

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE stavebná fakulta

Meno a priezvisko:

Ing. Mária Bolešová

Autoreferát dizertačnej práce:

VPLYV HISTÓRIE ZAŤAŽOVANIA NA ÚČINNOSŤ ZOSILNENIA LOKÁLNE PODOPRETEJ STROPNEJ DOSKY DODATOČNE VLOŽENOU ŠMYKOVOU VÝSTUŽOU

na získanie akademického titulu:	philosophiae doctor – PhD.
v doktorandskom študijnom programe:	teória a konštrukcie inžinierskych stavieb
v študijnom odbore:	stavebníctvo
forma štúdia:	denná

Miesto a dátum:

Bratislava, 01.08.2022

Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedra betónových konštrukcií a mostov, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladatel':	Ing. Mária Bolešová
	Katedra betónových konštrukcií a mostov
	Stavebná fakulta. STU v Bratislave
	Radlinského 11, 810 05 Bratislava
Školiteľ:	doc. Ing. Katarína Gajdošová, PhD.
	Katedra betónových konštrukcií a mostov
	Stavebná fakulta, STU v Bratislave
	Radlinského 11, 810 05 Bratislava
Oponenti:	prof. Ing. Jaroslav Halvoník, PhD.
1	Katedra betónových konštrukcií a mostov
	Stavebná fakulta, STU v Bratislave
	Radlinského 11, 810 05 Bratislava
	doc, Ing. Miloš Zich. Ph.D.
	Ústav betonových a zděných konstrukcí
	Vysoké učení technické v Brně
	Veveří 331/95, 602 00 Brno
	Ing. Ondrej Keseli, PhD.
	Peikko Austria GmbH
	Zehentweg 6, 6837 Weiler, Austria

Autoreferát bol rozoslaný dňa: 08.08. 2022

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa o h na Katedre betónových konštrukcií a mostov (SvF, STU v BA), Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD. Dekan fakulty

Obsah

0	bsah	. 0
1	Úvod	. 1
2	Prehľad súčasného stavu problematiky	. 1
3	Ciele a tézy dizertačnej práce	. 2
4	Experimentálny program	. 2
	4.1. Návrh experimentálnych vzoriek	. 2
	4.2. Výroba experimentálnych vzoriek	. 4
	4.3. Použité materiály	. 5
	4.4. Experimentálna zostava	. 6
	4.5. Postup zaťažovania a skúšania	. 7
	4.6. Analýza meraných výsledkov	. 8
	4.6.1. Priehyby	8
	4.6.2. Pootočenia	.11
	4.6.3. Pomerné pretvorenia	.12
	4.6.4. Napätia vo svorníkoch	.13
	4.6.5. Spôsob zlyhania experimentálnych vzoriek	.15
5	Posúdenie odolnosti dosiek podľa dostupných modelov	19
6	Závery	24
	6.1. Prínosy pre rozvoj vedného odboru	24
	6.2 Odporúčania pre prav	25
	0.2. Odportucania pre prax	23
	6.3. Odporúčania pre ďalší výskum	23 26

1. Úvod

V súčasnosti je kladený veľký dôraz na konštrukčný systém budovy, ktorý musí splniť univerzálnosť využitia vnútorných priestorov, jednoduchosť, otvorenosť priestoru, efektivitu a ekonomickosť riešenia konštrukcie ako celku. Z toho dôvodu jedným z najpoužívanejších typov železobetónových stropných konštrukcií v parkovacích domoch a budovách sú lokálne podopreté stropné dosky. Veľkou výhodou je ich rovný podhľad, ktorý zabezpečuje jednoduché zhotovenie konštrukcie (debnenie a vystuženie) a vedenie rozvodov technológií, čo znižuje náklady na stavbu a zvyšuje rýchlosť výstavby.

Na rozdiel od stropných dosiek s prievlakmi sa sily prenášajú z dosky priamo do podpier (stĺpov). Veľkým negatívom je zvýšená koncentrácia šmykových a ohybových síl v mieste styku dosky a stĺpa. Ak detail styku dosky so stĺpom nie je dobre navrhnutý, môže dôjsť ku krehkému porušeniu stropnej dosky, ktoré je nazývané porušenie pretlačením. Vtedy doska zlyháva náhle a bez výrazných signálov na konštrukcii. Okrem iného sa tieto dosky vyznačujú veľkými deformáciami (priehybmi). Konštrukcie s lokálne podopretými doskami majú malú horizontálnu tuhosť, ktorú je nutné zvýšiť pomocou stužujúcich stien aj pri nižšej podlažnosti objektov.

Množstvo budov prechádza rekonštrukciou, ktorá býva často spojená so zmenou využitia stavby. Z pravidla to býva nárast zaťaženia na stropných doskách, a preto by mala byť venovaná pozornosť posúdeniu pretlačenia počas návrhu rekonštrukcie lokálne podopretej stropnej dosky.

Práca sa zameriava na správanie sa zosilnených lokálne podopretých stropných dosiek, ktoré majú za sebou už históriu zaťažovania, ako aj metódam zvýšenia šmykovej odolnosti, ktoré sú v stavebníctve využívané a vedeckou spoločnosťou skúmané.

2. Prehľad súčasného stavu problematiky

Návrh lokálne podopretých dosiek podľa EC2 [1] a UDM [2] je zameraný hlavne na nové konštrukcie. Výpočtový postup MC2010 [3], [4] počíta šmykovú odolnosť lokálne podopretej stropnej dosky a aj deformačnú kapacitu. Na výpočet odolnosti dosky v pretlačení je nutné poznať vzťah medzi pootočením a zaťažením pôsobiacim na dosku. Výpočtový postup šmykovej odolnosti lokálne podopretej stropnej dosky v pripravovanej prEC2 [5], ktorý je v prílohe I zameraný na detailnejší návrh šmykovej odolnosti dosky v pretlačení (bez / so šmykovou výstužou), vychádza z nelineárneho výpočtu pootočenia dosky pomocou výpočtových FEM (finite element method) modelov. Tento prístup sa javí ako vhodnejší pre posúdenie existujúcich stropných dosiek.

Existuje viacero spôsobov zosilnenia lokálne podopretých stropných dosiek za účelom zvýšenia šmykovej odolnosti. Vhodnosť ich použitia je ovplyvnená stavom existujúcej konštrukcie, ohybovou a šmykovou odolnosťou. Pred výberom vhodného spôsobu zosilnenia je nutné brať do úvahy tieto vstupné parametre, ale aj ekonomickosť návrhu a vplyv na životné prostredie.

Jedným z najpoužívanejšie metód zosilnenia lokálne podopretých dosiek za účelom zvýšenia šmykovej odolnosti v pretlačení, čo zároveň zvyšuje aj ohybovú odolnosť je vytvorenie novej vrstvy z betónu (vytvorenie nadbetonávky) [6], prípadne aplikovanie GFRP [7] alebo CFRP [8] tkanín, alebo aj GFRP lamiel [9] na horný povrch dosky. Medzi spôsoby zosilnenia zvyšujúce ohybovú aj šmykovú kapacitu, ktoré minimálne navyšujú hmotnosť dosky patrí zosilnenie pomocou vytvorenia železobetónovej [10] alebo oceľovej hlavice, prípadne zväčšenie podpery, a pripadanie dodatočného lokálneho predpätia nad podperu [11]. Zosilnenie pomocou dodatočne vloženej šmykovej výstuže vo forme lepených prípadne skrutkovaných kotiev [12], [13], [14], [15], [16], [17] a svorníkov [18], [13] zvyšuje šmykovú odolnosť, ale nemá vplyv na ohybovú kapacitu lokálne podopretých stropných dosiek.

3. Ciele a tézy dizertačnej práce

V projekčnej praxi sa často objavuje zmena funkcie využitia budovy, ktorá so sebou nesie mnohokrát nárast zaťaženia a ako výsledok aj potrebu zvýšenia odolnosti konštrukcie. Keďže sa lokálne podopreté stropné dosky často používajú kvôli ich výhodám, vzrastá aj dopyt po ich rekonštrukcii a zosilňovaní. Väčšina výpočtových modelov, vrátane platnej a používanej normy Eurocode 2, sa nevenuje problematike návrhu zosilnenia konštrukcie.

Cieľom tejto práce je rozšíriť poznatky o problematike zosilnenia lokálne podopretých dosiek pomocou svorníkov, za účelom zvýšenia šmykovej odolnosti v pretlačení. Súčasne je práca venovaná aj experimentálnemu posúdeniu účinnosť zosilnenia stropnej dosky s históriou zaťažovania, keďže táto skutočnosť vystihuje reálne správanie sa konštrukcií v praxi.

Predpokladanými výsledkami dizertačnej práce by mali byť:

- Overenie aplikovateľnosti normových návrhových postupov odvodených pre nové konštrukcie na už existujúcich konštrukciách zosilnených dodatočne vloženou šmykovou výstužou.
- Vyhodnotenie účinnosti zosilnenia lokálne podopretej dosky dodatočne vloženou šmykovou výstužou.
- Teoretické a experimentálne overenie účinnosti zvyšovania odolnosti lokálne podopretých dosiek so zohľadnením histórie zaťažovania. Porovnanie správania zaťažených a nezaťažených dosiek počas zosilňovania.
- 4. Teoretické a experimentálne overenie účinkov zvyšovania odolnosti lokálne podopretých dosiek s rôznou úrovňou zosilňovania (použitie svorníkov väčšieho priemeru a vyššej pevnostnej triedy a svorníkov menšieho priemeru a nižšej pevnostnej triedy).
- 5. Stanovenie odporúčaní pre použitie svorníkov na zosilňovanie lokálne podopretých stropných dosiek pre projekčnú prax.

4. Experimentálny program

4.1. Návrh experimentálnych vzoriek

Experimentálny program nadviazal na už existujúce výsledky výskumu lokálne podopretých stropných dosiek na Katedre betónových konštrukcií a mostov na STU, ktorému sa venovali Majtánová [19], Keseli [13], Augustín [20], Kormošová [21] a Šarvaicová [22].

