

MODERNÍ METODY ZESILOVÁNÍ SLOUPŮ POMOCÍ FRP MATERIÁLŮ – STANOVENÍ ÚČINKU OVINUTÍ ■ MODERN METHODS OF STRENGTHENING COLUMN USING FRP MATERIALS – ASSESSMENT OF EFFECT OF CONFINEMENT

Vojtěch Kostiha, František Girgle,
Petr Štěpánek, Anna Kučerová

Článek je tematicky zaměřen do oblasti zesilování železobetonových svislých nosných prvků moderními a v poslední době stále širěji se uplatňujícími kompozitními materiály. I přes výhody zesílení těchto prvků pomocí ovinutí FRP tkaninami jsou v oblasti návrhu stále otevřené otázky. Zásadní pro návrh zesílení je otázka stanovení účinků zesílení, tj. vyčíslení výsledných vlastností (únosnosti a ductility) zesíleného prvku. Pro určení účinku zesílení existují analytické vztahy, normativní postupy a předpisy. Článek si klade za cíl upozornit na skutečnost, že mezi výsledky stanovenými dle běžně používaných algoritmů panuje značný rozptyl. V článku je prezentována studie účinku zesílení železobetonového sloupu kruhového průřezu pomocí ovinutí FRP tkaninou. Získané teoretické výsledky byly porovnány s reálným chováním vzorku sloupu. Zkušební vzorky v této fázi výzkumu představovaly železobetonové sloupky kruhového průřezu s poměrem výšky k průměru sloupu 2:1, což umožnilo opomenout redukci únosnosti prvku způsobenou jeho štíhlostí a maximalizovat tak účinek ovinutí, a tím zvýraznit rozptyl hodnot získaných dle jednotlivých metodik. ■ This paper is addicted to strengthening of loadbearing reinforced concrete vertical members by composite materials. These modern materials have been used more and more in the last years. Using the FRP fabrics as confinement has several advantages but there remain some open questions within the frame of design. An assessment of influence of the confinement on the members (its load bearing capacity and ductility) is for design necessary. There is a number of analytical formulas, prescriptive approaches and prescriptions, which specify the resulting influence on the confinement. The paper draws attention to the considerable dispersion between these obtained results. The article presents an analysis of the influence of confinement on reinforced concrete columns, which are wrapped with FRP fabric. The obtained theoretical results were compared with a real behaviour of several samples of confined concrete columns. As the experimental samples short reinforced concrete circular columns were used. The high to diameter ratio of the columns was 2:1, thus, the influence of slenderness to loadbearing capacity of the column can be neglected. Therefore the influence of confinement can be maximized and the dispersion of results according to different methodologies can be emphasized.

■ This paper is addicted to strengthening of loadbearing reinforced concrete vertical members by composite materials. These modern materials have been used more and more in the last years. Using the FRP fabrics as confinement has several advantages but there remain some open questions within the frame of design. An assessment of influence of the confinement on the members (its load bearing capacity and ductility) is for design necessary. There is a number of analytical formulas, prescriptive approaches and prescriptions, which specify the resulting influence on the confinement. The paper draws attention to the considerable dispersion between these obtained results. The article presents an analysis of the influence of confinement on reinforced concrete columns, which are wrapped with FRP fabric. The obtained theoretical results were compared with a real behaviour of several samples of confined concrete columns. As the experimental samples short reinforced concrete circular columns were used. The high to diameter ratio of the columns was 2:1, thus, the influence of slenderness to loadbearing capacity of the column can be neglected. Therefore the influence of confinement can be maximized and the dispersion of results according to different methodologies can be emphasized.

V průběhu své životnosti je konstrukce vystavena působení řady faktorů, které negativně ovlivňují její statickou spolehlivost (degradace materiálů působením environmentálního namáhání, změny velikosti zatížení a jeho působení, mimořádné situace – např. náraz vozidla apod.). Aby konstrukce mohla být v jakémkoliv okamžiku plánované životnosti pokládána z hlediska požadované spolehlivosti za vyhovující, musí splňovat kritéria definovaná mezními stavy únosnosti a použitelnosti. Při nesplnění některého z těchto kritérií je nutné provést úkony vedoucí k nápravě vzniklé situace, což většinou představuje sanaci či rekonstrukci deficientních částí objektu.

Rozsah a způsob rekonstrukce (kromě estetických, časových a finančních kritérií) zásadně ovlivňuje typ konstrukce (vodorovné, horizontální prvky apod.) a také druh působícího zatížení (statické, dynamické). O typu navrženého systému zesílení obvykle též dominantně rozhoduje finanční náročnost provedeného návrhu. Je nutno poznamenat, že celkové náklady na sanaci nosného systému v sobě zahrnují nejen cenu za provedené práce a použité materiály, ale také ztráty způsobené výlukou v užívání stavby. V současné době často opomíjeným parametrem jsou i náklady spojené s budoucím užíváním stavby.

Předkládaný text se podrobně věnuje problematice zesilování svislých nosných prvků, především sloupů a pilířů, vystavených účinkům statického (respektive kvazistatického) zatížení. Z mnoha možných způsobů návrhu zesílení bude v dalším textu blíže pojednáno o zesilování prvků za využití moderních kompozitních materiálů – zesílení ovinutím FRP tkaninou.

POUŽITÍ FRP MATERIÁLŮ PRO ZESILOVÁNÍ

Zesilování svislých tlacených prvků kompozitními (FRP) materiály významně rozšiřuje možnosti návrhu a přináší celou řadu výhod. Jedná se především o malý nárůst průřezu při zajištění požadované únosnosti, ductility a trvanlivosti, zvýšení rychlosti provádění a snadnou manipulaci s lehkým kon-

strukčním materiálem a v neposlední řadě též výborné odolnosti materiálů proti environmentálnímu namáhání.

