

# E xperimentální A nalýza N apětí 2005

## DEVELOPMENT AND MODERNIZING OF METODICS AND TECHNICAL EQUIPMENT FOR DIAGNOSTIC MONITORING OF SHAPE CHANGES OF HISTORICAL BUILDINGS

Ing. Jan Záruba, CSc., Ing. Tomáš Novotný

*Summary:* By preparing the sanitation of one of the most important monument in Prague – Charles bridge, there was a need of developing and attesting a special metodic of shape changes monitoring. For monitoring we use laser technology and digital camera. We are introducing principle of the methodic of monitoring.

### Keywords

Historical stone building, diagnostic monitoring, crack width, deflection, yawing, cant

### Úvod

V rámci spolupráce Kloknerova ústavu na grantovém úkolu GAČR 103/02/0990 „Výzkum vlivu nesilových účinků a agresivních prostředí na stárnutí historických staveb se zvláštním zaměřením na Karlův most v Praze“ kde KÚ zajišťoval dílčí řešení s názvem „Kontrola tvarových změn Karlova mostu při nesilovém zatížení“ vznikla potřeba operativně řešit důsledky dlouhodobé neúcty k historickým památkám ze strany státní správy, která vedla i k totální stagnaci diagnostických metodik specializovaných na tuto oblast.

Staletí přeživší kamenné historické stavby mají již zpravidla charakter kamenné rovnaniny, kde případné dodatečné opravy malt a jiných výplní spár mezi kameny mají za prioritní účel vytváření zábran, které zpomalují postupnou chemickou a biologickou destrukci související s obecným stárnutím stavby.

Z pohledu monitoringu je hlavním specifikem těchto staveb:

- jejich mimořádná tuhost
- extrémně malý poměr mezi předpokládaným provozním přitížením a zatížením stavby od vlastní hmotnosti
- zanedbatelná úroveň tahové pevnosti zdiva

mimořádně dlouhé časové konstanty teplotních a vlhkostních změn probíhajících v těchto stavbách

Z tohoto většinou vyplývá naprostá dostatečnost monitoringu založeného na vizuální kontrole stavu stavby a až když se touto cestou objeví poruchy s nejasnou příčinou jejich vzniku, je obvyklé uvažovat o možnostech aplikace diagnostického monitoringu tvarových změn.

Ing. Jan Záruba , CSc.: Kloknerův ústav, ČVUT v Praze, Šolínova 7, 166 08 Praha 6 – Dejvice;  
tel.:+420 224 353 524, fax: +420 224 353 537, e-mail: zaruba@klok.cvut.cz

Ing. Tomáš Novotný, Kloknerův ústav, ČVUT v Praze, Šolínova 7, 166 08 Praha 6 – Dejvice;  
tel.:+420 224 353 527, fax: +420 224 353 537, e-mail: tominon@centrum.cz

Potřeba monitorovat tvarové změny kamenné historické stavby rovněž často vzniká v souvislosti s potřebou prokázat, že závažnější zásah do konstrukce nezpůsobil, respektive naopak zarazil nepříznivý vývoj poruch konstrukce, nebo v případě potřeby specifikovat mechanické vlastnosti tmelů a podobně při přípravě poruch.

Je sice pravdou, že monitoring tvarových změn kamenné konstrukce vede k velmi blízkým úlohám známým z oblasti bezpečnostních systémů zajišťujících důlní objekty a z obecných geotechnických pozorování, ale zásadní odlišnost této experimentální aplikační oblasti spočívá v tom, že zde rozvoj probíhá v podmínkách mnohaleté preference finančních dotací s vysokým stupněm centralizace a organizovanosti rozvojových prací a využívání vyvíjených speciálních měřicích řetězců. Vlastní experimenty probíhají vesměs ve střežených lokalitách s vyloučením volného přístupu veřejnosti, takže se zde postupně prosadila orientace na využívání extrémně dokonalých, ale také extrémně nákladných měřicích systémů, jaké si nedovoluje využívat ani oblast experimentálního zajištění reálných průmyslových staveb.

