

SMYKOVÁ ÚČINNOST DESKOVÝCH PRVKŮ PODPÍRAJÍCÍCH KONZOLY KOMOROVÝCH MOSTŮ ■ SHEAR EFFICIENCY OF STRUT PLATES SUPPORTING CANTILEVERS OF BOX GIRDER BRIDGES

Lukáš Kadlec, Vladimír Křístek, Lukáš Vráblík

Na základě klasických přístupů teorie konstrukcí jsou sledovány soustavy izolovaných skloněných vzpěrných stěn podporujících konzoly průřezu v porovnání s použitím celistvé části komorového průřezu; hodnoceny jsou důsledky tohoto uspořádání z hlediska využití pro přenos krouticích a smykových účinků. Výsledky parametrické studie mohou posloužit pro optimalizaci rozměrových parametrů prvků komorových mostů. ■ Based on the classic theory of structures, a system of isolated separate inclined strut plates supporting the cantilevers of section is compared with the arrangement using continuous inclined plates as an integral part of the box girder cross section; assessed are these arrangements from the point of view of torsion and shear carrying capacities. The results of the presented parametric study can be used to optimize the dimensional parameters of elements of box girder bridges.

V poslední době se setkáváme s komorovými mosty, jejichž nosná konstrukce je vytvářena postupně. Nejdříve je stavěn základní monolitický páteřní nosník tvořený střední komorou, potom jsou osazeny vnější prefabrikované vzpěry a konečně je vybetonována mostovková deska (obr. 1 a 2). Otázkou je, jak se vnější, vzájemně nespojené, vzpěry podílejí a jak jsou účinné při přenosu účinků vyvolaných smykovým namáháním a kroucením.

Chování vzpěrového stěnového prvku při působení v konstrukci podle obr. 1 zřejmě významně závisí na poměru jeho šířky a délky – pokud je prvek široký, dominuje jeho smykové přetvoření (obr. 3a), s jeho klesající šířkou se stále více uplatňuje a posléze zcela převládá jeho ohybová deformace (obr. 3b) doprovázená dramatickým nárůstem poddajnosti –

do akce v mostní konstrukci se takovýto prvek zapojuje spíše jako prut Vierendelova nosníku.

Pro účely výpočetní analýzy byl vyšetřován stěnový prvek délky L , šířky B a tloušťky t , jehož dva protilehlé okraje se navzájem posunou o vzdálenost v (obr. 3). Hledá se relace tuhosti prvku v porovnání s tuhostí odpovídající případu plného smykového působení prvku jako součásti komorového průřezu při této deformaci.

Je použit optimistický předpoklad vzájemného posunu protilehlých okrajů bez jejich deformace (obr. 3). Ve skutečném konstrukčním uspořádání (obr. 1, 2) však připojení tohoto vzpěrového prvku do mostní konstrukce není zcela nepoddajné (a to tím více, čím je mezera mezi vzpěrami větší); to je důvodem dalšího zvýšení poddajnosti – proto skutečné redukce tuhosti jsou ještě významnější, než uvádějí dále odvozené závislosti.

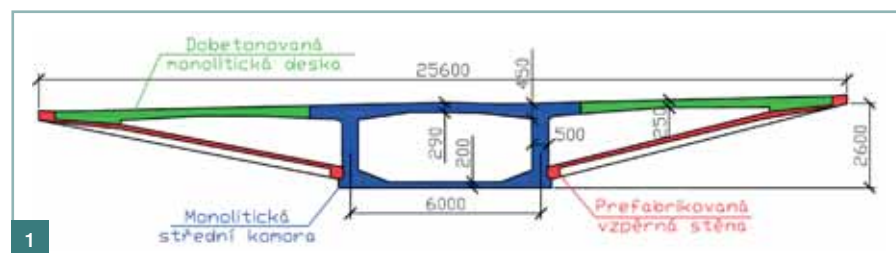
Řešení lze provést klasickou analytickou cestou: využijme antisymetrického charakteru úlohy vzhledem k polovině délky umožňující řešit polovinu stěnového prvku, nalezneme funkci napětí $\varphi(x,y)$ [Airy, 1863] vyhovující biharmonické rovnici:

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = 0 \quad (1)$$

a umožňující splnění příslušných okrajových podmínek.

