

Analýza technologie pro určování průhybové čáry mostních konstrukcí

Rudolf Urban¹
Ondřej Michal²

¹ ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra speciální geodézie; Thákurova 7, Praha 6, 166 29; rudolf.urban@fsv.cvut.cz

² ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra speciální geodézie; Thákurova 7, Praha 6, 166 29; ondrej.michal@fsv.cvut.cz

Grant: SGS13/059/OHK1/1T/11

Název grantu: Optimalizace získávání a zpracování 3D dat pro potřeby inženýrské geodézie

Oborové zaměření: DE - Zemský magnetismus, geodesie, geografie

© GRANT Journal, MAGNANIMITAS Assn.

Abstrakt Předpjaté betonové mosty jsou velmi citlivé k dlouhodobému nárůstu průhybů. Spolehlivá předpověď výchylek mostních konstrukcí během výstavby i životnosti má zásadní význam pro dosažení dobré trvanlivosti. Byla vyvinuta technologie pro určování průhybové čáry. Hlavním výsledkem jsou změny průhybové čáry mostní konstrukce v čase, což klade speciální nároky na měření. Výsledky měření jsou velmi užitečné pro zlepšení matematických predikčních metod chování přepjatých betonových konstrukcí dlouhých rozpětí.

Klíčová slova most, průhyb, trigonometrie

1. ÚVOD

Určování průhybové čáry mostních konstrukcí je vyvíjeno ve spolupráci s odborníky na matematické predikční metody již několik let, což lze nalézt v publikacích [1], [2] a [3]. Předpjaté betonované mostní konstrukce jsou velmi citlivé k dlouhodobému nárůstu průhybů, a proto je v posledních letech soustředěna velká pozornost optimalizaci procesu navrhování, která přímo souvisí s životností a bezpečností mostu. Monitoring mostů dlouhých rozpětí představují z geodetického hlediska značně komplikovanou situaci, neboť zde dochází k nejrůznějším negativním vlivům, které působí v první řadě přímo na geodetické měření a také sekundárně na konstrukci mostu (teplota, oslunění, vlhkost, atd.). Aby bylo možné zachytit průhybovou čáru, je nutné na konstrukci osadit vhodně stabilizovat sledované body v dostatečně hustotě pro měření vertikálních posunů. Hustota bodů je dána dle potřeb a požadované přesnosti proložení výsledné průhybové čáry polynomem i -tého řádu. Průhybová čára je zpravidla sledována ve dvou rovnoběžných profilech na levé a pravé straně mostu, aby bylo možné zachytit i možné průhybové anomálie na zakřivených mostech, kde je vnější strana kruhového oblouku (zatáčky) příslušně nadvýšena.

2. POPIS TECHNOLOGIE MĚŘENÍ

Zaměření velkého počtu bodů na mostní konstrukci je limitováno řadou požadavků. Požadovaná směrodatná odchylka určení sledovaného bodu ve vertikálním směru je dána hodnotou 2 mm. Celé měření musí být provedeno v co nejkratším časovém úseku (běžně cca 1 hod – 1,5 hod na zaměření 100 sledovaných bodů) a za co nejstabilnějších atmosférických podmínek (zpravidla v noci), aby průhybová čára mostní konstrukce během měření nezměnila parametry. Vzhledem k častému měření za provozu je nutné

potlačovat i případné odchylky z tlakových rázů velkých nákladních automobilů do konstrukce zejména při přejezdu mostních uzávěrů, ale i z větrných rázů do měřicího přístroje při průjezdu kolem místa měření.

Vertikální měření mostních konstrukcí je běžně prováděno pomocí geometrické nivelace ze středu příslušné přesnosti v přesně daných bodech, které jsou osazeny v průběhu stavby a složí zejména pro kontrolu stability. Metoda přesné a velmi přesné nivelace dosahuje výborné přesnosti v řádu desetin milimetru a je tedy z hlediska přesnosti pro určení průhybu vynikající. Odchylky vyvolané provozem lze částečně potlačit několikanásobným odečtením a následným průměrem měřených hodnot. Bohužel nelze u této metody zajistit provedení měření v časovém horizontu, který by negativně neovlivnil průhyb měřené konstrukce.

Vzhledem k výše uvedenému lze použít jen metoda měření, která je zejména dostatečně rychlá, což bez výhrad splňuje metoda trigonometrické nivelace. Aby byla časová úspora co největší, je vhodné využít nejmodernějších robotických přístrojů s vestavěným sledováním cílového zařízení a všesměrný hranol. Vyloučí se tím doba pro zacílení na sledovaný bod, možné nepřesnosti měřiče při cílení a v neposlední řadě nutnost otočení cílového zařízení do směru záměry přístroje. Potlačení vlivu provozu je v tomto případě také záležitostí několika odečtů, které se průměrují. Aby bylo možné potlačit i osovou nepřesnost přístroje, je měření prováděno ve dvou polohách přístroje.