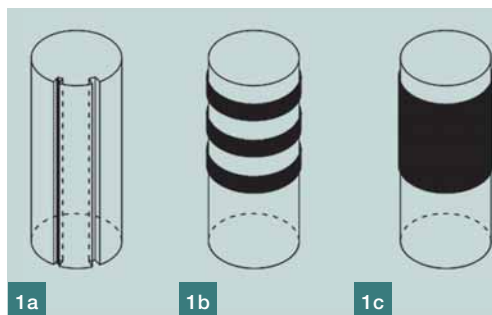
Současný sortiment FRP materiálů umožňuje provádět a navrhovat zesílení sloupů dvěma základními způsoby (případně jejich kombinací), jejichž volbu určuje především dominantní způsob namáhání zesilovaného prvku [4]:

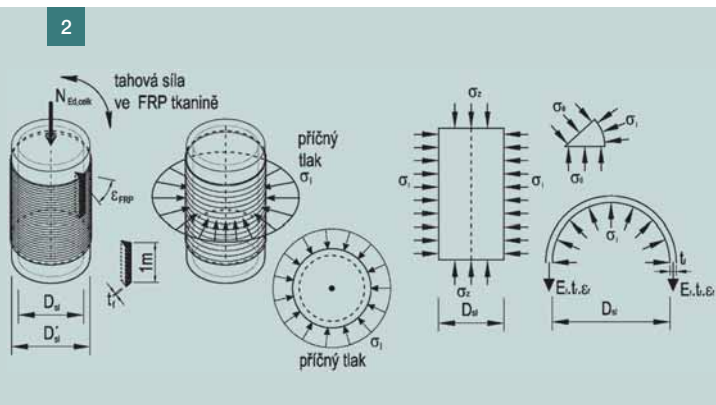
- zesílení pomocí přídavné výztuže kladené do mělkých drážek rovnoběžných s osou prvku (tzv. NSM výztuž, obr. 1a);
- zesílení ovinutím FRP tkaninou/výztuží ((obr. 1b) jednosměrné lamely; (obr. 1c) jednosměrná či obousměrná tkanina).

Zesílení prvku pomocí NSM výztuže přináší zvýšení ohybové únosnosti, kdy je využita vysoká tahová pevnost FRP materiálů, což je výhodné především pro přenos účinku zatížení působícího v oblasti velké výstřednosti [3], [4]. Nutným předpokladem je zajištění dobré soudržnosti mezi vkládanou výztuží a betonem zesilovaného prvku.

Při ovinutí prvku FRP lamelami či tkaninou je vyvozen trojosý stav napjatosti [1], [7]. Ovinutím dochází k příznivé změně (nárůstu) mechanických vlastností základního materiálu zesilovaného prvku – betonu. Lze tak docílit zvýšení především tlakové únosnosti a ductility prvku. Je zřejmé, že zesílení ovinutím je výhodné uplatnit při zesilování převážně tlacených prvků – tedy s normálovou silou působící v jádru průřezu. Využití progresivních FRP materiálů na bázi uhlíkových vláken způsobuje velmi příznivý nárůst příčné tlaku.

Na základě poznatků z odborných článků (např. [6], [7]) a provedených studií je možno konstatovat, že použití FRP materiálů pro zesílení ovinutím





Obr. 1 Varianty zesílení sloupů s použitím FRP materiálů, a) zesílení do drážek, b) vodorovné lamely; c) plnoplošná tkanina ■ Fig. 1 Methods of columns strengthening by using FRP materials, a) strengthening into the grooves, b) horizontal lamellas, c) full face fabric

Obr. 2 Princip zesílení ovinutím – příčný tlak ■ Fig. 2 Confinement – lateral pressure

Obr. 3 Závislost účinnosti zesílení ovinutím a) b) na tvaru průřezu zesilovaného prvku, c) na typu zesílení ■ Fig. 3 Efficiency of confinement, a) b) on the shape of cross section, c) on the type of strengthening

je z hlediska efektivity zesílení opodstatněné a je možno tak předpokládat i jeho rozšíření v české stavební praxi. Nevýhodou je především velmi nízká požární odolnost systému, což je důvodem k aplikaci protipožárních vrstev [4]. Je ovšem nutno podotknout, že též velmi často navrhované ocelové bandáže se vyznačují značnou citlivostí na působení teplotního namáhání.

Princip působení ovinutí FRP tkaninou na betonový průřez

Podstatou metody zesílení prvku ovinutím je vznik trojosého stavu napjatosti. S uvážením základních fyzikálně-mechanických principů je zřejmé, že při osovém zatížení prvku dochází k jeho svislé a také k příčné deformaci, která je úměrná velikosti Poissonova součinitele zesilovaného materiálu. V případě jednoose namáhaného prvku dochází postupně k vzniku svislých trhlin, které rozdělují průřez na několik samostatně působících částí s velmi vysokým štiřlostním poměrem. Tento stav neodvratně vede ke kolapsu prvku. Ovinutí oddaluje vznik a následný rozvoj těchto trhlin.

V důsledku bránění volné příčné deformaci dochází k vzniku příčného tlaku a k zvýšení únosnosti sloupu (působí celý průřez ovinutého jádra v reži-

mu tzv. víceosé napjatosti). Díky lineárním vlastnostem použitého zesilujícího materiálu je velikost přítlaku vždy přímo úměrná velikosti přetvoření tkaniny a nepřímo úměrná průměru zesilovaného prvku. Je též zřejmé, že velmi podstatnou skutečností pro co nejvyšší účinek zesílení je dostatečná tuhost a pevnost zesilujících vrstev.

Příčné napětí σ_l pro kruhový element je možné vyjádřit vztahem (odvozený viz např. [6], [7])

$$\sigma_l = \frac{2 E_f \varepsilon_f t_f}{D_{sl}}, \quad (1)$$

kde jednotlivé symboly označují vlastnosti zesilujícího materiálu. E_f značí modul pružnosti, ε_f přetvoření a t_f tloušťku FRP tkaniny, resp. D_{sl} průměr zesilovaného sloupu.

Je nutné poznamenat, že určitá část příčného přetvoření zesilovaného prvku je spotřebována na narovnání vláken tkaniny – tzv. aktivaci zesílení. Tento negativní jev se projevuje shodným průběhem pracovního diagramu neo- ovinutého a ovinutého betonu v oblasti nízkých přetvoření v příčném směru, a tedy faktickou účinností systému až od jisté počáteční hodnoty přetvoření.

