GRANT journal
ISSN 1805-062X, 1805-0638 (online)
Vol. 12, issue 02
EUROPEAN GRANT PROJECTS | RESULTS | RESEARCH & DEVELOPMENT | SCIENCE

Zpřesnění posuzování betonu na únavu a jeho experimentální ověření

Petr Miklas[1]

[1] ČVUT v Praze, Fakulta stavební; Thákurova 2077, 166 29 Praha 6; petr.miklas@fsv.cvut.cz

Grant: SGS23/036/OHK1/1T/11
Název grantu: Únavová odolnost a zesilování betonových mostů UHPFRC nabetonávkou
Oborové zaměření: JM – Inženýrské stavitelství

© GRANT Journal, MAGNANIMITAS Assn.

Abstrakt V první části se příspěvek zabývá popisem zpřesněných postupů při posuzování betonu na únavu. Zde je popsáno několik postupů pro vhodnější stanovování únavové odolnosti betonových konstrukcí. Prvním je stanovení obecné ekvivalentní vlakové soupravy dle statistických výsledků řady vlakových souprav pohybujících se na několika motech. Druhým doporučením je přesnější stanovení redukčního součinitele únavového zatížení pro vlakové soupravy železničních mostů. Tento součinitel je obdobně jako v předchozím případě stanovován na základě statistických výsledků zatížení, délky a typu vlakových souprav sledovaných na několika mostech v České republice. V druhé části bude zobrazeno praktické použití přímého využití Wöhlerových křivek. Zde bude popsán postup stanovení únavové odolnosti včetně využití v plánovaném experimentu.

Klíčová slova Wöhlerovy křivky, Zkoušení únavy betonu, Posuzování betonu na únavu

1. ÚVOD

Vzhledem k obtížnému stanovování skutečné únavové odolnosti betonových konstrukcí je snahou zpřesňovat stávající postupy a popřípadě i tvořit nové metody pro zisk přesnějších výsledků únavové odolnosti betonových konstrukcí. Tyto postupy by měly poskytovat reálnější údaje o chování betonových konstrukcí při cyklickém zatěžování.

V první části příspěvku jsou představeny dvě zjednodušená doporučení, která mohou být využita při posuzování betonových konstrukcí na únavu. Obě doporučení jsou založena na statistickém vyhodnocení skutečných vlakových souprav pohybujících se na mostech v České republice. Vyhodnocení je založeno na skutečném zatížení a délce jednotlivých vlakových souprav a jejich lokomotiv a vagonů. V rámci zpracování poskytnutých výsledků bylo vyhodnoceno několik tisíc vlakových souprav na celkem šesti mostech v České republice. Na základě obsáhlého vyhodnocení byla stanovena obecná ekvivalentní vlaková souprava, která reprezentuje skutečné zatížení mostních konstrukcí. Druhým doporučením je přesnější stanovování redukčního součinitele únavového zatížení železničních mostů. Součinitel je stanovován na základě statistického vyhodnocení vlakových souprav a následně i v závislosti na rozpětí mostní konstrukce.

Druhá část tohoto příspěvku se věnuje zobrazení reálného použití přímého využití Wöhlerových křivek. Tato metoda je v příspěvku popsána. Metoda je následně prakticky popsána pro plánovaný experiment únavové odolnosti betonového předpjatého panelu SPIROLL. V této části je popsán návrh a posouzení tohoto panelu včetně posouzení únavové odolnosti a výpočtu předpokládaného počtu cyklů do porušení. Dále zde je popsán předpokládaný postup průběhu experimentu včetně vypočtených vnitřních sil a napětí, které by se měly v panelu vyskytovat.

2. OBECNÁ EKVIVALENTNÍ SOUPRAVA

První část příspěvku se věnuje stanovení obecné ekvivalentní vlakové soupravy, která by mohla být využita při posuzování betonu na únavu. Tato souprava byla stanovena na základě dat o skutečných vlakových soupravách nacházejících se na několika železničních mostech v české republice.

