

## DYNAMICKÁ ODEZVA BETONOVÝCH LÁVEK DYNAMIC RESPONSE OF CONCRETE FOOTBRIDGES

JIŘÍ STRÁSKÝ, RADIM NEČAS, JAN KOLÁČEK

*Zkušenosti s analýzou patnácti lehkých betonových lávek pro pěší jsou uvedeny s ohledem na jejich dynamickou odezvu vyvolanou pohybem lidí. Dynamická odezva byla určena postupem uvedeným v návrhu Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část: Betonové mosty. Z analyzovaných lávek bylo deset konstrukcí již realizováno; jejich provoz je dosud bez problémů.*

*The experience with analysis of fifteen light concrete footbridges is presented from a point of view of their dynamic response caused by moving people. The dynamic response was determined according to procedure given in a proposal of Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part: Concrete Bridges. From analyzed footbridges ten structures have been built; their service has been without any problem.*

Nedávno bylo nutno s ohledem na nevyhovující dynamickou odezvu několik nově postavených lávek pro pěší uzavřít a nákladně opravit. Nepříjemná dynamická odezva byla vyvolána pohybem lidí po lávkách. Tato skutečnost si vyžádala zvýšenou pozornost věnovanou dynamické analýze lávek. Bylo publikováno množství teoretických článků, k jejichž pochopení je nutno mít hluboké teoretické znalosti dynamiky stavebních konstrukcí. Pro běžného projektanta mostních konstrukcí jsou mnohé přístupy příliš teoretické a těžko pochopitelné.

Na druhou stranu je zřejmé, že jednoduchá ustanovení starších norem, ve kterých se nepřipouští konstrukce s ohybovými frekvencemi menšími než 3 Hz [1], nevystihují podstatu problému, a přitom jejich aplikace automaticky neznamená, že bude navržena konstrukce s přijatelnou odezvou.

Eurokód [2] požaduje, aby u lávek pro pěší s frekvencí menší než 5 Hz bylo provedeno posouzení kritéria pohody chodců. Je uvedena maximální hodnota přípustného zrychlení  $a_{lim} = 0,7 \text{ m/s}^2$ , způsob výpočtu však není specifikován.

V minulých letech se autoři článku podíleli na návrhu a analýze řady lehkých a transparentních konstrukcí lávek pro pěší. Konstrukce těchto lávek tvoří buď visutý předpjatý pás, nebo betonový pás podporovaný, nebo zavěšený na oblouky, popř. pylony. Protože první ohybové frekvence těchto konstrukcí jsou v rozsahu od 0,2 do 2 Hz, neměly by být podle [1] realizovány. Dosaďadní zkušenosti z jejich provozu však dokazují, že ačkoliv uživatelé lávek cítí jejich pohyb, nevyvolává tento pohyb u nich nepříjemné pocity. Je tedy zřejmé, že návrh konstrukcí, který vychází z analýzy odezvy konstrukcí na pohyb chodců a nebo větru, je správný.

Všechny popisované konstrukce byly posouzeny postupy, které lze poměrně snadno provést běžně dostupnými programy, v souladu s doporučeními uvedenými v [3]. Tento přístup byl také převzat do předběžné normy [4] z roku 1998. Bohužel, pro autory příspěvku z neznámých důvodů, byla tato ustanovení z konečného znění platné normy z roku 2007 vypuštěna.

Protože při splnění kritérií uvedených v [3] je dynamická odezva popisovaných konstrukcí přijatelná a protože analýzu lze poměrně jednoduše provést, považují autoři za účelné shrnout získané zkušenosti v tomto článku. Je zřejmé, že pokud výsled-

ky analýzy jiných konstrukcí budou podobné, lze na základě našich zkušeností očekávat přijatelné dynamické chování i těchto konstrukcí.

### PSYCHOLOGICKÝ ÚČINEK VIBRACE KONSTRUKCÍ

Dynamické zatížení konstrukcí je vyvoláno rytmickým pohybem těla osob [5], [6], [7].

### Svislé kmitání

Typické frekvence kroků lidí přecházejících nebo běžících po lávce či skákajících na lávce jsou uvedeny v tab. 1. Hrubý průměr pro chůzi je  $f_s = 2 \text{ Hz}$ , pro běh  $f_r$  a skok je  $f_j = 2,5 \text{ Hz}$ .

Abý nedošlo k rezonanci, některé starší normy požadují, aby základní ohybové frekvence nebyly menší než 3 Hz. Protože řada konstrukcí postavených u nás i v zahraničí má základní ohybové frekvence mnohem nižší, a přesto mají přijatelné chování, je zřejmé, že je správné určit rychlost pohybu, popřípadě zrychlení konstrukcí a porovnat je s obecně uznávanými kritérii.

Ve smyslu [3] je možné dynamické zatížení vyvolané chodci vyjádřit jako pulsující sílu  $F$ , která se pohybuje po mostovce konstantní rychlostí  $v_t$ .

$$F_v = 180 \cdot \sin 2\pi f_0 T, \quad v_t = 0,9 f_0, \quad (1)$$

kde  $F_v$  je osamělá síla [N],  $T$  je doba [s] a  $v_t$  rychlost [m/s].

Maximální svislé zrychlení  $a$  by mělo být menší než

$$a_{lim} = 0,5 \sqrt{f_0} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (2)$$

Přípustné hodnoty zrychlení v závislosti na první ohybové frekvenci  $f_0$ , které byly převzaty z [8], jsou také uvedeny na obr. 1. Prof. Miroš Pirner, DrSc., z Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd doporučuje, aby rychlost pohybu lávek  $\max v$  nebyla větší než 0,024 m/s.

Při praktickém řešení je pulsující síla postupně vkládána do míst maximální amplitudy prvních vlastních tvarů konstrukce, a to nejen ohybových, ale také kroutivých. Při buzení kroutivých tvarů se břemeno umísťuje mimo podélnou osu lávky co nejblíže k zábradlí.

