

# ANALÝZA BETONOVÝCH SPÁR ŠTÍHLÝCH SEGMENTOVÝCH KONSTRUKCÍ

Marek Velešík, Radim Nečas, Leonard Šopík, Jiří Stráský

Mostovky štíhlých betonových konstrukcí jsou často sestaveny z prefabrikovaných segmentů s betonovými spárami. Spáry jsou obvykle betonovány mezi segmenty s čely, na nichž jsou po obvodu navrženy bednicí ozuby. Příspěvek porovnává prutovou a stěnovou analýzu spár s výsledky měření získanými ze zkoušek modelů části konstrukce. Výsledky analýzy byly využity při návrhu konstrukce z předpjatého pásu nedávno postavené lávky ve Švédsku.

## ANALYSIS OF CONCRETE JOINTS OF SLENDER SEGMENTAL STRUCTURES

Decks of slender concrete structures are often assembled from precast segments with concrete joints. The joints are usually cast between segments with faces, on which formwork keys are designed around their perimeter. The paper compares the joints' beam and shell analysis with the measurement results obtained from the model tests of the part of the structure. The results of the analysis were used in the design of a stress ribbon structure recently constructed in Sweden.

Visuté konstrukce a konstrukce z předpjatého pásu jsou často tvořeny štíhlou betonovou mostovkou sestavenou z prefabrikovaných segmentů, které jsou v průběhu montáže zavěšeny anebo podepřeny visutými kabely (obr. 1) [1], [2], [3]. Protože mostovky v průběhu montáže mění tvar, je vhodné spáry mezi prefabrikovanými prvky vytvořit až po dokončení montáže všech prvků. Osvědčily se konstrukce se spárami, které jsou betonovány mezi segmenty s čely, na nichž jsou po obvodu nav-

ženy bednicí ozuby (obr. 2), neboť potom není nutno spáry bednit. Podobné ozuby byly navrženy i u nových konstrukcí s mostovkou z UHPC [3], [4].

Integrita mostovky je garantována podélným předpětím. Protože za provozu je mostovka těchto konstrukcí namáhána ohybovými momenty obou znamének, je mostovka zpravidla centricky předepnutá.

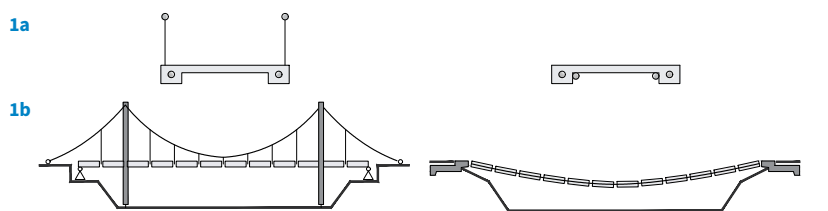
Popisované konstrukce jsou obvykle analyzovány jako geometricky nelineární prutové konstrukce, u kterých

je mostovka modelována na sebe navazujícími pruty. Vliv bednicích ozubů a příčníků je vystižen změnou polohy těžištní osy spáry, která je spojena s těžištní osou segmentů nekonečně tuhými pruty. V důsledku mimostředního spojení těžištních os je i centricky předepnutá mostovka ve spárách namáhána ohybem.

Protože popsaná prutová analýza nemůže vystihnout skutečné namáhání spár, je nezbytné ověřit jejich chování podrobnou analýzou. Výsledky analýzy je vhodné ověřit modelovým měřením.

**1** Visutá konstrukce a konstrukce z předpjatého pásu: a) příčný řez, b) podélný řez **2** Prefabrikovaný segment lávky přes dálnici D35 u Olomouce

