

VLIV DRÁTKŮ NA ÚNOSNOST VE SMYKU PŘI PROTLAČENÍ DRÁTKOBETONOVÉ DESKY

Kryštof Toman, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
krystof.toman@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Tento článek zhodnocuje vliv rozptýlené ocelové výztuže v betonu na únosnost ve smyku při protlačení drátkobetonové desky. V teoretické části jsou uvedeny postupy jednotlivých návrhových norem zabývající se touto problematikou u nás i ve světě. V experimentální části jsou využity výsledky reálných zatěžovacích zkoušek provedených v rámci 3. ročníku mezinárodní soutěže „Blind Simulation Competition“ pořádanou organizací *fib* (Fédération Internationale du Béton). Zjištěné únosnosti jsou porovnány s referenčním vzorkem bez rozptýlené výztuže, který je modelován za pomoci nelineární numerické simulace v softwaru ATENA a ověřen výpočtem podle současně platné normy. Dosažené výsledky jsou v závěru článku porovnány, je diskutován vliv rozptýlené výztuže na únosnost a jsou uvedeny omezující podmínky této technologie.

KLÍČOVÁ SLOVA

Drátkobeton • protlačení • nelineární analýza • software ATENA • numerická simulace

ABSTRACT

This paper evaluates the effect of dispersed steel fibres in concrete on the shear capacity in punching through a fibre concrete slab. The theoretical part presents the procedures of individual design standards in this issue in our country and in the world. In the experimental part, the results of real load tests carried out within the framework of the 3rd International Blind Simulation Competition organized by *fib* (Fédération Internationale du Béton) are used. The load capacities are compared with a reference specimen without dispersed reinforcement, which is modelled using non-linear numerical simulation in ATENA software and verified by calculation according to the current standard. The results obtained are compared in the conclusion of the paper, the effect of the dispersed fibres on the load capacity is discussed and the limiting conditions of this technology are presented.

KEYWORDS

Steel fibre reinforced concrete • punching • non-linear analysis
• software ATENA • numerical simulation

1. ÚVOD

Beton vyztužený pouze rozptýlenou ocelovou výztuží se v současnosti používá na konstrukční prvky s minimálními náklady v případě selhání, jako jsou průmyslové podlahy na terénu, primární ostění v tunelech ze stříkaného betonu, případně je použit v hlavních konstrukčních prvcích jako doplněk ke klasické betonářské výztuži. V návaznosti na další vývoj drátkobetonů a zejména ultra-vysokohodnotných betonů, kde je předepsán požadavek na přidání rozptýlené ocelové výztuže do betonové směsi, je snaha využít ocelová vlákna v betonu pro zajištění únosnosti průřezu bez klasické betonářské výztuže. Rozptýlená výztuž musí následně zajistit únosnost průřezu po vyčerpání tahové pevnosti betonu a vzniku trhlin. Pro rozšíření této technologie v běžné praxi je nutné provést sérii experimentálních testů, odvodit výpočetní postupy pro jednotlivé způsoby porušení konstrukčních prvků z drátkobetonu, ověřit tyto postupy a začlenit je do systému návrhových norem. Řada výzkumů je v této oblasti již provedena a výsledky jsou převedeny na možné výpočetní postupy, avšak v českém prostředí není dosud vydán jednotný normový předpis pro navrhování konstrukcí z drátkobetonu.

U lokálně podepřených desek je nutné konstrukci posoudit na smyk při protlačení. U stropní desky, která je bodově uložena na podporu, nebo u základové desky, která je lokálně zatížena, dochází ke koncentraci smykových sil v okolí uložení nebo bodového zatížení. Ke koncentraci dochází jak v základním obvodu na hraně podpory, tak i dalších kontrolovaných obvodech. Ve všech těchto obvodech desky musí být zajištěna požadovaná únosnost na protlačení. Tento článek má za cíl určit jaký vliv na únosnost desky v protlačení bude mít rozptýlená ocelová výztuž, pokud ji přidáme do betonové směsi.