Faktory ovlivňující výsledný efekt ovinutí

Výsledný efekt ovinutí je, jak je všeobecně známo, ovlivněn především tvarem průřezu, rozměry prvku (s rostoucím průměrem klesá výsledný účinek ovinutí), štiřlostním poměrem a povrchem prvku.

Nejvhodnější tvar představuje kruhový průřez, u kterého dochází k rovnoměrnému působení příčného tlaku po obvodu sloupu bez vzniku nerovnoměrné koncentrace napětí, viz vztah (1). U ostatních průřezů dochází ke koncentraci příčného tlaku v místech náhlých změn tvaru průřezu (např. zalomení), což vede k snížení efektu ovinutí (obr. 3a, b). Účinnost zesílení je

tedy nutno stanovit v závislosti na konfiguraci průřezu.

Výsledný efekt ovinutí je dále ovlivněn rozmístěním výztužných lamel či tkanin po výšce (obr. 3c), normálovou tuhostí zesilujících vrstev, orientací vláken a v neposlední řadě kvalitou provedení zesílení.

Podrobněji o aspektech ovlivňujících výslednou únosnost prvku pojednává např. článek [10].

Stanovení účinků ovinutí

Jak již bylo uvedeno, zesílení prvku ovinutím se projeví nárůstem pevnosti ovinutého betonu v tlaku a zvýšením jeho mezního poměrného přetvoření [1], [3], [5], [9]. Uvedené charakteristiky lze stanovit za použití řady výpočtových modelů, které jednotlivé základní vztahy odvozují aproximací výsledků z provedených analytických studií nebo experimentálních prací. V odborné literatuře je publikována celá řada vztahů, jež s různou mírou přesnosti predikují chování betonu s vlivem ovinutí. Jejich výstižnost (a tedy i použitelnost) ovlivňuje především rozsah provedených prací a především typ a konfigurace vzorků.

Podle způsobu odvození lze vztahy publikované v odborné literatuře dělit do dvou základních skupin (dělení převzato z [6], [8]):

- návrhově orientované (empirické) vztahy byly aproximovány z výsledků uskutečněných experimentů tak, aby na jejich základě stanovená zatěžovací křivka byla s co největší přesností shodná se závislostí získanou ze zkoušek (přesnost řešení závisí na množství zkušebních vzorků a nastavení zatěžovacích zkoušek);
- analyticky orientované vztahy byly odvozeny na základě řady analytických a numerických studií (pomocí nelineární analýzy založené na metodě konečných prvků). Správnost navrženého vztahu mohla být případně ověřena provedenými experimenty

Tab. 1 Přehled vybraných výpočtových modelů ovinutého betonu [1], [3], [6], [7] ■

Tab. 1 Overview of selected computational models of confined concrete [1], [3], [6], [7]

Autor	Pevnost ovinutého betonu v tlaku	Mezní přetvoření ovinutého betonu
Richart a kol. 1928	$f'_{cc} = f'_{co} + 4,1\sigma_1$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left(1 + 20,5 \frac{\sigma_1}{f'_{co}} \right)$
Mander a kol. 1988	$f'_{cc} = f'_{co} \left[2,254 \sqrt{1 + \frac{7,94\sigma_1}{f'_{co}}} - 2 \frac{\sigma_1}{f'_{co}} - 1,254 \right]$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right]$
Eurocode EN 1992-1	$f_{ck,c} = f_{ck} \left(1 + 5 \frac{\sigma_1}{f_{ck}} \right)$ pro $\sigma_1 \leq 0,05f_{ck}$ $f_{ck,c} = f_{ck} \left(1,125 + 2,5 \frac{\sigma_1}{f_{ck}} \right)$ pro $\sigma_1 > 0,05f_{ck}$	$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} \left(\frac{f_{ck,c}}{f_{ck}} \right)^2$ $\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0,2 \frac{\sigma_1}{f_{ck}}$
Cusson & Paultre 1995	$f'_{cc} = f'_{co} \left[1 + 2,1 \left(\frac{\sigma_1}{f'_{co}} \right)^{0,70} \right]$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 0,21 \left(\frac{\sigma_1}{f'_{co}} \right)^{1,70}$
Kono a kol. 1998	$f'_{cc} = f'_{co} (1 + 0,0572\sigma_1)$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + 0,28\varepsilon_{co}\sigma_1$
Lam & Teng 2002	$f'_{cc} = f'_{co} + 2,0\sigma_1$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[2 + k_2 \left(\frac{\sigma_1}{f'_{co}} \right) \right]$ když $k_2 = 15$ pro CFRP
Lam & Teng 2003	$f'_{cc} = f'_{co} + 3,3\sigma_1$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[2 + k_2 \left(\frac{\sigma_1}{f'_{co}} \right) \left(\frac{\varepsilon_{frp}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,45} \right]$ když $k_2 = 5,53$ pro CFRP
Bisby a kol. 2005	$f'_{cc} = f'_{co} \left(1 + 2,425 \frac{\sigma_1}{f'_{co}} \right)$ $f'_{cc} = f'_{co} \left[1 + 2,217 \left(\frac{\sigma_1}{f'_{co}} \right)^{0,911} \right]$ $f'_{cc} = f'_{co} \left[1 + 3,587 \left(\sigma_1 \right)^{0,84} \right]$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + k_2 \left(\frac{\sigma_1}{f'_{co}} \right)$ CFRP: $k_2 = 0,024$ AFRP: $k_2 = 0,053$ GFRP: $k_2 = 0,013$
Youssef a kol. 2007	$f'_{cc} = f'_{co} \left[1 + 2,25 \left(\frac{\sigma_1}{f'_{co}} \right)^{1,25} \right]$	$\varepsilon_{cc} = 0,003\,368 + 0,259 \left(\frac{\sigma_1}{f'_{co}} \right) \sqrt{\frac{f_t}{E_t}}$
ACI 440, 2R-08;-09	$f'_{cc} = f'_{co} + 3,3\psi_f\sigma_f$; $\psi_f = 0,95$	$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1,5 + 12 \left(\frac{\sigma_1}{f'_{co}} \right) \left(\frac{\varepsilon_{F,w}}{\varepsilon_{co}} \right)^{0,45} \right]$ $\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0,2 \frac{\sigma_1}{f_{ck}}$
You & Teng 2011	$f'_{cc} = f'_{co} + 3,3E_1 \left(1 + 6,5 \frac{f'_{co}}{E_1} \right) \varepsilon_{h,rup}$	$\varepsilon_{cc} = 0,003\,3 + 0,6 \left(\frac{E_1}{f'_{co}} \right)^{0,8} \left(\varepsilon_{h,rup} \right)^{1,45}$

