

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta

Ing. Simona Šarvaicová

Autoreferát dizertačnej práce

**VPLYV TVARU PODOPRETIA A SPÔSOBU ZAŤAŽOVANIA BEZPRIEVLAKOVEJ DOSKY
NA ODOLNOSŤ PROTI PRETLAČENIU**

na získanie akademického titulu „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

v doktorandskom študijnom programe:

Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore:

35. stavebníctvo

Forma štúdia:

denná

Miesto a dátum:

Bratislava, máj 2022



Dizertačná práca bola vypracovaná na

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra betónových konštrukcií a mostov

Predkladateľ: **Ing. Simona Šarvaicová**
Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11
810 05 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Viktor Borzovič, PhD.
Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11
810 05 Bratislava

Oponenti: prof. Ing. Jaroslav Halvonik, PhD.
Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11
810 05 Bratislava

doc. Ing. Peter Koteš, PhD.
Katedra stavebných konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta UNIZA v Žiline
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

doc. Ing. Bc. Oldřich Sucharda, Ph.D.
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb
Fakulta stavební, VŠB-TUO
Ludvíka Podéště 1875/17
708 00 Ostrava-Poruba

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 25.8.2022 o 10:00.

**na Katedre betónových konštrukcií a mostov, Stavebná fakulta STU v Bratislave,
Radlinského 11, 810 05 Bratislava, v miestnosti A417**

.....
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan stavebnej fakulty

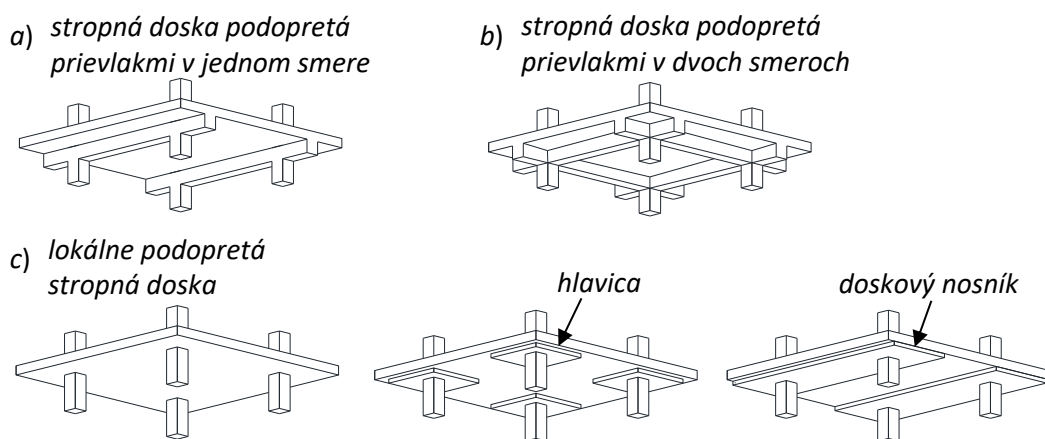
OBSAH

OBSAH	3
1 Úvod	4
2 Súčasný stav problematiky	5
2.1 Návrhové modely na posúdenie pretlačenia dosiek	5
2.2 Experimentálne programy v zahraničí	7
3 Ciele dizertačnej práce	8
4 Metodika dizertačnej práce	9
5 Experimentálny výskum	10
5.1 Experimentálne vzorky	10
5.2 Experimentálna zostava	15
5.3 Meracie zariadenia a merané veličiny	16
5.4 Postup zaťažovania	17
5.5 Analýza experimentálnych výsledkov	17
5.5.1 Celková sila	17
5.5.2 Trhliny	17
5.5.3 Deformácie	18
5.5.4 Pomerné pretvorenia	21
6 NELINEÁRNA ANALÝZA	23
6.1 Popis modelu	23
6.2 Doskové pootočená z NLFEA	24
7 Analýza výsledkov	27
7.1 Vplyv tvaru podopretia na šmykovú odolnosť	27
7.2 Redukcia dĺžky kontrolného obvodu	28
7.3 Vplyv spôsobu zaťaženia na šmykovú odolnosť dosiek	29
7.3.1 Vplyv spôsobu zaťaženia na šmykovú odolnosť dosiek podľa Oliveiru	30
7.3.2 Navrhovaná modifikácia výpočtu šmykovej odolnosti podľa MC2010	31
7.4 Trhliny	32
7.5 Zvislé deformácie	33
8 ZÁVER	36
ODPORÚČANIE PRE PRAX	37
ODPORÚČANIE PRE ĎALŠÍ VÝSKUM	37
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	38
PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ AUTORA	39

1 ÚVOD

Bezprievlakové stropné dosky patria vďaka svojim mnohým výhodám k čoraz častejšie navrhovaným typom stropných konštrukcií v praxi. Ich využitie možno nájsť v rozličných typoch budov ako sú rezidenčné budovy, parkovacie domy, administratívne či polyfunkčné výškové budovy.

Medzi hlavné výhody bezprievlakových stropných dosiek patrí jednoduchosť debnenia a s ním súvisiaca rýchlosť a efektívnosť výstavby, nižšia konštrukčná výška podlaží a iné.



Obr. 1.1 a) stropná doska podopretá prievlakmi v jednom smere b) stropná doska podopretá prievlakmi v oboch smeroch c) lokálne podopretá stropná doska

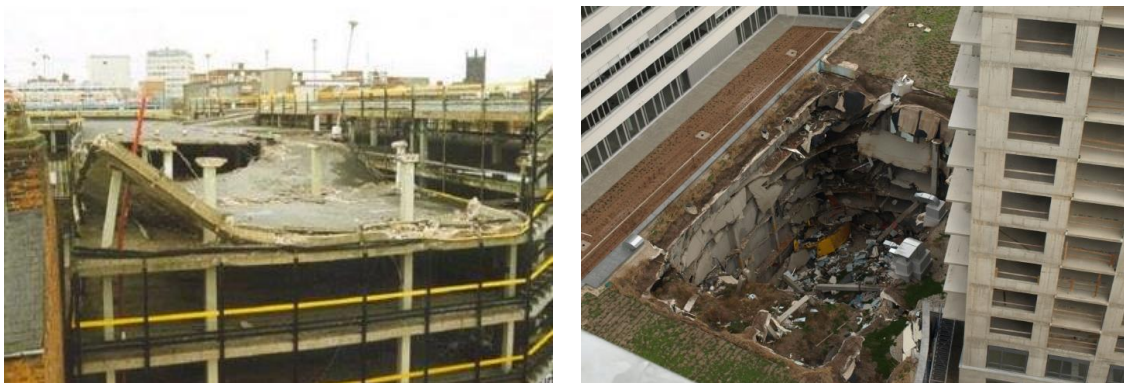
V oblasti podpier bezprievlakových dosiek pôsobí veľké zaťaženie na pomerne malej ploche, následkom čoho dochádza ku vysokej koncentrácii napätí. Vzniká tak v okolí podpory dvojsmerné šmykové namáhanie – pretlačenie, ktoré má krehký charakter porušenia, a teda nie je spojené so vznikom veľkých deformácií, či trhlín. Posúdenie pretlačenia má teda veľký význam pri návrhu hrúbky dosky a jej vystuženia.

Šmyková odolnosť bezprievlakových dosiek sa overuje v dvoch krokoch. Prvým je overenie odolnosti betónu proti rozdrveniu tlakových diagonál v líci podpory. Druhým krokom je overenie šmykovej odolnosti dosky bez šmykovej výstuže v základnom kontrolnom obvode. Ak je šmyková odolnosť nedostatočná, je potrebný návrh šmykovej výstuže, alebo zväčšenie účinnej výšky dosky pomocou návrhu lokálnych hlavíc, resp. doskových nosníkov (Obr. 1.1c). V prípade zosilnenia dosky v okolí stĺpa hlavica sú potrebné overenia šmykovej odolnosti nielen v líci stĺpa, ale i v líci hlavice.

V súčasnosti nielen u nás, ale i vo svete prebieha veľa projektov a štúdií zameraných práve na tento spôsob namáhania aj v súvislosti s kalibráciou spoľahlivosti nových návrhových modelov pre pretlačenie. Väčšina z týchto experimentov je zameraná na prípady podopretia dosky stĺpom so štvorcovým, resp. kruhovým prierezom. Pri podpore so stranou $c_{\max} > 3d$ sa podstatná časť šmykového toku koncentruje v oblasti rohov podpory. Ako následok tohto javu je potrebné pri výpočte šmykovej odolnosti dosky napríklad redukovať dĺžku kontrolného obvodu, s ktorým sa vstupuje do výpočtu šmykového namáhania dosky.

2 SÚČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Napriek tomu, že bezprievlakové dosky patria už desiatky rokov k bežne používaným typom stropných konštrukcií, jav pretlačenia je stále aktuálnou a diskutovanou témou v mnohých krajinách po celom svete. Dôvodom nie sú len zlyhania konštrukcií a následné zisťovanie príčin kolapsu, ale taktiež fakt, že k tomuto javu existuje viacero návrhových postupov v závislosti od krajiny.



Obr. 2.1 Kolaps budovy zapríčinený dosiahnutím šmykovej odolnosti dosky (vľavo Pipers Row Car Park, UK 1997 [21]; vpravo: Trinity, SK 2014)

2.1 Návrhové modely na posúdenie pretlačenia dosiek

V súčasnosti platné výpočtové modely na posúdenie pretlačenia bezprievlakových dosiek sa výrazne líšia v zohľadnení parametrov vstupujúcich do výpočtu. V tejto kapitole sú stručne zosumarizované vybrané výpočtové modely analyzované v práci.

Tab. 2.1 Sumarizácia návrhových modelov analyzovaných v práci

Návrhový model	Výpočtový vzťah pre šmykovú odolnosť dosky bez šmykovej výstuže
STN 73 1201 [1]	$\tau_{bu}=0,42 \kappa_s \kappa_h \kappa_n V_b R_{btd}$
EC2 (2004) [2]	$v_{Rd,c} = \frac{C_{Rk,c}}{\gamma_c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \geq v_{min}$
prEC2 (2021) [3]	$\tau_{Rd,c} = \frac{0,6}{\gamma_v} k_{pb} \left(100 \rho_l f_{ck} \frac{d_{dg}}{d_v} \right)^{1/3} \leq \frac{0,6}{\gamma_v} \sqrt{f_{ck}}$
Model Code 2010 [4]	$v_{Rd,c} = k_\psi \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c}$ $k_\psi = \frac{1}{1,5 + 0,9 k_{dg} \psi d} \leq 0,6$

ACI 318-19 [5]

$$v_c = \left(0,17 + \frac{2}{\beta}\right) \lambda_s \lambda \sqrt{f'_c}$$

$$v_c = \left(0,17 + \frac{0,083 \alpha_s d}{b_0}\right) \lambda_s \lambda \sqrt{f'_c}$$

$$v_c = \frac{1}{3} \lambda_s \lambda \sqrt{f'_c}$$

kde:

- τ_{bu} - šmykové napätie podľa STN 73 1201 [MPa],
- K_s - súčiniteľ stupňa vystuženia ťahanou pozdĺžnou výstužou v oblasti nad podperou ohraničenej kritickým obvodom zväčšeným o $1,5h$ na každej svojej strane,
- K_h - súčiniteľ hrúbky dosky [-],
- K_n - súčiniteľ normálovej sily pôsobiacej kolmo na kritický obvod v rovine dosky, pre nepredpäté dosky $K_n = 1,0$ [-],
- γ_b - súčiniteľ zohľadňujúci spracovanie betónu, $\gamma_b = 0,85$ ak hustá nadpodperová výstuž bráni dobrému zhutneniu, inak $\gamma_b = 1,0$ [-],
- R_{btd} - výpočtová pevnosť betónu v ťahu podľa STN 73 1201 [MPa],
- $V_{Rd,c}$ - šmyková odolnosť dosky bez šmykovej výstuže [kN/m²],
- $C_{Rk,c}$ - empirický faktor $C_{Rk,c} = 0,18$ [MPa],
- γ_c - parciálny súčiniteľ spoľahlivosti betónu, $\gamma_c = 1.5$ [-],
- k - súčiniteľ výšky prierezu [-],
- d - účinná výška [mm],
- ρ_l - stupeň vystuženia [-],
- f_{ck} - charakteristická hodnota pevnosti betónu v tlaku [MPa],
- γ_v - parciálny súčiniteľ spoľahlivosti pre odolnosť proti pretlačeniu bez šmykovej výstuže [-],
- k_{pb} - koeficient zvýšenia gradientu šmykovej odolnosti [-],
- d_{dg} - parameter zohľadňujúci vplyv zaklínenia zŕn kameniva v šikmej trhline v závislosti od vlastností kameniva [mm],
- d_v - šmyková účinná výška [mm],
- k_ψ - kritérium porušenia [-],
- k_{dg} - súčiniteľ zohľadňujúci veľkosť maximálneho zrna použitého kameniva, ak je maximálne zrno kameniva $d_g > 16\text{mm}$, môže sa uvážiť $k_{dg} = 1,0$ [-],
- ψ - pootočenie dosky v mieste vzniku kritickej trhliny [-],
- β - súčiniteľ zohľadňujúci pomer dlhšieho rozmeru stĺpa ku kratšiemu, koncentrované zaťaženie, alebo zaťažovanú plochu [-],

- λ_s - súčiniteľ vplyvu výšky prierezu, tzv. „size effect“ [-],
- λ - súčiniteľ zohľadňujúci hustotu betónu (redukciu vlastností betónu s ľahkým kamenivom vzhľadom na betón s bežným kamenivom) väčšinou $\lambda = 1$ [-],
- f_c' - nominálna pevnosť betónu v tlaku; $\forall f_c' \leq 8,3$ [MPa],
- α_s - súčiniteľ zohľadňujúci polohu stĺpa v rámci pôdorysu [-],

2.2 Experimentálne programy v zahraničí

Návrhu experimentálneho programu predchádzalo dôkladné štúdium experimentov podobného charakteru v zahraničí. Vybrané boli najmä experimentálne výskumy zaoberajúce sa šmykovou odolnosťou dosiek podopretých obdĺžnikovým stĺpom, resp. okrajom a rohom steny.

Tab. 2.2 Chronologicky zoradené vybrané zahraničné experimentálne výskumy

P.Č.	Rok	Autori a názov práce
1	1971	Hawkins, Fallsen a Hinojosa [6]
2	2004	Oliveira D. R. C., Melo G.S., Regan P. E.: <i>Punching shear resistance of flat slabs with rectangular columns</i> (Brazília) [7]
3	2014	Sagaseta J., Tassinari L., Fernández Ruiz M., Muttoni A.: <i>Punching of flat slabs supported on rectangular columns</i> (Veľká Británia, Švajčiarsko) [8]
4	2015	O. S. Paiva, M. P. Ferreira, D. R. C. Oliveira, A. F. Lima Neto, M. R. Teixeira: <i>Influence of the column rectangularity index and of the boundary conditions in the punching resistance of slab-column connections</i> (Brazília) [9]
5	2017	V. Filatov: <i>Experimental investigation of stress-strain conditions in punching zone of flat slabs</i> (Rusko) [10]
6	2018	V. Filatov: <i>Evaluation of punching shear strength of flat slabs supported on rectangular columns</i> (Rusko) [11]
7	2018	Farzam M, Sadaghian H.: <i>Mechanical model for punching shear capacity of rectangular slab-column connections</i> (Irán) [12]
8	2020	Setiawan A, Vollum RL, Macorini L, Izzuddin BA.: <i>Punching shear design of RC flat slabs supported on wall corners</i> (Veľká Británia) [13]
9	2020	Milligan G. J., Polak M. A., Zurell C.: <i>Finite element analysis of punching shear behaviour of concrete slabs supported on rectangular columns</i> (Canada) [14]

Na základe získaných poznatkov bol spracovaný experimentálny program v tejto práci a to vrátane novej skúšobnej zostavy, kedy sa prvýkrát v rade experimentov na pretlačenie dosiek realizovaných na Katedre betónových konštrukcií a mostov Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave pristúpilo k zaťažovaniu zhora po obvode vzorky.

3 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Náplňou dizertačnej práce je experimentálna a numerická nelineárna analýza pretlačenia lokálne podopretých železobetónových dosiek. Práca je zameraná na stanovenie šmykovej odolnosti bezprievlakových dosiek podopretých stĺpom so zväčšujúcim sa prierezom a na skúmanie vplyvu spôsobu zaťažovania. Vo svete, ale i na Slovensku prebiehalo a stále prebieha mnoho výskumov zameraných na jav pretlačenia, no vo veľkej väčšine prípadov ide o dosky podopreté stĺpom so štvorcovým prierezom zaťažovaným symetricky okolo celého obvodu. Zmena prierezu stĺpa na obdĺžnikový a doplnenie databáz o výsledky s týmto typom podopretia je vhodným prínosom do danej problematiky.

Vo všetkých prípadoch doteraz realizovaných experimentov pretlačenia stropných dosiek v Centrálnych laboratóriách STU sa jednalo o podopretie kruhovým alebo štvorcovým stĺpom, kde je šmykové namáhanie rovnomerne rozložené okolo celého kritického obvodu. V prípade podopretia obdĺžnikovým stĺpom sa šmykové namáhanie výrazne koncentruje pri rohoch stĺpa, resp. okraja steny. Z pohľadu experimentálnej práce ide o prvý experiment zameraný na iný typ podopretia, s čím súvisí aj vznik novej skúšobnej zostavy.

Hlavné ciele dizertačnej práce možno zhrnúť do niekoľkých bodov:

- vyšetrenie vplyvu geometrie stĺpa na šmykovú odolnosť lokálne podopretých dosiek proti pretlačeniu.
- vyšetrenie vplyvu spôsobu zaťažovania lokálne podopretých dosiek na odolnosť proti pretlačeniu.
- overenie spoľahlivosti nových a súčasných návrhových modelov na predikciu šmykovej odolnosti v pretlačení v závislosti od geometrie podopretia a spôsobu zaťaženia dosky,
- kalibrácia numerického nelineárneho modelu a jeho následné využitie pre zistenie veličín, ktoré neboli experimentálne namerané,
- odvodenie dĺžky redukovaného kontrolného obvodu na základe výsledkov z experimentov a numerickej analýzy. Následné porovnanie s hodnotami vypočítanými podľa návrhových postupov (EC2, MC2010, prEC2),
- rozšírenie databázy výsledkov z výskumných programov zameraných na šmykovú odolnosť bezprievlakových dosiek lokálne podopretých výrazne obdĺžnikovým stĺpom.

