



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

**STATICKÁ ANALÝZA ŽELEZOBETONOVÝCH STĚN
S DODATEČNĚ PROVEDENÝMI OTVORY**

STATIC ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE WALLS WITH ADDITIONALLY MADE
OPENINGS

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ondřej Šimek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miloš Zich, Ph.D.

BRNO 2023

KLÍČOVÁ SLOVA

beton, dodatečný otvor, stěna, výplň, experiment, nelineární analýza

KEYWORDS

concrete, additional opening, wall, infill, experiment, nonlinear analysis

© Ondřej Šimek, 2023

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební
Ústav betonových a zděných konstrukcí

ISBN 80-214-
ISSN 1213-4198

OBSAH

1	Úvod	3
2	Současný stav problematiky	4
2.1	Historický vývoj	4
2.2	Panelové stěny s otvorem	5
2.3	Ztužující výplňové stěny	7
3	Cíle disertační práce	8
4	Panelové stěny s otvorem	9
4.1	Experimentální a numerické ověření stěn s dodatečně provedenými otvory	9
4.2	Metodika pro posouzení stěn s dodatečně provedenými otvory	11
5	Ztužující výplňové stěny s otvorem	14
5.1	Experimentální a numerické ověření výplní s otvory	14
5.2	Odvození ekvivalentní šířky vzpěry ztužující výplňové stěny s otvorem	15
6	Závěr	18
6.1	Shrnutí práce	18
6.2	Doporučení pro další výzkum a vývoj	20
7	Seznam použité literatury	20
	Curriculum vitae	23
	Abstrakt	25

1 ÚVOD

Bytové domy jsou v současnosti v České republice, ale i jinde ve světě nejrozšířenější formou bydlení. U nás je tento typ budov zastoupen v naprosté většině panelovými objekty, které se stavěly během druhé poloviny minulého století. Nároky na kvalitu bydlení však neustále celosvětově rostou a tyto i mnohdy staré, vybydlené byty již nejsou atraktivní a nevyhovují moderním architektonickým standardům. Běžně je tento problém řešen například i pomocí vytváření dodatečných otvorů za účelem uvolnění dispozice, nebo propojením samotných bytových jednotek.

Zásahem do nosné stěny za účelem vytvoření dodatečného otvoru, ať už dveří či oken, je aktivně zasahováno do statického systému nejen dotčené stěny, ale i celého objektu. Otvory je nutno provádět na základě opětovného statického posouzení celého objektu, nelze je provádět zcela libovolně [1]. Přepočty celého objektu mohou být časově i finančně dosti náročné. Jsou komplikované i různými vlastnickými vztahy jednotlivých bytů nad sebou. Statik často nemá ani dostatek informací o stavu konstrukcí všech bytů nad nebo pod prováděným otvorem [1].

Podobná situace vzniká v budovách, jejíž nosný systém tvoří skeletová konstrukce skládající se ze sloupů a průvlaků. Konstrukce tohoto typu je zapotřebí ztuzit vůči účinkům vodorovných zatížení (vítr či zemětřesení). Ke ztuzení se používají např. ztužující výplňové stěny, cihelné či betonové. Požadavek investora na provedení otvoru do těchto stěn může nastat i v tomto případě.

Stěnové prvky lze obecně nalézt v mnoha konstrukčních systémech různých typů. Tato disertační práce se však bude zabývat jen dvěma. Prvním tématem zájmu budou konstrukční systémy tvořené převážně stěnovými prvky, druhým pak skeletové konstrukce se ztužujícími stěnovými prvky. Obě témata se však zabývají problematikou dodatečně prováděných otvorů v železobetonových stěnách. Práce je rozdělena do dvou podtémat. První téma je soustředěno na stěny v konstrukcích s převažujícím stěnovým systémem, viz kap. 4. Druhé pak na stěny, jejíž hlavním úkolem je ztuzení konstrukcí skeletových systémů, viz kap. 5.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

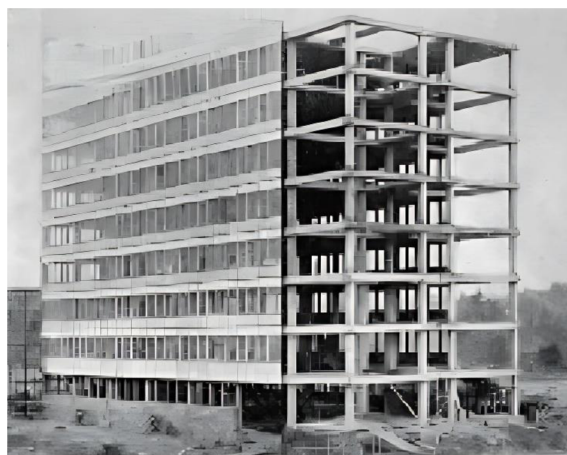
2.1 Historický vývoj

V České republice probíhala v minulosti rozsáhlá výstavba bytových domů panelovou technologií, zejména v letech 1957 až 1992, přičemž výstavba dosahovala největší intenzity v 70. a 80. letech. Za toto období bylo postaveno více než 80 tisíc panelových domů různých velikostí a variant. Hlavním rysem panelového systému byla implementace příčného systému nosných stěn. Výhodou tohoto uspořádání nosných stěn bylo „otevření“ obvodových konstrukcí a vytváření průčelí s průběžnými pásy oken a parapetů. Tento systém však částečně omezil jistou variabilitu uspořádání bytových jednotek a jediným způsobem propojení sousedních obytných prostor skrz příčné nosné stěny bylo pomocí otvorů [2].

V současné době začíná v České republice částečná renesance ve výstavbě panelových domů, viz Obr. 2.1. Pokud tento trend bude pokračovat, tak by měl být kladen důraz na moderní požadavky pro bydlení, zejména na rozmanitost dispozic, popř. na variabilitu jednotlivých bytů. Tím je myšlena možnost provádění dodatečných otvorů bez složitějších úkonů. Svislé nosné stěny těchto objektů – panely, jsou namáhány převážně svislým tlakem s malou excentricitou. Tento způsob zatížení často umožňoval návrh stěnových panelů z prostého, případně ze slabě vyztuženého betonu.



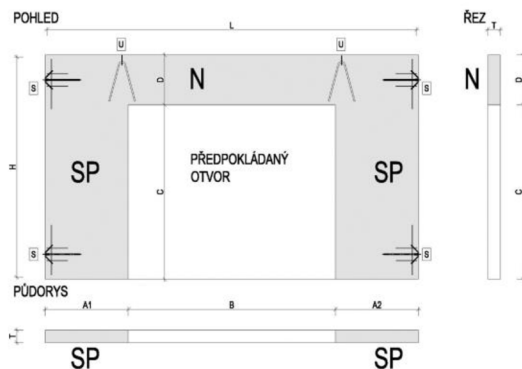
Obr. 2.1 Panelový dům (výstavba) [3]



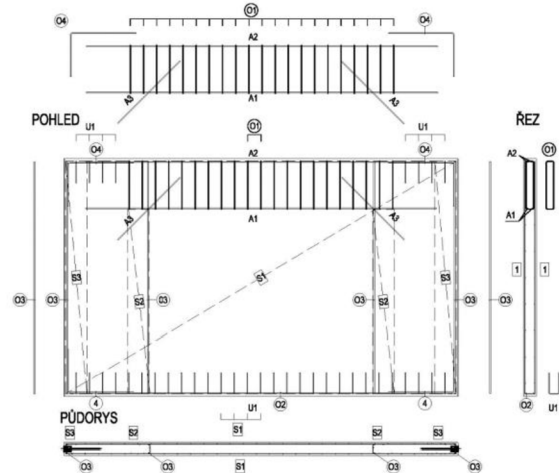
Obr. 2.2 Železobetonový montovaný skelet [4]

Obdobná situace vzniká u konstrukcí skeletového typu, viz Obr. 2.2. Oddělení jednotlivých prostorů je prováděno výplněmi, které mohou být vyzděné nebo betonové. Pokud jsou ztužující výplňové stěny volně vloženy do rámu skeletu, tak jsou, obdobně jako stěny panelových objektů, rovněž namáhány převážně tlakem. Vyztužení výplní bez otvorů lze tak provádět obdobným způsobem jako tomu je u panelových stěn.

Jako řešení výše uvedených problémů pro budoucí vystavované objekty se nabízí implementace tzv. „spící výtzuže“. Je to výtzuž, která je již při výrobě nachystána ve stěně pro situace, kdy bude do stěny v budoucnu vyřezán dodatečný otvor. Nadpraží (N) je tak vyztuženo na případné ohybové namáhání a skryté pilíře (SP) jsou vyztuženy na koncentrované tlakové namáhání, viz Obr. 2.3 a Obr. 2.4. Tímto řešením by teoreticky mohlo být vyřešeno posouzení konstrukce s dodatečnými otvory již ve fázi prováděcího projektu budovy. Variabilitou novodobých panelových objektů s implementovanou „spící výtzuží“ se zatím v experimentální fázi zabývá např. firma S.O.K. stavební, s.r.o. v Třebíči [5]. Eventuálně lze k řešení dodatečných otvorů použít některé s již používaných metod, jako např. dodatečně vkládaná výtzuž, ocelové svařence, či FRP lamely.



Obr. 2.3 Schéma panelu se skrytými pilíři



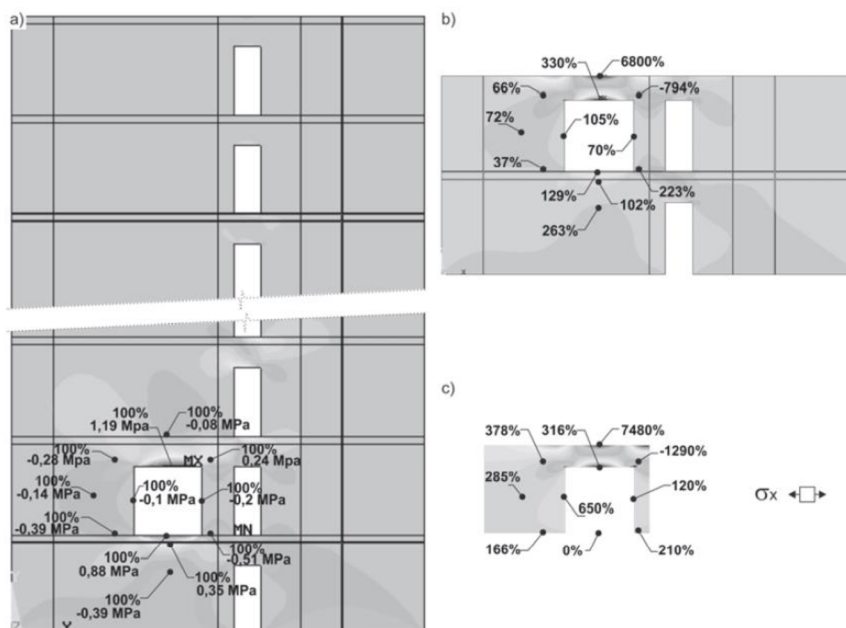
Obr. 2.4 Schéma vyztužení panelu spicí vyztuží

2.2 Panelové stěny s otvorem

Při návrhu dodatečně prováděných otvorů je třeba vycházet ze statické analýzy představující vyšetřovanou konstrukci. V případě objektů skládajících se ze stěnových dílců je na místě zohlednit všechny okolnosti, které mohou mít vliv na výpočetní model.

