

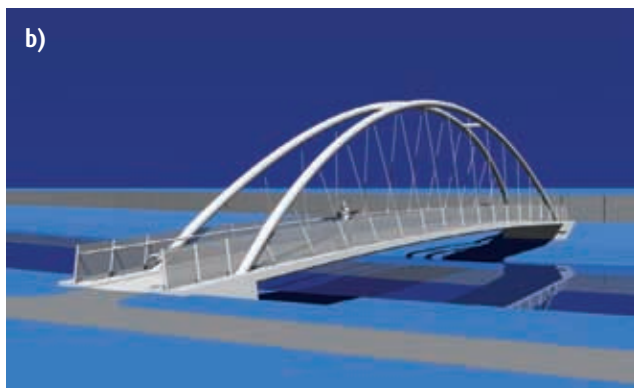
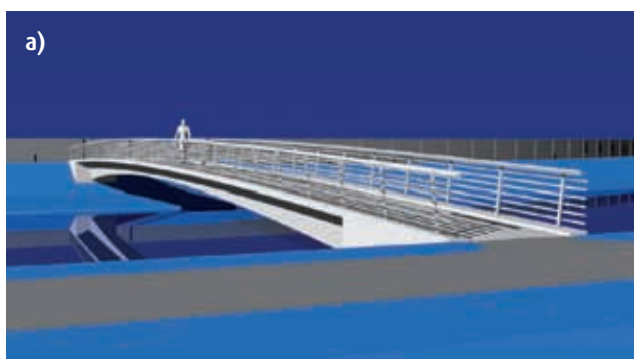
Statický a dynamický výpočet lávky pro pěší a cyklisty přes řeku Moravici

Mostní konstrukce zajistí propojení mezi obcemi Branka u Opravy a Hradec nad Moravicí a nahradí nevyhovující stávající provizorní lávku. Jedná se o předpjatý spojitý nosník s hlavním středním polem a dvěma krátkými příkrovenými krajními poli. Toto konstrukční řešení bylo vybráno na základě technické studie, kde byla investorovi představena další dvě konstrukční řešení, viz obr. 1. Vzhledem k značné štíhlosti navržené konstrukce byla kromě běžných návrhových kombinací posouzena i harmonická odezva na buzení chodci. Statické i dynamické výpočty byly provedeny v programu RFEM 4.

POPIS KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ

Lávka o délce 61,50 m a šířce mezi líci říms 3,00 m převádí stezku pro pěší a cyklisty, jejíž průchozí šířka mezi obrubníky je 2,5 m. Délka nosné konstrukce a poloha opěr vyplývají ze šířky koryta řeky Moravice. Výšková poloha mostu byla definována hladinou stoleté vody ve vodoteči (volná výška v polovině rozpětí je 0,81 m). Trasa stezky na lávce je směrově v přímé a výškově v zakružovacím oblouku.

Při projekčních pracích byla snaha navrhnout moderní dynamickou konstrukci a byl kladen důraz na estetické působení mostu. Ocelové mostní zábradlí o výšce 1,30 m bylo navrženo s vodorovnou výplní



Obr. 1 – Navrhované varianty konstrukčního řešení:

- a) rámová konstrukce (vítězný návrh),
- b) oblouková konstrukce,
- c) zavěšená konstrukce.

(obr. 2), splňující požadavek „TP 186 – Zábradlí na pozemních komunikacích“. Vodorovná výplň zábradlí vyzdvihuje celkové působení mostní konstrukce. Osvětlení mostovky je řešeno svítidly osazenými v madle zábradlí, vlastní těleso lávky je osvětleno svítidly, která jsou osazena v opevnění koryta vodoteče (obr. 3). Stavba svým konstrukčním uspořádáním nevytváří výraznou dominantu a vhodně doplňuje krajinu údolí řeky Moravice.

Nosná konstrukce z dodatečně předpjatého betonu C45/55 je ve-tknutá do železobetonových základových pasů podepřených na pilotách. Nosnou konstrukci tvoří spojitý nosník s krátkými příkrovenými krajními poli o rozpětí 5,6 + 49,0 + 5,6 m. Průřez mostovky ve středním poli je po délce proměnné výšky (parabolické náběhy). V polovině rozpětí je výška nosné konstrukce 0,90 m, která směrem k opěrám narůstá na 1,4 m. Příčný řez se skládá ze středového trámu proměnné výšky a konzol po bocích s vyložení 0,81 m. Po obou krajích nosné konstrukce jsou římsy šířky 400 mm s výškou obrubníku 70 mm. Horní povrch v pochozí části je střechovitý ve sklonu 2,5 %, v místě římsy je ve sklonu 4,0 % k ose lávky. Povrch nosné konstrukce je opatřen pochozí izolací. V místě úžlabí jsou umístěny odvodňovače, které jsou přímo zaústěny do vodoteče.