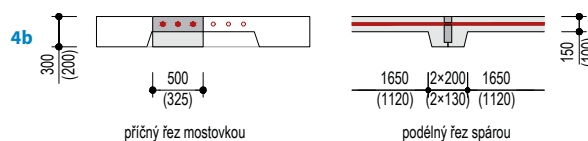
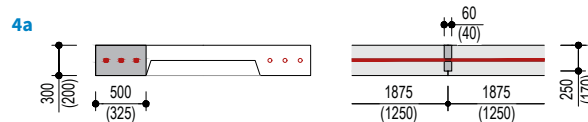
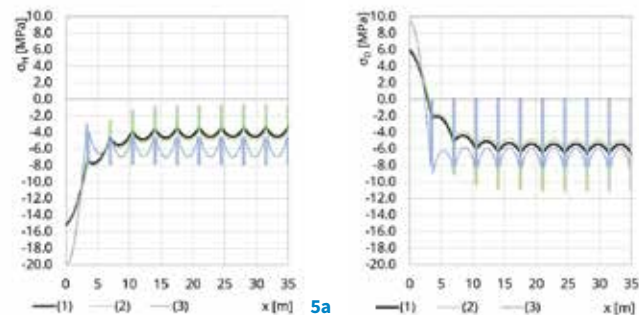
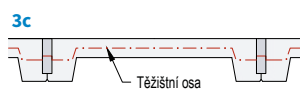
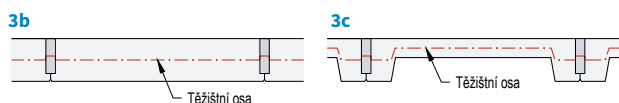
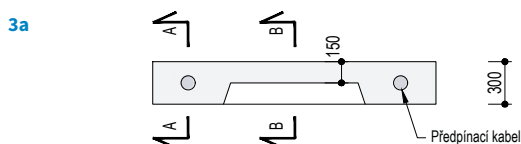
**1** Suspension and stress-ribbon structure: a) cross-section, b) elevation **2** Precast segment of the footbridge across the D35 motorway near Olomouc



## Globální analýza konstrukce předpjatého pásu

Segmenty diskutovaných konstrukcí jsou převážně tvořeny krajními nosníky vzájemně spojenými mostkovkou deskou, která může být u jejich čel zesílena příčnicí. Typické uspořádání segmentů je na obr. 3. Jak již bylo uvedeno, předpětí vyvozené po vybetonování spár zajišťuje v částech konstrukce mezi spárami rovnoměrný tlak. Je zřejmé, že chování konstrukce ve spárách je po její šířce rozdílné. Jinak bude působit v trámových pruzích a jinak v pruzích mezi trámy. Vlivem bednicích ozubů se v trámoch těžištní osa ve spárách posouvá nahoru (obr. 3b), naopak v částech mezi trámy se posouvá dolů (obr. 3c).

Pro představu o velikosti ohybového momentu byla programem Midas Civil provedena statická analýza konstrukce předpjatého pásu s rozpětím



**3** Typická mostovka: a) příčný řez, b) podélný řez trámem, c) podélný řez deskou **4** Analyzované uspořádání spár: a) trámový pruh, b) deskový pruh **5** Normálová napětí po délce předpjatého pásu: a) horní vlákna, b) spodní vlákna **6** Výztuž zkušebních prvků **7** Zkušební prvky před betonáží spár **8** Poloha tenzometrů

70 m a průvšem 1,5 m, předepnuté ho silou 9,75 MN. Mostovka s rozměry uvedenými na obr. 4 byla sestavena z 3,5 m dlouhých segmentů. Analýza byla provedena pro trámový pruh bez bednicích ozubů (1), pro trámový pruh s bednicími ozuby (2) a pro deskový pruh mezi trámy (3).

Výsledky analýzy jsou uvedeny v grafech na obr. 5. Je zřejmé, že mimo oblast u krajní opěry, kde je konstrukce namáhána významným kladným momentem, je namáhání po délce konstrukce rovnoměrné. Protože segmenty jsou na nosných kabelech podepřeny u spár, je konstrukce mezi spárami namáhána kladnými ohybovými momenty. Ohybové namáhání ve spárách odpovídá ohybovému namáhání vyvolanému excentricky působící předpínací silou. I když je tato excentricita poměrně malá, skoky v napětí ve spárách jsou významné, a proto je nutno je při návrhu konstrukce uvážit.

Ohybové namáhání u podpěr je obvykle redukováno konstrukčním uspořádáním, které je podrobně diskutováno v [1].

### Analyzované spáry

S ohledem na malou délku spár nemohou u realizovaných konstrukcí skoky v napětích dosahovat hodnot uvedených na obr. 5, a proto byla provedena podrobná analýza části konstrukce u spár. Z řady možných řešení byla podrobně analyzována dvě základní uspořádání, která se vyskytují

po šířce typické konstrukce (obr. 4): (a) v místě krajního trámu, (b) ve spárách konstrukce ztužené příčnickem výšky odpovídající výšce krajního trámu.

