

ZOSILŇOVANIE ŠTÍHLÝCH ŽELEZOBETÓNOVÝCH STÍPOV S POUŽITÍM KOMPOZITNÝCH MATERIÁLOV STRENGTHENING OF SLENDER REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH THE USE OF COMPOSITE MATERIALS

KATARÍNA HALÁSZOVÁ,
JURAJ BILČÍK

Použitie kompozitných materiálov predstavuje modernú alternatívu zosilňovania železobetónových konštrukcií. Aplikáciou na stĺpy sa dá dosiahnuť zvýšenie pevnosti a ťažnosti. V príspevku sa analyzujú možnosti zvýšenia odolnosti štíhlych stĺpov.

The use of composite materials presents a modern alternative of reinforced concrete structures strengthening. The application to columns results in an increase of strength and ductility. In this report the possibilities of slender columns resistance increase are analysed.

Potreba zosilňovania železobetónových konštrukcií je aktuálna najmä z týchto dôvodov:

- väčšia únosnosť konštrukcie z dôvodu zvýšeného zaťaženia;
- chyby pri navrhovaní alebo zhotovovaní, ktoré majú za následok nedostatočnú únosnosť;
- porušenie betónu alebo výstuže v dôsledku seizmicity, požiaru alebo iných mimoriadnych zaťažení;
- starnutie stavebných materiálov.

Existuje viacero spôsobov zosilňovania nosných prvkov, a to zväčšenie prierezu, dodatočné predpätie alebo zmena konštrukčného systému. Účinnosť týchto metód bola preukázaná v mnohých situáciách, majú však aj svoje obmed-

zenia. Preto treba zvážiť, či je zosilnenie tým najefektívnejším riešením. Ak áno, je potrebné rozhodnúť o požadovanej úrovni zosilnenia a o najvhodnejšom spôsobe. Pri potrebe zvýšenia únosnosti stĺpov sa používajú najčastejšie tieto spôsoby zosilňovania:

- pridanie pozdĺžnej a priečnej výstuže a betónu,
- pridanie tuhej výstuže,
- pridanie kompozitného materiálu, a to vo forme ovinutia tkaninou, lepenia lamiel na povrch konštrukčného prvku alebo uloženia do drážky.

Prvé dva spôsoby zosilňovania sa označujú ako klasické, tretí spôsob je inovácia klasických metód s použitím „moderných“ materiálov. Ide o menej prácny a menej časovo náročný „suchý“ postup oproti použitiu cementových kompozitov a navyše dochádza iba k nepatrnému zväčšeniu geometrie priečného rezu [2].

VLÁKNAMI VYSTUŽENÉ POLYMÉRY

V posledných desaťročiach sa rozšíri-
lo zosilňovanie železobetónových konštrukcií lepením kompozitných materiálov na ich povrch. Na tento účel je vhodný materiál s vysokou ťahovou pevnosťou a schopnosťou spolupôsobiť s povrchom pôvodnej konštrukcie. Vďaka svojim vlastnostiam sa uplatňujú najmä vlákna vystužené polyméry („Fibre Reinforced Polymers“ = FRP), ktoré majú viaceré výhody oproti klasickej ocelevej výstuži. Typický FRP kompozit pozostáva

z výstužných vlákien a matrice. Výstužné vlákna dávajú kompozitu základnú pevnosť a matrica ich chráni pred mechanickým poškodením a podieľa sa na rozno-
se namáhania do vlákien. Vlastnosti FRP kompozitov sú vo veľkej miere ovplyvnené použitým typom vlákien. V stavebných konštrukciách sa uplatňujú tri typy vlákien:

- uhlíkové (carbon),
- sklené (glass),
- aramidové – z aromatického polyamidu (aramid) (obr. 1).

Pre účely zosilňovania na statické účinky sú najvhodnejšie uhlíkové vlákna, ktoré majú vysoký modul pružnosti, veľké pevnosti, sú odolné voči mnohým chemickým vplyvom, odolávajú únavovému namáhaniu, nepodliehajú korózii a nepreukazujú žiadne známky dotvarovania a relaxácie. Uhlíkovými vláknami vystužený polymér („Carbon Fibre Reinforced Polymer“ = CFRP) spája v sebe pevnosť a tuhosť s objemovou stálosťou. V porovnaní s klasickou betonárskou výstužou medzi jeho výhody patrí: vysoká pevnosť, nízka hmotnosť, jednoduchá príprava povrchu, znížené nároky na kotvenie a trvanlivosť systému zosilnenia. Nevýhodou je relatívne vysoká cena, náchylnosť na mechanické poškodenie a prenos zaťaženia len v smere vlákien. Typické vlastnosti kompozitov tvorených uhlíkovými vláknami sú uvedené v tabuľke 1. Konkrétne vlastnosti udáva výrobca.

