

SEKUNDÁRNE MOMENTY OD PREDPÄTIA PO DOSIAHNUTÍ MSÚ

■ SECONDARY EFFECTS OF PRESTRESSING AT ULTIMATE LOADS

Jaroslav Halvoník, Peter Pažma,
Katarína Gajdošová

Sekundárne účinky od predpätia, ktoré vznikajú v dôsledku zabránenia voľnej deformácie nosného prvku staticky neurčitými väzbami, môžu vo výraznej miere ovplyvniť napätosť a priebeh vnútorných síl v predpätých konštrukciách. Samotné účinky sú závislé od statickej neurčitosti predpätej konštrukcie a geometrie predpínacích jednotiek. Táto skutočnosť vyvoláva otázky, či sekundárne účinky predpätia останú rovnaké aj po zmene statickej neurčitosti systému, napr. po vzniku plastického kĺbu v kritickom priereze, prípadne po vzniku kinematického mechanizmu v konštrukcii, resp. či sa sekundárne účinky, po premene staticky určitej sústavy na staticky určitú, úplne vytratia. Cieľom príspevku je poskytnúť čitateľovi informácie o pôsobení dodatočne predpätých spojitéch nosníkov s výraznými sekundárnymi účinkami od predpätia po dosiahnutí medzného stavu únosnosti. Spolu bolo skúšaných šesť dvojpoľových nosníkov, ktoré boli zaťažované narastajúcim vonkajším zaťažením až do vzniku kinematického mechanizmu. Vnútorne sily, vrátane sekundárných účinkov, boli merané sledovaním zmeny reakcie v každej z podpier pomocou dynamometrov. Výsledky ukazujú, že sekundárne účinky predpätia tvoria neoddeliteľnú súčasť vnútorných síl aj po zmene statickej sústavy, resp. po vzniku kinematického mechanizmu konštrukcie. Dosiahnuté výsledky potvrdzujú, že vnútorné sily spôsobené sekundárnymi účinkami od predpätia majú byť zahrnuté vo všetkých zaťažovacích kombináciách, vrátane posúdení konštrukcie na medzný stav únosnosti. ■ Secondary effects of prestressing

develop in statically indeterminate structures due to retraining of imposed deformations by hyperstatic restraints. These effects may significantly influence internal forces and stresses in prestressed structures. Secondary effects are influenced by redundancy of structural system, which raises a question if they remain unchanged after a change of structural system e.g. due to development of plastic hinge(s) in a critical cross-section(s) or after development of kinematic mechanism, or if they disappear when the structure changes into system of statically determinate members. The paper deals with investigation of behaviour of continuous post-tensioned beams with significant secondary effects of prestressing subjected to the ultimate load. Six two-span beams were tested in a laboratory, with load changing their structural system into kinematic mechanism. Internal forces and secondary effects of prestressing were controlled through measurements of reactions in all

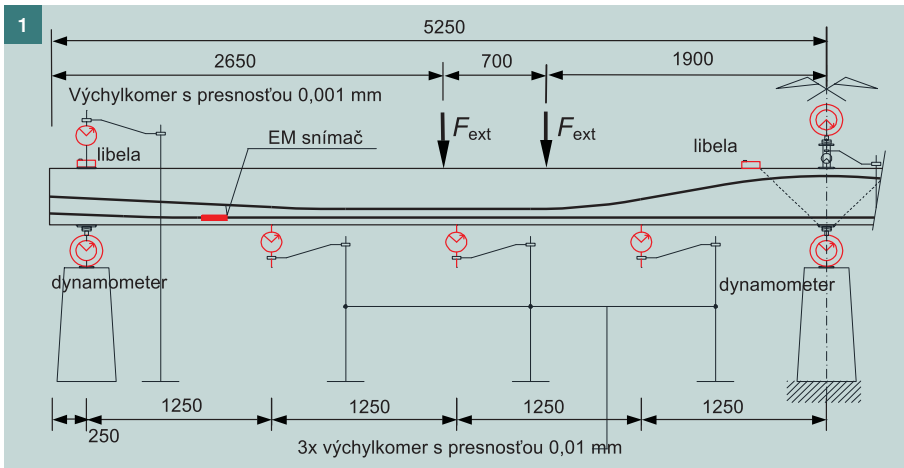
supports. The results revealed that the secondary effects remained a permanent part of action on the experimental beams even after development of kinematic mechanism. The obtained results confirmed that secondary effects should be included in all combinations of actions also for ultimate limit states verifications.

Staticky neurčité predpäté nosníky sú typickými nosnými prvkami, ktoré sa vyskytujú najmä v mostnom staviteľstve. Prvé spôsoby návrhu týchto konštrukcií vychádzali z princípov teórie dovolených namáhání. Únosnosť aj používateľnosť konštrukcie bola overovaná jednoduchou kontrolou napätí v konštrukčných materiáloch (betón, oceľ). Napätia boli počítané pomocou kombinácií pôsobiacich zaťažení uvažovaných v charakteristických hodnotách bez plastických deformácií v konštrukčných materiáloch. So zavedením teórie medzných stavov do noriem sa stal návrh predpätých konštrukcií zložitejší. Používateľnosť a trvanlivosť konštrukcie sa stále kontroluje kombináciami zaťažení uvažovaných v charakteristických hodnotách, avšak odolnosť sa overuje s tzv. návrhovými kombináciami. Návrhová kombinácia zaťažení vychádza z návrhových hodnôt síl a pevností materiálov, ktoré sa získajú aplikáciou parciálnych súčiniteľov, pričom sa využíva plastické pôsobenie jednotlivých konštrukčných materiálov. Na základe týchto predpokladov sa často stáva, že po dosiahnutí medzného stavu únosnosti (MSÚ) sa v konštrukcii vytvorí plastický kĺb, čo následne vedie k zmene statickej schémy konštrukcie.