(přesnost řešení je především determinována vytvořením věrohodného fyzikálního modelu ovinutého prvku, včetně popisu charakteristik jednotlivých materiálů a chování celého systému – např. popis postupné aktivity tkaniny).

V tab. 1 jsou uvedeny některé z používaných výpočtových modelů, jež postihují též historický vývoj v oblasti popisu chování sloupů zesílených ovinutím. Uvedené vztahy byly pro možnost vzájemného porovnání záměrně vybrány z obou výše popsaných skupin. Pro úplnost je uveden i výpočtový model dle platného normativního předpisu ČSN EN 1992-1-1 [1].

Prvotní vztahy byly odvozeny především pro průřez vyztužený či zesí-

lený ocelovou výztuží, nicméně jsou obecně platné při zohlednění odlišností v mechanickém chování zesilujících materiálů. Míra účinku zesílení je ve vztazích navázána především na velikost příčného napětí. Obdobný přístup je zvolen i v nověji publikovaných vztazích přímo určených pro aplikaci kompozitů (např. Xiao a Wu (2003), Lam a Teng (2003), Bisby a kol. (2005) ad. [6]). Výše účinku zesílení je u těchto prací též podmíněna typem použitého zesilujícího materiálu.

V tab. 1 značí $f_{ck,c}$, f_{ck} charakteristickou válcovou pevnost v tlaku ovinutého a neovinitého betonu (značení dle ČSN EN 1992-1-1 [1]); f'_{cc} , f'_{co} specifickou válcovou pevnost v tlaku ovinutého a neovinitého betonu (znače-

ní ostatních předpisů); $\varepsilon_{cu2,c}$, $\varepsilon_{c2,c}$ přetvoření betonu odpovídající $f_{ck,c}$, resp. f_{ck} ; ε_{cc} , ε_{co} přetvoření betonu odpovídající f'_{cc} , resp. f'_{co} a σ_1 efektivní příčný tlak od ovinutí.

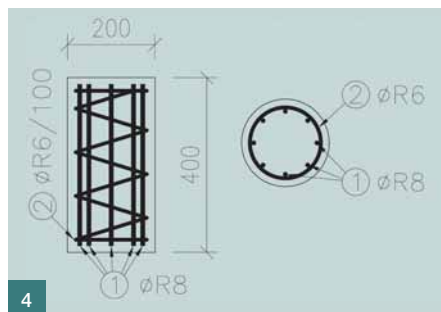
MODELOVÝ PŘÍKLAD – POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VÝPOČTOVÝCH VZTAHŮ

Pro porovnání hodnot získaných při využití výše uvedených vztahů s hodnotami získanými experimentálně byl uvažován jednoduchý modelový případ svislého tláčeného prvku. Jedná se o železobetonový prvek kruhového průřezu o průměru 200 mm a výšce 400 mm, kdy bylo cílem eliminovat vliv vzpěru a maximalizovat případné rozdíly v získaných hodnotách.

Na zkušebních tělesech vyhotovených společně se vzorky krátkých sloupů byla postupem dle [12] stanovena střední pevnost použitého betonu v tlaku $f_{cm} = 33,62$ MPa. Tato byla následně (pro možnost srovnání) použita i v modelovém výpočtu. Podélná výztuž prvku je tvořena šesti pruty o průměru 8 mm z oceli třídy B 500 ($f_{yk} = 500$ MPa, $f_{ym} = 568,96$ MPa). Rovněž příčná výztuž ve tvaru šroubovice o průměru 6 mm je provedena ze stejného typu oceli (obr. 4).

Zesílení je uvažováno ve formě třívrstvého celoplošného ovinutí jednosměrnou uhlíkovou tkaninou SikaWrap 600 C/120 (tloušťka tkaniny $t_f = 0,337$ mm, modul pružnosti $E_f = 242$ GPa, tahová pevnost na mezi porušení $f_t = 3\,800$ MPa, limitní přetvoření $\varepsilon_f = 1,55\%$; převzato od výrobce firmy Sika, s. r. o., [11]).

Výsledné hodnoty stanovené na základě vztahů uvedených v tab. 1 jsou



Obr. 4 Geometrie a vyztužení zkušebního prvku ■ Fig. 4 Geometry and reinforcement of the tested element

Obr. 5 Interakční diagram znázorňující únosnosti prvku dle metodik uvedených v tab. 1 ■ Fig. 5 Resistance of element according to the methods mentioned in tab. 1

Obr. 6 Pracovní diagram neovinitého/ovinitého betonu ■ Fig. 6 Working diagram of unconfined/confined concrete

prezentovány v tab. 2. Pro maximalizaci rozdílů jednotlivých přístupů je v modelovém případě přijato několik zjednodušujících předpokladů: nulové počáteční zatížení působící na zesilovaný segment před aplikací tkaniny (tj. využití úplné

přetvárnosti prvku až do jeho porušení bez jeho počátečního omezení) a zanedbání postupné aktivace tkaniny (část přetvoření zesíleného prvku se spotřebovuje na narovnání vláken tkaniny).

Výsledný rozptyl středních pevnos-

tí ovinutého betonu $f_{ck,cm}$ se na základě výše uvedených zjednodušujících předpokladů pohybuje v rozmezí od 48,87 až po 74,83 MPa, což představuje oproti nezesílenému vzorku nárůst pevnosti v rozmezí 45,36 až 122,58 %. Jak je z tabulky dobře patrné, rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší stanovenou hodnotou tlakové pevnosti ovinutého betonu je velmi významný.