4 METODIKA DIZERTAČNEJ PRÁCE

Dizertačná práca je rozdelená do troch okruhov, z ktorých každý má samostatný význam pri dosiahnutí stanovených cieľov práce. Tieto okruhy sú sústredené do samotných kapitol práce:

- teoretická časť – história a súčasný stav problematiky,
- experimentálny výskum,
- numerická nelineárna analýza.

Teoretická časť sa zameriava na históriu i súčasný stav danej problematiky. Štúdium starších aj súčasne platných návrhových modelov umožnilo pozorovať a porovnať trend v návrhu bezprievlakových dosiek u nás i v zahraničí. Oboznámenie sa so zahraničnými výskumami prehľadilo poznatky v danej téme a malo významný prínos pre túto prácu. Na základe štúdia zahraničných experimentálnych programov zameraných na problematiku pretlačenia bola inšpirovaná skúšobná zostava použitá pri experimentoch spomenutých v práci.

Významná časť práce je venovaná práve experimentálnemu výskumu. Tento výskum bol zameraný na skúmanie vplyvu dvoch aspektov vplývajúcich na šmykovú odolnosť dosky. Prvým z nich je geometria prierezu stĺpa s postupne zväčšujúcim sa pomerom $c_{\max}/c_{\min}$ a $c_{\max}/d$ a druhým je vplyv spôsobu zaťaženia v prípade podopretia stenovým stĺpom. Cieľom týchto experimentov bolo získať predstavu nielen o skutočnej šmykovej odolnosti navrhnutých vzoriek, ale aj o celkovom deformačnom stave počas zaťažovania a odvodenie skutočnej skrátenej dĺžky kontrolného obvodu. Na základe týchto výsledkov bolo možné zistiť spoľahlivosť vybraných návrhových modelov.

Treťou časťou bolo nelineárne modelovanie v programe Atena. Program Atena umožňuje nelineárne 3D výpočty a je to program, ktorý pracuje na báze metódy konečných prvkov. Numerická nelineárna analýza má veľký prínos vo vedeckej oblasti, nakoľko slúži ako virtuálne laboratórium, vďaka ktorému je možné uskutočniť rozsiahlu parametrickú štúdiu v danej oblasti. Dôležitým aspektom pri modelovaní je správna kalibrácia modelu, aby bolo možné sa čo najviac priblížiť k deformačným a silovým výsledkom z experimentov, čím sa overí vhodnosť nelineárneho modelu pre ďalšiu aplikáciu alebo hlbšie skúmanie deformačného a napätostného stavu.

5 EXPERIMENTÁLNY VÝSKUM

Experimentálny program pozostáva zo skúšok ôsmich vzoriek bezprievlakových dosiek. Výskum nadväzuje na predošlé experimenty Katedry betónových konštrukcií a mostov Stavebnej fakulty STU v Bratislave. Výskum, ktorým sa zaoberám v tejto práci, je prvý v rade experimentov, kedy sa štvorcový (resp. kruhový) prierez stĺpa zmenil na výrazne obdĺžnikový. S týmto faktom súvisí okrem iného aj vznik novej experimentálnej zostavy v porovnaní so spomenutými experimentami kolegov [15,16,17,18].

Experimentálny výskum bol rozdelený na dve časti. V prvej etape sa skúmal vplyv postupnej zmeny podopretia zo štvorcového stĺpa až na výrazne obdĺžnikový. Druhá časť výskumu bola zameraná na vplyv rôzneho spôsobu zaťažovania na vzorku s výrazne obdĺžnikovou podperou ($c_{\max}/c_{\min} = 6,3$).

5.1 Experimentálne vzorky

Experimentálne vzorky majú štvorcový pôdorys s rozmermi 2,5 x 2,5 m a hrúbku 0,2 m. Pôdorysné rozmery vzoriek boli stanovené s ohľadom na laboratórne podmienky (raster otvorov v podlahe laboratória 0,75 x 0,75 m, v ktorých budú upevnené oceľové tyče kotviace skúšobnú vzorku). Vzhľadom na vzdialenosť tyčí od osi stĺpa, t.j. poloha nulových radiálnych ohybových momentov, vzorka zodpovedá reálnej konštrukcii s rozpätím 5,1m v oboch smeroch prislúchajúcich polí.



Obr. 5.1 Výroba skúšobných vzoriek

Všetky vzorky boli rovnako vystužené viazanou výstužou z ocele triedy B500B s priemernou medzou klzu $f_y = 560$ MPa, pri hornom povrchu prúťmi s $\varnothing = 16$ mm rozmiestnených rovnomerne po 100 mm v oboch smeroch a pri dolnom povrchu prúťmi s $\varnothing = 10$ mm po 200 mm. Vzorky neboli vystužené šmykovou výstužou. Premenné charakteristiky jednotlivých vzoriek ako aj rozmery priečneho rezu stĺpov sú zhrnuté v Tab. 5.1. Stĺp bol vo všetkých prípadoch vystužený viazanou výstužou s prúťmi $\varnothing = 12$ mm rozmiestnenými rovnomerne okolo celého obvodu stĺpa. Kocková pevnosť betónu použitého na betonáž podpory dosahovala 89 MPa.

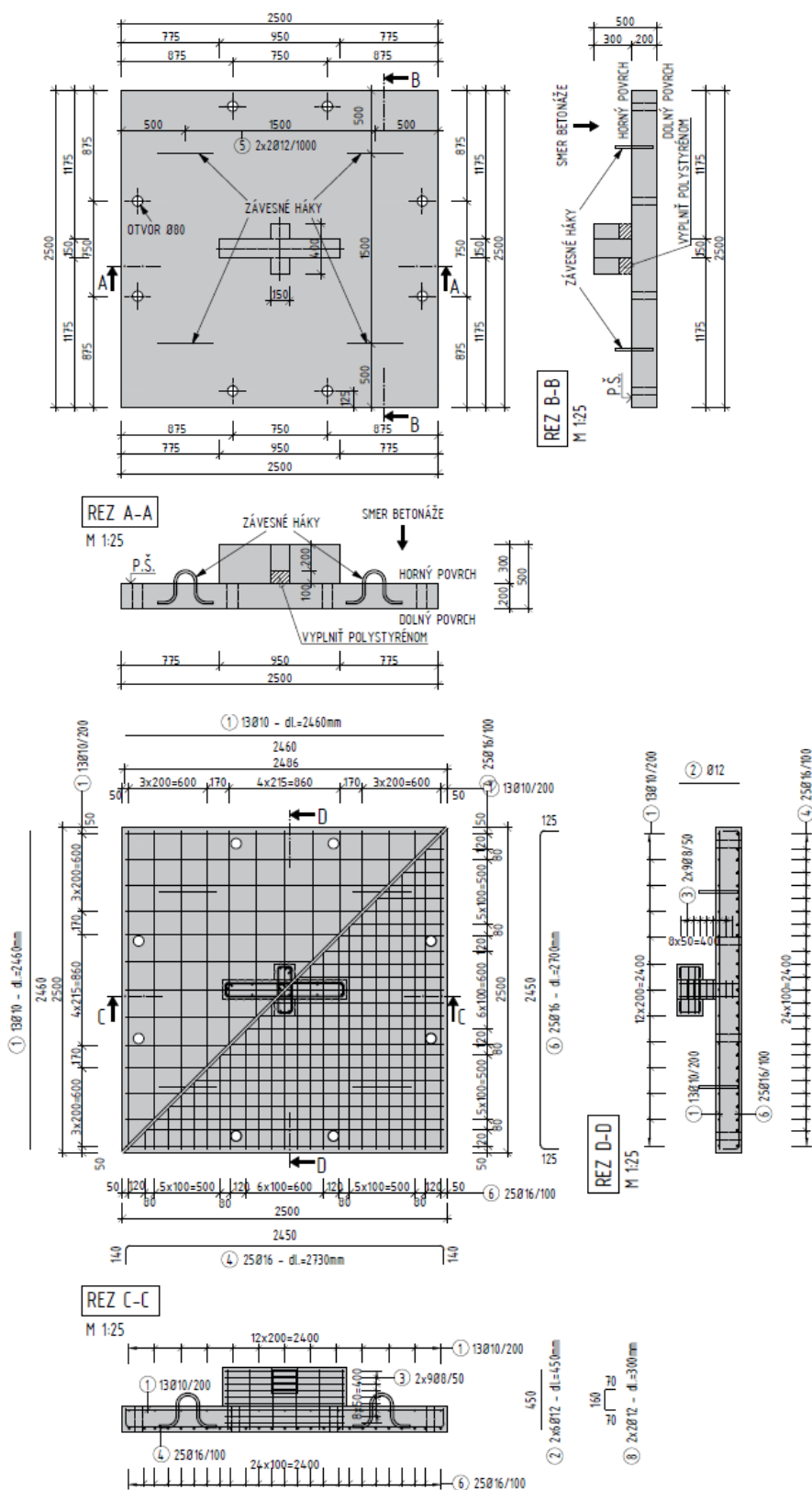
V druhej sérii experimentov bol zvolený variant stĺpa v tvare kríža s cieľom zvýšiť stabilitu uloženia zostavy a tým eliminovať natáčanie vzorky počas zaťažovania. Toto rozšírenie podpory do tvaru kríža bolo navrhnuté len v spodnej časti stĺpa tak, aby neovplyvnilo podopretie dosky (viď Obr. 5.2). Na presné stanovenie materiálových charakteristík boli v čase betónovania odobraté vzorky použitého betónu a tiež hlavnej nosnej výstuže.

Tab. 5.1 Geometrické a materiálové charakteristiky jednotlivých vzoriek

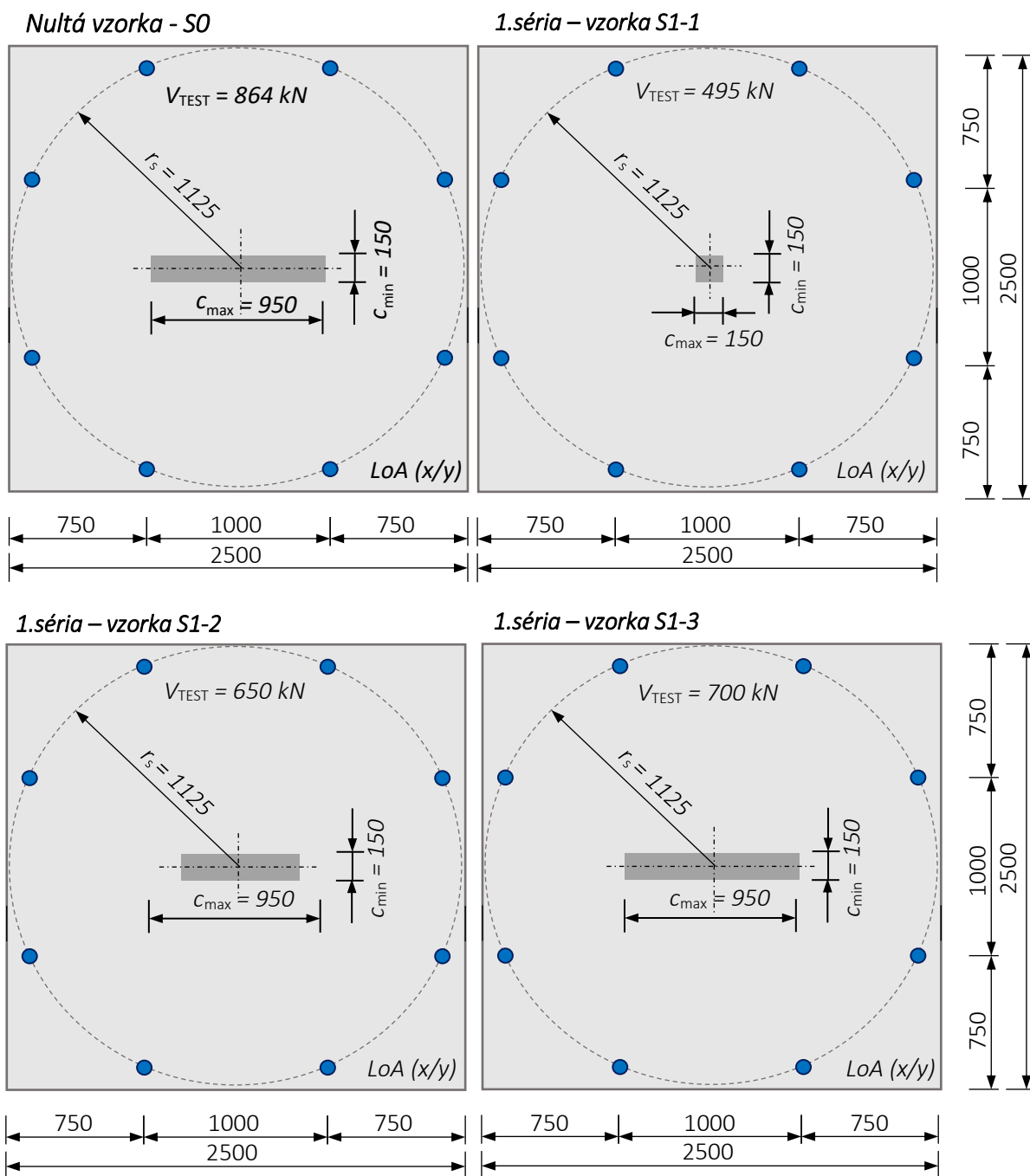
Vzorka	Zať.	C_{min} [m]	C_{max} [m]	C_{nom} [m]	d [m]	ρ [-]	f_c [MPa]	E [GPa]
S0	x/y	0,15	0,95	0,025	0,159	0,0126	29,89	32,25
S1-1	x/y		0,15					35,75
S1-2	x/y		0,65				22,86	35,75
S1-3	x/y		0,95					36,50
S2-1	x/y		0,95	0,02	0,164	0,0123	29,83	32,80
S2-2	2x/y		0,95				33,31	34,25
S2-3	x/2y		0,95				32,25	31,75
S2-4	9x/y		0,95				27,88	32,00

Tab. 5.2 Materiálové charakteristiky použitého betónu

Vzorka	S0 (x/y)	S1-1 (x/y)	S1-2 (x/y)	S1-3 (x/y)	S2-1 (x/y)	S2-2 (2x/y)	S2-3 (x/2y)	S2-4 (x)	Stĺp
Betonáž	4.4.19		25.5.20		17.3.21	16.3.21		25.5.20	
Exp. skúška	14.5.20	31.7.20	21.7.20	13.7.20	4.8.21	17.8.21	26.8.21	6.9.21	31.7.20
Vek betónu	406 dní	67 dní	57 dní	49 dní	145 dní	154 dní	163 dní	174 dní	49 dní
Valec	30,13	24,03	25,79	19,79	28,50	33,81	33,80	27,50	-
	30,65	23,54	21,24	18,56	31,00	33,25	30,70	28,55	-
	28,88	27,36	24,13	21,33	29,40	32,86	-	27,60	-
f_c [MPa]	29,89		22,86		29,83	33,31	32,25	27,88	-
Kocka	39,70	38,79	30,78	30,36	39,80	42,24	42,90	34,24	87,28
	40,42	36,04	33,64	31,79	36,70	42,64	41,90	34,96	91,91
	38,44	-	-	-	39,40	44,29	42,14	-	90,74
$f_{c,cube}$ [MPa]	39,52		33,57		38,63	43,06	42,31	34,60	89,98
Hranol	33,20	29,28	29,65	25,85	31,10	30,00	31,75	30,86	-
	32,56	26,18	25,08	30,10	32,30	32,22	30,96	21,26	-
$f_{c,prism}$ [MPa]	32,88		27,69		31,70	31,11	31,36	26,06	-
Modul	31,50	36,00	36,50	34,50	34,00	33,00	32,00	34,00	-
pružnosti	33,00	35,50	35,00	38,50	35,00	35,50	31,50	30,00	-
E [GPa]	32,25		36,00		34,50	34,25	31,75	32,00	-



Obr. 5.2 Pôdorysné usporiadanie experimentálnej vzorky S2-1

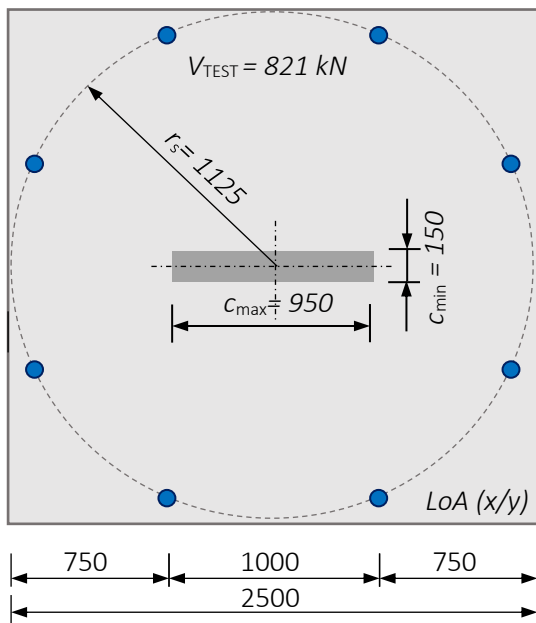


Legenda

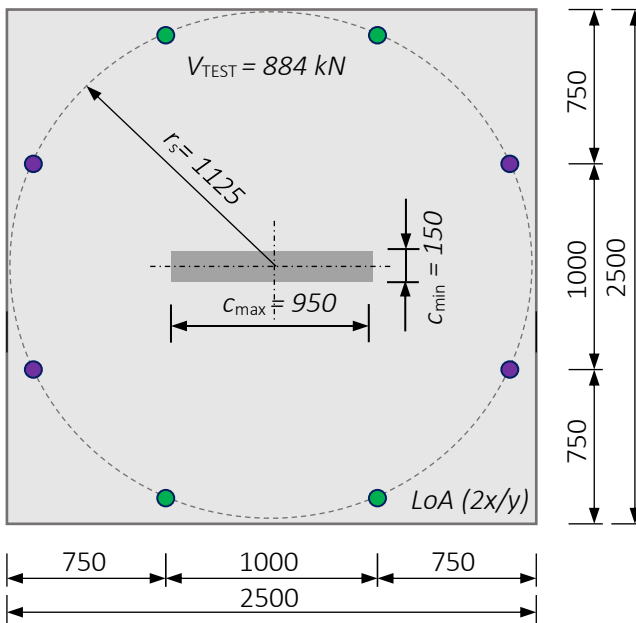
- V_{TEST} celková sila pri porušení [kN]
LoA spôsob zaťaženia (loading case)
● $V_{TEST}/8$ ($8 \times V_{TEST}/8 = \text{rovnomerné zaťaženie}$)

