funkční karty 6 a 7 pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 [5] | 54 |
| Obr. 5. 2. 28 | Hodnoty efektivní rychlosti deformace (a_1 [1/s]) a násobitele smykové pevnosti (α_1 [-]) definující křivku pro zohlednění vlivu rychlosti deformace (soubor *.k, PSPad) | 59 |
| Obr. 5. 2. 29 | Křivka pro zohlednění vlivu rychlosti deformace | 59 |
| Obr. 5. 2. 30 | *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 → parametry materiálového modelu při kvazi-statickém a cyklickém zatěžování (soubor *.k, PSPad) | 63 |
| Obr. 5. 2. 31 | *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 → parametry materiálového modelu při vyšších rychlostech zatěžování (soubor *.k, PSPad) | 63 |
| Obr. 5. 2. 32 | Vygenerované parametry materiálového modelu *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 a stavové rovnice *EOS_TABULATED_COMPACTION při hodnotě pevnosti betonu v jednoosém tlaku $f_c = 43$ MPa (soubor messag, PSPad) | 64 |
| Obr. 5. 2. 33 | Vygenerovaná křivka pro beton C 35/45, která slouží pro určení hydrostatického stavu napjatosti v betonu (Objemová deformace → VolStrain na obr. 5. 2. 32; Tlak → Pressure na obr. 5. 2. 32), *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 65 |
| Obr. 5. 2. 34 | Funkční karty 1, 2 a 3 pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_DAMAGE [5] | 67 |
| Obr. 5. 2. 35 | Funkční karty 4, 5, 6, 7 a 8 pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_DAMAGE [5] | 68 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Obr. 5. 2. 36 | Funkční karty pro klíčové slovo *EOS_TABULATED_COMPACTION [5] | 69 |
| Obr. 5. 2. 37 | *MAT_CONCRETE_DAMAGE → parametry materiálového modelu při kvazi-statickém a cyklickém zatěžování (soubor *.k, PSPad) | 76 |
| Obr. 5. 2. 38 | *MAT_CONCRETE_DAMAGE → parametry materiálového modelu při vyšších rychlostech zatěžování (soubor *.k, PSPad) | 76 |
| Obr. 5. 2. 39 | *EOS_TABULATED_COMPACTION → zadané parametry stavové rovnice (soubor *.k, PSPad) | 77 |
| Obr. 5. 2. 40 | Grafický popis modelu *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE [12] | 80 |
| Obr. 5. 2. 41 | Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE [5] | 81 |
| Obr. 5. 2. 42 | *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE → zadané parametry materiálového modelu → 1. varianta výpočtu (soubor *.k, PSPad) | 84 |
| Obr. 5. 2. 43 | *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE → zadané parametry materiálového modelu → 2. varianta výpočtu (soubor *.k, PSPad) | 84 |
| Obr. 5. 2. 44 | Pracovní diagram betonu v tlaku a tahu, *MAT_CONCRETE_EC2 [5] ... | 87 |
| Obr. 5. 2. 45 | Funkce tahového změkčení, *MAT_CONCRETE_EC2 [5] | 87 |
| Obr. 5. 2. 46 | Pracovní diagram betonu v tlaku a tahu, víceosá napjatost v tlaku, *MAT_CONCRETE_EC2 [5] | 87 |
| Obr. 5. 2. 47 | Chování betonu při odtěžování, *MAT_CONCRETE_EC2 [5] | 87 |
| Obr. 5. 2. 48 | Funkční karty 1 a 2 pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_EC2 [5] | 88 |
| Obr. 5. 2. 49 | Funkční karty 3 a 4 pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_EC2 [5] | 89 |
| Obr. 5. 2. 50 | *MAT_CONCRETE_EC2 → zadané parametry materiálového modelu (soubor *.k, PSPad) | 97 |
| Obr. 5. 3. 1 | Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_SOIL_CONCRETE [5] | 99 |
| Obr. 5. 3. 2 | Křivky udávající závislost plastických poměrných deformací ϵ_1 a ϵ_2 na tlaku [5] | 101 |
| Obr. 5. 3. 3 | Význam faktoru b [5] | 101 |
| Obr. 5. 3. 4 | Funkční karty pro klíčové slovo *MAT_CONCRETE_BEAM [5] | 104 |
| Obr. 6. 1. 1 | Geometrický model válce, ANSYS/LS-DYNA | 109 |
| Obr. 6. 1. 2 | Geometrický model válce s podložkami, ANSYS/LS-DYNA | 109 |
| Obr. 6. 1. 3 | Geometrický model desky, ANSYS/LS-DYNA | 110 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Obr. 6. 2. 1 | Geometrie konečného prvku SOLID164, ANSYS/LS-DYNA [13] | 111 |
| Obr. 6. 2. 2 | Geometrie konečného prvku SHELL163, ANSYS/LS-DYNA [13] | 112 |
| Obr. 6. 2. 3 | Konečnoprvkový model válce, ANSYS/LS-DYNA | 113 |
| Obr. 6. 2. 4 | Konečnoprvkový model válce s podložkami, ANSYS/LS-DYNA | 114 |
| Obr. 6. 2. 5 | Konečnoprvkový model desky, ANSYS/LS-DYNA | 114 |
| Obr. 6. 2. 6 | Nastavení konečných prvků typu SOLID (soubor *.k, PSPad) | 115 |
| Obr. 6. 2. 7 | Nastavení konečných prvků typu SHELL (soubor *.k, PSPad) | 115 |
| Obr. 6. 2. 8 | Konečnoprvkové modely válců (vlevo - řídká síť; vpravo - hustá síť), ANSYS/LS-DYNA | 116 |
| Obr. 6. 2. 9 | Konečnoprvkové modely desek (vlevo - řídká síť; vpravo - hustá síť), ANSYS/LS-DYNA | 116 |
