

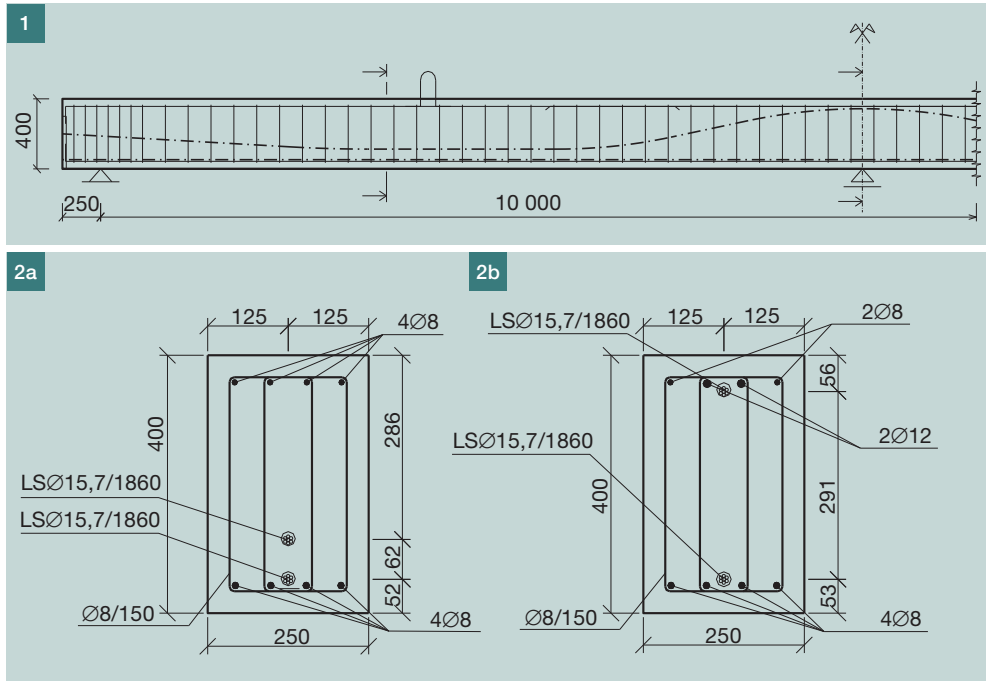
EXPERIMENTÁLNY VÝSKUM VPLYVU SÚDRŽNOSTI SEDEMDRÔTOVÝCH LÁN NA PÔSOBENIE DODATOČNE PREDPÄTÝCH DVOJPOĽOVÝCH NOSNÍKOV ■ EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BOND INFLUENCE OF SEVEN WIRE STRANDS ON BEHAVIOUR OF POST-TENSIONED TWO SPAN GIRDERS

Ján Laco, Viktor Borzovič,
Peter Pažma

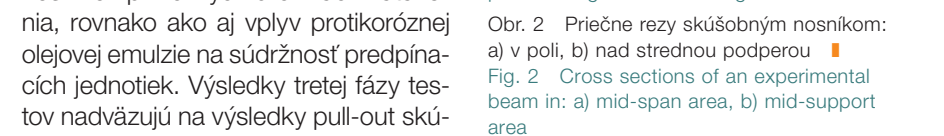
Súdržnosť predpinacích jednotiek je faktor ovplyvňujúci napätostné a deformačné pôsobenie dodatočne predpätých konštrukcií. Vyvrcholením experimentálneho programu zameraného na vplyv protikorózných olejových emulzií na súdržnosť predpinacích jednotiek boli zaťažovacie skúšky dvojpoľových nosníkov dodatočne predopnutých sedemdrôtovými lanami súdržnými, nesúdržnými a lanami so zníženou súdržnosťou vplyvom vrstvy protikorózne olejovej emulzie. Tie preukázali rozdielne pôsobenie nosníkov predopnutých lanami s rôznou mierou súdržnosti pri rôznych úrovniach namáhania. Taktiež boli zistené určité nezrovnalosti medzi výsledkami nameranými pomocou pull-out testov, realizovaných v skorších fázach experimentálneho programu a výsledkami zo skúšok dodatočne predpätých nosníkov. ■ Bond of prestressing units has major impact on stress and deformation behaviour in post-tensioned structures. An experimental program focused on influence of oil based corrosion protection agents on bond of prestressing units has culminated with loading tests of post-tensioned beams. Beams were in several cases prestressed with bonded tendons. Other beams were post-tensioned with unbonded tendons and also with tendons with reduced bond due the corrosion protection coating. Beams have demonstrated different behaviour by loading regarding to the bond level of prestressing units. There were also discovered some inconsistencies in results obtained by pull-out tests and loading tests of those beams.

