

EXPERIMENTÁLNE POROVNANIE VPLYVU ORIENTÁCIE OTVOROV NA ODOLNOSŤ PROTI PRETLAČENIU LOKÁLNE PODPRETÝCH STROPNÝCH DOSIEK

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF OPENINGS ORIENTATION ON THE PUNCHING RESISTANCE OF FLAT SLABS

Ludmila Kormošová*¹

*ludmila.kormosova@stuba.sk

¹Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra betónových konštrukcií a mostov, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovenská republika

Abstrakt

Príspevok sa zaoberá experimentálnym porovnaním vplyvu orientácie otvorov na šmykovú odolnosť proti pretlačeniu lokálne podopretých dosiek bez šmykovej výstuže. V rámci experimentov boli odskúšané dva fragmenty lokálne podopretých dosiek oslabených dvoma otvormi. Otvory s rozmermi 240 mm × 150 mm boli umiestnené symetricky na kratšej strane stenového stĺpa s rozmermi prierezu 950 mm × 150 mm. Experimentálne vzorky sa od seba líšili orientáciou otvorov voči podpere. Okrem porovnania deformácií boli na základe výsledkov vypočítané skutočné dĺžky kontrolných obvodov skúšaných vzoriek. Porovnaním s teoretickými dĺžkami kontrolných obvodov podľa EC2 sa skrátenie kontrolného obvodu pri výrazne obdĺžnikovom stĺpe javí ako konzervatívne.

Keľúčové slova

Lokálne podopreté dosky, experiment, otvory, pretlačenie, šmyková odolnosť

Abstract

The article deals with experimental investigation of the influence of openings orientation on the punching resistance of flat slabs. Within the experiments, two isolated fragments of flat slabs were tested. Both specimens were weakened by two symmetrically placed openings with dimensions of 240 mm × 150 mm adjusted to the shorter side of the elongated column with cross-section of 950 mm × 150 mm. The specimens differed from each other by the orientation of the openings in relation to the support. In addition to the comparison of deformations, the actual control perimeter lengths of the tested specimens were calculated based on the results. Compared to the theoretical lengths of the control perimeters according to EC2, the reduction of the control perimeter appears to be conservative.

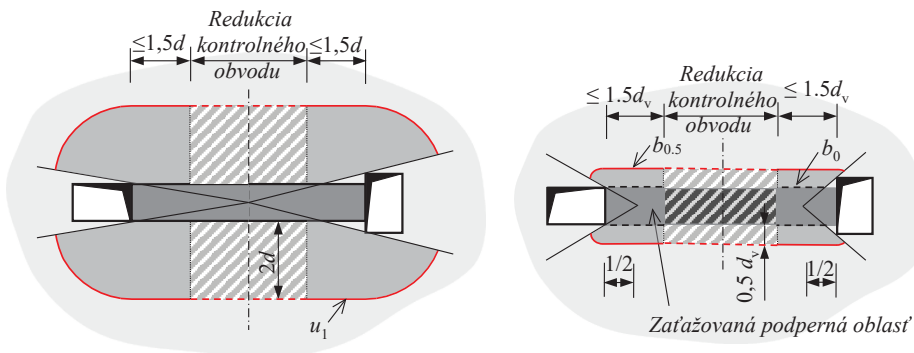
Key words

Flat slabs, experiment, openings, punching, shear resistance

1 ÚVOD

Konštrukčné systémy lokálne podopretých stropných dosiek majú v súčasnosti široké uplatnenie vďaka svojim architektonickým a konštrukčným výhodám. Pri návrhu je najkritickejším aspektom práve uloženie dosky priamo na podporu (stĺp, hlavica, stena). Prenos zaťaženia z dosky do podpery sa uskutočňuje priestorovo usporiadanými šmykovými napätiami a ich koncentrácia môže viesť k zlyhaniu konštrukcie, nazývanému pretlačenie. Pretlačenie má charakter náhleho zlyhania konštrukcie a ktorému nepredchádzajú žiadne výrazné signály, jedná sa o tzv. krehké zlyhanie. Krehké zlyhanie môže viesť až k progresívnemu zlyhaniu celej konštrukcie alebo jej časti. Veľkosť šmykového napätia, ktoré je príčinou zlyhania dosky zvyšuje aj prítomnosť otvorov v doske. Otvory v doske zmenšujú časť dosky, ktorá odoláva zlyhaniu a jej šmyková odolnosť proti pretlačeniu klesá. V projekčnej