Jednalo se celkem o následujících šest mostních konstrukcí:

- Most přes ulici Chodovská v Praze
- Most v Ostravě – kolej číslo 1
- Most v Ostravě – kolej číslo 1
- Most v Přerově
- Most přes Rokytku v Praze – kolej číslo 1
- Most přes Rokytku v Praze – kolej číslo 1

2.1 Popis mostních konstrukcí

U všech mostních konstrukcí se jedná o prostá pole. Všechny mosty jsou složeny z podélných předpjatých prefabrikátů (např. KA-73, KDP 15, KT, I atd.). Tyto prefabrikáty jsou na mostech celkem buď dva nebo čtyři v závislosti na šířkovém uspořádání. Rozpětí mostů se pohybuje v rozmezí 14,8 m – 33,0 m.

Pro všechny uvedené mostní konstrukce byly k dispozici data o vlakových soupravách, které se na nich nacházely během jednoho reprezentativního měsíce. Tato data byla poskytnuta od správy železnic s.o. Mosty byly vždy podrobeny výpočtu v polovině rozpětí, kde byly stanoveny ohybové momenty během celého průjezdu všech vlakových souprav. Z těchto všech účinků zatížení byl stanoven 95 % kvantil ohybových momentů, který odpovídá charakteristické hodnotě.

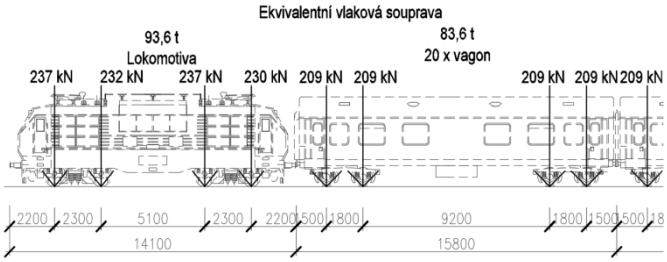
2.2 Stanovení obecné ekvivalentní soupravy

Uvedeným postupem byla následně stanovena ekvivalentní vlaková souprava. Tato souprava byla stanovena tak, aby co nejpřesněji vystihovala skutečné zatížení mostů vlakovou dopravou v České republice. Důvodem stanovení zatěžovacího modelu pro únavu je fakt, že model LM 71 využívaný v některých posudcích je výrazně těžší než reálné vlakové soupravy vyskytující se na mostech. Vzhledem k tomuto faktoru pak dochází při posuzování betonu na únavu k tomu, že konstrukce nevyhovují. Snahou je stanovit soupravu, která bude vhodná pro posuzování betonu na únavu. Dle *kap. 2.1* byly stanoveny účinky zatížení všech vlakových souprav na všech uvedených mostních konstrukcích. Tato data jsou využita následně pro stanovení redukčního součinitele únavového zatížení popsaný v *kap. 3*. Pro stanovení ekvivalentní vlakové soupravy byly využity zatížení na nápravu a rozměry všech jednotlivých vlakových souprav na jednotlivých mostech. Z těchto veličin byl stejně jako u účinků zatížení stanoven 95 % kvantil odpovídající charakteristické hodnotě jak zatížení, tak jednotlivých rozměrů a počtu vagonů. Z tohoto uvedeného 95 % kvantilu pro jednotlivé mosty byla stanovena ekvivalentní vlaková souprava pro průměr všech charakteristických hodnot. V *Tab. 1* jsou uvedeny charakteristické hodnoty ekvivalentních vlakových souprav pro jednotlivé mosty a na konci jsou pak uvedeny parametry obecné ekvivalentní soupravy.

	Lokomotiva			
	Počet lokom. (ks)	Délka lokomotiv (m)	Hmotnost lokomotiv (t)	Celk. délka vlaku
Most Chodovská	1	14,9	93,2	316,9
Most Ostrava - 1	1	12,5	90,8	338,0
Most Ostrava - 2	1	12,9	92,0	369,4
Most Přerov	1	14,4	91,2	334,4
Most Rokytka - 1	1	14,6	92,8	336,8
Most Rokytka - 2	1	14,6	92,8	283,2
Ekvivalentní vlak	1	14,1	92,0	330,1
	Vagony			
	Počet vagonů (ks)	Délka vagonu (m)	Hmotnost vagonu (t)	Celk. délka vlaku
Most Chodovská	20	15,1	21,3	316,9
Most Ostrava - 1	21	15,5	22,2	338,0
Most Ostrava - 2	23	15,5	20,9	369,4
Most Přerov	20	16,0	18,1	334,4
Most Rokytka - 1	18	17,9	20,0	336,8
Most Rokytka - 2	17	15,8	22,6	283,2
Ekvivalentní vlak	20	15,8	20,9	330,1