Obr. 5.3 Schéma zaťaženia nulte vzorky a vzoriek prvej série S1-i

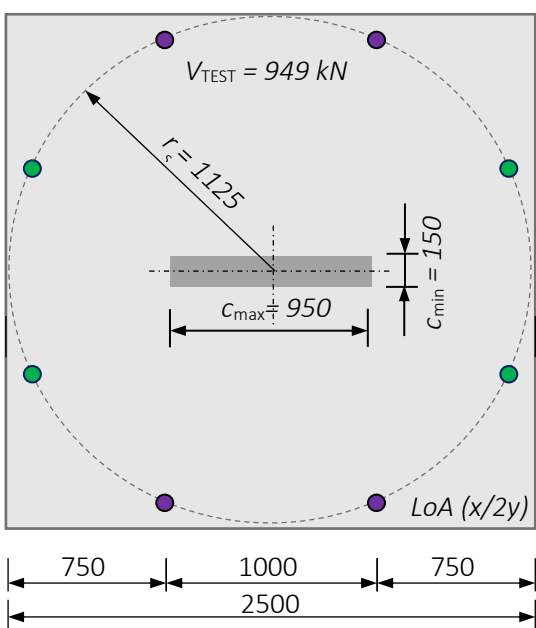
2.séria – vzorka S2-1



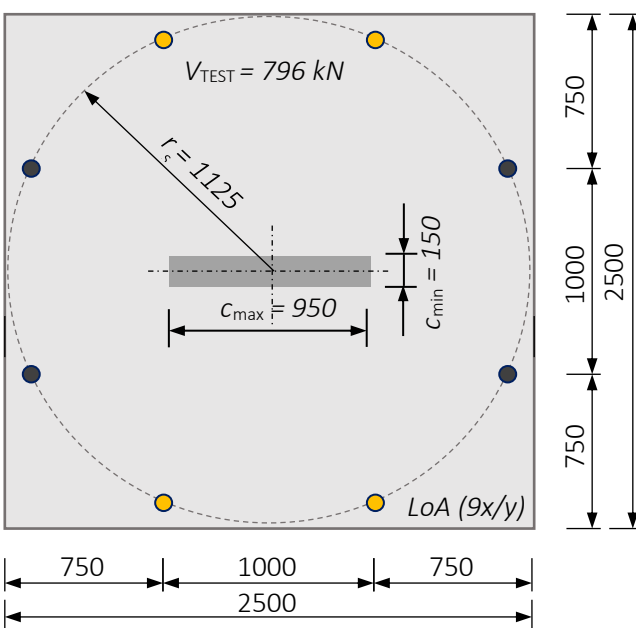
2.séria – vzorka S2-2



2.séria – vzorka S2-3



2.séria – vzorka S2-4



Legenda

V_{TEST} celková sila pri porušení [kN]

LoA spôsob zaťaženia (loading case)

● $V_{TEST}/8$ (rovnomerné zaťaženie)

● $V_{TEST}/6$ ($4 \times V_{TEST}/6$) = 2/3 z celk. zaťaženia

● $V_{TEST}/12$ ($4 \times V_{TEST}/12$) = 1/3 z celk. zaťaženia

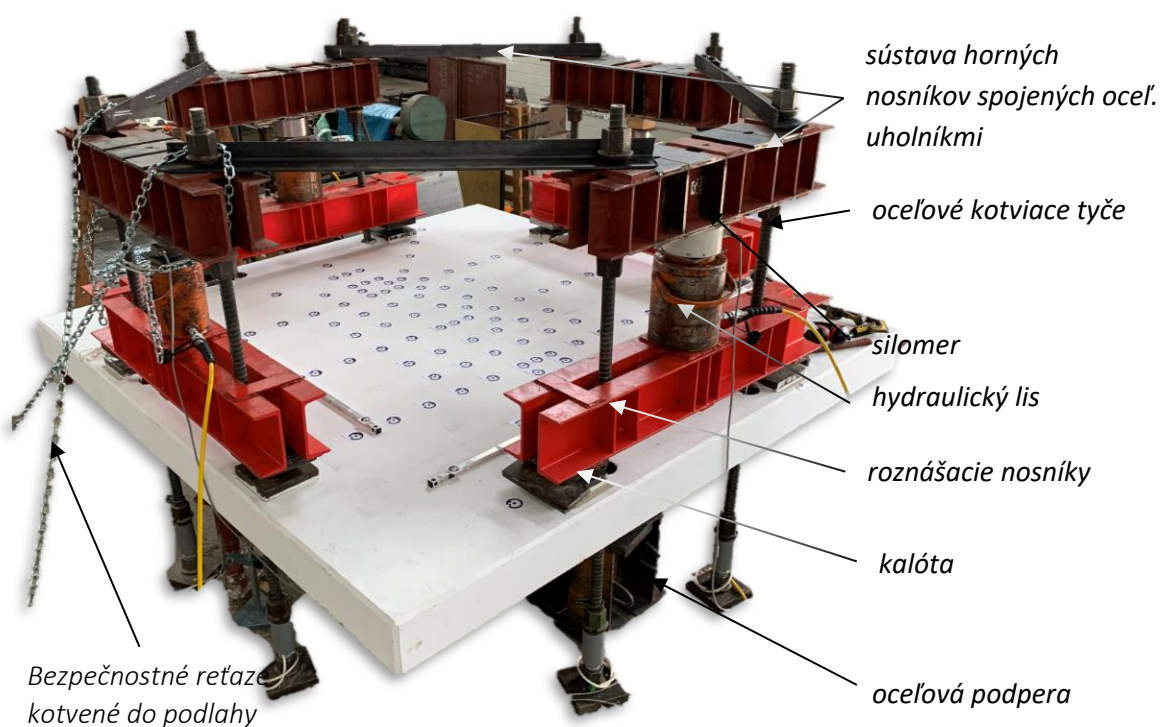
● $V_{TEST}/4,44$ ($4 \times V_{TEST}/4,44$) = 9/10 z celk. zať.

● $V_{TEST}/40$ ($4 \times V_{TEST}/40$) = 1/10 z celk. zať.

Obr. 5.4 Schéma zaťaženia vzoriek druhej série S2-i

5.2 Experimentálna zostava

Návrh skúšobnej zostavy bol inšpirovaný experimentami podobného charakteru v zahraničí [8], pričom sa bralo do úvahy vybavenie a podmienky v Centrálnych laboratóriách STU. Celkové usporiadanie skúšobnej zostavy je znázornené na Obr. 5.5. Skúšobná vzorka bola osadená na oceľovú podperu, pričom sa pomocou ôsmich oceľových tyčí priemeru $\varnothing = 42$ mm ukotvila do podlahy laboratória. Zaťažovanie vzoriek bolo realizované pomocou štvorice lisov a sústav nosníkov rozmiestnených po obvode dosky. Dvojice oceľových nosníkov boli rozopierané lismi umiestnenými v strede ich rozpätia, pričom sila bola do dosky vnášaná vždy v dvoch bodoch so vzájomnou vzdialenosťou 1 m. Spodné dvojice nosníkov boli podložené oceľovými kalótami, aby sa tak zabezpečilo klbové uloženie rámu a dosky.



Obr. 5.5 Experimentálna zostava s osadenou vzorkou S2-i

Skúšobná zostava bola navrhnutá tak, aby bolo okrem rovnomerného zaťažovania zo všetkých štyroch strán umožnené aj nerovnomerné zaťažovanie. Rôzne pomery síl prichádzajúcich do stĺpa boli zabezpečené pomocou rôznych veľkostí hydraulických lisov.

V druhej sérii experimentov bola skúšobná zostava doplnená o prvky zabezpečujúce celkovú stabilitu pri možnom naklonení zostavy ako celku. Horná sústava nosníkov bola diagonálne prepojená oceľovými uholníkmi, pričom dvojice nosníkov rovnobežných s dlhšou stranou stĺpa boli prichytené podlahu laboratória oceľovými reťazami.

5.3 Meracie zariadenia a merané veličiny

Počas experimentálnych skúšok boli na skúšobných vzorkách merané nasledovné veličiny:

- veľkosť zaťaženia dosky (veľkosti síl spôsobujúcich šmykové porušenie dosky),
- deformácie dosky (priehyby) v dvoch navzájom kolmých smeroch,
- pomerné pretvorenia betónu na hornom i spodnom povrchu dosky,
- vznik trhlín a ich postupný rozvoj,
- pootočenie dosky za šmykovou trhlinou.

Elektromagnetické snímače a silomery

Veľkosť síl, ktorými bola skúšobná vzorka zaťažovaná, bola meraná pomocou štyroch silomerov umiestnených nad hydraulickými lisami pripojenými na jednu riadiacu jednotku. Na rovnomerné zaťažovanie boli použité hydraulické lisy s kapacitou 0,5 MN. Pri nerovnomernom zaťažení boli dva z nich vymenené za lisy s vyššou kapacitou a to až 1 MN.

Viacsnímková konvergentná fotogrametria

V spolupráci s Katedrou geodézie Stavebnej fakulty Slovenskej technickej univerzity v Bratislave sa na experimentálnych skúškach realizovala metóda merania pomocou konvergentnej fotogrametrie [19]. Pomocou viacsnímkovej konvergentnej fotogrametrie bolo možné na skúšobnej vzorke merať pomerné pretvorenia na hornom povrchu dosky, jej pootočenie a taktiež deformáciu. Fotoaparát bol upevnený približne 2,5 m nad vzorkou na otočnom ramene, vďaka čomu bolo možné vzorku odfotografovať z viacerých uhlov, aby boli zachytené všetky body nachádzajúce sa na doske.

Tenzometrické pásy

Pomocou tenzometrických pásov HBM 1-LY41-50/120 nalepených na spodnom povrchu dosky boli merané pomerné pretvorenia v radiálnom i tangenciálnom smere. Stred pásov bol umiestnený vždy 75 mm od líca stĺpa. Príprava lepenia tenzometrických pásov spočíva v zbrúsení povrchu dosky až po viditeľné kamenivo a očistení zbrúseného povrchu. Pásy sa lepia na takto pripravený povrch dvojzložkovým lepidlom X60 Schnellklebstoff. Rozmiestnenie tenzometrov bolo pre jednotlivé skúšobné vzorky odlišné a schémy rozmiestnenia sú znázornené v kapitole 5.5.4.

LVDT (Linear Variable Differential Transformer) snímače

Zvislé deformácie dosky boli merané pomocou LVDT snímačov umiestnených pod vzorkou podľa schémy na Obr. 5.6. Vďaka obojstrannému umiestneniu snímačov v miestach maximálnych deformácií bolo

v konečnom dôsledku možné z celkovej deformácie odpočítať naklonenie vzorky, ku ktorému prichádzalo počas zaťažovania.



Obr. 5.6 Rozloženie LVDT snímačov pre vzorku S0 (resp. S1-3, S2-i)

5.4 Postup zaťažovania

Postupnosť zaťažovania bola stanovená pri každej vzorke osobitne s ohľadom na predpokladanú silu pri porušení. Prvým krokom bolo pri každej skúške zaktivizovanie zaťažovacej sústavy pri hodnote celkovej sily 20 kN. Ostatné kroky sa volili postupne po 25, 50 až 100 kN. Prestávky medzi jednotlivými zaťažovacími krokmi slúžili nielen na ustálenie meracích zariadení, ale taktiež na zakresľovanie novovzniknutých trhlín na hornom povrchu dosky.

5.5 Analýza experimentálnych výsledkov

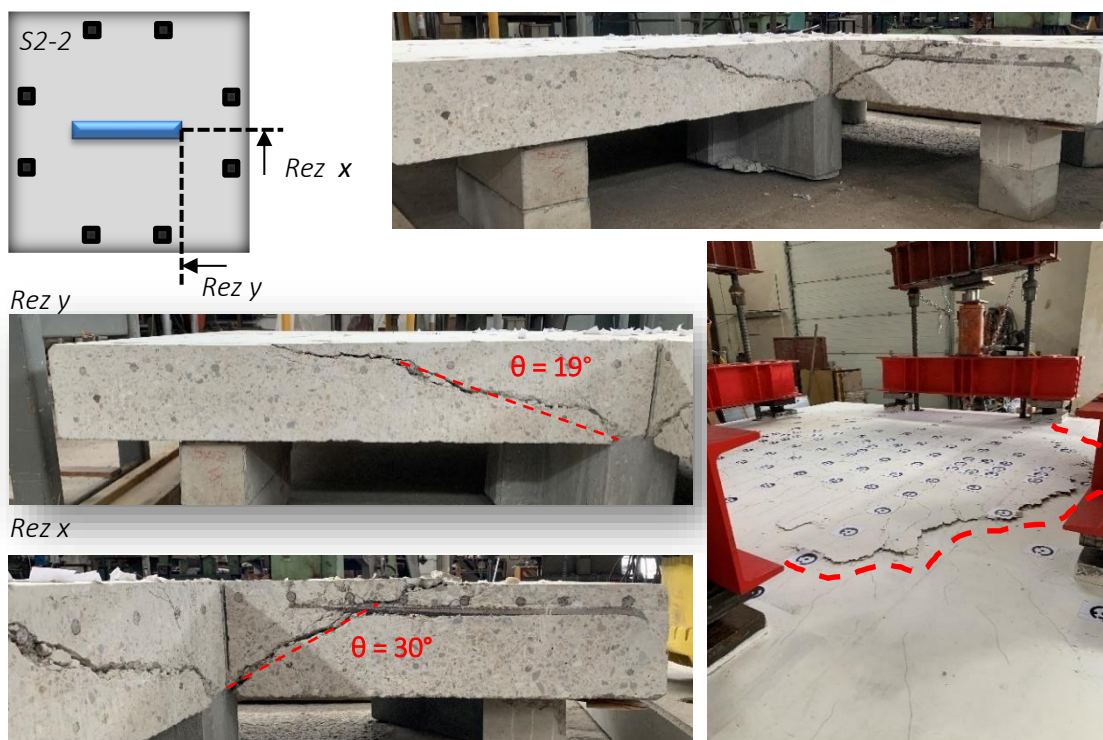
5.5.1 Celková sila

Celková sila pri porušení bola pri experimentálnych skúškach meraná pomocou štyroch silomerov rozmiestnených po obvode vzorky. K celkovej sile nameranej v silomeroch bola následne pripočítaná vlastná tiaž dosky o veľkosti 31 kN a tiaž zostavy celkovo s hodnotou 12 kN. Sila pri porušení jednotlivých vzoriek je uvedená v kap 7.1.

5.5.2 Trhliny

Prvé viditeľné trhliny vznikli pri celkovom zaťažení približne 200 kN. Z pozorovania možno usúdiť, že ako prvé vznikali radiálne trhliny v oblasti rohov podpery, čo indikuje koncentráciu šmykového napätia pri stranách stĺpa c_{min} . Postupne sa pri vyšších zaťaženiach tieto radiálne trhliny prepájali s trhlínami v tangenciálnom smere až sa následne zastavil vznik nových trhlín a rozvinuté trhliny zväčšovali svoju šírku. Zaznamenanie vzniku nových trhlín je pri jednotlivých zaťaženiach zobrazené na Obr. 7.6.

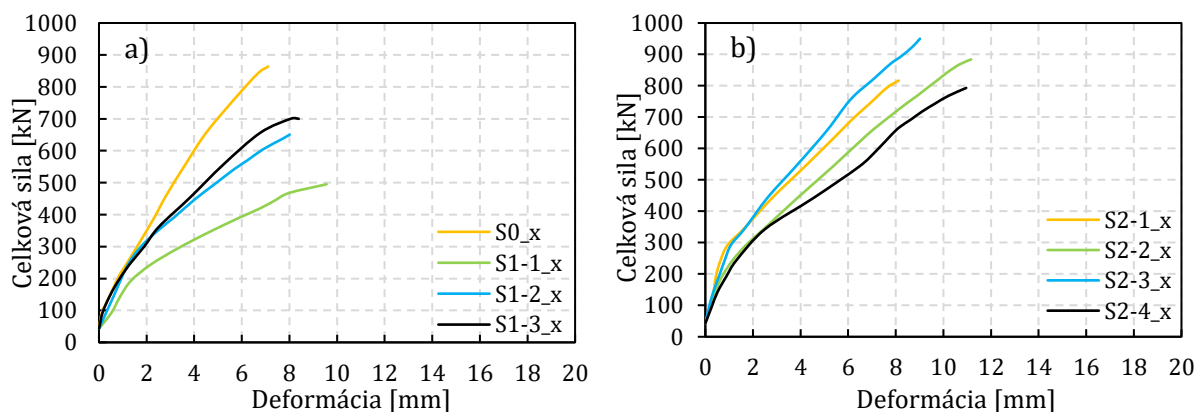
V rámci experimentálneho programu bola vzorka S2-2 po porušení prerezaná s cieľom zistiť charakter porušenia. Šmyková trhlinka má rôzny uhol v dvoch navzájom kolmých smeroch. Zatiaľ čo pri kratšej strane stĺpa $c_{\min}$ je tento uhol približne 19° , v smere kolmom na dlhšiu stranu stĺpa $c_{\max}$ je tento uhol rovný 30° .



