

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

# VLIV TECHNICKÉ A PŘÍRODNÍ SEIZMICITY NA STAVEBNÍ KONSTRUKCE SE ZAMĚŘENÍM NA KONSTRUKCE ZE ZDICÍCH MATERIÁLŮ

INFLUENCE OF TECHNICAL AND NATURAL SEISMICITY ON BUILDING STRUCTURES  
WITH FOCUS ON STRUCTURES OF MASONRY MATERIALS

## TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS SUMMARY

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Zdeněk Čada

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Doc. Ing. Vlastislav Salajka, CSc.

---

## ***Abstrakt***

Disertační práce pojednává o vybraných problémech v oblasti řešení dynamické odezvy stavebních konstrukcí na nestacionární zatížení nuceným pohybem v místě uložení. Jedná se o seizmické zatížení. Jsou doporučeny postupy, jak využít seizmické záznamy buzení s ohledem na přesnost dynamických výpočtů. Elastická spektra odezvy je nutno upravit tak, aby byla zajištěna požadovaná spolehlivost návrhu. Je ukázáno, jak generovat vhodné syntetické akcelerogramy pro řešení požadované odezvy. Podle vytvořené vlastní metodiky byl generován syntetický akcelerogram pro užití při experimentální seizmické zkoušce zděného objektu z autoklávovaného betonu v modelovém měřítku. Odezvové veličiny pohybu získané v měřených místech při experimentu byly porovnány s lineárními a nelineárními dynamickými výpočty na modelech sestavenými metodou konečných prvků. Byly použity numerické modely s různými úrovněmi detailnosti. Smykové chování stěn bylo modelováno s užitím konstitutivních vztahů zahrnující možnost křehkého porušení a dále s užitím nelineárního interakčního rozhraní zahrnující delaminaci mezi zdicími prvky. Chování matematického modelu stěnových systémů bylo kalibrováno s ohledem na měřená data při smykových zkouškách stěn ve skutečném a modelovém měřítku.

## ***Klíčová slova***

ANSYS, autoklávovaný pórobeton, metoda konečných prvků, seizmicita, seizmická odezva, smykové stěny, SOLID65, stavební konstrukce, syntetický akcelerogram, úprava spekter odezvy, YTONG, zděná konstrukce, zemětřesení.

---

## ***Abstract***

The dissertation deals with selected issues in the field of the calculation of the response of building structures which are excited with dynamic non-stationary displacement loading of its ground. Seismic load has been assumed. Procedures, how to work with seismic records with respect to the accuracy of dynamic calculations, how to modify the response spectrum to ensure the reliability, how to generate synthetic accelerogram requiring more accurate response, are recommended. Synthetic accelerogram has been generated by own approaching, which has been used as the excitation function in the experimental seismic testing of autoclaved concrete brick building in model scale. Response values of motion in the measured points of the experiment were compared with the linear and nonlinear dynamic calculations by using the finite element method models. Different levels of detail of the numerical models have been used. The shear wall behaviour has been modelled by using constitutive models with brittle failure as well as using of non-linear interaction interface with possible delamination between the masonry bricks. The behaviour of the mathematical model of wall systems has been calibrated with respect to the measured data at shear wall experiments in real and model scale of walls.

## ***Keywords***

ANSYS, Autoclaved Porous Concrete, Building Structure, Earthquake, Finite Element Method, Masonry Structure, Nonlinear Simulation, Seismicity, Seismic response, Shear walls, SOLID65, Synthetic Accelerogram, Response Spectra Modification, YTONG.

---

## Obsah

<b>ČÁST A – Současný stav problematiky</b>	<b>5</b>
A.1 Úvod do seizmicity	5
A.2 Přírodní a technická seizmicita na území ČR	6
A.3 Eurocode 8	6
A.4 Trendy v pozemním stavitelství	7
A.5 Vybrané kapitoly ze stavební dynamiky	8
A.6 Seizmická odolnost zděných objektů	8
<b>ČÁST B – Cíle</b>	<b>10</b>
<b>ČÁST C – Zvolené metody zpracování</b>	<b>11</b>
C.1 Metoda konečných prvků v dynamice konstrukcí	11
C.2 Vlastní kmitání lineárních soustav	11
C.3 Přímá integrace pohybových rovnic	11
C.4 Řešení rozkladem do vlastních tvarů kmitů	11
C.5 Řešení dynamické odezvy vyvozené pohybem základu	11
C.6 Řešení dynamické odezvy s užitím spekter	12
C.7 Generování spekter odezvy	12
C.8 Spektra odezvy	12
C.9 Sčítání odezev	12
C.10 Modelování zděných konstrukcí	12
<b>ČÁST D – Výsledky disertace a uvedení nových poznatků</b>	<b>14</b>
D.1 Studie reálných záznamů seizmických dějů	14
D.2 Zvýšení vzorkovací frekvence záznamu	14
D.3 Úprava spekter odezvy	16
D.4 Syntetické akcelerogramy	17
D.5 Experimentální ověření	18
D.6 Extrapolace na objekt s reálnými rozměry	25
<b>ČÁST E – Závěry</b>	<b>27</b>
<b>Vybraná autorská publikační činnost</b>	<b>30</b>
<b>Seznam vybraných užitých zdrojů</b>	<b>30</b>

## ČÁST A – SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

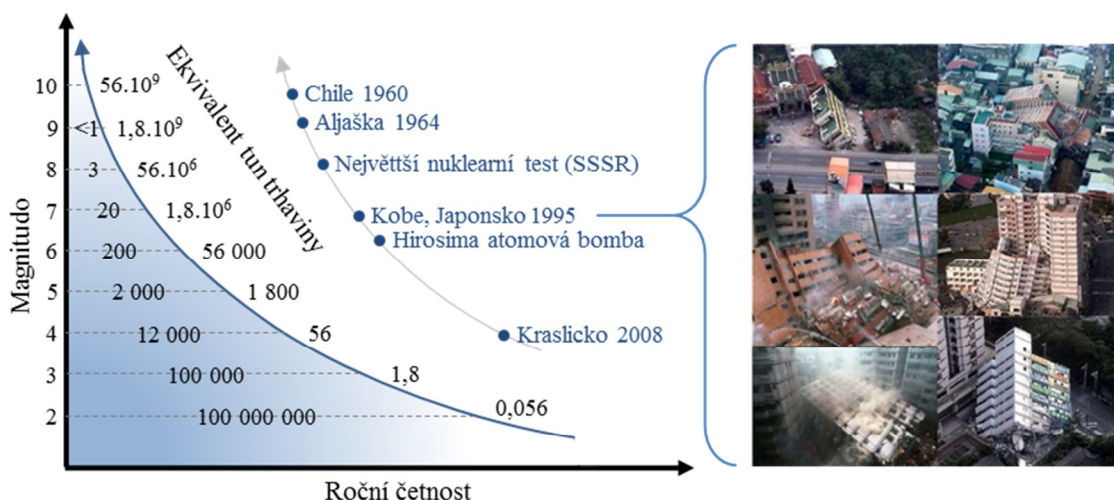
### A.1 ÚVOD DO SEIZMICITY

#### Zemětřesení

Příčinou zemětřesení jsou různé jevy: vulkanická činnost, tektonické pohyby v zemské kůře, sesuvy, výbuchy a jiné. Většina zemětřesení je tektonického původu a je vázaná na zlomy. Zemětřesení je náhlé uvolnění deformační energie nashromážděné v horninách s následným šířením mechanických vln zemským tělesem. [18]

#### Seizmicita

Seizmicita je aktivita zemětřesení. Jedná se o zdánlivě náhodný pohyb podloží. Seizmicitu nejčastěji zaznamenáváme na povrchu země v podobě mechanického kmitání. Kmitání v každém místě povrchu je rozdílné v závislosti na vzdálenosti hypocentra a na skladbě prostředí, kterým se šířilo kmitání v podobě mechanických vln. [10]



Obr. A.1.1 Vlevo: celosvětová četnost zemětřesení [10], vpravo: Kobe 1995

#### Přírodní seizmicita

V případě, kdy je seizmicita vztažena ke spontánnímu přírodnímu jevu, nejčastěji tektonické pohyby v zemské kůře, hovoříme o přírodní seizmicitě. Studium zemětřesení a šířením vln zemským tělesem se zabývá obor geofyziky zvaný seizmologie. Studuje vznik, šíření vln a jejich registraci příp. zaznamenávání. [18]

#### Technická seizmicita

Významný vibrační efekt na povrchu však mohou také způsobit projevy technické seizmicity. Technickou seizmicitou rozumíme seizmické otřesy vyvolané umělým zdrojem a indukovanou seizmicitou. Charakter záznamu v časovém měřítku je závislý především na zdroji; jde o rychle se tlumící seizmický impulz nebo jde o déle

trvající rázový projev. Skupina otřesů vyvolaných umělým zdrojem je tvořena především vibracemi vzniklými při trhačích pracích, automobilovou a kolejovou dopravou, pulzací vodního proudu, činností strojů a lidí nebo průmyslovou činností. Seismické otřesy buzené činností strojů jsou označovány jako průmyslová seismicity.

### ***Seismická odolnost staveb***

Z hlediska stavební mechaniky lze tedy chápat seismicity jako dynamický pohyb podloží (kinematické zatížení objektu) ve vztahu ke konkrétní lokalitě. Z vlastností horninových vrstev lze odvodit maximální rychlost pohybu kmitání podloží v rozmezí 1 až 3 m.s<sup>-1</sup>. Těmto rychlost odpovídá intenzita seismicity, která je výrazně vyšší než běžně uvažované intenzity v praxi. Vždy existuje konečná pravděpodobnost, že nastane seismicity s větší intenzitou, než byla uvažována při návrhu dané konstrukce.

Náhodná povaha zemětřesení a nedostatek podkladů pro určení jeho následků vzhledem k užívání hmotných zdrojů dané země je příčinou kompromisu v navrhování z hlediska seismické odolnosti [16]. Především v oblastech s potenciální velmi silnou přírodní seismicity mohou být důsledky katastrofální, obr. A.1.1 vpravo.

## **A.2 PŘÍRODNÍ A TECHNICKÁ SEISMICITA NA ÚZEMÍ ČR**

### ***Přírodní seismicity***

Intenzivní přirozené zemětřesení, jehož ohnisko bylo lokalizováno na území ČR nebo do jeho bezprostřední blízkosti, nejsou historicky ojedinělá. I v současné době jsou v západních Čechách a v Německu detekována slabší zemětřesení. Mimořádně silný roj s neaktivnějšími zemětřeseními byl v období zvýšené aktivity na přelomu 19. a 20. století a po následujícím obdobím klidu, byl silnější seismický roj zaregistrován až na přelomu roků 1985 a 1986 v oblasti obce Nový Kostel a dosáhl lokální hodnoty magnitudo 4,8. [13]

### ***Technická seismicity***

V ČR byla například důlně indukovaná seismicity pozorována na Karvinsku, na Kladensku a v Příbrami. Nejsilnější důlní otřes v ČR vznikl na Dole ČSA v Ostravsko-karvinském revíru v roce 1983 magnitudo 3,8. Nyní je seismickou monitorovací sítí v karvinské části Ostravsko-karvinském revíru zaregistrováno až 50 tisíc jevů ročně, z toho přibližně 100 až 500 jevů, jejichž lokální magnitudo přibližně 1,0. [11]

## **A.3 EUROCODE 8**

V letech 2004 až 2008 byly schváleny a přijaty jednotlivé části evropské normy ČSN EN 1998 „Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení“ (zvaná také Eurocode 8, dále jen EC8) [16]. Tímto byly nahrazeny stávající normy ČSN 73 0036



„Seismická zatížení staveb“ a ČSN 73 0040 „Zatížení stavebních objektů technickou seizmicitou a jejich odezva“. Po zavedení EC8 pro Českou republiku je nutnost od 1. 3. 2010 posuzovat stavby na území České republiky na seismické účinky.

### Seismické oblasti

Norma definuje šest seismických oblastí na území ČR, ve kterých předpokládá konstantní referenční zrychlení základových půd  $a_{gR}$ , které nabývá hodnot 0,0 až 0,12 g, viz. obr. A.3.1. Rozsah platnosti normy se vztahuje na navrhování a provádění pozemních a inženýrských staveb v seismických oblastech. Pro případ **malé seizmicity** mohou být pro některé typy staveb a základových půd omezené nebo zjednodušené podmínky návrhu. Pro případ **velmi malé seizmicity** nemusí být ustanovení normy dodržovány.