Tab. 1 Typické vlastnosti CFRP

Tab. 1 CFRP typical properties

Modul pružnosti v ťahu	Ťahová pevnosť	Predĺženie pri porušení
[GPa]	[MPa]	[%]
165 až 640	2500 až 3800	1,3 až 1,6

Obr. 1 Porovnanie vlastností vlákien a ocele

Fig. 1 Fibres and steel properties comparison

Obr. 2 Diagram σ - ϵ ocelevej betonárskej výstuže a FRP

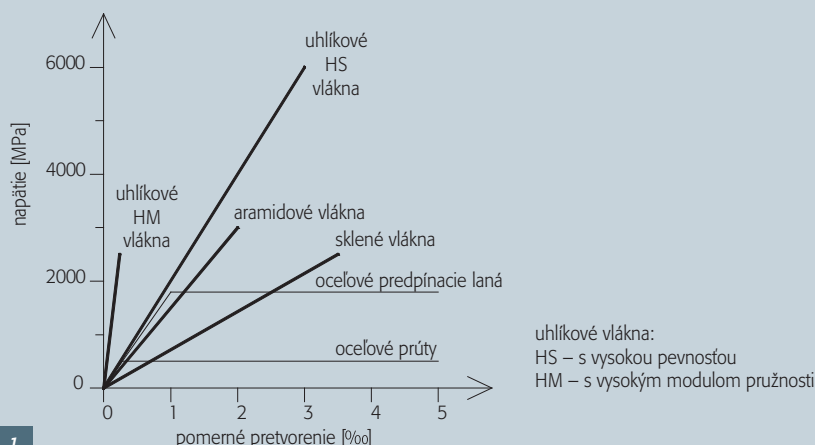
Fig. 2 Diagram σ - ϵ of steel reinforcement and FRP

Obr. 3 Uloženie FRP lamely v drážke

Fig. 3 Placing of FRP strip in a groove (NSMR)

Obr. 4 Úprava ID prierezu na ID stĺpa

Fig. 4 Cross-section interaction curve to column interaction curve modification



uhlíkové vlákna:
HS – s vysokou pevnosťou
HM – s vysokým modulom pružnosti

POUŽITIE FRP KOMPOZITOV NA ZOSILŇOVANIE STĽPOV

FRP sa dodáva vo forme tkanín alebo lamiel. Výber vhodnej formy závisí od spôsobu a potrieb systému zosilnenia.

Zvýšenie tlakovej pevnosti betónu v priereze je možné dosiahnuť v stave trojosového napätia obmedzením priečnej deformácie prierezu, ktorá môže byť vyvolaná ovinutím tkaninou.

Tkanina sa pri aplikácii na betónový povrch laminuje do matrice, najčastejšie epoxidovej (kotviacej) alebo akrylátovej (ochrannej) živice. Laminácia môže byť urobená po častiach (ako jednotlivé strmene) alebo kontinuálne po výške (formou skrutkovice).

Pri zaťažení stĺpa vyvoláva osová tlaková sila tlakové napätie kolmo na prierez, priečna výstuž, ktorá obmedzuje priečne pretvorenie prierezu, vyvoláva priečne tlakové napätie. Toto napätie vyvolané ovinutím je závislé od deformačných vlastností materiálu ovinutia, t.j. diagramu σ - ε . Preto jednoduchá aplikácia modelov na výpočet účinkov ovinutia vyvinutých pre priečnu oceľovú výstuž môže pri FRP výstuži viesť k preceneniu pevnosti a nebezpečnému návrhu. Zásadným rozdielom je lineárne správanie sa FRP až do porušenia, kým v oceli sa po dosiahnutí medze klzu napätie nezväčšuje, a tým aj tlak vyvinutý ovinutím zostáva konštantný (obr. 2).

