

E xperimentální 2007 A nalyza N apětí

DEVELOPMENT OF TECHNICAL EQUIPMENT AND METHODS FOR STATIC LOADING TESTS

TECHNICKÉ PROSTŘEDKY A METODY OMEZOVÁNÍ NEJISTOT SPRÁVNOSTI EXPERIMENTÁLNÍHO OVĚŘOVÁNÍ STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ STATICKOU ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKOU

Jan Záruba-Pfeffermann,¹ Pavel Štemberk², Simona Sedláčková³

***Abstract:** New technical equipment and methods for loading tests of engineering structures, especially for bridge structures, are still developed in the laboratory of the Klokner Institute. Required metrological conditions for static loading tests of bridge structures are analysed in the paper. Late innovation activities of measuring methods are presented as well.*

***Keywords:** loading tests of bridges, deflections, wire strain-gauge method, levelling, laser ray*

1. Úvod

Statické zatěžovací zkoušky, zejména mostů, se staly jen normou doporučenou záležitostí, takže se z pohledu experimentátora jedná daleko více o prodej jím nabízeného produktu. Otázka zajišťované metrologické kvality při experimentech proto není jen zda je, nebo není splněna norma, ale i způsobilost akceptovat i speciální přídavné požadavky objednatele a to prakticky (v systémové realitě) za podmínky, že veškerá rizika v důsledku nepředvídaných okolností nese dodavatel experimentu.

Důsledkem tohoto stavu je, že zatím většina požadavků na provedení zatěžovací zkoušky, možná ze setrvačnosti, vyplývá z obdobných důvodů jako v dobách kdy provedení zkoušek bylo povinností vyplývající z normy. Jedná se tudíž prioritně o všemi stranami (dodavatel, investor a provozovatel) akceptovanou součást předávacího protokolu při uvádění nové stavby (mostu) do provozu. Je přirozené, že u takovýchto zkoušek je upřednostňovaná formální stránka experimentu (stavba splňuje- nesplňuje normové požadavky a způsobilost realizátora experimentu ve smyslu úředního pověření) resp. právní využitelnost výstupů zatěžovací zkoušky. Skutečnost, že objednavatel zkoušky má možnost i třeba nepochybně účelnou zatěžovací zkoušku odmítnout, zásadním způsobem obchodně znevýhodňuje pozici realizátorů zatěžovacích zkoušek.

¹ Ing. Jan Záruba-Pfeffermann, CSc., Kloknerův ústav, České vysoké učení technické v Praze; Šolínova 7, 166 08 Praha 6; tel.: 02-24353524, fax: 02-24353537; e-mail: zaruba@klok.cvut.cz

² Ing. Pavel Štemberk, Kloknerův ústav, České vysoké učení technické v Praze; Šolínova 7, 166 08 Praha 6; tel.: 02-24353540, fax: 02-24353537; e-mail: stem@klok.cvut.cz

³ Ing. Simona Sedláčková, Kloknerův ústav, České vysoké učení technické v Praze; Šolínova 7, 166 08 Praha 6; tel.: 02-24353855, fax: 02-24353537; e-mail: sedlacek@klok.cvut.cz

Takto nastavené podmínky hospodářské konkurence vedou obecně k výhradní orientaci na rutinní experimentální postupy, což při snaze obchodně seriózními cestami obstát v konkurenci experimentátorských pracovišť, toto též vede k nutnosti stálého zdokonalování technického vybavení pro realizaci rutinních zatěžovacích zkoušek tak, aby se minimalizovala pracnost provedení rutinních zatěžovacích zkoušek. Zejména se jedná o náročnost instalace přístrojového vybavení, časovou náročnost provádění odečtů, záznamů a výstupů pro počítačové zpracování provedených měření.