Obr. A.3.1 Mapa seismických oblastí Schenk & Schenková 2005 [16]

## A.4 TRENDY V POZEMNÍM STAVITELSTVÍ

Současné trendy ve stavebnictví mimo jiné spočívají ve snižování energetické a související ekonomické náročnosti nových objektů. Za tímto účelem jsou vyvíjeny stavební materiály a technologické postupy výstavby, které umožňují zvyšovat teplotní odpor obvodových konstrukcí. Příkladem jsou zdící prvky z lehkých betonů, u kterých snižováním teplotní vodivosti a objemové hmotnosti materiálu je bohužel i snížena pevnost prvků. Velké výrobní závody v oblasti cihlářského průmyslu, jako např. Xella či Wienerberger, reagují zaměřením svých investic na dokázání, že jejich nově navržené zdící prvky nejnižších pevnostních tříd P2 a dokonce i P1.8 (zařazení do pevnostních tříd dle ČSN EN 1996 [17]) je možné používat do nosného zdiva i v oblastech seizmicitou odpovídající úrovni pravděpodobné na území ČR.

## A.5 VYBRANÉ KAPITOLY ZE STAVEBNÍ DYNAMIKY

### *Seizmické zatížení*

Seizmické zatížení ve stavební mechanice (mechanice těles) lze zařadit mezi kinematické dynamické zatížení. Toto nestacionární neperiodické zatížení má mnohdy extrémní význam z hlediska návrhu konstrukcí na vodorovné síly, i přestože se jedná o krátkodobý jev s náhodně velkou intenzitou s dlouhou periodou návratnosti. Řešení odezvy na seizmické zatížení, způsoby jak vyšetřit vnitřní síly s návazností na posouzení spolehlivosti se zabývá obor stavební dynamiky jakožto podoblast mechaniky těles. V současnosti bývá k řešení vnitřních sil využita metoda konečných prvků.

### *Analýza s užitím lineárních spekter odezvy*

Výpočet odezvy stavebních objektů zatížených seizmicitou s užitím lineárních spekter odezvy zanechali cenné publikace autoři A. K. Gupta [6], E. Rosenblueth, D. W. Lindley, A. Chopra [5], ve kterých se zabývají mimo jiné metodami sčítání odezvy z jednotlivých vlastních tvarů v souvislosti s jejich vzájemnou korelací.

### *Úprava spekter odezvy*

Úprava spekter odezvy spočívá v modifikaci funkce spektra odezvy tak, aby výsledné zatížení při aplikaci spektra ve výpočtu bylo navýšeno (příp. poníženo) dle potřeb. Důvodem může být odstranění z výpočtu lokálních rezonancí a anti-rezonancí při výpočtu odezvy, příp. zohlednění nejistot modelování.

### *Syntetické seizmogramy*

Syntetické seizmogramy resp. akcelerogramy nebo obecně syntetické záznamy pohybu jsou uměle generované časové funkce pohybu podloží. Tyto záznamy jsou následně obvykle použity v oblasti stavební mechaniky jako budící funkce pro numerické výpočty přechodového děje v časové oblasti nebo jako budící funkce experimentálního měření. V EC8 [16] jsou uvedeny požadavky syntetické akcelerogramy ve vztahu k navrhování seizmicky odolných konstrukcí, kdy hlavní požadavky se zaměřují na odezvu generovaných záznamů.

## A.6 SEIZMICKÁ ODOLNOST ZDĚNÝCH OBJEKTŮ

Zaměření pozornosti na zděné objekty v kombinaci se seizmickým zatížením je především z důvodu nízké odolnosti toho typu konstrukce vzhledem k vodorovnému zatížení. Zde je nutno podotknout, že v případě použití zděné stavby v oblasti s předpokládaným výskytem seizmicity jsou doporučení jednoznačná EC8 [16]: použití sevřeného nebo vyztuženého zdiva.



### ***Eurocode 8***

Nevyztužené zdivo má kvůli své malé pevnosti v tahu a malé duktilitě malou schopnost disipace energie, součinitel duktility je uváděn hodnotou 1,5, což je minimální hodnota tohoto součinitele ve výčtu tradičních konstrukčních systémů. Použití nevyztuženého zdiva je omezeno normou EC8 na  $a_{gR}S/\gamma_t < \mathbf{0,20\ g}$ , což je podmínka, která při velkém významu stavby může být snadno limitující. Dalším požadavkem pro nevyztužení zdiva je minimální tlaková pevnost zdiva 5 MPa (neplatí pro případ malé seizmicity, tzn.  $a_{gR}S/\gamma_t < \mathbf{0,10\ g}$ ). Z uvedeného vyplývá, že užití stavebních objektů, kde hlavní konstrukční systém je nevyztužené zdivo, je významně omezeno vzhledem k seizmickým oblastem územím ČR.

### ***Seizmická analýza zděných objektů***

Podrobný matematický popis chování zděných objektů při smykovém zatížení nad lineární mez deformace je obvykle prováděno při užití metody konečných prvků jedním z odlišných přístupů. První přístup spočívá v modelování celé stěny jako homogenní kontinuum se zavedení ortotropního nelineárního materiálového modelu, který zohledňuje chování interakce ve spárách. Druhý přístup spočívá v modelování zdícího prvku jako homogenní kontinuum a modelování interakčního rozhraní kontaktním nelineárním modelem.

### ***Experimentální ověření seizmické odolnosti***

Za tímto účelem jsou v technické praxi prováděny experimenty na modelových stěnách s různých zdících prvků a o různých rozměrech. Příkladem je velmi dobře zpracovaný ucelený soubor zkoušek stěn z pálených cihel [8].

## ČÁST B – CÍLE

V rámci doktorského studia během řešení problematiky vlivu přírodní a technické seizmicity na stavební konstrukce byly stanoveny cíle v oblastech, které byly shledány jako nedostatečně řešené. Jednotlivé cíle jsou zaměřeny na úzce specializované oblasti v matematickém modelování opírající se o data získané měřeními přírodních i technických záznamů seizmicity a o data měřená během experimentálního ověřování.

Dílčí cíl je zaměřen na studii vlivu vzorkovací frekvence záznamu akcelerogramů a možnosti jejich zlepšení. V této souvislosti je třeba provést zkoumání možného zlepšení vzorkovací frekvence a vlivu na přesnost odezvy.

Užití ve výpočtu na generovaná spektra odezvy přímo z akcelerogramů je vždy problematické z hlediska velké ostrosti spektrálních hodnot. Malá chyba výpočtového modelu může výrazně ovlivnit výpočet. Na tuto skutečnost navazuje výpočet v časové oblasti, kdy spektra odezvy a vlastní frekvence ani nemusí být vyčísleny a chyba je ukryta. Vzhledem k získaným poznatkům v této oblasti, není dostupná univerzální metodika pro úpravu lineárních spekter odezvy, která by se vztahovala ke konkrétnímu řešenému modelu a zároveň kvalifikovaně upravovala spektrální hodnoty. Dílčím cílem práce je zkoumání možnosti zahrnutí pravděpodobnosti změny vlastností modelu (ve vztahu k výpočtu frekvencí vlastního kmitání) přímo do výpočtových spekter odezvy.

Pro nelineární matematické simulace v časové oblasti a experimentální zkoušení chování objektu při seizmickém ději je zapotřebí užít budící časovou funkci. Dílčím cílem bylo vytvořit co nejvěrnější syntetické akcelerogramy s ohledem na jejich spektra odezvy a získat věrohodné seizmické zatížení, které co nejlépe koresponduje s požadovaným (např. normovým) seizmickým zatížením. Dílčím cílem je rozšířit a zpřesnit známou iterační metodou generování syntetických akcelerogramů založenou na úpravě amplitud harmonických složek na základě hledaného spektra odezvy tak, aby vytvořené syntetické akcelerogramy co nejlépe nahrazovali typické seizmické zatížení.

V rámci snižování energetické a ekonomické náročnosti staveb se objevují na trhu zdící prvky z lehčených betonů (pórobetonu), které díky své nízké objemové hmotnosti mají vylepšené teplotní vlastnosti. Stěnové systémy z těchto zdících prvků spadajících do nejnižších pevnostních tříd jsou velmi náchylné na vodorovné seizmické zatížení. Dílčím cílem v oblasti seizmické odolnosti zděných objektů ze zdících prvků s nízkou pevností je analyzování chování a ověření únosnosti stěnových systémů. S užitím moderní výpočetní techniky s kombinací moderního softwarového vybavení (zvolený program ANSYS) bylo cílem provést detailní numerické simulace experimentálních zkoušek seizmicky zatížených modelových stěn a seizmicky zatíženého modelové rodinného domu.

Následně je cílem provést extrapolaci na model domu se skutečnými rozměry, hmotnostmi i tuhostí. K tomu je zapotřebí sestavit výpočtový model vztažený ke skutečným rozměrům, tuhostem, hmotnostem reálného objektu a s vhodnou volbou modelu podloží.

## ČÁST C – ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

### C.1 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ V DYNAMICE KONSTRUKCÍ

Diskretizací konečnými prvky kontinuálního geometrického prostoru modelované mechanické soustavy obdržíme soustavu homogenních diterciálních rovnic, zvané jako základní pohybové rovnice, která lze zapsat v maticové formě:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{p}, \quad (\text{C.1.1})$$

kde  $\mathbf{M}$  je matice hmotnosti,  $\mathbf{C}$  je matice tlumení,  $\mathbf{K}$  je matice tuhosti,  $\ddot{\mathbf{u}}$  je vektor uzlových zrychlení,  $\dot{\mathbf{u}}$  je vektor uzlových rychlostí,  $\mathbf{u}$  je vektor uzlových posunutí,  $\mathbf{p}$  je vektor uzlových sil,  $\mathbf{u}_0$  a  $\dot{\mathbf{u}}_0$  jsou vektory počátečních posunutí a rychlostí.

### C.2 VLASTNÍ KMITÁNÍ LINEÁRNÍCH SOUSTAV

Velký význam při řešení úloh lineární dynamiky má řešení diferenciálních rovnic (C.1.1) s homogenními okrajovými podmínkami, při zanedbání členu  $\mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}$  a při předpokladu, že na soustavu nepůsobí vnější síly  $\mathbf{p}$ . Z hlediska mechaniky konstrukcí se jedná o úlohu vlastního netlumeného kmitání.

### C.3 PŘÍMÁ INTEGRACE POHYBOVÝCH ROVNIC

Pro řešení v časové oblasti rovnice (C.1.1) je užitá implicitní přímé integrační schéma konečných diferencí [4], které převádí diferenciální rovnice na soustavu lineárních algebraických rovnic, které jsou řešeny v každém integračním kroku s časovým krokem  $\Delta t$ . Celkové řešení v dané časové oblasti je získáno postupnou krokovou integrací v jednotlivých časových okamžicích.

### C.4 ŘEŠENÍ ROZKLADEM DO VLASTNÍCH TVARŮ KMITŮ

Převodem pohybových rovnic (C.1.1) na soustavu nezávislých rovnic je možné získat řešení jako součet vlastních tvarů kmitů násobených hledanými funkcemi času [4]. Pak při zavedení předpokladů ortogonality vlastních tvarů kmitu a Rayleighova modelu tlumení a vhodnými úpravami pohybových rovnic (C.1.1) je možné obdržet  $n$  nezávislých diferenciálních rovnic druhého řádu. Vyřešením diferenciálních rovnic jsou obdrženy potřebné časové funkce, ze kterých lze pomocí vlastních tvarů kmitů sestavit výslednou odezvu v libovolném čase výpočtu.

### C.5 ŘEŠENÍ DYNAMICKÉ ODEZVY VYVOZENÉ POHYBEM ZÁKLADU

Zavedením označení relativního pohybu  $\mathbf{u}_a$  při buzení vynuceným pohybem v místě uložení  $\mathbf{z}$ , vhodnou substitucí a vhodnými úpravami rovnice (C.1.1) je možné obdržet:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_a + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_a + \mathbf{K}\mathbf{u}_a = \mathbf{K}\mathbf{z}. \quad (\text{C.5.1})$$

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{D}\mathbf{a}. \quad (\text{C.5.2})$$

Řešení rovnice (C.5.1) se pak probíhá v absolutních souřadnicích  $\mathbf{u}_a$ . Oproti tomu řešení rovnice (C.5.2) probíhá v relativních souřadnicích  $\mathbf{u}$ . Rovnice (C.5.2) je důležitá při řešení s užitím lineárních spekter odezvy.