3. NÁVRH EXPERIMENTU

Pro analýzu metody trigonometrické nivelace při určování velkého počtu sledovaných bodů byl navržen experiment, který spočívá ve srovnání výsledků zaměření podélného profilu o délce cca 200 metrů robotickou totální stanicí TRIMBLE S6 robotic ($\delta\phi = 0,3$ mgon, $\delta D = 1$ mm + 1 ppm D) a výsledků přesnější referenční metody – byla zvolena metoda přesné nivelace přístrojem Trimble DiNi 12T (střední chyba obousměrné kilometrové nivelace 0,3 mm) na kódové latě s automatickým zaváděním opravy z nevdorovnosti záměrné přímkou (určena před experimentem). Podélný profil byl realizován ve výškově stabilní oblasti, aby byl zcela eliminován pohyb měřených bodů vlivem negativních podmínek při měření a tím porovnávána přímo přesnost daných metod měření ve specifických časových obdobích dne. Zároveň byly po celou dobu měření zaznamenávány teploty v různých vrstvách atmosféry, aby mohl být spočten teplotní gradient a výsledky trigonometrické

metody následně opraveny o vliv svislé složky atmosférické refrakce.

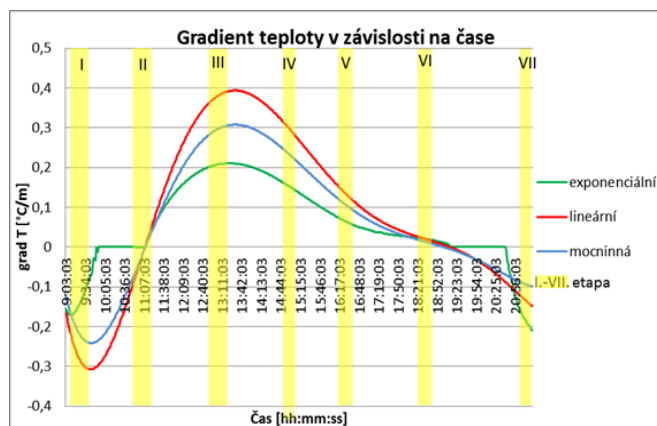
Profil byl sestaven z 16 sledovaných bodů vzdálených od sebe 10 m a stabilizovaných natloukacím hřebem FIXPIN o délce 18 mm, kdy měřicí přístroj byl postaven asi 10 m od prvního bodu profilu v jeho prodloužení. Pro přímou konfrontaci experimentu a reality byl také stabilizován přípojovací bod ve vzdálenosti cca 60 m od měřicího přístroje, aby bylo možné kontrolovat stabilitu výšky přístroje a dále srovnávat jednotlivé etapy měření k sobě.

3.1 Rozvržení do etap

Hlavním výstupem experimentu je zhodnocení přesnosti trigonometrického určování výšek za různých vnějších podmínek. Proto byl profil zaměřován sedmkrát během jednoho dne. V každé etapě je profil zaměřen nejprve přesnou nivelací a následně trigonometrickou metodou. Během doby experimentu byl měřen teplotní gradient (4 předem kalibrovaná teplotní čidla ve výškách 0,2 m, 0,9 m, 1,6 m, 2,3 m nad terémem viz Obr. 1) bezprostředně u geodetického přístroje, kde se předpokládá vliv zakřivení dráhy paprsku největší pro určení vývoje vertikální refrakce. Data z teplotních záznamů (záznam po jedné minutě) byly dále proloženy různými druhy křivek, což lze společně s etapami měření a časovým zařazením vidět na Obr. 2.



Obr. 1 - Teplotní čidlo se stínítkem proti slunci



Obr. 2 – Znáornění gradientu teploty a etap měření

V grafu jsou žlutými pruhy znázorněny jednotlivé etapy, je tedy jasně zřejmé, že největší vliv má refrakce ve třetí a čtvrté etapě měření.

3.2 Apriorní rozbor přesnosti jednotlivých metod

Rozbor přesnosti trigonometrické nivelace vychází z extrémních podmínek dané při měření a z přesnosti geodetického přístroje dané výrobcem. Dále je zavedena přesnost urovnání všesměrného hranolu podle citlivosti libely použité výtyčky (nesvislost cíle) a v neposlední řadě také přesnost připojení na vzdálený bod.