Zámerom tretej a zároveň záverečnej fázy experimentálneho programu, súvisiaceho s vplyvom protikorózných olejových emulzií na súdržnosť predpinacích jednotiek, bolo vystihnúť skutočné pôsobenie betónového prvku dodatočne predopnutého lanami s rôznou mierou súdržnosti. Za týmto účelom boli navrhnuté dvojpoľové nosníky s celkovou dĺžkou 10,5 m a podrobené ohybovým skúškam.

Na základe pôsobenia nosníkov bolo následne možné určiť vplyv miery súdržnosti na ich všeobecný napätost-



Obr. 1 Schéma vystuženia a vedenia predpinacích jednotiek v pozdĺžnom smere
■ Fig. 1 Scheme of reinforcement and prestressing tendons in longitudinal direction



Obr. 2 Priečne rezy skúšobným nosníkom:
a) v poli, b) nad strednou podperou
■ Fig. 2 Cross sections of an experimental beam in: a) mid-span area, b) mid-support area

ný a deformačný stav. Získané výsledky tak umožnili pochopiť správanie sa nosníkov pri rôznych úrovniach zaťaženia, rovnako ako aj vplyv protikorózne olejovej emulzie na súdržnosť predpinacích jednotiek. Výsledky tretej fázy testov nadväzujú na výsledky pull-out skúšok vykonaných v skorších fázach experimentálneho programu prezentovaných v Beton TKS 6/2014.

OPIS VZORIEK A SKÚŠOBNEJ ZOSTAVY

Vyrobených bolo sedem kusov dodatočne predpätých nosníkov o celkovej dĺžke 10,5 m s teoretickým rozpätím polí 5 m. Nosníky mali obdĺžnikový priečny rez s rozmermi 400 × 250 mm. Ich hmotnosť sa po zatvrdnutí betónu pohybovala v rozmedzí od 2 500 do 2 600 kg.

Nosníky boli vyrobené v troch etapách z betónu triedy C40/50. V každej etape bol odobratý čerstvý betón pre vyhotovenie kociek, valcov a hranolov pre určenie skutočnej pevnosti a modulu pružnosti v čase testovania nosníkov. Nosníky boli v pozdĺžnom smere vystužené rebierkovou výstužou s výraz-

nou medzou kľzu. Na základe trhacích skúšok bolo možné zatriediť pozdĺžnu výstuž ako B 500C. Šmyková odolnosť nosníkov bola zabezpečená priečnou strmeňovou výstužou s nevýraznou medzou kľzu, ktorú možno zaradiť do triedy B 500B.

Nosníky boli v troch prípadoch predopnuté so súdržnými predpinacími jednotkami. Z nich bol jeden použitý ako nultá – kalibračná vzorka pre vyladenie skúšobnej zostavy a meracích zariadení. Ďalšie dva nosníky boli predopnuté nesúdržnými lanami typu monostrand. Posledné dva nosníky boli predopnuté holými lanami opatrenými vrstvou protikorózne olejovej emulzie, rovnakej ako v I. a II. fáze experimentálneho programu. Ako predpinacia výstuž boli použité sedemdrôtové lana LSØ15,7/1860 MPa.