Rozdíly v rozložení napětí kolem dodatečného otvoru jsou z modelů zřejmé. Kdy v případě a) má spolupůsobení panelů příznivý vliv na rozložení napětí ve stěně, kdežto v případech b) a c) je zanedbán roznos zatížení z pater nad dodatečným otvorem, dochází tak ke značné koncentraci napětí, viz Obr. 2.5. Zanedbání spolupůsobení celého výseku stěny konstrukce může tedy zkreslit výsledky numerické analýzy. Uvažováním spolupůsobení všech panelů ve výseku stěny lze vyjádřit vliv „stěnového efektu“, za pomoci kterého je zatížení rozneseno vzhledem k dílčí tuhostem jednotlivých částí stěny.

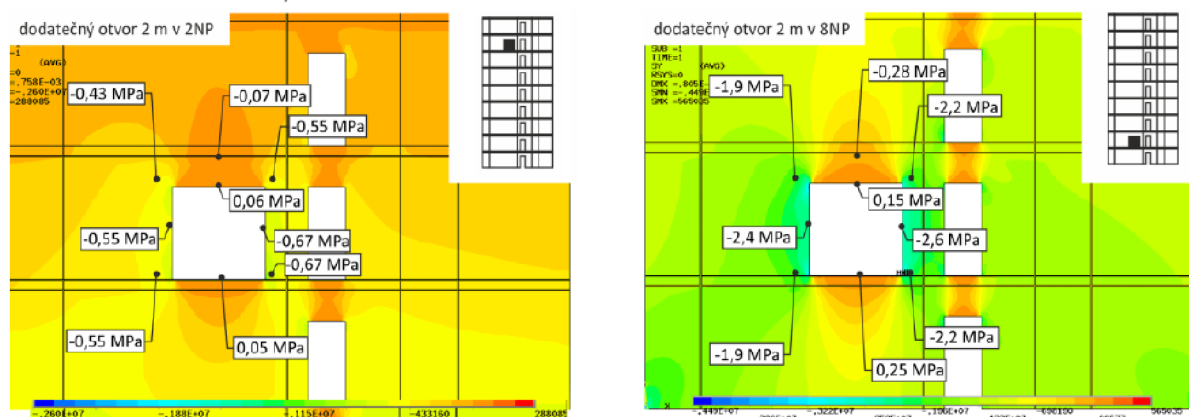
Na základě dostatečně nevýstižného výpočetního modelu nelze spolehlivě posoudit vliv dodatečně provedeného otvoru na skutečný stav napjatosti konstrukce [2].



Obr. 2.5 Varianty výpočetních modelů stěny s dodatečně provedeným otvorem šířky 2 m; a) celý výsek stěny; b) výsek dvou pater o šířce budovy; c) pouze vyšetřovaný stěnový panel [2]

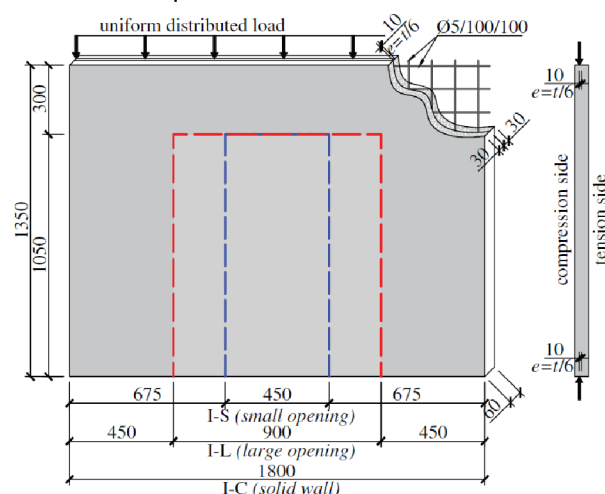
Jistou předností volby varianty modelu celého stěnového výseku je zohlednění umístění dodatečného otvoru ve stěnovém výseku, Obr. 2.6. Tímto postupem je zohledněn roznos zatížení stěnovým efektem kolem dodatečně provedeného otvoru, který se projeví především v případě otvoru v 2.NP věrohodnějším tokem vnitřních sil. U varianty otvoru v 8.NP, kde zatížení představuje jen jedno patro nad otvorem se stěnový efekt uplatní v mnohem menším rozsahu. V případě analýzy varianty na Obr. 2.5 by zatížení ze všech pater nad vyšetřovaným otvorem bylo v modelu nanášeno „na přímo“ a stěnový efekt roznosu zatížení by v tomto případě nefungoval.

svislá normálová napětí σ_y

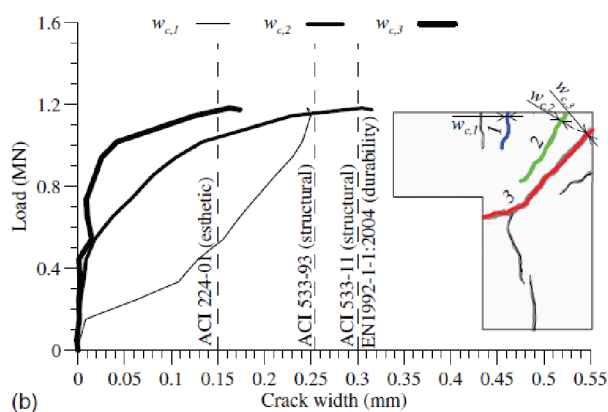


Obr. 2.6 Porovnání velikosti svislých normálových napětí v závislosti na umístění dodatečně provedeného otvoru šířky 2 m [2]

Popescu a kol. (2016) [6] provedli experimentální studii stěnových panelů bez otvoru a se dvěma velikostmi předem vytvořených otvorů. Vzorky panelů byly vyztuženy s ideou dodatečně provedeného otvoru, tedy svařovanou sítí umístěnou v ose panelu, bez žádné další výztuže kolem otvorů nebo obvodu panelu, viz Obr. 2.7. Excentricita zatížení byla velikosti $e = t/6$, tedy běžná pro konstrukce se stěnovým systémem. Byla zde sledována napjatost panelu v průběhu zatěžování ve formě poměrného přetvoření výztuže a betonu včetně vyhodnocení šířek trhlin v průběhu zatěžování, viz Obr. 2.8.



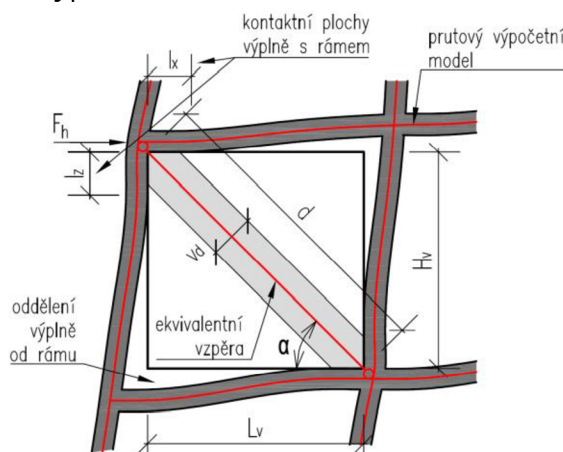
Obr. 2.7 Schéma experimentu [6]



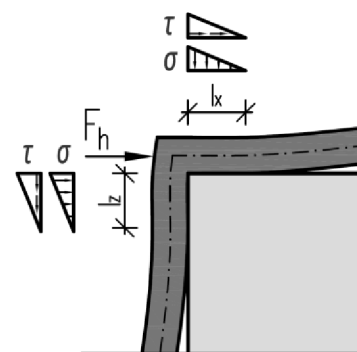
Obr. 2.8 Vyhodnocení šířky trhlin vzhledem k různým kritériím udávaným v normách [6]

2.3 Ztužující výplňové stěny

Z předešlých výzkumů zabývajících se touto problematikou vyplývá, že ztužující výplňovou stěnu v rámové konstrukci lze idealizovat jako diagonální prutový, kloubově připojený tlačенý prvek, tedy „diagonální vzpěru“, viz Obr. 2.9. Tento prvek, který je následně použit do globálního výpočetního modelu, má za úkol simulovat tuhost výplně a její příspěvek k tuhosti celé konstrukce. Délka vzpěry je dána diagonálním rozměrem výplně. Odvození průřezové plochy vzpěry, tedy rozměry, které představují tuhost tohoto prvku, však v minulosti získalo mnoha variant. Mezi důležitý parametr, který byl v minulosti odvozen a je dodnes používán patří tzv. relativní stěnová tuhost výplně vůči ohybové tuhosti rámu λH_v , [7]. Dle tohoto parametru je v současné době pro většinu výpočetních postupů odvozena kontaktní plocha mezi výplní a rámem konstrukce, viz Obr. 2.10.

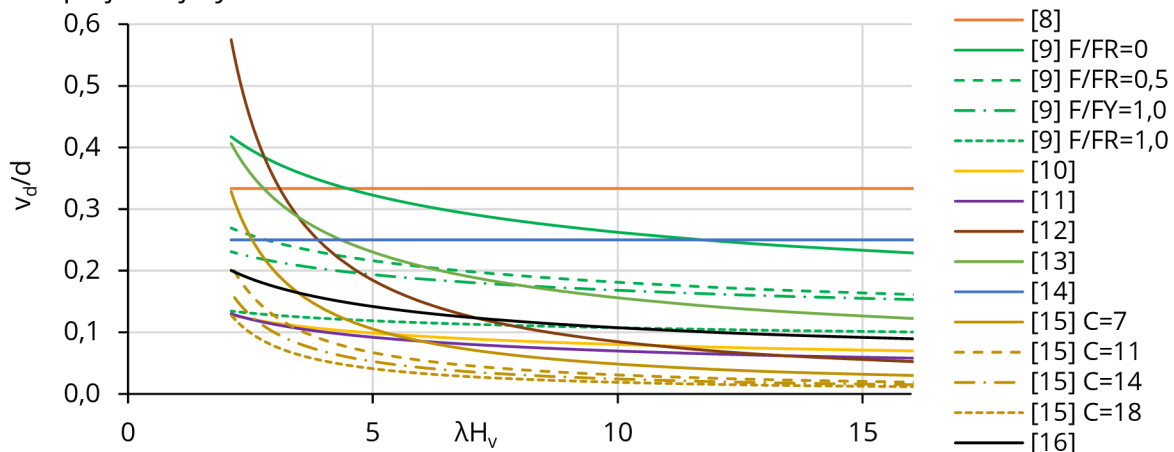


Obr. 2.9 Ekvivalentní prutová vzpěra



Obr. 2.10 Napětí na kontaktních plochách

Srovnání vlivu parametru relativní tuhosti λH_v na poměr šířky vzpěry k její diagonální délce v_a/d je vyobrazen na Obr. 2.11. Značný rozptyl výsledků dle jednotlivých výpočetních postupů je zřejmý.



