

MONITORING NAPÄTOSTI OBJEKTU 215-00 V PREŠOVE

Milan Chandoga¹ – Ján Sedlák² – Andrej Jaroševič³ – Eduard Sedlák⁴

ABSTRAKT

Mostný objekt 215-00 na D1 je tvorený dvojtrámovou konštrukciou s 10 poliami o rozpätiach 29 m + 8×35 m + 29 m, celková dĺžka mosta je 347 m. Súčasťou pozdĺžnej nosnej konštrukcie je vzperadlový systém, vytvorený z dvojice voľných káblov s vysokou excentricitou (vedené mimo obrys trémov) a deviátorov, nachádzajúcich sa v strede rozpätí jednotlivých polí. Z dôvodu použitia konštrukčného systému, ktorý sa na Slovensku doteraz nerealizoval, sa rozhodlo o monitorovaní mosta počas jeho výstavby, osadzovaní a predpínaní voľných káblov a počas zaťažkávacej skúšky.

1 ÚVOD

Most 215-00 (Obr. 1) sa nachádza na diaľnici D1 Fričovce – Prešov západ a je navrhnutý ako spojitá dodatočne predpätá dvojtrámová doska podopretá v stredoch rozpätia polí káblovým tiahom. Rozpätia polí sú 29 m + 8×35 m + 29 m a celková dĺžka mosta je 347 m. Podobná konštrukcia – viadukt Osomort (Vall d'Ossormort) s rozpätiami polí 32 m + 11×40 m + 32 m a celkovou dĺžkou 504 m bol realizovaný v rokoch 1993 – 1995 v Girone (Španielsko) a je považovaný za veľmi úspešné technické a architektonické dielo. Základom použitého konštrukčného systému sú vonkajšie káble vo forme tiahla, ktoré sú pre vyššiu účinnosť predpätia vedené mimo obrys trému nosnej konštrukcie. Tento systém zaradujeme do kategórie mostov s hybridným predpätím.



Obr. 1 Pohľad na most 215-00

Objekt 215-00 je prvou realizáciou betónovej mostnej konštrukcie tohto druhu na Slovensku a k podrobnému monitorovaniu napätosti a deformácií nosnej konštrukcie a káblov vonkajšieho predpätia sa pristúpilo z viacerých dôvodov, a to najmä:

¹ Doc. Ing. PhD., PROJSTAR-PK spol. s r.o.,
Nad Dunajom 50, 841 04 Bratislava, tel.: (02)65422432, e-mail: milan.chandoga@stonline.sk

² Ing., Stavebná fakulta STU v Bratislave, Katedra betónových konštrukcií a mostov,
Radlinského 11, 813 68 Bratislava, tel.: (02)59274-295, e-mail: jan.sedlak@stuba.sk

³ Doc. RNDr. PhD., PROJSTAR-PK spol. s r.o.,
Nad Dunajom 50, 841 04 Bratislava, tel.: (02)65422432, e-mail: jarosevic@zoznam.sk

⁴ Ing., Inžinierske stavby a.s., Závod 06 Prešov,
Lubochnianska 7, 080 06 Lúbochna, tel.: (051)7764171, e-mail: sedlake@iske.sk

- boli použité vonkajšie káble (VK), zostavené z 19 lán typu Monostrand a osadené mimo obrys nosnej konštrukcie. Pre uvedené typy VK chýbajú kritéria pre výšku základného predpätia a rozkmitu napätosti od pohyblivého zaťaženia;
- vzhľadom na obmedzený prístup ku koncovým kotvám sa VK predpínali po jednotlivých lanách. Meraním napätosti je možné kontrolovať straty predpätia z postupného napínania a zvýšeného trenia z radiálneho zaťaženia lán typu Monostrand v ich deviácii;
- použitý monitorovací systém dokáže zabezpečiť dlhodobé sledovanie napätosti VK;
- vyhodnotením merania je možné rozšíriť poznanie v oblasti navrhovania a výstavby mostov s káblami mimo obrys nosnej konštrukcie mosta, prípadne vypracovať odporúčania pre projektantov mostov typu extradosed.