3a



3b



3c



3d

Obr. 3 a) Výstuž a káblové kanálky pripravené vo forme, b) betonáž vzoriek, c) uskladnenie vzoriek v laboratóriu, d) predpínanie vzoriek

■ Fig. 3 a) Reinforcement and tendon ducts placed in formwork, b) concrete pouring, c) specimens storage in laboratory, d) post-tensioning of the beam

Obr. 4 a) Meracie zariadenia pri stredovej podpore, b) merače pomerných pretvorení v poli, c) odchýlkomer pre určenie natočenia a pružného stlačenia krajnej podpory a dynamometer merajúci príslušnú reakciu, d) elasto-magnetický (EM) snímač

■ Fig. 4 a) Measuring devices at the mid-support, b) strain gauges in mid-span area, c) gauges for support cross rotation and elastic deformation and dynamometer for reaction measuring d) elasto-magnetic gauge (EM gauge)

Obr. 5 Celkový pohľad na osadený experimentálny nosník

■ Fig. 5 Overview of the test arrangement

Obr. 6 Rozmiestnenie a šírka trhlin pre rôzne typy nosníkov, a) nosník predopnutý súdržne, medzpodperová oblasť, b) nadpodperová oblasť, c) nosník predopnutý nesúdržne, medzpodperová oblasť, d) nadpodperová oblasť, e) nosník predopnutý lanami so zníženou súdržnosťou, medzpodperová oblasť, f) nadpodperová oblasť

■ Fig. 6 Crack width and pattern with different bond conditions, a) bonded tendon, midspan area, b) support area, c) unbonded tendon, midspan area, d) support area, e) tendon with reduced bond, midspan area, f) support area



4a



4b



4c



4d



5

Holé laná boli vedené v HDPE kanálikoch s vnútorným priemerom $\phi_d = 25$ mm. Na kotvenie bol použitý jednolanový predpínací systém VSL. Laná bez súdržnosti boli uložené v nosníkoch bez použitia káblových kanálikov.

Každý nosník bol predopnutý dvoma lanami, pričom jedno bolo vedené priamo, pri spodnom povrchu nosníka tak, aby vyvolávalo maximálne sekundárne účinky na staticky neurčitej sústave. Druhé lano bolo deviované takým spôsobom, aby jeho sekundárne účinky boli nulové resp. minimálne, tzv. konkordantná predpínacia jednotka. Laná boli napnuté jednostranne silou $P_0 = 200$ kN. Ako prvé sa vždy napínalo deviované lano. Po napnutí boli súdržné predpínacie jednotky a lana so zníženou súdržnosťou zainjektované cementovou maltou. Každý nosník bol odsúšaný po dosiahnutí sedemdnovej ťahovej pevnosti malty, ktorá bola približne na úrovni $f_{tm} = 4$ MPa. Schéma vystuženia a pozdĺžneho vedenia predpínacích jednotiek je znázornená na obr. 1. Priečne rezy nosníkom sú na obr. 2. Zhotovovanie experimentálnych vzoriek je znázornené na obr. 3.

Skúšobné nosníky boli z výroby pre-

vezené a uskladnené v Centrálnych laboratóriách Stavebnej fakulty STU, kde boli aj odskúšané. Nosník bol pred skúškou osadený na ocelové podpery. Reakcie od pôsobiacich zaťažení boli zaznamenávané pomocou dynamometrov v mieste každej podpery.

Po osadení nosníka na podpery boli pripojené analogické merače pomerých pretvorení v strede rozpätia každého poľa a nad strednou podporou. Okrem toho boli tiež elektronicky zaznamenávané priehyby v štvrtinách rozpätia každého poľa a pootočenia prierezu v miestach uloženia nosníka.