## C.6 ŘEŠENÍ DYNAMICKÉ ODEZVY S UŽITÍM SPEKTER

Řešení dynamické odezvy pomocí metody spekter odezvy je založena na rozkladu do vlastních tvarů kmitu. Rozloží-li se rovnice (C.1.1) do vlastních tvarů kmitů, pak při buzení pohybem v místě uložení. Úpravami lze získat úplně separovaná diferenciální rovnici od výpočtového modelu, kdy výsledkem řešení diferenciální rovnice jsou funkce pohybu. Toto řešení diferenciální rovnice je obvykle řešeno předem, kdy jednotlivé maximální odezvy jsou sestaveny do tabulek v závislosti na frekvenci a jsou nazývány spektra odezvy.

## C.7 GENEROVÁNÍ SPEKTER ODEZVY

Generování spekter odezvy je založeno na opakovaném řešení diferenciální rovnice při rozkladu do vlastních tvarů kmitů (kap. C.6) pro různé hodnoty frekvence, tlumení a směrů buzení. Hodnoty vlastní frekvence bývají obvykle voleny tak, aby výsledné spektrum odezvy bylo hladké a popsal veškeré lokální minima a maxima.

## C.8 SPEKTRA ODEZVY

Funkce obsahující maxima posunutí, rychlosti nebo zrychlení v závislosti na vlastní frekvenci a tlumení se nazývají jako spektrum odezvy v posunutí, rychlosti nebo zrychlení. Spektra odezvy jsou sestavována na dané zatížení, bez ohledu na znalosti budoucího výpočtového modelu.

## C.9 SČÍTÁNÍ ODEZEV

Pro řešení celkové odezvy při výpočtech pomocí spekter odezvy bylo použito sčítání postupem CQC [20]. Výpočet hlavních napětí byl proveden na základě postupu CQC součtu hlavních napětí vyčíslených při odezvě jednotlivých vlastních tvarů kmitu. Do sčítání odezvy byla zahrnuta odezva tvarů s vysokou frekvencí, kdy se předpokládá vzájemná korelace (Guptova metoda). Odezva při kmitání s frekvencí vyšší než ZPA byla přičtena metodou *Missing Mass* [20].

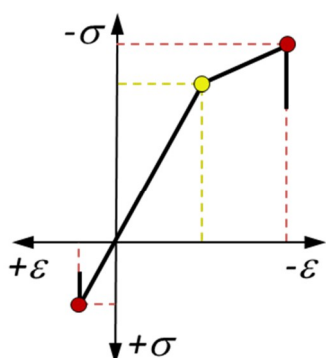
## C.10 MODELOVÁNÍ ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

K matematickému simulování experimentálních zkoušek zděných stěn a zděného objektu byl zvolen přístup modelování pomocí detailního dynamického konečnoprvkového modelu sestaveného v programu ANSYS [20].

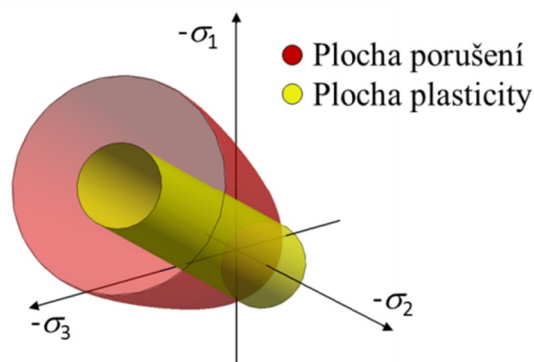
### *Nelineární materiálové modely pórobetonu*

Materiálový model pro popis mechanického chování zdících prvků z pórobetonu byl zvolen jako kombinace modelů *Concrete* [15] a *Bilinear Isotropic Hardening*

[20] obsažených v programu ANSYS [20]. Snahou bylo dosáhnout křehkého porušení v tahové oblasti a plastické rezervy v tlakové oblasti.



Obr. C.10.1 Pracovní diagram



Obr. C.10.2 Plocha plasticity a porušení

### Nelineární modely kontaktního rozhraní

Na modelování nelineárních i lineárních kontaktních rozhraní byly zvoleny v programu ANSYS povrchové kontaktní prvky [20]. Užito bylo nastavení kontaktních prvků, kdy interakce je definována jako jednostranná vazba (pouze tlaková) s možností zohlednění tření a nazývá se *Frictional Contact* [20].

### Řešení nelineárních soustav Newton-Raphson iterační metodou

Pro řešení úloh v časové oblasti (implicitní integrační schéma přímé integrace pohybových rovnic) se zohledněním změny členů v matici tuhosti  $\mathbf{K}$  ve vztahu (C.1.1) byla použita Newtonova-Raphsonova numerická metoda [20] pro určení rovnovážného stavu řešení v každém výpočtovém kroku. Tedy k výpočtu rovnovážného stavu v každém časovém kroku výpočtu je vyžadován iterační postup. V rámci každé iterace je sestavena nová (tzv. tečná) matice tuhosti  $\mathbf{K}^T$  v závislosti na aktuálním stavu modelu. Iterační postup v rámci časového kroku je ukončen splněním konvergenčních kritérií.

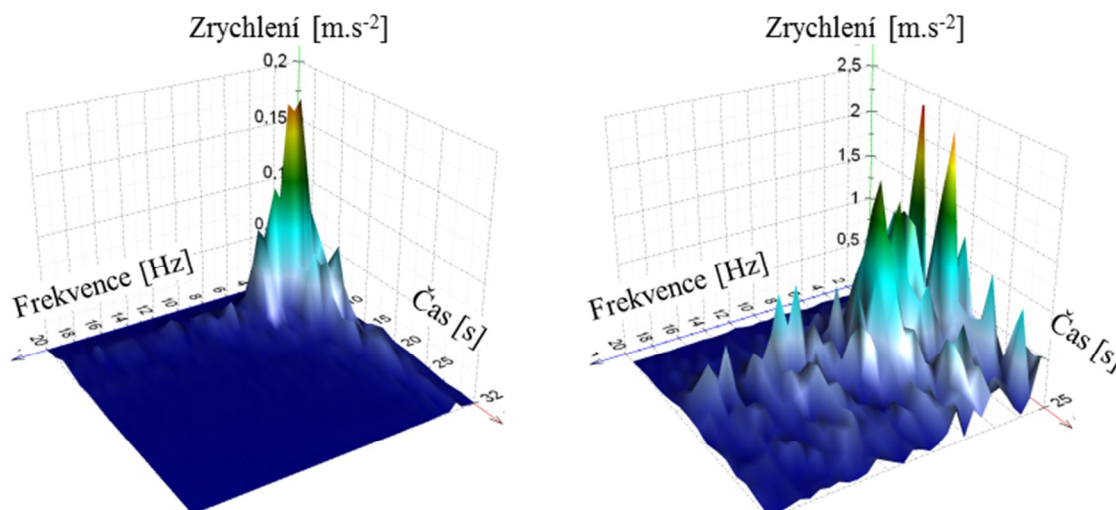


## ČÁST D – VÝSLEDKY DISERTACE A UVEDENÍ NOVÝCH POZNATKŮ

### D.1 STUDIE REÁLNÝCH ZÁZNAMŮ SEIZMICKÝCH DĚJŮ

Správné sestavení seizmického modelu zatížení v podobě syntetických akcelerogramů (kap. D.4), studie vlivu vzorkovací frekvence na výpočet odezvy (kap. D.2), úprava spekter odezvy generovaných na základě měřených záznamů (kap. D.3), vyžaduje užití a studii měřených reálných záznamů pohybu základových púd.

Uvedeno je 5 záznamů reálných zemětřesení, získány na území ČR: „Jeronym“ (projev kraslického roje 2008 zaznamenaný stanicí Jeronym [12]), „Darkov“ (důlně indukovaný jev v roce 2008 zaznamenaný stanicí Darkov [23]), „El Centro“ (velmi silné přírodní zemětřesení El Centro z roku 1940 [22]), „Karviná“ (důlně indukovaný jev z roku 2004 v oblasti Karviná [23]), „Tabas“ (velmi silné přírodní Iránské zemětřesení v blízkosti města Tabas z roku 1978 [22]).



Obr. D.1.1 Průběh amplitud zrychlení získaných pomocí STFT, vlevo: Karviná směr sever-jih, vpravo: Tabas směr sever-jih

Tři záznamy jsou získány měřením na území ČR (2x technická seizmicita, 1x přírodní seizmicita) a 2 záznamy odpovídají velmi silných světových zemětřesení (2x přírodní seizmicita).

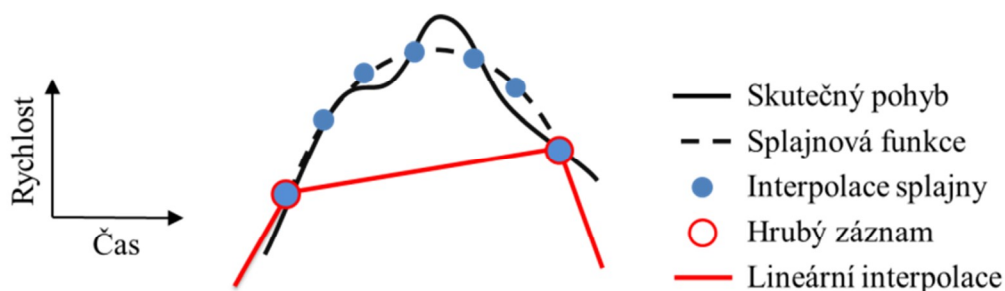
Sledovány byly prostorový pohyb (zrychlení, rychlost), vzájemná korelace jednotlivých složek. Vyčíslena byla Arias intenzita, lineární spektra odezvy, amplitudy a fáze získané krátkodobou Fourierovou transformací (STFT, viz. obr. D.1.1).

### D.2 ZVÝŠENÍ VZORKOVACÍ FREKVENCE ZÁZNAMU

Při výpočtu maximální dynamické odezvy konečnoprvkových modelů při užití reálných záznamů přírodního nebo technického seizmického děje není zcela zřejmé, zda je hustota diskrétních hodnot digitálního záznamu děje dostatečná. Pokud

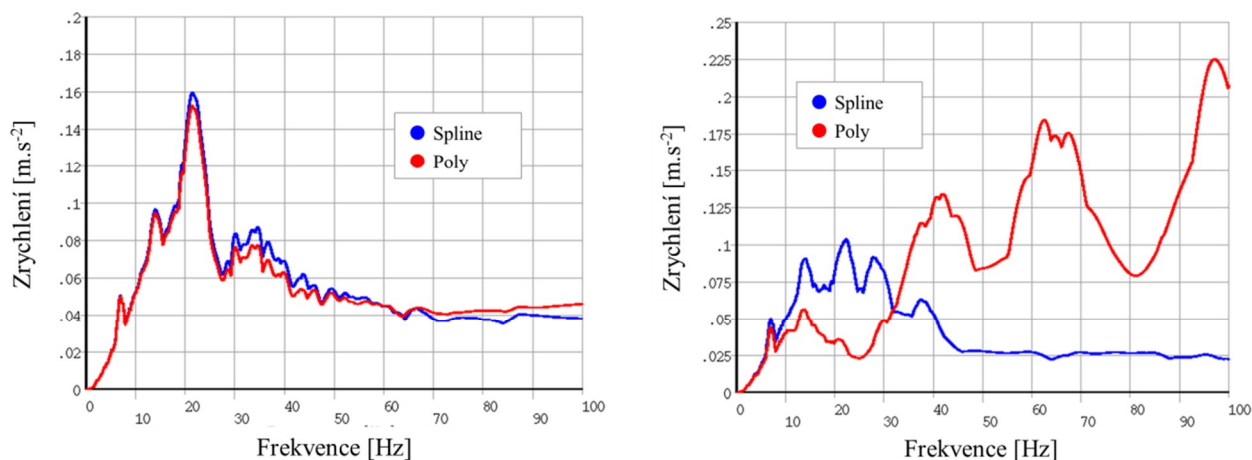


výpočtové kroky neodpovídají přesně časovým okamžikům, ve kterých je uložena funkce záznamu, je prováděna zpravidla lineární interpolace.