V rámci experimentálneho programu, ktorý je súčasťou predkladanej dizertačnej práce, bolo otestovaných 7 vzoriek (*Obr. 4.1*) štvorcového tvaru s pôdorysnými rozmermi 2,50 x 2,50 m a s hrúbkou 0,25 m. Takéto rozmery vzorky zodpovedajú stropnej doske

podopretej stĺpom s rozpätím, v oboch na seba kolmých smeroch x a y, približne 5,50 m ($L = 5,50 \text{ m} \cong 1.185 \text{ m}/0.22$) [23]. Priemer podpery bol 0,25 m. Všetky vzorky boli vystužené rovnako pri hornom povrchu betonárskou výstužou s priemerom 20 mm v osovej vzdialenosti 100 mm po celej šírke dosky v oboch na seba kolmých smeroch a rovnako pri spodnom povrchu betonárskou výstužou s priemerom 10 mm v osovej vzdialenosti 200 mm (ktoré boli zhustené približne na 100 mm v mieste inštalácie dodatočne vloženej šmykovej výstuže). Viac informácií o vzorkách a rozložení výstuže je uvedených v *Tab. 4.1*.

Názov vzorky	Hrúbka Priemer dosky stĺpa		Vystuženie pri hornom povrchu	Vystuženie pri spodnom povrchu	Krytie výstuže pri hornom povrchu	Stupeň vystuženia pri hornom povrchu P _{flex}	Označenie sady vyrobených vzoriek	
	[<i>mm</i>]	[mm]	priemer[mm] / rozteč[mm]	priemer[mm] / rozteč[mm]	[mm]	[%]		
FS-01					24	1,527		
FS-02					29	1,565	Sada 1	
FS-03				10 / 200	24	1,527	(betonáž v máji	
FS-04	250	250	20 / 100	(lokálne	25	1,534	2020)	
FS-05				zhustenie na	31	1,581		
FS-06				100 mm)	39	1,647	Sada 1	
FS-07					40	1,656	(betonáž v auguste 2021)	
•	01 • • • • • • •		• • • • • • •	FS-02		•		
125, *	750	3 750 2500	<u>, 750 125</u> , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	• Smykov 125, 7 *	a vystuž M12 1 [50 7 2!	3] • Smyková vý 50 , 750 500	125,	

Tab. 4.1 Vlastnosti experimentálnych vzoriek geometria a výstuž.

Obr. 4.1 Tvar vzoriek, rozmiestnenie šmykovej výstuže v pôdorysoch.

Všetky vzorky boli vyrobené už s dopredu vloženými plastovými rúrkami do debnenia pred betonážou v mieste inštalácie oceľových svorníkov (viac k tejto problematike viď. kapitolu 4.2 Výroba experimentálnych vzoriek). Rozmiestnenie šmykovej výstuže v okolí podpery zodpovedalo návrhu podľa konštrukčných zásad uvedených v EC2. Typ použitej šmykovej výstuže viď. kapitolu 4.3 Použité materiály. Šmyková výstuž bola inštalovaná do dosky bez spojovacieho materiálu (chemickej kotvy). Vzorka FS-01 (Obr.

4.1) bola referenčná - navrhnutá bez šmykovej výstuže, ale mala tiež nainštalované plastové rúrky do debnenia pred betonážou. Vzorka FS-02 (*Obr. 4.1*) bola vystužená dodatočne vloženou šmykovou výstužou metrického závitu M12. Na každom zo štyroch prstencov bolo rozmiestnených rovnomerne 12 kusov šmykovej výstuže a na piatom prstenci bolo rozmiestnených 20 kusov. Vzorky FS-03 až FS-07 (*Obr. 4.1*) boli vystužené dodatočne vloženou šmykovou výstužou metrického závitu M10. Spôsob rozmiestnenia šmykovej výstuže v okolí podpery bol rovnaký ako pri doske FS-02.

Stupeň vystuženia vzoriek šmykovou výstužou ρ_w [24] bol určený podľa:

$$\rho_{w} = \frac{\sum A_{sw}}{b_{0} \cdot max \left(s_{0} + \frac{s_{1}}{2}; s_{0}\right)}$$
(4.1.1)

kde A_{sw} je prierezová plocha šmykovej výstuže v jednom najbližšom obvode k podpere; b_0 je dĺžka kontrolného obvodu vo vzdialenosti 0,5d; s_0 je radiálna vzdialenosť prvého obvodu šmykovej výstuže a s_1 je radiálna vzdialenosť druhého obvodu šmykovej výstuže.

Tab. 4.2 Vlastnosti experimentálnych vzoriek vzhľadom na šmykovú výstuž.

Názov	ϕ_w	d	s ₀	<i>s</i> ₁	n_r	n_t	ρ_w
vzorky	[<i>mm</i>]	[<i>mm</i>]	[<i>mm</i>]	[<i>mm</i>]	[-]	[-]	[%]
FS-01	-	206	-	-	-	-	-
FS-02	M12	201					0,54
FS-03		206					0,37
FS-04		205	60	110	12	5	0,37
FS-05	M10	199	00	110	12	5	0,37
FS-06		191					0,38
FS-07		190					0,38

 ϕ_w – priemer šmykovej výstuže; d – účinná výška prierezu; $s_0 a s_1 sú vzdialenosti šmykovej výstuže v pôdoryse;$ $<math>n_r$ – množstvo šmykovej výstuže na jednom obvode; n_t – počet obvodov šmykovej výstuže; ρ_w – stupeň vystuženia šmykovou výstužou

4.2. Výroba experimentálnych vzoriek

Spolu bolo vyrobených 7 vzoriek, z ktorých 5 vzoriek zo Sady 1 boli vyrobené v máji 2020 a 2 vzorky zo Sady 2 bolo vyrobených v auguste 2021.

Všetky vzorky mali vložené pred betonážou do debnenia osem oceľových rúrok, ktorých vonkajší priemer bol 76 mm a hrúbka steny 3,2 mm. Rúrky boli zakotvené do betónu pomocou navarených troch prútov betonárskej výstuže. Počas experimentálneho overovania šmykovej odolnosti v pretlačení boli cez otvory vytvorené pomocou oceľových rúrok vedené kotevné tyče a uložené jednosmerné ložiská tak, aby v tomto mieste bol ohybový moment rovný nule.

Na to, aby sa predchádzalo prácnemu skenovaniu polohy ohybovej výstuže a vŕtaniu, sa do debnenia vložili platové rúrky s vonkajším priemerom 20 mm a vnútorným priemerom 16,9 mm v mieste budúcej šmykovej výstuže. Rúrky boli pri spodnom povrchu zabezpečené pomocou plastových kolíkov, na ktoré boli plastové rúrky osadené, a pri hornom povrchu bola ich poloha zabezpečená pripevnením o ohybovú výstuž.

Dodatočné osádzanie oceľových svorníkov prebiehalo v Centrálnych laboratóriách Stavebnej fakulty STU v Bratislave – Trnávke (CL SvF). Svorníky neboli nijako spriahnuté so vzorkami. Pred ich inštaláciou sa vyrovnal horný a spodný povrchu

dosky, očistil od prachu a iných nečistôt. Pomocou malty sa zarovnali všetky nerovnosti, aby sa dosiahol čo najrovnejší povrch. Následne sa nainštalovali svorníky od podpery až po najvzdialenejší obvod. Vzorky FS-02, FS-03 a FS-07 mali nainštalované svorníky a predopnuté pomocou momentového kľúča pred zaťažovaním. Vzorky FS-04, FS-05 a FS-06 mali pripravené svorníky v dierach, ktoré neboli nainštalované a ani predopnuté. Ich predopnutie prebiehalo počas zaťažovania vzoriek na zaťažovacej zostave pri hodnote 500 kN pomocou momentového kľúča bez toho, aby sa po vzorkách pohybovali osoby.

4.3. Použité materiály

Dosky boli vyrobené betónu s pevnosťami, betonárskou výstužou a závitovými tyčami vlastnosťami uvedenými *Tab. 4.3.* Betonárska výstuž bola navrhnutá s priemerom 20 mm pri hornom povrchu a 10 mm pri spodnom povrchu experimentálnych vzoriek. vzorky FS-02 až FS-07 boli vystužené šmykovou výstužou vyrobenou zo závitových tyčí, dvoch podložiek a matice pri oboch povrchoch. Vlastnosti podložiek a matíc sú uvedené *Tab. 4.4.*



Obr. 4.2 Detail svorníka pri hornom povrchu.



Obr. 4.3 Pohľad na svorníky nainštalované pri spodnom povrchu.

Názov		Be	etón		Ohybová	výstuž	Závitové tyče – šmyková výstuž							
		fc		Ec	D/D	D	4	D/D	D					
vzorky	kocky	valce	hranoly	hranoly	Re/Rp0.2	Λ_m	φ_w	Re/Rp0.2	Λ_m					
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[MPa	[MPa]	[<i>mm</i>]	[MPa]	[MPa]					
FS-01	45,62	30,56	34,28	37,67			-	-	-					
FS-02	42,24	34,82	-	-								M12	817	877
FS-03	47,50	30,94	-	-	537	643		437	465					
FS-04	12 66	24 72	22.66	40.20				120	460					
FS-05	45,00	54,72	52,00	40,50			M10	438	409					
FS-06	26 17	28.00	20.52	25.07	550	617		420	472					
FS-07	50,47	28,99	50,52	55,07	338	047		430	472					
$f_c - peve$	nosť betóm	u v tlaku; E	E _c – modul _I	pružnosti be	tónu; R _e – me	edza klzu; I	R _{p0.2} - doho	vorená mea	lza klzu; R _m -					
medza p	orušenia; q	¢ _w − priem	er šmykovej	výstuže										

Tab. 4.3 Pevnostné vlastnosti betónu, ohybovej výstuže a závitových tyčí vzoriek.