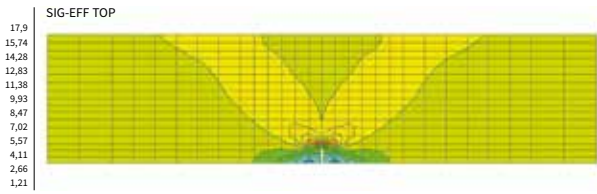
Mimo tato dvě uspořádání byly také analyzovány konstrukce s různou výškou ztužujících příčníků [6]. Protože tíhu segmentů nesou nosné kabely, byl analyzován jen vliv centrického předpětí segmentů. Proto jsou předpínací kabely vedeny v těžištích prvků, tj. u alternativy (a) v těžišti krajního trámu a u alternativy (b) v těžišti mostovkové desky.

S ohledem na výrobní možnosti a kapacitu zkušebního zařízení zkušebny VUT v Brně byly prvky vyrobeny ve zmenšeném měřítku. Rozměry zkušebních prvků jsou na obr. 4 uvedeny v závorkách. Pro analýzu byla uvažována modelová podobnost v měřítku 1 : 1,5.

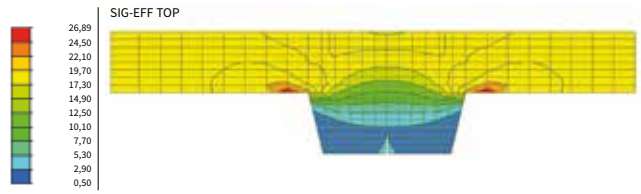
Bednicí ozuby byly 20 mm dlouhé a 30 mm vysoké. Šířka spáry byla 40 mm. Uprostřed výšky každého prvku byla v plastových kanálcích vedena předpínací lana Y1860S7-15,7 mm. Pevnostní třída betonu zkušebních prvků byla C40/50, statický modul pružnosti byl 27,7 GPa. Spára byla tvořena rychletuhnoucí betonovou směsí třídy C50/60 [7].

Zkušební prvky (obr. 6) byly vytvořeny spojením dvou dílů, jejichž stáří bylo větší než 28 dnů. Po osazení dílů na montážní podpěry (obr. 7) a jejich přiblížení byla spára mezi nimi vybetonována. Po 24 h byly prvky předepnuty na počáteční tlakové napětí velikosti 1 MPa, které eliminovalo trhliny od smršťování betonu. Po dosažení 80% pevnosti betonu spára byla předpínací lana napnutá na projektované hodnoty. Velikost předpínací síly byla ověřena siloměry.

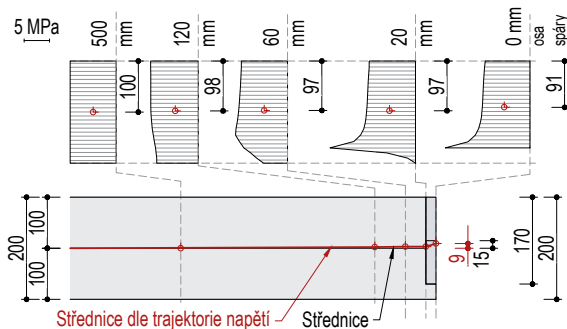




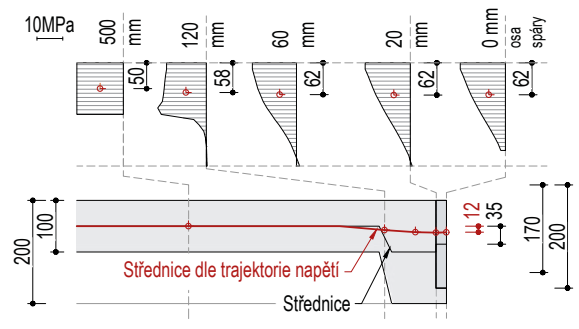
9



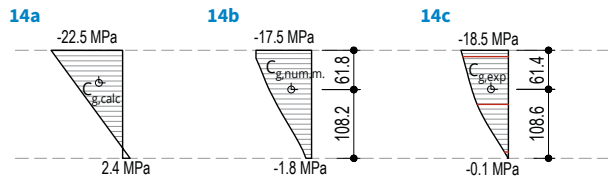
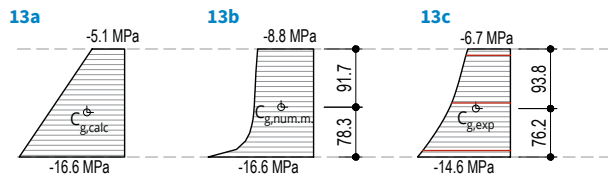
10