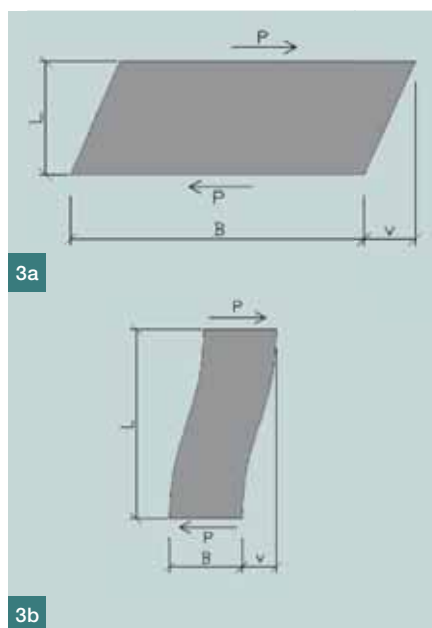
Pro vzájemný posun vodorovných okrajů vzpěrového prvku (obr. 3) platí

$$v = \frac{2Pn(2n^2 + 4 + 5\mu)}{4Et} \quad (2)$$



Obr. 1 Typické uspořádání analyzovaného konstrukčního řešení, příčný řez mostu – prefabrikované vzpěry (převzato z [4]); most na R1 nad údolím Hošťovského potoka, nedaleko města Nitra, projekt RDS zpracovala firma SHP ■ Fig. 1 Typical arrangement of the analyzed structural system. Cross section of the bridge – precast strut plates (after [4]); the bridge on the R1 over Hostovský creek valley, near the town of Nitra, the project prepared by the firm SHP

Obr. 2 Osazování vzpěrných prefabrikovaných stěnových prvků, (převzato z [4]); most na R1 nad údolím Hošťovského potoka, nedaleko města Nitra, projekt RDS zpracovala firma SHP ■ Fig. 2 Assembly of precast strut plates (after [4]); the bridge on the R1 over Hostovský creek valley, near the town of Nitra, the project prepared by the firm SHP



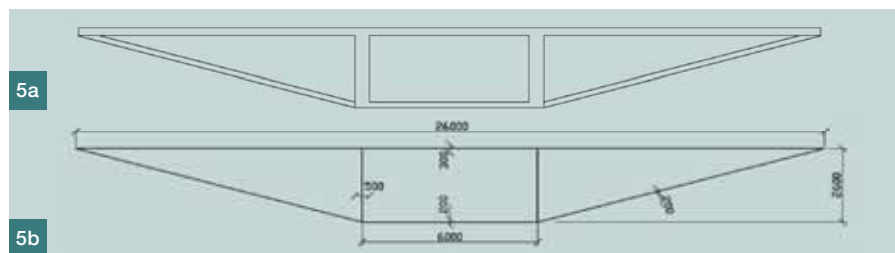
Obr. 3 Charakter deformace: a) široká stěna s dominujícím smykovým působením, b) úzká stěna s převažujícím ohybovým působením ■ Fig. 3 Deformation patterns for: a) a wide wall exhibiting dominant shear performance, b) a narrow wall with prevailing flexural performance

Obr. 4 Nárůst poddajnosti vzpěrných prvků v závislosti na poměrech jejich rozměrů ■ Fig. 4 Compliance increase of strut plate elements in terms of their dimensional ratios

Obr. 5 Řešený průřez: a) reálný tvar, b) osově schéma ■ Fig. 5 Cross section under consideration: a) real arrangement, b) centre-line diagram

Obr. 6 Účinnost systému vzpěrných prvků na torzní působení průřezu v závislosti na jejich šířce ■ Fig. 6 Efficiency of the strut plate elements on torsional performance, depending on the width of the strut elements

Obr. 7 Účinnost systému vzpěrných prvků na smyková napětí ve stěnách komory v závislosti na šířce vzpěrných prvků ■ Fig. 7 Efficiency of the strut plate elements on shear stress values in the webs of the box, depending on the width of the strut elements



kde $n = L/B$, μ je Poissonův součinitel, E modul pružnosti materiálu a P je síla v prvku, která odpovídá posunu v .

Pro velmi velké šířky B v porovnání s délkou prvku L dominuje smykové chování; jako limitní případ tomu odpovídá vzájemný posun vodorovných okrajů o velikosti

$$v_s = \frac{2(1+\mu)Pn}{Et} \quad (3)$$

Pro nárůst poddajnosti vzpěrného prvku, definované jako poměr poddajnosti prvku s rozměry L , B a poddajnosti prvku v plně smykovém režimu (např. jako součást prizmatického komorového nosníku), dostáváme jednoduchý vztah