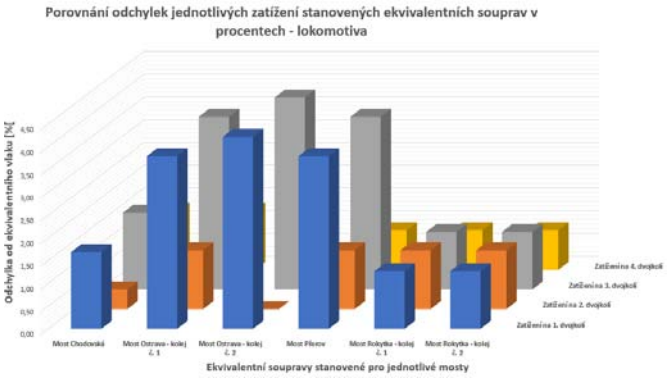
Tabulka 1: *Přehled jednotlivých parametrů navržené obecné ekvivalentní vlakové soupravy pro posuzování betonu na únavu*

Na *obr. 1* je graficky znázorněna navržená obecná ekvivalentní vlaková souprava. Z obrázku je vidět, že je navržena s jednou lokomotivou a dvaceti vagony. Zatížení jednotlivých dvojkolí lokomotivy se pohybuje v rozmezí 230 kN – 237 kN a u vagonů je zatížení na dvojkolí jednotné, a to 209 kN.



Obrázek 1: *Grafické znázornění části obecné ekvivalentní vlakové soupravy*

V grafech na *obr. 2* jsou zobrazeny odchylky v % zatížení lokomotivy obecné ekvivalentní vlakové soupravy a průměrů jednotlivých charakteristických hodnot zatížení spočítaných pro lokomotivy na jednotlivých mostech.



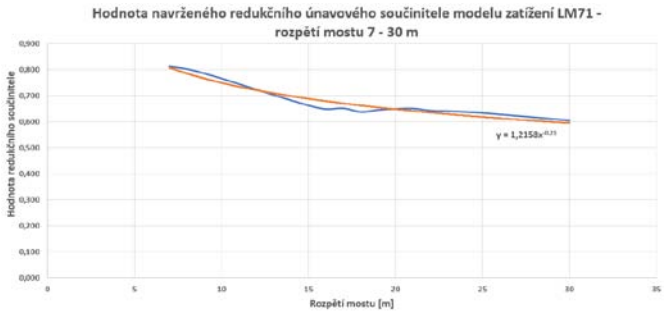
Obrázek 2: *Porovnání odchylek zatížení lokomotiv jednotlivých souprav pro mosty a obecné ekvivalentní vlakové soupravy*

3. REDUKČNÍ SOUČINITEL ÚNAVOVÉHO ZATÍŽENÍ

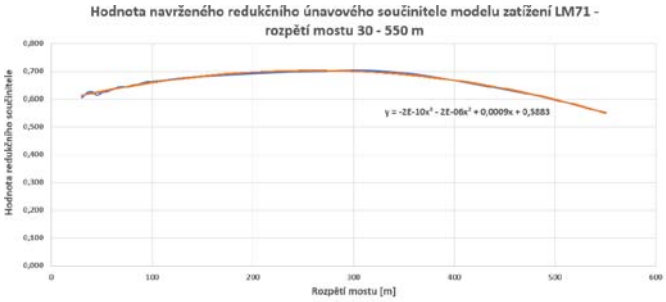
Druhým doporučením je výpočet redukčního součinitele únavového zatížení, který je stanovován přímo ze zatížení LM 71. Výhodou tohoto doporučení je jeho jednoduchost pro využití v praxi. U tohoto postupu je nutné znát pouze rozpětí dané mostní konstrukce. Následně je možné přímo stanovit redukční součinitel únavového zatížení.