praxi sa otvory vo veľkej miere umiestňujú práve v blízkosti stĺpov. Ide hlavne o šachty, alebo prierazy na vedenie potrubí a iných technických inštalácií. Na šmykovú odolnosť a rozloženie šmykových napätí v okolí podpory má výrazný vplyv nie len tvar, poloha a veľkosť otvorov, ale aj tvar podpory. Pri podopretí výrazne obdĺžnikovým (stenovým stĺpom), kde väčší z rozmerov stĺpa (h) je viac ako trojnásobok účinnej výšky dosky d , sa šmykové napätia sústreďujú hlavne v rohoch podpory. Súčasným normovým postupom sa líšia v spôsobe započítania vplyvu otvorov na šmykovú odolnosť proti pretlačeniu a vychádzajú z databázy výsledkov na fragmentoch dosiek podopretých štvorcovým, príp. kruhovým stĺpom. Na Obr. 1. je znázornený spôsob redukcie základného kontrolného obvodu pre Eurokód 2 (EC2) [1] a pre pripravovanú novú generáciu Eurokódu 2 (EC2v2) [2].



Obr. 1 Redukcia kontrolných obvodov: a) EC2, b) EC2v2.

Experimentálne štúdie zaoberajúce sa súčasne šmykovou odolnosťou lokálne podopretých dosiek s otvormi a zároveň vplyvom stenového stĺpa sú veľmi zriedkavé. V posledných rokoch výskum uskutočnili Teng, Cheong & Kuang [3], Borges, Melo a Gomez [4] a Oliviera, Gomes Melo [5]. Najrozsiahljší bol experimentálny program prof. Tenga [1], ktorý obsahoval 20 dosiek s otvormi bez šmykovej výstuže s hrúbkou dosky 150 mm. Počet vyššie uvedených výskumov naznačuje, že vyšetrovanie vplyvu otvorov pri výrazne obdĺžnikových stĺpoch, overenie spoľahlivosti a ich zohľadnenia v normových postupoch je stále veľmi aktuálna téma.

V práci sú porovnané výsledky dosiahnuté na základe experimentov na dvoch izolovaných fragmentoch dosiek so symetricky umiestnenými otvormi na líci kratšej strany výrazne obdĺžnikového stĺpa, pričom sa mení ich orientácia voči podpore. Riešené vzorky sú súčasťou prebiehajúceho experimentálneho programu na súbore 6 lokálne podopretých dosiek.

2 OPIS EXPERIMENTU

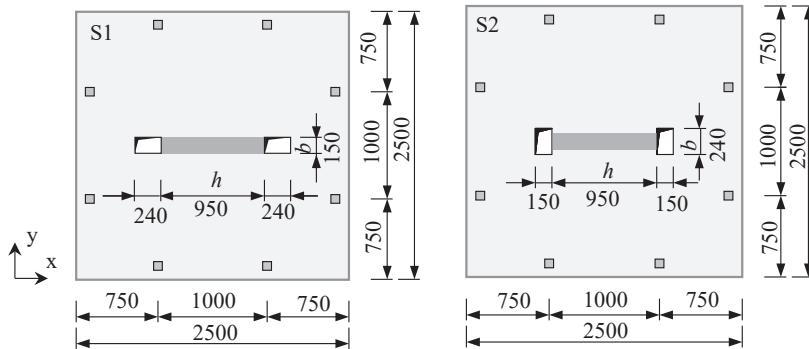
Analyzované vzorky predstavujú dosko-stenové izolované fragmenty, ktorých výroba prebiehala v závode Strabag, s. r. o. v Sereďi. Spolu so vzorkami bezprievlakových fragmentov dosiek boli vyhotovené betónové kocky, valce a hranoly na určenie materiálových vlastností betónu. Experiment bol vykonaný v Centrálnych laboratóriách SvF STU.