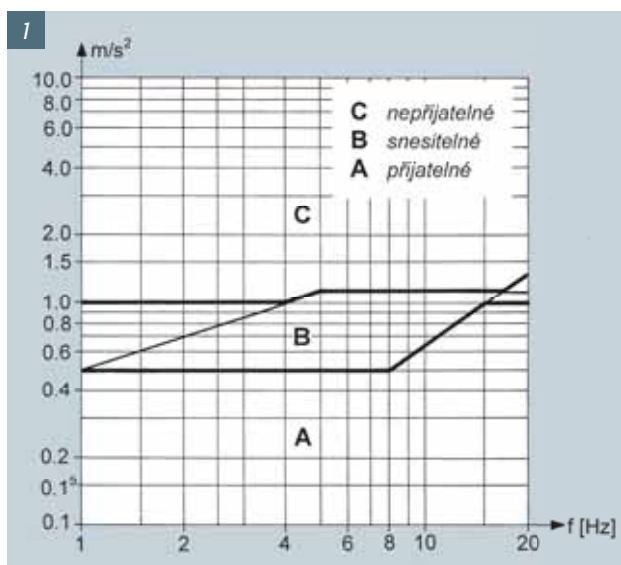
### Vodorovné kmitání

Chodci zatěžují konstrukci také ve vodorovném směru. S každým krokem vzniká vodorovná síla  $F_H$ , která je v interakci s vodorovným kmitáním. Zatímco svislá síla zatěžuje konstrukci s každým krokem, vodorovná síla působí střídavě nalevo a napravo (obr. 2). Proto mluvíme o rezonanci, jestliže svislé kmitání  $f_v = f_s$  a vodorovné kmitání  $f_H = f_s/2$ .

Frekvence kroků  $f_s$  kolem 2 Hz vyvolá u lávek s vodorovnými vlastními tvary kmitání  $f_v = 1 \text{ Hz}$  podstatné vodorovné deformace.

Případy, kdy  $f_v = 2 f_H$ , by se neměly vyskytovat.

Podle [6] spektrum amplitudy vodorovných sil vyvolaných osobou pohybující se s krokovou frekvencí 2 Hz ukazuje značný rozptyl. Všeobecně se amplituda zvětšuje se zvětšujícím se kmitáním mostovky. Ve vodorovném směru byly měřeny maximální hodnoty  $\Delta G/G$  až 0,07 v případě pevné mostovky a hodnoty až 0,14 v případě pohybující se mostovky.



Tab. 1 Frekvence kroků  $f_s$ ,  $f_r$  a skoků  $f_j$  [Hz]

Tab. 1 Frequency od steps  $f_s$ ,  $f_r$  and jumps  $f_j$  [Hz]

Pohyb	Frekvence kroků (s) (r) a skoků (j) [Hz]			
	celkový rozsah	pomalá (ý)	běžná (ý)	rychlá (ý)
chůze $f_s$ [Hz]	1,4 až 2,4	1,4 až 1,7	1,7 až 2,2	2,2 až 2,4
běh $f_r$ [Hz]	1,9 až 3,3	1,9 až 2,2	2,2 až 2,7	2,7 až 3,3
skok $f_j$ [Hz]	1,3 až 3,4	1,3 až 1,9	1,9 až 3	3 až 3,4

Ačkoliv vodorovné síly vyvolané chůzí nebo během jsou v poměru k svislým silám relativně malé, jsou dostatečně velké k tomu, aby vyvolaly silnou vibraci vodorovně poddajných konstrukcí charakterizovaných nízkými vodorovnými frekvencemi.

Důležitý je také tzv. účinek „lock-in“. Jestliže vodorovně posunutí dosáhne určité prahové hodnoty, jdoucí nebo běžící osoby se přizpůsobí pohybu mostovky a synchronizují svůj pohyb s pohybem konstrukce. Při horizontální vibraci s frekvencí kolem 1 Hz se některé osoby začínají přizpůsobovat kmitání konstrukce již při amplitudě 2 až 3 mm. Následkem toho je zvětšení amplitudy, které se následně přizpůsobí více osob. Může dojít až k synchronizaci 80 % osob, kteří následně dále rozkmitávají konstrukci. To byl případ lávky Millenium v Londýně.

### Kmitání od větru

Lávky pro pěší by měly být také posouzeny pro kmitání vyvolané větrem. Protože chůze po lávce při rychlosti větru větší než 20 m/s (72 km/hod) je velmi obtížná, posuzování rychlosti kmitání a nebo zrychlení by mělo být provedeno jen pro rychlost větru, při kterém mohou lávku používat normální chodci.

### STUDOVANÉ KONSTRUKCE

V posledních deseti letech popsaným postupem autoři posoudili třináct nově navrhovaných konstrukcí. Pro porovnání provedli také novou analýzu dynamické odezvy dvou starších lávek, a to lávky přes Vltavu v Praze-Tróji a lávky přes Švýcarskou zátoku Vranovské přehrady.

Všechny konstrukce byly analyzovány programovým systémem ANSYS. Při návrhu byly konstrukce posouzeny jako geometricky nelineární prostorové konstrukce. Analýza zohlednila změnu statického působení během jejich postupné výstavby a skutečné okrajové podmínky. U všech konstrukcí kombinujících taže-

Obr. 1 Psychologická klasifikace

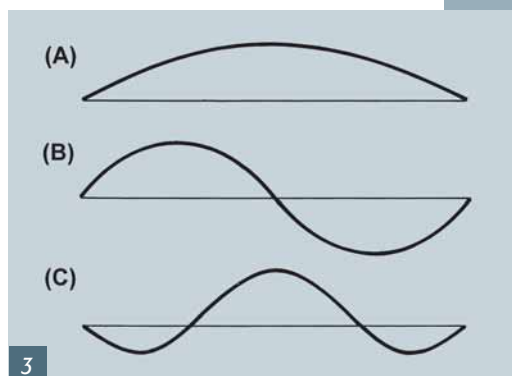
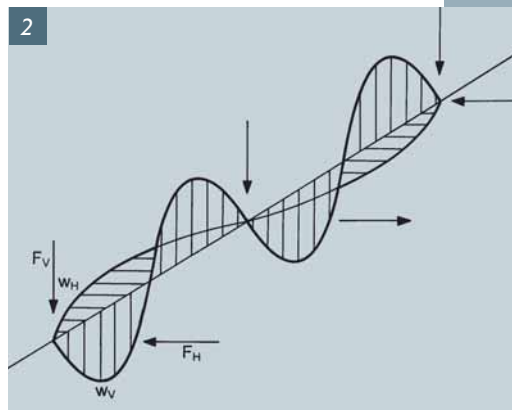
Fig. 1 Psychological classification

Obr. 2 Svislé a vodorovné zatížení

Fig. 2 Vertical and horizontal load

Obr. 3 Typické vlastní tvary kmitání

Fig. 3 Typical natural modes



né prvky s prvky tlačnými byl také proveden stabilitní výpočet.