Křivka a vzorec pro výpočet redukčního součinitele únavového zatížení je stanovena opět na základě dat z několika mostů popsaných v *kap. 2*. Z těchto dat byla stanovena obecná ekvivalentní vlaková souprava viz *kap. 2.2*. Pro tuto vlakovou soupravu byly stanoveny ohybové momenty pro rozpětí v rozmezí 7–550 m. Pro tato rozpětí pak byly stanoveny účinky zatížení stejným způsobem od standartního modelu LM 71. Následně byly tyto účinky pro jednotlivá rozpětí poděleny, tzn. Účinek obecné ekvivalentní vlakové soupravy lomeno účinkem modelu LM 71. Tímto postupem vznik poměr účinků skutečných vlakových souprav pohybujících se na mostech a účinků „těžkého“ modelu LM 71.

Redukční součinitel únavového zatížení stanovený uvedeným postupem je stanoven pouze v závislosti na rozpětí mostní konstrukce. Součinitel je možné stanovit pro rozpětí v rozmezí 7-500 m. Redukční součinitel se pohybuje v rozmezí 0,55 – 0,80.



Obrázek 3: *Graf zobrazující redukční součinitel únavového zatížení pro rozpětí mostu 7-30 m*



Obrázek 4: *Graf zobrazující redukční součinitel únavového zatížení pro rozpětí mostu 30-550 m*

V grafech na *obr. 3* a *obr. 4* je zobrazen modrou čarou přesný průběh spočítaného redukčního součinitele únavového zatížení. Oranžovou čarou jsou v grafech pak zobrazeny idealizované průběhy redukčního součinitele včetně vzorce pro jeho výpočet v závislosti pouze na rozpětí dané mostní konstrukce. Graf na *obr. 3* je pro rozpětí mostní konstrukce 7-30 m a graf na *obr. 4* je pro rozpětí mostu 30-550 m.

4. POSOUZENÍ ÚNAVY BETONU

Využití Wöhlerových křivek je pravděpodobně jednou z nejpřesnějších metod pro stanovování únavové odolnosti betonových konstrukcí. Jejich přímé využití využívá stanoveného postupu s použitím únavové pevnosti betonu, maximálního a minimálního napětí vyskytujícího se v konstrukci. Nejprve je nutné stanovit únavovou pevnost betonu – $f_{cd,fat}$ a maximální a minimální úroveň tlakového napětí – $E_{cd,min}$ a $E_{cd,max}$. Následně je nutné stanovit koeficienty *A*, *B* a *C* dle *rovnic 1*, *2* a *3*.

$$A = 0{,}0011 * E_{cd,min}{}^{2} - 0{,}0029 * E_{cd,min} + 0{,}0022 \qquad (1)$$

$$B = -0{,}0353 * E_{cd,min}{}^{2} + 0{,}1121 * E_{cd,min} - 0{,}0902 \qquad (2)$$

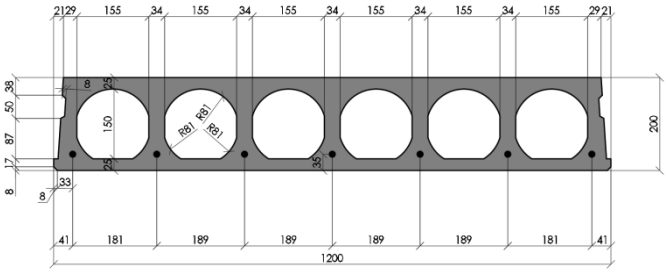
$$C = 0{,}0515 * E_{cd,min}{}^{2} - 0{,}057 * E_{cd,min} + 1{,}0165 \qquad (3)$$

Po stanovení koeficientů je nutné stanovit exponent N dle *rovnice 4*. Po jeho stanovení jej dosadíme do vztahu 10^N a tímto vztahem obdržíme počet cyklů napětí do porušení únavové odolnosti betonové konstrukce. Tuto hodnotu je na závěr potřeba vydělit dílčím součinitelem materiálu tak, abychom dostali hodnotu neovlivněnou tímto součinitelem.

$$N = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 * A * (C - E_{cd,max})}}{2 * A} \qquad (4)$$