Interakční diagramy sestavené pro výše popsany prvek za použití vztahů uvedených v tab. 1 jsou prezentovány na obr. 5. Při jejich výpočtu je nutno uvážit též mezní poměrné přetvoření ovinutého betonu ε_{cc} , jež obdobně jako pevnost vykazuje značný rozptyl hodnot (tab. 2). Stává se tak jednou z příčin způsobujících navýšení diferencí mezi jednotlivými vztahy. Únosnost stanovená dle [1] se nachází přibližně uprostřed výsledného rozptylu hodnot.

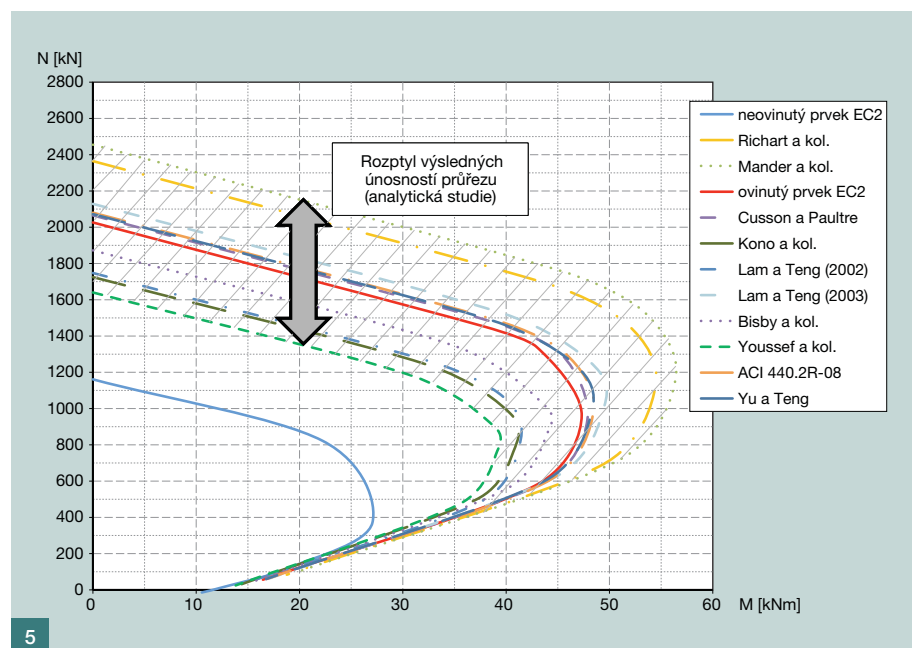
Hodnota limitního přetvoření ε_{cc} stanovená dle [1] (tab. 2) je v porovnání s ostatními značně nadhodnocena, což je pravděpodobně způsobeno odvozením vzorce pro ovinutí sloupu ocelovou výztuží. Tomuto předpokladu odpovídá i průběh pracovního diagramu ovinutého betonu dle [1], kdy po dosažení mezní hodnoty přetvoření dojde k plastizaci prvku (průběh odpovídající tečení výztuže – charakteristické pro ocelovou výztuž). Pro FRP materiály s lineárním průběhem pracovního diagramu až do porušení je nutné tento diagram upravit a omezit hodnotu mezního poměrného přetvoření ε_{cc} .

Na obr. 6 je uvedeno porovnání parabolicko-rektangulárního pracovního diagramu neovinutého a ovinutého betonu stanoveného dle [1], jež byl uvažován při výpočtu interakčního diagramu (obr. 5, křivky s označením EC2). Pro srovnání je součástí i pracovní diagram ovinutého betonu stanovený dle Lam&Teng (2003) [6], neboť se jedná o velmi často využívaný návrhový postup pro zesílení FRP materiály. Z uvedených dvojice návrhových diagramů je dobře patrný nárůst pevnosti ovinutého prvku, významný nárůst jeho ductility a především značný rozdíl v průběhu obou „ovinutých“ diagramů. Pracovní diagram ovinutého betonu EC2 byl z výše uvedených důvodů omezen přetvořením ε_{cc2} (označení dle [1]). Při tomto přetvoření je dosaženo limitní pevnosti zesilujícího materiálu.

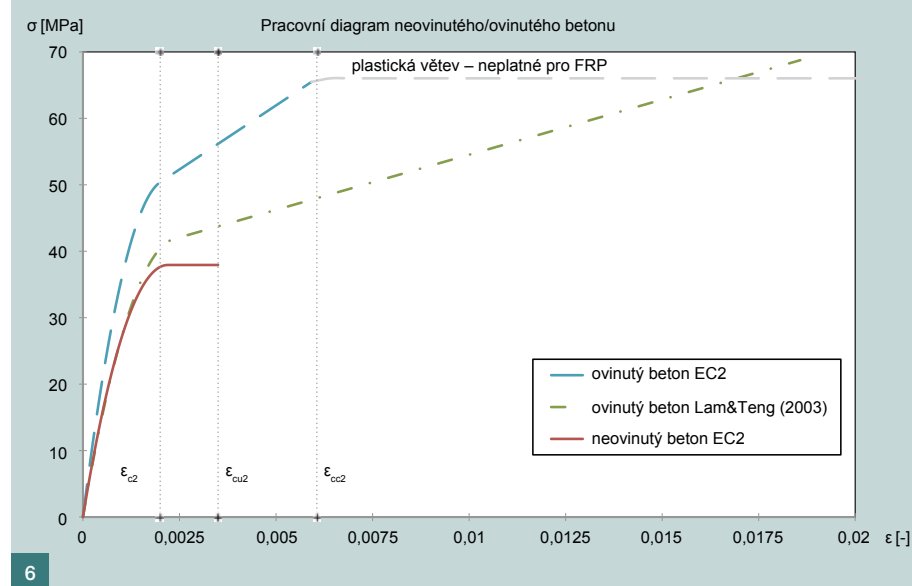
Z výše uvedených výsledků modelové studie je jasné patrné, že volba použitého přístupu (a s tím souvisejícího pracovního diagramu ovinutého beto-