Predpínacie jednotky sa najčastejšie navrhujú do konštrukcie tak, aby svojim tvarom kopirovali priebeh vnútorných síl od pôsobiaceho zaťaženia, napr. v prípade prostého nosníka sú predpínacie jednotky vedené pri dolnom povrchu prvku. V prípade spojitéch viacpoľových nosníkov sa geometria káblov navrhuje s polygonálnym vedením tak, že v miestach kladných ohybových momentov sú káble pri spodnom povrchu a v miestach záporných ohybových momentov pri hornom povrchu. Dôvodom polygonálneho vedenia je priama závislosť momentového účinku predpínacej jednotky od jej vzdialenosti od ťažiska prierezu, ktorá je označovaná ako

excentricita predpínacej sily e . Súčin Pe potom predstavuje primárny moment od predpätia. V prípade staticky neurčitých konštrukcií je situácia zložitejšia, nakoľko za istých podmienok spôsobuje predpätie prídavné, tzv. sekundárne účinky, ktoré môžu výrazne ovplyvniť priebeh vnútorných síl na konštrukcii. Sekundárne účinky od predpätia sú závislé od statickej neurčitosti konštrukcie a od geometrie predpínacej jednotky. Je možné navrhnúť geometriu polygonálneho kábla, napr. v spojitom nosníku, tak aby účinnok od predpätia nespôsovoval žiadne sekundárne momenty, alebo aby sa tieto momenty blížili k nule. Káble s takouto geometriou v staticky určitej konštrukcii nazývame konkordantné káble. Je ale veľmi zložitá takúto geometriu vedenia kábla uplatniť v bežnej praxi, a preto sú vo väčšine prípadov staticky neurčitých konštrukcií primárne momenty od predpätia sprevádzané sekundárnymi účinkami. Ako už bolo spomenuté, sekundárne účinky závisia od statickej neurčitosti konštrukcie, na staticky určitej konštrukcii nevznikajú. Preto sa vynára otázka, čo sa stane so sekundárnymi účinkami po zmene statickej neurčitosti sústavy, napr. v dôsledku vzniku plastických kĺbov v konštrukcii, či sa majú alebo nemajú zahŕňať do odolnosti pri posudzovaní konštrukcie na úrovni MSÚ. Je známe, že niektoré normy sa takmer vôbec nezmieňujú o sekundárnych momentoch predpätia, naopak iné jasne uvažujú s účinkom sekundárneho momentu pri posúdení konštrukcie na MSÚ, napr. ACI-318. Tento prístup uvažuje vznik prvého plastického kĺbu s ešte dostatočnou rezervou napätí. Po prekročení tejto hodnoty sa použité materiály dostanú za svoju pružnú hranicu, čo by ale ešte nemalo ovplyvniť samotnú prítomnosť sekundárných účinkov. Podobný prístup má aj EC2, ktorá uvádza, že pri plastickej a nelineárnej analýze je dovolené uvažovať sekundárne účinky predpätia ako dodatočné plastické pootočená, ktoré majú byť zahrnuté do overenia kapacity v pootočení. Takto nepriamo ich zahŕňa do návrhových kombinácií zaťažení.

Za účelom nájdenia odpovedí na vyššie spomenuté otázky bol navrhnutý experimentálny program, ktorý bol za-



Obr. 1 Vedenie káblov predpätia a usporiadanie meracích zariadení na experimentálnej vzorke | Fig. 1 Tendon layout and layout of measuring devices arrangement

meraný na monitorovanie pôsobenia spojitéch, staticky neurčitých nosníkov predpätých káblami s významnými sekundárnymi účinkami, kde sa vplyvom vonkajšieho zaťaženia staticky neurčitá sústava najskôr zmenila na staticky určitú s následným vznikom kinematického mechanizmu.

OPIS EXPERIMENTÁLNEHO PROGRAMU

Spolu bolo vyrobených šesť experimentálnych nosníkov, plus jeden skúšobný nosník, s rovnakou prierezovou plochou $0,25 \times 0,4$ m a dĺžkou 10,5 m, pre všetky bola použitá pevnostná trieda betónu C40/50. Nosníky boli vyrobené v špecializovanej výrobni na výrobu prefabrikátov spoločnosti ZIPP Bratislava, s. r. o., závod Sereď a následne prenesené do priestorov centrálnych laboratórií STU v Bratislave, kde boli osadené do skúšobnej zostavy, káble sa predopli a zainjektovali.

Nosníky boli vystužené betonárskou

výstužou z ocele B500B a dvomi jedno-lanovými káblami typu \varnothing Ls 15,7 mm/1860 MPa (prierezová plocha lana 150 mm^2) s rozdielnou geometriou. Prvé lano malo polygonálny tvar po výške prierezu, čo malo viesť k dosiahnutiu minimálnych sekundárných účinkov (konkordantný kábel). Druhé lano bolo navrhnuté ako priame, bez výraznejšej zmeny geometrie po dĺžke nosníka, a teda po napnutí lano spôsobovalo maximálne sekundárne účinky. Výškové usporiadanie oboch lán je zobrazené na obr. 1. Okrem rozličnej geometrie lán sa počas experimentu sledoval aj vplyv súdržnosti na celkový priebeh vnútorných síl v konštrukcii. Z toho dôvodu boli v nosníkoch použité tri typy predpínacích jednotiek, vždy v dvoch nosníkoch, ktoré boli vyrobené z rovnakej zámesi betónu. Prvú skupinu tvorili nosníky vystužené súdržnými predpínacími lanami, druhá skupina bola vystužená rovnako súdržnými lanami, ale tie, na rozdiel od prvej skupiny, boli

ošetrené protikoróznym prostriedkom, ktorý mal viesť ku zníženiu súdržnosti. Poslednú tretiu skupinu tvorili nosníky vystužené lanami bez súdržnosti – laná typu monostrand. Súdržné laná a laná so zníženou súdržnosťou boli vedené v ochranných plastových kanálikoch s priemerom 22 mm a po napnutí riadne zainjektované. Všetky laná sa predpínali na predpínaciu silu $P_0 = 200 \text{ kN}$.