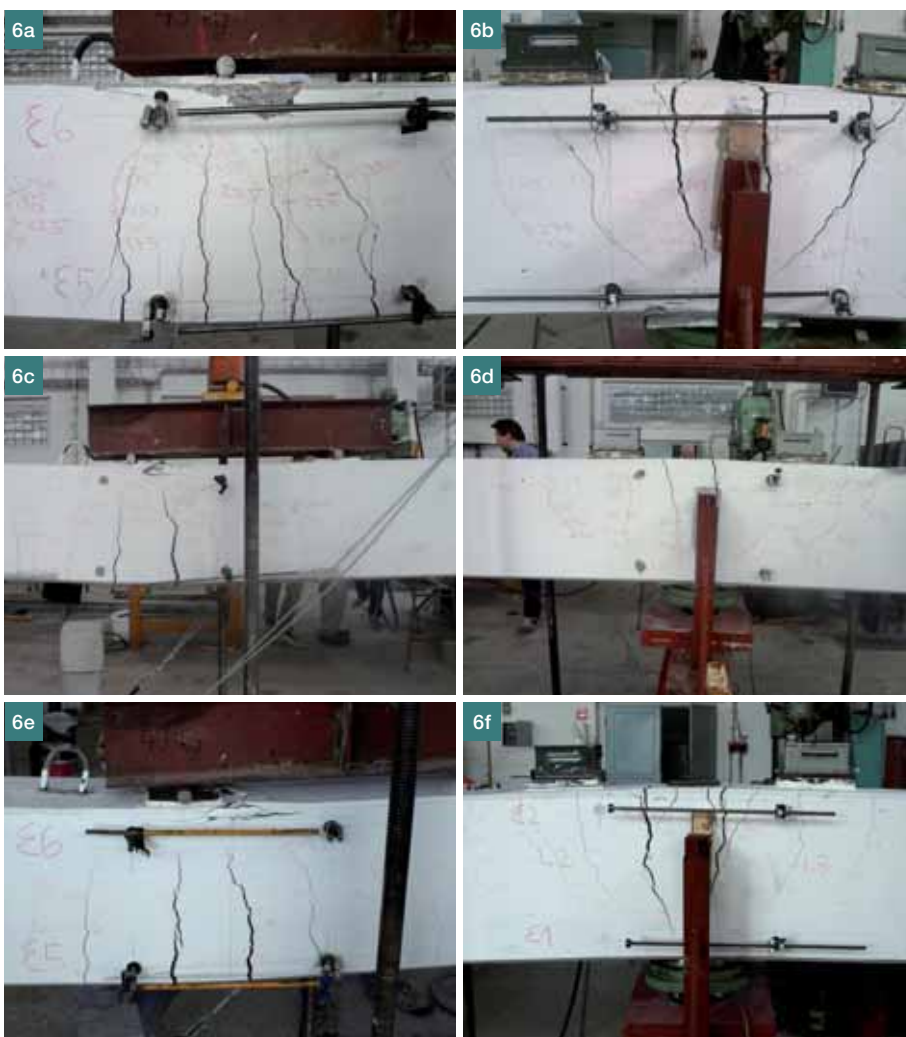
Nosník bol počas skúšky zaťažovaný dvomi koncentrovanými silami pôsobiacimi v každom poli. Tá bola vyvolávaná lismi pripojenými k agregátu. Jeden zaťažovací krok predstavoval prírastok sily približne 2×10 kN pôsobiaci na každé pole. Okrem vonkajších deformačných a silových veličín boli tiež zaznamenávané sily v predpínacích jednotkách pomocou elasto-magnetických (EM) snímačov počas predpínania a testovania. Niektoré meracie zariadenia sú znázornené na obr. 4 a osadený skúšobný nosník na obr. 5.

POSTUP ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY

Po osadení a následnej príprave nosníka bola vykonaná zaťažovacia skúška. V prvých zaťažovacích krokoch po vytvorení trhlin v nadpodperovej a medzi-podperovej oblasti sa pokračovalo v zaťažovaní nosníka, až do vyčerpania únosnosti nadpodperového prierezu, kde bol očakávaný vznik plastického kĺbu. Po jeho vytvorení nastala redistribúcia vnútorných síl vplyvom zmeny statickej sústavy. Spojitý nosník sa zmenil na dve samostatné prosté polia. Takáto sústava bola schopná odolávať ďalšiemu zvyšovaniu zaťaženia, až do momentu vyčerpania únosnosti kritického prierezu v medzi-podperovej oblasti. Porovnanie skutočnej a teoretickej odolnosti nosníkov získanej pomocou pružno-plastickej analýzy je spracované v tab. 1.