Obr. D.2.1 Detail na vlnu rychlosti záznamu, zvýšení hustoty interpolací splajny

Interpolace kubickými splajny zajišťuje, že výsledný vyhlazený záznam prochází přesně původními body záznamu a přitom je zachována spojitost v derivaci. Je zřejmé, že ani interpolace kubickými splajny nenahradí „zapomenutý“ skutečný pohyb, viz. obr. D.2.1. Ve výpočtu maximální odezvy modelu v historii dynamického děje hrají významnou roli následující parametry výpočtu: vzorkovací frekvence záznamu (resp. časový krok diskretních hodnot záznamu), časový krok integrace výpočtu, budící frekvence (seizmický děj obvykle obsahuje frekvence v rozmezí 0 až  $f_{ZPA}$ ), významné vlastní frekvence výpočtového modelu.

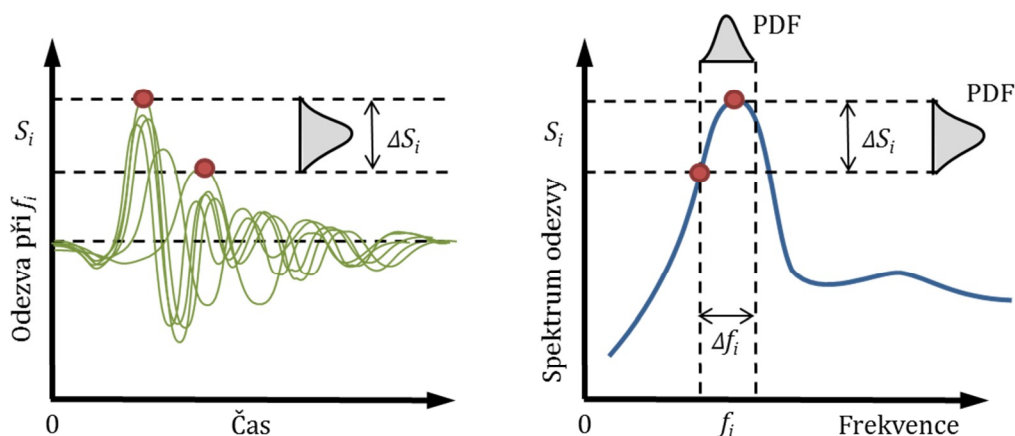


Obr. D.2.2 Spektra odezvy, vlevo: Jeroným 250 Hz, vpravo: Jeroným 50 Hz

Pro srovnání byla zvolena náhradní budící funkce. Jedná se o tři vlny popsané funkcí sinus s frekvencí 20 Hz a s maximální amplitudou  $1 \text{ m.s}^{-1}$ . Tato budící analyticky vyjádřená funkce byla ze zkušebních důvodů zaznamenána s různou vzorkovací frekvencí.

První sledovanou hodnotou ve srovnání byla chyba absolutní hodnoty rozdílu ploch záznamů vztažená k absolutní hodnotě plochy analytického záznamu. Dále byla sledována chyba v odezvě při různé vlastní frekvenci výpočtového modelu konstrukce pro frekvenční rozsah 0 až 100 Hz. Dalším sledovaným parametrem byla vzorkovací frekvence numerické integrace.

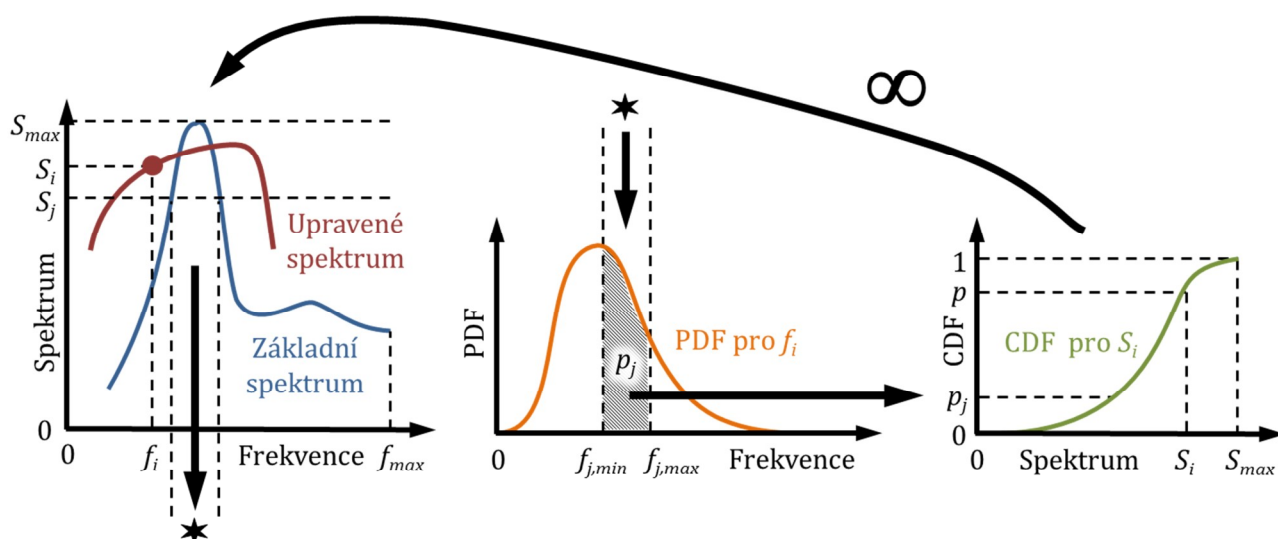
Zlepšení vzorkovací frekvence pomocí kubických splajnů bylo aplikováno na záznamech rychlostí děje Jeroným s hustotou vstupního záznamu rychlostí o vzorkovací frekvenci 250 Hz. Na základě originálního záznamu (červená) a na základě zlepšeného záznamu (modrá) byly generovány spektra odezvy, obr. D.2.2 vlevo. Na obr. D.2.2 vpravo je vyneseno srovnání spekter odezvy záznamu Jeroným, kterému byla ponížena vzorkovací frekvence na 50 Hz (červená). Tato funkce byla vzápětí zlepšena kubickými splajny (modrá). Zde je vidět výrazné zlepšení, i když celková kvalita spektra odezvy nedosahuje spektru záznamu s původní vzorkovací frekvencí 250 Hz.



Obr. D.3.1 Diference spektrální hodnoty vlivem změny frekvence modelu

### D.3 ÚPRAVA SPEKTER ODEZVY

Malá změna vstupních parametrů výpočtového modelu, může vést k výrazně odlišným výsledkům odezvy. Chování dynamického modelu při seizmickém ději je především závislé na jeho frekvenčních charakteristikách, které se vážou na nevynucené kmitání. Tedy zdánlivě deterministicky zvolené vstupní parametry ne vždy musí vést ke konzervativním výsledkům.

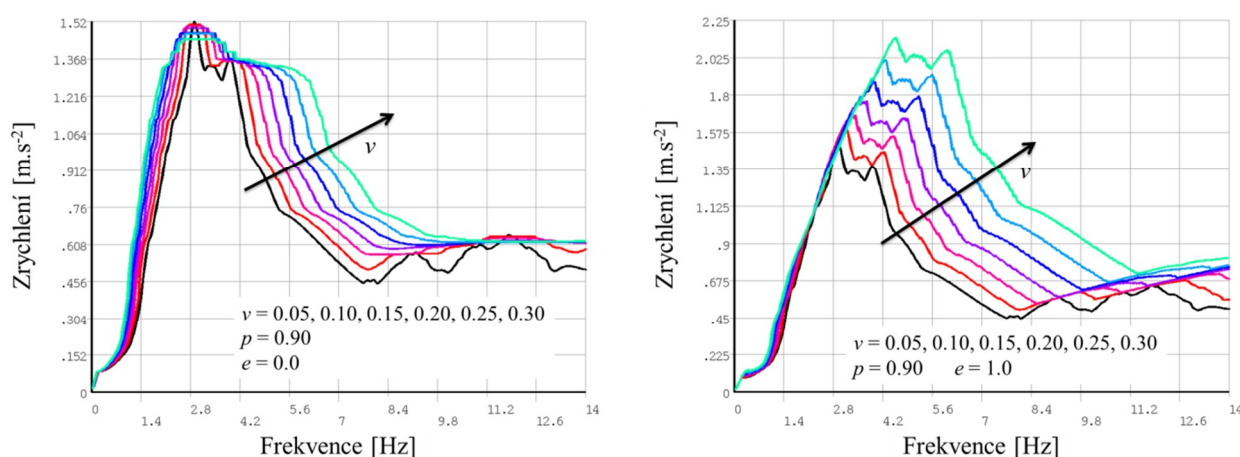


Obr. D.3.2 Postup úpravy spekter odezvy na základě pravděpodobnosti překročení

Konkrétní pravděpodobnostní rozdělení vlastní frekvence bylo založeno na numerickém výpočtu citlivostní analýzy s detailním modelem vícepodlažního panelového objektu. Velká pozornost byla věnována modelu založení a jeho rozdělení tuhostních parametrů. Variační koeficient modulu pružnosti jednotlivých vrstev se pohybuje kolem 30 %.

Za uvedených předpokladů je možné popsat pravděpodobnostní způsob úpravy spekter odezvy jehož schéma je uvedeno na obr. D.3.2.

Při úpravě spekter odezvy byl dále zohledněn vliv změny frekvence, kdy se předpokládá, že při změně vlastní frekvence muselo dojít ke změně hmotnosti nebo změně tuhosti. Případná změna hmotnosti má následně vliv na odezvu nejen v posunutí, ale i na odezvu ve vnitřních silách. Zda je změna frekvence způsobena hmotností nebo tuhostí je popsáno statistickou závislostí pro zpřesnění úpravy spekter.



Obr. D.3.3 Upravená spektra odezvy při různém variačního koeficientu rozdělení

## D.4 SYNTETICKÉ AKCELEROGRAMY

V této práci byl zvolen přístup, který se opírá o vytvoření analytické funkce, jejichž spektrum lineární odezvy odpovídá předem zvolenému spektru. V podstatě se jedná o zpětnou transformaci lineárního spektra odezvy na akcelerogram.

Realizovaná aplikace syntetických akcelerogramů na základě uvedeného algoritmu:

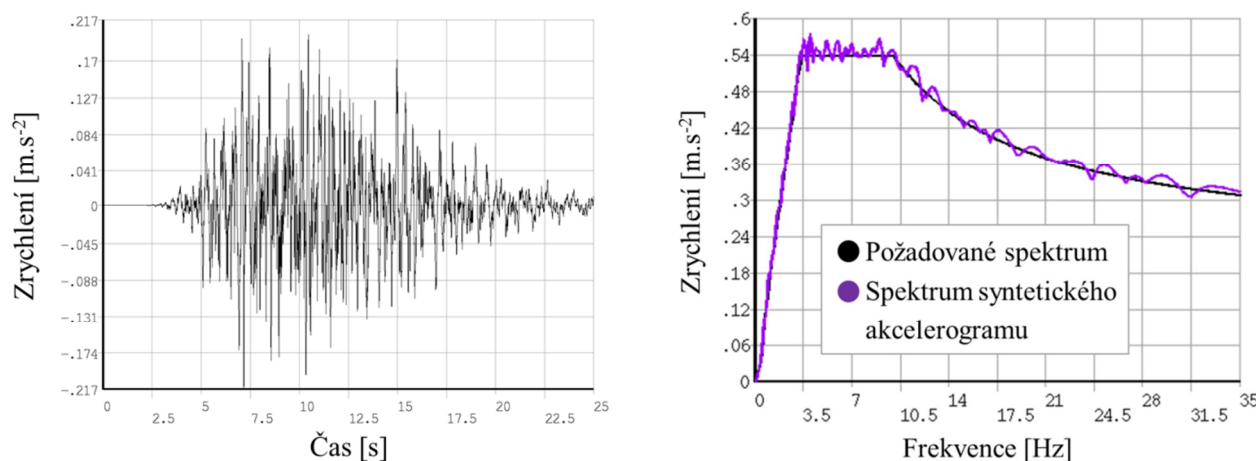
- A. syntetické akcelerogramy na základě návrhových spekter odezvy dle EC8 [16] užitá pro buzení experimentu modelového domu (viz. kap. D.5),
- B. syntetické akcelerogramy na základě podlažních spekter odezvy sestavených pro objekty elektrárny Mochovce pro nelineární výpočet uložení kompenzátoru (řešení provedla společnost Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o, výsledky výpočtu nejsou volně publikovány)

Základní myšlenka volby vícesložkové harmonické funkce a změna amplitud v čase byla převzata z [10]. Změna amplitud byla v závislosti na čase. Tvar funkce by měl zajistit, aby počet kmitů o velké intenzitě odpovídal počtu reálného zemětřesení. Toto je ale problematické, protože ve většině případů bude syntetický

akcelerogram generován na „nereálné“ spektrum odezvy (rozšířené, vyhlazené, ...). Z konzervativního hlediska jsou častěji používány syntetické akcelerogramy, které kmitají relativně dlouhý čas přibližně na úrovni PGA.