Výsledky snah KÚ ve zdokonalování technického vybavení v uvedeném smyslu jsou potom hlavním předmětem tohoto příspěvku

Vedle tohoto nejrozšířenějšího požadavku provedení normou specifikované zatěžovací zkoušky(tedy zkoušky jejímž výstupem je potvrzení, že nebyly zjištěny deformace a další mechanické veličiny mimo normou přípustné pásmo a že zkoušky byly zajištěny v souladu s normou předepsanými formálními, povětrnostními a případně dalšími podmínkami) jsou často požadovány zatěžovací zkoušky, které nemají jednoznačnou vazbu na normou stanovený postup a přípustné meze zajištěných podmínek pro experiment ani parametrů experimentem zjišťovaných hodnot. Jejich prioritním smyslem je zpravidla potvrdit nebo získat orientační body pro hypotetický matematický popis mechanické funkce specifických staveb. V současné době se nejčastěji jedná o „přesýpané“ mostní konstrukce a o silně poškozené stavby.

U takovýchto zkoušek a experimentů je předmětem realizační rozvahy i to, co se bude při zkoušce kontrolovat a to především z pohledu:

Co je ekonomicky reálné zajistit a jakou úroveň souhrnných nejistot výsledků experimentu lze připustit. Jedná se proto vždy, alespoň částečně o technickou improvizaci, která je zásadně odborně náročnější, než je realizace rutinní zatěžovací zkoušky.

Problémem ovšem je, že objednavatele experimentu zpravidla zastupuje obchodní zástupce, pro kterého (pokud vůbec připustí ukazatel jako je odborná náročnost) tak jen v krajních polohách – ano a ne.

Kloknerovu ústavu, resp. realizátorům experimentu nezbyvá, než přizpůsobit tech. vybavení pro rutinní zkoušky i potenciální potřebě improvizovat experimenty i v podmínkách obtížnějších než obvykle připouští normy, což je též jedním z důvodů výraznější orientace KÚ na aplikace strunové měřicí techniky a dalších odlišností experimentálního vybavení užívaného Kloknerovým ústavem.

2. Měření veličiny

Zatěžovací zkoušky mostů prováděné podle normy předpokládají:

- kontrolu průhybu mostovky zatíženého a případně sousedních polí a to zpravidla ve středním řezu a to minimálně ve dvou bodech
- kontrolu zatlačení opěr nebo pilířů vymezujících zatížení pole
- kontrolu stlačení podpěrných ložisek zatíženého mostního pole
- kontrolu povětrnostních podmínek, za kterých zkouška probíhá (teplota, vítr a orientačně míra oslunění)

Přičemž minimální interval zatěžovacího cyklu (přetížený a odlehčený stav) připouštěný normou je zpravidla větší než 1 hod.

Obvykle na základě doplňujících požadavků projektanta je často vyžadována:

- širší kontrola prohrátí kontrolované stavby
- kontrola existence a chování trhlin při zatěžování
- doplňující tensometrická kontrola napjatosti
- paralelní, metodicky nezávislá kontrola klíčových veličin pro zkoušku (např. kontrola průhybové křivky, měření změn podélných a případně i příčných náklonů v charakteristických bodech stavby a pod.

Pro výběr experimentálních metodik a technického vybavení je klíčovou podmínkou způsobilost zajistit potřebnou úroveň nejistot měření respektive souhrnných nejistot experimentu. V tomto smyslu lze obecně charakterizovat experimenty IN SITU ve stavebnictví tak, že je žádáno experimentálně doložit, že se mechanická funkce neliší od předpokladu více než o 5 %, z čehož vyplývá pro experimentátory morální povinnost rozhodovat při výběru metodik a vybavení s vůlí zajistit nejistoty experimentu pod hranicí 1% u základního normou předepsaného souboru kontrolovaných veličin.