Na monitorovanie podrobného priebehu zmeny napätia v predpínacích kábloch boli použité elasto-magnetické snímače (EM), ktoré boli osadené na oboch lanách v nosníku a to tak, aby každý snímač bol umiestnený na opačnom konci nosníka. Detail umiestnenia EM snímača je na obr. 2, poloha umiestnenia na obr. 1.

Zaťažovacia sústava pozostávala z dvoch hydraulických valcov umiestnených v oboch poliach nosníka tak, aby spôsobovali maximálny ohybový moment v mieste nad vnútornou podporou a v strede rozpätia poľa. Sila v li-



Firmní prezentace

XYPEX

VODONEPROPUSTNOST BETONU
A OCHRANA BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

NEKAP

Vyhradní prodejce v ČR

NEKAP, s.r.o., Thákurova 7, 160 00 Praha 6
tel.: 233 323 902, 224 316 107, fax: 224 313 212
e-mail: info@xypex.cz, www.nekap.cz

Tab. 1 Zoznam požitých symbolov a značiek

■ Tab. 1 List of notation

Symboly a značky použité v texte	
A_p	prierezová plocha predpínacieho lana
A_s	prierezová plocha betonárskej výstuže
F_c	osová sila v betóne
F_s	osová sila v betonárskej oceli
ΔF_p	osová sila od predpätia po zaťaženie konštrukcie
E_c	modul pružnosti betónu
E_s	modul pružnosti betonárskej ocele
E_p	modul pružnosti predpínacej ocele
$M_{E,exp}$	ohybový moment dosiahnutý experimentálnym zaťažením (účinnok vonkajšieho zaťaženia)
M_R	ohybová odolnosť
M_p	primárny moment od predpätia
N_p	osová sila od predpätia
P	predpínacia sila
P_0	predpínacia sila v čase vnesenia predpätia do konštrukcie
b	šírka trámu
e	excentricita predpínacej výstuže
d_s	vzdialenosť betonárskej výstuže meraná od najviac tlačenej okraja prierezu
d_p	vzdialenosť predpínacej výstuže meraná od najviac tlačenej okraja prierezu
f_p	pevnosť predpínacej ocele
$f_{p0,1} = 0,1 \%$	dohovorená medza kizu predpínacej výstuže
f_y	medza kizu betonárskej výstuže
f_t	maximálna ťahová pevnosť betonárskej výstuže
$f_{c,cube}$	kocková pevnosť betónu meraná v čase experimentu
h	výška trámu
x	poloha neutrálnej osi
ϵ_{cu}	medzné pretvorenie betónu
ϵ_{p0}	pretvorenie predpínacej výstuže v čase vnesenia predpätia do konštrukcie
$\Delta \epsilon_p$	pretvorenie predpínacej výstuže v dôsledku narastajúceho vonkajšieho zaťaženia
ϵ_s	pretvorenie betonárskej výstuže
$\epsilon_{up}/\epsilon_{us}$	limitné pretvorenie predpínacej/betonárskej výstuže
\varnothing	priemer výstuže
σ_p	napätie v predpínacom lane
σ_{p0}	napätie v predpínacom lane v čase vnesenia predpätia do konštrukcie

se bola cez oceľový nosník rozdelená na dvojicu síl F_{ext} (obr. 1). V mieste každej z podpíer bol umiestnený dynamometer na kontinuálne zaznamenanie priebehu reakcií, rovnako bol sledovaný pokles podpíer počas experimentu.

TEORETICKÁ ANALÝZA

Experimentálne vzorky boli navrhnuté ako spojitý dvojpoľový nosník. Po vnesení predpätia nosníky stále pôsobili v pružnom štádiu. S rastúcim vonkajším zaťažením sa najprv vyčerpala ohybová

kapacita prierezu nad strednou podperou, čo malo za následok vznik plastického kľbu v tomto mieste. Staticky neurčitá konštrukcia (obr. 3a) sa zmenila na dva prosté nosníky (obr. 3b). Ďalšie rastúce zaťaženie od vonkajšej sily viedlo k vytvoreniu nových plastických kľbov v strede rozpätia jednotlivých poľí (obr. 3c), čo malo za dôsledok celkový kolaps konštrukcie – vznik kinematického mechanizmu (obr. 3d).

Pri plasticitnej analýze je maximálna veľkosť vonkajšej sily priamo úmerná ohybovej kapacite prierezov v mieste vzniku plastických kľbov. Pre účely porovnania dosiahnutých experimentálnych výsledkov bolo potrebné uskutočniť teoretickú analýzu ohybovej odolnosti experimentálnej konštrukcie. Tá vychádzala z mechanických vlastností použitých materiálov, ktoré boli testované v rovnakom čase, ako bol uskutočnený samotný experiment, a jej cieľom bolo vypočítať ohybovú odolnosť v kritických prierezoch nosníka. Ohybová odolnosť bola stanovená na základe predpokladu medzného pomerneho pretvorenia betónu v tlačenej oblasti $\epsilon_{cu} = 0,0035$ (obr. 5). Materiálové charakteristiky použitých materiálov sú v tab. 2. Aktívnu časť predpínacej sily reprezentuje osová sila (1) a primárny ohybový moment od predpätia (2). Obe hodnoty sú vyjadrené z napätia v predpínacej výstuži s uvážením strát od predpätia. Pre výpočet ohybovej odolnosti prierezu bol použitý bilineárny pracovný diagram výstuže. Maximálne napätie v lane je vyjadrené súčtom napätia vneseného pri predpínaní (3) a prírastku napätia vplyvom deformácie prierezu od rastúceho vonkajšieho zaťaženia (4). Napätie v betóne bolo vyjadrené z nelineárneho pracovného diagramu betónu, podľa vzťahu (6), ktorý poskytuje Eurokód 2 a ModelCode 1990. Zoznam požitých symbolov a značiek je v tab. 1.

