

Meranie zvislých posunov mostného objektu Apollo v Bratislave

Ján Ježko¹ a Vlastimil Staněk²

Measurements of vertical displacements Apollo bridge in Bratislava

Apollo bridge across the Danube river in Bratislava - description of construction parts. Reference network and long-term measurements of displacements. Measurements of vertical displacements of bridge pillars using levelling instruments DiNi 12 and Ni 007 and stability testing of the reference points.

Key words: bridge, vertical displacements, bridge pillars, reference points

Úvod

Dôležitou súčasťou hospodárskeho rozvoja krajiny, regiónu je doprava, v ktorej nezastupiteľné miesto má pozemná doprava, najmä cesty a železnice. Medzi základné limitujúce faktory výstavby cestnej siete patria mostné objekty. Mosty ako inžinierske diela slúžia nielen na prekonávanie prekážok nad povrchom terénu, ale pomáhajú skracovať cestné trasy, zabezpečujú plynulosť a bezpečnosť dopravy a architektonicky dotvárajú krajinu [2]. Výstavba mostných objektov v súčasnosti vedie k používaniu zložitých a atypických konštrukcií veľkých rozmerov alebo výšok. Technické predpisy na výstavbu a prevádzku stavebných objektov preto zakotvujú požiadavky na systematické meranie posunov a pretvorení objektov a technologických zariadení [1].

Most Apollo v Bratislave

Most Apollo (obr. 1) premostuje rieku Dunaj vo vzdialenosti približne 1 km od historického centra Bratislavy a nadväzuje na celkovú dopravno-urbanistickú koncepciu hlavného mesta SR Bratislavy. Umožňuje priame cestné prepojenie mestskej časti Petržalka s mestskými časťami Mlynské Nivy a Ružinov.

Súčasťou projektu bola aj prestavba súvisiaceho mestského komunikačného systému v celkovej dĺžke 1,8 km vrátane štyroch križovatiek (viac ako 100 stavebných objektov). Most je určený pre cestnú dopravu mestského charakteru, chodcov a cyklistov, a v jeho technickom priestore sú uložené potrubné a káblové vedenia. Jeho funkciou je zvýšiť dopravnú kapacitu mostov cez Dunaj v Bratislave, ktorá je doposiaľ slabým článkom v dopravnej obsluhu mesta. Realizovaná konštrukcia mosta zohľadňuje plavebný gabarit v toku Dunaja šírky 210 m a výšky 10 m nad maximálnou plavebnou hladinou.



Obr. 1. Pohľad na most Apollo z Prístavného mosta v Bratislave

Fig. 1. View of Apollo bridge from Harbour bridge in Bratislava.

¹ Ing. Ján Ježko, PhD., katedra geodézie, stavebná fakulta, STU Bratislava, Radlinského 11, Bratislava, Slovenská republika, jan.jezko@stuba.sk

² prof. Ing. Vlastimil Staněk, PhD., katedra geodézie, stavebná fakulta, STU Bratislava, Radlinského 11, Bratislava, Slovenská republika, vlastimil.stanek@stuba.sk

(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 3. 11. 2009)

Hlavný oceľový mostný objekt je oddilatovaný od betónových estakád na petržalskej a bratislavskej strane. Petržalskú estakádu tvorí konštrukcia piatich polí vybudovaných technológiou postupnej betonáže po poliach na statickej skruži. Obdobným spôsobom je vybudovaná aj bratislavská estakáda. Trasa realizovaného premostenia celkovej dĺžky 854m je pôdorysne aj výškovo pevne definovaná už existujúcimi križovatkami, z väčšej časti sa nachádza v pôdorysných oblúkoch, iba úsek nad plavebným gabaritom v dĺžke 248 m je priamy.