Dynamický výpočet uvažil „tension stiffening“ tažených prvků. Při analýze byly nejdříve určeny vlastní tvary kmitání. V závislosti na konstrukčním systému, podepření a hmotě lávek je první vlastní tvar buď tvaru (A), (B), nebo (C) (obr. 3). U lávek o více polích se základní tvary (A), (B), popř. (C) někdy vyskytují současně.

Po určení vlastních frekvencí bylo vždy provedeno vybuzení kmitání pro pulsující sílu určenou podle (1).

Analýzou byly určeny hodnoty:








- maximální výchylka  $\max u$  [mm]
- maximální rychlost kmitání  $\max v$  [m/s]
- maximální zrychlení kmitání  $\max a$  [ $m/s^2$ ]









Podle (2) bylo dále určeno limitní zrychlení  $a_{lim}$  [ $m/s^2$ ] a byly porovnány svislé ohybové a příčné frekvence  $f_v/2 = f_o/2 \neq f_h$ .

Analýzované konstrukce (obr. 4.) jsou popsány dále. Výsledky jsou shrnuty v tab. 2. Tabulka uvádí příčný řez konstrukce, srovnanou výšku mostovky  $h_s = A / w$  (plocha  $A$  dělená šířkou  $w$ ), stálé zatížení mostovky  $g$  [kN/m], hodnoty a základní tvary prvních vlastních ohybových frekvencí a výsledky shora popsaného posouzení. Pro lávku přes Vltavu v Českých Budějovicích je uvedena nejen srovnaná výška spřažené betonové desky, ale také ideální výška  $h_l$  zahrnující plochu oceli vynásobenou pracovním součinitelem  $n = E_s/E_c$ , kde  $E_s$  a  $E_c$  jsou moduly pružnosti oceli a betonu.

Posouzení zrychlení popisovaných konstrukcí je dále sumari- zováno v obr. 5, kde jsou v závislosti na první ohybové frekvenci  $f_0$  uvedeny hodnoty zrychlení a kritéria pro posouzení podle [2], [8] (obr. 1) a podle rovnice (1). Protože většina konstrukcí již byla podrobně popsána v publikacích [9] až [14], ve kterých je uvedeno konstrukční řešení, statické schéma a výsledky analýz, jsou v tab. 2 uvedeny jen schematické příčné řezy bez kót. Pro porovnání jsou všechny vykresleny ve stejném měřítku.

Tab. 2 Analyzované lávky  
Tab. 2 Analyzed footbridges

Lávka Typ konstrukce Realizace / projekt	Příčný řez Srovnaná výška Zatížení stálé	Frekvence a tvar kmitání	Posouzení
1 – Vltava, Praha-Trója Předpjatý pás 1984	 $h_s = 0,25 \text{ m}$ $g = 27 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(1)} = 0,49 \text{ Hz (A)}$ $f_{(2)} = 0,609 \text{ Hz (A)}$ $f_{(3)} = 0,966 \text{ Hz (A)}$ $f_{(4)} = 1,01 \text{ Hz (A) \& (B)}$ $f_{(H)} = f_{(9)} = 2,204 \text{ Hz}$	$\max u = 5,33 \text{ mm}$ $\max v = 0,02 \text{ m/s}$ $\max a = 0,078 \text{ m/s}^2$ $a_{\text{lim}} = 0,35 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)}/2 = 0,245 \text{ Hz}$
2 – Lake Hodges, San Diego, California, USA Předpjatý pás 2009	 $h_s = 0,28 \text{ m}$ $g = 38,6 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(1)} = 0,574 \text{ Hz (A)}$ $f_{(2)} = 0,587 \text{ Hz (A)}$ $f_{(3)} = 0,796 \text{ Hz (A)}$ $f_{(5)} = 1,188 \text{ Hz (B)}$ $f_{(6)} = 1,195 \text{ Hz (B)}$ $f_{(7)} = 1,197 \text{ Hz (B)}$ $f_{(H)} = f_{(4)} = 1,087 \text{ Hz}$	$\max u = 3,63 \text{ mm}$ $\max v = 0,013 \text{ m/s}$ $\max a = 0,047 \text{ m/s}^2$ $a_{\text{lim}} = 0,379 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)}/2 = 0,287 \text{ Hz}$
3 – Medway, Maidstone, Kent, UK Předpjatý pás 2001	 $h_s = 0,23 \text{ m}$ $g = 19,8 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(1)} = 1,171 \text{ Hz (A)}$ $f_{(2)} = 1,964 \text{ Hz (A) \& (B)}$ $f_{(H)} = f_{(4)} = 2,619 \text{ Hz}$	$\max u = 1,73 \text{ mm}$ $\max v = 0,021 \text{ m/s}$ $\max a = 0,263 \text{ m/s}^2$ $a_{\text{lim}} = 0,541 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)}/2 = 0,586 \text{ Hz}$
4 – Olše, Bohumín Předpjatý pás Projekt	 $h_s = 0,14 \text{ m}$ $g = 15,3 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(1)} = 0,888 \text{ Hz (A)}$ $f_{(2)} = 1,116 \text{ Hz (A) \& (B)}$ $f_{(3)} = 1,332 \text{ Hz (B)}$ $f_{(H)} = f_{(4)} = 1,350 \text{ Hz}$	$\max u = 3,71 \text{ mm}$ $\max v = 0,031 \text{ m/s}$ $\max a = 0,26 \text{ m/s}^2$ $a_{\text{lim}} = 0,471 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)}/2 = 0,444 \text{ Hz}$
5 – R35, Olomouc Předpjatý pás podepřený obloukem 2008	 $h_s = 0,14 \text{ m}$ $g = 17,8 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(1)} = 1,530 \text{ Hz (A)}$ $f_{(2)} = 1,746 \text{ Hz (B)}$ $f_{(3)} = 2,149 \text{ Hz (B)}$ $f_{(H)} = f_{(1)} = 0,961 \text{ Hz}$	$\max u = 1,57 \text{ mm}$ $\max v = 0,015 \text{ m/s}$ $\max a = 0,145 \text{ m/s}^2$ $a_{\text{lim}} = 0,49 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)}/2 = 0,765 \text{ Hz}$
6 – Svratka, Brno Předpjatý pás podepřený obloukem 2008	 $h_s = 0,18 \text{ m}$ $g = 22,6 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(1)} = 1,912 \text{ Hz (B)}$ $f_{(2)} = 2,163 \text{ Hz (A)}$ $f_{(3)} = 3,819 \text{ Hz (C)}$ $f_{(H)} = f_{(4)} = 4,627 \text{ Hz}$	$\max u = 0,88 \text{ mm}$ $\max v = 0,012 \text{ m/s}$ $\max a = 0,162 \text{ m/s}^2$ $a_{\text{lim}} = 0,691 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)}/2 = 0,956 \text{ Hz}$
7 – Vltava, České Budějovice Oblouk s ocelobetonovou mostovkou 2007	 $h_s = 0,1 \text{ m}, h_1 = 0,16$ $g = 16 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(2)} = 1,711 \text{ Hz (B)}$ $f_{(3)} = 1,851 \text{ Hz (A)}$ $f_{(4)} = 2,863 \text{ Hz (C)}$ $f_{(H)} = f_{(1)} = 1,264 \text{ Hz}$	$\max u = 1,89 \text{ mm}$ $\max v = 0,026 \text{ m/s}$ $\max a = 0,218 \text{ m/s}^2$ $a_{\text{lim}} = 0,38 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)}/2 = 0,856 \text{ Hz}$