Osová sila od predpätia:

$$N_p = -\sum \sigma_{p0,i} A_{p,i} \tag{1}$$

Primárny moment od predpätia:

$$M_p = -\sum \sigma_{p0,i} A_{p,i} e_{p,i} \tag{2}$$

Pomerné pretvorenie predpínacej výstuže:

$$\epsilon_{p0,i} = \frac{\sigma_{p0,i}}{E_p} \tag{3}$$

Prírastok pomerneho pretvorenia predpínacej výstuže ako dôsledok pretvorenia prierezu, ktoré je uvažované lineárne po výške prierezu:

$$\Delta \epsilon_{p,i} = \frac{\epsilon_{cu}}{x} (d_{p,i} - x) \tag{4}$$

Pomerné pretvorenie betonárskej výstuže:

$$\epsilon_{s,i} = \frac{\epsilon_{cu}}{X} (d_{s,i} - x) \tag{5}$$

Pomerné pretvorenie betónu v tlaku po výške prierezu z merané od najviac tlačenej okraja:

$$\epsilon_c(z) = \frac{\epsilon_{cu}}{x} (x - z) \tag{6}$$

Prírastok predpínacej sily po zaťažení konštrukcie:

$$\Delta F_{p,i} = (\sigma_{p,i} - \sigma_{p0,i}) A_{p,i} \tag{7}$$

Sila v betonárskej výstuži:

$$F_{s,i} = \sigma_{s,i} A_{s,i} \tag{8}$$

Sila v tlačenej betóne po výške prierezu:

$$F_c \int_0^x b \sigma_c(z) dz \tag{9}$$

Poloha neutrálnej osi x bola stanovená z podmienky rovnováhy horizontálnych síl v priereze (10).

Podmienka rovnováhy síl:

$$F_c - \sum F_{s,i} - \sum \Delta F_{p,i} - N_p = 0 \tag{10}$$

Ohybová odolnosť prierezu bola následne stanovená z podmienky rovnováhy momentov ku strednici prierezu (11). Do ohybovej odolnosti neboli zahrnuté sekundárne momenty od predpätia. Tie boli uvažované ako zaťaženie a pripočítané k účinkom pôsobiacich zaťažení.

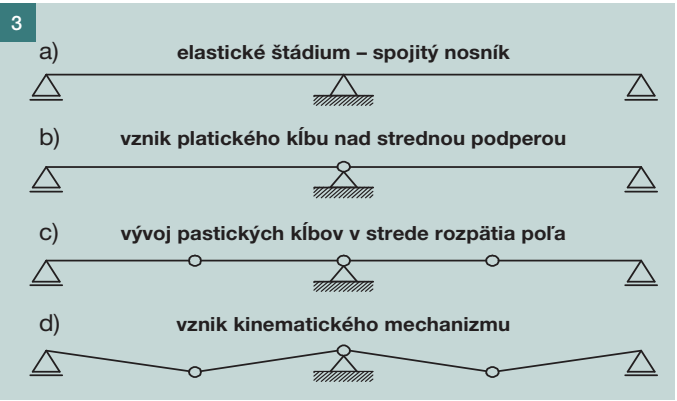
Podmienka rovnováhy ohybových momentov, kde z_c je poloha výslednice tlakových napätí v betóne vzhľadom na tlačenej okraj prierezu:

$$M_R = F_c (h/2 - z_c) + \sum F_{s,i} (d_{s,i} - h/2) + \sum \Delta F_{p,i} (d_{p,i} - h/2) + M_p \tag{11}$$

Experimentom sa zistilo, že použitie protikoróznej ochrany na báze olejových emulzií nemalo výrazný vplyv na priebeh vnútorných síl v konštrukcii, či v štádiách zaťaženia na úrovni medzných stavov použiteľnosti, ale aj v štádiách pri dosiahnutí ohybovej odolnosti. Preto tento postup bol v plnej miere použitý pre výpočet ohybovej odolnosti prierezov nosníkov vystužených súdržnými predpínacími lanami (nosníky s označe-



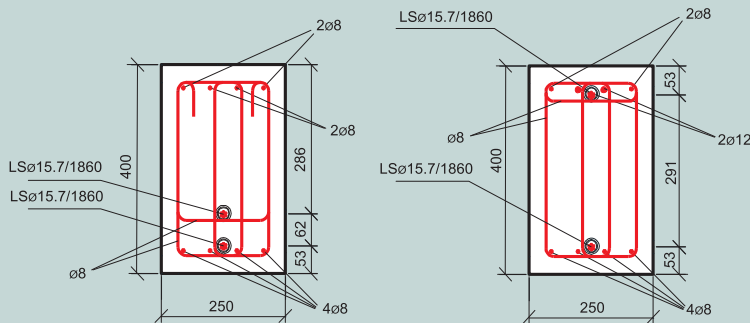
2



3

REZ 1
Priečný rez v strede poľa

REZ 2
Priečný rez nad strednou podporou



4

Obr. 2 Inštalácia elasto-magnetického senzora v prípade predpínacích lán so súdržnosťou ■ Fig. 2 Elasto-magnetic sensors installed on the tendons

Obr. 3 Zmena statického systému zo staticky neurčitej konštrukcie až po vznik kinematického mechanizmu ■ Fig. 3 Change of structural system from a statically indeterminate beam to kinematic mechanism

Obr. 4 Schéma usporiadania výstuže v kritických priečných rezoch ■ Fig. 4 Layouts of critical cross-sections

Obr. 5 Princíp posúdenia ohybovej kapacity priečného rezu so súdržnou predpínacou výstužou ■ Fig. 5 Model for assessment of bending capacity of cross-section with bonded tendons