| Obr. 6. 3. 1 | *MAT_ELASTIC → zadané parametry materiálového modelu (soubor *.k, PSPad) | 118 |
| Obr. 6. 4. 1 | Nastavení okrajových podmínek a zatížení pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek (soubor *.k, PSPad) | 119 |
| Obr. 6. 4. 2 | Zadané zatěžovací křivky, které charakterizují kvazi-statické zatěžování, pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek (soubor *.k, PSPad) → a1: čas [s]; o1: posun ve směru osy z [mm] (VAD = 2; DOF = 3) | 119 |
| Obr. 6. 4. 3 | Kladná zatěžovací křivka (LCID = 1), která charakterizuje kvazi-statické zatěžování, pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích bez ocelových podložek (LS-PrePost v. 4.0) | 120 |
| Obr. 6. 4. 4 | Nastavení okrajových podmínek a zatížení pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích s ocelovými podložkami (soubor *.k, PSPad) | 121 |
| Obr. 6. 4. 5 | Nastavení zatížení pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích s ocelovými podložkami, bez podepření (soubor *.k, PSPad) | 121 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Obr. 6. 4. 6 | Zadané zatěžovací křivky, které charakterizují kvazi-statické zatěžování, pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích s ocelovými podložkami (soubor *.k, PSPad) → a1: čas [s]; o1: posun ve směru osy z [mm] (VAD = 2; DOF = 3) | 121 |
| Obr. 6. 4. 7 | Kladná zatěžovací křivka (LCID = 1), která charakterizuje kvazi-statické zatěžování, pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tlaku na válcích s ocelovými podložkami (LS-PrePost v. 4.0) | 122 |
| Obr. 6. 4. 8 | Nastavení tření mezi podstavami válce a podložkami | 123 |
| Obr. 6. 4. 9 | Nastavení zatížení pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válcích, bez podepření (soubor *.k, PSPad) | 123 |
| Obr. 6. 4. 10 | Zadané zatěžovací křivky, které charakterizují kvazi-statické zatěžování, pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válcích (soubor *.k, PSPad) → a1: čas [s]; o1: posun ve směru osy z [mm] (VAD = 2; DOF = 3) | 124 |
| Obr. 6. 4. 11 | Kladná zatěžovací křivka (LCID = 1), která charakterizuje kvazi-statické zatěžování, pro numerické simulace zkoušek mechanicko fyzikálních vlastností betonu v prostém tahu na válcích (LS-PrePost v. 4.0) | 124 |
| Obr. 6. 4. 12 | Nastavení okrajových podmínek a zatížení pro numerickou simulaci ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky (soubor *.k, PSPad) . | 125 |
| Obr. 6. 4. 13 | Zadaná zatěžovací křivka pro numerickou simulaci ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky (soubor *.k, PSPad) → a1: čas [s]; o1: posun ve směru osy z [mm] (VAD = 2; DOF = 3) | 125 |
| Obr. 6. 4. 14 | Zatěžovací křivka (LCID = 1) pro numerickou simulaci ohybu lokálně zatížené po všech stranách vetknuté desky (LS-PrePost v. 4.0) | 125 |
| Obr. 8. 1. 1 | Betonový zkušební válec mezi ocelovými deskami | 132 |
| Obr. 8. 1. 2 | Tuhé ocelové podložení | 132 |
| Obr. 8. 1. 3 | Zkušební přístroj, který vyvíjel tlakové namáhání | 133 |
| Obr. 8. 1. 4 | Porušený betonový zkušební válec | 133 |
| Obr. 8. 1. 5 | Zatěžovací l-t diagram betonového válce v tlaku (experiment) | 134 |
| Obr. 8. 2. 1 | Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, kvazi-statické stlačování válce (LS-PrePost v. 4.0) | 136 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Obr. 8. 2. 2 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CSCM | 137 |
| Obr. 8. 2. 3 | Pracovní diagram betonu v tlaku na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CSCM | 137 |
| Obr. 8. 2. 4 | Minimální hlavní poměrné deformace na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_CSCM | 138 |
| Obr. 8. 2. 5 | Minimální hlavní normálová napětí na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_CSCM | 138 |
| Obr. 8. 2. 6 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 139 |
| Obr. 8. 2. 7 | Pracovní diagram betonu v tlaku na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 140 |
| Obr. 8. 2. 8 | Minimální hlavní poměrné deformace na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 140 |
| Obr. 8. 2. 9 | Minimální hlavní normálová napětí na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 141 |
| Obr. 8. 2. 10 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CDPM | 142 |
| Obr. 8. 2. 11 | Pracovní diagram betonu v tlaku na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CDPM | 142 |
| Obr. 8. 2. 12 | Minimální hlavní poměrné deformace na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled; *MAT_CDPM | 143 |
| Obr. 8. 2. 13 | Minimální hlavní normálová napětí na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled; *MAT_CDPM | 143 |