11



12



9 Trámový pruh – hlavní tlakové napětí 10 Deskový pruh – hlavní tlakové napětí 11 Trámový pruh – podélné normálové napětí 12 Deskový pruh – podélné normálové napětí 13 Trámový pruh – normálové napětí ve spáře: a) prutová analýza, b) stěnová analýza, c) modelové měření 14 Deskový pruh – normálové napětí ve spáře: a) prutová analýza, b) stěnová analýza, c) modelové měření

Poměrná přetvoření byla v každé spáře měřena třemi odporovými tenzometry LY41-50/120 osazenými po výšce spáry (obr. 8). Horní a spodní tenzometry byly situovány co nejbližší krajním vláknům, resp. přibližně 5 mm od hrany. Z poměrných přetvoření byla určena normálová napětí.

Namáhání konstrukce bylo ověřeno analýzou zkušebních prvků na deskostěnovém modelu. Analýzou byly získány průběhy všech stěnových napětí. Na obr. 9 a 10 jsou uvedeny prů-

běhy hlavních napětí, která vznikla ve zkušebních prvcích. Detailní průběhy podélných normálových napětí, která po výšce vznikla v pěti řezech u spáry, jsou uvedeny na obr. 11 a 12. Z těchto průběhů byla v každém řezu určena poloha výslednice normálových napětí. Jejich spojením byla získána střednice ukazující průběh tlakových sil v části konstrukce u spáry. Je zřejmé, že průběh střednice je hladký a spojitý a že neodpovídá zalomené střednici použité v prutové analýze.

Průběhy napětí ve spáře určené prutovou a stěnovou analýzou byly porovnávány s průběhem napětí určeným z poměrných přetvoření zkušebních prvků na obr. 13 a 14. Je zřejmé, že hodnoty napětí určené stěnovou analýzou jsou v dobré shodě s hodnotami napětí určenými měřeními na modelu konstrukce. Analýza konstrukce modelovanými zalomenými pruty dává nepříznivé výsledky, které neodpovídají skutečnému působení spár.

Literatura:

[1] STRÁSKÝ, J. *Stress ribbon and cable-supported pedestrian bridges*. London: Thomas Telford, 2005. ISBN 07277-3282-X.  
 [2] SLIWKA, P., KALÁB, P., ŠTEFAN, P., STRÁSKÝ, J. Lundabron – lávka pro pěší a cyklisty. *Beton TKS*. 2020, roč. 20, č. 4, s. 32–39. ISSN 1213-3116.  
 [3] STRÁSKÝ, J., SLIWKA, P., KALÁB, P., NOVÁČEK, J., LAKATOSOVÁ, P. Nové visuté lávky. *Beton TKS*. 2023, roč. 23, č. 3, s. 16–23. ISSN 1213-3116.  
 [4] VÍTEK, P., COUFAL, R. Výroba segmentů z UHPC a výstavba lávky. *Beton TKS*. 2020, roč. 20, č. 4, s. 10–15. ISSN 1213-3116.  
 [5] VRÁBLÍK, L., HARAZIM, P., KÁBRT, L., ELICHOVÁ, G., ELICH, M., KECLÍK, J., NAVAROVÁ, L., STRŽÍNEK, V. Projekt a realizace nové lávky pro pěší a cyklisty přes Labe v Hradci Králové. *Beton TKS*. 2022, roč. 22, č. 3, s. 38–41. ISSN 1213-3116.  
 [6] VELEŠÍK, M., NEČAS, R. Analýza spár mezi prefabrikovanými segmenty štíhlých mostních konstrukcí. *Juniorstav* 2022. s. 218–223. ISBN 978-80-86433-76-9.  
 [7] ČSN EN 13813 (722481). *Potěrové materiály a podlahové potěry – Potěrové materiály – Vlastnosti a požadavky*. Praha, ČNI, 2003.