Při generování syntetických akcelerogramů jsou použity 4 přístupy (postupy) změny amplitudy na základě:

- 1) lokálního rozdílu spekter – základní iterační známá metoda jak získat přibližně amplitudy syntetického akcelerogramu;
- 2) přírůstku spektra při jednotkové změně amplitudy – sestavuje se matice jednotkových odezev, kdy na základě chyby rozdílu ve spekter odezvy a přenásobením matice odezev je možné obdržet přírůstek amplitud;
- 3) váženého průměru rozdílu spektra – na základě váženého průměru chyby spektra jsou měněny jednotlivé amplitudy;
- 4) kombinace – lineární kombinace 1) a 3) postupu.



Obr. D.4.1 Vlevo: generovaný akcelerogram, vpravo: odpovídající spektra odezvy

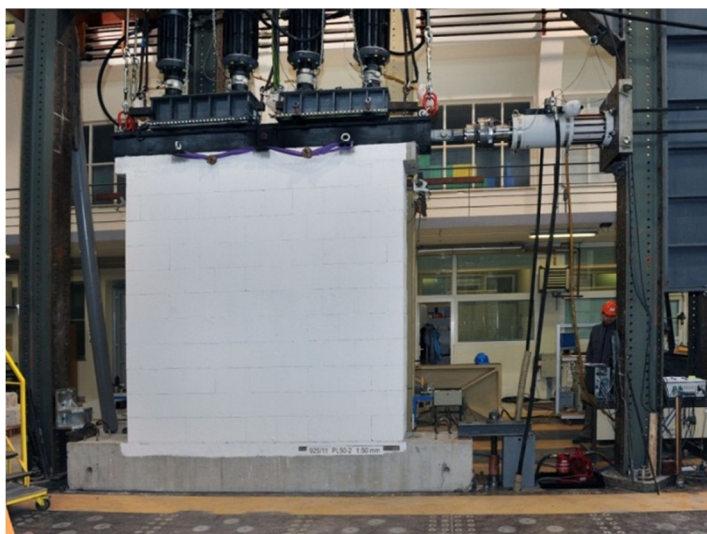
Přístup 1) je obdobný jako popsán např. v [10] a publikovaný v [1]. Přístup úpravy 2) až 4) jsou vlastní postupy, které jsou zaměřeny na nedostatky postupu 1).

## D.5 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

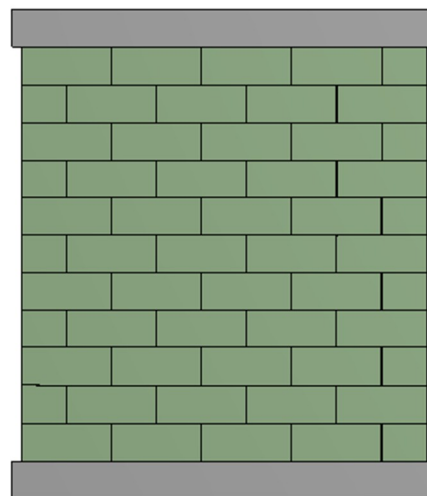
Část práce týkající se matematického modelování stěn zatěžovaných cyklickým vodorovným zatěžováním ve své rovině v kombinaci s diferencovaným svislým přitížením zděných stěn z přesného pórobetonového zdiva reálné velikosti a v modelovém rozměrovém měřítku 1:3, stejně jako variantní matematické modelování experimentálně ověřeného modelu zděného objektu 1:3 z téhož zdiva v podmínkách působení seismického zatížení nejvyšší možné úrovně v ČR podle EC8 [16], bylo provedeno pod vedením doc. Ing. Vlastislava Salajky, CSc. pro firmu TZÚS Praha na základě zadání doc. Ing. Jaromíra Kloudy, CSc., EURing., ředitele pro výzkum, vývoj a inovace TZÚS Praha, 0090-VVI Brno, Šumavská 31a, hlavního řešitele celého inovačního projektu řešeného v letech 2011 – 2012 (celkem 602 stran), pokračujícího dále v letech 2013-2015 na objednávku VVI centra



koncernu Xella, Německo – jako neveřejná práce s dílčími publikovatelnými výstupy [19].



Obr. D.5.1 Pohled na experiment PL50-2



Obr. D.5.2 Model PL35

Experimentální stěny i experimentální model objektu byly sestaveny pomocí pórobetonových zdících prvků výrobce: Xella, produktová řada: YTONG, produkt: Lambda, Theta. Jedná se o velmi nízké pevnostní třídy P2 (Lambda) a P1,8 (Theta). Zkoušky byly provedeny na certifikovaném pracovišti ZAG Ljubljana, Slovinsko (*Zavod za gradbeništvo Slovenije – Slovenian National Building and Civil Engineering Institute*) pod odborným dohledem doc. Ing. Jaromíra Kloudy, CSc., EURing.

### **Experimentální smykové zkoušky stěn**

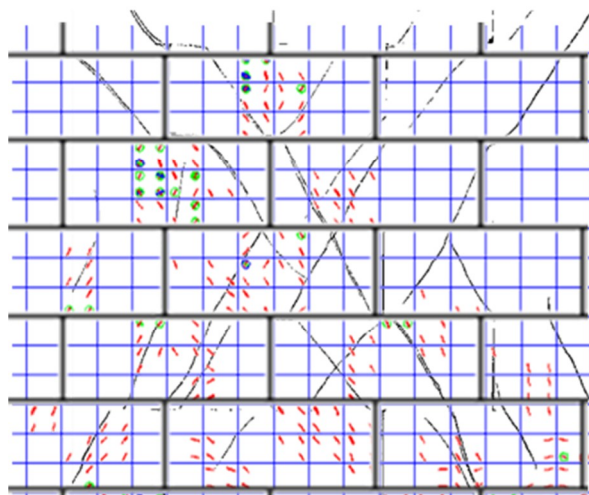
Provedeno bylo celkem 12 zkoušek stěn různé velikosti. Sledovány byly síly a posunutí, souhrn výsledků je uveden ve zprávě [19].

### **Numerická simulace zkoušek stěn**

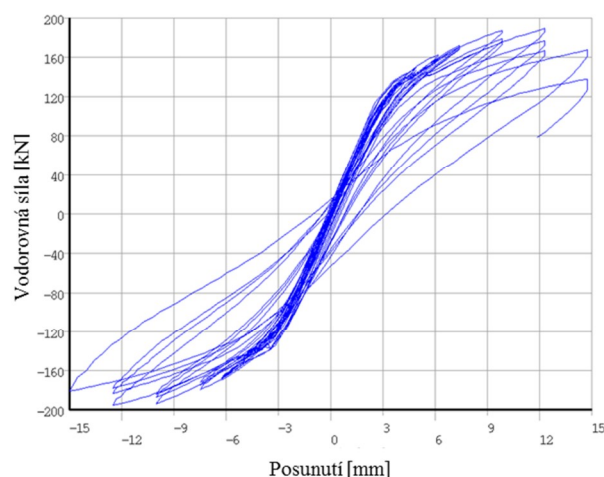
K vystižení kvazi statického chování experimentálních modelů stěn z autoklávovaného pórobetonu byly sestaveny metodou konečných prvků v programu ANSYS [20] výpočtové modely jednotlivých stěn. Výpočtové modely stěn z objemových konečných prvků zahrnují jednotlivé zdící prvky (pórobetonové tvárnice) včetně vodorovných a svislých spár.

Jedním z nejvýznamnějších parametrů ovlivňující výsledky zkoušek stěny při cyklické zatěžování je velikost momentu na spodním a horním okraji stěny. Velikost momentu je závislá na tuhosti vedení zatěžovacího trámu. Při volném naklápění moment v trámu vymizí, v případě tuhého vedení (vetknutí s vodorovným posuvem) je moment největší, přestože byla snaha při experimentu vynutit nulové pootočení. Tuhost naklápění trámu byla v modelu aplikována bilineární torzní pružinou [20], kdy počáteční torzní tuhost, tečná tuhost a hodnota momentu při změně tuhosti byla stanovena na základě měřených svislých sil v hydraulických válcích.

Materiálový model *Concrete* umožňuje v každém integračním bodě konečných prvků rozhodnout v jakém stavu se bod nachází: neporušený stav, trhлина, uzavřená trhлина. Tato vlastnost má velký vliv při cyklickém zatěžování na postupné snižování tuhosti v konkrétním směru. Podobně se chová i kontaktní model CZM [20]. V každém bodě kontaktního rozhraní algoritmus zaznamenává a respektuje historii zatěžování. Jakmile byla jednou překročena maximální soudržnost, kontaktní tuhost je trvale adekvátně snížena.



Obr. D.5.3 Srovnání s experimentem



Obr. D.5.4 Hysterezní chování stěny

Tab. D.5.1 Maximální smyková únosnost zdiva

Stěna	Výpočet			Měření při experimentu		
	$d$ [mm]	$H$ [kN]	$\phi$ [%]	$d$ [mm]	$H$ [kN]	$\phi$ [%]
PL50-1	11,3	154,6	0,41	5,2	179,9	0,18
PL50-2	6,9	185,6	0,25	7,1	187,1	0,25
PL35-1	7,5	185,4	0,27	5,8	157,1	0,21
PL35-2	10,0	160,7	0,36	7,3	128,9	0,26
PS50-1	12,5	63,8	0,45	11,1	74,7	0,39
PS50-2	15,0	50,5	0,55	18,2	47,4	0,64
PS35-1	12,4	61,4	0,45	9,8	58,8	0,35
PS35-2	15,0	51,5	0,55	12,0	42,8	0,42
ML-1	3,5	22,9	0,38	3,7	22,4	0,38
ML-2	3,0	17,6	0,33	4,2	15,1	0,43
MS-1	4,5	7,1	0,49	5,1	7,1	0,53
MS-2	5,5	6,1	0,60	10,3	5,0	1,07

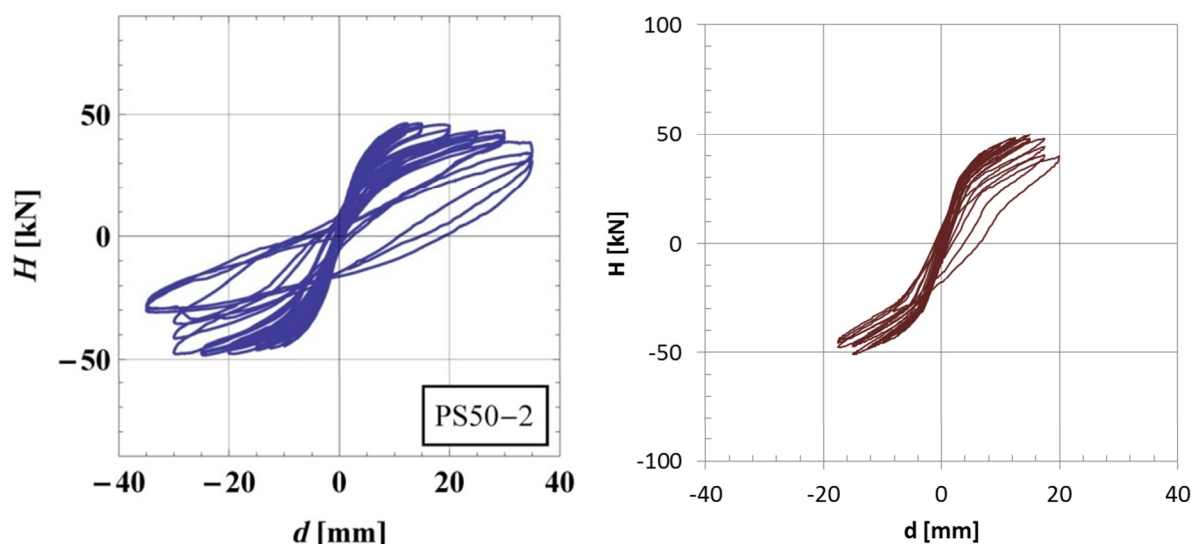
Použití prvků *SOLID65* s materiálovým modelem *Concrete* je dokumentováno jako velice nestabilní [20]. Míra užité stabilizace byla laděna velmi citlivě, aby



ovlivnění celkové únosnosti bylo zanedbatelné. Provedeny byly desítky testovacích citlivostních výpočtu, na kterých byly jednotlivé parametry laděny.