Mimořádný rozsah současného vnitřního zadlužení v oblasti údržby historických památek, kde je navíc problematické seriózně vyhodnocovat jakýkoli ekonomický ukazatel, si vynucuje decentralizovaný přístup orientovaný na podporu lokálních svépomocných iniciativ. Rozvíjené a doporučované metodiky monitoringu musí proto umožňovat i její využívání jen zaškolenou laickou veřejností tak, aby náklady na diagnostiku byly zlomkem nákladů na viditelné údržbářské práce.

Z aplikačního hlediska je nejzávažnější odlišností přístup veřejnosti k místům pozorování nebo naopak obtížnost přístupu k těmto místům z důvodu bezpečnosti obsluhy monitorovacího systému nebo z důvodu ochrany pozorované památky před poškozením. Další komplikací monitoringu památkově chráněných objektů je potřeba povolení k trvalé instalaci monitorovacího systému atd. Pro specifikaci speciálních potřeb technických monitorovacích systémů je v případě historických staveb většinou klíčovým problémem to, že pozorovatelné tvarové změny během denního cyklu jsou obvykle srovnatelně velké jako tvarové změny pozorované v teplotně vyrovnaných momentech ročního cyklu. Z toho vyplývají též dva základní přístupy k monitoringu:

- studijní, s cílem ověřit si experimentálně správnost hypotéz a předpokladů, ze kterých vycházejí rozhodnutí týkající se těchto staveb
- bezpečnostní, jehož hlavním cílem je včas diagnostikovat rozběh nežádoucího procesu vyvolaného selháním mechanické funkce některého z nosných prvků stavby

Veškerá specifika diagnostiky památkových objektů a v podstatě i všechny základní technické požadavky této aplikační oblasti bylo nutné absolvovat v rámci diagnostického zajištění snahy optimalizovat asanaci Karlova mostu. Jelikož se do jisté míry jednalo o potřebu navázat na metodiky využívané v 50. letech 20. století, naše rozvojové snahy se orientovaly zejména na zdokonalení tohoto koncepčního přístupu aplikací nových technických možností (laser, digitální fotoaparát atd.), které jsou dnes zpřístupněny „masovou výrobou“ mechanických zařízení využitelných jako polotovary rozvíjených měřicích přípravků.

## Přehled potřeb a technických řešení doporučených a vyvinutých Kloknerovým ústavem ČVUT

Měření změn šířky trhlin:

Vzhledem k problematice diagnostiky a monitoringu tvarových změn historických kamenných staveb jsou trhliny nejčastější formou poruchy, což je důsledkem mimořádné tuhosti stavebních prvků a prakticky nulové způsobilosti přenášet tahové napětí.

Komplikací nejběžnějšího způsobu monitoringu šířky trhlin vizuálním pozorováním je to, že trhliny zpravidla na povrchu konstrukce sledují spáry mezi kameny vyplněné na povrchu zvětralou nebo již chybějící maltou. Je proto zpravidla nutné použít přemostění trhliny sádrovým můstkem instalovaným v době předpokládaného největšího sevření spáry a změny šířky trhlin potom pozorovat na trhlíně v sádrovém můstku klasickými metodami volenými podle požadované rozlišovací schopnosti pozorování (spárové měřky, lupa nebo mikroskopické zařízení).

U bezpečnostních kontrol šířky trhlin je obvykle dostačující rozlišovací schopnost 0,1 mm (respektive hodnota odpovídající zhruba výkyvům šířky v denním cyklu), ale je zvýšený zájem, aby odečet mohl být prováděn ze snadno přístupného místa a tak aby registrovaná data nemohla být nevědomě ovlivněna „lidským činitelem“.