Jako mezní hodnoty byly stanoveny délka na nejvzdálenější bod profilu cca 200 m a zenitový úhel 90 gonů (ekvivalentně 110 gonů). Délka na přípojovací bod byla 50 m a zenitový úhel opět 90 gonů. Při těchto hodnotách je celková směrodatná odchylka metody rovna 0,90 mm, přičemž vliv velikosti zenitového úhlu je v řádu desetin mm a vliv odklonu cíle od svislice dokonce v řádu setin mm.

Rozbor přesnosti měření referenční metodou přesné nivelace vychází z [4], kde je přesnost celého uzavřeného nivelčního pořadu dána dle zákona hromadění směrodatných odchylek v [5] součtem směrodatných odchylek jednotlivých záměr. Pro hodnocení přesnosti byla spočtena teoretická hodnota mezního uzavěru 0,37 mm pro nivelční pořad dlouhý 310 m. Je tedy zřejmé, že metoda přesné nivelace je použitelná jako referenční metoda vzhledem k metodě trigonometrické.

3.3 Model vertikální refrakce

Nelineární průběh paprsku elektromagnetického záření atmosférou je jedním z nejdůležitějších faktorů limitujících přesnost trigonometrické metody. Průběh paprsku závisí na indexu lomu vzduchu v okolí jeho trasy. Index lomu je funkcí teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu, přičemž největší vliv má teplota [6].

V praxi je však nemožné měřit všechny parametry indexu lomu vzduchu v průběhu celé dráhy paprsku, zvláště s ohledem na jejich velkou proměnlivost například poryvy větru, na které měřicí přístroje zareagují se zpožděním. Proto byla měřena pouze teplota, jejíž gradient má na průběh paprsku největší vliv. Z těchto dat byl modelován mezní vliv refrakce na měřená převýšení, který by reálně neměl být překonán.

Existuje několik modelů simulujících průchod paprsku atmosférou, založených na Snellově zákonu, či na diferenciální rovnici průchodu vlnoplochy nehomogenním prostředím. Dle [7] by pro odhad mezního vlivu refrakce měl postačovat přibližný vzorec profesora Böhma:

$$\Delta H = 4,65 \cdot 10^{-7} \cdot s^2 \cdot \sin(z) \cdot \left(0,034 + \frac{dT}{dH}\right). \quad (1)$$

ΔH změna měřeného převýšení způsobená refrakcí.

dT/dH změna teploty v závislosti na změně výšky (teplotní gradient).

4. VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Výsledkem experimentu bylo nejen porovnání jednotlivých metod měření, ale i analýza jednotlivých rizik, které při různých metodách měření nastávají.

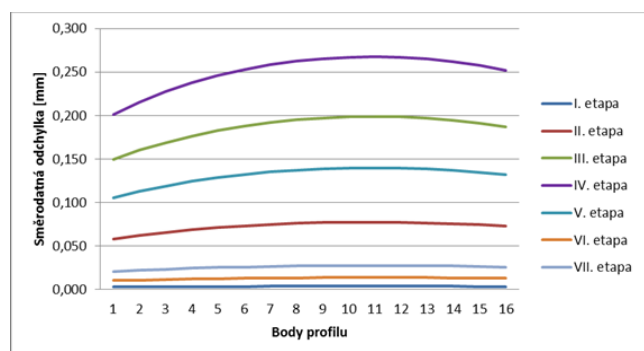
4.1 Zhodnocení přesnosti přesné nivelace

Základním ukazatelem pro hodnocení metody přesné nivelace byl uzavěr nivelčního pořadu, který je uveden v Tab. 1 včetně mezního uzavěru.

Z uvedených výsledků je patrné, že při měření nivelace při výrazném oslunění dochází ke zvětšování velikosti uzavěru a tím i ke zhoršování přesnosti metody. Měřený uzavěr neodpovídá apriornímu rozboru přesnosti, avšak po vyrovnání nivelčního pořadu dle metody nejmenších čtverců, lze stále dosáhnout vyšší přesnosti než apriorní rozboru pro metodou trigonometrickou dle Obr. 3. (pro IV etapu je maximální vypočtená aposteriorní směrodatná odchylka bodu profilu 0,27 mm).