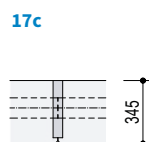
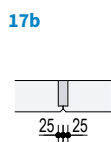
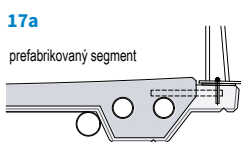
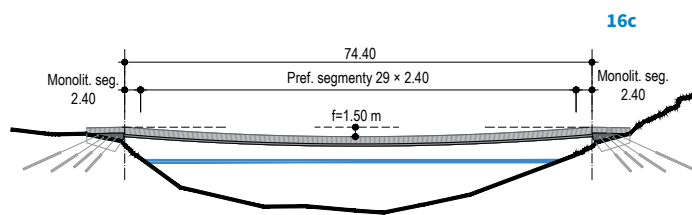
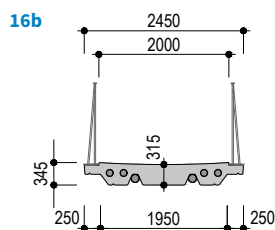
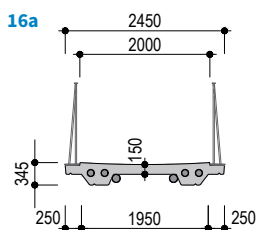




15a



15b



## Lávka Tyresta, Švédsko

Výsledky popsané analýzy byly využity při návrhu lávky pro pěší dokončené v červnu letošního roku ve Švédsku. Lávka, která je součástí turistické stezky Sörmlandsleden, vede přes záliv Baltského moře v národním parku Tyresta (obr. 15).

Lávku celkové délky 86 m tvoří předpjatý pás délky 74,4 m a průvěsu 1,5 m, který je vetknutý do 6 m dlouhých krajních opěr. Předpjatý pás je sestaven z 31 segmentů délek 2,4 m; 29 vnitřních segmentů tvoří prefabrikované prvky, dva krajní zesílené segmenty jsou monolitické a jsou spojeny betonářskou výztuží jak s navazujícími segmenty, tak i s opěrami. Segmenty výšky 345 mm a šířky 2,45 m mají dvoutrámový průřez tvořený krajními nosníky a spojující deskou (obr. 16). Segmenty jsou uloženy na dva nosné kabely sestavené z 19 monostrandů zainjektovaných v trubkách z nerezové oceli. Konstrukce je předepnuta 2x 2 kabely vedenými v krajních trámech. Tyto kabely

jsou sestavené z 13 monostrandů zainjektovaných v PE trubkách.

Jak nosné, tak i předpínací kabely jsou kotveny v krajích opěrách, kde se překrývají se skalními kotvami přenášejícími tahovou sílu z předpjatého pásu do skalního podloží.

S ohledem na malou šířku konstrukce nebylo nutné zesilovat mostovkovou desku ve spárách příčnický. Spáry mezi prefabrikovanými prvky šířky 50 mm byly betonovány mezi čely segmentů, na kterých byly vytvořeny ozuby s uspořádáním zřejmým z obr. 17.

Popsaná konstrukce byla posouzena pro všechna zatížení definovaná Eurokódy. Analýza prokázala, že pro charakteristické zatížení je ve spárách vždy tlakové napětí. Dosavadní zkušenosti s provozem lávky potvrzují předpoklady analýzy.

## Závěr

Analýza a modelové měření spár navržených mezi betonovými segmenty mostovek visutých konstrukcí a konstrukcí z předpjatého pásu prokázala,

že při použití bednicích ozubů není možné zanedbat změnu geometrie a tuhosti konstrukce u spár. Chování konstrukcí v oblasti spár však nemůže vystihnout analýza mostovky modelované zalomenými pruhy situovanými v těžištích konstrukčních prvků. Pro posouzení funkce spár je nezbytná stěnová analýza konstrukce.

Článek vznikl za finanční podpory projektu FAST-J-23-8180.



Ing. Marek Velešik  
Fakulta stavební VUT v Brně  
velesik.m@fce.vutbr.cz



doc. Ing. Radim Nečas, Ph.D.  
Fakulta stavební VUT v Brně  
neecas.r@fce.vutbr.cz



Ing. Leonard Šopík, Ph.D.  
Stráský, Hustý a partneři s.r.o.  
l.sopik@shp.eu



prof. Ing. Jiří Stráský, DSc.  
Stráský, Hustý a partneři s.r.o.  
& Fakulta stavební VUT v Brně  
j.strasky@shp.eu