Obr. 1

Jelikož byl sledován též zájem o minimalizaci pořizovacích nákladů, byl nově vyvinut, odzkoušen a doporučen systém využívající na přemostění trhliny měřič délky 10 cm (viz. Obr.1), vyrobený jako odštípek ze svinovacího metru, který je upevněn na jedné straně trhliny přičemž druhá strana trhliny je opatřena vodítkem (obdobou jezdce posuvného měřítka s noniem). Odečet je potom prováděn fotograficky digitálním fotoaparátem, takže lze z digitálního dokumentu odečíst datum odečtu, kontrolované místo podle výřezu z měřítka a pomocí polohy nonia i změny šířky s rozlišovací schopností 0,1 mm.

Kontrola celkových rozměrů:

Požadavek kontroly změn vnějších rozměrů vychází téměř výhradně ze zájmu bezpečnostních pozorování. Jelikož denní kolísání teploty povrchu konstrukcí je často větší i než 10 °C, je rozlišovací schopnost kontrolních systémů lepší než 10<sup>-4</sup> kontrolované báze zpravidla dostačující. Pro kratší báze je proto dobře použitelný princip doporučený pro kontrolu změn šířky trhlin. Pro nejčastěji kontrolované báze s délkou větší než 10 m je potom dostačující rozlišovací schopnost 1 mm, takže se zde ukazuje jako nejvhodnější aplikace laserového dálkoměru (viz. Obr.2). Plné využití metrologické kvality laserových dálkoměrů (dnes již snadno dostupných na trhu)



Obr.2

vyžaduje speciální úpravu ploch v místech, jejichž rozteč je kontrolována. Při kontrole Karlova mostu se plně osvědčily přísádrované značky (1. opěra s kulovou plochou a 2. rovinná značka s odrazovou plochou kolmou na paprsek laseru).

Měření změn náklonu:

Náklon je veličina, kterou lze odečítat s velkou „stabilitou a necitlivostí“ na vnější rušivé vlivy. Již v 1. polovině 20. století byly vyráběny a dodávány náklonoměry s rozlišovací schopností 1“/dílek. Z pohledu monitoringu tvarových změn kamenných historických staveb byl další rozvoj klinometrických zařízení již málo přínosný, jelikož se orientoval obvykle na urychlení, automatizaci a digitalizaci odečtu nebo na způsobnost aplikace v telemetrii, takže při reálných aplikacích na kamenných stavbách obvykle převažuje negativní stránka tohoto rozvoje, kterou je významné zvýšení pořizovací ceny těchto zařízení.

Specifickou překážkou aplikace náklonoměrů při kontrole tvarových změn kamenných konstrukcí je diskontinuita kontrolovaného subjektu, respektive možnost výrazně nepravidelných a rozdílných natáčení spolu sousedících povrchových kamenů při deformaci kamenné konstrukce, takže měření průhybové křivky na parapetech mostovky Karlova mostu (viz. Obr.3) bylo neúspěšné, zatížené příliš velkou náhodnou odchylkou, ale výsledky kontroly příčných změn náklonů (viz. Obr.4) lze s dostatečnou věrohodností vyhodnotit.



Obr.3



Obr.4

Kontrola svislých posuvů:

Požadavek monitoringu svislých posuvů je nejčastější při pozorování průhybu horizontálních konstrukcí a při kontrole stability, respektive sedání základů pilířů atd. Pokud se (jako na příklad u základových konstrukcí) jedná o zájem kontrolovat absolutní výškové změny, je zpravidla stále nejvýhodnější využití klasických geodetických metodik. Naopak při potřebě kontrolovat průhyby horizontálního prvku konstrukce (například mostovky) je výhodnější aplikace laserové nivelační techniky, jelikož cenově dostupná, nebo-li hromadně vyráběná laserová technika doplněná příslušenstvím pro aplikace, kde je očekávána rozlišovací schopnost řádu milimetrů je Kloknerovým ústavem vypracována na základě vyřešení problému, jak tuto levnou techniku využít jako polotovaru pro laserové vodováhy dovolující kontrolu nivelety s nejistotou řádu desetin milimetru. Tento úkol se daří řešit následujícími cestami:

- přestavbou laserových vodováh tak, aby vysílaly laserový paprsek symetricky na obě protilehlé strany (viz. Obr.5)
- zajištěním externího spínače pro rozsvěcování laserových zářičů
- umístováním laserových zářičů do míst největšího očekávaného průhybu, respektive do míst ve kterých při deformaci konstrukce nedochází v kontrolovaném směru k naklápění
- opatřováním kontrolovaných míst přitmelenou vodorovnou kontaktní destičkou
- odečítáním vzdálenosti paprsku od kontrolních destiček pomocí posuvky opatřené terčovitým stínítkem na jezdcí (viz. Obr.6)
- a současně se soustředíme na hledání nejvhodnějších optických členů pro rozložení laserového paprsku tak, aby byl maximálně podpořen obraz laserového paprsku na stínítku ve tvaru soustředných mezikružích,

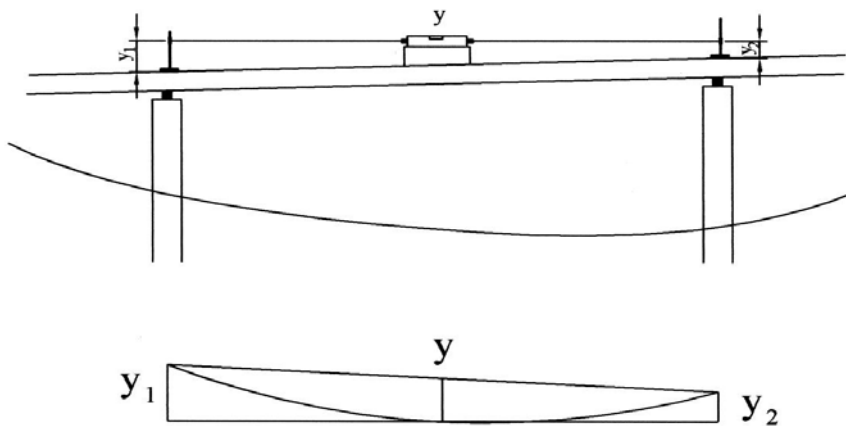


Obr.5



Obr.6

v případě Karlova mostu vedly tyto snahy k řešení podle Obr.5 a 6 s vyhodnocením průhybu podle schématu na Obr.7.



$$\Delta y = (\Delta y_1 + \Delta y_2) / 2$$

Obr.7

### Kontrola příčných vybočení:

Kontrola příčných vybočení je technickou obdobou měření průhybů horizontálních prvků. Je zde pouze poněkud náročnější jejich upínání na kontrolovaný stěnový prvek stavby. V případě Karlova mostu bylo využito řešení podle Obr.8 a 9. s magnetickým upínáním zářiče na svislou plochu prizma instalovaného nad středem mostního oblouku a magnetickým upínáním odečítacího přípravku na svislé čelo přemostovacího přípravku vynuceného aplikací nákolonoměru pro měření příčných náklonů parapetů mostovky



### Poděkování

Prezentovaná nová řešení vznikla jako náš příspěvek snahám optimálně a co nejehospodárněji zvolit způsob asanace Karlova mostu, přičemž text shrnující poznatky v této specifické oblasti dlouholetého diagnostického monitorování stavebních konstrukcí je součástí řešení záměru VZ6840770026.

### Reference:

- [1] J.ZÁRUBA-P.BOUŠKA-P.ŠTEMBERK-M.VOKÁČ: *Cotinuous report about both structure deformation monitoring of Charles Bridge and estimation of mechanical and physical properties of stone used in bridge structure*, CTU in Prague Klokner Institute, 2003, pp. 1-22
- [2] CTU KI – REPORTS: *Loading test sof road and railway bridges*, CTU in Prague Klokner Institute, 2003.
- [3] J.ZÁRUBA: *Experimental check of shape changes of Charles bridge by unforce loading*, CTU in Prague Klokner Institute, 2004.