Lávka Typ konstrukce Realizace / projekt	Příčný řez Srovnaná výška Zatížení stálé	Frekvence a tvar kmitání	Posouzení
8 – McLoughlin Blvd, Portland, Oregon, USA  Předpjatý pás zavěšený na oblouku  2006	  $h_s = 0,25 \text{ m}$ $g = 31,7 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(1)} = 1,021 \text{ Hz (B)}$ $f_{(5)} = 1,791 \text{ Hz (C)}$  $f_{(H)} = f_{(2)} = 1,282 \text{ Hz}$	$\max u = 2,54 \text{ mm}$ $\max v = 0,016 \text{ m/s}$ $\max a = 0,104 \text{ m/s}^2$  $a_{\text{lim}} = 0,505 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)/2} = 0,511 \text{ Hz}$
9 – Švýcarská zátoka, Vranovská přehrada  Visutá konstrukce s předpjatým pásem  1993	  $h_s = 0,16+0,14 \text{ m}$ $g = 27,4+35,7 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(1)} = 0,298 \text{ Hz (B)}$ $f_{(2)} = 0,360 \text{ Hz (C)}$  $f_{(H)} = f_{(4)} = 0,431 \text{ Hz}$	$\max u = 10,96 \text{ mm}$ $\max v = 0,025 \text{ m/s}$ $\max a = 0,056 \text{ m/s}^2$  $a_{\text{lim}} = 0,273 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)/2} = 0,149 \text{ Hz}$
10 – Willamette River, Eugene, Oregon, USA  Visutá konstrukce s předpjatým pásem  2002	  $h_s = 0,22 \text{ m}$ $g = 36,6 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(1)} = 0,541 \text{ Hz (B)}$ $f_{(2)} = 0,613 \text{ Hz (C)}$ $f_{(3)} = 0,888 \text{ Hz (C)}$  $f_{(H)} = f_{(5)} = 1,136 \text{ Hz}$	$\max u = 7,04 \text{ mm}$ $\max v = 0,027 \text{ m/s}$ $\max a = 0,105 \text{ m/s}^2$  $a_{\text{lim}} = 0,367 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)/2} = 0,271 \text{ Hz}$
11 – Harbor Drive, San Diego, California, USA  Visutá konstrukce s komorovým nosníkem  ve stavbě	  $h_s = 0,23 \text{ m}$ $g = 35,4 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(2)} = 0,955 \text{ Hz (B)}$ $f_{(5)} = 2,039 \text{ Hz (C)}$  $f_{(H)} = f_{(1)} = 0,731 \text{ Hz}$	$\max u = 1,65 \text{ mm}$ $\max v = 0,01 \text{ m/s}$ $\max a = 0,059 \text{ m/s}^2$  $a_{\text{lim}} = 0,489 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)/2} = 0,478 \text{ Hz}$
12 – Johnson Creek, Portland, Oregon, USA  Předpjatý pás podepřený visutým kabelem  Návrh	  $h_s = 0,26 \text{ m}$ $g = 36,3 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(1)} = 0,838 \text{ Hz (A)}$ $f_{(3)} = 1,774 \text{ Hz (B)}$ $f_{(5)} = 2,965 \text{ Hz (C)}$  $f_{(H)} = f_{(2)} = 1,674 \text{ Hz}$	$\max u = 3,534 \text{ mm}$ $\max v = 0,019 \text{ m/s}$ $\max a = 0,098 \text{ m/s}^2$  $a_{\text{lim}} = 0,458 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)/2} = 0,419 \text{ Hz}$
13 – Freeway I-5, Eugene, Oregon, USA  Zavěšená konstrukce s předpjatým pásem  2009	  $h_s = 0,26 \text{ m}$ $g = 36,3 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(4)} = 1,654 \text{ Hz (A)}$ $f_{(10)} = 3,295 \text{ Hz (A)}$ $f_{(17)} = 4,633 \text{ Hz (A) \& (B)}$  $f_{(H)} = f_{(1)} = 1,131 \text{ Hz}$	$\max u = 0,81 \text{ mm}$ $\max v = 0,008 \text{ m/s}$ $\max a = 0,083 \text{ m/s}^2$  $a_{\text{lim}} = 0,639 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)/2} = 0,827 \text{ Hz}$
14 – Delta Pond, Eugene, Oregon, USA  Zavěšená konstrukce s předpjatým pásem  Ve stavbě	  $h_s = 0,26 \text{ m}$ $g = 36,3 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(1)} = 1,267 \text{ Hz (A)}$ $f_{(7)} = 2,207 \text{ Hz (A) \& (B)}$ $f_{(9)} = 2,584 \text{ Hz (A) \& (B)}$  $f_{(H)} = f_{(4)} = 1,403 \text{ Hz}$	$\max u = 2,02 \text{ mm}$ $\max v = 0,016 \text{ m/s}$ $\max a = 0,128 \text{ m/s}^2$  $a_{\text{lim}} = 0,477 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)/2} = 0,634 \text{ Hz}$
15 – D47, Bohumín  Zavěšená konstrukce s páteřním nosníkem  Ve stavbě	  $h_s = 0,31 \text{ m}$ $g = 63,2 \text{ kN/m}$	$f_{(0)} = f_{(2)} = 1,42 \text{ Hz (A)}$ $f_{(3)} = 2,199 \text{ Hz (A)}$ $f_{(8)} = 4,115 \text{ Hz (B)}$  $f_{(H)} = f_{(4)} = 2,746 \text{ Hz}$	$\max u = 0,53 \text{ mm}$ $\max v = 0,005 \text{ m/s}$ $\max a = 0,26 \text{ m/s}^2$  $a_{\text{lim}} = 0,596 \text{ m/s}^2$ $f_{(0)/2} = 0,71 \text{ Hz}$