Ďalším omylom môže byť predpoklad, že porušenie FRP v ovinutom priereze nastane, keď je dosiahnutá jeho ťahová pevnosť získaná ťahovou skúškou, keďže FRP je v priečnom reze stĺpa namáhané ťahom. Ťahová pevnosť FRP nemôže byť v ovinutom priereze dosiahnutá, pretože namerané hodnoty pretvorení FRP pri porušení sú oveľa nižšie ako hod-

noty získané z ťahovej skúšky materiálu. Pomer medzi pretvorením pri pretrhnutí FRP v ovinutom priereze a medzným pretvorením získaným z ťahovej skúšky sa mení v závislosti od druhu FRP. Porušenie nastáva pri 50 až 80% hodnotách medzného pretvorenia zo skúšok ťahovej pevnosti. Príčinami tejto redukcie sú trojosový stav napätí v priereze ovinutom FRP, kvalita vyhotovenia - ak nie je povrch dôkladne upravený, časť pretvorení sa využije na natiahnutie vlákien, tvar zaoblenia hrán ovinutého prierezu a vplyv rozmerov pri aplikácii viacerých vrstiev [4].

Z predchádzajúceho je zrejmé, že na úroveň ovinutia má významný vplyv geometria stĺpa. Celý prierez je plne účinne ovinutý len pri kruhovom stĺpe. Vzhľadom na malú deformačnú kapacitu FRP materiálov pri hranatých prierezoch prídje k porušeniu zvyčajne predčasným pretrhnutím vlákien na hrane. Účinok ovinutia stĺpov štvorcového alebo obdĺžnikového prierezu je možné zvýšiť zaoblením hrán prierezu.

Pri potrebe zvýšenia odolnosti v ťahovej oblasti namáhania sa ako alternatíva pridávania výstuže využíva lepenie lamiel na povrch zosilňovaného prvku alebo do vopred vyfrézovaných drážok v betónovej krycej vrstve (obr. 3) (near surface mounted reinforcement = NSMR). Vloženie lamely do drážky prináša, pri porovnaní s lepením lamiel na povrch, viaceré výhody:

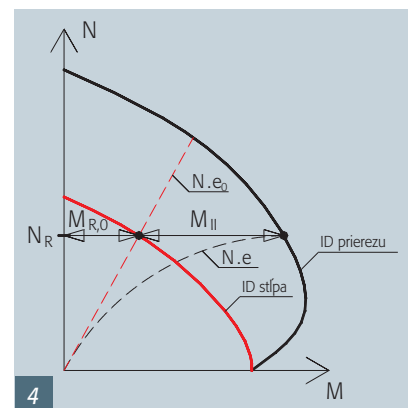
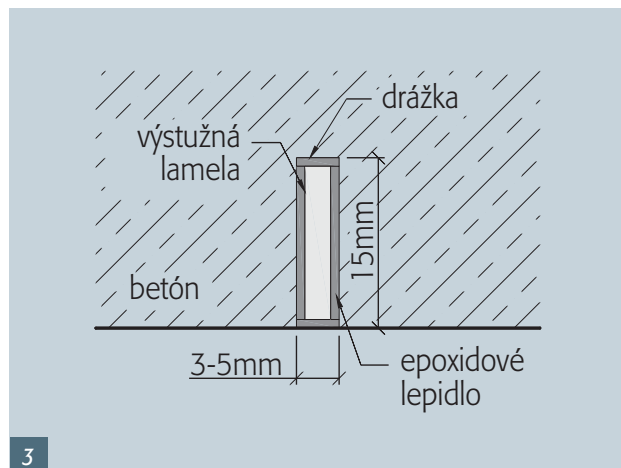
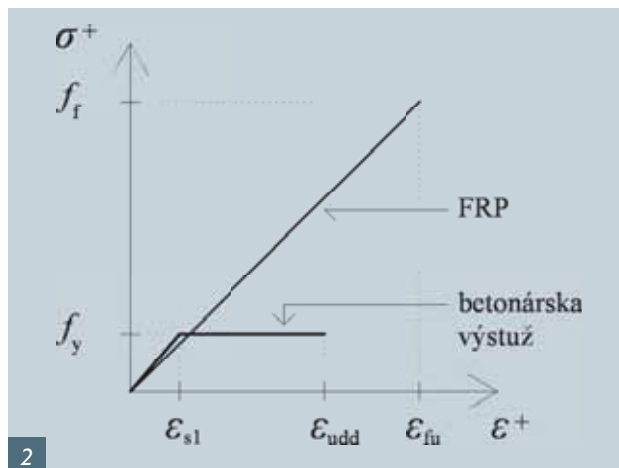
- zlepšené kotvenie (možnosť skrátenia kotevnej dĺžky) a zmenšené požiadavky na kvalitu podkladového betónu;
- lepšiu ochranu lamely proti mechanickému poškodeniu, účinkom požiaru a vandalizmu;
- zabránenie efektu delaminácie od betónového podkladu.