Obr. 2.11 Srovnání parametru λH_v pro jednotlivé literatury

Je obecně přijímáno, že otvor ve výplni má za následek pokles tuhosti výplně, a tedy celého konstrukčního systému. Při uvažování dodatečného či předem vytvořeného otvoru ve výplni je již zmiňovaná ekvivalentní diagonální vzpěra přerušena a silový tok musí proudit kolem otvoru. V duchu zachování jednoduchosti pro použití v běžné projekční praxi byl v minulosti i případ výplně s otvorem uvažován jako ekvivalentní vzpěra, avšak s redukovanou velikostí, Obr. 2.12.

Pro popsání vlivu poklesu tuhosti vlivem otvoru ve výplni byl v minulosti odvozován součinitel $\chi_{v_d,red}$, který zohledňuje vliv velikostí otvoru na míru redukce velikosti ekvivalentní vzpěry. Šířka redukované vzpěry se následně vypočte dle vztahu (2.1). Pro výpočet redukované vzpěry výplně s otvorem je tedy dle prezentovaného postupu nejdříve nutno spočítat vzpěru pro plnou stěnu bez otvoru, a poté součinitel redukce, který otvor následně zohlední.

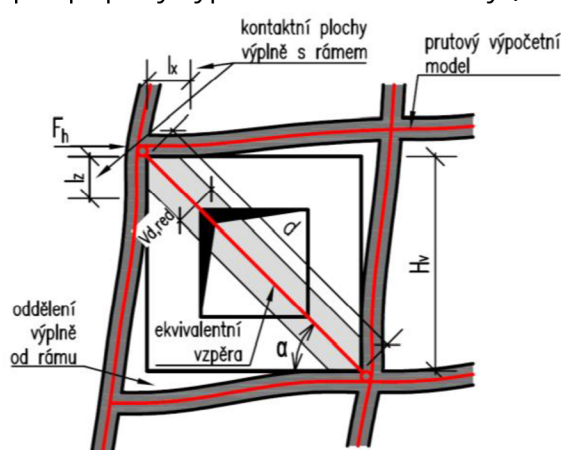
$$v_{d,red} = v_d \cdot \chi_{v_d,red} \quad (2.1)$$

Součinitel redukce je závislý na velikosti otvoru ve stěně. V dostupné literatuře je jednotně používán poměr plochy otvoru ku ploše plně stěny bez otvoru, viz (2.2).

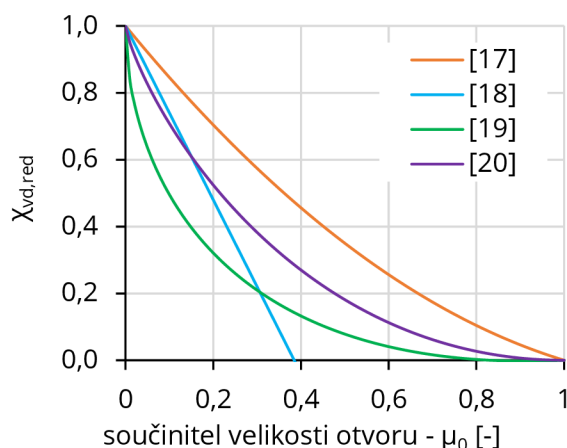
$$\mu_0 = \frac{A_{otvor}}{A_{plná\ stěna}} \quad (2.2)$$

Kde μ_0 je součinitel velikosti otvoru, A_{otvor} je plocha otvoru stěny a $A_{plná\ stěna}$ je plocha stěny bez otvoru.

Vyjádření průběhu součinitele pro redukcí šířky vzpěry $\chi_{v_d,red}$ je provedeno ve vlastním porovnání na Obr. 2.13. Všechny výpočetní postupy jsou odvozeny pro počáteční tuhost výplně, tedy bez trhlin. Rozdíly mezi jednotlivými výpočetními vztahy jsou podstatné, s rozdílem redukčního součinitele mezi jednotlivými vztahy kolem 40 %, např. pro velikost otvoru 25 % ($\mu_0 = 0,25$). Pokud je $\mu_0 = 1$, jedná se o případ, kdy výplň není v rámu přítomna. Naopak $\mu_0 = 0$ vyjadřuje výplň bez otvoru. Hodnota redukčního součinitele se podstatně liší už pro případy výplní s menšími otvory (5–10 %).



Obr. 2.12 Ekvivalentní vzpěra výplně s otvorem



Obr. 2.13 Srovnání průběhu redukčního součinitele $\chi_{v_d,red}$ pro jednotlivé literatury

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Díličí cíle disertační práce je možné shrnout do dvou oblastí:

1. Panelové stěny s otvorem

- Experimentálně ověřit různé varianty typů vyztužení železobetonových panelových stěn s předem vytvořeným nebo dodatečným otvorem a vytvořit numerické modely představující vzorky za experimentu.
- Navrhnout a ověřit metodiku pro posouzení dodatečně provedených otvorů v panelových stěnách na mezní stavy použitelnosti a únosnosti s ohledem na proveditelnost v běžné projekční praxi, tj. bez použití složitějších numerických modelů.

- Ověřit stávající kritéria pro posouzení mezního stavu použitelnosti a popř. navrhnout jejich úpravu.
- Experimentálně a numericky analyzovat dlouhodobé chování stěnových panelů s dodatečně provedenými otvory a popsat jejich vliv na napětí v panelu.
- Navrženou metodiku aplikovat při posouzení dodatečně provedeného otvoru ve stěně reálné konstrukce panelového rodinného domu.

2. Ztužující výplňové stěny s otvorem

- Experimentálně ověřit různé varianty typů vyztužení železobetonových ztužujících výplňových stěn s otvorem a vytvořit numerické modely představující vzorky za experimentu.
- Vytvořené modely rozšířit o parametrickou studii zahrnující různé velikosti otvoru.
- Odvodit postup a výpočetní vztahy pro modelování ztužujících výplňových stěn s otvorem pomocí ekvivalentní diagonální vzpěry na základě velikosti otvoru, vyztužení a jejího stavu zatížení.
- Odvodit výpočetní vztahy pro stanovení únosnosti ztužujících výplňových stěn s otvorem na základě velikosti otvoru a vyztužení.
- Porovnat navržené výpočetní vztahy s dostupnou literaturou.
- Popsat metodiku pro návrh ztužujících výplňových stěn s otvorem.
- Navržené výpočetní postupy aplikovat při ověření globálního modelu konstrukce.

4 PANELOVÉ STĚNY S OTVOREM

4.1 Experimentální a numerické ověření stěn s dodatečně provedenými otvory

Jak již bylo řečeno v kap. 2.1, stěnové panely jsou v konstrukcích panelového typu namáhány převážně tlakem, tomu odpovídá i jejich návrh z prostého či slabě vyztuženého betonu. Z těchto předpokladů plyne i návrh experimentálních vzorků které zahrnují jak méně vyztužené panely, tak i varianty se „spící výztuží“. Byly vyzkoušeny stěnové panely s variantami dodatečného i předem vytvořeného otvoru, pro různé úrovně zatížení. Byly tak studovány mezní stavy použitelnosti i únosnosti.



Obr. 4.1 Foto experimentu – před vyřezáním otvoru



Obr. 4.2 Foto experimentu – po vyřezání otvoru

Statická analýza železobetonových stěn s dodatečně provedenými otvory

V rámci stěžejního experimentu této práce bylo navrženo bylo 5 samostatných typů vzorků, které byly různě vyztuženy, s označením ZP01 až ZP05, viz Obr. 4.1 až Obr. 4.3 a Tab. 4.1. Vzorky byly v měřítku 2:1 vůči skutečné stěně v panelovém objektu. Panely byly navrženy v rámci grantu [5], ve spolupráci s firmou S.O.K. stavební, s.r.o. Tyto samostatné zkušební panely simulují případ vyztužení, který může vzniknout po vyřezání otvoru ve stěnovém panelu. Na zkušebních vzorcích byl vyzkoušen postup dodatečného vyřezávání otvoru již zatížené stěny a současně byl zkoumán vliv vhodného vyztužení stěn pomocí tzv. „spící výtzuže“. Vyztužení panelů zahrnovalo jednoduché použití kari sítě, varianty s obvodovou výtzuží, která je běžná pro stávající panelové objekty, nebo s výtzuží kolem nově vytvořeného otvoru.

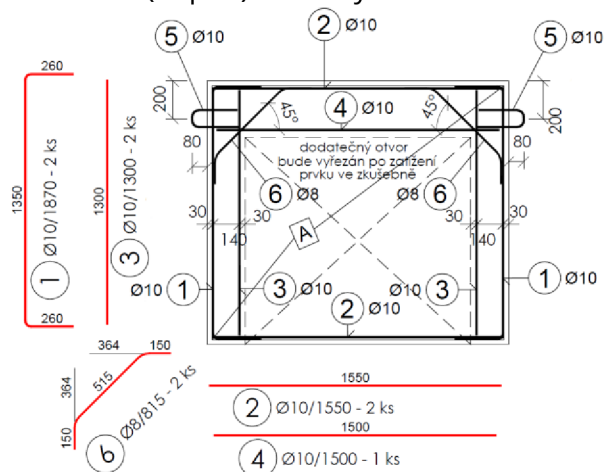
Tab. 4.1 Vyztužení jednotlivých variant vzorků panelů

Stěnový dílec	Plošná výtzuž	Vnější obvodová lemuující výtzuž	Výtzuž nadpraží	Vnitřní svislá výtzuž rámu	Rohová šikmá výtzuž
ZP01	1Ø6/100/100	-	-	-	-
ZP02	1Ø6/100/100	①② 1Ø10	-	-	-
ZP03	1Ø6/100/100	①② 1Ø10	④ 1Ø10	-	-
ZP04	1Ø6/100/100	①② 1Ø10	④ 1Ø10	③ 1Ø10	-
ZP05	1Ø6/100/100	①② 1Ø10	④ 1Ø10	③ 1Ø10	⑥ 1Ø8

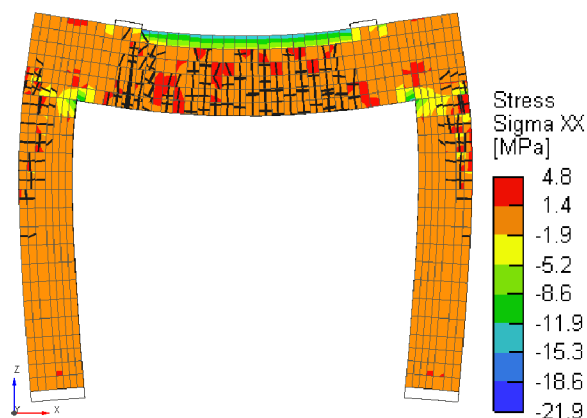
Při následném modelování experimentu byla maximální snaha vystihnout okrajové podmínky experimentu, materiálové parametry, vliv rozdílného typu vyztužení, postup dodatečného provádění otvoru a dlouhodobé chování zkušebních panelů. Pro zohlednění všech těchto jevů byl zvolen software Atena s modulem pro analýzu dotvarování [21].