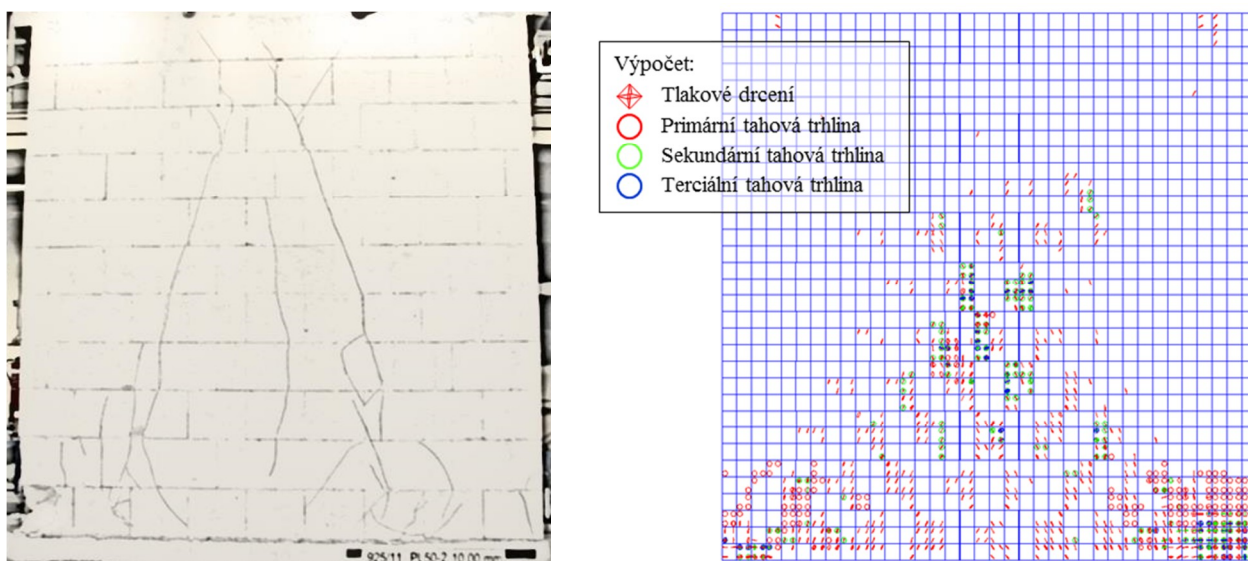
### Srovnání výsledků výpočtu stěn s měřením

V tab. D.5.1 je vypsáno srovnání výpočtu s měřením maximálních horizontálních vodorovné reakce  $H$ , při které byly dosaženy při vodorovném posunutí  $d$ , a poměrného posunutí  $d/h$ . Ze srovnání je patrná relativně dobrá shoda výpočtu s měřením ve fázi do významného porušení stěny.



Obr. D.5.5 Experiment PS50-2, vlevo:  $H$ - $d$  (měření), vpravo:  $H$ - $d$  (výpočet)

Na obr. D.5.5 je vykresleno v grafu průběh vodorovné reakce v závislosti na vodorovném posunutí z experimentu PS50-2 a z výpočtu. Výpočtem se povedlo dobře vystihnout hysteresezní chování stěny. Na obr. D.5.6 je zobrazeno porušení z vybraného experimentu PL50-2 a z výpočtu při přibližně stejné úrovni zatížení.



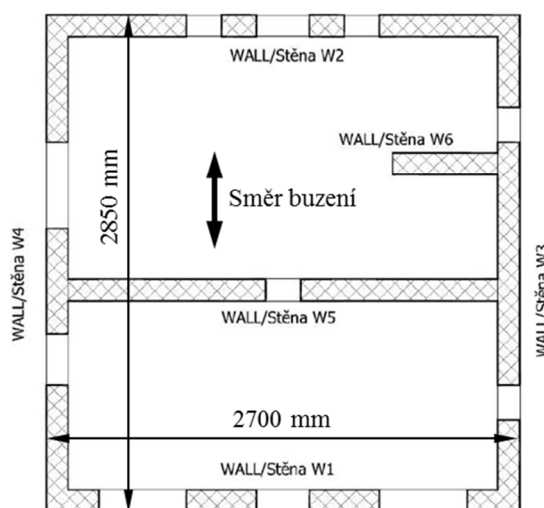
Obr D.5.6 Porušení PL50-2, vlevo: experiment, vpravo: výpočet

### Experimentální zkouška objektu v modelovém měřítku

Pro experimentální ověření chování objektu při seizmickém zatížení byl vyzděn modelový dům v rozměrovém měřítku 1:3 [19]. Snahou bylo vynutit reálnou napjatost ve zdivu (1:1) během dynamického děje. Z užitého modelového měřítka vyplývá, že vlastní frekvence modelového objektu teoreticky kmitá na 3x vyšší frekvenci (3:1) a k vyvození napjatosti na úrovni pevnosti zdiva je zapotřebí 3x větší zrychlení (3:1). Výsledná odezva v posunutí je pak teoreticky 3x menší (1:3).



Obr. D.5.7 Pohled na přípravu zkoušky



Obr. D.5.8 Půdorys modelu objektu

Modelový objekt v měřítku 1:3 byl vyzděn z pórobetonových prvků o rozměrech 200x83x125 mm, což odpovídá zhruba 1:3 velikosti prvků Lambda P2-350. Nestandardní rozměr prvků byl dosažen řezáním. Zdění bylo provedeno přesně podle předem předepsané vazby [19], kdy na vodorovné spáry bylo použito lepidlo na pórobeton, svislé spáry byly suché. Objekt byl vyzděn na vylehčené železobetonové podkladní desce, která byla tuze upevněna na vibračním stole. Vibrační stůl byl použit Schenk PL 160N s kapacitou  $\pm 160$  kN při rozsahu posunutí  $\pm 120$  mm.

Tab. D.5.2 Úroveň zatížení při experimentech

Označení	G010	G025	G050	G075	G100	G150	G200	G250	G300	G350
Úroveň z 0,1 g [%]	10	25	50	75	100	150	200	250	300	350
Požadované PGA [g]	0,010	0,025	0,050	0,075	0,100	0,150	0,200	0,250	0,300	0,350
Modelové PGA [g]	0,030	0,075	0,150	0,225	0,300	0,450	0,600	0,750	0,900	1,050
Vybuzené PGA [g]	0,014	0,027	0,125	0,167	0,242	0,466	0,696	0,684	0,736	0,818

Celkem bylo provedeno 10 zkoušek s různou úrovní zatížení na stejném experimentálním modelu [19]. Sledovány byly absolutní horizontální zrychlení měřené akcelerometry (Acc1 až Acc8) a absolutní horizontální posunutí (posunutí vztažená k podlaze haly) měřené snímači LVDT (L1 až L8), obr. D.5.10. Souhrn výsledků měření je uveden ve zprávě [19].

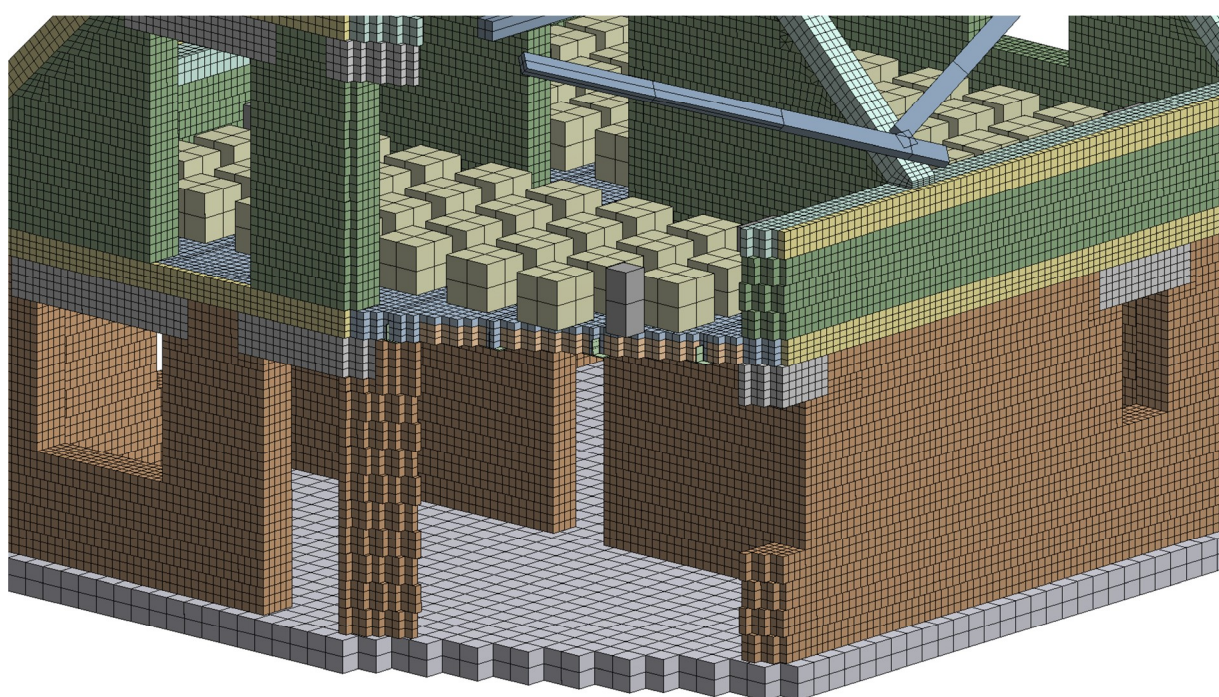


### Výpočtové modely domu

K vystižení dynamického chování provedeného experimentu rodinného domu v měřítku 1:3 byly sestaveny 3 globální výpočtové matematické modely v programu ANSYS [20]:

- Model O1 – detailně modelováno přízemí, strop i podkroví,
- Model O2 – detailně modelováno přízemí, zjednodušeně modelován strop a podkroví,
- Model O3 – zjednodušeně modelováno přízemí, strop i podkroví.