ODOLNOSŤ ŠTÍHLÝCH STĽPOV

Stĺp ako nosný prvok namáhaný kombináciou osovej tlakovej sily a ohybového momentu musí byť navrhnutý tak, aby preniesol zaťaženie bez zlyhania spôsobeného vyčerpaním únosnosti – pevnosti materiálov a v prípade štíhlych stĺpov aj stratou stability. V stĺpoch dochádza v dôsledku štíhlosti k redukcii odolnosti vzhľadom na nárast momentu vplyvom deformácie prvku. Tieto účinky zohľadňuje teória II. rádu, pri ktorej sa započítava vplyv deformácií prvku na rozdelenie vnútorných síl, neplatí princíp superpozície a uplatňujú sa princípy nelineárnej mechaniky.

Odolnosť najviac namáhaného prierezu pri pevnostnom porušení možno určiť na základe metódy medzných pomerných pretvorení grafickým zobrazením podmienok spoľahlivosti – pomocou interakčného diagramu prierezu (ID prierezu). U štíhlych stĺpov je potrebné zohľadniť aj vzpernú odolnosť v interakčnom diagrame prierezu a upraviť ho na interakčný diagram stĺpa (ID stĺpa).

Numerické vyjadrenie bodov ID prierezu sa robí vyčíslením vzťahov pre N_R a M_R z podmienok rovnováhy síl a momen-



tov k ťažiskovej osi betónového prierezu. Postupne sa volia také polohy priebehu pomerných pretvorení, aby v najviac namáhaných vláknach prierezu bola dosiahnutá aspoň jedna z medzných hodnôt. Na základe zvolených hodnôt pomerných pretvorení sa určia napätia z diagramov σ - ε materiálov. Podľa kubatúry napätí je možné vyčíslieť vzťahy pre N_R a M_R a graficky zobrazíť ich závislosť na ID prierezu.

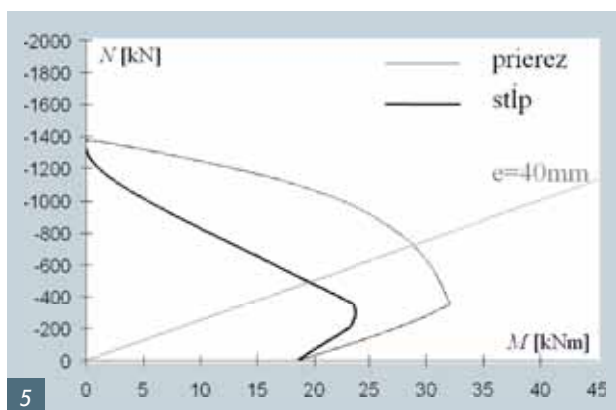
ID je potrebné upraviť tak, aby bolo

možné zistiť únosnosť stĺpa bez pôsobenia prídavného zaťaženia účinkami druhého rádu. Priemerná ohybová tuhosť $(EI)_n$ vypočítaná na základe materiálových charakteristík ideálneho prierezu, so zohľadnením vplyvu trhlín, slúži na výpočet krivosti kritického prierezu. Tá sa výraznou mierou podieľa na priečnej deformácii II. rádu a je možné pomocou nej určiť veľkosť momentu II. rádu. ID stĺpa je potom definovaný dvojicou veličín $N_R - M_{R,0}$, kde N_R je pôsobiaca tlako-

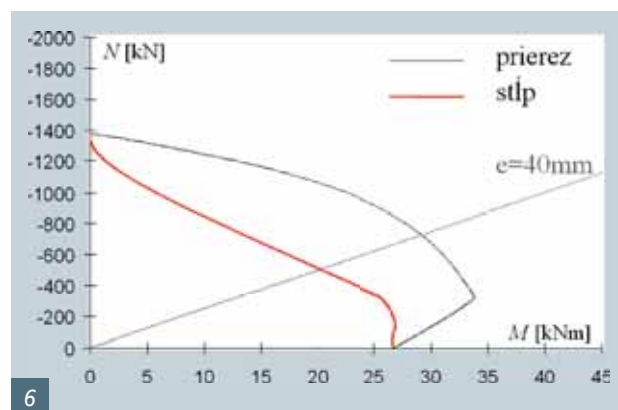
vá osová sila a $M_{R,0}$ je hodnota momentu prvého rádu vypočítaná ako rozdiel celkového pôsobiaceho momentu a momentu druhého rádu (obr. 4).