Tab. 2 Výsledné pevnosti ovinutého betonu v tlaku stanovené dle analytických vztahů prezentovaných v tab. 1 ■ Tab. 2 Resulting compressive strength of confined concrete determined according to the analytical relations presented in tab. 1

Modely	f_{cm} [MPa]	$\sigma_{l,eff}$ [MPa]	k_1	$f_{ck,cm}$ [MPa]	ε_{α} [-]
Richart a kol. 1928	33,62	9,34	4,1	70,9	0,023 4
Mander a kol. 1988	33,62	9,34	1,254	74,83	0,025
Eurocode EN 1992-1	33,62	9,34	5	61,16	0,059 1
Cusson & Paultre 1995	33,62	9,34	2,1	62,41	0,027 3
Kono a kol. 1998	33,62	9,34	0,057 2	51,57	0,012 7
Lam & Teng 2002	33,62	9,34	2	52,29	0,021 6
Lam & Teng 2003	33,62	9,34	3,3	64,43	0,016 6
Bisby a kol. 2005	33,62	9,34	2,425	56,26	0,010 2
Youssef a kol. 2007	33,62	9,34	2,25	48,87	0,011 1
ACI 440.2R-08;-09	33,62	9,34	3,3	62,89	0,028
You & Teng 2011	33,62	9,34	3,5	62,64	0,018 5



5



6



Obr. 7 Provedení zatěžovací zkoušky referenčního vzorku, a) příprava zkušební vzorku, b) reálné provedení, c) porušení vzorku ■ Fig. 7 Loading test of reference specimen, a) preparing a test specimen, b) realization, c) failure of specimen

Obr. 8 Zatěžovací zkouška ovinutého vzorku: a) reálné provedení, b) porušení vzorku ■ Fig. 8 Loading test of confined specimen, a) realization, b) failure of specimen

nu) značně ovlivňuje získané výsledky, což je nutno si při návrhu zesílení uvědomit. Výsledný rozdíl získaných hodnot se pohybuje v řádech desítek procent.

EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ TEORETICKÝCH PŘEDPOKLADŮ

Výše prezentované výsledky byly porovnány s přímo měřenými hodnotami stanovenými na připravených vzorcích. Byla vyhotovena série čtyř kusů zkušebních vzorků, z nichž tři byly zesíleny výše uvedeným způsobem.

Aplikace tkaniny vyžadovala dostatečnou soudržnost mezi podkladním betonem a lepenou vrstvou tkaniny, což zajistila úprava povrchu prvku opískováním. Čtvrtý vzorek byl uvažován jako referenční, nebyl tedy opatřen zesilující vrstvou tkaniny. Společně se zkušebními vzorky byly vyrobeny trámce a krychle, z nichž byly stanoveny potřebné vlastnosti použitého betonu – pevnost betonu v tlaku a modul pružnosti.

Při zatěžovací zkoušce byly ve zkušebním zařízení jednotlivé prvky plynule zatěžovány tlakovou silou až do porušení. Byl uvažován pouze případ „centrického“ zatížení prvku bez vlivu ohybového namáhání, aby bylo možno získané výsledky přímo porovnávat s hodnotami získanými teoretickým výpočtem. Tento teoretický případ namáhání (odpovídá bodu „0“ interakčního diagramu) je pro krátký zkoušený segment bez vlivu excentricit oprávněný.

V průběhu zkoušky byla měřena velikost zatěžovací síly a odpovídající deformace. Tato byla snímána na dvou

protilehlých místech pomocí osazených Hollanových můstků (obr. 7). Zároveň byl na tkanině ve směru působení (tj. v příčném směru) osazen odporový tenzometr, který umožňoval zaznamenat chování tkaniny během zatěžování a především stanovit velikost přetvoření prvku potřebného pro aktivaci zesílení. Provedení zatěžovacích zkoušek a způsob porušení vzorku jsou patrné z obr. 8.

Z výsledků prezentovaných na obr. 9 (vzorky zesílené ovinutím FRP tkaninou označeny OV) lze jednoznačně usuzovat na funkčnost daného způsobu zesílení, přičemž je patrný rozdíl v chování nezesíleného (referenčního) a zesíleného (ovinutého) vzorku sloupu – potvrzuje závěry prezentované v literatuře. Všechny

testované vzorky se porušily očekávaným způsobem.

Vlivem ovinutí došlo k nárůstu únosnosti prvku z hodnoty 36,53 MPa (naměřeno na referenčním vyztuženém vzorku, tj. zahrnuje i zvýšení únosnosti vlivem betonářské výztuže) na hodnotu 57,09 MPa (střední hodnota), což představuje cca 56,3% navýšení únosnosti prvku oproti referenčnímu vzorku. Při dosažení mezní hodnoty došlo k porušení tkaniny (obr. 8). Uvedené hodnoty tlakových pevností jsou pro přehlednost zaneseny ve formě bodů únosnosti do interakčních diagramů prezentovaných již na obr. 5. Výsledné vyhodnocení je patrné z obr. 10.

Potvrdil se také nárůst duktility prv-



ku, kdy v porovnání s neovinutým betonem došlo k významnému nárůstu přetvoření při dosažení maximální únosnosti na více jak dvojnásobek (z hodnoty 2,25 % na hodnotu 4,82 %, obr. 9). Avšak naměřené hodnoty přetvoření zesíleného prvku nedosahovaly očekávaných (vztahy predikovaných) hodnot. Při porovnání s teoretickým

předpokladem o chování ovinutého prvku reálné vzorky selhávaly při dosažení menšího přetvoření, což je dobře patrné ze srovnání obr. 9 a výsledků uvedených v tab. 2.

V rámci provedených testů bylo též zjišťováno reálné limitní přetvoření dosažované při porušení laminátu, tedy zesilující tkaniny impregnované lepidlem o celkové tloušťce uvažované dle údajů výrobce.