2 PREDMET MONITORINGU

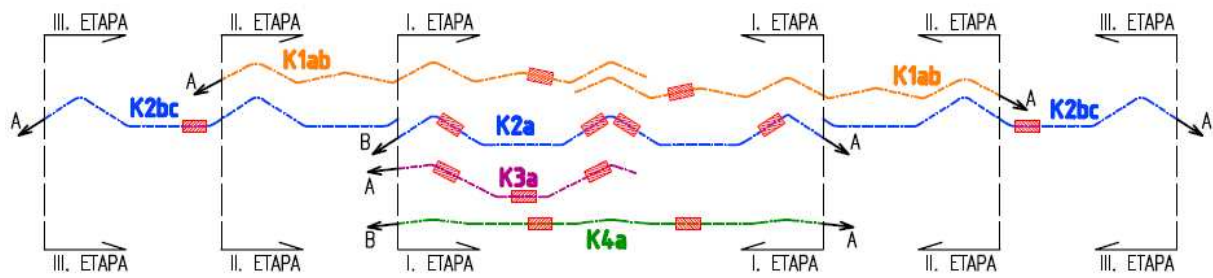
Monitorovanie mostnej konštrukcie bolo rozdelené do 3 etáp:

- 1.) V priebehu výstavby sa v rámci prvých dvoch pracovných etáp vyhodnocovali laboratórne skúšky zamerané na zistenie kockovej pevnosti a modulu pružnosti betónu, overovali sa skutočné predĺženia predpínacej výstuže oproti teoretickým hodnotám. Počas predpínania káblov 1. etapy bola zameraná zmena deformačného stavu nosnej konštrukcie, a hlavné ťažisko merania sa sústredilo na zmenu napätostného stavu nosnej konštrukcie (pomerné pretvorenie betónu a sila v kábloch) počas predpínania káblov 1. etapy (november 2008), 2. etapy v smere na Prešov (marec 2009) a v smere na Poprad (marec 2009); 3. etapy v smere na Prešov (apríl 2009) a v smere na Poprad (máj 2009), a na výsledný napätostný stav po dokončení poslednej 5. etapy (august 2009);
- 2.) Po dokončení hlavnej nosnej konštrukcie sa v rámci samostatnej pracovnej etapy pristúpilo k predpínaniu vonkajších káblov (október 2009). Podrobne bola sledovaná zmena napätostného stavu nosnej konštrukcie (pomerné pretvorenie betónu a sila vo vonkajších kábloch) v poliach 4, 5, 6 a 7, a kontrolné predĺženia všetkých VK;
- 3.) Záverečným krokom bolo uskutočnenie zaťažkávacej skúšky (november 2009). Počas skúšky bol vo vybraných polohách zaťaženia sledovaný rozkmit predpínacej sily vo vonkajších kábloch, ako aj napätostný stav nosnej konštrukcie (pomerné pretvorenie betónu).

3 MERACIE PRVKY

3.1 Meranie sily v súdržných kábloch

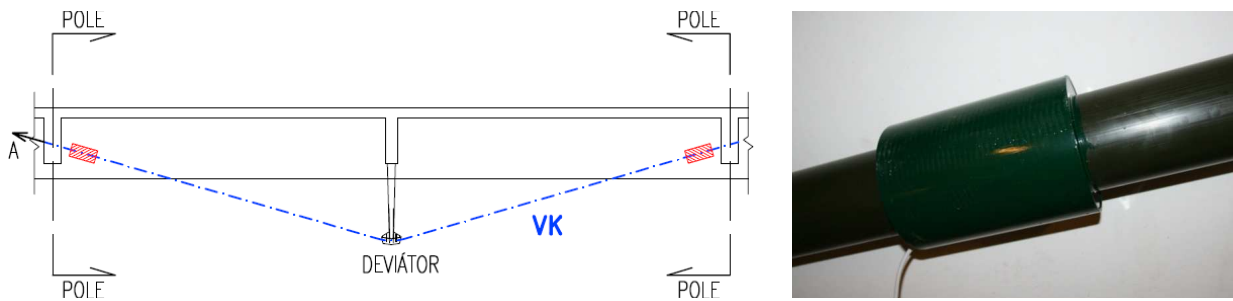
Sila v kábloch bola vyhodnotená z merania magnetického toku pomocou elastomagnetickej metódy. Princíp merania spočíva v tom, že pri mechanickom namáhaní ocele sa menia jej magnetické charakteristiky [2]. Na sledovaných 12-lanových, 13-lanových a 19-lanových kábloch boli osadené elastomagnetické (EM) snímače PSS90 v celkovom počte 13 kusov (Obr. 2), jeden snímač slúžil ako nulový. Snímače sa nachádzajú na kábloch K1ab (12-lanový kábel dĺžky 85,3 m), K2a (13-lanový kábel dĺžky 84,6 m), K2bc (13-lanový kábel dĺžky 72,7 m), K3a (12-lanový kábel dĺžky 47,2 m) a K4a (19-lanový kábel dĺžky 84,0 m) v určených pozíciách, zvolených pre sledovanie počiatkovej predpínacej sily, ako aj jej prenos po dĺžke predpínacej jednotky.