2. NORMOVÉ PŘEDPISY PRO ÚNOSNOSTI DRÁTKOBETONOVÝCH DESEK V PROTLAČENÍ

V prostředí českých technických norem v oblasti navrhování betonových konstrukcí je výchozí normou Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí (ČSN EN 1992) [1]. Tato norma neposkytuje pravidla pro návrh konstrukčních prvků z betonu s rozptýlenou výztuží.

* Školitel: doc. Ing. Iva Broukalová, Ph.D.

V Německu je v současnosti platná směrnice DAfStb Richtlinie Stahlfaserbeton [2], která rozšiřuje německou verzi eurokódu pro navrhování betonových konstrukcí. Tato směrnice, platná od března 2011, obsahuje návrhové postupy pro konstrukce z drátkobetonu. Pro výpočet únosnosti ve smyku při protlačení je do příslušného vzorce přidán další člen, který postihuje zvýšení únosnosti vlivem přidání drátků do betonu. Konkrétně je návrhová hodnota únosnosti ve smyku při protlačení podél kritického kruhového průřezu desky bez smykové výztuže s uvažováním vlivu drátků $v_{Rd,ct}^f$ dána dle vztahu 1.

$$v_{Rd,ct}^f = v_{Rd,ct} + v_{Rd,f} \leq v_{Rd,max} \quad (1)$$

$v_{Rd,ct}$ návrhová hodnota únosnosti ve smyku při protlačení podél kritického průřezu desky bez smykové výztuže a vlivu drátků
 $v_{Rd,f}$ návrhová hodnota příspěvku drátků k únosnosti ve smyku při protlačení podél kritického průřezu desky

V případě kombinace drátků a smykové výztuže na protlačení není možné dle článku 10.5.5 [2] uvažovat příspěvek k únosnosti od rozptýlené výztuže, pokud k tomu nebudou poskytnuty další důkazy.

V USA lze postupovat dle příručky pro navrhování vláknobetonových konstrukcí s označením ACI 544.4R-18: Guide for Design with Fiber-Reinforced Concrete [3]. Konkrétní výpočet únosnosti ve smyku při protlačení zde není uveden, ale přístup zohlednění vlivu drátků lze demonstrovat na výpočtu únosnosti nosníku ve smyku. V kapitole 4.8 jsou uvedeny vztahy pro výpočet únosnosti nosníku ve smyku V_{FRC} s klasickou konvenční podélnou výztuží bez smykové výztuže. Přenos smyku je tak zajištěn pouze betonem a rozptýlenou výztuží a spolupůsobením s ohybovou výztuží.

$$V_{FRC} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} k_s \left[100 \rho \left(1 + 7,5 \frac{f_{ut-FRC}}{f_t} \right) f_c \right]^{\frac{1}{3}} + 0,15 \sigma_c \right\} \cdot b \cdot d \quad (2)$$

γ_c dílčí součinitel pro beton
 k_s faktor účinku velikosti průřezu
 ρ stupeň vyztužení průřezu ohybovou výztuží
 f_{ut-FRC} pevnost v tahu drátkobetonu
 f_t pevnost v tahu prostého betonu
 f_c pevnost v tlaku prostého betonu
 σ_c tlakové napětí v betonu vyvolané předpětím nebo osovým zatížením
 $b; d$ šířka průřezu, účinná výška průřezu

Ze vzorce je patrný příspěvek ke zvýšení únosnosti od rozptýlené výztuže. Konkrétně se jedná o člen $7,5 \frac{f_{ut-FRC}}{f_t}$. Pokud se tento člen vynechá, jedná se o výpočet únosnosti ve smyku podle Model Code 2010, který je převzat do systému návrhové normy ČSN EN 1992-1-1. V americké příručce však chybí požadavek na kontrolu $v_{Rd,max}$, kde se ověřuje, zda v podpoře není překročena únosnost tlakových diagonál. V případě použití smykové výztuže v průřezu a rozptýlené výztuže lze únosnosti dle této příručky počítat.