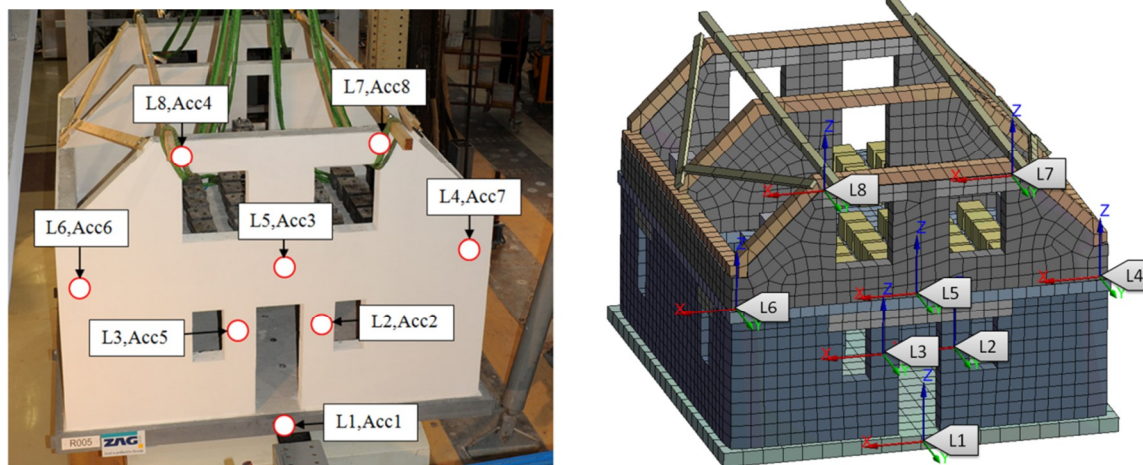
Geometrie modelů přesně odpovídá (včetně vazby zdících prvků) výkresové dokumentaci, na základě které byl postaven experimentální model a fotodokumentace zkoušeného modelového objektu pořízené během výstavby. [19]



Obr. D.5.9 Síť konečných prvků detailního modelu O1 – řez modelem

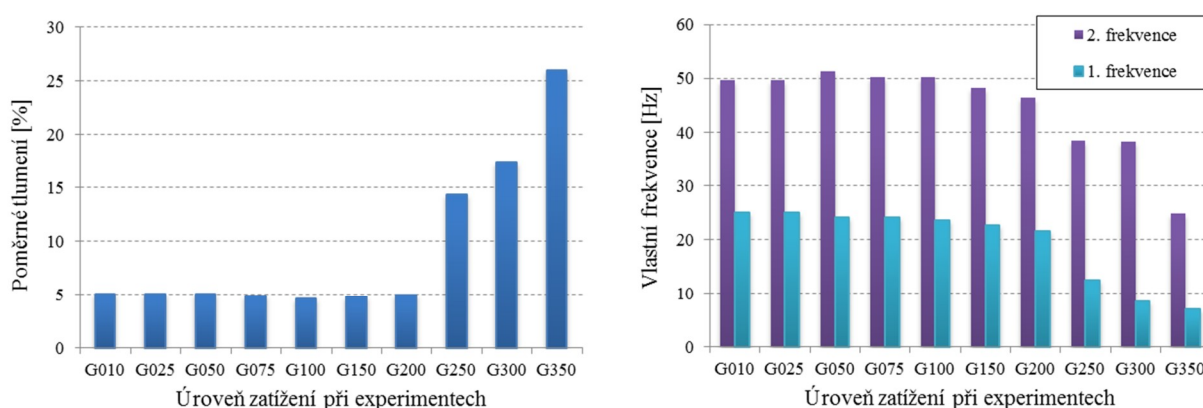
Detailní modelování stěnového systému (model O1 a O2) bylo provedeno obdobně jako u modelu stěn. Byly modelovány jednotlivé zdící prvky pokryty konečnými prvky *SOLID65*. Materiálové modely a kontaktní modely přesně odpovídají modelů stěn z prvků P2-350. Hustota sítě přesně odpovídá hustotě sítě použité při modelování stěn.

Zjednodušené modelování u modelů O2 a O3 spočívalo nahrazení stěnového systému nebo stropního systému skořepinovými prvky, které svou tuhostí odpovídají modelu O1 v lineární oblasti (ověřeno na dílčím výpočtovém modelu stropu). Materiálové vlastnosti náhradního skořepinového modelu byly mírně upraveny (snížení modulu pružnosti zdiva) tak, aby vlastní tvary kmitů a frekvence odpovídaly co nejvíce lineárnímu kmitání modelu O1, který respektuje volné svislé spáry ve zdivu.



Obr. D.5.10 Poloha snímačů, vlevo: experimentální model, vpravo: matematické model

Z prvních výsledků výpočtů vlastního kmitání a výpočtů v časové oblasti modelů O1 až O3 srovnaných s měřením v místech L1 až L8 (obr. D.5.10) se ukázalo, že uložení zkoumaného modelu při experimentu nelze považovat jako nepoddajné. Pro určení tuhosti uložení byla provedena analýza záznamu čidel L5 a L7 (obr. D.5.10) přes všechny měřené děje. Z výpočtu vlastních tvarů kmitů objektu je zřejmé, že dominantní kmitání v odezvě bude způsobeno především dvěma tvary s nejnižší vlastní frekvencí. Vzhledem k časové náročnosti výpočtu na modelech O1 až O3, byl sestaven náhradní model objektu dvoustupňovou soustavou (dále jen 2DOF). Hledány byly hmotnosti, tuhosti a poměrné tlumení modelu 2DOF. Samotné hledání parametrů bylo provedeno jednoduchou optimalizační metodou *Screening* v programu ANSYS [20]. Objektívni funkcí optimalizačních výpočtů byla chyba sumy čtverců rozdílů v jednotlivých časových krocích počítaného a měřeného relativního posunutí snímačů L5 a L7.

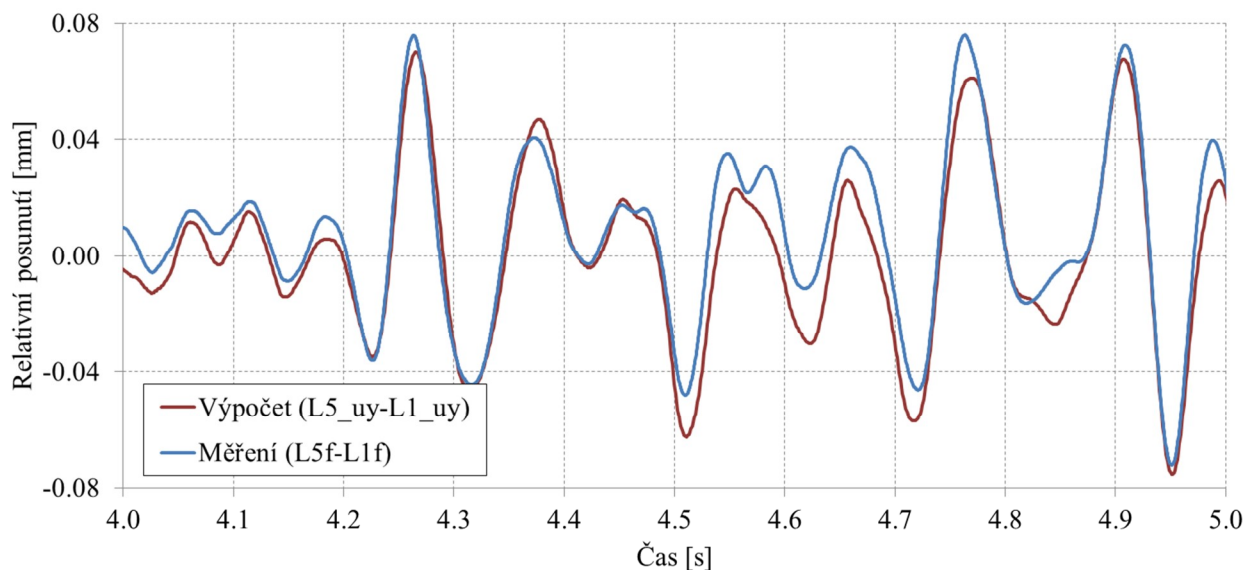


Obr. D.5.11 Poměrné tlumení a vlastní frekvence získané z měření

Z výsledných nalezených hodnot parametrů (obr. D.5.11) je zřejmé, že experimentální model až do úrovně zatížení G200 se choval lineárně pružně a nedochází k výraznému poškození. Nejvýraznější poškození došlo během dějů G250

až G350. U těchto úrovní zatížení docházelo k poškození postupně, vypočítané parametry tuhosti a tlumení odpovídají nejvíce oblasti kolem středu časového intervalu jednotlivých dějů.

Na základě vlastní frekvence získané analýzou měření byly modely O1, O2, O3 doplněny o pružné uložení (Winklerův model založení) tak, aby první vlastní frekvence odpovídala průměrné vlastní frekvenci experimentálního v oblasti dějů G010 až G075. Modely jsou dále označovány jako O1w, O2w, O3w. Z vyčíslených vlastních tvarů kmitů a vlastních frekvencí je zřejmá dobrá shoda modelů v lineární oblasti kmitání.



Obr. D.5.12 Průběh relativního posunutí L5 při G075, srovnání měření a výpočtu

### Srovnání výsledků výpočtu modelu objektu s měřením

Na obr. D.5.12 je zobrazena část průběhu relativního posunutí bodu L5 porovnaných s průběhem při měření G075. Vykresleny jsou měřené relativní posunutí snímače L5 vztažené k výsledkům snímače L1. Z obdobného místa v numerickém modelu O3w jsou odečteny a vykresleny hodnoty posunutí.

Ze srovnání průběhů je patrné, že numerická simulace dobře vystihuje chování objektu při experimentu. Především první vlastní frekvence odpovídající prvnímu ohybovému vlastnímu tvaru velmi obdobně reaguje na pohyb základu. Rozdíly v relativním posunutí jsou způsobeny nepřesností modelu, ale také nepřesností měření.

Detailní matematické modelování umožnilo popsat a lépe pochopit mechanické chování smykově zatížených stěn z pórobetonových zdících prvků tak i chování vyzdřeného celého objektu.

## D.6 EXTRAPOLACE NA OBJEKT S REÁLNÝMI ROZMĚRY

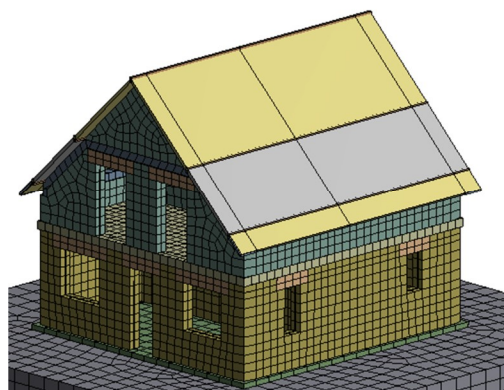
Pro extrapolaci mechanického chování při seizmickém ději na objekt s reálnými rozměry byly vytvořeny tři matematické modely OR3a, OR3b, OR3c (viz. obr. D.6.1) v programu ANSYS [20]. Modely se lišily předpokládanou hmotností a



tuhostí podzákladí tak, aby byla vyšetřena maximální odezva. Všechny modely OR3 vychází z modelu O3, bylo zvětšeno měřítko (3x), byl odebrán model desky a závaží, byl přidán model základová konstrukce, podzákladí, střešní konstrukce, konstrukce schodiště, hmotnosti podlah, užité zatížení a oken.



Obr. D.5.13 Borcení během děje G350



Obr. D.6.1 Síť konečných prvků modelu

Uložení modelů bylo modelováno nehmotným blokem zeminy v interakci se základy objektu. Maximální/minimální hmotnost byla volena za předpokladu užití těžkých/lehkých střešních krytin, užití těžkých/lehkých konstrukcí podlah, maximálních/minimálních užitných podlahových hmotností. Změna hmotnosti byla aplikována především změnou objemové hmotnosti stropů a střešní krytiny.

Byl proveden výpočet statické odezvy modelů OR3a, OR3b a OR3c při zatížení vlastní tíhou a výpočet dynamické odezvy při zatížení spektrem odezvy EC8. Výsledky výpočtů byly kombinovány: statika ± dynamika. Buzení bylo aplikováno pouze ve směru globálního systému modelu, což odpovídá buzení experimentálního modelu. Největší dynamická odezva byla zaznamenána na modelu OR3b.

Bylo provedeno srovnání výsledků výpočtu simulace lineárního chování experimentálního modelu na úrovni zatížení 200 % (G200 - limitní zatížení, při kterém experimentální model vykazuje lineární chování) s výsledky výpočtu modelu objektu s reálnými rozměry se zatížením dle EC8. Model reálného objektu byl sestaven ve variantách, které zohledňují nejistoty především ve hmotnosti objektu a tuhostních vlastnostech podzákladí.

Srovnáním odezvy na modelech ve skutečném a modelovém měřítku poskytuje informaci o tom do jaké míry předpoklady modelového měřítka a pouze jednosměrného buzení ovlivnily výslednou odezvu. Z uvedených výsledků pouze při horizontálním buzením ve směru delší osy objektu vykazuje model OR3b největší dynamickou odezvu. Shodou okolností je tato odezva velmi srovnatelná s odezvou modelu O3w na úrovni zatížení G200, kdy byl experimentální objekt ještě nevykazoval rozsáhlé poškození. Zesílení dynamické odezvy vlivem prostorového buzení je zhruba 15 %. Extrémní poškození reálného objektu při návrhovém zatížení odpovídá poškození při experimentu na úrovni mezi G200 a G250. Objekt bude poškozen četnými trhlinami, ale nedojde k jeho celkovému kolapsu.



## ČÁST E – ZÁVĚRY

V disertační práci byly představeny postupy, metodika řešení úloh v oblasti určení odezvy stavebních konstrukcí na seizmickém zatížení. Toto je spojeno s praktickými požadavky na výpočty seizmické odezvy v souladu s přijetím normy ČSN EN 1998 a jejích částí. Vychází se z problémů definice modelu seizmického buzení a jeho aplikace na řešení odezvy zděných konstrukcí z pórobetonových tvárníc nízké pevnosti.