Obr. 2 Schéma geometrie predpínacích káblov a umiestnenie EM snímačov

3.2 Meranie sily vo vonkajších kábloch

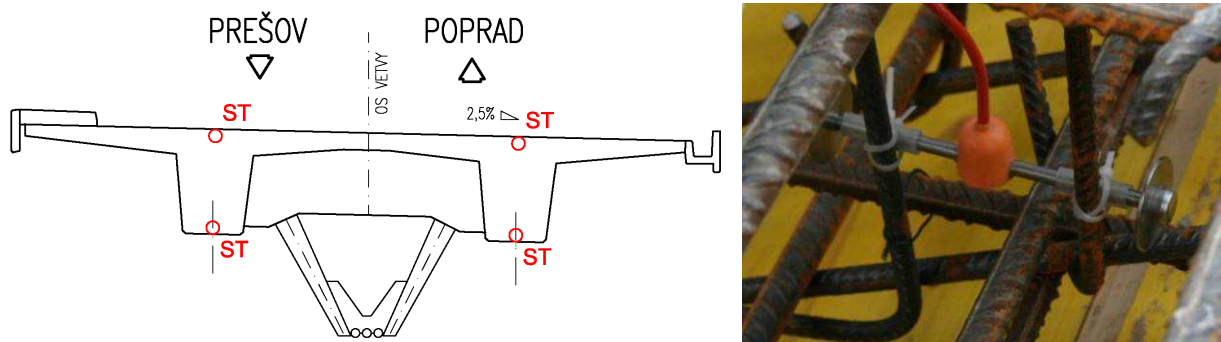
Každé pole obsahuje dvojicu vonkajších predpínacích 19-lanových káblov, pre 10 polí je to spolu 20 káblov. EM snímače PSS140 (Obr. 3) sú osadené na začiatku a konci káblov 4 polí v strede mosta. Celkovo je na vonkajších kábloch osadených 16 EM snímačov PSS140. Ich poloha je stanovená pre zistenie prenosu predpínacej sily z aktívnej strany kábla na pasívnu.



Obr. 3 Schéma geometrie VK s umiestnením EM snímačov a detail EM snímača

3.3 Meranie pomerného pretvorenia v betóne

Meranie napätosti betónu vo vybraných pričných rezoch mosta 1. etapy bolo prevedené pomocou strunových tenzometrov, uchytených o mäkkú výstuž. Strunové tenzometre s teplomerom sú osadené v 5-tich pričných rezoch (podpera 5, stred poľa 5-6, podpera 6, stred poľa 6-7, podpera 7) v každom tráme v hornom a spodnom vlákne betónu pre určenie priebehu pomerného pretvorenia po výške prierezu.



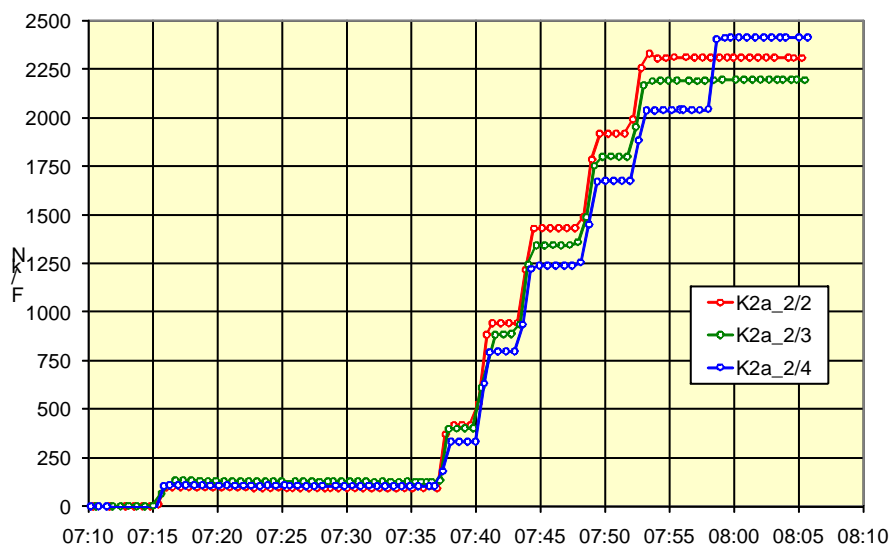
Obr. 4 Umiestnenie strunových tenzometrov v pričnom reze a detail osadenia

4 VYBRANÉ VÝSLEDKY MONITORINGU

Pre celkový rozsah monitoringu sú prezentované iba vybrané najzaujímavejšie výsledky.