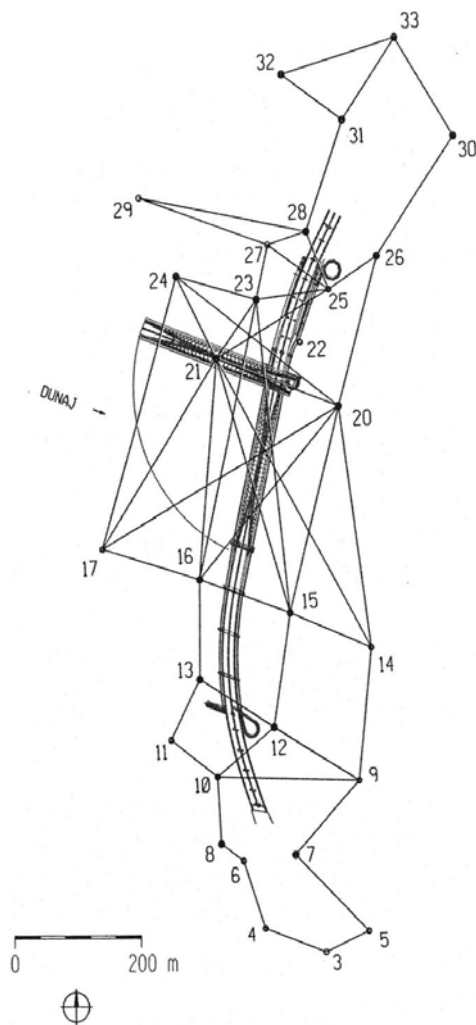
Sieť vzťažných bodov mosta Apollo

Sieť vzťažných bodov vychádza z bodov vytyčovacej siete (VS). Projekt VS obsahoval požiadavky stanovené hlavným projektantom stavby v zmysle platných technických noriem, na zabezpečenie polohovej presnosti určenia bodu v horizontálnych súradniciach 10 mm a vo výške 1 mm. Ako základ vytyčovacej siete pre hlavný mostný objekt a estakády bolo navrhnutých 14 bodov v tvare reťazca zloženého z nepravidelných trojuholníkových resp. štvoruholníkových obrazcov (obr. 2).

Z hľadiska efektívneho využitia navrhovaných bodov počas výstavby bola prvoradá požiadavka, aby z každého bodu siete bola viditeľnosť na minimálne dva body VS, čo bolo vzhľadom na členitosť terénu, nepriechodný pás zelene v inundačnom území na pravom brehu Dunaja, existujúcu zástavbu a rozsah budúcich stavebných prác značne obmedzené. Vzhľadom na dané skutočnosti bola pri určovaní parametrov VS použitá kombinácia terestrických a GPS meraní.

Pre body bola navrhnutá ťažká stabilizácia, ktorá bola nevyhnutná z hľadiska kvality bodov, vplyvu vonkajšieho prostredia ako aj blízkosti plánovaného rozsahu prác. Základom stabilizácie bola železná rúra s priemerom 300 mm, zavítaná do hĺbky zohľadňujúcej úroveň minimálnej hladiny spodnej vody s výškou nadzemnej časti piliera 1,35 alebo 3,0 m.

Táto vytyčovacia sieť bola dobudovaná na zabezpečenie geodetických prác pre ďalších vyše 100 stavebných objektov v širšom území na dĺžke 1,8 km, ktoré boli súčasťou projektu. Sieť bola preto rozšírená na petržalskej aj bratislavskej strane o body, ktoré umožnili vytvoriť potrebnú sieť bodov takej konfigurácie, v ktorej bolo možné realizovať meranie terestrickými metódami.



Obr. 2. Vytyčovacia (vzťažná) sieť mosta Apollo.
Fig. 2. Setting out network of Apollo bridge.

Tieto následne tvorili podstatnú časť meraní vstupujúcich do odhadu súradníc bodov v miestnom súradnicovom systéme. Body polohovej vytyčovacej siete sú súčasne súčasťou aj výškovej vytyčovacej siete. Na každom bode sa nachádza čapová, resp. klincová výšková nivelačná značka, podľa typu stabilizácie (obr. 4), pričom štyri body vytyčovacej siete (VS15, VS16, VS21, VS23) boli vybudované s observačnou plošinkou (obr. 3). Výšky bodov VS boli určené vo výškovom systéme Balt po vyrovnaní (Bpv) vzhľadom k vzťažným bodom Štátnej nivelačnej siete (ŠNS) v širšom koridore stavby, ktoré tvoria kostru výškovej vytyčovacej siete. Prepojenie bratislavskej a petržalskej strany bolo realizované meraním cez Starý most. Výšky bodov siete boli určené metódou najmenších štvorcov. Presnosť realizovanej nivelácie je definovaná strednou kilometrovou chybou z vyrovnania v opakovanom meraní $m_0 = 0,72 \text{ mm}$.