Při analýze numerických nelineárních modelů, které simulovaly experiment, byly porovnávány hodnoty poměrných přetvoření betonu ve sledovaných měřičských bodech před i po vyřezání otvoru, ze kterých bylo odvozeno napětí v betonu, viz Obr. 4.4. Dále byly sledovány šířky trhlin v nadpraží a pilířích a výšky tlačných oblastí neporušených trhlinami.

Analýza je rozdělena do dvou částí: sledování chování zkušebních panelů bezprostředně po vyřezání otvoru, kde jsou srovnávány okamžité změny zmiňovaných parametrů, a dlouhodobé chování, kde jsou analyzovány dlouhodobé účinky dotvarování na poměrné přetvoření (napětí) a trhliny.



Obr. 4.3 Vyztužení experimentálních vzorků



Obr. 4.4 Analýza experimentu - Atena

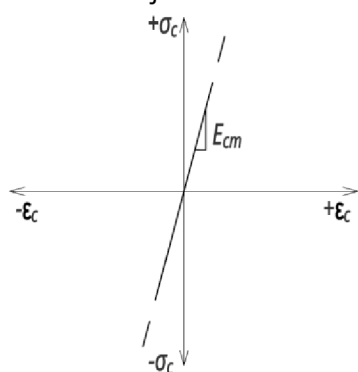
4.2 Metodika pro posouzení stěn s dodatečně provedenými otvory

Smyslem experimentů je navrhnout takový postup pro posouzení dodatečně provedených otvorů v panelových objektech, který bude jednoduše aplikovatelný v běžné projekční praxi, avšak bez nadměrného obětování přesnosti výsledků. Za tímto účelem budou výsledky, které byly získány experimenty, simulovány za pomoci běžně dostupných výpočetních softwarů, pomocí kterých lze v relativně krátkém čase provést výše zmíněný posudek. Dalším kritériem je, že odvozené řešení bude natolik obecné, aby byla možnost sestavení modelu většího výseku stěny za účelem přesnosti výsledků.

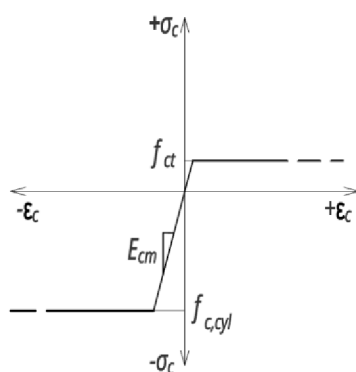
Za tímto účelem budou výsledky získané experimentem simulovány stěnovým modelem s posouzením kritických průřezů dle normy ČSN EN 1992-1-1 [22]. Stěnový model bude testován ve dvou variantách. Prvním z nich je „standardní“ lineárně pružný model (LP), kde pracovní diagram betonu se chová pružně dle zadaného modulu pružnosti v tahu i tlaku a není nijak omezen, viz Obr. 4.5. To představuje nejjednodušší variantu modelu, kterou lze použít. Druhou variantou bude nelineární stěnový model, ve kterém bude uvažováno s materiálově nelineárním působením betonu. Zvolená podmínka plasticity pro beton je dle Drucker-Pragera (PLDP), jak je např. popsáno v [23], viz Obr. 4.6 a Obr. 4.7 a (4.1).

$$f(\sigma_1, \sigma_2) = \alpha_\phi(\sigma_1 + \sigma_2) + \sqrt{\frac{1}{3}(\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)} - \tau_0 \quad (4.1)$$

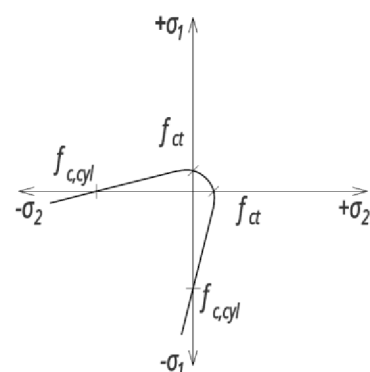
Kde σ_1 je maximální hlavní napětí, σ_2 je minimální hlavní napětí, α_ϕ a τ_0 jsou konstanty charakterizující vlastnosti materiálu.



Obr. 4.5 Lineárně pružný pracovní diagram betonu (LP)



Obr. 4.6 Plastický pracovní diagram betonu (PLDP)

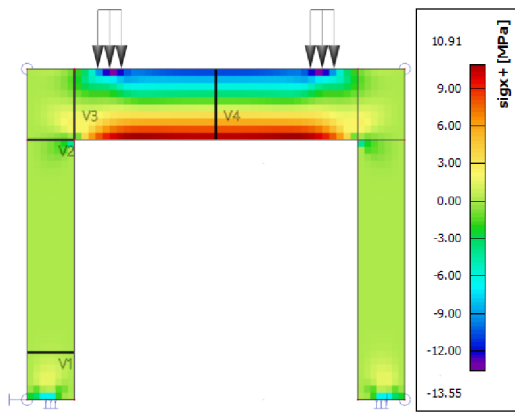


Obr. 4.7 Podmínka plasticity dle Drucker-Pragera (PLDP)

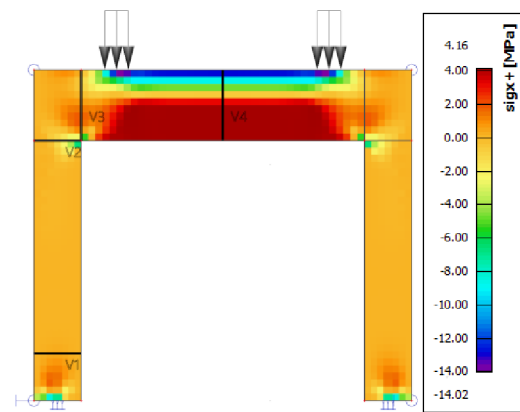
Z modelů jsou poté odečteny výslednice vnitřních sil zadaných řezů po celé výšce posuzovaného průřezu. Touto integrací je získána kombinace ohybového momentu a normálové síly z celé výšky řezu v jeho těžišti.

Rozložení vnitřních sil dle modelu LP ve stěně je zřejmé z Obr. 4.8, kde tahové napětí v nadpraží překračuje dovolenou mez $f_{ct} = 4,1 \text{ MPa}$. Tahové napětí se soustřeďuje do nadpraží a do pilířů jde tak jeho menší část. V pilířích není dosaženo tahové pevnosti, trhliny tedy dle tohoto modelu v pilířích nevznikají, což neodpovídá výsledkům experimentu. Naopak v modelu PLDP, kde je pevnost betonu definována kritériem plasticity, se tahové napětí v nadpraží, které překročí mez f_{ct} , uvolní a putuje dále do pilířů, viz Obr. 4.9. Hodnota napětí v pilířích je pak vyšší než u modelu LP, navíc je zde dosaženo tahové pevnosti. Plastické chování stěnových panelů s otvorem je vhodnější modelovat s diskrétním vyztužením pro bližší vystižení tuhostí jednotlivých průřezů. Vyztuž však bude kvůli jednoduchosti zanedbána.

Statická analýza železobetonových stěn s dodatečně provedenými otvory

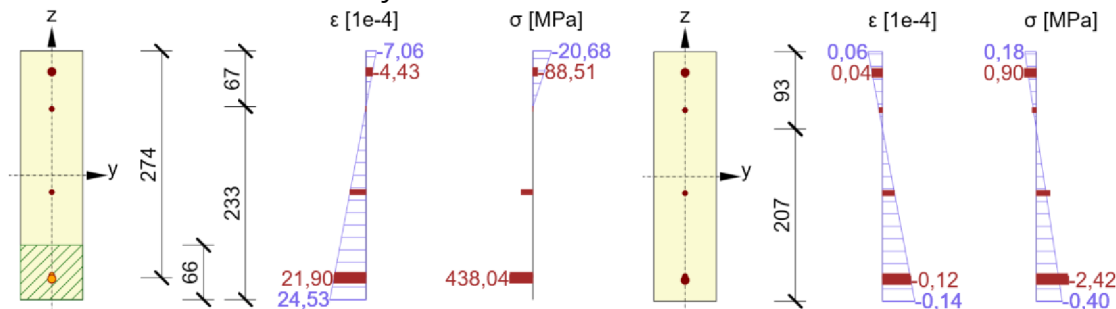


Obr. 4.8 Vodorovné napětí modelu LP



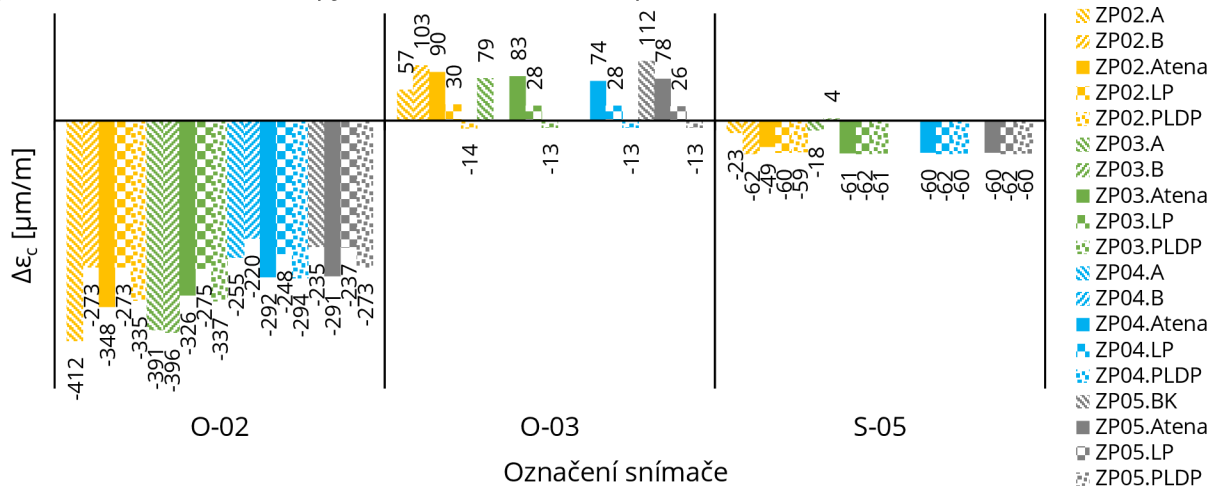
Obr. 4.9 Vodorovné napětí modelu PLDP

Výslednice vnitřních sil získané oběma stěnovými modely (LP a PLDP) byly aplikovány na vyztužený průřez pro jeho analýzu. K tomu byl využit software IDEA StatiCa, modul RCS [24], viz Obr. 4.10. Metody výpočtu napětí, šířky trhlin, popř. mezních stavů únosnosti jsou v softwaru počítány dle ČSN EN 1992-1-1 [22]. Vyztužení jednotlivých průřezů nadpraží je provedeno dle skutečného vyztužení zkušebních vzorků, viz Obr. 4.3.