Tab. 2 Namerané materiálové charakteristiky betónu – stredné hodnoty ■ Tab. 2 Measured material properties of concrete – mean values

	N1	N2	N3	N4	N5	N6
$f_{c,cube}$ [MPa]	53,93	53,32	60	66,1	60,78	61,48
E_c [GPa]	33,161	34,132	35,584	37,784	37,414	36,578

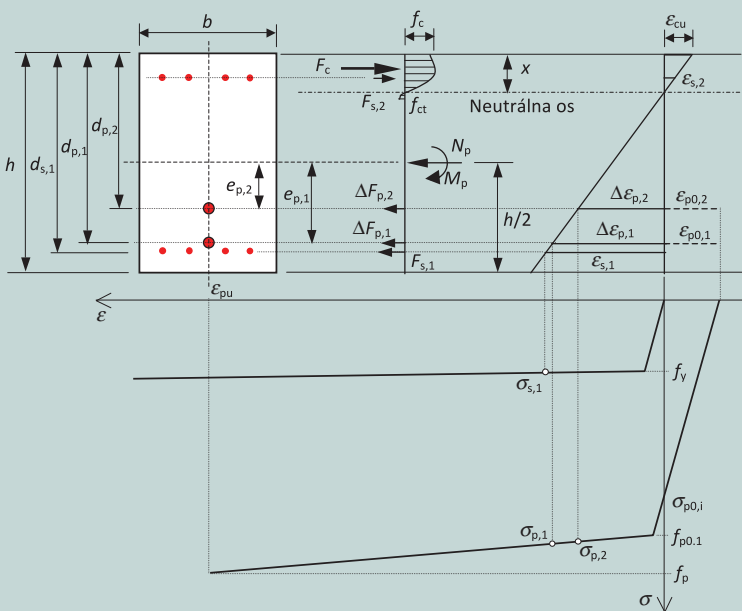
Tab. 3 Namerané materiálové charakteristiky betonárskej a predpínacej ocele – stredné hodnoty ■ Tab. 3 Material properties of reinforcing and prestressing steel – mean values

Ø [mm]	Betonárska oceľ				Predpínacia oceľ			
	f_y [MPa]	f_t [GPa]	E_s [GPa]	ϵ_u [%]	f_p [MPa]	$f_{p0,1}$ [MPa]	ϵ_u [%]	E_p [GPa]
12	508	601	212	11	1862	1516,3	6	195,7
8	567	649	200	8				

Tab. 4 Výsledky z EM snímača – nosníky vystužené súdržnými lanami ■ Tab. 4 Results from elasto-magnetic sensors – beams prestressed by bonded tendons

Priemerná sila na aktívnej strane deviovaného kábla po predpätí	[kN]	177,7
Priemerná sila na pasívnej strane deviovaného kábla po predpätí	[kN]	187,5
Priemerná hodnota poklzu v kotvení	[mm]	5
Koeficient trenia stanovený z merania	[-]	0,135

5

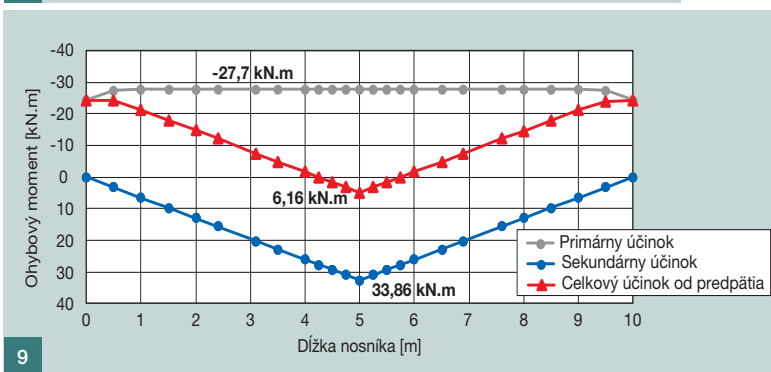
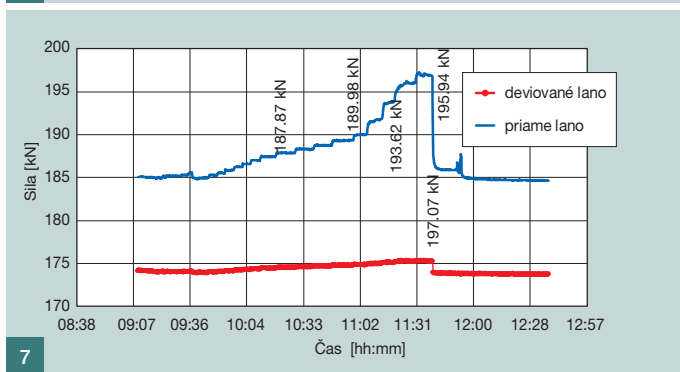
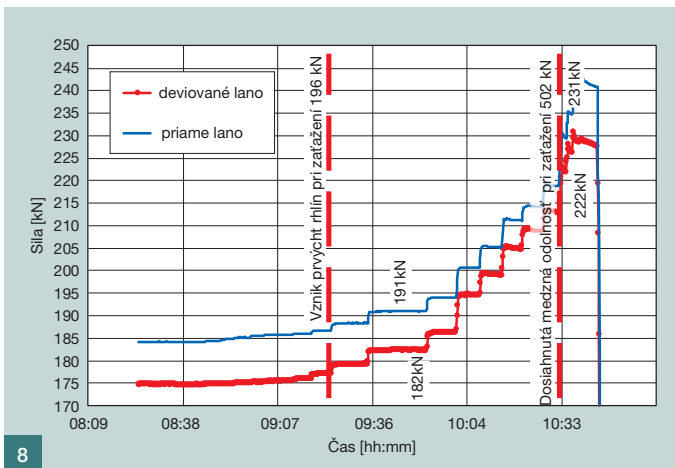
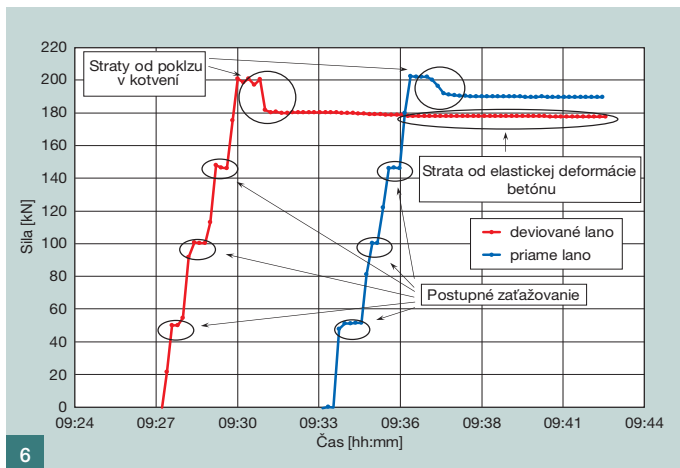