Limitní přetvoření laminátu udávané výrobcem je 6 %. Tato hodnota je uvedena jako návrhová, měla by tedy být z pohledu projektanta konzervativní. Experimentálně stanovené maximální přetvoření laminátu (při porušení vzorku) však bylo pouze 4,52 % (průměrné cca 3,85 %).

Parametrů definovaných výrobcem tedy nebylo dosaženo, což může být

způsobeno např. odchylkami v tloušťce laminátu (poměrem množství tkaniny a lepidla). S ohledem na výše uvedené dosažené výsledky jsou plánovány další experimentální práce, které budou mít za cíl doplnit informace o chování laminátu a také prvku ovinutého FRP tkaninou.

ZÁVĚR

Zesílení sloupu ovinutím FRP tkaninou vede, obdobně jako při husté aplikaci příčné výztuže (třmínků, šroubovice), k vzniku trojosého stavu napjatosti v zesilovaném tláčeném prvku. U zesíleného prvku dochází k podstatnému zvýšení pevnosti betonu v tlaku a též jeho mezního přetvoření – prvek se chová duktilněji, a lépe tak odolává např. impaktu mimořádných zatížení.

Článek poukazuje na skutečnost, že při stanovování těchto klíčových vlastností panuje značný nesoulad. Z hlediska projektanta není tudíž lehké použít vztah, který by nejvhodněji popsal chování takto zesíleného prvku a stanovil jeho únosnost s požadovanou mírou spolehlivosti.

V současnosti jsou prováděny sady zatěžovacích zkoušek různých konfigurací sloupů, kde se projeví účinky vlivu štíhlosti prvku. Taktéž jsou připravovány testy krátkých prvků s různými konfiguracemi zesilujících vrstev. Výsledky těchto prací doplní doposud provedené studie a měly by být podkladem ke kritickému zhodnocení využívaných vztahů. Cílem je vznik praktického doporučení, které (plně v souladu s platnými normami) usnadní bezpečný návrh a umožní tak rozšíření tohoto jistě progresivního a perspektivního způsobu zesilování svislých tláčených prvků. O nově zjištěných skutečnostech vyplývajících z v současnosti prováděných experimentů bude odborná veřejnost informována v dalších příspěvcích.

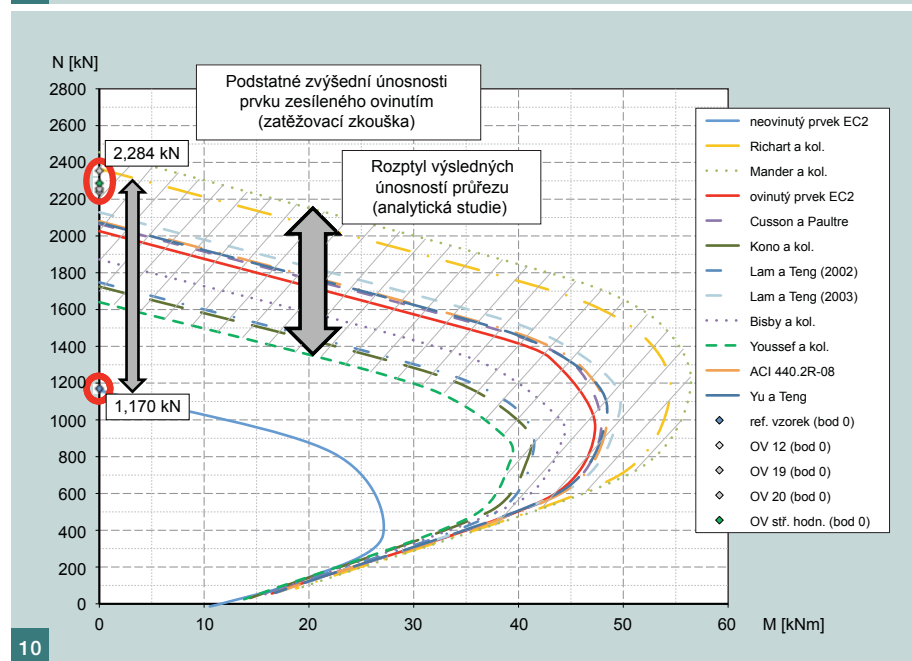
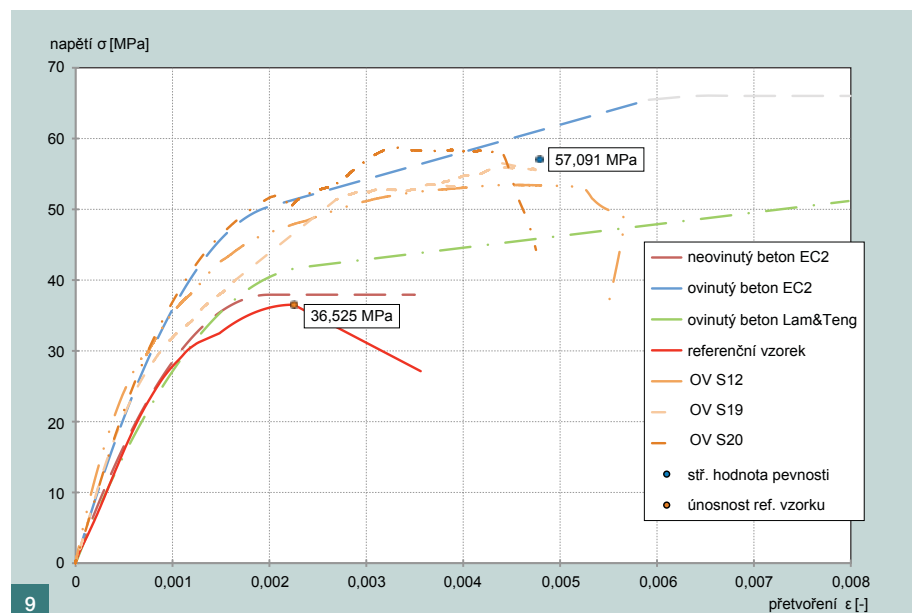
Prezentované výsledky byly získány za finanční podpory projektu TAČR TA02010382 Zvýšení spolehlivosti vysokých tenkostěnných betonových a zděných konstrukcí při klimatických zatíženích a dále juniorských projektů FAST-J-13-2110 a FAST-J-13-2128. Experimentální práce byly provedeny za vydatné materiální podpory společnosti SIKKA CZ, s. r. o. a byly uskutečněny v laboratořích Ústavu kovových a dřevěných konstrukcí pod vedením Ing. Veselého. Člen autorského týmu je podpořen v rámci řešení projektu MŠMT CZ.1.07/2.3.00/30.0005.