Základové pasy jsou železobetonové monolitické. Založení je hlubinné na pilotách vrtaných z úrovně stávajícího terénu. Spojení základových pasů a pilot je navrženo tak, aby se nepřenášel ohybový moment do hlav pilot.

STATICKÉ ŘEŠENÍ

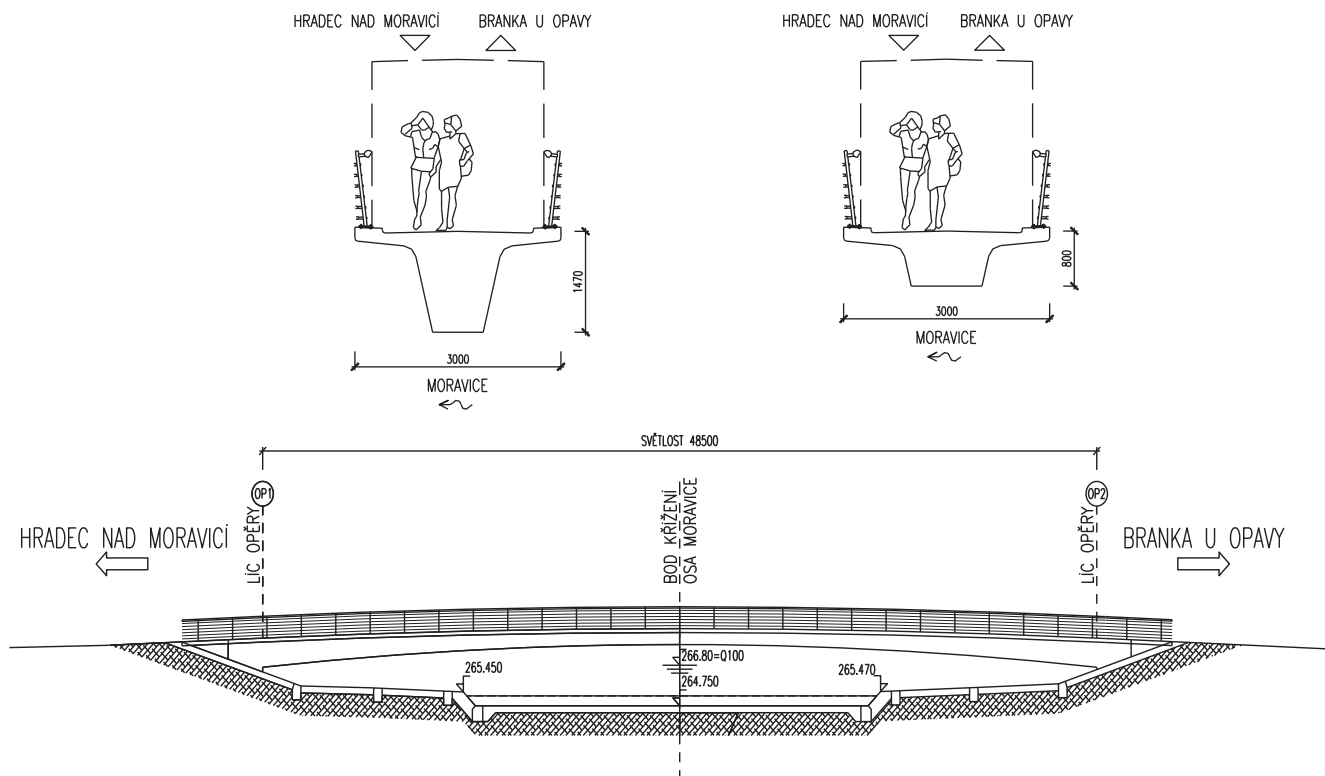
Při vytváření prutového modelu konstrukce bylo v maximální míře využito možnosti importu geometrie z CAD systému při vytváření střednic a zadání průřezů na prutech s náběhy. Podepření spojitěho nosníku bylo modelováno jako neposuvné ve svislém směru, ve vodorovném směru bylo modelováno pomocí lineárních pružin, které respektují tuhost založení. V podporách není zabráněno pootočení.