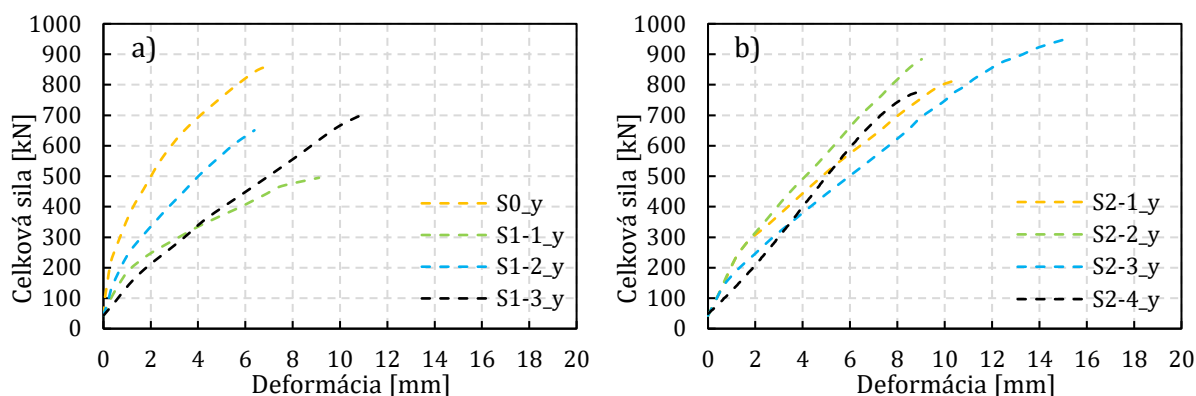
Obr. 5.7 Prierez vzorkou S2-2 po porušení

5.5.3 Deformácie

Deformačný stav vzoriek bol meraný viacerými spôsobmi. Prvým z nich bolo meranie deformácií pomocou LVDT (Linear Variable Differential Transformer) snímačov umiestnených v líniiach osí vzorky podľa schémy na Obr. 5.6.

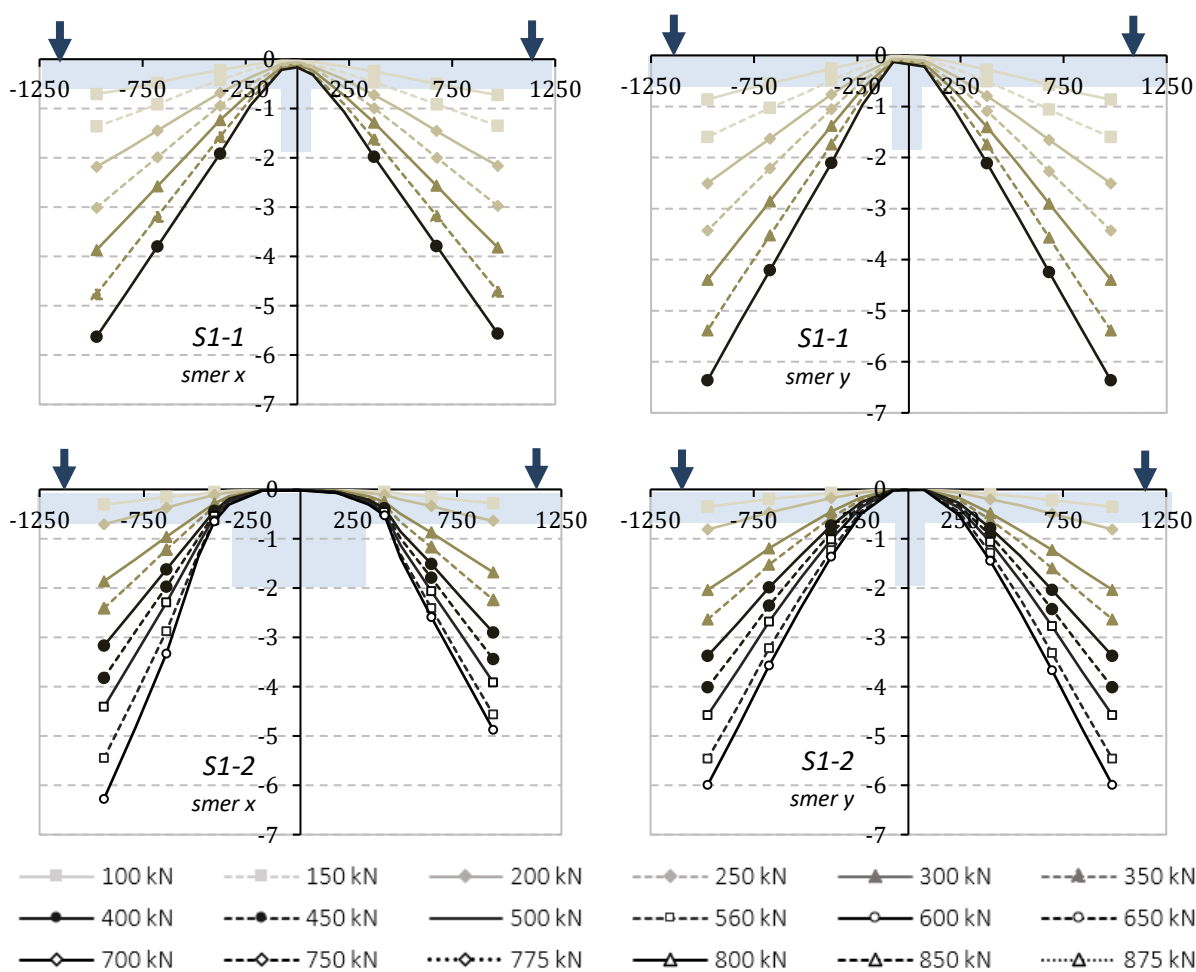


Obr. 5.8 Maximálne namerané deformácie vzoriek rovnobežne s $c_{\max}$

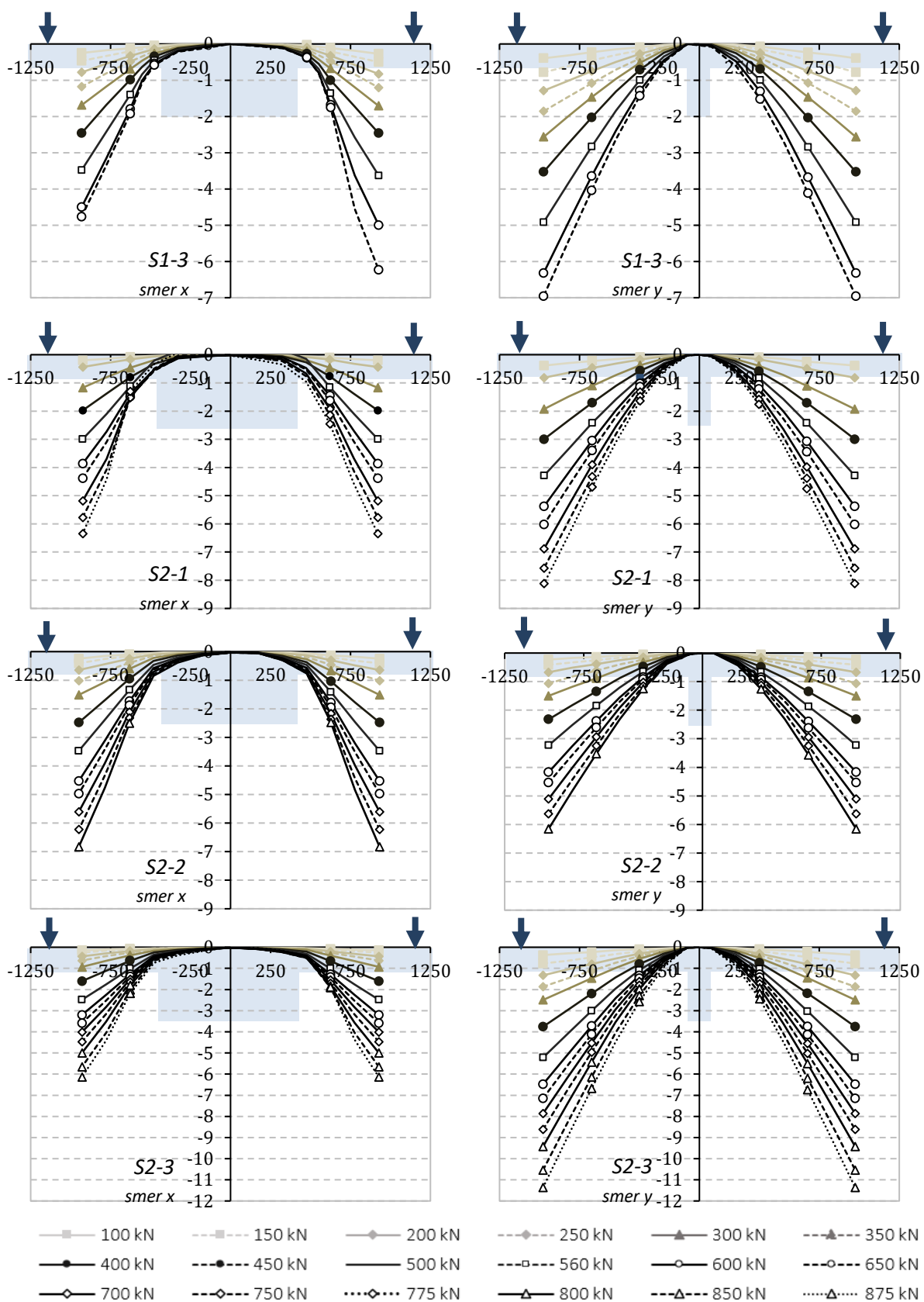


Obr. 5.9 Maximálne namerané deformácie vzoriek kolmo na c_{max}

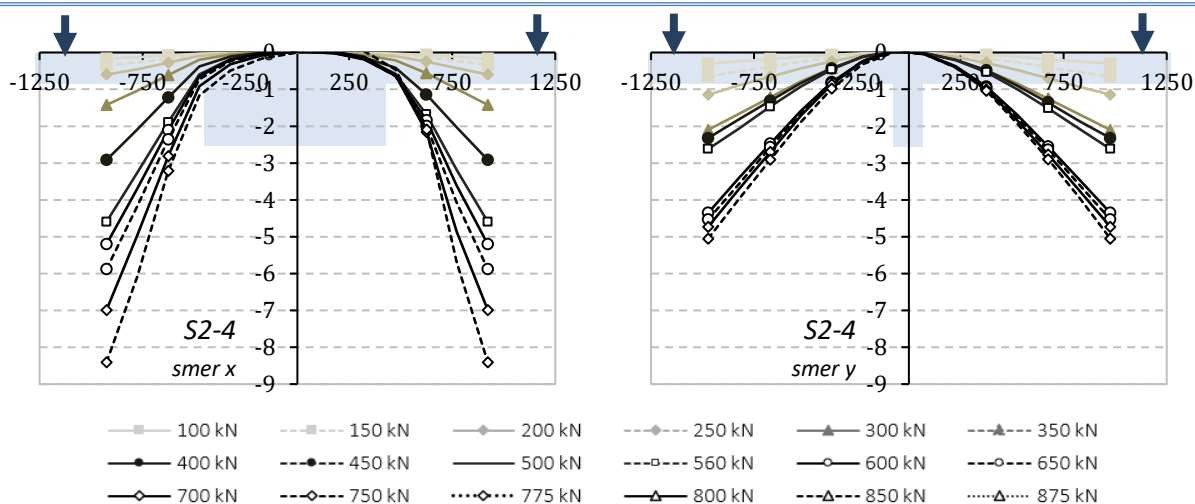
Počas zaťažovania prichádzalo pri niektorých vzorkách k nepriaznivému natočeniu dosky okolo dlhšej strany stĺpa. Vo výslednej deformácii v smere y bolo toto natočenie eliminované spriemerovaním nameraných hodnôt deformácie na vzájomne protiľahlých stranách vzorky. Z porovnania deformácií v smere x a v smere y je jasné, že na deformáciu dosky vplyva nielen tvar jej podopretia, ale aj spôsob zaťaženia vzorky.



Obr. 5.10 Deformácie vzoriek S1-1 a S1-2 získané metódou fotogrametrického merania



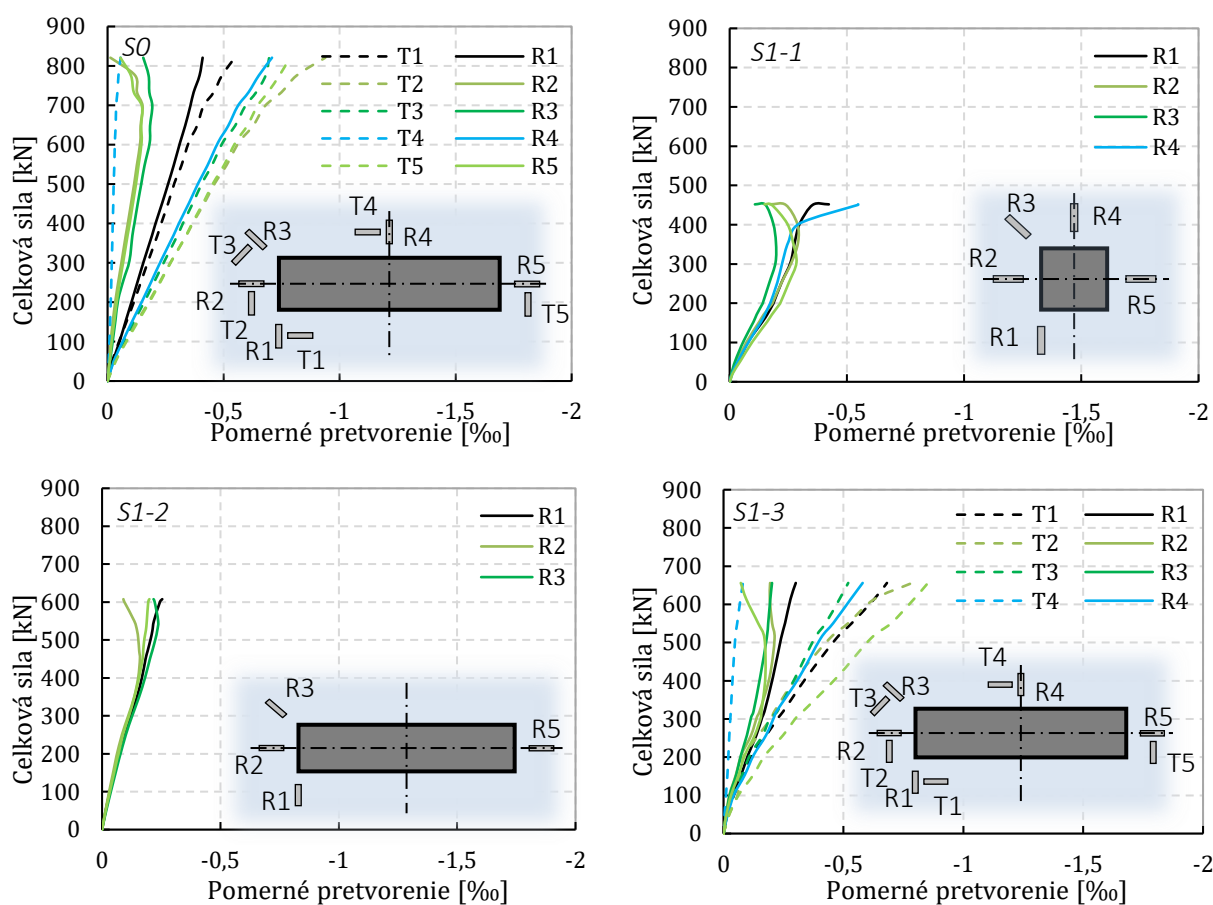
Obr. 5.11 Deformácie vzorky druhej série S1-3, S2-1, S2-2 a S2-3 získané metódou fotogrametrického merania



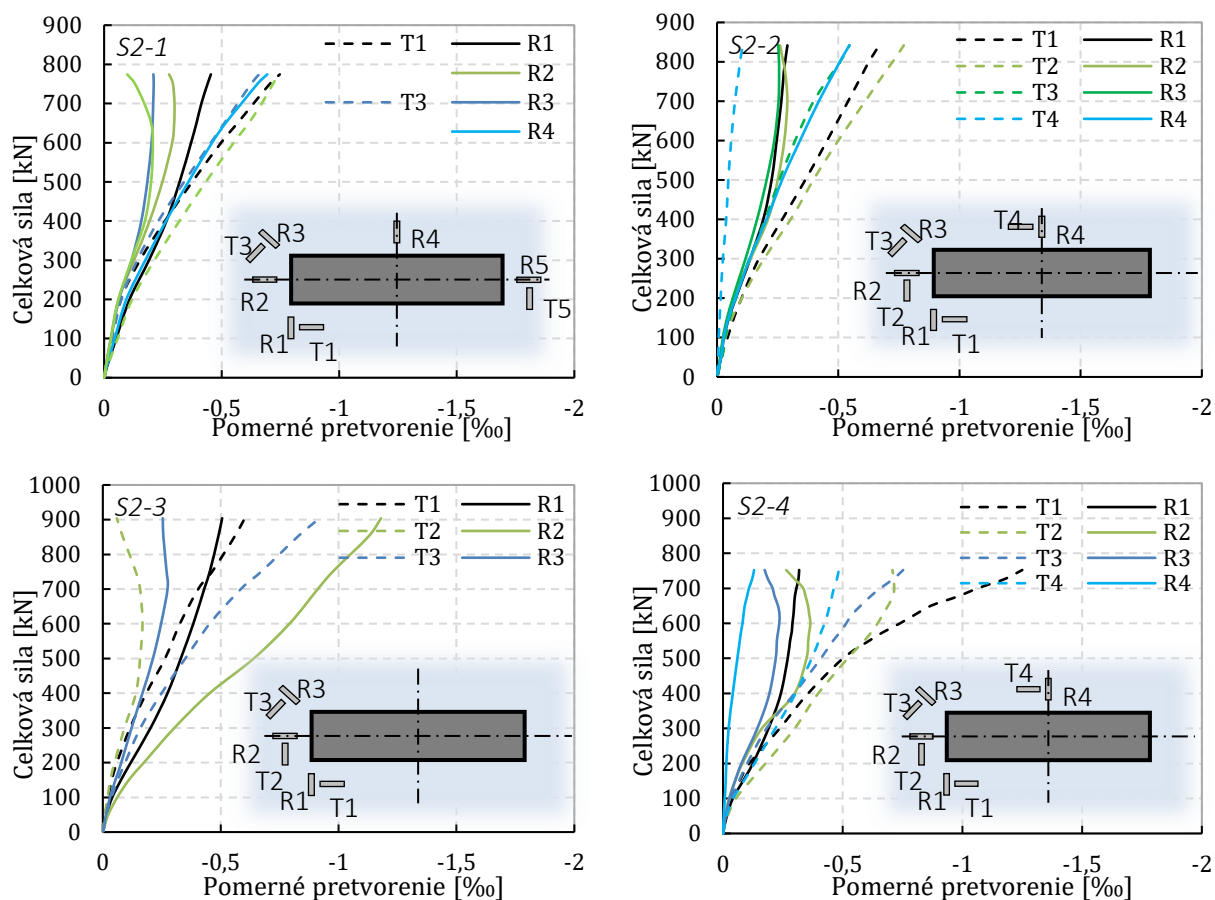
Obr. 5.12 Deformácie vzorky S2-4 získané metódou fotogrametrického merania