Obr. 9 Vyhodnocení provedených experimentů – pracovní diagram zkušebních prvků (OV – značí vzorek zesílený ovinutím FRP tkaninou)

Fig. 9 Evaluation of experiments – working diagram of tested specimens (OV – denote confined specimen by FRP fabric)

Obr. 10 Porovnání únosností stanovených na základě analytické studie (interakční diagram) a získaných z reálného měření

Fig. 10 Comparison of analytical studies (interaction diagram) and results obtained from loading tests



Literatura:

- [1] ČSN EN 1992-1-1 (73 1201) Navrhování betonových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, 2006
- [2] ČSN EN 206-1 (73 2403): Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, 2001
- [3] ACI 440.2R-02: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI Committee 440, 2002, ISBN 0-87031-088-7
- [4] Bulletin 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, technical report prepared by a working party of Task Group 9.3, FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures. 1st pub. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2001, 139 s. Bulletin Fédération Internationale du béton (*fib*). ISBN 2-88394-054-1
- [5] CEB-FIP Model Code 1990, 1. Vydání, London: Comité Euro International du Béton, 1998, 186 s. ISBN 0 7277 1696 4
- [6] *Ozbakkaloglu T., Jian C. Lim, Vincent T.:* FRP-confined concrete in circular sections: Review and assessment of stress-strain models, *Engineering Structures*, Vol. 49, April 2013, pp. 1068–1088
- [7] *Hernández H., Jara J. M., Jara M.:* Revision of constitutive models for repairing bridge columns with fiber polymers, *Intern. Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 3, No 4 2011
- [8] *Mander J. B., Priestley M. J. N., Park R.:* Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, Issue 8, September 1988, pp. 1804–1826
- [9] *Campione G., Miraglia N.:* Strength and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25, Issue 1, January 2003, pp. 31–41
- [10] *Bilčík J., Gajdošová K.:* Zásady zesilování betónových konstrukcí lepenou CFRP výstužou, *Beton TKS*, 3/2014, str. 68–72, 2014, ISSN 12133116
- [11] Uhlíková jednosměrná tkanina SikaWrap 600 C/120, výrobce: Sika CZ, s. r. o., dostup. z: http://cze.sika.com/cs/produkty_a_reseni/dokumentace/PDS/PDS_G_Sika_Wrap.html
- [12] ČSN EN 12390-3 (73 1302) Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles, 2002

Ing. Vojtěch Kostiha

tel.: 541 147 871

e-mail: kostiha.v@fce.vutbr.cz

Ing. František Girgle, Ph.D.

tel.: 541 147 871

e-mail: girgle.f@fce.vutbr.cz

prof. RNDr. Ing. Petr

Štěpánek, CSc.

tel.: 541 147 848

e-mail: stepanek.p@fce.vutbr.cz

Ing. Anna Kučerová

tel.: 541 147 871

e-mail: kucerova.a@fce.vutbr.cz

všichni: Fakulta stavební VUT v Brně

Veveří 95, 662 37 Brno

www.fce.vutbr.cz

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

TROJSKÝ MOST PŘES VLTAVU OTEVŘEN

Nový Trojský most byl oficiálně otevřen v sobotu 4. října t. r. za účasti primátora hl. m. Prahy. Do provozu byl most uveden v pondělí 6. října kolem čtvrté hodiny ranní.

Most je součástí tunelového komplexu Blanka a převádí přes Vltavu pokračování Partyzánské ulice z Holešovic do Troje bez nutnosti jakékoliv podpory v korytě řeky.

Trojský most je navržen podle vítězného soutěžního návrhu mezinárodní dvoukolové architektonicko-konstrukční soutěže, kterou vyhlásil Magistrát hl. m. Prahy v roce 2006. Spoluautory vítězného návrhu Trojského mostu jsou Jiří Petrák a Ladislav Šašek z firmy Mott MacDonald CZ, spol. s r. o., a Roman Koucký a Libor Kábrt z firmy Roman Koucký architektonická kancelář.

Přemostění je tvořeno dvojicí samostatných konstrukcí, které jsou odděleny dilatací nad pilířem, umístěným na trojském břehu. Hlavní pole mostu přes Vltavu rozpětí 200,4 m tvoří ocelový síťový oblouk s dolní mostovkou z předpjatého betonu, zavěšenou na síťově uspořádaných závěsech. Inundační most je monolitický trámový z předpjatého betonu rozpětí 40,35 m. Most celkové šířky 35,25 m je rozdělen konstrukčním uspořádáním na jednotlivé jízdní pásy pro různé druhy dopravy. Uprostřed mostu je na samostatném tělese vedena dvoukolejná tramvajová trať, po stranách mostu je symetricky vždy dvoupruhová vozovka a chodník pro pěší a cyklisty.

Trojský most je významná a odvážná mostní stavba, užívající dosud nezvyklých vzájemných vazeb stavebních prvků,



složených z ocelového oblouku a předpjaté betonové desky mostovky, vzájemně spojenými pomocí sítě závěsů. Statický systém a tvarování mostu při rozpětí 200,4 m, vytváří unikátní konstrukci, která je dána zejména poměrem vzeptí a rozpětí oblouku, tedy jeho štíhlostí 1:10 a poměrem konstrukční výšky oblouku a jeho rozpětí 1/180. Tyto parametry umožňuje hustá síť závěsů, která dodává konstrukci odolnost a tuhost. Statické a dynamické zatěžovací zkoušky mostu prokázaly jeho statickou únosnost a tuhost a jeho velmi dobré dynamické chování. Zhotovitelem mostu byla firma Metrostav, a. s.

Ing. Ladislav Šašek, CSc.