Firmní prezentace

PROFESIONÁLNÍ ŘEŠENÍ

výzkum ■ vývoj ■ výroba ■ obchod ■ poradenství
pro sanace betonových konstrukcí

Redrock Construction s.r.o.
Újezd 40/450, Michnov palác
Praha 1, Malá Strana
Telefon: +420 283 893 533
Fax: +420 284 816 112
E-mail: info@redrock-cz.com
www.redrock-cz.com



ním N1, N2) a pre nosníky vystužené lanami ošetrenými protikoróznou emulziou (nosníky N3, N4). Pre výpočet ohybovej odolnosti nosníkov s lanami bez súdržnosti boli použité priamo hodnoty predpínacej sily získané prostredníctvom EM snímačov (nosníky N5, N6). Ohybová odolnosť, vypočítaná vyššie spomenutým nelineárnym výpočtom, v strede rozpätia poľa pre súdržné laná a laná s protikoróznou ochranou bola stanovená na hodnotu 192,3 kNm a pre nesúdržné laná na hodnotu 167,9 kNm. V mieste vnútornej podpery bola výpočtom stanovená odolnosť 150,8 kNm pre súdržné laná a laná s protikoróznou ochranou, pre nesúdržné laná bola stanovená ohybová odolnosť na hodnotu 136,3 kNm.

VÝSLEDKY MERANÍ

Materiálové charakteristiky

Pre potreby analýzy boli skúšané nasledujúce materiálové charakteristiky: kocková pevnosť betónu, modul pružnosti betónu, medza kľuzu a ťahová pevnosť betonárskej výstuže, modul pružnosti betonárskej výstuže, ťahová pevnosť predpínacej výstuže pri pomernom pretvorení 0,1 % a modul pružnosti predpínacej ocele. Materiálové vlastnosti betónu a injektážnej malty boli skúšané v čase experimentu. Spolu boli vyrobené a skúšané tri kocky, tri hranoly

Tab. 5 Reakcie a im prislúchajúce ohybové momenty – nosníky N1, N2
 Tab. 5 The reactions and corresponding bending moment – beams N1, N2

Súdržné laná	Reakcia v krajných podperách R1	Reakcia v mieste strednej podpery R2	Ohybový moment v strede rozpätia	Ohybový moment nad strednou podperou
	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]
vlastná tiaž g_0	6,09	12,58	6,34	-3,58
tiaž skúšobných zariadení	0,41	1,19	0,98	-0,21
sekundárne účinky	6,45	-12,9	15,41	32,1
zaťaženie lismi 2x 259,05 kN	69,97	370,06	167,93	-196,3

Tab. 6 Reakcie a im prislúchajúce ohybové momenty – nosníky N3, N4
 Tab. 6 The reactions and corresponding bending moment – beams N3, N4

Súdržné laná ošetrené s protikoróznou emulziou	Reakcia v krajných podperách R1	Reakcia v mieste strednej podpery R2	Ohybový moment v strede rozpätia	Ohybový moment nad strednou podperou
	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]
vlastná tiaž g_0	7,27	10,57	9,05	3,39
tiaž skúšobných zariadení	0,18	1,65	0,42	-1,37
sekundárne účinky	6,57	-13,14	15,77	32,85
zaťaženie lismi 2x 259,05 kN	69,91	361,38	167,78	-192,1

Tab. 7 Reakcie a im prislúchajúce ohybové momenty – nosníky N5, N6
 Tab. 7 The reactions and corresponding bending moment – beams N5, N6

Nesúdržné laná	Reakcia v krajných podperách R1	Reakcia v mieste strednej podpery R2	Ohybový moment v strede rozpätia	Ohybový moment nad strednou podperou
	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]
vlastná tiaž g_0	8,4	8,24	11,78	9,13
tiaž skúšobných zariadení	0,36	1,28	0,86	-0,45
sekundárne účinky	7,09	-14,19	17,03	35,45
zaťaženie lismi 2x 243,3 kN	58,69	306,08	140,86	-182,8

Tab. 8 Porovnanie teoretických a experimentom dosiahnutých výsledkov – nosníky N1, N2

■ Tab. 8 Comparison between theoretical and experimental results – beams N1, N2

Nosníky vystužené súdržnými lanami		Teoretická ohybová odolnosť	Odolnosť ¹ dosiahnutá experimentálne	
			so sekundárnymi účinkami	bez sekundárných účinkov
		M_R	$M_{E.exp}$	$M_{E.exp}$
Rez 1-1	[kNm]	192,3	190,7	174,9
	[%]	100	99,2	91
Rez 2-2	[kNm]	-150,8	-168,8	-200,9
	[%]	100	111,4	133,2

¹ Odolnosť predstavujú ohybové momenty od experimentálneho zaťaženia stanovené na základe nameraných reakcií a sily v lisoch pri vzniku kinematického mechanizmu. Momenty sú uvedené v tab. 5 až 7.