$$r = \frac{(2n^2 + 4 + 5\mu)}{4(1+\mu)} \quad (4)$$

Použijeme-li hodnotu $\mu = 0,15$, dostáváme

$$r = 0,4348 \left(\frac{L}{B} \right)^2 + 1,0326 \quad (5)$$

pro $\mu = 0,18$ potom

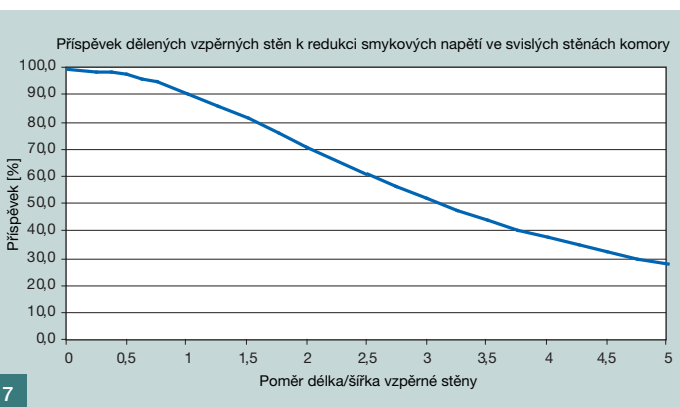
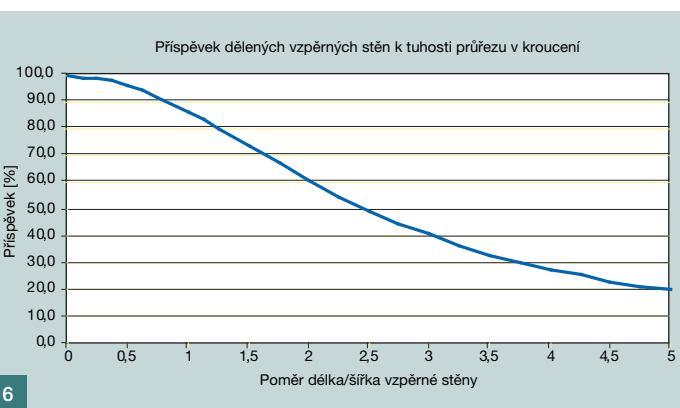
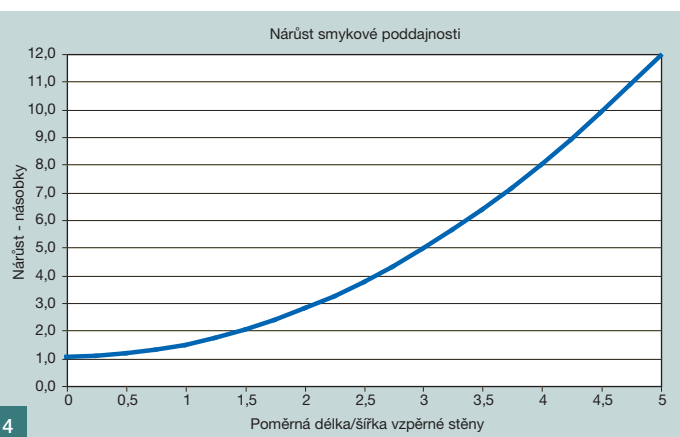
$$r = 0,4237 \left(\frac{L}{B} \right)^2 + 1,0381 \quad (6)$$

Rozdíly mezi vztahy (5) a (6) jsou nevýznamné. Vztahy jsou pro $\mu = 0,18$ vyznačeny v obr. 4.

Z grafu např. vyplývá téměř osminásobné zvýšení poddajnosti vzpěrného prvku při poměru jeho délky a šířky 4:1.

Na úrovni konstrukce je možno sledovat účinnost vzpěrných stěn v režimu namáhání kroucením a v režimu namáhání smykem. Pro tuto studii byl vybrán idealizovaný průřezový tvar podle obr. 5a.

Aplikace vzpěrných stěn znamená příspěvek k tuhosti průřezu v kroucení oproti průřezovému uspořádání bez těchto stěn. Vezmeme-li za základ příspěvek odpovídající souvislé podélné vzpěrné stěně (bez dělení na jednotlivé vzpěrné prvky, tj. pro tříkomorový průřez), potom příspěvek systému dělených vzpěrných prvků, v závislosti na jejich šířce, je pro řešený, výše znázorněný průřez a Poissonův součinitel $\mu = 0,15$ znázorněn na obr. 6 (pro $\mu = 0,18$ jsou výsledky prakticky identické).



Z obr. 6 je např. patrné, že pro sledovaný průřez podle obr. 5, pro poměr délka/šířka vzpěrných stěn = 4, by byl jejich příspěvek k torzní účinnosti systému jen **28 %** toho, čeho by bylo dosaženo při spojení vzpěrných stěn do celistvé smykově účinné stěny.

Aplikace vzpěrných stěn znamená snížení smykových napětí ve svislých stěnách střední komory mostu oproti průřezovému uspořádání bez těchto stěn. Vezmeme-li za základ tento příznivý účinek odpovídající souvislé podélné stěně (bez dělení na jednotlivé vzpěrné prvky, tj. pro tříkomorový průřez), potom příspěvek systému dělených vzpěrných prvků, v závislosti na jejich šířce, je pro řešený průřez a pro Poissonův součinitel $\mu = 0,15$ znázorněn na obr. 7 (pro $\mu = 0,18$ jsou výsledky prakticky identické).