Duinnan	Pouřitá vo	i	Väčšia podložka	1	Menšia podložka				
výstuže	vzorkách	Označenie	Veľkosť d ₁ x d ₂ x t [mm]	Materiál	Označe nie	Veľkosť d1 x d2 x t [mm]	Materiál		
M12	FS-02	DIN 1052	18x68x6	oceľ S235	DIN 1052	14x58x6	oceľ S235		
M10	FS-03 - FS-07	DIN 1052	18x68x6	oceľ S235	DIN 9021	15x44x3	oceľ S235		
Priemer	Použité vo			Mati	Matica				
výstuže	vzorkách	Ozna	čenie	Veľk	osť	Materiál – trieda ocele			
M12	FS-02	DIN	6331	M12		10.9			
M10	FS-03 - FS-07	DIN	6331	M10		10.9			
$d_1 x d_2 x t$	– vnútorný priem	er otvoru x vonka	ijší priemer pod	ložky x hrúbk	a podložky				

Tab. 4.4 Vlastnosti podložiek a matíc šmykovej výstuže pre vzorky FS-01 a FS-07.

4.4. Experimentálna zostava

Zaťažovanie vzoriek prebiehalo v Centrálnych laboratóriách STU v Bratislave. Použitá experimentálna zostava vychádzala z predchádzajúcich experimentov vykonaných na Katedre betónových konštrukcií a mostov kolegami – Bartók [25], Majtánová [19], Augustín [20] a Keseli [13].

Vzorka bola do masívnej podlahy laboratória uchytená pomocou 8 kotevných predpínacích tyčí priemeru 36 mm, ktoré prechádzali cez oceľové rúrky vo vzorkách. Na tyčiach boli nainštalované elektromagnetické snímače. Na spodnom povrchu masívnej dosky laboratória boli tyče ukotvené pomocou sférickej matice s podložkou 30 mm. Predpínacie tyče boli približne v polovici rozpätia medzi masívnou doskou laboratória a vzorkou zavetrené pomocou reťazí ukotvených v masívnej doske laboratória. Pri spodnom povrchu vzorky boli na predpínacích tyčiach upevnené ďalšie z podložky s maticami (ktoré sa počas zaťažovania vzoriek po dotlačení valca na zaťažovaciu platbu uvoľnili a slúžili len na podopretie vzorky pred vykonaním experimentu) a pri hornom povrchu sa nachádzali jednosmerné kalótové ložiská, sférické podložky hrubé 30 mm a sférické matice. Vzorky boli zaťažované zospodu pomocou hydraulického valca vysúvajúceho sa smerom nahor. Nad hydraulickým valcom sa nachádzala platňa hrúbky 30 mm, na nej všesmerné kalotové ložisko a silomer, ktorý mal kapacitu 2 MN. Stĺpik na doske bol reprezentovaný kruhovou oceľovou platňou priemeru 250 mm a hrúbkou 40 mm.



Obr. 4.4 Schéma experimentálnej zostavy v pôdoryse (vľavo) a v reze (vpravo).

4.5. Postup zaťažovania a skúšania

Zaťažovanie každej experimentálnej vzorky prebiehalo pomocou hydraulického systému, ktorého miera vnesenia zaťaženia do dosky bola kontrolovaná pomocou silomeru.

Názov vzorky	FS	-01	FS	-02	FS	-03	FS	-04	FS	-05	FS	-06	FS	-07
Zaťažovacie kroky	nezosilnená	zosilnená	nezosilnená	zosilnená	nezosilnená	zosilnená	nezosilnená	zosilnená	nezosilnená	zosilnená	nezosilnená	zosilnená	nezosilnená	zosilnená
[kN]	[k.	N]	[k.	N]	[k.	N]	[k.	N]	[k.	N]	[k.	N]	[k	N]
50	x			x		x	x		x		x			x
100	x			x		x	x		x		x			x
200	x			х		х	х		х		хO			хΘ
250	хΘ			хΘ		хΘ	хO		хO		х			х
300	х			x		x	х		х		х			х
400	x			x		x	x		x		x			x
500	x			х		х	х	х	х	х	х	х		х
600	x			x		x		x	x	x	x	x		x
700									x		x			x
750	x			x		x		х	x		x			x
800	x			x		x		х		x		х		x
900	х													
1000	1032			x		х		х		х		х		х
1100				х		х		х						
1200				х		х		х		х		х		х
1300				x		х						1347		
1400				x		x		х		x				1412
1500				x		x		x		1563				
1600				x		x		1647						
1700						1715								
1800				1830 *										
x - ozna (ostatné	ačenie r meracio	nerania e zariad	v kroku enia bol	ı; O - o i neprip	značeni ojené)	ie vznik	u trhlin	y; * - j	ediná n	ameran	á hodno	ota pri z	lyhaní	dosky

Tab. 4.5 Priebeh zaťažovania experimentálnych vzoriek.

Pred začatím zaťažovania bola vzorka osadená na 4 podložkách s maticami, ktoré boli upevnené na kotevných tyčiach tak, aby medzi oceľovou platňou predstavujúcou stĺp a silomerom bola medzera približne 30 mm. Po spustení hydraulického systému sa dotlačil piest hydraulického valca o podperu a vzorka sa zaťažila na hodnotu 50 kN, čo zodpovedalo približne hodnote vlastnej tiaže vzorky a častiam zostavy umiestneným na vzorke. Následne sa 4 podložky a matice odtočili nižšie pod spodnú hranu dosky tak, aby žiadnym spôsobom neovplyvňovali zaťažovanie vzorky a vzorka bola podopretá pri spodnom povrchu len v strede v mieste oceľovej platne (stĺpa).

Vzorka FS-01 nebola zosilňovaná a bola zaťažovaná kontinuálne do porušenia. Vzorky FS-02, FS-03 a FS-07 boli zosilnené pred zaťažovaním. Vzorka FS-04 bola zaťažovaná pred zosilnením, pri hodnote 500 kN zosilnená (čo predstavuje cca 50 % z odolnosti vzorky FS-01) a potom zaťažovaná do porušenia. Vzorky FS-05 a FS-06 boli zaťažované pred zosilnením do sily 750 kN (čo predstavuje cca 75 % z odolnosti vzorky FS- 01), potom odľahčené na silu 500 kN, pri ktorej boli zosilnené, a následne zaťažované až do porušenia. Na začiatku zaťažovania, približne do úrovne 500 kN, bola priemerná rýchlosť zaťažovania vzoriek 6,6 kN/min.

Vznik prvej trhliny bol u vzoriek zo Sady 1 spozorovaný na hodnote 250 kN a zo Sady 2 na hodnote 200 kN (*Tab. 4.5*). Počas zaťažovania boli pri označených zaťažovacích stavoch odčítavané hodnoty priehybov z odchýlkomerov, pootočenia z libiel a zároveň bola vykonaná viacsnímková konvergentná fotogrametria a snímanie elektromagnetického toku v predpínacích kotevných tyčiach.

4.6. Analýza meraných výsledkov

Z experimentálnych meraní získaných počas experimentálneho overovania vzoriek boli analyzované dáta priehybov, pootočení, pomerných pretvorení, prerozdelenia osových síl a napätia v svorníkoch.

4.6.1. Priehyby

Priehyby boli merané pomocou snímačov dráhy (LVDT a odchýlkomerov) a zároveň aj pomocou fotogrametrie. Priehyby boli vyhodnocované v pôdorysnom strede vzorky a po dĺžke dosky v dvoch osiach. Osi sú vždy označované ako hlavná os (os, v ktorej je výstuž umiestnená bližšie k povrchu, a teda v prvej vrstve) a vedľajšia os (os, umiestnená v druhej vrstve). V každej doske sú vždy označené stredy hrán dosky 1 až 4. Priehyby vyhodnotené v strede dosky vychádzajú z výsledkov snímača LVDT umiestneného na hornom povrchu vzoriek.



Obr. 4.5 Grafy zobrazujúce závislosť zaťaženia a priehybu v strede vzorky (Sady 1): a) pre vzorky zosilnené pred zaťažovaním (FS-02 () – je priebeh odhadnutého priehybu pri porušení vzorky); b) pre dosky zosilnené pred a počas zaťažovania.*

Na grafe Obr. 4.5a sú zobrazené výsledky troch vzoriek, kde FS-01 je nezosilnenou doskou a zosilnenými doskami FS-02 (zosilnená pomocou svorníkov

s priemerom M12 a s medzou pevnosti ocele 877 MPa) a FS-03 (zosilnená pomocou svorníkov s priemerom M10 a s priemernou medzou pevnosti ocele 469 MPa) pred zahájením zaťažovania. Meranie priehybu vzorky FS-02 prebehlo po hodnotu 1775 kN, potom musel byť snímač demontovaný a počas jej zlyhania bola zaznamená len hodnota sily a priehyb od hodnoty sily 1775 kN bol predpokladaný.

Na grafe *Obr. 4.5b* sú zobrazené štyri vzorky, tri zosilnené (FS-03, FS-04, FS-05) v rozdienlom čase, ale rovnakým množstvom a typom šmykovej výstuže, a jedna nezosilnená referenčná vzorka (FS-01). Z grafu je vidieť úbytok šmykovej odolnosti vzorky s narastajúcou hodnotou zaťaženia pred zosilnením šmykovou výstužou v porovnaní s nezosilnenou a zosilnenou vzorkou pred zahájením zaťažovania.

Z výsledkov zobrazujúcich závislosť zaťaženia a priehybu sa dá pozorovať nárast priehybu a pokles šmykovej odolnosti v pretlačení vo vzorkách, ktoré boli zosilňované počas zaťažovania v porovnaní so vzorkami zosilnenými pred vnesením zaťaženia.



Obr. 4.6 Graf zobrazujúci závislosť zaťaženia a priehybu v strede vzorky pre všetky vzorky.

Priehyby po dĺžke dosky boli vyhodnocované aj z viacsnímkovej konvergentnej fotogrametrie (*Obr. 4.7, Obr. 4.8, Obr. 4.9* a *Obr. 4.10*), ktoré sa viac približujú tvaru priehybu dosky, kvôli väčšiemu počtu meraných bodov. Posledné namerané sily vo výsledkoch priehybu po dĺžke nie sú sily, pri ktorých vzorky zlyhali, ale sily, pri ktorých bolo vykonané posledné meranie.