Aktuálně se připravuje 2. generace eurokódů, která v blízké budoucnosti nahradí i současnou normu ČSN EN 1992-1-1. Nyní je k dispozici finální návrh s označením FprEN 1992-1-1:2023 [4]. V tomto předpisu se upravuje vý-

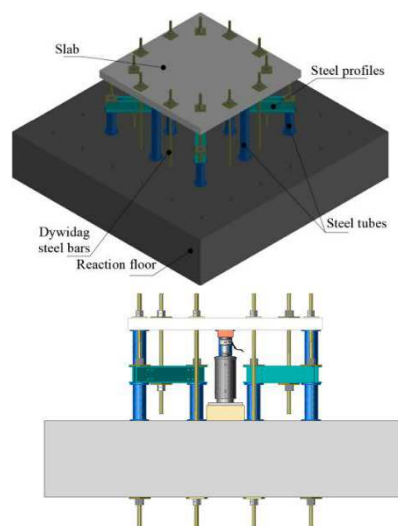
počet smyku při protlačení pro běžné betony a dále je zde doplněna příloha L, která se zabývá návrhem konstrukcí z drátkobetonu. Návrhový postup této normy autor plánuje představit v samostatném článku.

3. OVĚROVANÝ EXPERIMENT

Pracovní skupina WP 2.4.1. Modelování vláknobetonových konstrukcí při mezinárodní organizaci fib pořádala v roce 2023 již 3. ročník soutěže v simulaci naslepo. Tento ročník soutěže byl zaměřen na protlačovací zkoušku drátkobetonové desky doplněné o klasickou ohybovou výztuž. Díky účasti autora tohoto článku v soutěži byly získány zatěžovací diagramy dvou zkoušených desek. Na těchto datech, na výsledku numerické simulace v softwaru ATENA a na výpočtech dle normových předpisů je provedeno srovnání a celkové zhodnocení konkrétního případu.

3.1. Vstupní parametry experimentální zkoušky

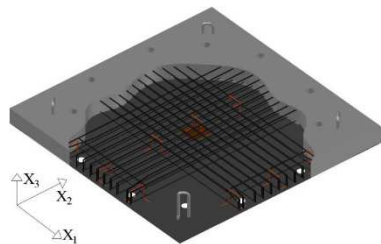
Geometrie a jednotlivé parametry byly definovány zadavatelem soutěže. V experimentu se zkoušela drátkobetonová deska půdorysných rozměrů 2,55 m x 2,55 m a tloušťce 180 mm. Deska byla po obvodu kruhu o průměru 2,372 m svisle ukotvena k podkladu prostřednictvím ocelových tyčí Dywidag. Celkem bylo použito 12 kotevních bodů. Střed desky byl vůči podkladu rozpírán zatěžovacím pístem. Hlava pístu se do desky opírala přes roznášecí ocelovou desku rozměru 200 mm x 200 mm. Zatěžování desky bylo řízeno posunem do selhání desky. Schéma zatěžovací zkoušky je znázorněno na obrázku 1.



Obr. 01: Vizualizace zkoušky v protlačení [5]

V rámci experimentu byla deska vyztužena při spodním i horním povrchu klasickou betonářskou výztuží. Na horním taženém povrchu bylo v obou směrech umístěno 11 prutů o průměru 12 mm ve středovém pruhu v rozteči 100 mm. Na spodním tlakovém povrchu bylo ve stejných pozicích umístěno

11 prutů o průměru 8 mm v každém směru. Kytí výztuže bylo 20 mm.