VÝSLEDKY A VYHODNOTENIA

Všetky nosníky bez ohľadu na súdržnostnú kapacitu predpínacej výstuže sa porušili rozdrvením betónu v tlačných oblastiach nad strednou podporou a v strede rozpätia poľa. Zásadný rozdiel medzi nosníkmi predopnutými súdržne a nesúdržne bol v distribúcii a šírke trhlín po dĺžke nosníka v ťahovo namáhaných oblastiach. S týmto javom následne súviseli aj hodnoty nameraných priehybov.



Tab. 1 Teoretické a namerané zaťaženie pôsobiace na nosník pri MSÚ
Tab. 1 Theoretical and measured forces acting on beam at ULS

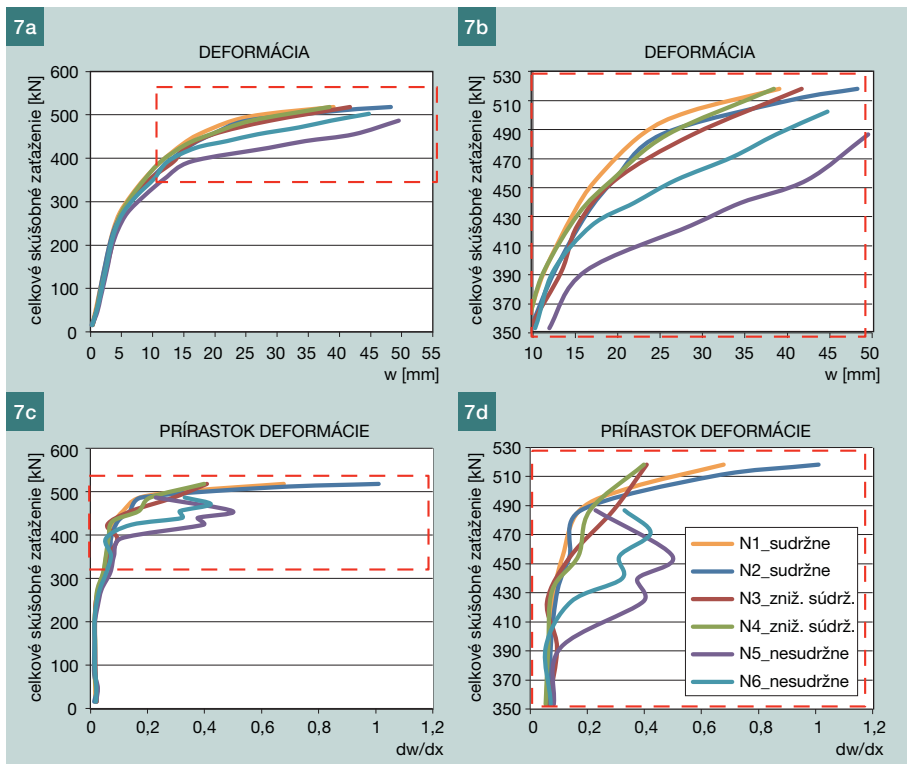
Nosník	Teoretická pôsobiaca sila [kN]	Nameraná pôsobiaca sila [kN]	Rozdiel medzi hodnotami [%]
súdržný	4 x 121,5	4 x 129,5	6
nesúdržný	4 x 90	4 x 125,6	28,3

V prípade súdržne predopnutých nosníkov boli trhliny distribuované rovnomerne po celej dĺžke ťahaných oblastí nosníka. Ich šírka bola primeraná namáhaniu a polohe na nosníku. Pri nosníkoch predopnutých nesúdržne sa na medzi vzniku trhliny vytvorila prvá trhlinka, ktorej šírka pri narastajúcom zaťažení narastala nerovnomerne s ostatnými trhlinami vytvorenými v jej blízkosti. To znamená, že prvá „centrálna“ trhlinka mala výrazne väčšiu šírku ako ostatné trhliny. Po rozdrvení tlačeneho betónu mal tento jav za následok pretrhnutie betonárskej výstuže v centrálnej trhline. V prípade nosníkov predopnutých lanami so zníženou súdržnosťou bola šírka trhlín blízka nosníkom so súdržnými lanami, avšak distribúcia trhlín bola ovplyvnená stratou súdržnosti pri vyš-

ších zaťažovacích stupňoch. Charakteristická distribúcia a šírka trhlín v ťahovo namáhaných oblastiach nosníkov je znázornená na obr. 6.