Tab. 9 Porovnanie teoretických a experimentom dosiahnutých výsledkov – nosníky N3, N4

■ Tab. 9 Comparison between theoretical and experimental results – beams N3, N4

Nosníky vystužené lanami ošetrenými protikoróznou emulziou		Teoretická ohybová odolnosť	Odolnosť ¹ dosiahnutá experimentálne	
			so sekundárnymi účinkami	bez sekundárných účinkov
		M_R	$M_{E.exp}$	$M_{E.exp}$
Rez 1-1	[kNm]	192,3	193	177,3
	[%]	100	100,4	92,2
Rez 2-2	[kNm]	-150,8	-157,2	-190,1
	[%]	100	104,3	126

Tab. 10 Porovnanie teoretických a experimentom dosiahnutých výsledkov – nosníky N5, N6

■ Tab. 10 Comparison between theoretical and experimental results – beams N5, N6

Nosníky vystužené lanami bez súdržnosti		Teoretická ohybová odolnosť	Odolnosť ¹ dosiahnutá experimentálne	
			so sekundárnymi účinkami	bez sekundárných účinkov
		M_R	$M_{E.exp}$	$M_{E.exp}$
Rez 1-1	[kNm]	167,9	170,5	153,5
	[%]	100	101,6	91,4
Rez 2-2	[kNm]	-136,3	-138,3	-173,2
	[%]	100	101,5	127,1

a tri valce pre každý nosník. Získané výsledky materiálových charakteristík betónu sú zobrazené v tab. 2 a charakteristiky predpínacej a betonárskej výstuže v tab. 3.

Sily od predpätia

Na obr. 6 je zobrazený záznam z merania predpínacej sily pomocou elasto-

magnetických snímačov. Z obrázku jasne vidieť rozdielny priebeh zmeny napätia pre jednotlivé laná. Obe laná v priereze boli napínané z rovnej strany, pričom ako prvé bolo napínané deviované lano, a potom priame lano. Laná sa napínali postupne v štyroch krokoch po 50 kN. Zo záznamu na obr. 6 jasne vidieť stratu napätia v dôsledku pokľzu

Obr. 6 Záznam z EM snímača počas napínania jednotlivých lán v nosníku ■ Fig. 6 Development of prestressing force in time recorded by elasto-magnetic sensor

Obr. 7 Záznam z EM snímača počas zaťažovania nosníka N1 vystuženého súdržnými lanami ■ Fig. 7 EM sensors measurement record during the experiment for bonded tendons

Obr. 8 Záznam z EM snímača počas zaťažovania nosníka vystuženého nesúdržnými lanami ■ Fig. 8 EM sensors measurement record during the experiment for unbonded tendons

Obr. 9 Ohybové momenty spôsobené priamym káblom ■ Fig. 9 Bending moments caused by straight tendon on tested beams

Obr. 10 Pohľad na zdeformovaný nosník pri vzniku kinematického mechanizmu ■ Fig. 10 Deformation of experimental beam prior to kinematic mechanism development

v kotvení, pružnej deformácie betónu a tiež v dôsledku postupného napínania. Výsledky zaznamenané EM snímačmi poskytli dôležité informácie potrebné pre kalibráciu teoretickej analýzy a pre posúdenie okamžitých strát od predpätia. Z výsledkov uvedených v tab. 4 je vidieť zhodu nameraných hodnôt s výrobcom deklarovanými hodnotami pre daný predpínací systém. Výrobcom stanovená maximálna hodnota pokľzu v kotvení je 6 mm, čomu zodpovedá aj experimentálne dosiahnutý priemerný pokľz 5 mm. Nameraná strata koeficientu trenia bola 0,135, pričom výrobca pre daný typ použitých káblových kanálikov (VSL PT-Plus) deklaruje hodnotu koeficientu trenia 0,12 až 0,14. Na základe toho možno konštatovať, že počas výroby ani počas predpínania nedošlo k výraznejšej chybe a namerané výsledky boli použiteľné pre ďalšiu analýzu.

Na obr. 7 je zobrazený záznam z EM



snímačov vytvorený počas zaťažovania nosníka so súdržnými káblami. Snímače sa nachádzajú 0,8 m od konca nosníka, mimo kritických oblastí. Z obrázku je zrejmy veľmi malý prírastok sily v polygonálnom a trochu väčší v priamom kábli až do vzniku kinematického mechanizmu. Na obr. 8 je záznam z EM snímača počas skúšky nosníka predpätého lanami bez súdržnosti. Už od vzniku prvej trhliny je možné na oboch kábloch sledovať prírastok sily spôsobený každým prírastkom experimentálneho zaťaženia.

Vnútrorné sily a reakcie

Na obr. 9 je zobrazený priebeh jednotlivých zložiek ohybových momentov od predpätia priameho kábla na nosníku N1 so súdržným predpätím.

Z obrázku vyplýva, že sekundárne účinky, v danom prípade, tvorili 122 % z hodnoty primárnych účinkov. V tab. 5 až 7 sú podrobne uvedené hodnoty reakcií a im zodpovedajúce ohybové momenty pre jednotlivé zaťažovacie stavy.