Z výsledkov je možné pozorovať tvar priehybov pred zlyhaním, ktorý je rozdielny medzi zosilnenými doskami a nezosilnenou doskou. Zosilnené dosky majú vyššiu odolnosť, ale aj deformačnú kapacitu. Vzorka FS-06, ktorá bola zaťažovaná po hodnotu 750 kN pred zosilnením vykazuje výraznejšiu deformáciu v mieste šmykového kužeľa ako ostatné dosky.







Obr. 4.8 Priehyb vzorky FS-03 a FS-04 po dĺžke v hlavnom smere.



Obr. 4.9 Priehyb vzorky FS-05 po dĺžke ((z) je označenie zosilnenia vzorky) v hlavnom smere.



.

4.6.2. Pootočenia

Počas experimentu boli merané aj pootočenia dosiek pomocou libiel nainštalovaných na okrajoch dosiek a pomocou rozdielu v posunoch v dvoch LVDT snímačoch, ktoré sú umiestnené na spodnom povrchu vzorky podľa *Obr. 4.11*. Rozvíjanie sa kritickej šmykovej trhliny bolo uvažované pod uhlom 45° od spodnej hrany dosky v líci podpery. Tento rozvoj vychádzal z teórie rozvoja kritickej šmykovej trhliny a výskumu venovanému stropným doskám vystužených šmykovou výstužou [26].



Obr. 4.11 Vyhodnotenie pootočení z priehybov LVDT.

Z výsledkov získaných experimentálnym meraním je možné pozorovať, že vo výsledkoch pootočení nameraných z libiel a vzájomného rozdielu posunov LVDT snímačov nezosilnenej dosky, zosilnenej dosky pred zahájením zaťažovania a počas zaťažovania, sú rozdiely. Zosilnené dosky dosahujú vyššiu deformačnú kapacitu ako nezosilnená doska. Okrem toho, dosky zosilnené počas zaťažovania si zachovávajú reziduálne pootočenia, ktoré boli spôsobené vznikom trhlín a teda znížením tuhosti prierezu. Ani odľahčením dosiek sa neodstránilo celé pootočenie nadobudnuté zaťažovaním z hodnoty 750 kN na 500 kN, čo potvrdzuje teoretické pozorovania zosilnenia zo štúdie [27].



Obr. 4.12 Graf zobrazujúci závislosť zaťaženia a priemerného pootočenia (v hlavnom a vedľajšom smere) vypočítaného z rozdielu LVDT snímačov pre všetky dosky (pootočenie na vzorke FS-02 bolo merané len do 1775 kN).

4.6.3. Pomerné pretvorenia

Na doskách boli merané aj pomerné pretvorenia betónu pri spodnom povrchu zaznamenávané z tenzometrov a pri hornom povrchu z posunov zaznamenávaných pomocou fotogrametrie. Pomerné pretvorenia boli vyhodnocované v radiálnom a tangenciálnom smere.



Obr. 4.13 Pomerné pretvorenia po dĺžke vzorky FS-02 v hlavnom smere výstuže.



Obr. 4.14 Pomerné pretvorenia po dĺžke vzorky FS-02 vo vedľajšom smere výstuže.

Vzorka FS-02 zlyhala pretlačením kužeľa za posledným obvodom šmykovej výstuže, no pred zlyhaním vzorky boli pozorované ohybové trhliny na okraji dosky, a tak boli vyhodnotené pomerné pretvorenia pri hornom povrchu po celej dĺžke dosky . V grafe je vynesená približná hodnota pomerného pretvorenia na povrchu vzorky zodpovedajúca pomernému pretvoreniu ohybovej výstuže na medzi klzu. Z grafu je zrejmé, že ohybová výstuž začala dosahovať medzu klzu pred zlyhaním vzorky na šírke menej ako *d* od líca podpery. Napriek postupnému rozvoju plastizácie časti ohybovej výstuže sa však zväčšením pootočenia doska v závere neporušila ohybom, ale pretlačením za obvodom *u*_{out}.

4.6.4. Napätia vo svorníkoch

Na 6 svorníkoch v každej doske boli nainštalované tenzometrické pásky, z ktorých počas skúšky nefungovali všetky. Merané svorníky boli umiestnené na prvom a treťom obvode. Svorníky boli predopínané pomocou momentového kľúča na hodnoty momentov, kde pre M12 ($R_m = 877$ MPa) to bola hodnota 70 Nm a pre M10 ($R_m = 469$ MPa) na hodnotu 25 Nm. Hodnoty napätí boli vypočítané z aplikovaného krútiaceho momentu na efektívnu plochu svorníka pre všetky dosky, ktoré boli zosilňované pred zahájením zaťažovania (FS-02, FS-03, FS-07).

Z pomerných pretvorení odmeraných pomocou tenzometrických pások nainštalovaných na svorníkoch boli odvodené hodnoty napätí. Doska FS-02 bola vystužená M12 ($R_m = 877$ MPa) a počas zaťažovania nedošlo k porušeniu šmykovej výstuže. Vzorky FS-03 až FS-07 boli vystužene M10 ($R_m = 469$ MPa) a vzorky zlyhali pretlačením sprevádzaným pretrhnutím šmykovej výstuže. Meranie tenzometrami na šmykovej výstuže vo vzorkách FS-03 až FS-07 neprebehlo až do pretrhnutia svorníkov, kvôli plastizácii svorníkov došlo skôr k znefunkčneniu tenzometrov.

Pomer medzi napätím vnesením pomocou momentového kľúča do svorníka (σ_{sp}) a medzou pevnosti šmykovej výstuže (R_m) bol pre použité svorníky M12 ($R_m = 877$ MPa) 30% a pre M10 ($R_m = 469$ MPa) 32%.

Namerané hodnoty napätia vo svorníkoch nezodpovedajú hodnotám napätí, ktoré boli v svorníkoch tesne pred ich porušením, a to dôvodu zlyhania tenzometra, ktorých maximálna kapacita pomerného pretvorenia bola menšia, ako je pomerné pretvorenie svorníkov pri vyšších hodnotách napätí. Merania napätí v svorníkoch M10 (R_m = 469 MPa) sú realizované do sily od 77 % až do 97% zo sily pri zlyhaní dosky. Hodnoty napätí v svorníkoch pri týchto úrovniach zaťaženia potvrdzujú dosiahnutie medze pevnosti z ťahovej skúšky závitových tyčí pri dosiahnutí šmykovej odolnosti dosky. Vo svorníkoch M12 s medzou pevnosti ocele R_m = 877 MPa nebola dosiahnutá medza pevnosti a pomerné pretvorenia boli menšie ako je medza zlyhania tenzometrov.

Zo štúdie Koppitz-a [27], ktorá bola venovaná zosilneniam lokálne podopretých stropných dosiek vyplývalo, že šmyková výstuž sa postupne aktivuje počas zaťažovania vzorky so zväčšujúcim sa zaťažením od prvého po posledný obvod šmykovej výstuže. Na overenie tejto štúdie boli dáta získané z experimentov spracované tak, aby bola viditeľná aktivácia šmykovej výstuže na závislosti zaťaženia a pootočenia (*Obr. 4.15 a Obr. 4.16*). Zároveň boli vyhodnotené napätia a sily vo svorníkoch na prvom (12 kusov) a treťom (12 kusov) obvode z pomerných pretvorení (s uvážením efektívnej plochy prierezu svorníka – závitovej tyče). Z výsledkov vzoriek zo Sady 1 vyplýva, že šmyková výstuž sa aktivuje približne v čase, keď je dosiahnutá šmyková odolnosť dosky bez šmykovej výstuže. Na *Obr. 4.15 a Obr. 4.16* sú znázornené závislosti zaťaženia a pootočenia dosiek zo Sady 1 vystužených pomocou svorníkov (FS-02 vystužená M12 s medzou pevnosti ocele $R_m = 877$ MPa a FS-03 až FS-05 vystužená M10 s priemernou medzou pevnosti ocele $R_m = 469$ MPa) a dosky bez šmykovej výstuže (FS-01). Výsledky potvrdili aktiváciu svorníkov na prvom obvode skôr ako na treťom obvode šmykovej výstuže a súčasne aktiváciu šmykovej výstuže až po dosiahnutí odolnosti dosky bez šmykovej výstuže (FS-01).



Obr. 4.15 Graf závislosti zaťaženia (normalizovaná hodnota) a pootočenia zobrazujúci aktiváciu svorníkov a nárast pôsobiacej sily na prvom a treťom obvode šmykovej výstuže dosky FS-02 (vľavo) a dosky FS-03 (vpravo).



Obr. 4.16 Graf závislosti zaťaženia (normalizovaná hodnota) a pootočenia zobrazujúci aktiváciu svorníkov a nárast pôsobiacej sily na prvom a treťom obvode šmykovej výstuže dosky FS-04 (vľavo) a dosky FS-05 (vpravo).

4.6.5. Spôsob zlyhania experimentálnych vzoriek

Experimentálne vzorky boli testované v Centrálnych laboratóriách STU v Bratislave. Postup zaťažovania a čas zosilnenia nebol u všetkých vzoriek rovnaký (viac o zaťažovaní viď. 4.5 *Postup zaťažovania a skúšania*). Maximálne hodnoty dosiahnutých odolností V_{test} , priehybov w_{test} a pootočení dosiek v hlavnom $\psi_{test,h}$ a vedľajšom smere $\psi_{test,v}$ sú uvedené v *Tab. 4.6*.

Referenčná doska FS-01 bola bez zosilnenia šmykovou výstužou, zlyhala náhle pretlačením pri sile 1032 kN. Zlyhanie bolo sprevádzané výrazným dunivým zvukom. Pri porušení nastalo aj mierne zatlačenie podpery do dosky, ktoré bolo možné pozorovať pri všetkých doskách.

Vzorka zosilnená pred zaťažovaním FS-02 zlyhala pretlačením za oblasťou vystuženou pomocou svorníkov M12 ($R_m = 877$ MPa) pri sile 1830 kN. Pri vzorke FS-02 bolo pred zlyhaním za vonkajším obvodom šmykovej výstuže pozorované, že dochádza k plastizácii časti ohybovej výstuže približne na oblasti v okolí *d* od líca podpery (viď. *Obr.* 4.13 a *Obr.* 4.14.), ohybové porušenie však nenastalo. Vzorka po porušení je zobrazená na *Obr.* 4.17 a *Obr.* 4.18.