Obr. 3. Bod VS23 s observačnou plošinou.
Fig. 3. Point VS23 with observation platform.



Obr. 4. Bod VS21.
Fig. 4. Point VS21.

Testovanie stability vzťažných bodov

Na skúmanie stability vzťažných bodov bola použitá metóda založená na analýze prevýšení. Analýza prevýšení sa realizuje po skupinách. Do prvej skupiny sa zaradia prevýšenia vzhľadom na bod 1, napr. 1-2, 1-3, ..., 1-n. Do druhej skupiny prevýšenia vzhľadom na bod 2, napr. 2-1, 2-3, ..., 2-n, atď. Skupín je toľko, koľko je vzťažných bodov výškovej siete. V každej skupine sa z prevýšení nameraných pri základom meraní h_z (08/2005) a z prevýšení nameraných v uvažovanej etape h_i vypočítajú rozdiely Δh :

$$\Delta h = h_i - h_z, \quad (1)$$

Na posúdenie stability jednotlivých vzťažných výškových bodov sa použije suma štvorcov týchto rozdielov v príslušnej skupine. Za vzťažný výškový bod sa vyberie v danej etape bod, v ktorého skupine je najmenšia hodnota $\sum \Delta h^2$ [3].

Pre petržalskú stranu boli vybrané body VS 12, VS13 a VS16, výsledky z merania prístrojom DiNi 12 a testovania stability sú v tab. 1.

Tab. 1: Petržalská strana - Trimble DiNi 12.
Tab. 1. Petržalka site - Trimble DiNi 12.

	VS12 [m]	VS13 [m]	VS16 [m]	$\sum \Delta h^2$ [m ²]
VS12 [m]	0	-0,000 6	-0,000 9	0,000 0011
VS13 [m]	0,000 6	0	0,000 5	0,000 000 6
VS16 [m]	0,000 1	0,000 5	0	0,000 000 2
$\sum \Delta h^2$ [m ²]	0,000 0011	0,000 000 6	0,000 000 2	0

Podobne bol realizovaný výber pre bratislavskú stranu (body VS28, VS26, a VS4) a výsledky s testovania sú v tab. 2.

Tab. 2. Bratislavská strana - Trimble DiNi 12.
Tab. 2. Bratislava side - Trimble DiNi 12

	VS12 [m]	VS13 [m]	VS16 [m]	$\sum \Delta h^2$ [m ²]
VS12 [m]	0	-0,000 4	0,000 1	0,000 0001
VS13 [m]	0,000 4	0	-0,000 3	0,000 000 2
VS16 [m]	-0,000 1	0,000 3	0	0,000 000 1
$\sum \Delta h^2$ [m ²]	0,000 000 2	0,000 000 2	0,000 000 1	0

Meranie posunov pozorovaných bodov

Meranie posunov pozorovaných bodov bolo realizované prístrojmi Ni 007 a prístrojom Trimble DiNi 12 s pripojením na body vzťažnej (vytyčovacej) siete podľa predchádzajúceho testovania.

Presnosť meraní sa overuje jednak dovolenou odchýlkou v uzávere nivelačného ťahu φ , resp. dovolenou odchýlkou medzi meraním tam a späť v nivelačnom ťahu Q .

Tab. 3 a 4 reprezentujú dosiahnuté výsledky realizovaných meraní oboma použitými nivelačnými prístrojmi.

Tab. 3. Petržalská strana.

Tab. 3. Petržalka side.

Prístroj	počet zostáv	dĺžka ťahu	tam	späť	rozdiel φ, Q	φ, Q max posúdenie [mm]
		[m]	[m]	[m]	[mm]	
Ni 007	22	435,6	uzavretý ťah		0,42	0,47 vyhovuje
DiNi 12	26	438,9	uzavretý ťah		0,38	0,49 vyhovuje

Tab. 4. Bratislavská strana.

Tab. 4. Bratislava side.