5.5.4 Pomerné pretvorenia

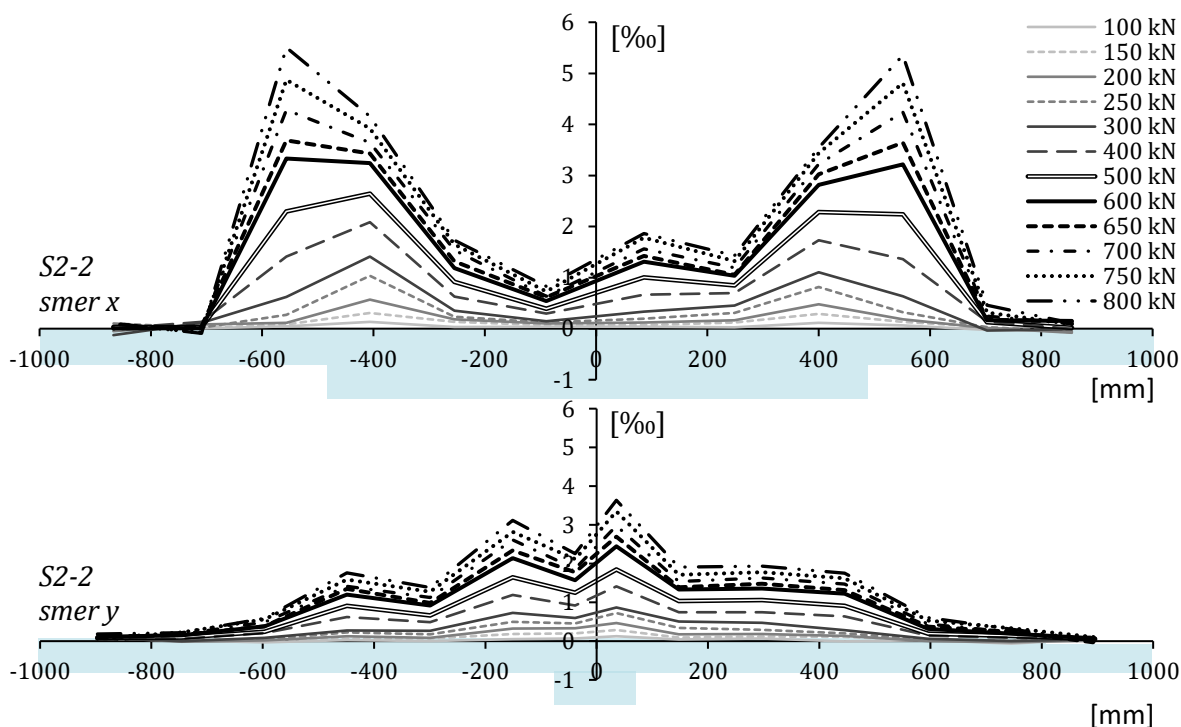
Pomerné pretvorenia boli na spodnom povrchu dosky merané pomocou tenzometrov umiestnených v blízkosti stĺpa (vo vzd. 75 mm od líca stĺpa). Na základe získaných hodnôt možno potvrdiť koncentráciu šmykových síl pri kratšej strane podpory. Vo všeobecnosti najväčšie pomerné pretvorenia vznikali v tangenciálnom smere v blízkosti strany c_{min} a v radiálnom smere uprostred strany c_{max} .



Obr. 5.13 Pomerné pretvorenia merané odporovými tenzometrami na spodnom povrchu vzoriek S0, S1-1, S1-2 a S1-3



Obr. 5.14 Pomerné pretvorenia merané odporovými tenzometrami na spodnom povrchu vzoriek druhej série



Obr. 5.15 Priebeh pomerných pretvorení na hornom povrchu vzoriek S2-2 a S2-3

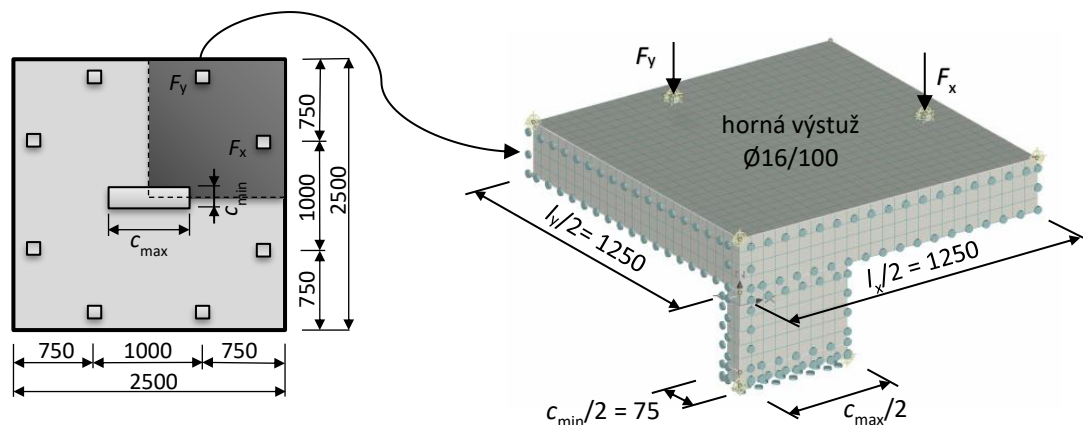
Na základe fotogrametrického merania bolo možné určiť pomerné pretvorenia na hornom povrchu dosky. Meraním zmeny polohy jednotlivých bodov sme získali predstavu o priebehu pomerných pretvorení po celej dĺžke v líniiach osí dosky. Na základe týchto výsledkov možno konštatovať, že najväčšie pomerné pretvorenia v smere x (v smere dlhšej strany stĺpa) vznikli za lícom stĺpa. Najväčšie hodnoty pomerných pretvorení v smere y (kolmo na dlhšiu stranu stĺpa) vznikli priamo v osi stĺpa (Obr. 5.15).

6 NELINEÁRNA ANALÝZA

Jedným z cieľov práce je verifikácia existujúcich návrhových výpočtových modelov používaných nielen u nás, ale i v zahraničí. Nakoľko realizácia experimentov a výroba skúšobných vzoriek je finančne náročná, čoraz častejšie sa na analýzu využívajú nelineárne výpočtové programy založené na báze metódy konečných prvkov. Na nelineárne výpočty bol v tejto práci použitý program ATENA. Na kalibráciu modelov boli použité poznatky z predošlých experimentov podobného charakteru [17].

6.1 Popis modelu

Vzhľadom na časovú náročnosť nelineárnych výpočtov je vhodné využiť symetriu modelovaných vzoriek. Vďaka tomuto faktoru bolo možné namodelovať len štvrtinu celkovej vzorky, pričom sa použili okrajové podmienky zabezpečujúce jej symetrické správanie.



Obr. 6.1 Geometria vzorky analyzovanej v programe Atena

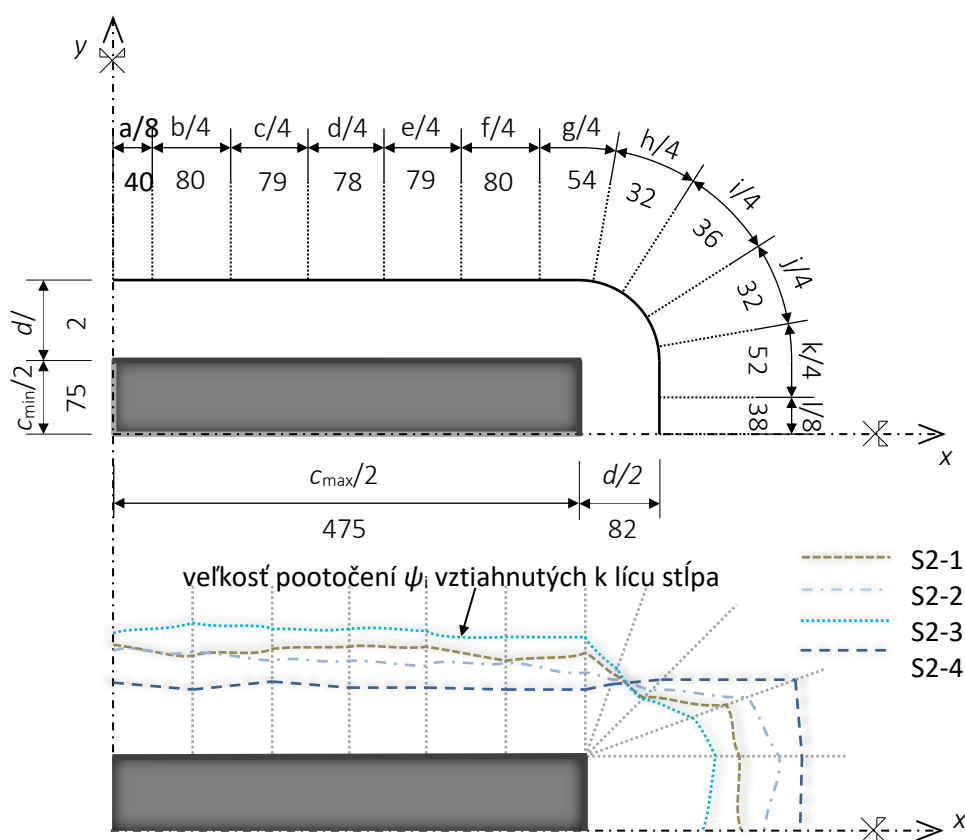
Podľa odporúčaní [20] sa zvolilo vhodné delenie siete 3D elementov so stranou kubického elementu $a = 40$ mm. Program Atena pracuje na kumulatívnom spôsobe zaťažovania, a teda v každom kroku bola pripočítaná sila, ktorá mohla byť korigovaná zadaním koeficientu kumulácie pri každom zaťažovacom kroku. Základným zaťažovacím krokom bola sila o hodnote 12,5 kN (50 kN na celú vzorku), pričom v prvom kroku bola k sile pripočítaná aj vlastná tiaž vzorky.

6.2 Doskové pootočená z NLFEA

Na základe kalibrácie parametrov výpočtového modelu a dosiahnutia pomerne dobrej zhody medzi experimentálnymi výsledkami s výsledkami z NLFEA sa numerické modely použili na zistenie pootočení po dĺžke kontrolného obvodu. Kontrolný obvod bol rozdelený na niekoľko segmentov, na ktorých bolo uvažované konštantné pootočenie (Obr. 6.2). Tieto pootočená boli merané vo vzdialenosti $2d$ (≈ 330 mm) od líca stĺpa. Výsledné hodnoty pootočení a k nim prislúchajúce odolnosti sú zhrnuté v Tab. 6.1 až Tab. 6.8.

Podľa CSCT je šmyková odolnosť funkciou pootočenia dosky. V prípade podopretia dosky obdĺžnikovým stĺpom nie sú pootočená dosky konštantné po obvode stĺpa. Šmyková odolnosť jednotlivých vzoriek bola vypočítaná na základe výsledného pootočenia ψ získaného tromi spôsobmi:

- integráciou šmykových odolností jednotlivých častí plného kontrolného obvodu s použitím príslušných pootočení ψ_i
- integráciou šmykových odolností jednotlivých častí redukovaného kontrolného obvodu s použitím príslušných pootočení ψ_i
- s uvažovaním maximálneho pootočenia vo výpočte šmykovej odolnosti dosky $\psi = \psi_{\max}$ na plnom kontrolnom obvode.



Obr. 6.2 Rozdelenie kontrolného obvodu na segmenty a pootočená okolo obvodu stĺpa pre dosky S2-i

Tab. 6.1 Pootočenia segmentov a k nim prislúchajúce šmykové odolnosti podľa CSCT s plným kontrolným obvodom

Segment	Pootočenie				$b_{0,i}$	$V_{R,c}(b_0)$			
	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4		S2-1	S2-2	S2-3	S2-4
	[mRad]					[m]	[kN]		
a	11,21	10,61	12,37	7,40	0,160	57,7	62,6	57,3	66,2
b	10,10	10,54	13,35	6,68	0,320	121,0	125,5	110,3	137,3
c	10,83	9,60	12,79	7,46	0,315	115,5	128,7	111,0	130,0
d	11,02	9,58	12,82	6,91	0,310	112,8	126,7	109,1	131,5
e	11,11	9,13	12,65	6,87	0,315	114,2	131,4	111,6	133,9
f	9,59	9,40	12,00	6,70	0,320	123,7	131,9	116,3	137,2
g	10,40	8,36	12,05	6,70	0,217	81,1	93,9	78,7	93,1
h	8,73	8,21	9,43	7,73	0,129	51,8	56,1	52,2	52,5
i	8,26	9,40	8,10	10,92	0,143	58,8	59,0	61,6	50,5
j	15,13	17,45	11,38	22,49	0,129	40,0	39,1	48,0	30,7
k	15,52	19,53	13,10	21,82	0,207	63,5	58,8	72,1	50,3
l	15,71	17,99	11,78	21,57	0,150	45,7	44,7	55,0	36,7
Súčet					2,715	985,6	1058,2	983,1	1049,8

Tab. 6.2 Pootočenia segmentov a k nim prislúchajúce šmykové odolnosti podľa CSCT s uvažovaním redukovanej dĺžky kontrolného obvodu

Segment	Pootočenie				$b_{0,i}$	$V_{R,c}(b_{0,red})$			
	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4		S2-1	S2-2	S2-3	S2-4
	[mRad]					[m]	[kN]		
a	11,21	10,61	12,37	7,40	0,000	-	-	-	-
b	10,10	10,54	13,35	6,68	0,000	-	-	-	-
c	10,83	9,60	12,79	7,46	0,000	-	-	-	-
d	11,02	9,58	12,82	6,91	0,189	68,7	77,3	66,5	80,1
e	11,11	9,13	12,65	6,87	0,315	114,2	131,4	111,6	133,9
f	9,59	9,40	12,00	6,70	0,320	123,7	131,9	116,3	137,2
g	10,40	8,36	12,05	6,70	0,217	81,1	93,9	78,7	93,1
h	8,73	8,21	9,43	7,73	0,129	51,8	56,1	52,2	52,5
i	8,26	9,40	8,10	10,92	0,143	58,8	59,0	61,6	50,5
j	15,13	17,45	11,38	22,49	0,129	40,0	39,1	48,0	30,7
k	15,52	19,53	13,10	21,82	0,207	63,5	58,8	72,1	50,3
l	15,71	17,99	11,78	21,57	0,150	45,7	44,7	55,0	36,7
Súčet					1,799	647,4	692,0	662,0	664,9

Tab. 6.3 Maximálne pootočenie a šmyková odolnosť podľa CSCT s plným kontrolným obvodom

Segment	Pootočenie				b_0	$V_{R,c} (b_0 + \psi_{\max})$			
	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4		S2-1	S2-2	S2-3	S2-4
	[mRad]					[m]	[kN]		
$a - l$	15,71	19,53	13,10	22,49	2,715	826,3	770,6	945,1	646,2

Tab. 6.4 Vyhodnotenie šmykovej odolnosti podľa CSCT

Vzorka	V_{TEST}	V_{ATENA}	$V_{\psi}(b_0)$	$V_{\psi}(b_{0,red})$	$V_{\psi,max}$	V_{TEST} / V_{calc}			V_{ATENA} / V_{calc}		
						V_{ψ}	$V_{\psi}(b_{0,red})$	$V_{\psi,max}$	V_{ψ}	$V_{\psi}(b_{0,red})$	$V_{\psi,max}$
S2-1	821	831	985,6	647,4	826,3	0,83	1,27	0,99	0,84	1,28	1,01
S2-2	884	836	1058,2	692,0	770,6	0,84	1,28	1,15	0,79	1,21	1,08
S2-3	949	919	983,1	662,0	945,1	0,97	1,43	1,00	0,93	1,39	0,97
S2-4	796	756	1049,8	664,9	646,2	0,76	1,20	1,23	0,72	1,14	1,17
Priemer						0,85	1,29	1,09	0,82	1,25	1,06

Tab. 6.5 Pootočenia segmentov a prislúchajúce šmykové odolnosti podľa MC2010 s plným kontrolným obvodom

Segment	Pootočenie				$b_{0,i}$	$V_{R,c}(b_0)$			
	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4		S2-1	S2-2	S2-3	S2-4
	[mRad]					[m]	[kN]		
<i>a</i>	11,21	10,61	12,37	7,40	0,160	45,4	49,4	44,8	53,5
<i>b</i>	10,10	10,54	13,35	6,68	0,320	95,8	99,1	85,9	111,5
<i>c</i>	10,83	9,60	12,79	7,46	0,315	91,1	102,2	86,6	104,9
<i>d</i>	11,02	9,58	12,82	6,91	0,310	88,8	100,7	85,1	106,5
<i>e</i>	11,11	9,13	12,65	6,87	0,315	89,9	104,7	87,1	108,5
<i>f</i>	9,59	9,40	12,00	6,70	0,320	98,3	104,9	91,1	111,4
<i>g</i>	10,40	8,36	12,05	6,70	0,217	64,1	75,2	61,7	75,6
<i>h</i>	8,73	8,21	9,43	7,73	0,129	41,4	45,0	41,5	42,2
<i>i</i>	8,26	9,40	8,10	10,92	0,143	47,1	46,9	49,5	39,8
<i>j</i>	15,13	17,45	11,38	22,49	0,129	30,9	29,9	37,7	23,1
<i>k</i>	15,52	19,53	13,10	21,82	0,207	49,0	44,8	56,2	38,0
<i>l</i>	15,71	17,99	11,78	21,57	0,150	35,2	34,2	43,1	27,7
Súčet					2,715	777,0	836,9	770,4	842,7

Tab. 6.6 Pootočenia segmentov a k nim prislúchajúce šmykové odolnosti podľa MC2010 s uvažovaním redukovanej dĺžky kontrolného obvodu