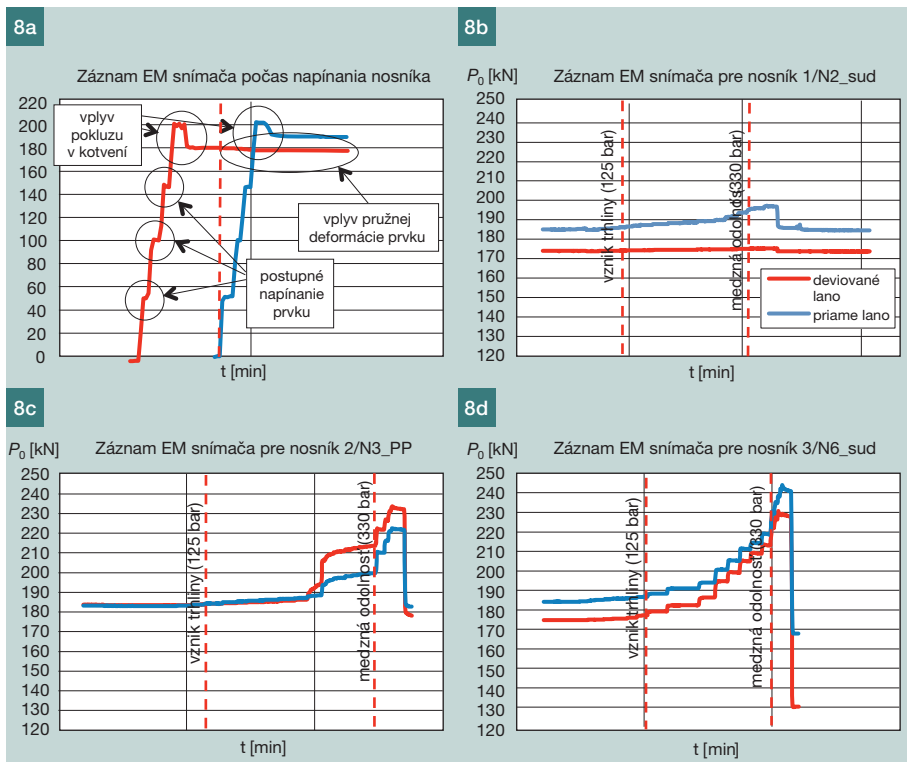
Súdržnostné vlastnosti predpínacej výstuže sa rovnako prejavili na veľkosti a náraste priehybu nosníkov. Priehyb nosníkov narastal rovnomerne vo všetkých prípadoch predpätia až do okamihu vzniku prvej trhliny. Po jej iniciácii sa začali prejavovať rozdiely v deformačnom pôsobení vplyvom zmeny tuhosti nosníkov. V prípade nosníkov predopnutých nesúdržne po vzniku trhlín sa priehyb zväčšoval rýchlejšie s narastajúcim zaťažením oproti nosníkom so súdržným predpätím. Charakter deformačie nosníkov predopnutých lanami s obmedzenou súdržnosťou bol podobný skôr súdržným nosníkom, avšak zaujímavý je sklon kriviek popisujúcich priehyb, ktorý je naopak podobný sklonu kriviek nesúdržných nosníkov.

Vyhodnotenie diferenciálnych prírastkov priehybu výraznejšie poukázalo na rozličné deformačné pôsobenie vplyvom súdržnosti predpínacích jednotiek. Na obr. 7a až 7d je znázornená závislosť priehybu od narastajúce-



Obr. 7 a) Závislosť priehybu nosníkov od pôsobiaceho zaťaženia, b) závislosť priehybu nosníkov od pôsobiaceho zaťaženia vo väčšej mierke, c) závislosť prírastku priehybu nosníkov od pôsobiaceho zaťaženia, d) závislosť priehybu nosníkov od pôsobiaceho zaťaženia vo väčšej mierke ■ Fig. 7 a) Beams deflection vs. acting load relationship, b) beams deflection vs. acting load relationship in larger scale, c) beams deflection increment vs. acting load relationship, d) beams deflection increment vs. acting load relationship in larger scale