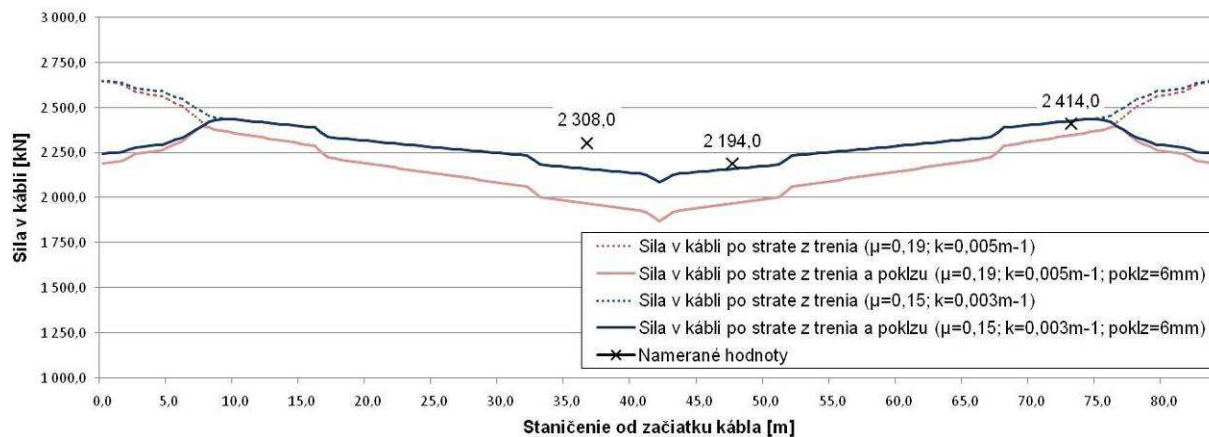
4.1 Sila v súdržných káblach počas predpínania

Kábel K2a, na ktorom sú osadené 2 EM snímače bol predpínaný v prvej pracovnej etape. Najprv sa kábel predopol na plnú hodnotu predpínacej sily zo strany „A“ (Obr. 2), následne bol dopnutý zo strany „B“. Pribeh sily v kábli (v miestach osadenia snímačov) je zobrazený na Obr. 5. Z nameraných hodnôt síl je stanovený koeficient trenia na jednotlivých úsekoch medzi snímačmi.



Obr. 5 Nárast predpínacej sily počas predpínania v miestach EM snímačov na kábli K2a

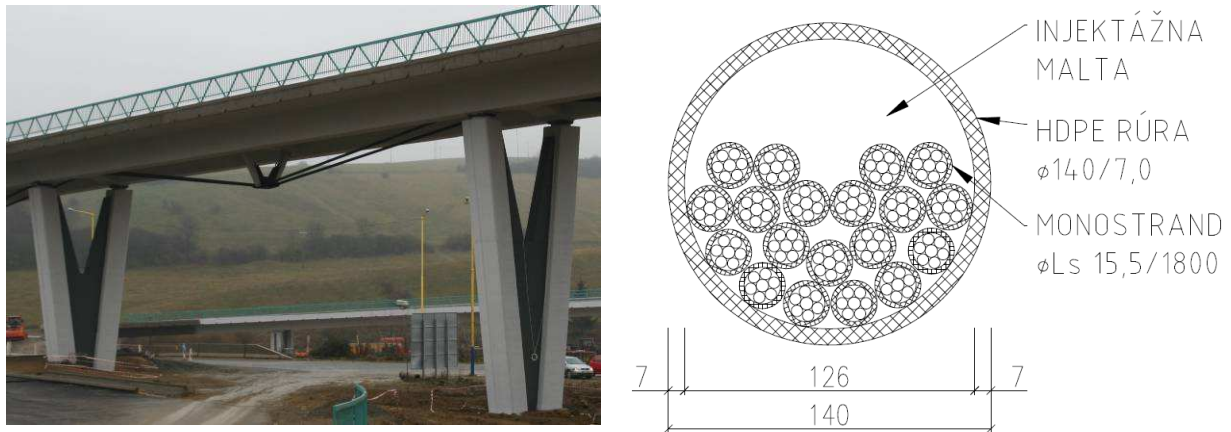
Porovnanie teoretických a nameraných hodnôt predpínacej sily v kábli K2a po jeho dĺžke je znázornený na Obr. 6. Pre zistenie priebehu predpínacej sily v kábli počas merania sa na kábel umiestnili vo vybraných pozíciách EM snímače. Teoretické hodnoty rozloženia sily v kábli sú vypočítané s použitím odporúčaných hodnôt (*fib* Model Code) 0,19 pre súčiniteľ trenia medzi výstužou a káblovým kanálíkom (μ) a $0,005 \text{ m}^{-1}$ pre neprojektované uhlové premiestnenie vnútorných predpínacích výstuží (k). Zároveň je však doporučené zmerať priebeh predpínacej sily po dĺžke kábla pre zistenie skutočných koeficientov trenia. V tomto prípade meranie potvrdilo nižšie hodnoty strát z trenia ($\mu=0,15$ a $k=0,003 \text{ m}^{-1}$).