#### Lávka přes Vltavu v Praze-Troji

Lávku tvoří předpjatý pás o třech polích 85,5 + 96 + 67,5 m (obr. 4 – 1), [9]. Průvės pásu uprostřed rozpětí středního pole je 1,69 m. Předpjatý pás je sestaven z prefabrikovaných segmentů (tab. 2.1) a z monolitických sedel navržených nad vnitřními podpěrami. Nosné kabely jsou situovány v rýhách vytvořených v segmentech, předpinací kabely procházejí kanálky vytvořenými ve střední desce segmentů.

Dynamické chování konstrukce ověřil Prof. Miroš Pirner v roce 1984 po uvedení konstrukce do provozu a znovu po čtrnácti letech. Druhý test potvrdil, že dynamické chování konstrukce zůstalo beze změny.



4-1

#### Lávka Lake Hodges, San Diego, California

Lávku tvoří dosud nejdelší předpjatý pás celkové délky 301,74 m (obr. 4 – 2), [10]. Lávka má tři stejně dlouhá pole s rozpětími 100,58 m; průvės uprostřed rozpětí je 1,41 m. Předpjatý pás je sestaven z prefabrikovaných segmentů (tab. 2.2) a z monolitických sedel navržených u opěr i nad vnitřními podpěrami. Nosné a předpinací kabely jsou situovány v rýhách vytvořených v segmentech.



4-2

#### Lávka přes Medway River, Maidstone, Kent, UK

Lávku o dvou polích 49,5 + 37,5 m (obr. 4 – 3), [9] tvoří předpjatý pás sestavený z prefabrikovaných segmentů a spřažené desky (tab. 2.3). Lávka je nad vnitřní podpěrou půdorysně zalomená. Vnitřní podpěru tvoří skloněné schodiště a ocelová stojka, která podle zatížení působí jako táhlo, nebo vzpěra. U vnitřní podpěry a krajních opěr je předpjatý pás tvořen monolitickým sedlem. Nosné a předpinací kabely jsou situovány ve spřažené desce.

Dynamické chování lávky bylo ověřeno dynamickou zkouškou.



4-3

#### Lávka přes Olši u Bohumína

Projektovanou lávku tvoří předpjatý pás o třech polích 40,5 + 80 + 40,5 m (obr. 4 – 4). Průvės pásu uprostřed rozpětí středního pole je 1,38 m. Předpjatý pás délky 160 m je sestaven z prefabrikovaných segmentů nesených a předepnutých dvěma dvojicemi vnějších kabelů (tab. 2.4). Nad vnitřními podpěrami a u krajních podpěr je předpjatý pás podepřen sedly.



4-4

#### Lávka přes rychlostní komunikaci R35 u Olomouce

Lávku tvoří předpjatý pás o dvou polích, který je podepřen štíhlým obloukem o rozpětí 64 m (obr. 4 – 5), [11]. Předpjatý pás délky 76,5 m je sestaven z prefabrikovaných segmentů nesených a předepnutých dvěma vnějšími kabely (tab. 2.5). Protože základy oblouku a kotevní bloky předpjatého pásu jsou vzájemně spojeny tlačeními vzpěrami, tvoří konstrukce lávky samokotvený systém.

Dynamické chování lávky bylo ověřeno dynamickou zkouškou.



4-5

#### Lávka přes Svatku v Brně

Lávku tvoří předpjatý pás o dvou polích, který je podepřen štíhlým obloukem s rozpětím 42,9 m (obr. 4 – 6), [11]. Předpjatý pás délky 43,5 m je sestaven z prefabrikovaných segmentů nesených a předepnutých čtyřmi vnitřními kabely situovanými v segmentech (tab. 2.6). Protože základy oblouku a kotevní bloky předpjatého pásu jsou vzájemně spojeny krajními opěrami, tvoří konstrukce lávky samokotvený systém.