Obr. 2 Výroba vzoriek: pohľad do debnenia, vzorka po zabetónovaní, materiálové vzorky.

Experimentálne vzorky

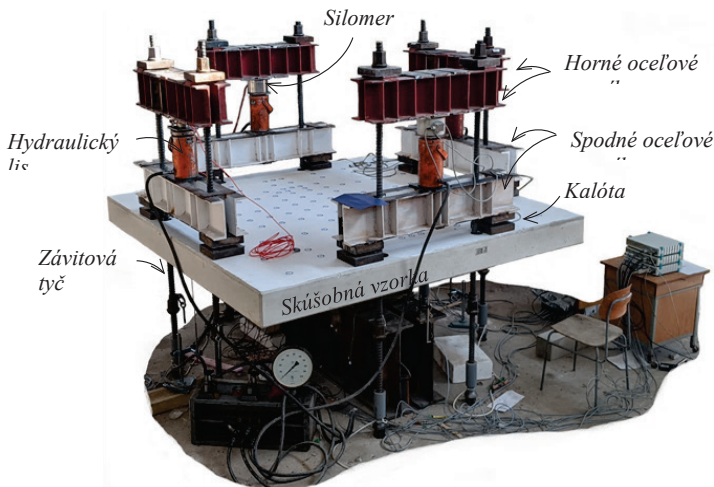
Analyzované vzorky sú bez šmykovej výstuže a majú pôdorysný rozmer $2,5 \times 2,5$ m a výškou $h = 200$ mm. Vzorky podopiera stenový stĺp s rozmermi prierezu 950×150 mm, kde pomer $h/d = 6$. Obe riešené vzorky boli oslabené dvojicou otvorov s rozmermi $240 \text{ mm} \times 150$ mm. Umiestnenie otvorov v doske bolo navrhnuté symetricky z dôvodu minimalizácie dodatočného vplyvu nevyrovnaných momentov. Geometria vzoriek ako aj orientácia otvorov je zobrazená na Obr. 3. Priemerná pevnosť betónu v tlaku f_c bola vyhodnotená na 30,36 MPa pre vzorku s označením S1 a 28,43 MPa pre vzorku S2. Stupeň vystuženia bol $\rho = 1,2 \%$ ($\phi 16/100$ mm pre oba smery). Krytie výstuže bolo 20 mm. Maximálne zrno kameniva v betonárskej zmesi bolo predpísané na $d_{g,\max} = 16$ mm.



Obr. 3 Schéma geometrie vzoriek S1 vľavo a S2 vpravo.

Zaťažovacia zostava

Experimentálna zostava zobrazená na Obr. 4. bola navrhnutá tak, aby sa zaťaženie vnášalo zhora na dol pomocou 4 hydraulických lisov. Všetky lisy boli umiestnené spolu so silomerom medzi dve dvojice oceľových nosníkov. Po vyvinutí sily sa silomer zaprel do hornej dvojice nosníkov, ktorá bola ukotvená do podlahy 2 závitovými tyčami a spodnej dvojice nosníkov, ktorá reakciu preniesla priamo do dosky pomocou oceľových kalôt, slúžiacich ako kĺbová podpera. Dosku podopieral fragment obdĺžnikového stĺpa uložený na dvojicu oceľových nosníkov.



Obr. 4 Experimentálna zostava.

Priebeh experimentu a zaznamenávanie nameraných veličín

Zaťažovanie prebiehalo postupne v zaťažovacích krokoch. Sily boli zaznamenaná štyrmi silomerami, pričom najprv sa vzorka zaťažila v prvom kroku na 20 kN a v druhom na 50 kN. Ďalej sa postupovalo po krokoch veľkosti 50 kN a 100 kN a postupne bolo možné pozorovať vznik a rozvoj trhlin. Na hornom povrchu dosky boli umiestnené geodetické RAD (Rigid Automatically Detected Coded) značky na zaznamenávanie priestorových premiestnení po každom zaťažovacom kroku pomocou viacsímkovej konvergentnej fotogrametrie (Obr. 5. a) a Obr. 5. b). Na meranie deformácie dosky sa použili LVDT snímače umiestnené pri spodnom povrchu dosky.