Obr. 6 Teoretický prenos predpínacej sily po dĺžke kábla K2a a namerané hodnoty

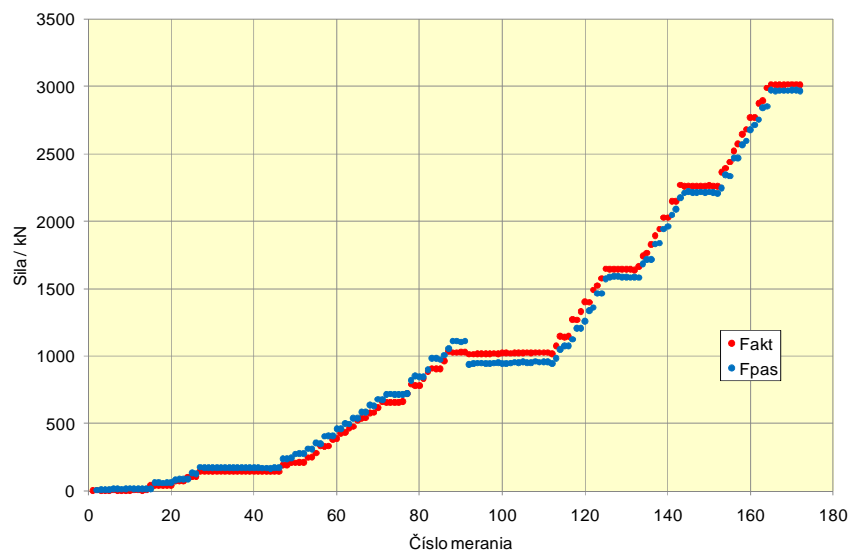
4.2 Sila vo vonkajších káblach počas predpínania

Vonkajšie káble predstavujú jednoduchú geometriu v tvare „V“, sú zložené z 19 lán typu monostrand v medziláhlych poliach a 12 lán typu monostrand v krajných poliach, ktoré sú natlačené do HDPE ochrannej rúry s vonkajším priemerom 140 mm (Obr. 7). Umiestnenie koncových kotiev vonkajších káblov a sklon kábla v prierečníku neumožňovali použitie veľkokapacitného predpínacieho lisu. Z tohto dôvodu sa zvolilo predpínanie pomocou jednolanového predpínacieho lisu. Po predopnutí sa rúra vyplnila injektážnou maltou.



Obr. 7 Vonkajšie káble na mostnom poli a priečny rez káblom

Jednou z úloh monitoringu bolo okrem iného zabezpečiť spoľahlivý prenos predpínacej sily z jednej strany kábla na druhú. Na základe meraní sa rozhodlo o jednostrannom napínaní vonkajších káblov z dôvodu malej hodnoty straty predpínacej sily z trenia na pasívnej strane. Výsledky nárastu predpínacej sily na aktívnej a pasívnej strane počas predpínania kábla VK6 sú znázornené na Obr. 8.