). /	f _c	Šmyková výstuž	ă	V _{test}	W _{test}	$\psi_{test,h} \ \psi_{test,v}$	$\frac{V_{test}}{b_{0.5} \cdot d \cdot f_c^{1/2}}$	G A 1
dosky	[MPa]	ks x priemer x počet obvodov	zosilnenia	[kN]	[mm]	[mrad]	[MPa ^{1/2}]	Sposob zlyhania
FS-01	30,56	-	bez zosilnenia	1032	9,92	8,66 8,86	0,633	Pretlačenie – dosiahnutá šmyková odolnosť bez šmykovej výstuže
FS-02	34,82	12 x M12 (<i>R_m</i> = 877 <i>MPa</i>) x 5	pred zaťažovaním	1830	27,60*	26,90* 30,12*	1,089	pretlačenie za posledným obvodom šmykovej výstuže
FS-03	30,94		pred zaťažovaním	1715	25,42	23,68 24,08	1,045	Pretlačenie vo vnútri
FS-04	34,72		pri sile 500 kN	1647	26,85	24,60 26,60	0,954	kontrolného obvodu
FS-05	34,72	12 x M10 (R 469	pri sile 500 kN	1563	32,02	30,99 32,64	0,945	vystuženého šmykovou
FS-06	28,99	$(M_m = 10)$ MPa) x 5	pri sile 500 kN	1347	30,55	25,30** 19,89**	0,945	výstužou sprevádzané
FS-07	28,99		pred zaťažovaním	1412	25,30	20,85 24,10	0,999	ťahovým porušením šmykovej výstuže

Tab. 4.6 Prehľad nameraných hodnôt experimentálnych vzoriek.

 f_c – nameraná pevnosť betónu v tlaku; $b_{0.5}$ – dĺžka kontrolného obvodu vo vzdialenosti 0.5d od líca podpery; d – účinná výška prierezu, * - maximálne namerané hodnoty pri doske FS-02 pri sile 1775 kN z dôvodu nutnosti odinštalácie snímačov, ** - rozdiel pootočenia v doske FS-06 je detailne popísaný ďalej v kapitole 5.7.6.



Obr. 4.17 Porušenie vzorky FS-02 za vystuženou oblasťou pri spodnom povrchu.



Obr. 4.18 Priebeh trhlín na okraji porušenej vzorky FS-02.



Obr. 4.19 Porušenie vzorky FS-03 vo vnútri vystuženej oblasti (vľavo) a porušená šmyková výstuž (vpravo).

Vzorka zosilnená pred zaťažovaním FS-03 pomocou svorníkov M10 (R_m = 469 MPa) zlyhala pri sile 1715 kN. Porušenie pretlačením bolo sprevádzané pretrhnutím svorníkov najprv na prvom obvode a so zvyšujúcou sa silou a deformáciu postupne zlyhávali svorníky aj na druhom obvode šmykovej výstuže. Pomerné pretvorenia vo svorníkoch boli krátko pred porušením dosky, a teda aj pred ich pretrhnutím natoľko veľké, že ich nebolo možné zaznamenať. Všetky tenzometre sa porušili skôr ako nastalo porušenie samotného svorníka. Na obrázku *Obr. 4.19* je možné pozorovať horný povrch dosky, rozvinutú šmykovú trhlinu a porušené svorníky.



Obr. 4.20 Vzorka FS-03 prerezaná stredom podpery v mäkšom smere.

Z *Obr. 4.20* je vidieť, že rozvoj kritickej trhliny pretína hlavne prvý obvod šmykovej výstuže. V mieste rozvetvenia trhliny je možné pozorovať jej prechod cez druhý a tretí obvod šmykovej výstuže. Sklon kritickej šmykovej trhliny je 57° a je porovnateľne

veľký s experimentálnymi programami vykonanými na doskách s dodatočne vloženou šmykovou výstužou vo forme kotiev [15], [14] a svorníkov [18].

Vplyv zaťaženia na hodnotu 500 kN, potom zosilnenie vzorky pomocou M10 (R_m = 469 MPa) pri zaťažení 500 kN, bolo pozorované na FS-04. Vzorka zlyhala rovnako ako FS-03 a to rozvojom kritickej šmykovej trhliny sprevádzaným pretrhnutím šmykovej výstuže najprv na prvom obvode, a potom na ďalších (*Obr. 4.21*).



Obr. 4.21 Porušenie vo vnútri vystuženej oblasti vzorky FS-04 (vľavo) a FS-05 (vpravo).

Zlyhanie vzorky FS-05 nastalo rovnako pretlačením v oblasti vystuženej šmykovou výstužou. Doska bola zaťažená pred zosilnením na hodnotu 750 kN, potom odľahčená na 500 kN a pri tejto hodnote zosilnená. Priehyby a teda aj pootočenia boli najväčšie zo všetkých dosiek zo Sady 1. Počas zlyhania nastalo porušenie svorníkov a náhly pokles sily v hydraulickej zostave, zväčšenie priehybu a roztvorenie kritickej šmykovej trhliny. Po odľahčení zaťaženia boli svorníky splastizované, a teda mali voľným okom približne v strede rozpätia svorníka zúžené priemery.

Vzorky zo Sady 2 zlyhali rovnakým spôsobom ako dosky v Sade 1 vo vnútri vystuženej oblasti šmykovou výstužou a počas zlyhania došlo k pretrhnutiu svorníkov.

Doska FS-06 bola zaťažovaná po úroveň takmer 750 kN až do okamihu, v ktorom nastal náhly pokles tlaku v hydraulickom systéme približne na hodnotu 500 kN. Oceľová platňa sa zaborila na jednej strane (v menej tuhom smere, kde bola ohybová výstuž ďalej od povrchu) približne 5 mm do betónu. Zlyhanie dosky nenastalo, a tak sa doska opäť zaťažila z hodnoty 500 kN na hodnotu 750 kN, potom odľahčila na hodnotu 500 kN a pri tomto zaťažení zosilnila (proces tohto zaťažovania je čitateľný aj na grafe priehybov alebo pootočení). Zosilnená doska zlyhala vo vnútri vystuženej oblasti pretlačením, no na jednej strane mala pri spodnom povrchu viac zatlačenú podperu, ako vzorka FS-07 (vzorka mala zatlačenú podperu rovnomerne). Vzhľadom na nezvyčajné správanie dosky FS-06 v porovnaní so ostatnými, je možné predpokladať, že v okolí podpery nebola dosiahnutá požadovaná kvalita zhotovenia experimentálnej vzorky (uloženia a zhutnenia betónu).

5. Posúdenie odolnosti dosiek podľa dostupných modelov

Posúdenie experimentálnych vzoriek bolo vypočítané podľa aktuálnej normy Eurokód 2 (EC2) [1], výpočtového postupu Model Code 2010 (MC2010) [3] a poslednej verzie pripravovaného Eurokódu 2 (prEC2) [5]. Hodnoty odolností experimentálnych dosiek boli počítané so súčiniteľmi spoľahlivosti rovnými 1,0. Ohybová odolnosť V_{flex} experimentálnych vzoriek bola vypočítaná pre dosku podľa Muttoniho [28].

Výpočet odolnosti bez šmykovej výstuže $V_{Rm,c}$, ako podiel betónu na celkovej odolnosti dosky so šmykovou výstužou $V_{Rm,cs}$, bol uvačovaný so znížením jeho účinku o 25%. Vo výpočtoch bola použitá hodnota empirického súčiniteľa $C_{Rk,c}$ rovná 0,18. V prípade efektívnej pevnosti šmykovej výstuže proti pretlačeniu $f_{ywk,ef}$ sa hodnota účinnej výšky uvažovala ako 0,25 m, a teda zhodná s hrúbkou dosky, čo vyplýva z efektívnej výšky svorníka zakotveného na hornom a spodnom povrchu dosky.

$$V_{Rm,cs} = 0.75 \cdot V_{Rm,c} + V_{Rm,s} \tag{6.1}$$

$$V_{Rm,c} = C_{Rk,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{\frac{1}{3}} \cdot u_1 \cdot d$$
(6.2)

$$V_{Rm,s} = \frac{1.5 \cdot a}{s_r} \cdot A_{sw} \cdot f_{ywd,ef}$$
(6.3)

$$f_{ywd,ef} = 250 \, MPa + 0.25 \cdot h \le f_{t.sw} \tag{6.4}$$

kde $f_{t.sw}$ je hodnota nameranej medze pevnosti šmykovej výstuže.

Maximálna šmyková odolnosť dosky v pretlačení v líci podpery $V_{Rm,max}$ bola uvažovaná vo výpočte so súčiniteľom 0,5 (pre osovo symetrické zaťažovanie) namiesto 0,4 ako uvádza EC2. Hodnota šmykovej odolnosti za vystuženou oblasťou $V_{Rm,out}$ bola vypočítaná vo vzdialenosti 1,5*d* za posledným obvodom šmykovej výstuže.

Výpočtový postup Model Code 2010 (MC 2010) [3] vychádza z Teórie kritickej šmykovej trhliny (CSCT) a ponúka výpočet podľa štyroch úrovní priblíženia (Levels of Approximation LoA) [4]. Výpočet šmykovej odolnosti dosky v pretlačení bez šmykovej výstuže $V_{Rm,c}$, ktorý výrazne ovplyvňuje pootočenie dosky ψ , bol uvažovaný podľa CSCT (2008) [28] a vzťahu (6.5). Príspevok šmykovej odolnosti od šmykovej výstuže $V_{Rm,s}$ pozostával z odolnosti prierezu svorníkov na obvodoch A_{si} , cez ktoré sa rozvíjala teoretická šmyková trhlina pod uhlom 45°, a vneseného predopnutia do svorníkov σ_{sp} . Vzhľadom na šmykovú odolnosť experimentálnych dosiek bola posúdená aj maximálna odolnosť dosky spôsobujúca drvenie betónu v líci podpery $V_{Rm,crush}$ a aj šmyková odolnosť za posledným obvodom šmykovej výstuže $V_{Rm,out}$ vo vzdialenosti $d_v/2$.