Tab. 1: Přesnost jednotlivých etap

	Čas měření	Teplota [°C]	uzávěr [mm]	mezní uzavěr [mm]	dodržen
I. etapa	8:25 -9:00	12	-0,03	0,37	ANO
II. etapa	10:00-10:40	17	-0,62	0,26	NE
III. etapa	11:40-12:25	18	1,59	0,26	NE
IV. etapa	13:20-14:05	23	2,14	0,26	NE
V. etapa	15:20-16:05	23	1,12	0,26	NE
VI. etapa	17:05-17:45	18	0,11	0,26	ANO
VII. etapa	20:20-21:00	15	-0,22	0,26	ANO



Obr. 3 - Graf směrodatných odchylek výšek na bodech profilu u jednotlivých etapách

4.2 Zhodnocení přesnosti přesné nivelace

Každá etapa trigonometrického zaměření profilu probíhala přibližně 20 minut. Během této doby byl přístroj vystaven přímým slunečním paprskům a mohlo tedy dojít k porušení horizontace vlivem teplotní roztažnosti stativu či zapadání hrotů nohou stativu do podkladu.

Proto bylo převýšení na přípojovací bod měřeno dvakrát, vždy na začátku a na konci každé etapy. Mezní rozdíl pro připojení na vzdálenost 60 m vychází z apriorního rozboru přesnosti, kde směrodatná odchylka na přípojovací bod je dána hodnotou 0,4 mm (uvažován koeficient spolehlivosti 2). Analýza stability stativu je v Tab. 2.

Tab. 2: Rozdíl v převýšení na přípojovací bod na začátku a na konci etapy

	rozdíl [mm]	mezní rozdíl [mm]	splněn
I. etapa	1,61	1,1	NE
II. etapa	1,51	1,1	NE
III. etapa	1,06	1,1	ANO
IV. etapa	0,86	1,1	ANO
V. etapa	1,07	1,1	ANO
VI. etapa	0,51	1,1	ANO
VII. etapa	0,58	1,1	ANO

Z Tab. 2 je zřejmé, že největší rozdíly v převýšení na přípojovací bod jsou v prvních dvou etapách, kdy se stativ nejrychleji ohříval. Rozdíly dosahují nezanedbatelných hodnot přesto, že během celého měření byl kompenzátor totální stanice v rozsahu a přístroj nebylo nutno dorovnávat.

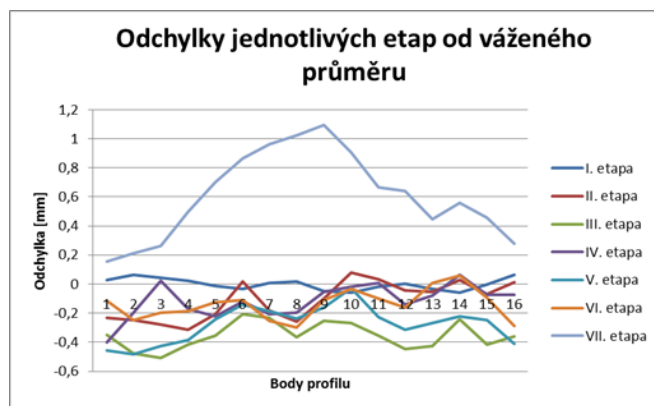
4.3 Zhodnocení přesnosti přesné nivelace

Pro každou etapu byly vypočteny odchylky mezi výsledky trigonometrické metody a přesné nivelace (Tab. 3). Odchylky byly vypočteny jak pro samotnou trigonometrickou etapu bez uvážení vlivu refrakce, tak pro tři různé způsoby zavedení refrakce v závislosti na průběhu teploty mezi teplotními čidly.

Tab. 3: Vývoj srovnání metod trigonometrické a přesné nivelace

etapa	Výběrová směrodatná odchylka			
	bez opravy z refrakce [mm]	zavedena refrakce s průběhem teploty		
		exponenciální [mm]	Mocnninná [mm]	Lineární [mm]
I.	0,96	1,34	1,36	1,57
II.	1,85	1,81	1,91	1,93
III.	1,11	1,07	1,36	1,65
IV.	2,42	1,73	1,42	1,23
V.	1,29	0,98	0,87	0,80
VI.	0,47	0,37	0,37	0,37
VII.	1,82	1,44	1,58	1,42

Z výsledků srovnání je patrný vliv vertikální refrakce na trigonometrickou metodu v etapách, kdy docházelo k výraznému ohřívání povrchu i vzduchu. Nejstabilnější etapa vyšla okolo šesté hodiny, kdy se již nic neohřívalo a slunce zapadalo. Sedmá etapa byla realizována již při umělém osvětlení nivelačních latí a výšky jednotlivých bodů byly výrazně odlišné od předchozích etap u přesné nivelace Obr. 4 tak i u trigonometrické nivelace, kde pro tuto etapu jsou v Tab. 3 uvedeny odchylky od váženého průměru přesné nivelace. Tato skutečnost ukazuje patrně na problém se stabilizací jednotlivých bodů pomocí systému FIXPIN po západu slunce.