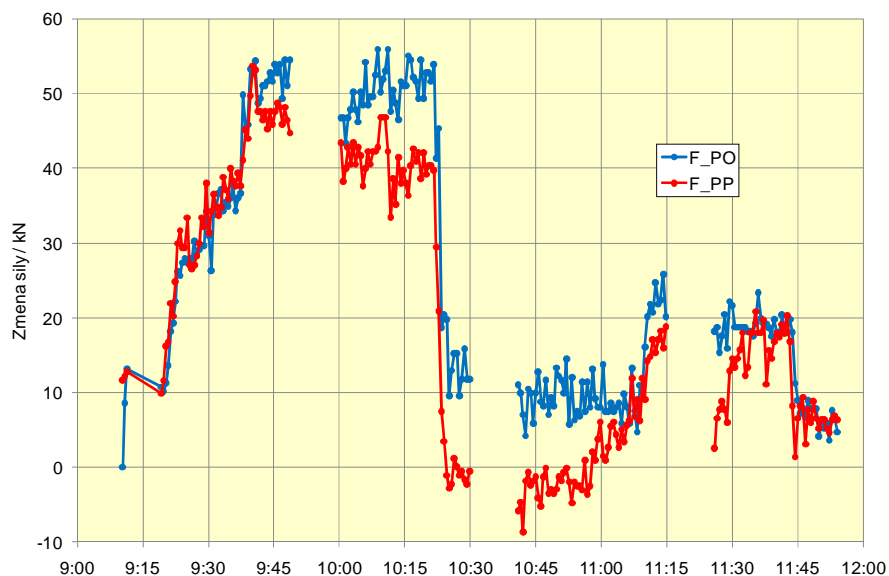
Obr. 8 Nárast predpínacej sily počas predpínania na aktívnej a pasívnej strane kábla VK5L

EM snímače sú umiestnené na oboch koncoch vonkajších káblov. Predpínanie bolo realizované jednolanovým predpínacím lisom v 2 krokoch. Najprv sa každé lano zo zväzku predoplo na základné napätie 100 bar, čím sa docielilo narovnanie jednotlivých lán a ich

vzájomné usporiadanie v rámci priečného rezu ochrannej HDPE rúry. V druhom kroku sa pomocou jedného zdvihu predpínacieho lisu bez prekotvenia dosiahla návrhová hodnota predpínacej sily v kábli. Počas tohto zdvihu sa zapisovalo kontrolné predĺženie každého z lán na hodnotách napätia 200 – 300 – 365 bar. Takýmto spôsobom boli predopnuté všetky vonkajšie káble, pričom 8 z nich bolo počas predpínania merané. Výsledný graf nárastu predpínacej sily na aktívnej a pasívnej strane počas jednostranného predpínania je zobrazený na Obr. 8. Straty na pasívnej strane pri všetkých meraných kábloch predstavujú hodnoty v rozsahu 4-5%. Ide o veľmi nízku hodnotu. Zo skúsenosti vieme, že dopínanie lán môže silu na pasívnej strane kábla skôr poškodiť ako navýšiť. Okrem toho pri dopínaní môže dôjsť k zakotveniu čelustí na lane v oblasti prvého kotvenia a to nie je pri nesúdržných jednotkách žiaduce. Z uvedených dôvodov bolo rozhodnuté káble nedopínať.