Jelikož si reálné ekonomické tlaky často vynucují provádět zkoušky i za podmínek, kdy ani tento požadavek není prakticky reálně splnit, norma své požadavky formuluje tak, že zkouškou zjištěné deformace nejsou větší než stanovená mez. To ovšem v podstatě připouští riziko schválení stavby, i když skutečné deformace jsou v pásmu mezi stanovenou mezí a touto mezí zvětšenou o nejistotu experimentálního zjištění. Dalším klíčovým parametrem důležitým zejména pro aplikační univerzálnost používaného technického vybavení je obvyklý rozsah změn velikosti měřených veličin resp. obvykle požadovaný funkční rozsah snímačů kontrolovaných veličin. V případě zatěžovacích zkoušek mostů je hlavní kontrolovanou veličinou průhyb středu mostovky, přičemž délka naprosté většiny statickými zatěžovacími zkouškami kontrolovaných polí je v rozsahu 16 – 42 m. U kratších polí tato kontrola zatěžovací zkouškou není zpravidla vyžadována a mosty s delšími poli jsou zase zpravidla unikátními stavbami ve specifické lokalitě (přemostění širokého vodního toku, hluboké údolí atd.) takže u příslušné zkoušky zpravidla převažují specifické kontrolní požadavky nad rámcem normou vyžadovaného povinného rozsahu zatěžovací zkoušky. Nejedná se proto o rutinní zkoušky. Maximální průhyby měřené při zkouškách mostů obvyklých rozměrů se při zatěžovacích zkouškách proto pohybují v rozsahu 1,5 až 25 mm.

Jelikož zajištění rozlišovací schopnosti lepší než 0,5 % maximálního průhybu je ve smyslu předchozího zbytečné a v zájmu omezení chyb instalace je umožnit přednastavení všech průhyboměrů do cca středu měřicího rozsahu, je správné volit citlivost měření tak, aby využitelný rozsah měl alespoň 500 dílků s velikostí cca 0,5 % max průhybu.

Na závěr těchto diskusních a proto i diskutabilních odstavců je třeba uvést několik poznámek a postřehů:

- základním problémem statických zatěžovacích zkoušek (zejména mostů) prováděných v podmínkách IN SITU je ekonomická nerealnost získat dostatečně přesný odhad teplotních a vlhkostních tvarových změn zkoušeného objektu během zatěžovací zkoušky
- v realitě nebývá ani časový prostor pro upřesnění tohoto odhadu cestou observace a tak nezůstává jiná možnost, než zkompletovat časový průběh srovnávacích nulových odečtů jejich propojením křivkou souběžnou s průběhem změn odpovídajících

zatíženým stavům zkoušené konstrukce. I tak ovšem při odhadu nejistot experimentu musíme předpokládat chybu zavedené korekce na úrovni 5-20% její velikosti, což je v absolutní velikosti většinou rozhodující složkou souhrnné nejistoty experimentu

- výchozí zkušeností KÚ pro metodická rozhodnutí a vývojové aktivity v oblasti statických zatěžovacích zkoušek mostů je realizace zatěžovací zkoušky Nuselského mostu v r. 1969, na kterou bylo uvolněno tolik finančních prostředků a pracovních kapacit, že bylo zajištěno odzkoušení všech v té době známých nadějných metodik a to v rozsahu, který dovolil i statistické posouzení jimi zajišťovaných metrologických kvalit

3. Metodiky měření a příslušné technické vybavení vyvíjené a upřednostňované v KU

3.1. Měření průhybu mostovky

Měření relativního pohybu mostovky vůči terénu pod mostem

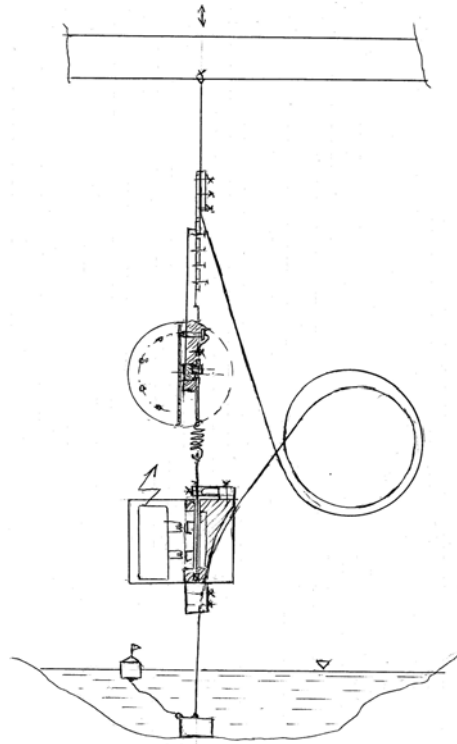
I když existují laserové dálkoměry s dostatečnou rozlišovací schopností řádu 0,1 mm, je prakticky nereálné zajistit i přiměřenou úroveň nejistoty odečtu cestou vyžadující přenášení dálkoměru, takže je zatím tato cesta z ekonomických důvodů nepoužitelná a KÚ upřednostňuje strunový systém, kde je průhyb přenášen pomocí předpjaté (cca 150N) invarové struny \varnothing 2 mm přes pružinu na strunový siloměr upevněný na terénu pod mostem (obr.1)