Obr. 02: Schéma vyztužení [5]

Desky byly provedeny z betonu třídy C50/60-XD3(P) CL0,20-D_{max}14 S5. Materiálové parametry byly ověřeny na zkušebních vzorcích. Sečnový modul pružnosti v tlaku po 22 dnech je 26,35 GPa. Průměrná pevnost v tlaku stanovená na válcích dle NP EN 12390-13:2014 ve stejné době je 50,15 MPa. Beton je vyztužen rozptýlenou výztuží z ocelových vláken HE ++ 90/60 s pevností v tahu 1900 MPa. Obsah vláken ve směsi je 60 kg/m³. Na osmi vzorcích byla změřena zbytková pevnost v tahu za ohybu stanovená podle doporučení fib Model Code 2010. Jedná se o zkoušku dle EN 14651 [6] v třibodovém ohybu na trémci se zářezem. Výsledkem těchto zkoušek jsou diagramy závislosti působící síly a rozevření trhliny na spodním taženém povrchu (CMOD). K dispozici bylo 8 zatěžovacích diagramů. Pevnostním zkouškám byla podrobena také betonářská výztuž. Mez kluzu se pohybuje kolem 600 MPa.

3.2. Výsledek experimentální zkoušky

Laboratorní zatěžovací zkoušky proběhly v laboratořích University Minho v Portugalsku. První z desek byla testována 18. července 2023. Maximální dosažená síla byla 565 kN při deformaci 63 mm. Smykové trhliny při porušení v protlačení vznikly v blízkosti bodového zatížení po celém obvodu kruhu.



Obr. 03: Rozvoj trhlín na horním taženém povrchu drátkobetonové desky 1 [5]

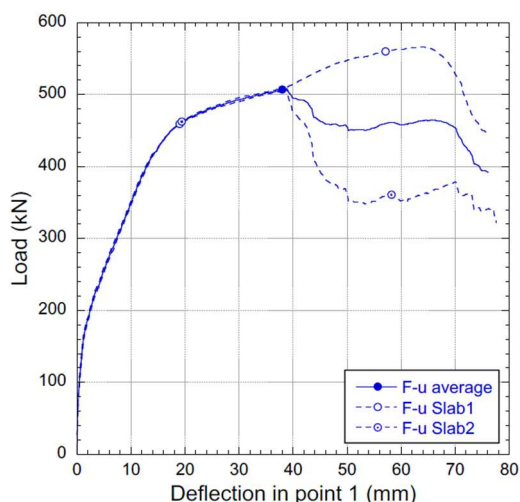


Obr. 04: Detail trhlín desky 1 – viditelné poškození v blízkosti lokálního zatížení [5]

Druhá z desek byla testována 27. července 2023. U této desky došlo k porušení při síle 507 kN a deformaci 38 mm. Hlavní trhliny se objevily nesymetricky pouze na čtvrtině kruhu ve vzdálenosti přibližně 1,5 d (d je vzdálenost těžiště tažené výztuže od tlaceného povrchu) od líce bodového zatížení. Po objevení trhlín nastalo následné rychlé rozevření trhlín a výrazný pokles zatěžovací síly. Tento experimentální vzorek obsahoval lokálně slabší místo v blízkosti kritického průřezu, které bylo příčinou celkově nižší únosnosti s rozdílem cca 10 % oproti desce 1.



Obr. 05: Detail trhlín desky 2 – nesymetrické poškození [5]

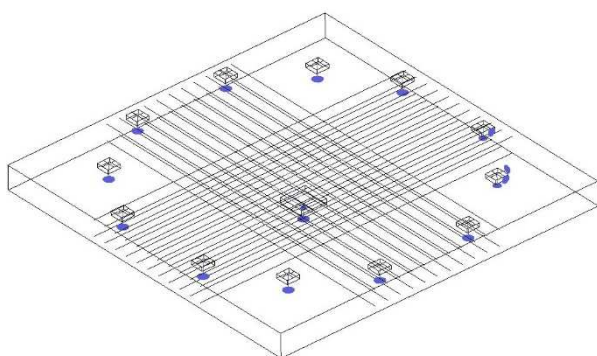


Obr. 06: Zatěžovací křivky z experimentální zkoušky [5]