4.3 Sila vo vonkajších kábloch počas zaťažkávacej skúšky

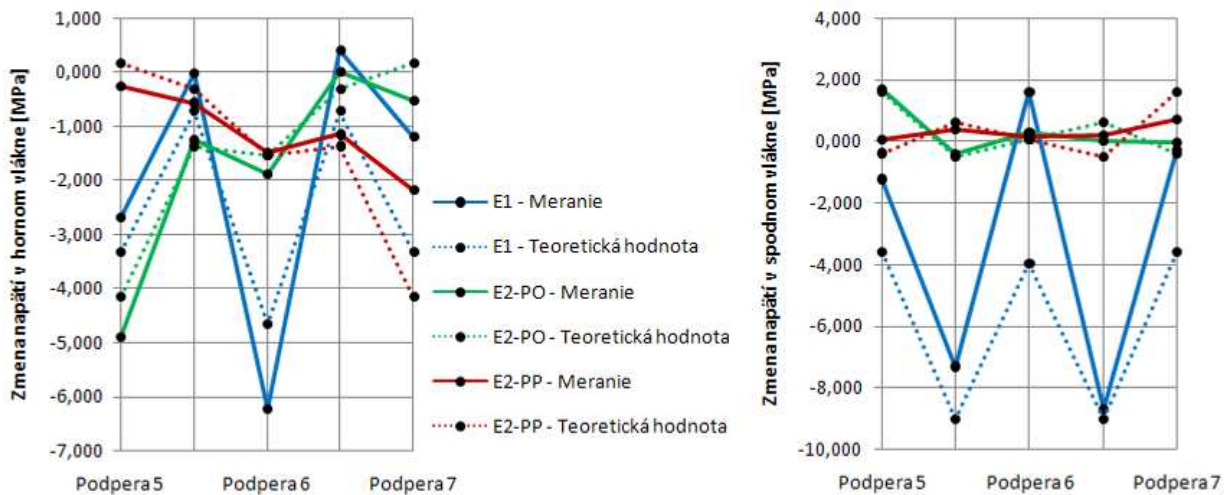
Zaťažkávacia skúška bola uskutočnená podľa normy STN 73 6209 koncom novembra 2009 akreditovaným skúšobným laboratóriom TSÚS. Na každé pole sa navrhla zaťažovacia zostava zložená zo 6 vozidiel, každé s tiažou 35 t. Účinnosť zaťaženia (pomer skutočnej hodnoty zaťaženia k návrhovej hodnote uvažovanej vo výpočte) predstavoval pre hlavné mostné polia hodnotu 71%. Maximálna hodnota priehybu pre použité skúšobné zaťaženie pri najnepriaznivejšom rozostavení vozidiel je 9,35 mm a maximálna hodnota vzopätia 6,24 mm. Plán zaťažkávacej skúšky pre zistenie maximálnych účinkov v strede polí predstavoval zaťaženie 2 vozidlami (doba zaťažovania 15 minút), následne 4 vozidlami (doba zaťažovania 15 minút) a nakoniec 6 vozidlami (doba zaťažovania 60 minút) na nesusedných poliach, po odľahčení sa čakalo ďalších 60 minút. Pre zistenie maximálnych účinkov nad podperou sa použilo priamo 6 vozidiel (doba zaťažovania 30 minút) na susedných poliach, po odľahčení sa čakalo 30 minút. Na Obr. 9 je znázornený priebeh sily na koncoch vonkajšieho predpínacieho kábla VK5L (pole č. 5, ľavý kábel v smere staničenia mosta) počas vybranej etapy zaťažkávacej skúšky. Čas 9:20 predstavuje nezaťažený most, časový úsek 9:50-10:20 plné zaťaženie poľa č. 5 s meraným káblom a poľa č. 7 (nesusedné polia), časový úsek 10:25-11:00 odľahčenie, časový úsek 11:10-11:40 plné zaťaženie poľa č. 5 a poľa č. 6 (susedné polia), a od času 11:50 odľahčenie. Pri zaťažovaní nesusedných polí sa dosiahol v meranom polí väčší priehyb, čomu zodpovedá zmena sily približne 50 kN, v prípade susedných polí je zmena sily v kábli približne 20 kN zodpovedajúca menšiemu priehybu meraného poľa.



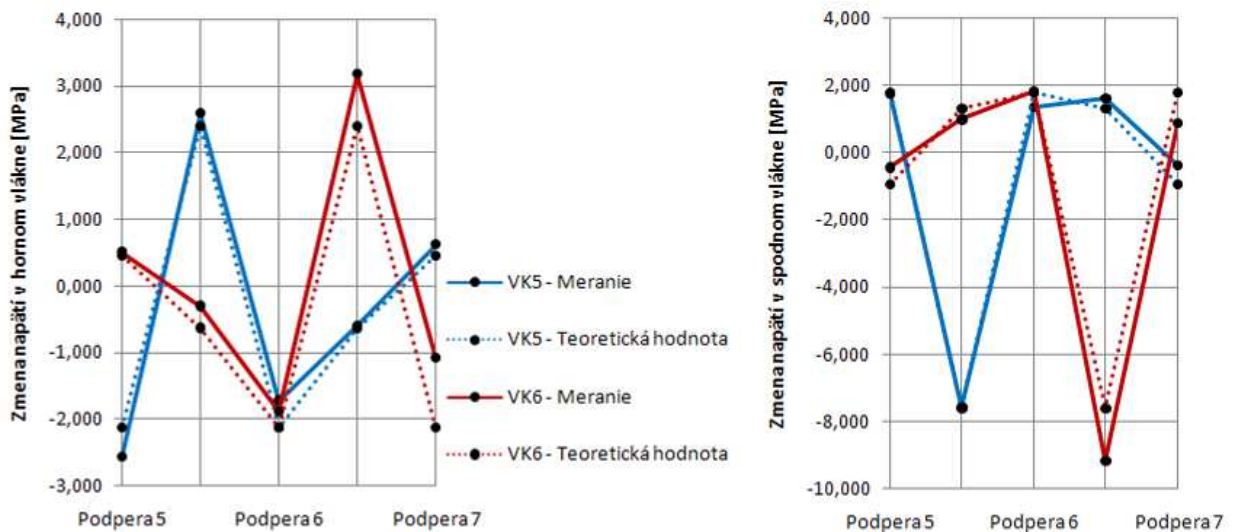
Obr. 9 Zmena predpínacej sily počas zaťažkávacej skúšky na oboch stranách kábla VK5L