ZVÝŠENIE ODOLNOSTI ŠTÍHLÝCH STĽPOV ZOSILŇOVANÍM

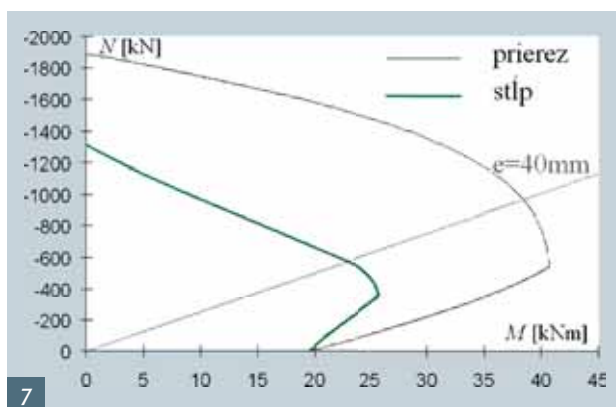
Pre experimentálne overenie možnosti zvýšenia vzpernej odolnosti stĺpov boli zvolené tri spôsoby zosilnenia štíhlych železobetónových stĺpov (stĺpy dĺžky 4 m s obdĺžnikovým prierezom 210 x 150 mm



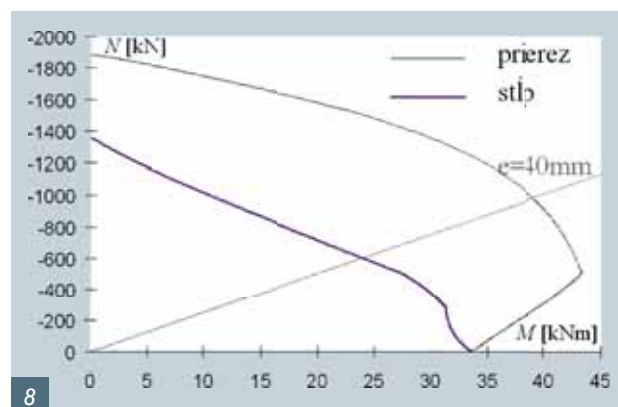
5



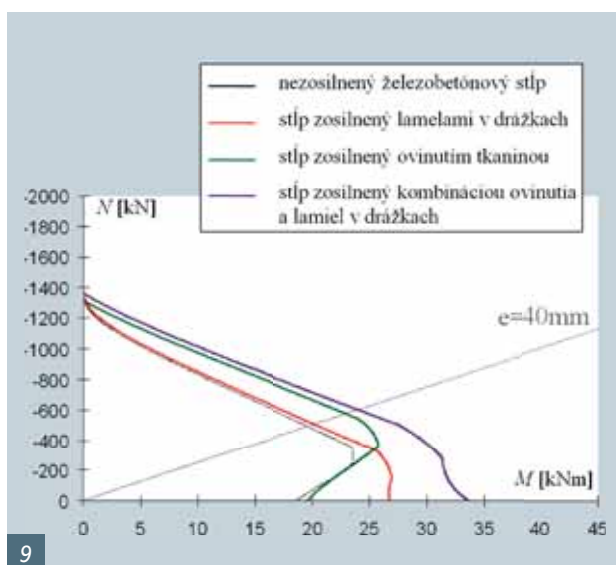
6



7



8



9

Obr. 5 Interakčný diagram nezosilneného železobetónového stĺpa

Fig. 5 Non-strengthened reinforced concrete column interaction curve

Obr. 6 Interakčný diagram stĺpa zosilneného CFRP lamelami v drážkach

Fig. 6 Column strengthened with CFRP strips in grooves interaction curve

Obr. 7 Interakčný diagram stĺpa zosilneného ovinutím CFRP tkaninou

Fig. 7 Column strengthened with CFRP fabric wrapping interaction curve

Obr. 8 Interakčný diagram stĺpa zosilneného kombináciou ovinutia a lamiel v drážkach

Fig. 8 Column strengthened with combination of wrapping and strips in grooves interaction curve

Obr. 9 Porovnanie interakčných diagramov stĺpov: nezosilnený, zosilnený lamelami v drážkach, zosilnený ovinutím tkaninou, zosilnený kombináciou

Fig. 9 Columns interaction curves comparison: non-strengthened, strengthened with strips in grooves, strengthened with fabric wrapping, strengthened with combination

so zaoblenými hranami $r = 20$ mm). Celkom budú skúšané štyri skupiny vzoriek.