Z obr. 7 je např. patrné, že pro sledovaný průřez podle obr. 5, pro poměr délka/šířka vzpěrných stěn = 4, bude tento systém přispívat k redukci smykových napětí ve svislých stěnách komorového průřezu jen **38 %** toho, čeho by bylo dosaženo při spojení vzpěrných stěn do celistvých smykově účinných stěn, tj. pro prizmatický tříkomorový nosník.

ZÁVĚR

Studie byla založena na předpokladu, že spoj vzpěrných stěn s konzolovými deskami a mostní komorou je dokonalý, chování celého systému je přísně lineární, spoje působí ihned, při iniciaci i nejmenších napětí a nejsou tedy aktivovány až po vzniku jisté deformace. Při nesplnění těchto podmínek by smyková účinnost tohoto konstrukčního uspořádání byla dále významně snížena.

Studie byla dále založena na předpokladu, že mezery mezi jednotlivými vzpěrnými stěnami jsou nulové šířky. Ve skutečném uspořádání tyto mezery znamenají zúžení šířky vzpěrných stěn *B* (obr. 3b), a tím další – třeba ne již zásadní – zvýšení poddajnosti systému.

Z hlediska praktického návrhu konstrukce je poměr mezi délkou vzpěrového prvku *L* a jeho šířkou *B* významně ovlivněn celkovým uspořádáním konstrukce. Šířka prvku *B* je dána například délkou lamel monolitického páteřního nosníku. Nabízela by se tu jistá možnost optimalizace návrhu, která by zaručila optimální délku lamely z hlediska betonáže a zároveň optimální šířku vzpěrné stěny z hlediska její tuhosti, a tím i celkové tuhosti příčného řezu.

Jak je patrné z obr. 7, dochází při narůstajícím poměru mezi délkou vzpěry *L* a její šířkou *B* ke snížení její účinnosti z hlediska přenosu smykového namáhání. Smykové namáhání je pak více soustředěno do centrálního monolitického páteřního nosníku, kde může vyvolávat zvýšené namáhání v hlavním tahu. Toto obecně může vést na požadavek většího množství smykové výztuže v této části příčného řezu, popřípadě k nutnosti použití betonu vyšších pevnostních tříd (zvýšené namáhání tlakových diagonál).

Dále je třeba připomenout velmi složitý způsob namáhání v singulární oblasti připojení vzpěrných stěn ke konzolám průřezu, kdy zde na desky konzol působí v bezprostřední krátké vzdálenosti, odpovídající příslušné mezeře mezi vzpěrnými stěnami, nejvyšší hodnoty reakcí vzpěrných stěn, a to rozdílného znaménka. Toto „střihové“ namáhání koncových oblastí konzol jistě zasluhuje podrobnější – zřejmě nelineární – rozvalu. V každém případě je tato singularita zdrojem dodatkového změkčení systému, které se promítne do další redukce jeho účinnosti.

Výhradním záměrem předložené studie je na základě 150 let starých poznatků vytvoření statického názoru na působení

Literatura:

- [1] *Airy*: On the strains in the interior of beams, Philos. Trans. Royal Society, London, 1863
- [2] *Girkmann K.*: Flachentragwerke, Springer-Verlag, 1954
- [3] *Křístek V.*: Theory of Box Girders, Wiley & Sons, New York Chichester, Brisbane, Toronto, 1979
- [4] *Novotný P., Konečný L., Stráský J., Smíšek P.*: Most na R1 nad údolím Hoštovského potoka, 17. Betonářské dny 2010, Sekce ST1A: Mosty a tunely 3, 2010
- [5] *Stráský J., Hradil P.*: Statická analýza zavěšeného mostu přes Vršovické nákladové nádraží v Praze, Sb. symp. Mosty 2011, Brno, 2011

ní významného mostního konstrukčního prvku; výsledky mohou případně posloužit pro všestrannou optimalizaci rozměrových parametrů vzpěrných prvků komorových mostů. Studie není zamýšlena jako posouzení technologických aspektů.

Uvedené výsledky byly získány v rámci řešení projektu GAČR č.

P104/11/1301, projektu TAČR č. TA01031920 a projektu MŠMT 1M0579

v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

Text článku byl posouzen odborným lektorem.



Prof. Ing. Vladimír Křístek, DrSc.



Ing. Lukáš Kadlec



Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.

všichni: Katedra betonových a zděných konstrukcí
Stavební fakulta ČVUT v Praze
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Profesionální není složitě

20

ANNIVERSARY

PROFESSIONAL SOLUTIONS

Skutečné řešení pro sanace betonových konstrukcí...

REDROCK[®] CONSTRUCTION

www.redrock-cz.com

Redrock Construction s.r.o.

Újezd 40/450, Praha 1, Malá Strana, Michnův palác

Telefon: +420 283 893 533, Fax: +420 284 816 112

E-mail: info@redrock-cz.com