4.4 Pomerné pretvorenie v betóne

Pomerné pretvorenia v betóne sa merali pomocou strunových tenzometrov. Pre výpočet napätia v betóne z nameraných hodnôt pomerných pretvorení je nutné poznať skutočnú hodnotu modulu pružnosti a z tohto dôvodu boli najprv vyhodnotené laboratórne skúšky betónových trámčov. Pre teoretickú analýzu prvej etapy boli následne uvažované hodnoty modulu pružnosti 33 GPa pre trámy a 32 GPa pre dosku. Vek skúšobných vzoriek predstavoval čas od betonáže po predpínanie danej etapy. Na Obr. 10 sú porovnané teoretické a namerané zmeny napätia vyvolané predopnutím 3 stavebných etáp (predpínanie súdržných káblov v 1. etape – E1, v 2. etape v smere na Prešov – E2-PO a v 2. etape v smere na Poprad - E2-PP). Výraznejšie rozdiely možno badať v nameranej zmene napätí počas predpínania 1. etapy – E1, keď celá nosná konštrukcia bola uložená v debnení, a namerané hodnoty sa líšia od teoretickej analýzy, v ktorej boli zadefinované výpočtové podpory podľa predpokladaného skutočného stavu (pevné podopretie v mieste pilierov a jednostranné podopretie po dĺžke, umožňujúce uvoľnenie vzopínajúcej sa nosnej konštrukcie počas predpínania).



Obr. 10 Zmena napätí v betóne v štádiách predpínania súdržných káblov



Obr. 11 Zmena napätí v betóne v štádiách predpínania vonkajších káblov

Na Obr. 11 sú porovnané teoretické a namerané zmeny napätia vyvolané predopnutím vonkajších káblov v poliach, v ktorých sú umiestnené strunové tenzometre. Výsledky zobrazujú porovnateľné priebehy nárastu a poklesu napätia vo vláknoch betónu.

5 ZÁVERY

Nameraná hodnota sily v kábloch K2a, K3a a K4a v miestach EM snímačom je v porovnaní s teoretickým priebehom predpínacej sily väčšia. Meranie v tomto prípade preukázalo nižšie hodnoty strát z trenia ($\mu=0,15$ a $k=0,003\text{ m}^{-1}$) ako sú odporúčané ($\mu=0,19$ a $k=0,005\text{ m}^{-1}$) pre dané ochranné rúry a typ predpínacej výstuže.

Nameraný pokles sily v predpínacích kábloch K2a, K3a a K4 v sledovanom období v jednotlivých meraných snímačoch predstavuje hodnoty -1,1% až -3,9% (kábel K2a), -1,5% až -2,1% (kábel K3a), -1,8% až -1,9% (kábel K4a), čo zodpovedá dlhodobým stratám od zmrašťovania a dotvarovania betónu.

Namerané predĺženia lán 12 a 19-lanových vonkajších káblov (VK) vykazujú vyhovujúce odchýlky oproti teoretickým hodnotám (povolená odchýlka pre jedno lano $\pm 10\%$, rozsah nameraných hodnôt +2,0% až +8,0%).

Namerané hodnoty predpínacej sily na pasívnej strane vonkajších káblov po jednostrannom predpínaní predstavovali hodnoty zmenšené o straty z trenia v rozsahu 4-5%. Meranie preukázalo, že prenos sily do pasívnej strany kábla bol dostatočný, strata z trenia bola nízka a kábel nebolo potrebné dopínať z druhej strany.

Nameraná zmena priebehu napätia v betóne v stredných dvoch poliach počas predpínania súdržných káblov 2. etapy a vonkajších káblov v poliach č. 5 a č. 6 je v zhode s teoretickým predpokladom (uvažované sily v predpínacích kábloch a moduly pružnosti betónu sú stanovené podľa skutočne nameraných hodnôt na moste, resp. na laboratórnych vzorkách).

LITERATÚRA

- [1] CHANDOGA, M. – JAROŠEVIČ, A. – SEDLÁK, J.: *Monitoring napätostného stavu viaduktu 215-00 na D1 Fričovce – Prešov západ*. Záverečná správa. Projstar-PK, s.r.o., Bratislava, 10/2009.
- [2] CHANDOGA, M. – JAROŠEVIČ, A.: *Measurement of force distribution along the external tendons*. Proceedings of the international conference „Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures“, Technical University of Lodz, Poland, pp.6 Monitoring of prestressing force in external tendons, 9-11 Jun 2008.