Prvá, referenčná, skupina je tvorená stĺpmi bez zosilnenia. Príslušné ID sú znázornené na obr. 5.

Pre druhú skupinu – stĺpy zosilnené CFRP lamelami v drážkach – bolo generované ID podobné ako pre nezosilnený železobetónový prierez s tým, že lamely boli uvažované ako prídavná ťahaná výstuž pri povrchu prierezu a veľkosti ich pomerných pretvorení sa určujú na základe zvolených

pretvorení betónu, v závislosti od vzdialenosti od neutrálnej osi. Na základe hodnôt pomerných pretvorení sa určí napätie z diagramu σ - ε lamiel (obr. 6).

Tretiu skupinu vzoriek tvoria stĺpy zosilnené ovinutím prierezu CFRP tkaninou, čo má za následok zvýšenie pevnosti a ťažnosti betónu. Pri generovaní ID bol preto použitý diagram σ - ε ovinutého betónu závislý od pôvodnej pevnosti betónu a od tlaku vyvinutého ovinutím, zjednodušene sa počíta so zatažením tlakom len na betónové jadro, nie na materiál ovinutia (obr. 7). Zvýšená pevnosť bola stanovená podľa vzťahov uvedených v EN 1992 [7].

Poslednú, štvrtú skupinu tvoria stĺpy zosilnené kombináciou ovinutia a lamiel v drážkach. ID sú na obr. 8.

Z uvedených interakčných diagramov (obr. 9) vyplýva, že pri porovnaní s odolnosťou nezosilneného stĺpa, pri zvolenej porovnávacej excentricite 40 mm, je odolnosť stĺpa (bez pôsobenia prídavného zataženia účinkami druhého rádu) zosilneného lamelami v drážkach vyššia o 4 %, zosilneného ovinutím tkaninou vyššia o 17 % a zosilneného kombináciou ovinutia a lamiel v drážkach vyššia o 24 %. Na overenie uvedených teoretických záverov a realizácie zosilnenia v praxi sa okrem experimentálneho overenia pripravuje aj numerická simulácia.

ZÁVER

Cieľom predloženého príspevku a pripravovaného experimentálneho programu je overenie účinnosti zosilňovania štíhlych stĺpov ovinutím CFRP tkaninou, vložení CFRP lamiel do drážok a ich kombináciou. Získané výsledky majú prispieť k určeniu vhodných spôsobov zosilňovania štíhlych stĺpov, resp. k výberu metódy s najväčším prírastkom vzpernej odolnosti a poskytnúť vstupné údaje pre aplikáciu v praxi. Z výsledkov teoretickej analýzy vyplýva 4% zvýšenie odolnosti pri zosilnení lamelami v drážkach, 17% ovinutím tkaninou a 24% kombináciou ovinutia a lamiel v drážkach. Vzhľadom na pomerne vysokú cenu je uplatnenie CFRP materiálov obmedzené na prvky, kde klasické spôsoby zosilňovania nevyhovujú. Aj v prípade použitia kompozitných materiálov platí požiadavka účinnej aktivácie pridaných materiálov, ak sa majú podieľať na prenášaní vnútorných síl v priereze.

Text článku byl posouzen odborným lektorem.



Obr. 10 Príprava experimentálneho programu, a) ovinutie stĺpa CFRP tkaninou vo forme strmeňov, b) zaoblenie hrán prierezu, c) lamely nalepené v drážkach

Fig. 10 Experimental program preparation, a) wrapping of a column with CFRP fabric in stirrups form, b) cross-section edges chamfer, c) strips glued in grooves

Ing. Katarína Halászová
tel.: +421 259 274 382
e-mail: katarina.halaszova@stuba.sk
Prof. Ing. Juraj Bilčík, PhD.
tel.: +421 259 274 546
e-mail: juraj.bilcik@stuba.sk

oba: Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 81368 Bratislava
Slovenská republika