Prístroj	počet zostáv	dĺžka ťahu	tam	späť	rozdiel φ, Q	φ, Q max posúdenie [mm]
		[m]	[m]	[m]	[mm]	
Ni 007	32	677,7	0,07303	-0,07230	0,73	1,13 vyhovuje
DiNi 12	31	677,1	0,07326	-0,07297	0,29	1,11 vyhovuje

Pri výpočte veľkosti zvislých posunov pozorovaných bodov spodnej stavby mosta Apollo v Bratislave, boli uvažované výšky pozorovaných bodov zo základného merania a výšky pozorovaných bodov z aktuálneho merania vykonaného v mesiaci apríl 2008.

Z predchádzajúcich tabuliek je zrejmé, že uzávěry v nivelačných ťahov nie sú nulové (rozdiel φ, Q). Meranie je preto potrebné vyrovnať tak, aby sme na pripájacích bodoch uzavretého nivelačného ťahu, dostali nulovú hodnotu meraného prevýšenia. Tu vychádzame z predpokladu, že najväčšia neistota pri určovaní bodov je v bode, ku ktorému sme od pripájacieho vzťažného bodu prišli pomocou najviac zostáv. Na základe tohto predpokladu bolo vyrovnanie realizované druhým lineárnym modelom metódy MNS, pričom váhová matica má na diagonálnych prvkoch počet zostáv a výsledkom vyrovnaní budú odhadnuté hodnoty výšok pozorovaných bodov.

Postup spracovania bol nasledovný [4]:

Merané prevýšenia medzi jednotlivými bodmi tam a späť zostavíme do vektora meraných parametrov x .

$$x = (h_1 \ h_2 \ h_3 \ \dots \ h_n), \quad (2)$$

kde n je počet meraní.

Vektor neznámych obsahuje výšky bodov P_1 až P_k a má tvar:

$$\Theta = (H_1 \ H_2 \ \dots \ H_k), \quad (3)$$

kde k je počet bodov s neznámou výškou.

Kovariančná matica Σ_x je diagonálna matica, kde na diagonále sú štvorce stredných chýb jednotlivých prevýšení σ_{h_i} , vypočítaných zo vzťahu:

$$\sigma_{h_i} = \sigma_0 \sqrt{N_i}, \quad (4)$$

kde $\sigma_0 = 0,1 \text{ mm}$ je stredná chyba v určení prevýšenia v jednej nivelačnej zostave,

N_i je počet zostáv, potrebný na určenie prevýšenia h_i medzi dvoma bodmi.

Kovariančná matica má teda tvar :

$$\Sigma_x = \begin{pmatrix} \sigma_{h_1}^2 & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & \dots & \sigma_{h_i}^2 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

Kovariančnú maticu ďalej upravíme na tvar:

$$\Sigma = \sigma^2 H, \quad (6)$$

kde H je tzv. kofaktorová matica.

Ďalej musíme určiť vektorová funkciu $f(\Theta)$, ktorá obsahuje funkčné vzťahy medzi meranými a neznámymi. Musíme teda merané veličiny vyjadriť ako funkcie neznámych parametrov.

$$x = f(\Theta), \quad (7)$$

a

$$f(\Theta) = \begin{pmatrix} H_2 - H_1 \\ \vdots \\ H_k - H_{k-1} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

Ďalej platí

$$x = f(\Theta^0) + A \cdot \Delta\Theta, \quad (9)$$

kde $\Delta\Theta$ sú približné výšky pozorovaných bodov a A je matica plánu pre ktorú platí:

$$A = \frac{\partial f(\Theta^0)}{\partial \Theta^0} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial H_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial H_k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial H_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial H_k} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

Vektor absolútnych členov vypočítame tak, že do funkčných vzťahov (2.9) dosadíme približné výšky Θ^0 a vyčíslené hodnoty odrátame od vektora meraných prevýšení.