Obr. 1. Průhyboměr se strunovým siloměrem.

Zejména pro případy měření průhybů nad vodní hladinou bylo nově navrženo řešení podle obr.2, které se vyznačuje především tím, že umožňuje variabilní polohu deformetrického

zařízení na invarovém táhle a má zajištěno operativně využitelné kalibrační zařízení využívající klikový mechanismus nastavení kalibrační polohy.



Obr. 2. Průhyboměr s vestavěným kalibračním přípravkem.

Obecnou výhodou této měřicí metody je snadná přestavitelnost citlivosti měření volbou tuhosti pružin převádějících deformaci na sílu zanedbatelná úroveň hystereze a funkční odolnost proti zhoršeným povětrnostním podmínkám. Určitou nevýhodou je naopak potřeba kalibrovat každou instalaci průhyboměrného systému a nutnost korigovat výstupní údaj o pokles zjištěný na opěrách a pilířích.

Geodetická nivelace

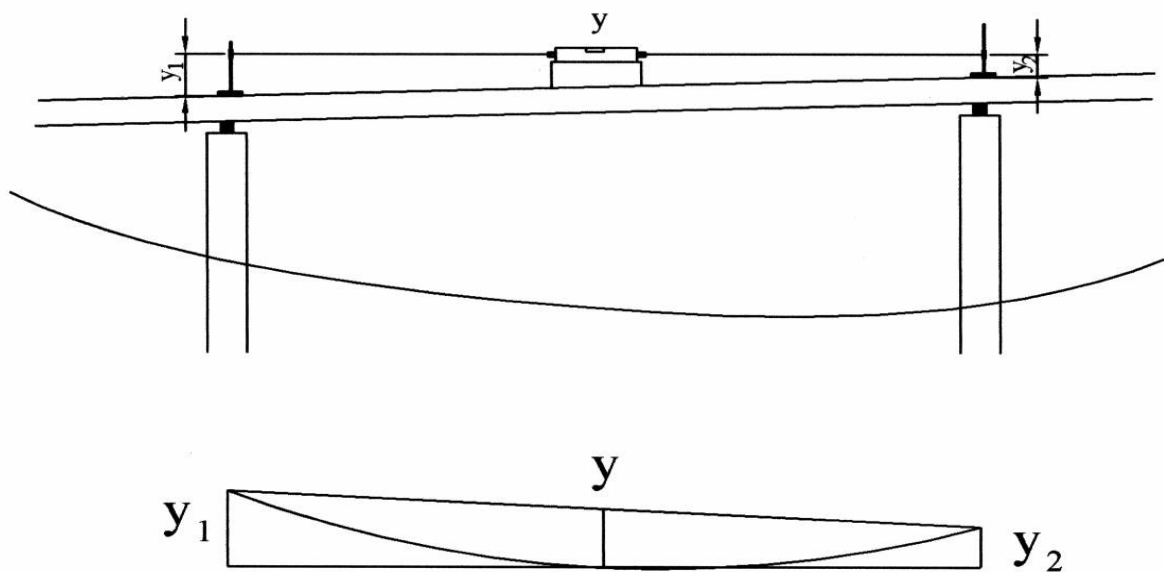
Geodetická nivelace, neboli postupná geodetická kontrola změn svislé souřadnice kontrolovaných bodů konstrukce je univerzální metodou s minimálními časovými nároky na přípravu měření, ale má celou řadu specifických aplikačních překážek:

- Zvýšená časová náročnost provedení odečtu zhoršuje možnost korekce odečtených hodnot podle změn odpovídajících změnám prohřátí konstrukce během zatěžovací zkoušky.
- Klasické vizuální geodetické vybavení je citlivé na vibrace podloží nebo poryvy větru, navíc při výšce záměrné přímkou cca 1,5 m je obvykle využívána zátěž (seskupení nákladních automobilů) neprůhlednou překážkou.
- I špičkový geodet pracuje s nejistotou odečtu při nejčastější vzdálenosti cca 20 m horší než 0,1 mm, takže i kvalifikované „vyrovnání“ výsledků měření vedou zpravidla k souhrnným nejistotám experimentu horším než $\pm 0,2$ mm.

Snadněji lze této úrovni nejistot dosáhnout aplikací digitálních nivelačních zařízení s odečtem na lati se speciálním „čárovým“ kódem nebo laserovou technikou s využitím laserových vodováh s oboustranně vyzařujícím laserovým paprskem viz obr. 3 a 4.



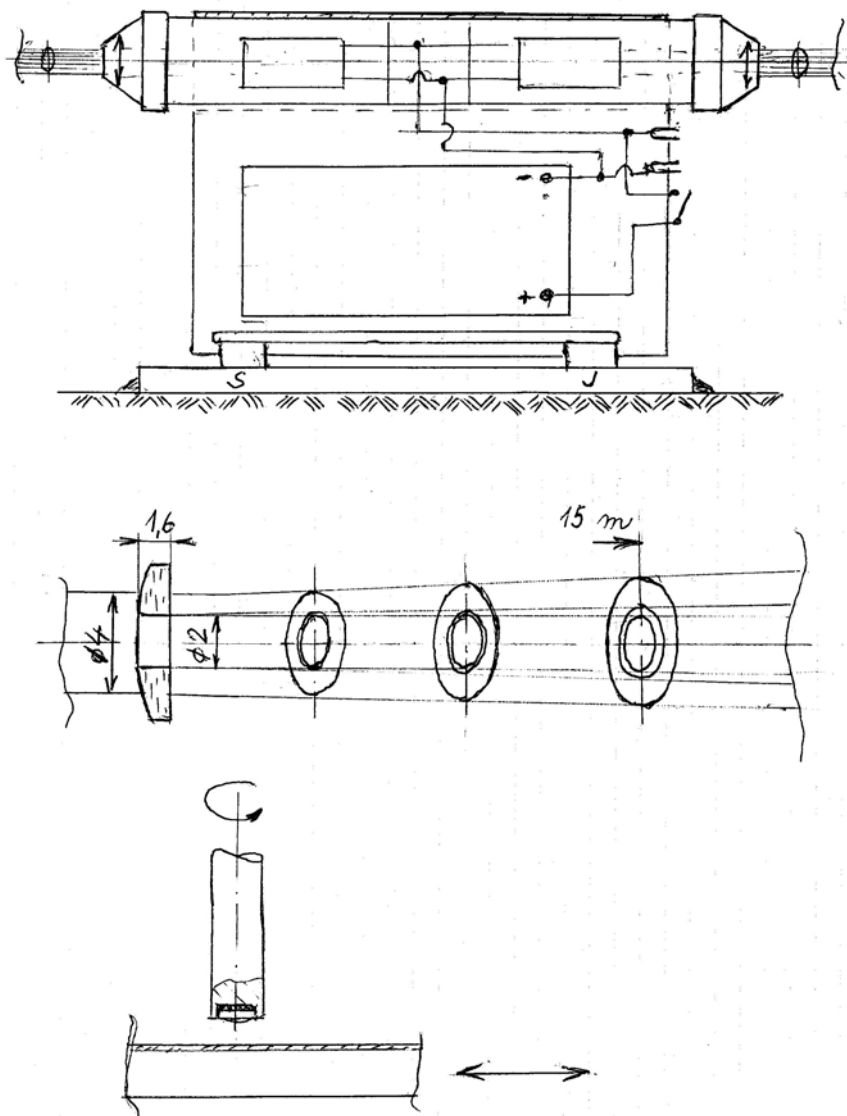
Obr. 3. Používané laserové vodováhy.