| Obr. 8. 2. 14 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 144 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Obr. 8. 2. 15 | Pracovní diagram betonu v tlaku na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 145 |
| Obr. 8. 2. 16 | Minimální hlavní poměrné deformace na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 145 |
| Obr. 8. 2. 17 | Minimální hlavní normálová napětí na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 146 |
| Obr. 8. 2. 18 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 147 |
| Obr. 8. 2. 19 | Pracovní diagram betonu v tlaku na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 147 |
| Obr. 8. 2. 20 | Minimální hlavní poměrné deformace na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 148 |
| Obr. 8. 2. 21 | Minimální hlavní normálová napětí na válci v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické stlačování válce, zleva: řez, pohled, pohled 90°; *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 148 |
| Obr. 8. 2. 22 | Křivky charakterizující posuny podložek v závislosti na čase, kvazi-statické stlačování válce s podložkami (LS-PrePost v. 4.0) | 149 |
| Obr. 8. 2. 23 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, *MAT_CSCM | 150 |
| Obr. 8. 2. 24 | Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (1 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CSCM .. | 151 |
| Obr. 8. 2. 25 | Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (2 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CSCM .. | 152 |
| Obr. 8. 2. 26 | Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (bez podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CSCM .. | 152 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Obr. 8. 2. 27 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 153 |
| Obr. 8. 2. 28 | Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (1 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 154 |
| Obr. 8. 2. 29 | Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (2 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 154 |
| Obr. 8. 2. 30 | Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (bez podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 155 |
| Obr. 8. 2. 31 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, *MAT_CDPM | 156 |
| Obr. 8. 2. 32 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 156 |
| Obr. 8. 2. 33 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 157 |
| Obr. 8. 2. 34 | Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (1 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 158 |
| Obr. 8. 2. 35 | Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (2 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy; *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 158 |

- Obr. 8. 2. 36 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (bez podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy;
*MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 159
- Obr. 8. 2. 37 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (1 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy;
*MAT_CONCRETE_DAMAGE 159
- Obr. 8. 2. 38 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (2 podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy;
*MAT_CONCRETE_DAMAGE 160
- Obr. 8. 2. 39 Minimální hlavní poměrné deformace (vlevo) a minimální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci s podložkami v koncovém čase 3 s (bez podepření), kvazi-statické stlačování válce s podložkami, pohledy;
*MAT_CONCRETE_DAMAGE 160
- Obr. 8. 2. 40 Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, kvazi-statické natahování válce (LS-PrePost v. 4.0) 161
- Obr. 8. 2. 41 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CSCM 162
- Obr. 8. 2. 42 Pracovní diagram betonu v tahu na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CSCM 162
- Obr. 8. 2. 43 Maximální hlavní poměrné deformace (vlevo) a maximální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci v koncovém čase 0,04 s, kvazi-statické natahování válce, pohledy; *MAT_CSCM 163
- Obr. 8. 2. 44 Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_WINFRITH_CONCRETE 164
- Obr. 8. 2. 45 Pracovní diagram betonu v tahu na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce,
*MAT_WINFRITH_CONCRETE 164
- Obr. 8. 2. 46 Maximální hlavní poměrné deformace (vlevo) a maximální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci v koncovém čase 0,04 s, kvazi-statické natahování válce, pohledy; *MAT_WINFRITH_CONCRETE 165

| | | |
|---------------|---|-----|