Obr. 5.1 Označenie vstupných hodnôt pre výpočet šmykovej odolnosti v pretlačení podľa Model Code 2010.

Vzťahy pre šmykové odolnosti sú uvažované v tvare:

$$V_{Rm,c} = \frac{3/4 \cdot b_0 \cdot d \cdot \sqrt{f_{cm}}}{1 + 15 \cdot \frac{\psi \cdot d}{d_{g0} + d_g}}$$
(6.5)

$$V_{Rm,s} = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{si}(\psi) \cdot A_{si}$$
(6.6)

$$\sigma_{si}(\psi) = E_{sw} \cdot \frac{k_s \cdot \psi \cdot h_w \cdot \cos(\alpha_w)}{l_w} + \sigma_{sp} \le f_{t.sw}$$
(6.7)

$$V_{Rm,crush} = k_{sys} \cdot V_{Rm,c} \le \sqrt{f_{cm}} \cdot b_0 \cdot d_\nu$$
(6.8)

$$V_{Rm,out} = \frac{b_{out} \cdot d_v}{b_0 \cdot d} \cdot V_{Rm,c}$$
(6.9)

kde ψ je vypočítaná hodnota pootočenia podľa LoA III pri sile zodpovedajúcej šmykovej odolnosti lokálne podopretej dosky so šmykovou výstužou $V_{Rm,cs}$; $\sigma_{si}(\psi)$ je napätie v šmykovej výstuži na jednom obvode šmykovej výstuže; k_s je faktor označujúci roztvorenie kritickej šmykovej trhliny rovný 0,5; h_w je vertikálna vzdialenosť medzi špičkou trhliny a miestom, kde kritická šmyková trhlina pretne šmykovú výstuž (*Obr. 5.1*); α_w predstavuje uhol medzi kritickou šmykovou trhlinou a tlačeným povrchom dosky (45°); l_w je dĺžka svorníka rovná 0,25 m; k_{sys} je koeficient započítavajúci účinok šmykovej výstuže rovný 3,0 (pre dobre zakotvenú šmykovú výstuž) [26] a b_{out} je vonkajší kontrolný obvod za posledným obvodom šmykovej výstuže vo vzdialenosti $d_v/2$.

Porovnanie podľa pripravovanej poslednej verzie nového Eurokódu 2 (prEC2) [5] bolo vypočítané ako posúdenie novej konštrukcie a existujúcej konštrukcie podľa prílohy I z prEC2 (Posúdenie existujúcich konštrukcií).

Šmyková odolnosť dosky so šmykovou výstužou $V_{Rm,cs}$ sa pre nové dosky vypočíta ako prírastok šmykovej odolnosti betónu $V_{Rm,c}$ redukovaného koeficientom η_c a šmykovej odolnosti z účinkov šmykovej výstuže $V_{Rm,s}$. Použitá nesúdržná šmyková výstuž bola predopnutá pomocou momentového kľúča a hodnota ťahového predpínacieho napätia σ_{sp} bola pripočítaná k napätiu zvyšujúcemu šmykovú odolnosť dosky σ_{swm} . V líci podpery bola vypočítaná šmyková maximálna odolnosť $V_{Rm,max}$ a šmyková odolnosť za posledným obvodom šmykovej výstuže $V_{Rm,out}$ vo vzdialenosti $d_v/2$. Použité vyjadrené vzorce pre predopnuté nesúdržné svorníky sú vyjadrené v tvare:

$$V_{Rm,cs} = \eta_c \cdot V_{Rm,c} + V_{Rm,s} \ge \rho_{sw} \cdot f_{t.sw} \cdot b_{0,5} \cdot d_v \tag{6.10}$$

$$V_{Rm,c} = 0.6 \cdot k_{pb} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm} \cdot \frac{d_{dg}}{a_{pd}} \right)^{\overline{3}} \cdot b_{0,5} \cdot d_{\nu}$$

$$\leq 0.6 \cdot \sqrt{f_{cm}} \cdot b_{0,5} \cdot d_{\nu}$$
(6.11)

$$\eta_c = \frac{V_{Rm,c}}{V_{Rm,cs}} \tag{6.12}$$

$$V_{Rm,s} = \rho_{sw} \cdot \sigma_{swm} \cdot b_{0,5} \cdot d_{\nu} \tag{6.13}$$

20

$$\sigma_{swm} = \eta_s \cdot f_{t.sw} + \sigma_{sp} \le 0.8 \cdot f_{t.sw} \tag{6.14}$$

$$\eta_s = \left(15 \cdot \frac{d_{dg}}{d_v}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{1}{\eta_c \cdot k_{pb}}\right)^{3/2} \tag{6.15}$$

$$V_{Rm,max} = \eta_{sys} \cdot V_{Rm,c} \tag{6.16}$$

$$\eta_{sys} = 1.15 \cdot \frac{d_{sys}}{d_v} + 0.63 \cdot \left(\frac{b_0}{d_v}\right)^{\frac{1}{4}} - 0.85 \frac{s_0}{d_{sys}} \ge 1.0$$
(6.17)

kde $a_{pd} = \sqrt{(a_p/8) \cdot d_v}$ je závislá od maximálnej vzdialenosti ťažiska kontrolného obvodu od miesta nulových momentov (a_p) a d_{sys} je účinná výška závislá od tvaru použitej šmykovej výstuže (pre svorníky kotvené na hornom a spodnom povrchu dosky je uvažovaná s hodnotou 0,25 m).

Okrem návrhu šmykovej výstuže pre nové konštrukcie pripravovaná norma prEC2 ponúka aj posúdenia existujúcich konštrukcií. Šmyková odolnosť stropných dosiek so šmykovou výstužou $V_{Rm,cs}$ závislá od pootočenia ψ sa vypočíta ako súčet šmykovej odolnosti bez šmykovej výstuže $V_{Rm,c}$ a šmykovej odolnosti od účinkov nesúdržnej predopnutej šmykovej výstuže $V_{Rm,s}$. V prípade detailného návrhu výpočtový postup ponúka možnosť uvažovať koeficient η_c s hodnotu 1,0. Hodnota koeficientu redukujúceho účinok šmykovej odolnosti od účinkov šmykovej výstuže je ohraničená na maximálnu hodnotu 0,8, ktorá sa pri výpočte šmykovej odolnosti experimentálnych dosiek stala vždy limitnou. Hodnota maximálnej šmykovej výstuže $V_{Rm,out}$ bola vypočítaná pri finálnom pootočení dosky ψ_{final} , ktoré bolo získané experimentálnym meraním.

$$V_{Rm,cs} = \eta_c \cdot V_{Rm,c} + V_{Rm,s} \ge \rho_{sw} \cdot f_{t.sw} \cdot b_{0,5} \cdot d_v \tag{6.18}$$

$$V_{Rm,c} = 0.75 \cdot \frac{\sqrt{J_{cm}}}{1 + 15 \cdot \psi \cdot \frac{d_{\nu}}{d_{da}}} \cdot b_{0,5} \cdot d_{\nu}$$
(6.19)

$$V_{Rm,s} = \eta_s \cdot \rho_{sw} \cdot f_{t.sw} \cdot b_{0,5} \cdot d_v \tag{6.20}$$

$$\eta_s = \left(\frac{E_{sw} \cdot \psi}{7,5 \cdot f_{t,sw}} \cdot 1\right) + \frac{o_{sp}}{f_{t,sw}} \le 0.8 \tag{6.21}$$

$$V_{Rm,max} = \eta_{sys}^{5/3} \cdot V_{Rm,c}$$
(6.22)

kde E_{sw} je modul pružnosti šmykovej výstuže.

Podľa prílohy I v pripravovanej norme prEC2 boli posudzované len vzorky, ktoré boli pred zosilnením už zaťažovania (FS-04, FS-05, FS-06). Šmykové odolnosti týchto dosiek boli počítané dvoma spôsobmi. Raz boli vypočítané s pootočeniami získanými počas experimentálneho overovania ψ_{test} a druhý krát s pootočeniami ψ_{vyp} vypočítaným podľa CSCT (2008) [28].

Z grafu *Obr. 4.12* závislosti medzi zaťažením a pootočením získaných z experimentálnych skúšok dosiek (ψ_{test}) boli získané hodnoty potočení v čase zosilňovania ψ_0 a výsledné pootočenia v čase porušenia dosiek ψ_{final} . Hodnoty pootočení lokálne

podopretých dosiek (ψ_{vyp}) v druhom prípade výpočtu boli podľa LoA III počítané v čase zosilňovania ψ_0 a v čase porušenia dosiek ψ_{final} .

Hodnoty šmykovej odolnosti dosky v pretlačení $V_{Rm,cs}(\psi_{final})$ boli v oboch typoch výpočtov počítané ako súčet šmykovej odolnosti bez šmykovej výstuže pri výslednom pootočení v čase porušenia dosky $V_{Rm,c}(\psi_{final})$ a šmykovej odolnosti od účinku šmykovej výstuže pri pootočení dosky $V_{Rm,s}(\psi_{final} - \psi_0)$, ktorá bola rozdielom výsledného pootočenia a pootočenia v čase zosilňovania. Pre posudzované dosky boli vyčíslené aj šmykové odolnosti v pretlačení bez šmykovej výstuže v čase zosilňovania dosiek $V_{Rm,c}(\psi_0)$.

$$V_{Rm,cs}(\psi_{final}) = V_{Rm,c}(\psi_{final}) + V_{Rm,s}(\psi_{final} - \psi_0)$$
(6.23)

Vzájomné porovnanie výsledkov z výpočtových postupov je súhrnne vyjadrené v *Tab. 5.1.* Pre všetky experimentálne dosky sú vyjadrené hodnoty najnižších šmykových odolností vypočítaných podľa platného EC2 (V_{EC2}), MC 2010 (V_{MC2010}), poslednej verzie pripravovanej prEC2 pre nové konštrukcie (V_{prEC2}) a pre existujúce konštrukcie ($V_{prEC2,ex}$). Vypočítané výsledky sú súhrne vyjadrené aj na *Obr. 5.2*, na ktorom je vidieť spoľahlivosť jednotlivých výpočtových postupov.