Obr. 8 Záznamy EM snímačov, a) počas napínania nosníka, b) zaťažovacia skúška nosníka predopnutého súdržnými lanami, c) zaťažovacia skúška nosníka predopnutého s lanami s obmedzenou súdržnosťou, d) zaťažovacia skúška nosníka predopnutého s lanami bez súdržnosti ■ Fig. 8 EM gauge records, a) during prestressing, b) loading of beam with bonded tendons, c) loading of beam with tendons with reduced bond, d) loading of beam with unbonded tendons



Na rozdiel od nosníkov predopnutých nesúdržne sa sila v každom z lán zvyšovala úmerne zaťažovaciemu kroku a narastajúcej deformácii prvku, až na úroveň plastickej deformácie predpínacej jednotky. To je evidentné z poklesu sily v predpínacích jednotkách po odľahčení nesúdržne predpätých nosníkov pod úroveň pred skúškou. Nosníky predopnuté lanami s obmedzenou súdržnosťou vykazovali malý nárast sily v predpínacích jednotkách pri nižších úrovniach zaťaženia, podobne ako pri súdržných lanách. Tesne pred dosiahnutím medznej únosnosti nosníka je však evidentný skokovitý nárast sily a následne podobné správanie ako pri nosníkoch predopnutých nesúdržne. Z toho možno usúdiť, že pri určitej úrovni namáhania nastala **globálna strata súdržnosti** po celej dĺžke predpínacej jednotky vplyvom použitia protikorózných prostriedkov.

ZÁVER

Výsledky experimentov zameraných na sledovanie súdržnostných podmienok predpínacích jednotiek vplyvom protikorózných olejových emulzii priniesli niekoľko zaujímavých výsledkov. Sledovanie napätostného a deformačného pôsobenia dodatočne predpätých nosníkov si vyžaduje náročnú prípravu a realizáciu. Avšak výsledky získané takýmto spôsobom majú vyššiu výpovednú hodnotu ako výsledky získané pomocou pull-out testov.

Šírky trhlín ako aj ich distribúcia a rovnako priehyb nepreukázali zásadný

ho zaťaženia pri všetkých súdržnostných podmienkach rovnako ako aj závislosť diferenciálnych prírastkov priehybu k narastajúcemu zaťaženiu.

Rozdielne statické pôsobenie nosníkov zaznamenali aj EM snímače, ktoré odzrkadľovali reálne silové namáhanie predpínacieho lana v diskretnom priereze. EM snímač bol umiestnený približne 800 mm od krajnej podpory nosníka. Na obr. 8a je zaznamenaný priebeh sily pri napínaní sedemdrôtvových lán. Zo záznamu sú evidentné javy ako okamži-

tá strata predpätia pri zakotvení či strata sily z pružnej deformácie prvku.

Záznamy na obr. 8b až 8d znázorňujú priebeh sily v predpínacích jednotkách počas skúšania nosníkov. V prípade predpätých nosníkov so súdržným predpätím došlo k porušeniu súdržnosti lokálne, v miestach ohybových trhlín. Lano sa za hranicou trhliny opäť zakotvilo a tak je v mieste uloženia EM snímača vidieť len veľmi malý prírastok sily v predpínacích jednotkách počas trvania celého namáhania nosníkov.

Literatúra:

- [1] *Laco J.*, 2014: Súdržnosť predpínacích jednotiek opatrených protikoróznou ochranou: dizertačná práca, Bratislava: STU
- [2] *Lüthi T. et al.*, 2005: Factors affecting bond and friction losses in multistrand post-tensioning tendons including the effect of emulsifiable oils, Austin: Centre for Transportation Research at the University of Texas, FHWA/TX-05 / 0-4562-1
- [3] *Marti P. et al.*, 2008: Temporary corrosion protection and bond of prestressing steel, In: ACI Structural Journal, Vol. 105, No. 1, p. 51–59, ISSN 0889-3241
- [4] *Salcedo Rueda E. et al.*, 2004: Bond and corrosion studies of emulsifiable oils used for corrosion protection in post-tensioned tendons. In: PTI Journal, Vol. 22, No. 1. ISSN 1544-2314

odstránenia protikorózneho prostriedku na báze oleja po uložení predpínacej výstuže do konštrukcie.