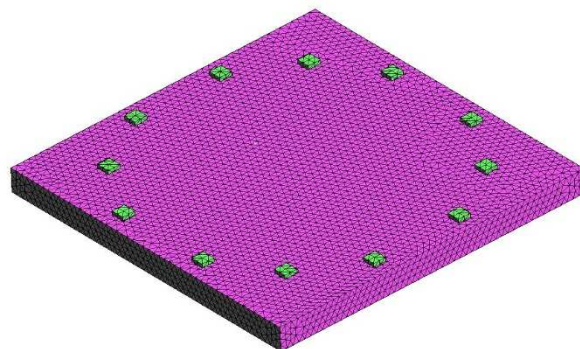
4. NUMERICKÝ MODEL

4.1. Geometrie modelu

Pro stanovení příspěvku k únosnosti od rozptýlené výztuže ve smyku při protlačení byla provedena numerická simulace v softwaru ATENA. Ta se týkala referenčního vzorku bez rozptýlené výztuže. Rozměry a geometrie numerického modelu vychází ze zadání experimentu. Betonová deska je modelována celá jako jeden makroprvek a následně je rozdělena sítí konečných prvků. Jako konečné prvky jsou voleny čtyřstěny s délkou strany 45 mm. Deska je upevněna visle ve 12 předepsaných bodech přes roznášecí ložiska. U dvou podpor je zamezen vodorovný posun tak, aby bylo dosaženo stability numerického modelu. Zatížení je do modelu vnášeno řízeným posunem roznášecího ložiska o rozměrech 200 mm x 200 mm a tloušťky 40 mm dle zadání. Betonářské pruty jsou do modelu vloženy jako lineární prvky. Uvažovaný průměr prutů je 11,5 mm a 7,7 mm podle měření skutečně použité výztuže.



Obr. 07: Numerický model – betonová deska, výztuž, podpory, zatížení



Obr. 08: Numerický model – sít' konečných prvků

4.2. Numerický materiálový model

Pro popis betonářské výztuže je použit multilineární diagram se stejným průběhem pro tahovou a tlakovou oblast. Jednotlivé body diagramu byly odečteny ze zadání soutěže z tahových zkoušek použitých betonářských prutů.

Numerická simulace byla provedena pro běžnou betonovou desku bez drátků. Samotná deska je modelována za pomoci nelineárního materiálového modelu 3D Nonlinear Cementitious 2 User. Vstupní parametry materiálového modelu jsou odvozeny pro beton střední válcové pevnosti 50,15 MPa a s úpravou modulu pružnosti na 26,35 GPa. Zbývající parametry jsou ponechány dle vztahů implementovaných v softwaru.

4.3. Výsledek numerické simulace a ověření dle platné normy

Numerický model odpovídající referenčnímu vzorku bez drátků predikuje maximální dosaženou sílu 483 kN. Správnost této hodnoty je ověřena následujícím výpočtem dle platné ČSN EN 1992-1-1 [1]. Posudek je proveden pro kontrolovaný obvod u_1 ve vzdálenosti $2d$ od líce bodového zatížení pro střední hodnoty pevností materiálu a se součiniteli bezpečnosti rovnající se 1,0. Únosnost v obvodu u_0 byla také ověřena a není rozhodující.