Při definování buzení se využívají akcelerogramy nebo elastická spektra odezvy. V oblasti výpočtu odezvy při užití záznamů pohybu podloží jsou uvedeny postupy, jak rozhodnout, zda tyto záznamy jsou vhodné pro řešení. Záznamy vykazují řadu nedostatků. Nedostatek hustoty záznamu byl řešen doplněním mezilehlých hodnot na základě kubických splajnů. Zvýšení vzorkovací frekvence záznamu vykazuje vždy zpřesnění odezvy, ale také současně poukazuje na případnou nedostatečnost v hustotě záznamu. Pro praktické použití byly naprogramovány a odladěny skripty v prostředí ANSYS pro automatizované doplnění hustoty záznamu pohybu podloží.

Nejistoty v matematickém modelování při výpočtu seizmické odezvy není běžnými postupy možné shrnout do jednoznačného deterministického výpočtu odezvy. Proto byl navržen postup pravděpodobnostní úpravy spekter odezvy. Upravená spektra lze použít v deterministickém výpočtu odezvy na seizmické zatížení, kdy je známo či odhadnuto pravděpodobnostní rozdělení parametrů modelu, které ovlivňují dominantní vlastní frekvence. Ukázalo se, že úprava spektrálních hodnot je ve většině případů mnohonásobně méně náročná na výpočtový čas ve srovnání s běžnými simulačními stochastickými metodami. Vhodnost postupů byla testována a ověřena na podrobném parametrickém FE modelu typické stavební konstrukce s užitím reálných statistických rozdělení parametrů konstrukce a podzákladí. Dynamické výpočty byly realizovány v programu ANSYS. Byly programovány a odladěny algoritmy, které automatizovaně upravují funkce spekter odezvy v závislosti na vstupních parametrech zahrnující variační koeficient náhodného rozdělení, pravděpodobnost překročení hodnoty spektra a korelace rozdělení hmotnosti a tuhosti. Pravděpodobnostní úprava spekter odezvy je široce užitelná v praxi při výpočtech odezvy konstrukcí s modelem zatížení v podobě základových a podlažních spekter odezvy.

Při řešení speciálních a nelineárních úloh dynamické odezvy se vychází z řešení s využitím záznamů pohybu. Jsou většinou známa pouze spektra odezev. Byl navržen postup pro generování syntetických akcelerogramů ze zadaných spekter, který vylepšil dříve známé algoritmy. Podařilo se vytvořit syntetické akcelerogramy lépe vystihující odezvu v oblasti vyšších frekvencí. V tomto postupu amplitudy harmonických funkcí jsou měněny v závislosti na celém frekvenčním rozsahu spektra odezvy. Tyto syntetické akcelerogramy byly užity v praktických aplikacích a při nelineárních výpočtech na experimentálně sledovaném objektu. Naprogramované a odladěné postupy pro generování akcelerogramů jsou obecně využitelné pro sestavení nekorelovaného prostorového modelu zatížení. Lineární odezva s využitím

těchto akcelerogramů se prakticky shoduje s odezvou získanou pomocí původních elastických spekter odezvy.

V oblasti seizmické odolnosti zděných konstrukcí z pórobetonových nízkopevnostních tvarovek byly provedeny rozsáhlé dynamické nelineární výpočty v programu ANSYS. Výpočty zahrnovaly simulace chování zděných experimentálních stěn při smykovém cyklickém zatížení. Bylo sestaveno 12 detailních FE modelů simulující provedené experimenty. Zkoušené přístupy modelování byly odladěny až na úroveň, kdy je možné postihnout fáze porušování. Detailní modely stěnových systému byly sestaveny pomocí FE modelů zdicích prvků s konstitutivním vztahem zahrnující křehké porušení. Interakce zdicích prvků byla modelována kontaktními elementy umožňující delaminaci při porušování. Vypočítané pracovní diagramy jednotlivých stěn odpovídají hystereznímu chování experimentů až do prvních fází porušování a to včetně cyklického porušování. Z výsledků výpočtů je patrné, že bylo dosaženo dobré shody s měřeními. Porovnávaly se hodnoty smykových únosností a deformací v celém souboru experimentů. Unikátní experimenty byly provedeny na certifikovaném pracovišti ZAG Ljubljana, Slovinsko pod odborným dohledem Doc. Ing. Jaromíra Kloudy, CSc.. Možnosti matematického modelování dovolují sledovat a analyzovat jednotlivé vlivy na chování stěn. Mezi ně například patří: vliv pevnosti pórobetonu, vliv plastické rezervy pórobetonu, vliv pevnosti spojovacího materiálu, vliv tuhosti spojovacího materiálu, vliv svislých (suchých) mezer atd.. Popsané postupy řešení stěn z pórobetonových prvků jsou využitelné v praxi v oblasti seizmických výpočtů stavebních konstrukcí ze stěnových systémů.

Otestovaný přístup při matematickém modelování stěn ze zdicích prvků byl aplikován při sestavení výpočtových modelů využitých při simulaci dynamického chování experimentálně sledovaného domu. Fyzický model zděného domu byl vytvořen v modelovém měřítku 1:3. Při matematickém modelování bylo shodně užito modelování vazeb zdicích prvků z pórobetonu. Zdicí prvky jsou složeny z objemových konečných prvků. Vzájemná interakce mezi zdicími prvky byla modelována kontaktními prvky. Detailní matematický model objektu umožňoval porušování ve zdicích prvcích a i delaminaci spojení v oblastech kontaktů. Výpočet odezvy byl proveden přímou integrací pohybových rovnic při buzení akcelerogramem odpovídajícím buzení při experimentu. Pro oblast lineárního chování byly sestaveny zjednodušené modely domu s lineárními materiálovými vlastnostmi. Tento postup dovolil získat více výsledků z řešení simulace experimentu. Z výsledků výpočtů je patrná velmi dobrá shoda s výsledky experimentů z hlediska hodnot přemístění a zrychlení.

Výpočty v modelovém měřítku 1:3 byly dále pomocí matematického modelování extrapolovány na reálný objekt včetně založení. Shodou okolností vypočítaná odezva při jednosměrném buzení spektry odezvy s referenčním zrychlením 0,12 g je srovnatelná s odezvou na numerickém modelu v měřítku 1:3 při zatížení na úrovni zatížení G200. Další výpočet odezvy modelu reálného byl proveden při prostorovém buzení opět referenční špičkové zrychlení 0,12 g v souladu s ČSN EN 1998.

Vypočtený nárůst dynamické odezvy vlivem prostorového buzení a zahrnutí interakce s podložím je až 15 %. Poškození reálného objektu při návrhovém zatížení lze očekávat na úrovni poškození experimentálního domu při úrovni zatížení G200 až G250. Lze usuzovat, že reálný objekt bude při tomto zatížení poškozen četnými trhlinami, ale nedojde k jeho celkovému kolapsu. Na základě srovnání výsledků extrapolace s výsledky simulací experimentu lze usuzovat, jak se bude chovat reálný objekt při seizmickém ději na horní hranici zatížení definované pro naše území platnou normou ČSN EN 1998. Výsledky uvedeného výzkumu a analýzy jsou využitelné pro stanovení použitelnosti pórobetonových zdicích prvků pevnostních tříd P2 a P1,8 pro nosné stěny u zděných objektů v seizmických oblastech na území ČR.

Představené postupy a metodiky řešení odezvy na seizmické zatížení lze obecně aplikovat při návrhu a posuzování seizmicky namáhaných staveb. Modelování konstrukcí z pórobetonových dílců lze rozšířit na komplikovanější modely stěn a konstrukcí sestavených z přesných pálených zdicích prvků POROTHERM 44 T Profi. Experimentální výzkum v současné době probíhá. Při modelování a výpočtu konstrukcí z křehkých keramických prvků s dutinami lze očekávat celou řadu nových problémů, které by byly součástí dalšího výzkumu.

---

## Vybraná autorská publikační činnost

- [1] ČADA Z., SALAJKA V., KANICKÝ V., *Odezva stavebních objektů na seizmické buzení s využitím syntetických akcelerogramů*. Transactions – Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební. Ostrava 2009, ISSN 1213-1962.
- [2] ČADA Z., SALAJKA V., HRADIL P., KANICKÝ V., *Účinky přírodní a technické seizmicity na stavební konstrukce v ČR*. Transactions of the VŠB – Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební, Ostrava, 2010, ISSN:1213-1962.
- [3] ČADA Z., SALAJKA V., HRADIL P., *Pravděpodobnostní přístup úpravy spekter odezvy seizmického děje*. International Journal EGRSE, number 2, Czech Association of Geophysicists. Stran: 12, Ostrava, 2011, ISSN:1803-1447.

## Seznam vybraných užitých zdrojů

- [4] BITTNAR, Z., ŘEŘIČHA, P., *Metoda konečných prvků v dynamice konstrukcí*. Praha: SNTL, 1981.
- [5] CHOPRA A. *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Pearson Prentice Hall. (2007) ISBN:013156174X.
- [6] GUPTA, A. K., *Response Spectrum Method. In Seismic Analysis and Design of Structures*. United States of America: CRC Press, 1992.
- [7] PAULAY T, PRIESTLEY M. J., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. Wiley-Interscience, 1992, ISBN:0471549150.
- [8] FRUMENTO S., *Interpretation of Experimental Shear Tests on Clay Brick Masonry Walls and Evaluation of Q-factors for Seismic Design*. (2009) ISBN:8861980341.
- [9] BETBEDER-MATIBET J. *Seismic Engineering*. Wiley-ISTE, 2008, ISBN:1848210264.
- [10] ELNASHAI A. S., SARNO L., *Fundamentals of Earthquake Engineering*. Wiley-ISTE, 2012, ISBN:9780470024836.
- [11] KALÁB Z., KNEJZLÍK J., *Field Measurement of Surface Seismic Vibrations Provoked by Mining in Karvina Region*. Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc., M-29(395), Warszawa, 185-194, 2006.
- [12] KALAB Z., LEDNICKÁ M., *Seizmické zatížení lokality dolu Jeroným v období kraslického roje v roce 2008*. Hornická Příbram ve vědě a technice [CD-ROM], 2009, s. 1-7. 978-80-254-5090-1.

- 
- [13] KŘÍŽEK M., *Zemětřesení na území České republiky*. V zorném poli geografů. Geografické rozhledy 2/07-08, ISSN:12103004.
- [14] JOSHI A., KURNAR B., SINVAHAL A., SINVAHAL H., *Generation of Synthetic Earthquake Accelerograms by Modelling of Rapture Plane*, ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 390, Vol. 36, No. 1, March 1999, pp. 43-60.
- [15] WILLAM K. J., WARNKE E. D., *Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete*. Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering. Vol. 19. ISMES. Bergamo, Italy. p. 174. 1975.
- [16] ČSN EN 1998, *Navrhování konstrukcí odolných proti zemětřesení*. Český normalizační institut, Praha, 2006.
- [17] ČSN EN 1996, *Navrhování zděných konstrukcí*. Český normalizační institut, Praha, 2007.
- [18] ZEDNÍK J., *Zemětřesení*. Brožůrka, Geofyzikální ústav Akademie věd ČR, 2006.
- [19] Klouda, J.K. & kol., *Experimentální a teoretické ověření a stanovení návrhových parametrů zdiva z přesných zdicích prvků YTONG Lambda a YTONG Theta výrobce XELLA CZ s.r.o.*. In: Situační zpráva 3 o stavu řešení inovačního projektu >SEZ - X02< 04 / 2011, Závěrečná zpráva, červen 2012, 212 stran, TZÚS 0090-VVI Brno.
- [20] ANSYS, Inc., *Release 13.0 Documentation for ANSYS*. SAS IP, Inc 2013.
- [21] ANDERSON D., BRZEZ S., *Seismic Design Guide For Masonry Buildings*. Canadian Concrete Masonry Producers Association, 2009.
- [22] *U.S. Geological Survey* <<http://www.usgs.gov>>.
- [23] *Geofyzikální ústav AV ČR* <[www.ig.cas.cz](http://www.ig.cas.cz)>.
- [24] *European Strong-Motion Data* <[http://www.isesd.hi.is/ESD\\_Local](http://www.isesd.hi.is/ESD_Local)>.