Obr. 4 - Odchylky výšek bodů v jednotlivých etapách od váženého průměru všech etap

5. SHRNU TÍ ANALÝZY

Analýza technologie pro určení průhybové čáry mostních konstrukcí ukázala, že trigonometrická metoda nivelace je vhodná pro měření velkého počtu bodů s dostatečnou přesností ve velmi krátkém čase. Metodou trigonometrické nivelace lze dosáhnout velmi dobrých výsledků v porovnání s přesnou nivelací při stabilních atmosférických podmínkách. Vzhledem k měření mostních konstrukcí zpravidla v nočních hodinách z důvodu ustálení konstrukce s teplotou, jsou tyto podmínky splněny.

Dále je zřejmé, že bez dodržování základních zásad pro přesné měření, není možné požadovanou přesnost při denních měřeních splnit. Velmi nebezpečné je pro trigonometrickou i přesnou nivelaci pohyb stativu způsobený ohřevem od slunečních paprsků, který dosahuje řádu desetin milimetrů ve velmi krátkém časovém úseku bez zjevného porušení horizontace přístroje. Ačkoliv tedy ráno dosahuje refrakce velmi malých hodnot, je nutné o to více dbát na zastínění nohou stativu. Dále je velký problém vertikální refrakce, která zvláště v ranních hodinách neodpovídá použitému modelu a je tedy výhodnější refrakční model zavádět až u větších teplotních gradientů, které jsou prokazatelné. V neposlední řadě je nutná spolehlivá stabilizace sledovaných bodů.

6. ZÁVĚR

Byla analyzována technologie na určování průhybů mostních konstrukcí založená na metodě trigonometrické nivelace. Vzhledem k velkému počtu sledovaných bodů, vysoké přesnosti a velmi krátkému času na geodetické zaměření je tato metoda v současnosti jedinou možnou alternativou, jak mosty velkých rozpětí měřit. Navržený experiment ukázal, že metodou trigonometrické nivelace lze dosáhnout velmi dobrých výsledků v porovnání s přesnou nivelací pouze při stabilních atmosférických podmínkách, což bezesporu platí i pro deformace samotné konstrukce.

Určení průhybové čáry mostní konstrukce je velmi důležité, neboť z těchto dat lze získat počáteční vývoj deformací a bude tak možné přesně kalibrovat souběžně prováděné výpočetní a citlivostní analýzy chování konstrukce.

Průhybová čára může posloužit pro lepší pochopení komplexního působení těchto konstrukcí. Jedná se o další krok vedoucí k

vytvoření zcela obecné metodiky predikce dlouhodobého chování předpjatých betonových konstrukcí velkých rozpětí, která bude sloužit pro jejich bezpečný a spolehlivý návrh ve shodě s chováním reálných konstrukcí.

Zdroje

1. VRÁBLÍK, L., URBAN, R., ŠTRONER, M. Measurement of Bridge Body Across the River Labe in Mělník In: Acta Montanistica Slovaca. 2009, vol. 14, no. 1, p. 79-85. ISSN 1335-1788.
2. MATOUŠ, Z., ŠTRONER, M., URBAN, R., VRÁBLÍK, L. Měření a vyhodnocení dlouhodobých deformací letmo betonovaného mostu přes Labe v Litoměřicích In: Beton - křižovatka požadavků. 2012, roč. 12, č. 4, s. 74-79. ISSN 1213-3116.
3. URBAN, R., ŠTRONER, M., VRÁBLÍK, L. Etapové měření tvaru nosné konstrukce mostu přes Labe v Mělníku In: Stavební obzor. 2009, roč. 18, č. 3, s. 79-84. ISSN 1210-4027.
4. BRAUN, J., ŠTRONER, M., TRÁSÁK, P. Experimentální určení přesnosti záměry při nivelaci In: Geodetický a kartografický obzor 2012, 58/100, č. 10. ISSN 0016-7096.
5. ŠTRONER, M. - HAMPACHER, M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. 1. vyd. Praha: CTU Publishing House, 2011. 313 s. ISBN 978-80-01-04900-6.
6. HORÁK, Z., KRUPKA, F., ŠINDELÁŘ, V. Technická fyzika. Vyd. 2. přeprac. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960, 1435 s.
7. WALD, F. Fire test on an administrative building in Mokrsko Prague: Czech Technical University in Prague, 2010, 151 s. ISBN 978-80-01-04571-8.