Vzhledem ke konstrukčnímu uspořádání lávky bylo nutno řešit její namáhání rovnoměrným i nerovnoměrným oteplením či ochlazením. Vliv smršťování a dotvarování betonové předpjaté konstrukce byl zjednodušeně řešen součiniteli v kombinacích.

Předpětí bylo navrženo metodou vyrovnání vlastní tíhy a ostatního stálého zatížení předpětím. Dráha předpinacích kabelů byla volena tak, aby průběh momentů od předpětí v absolutní hodnotě odpovídal součtu průběhu momentů od vlastní tíhy a ostatního stálého zatížení. Tímto návrhem předpětí bylo docíleno centrického předpětí a minimálních průhybů v provozním stavu na konstrukci. Navržené předpětí zajistí malé průhyby konstrukce a minimální změny napětí vlivem dotvarování v průběhu životnosti konstrukce. V nosné konstrukci je navrženo pět kabelů po 19 lanech (\varnothing Ls15.7-1570/1770).

DYNAMICKÁ ANALÝZA

Vzhledem ke štíhlosti lávky bylo nutno analyzovat její kmitání způsobené pohybem chodců, posoudit kriteria pohody chodců a v případě potřeby navrhnout omezovač kmitání. Podmínky pro posouzení komfortu chodců specifikuje norma ČSN EN 1990/A1 [1], která doporučuje maximální hodnoty zrychlení $0,7 \text{ m/s}^2$ ve svislém směru a $0,2 \text{ m/s}^2$ ve vodorovném směru. Výpočet vynuceného kmitání od pohybu chodců je vyžadován, jestliže některá ze základních frekvencí je menší než 5 Hz pro svislé kmitání mostovky a 2,5 Hz pro vodorovné nebo torzní vlastní kmitání. Kromě kritérií pro zrychlení [3] jsou definovány maxi-



Obr. 2 – Konstruktivní řešení

mální hodnoty amplitud posunutí (10 mm pro svislé a 2 mm pro vodorovné), jejichž splnění předchází vzniku tzv. lock-in efektu.

Modální analýza konstrukce posloužila pro stanovení vlastních tvarů a frekvencí konstrukce potřebných pro následně posouzení odezvy na buzení chodci a návrh omezovače kmitání. Při dynamických výpočtech bylo podepření prutového modelu ve vodorovném směru voleno jako neposuvné, což lépe vystihuje chování pilotového založení konstrukce při krátkodobém (dynamickém) zatížení. Vypočtené vlastní frekvence jsou uvedeny v tab. 1. Předpětí neovlivňuje podstatným způsobem modální vlastnosti konstrukce, a proto nebylo v dynamických výpočtech uvažováno.

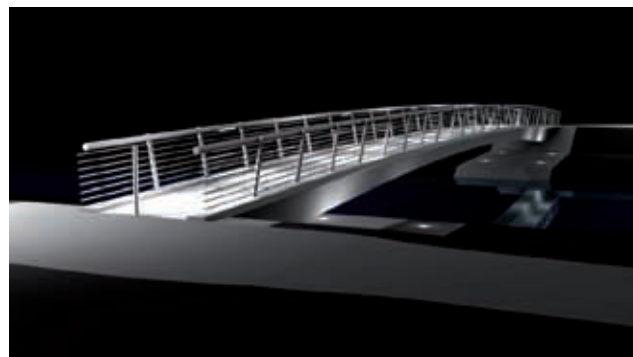
Tab. 1 – Vlastní tvary a frekvence

1	2,235 Hz	1. svislý ohybový
2	3,164 Hz	1. vodorovný ohybový
3	4,793 Hz	2. svislý ohybový
4	8,478 Hz	2. vodorovný ohybový

Podle výše uvedených kritérií je výpočet vynuceného kmitání od pohybu chodců vyžadován pro 1. a 3. vlastní frekvenci kmitání. Vzhledem k rozsahu frekvence lidských kroků 1,4 Hz (pomalá chůze) až 3,4 Hz (běh), je nutné detailně vyšetřovat buzení chodci pro 1. vlastní tvar. U 3. vlastního tvaru kmitání je výrazné buzení chodci nepravděpodobné. Jako dynamický model zatížení pro svislé kmitání byla použita harmonicky proměnná síla uprostřed rozpětí podle vztahu:

$$Q(t) = 840 (2 \sin f_v t) \quad [N],$$

kde f_v je vlastní frekvence svislého kmitání lávky, v tomto případě $f_v = f_1 = 2,235 \text{ Hz}$.