4-6

### Lávka přes Vltavu v Českých Budějovicích

Konstrukci lávky tvoří jednostranný skloněný oblouk vetknutý do ocelobetonové mostovky (obr. 4 – 7), [12]. Sklonění oblouku a hmotnost mostovky jsou navrženy tak, aby konstrukce nebyla od stálého zatížení kroucena. Rozpětí oblouku je 53,2 m, vzepětí je 8 m. Oblouk je tvořen ocelovou rourou průměru 355,6 mm; mostovku tvoří dvě okrajové ocelové roury průměru 508 a 355,6 mm, které jsou vzájemně spojeny rovinnou příhradovinou (tab. 2.7). Závěsy jsou tvořeny I profily proměnné výšky. Ocelová konstrukce je vetknuta do náběhů krajních opěr založených na vrtaných pilotách. Vytváří se tak integrovaný systém bez ložisek a dilatačních závěrů.

Dynamické chování lávky bylo ověřeno dynamickou zkouškou.



4-7

### Lávka McLoughlin Boulevard, Portland, Oregon, USA

Lávka je tvořena dvěma skloněnými oblouky, na kterých je zavěšena mostovka z předpjatého pásu (obr. 4 – 8), [11]. Oblouky s rozpětím 73,508 m a vzepětím 13,715 m jsou tvořeny ocelovými rourami průměru 0,457 m. Oblouky jsou vzájemně spojeny dvěma stěnovými výztuhami. Mostovku tvoří prefabrikované segmenty spřažené s monolitickou deskou (tab. 2.8). V krajních polích jsou segmenty ztuženy ocelovými I profily. Nosné a předpínací kabely jsou situovány ve spřažené desce. Protože základy oblouku a kotvení bloky předpjatého pásu jsou vzájemně spojeny tlačnými vzpěrami, tvoří konstrukce lávky samokotvený systém.



4-8

### Lávka přes Švýcarskou zátoku Vranovské přehrady

Lávka s mostovkou délky 252 m je zavěšena na dvou skloněných kabelech s rozpětími 30 + 252 + 30 m (obr. 4 – 9), [9]. Lávka převádí nejen pěší dopravu, ale také vodovodní a plynové potrubí. Šířka lávky mezi zábradlím je proměnná od 3,4 do 6,6 m. Protože mostovka je pružně vetknuta do krajních opěr, vytváří částečný samokotvený systém. Mostovka, která je sestavena z prefabrikovaných segmentů, je předepnuta vnitřními kabely vedenými v segmentech a je ztužena vnějšími kabely vedenými v kruhových otvorech vytvořených v segmentech (tab. 2.9).

Dynamické chování bylo ověřeno na aeroelastickém modelu navrženém pro zkoušku konstrukce ve větrném tunelu a dynamickou zkouškou hotové konstrukce.



4-9

### Lávka přes Willamette River, Eugene, Oregon

Lávka celkové délky 178,8 m se sestává ze dvou částí: visuté konstrukce o třech polích 23 + 103 + 23 m a navazujících ramp vetknutých do opěr (obr. 4 – 10), [9]. Mostovka, kterou tvoří předpjatý pás sestavený z prefabrikovaných segmentů (tab. 2.10), je pružně vetknuta do ramp. Mostovka je předepnuta vnitřními kabely vedenými v segmentech. Uprostřed rozpětí hlavního pole je vytvořena vyhlídková plošina.

Dynamické chování bylo ověřeno na aeroelastickém modelu navrženém pro zkoušku konstrukce ve větrném tunelu.



4-10

### Lávka přes Harbor Drive, San Diego, California

Lávku tvoří půdorysně zakřivený komorový nosník, který je na vnitřním okraji zavěšen na visutém kabelu o dvou polích s rozpětími 53,65 m (obr. 4 – 11), [13]. Půdorysný oblouk má poloměr 170 m. Visutý kabel je kotven v jednosloupovém skloněném pylonu i v krajních opěrách. Nad vnitřními podpěrami přechází v sedlech vytvořených v zábradelních zídkách. Závěsy jsou kotveny ve sloupcích zábradlí, které se tak stávají součástí základního nosného systému. V zábradlí také prochází vnější radiální kabely, které spolu s vnitřními kabely vedenými v komorovém nosníku vyrovnávají kroucení vyvolané jednostranným zavěšením (tab. 2.11). Komorový nosník je spojen se schodišti a rampami vetknutými do nízkých opěr. Konstrukce tak vytváří samokotvený systém, ve kterém je tahová síla z visutých kabelů přenášena tlakovou únosností mostovky.

Dynamické chování bylo ověřeno na aeroelastickém modelu navrženém pro zkoušku konstrukce ve větrném tunelu.

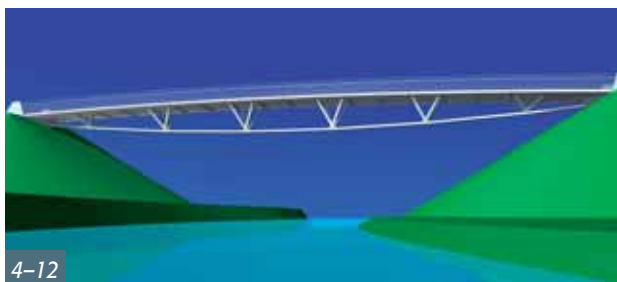


4-11

### Lávka přes Johnson Creek, Portland, Oregon

Navrhovanou lávku o jednom poli s rozpětím 63 m tvoří přímo pocházející oblouk nesený a předepnutý vnějšími visutými kabelemi (obr. 4 – 12), [9]. Oblouk, který je sestaven z prefabrikovaných segmentů a spřažené desky (tab. 2.12), je spojen s vnějšími kabelemi ocelovými vzpěrami.

Statická funkce a mezní únosnost konstrukce byla ověřena na modelu postaveném v měřítku 1 : 8.