| Obr. 8. 2. 47 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CDPM | 166 |
| Obr. 8. 2. 48 | Pracovní diagram betonu v tahu na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CDPM | 166 |
| Obr. 8. 2. 49 | Maximální hlavní poměrné deformace (vlevo) a maximální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci v koncovém čase 0,04 s, kvazi-statické natahování válce, pohledy; *MAT_CDPM | 167 |
| Obr. 8. 2. 50 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 168 |
| Obr. 8. 2. 51 | Pracovní diagram betonu v tahu na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 168 |
| Obr. 8. 2. 52 | Maximální hlavní poměrné deformace (vlevo) a maximální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci v koncovém čase 0,04 s, kvazi-statické natahování válce, pohledy; *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 169 |
| Obr. 8. 2. 53 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 170 |
| Obr. 8. 2. 54 | Pracovní diagram betonu v tahu na prvku modelu válce (numerická simulace), kvazi-statické natahování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 170 |
| Obr. 8. 2. 55 | Maximální hlavní poměrné deformace (vlevo) a maximální hlavní normálová napětí (vpravo) na válci v koncovém čase 0,04 s, kvazi-statické natahování válce, pohledy; *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 171 |
| Obr. 8. 2. 56 | Křivka charakterizující průhyb středu desky v závislosti na čase, kvazi-statické zatěžování desky (LS-PrePost v. 4.0) | 172 |
| Obr. 8. 2. 57 | Zatěžovací l-d diagram betonové desky při ohybu (numerická simulace), kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2 | 173 |
| Obr. 8. 2. 58 | Graf závislosti ohybových momentů ve středu desky ve směru osy x na průhybu středu desky (numerická simulace), kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2 | 173 |
| Obr. 8. 2. 59 | Pracovní diagram betonu v tahu na prvku modelu desky (numerická simulace), kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2 . | 173 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Obr. 8. 2. 60 | Průhyb desky ve směru osy z v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2 | 174 |
| Obr. 8. 2. 61 | Maximální hlavní normálová napětí (maximální hodnoty v integračních bodech) na desce v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2 | 174 |
| Obr. 8. 2. 62 | Ohybové momenty ve směru osy x (\rightarrow x) na desce v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2 | 175 |
| Obr. 8. 2. 63 | Kroutící momenty na desce v koncovém čase 1,5 s, kvazi-statické zatěžování desky, *MAT_CONCRETE_EC2 | 175 |
| Obr. 8. 2. 64 | Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, stlačování válce vyšší rychlostí, *MAT_CSCM (LS-PrePost v. 4.0) | 177 |
| Obr. 8. 2. 65 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), stlačování válce vyšší rychlostí, *MAT_CSCM | 177 |
| Obr. 8. 2. 66 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CSCM | 178 |
| Obr. 8. 2. 67 | Porušení betonového válce v koncovém čase 2 s, *MAT_CSCM | 178 |
| Obr. 8. 2. 68 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), stlačování válce vyšší rychlostí, *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 179 |
| Obr. 8. 2. 69 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 180 |
| Obr. 8. 2. 70 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), stlačování válce vyšší rychlostí, *MAT_CDPM | 181 |
| Obr. 8. 2. 71 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CDPM | 181 |
| Obr. 8. 2. 72 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), stlačování válce vyšší rychlostí, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 182 |
| Obr. 8. 2. 73 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), stlačování válce vyšší rychlostí, *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 182 |
| Obr. 8. 2. 74 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 183 |
| Obr. 8. 2. 75 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 183 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Obr. 8. 2. 76 | Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, stlačování válce, *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (LS-PrePost v. 4.0) | 184 |
| Obr. 8. 2. 77 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), stlačování válce, *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE | 185 |
| Obr. 8. 2. 78 | Porušení betonového válce v koncovém čase 1,5 s, *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE | 185 |
| Obr. 8. 2. 79 | Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_CSCM (LS-PrePost v. 4.0) | 186 |