Segment	Pootočenie				$b_{0,i}$	$V_{R,c}(b_{0,red})$			
	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4		S2-1	S2-2	S2-3	S2-4
	[mRad]					[m]	[kN]		
<i>a</i>	11,21	10,61	12,37	7,40	0,000	-	-	-	-
<i>b</i>	10,10	10,54	13,35	6,68	0,000	-	-	-	-
<i>c</i>	10,83	9,60	12,79	7,46	0,000	-	-	-	-
<i>d</i>	11,02	9,58	12,82	6,91	0,189	54,2	61,4	51,9	64,9
<i>e</i>	11,11	9,13	12,65	6,87	0,315	89,9	131,4	111,6	133,9
<i>f</i>	9,59	9,40	12,00	6,70	0,320	98,3	131,9	116,3	137,2
<i>g</i>	10,40	8,36	12,05	6,70	0,217	64,1	93,9	78,7	93,1
<i>h</i>	8,73	8,21	9,43	7,73	0,129	41,4	56,1	52,2	52,5
<i>i</i>	8,26	9,40	8,10	10,92	0,143	47,1	59,0	61,6	50,5
<i>j</i>	15,13	17,45	11,38	22,49	0,129	30,9	39,1	48,0	30,7
<i>k</i>	15,52	19,53	13,10	21,82	0,207	49,0	58,8	72,1	50,3
<i>l</i>	15,71	17,99	11,78	21,57	0,150	35,2	44,7	55,0	36,7
Súčet					1,799	510,0	546,9	519,9	531,3

Tab. 6.7 Maximálne pootočenie a šmyková odolnosť podľa MC2010 s plným kontrolným obvodom

Segment	Pootočenie				b_0	$V_{R,c}(b_0 + \psi_{\max})$			
	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4		S2-1	S2-2	S2-3	S2-4
	[mRad]					[m]	[kN]		
$a - l$	15.71	19.53	13.10	22.49	2.715	637.0	586.4	736.6	487.9

Tab. 6.8 Vyhodnotenie šmykovej odolnosti podľa MC2010

Vzorka	V_{TEST}	V_{ATENA}	$V_{\psi}(b_0)$	$V_{\psi}(b_{0,red})$	$V_{\psi,max}$	V_{TEST} / V_{calc}			V_{ATENA} / V_{calc}		
						V_{ψ}	$V_{\psi}(b_{0,red})$	$V_{\psi,max}$	V_{ψ}	$V_{\psi}(b_{0,red})$	$V_{\psi,max}$
S2-1	821	831	777,0	510,0	637,0	1,06	1,61	1,29	1,07	1,63	1,30
S2-2	884	836	836,9	546,9	586,4	1,06	1,62	1,51	1,00	1,53	1,43
S2-3	949	919	770,4	519,9	736,6	1,23	1,83	1,29	1,19	1,77	1,25
S2-4	796	756	842,7	531,3	487,9	0,94	1,50	1,63	0,90	1,42	1,55
Priemer						1,07	1,64	1,43	1,04	1,59	1,38

7 ANALÝZA VÝSLEDKOV

7.1 Vplyv tvaru podopretia na šmykovú odolnosť

Na základe porovnania experimentálne nameranej hodnoty s predikciami podľa vybraných návrhových modelov bola stanovená ich spoľahlivosť (Tab. 7.1). Šmyková odolnosť získaná z experimentu bola taktiež porovnaná s výsledkami numerickej nelineárnej analýzy v programe Atena.

Tab. 7.1 Experimentálne nameraná šmyková odolnosť nutej vzorky a vzoriek prvej série v porovnaní s NLFEA a predikciami návrhových modelov pri uvážení plnej dĺžky kontrolného obvodu

Vzorka	Zať.	V _{TEST}	V _{NLFEA}	V _{EC2}	V _{MC2010}	V _{prEC2}	V _{TEST} / V _{model}			
							V _{NLFEA}	V _{EC2}	V _{MC2010}	V _{prEC2}
							[kN]			[-]
S0	x/y	864	831	806	760	800	1,04	1,07	1,14	1,08
S1-1	x/y	495	496	484	409	492	1,00	1,02	1,21	1,01
S1-2	x/y	650	681	666	619	678	0,95	0,98	1,05	0,96
S1-3	x/y	700	756	775	717	768	0,93	0,90	0,98	0,91
Priemer							0,98	0,99	1,09	0,99

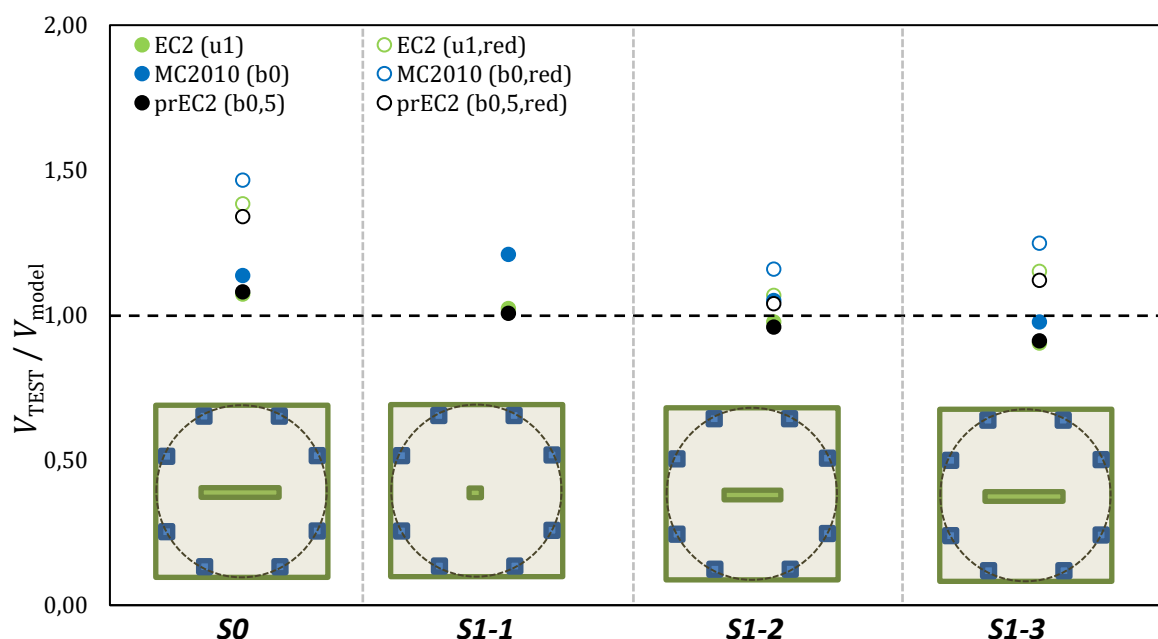
Tab. 7.2 Experimentálne nameraná šmyková odolnosť nutej vzorky a vzoriek prvej série v porovnaní s predikciami návrhových modelov pri uvážení redukovanej dĺžky kontrolného obvodu

Vzorka	Zař.	V_{TEST}	V_{EC2}	V_{MC2010}	V_{prEC2}	V_{TEST} / V_{model}		
						V_{EC2}	V_{MC2010}	V_{prEC2}
						[-]		
<i>S0</i>	x/y	864	624	590	645	1,38	1,47	1,34
<i>S1-1</i>	x/y	495	484	409	492	1,02	1,21	1,01
<i>S1-2</i>	x/y	650	608	561	625	1,07	1,16	1,04
<i>S1-3</i>	x/y	700	608	561	625	1,15	1,25	1,12
<i>Priemer</i>						1,16	1,27	1,13

Na Obr. 6.1 možno vidieť pokles spoľahlivosti návrhových modelov so zväčšujúcou sa stranou c_{max} pri uvážení plného kontrolného obvodu. Redukciou dĺžky kontrolného obvodu na vzdialenosť $1,5d$ od líca podpory sa spoľahlivosť výrazne zlepšuje na stranu bezpečnú. Trendová krivka sa mení z klesajúcej na stúpajúcu, čo značí, že skutočná redukcia dĺžky kontrolného obvodu je menšia ako odporúčaná vzdialenosť $1,5d$ od líca podpory.

Potreba redukcie dĺžky kontrolného obvodu sa preukázala vo všetkých vyššie spomenutých návrhových postupov. V prípade aktuálne platnej normy EC2 a taktiež pripravovanej novej formy prEC2 sa porovnanie experimentálne nameraných hodnôt šmykovej odolnosti a šmykovej odolnosti podľa EC2

a prEC2 s uvážením plného kontrolného obvodu preukázalo pri viacerých vzorkách na strane nebezpečnej. Návrhový model MC2010 sa javí ako najbezpečnejší, pričom len pri vzorke S1-3 sa výpočet s plným kontrolným obvodom preukázal na strane nebezpečnej. Pri redukcii dĺžky kontrolného obvodu na vzdialenosť $1,5d$ od rohu podpory sa návrhové modely pohybujú na strane bezpečnej s mierou spoľahlivosti od 1,13 až po 1,27.

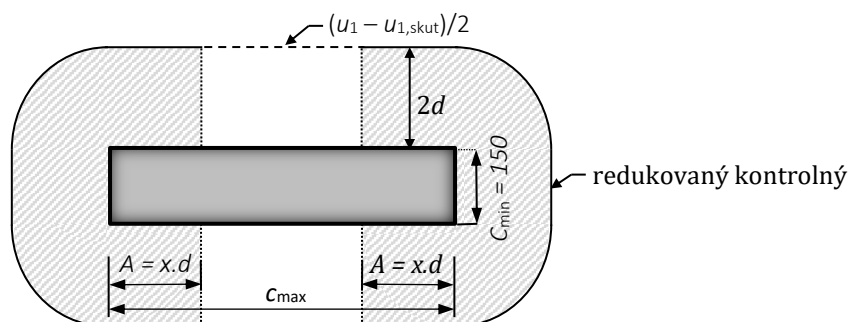


Obr. 7.1 Vyhodnotenie spoľahlivosti návrhových modelov pretlačenia pre pilotnú vzorku a vzorky prvej série S1-i

7.2 Redukcia dĺžky kontrolného obvodu

Nakoľko sa v aktuálne platnej norme EC2 preukázala potreba redukcie dĺžky kontrolného obvodu (viď. Tab. 7.1), z experimentálne nameranej šmykovej odolnosti bola spätne vypočítaná dĺžka skutočného kontrolného obvodu. Za predpokladu, že šmykový tok je okolo stĺpa so štvorcovým prierezom (vzorka S1-1) konštantný po celej dĺžke kontrolného obvodu, bol pomocou experimentálne získanej šmykovej odolnosti vzorky S1-1 vypočítaný šmykový tok. Na základe podielu experimentálne získaných šmykových odolností vzoriek S1-2, S1-3, S2-i a šmykového toku vzorky S1-1, sa vypočítala skutočná dĺžka kontrolného obvodu týchto vzoriek.

Redukcia dĺžky kontrolného obvodu podľa EC2 na vzdialenosť $1,5d$ od líca podpery sa preukázala ako bezpečná vzhľadom na výsledky experimentálnych skúšok vzoriek, nakoľko z analýzy vyplývajú efektívne časti kontrolného obvodu v rozmedzí od $1,73d$ pre vzorku S1-3 až po $2,14d$ pre vzorku S1-3. Potreba redukcie dĺžky kontrolného obvodu sa nepreukázala len pri vzorke S2-3.



Obr. 7.2 Redukcia dĺžky kontrolného obvodu

Tab. 7.3 Redukcia dĺžky kontrolného obvodu pre EC2 na základe experimentálne nameranej šmykovej odolnosti

Vzorka	Zaťaženie	V_{TEST} [kN]	u_{skut} [m]	$u_1 - u_{skut}$ [m]	A [m]	x [-]	u_{skut}/u_1 [-]
S1-1	x/y	495	-	-	-	-	-
S1-2	x/y	650	3,49	0,17	0,28	1,73	0,95
S1-3	x/y	700	3,76	0,50	0,35	2,14	0,88
S2-1	x/y	821	4,04	0,22	0,42	2,56	0,95
S2-2	2x/y	884	4,19	0,07	0,46	2,79	0,98
S2-3	x/2y	949	4,26	0,00	0,48	2,90	1,00
S2-4	9x/y	796	4,00	0,26	0,41	2,51	0,94

7.3 Vplyv spôsobu zaťaženia na šmykovú odolnosť dosiek

Aktuálne platné návrhové modely EC2, MC2010, ako aj pripravovaná druhá generácia prEC2 (2021) nezohľadňujú vo výpočte šmykovej odolnosti spôsob zaťaženia. Experimentálne namerané šmykové odolnosti jednotlivých vzoriek podopretých stĺpom s rozmermi 950 mm x 150 mm (vzorky druhej série) sú uvedené v Tab. 7.4 a Tab. 7.5.

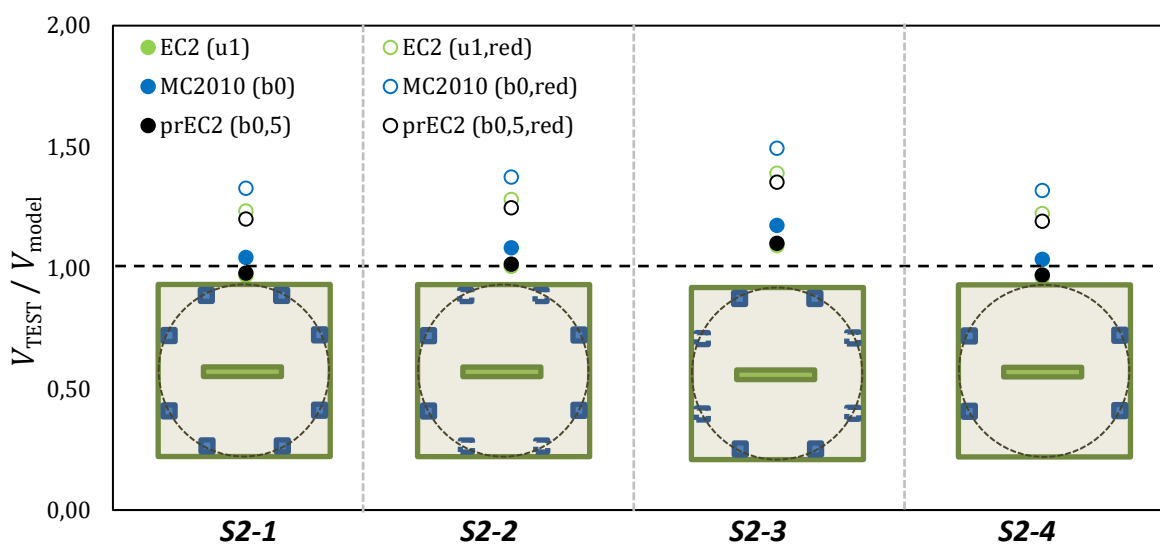
Rôzne rozpätia polí v reálnych konštrukciách možno simulovať nerovnomerným zaťažovaním vzoriek v smere x a v smere y, čo má za následok rozdielne rozloženie šmykového namáhania okolo podpory. Postupné zväčšovanie zaťaženia v smere x (zaťaženie bližšie ku kratšej strane stĺpa) v pomere ku zaťaženiu v smere y spôsobilo pokles šmykovej odolnosti dosky.

Tab. 7.4 Experimentálne nameraná šmyková odolnosť v porovnaní s NLFEA a predikciami návrhových modelov pri uvažovaní plnej dĺžky kontrolného obvodu

Vzorka	Zať.	V _{TEST}	V _{NLFEA}	V _{EC2}	V _{MC2010}	V _{prEC2}	V _{TEST} / V _{model}			
							V _{NLFEA}	V _{EC2}	V _{MC2010}	V _{prEC2}
							[kN]			[-]
S2-1	x/y	821	831	847	787	839	0,99	0,97	1,04	0,98
S2-2	2x/y	884	836	879	817	871	1,06	1,01	1,08	1,02
S2-3	x/2y	949	919	869	808	861	1,03	1,09	1,17	1,10
S2-4	9x/y	796	756	828	769	821	1,05	0,96	1,04	0,97
Priemer							1,03	1,01	1,08	1,02

Tab. 7.5 Experimentálne nameraná šmyková odolnosť v porovnaní s predikciami návrhových modelov pri uvažovaní redukovanej dĺžky kontrolného obvodu

Vzorka	Zať.	V_{TEST}	V_{EC2}	V_{MC2010}	V_{prEC2}	V_{TEST} / V_{model}		
						V_{EC2}	V_{MC2010}	V_{prEC2}
						[-]		
		[kN]				[-]		
S2-1	x/y	821	665	618	683	1,23	1,33	1,20
S2-2	2x/y	884	690	643	709	1,28	1,37	1,25
S2-3	x/2y	949	682	636	701	1,39	1,49	1,35
S2-4	9x/y	796	650	604	668	1,22	1,32	1,19
Priemer						1,28	1,38	1,25

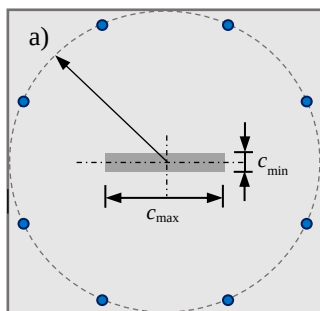


Obr. 7.3 Vyhodnotenie spoľahlivosti návrhových modelov pretlačenia pre vzorky druhej série S2-i

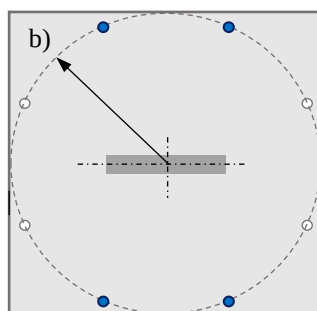
7.3.1 Vplyv spôsobu zaťaženia na šmykovú odolnosť dosiek podľa Oliveira

Aktuálne platné návrhové modely, ako napríklad EC2, či MC2010 nezohľadňujú vo výpočte šmykovej odolnosti dosiek spôsob zaťaženia. Zohľadnenie zaťažovacích podmienok predstavil vo svojej práci Oliveira et al. [7], kde aplikoval súčiniteľ λ_i upravujúci veľkosť šmykovej odolnosti.