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{cm})^{1/3}$$

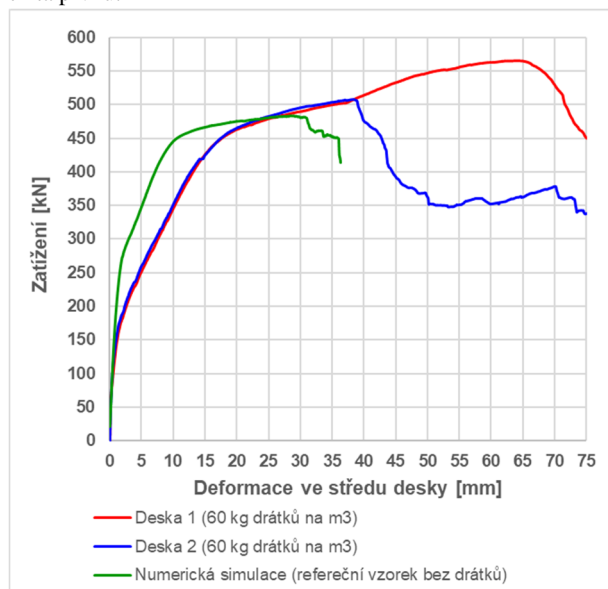
$$= \frac{0,18}{1,0} \cdot 2,0 \cdot (100 \cdot 0,00701 \cdot 50,15)^{1/3} = 1,179 \text{ MPa}$$

$$V_{Rd} = v_{Rd,c} \cdot d \cdot u_1 = 1,179 \cdot 0,1483 \cdot 2,66 = 465 \text{ kN}$$

Vypočtená hodnota 465 kN je blízko hodnotě z numerického výpočtu. Výsledek numerické simulace lze považovat za správný.

4.4. Srovnání výsledků

V následujícím grafu je srovnán referenční vzorek bez drátků z numerické simulace s daty z reálného experimentu drátkobetonových desek. V případě desky 1 se únosnost navýšila o 17 % a v případě desky 2 je únosnost vyšší o 5 %. Na grafech je patrné, že v případě použití rozptýlené výztuže se navyšuje maximální dosažená deformace, a tedy celková duktilita prvku.



Obr. 09: Porovnání zatěžovacích křivek

Tabulka 1: Porovnání únosností vůči referenčnímu vzorku

referenční vzorek bez drátků	deska 1		deska 2	
	únosnost	navýšení	únosnost	navýšení
ATENA	483 kN	17,0%	507 kN	5,0%
ČSN EN 1991-1-1	465 kN	21,5%		9,0%

Navýšení únosnosti je v souladu s výsledky jiných experimentů, které autor k tomuto tématu dohledal ([7], [8], [9]). Přidáním ocelových drátků do betonu se únosnost ve smyku při protlačení u deskových konstrukcí navyšuje zhruba mezi 15 % až 40 %. Výsledky vykazují značný rozptyl a závisí na řadě proměnných. Pozitivní vliv na únosnost je však při běžném dávkování drátků zmiňován ve všech dohledaných vědeckých člancích.

5. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Navýšení únosnosti drátkobetonové desky číslo 2 vůči referenčnímu vzorku bez drátků činí 5 % v případě numerické simulace, respektive 9 % v případě srovnání s normovým výpočtem. Nárůst únosnosti v obou srovnáních není výrazný, a i ve srovnání s jinými výzkumy je výrazně pod průměrem. V reálném experimentu u této desky došlo k porušení v omezené oblasti. Lze to dát do souvislosti s typickou vlastností drátkobetonu, kterou velký rozptyl tahových pevností závisející především na rovnoměrnosti rozmístění drátků po průřezu. Pokud se v kritickém průřezu objeví místo s menším obsahem drátků a nevhodnou orientací, tak se únosnost tohoto průřezu v tahu

blíží únosnosti betonu bez drátků. Zbývajících drátků poté pouze zamezují náhlému selhání, avšak nenavyšují únosnost po dosažení trhlin.