5. POROVNÁNÍ A POSOUZENÍ VÝSLEDKŮ S WÖHLEROVÝMI KŘIVKAMI

Tato kapitola se věnuje praktickému použité metody přímého využití Wöhlerových křivek. Praktické využití je zobrazeno pro výpočet počtu cyklů budoucího experimentu. Experiment se bude týkat zkoumání únavové odolnosti betonového předem předpjatého panelu SPIROLL výšky 200 mm. Tento panel bude předepnut sedmi lany průměru 12,5 mm. Rozpětí panelu bude 3,5 m. Příčný řez panelem je zobrazen na *obr. 5*. Panel bude podroben cyklickému zatěžování až do dosažení meze únavy betonu. Panel bude v krajních částech plný tak, aby nedošlo k dosažení smykové únosnosti průřezu. Ve středních 2,25 m bude panel s dutinami. Síly budou do panelu vnášeny v místě 0,625 m od kraje. Panel bude namáhám čtyřbodovým ohybem.



Obrázek 5: *Příčný řez zkušebním panelem SPIROLL v místě s dutinami*

Pro uvedený panel byl proveden statický výpočet, který prokázal, že ke kolapsu by mělo dojít vlivem únavového zatížení. Panel bude systematicky zatěžován a přitěžován až do dosažení meze vzniku trhlin a následnému kolapsu.

Na *obr. 6* je znázorněn hotový předpjatý panel před provedením únavové zatěžovací zkoušky.

Obrázek 6: *Fotografie zkoušeného panelu SPIROLL na únavu [10]*

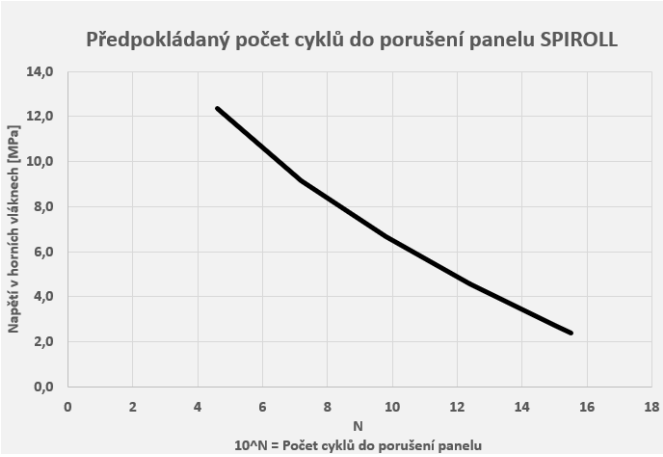
Na *obr. 7* je detail přilepení odporového tenzometru pro měření protažení nebo zkrácení betonu během únavové zatěžovací zkoušky. Z naměřených hodnot protažení bude následně možné stanovit napětí vyskytující se v konstrukci.

Obrázek 7: *Fotografie detailu přilepení odporového tenzometru [10]*

Na *obr. 8* je zobrazen lis, který bude vyvozovat únavové zatížení v předpjatém panelu SPIROLL. Maximální možné zatížení, kterého je možné lisem dosáhnout je 50 tun. Cyklické zatěžování bude prováděno s frekvencí 5 Hz.

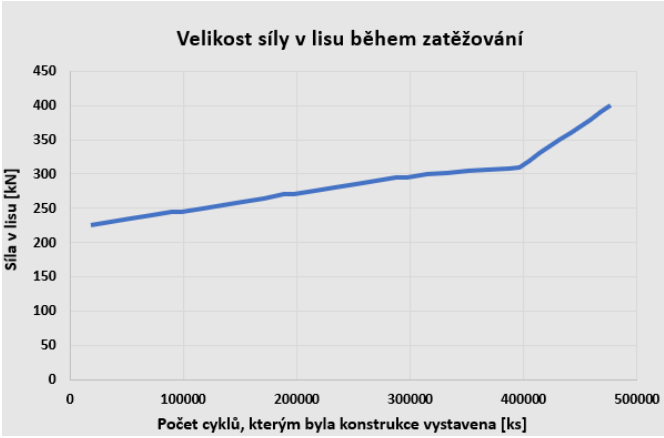
Obrázek 8: *Lis pro vyvozování únavového zatížení předpjatého panelu*