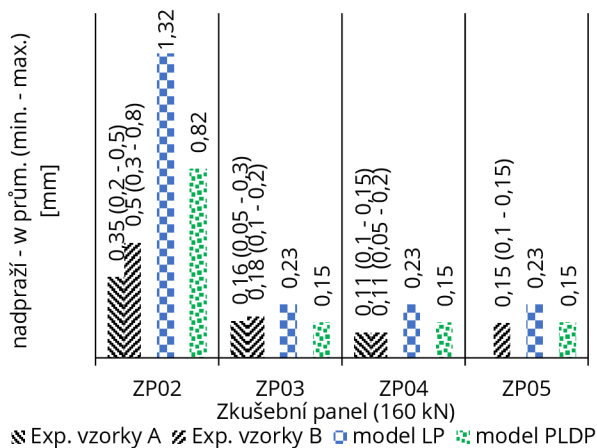
Obr. 4.10 Vybrané výsledky z analýzy průřezů

Výsledky poměrných přetvoření získané analýzami průřezů byly porovnány s výsledky získanými experimenty a numerickou analýzou, viz Obr. 4.11. Ve většině případů jsou hodnoty poměrných přetvoření z modelu PLDP blíže k experimentům oproti modelu LP. V ojedinělých případech (bod O-03) experiment lépe vystihuje model LP. Lze však konstatovat, že použití modelu s kritériem plasticity pro analýzu dodatečného otvoru v panelové stěně lze věrohodně vystihnout skutečnou napjatost změřenou za experimentu.

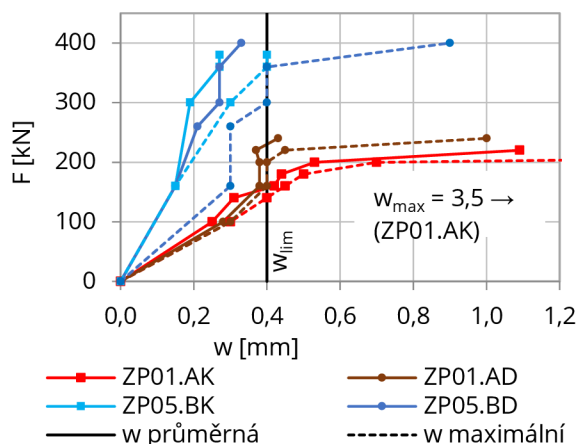


Obr. 4.11 Porovnání $\Delta \epsilon_c$ po vyřezání otvoru (výslednice 160 kN) - experiment/atena/stěnové modely

Šířka trhlin spočítaná analýzou průřezu ze stěnových modelů (LP a PLDP) je průměrná, proto s ní byly srovnávány průměrné šířky trhlin získané experimentem. Průměrné šířky trhlin získané modelem PLDP jsou téměř totožné s těmi za experimentu pro případy vzorků s tahovou výztuží u spodní hrany nadpraží ④ (ZP03, 04 a 05), viz Obr. 4.12. Pro vzorek ZP02 jsou trhliny z modelu PLDP mírně vyšší, než je tomu tak u experimentu. Na druhou stranu, model LP vykazuje výrazně vyšší šířky trhlin pro ZP02 oproti experimentu a mírně vyšší pro ostatní vzorky, právě díky koncentraci tahového napětí v nadpraží.



Obr. 4.12 Trhliny po vyřezání – oblast I



Obr. 4.13 Šířky trhlin v závislosti na zatížení (experiment)

Vybrané panely experimentu byly mimo studii chování v mezních stavech použitelnosti dodatečně zatíženy, aby bylo dosaženo jejich celkovému porušení. Takto byly studovány vzorky ZP01 a ZP05. Na těchto panelech byla mj. sledována šířka trhlin v průběhu zatěžování. Zde bylo ověřováno, zda stávající mezní hodnota $w_{lim} = 0,4 \text{ mm}$ dle [22] je dostačující pro posouzení, viz Obr. 4.13. Bylo zjištěno že zatížení odpovídající těmto šířkám trhlin je velmi blízko únosnosti panelu. Je tak vhodnější použít přísnější kritérium, např. $w_{lim} = 0,3 \text{ mm}$.

Pro ověření vhodnosti použití systému „spící výztuže“ firmou S.O.K. stavební, s.r.o. bylo navrženo dodatečné provedení otvoru do panelu v experimentálním domě, viz Obr. 4.14 a Obr. 4.15. Ve vybraném panelu byly vytvořeny skryté pilíře a nadpraží v reálné stavbě rodinného domu díky této výztuži, viz Obr. 2.4. Zároveň byla možnost ověření navržené metodiky posudku aplikovat v podmínkách skutečné stavby.



Obr. 4.14 Experimentální dům – před vyřezáním otvoru



Obr. 4.15 Experimentální dům – po vyřezání otvoru

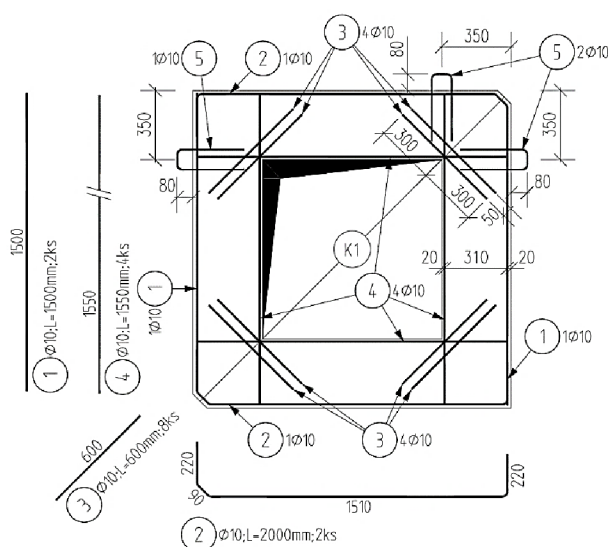
5 ZTUŽUJÍCÍ VÝPLŇOVÉ STĚNY S OTVOREM

5.1 Experimentální a numerické ověření výplně s otvory

Jak již bylo zmíněno, výplň bez otvoru je prvek namáhaný převážně tlakem. Tato skutečnost umožňuje projektantům návrh těchto prvků z prostého, či slabě vyztuženého betonu, obdobně jako je to u stěn panelových objektů. Z této úvahy plyne návrh vzorků autorem práce pro provedení experimentů a jejich následnou studii. První dva vzorky (SV1 a SV2) byly vyztuženy způsobem, jakým by mohla být plná výplň, bez otvoru, vyztužena ve fázi výroby, tedy pouze jednoduchým vyztužením kari sítí (SV1) nebo kombinací kari sítě a obvodové výztuže (SV2). Tyto dva případy tedy simulují situaci, kdy by výplň nebyla vyztužena „spící výztuží“, tedy bez předem připraveného vyztužení kolem uvažovaného dodatečného otvoru. Další dva vzorky jsou vyztuženy kari sítí s obvodovou výztuží a výztuží kolem otvoru – v jednom případě šikmou výztuží (SV3), v druhém případě vodorovnými a svislými pruty (SV4). Kari sítě vzorků byly $\varnothing 6$ s oky 100×100 mm, doplňující vázané výztuže byly $\varnothing 10$. Všechny výztuže byly kladeny pouze v jedné vrstvě. Pro přehlednost je vyztužení vyobrazeno na Obr. 5.1 s popisem rozdílů jednotlivých variant v Tab. 5.1. Rozměry stěn byly zvoleny 1600×1600 mm s tloušťkou 75 mm, tedy přibližně v měřítku 1:2 vůči reálné výplni. Otvor byl rozměru 900×900 mm, tedy 32 % plochy plné stěny bez otvoru, který představuje značný zásah do tohoto nosného prvku hypotetické budovy.

Tab. 5.1 Vyztužení jednotlivých variant vzorků pro experiment

Vzorek	Plošná výztuž	Vnější obvodová lemující výztuž	Rohová šikmá výztuž u otvoru	Svislá a vodorovná výztuž u otvoru
SV1	1 $\varnothing 6/100/100$	-	-	-
SV2	1 $\varnothing 6/100/100$	①② 1 $\varnothing 10$	-	-
SV3	1 $\varnothing 6/100/100$	①② 1 $\varnothing 10$	③ 1 $\varnothing 10$	-
SV4	1 $\varnothing 6/100/100$	①② 1 $\varnothing 10$	-	④ 1 $\varnothing 10$

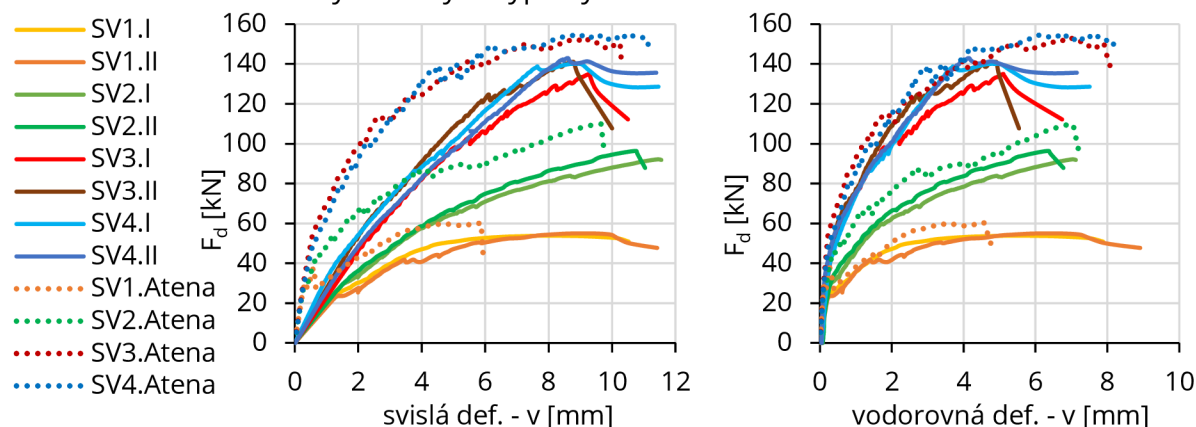


Obr. 5.1 Vyztužení experimentálních vzorků



Obr. 5.2 Foto experimentu

Provedené experimenty, viz Obr. 5.2, byly následně analyzovány v softwaru Atena [21]. Při analýze modelů byly porovnávány mezní dosažené síly, tedy únosnosti stěn, průběhy svislých a vodorovných deformací a tuhosti v různých fázích zatížení prvku, viz Obr. 5.3. Rovněž byly sledovány specifické mechanismy porušení jednotlivých různě vyztužených vzorků a bylo poukázáno na nedostatky některých typů vyztužení.