Vektor absolútnych členov je rovný

$$y = x - f(\Theta^0), \quad (11)$$

Výšky pozorovaných bodov potom vypočítame podľa vzťahu

$$\tilde{\Theta} = \Theta^0 + \Delta\tilde{\Theta}, \quad (12)$$

kde

$$\Delta\tilde{\Theta} = (A' \cdot H^{-1} \cdot A)^{-1} \cdot A' \cdot H^{-1} \cdot y \quad (13)$$

Vektor opráv vypočítame podľa vzťahu

$$v = y - A \cdot \Delta\tilde{\Theta}, \quad (14)$$

a jednotkovú strednú chybu podľa vzťahu

$$\widehat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{v' \cdot H^{-1} \cdot v}{n-k}}, \quad (15)$$

kde n je počet meraných a k počet neznámych parametrov.

Kovariančnú maticu $\widehat{\Sigma}_{\Theta}$ vektora $\widehat{\Theta}$ (výšok pozorovaných bodov) vypočítame podľa vzťahu

$$\widehat{\Sigma}_{\Theta} = \widehat{\sigma}_{\Theta} \cdot (A' \cdot H^{-1} \cdot A)^{-1}, \quad (16)$$

Zvislý posun výškového bodu sa určí na základe rozdielov medzi základným a etapovým meraním, resp. medzi etapovými meraniami. Pre posun pozorovaného bodu teda platí:

$$p = H_{\varepsilon} - H_{z}, \quad (17)$$

kde p je zvislý posun pozorovaného bodu,

H_{ε} je výška pozorovaného bodu pri etapovom meraní,

H_{z} je výška pozorovaného bodu pri základnom meraní.

Stredná chyba posunu je rovná druhej odmocnine zo súčtu stredných chýb výšky pozorovaného bodu zo základného a etapového merania:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{H_{\varepsilon}}^2 + \sigma_{H_z}^2}, \quad (18)$$

Presnosť merania posunov, resp. všetkých geodetických meraní je vždy ovplyvnená aj náhodnými a systematickými chybami. Ich odstránenie je veľmi náročné až často krát nereálne, z toho dôvodu je vhodné merať etapové meranie za približne rovnakých podmienok ako meranie základné.

Ak teda uvažujeme rovnaké podmienky základného a etapového merania ($\sigma_{H_{\varepsilon}} = \sigma_{H_z}$), platí pre presnosť posunov vzťah:

$$\sigma_p = \sqrt{2} \cdot \sigma_{H_{\varepsilon}}, \quad (19)$$

Pre určenie zvislých posunov platí kritérium, na základe ktorého je možné pri určitej hladine významnosti α zistiť, či došlo k posunu pozorovaného bodu alebo zistené rozdiely sú len dôsledkom chýb merania. Rozhodnutie o významnosti posunu resp. pretvorenia sa prijíma na základe výsledkov testovacích štatistík významnosti.

Nulová hypotéza sa formuluje v podobe $H_0: |p| = 0$ oproti alternatívnej hypotéze $H_{\alpha}: |p| \neq 0$.

O prijatí resp. zamietnutí nulovej hypotézy sa rozhodne na základe nasledujúcich intervalových odhadov, na hladine významnosti $\alpha = 0,05$ ($t_{\alpha} = 2$):

ak $|p| < \sigma_p$ nulová hypotéza sa prijíma – meranie nedokázalo posun bodu,

ak $\sigma_p \leq |p| \leq t_{\alpha} \cdot \sigma_p$ predpokladá sa, že posun nastal, pričom riziko takéhoto rozhodnutia je 5 – 30 %,

ak $|p| > t_{\alpha} \cdot \sigma_p$ posun je reálny s rizikom menším než 5% - nulová hypotéza sa zamietne.

Na základe výsledkov získaných z merania a spracovania môžeme s rizikom 5 % a pravdepodobnosťou 95 % tvrdiť, že posuny nastali na Petržalskej strane u bodov P1P, P1L, P2P, P2L, P3P, P3L, P4P, P4L, P5P a P5L. Podobne bola spracovaná aj časť na Bratislavskej strane. Maximálna hodnota posunu voči základnému meraniu bola zistená na Petržalskej strane na bode P5P a jeho hodnota bola -3,2 mm (tab. 5).

Tab. 5. Petržalská strana Trimble DiNi 12.

Tab. 5. Petržalka side Trimble DiNi 12.