Meranie reakcií v každom zaťažovacom kroku umožnilo ľahké zrekonštruovanie priebehu vnútorných síl (ohybové momenty, šmykové sily) od všetkých zaťažení vrátane sekundárnych účinkov predpätia. Experimentom dosiahnuté ohybové momenty v kritických prierezoch by mali preukázať zhodu s teoreticky stanovenými hodnotami ohybovej odolnosti. Porovnanie nameraných a teoretických hodnôt takto môže poskytnúť jasný výsledok prítomnosti alebo zániku sekundárnych účinkov pri dosiahnutí MSÚ. V tab. 8 až 10 je zobrazené porovnanie teoretických hodnôt ohybovej odolnosti s experimentálne nameranými hodnotami momentov od medzného zaťaženia, podľa typu súdržnosti použitej predpínacej výstuže. Výsledky sú uvedené v [kNm] aj v [%] pre jednotlivé úrovne súdržnosti lán a pre vybrané kritické prierezy. Z uvedených hodnôt vyplýva, že výsledky dosiahnuté experimentom, s uvážením sekundárnych účinkov, majú podstatne lepšiu zhodu s teoretickou hodnotou ohybovej odolnosti kritických prierezov oproti momentom bez uváženia sekundárnych účinkov. Na základe týchto výsledkov možno konštatovať, že aj po vzniku plastického kĺbu nad strednou podperou, a teda zmenou staticky neurčitej konštrukcie na dva staticky určité nosníky, resp. pri dosiahnutí kinematického mechanizmu, sa sekundárne účinky z konštrukcie nevytratili.

ZÁVER

Vplyv zmeny statickej sústavy, v dôsledku vzniku a rozvoja plastických kĺbov na konštrukcii, bol sledovaný experimentálnym meraním na celkom šiestich dodatočne predpätých dvojpoľových nosníkoch. Nosníky boli zaťažované postupne narastajúcim vonkajším zaťažením do vytvorenia plastických kĺbov v kritických prierezoch a následne do vzniku kinematického mechanizmu. Priebeh vnútorných síl bol zaznamenávaný počas celého priebehu zaťažovacej skúšky s uvážením sekundárnych účinkov od predpätia. Porovnaním ohybových momentov v kritických prierezoch, dosiahnutých experimentálne s a bez sekundárnych účinkov predpätia, s teoretickými hodnotami ohybovej odolnosti sa preukázalo, že aj po vzniku plastických kĺbov, a teda po zmene statickej schémy konštrukcie, sa sekundárne účinky z konštrukcie nevytratili. Napríklad v prípade nosníkov predpätých so súdržnými predpínacími lanami bez uváženia sekundárnych účinkov bol rozdiel medzi nameranou hodnotou a teoretickou hodnotou ohybového momentu v priereze 1-1 v poli -9 %, kým v prípade uváženia prítomnosti sekundárnych účinkov bol rozdiel ohybových momentov len -0,8 %. V priereze 2-2 nad podperou boli rozdiely ešte výraznejšie. Bez uváženia sekundárnych účinkov bol dosiahnutý rozdiel ohybových momentov 33,2 % a v prípade prítomnosti sekundárnych účinkov bol rozdiel teoretickej a nameranej hodnoty 11,4 %.

Na základe týchto výsledkov je možné konštatovať, že sekundárne účinky od predpätia sú stálou zložkou zaťaženia na konštrukcii. Je preto nevyhnutné s týmito účinkami uvažovať vo všetkých zaťažovacích kombináciách vrátane návrhových. Projektanti by sa nemali pri návrhu a posudzovaní staticky neurčitých predpätých konštrukcií spoliehať na redistribúciu sekundárnych účinkov od predpätia v prípade očakávaného vzniku plastického kĺbu, spojeného so zmenou statickej sústavy, ani pri výpočte ohybovej odolnosti konštrukcie pre MSÚ s použitím nelineárnej analýzy.

Projekt bol realizovaný s finančnou pomocou Agentúry na podporu výskumu a vývoja Slovenskej republiky na základe zmluvy APVV-0442-12.

Naše poďakovanie tiež patrí firme VSL Systémy/CZ/, s. r. o., za poskytnutie kotiev a káblových kanálikov pre účely experimentu.

Literatúra:

- [1] ANDREW, R. P., WITT, P. Prestressed Concrete – Statically Indeterminate Structures. *A Symposium on Prestressed Concrete Statically Indeterminate Structures, 24-25 September 1951: papers and discussion at a symposium organized by the Cement and Concrete Association, in conjunction with the Prestressed Concrete Development Group at the Institution of Civil Engineers.* London, 1951.
- [2] MATTOCK, A. H. Secondary moments and moment redistribution in ACI318-77 Code. In: COHN, M. Z. (Ed.) *Symposium Nonlinearity and Continuity in Prestressed Concrete.* Vol. 3, p. 27-48. Ontario, Canada: University of Waterloo, 1983.
- [3] BURGUYNE, Ch. *Analysis of Continuous Prestressed Concrete Beams* [online]. 2005. Dostupné z: www.civ.eng.cam.ac.uk/cjb/papers/cp71
- [4] ARAVINTHAN, T., WITCHUKREANGKRAI, E., MUTSUYOSHI, H. Flexural Behavior of Two-Span Continuous Prestressed Concrete Girders with Highly Eccentric External Tendons. *ACI Structural Journal.* 2005, May-June, p. 402-411.
- [5] NAVRÁTIL, J. *Prestressed concrete structures.* 2nd ed. Ostrava: Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, 2014, 220 p. ISBN 978-80-248-3625-6.
- [6] LACO, J. Bond behavior of prestressing strands coated with corrosion protection emulsifiable oil. In: *The 11th Central European Congress on Concrete Engineering, Innovative Concrete Technology in Practice.* 1-2 October 2015, Hainburg, Austria, 2015, p. 346-349.

prof. Ing. Jaroslav Halvoník, PhD.
e-mail: jaroslav.halvonik@stuba.sk



Ing. Peter Pažma
e-mail: peter.pazma@stuba.sk



Ing. Katarína Gajdošová, PhD.
e-mail: katarina.gajdosova@stuba.sk



všichni: Slovenská technická
univerzita v Bratislave
Stavebná fakulta
Katedra betónových konštrukcií
a mostov

Text článku byl posouzen odborným lektorem.
The text was reviewed.