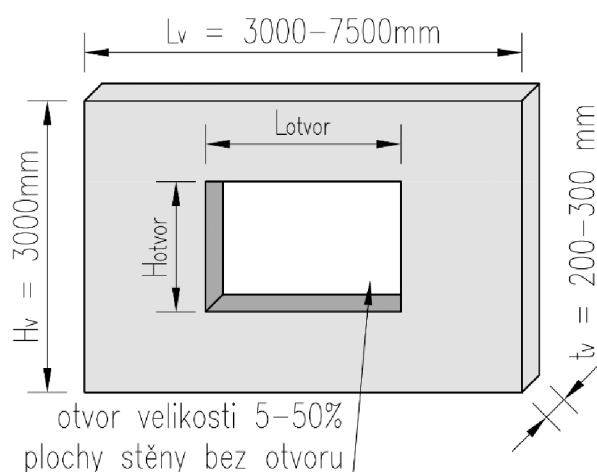
Obr. 5.3 Porovnání závislosti síly na deformaci – data experimentů a modelů Atena

5.2 Odvození ekvivalentní šířky vzpěry ztužující výplňové stěny s otvorem

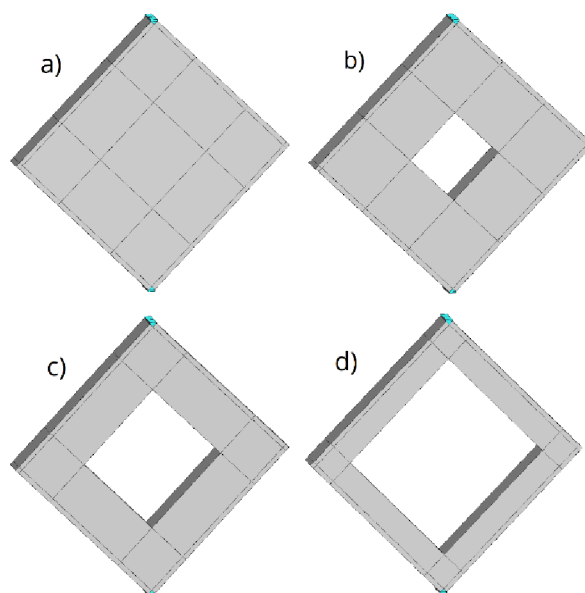
Výše popsané experimenty byly navrženy s ohledem na odvození redukčního součinitele rozměrů ekvivalentní šířky vzpěry $\chi_{v_d,red}$. Za tímto účelem byla provedena parametrická studie numerických modelů, kde byl studován vliv velikosti otvoru stěny a vyztužení na její únosnost a tuhost.

Stěny podrobené této studii byly voleny poměrů stran 1:1; 1:1,5; 1:2 a 1:2,5 (výška \times šířka). Bylo snahou co nejlíže simulovat vlastnosti ztužujících výplňových stěn v reálných konstrukcích. Rozměry studovaných prvků tedy měly rozměry 3000 \times 3000 – 7500 mm (výška \times šířka) a tloušťky 200 a 300 mm, viz Obr. 5.4. Velikost otvoru byla ověřována pro případy plochy otvorů 0 až 50 % plochy stěny, viz Obr. 5.5. Všechny varianty rozměrů byly rovněž analyzovány numerickými modely v softwaru Atena [21] pro věrohodné vystižení tuhostí v průběhu zatěžování. Okrajové podmínky modelů, materiálové modely a nastavení výpočtového řešiče byly odvozeny z modelů, které sloužily k ověření výsledků experimentu.

Otvor různých velikostí byl v případě stěn s poměrem stran 1:1 čtvercového tvaru, situován ve středu stěny. V ostatních případech stěn obdélníkového tvaru byl otvor situován rovněž ve středu stěny, se zachováním dvouosé symetrie geometrie v ploše, stejně jako tomu bylo za experimentu. Vyztužení stěn bylo voleno tak, aby plocha výztuže splňovala minimální požadavky pro železobetonové stěny, které předepisuje již zmiňovaná norma [22], tedy stupeň vyztužení 0,002. Minimální stupeň vyztužení byl dodržen pouze v průřezech, u kterých je třeba „ověření lokálních mezních stavů únosnosti a použitelnosti“ dle čl. 12.1 (4) normy [22]. V ostatních částech konstrukce je uvažováno s prostým betonem. Následné výpočetní vztahy jsou tak odvozeny pro minimum výztuže, které lze ve statickém posudku uvažovat, aby byla výplň posouzena jako železobetonová. Vyztužení je rozlišeno označením VSO1 až VSO5, které je provedeno na stejném principu, jako u experimentů. Vzorek VSO5 je kombinací vzorku VSO3 a VSO4.



Obr. 5.4 Popis rozměrů navržených stěn



Obr. 5.5 Modely s různými velikostmi otvorů – a) plná stěna, b) otvor 10 %, c) otvor 25 %, d) otvor 50 %

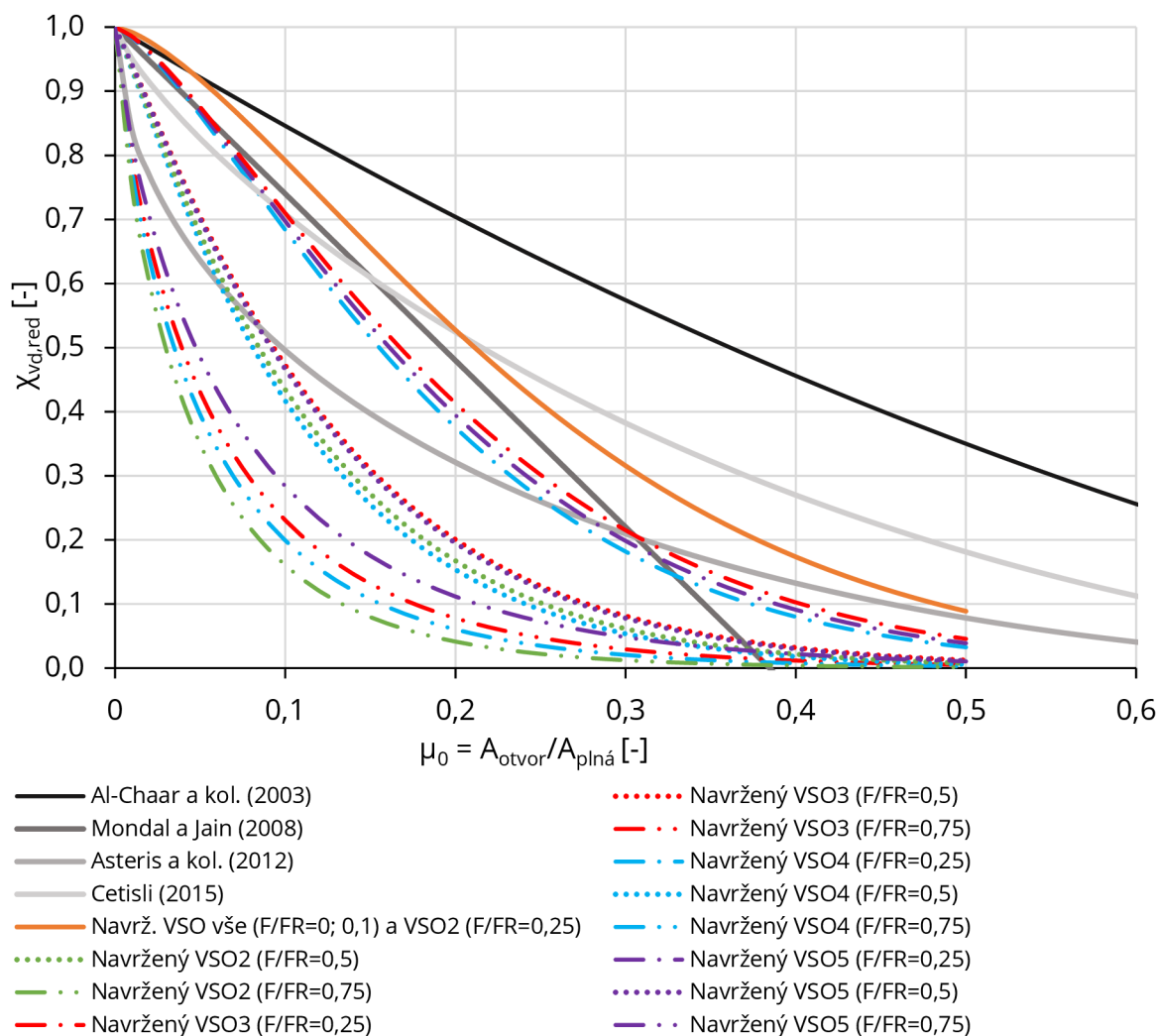
Odvození šířky ekvivalentní diagonální vzpěry bude v následujícím grafu (Obr. 5.6) popsáno součinitelem $\chi_{v_d,red}$, tedy na stejném principu, jako to bylo popsáno v kap. 2.3. Tečnové tuhosti byly odvozeny pro navržené vzorky s poměrem stran 1:1 až 1:2,5, s tloušťkami 200 až 300 mm, pro varianty otvorů 5 % - 50 %. Z těchto tuhosti byl odvozen součinitel $\chi_{v_d,red}$, který lze použít pro výpočet redukované šířky vzpěry $v_{d,red}$. Závislosti byly odvozeny pro poměr působící síly k únosnosti výplně $F/F_R = 0$ až 0,75 tak, aby bylo pokryto téměř celé spektrum zatížení, které může výplň přenášet. Při vyšším poměru zatížení k únosnosti (tj. 75 % a víc) se tuhosti blíží nule a nemá smysl je nadále odvozovat. Pro popsání redukčního součinitele všech navržených variant vyztužení byl odvozen jednotný výpočetní vztah exponenciálního tvaru, viz (5.1). Ten věrohodně popisuje postupný úbytek redukčního součinitele především ve vyšších poměrech F/F_R . V následujících grafech jsou odvozeny konstanty k_{vd1} a k_{vd2} pomocí metody nejmenších čtverců, díky kterým je rozlišen výsledný průběh součinitele $\chi_{v_d,red}$ pro jednotlivé typy analyzovaných, různě vyztužených stěn (VSO1 až VSO5).

$$\chi_{v_d,red} = e^{-\left(\frac{\mu_0}{k_{vd1}}\right)^{k_{vd2}}}; \text{pro } 0 < \mu_0 \leq 0,5 \quad (5.1)$$

Kde e je Eulerovo číslo, k_{vd1} , k_{vd2} jsou konstanty odvozené pomocí metody nejmenších čtverců a μ_0 je součinitel velikosti otvoru.