Pozorovaný bod	Základné meranie 08/2005	Stredná chyba σ_{Hz}	Etapové meranie 04/2008	Stredná chyba σ_{He}	Zvislý posun p	Stredná chyba σ_p	t. σ_p	Posúdenie posunu
	[m]	[mm]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
VS12	138,852 6	0,2	138,8527	0,5	0,1	0,5	1,0	nenastal
VS13	138,976 2	0,2	138,9757	0,3	-0,5	0,4	0,8	nenastal
VS16	134,836 2	0,2	134,8362	0,2	0,0	0,2	0,4	nenastal
P9P	134,577 1	0,2	134,5770	0,6	-0,1	0,6	1,2	nenastal
P9L	134,587 5	0,2	134,5881	0,2	0,1	0,2	0,4	nenastal
P8P	prestabilizovaný	-	135,5169	0,6	-	-	-	nenastal
P8L	prestabilizovaný	-	135,7414	0,2	-	-	-	nenastal
P7P	136,325 1	0,1	136,3240	0,6	-1,1	0,6	1,2	nenastal
P7L	136,879 2	0,1	136,8796	0,2	0,4	0,2	0,4	nenastal
P5P	137,174 1	0,2	137,1709	0,4	-3,2	0,4	0,8	nastal
P5L	137,179 4	0,2	137,1774	0,4	-2,0	0,4	0,8	nastal
P4P	136,524 8	0,2	136,5226	0,4	-2,2	0,4	0,8	nastal
P4L	136,506 9	0,2	136,5040	0,4	-2,9	0,4	0,8	nastal
P3P	136,499 3	0,2	136,4968	0,4	-2,5	0,4	0,8	nastal
P3L	136,488 2	0,2	136,4864	0,4	-1,8	0,4	0,8	nastal
P2P	136,501 9	0,3	136,4992	0,4	-2,7	0,5	1,0	nastal
P2L	136,499 9	0,3	136,4984	0,4	-1,5	0,5	1,0	nastal
P1P	136,374 6	0,3	136,3714	0,4	-3,2	0,5	1,0	nastal
P1L	136,372 3	0,3	136,3698	0,4	-2,5	0,5	1,0	nastal

Záver

Zvyšovanie potreby merania posunov mostných objektov je všeobecne podmienené narastajúcou automobilizáciou i zvyšovaním prepravy tovarov po cestnej sieti a samozrejme i starnutím a opotrebovaním týchto objektov.

Dôležitejšou otázkou je proces optimalizácie merania a spracovania výsledkov. Významný kvalitatívny podiel na meraní posunov má metrológia, ktorá tvorí základné predpoklady pre plnenie úloh v oblasti merania posunov stavieb s vyžadovanou kvalitou a efektívnosťou merania. Informácie získané diagnostikou konštrukcií stavebných objektov majú všestranný vedecký, technický a praktický význam. Poskytujú podklady na hodnotenie technického stavu diagnostikovaných objektov a zariadení a vedú k objasneniu vzniku príčin anomálií v správaní sa stavebných objektov [1].

Na základe dosiahnutých výsledkov merania posunov tohto mostného objektu (meranie a spracovanie realizované v spolupráci so študentmi), ale aj iných podobných mostných objektov, ktorých meranie posunov realizoval kolektív pracovníkov Katedry geodézie Stavebnej fakulty STU v Bratislave, možno skonštatovať, že realizovaná technológia merania a spracovania i použité prístroje splňujú plne požiadavky na kvalitu i efektívnosť merania.

Príspevok je súčasťou riešenia projektu č. 1/4206/07 podpory vedeckej agentúry VEGA.

Literatúra - References

- [1] Kopáčik, A.: Meranie posunov a deformácií stavebných objektov. Bratislava, *Komora geodetov a kartografov*, 2003, str. 155-163.
- [2] Staněk, V.: Geodetické aspekty výstavby mostných objektov. Bratislava, *Vydavateľstvo STU*, 1995.
- [3] Piš, D.: Určovanie zvislých posunov mostných objektov. *Katedra geodézie, Bratislava, 1982, KDP*.
- [4] Praženka, J.: Meranie posunov mostných objektov. *Katedra geodézie, Bratislava, 2008, DP*.