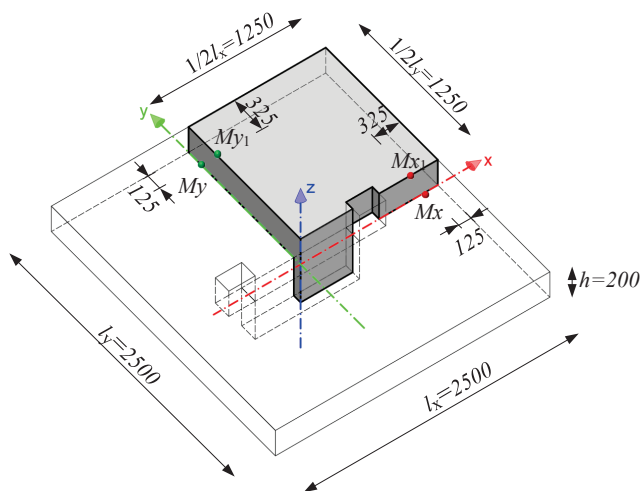
Zaťažovanie vzorky S1 prebehlo bez problémov a vzorka zlyhala pretlačením pri zaťažovacom kroku so silou 825 kN. Je nutné spomenúť, že výsledné hodnoty deformácií získaných pomocou fotogrametrie pri zaťažovacom kroku 825 kN nie sú tak presné, nakoľko doska zlyhala priamo počas zaznamenávania snímok potrebných na vyhodnotenie. Výsledná hodnota odolnosti 856 kN bola získaná pripočítaním vlastnej tiaže dosky.

Počas zaťažovania vzorky S2 bolo pozorované natočenie zostavy. Skúška bola prerušená aby sa zostava vyrovnala a poloha sa zabezpečila reťazami vid'. Obr. 5. c). Vďaka tejto skúsenosti boli počas zvyšných skúšok v rámci experimentálneho programu použité stužujúce oceľové prvky. Vzorka S2 zlyhala pri zaťažovacom kroku 750 kN, skôr než bolo možné v tomto kroku zaznamenať premiestnenia pomocou fotogrametrie. Výsledná hodnota odolnosti 781 kN bola získaná pripočítaním vlastnej tiaže dosky.



Obr. 5 Priebeh a meranie experimentu: a) porušenie vzorky S1, b) porušenie vzorky S2, c) vzorka S2 - zabezpečenie zostavy.

V práci je porovnávaný zvislý priehyb v osiach x a y meraný pomocou fotogrametrie v jednotlivých zaťažovacích krokoch. Porovnané sú tiež výsledky deformácie nameraných v monitorovacích bodoch Mx_1 a My_1 pomocou fotogrametrie a deformácie v bodoch Mx_2 , My_2 zaznamenaných LVDT snímačmi pri spodnom povrchu dosky. Orientácia súradnicového systému a poloha monitorovacích bodov je znázornená na Obr. 6.



Obr. 6 Orientácia súradnicového systému a poloha monitorovacích bodov použitých pri vyhodnocovaní.

3 VYHODNOTENIE

Výsledné hodnoty šmykovej odolnosti v pretlačení získané z výsledkov experimentov sú zhrnuté v Tab. 2. Z výsledkov je možné pozorovať, že vzorka S2 má menšiu šmykovú odolnosť pri pretlačení, čo je spôsobené zmenšením dĺžky základného kontrolného obvodu v porovnaní so vzorkou S1. Túto skutočnosť zahŕňajú všetky v súčasnosti používané normové postupy. Zo získaných výsledkov boli vypočítané skutočné dĺžky kontrolného obvodu v súlade so súčasne platnou normou EC2 vid'. Tab. 1. a následne boli porovnané s teoretickou dĺžkou kontrolných obvodov na základe redukcie podľa EC2 vid'. Obr. **Chyba! Záložka není definována.** a). Porovnaním skutočnej dĺžky kontrolného obvodu u_{exp} a teoretickej dĺžky u_1 sa ukazuje normou stanovená redukcia ako veľmi konzervatívna pre obe vzorky rovnako s pomerom $u_{exp}/u_1 = 1,52$ resp. 1,51. Ak sa pri výpočte neuvažovala redukcia v dôsledku stenovej podpory rozdiel medzi $u_{exp}/u_1^* = 1,14$ pre dosku S1 a 1,11 pre dosku S2. Skúšané vzorky neboli po skúške rozrezané, preto vo vyhodnotení nie sú uvedené skutočné sklony tlakovej diagonály a skutočný obvod porušenia. Po zlyhaní bolo možné vidieť tvar šmykového obvodu porušenia, ale skutočná hodnota by sa dala odčítať až po odbití krycej vrstvy.