Tab. 5.2 Odvozené konstanty pro výpočet redukce ekvivalentní šířky vzpěry

F/F _R	VSO1		VSO2		VSO3		VSO4		VSO5	
	Navržená konstanta									
	k _{vd1}	k _{vd2}	k _{vd1}	k _{vd2}	k _{vd1}	k _{vd2}	k _{vd1}	k _{vd2}	k _{vd1}	k _{vd2}
0	0,272	1,453	0,272	1,453	0,272	1,453	0,272	1,453	0,272	1,453
0,1	0,272	1,453	0,272	1,453	0,272	1,453	0,272	1,453	0,272	1,453
0,25	-	-	0,272	1,453	0,219	1,366	0,203	1,366	0,211	1,366
0,5	-	-	0,118	1,100	0,130	0,062	0,113	1,100	0,128	1,100
0,75	-	-	0,047	0,800	1,100	0,800	0,055	0,800	0,075	0,800



Obr. 5.6 Porovnání navržených vztahů redukčního součinitele $\chi_{v,d,red}$ s dostupnou literaturou

Klíčovým parametrem pro návrh výplně otvorem s ohledem na její stav zatíženosti F/F_R je znalost její únosnosti. V následujících grafech jsou prezentovány jednotkové únosnosti všech variant analyzovaných stěn. Únosnosti jsou určeny na základě numerických nelineárních modelů, viz Obr. 5.8. Redukce únosnosti je provedena na stejném principu jako u diagonální vzpěry, tedy vynásobením únosnosti výplně bez otvoru $F_{d,R}$ redukčním součinitelem $\chi_{F_R,red}$. Takto je získána únosnost výplně s otvorem $F_{d,R,red}$, viz (5.2).

$$F_{d,R,red} = \chi_{F_R,red} \cdot F_{d,R} \quad (5.2)$$

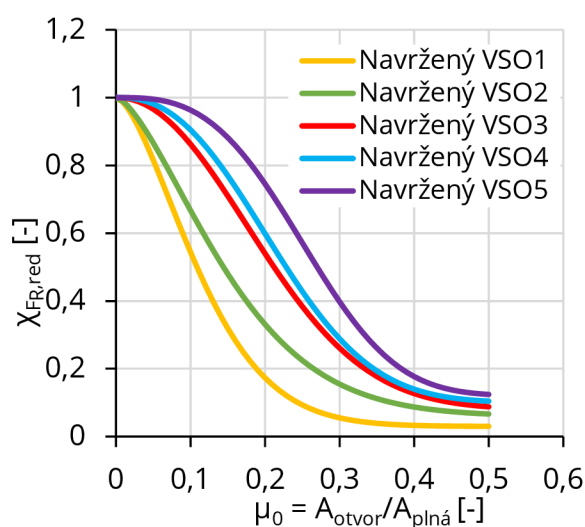
Samotný redukční součinitel lze, jako v případě tuhosti, popsat odvozenou funkcí exponenciálního tvaru, viz (5.3). Ta dobře popisuje případ velmi malých otvorů, kdy redukční součinitel téměř neklesá v případě více vyztužených výplní (VSO3 až VSO5, viz Obr. 5.7). Navržená konstanta k_{F1} posouvá graf ve svislém směru, únosnost tak není samotnou funkcí nijak omezena. Zbytková únosnost bude vždy o hodnotě $(1 - k_{F1})$ násobku únosnosti plné výplně bez otvoru. Z tohoto důvodu je omezena platnost výpočetního vztahu do 50 % plochy otvoru (maximální velikost otvoru, která byla analyzována numerickými modely), aby se předešlo nereálným únosnostem pro výplně s většími otvory.

$$\chi_{FR,red} = (1 - k_{F1}) + k_{F1} e^{-\left(\frac{\mu_0}{k_{F2}}\right)^{k_{F3}}}; \text{ pro } 0 < \mu_0 \leq 0,5 \quad (5.3)$$

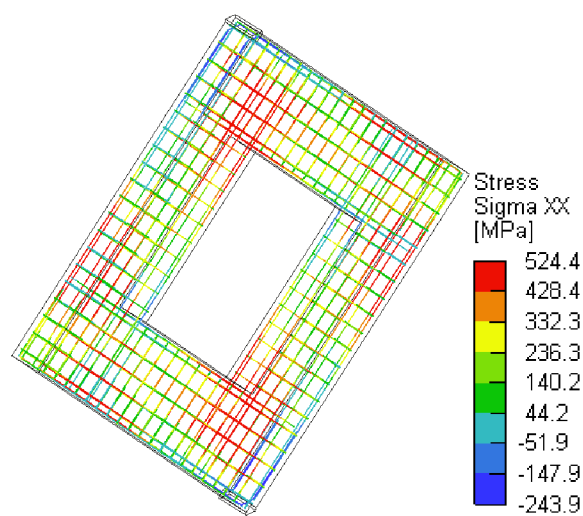
Kde e je Eulerovo číslo, k_{F1} , k_{F2} , k_{F3} jsou konstanty odvozené pomocí metody nejmenších čtverců a μ_0 je součinitel velikosti otvoru.

Tab. 5.3 Odvozené konstanty pro výpočet redukce únosnosti

Navržená konstanta	VSO1	VSO2	VSO3	VSO4	VSO5
k_{F1}	0,970	0,940	0,920	0,900	0,880
k_{F2}	0,133	0,173	0,238	0,249	0,286
k_{F3}	1,591	1,509	2,100	2,400	3,000



Obr. 5.7 Navržené výpočetní vztahy pro redukci únosnosti



Obr. 5.8 Napětí ve výztuži (stěna 3×3×0,3, otvor 25 %)

6 ZÁVĚR

Disertační práce předkládá metody analýzy pro posouzení dvou typů stěnových prvků s dodatečně provedenými otvory. Navržené metodiky jsou využitelné v inženýrské praxi, kde je používán běžně dostupný software a je vyžadována obvyklá úroveň znalostí projektanta se zaměřením na statiku betonových konstrukcí pozemních staveb.

6.1 Shrnutí práce

Panelové stěny s otvorem

Za účelem studie dodatečně prováděných otvorů v železobetonových panelových stěnách byly navrženy různé varianty vyztužení stěnových prvků s dodatečným/předem vytvořeným otvorem, včetně samostatných prvků pilířů. Výsledky z provedených experimentů byly ověřeny simulací experimentu pomocí nelineárních numerických modelů. Specifické chování studovaných prvků bylo v práci popsáno.

Použití jednodušších stěnových modelů pro posouzení dodatečných otvorů, které je již v současném stavu poznání popsáno, bylo rozšířeno o samotné experimentální ověření. Byla navržena a popsána metodika pro posouzení dodatečných otvorů pomocí těchto modelů

v kombinaci s metodou 1D řezu pro mezní stavy použitelnosti i únosnosti dle ČSN EN 1992-1-1 [22]. Modely simulující vyšetřovanou stěnu lze modelovat v běžně dostupných softwarech používaných v praxi.

Byly provedeny doplňkové studie, kde bylo poukázáno, že rozdíly působení mezi předem vytvořeným a dodatečným otvorem má zanedbatelný vliv na chování stěnového panelu. Při tomto specifickém statickém systému však byly zjištěny nevyhovující stávající kritéria pro mezní šířku trhlin a průhybů pro méně vyztužené panely (ZP01 a S1), které však vyhovují požadavkům na minimální plochy vyztužení. Při návrhu dodatečného otvoru bez zesílení doplňkovou výztuží by tak měly být tyto kritéria zpřísněny.

Dále byly studovány vlivy dotvarování betonu na změny napětí, především na přírůstky napětí v tlačných výztužích, které se ukázaly jako zanedbatelné.

V poslední řadě byl i prozkoumán alternativní posudek pomocí zjednodušeného empirického výpočtu únosnosti pilířů, který je použitelný pro situace, kdy není známo vyztužení či stáří betonu nově vzniklého pilíře po dodatečném provedení otvoru.

Navržená metodika byla aplikována na reálný případ dodatečného provedení otvoru s implementovanou „spící výztuží“. Experiment byl proveden na panelovém rodinném domě. Byl vytvořen stěnový model vystihující napjatost stěn před a po dodatečném provedení otvoru a byl vytvořen vzorový posudek vyšetřované panelové stěny.

Ztužující výplňové stěny s otvorem

Za účelem studie otvorů v železobetonových ztužujících výplňových stěnách byly navrženy různé varianty vyztužení stěnových prvků s předem vytvořeným otvorem. Výsledky z provedených experimentů byly ověřeny simulací experimentu pomocí nelineárních numerických modelů. Specifické chování studovaných prvků bylo popsáno.

Na základě numerických modelů představující experimenty byla provedena parametrická studie zahrnující obdobné varianty výplní s různými typy vyztužení, v měřítku 1:1 vůči reálným rozměrům běžných výplní. Studie sloužila ke zkoumání vlivu velikosti otvoru, stavu zatíženosti výplně (F/F_R) a jejího vyztužení na její únosnost a tuhost.

Parametrická studie vedla k odvození nových výpočetních vztahů, plně kompatibilních s již zavedenou metodou výpočtu, pomocí ekvivalentní diagonální vzpěry, popsanou v současném stavu poznání. Nové výpočetní vztahy byly odvozeny jak pro šířku ekvivalentní diagonální vzpěry, tak i pro únosnost výplně v závislosti na velikosti otvoru, stavu zatíženosti výplně (F/F_R) a rozdílném typu vyztužení.

Navržené výpočetní vztahy byly porovnány se vztahy uvedenými ve stávající literatuře. Bylo poukázáno na smysl odvození výpočtových vztahů pro vyšší úrovně zatížení výplně.

Postup návrhu šířky ekvivalentní vzpěry, implementace do globálního výpočtového modelu a posouzení únosnosti je poskytnuto v krocích vývojového diagramu, pomocí kterého se lze snadno orientovat ve tvorbě statického posouzení.

Navržené výpočetní postupy pro idealizaci ztužujících výplňových stěn a jejich posouzení jsou aplikovány ve vzorovém příkladu posudku hypotetické montované rámové konstrukce s dodatečně provedenými otvory. Zde je poukázáno na vliv zatíženosti výplní na samotný výpočet a na výsledný posudek globálních deformací konstrukce. Výpočetní postup je tak použitelný především při návrhu výplní ve výstavbě prefabrikací, ale i při statických úpravách stávajících objektů.

6.2 Doporučení pro další výzkum a vývoj

Panelové stěny s otvorem

V rámci provedených experimentů byly studovány stěny s předem vytvořeným či dodatečným otvorem. Tyto dvě varianty nebyly však srovnány v rámci jednoho experimentu. Různé varianty provedení otvoru byly dodatečně analyzovány pouze numerickým modelem. Velmi přínosné by proto bylo provést experimenty za účelem sledování tohoto rozdílného působení.

Experimentálně a modelově byly ověřovány jen samostatné panely s otvorem. Změna statického schématu po vytvoření dodatečného otvoru má však vliv i na okolní panely, ovlivněné dodatečným otvorem. Navazující výzkum by se mohl soustředit na odvození metody pro posouzení těchto okolních panelů, vzhledem ke specifickým okrajovým podmínkám daným různými typy panelových objektů.

Ztužující výplňové stěny s otvorem

Při provádění experimentů byly vzorky zatíženy na relativně malé ploše roznosu, ne přes ohraničující rámovou konstrukci. Tento způsob tak neúplně vystihoval zatížení v reálných podmínkách. Další výzkum by se mohl orientovat na obdobně vyztužené výplně s otvorem, při vystižení reálného působení v rámové konstrukci.

Výplně s otvorem byly studovány za působení monotónního statického zatížení, představujícího např. zatížení větrem. Jelikož se tento konstrukční prvek navrhuje často i v seismických oblastech, bylo by přínosem studovat působení výplní s otvorem s různými typy vyztužení za cyklického zatížení.