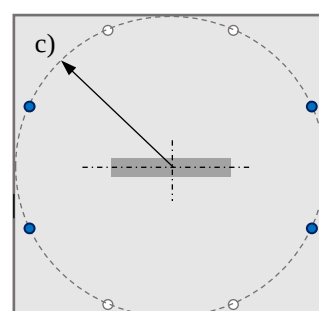
$$\lambda_1 = 1.03 \cdot \left(\frac{c_{\max}}{d} \right)^{0,02}$$



$$\lambda_2 = 0.93 \cdot \left(\frac{c_{\max}}{d} \right)^{0,14}$$



$$\lambda_3 = 1.0 \cdot \left(\frac{c_{\max}}{d} \right)^{0,17}$$



Obr. 7.4 Zaťažovacie podmienky pre vnútorný stĺp a) rovnomerné zaťaženie, b) jednosmerné zaťaženie kolmo na stranu $c_{\max}$; c) jednosmerné zaťaženie rovnobežne so stranou $c_{\max}$

Tento prístup bol aplikovaný na šmykovú odolnosť podľa EC2 s uvažovaním plného kontrolného obvodu. Pre zohľadnenie vplyvu zaťaženia sa šmyková odolnosť podelí súčiniteľom λ .

Vzťahy pre výpočet λ_i sú uvedené v Obr. 7.4 pre extrémne zaťažovacie podmienky. Z tohto dôvodu bol vo výpočtoch v druhej sérii experimentov použitý vážený priemer jednotlivých λ_1 a λ_2 resp. λ_1 a λ_3 , a teda pre vzorky S2-i jednotlivo platí $\lambda_{S2-2} = (2 \lambda_1 + \lambda_3)/3$; $\lambda_{S2-3} = (2 \lambda_1 + \lambda_2)/3$; $\lambda_{S2-3} = (2 \lambda_1 + 8 \lambda_2)/10$.

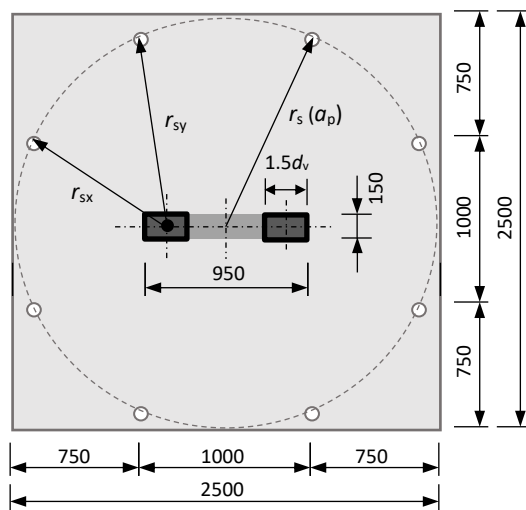
Tab. 7.6 Zohľadnenie vplyvu zaťažovacích podmienok na šmykovú odolnosť dosiek

Vzorka	V_{test} [kN]	λ_1 [-]	λ_2 [-]	λ_3 [-]	λ [-]	bez súčiniteľa λ_i		so súčiniteľom λ_i	
						V_{EC2} [kN]	$V_{\text{test}}/V_{\text{EC2}}$ [-]	$V_{\text{EC2},\lambda}$ [kN]	$V_{\text{test}}/V_{\text{EC2},\lambda}$ [-]
S0	864	1,067	-	-	1,067	806	1,072	755	1,144
S1-1	495	1,028	-	-	1,028	484	1,023	471	1,052
S1-2	650	1,059	-	-	1,059	666	0,977	629	1,034
S1-3	700	1,067	-	-	1,067	775	0,911	720	0,972
S2-1	821	1,067	-	-	1,067	847	0,970	793	1,034
S2-2	884	1,067	-	1,348	1,161	879	1,007	757	1,168
S2-3	949	1,067	1,189	-	1,108	869	1,092	785	1,209
S2-4	796	1,067	-	1,348	1,292	828	0,962	641	1,242

7.3.2 Navrhovaná modifikácia výpočtu šmykovej odolnosti podľa MC2010

Šmyková odolnosť dosky je podľa MC2010 úmerná doskovému pootočeniu za kritickou šmykovou trhlinou. Návrhový model MC2010 uvádza, že pootočená sú závislé od vzdialenosti nulových radiálnych momentov od osi stĺpa. V prípade výrazne obdĺžnikových stĺpov je vhodné túto vzdialenosť uvažovať od ťažiska zaťažovacej oblasti, nie od ťažiska samotného stĺpa (Obr. 7.5).

Priemerné pootočené, na základe ktorého bola vypočítaná šmyková odolnosť dosky, bolo stanovené ako vážený priemer pootočení ψ_x a ψ_y podľa spôsobu zaťaženia vzorky.



Obr. 7.5 Vzdialenosť nulových radiálnych momentov od ťažiska zaťažovacej oblasti

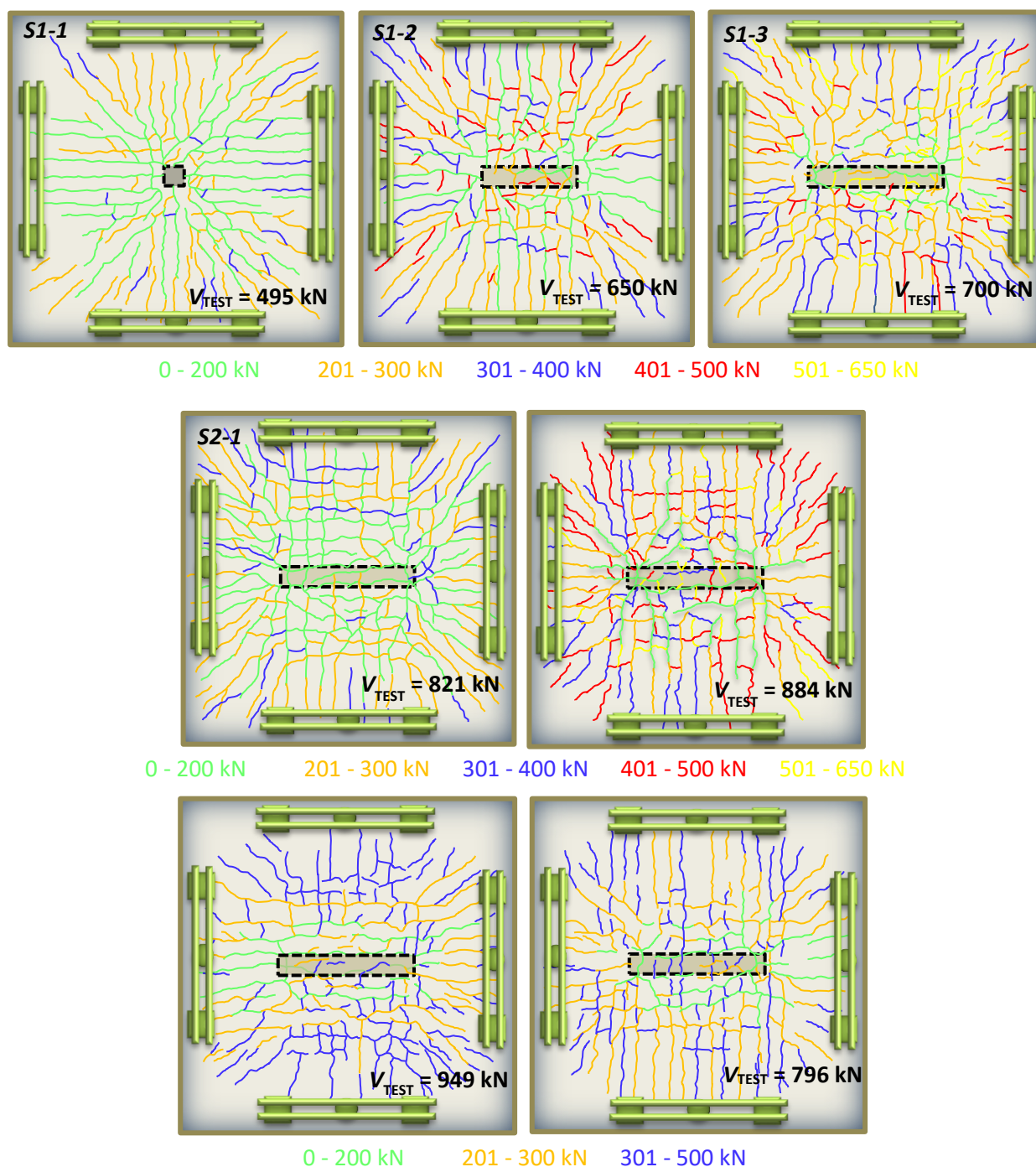
Tab. 7.7 Vyhodnotenie šmykovej odolnosti vypočítanej podľa MC2010 v porovnaní s navrhovanou úpravou

Vzorka	c_{max} [mm]	c_{max}/c_{min} -	V_{test} [kN]	Plná dĺžka $b_{0.5}$		Redukovaná dĺžka $b_{0.5}$		Redukovaná dĺžka $b_{0.5}$ (po úprave)	
				V_{MC2010} [kN]	V_{test}/V_{MC2010} -	V_{model} [kN]	V_{test}/V_{MC2010} -	V_{model} [kN]	V_{test}/V'_{MC2010} -
S0	950	6,33	864	760	1,14	590	1,47	620	1,39
S1-1	150	1,00	495	409	1,21	-	-	409	1,21
S1-2	650	4,33	650	619	1,05	561	1,16	578	1,13
S1-3	950	6,33	700	717	0,98	561	1,25	589	1,19
S2-1	950	6,33	821	787	1,04	618	1,33	650	1,26
S2-2	950	6,33	884	808	1,08	636	1,37	663	1,29
S2-3	950	6,33	949	817	1,17	643	1,49	683	1,43
S2-4	950	6,33	796	769	1,04	604	1,32	648	1,23

7.4 Trhliny

Vznik a rozvoj trhlín bol počas experimentálnych skúšok zaznamenávaný počas jednotlivých zaťažovacích krokov. Ako možno vidieť na jednotlivých vzorkách, ako prvé vznikali radiálne trhliny okolo celého obvodu stĺpa. S postupne narastajúcou silou sa tieto trhliny rozširovali ku okrajom vzorky a spájali sa novovzniknutými tangenciálnymi trhlínami. Pri vyšších zaťažovacích krokoch bol vznik nových trhlín zastavený a už vzniknuté trhliny zväčšovali svoju šírku.

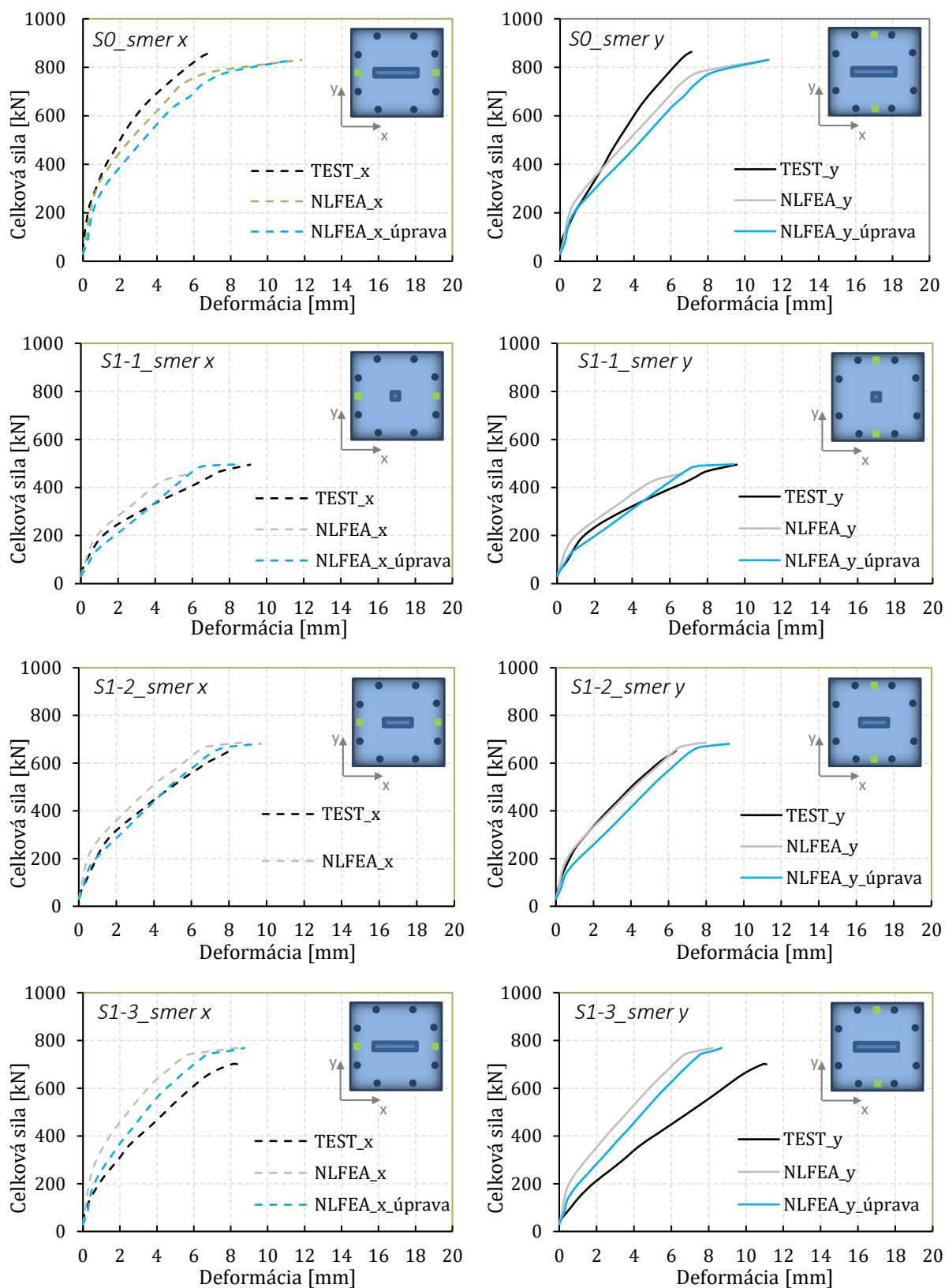
Trhlinový patern vzniknutý na povrchu vzoriek je pre jednotlivé experimentálne vzorky zobrazený na Obr. 7.6.



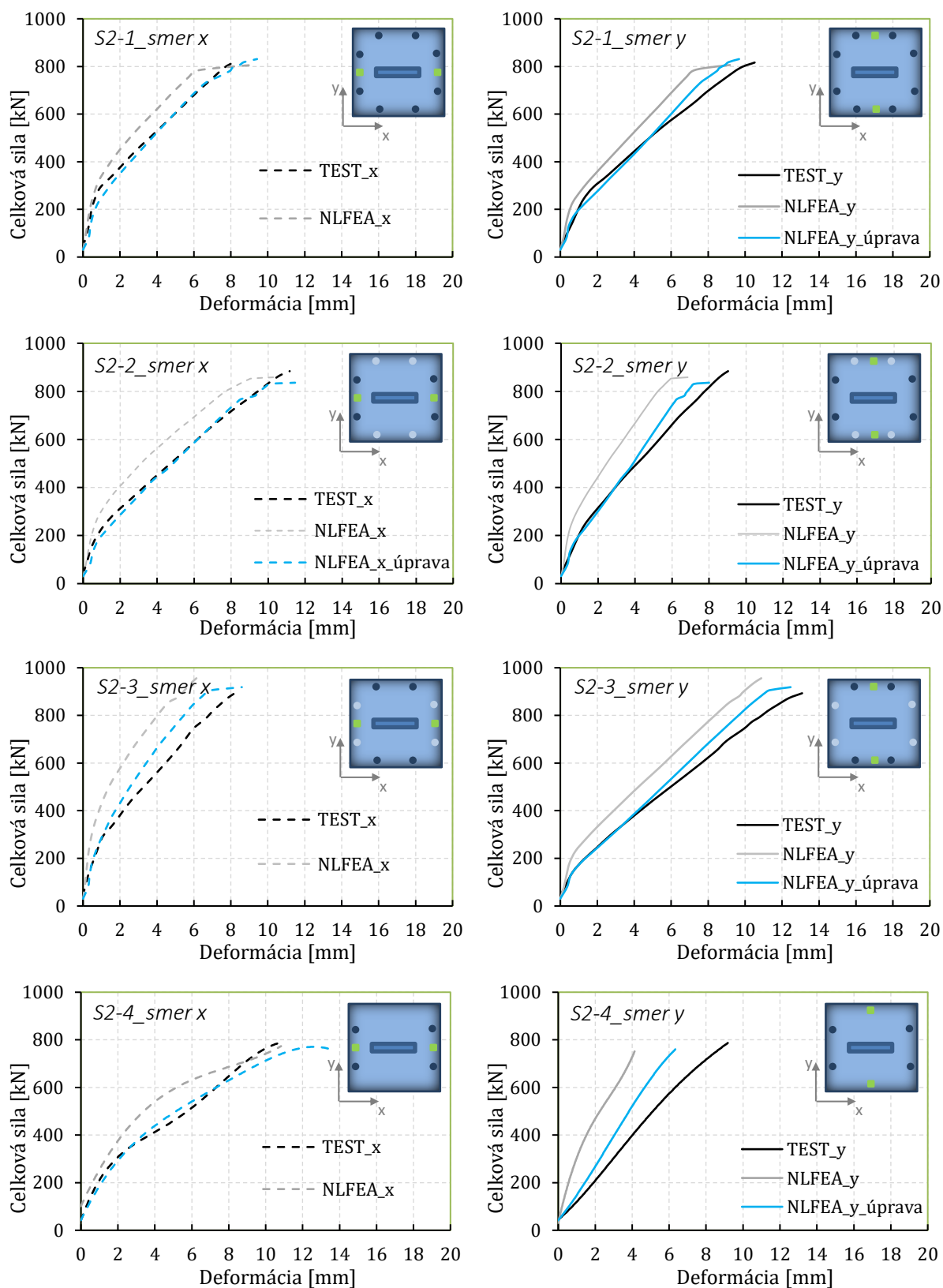
Obr. 7.6 Vznik a rozvoj trhlín v jednotlivých zaťažovacích krokoch zaznamenaný počas experimentálnych skúšok vzoriek S1-3, S2-1 a S2-2 v porovnaní s paternom trhlín z NLFEA

7.5 Zvislé deformácie

Maximálne deformácie merané počas experimentálnych skúšok boli porovnané s priebehom deformácií z nelineárnej analýzy. Vzhľadom na vysokú tuhosť modelu vzoriek v programe Atena sa pristúpilo k zníženiu tuhosti vplyvom zmrašťovania (NLFEA_úprava). Porovnanie nameraných a vypočítaných deformácií jednotlivých vzoriek je uvedené na Obr. 7.7 a Obr. 7.8.