4-12

### Lávka přes Freeway I-5, Eugene, Oregon

Lávku celkové délky 161,6 m tvoří hlavní zavěšený most o dvou polích s rozpětími 31,76 m, který je monoliticky spojen se zakřivenými rampami o rozpětích 9 m (obr. 4 – 13), [14]. Protože rampy jsou vetknuty do krajních opěr, lávka tvoří integrovanou konstrukci bez ložisek a dilatačních závěrů. Pylon tvaru písmene A je betonový, závěsy kotvené v mostovce po třech metrech jsou tvořeny hladkými předpínacími tyčemi. Zavěšená mostovka je sestavena z prefabrikovaných segmentů a spřažené desky (tab. 2.13), rampy jsou monolitické. Předpínací kabeley jsou situovány ve spřažené desce.



4-13

### Lávka přes Delta Pond Expressway, Eugene, Oregon

Lávku celkové délky 231,65 m tvoří zavěšená konstrukce o třech polích délek 15,24 + 36,58 + 51,82 m, na kterou po obou stranách navazují rampy s rozpětími 9 m (obr. 4 – 14), [14]. Lávka je rozdělena na dva dilatační celky délek 98,3 a 133,35 m. Pylon tvaru písmene V je betonový, závěsy kotvené v mostovce po třech metrech jsou tvořeny uzavřenými lany. Pole přemostující komunikaci je sestaveno z prefabrikovaných segmentů a spřažené desky (tab. 2.14). Předpínací kabeley jsou situovány ve spřažené desce.



4-14

### Lávka přes dálnici D47 u Bohumína

Lávku o dvou nesymetrických polích délek 54,6 a 58,2 m tvoří pátevní nosník s oboustrannými konzolami, který je zavěšen na středním pylonu (obr. 4 – 15). Protože lávka je v půdorysném oblouku s poloměrem 220 m, bylo možné mostovku vetknout do krajních podpěr. Ocelobetonový pylon, který v podélném směru lávky má tvar písmene V, je rámově spojen s pátevním nosníkem oddělujícím cyklistickou a pěší dopravu. Protože šířky cyklistické a pěší stezky jsou různé, je vyložení konzol rozdílné. Aby nosník nebyl od zatížení stálého kroucen, jsou delší konzoly vylehčeny kazetou (tab. 2.15). Závěsy, kotvené v mostovce po 2 m, jsou z uzavřených lan. Mostovka je předeputa kabeley vedenými v pátevním nosníku i v konzolách.



4-15

### ZÁVĚR

Z patnácti popsaných lávek je deset konstrukcí postaveno, tři jsou ve stavbě a dvě konstrukce se projektují. Všechny konstrukce mají velmi lehkou mostovku charakterizovanou srovnanou výškou  $h_5$  velikosti od 0,1 do 0,31 m.

Ačkoliv všechny postavené konstrukce jsou velmi lehké, v průběhu jejich provozu se dosud nevyskytly problémy s jejich dynamickou odezvou vyvolanou pohybem chodců, popř. větrem. Uživatelé pohybující se, nebo stojící na lávce cítí pohyb konstrukcí, který však u nich nevyvolává nepříjemné pocity. Na pohyb chodců je nejcitlivější lávka v Českých Budějovicích, u které je tenká betonová mostovka spřažena s ocelovou konstrukcí. Jak je zřejmé z tab. 2, rychlost pohybu mírně překračuje doporučení Prof. Pirnera. Dynamická zkouška provedená pod jeho vedením však i u této konstrukce potvrdila přijatelné chování.

Zajímavé je chování lávky postavené nad Freeway I-5 v Eugenu (obr. 4 – 13). Lávka je velmi tuhá, a proto uživatelé necítí její pohyb od pohybu chodců. Vlivem projíždějících těžkých nákladních aut však za auty vzniká vzdušný proud, který následně vyvolává svislý pohyb konstrukce. Pohyb je citelný, ne však nepříjemný.

Tenká betonová deska má nejen dostatečnou hmotnost, ale to, co je nejdůležitější, velkou membránovou tuhost. Ta omezuje vodorovné pohyby konstrukcí, na které jsou uživatelé velmi citliví. Proto se u našich konstrukcí nikdy nevyskytl problém s tak zvaným „Lock in“ účinkem.

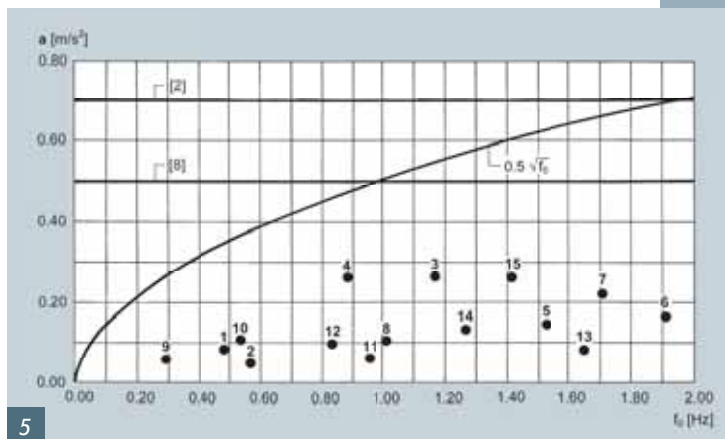
Je tedy zřejmé, že spojitá betonová mostovka, která dává konstrukcím potřebnou tuhost a hmotnost, představuje ideální řešení pro pocházející konstrukce lávek pro pěší.

### Zúčastnění

Dynamická analýza popsaných konstrukcí realizovaných v České Republice a ve Spojeném Království byla pod vedením prvního autora provedena firmou Stráský, Hustý a partneři, Brno, konstrukcí realizovaných v USA byla zajištěna pracovníky Ústavu betonových a zděných konstrukcí VUT-FAST.