V grafu na *obr 9* je znázorněn předpokládaný vývoj počtu cyklů do porušení pomocí přímého využití Wöhlerových křivek pro horní vlákna zkušebního panelu SPIROLL. Výpočet je ukončen při dosažení ohybového momentu na mezi vzniku trhlin, kterého by mělo být dosaženo přibližně při dosažení síly v lisu 313 kN. Z grafu je jasně patrné, že počet cyklů do porušení se silně závislý především na střední hodnotě napětí, která se v konstrukci vyskytuje. Dále pak na rozkmitu napětí a dalších faktorech.



Obrázek 9: *Graf závislosti napětí v konstrukci a počtu cyklů do porušení konstrukce*

Na obr. 10 je znázorněn předpokládaný vývoj zatěžování panelu SPIROLL lisem a již proběhlý počet cyklů při dané síle v lisu. Začátek zatěžování je stanoven pro sílu v lisu 225 kN. Předpokládanou hodnotou síly v lisu pro vznik trhlin je hodnota 313 kN. V případě, že při této hodnotě nedojde k porušení konstrukce, bude panel nadále vystavován zvyšující se síle v lisu až do porušení panelu. Během zatěžování budou pomocí deseti odporových tenzometrů měřeny poměrná přetvoření konstrukce při horním i při dolním povrchu.



Obrázek 10: *Graf znázorňující velikost síly od lisu a počtu cyklů do porušení konstrukce*

6. ZÁVĚR

Pomocí dosažených výsledků je možné efektivněji a jednodušeji posuzovat betonové konstrukce na únavu. Byly představeny doporučení pro úpravu stávajících postupů ověřování betonu na únavu. Prvním doporučením je využití obecné ekvivalentní vlakové soupravy, u které bylo stanoveno její zatížení, vzdáleností jednotlivých dvojkolí a počet vagonů. Tato soustava reprezentuje skutečné zatížení železničních mostů v České republice. Druhým doporučením je výpočet redukčního součinitele únavového zatížení. Tento součinitel se stanovuje v závislosti na rozpětí dané mostní konstrukce. Tímto součinitelem se následně přenásobí zatížení modelem LM 71 a pro tyto mírnější účinky může být následně konstrukce posouzena.

Druhá část se věnuje popisu metody přímého využití Wöhlerových křivek. Pro tuto metodu je nutné znát pouze únavovou odolnost betonu a maximální a minimální úroveň tlakového napětí. Následně

jsou dopočítány koeficienty *A*, *B*, a *C* a z nich exponent *N* pro dosazení do 10^N a výpočet počtu cyklů do porušení betonové konstrukce. V poslední kapitole je znázorněno použití přímého využití Wöhlerových křivek. Využití je znázorněno pro budoucí experimentální ověření únavové odolnosti betonového předpjatého panelu SPIROLL. V této kapitole je podrobně popsán předpokládaný průběh experimentálního ověření.

Zdroje

1. ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí, 2006
2. ČSN EN 1992-2 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2_ Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady, 2007, včetně změn
3. fib, Model Code 2010 for Concrete Structures 2010, 2013. ISBN 978-3-433-60409-0
4. Hansen, M. Determination and assessment of fatigue stresses on concrete bridges, Structural Concrete, 21(4), 2020, pp. 1286–1297. doi: 10.1002/suco.201900432
5. KIM, J.-K.; KIM, Y.-Y. Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete. Cement and Concrete Research, 1996, 26.10: 1513-1523.
6. MIAO, Y.-Y.; NIU, D.-T.; CHENG, N. Durability of Concrete Under the Combined Action of Carbonization and Fatigue Loading of Vehicles. Science of Advanced Materials, 2019, 11.12: 1781-1787.
7. PAYMAN, A., SZYMANSKI, M. Fatigue in Plain Concrete, Göteborg, 2006
8. Správa železnic, s.o., Podklady přejezdů jednotlivých vlakových souprav přes most Chodovská, 2016
9. Správa železnic, s.o., Archivní dokumentace mostu Chodovská TU 0206 km 3,007
10. SVÚM, a.s., Výzkumné a testovací centrum materiálů