Obr. 7.7 Zvislé deformácie pilotnej vzorky a vzoriek prvej série S1-i získané experimentálnym testom v porovnaní s deformáciami z NLFEA



Obr. 7.8 Zvislé deformácie dosiek druhej série S2-i získané experimentálnym testom v porovnaní s deformáciami z NLFEA

8 ZÁVER

Predmetom dizertačnej práce bola teoretická, experimentálna a numerická analýza šmykovej odolnosti proti pretlačeniu dosiek podopretých výrazne obdĺžnikovým stĺpom. V prvom kroku bol skúmaný vplyv tvaru podopretia na šmykovú odolnosť dosiek a následne vplyv rôzneho spôsobu zaťaženia na šmykovú odolnosť dosky podopretej stĺpom s najväčším pomerom $c_{\max}/c_{\min} = 6,3$.

Analyzované návrhové prístupy sa výrazne líšia v spôsobe výpočtu šmykovej odolnosti proti pretlačeniu bezprievlakových dosiek. U nás používaná norma EC2 zohľadňuje len geometrické a materiálové charakteristiky dosky. Zohľadňuje veľkosť podpery, no nezohľadňuje jej tvar, a teda ani deformačný stav dosky. Naopak šmyková odolnosť dosiek podľa MC2010 je úmerná pootočeniu dosky za kritickou šmykovou trhlinou. Toto pootočenie je pri doskách podopretých obdĺžnikovým stĺpom odlišné v dvoch navzájom kolmých smeroch a rovnako má na pootočenie vplyv veľkosť aj spôsob zaťažovania. Experimentálne získané šmykové odolnosti na izolovaných fragmentoch doskových vzoriek boli porovnané s predikciami nielen s týchto aktuálne platných návrhových postupov, ale aj s najnovšou druhej generácie Eurokódu 2 - prEC2 (2021).

Okrem experimentálnej analýzy bola na rovnakých vzorkách vykonaná numerická nelineárna analýza s cieľom kalibrácie parametrov výpočtového modelu. Na základe nakalibrovaného modelu je možné nielen predpovedať šmykovú odolnosť dosiek pri ďalších experimentoch, ale aj vytvoriť rozsiahlu parametrickú štúdiu v danej problematike, či odčítať parametre, ktoré sa nepodarilo namerať experimentálne.

Na základe experimentálne nameraných výsledkov a ich porovnania s návrhovými modelmi boli formulované nasledovné závery, na základe ktorých boli taktiež stanovené odporúčania pre ďalší výskum a prax:

1. Redukcia dĺžky kontrolného obvodu sa potvrdila vo všetkých spomenutých návrhových modeloch, pričom redukovanie dĺžky kontrolného obvodu na vzdialenosť $1,5d$ od líca podpery sa javí ako bezpečne stanovená hodnota tejto vzdialenosti. Výpočet šmykovej odolnosti podľa návrhového modelu MC2010 sa na rozdiel od EC2 a prEC2 javí ako spoľahlivý aj s uvážením plného kontrolného obvodu s mierou spoľahlivosti 0,98 až 1,21. Dôvodom je pomerne konzervatívne kritérium zlyhania.
2. Spoľahlivosť jednotlivých návrhových modelov s uvážením redukcie kontrolného obvodu sa pohybuje na úrovni: EC2 – 1,07 až 1,39, MC2010 – 1,16 až 1,49 a prEC2 (2021) – 1,04 až 1,35, a to v závislosti od geometrie podpery a zaťažovacích podmienok.
3. Redukcia dĺžky kontrolného obvodu dokáže pokryť aj vplyvy spôsobu zaťažovania vzoriek, napríklad aj keď väčšia časť zaťaženia pôsobí v smere kolmom na kratší rozmer stĺpa.

4. Modifikácia výpočtu šmykovej odolnosti podľa MC2010 zlepšila spoľahlivosť modelu v podiele 6 - 9 % z celkovej šmykovej odolnosti závisiac od zaťažovacích podmienok a geometrie podpery.
5. Kalibrácia parametrov nelineárneho modelu umožnila bližšie skúmať analyzované vzorky, a to napríklad pootočená dosky, či napätie vo výstuži, ktoré nebolo možné zmerať experimentálne.
6. Pootočená doska nad obdĺžnikovým stĺpom nie sú konštantné po obvode, ale závisia od pomeru strán priečného rezu stĺpa $c_{\max} / c_{\min}$. Veľkosť pootočení po obvode stĺpa závisí tiež od toku šmykových síl prichádzajúcich do stĺpa. Z analýzy doskových pootočení pri rôznych zaťažovacích podmienkach vyplýva, že do výpočtu je potrebné vstupovať s maximálnym pootočením $\psi_{\max}$ po celom kritickom obvode.
7. Predikciu šmykovej odolnosti proti pretlačeniu dosiek podopretých obdĺžnikovým stĺpom spresňuje úprava výpočtu doskových pootočení podľa MC2010, kde sa uvažuje rôzna vzdialenosť r_s v dvoch navzájom kolmých smeroch. Vzdialenosť r_s je vhodnejšie uvádzať od ťažiska zaťažovanej oblasti, nie od ťažiska stĺpa.

ODPORÚČANIE PRE PRAX

Na základe záverov vyplývajúcich z experimentálnej a numerickej analýzy, boli vyvedené nasledovné odporúčania pre prax:

- pri výpočte šmykovej odolnosti dosiek proti pretlačeniu redukovať dĺžku kontrolného obvodu pri podperách so stranou $c_{\max} > 3d$ na vzdialenosť $1,5d$ od líca podpery,
- pri posúdení šmykovej odolnosti dosiek podľa MC2010 uvažovať vo výpočte s maximálnym pootočením $\psi_{\max}$ okolo celého kontrolného obvodu,
- pri posúdení šmykovej odolnosti dosiek podľa MC2010 s výrazne obdĺžnikovým stĺpom uvažovať vzdialenosť r_s od ťažiska zaťažovanej oblasti, nie od ťažiska stĺpa.

ODPORÚČANIE PRE ĎALŠÍ VÝSKUM

Odporúčania pre ďalší výskum v oblasti problematiky pretlačenia sú zhrnuté v nasledovných bodoch:

- doplniť databázu výsledkov o ďalšie vzorky dosiek podopretých obdĺžnikovým stĺpom s iným pomerom $c_{\max}/c_{\min}$ a $c_{\max}/d$,
- zamerať sa na ďalšie nesymetrické spôsoby zaťažovania najmä v spojitosti s vplyvom nevyrovnaných ohybových momentov,
- skúmať vplyv spôsobu zaťažovania aj pre dosky podopreté stĺpom s iným pomerom $c_{\max}/c_{\min}$, napr. $c_{\max}/c_{\min} = 1,0$,
- pokračovať vo výskume redukcie dĺžky kontrolného obvodu okolo okrajov a rohov stien.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] STN 73 1201: *Navrhovanie betónových konštrukcií*. 1986.
- [2] CEN European committee for standardization: *Eurocode 2. Design of concrete structures – Part 1: general rules and rules for buildings*. Brussels, Belgium: CEN. EN 1992-1-1; 2004.
- [3] prEN 1992-1-1 Eurocode 2: *Design of concrete structures – Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures*. Upgraded draft D7. 2021.
- [4] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON: *Model Code 2010 - Final draft, Vol. 2, Buletin 66*. Lausanne, Switzerland : DCC Document Competence Center Siegmars Kästle e.K., Germany, 2012.
- [5] ACI Committee 318: *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute; 2019.
- [6] HAWKINS N. M., FALSEN H. B., HINOJOSA R.C.: *Influence of column rectangularity on the behaviour of flat plate structures*. In ACI Special Publication 1971; s. 127–146.
- [7] OLIVEIRA D. R. C., MELO G.S., REGAN P. E.: *Punching shear resistance of flat slabs with rectangular columns*. In Magazine of Concrete Research 56 (3) (2004). s. 123-138. ISSN 0024-9831.
- [8] SAGASETA J., TASSINARI L., FERNÁNDEZ RUIZ M., MUTTONI A.: *Punching of flat slabs supported on rectangular columns*. In Engineering Structures 77 (2014). Elsevier Ltd: 2014. s. 17-33.
- [9] PAIVA O.S., FERREIRA M.P., OLIVEIRA D.R.C., LIMA NETO A. F., TEIXEIRA M.R.: *Influence of the column rectangularity index and of the boundary conditions in the punching resistance of slab-column connections*. In Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, vol. 8 (3) 2015. s. 260-295. ISSN 1983-4195.
- [10] FILATOV V. B.: *Experimental investigation of stress-strain conditions in punching zone of flat slabs*. In MATEC Web of Conferences 117. Russia: 2017.
- [11] FILATOV V. B.: *Evaluation of punching shear strength of flat slabs supported on rectangular columns*. In E3S Web of Conferences 33. Russia: 2018.
- [12] FARZAM M., SADAGHIAN H.: *Mechanical model for punching shear capacity of rectangular slab-column connections*. In Structural Concrete 19. 2018. s. 1983–1991.
- [13] SETIAWAN A., VOLLUM R. L., MACORINI L., IZZUDDIN B. A.: *Punching shear design of RC flat slabs supported on wall corners*. In Structural Concrete 21. 2020. s. 859 – 874.
- [14] MILLIGAN G. J., POLAK M. A., ZURELL C.: *Finite element analysis of punching shear behaviour of concrete slabs supported on rectangular columns* In Engineering Structures 224(3). 2020. 13 s.
- [15] BARTÓK, A. *Vplyv nesúdržného predpätia na odolnosť lokálne podopretých dosiek v pretlačení*. Bratislava, 2009.
- [16] MAJTÁNOVÁ, L. *Maximálna odolnosť v pretlačení lokálne podopretých dosiek so šmykovou výstužou*. Bratislava, 2017.
- [17] AUGUSTÍN T., FILLO L., HALVONIK J.: *Punching resistance of slab-column connections with openings*. In Structural Concrete 21. 2019. s. 278-290.
- [18] KESELI O. *Zosilňovanie bezprievlakových stropných dosiek dodatočne vloženou šmykovou výstužou*. Bratislava, 2018.
- [19] MARČIŠ M., FRAŠTIA M., BAJTALA M., AUGUSTÍN T.: *Measurement of flat slab deformations by the multi-image photogrammetry method*. In: Slovak Journal of Civil Engineering. Vol. 25, no. 4, 2017. s. 19-25.
- [20] ČERVENKA V., JENDELE L., ČERVENKA J.: *ATENA Program Documentation, Part 1, Theory*. Prague : s.n., 2018.

PUBLIKAČNÁ ČINNOSŤ AUTORA

Vedecké práce v zahraničných časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo Scopus

Šarvaicová, Simona; Borzovič, Viktor. Experimental verification of punching shear resistance of flat slab fragments. WOS CC In: *Stavební obzor - Civil Engineering Journal*, Praha (Česko) : Fakulta stavební ČVUT v Praze. – ISSN 1804-8692. – Roč. 30, č. 4 (2021), s. 835-846.

Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

Šarvaicová, Simona. Šmyková odolnosť fragmentu dosky v pretlačení overená experimentálnym testom. Juniorstav 2021, 23. In Juniorstav 2021 [elektronický dokument] : sborník příspěvků. 23. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno, ČR. 1. vyd. – Brno (Česko) : ECON publishing, 2021. – ISBN 978-80-86433-75-2, s. 212-217.

Šarvaicová, Simona; Borzovič, Viktor. Experimental analysis of flat slab locally supported by an elongated column . International Conference Concrete Days 2020, 27 [02.12.2020, Praha, Česko]. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.322.111. – SCOPUS. In 27th Concrete Days 2020 : selected peer-reviewed full text papers from 27th International Conference Concrete Days. 1. vyd. – Baech (Švajčiarsko) : Trans Tech Publications, 2021. Solid State Phenomena, ISSN 1662-9779, ISSN 1012-0394, ISSN 1662-9787 ; Volume 322. ISBN 978-3-0357-1821-8. ISBN (elektronické) 978-3-0357-3821-6, s. 111-116.

Šarvaicová, Simona; Borzovič, Viktor. Punching shear resistance of continuous RC slab compared to experimental specimens; Engineering Mechanics 2020 [24.11.2020-25.11.2020, Brno, Česko]. DOI 10.21495/5896-3-444. – WOS CC. In Engineering Mechanics 2020: 26th international conference : book of full texts. 1. vyd. – Brno (Česko) : Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2020. – ISBN 978-80-214-5896-3. – ISSN 1805-8248, s. 444-447.

Šarvaicová, Simona; Borzovič, Viktor. The Analysis of Shear Forces Flow around the Supports of Flat Slabs International Conference Concrete Days 2019, 26 [20.11.2019-21.11.2019, Hradec Králové, Česko]. DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.309.216. – SCOPUS. In: 26th Concrete Days 2019: selected peer-reviewed full text papers from 26th International Conference Concrete Days. 1. vyd. – Baech (Švajčiarsko) : Trans Tech Publications, 2020. – Solid State Phenomena, ISSN 1662-9779, ISSN 1012-0394, ISSN 1662-9787 ; Volume 309, SJR: 0,215 ; CiteScore: 1,1 ; SNIP: 0,494. ISBN 978-3-0357-1668-9. ISBN (elektronické) 978-3-0357-3668-7. – ISSN 1012-0394. – ISSN (online) 1662-9779, s. 216-221.

Šarvaicová, Simona; Borzovič, Viktor; Augustín, Tomáš. The influence of a column shape cross-section on the punching capacity; Modern Building Materials, Structures and Techniques, 13 [16.05.2019-17.05.2019, Vilnius, Litva]. DOI 10.3846/mbmst.2019.094. – WOS CC. In Modern Building Materials, Structures and Techniques: selected papers of the 13th International Conference. 1. vyd. – Vilnius (Litva) : Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius Gediminas Technical University Press, 2019. – ISBN 978-609-476-197-3. – ISSN 2029-9915, s. 455-462.

Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

Šarvaicová, Simona; Borzovič, Viktor. Application of critical shear crack theory on punching of flat slabs; International Scientific Conference of Civil and Environmental Engineering for PhD. Students and Young Scientists, 13 [13.10.2021-15.10.2021, Vysoké Tatry, Slovensko]. DOI 10.1088/1757-899X/1209/1/012060. In Young Scientist 2021: proceedings of the 13th International Scientific Conference of Civil and Environmental Engineering for PhD. Students and Young Scientists. 1. vyd. – Bristol (Veľká Británia) : Institute of Physics Publishing. IOP Publishing, 2021. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, ISSN 1757-8981, ISSN 1757-899X ; Volume 1209. – ISSN 1757-899X. – ISSN 1757-8981. – SIGN-TUKE 301236, art no. 012060, s. 1-6.

Šarvaicová, Simona. Analýza šmykového toku v oblasti okolo vnútorných stĺpov a okrajov stien. Advances in architectural, civil and environmental engineering, 29 [16.10.2019, Bratislava, Slovensko]. In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering: 29th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. 1 vyd. – Bratislava (Slovensko) : Spektrum STU , 2019. – ISBN 978-80-227-4972-5, s. 440-447.

Šarvaicová, Simona. Experimentálna analýza fragmentu dosky lokálne podopretej obdĺžnikovým stĺpom. Advances in architectural, civil and environmental engineering, 30 [14.10.2020, Bratislava, Slovensko]. In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický dokument] : 30th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering 1. vyd. – Bratislava (Slovensko) : Spektrum STU , 2020. – ISBN 978-80-227-5052-3, s. 510-517.

Borzovič, Viktor; Švachula, Radovan; Lániová, Dagmar; Šarvaicová, Simona. Flexural testing of steel and GFRP reinforced beams; ESaT 2018, 3 [12.09.2018-14.09.2018, Tatranské Matliare, Slovensko]. In ESaT 2018: 3rd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. 1. vyd. – Košice (Slovensko) : Technická univerzita v Košiciach, 2018. – ISBN 978-80-553-2982-6. – SIGN-TUKE 196668, s. 1-4.

Borzovič, Viktor; Švachula, Radovan; Lániová, Dagmar; Šarvaicová, Simona. Bending behavior of steel and GFRP reinforced concrete girders; ESaT 2018, 3 [12.09.2018-14.09.2018, Tatranské Matliare, Slovensko]. In Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies 3. 1. vyd. – Londýn (Veľká Británia) : Taylor & Francis Group. CRC Press, 2019. – ISBN 978-0-367-07509-5. – ISBN (elektronické) 978-0-429-02159-6. – SIGN-TUKE 206552, s. 43-48.

Porovnanie šmykovej odolnosti bezprievlakových spojitých dosiek s izolovanými vzorkami Šarvaicová, Simona; Borzovič, Viktor; Betonárske dni 2020, 13 [22.10.2020, virtuálny priestor, Slovensko]. In Betonárske dni 2020 a 6. post kongresové kolokvium SNK fib: zborník príspevkov z konferencie. 1 vyd. – Bratislava (Slovensko) : Spektrum STU , 2020. – ISBN 978-80-227-5047-9, s. 163-168.

Šarvaicová, Simona. Spôsoby experimentálneho zaťažovania fragmentov lokálne podopretých dosiek; Advances in architectural, civil and environmental engineering, 31 [13.10.2021, Bratislava, Slovensko]. In Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering: 31st Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. 1. vyd. – Bratislava (Slovensko) : Spektrum STU , 2021. – ISBN 978-80-227-5150-6, s. 504-510.

Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

Šarvaicová, Simona; Borzovič, Viktor. Experimentálna analýza dosky lokálne podopretej stenovým stĺpom. Betonárske dni 2020, 27 [27.11.2020, Virtuálny priestor, Česko]. In 27. Betonárske dni 2020: zborník ke konferenci. 1. vyd. – Praha (Česko) : Česká betonářská společnost ČSSI, 2020. – ISBN 978-80-907611-3-1, s. 318-325.

Šarvaicová, Simona; Borzovič, Viktor. Analýza šmykového toku okolo podpier lokálne podopretých dosiek Betonárske dni 2019, 26 [20.11.2019-21.11.2019, Hradec Králové, Česko]. In 26. Betonárske dni 2019: zborník příspěvků konference. 1 vyd. – Praha (Česko) : Česká betonářská společnost ČSSI, 2019. – ISBN 978-80-907611-2-4, s. 1-7.