Navýšení únosnosti u drátkobetonové desky 1 o 17 %, respektive o 21,5 %, vůči referenčnímu vzorku již lze přisuzovat rozptýlené výztuži. V tomto případě nastalo i požadované tahové zpevnění, kde dochází k aktivaci drátků po rozevření trhlin a dalšímu nárůstu únosnosti prvku. Deska 1 také vykazuje značné duktilní chování. Selhání desky bez rozptýlené výztuže dle numerické simulace nastává při deformaci kolem 36 mm. Maximální protlačovací síla u desky 1 je však zaznamenána až při téměř dvojnásobné deformaci na úrovni 63 mm.

Obecně tedy lze přisuzovat rozptýlené ocelové výztuži v betonu vliv na zvýšení únosnosti ve smyku při protlačení, avšak pouze za podmínky, že je tato výztuž vhodně rozmístěna po průřezu. To se v případné aplikaci může ukázat jako limitující faktor. Obecným přínosem rozptýlené výztuže v betonu je zabránění náhlému selhání konstrukce, což je patrné ze zatěžovacích křivek obou zkoušených desek.

6. ZÁVĚR

Experimentální zkoušky potvrzují, že v případě vhodného rozmístění drátků po průřezu dochází k navýšení únosnosti ve smyku při protlačení při použití rozptýlené výztuže v betonu. Příspěvek k únosnosti od samotných drátků je však značně závislý na jejich výsledné poloze a orientaci. V případě sníženého množství drátků v kritickém průřezu se únosnost konstrukčního prvku blíží k únosnosti prvku bez rozptýlené výztuže. Cenným přínosem rozptýlené ocelové výztuže je zvýšená duktilita konstrukce, která přispívá k bezpečnějšímu způsobu porušení konstrukce.

Navazující výzkum drátkobetonových prvků je vhodné zacílit na to, jak zabezpečit rovnoměrné rozmístění a všesměrnou orientaci drátků v konstrukci a jak tento stav kontrolovat bez destruktivních zkoušek. Rozmístění a orientace drátků je základním bodem, který ovlivňuje efektivitu této technologie a aktuálně limitujícím faktorem pro rozšíření používání drátkobetonu v primárně nosných konstrukcích bez klasické betonářské výztuže.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory projektu SGS24/040/OHK1/1T/11 Moderní cementové kompozity a jejich efektivní použití v konstrukcích a za odborné pomoci docentky Ing. Ivy Broukalové, Ph. D., které tímto děkuji.

REFERENCE

- [1] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2006, Z4 11/2019.
- [2] *DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton*. Berlin, 2012.
- [3] ACI 544.4R-18 *Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete*. Farmington Hills: ACI, 07/2018.

- [4] Final Draft FprEN 1992-1-1. *Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures*. Brusel: CEN, 04/2023.
- [5] Barros, J., Sanz, B., *Experimental results of 3rd Blind Simulation Competition*. Madrid: 2023.
- [6] EN 14651:200 + A1 2007 (09/2007), *Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)*.
- [7] Gouveia, N. D., Fernandes, N. A. G., Faria, D. M. V., Ramos, A. M. P., Lúcio, V. J.G. SFRC flat slabs punching behaviour – Experimental research. In: *Composites Part B: Engineering, volume 63, 2014*. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.04.005>
- [8] Nguyen-Minh, L., Rovňák, M., Tran-Quoc, T., Nguyen-kim, K. Punching Shear Resistance of Steel Fiber Reinforced Concrete Flat Slabs. In: *Procedia Engineering, volume 14, 2011*. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.230>
- [9] Gouveia, N. D., Faria, D. M. V., Ramos, A. M. P., Assessment of SFRC flat slab punching behaviour - Part I: Monotonic vertical loading. In: *Magazine of Concrete Research, 2018*. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/323978944_Assessment_of_SFRC_flat_slab_punching_behaviour_-_Part_I_Monotonic_vertical_loading
- [10] Toman, K., Broukalová, B. Numerická simulace protlačení drátkobetonové desky. In: *29. betonářské dny – sborník ke konferenci*. Praha: ČBS, 2023, pp. 396-403. ISBN: 978-80-908943-0-3.