Tab. 2 Výsledky hodnôt z experimentov $V_{Rc,exp}$.

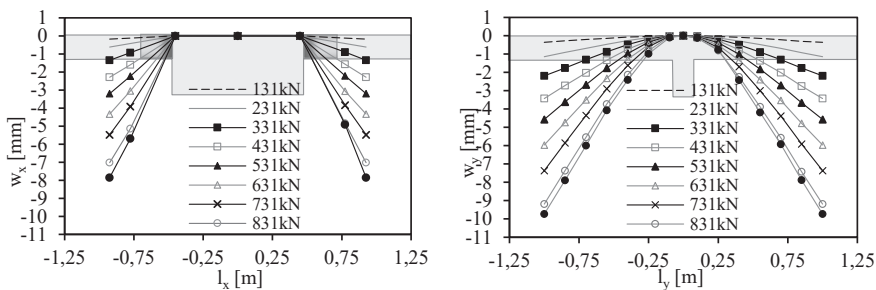
	Podpera (x × y) [mm]	Otvor (x × y) [mm]	d [mm]	ρ [%]	f _c [MPa]	V _{exp} [kN]
S1	950 × 150	240 × 150	164	1,22	30,36	856
S2	950 × 150	150 × 240	164	1,22	28,43	781

Tab. 3 Porovnanie kontrolného obvodu u_1 podľa EC2 a u_{exp} získaného na základe výsledkov experimentov

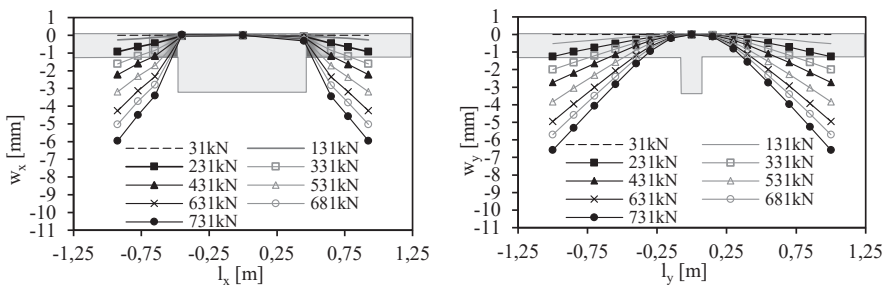
	u_1 [mm]	u_1^* [mm]	u_{exp} [mm]	u_{exp}/u_1 [-]	u_{exp}/u_1^* [-]
S1	2715	3631	4126	1,52	1,14
S2	2555	3471	3847	1,51	1,11

* bez redukcie z dôvodu stenového stĺpa

Výsledky deformácií oboch vzoriek získaných z výsledkov nameraných fotogrametriou sú zobrazené na Obr. 7. a Obr. 8. Osový systém je v súlade s Obr. 6. Výsledná zvislá deformácia oboch vzoriek je väčšia v smere menšej tuhosti podpory (smer y).