Literatura:

- [1] Guide Specification for Design of Pedestrian Bridges. AASHTO 1997
- [2] Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí EN 1990, Změna A1, ČSN 730002, duben 2007
- [3] Design Criteria for Footbridges. Department of Transport, UK 1988 Anglie
- [4] Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – část 2: Betonové mosty, ČSN 736208, ENV 1992-2, Předběžná norma, listopad 1998, Platná norma, květen 2007
- [5] *Bachmann H.*: 'Lively' Footbridges – a real Challenge. Footbridge 2002. Design and Dynamic behaviour of footbridges. OTUA Paris 2002
- [6] *Kreuzinger H.*: Dynamic design strategies for pedestrian and wind action. Footbridge 2002. Design and Dynamic behaviour of footbridges. OTUA Paris 2002
- [7] Guidelines for the design of footbridges. *fib* – Guide to good practice prepared by Task Group 1.2. ISBN 2-88394-072-X. Fédération internationale du béton (*fib*) 2005
- [8] *Walther R., Houriet B., Walmar I., Moia P.*: Cable Stayed Bridges, Thomas Telford Publishing, London, 1998
- [9] *Strasky J.*: Stress Ribbon and Cable-Supported Pedestrian Bridges, Thomas Telford, London, UK, 2005
- [10] *Sanchez T., Tognoli J., Strasky J.*: The Lake Hodges Stress Ribbon Bridge, San Diego, California, 3<sup>rd</sup> Inter. Conf. Footbridge 2008, Porto, Portugal 2008
- [11] *Strasky J., Nečas R., Hrdina L., Štefan P.*: Lávky kombinující předpjatý pás s oblouky, Beton TKS 4/2009
- [12] *Strasky J., Baron J., Nečas R.*: Obloukové lávky pro pěší v Českých Budějovicích a v Portlandu, Oregonu. 13. Betonářské dny 2006, Sekce ST4A: Mosty 2
- [13] *Tognoli J., Fitzwilliam D., Kompfner T. A., Strasky J.*: Design of a Curved, Self-Anchored Design of a Curved, Self-Anchored Suspension Bridge for the New San Diego Ballpark. International Bridge Conference, Pittsburgh 2007
- [14] *Strasky J., Rayor G.*: Design Development and Construction of I-5 Beltline (Gateway) Pedestrian Bridge, Eugene /Springfield, Oregon. Inter. Bridge Conf., Pittsburgh 2009



Obr. 5 Zrychlení analyzovaných lávek  
Fig. 5 Acceleration of analyzed footbridges

Popisované konstrukce byly zhodnoceny v rámci programu výzkumu a vývoje „Impuls“ FI – IM5/128 „Progresivní konstrukce z vysokohodnotného betonu“ Ministerstva průmyslu a obchodu. Příspěvek vznikl za podpory projektu IM6840770001 MŠMT, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

Prof. Ing. Jiří Stráský, DSc.  
tel.: 547 101 811, 541 147 845, fax: 547 101 881  
e-mail: j.strasky@shp.eu, strasky.j@fce.vutbr.cz  
Stráský, Husťý a Partneři, s. r. o.  
Bohunická 50, 619 00 Brno  
www.shp.eu

Ing. Radim Nečas, Ph.D.  
tel.: 541 147 855, e-mail: necas.r@fce.vutbr.cz  
Ing. Jan Koláček  
tel.: 541 147 872, e-mail: kolacek.j@fce.vutbr.cz

všichni: FAST-ÚBZK VUT v Brně  
Veveří 95, 662 37 Brno  
fax: 549 250 218, www.fce.vutbr.cz

## NOVÁ ZNAČKA

Členové Svazu výrobců betonu ČR se rozhodli používat novou značku. Proč?

**Kvalita** – členové SVB ČR jsou schopni trvale udržovat vysokou kvalitu výroby transportbetonu. V příštím roce se dokladem toho stane nabídka betonů s garantovaným modulem pružnosti.

**Identifikace** – bude snadné určit, které betonárny patří členům SVB ČR.

**Hlavní technolog** – každý člen SVB ČR využívá služeb svého interního hlavního technologa (nezaměňovat s operátorem betonárny). Ve všech případech jde o jednu z vrchních technických autorit společnosti. V případě zvláštních požadavků je hlavní technolog schopen „ušít beton na zakázku“, ať už se jedná o parametry betonu ztvrdlého (pevnost, modul pružnosti, trvanlivost) nebo čerstvého (zpracovatelnost, počátek tuhnutí apod.). Je však potřeba mít na zřeteli, že podobné případy je nutné, ve vztahu k potřebnému odzkoušení upravených receptur, řešit s předstihem několika týdnů.

**Laboratoř** – většina členů SVB ČR má vlastní akreditovanou laboratoř. Ta jim poskytuje špičkové technické a technologické zázemí pro provoz betonáren v rámci české legislativy a technických norem.



**Výrobní zařízení** – všechny betonárny jsou buď nové, nebo prošly během posledních deseti let kompletní přestavbou s dovybavením moderními řídicími systémy a zařízeními na recyklaci čerstvého betonu.

**Předpisy** – Svaz výrobců betonu ČR se spolupodílí na implementaci evropských technických norem z oblasti technologie betonu do prostředí české legislativy. Na všech betonárnách je zaveden certifikovaný systém řízení výroby dle ČSN EN 206-1 a zákona č. 22/1997 Sb. ve smyslu Nařízení vlády č. 312/2005 Sb. a systém ISO 9001. Na mnohých i ISO 14001 a 18001.

**ERMCO** – SVB ČR je členem Evropského svazu výrobců transportbetonu ERMCO. Jeho prostřednictvím sleduje nejnovější trendy v oblasti transportbetonu a udržuje profesní vazby s kolegy ze zahraničí.

**Příjemné prostředí** – mnoho betonáren členů SVB ČR obdrželo titul „Ekologická betonárna“ od Evropského svazu výrobců transportbetonu za to, jak využívají recyklovanou vodu a kamenivo, za ozelenění výroby a jejího bezprostředního okolí a další aktivity spojené s rozumným přístupem k výrobě betonu a jeho vlivu na okolí.

Michal Števíla  
Svaz výrobců betonu ČR  
Na Zámecké 9, 140 00 Praha 4  
e-mail: svb@svb.cz, tel.: 246 030 153