| Obr. 8. 2. 80 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_CSCM | 187 |
| Obr. 8. 2. 81 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CSCM | 187 |
| Obr. 8. 2. 82 | Porušení betonového válce v koncovém čase 0,15 s, *MAT_CSCM | 188 |
| Obr. 8. 2. 83 | Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_WINFRITH_CONCRETE (LS-PrePost v. 4.0) | 189 |
| Obr. 8. 2. 84 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 189 |
| Obr. 8. 2. 85 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 190 |
| Obr. 8. 2. 86 | Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_CDPM (LS-PrePost v. 4.0) | 191 |
| Obr. 8. 2. 87 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_CDPM | 191 |
| Obr. 8. 2. 88 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CDPM | 192 |
| Obr. 8. 2. 89 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 193 |
| Obr. 8. 2. 90 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), natahování válce vyšší rychlostí, *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 193 |
| Obr. 8. 2. 91 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 194 |

| | | |
|----------------|--|-----|
| Obr. 8. 2. 92 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), srovnání rychlostí zatěžování, *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 194 |
| Obr. 8. 2. 93 | Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, natahování válce, *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (LS-PrePost v. 4.0) | 195 |
| Obr. 8. 2. 94 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), natahování válce, *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE | 196 |
| Obr. 8. 2. 95 | Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, cyklické zatěžování válce, *MAT_CSCM (LS-PrePost v. 4.0) | 198 |
| Obr. 8. 2. 96 | Hysterézní křivka betonového válce (numerická simulace), cyklické zatěžování válce, RECOV = 0, *MAT_CSCM | 198 |
| Obr. 8. 2. 97 | Hysterézní křivka betonového válce (numerická simulace), cyklické zatěžování válce, RECOV = 1, *MAT_CSCM | 199 |
| Obr. 8. 2. 98 | Hysterézní křivka betonového válce (numerická simulace), cyklické zatěžování válce, *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 200 |
| Obr. 8. 2. 99 | Hysterézní křivka betonového válce (numerická simulace), cyklické zatěžování válce, *MAT_CDPM | 201 |
| Obr. 8. 2. 100 | Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, cyklické zatěžování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 (LS-PrePost v. 4.0) | 202 |
| Obr. 8. 2. 101 | Hysterézní křivka betonového válce (numerická simulace), cyklické zatěžování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 202 |
| Obr. 8. 2. 102 | Křivky charakterizující posuny podstav válce v závislosti na čase, cyklické zatěžování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE (LS-PrePost v. 4.0) | 204 |
| Obr. 8. 2. 103 | Hysterézní křivka betonového válce (numerická simulace), cyklické zatěžování válce, *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 204 |
| Obr. 8. 2. 104 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), testování závislosti výsledků na síti konečných prvků, *MAT_CSCM ... | 206 |
| Obr. 8. 2. 105 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), testování závislosti výsledků na síti konečných prvků, *MAT_WINFRITH_CONCRETE | 207 |
| Obr. 8. 2. 106 | Zatěžovací l-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), testování závislosti výsledků na síti konečných prvků, *MAT_CDPM ... | 207 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| Obr. 8. 2. 107 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), testování závislosti výsledků na síti konečných prvků, *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 | 208 |
| Obr. 8. 2. 108 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), testování závislosti výsledků na síti konečných prvků, *MAT_CONCRETE_DAMAGE | 208 |
| Obr. 8. 2. 109 | Zatěžovací 1-d diagram betonové desky při ohybu (numerická simulace), testování závislosti výsledků na síti konečných prvků, *MAT_CONCRETE_EC2 | 209 |
| Obr. 8. 2. 110 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tlaku (numerická simulace), srovnání výsledků od jednotlivých nelineárních materiálových modelů betonu | 209 |
| Obr. 8. 2. 111 | Zatěžovací 1-d diagram betonového válce v tahu (numerická simulace), srovnání výsledků od jednotlivých nelineárních materiálových modelů betonu | 210 |
| Obr. 8. 3. 1 | Zatěžovací 1-t diagram betonového válce v tlaku, srovnání numerických simulací s experimentem | 211 |