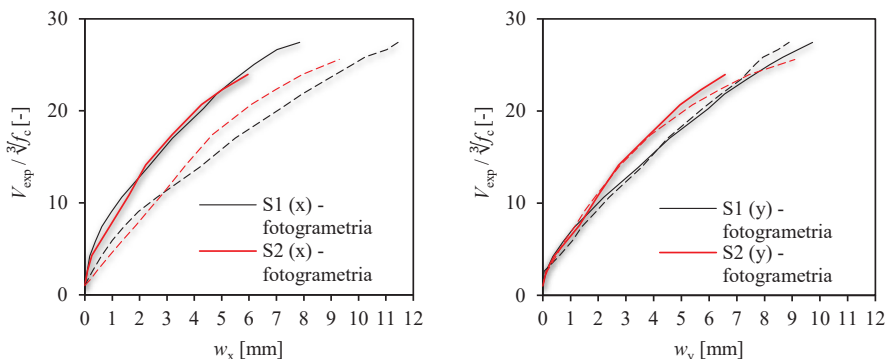


Obr. 7 Deformácia dosky S1: a) v smere x, b) v smere y.



Obr. 8 Deformácia dosky S2: a) v smere x, b) v smere y.

Na grafoch (Obr. 9.) zobrazujúcich normalizovanú zvislú deformáciu v monitorovacích bodoch je vidieť dobrú zhodu použitých meracích zariadení a zároveň veľkú podobnosť v postupnej zvislej deformácii v oboch riešených vzorkách. Výsledná šmyková odolnosť sa normalizovala len podielom $V_{exp} / f_c^{1/3}$. Výsledky sa normalizovali s prihliadnutím na rôznu dĺžku kontrolného obvodu. Grafy na Obr. 9. dokazujú, že pri zmene orientácie otvoru s malým pomerom strán nemá skrátenie kontrolného obvodu vplyv na priebeh deformácie.



Obr. 9 Porovnanie normalizovaného prichybu nameraného pomocou fotogrametrie a LVDT snímačov v monitorovacích bodoch: a) v smere x, b) v smere y.

4 ZÁVER

Práca sa zaoberá porovnaním výsledkov šmykovej odolnosti proti pretlačeniu experimentálne odskúšaných fragmentov lokálne podopretých dosiek oslabených dvojicou symetricky umiestnených otvorov na kratšej strane stenového stĺpa s prierezom s rozmermi 950 mm × 150 mm. Vzorky neobsahovali šmykovú výstuž. Na základe porovnaní experimentálnych skúšok sa dospelo k nasledujúcim záverom:

- Experimentálne navrhnutá zostava a jej funkčnosť bola vhodne navrhnutá, nakoľko skúšané vzorky zlyhali pretlačením pri hodnote blízkej predpokladanej sile.
- Nepreukázala sa potreba redukcie dĺžky kontrolného obvodu v dôsledku výrazne obdĺžnikového tvaru podpory, kde $c_{max} > 3d$ podľa súčasne platného výpočtového postupu EC2.
- Orientácia otvoru daných rozmerov umiestneného na kratšej strane stenovej podpory má vplyv na šmykovú odolnosť dosiek ale nemá výrazný vplyv na priebeh deformácie dosky.

PodĎakovanie

Táto práca vznikla s podporou výskumného projektu VEGA č. VEGA 1/0254/19 "Šmyková odolnosť železobetónových dosiek namáhaných koncentrovaným zaťažením".

Použitá zdroje

- [1] EN 1992-1-1: Eurocode 2 - Design of Concrete Structures, Part 1-1 General Rules and Rules for Buildings, CEN/CENELEC, TC250, 2004.
- [2] CEN/TC250/SC2/N 1874 Eurocode 2: Design of Concrete Structures (2021) - Part 1-1: General rules for buildings, bridges and civil engineering structures, latest draft prEN 1992-1-1:2021-01.
- [3] TENG, S. et al.: Punching shear strength of slabs with openings and supported on rectangular columns, *ACI Structural Journal*, V. 101, No. 5, 2004. s. 678-687.
- [4] BORGES, L. L. J. et al.: Punching shear of reinforced concrete flat and plates with openings, *ACI Structural Journal*, Vol. 110, No. 4, 2013. s. 547-556.
- [5] OLIVEIRA, D. C. et al.: Punching shear in reinforced concrete flat slabs with hole adjacent to the column and moment transfer. In *Revista IBRACON de Estruturas*, 2014.