Obr. 3 – Osvětlení lávky

Tento model převzatý z [4] reprezentuje účinky skupiny chodců. Harmonická síla budící první vlastní tvar byla umístěna uprostřed rozpětí a je uvažována jako nepohyblivá. V [2] je popsán výpočet, kde je simulován pohyb chodce pohyblivým harmonickým zatížením. Vzhledem ke značnému vlivu hodnoty tlumení při analýze kmitání konstrukce v rezonanční oblasti, byly brány v potaz nejistoty v útlumu konstrukce. Celkový útlum konstrukce je ovlivněn celou řadou faktorů a přesnou hodnotu poměrného útlumu lze přesně určit až z dynamické zatěžovací zkoušky. Tlumení se nejčastěji udává hodnotou poměrného útlumu ξ . Pro předpjatou betonovou lávku lze předpokládat hodnotu poměrného útlumu kolem 1,0 %, jako minimální hodnota se uvádí 0,5 %.

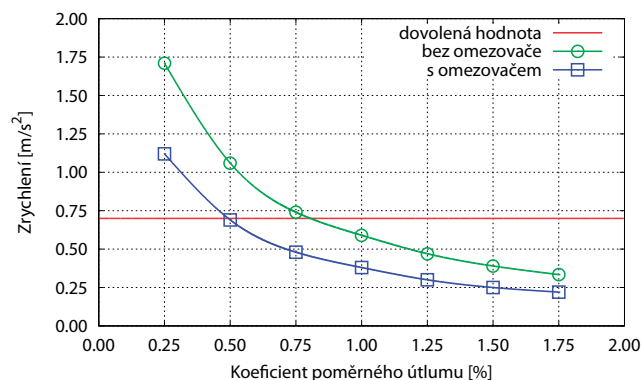
Při analýze vynuceného kmitání byla sledována odezva lávky pro několik hodnot z intervalu 0,5 – 1,5 %. V programu RFEM lze tlumení zadat pomocí koeficientů α a β Rayleighova proporcionálního tlumení, které lze získat z poměrného tlumení podle vztahů $\alpha = \xi / (2 \pi f)$ a $\beta = \xi / (2 \pi f)$. Vypočtené amplitudy zrychlení od harmonické síly pro různé hodnoty tlumení jsou zobrazeny na obr. 4. Harmonická analýza prokázala splnění kritéria pro maximální svislé zrychlení pro

poměrné tlumení $\xi > 0,8\%$. Pokud by skutečné tlumení bylo nižší, konstrukce by nevyhověla z hlediska komfortu uživatelů. Proto byl v rámci projektové přípravy navržen omezovač svislého kmitání, který se namontuje v případě potřeby po provedení dynamické zatěžovací zkoušky.

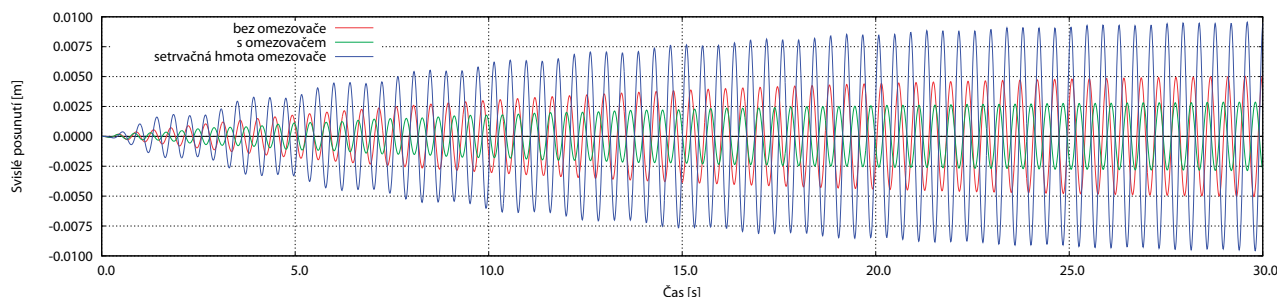
Pohlčovač je navržen pro omezení frekvenční složky vibrací, která odpovídá 1. vlastnímu tvaru kmitání. Parametry omezovače kmitání se ladí s malou frekvenční diferencí do blízkosti frekvence, jejíž kmitání má omezit. Pro hmotnost setrvačné hmoty omezovače m lze tuhost závěsných pružin navrhnout podle vztahu:

$$k = 4m\pi^2(0,95f_d)^2.$$

Tuhost závěsů pohlčovače se setrvačnou hmotou 3 000 kg byla vypočtena podle výše uvedeného vztahu pro 1. vlastní frekvenci lávky. První vlastní frekvence konstrukce s omezovačem kmitání se posunula na hodnotu 2,417 Hz. Vlastní tvar odpovídající kmitání tlumiče má frekvenci 1,961 Hz. Na obr. 4 jsou porovnány amplitudy zrychlení s omezovačem a bez omezovače. Konstrukce s instalovaným omezovačem kmitání splní kriteria pohody i pro nejnižší předpokládanou hodnotu tlumení. Na obr. 5 je zobrazen časový průběh svislého kmitání mostovky uprostřed rozpětí a setrvačné hmoty omezovače. Je vi-



Obr. 4 – Maximální hodnoty amplitud zrychlení mostovky pro různé hodnoty



Obr. 5 – Časový průběh výchylky lávky a setrvačné hmoty tlumiče pro poměrný útlum 0,5 %

dět, že se kmitání setrvačné hmoty omezovače velmi brzy dostane do protifáze s kmitáním lávky. Maximální svislá výchylka bez omezovače je 5,0 mm, s omezovačem se sníží na 2,6 mm. Pokud bude nutné po realizaci konstrukce nainstalovat omezovač kmitání, je nutné jeho parametry upřesnit na základě experimentálního ověření dynamického chování konstrukce.

ZÁVĚR

Statické a dynamické výpočty navržené konstrukce prokázaly její dostatečnou bezpečnost a splnění přípustných limitů amplitud kmitání při pohybu chodců. Vzhledem k nejistotám modelu a zejména tlumení byl navržen omezovač kmitání, který lze dodatečně nainstalovat do konstrukce, pokud by po uvedení do provozu nesplňovala kriteria pohody chodců. Byla vyhodnocena účinnost tlumiče a vliv předpokládané hodnoty poměrného útlumu na maximální zrychlení konstrukce. Provedená dynamická analýza konstrukce prokázala použitelnost programu RFEM 4 pro běžné dynamické výpočty při návrhu a posouzení mostních konstrukcí.

Ing. Petr Michal,
petr.michal@dlubal.cz,
Ing. Software Dlubal s. r. o.

Ing. Radek Šiška,
siska.r@designotec.cz,
Ing. Petr Vymlátíl,
vymlatil.r@designotec.cz,
Designotec s. r. o.

LITERATURA:

- [1] ČSN EN 1990 ZMĚNA A1 (73 0002) Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí, Příloha A2 – použití pro mosty, duben 2007
- [2] Hradil, P., Kala, J., Salajka, V., Jüttner, V.: Účinky pohybujících se chodců na lehké mostní konstrukce, CD-ROM, In Proc 15. ANSYS users meeting, Česká republika a Slovensko 2007, Lednice, 3. – 5. 10. 2007, ISBN 978-80-254-0301-3
- [3] Stráský, J.: Stress gibbon and cable-supported pedestrian bridges, Thomas Telford Publishing, London, ISBN 0-7277-3282-X, 2005
- [4] Studničková, M.: Posouzení vibrací lávek pro chodce podle evropských norem, Stavební obzor 10/2001 ČVUT – Kloknerův ústav Praha

Static and dynamic analysis of slender post-tensioned pedestrian and bicycle friendly bridge over the Moravice river

This paper presents static and dynamic analysis of slender post-tensioned pedestrian and bicycle friendly bridge over the Moravice river. The structure is designed as prestressed three-span continuous beam. The middle span forms a path over the river-bed, the short outer spans anchored at the ends to pile foundations. Because of the vertically curved bridge deck and varying cross-sectional height the main goal of static design was to optimize the trajectory of prestressing tendons and prestressing force, so that there are no significant deflections and bending moments under dead loads. Because of low first natural frequency the response of the structure to pedestrian actions was evaluated. All static and dynamic calculations were carried out by using FE-code RFEM 4.