Výpočet podľa poslednej verzie pripravovanej prEC2 sa javí ako najkonzervatívnejší. Vzhľadom na pootočenia získané z experimentálnych meraní má doska výrazne menšiu šmykovú odolnosť ako je experimentálne nameraná. Prídavok šmykovej odolnosti od príspevku betónu je pri nameranom pootočení výrazne redukovaný.

Názov dosky	V _{EC2}	V _{MC2010} LoAIII	V _{prEC2}	$V_{prEC2,ex} \ \psi_{test}$	$V_{prEC2,ex} \ \psi_{vyp}$	V _{test}
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]
FS-01	894	886	876	-	-	1032
FS-02	1419	1680	1758	-	-	1830
FS-03	1191	1208	1159	-	-	1715
FS-04	1211	1244	1187	866	1108	1647
FS-05	1171	1211	1143	784	1061	1563
FS-06	1076	1113	1039	800	939	1347
FS-07	1069	1108	1032	-	-	1412
Názov dosky	$\frac{V_{test}}{V_{EC2}}$	$\frac{V_{test}}{V_{MC2010}}$ LoAIII	$rac{V_{test}}{V_{prEC2}}$	$\frac{V_{test}}{V_{prEC2,ex}}$ ψ_{test}	$\frac{V_{test}}{V_{prEC2,ex}}$ ψ_{vyp}	V _{test}
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN]
FS-01	1,154	1,164	1,178	-	-	1032
FS-02	1,289	1,089	1,041	-	-	1830
FS-03	1,440	1,419	1,480	-	-	1715
FS-04	1,360	1,324	1,387	1,902	1,486	1647
FS-05	1,335	1,291	1,368	1,994	1,473	1563
FS-06	1,252	1,210	1,296	1,683	1,435	1347
FS-07	1,321	1,274	1,368	-	-	1412
ψ_{test} je nameraná ho podopretej stroj	odnota pootoč onej dosky; ψ	enia počas exper novn je vypočítan	rimentálneho á hodnota poo	overovania šmyk otočenia podľa C	ovej odolnosti lol SCT (2008) [28].	kálne

Tab. 5.1 Porovnanie vypočítaných hodnôt šmykových odolností v pretlačení podľa EC2, MC 2010 a prEC2 s experimentálne nameranými hodnotami odolností.

Ak sa vo výpočte šmykovej odolnosti podľa prEC2 uvažuje s pootočením vypočítaným podľa CSCT (2008) [28], tak šmyková odolnosť so šmykovou výstužou je vyššia a viac sa približuje experimentálne zistenej odolnosti. Rozdiel medzi šmykovou odolnosťou lokálne podopretej stropnej dosky so šmykovou výstužou vypočítanou s experimentálne zisteným potočením a vypočítaným pootočením (CSCT, 2008) je priemerne 24% pre dosky FS-04 a FS-05 a 15% pre dosku FS-06.

Výpočet podľa poslednej verzie prEC2 pre nové konštrukcie má v porovnaní s výpočtom pre existujúce konštrukcie v prílohe I (s vypočítaným pootočením podľa CSCT 2008) [28] o cca 7 % nižšiu bezpečnosť pre dosky FS-04 a FS-05 a o cca 10 % pre dosku FS-06.

Z *Obr. 5.2* sa môže javiť návrh šmykovej výstuže svorníkmi M12 (s medzou pevnosti ocele 877 MPa) najmenej bezpečný, nie je to však pravda. Nízka spoľahlivosť je daná iným spôsobom porušenia – za posledným radom šmykovej výstuže. Šmyková výstuž nemohla byť preto naplno využitá.

Na *Obr. 5.3a* sú zobrazené účinnosti zvýšenia šmykovej odolnosti v percentách po pridaní svorníkov porovnané s doskou bez šmykovej výstuže (FS-01). Nejde o porovnanie nameraných odolností označovaných v predchádzajúcich vyhodnoteniach ako *V*_{test}, ale o porovnanie normalizovaných hodnôt podľa *Tab. 4.6*, keďže nie všetky dosky boli vyhotovené z rovnakej triedy betónu a drobné odchýlky boli aj v účinnej výške jednotlivých dosiek.



Obr. 5.2 Porovnanie vypočítaných výsledkov šmykových odolností v pretlačení podľa EC2, MC 2010 a prEC2 s výsledkami získanými experimentálnym overením.

V prípade dosky vystuženej svorníkmi M12 (s medzou pevnosti ocele 877 MPa) nebola dosiahnutá šmyková odolnosť dosky so šmykovou výstužou, doska zlyhala za oblasťou vystuženou svorníkmi, a šmyková odolnosť dosky sa zvýšila o 72 %. Dosky FS-03 a FS-07 zosilnené pomocou svorníkov s priemerom M10 (s priemernou medzou pevnosti ocele 469 MPa) sa porušili vo vnútri oblasti vystuženej svorníkmi (pretrhnutím svorníkov) a šmyková odolnosť dosky sa zvýšila o 65 % a 58 %.

Dosky zosilňované počas zaťažovania (FS-04, FS-05, FS-06) vykazujú o cca 15 % menší nárast šmykovej odolnosti v porovnaní s doskami zosilnenými pred zahájením

zaťažovania (FS-03 a FS-07). Tento pokles je možné pozorovať pri doskách zo Sady 1 aj Sady 2 (*Obr. 5.3a,b*).



Obr. 5.3 a) porovnanie zvýšenia šmykovej odolnosti v pretlačení pomocou pridania svorníkov pred zaťažovaním; b) porovnanie úbytku účinnosti zosilnenia pomocou svorníkov pri doskách zosilnených počas zaťažovania v Sade 1; c) porovnanie úbytku účinnosti zosilnenia pomocou svorníkov pri doskách zosilnených počas zaťažovania v Sade 2.

6. Závery

6.1. Prínosy pre rozvoj vedného odboru

Experimentálne overenie účinku zosilnenia pomocou svorníkov za účelom zvýšenia šmykovej odolnosti lokálne podopretej dosky s históriou zaťažovania potvrdilo predpokladané hypotézy a prinieslo niekoľko záverov:

- Zvýšenie šmykovej odolnosti lokálne podopretej dosky pomocou dodatočne vloženej šmykovej výstuže je účinný spôsob zosilnenia v prípadoch, ak má doska dostatočnú ohybovú kapacitu a rezervu v maximálnej šmykovej odolnosti dosky, ktorú limituje drvenie tlakovej betónovej diagonály. Z experimentálneho overenia vyplýva, že prípade dosiek zosilnených pred zaťažovaním bolo možné dosiahnuť zvýšenie odolnosti dosky až o 72% (12xM12 s medzou pevnosti ocele 877 MPa, vzorka zlyhala za vonkajším obvodom šmykovej výstuže), prípadne 65% a 58% (12xM10 s medzou pevnosti ocele 469 MPa, vzorky zlyhali vo vnútri oblasti vystuženej šmykovou výstužou).
- 2. Zosilňovanie dosiek pomocou dodatočne vloženej výstuže, napr. vo forme svorníkov zo závitových tyčí upevnených maticami, sa v praxi realizuje na existujúcich doskách, ktorých tuhosť je vplyvom predchádzajúceho, zväčša dlhodobého, zaťaženia znížená. Dosky, ktoré boli experimentálne skúšané s históriou zaťaženia, vykazovali pokles v účinnosti zvýšenia šmykovej odolnosti cca 15 % v porovnaní s doskami zosilnenými pred zaťažovaním. Dokonca aj v prípade dosky FS-06, ktorej kvalita betónu v okolí podpery nedosahovala požadovanú úroveň, bolo možné pozorovať zvýšenie šmykovej odolnosti o 9 %.
- Z grafov zobrazujúcich aktiváciu šmykovej výstuže počas zaťažovania (Obr. 4.15, Obr. 4.16) bolo zrejmé, že ich príspevok na preberaní šmykovej odolnosti dosky sa začal

prejavovať až v momente dosiahnutia šmykovej odolnosti dosky bez šmykovej výstuže. Do tohto momentu nebolo vo svorníkoch pozorované žiadne pomerné pretvorenie.

- 4. Rozloženie šmykovej výstuže má výrazný vplyv na výslednú odolnosť dosky. V prípade vystuženia, ktoré bolo použité v experimentálnom programe, bolo možné pozorovať, že s narastajúcim zaťažením sa najprv aktivovali svorníky na prvom obvode (najbližšie k lícu podpery) a neskôr na treťom obvode. Napätie na prvom a treťom obvode bolo počas celého zaťažovania rozdielne, na treťom obvode bolo priemerne o 35 % menšie.
- 5. Z nameraných hodnôt pomerných pretvorení v prvom a treťom rade šmykovej výstuže vyplývalo, že šmyková trhlina prechádza čiastočne aj tretím radom výstuže a táto výstuž prispieva svojím podielom k prenosu šmykovej sily, hoci použité výpočtové postupy tretí obvod šmykovej výstuže nezapočítavajú do šmykovej odolnosti dosky. Z rezu stredom dosky po celej dĺžke na *Obr. 4.20* je možné pozorovať, že kritická šmyková trhlina prechádza prvým obvodov šmykovej výstuže. V mieste ohybovej výstuže nastáva rozvetvenie kritickej šmykovej trhliny. Až rozvetvené trhliny prechádzajú druhým a tretím obvodom šmykovej výstuže.
- 6. V prípade použitia svorníkov ako dodatočnej šmykovej výstuže s dostatočne veľkými a tuhými podložkami, ktoré bezpečne prenesú napätie zo svorníkov do betónu, je ich účinnosť zabezpečená aj bez použitia chemickej kotvy, ako bolo potvrdené v experimentálnom programe.
- Vzhľadom na to, že porušenie dosiek vystužených pomocou M10 s medzou pevnosti ocele 469 MPa nastalo pretrhnutím svorníkov, je možné konštatovať, že hodnota napätia v svorníkoch je väčšia ako pripúšťa Eurokód 2.
- 8. Z porovnaní šmykových odoľností dosiek vypočítaných podľa výpočtových postupov EC2 [1], MC 2010 [3] a pripravovanej normy prEC2 [5] je možné konštatovať, že aj vzhľadom na to, že sú tieto výpočtové vzťahy určené pre nové konštrukcie, sú vypočítané odolnosti stále na strane bezpečnej. Najbezpečnejšia sa javí pripravovaná norma prEC2. Výpočtový postup v prílohy I z prEC2 venovaný posudzovaniu existujúcich konštrukcií sa javí ako najkonzervatívnejší. Hodnoty odolností sú výrazne ovplyvnené pootočením dosky, ktoré výrazne znižuje vypočítanú šmykovú odolnosť príspevku betónu do celkovej šmykovej odolnosti so šmykovou výstužou. Výpočet podľa poslednej verzie prEC2 pre nové konštrukcie má v porovnaní s výpočtom pre existujúce konštrukcie v prílohe I (s vypočítaným pootočením podľa CSCT (2008) [28] o cca 7 % nižšiu bezpečnosť pre dosky FS-04 a FS-05 a o cca 10 % pre dosku FS-06.