Navržené vztahy pro návrh výplní s otvorem jsou omezeny pro použití minimální plochy betonářské výztuže. Výpočetní vztahy, především pro výpočet únosnosti lze rozšířit o libovolnou plochu navržené výztuže.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BAŽANT, Zdeněk, Jiří STRNAD a Miloš ZICH. Ke stavu, poruchám, rekonstrukcím a úpravám panelových objektů. Beton TKS, 2017, roč. 17, č. 3 [online]., 8-12 [cit. 2021-01-25]. ISSN 1213-3116.
- [2] WITZANY, Jiří, Jaromír VRBA a Václav HONZÍK. Otvory v panelových domech. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2014. Technická knihovna (ČKAIT). ISBN 978-80-87438-55-8.
- [3] S.O.K. stavební, s.r.o. [online]. [cit. 2022-08-02]. Dostupné z: <https://www.sok.cz/>
- [4] JIRKA, Vladimír. Přednáška z předmětu pozemní stavitelství II: Konstrukční systémy podlažních budov, stavby sloupové (kostrové, skelety) montované. Ústav stavitelství, Fakulta architektury, České vysoké učení technické v Praze, 2016.
- [5] ZICH, Miloš, Radim NEČAS, Miloslav JANDA, Jiří HUML a Ondřej ŠIMEK. TH03020446: Vývoj dispozičně variabilnější panelové soustavy pro bytové domy: Zpráva č. 39: Projektová dokumentace řešení.
- [6] POPESCU, Cosmin, Gabriel SAS, Cristian SABĂU a Thomas BLANKSVÄRD. Effect of Cut-Out Openings on the Axial Strength of Concrete Walls. Journal of Structural Engineering [online]. 2016, 142(11) [cit. 2021-01-12]. ISSN 0733-9445. Dostupné z: doi: [10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001558](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001558)

- [7] HETÉNYI, M. Beams On Elastic Foundation : Theory With Applications In The Fields Of Civil And Mechanical Engineering. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1979. ISBN 0-472-08445-3.
- [8] HOLMES, M. STEEL FRAMES WITH BRICKWORK AND CONCRETE INFILLING. Proceedings of the Institution of Civil Engineers [online]. 1961, 19(4), 473-478 [cit. 2021-05-12]. ISSN 1753-7789. Dostupné z: doi:[10.1680/iicep.1961.11305](https://doi.org/10.1680/iicep.1961.11305)
- [9] STAFFORD SMITH, B a C CARTER. A METHOD OF ANALYSIS FOR INFILLED FRAMES. Proceedings of the Institution of Civil Engineers [online]. 1969, 44(1), 31-48 [cit. 2021-5-5]. ISSN 1753-7789. Dostupné z: doi:[10.1680/iicep.1969.7290](https://doi.org/10.1680/iicep.1969.7290)
- [10] MAINSTONE, RJ a GA WEEKS. The Influence of a Bounding Frame on the Racking Stiffnesses and Strengths of Brick Walls [online]. 2nd International brick masonry conference, 1970 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/1970/165.pdf>
- [11] MAINSTONE, RJ. SUMMARY OF PAPER 7360. ON THE STIFFNESS AND STRENGTHS OF INFILLED FRAMES. Proceedings of the Institution of Civil Engineers [online]. 1971, 49(2) [cit. 2021-5-12]. ISSN 1753-7789. Dostupné z: doi:[10.1680/iicep.1971.6267](https://doi.org/10.1680/iicep.1971.6267)
- [12] HENDRY, Arnold W. Structural Masonry: Second Edition. Palgrave, London, 1998. ISBN 978-0-333-73309-7.
- [13] TE-CHANG, Liau a Kwan KWOK-HUNG. Nonlinear behaviour of non-integral infilled frames [online]. 1984, 18(3), 551-560 [cit. 2022-01-05]. ISSN 00457949. Dostupné z: doi:[10.1016/0045-7949\(84\)90070-1](https://doi.org/10.1016/0045-7949(84)90070-1)
- [14] PAULAY, T. a M. J. N. PRIESTLY. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. New York, NY: John Wiley & Sons, 1992. ISBN 9780471549154.
- [15] FLANAGAN, Roger D. a Richard M. BENNETT. In-Plane Behavior of Structural Clay Tile Infilled Frames. Journal of Structural Engineering [online]. 1999, 125(6), 590-599 [cit. 2021-07-28]. ISSN 0733-9445. Dostupné z: doi:[10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:6\(590\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:6(590))
- [16] CHRYSOSTOMOU, C.Z. a P.G. ASTERIS. On the in-plane properties and capacities of infilled frames. Engineering Structures [online]. 2012, 41, 385-402 [cit. 2022-01-05]. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:[10.1016/j.engstruct.2012.03.057](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.03.057)
- [17] AL-CHAAR, Ghassan, Daniel ABRAMS a Gregory LAMB. Effect of Openings on Structural Performance of Unreinforced Masonry Infilled Frames. ACI 211 [online]. 2003 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/265562695 Effect of Openings on Structural Performance of Unreinforced Masonry Infilled Frames](https://www.researchgate.net/publication/265562695_Effect_of_Openings_on_Structural_Performance_of_Unreinforced_Masonry_Infilled_Frames)
- [18] MONDAL, Goutam a Sudhir K. JAIN. Lateral Stiffness of Masonry Infilled Reinforced Concrete (RC) Frames with Central Opening. Earthquake Spectra [online]. 2008, 24(3), 701-723 [cit. 2021-05-12]. ISSN 8755-2930. Dostupné z: doi:[10.1193/1.2942376](https://doi.org/10.1193/1.2942376)
- [19] ASTERIS, Panagiotis G., Christis Z CHRYSOSTOMOU, Ioannis P. GIANNOPOULOS a Eleni SMYROU. Masonry infilled reinforced concrete frames with openings: Conference: COMPDYN 2011 - III ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering [online]. 2011 [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/233961128 Masonry Infilled Reinforced Concrete Frames With Openings](https://www.researchgate.net/publication/233961128_Masonry_Infilled_Reinforced_Concrete_Frames_With_Openings)

- [20] CETISLI, Fatih. Effect of openings on infilled frame stiffness. *Gradevinar* 67 [online]. 2015, (6), 787-798 [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/280036445_Effect_of_openings_on_infilled_frame_stiffness
- [21] ČERVENKA, Vladimír, Libor JENDELE a Jan ČERVENKA. ATENA Program Documentation: Part 1 - Theory [online]. [cit. 2020-10-07]. Dostupné z: https://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA_Theory.pdf
- [22] ČSN EN 1992-1-1 ed. 2: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [23] JIRÁSEK, Milan a Jan ZEMAN. Přetváření a porušování materiálů: dotvarování, plasticita, lom a poškození. 2. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05064-4.
- [24] Idea StatiCa, modul RCS; Dimenzování železobetonových průřezů podle EN 1992-1-1 a EN 1992-2: studijní text pro odborný seminář. 3.12.2010 [cit. 2023-02-22].

CURRICULUM VITÆ

Jméno: Ondřej
 Příjmení: Šimek
 e-mail: simek.o@fce.vutbr.cz

Vzdělání:

2012 – dosud **Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební**
 2019 – dosud Doktorské studium, obor: Konstrukce a dopravní stavby
 Disertační práce: Statická analýza železobetonových stěn s dodatečně provedenými otvory
 2017 – 2019 Magisterské studium, obor: Konstrukce a statika staveb
 Diplomová práce: Návrh kruhové betonové nádrže
 2013 – 2017 Bakalářské studium, obor: Pozemní stavby
 Bakalářská práce: Návrh podzemní části nosné konstrukce pozemní stavby
 2009–2013 **Střední průmyslová škola stavební, Lipník nad Bečvou**

Publikace:

Do současnosti je autorem nebo spoluautorem:

- 3 článků evidovaných ve světově uznávané databázi SCOPUS,
- 6 příspěvků na tuzemských a zahraničních odborných konferencích,
- 5 příspěvků na doktorských konferencích,
- 1 příspěvku v recenzovaném odborném časopise.

Práce na projektech:

TH03020446 „Vývoj dispozičně variabilnější panelové soustavy“ – člen řešitelského týmu
 FAST-J-20-6438 „Vliv šikmé výztuže v rozích dodatečně provedeného otvoru“ – řešitel

Praxe:

2021–dosud VUT, Fakulta stavební – asistent
 2019–dosud OSVČ – projektant
 2018 Prefa Brno a.s. – projektant

Významné realizované projekty:

2021 Rychlostná cesta R2 Kriváň – Mýtná
Nezávislá statická analýza mostní estakády
 2022 Inovácia a modernizácia plavebných komôr pre zvýšenie bezpečnosti a intenzity vodnej dopravy na vodnom diele Gabčíkovo
Statická analýza poruch výtokových kanálů a návrh zesílení
 2023 Diagnostický průzkum a statické posouzení konstrukčních prvků a celků stavebních objektů na fotbalovém stadionu v Brně za Lužánkami
Statická a dynamická analýza stávající konstrukce tribuny
 2023 Zatěžovací zkouška předpjatého vazníku v prostoru marinovacího sklepa
Návrh a provedení statické zatěžovací zkoušky

ABSTRAKT

Práce se zabývá prováděním dodatečných otvorů v železobetonových stěnách z pohledu statické analýzy. Jsou analyzovány dva typy stěn: panelové stěny a ztužující výplňové stěny. V úvodní části je rozebrán současný stav poznání v metodách analýzy této problematiky a je poukázáno na jejich přednosti či nedostatky. Je navrženo několik typů vzorků stěn s předem vytvořeným či dodatečným otvorem s různými typy vyztužení představující stav po dodatečném vytvoření otvoru, jejichž chování je experimentálně a následně numericky ověřeno. Na základě získaných dat jsou navrženy metody sloužící ke statické analýze a posouzení železobetonových stěn s dodatečně provedenými otvory. Pro panelové stěny s otvorem je rozšířena metoda analýzy pomocí stěnových modelů a je konkretizován způsob statického posouzení. Metoda analýzy ztužujících výplňových stěn s otvorem pomocí ekvivalentní diagonální prutové vzpěry byla rozšířena o možnosti zohlednění vyztužení a jejich stavu zatížení. Navržené metody statické analýzy byly aplikovány na skutečné konstrukci panelového rodinného domu, kde byl vytvořen dodatečný otvor a na hypotetické rámové konstrukci s navrženým statickým zásahem do jejího ztužujícího systému.

ABSTRACT

The thesis deals with the implementation of additional openings in reinforced concrete walls from the point of view of structural analysis. Two types of walls are analysed: panel walls and infill shear walls. In the introductory part, the current state of knowledge in the methods of analysis of this issue is discussed and their advantages or shortcomings are pointed out. Several types of wall specimens with pre- or post-made openings with different types of reinforcement representing the state after an additional opening is made are proposed and their behaviour is experimentally and subsequently numerically verified. On the basis of the data obtained, methods are proposed for the structural analysis and the design of reinforced concrete walls with additional openings. For panel walls with openings, the analysis method using wall models is extended and the method of static assessment is specified. The method of analysis for infill shear walls with an opening using equivalent diagonal bar strut has been extended to take account for the reinforcement and its load state. The proposed structural analysis methods were applied to a real prefabricated house with an additional opening and to a hypothetical frame structure with a proposed structural intervention in its bracing system.