Obr. 4. Schéma měření průhybu ve středu mostovky.

Nejzávažnějšími výhodami aplikace laserových vodováh je:

- Možnost využívat záměrné přímký i jiné než horizontální.
- Nenáročnost na osvětlení kontrolovaného objektu, zejména výhodná při nočních měřeních.
- V pojetí rozvíjeném Kloknerovým ústavem s orientací na diodové lasery z hromadné výroby i extrémně nízké pořizovací náklady příslušného technického vybavení.
- Výhodná využitelnost části instalace i pro paralelní kontrolu změn náklonu.
- V současné době Kloknerův ústav zkouší vylepšení této techniky podle naší patentové přihlášky cestou podle obr. 5.



Obr. 5. Dvoupaprskový laserový přípravek s úpravou paprsku podle vynálezu.

Využití odporových (potenciometrických) převodníků relativních posuvů na úměrnou změnu elektrického odporu.

Z metodik upřednostňovaných jinými experimentátory v oblasti statických zatěžovacích zkoušek mostů se Kloknerův ústav vybavuje a využívá potenciometrické snímače dráhy s přímým potenciometrem. Tato technika je Kloknerovým ústavem obecně využívána pro kontrolu změn rozměrů krátkých bází (stlačení ložisek, průhyb nízkých mostů) a pro měření průhybu s požadovanou vyšší frekvencí odečtu..

3.2. Měření dalších normou vyžadovaných veličin.

Měření stačení ložisek, deformací a poklesu podpěr, teplot v průběhu zkoušky, rychlosti větru atd. je Kloknerovým ústavem zajišťováno pomocí standardních, převzatých přístrojů.

3.3. Měření veličin na základě speciálních požadavků.

Nejčastějším požadavkem na doplňující kontrolní pozorování v průběhu statické zatěžovací zkoušky je kontrola změn šířky trhlin a tensometrická kontrola změn napjatosti zkoušené konstrukce.

Problém diagnostiky významu trhlin pro mechanickou funkci a životnost stavební konstrukce je aktuálním výzkumným zaměřením Kloknerova ústavu, ale není zahrnut do rámce tohoto příspěvku. Úroveň řešení problematiky tensometrie pro statická měření nedoznala závažnějších změn proti informacím o stavu rozvoje této problematiky přednesené této odborné veřejnosti na konferenci EAN 2001. Podobně je tomu i v oblasti rozvoje strunových aparatur pro statická měření, kde je předpokládán závažnější počín až v návaznosti na rozhodnutí o výběru typu radiopojítka, které se ukáže v reálných podmínkách nejspolehlivější a ekonomicky ještě přijatelné a přiměřené.

***Poznámka:** Současné rozvojové iniciativy Kloknerova ústavu v oblasti strunového měření metody jsou orientovány prioritně na podporu rozvoje experimentální statistické dynamiky pro potřeby odhadu zbytkové životnosti.*

5. Závěr

Smyslem příspěvku je předání informací o metrologických problémech, které musí v současných podmínkách řešit realizátor statických zatěžovacích zkoušek mostů a vývojových aktivitách Kloknerova ústavu, které řešení těchto problémů usnadňují a to ve smyslu experimentálních metodik a příslušného technického vybavení.

Poděkování: Předložený text je informací o výsledcích řešení tradiční rozvojové aktivity KÚ, která současně probíhá pod patronátem výzkumného záměru MSM 684 077 0015.

Literatura

- [1] Záruba, J. ,Švanda, J., Štemberk, P.: *Development of technical equipment for static loading tests.* EAN 2001, p. 349-354
- [2] Záruba, J. , Štemberk, P.: *Experimental verification of extreme dynamic load effects on building structure* IM 2003, p.402- 403
- [3] J Záruba, J. , Štemberk, P.: *Zkušební testovací metoda pro testování konstrukcí, a zařízení k jejímu provádění.*, CS patent č. 297 527 (2007)