6.2. Odporúčania pre prax

Zosilnenie pomocou svorníkov je účinný spôsob zvýšenia šmykovej odolnosti:

- Návrhový výpočtový postup, ktorý je zatiaľ v praxi zaužívaný podľa platnej EC2, je dostatočne bezpečný aj pre dosky, ktoré boli už počas svojej životnosti zaťažované.
- 2. Z pohľadu materiálových vlastností svorníkov sa odporúča používať oceľové závitové tyče vyšších pevnostných tried. Matice je vhodnejšie používať vyššie (s dlhším závitom), prípadne s rozšírenou hlavou v kontakte s oceľovou podložkou, aby bol zabezpečený prenos napätia zo závitovej tyče na väčšej ploche cez závit a potom do podložky. Podložka pod maticou musí zabezpečiť prenos napätia zo svorníka do betónu,

a preto musí mať dostatočnú tuhosť a veľkosť, aby prekryla vyvítaný otvor a nedošlo k jej deformácii.

- Vhodné je predopnúť svorníky pomocou momentového kľúča na vypočítané hodnoty momentov závislé od pevnosti ocele a priemeru závitovej tyče, aby bolo možné šmykovú výstuž okamžite aktivovať.
- Pre bezpečný návrh je vhodné vždy redukovať šmykovú odolnosť príspevku betónu do celkovej šmykovej odolnosti stropnej dosky so šmykovou výstužou minimálne o 25% ako uvádza EC2.
- Do výpočtu šmykovej odolnosti so šmykovou výstužou je vhodné brať priemerné vzdialenosti šmykovej výstuže v radiálnom smere, ktoré uvažujú s polohou ohybovej výstuže.

6.3. Odporúčania pre ďalší výskum

Zo zistení založených na výsledkoch experimentálneho programu sa odporúča venovať sa v nadväzujúcom výskume nasledovným vplyvom:

- 1. Pozorovať detailne aktiváciu a správanie sa šmykovej výstuže počas zaťažovania. Najvhodnejšie je meranie pomerných pretvorení vo viacerých miestach a všetkých zhotovených obvodoch šmykovej výstuže.
- Overiť účinok predopnutia a jeho úrovne ako aj možností kotviaceho systému svorníkov za účelom zvýšenia účinnosti zosilnenia pomocou svorníkov ako dodatočne vloženej šmykovej výstuže.
- 3. Rozšíriť databázu experimentov na potvrdenie účinku predchádzajúceho zaťaženia dosiek na ich následné zosilnenie a to monotónnym ale aj cyklickým zaťažením, ktoré môže mať výrazne vyšší vplyv na budúcu únosnosť dosky po jej zosilnení šmykovou výstužou.
- 4. Keďže zosilňovanie stropných dosiek za účelom zvýšenia šmykovej odolnosti s históriou zaťažovania nemá dostatočné množstvo odporúčaní na jeho správne nelineárne modelovanie, ktoré bude potrebné na detailné posúdenie podľa pripravovanej druhej generácie európskych noriem, je žiadúce venovať sa tejto oblasti.
- 5. Vzhľadom na pomerne malé množstvo experimentálnych vzoriek sa v rámci nelineárneho modelovania odporúča vypracovanie parametrickej štúdie opierajúcej sa o experimentálne zistené hodnoty odolností dosiek.

7. Zoznam použitej literatúry

- [1] CEN, EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, Brussel, 2004, p. 225 s.
- [2] D. KUERES, C. SIBURG, M. HERBRAND and J. HEGGER, "Uniform Design Method for punching shear in flat slabs and column bases," *Engineering Structures*, no. 136, pp. 149-164, 2017.
- [3] FIB INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE, fib - Model Code for Concrete Structures 2010, Berlin: Ernst & Sohn, 2013.

- [4] A. MUTTONI and M. F. RUIZ, "The levels-of-approximation approach in MC 2010: application to punching shear provisions: application to punching shear provisions," *Structural Concrete*, no. 13, pp. 32-41, 2012.
- [5] CEN/TC 250/SC 2, prEN 1992-1-1:2021-09. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures, 2021.
- [6] H. FERNANDEZ, V. LÚCIO and A. RAMOS, "Strengthening of RC slabs with reinforced concrete overlay on the tensile face," *Engineering Structures*, no. 132, pp. 540-550, 2017.
- [7] C. Y. LI and C.-C. CHEN, "Punching shear strength of reinforced concrete slabs strengthened with glass fiber-reinforced polymer laminates," *ACI Structural Journal*, no. 102(4), pp. 535-542, 2005.
- [8] C.-C. CHEN and S.-L. CHEN, "Strengthening of Reinforced Concrete Slab-Column Connections with Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminates," *Applied sciences*, no. 10, p. 11, 2020.
- [9] C. MORENO, D. FERREIRA, A. BENNANI, A. SARMENTO and M. NOVERRAZ, Punching shear strengthening of flat slabs: CFRP and shear reinforcement, FIB SYMPOSIUM 2015: CONCRETE – INNOVATION AND DESIGN, 2015.
- [10] J. NOVÁČEK and M. ZICH, "Study of Strengthening Flat Slabs Against Punching by Additional Column Heads," *Key Engineering Materials*, no. Vol. 691, pp. 321-332, 2016.
- [11] D. M. V. FARIA, V. J. G. LÚCIO and P. A. RAMOS, "Strengthening of flat slabs with post-tensioning using anchorages by bonding," *Engineering Structures*, no. 33, pp. 2025-2043, 2011.
- [12] M. F. RUIZ, A. MUTTONI and J. KUNZ, "Strengthening of Flat Slabs Against Punching Shear Using Post-Installed Shear Reinforcement," ACI Structural Journal, no. 107, pp. 434-442, 2010.
- [13] O. KESELI, Zosilňovanie lokálne podopretých stropných dosiek na účinky pretlačenia dodatočne vloženou šmykovou výstužou, Bratislava, 2018, p. 163.
- [14] R. WALKNER, M. SPIEGL and J. REIX, "A new method for post-installed punching shear reinforcement," *Punching shear of structural concrete slabs. fib Bulletin*, no. 81, pp. 337-352, 2017.
- [15] P. WÖRLE, "Enhanced shear punching capacity by the use of post installed concrete screws," *Engineering Structures*, no. 60, p. 41–51, 2014.
- [16] R. WALKNER, M. SPIEGL and J. FEIX, "Concrete screws as a post-installed punching shear reinforcement," *Structural Concrete*, no. 22, pp. 709-725, 2021.
- [17] M. SPIEGL, R. WALKNER and J. FEIX, "Concrete screws as a post-installed punching reinforcement," *Stuctural Concrete*, no. 22, p. 2289–2308, 2021.
- [18] M. M. INÁCIO, A. P. RAMOS and FARIA, "Strengthening of flat slabs with transverse reinforcement by introduction of steel bolts using different anchorage approaches," *Engineering Structures*, no. 44, pp. 63-77, 2012.

- [19] L. MAJTÁNOVÁ, Maximálna odolnosť v pretlačení lokálne podopretých dosiek so šmykovou výstužou, Bratislava, 2017.
- [20] T. AUGUSTÍN, Pretlačenie lokálne podopretých dosiek s otvormi, Bratislava, 2018.
- [21] Ľ. KORMOŠOVÁ, Odolnosť proti pretlačeniu lokálne podopretých dosiek stenovými stĺpmi a oslabených otvormi, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2022.
- [22] S. ŠARVAICOVÁ, Vplyv tvaru podopretia a spôsobu zaťažovania bezprievlakovej dosky na odolnosť proti pretlačeniu, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2022.
- [23] A. NADAI, Die elastischen Platten, Berlin: Springer, 1925.
- [24] J. EINPAUL, F. BRANTSCHEN, F. M. RUIZ and A. MUTTONI, "Performance of Punching Shear Reinforcement under Gravity Loading: Influence of Type and Detailing," *ACI Structural Journal*, vol. 4, no. 113, pp. 827-838, 2016.
- [25] A. BARTÓK, Vplyv nesúdržného predpätia na odolnosť lokálne podopretých dosiek v pretlačení, Bratislava, 2009.
- [26] M. F. RUIZ and A. MUTTONI, "Applications of Critical Shear Crack Theory to Punching of Reinforced Concrete Slabs with Transverse Reinforcement," *Aci Structural Journal*, vol. 106, no. 4, pp. 485-494, 2009.
- [27] R. KOPPITZ, A. KENEL and T. KELLER, "Punching shear of RC flat slabs – Review of analytical models for new and strengthening of existing slabs," *Engineering Structures*, no. 52, pp. 123-130, 2013.
- [28] A. MUTTONI, "Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement," *ACI Structural Journal*, no. 105, N, pp. 440-450, 2008.
- [29] CEN, Background documents to the final PT1 draft prEN 1992-1-1:2018, 2018.