Príspevok vznikol s finančnou pomocou Agentúry na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0442-12.

Ing. Ján Laco, PhD.

Reming Consult, a. s.

Trnavská cesta 27, 831 04 Bratislava

e-mail: laco@reming.sk

jl.beton@gmail.com



Ing. Viktor Borzovič, PhD.

e-mail: viktor.borzovic@stuba.sk



Ing. Peter Pažma

e-mail: peter.pazma@stuba.sk



oba: Stavebná fakulta STU

v Bratislave

Katedra betónových

konštrukcií a mostov

Radlinského 11, 813 68 Bratislava

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

vplyv protikorózneho olejovej emulzie na únosnosť a deformačné pôsobenie dodatočne predpätých prvkov. Výsledky EM snímačov ukázali globálnu stratu súdržnosti predpínacích jednotiek opatrených protikoróznym prostriedkom až tesne pred porušením nosníkov.

Výsledky pull-out testov prezentované v Beton TKS 6/2014 preukázali v prípade protikorózneho olejovej emulzie stratu súdržnosti o viac ako 60 %. Takáto výrazná strata súdržnosti pri pull-out testoch môže viesť k mylným záverom, nakoľko vplyv tohto prostriedku sa na prvku reálnych rozmerov prejavil len mini-

málne. Z tohto dôvodu je vhodné, pri vyšetrení súdržnosti dvoch materiálov, používať pull-out testy len pri určovaní prenosových a kotevných dĺžok.

Okrem vplyvu olejových emulzií na súdržnosť, je možné získať výsledky z testov na dodatočne predpätých nosníkoch aplikovať aj pri diagnostike čiastočne predpätých betónových konštrukcií v prípade ich porušenia ohybovým namáhaním. Na základe ich šírky a distribúcie je možné konštatovať, či neprišlo k zmene súdržnostných podmienok v dôsledku nekvalitne prevedenej iniektáže alebo nedostatočného

OCENĚNÍ BETONOVÉHO POVRCHU V PRESTIŽNÍ SOUTĚŽI



Britské Centrum designu udělilo na základě rozhodnutí odborné poroty 12. února t. r. nejvyšší ocenění v soutěži **Surface Design Award 2015** v kategorii Povrch v interiéru veřejné budovy **interiéru kaple Giovanni XXIII** postavené v Ospedale, části italského Bergama (obr. 1 a 2). Kaple, navržena francouzským architektem Aymericem Zublehou ve spolupráci s italskými architekty Pippo a Ferdinandem Traversi, je součástí nemocnice papeže St. Johna XXIII a byla vysvěcena 11. října 2014.

Návrh současného kostela vychází z pevných architektonických zásad, že jeho interiér má vytvářet místo povzbuzující návštěvníka k modlitbě a klidnému rozjímání. Minimalistický interiér tvoří světlé dřevo a teplé odstíny **bílých prefabrikovaných stěnových betonových panelů** s grafickými motivy vyjádřenými pomocí technologie Graphic Concrete (GCArt&Design™). Autorem návrhu vzoru je Stefano Arienti, který čerpal inspiraci v Zahradách Edenu, jak napovídají

květy, rostliny a keře zobrazené na stěnách. Květinové motivy byly na stěny přeneseny pomocí jemného rastrování vzorů a vhodně zvolené kompozice betonové směsi, která tak dotváří celkový dojem lehkosti, vzdušnosti a klidu. Přirozené světlo, které proniká do kaple kruhovými otvory na stěnách a ve stropě, završuje dechberoucí atmosféru vnitřního prostoru.

zdroj: www.graphicconcrete.com
a www surfacedesignshow.com

připravila Jana Margoldová