

EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA VZNIKU SMYKOVÝCH TRHLIN PŘEDPJATÉHO STĚNOVÉHO PRVKU Z UHPC

Vladimír Příbramský, *
Michaela Kopálová, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
vladimir.pribramsky@fsv.cvut.cz
michaela.kopalova@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

UHPC (ultra vysokohodnotný beton) je inovativní materiál, díky kterému je možné realizovat lehčí a konstrukčně optimalizované konstrukce s vysokou životností. V tomto příspěvku je představeno experimentální ověření chování stojin komorového mostu s prefabrikovanými stěnovými panely na zmenšených vzorcích. Předem předpjaté nosníky byly vyhotoveny ve dvou variantách – plnostěnný a s vylehčenou stojinou, která reprezentuje chování prefabrikovaných stěn na mostě. Na základě výsledků experimentu jsou obě varianty porovnány a jsou odvozeny numerické a materiálové modely v programu SCIA Engineer pro UHPC.

KLÍČOVÁ SLOVA

UHPC • Vylehčený nosník • Smyková únosnost FRC • Optimalizace konstrukce

ABSTRACT

UHPC (Ultra High Performance Concrete) is an innovative material that enables design of lightweight and structurally optimized, long-lasting structures. In this paper is presented experimental analysis of precast webs of box-girder bridge on scaled-down specimens. Pretensioned beam specimens were analyzed in 2 variants – with continuous web and with lightened web, which represents the behaviour of precast webs on a “butterfly web” bridge. Based on the experimental results are both variants compared and are presented numerical and material models suitable for UHPC modelling in software SCIA Engineer.

KEYWORDS

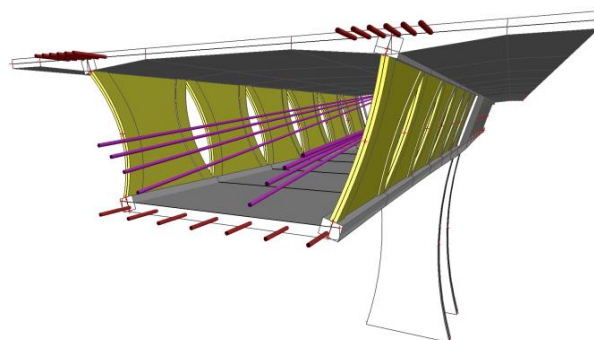
UHPC • Lightened beam • FRC shear resistance • Structural optimization

1. ÚVOD

Tento příspěvek se věnuje experimentální analýze vzniku a rozvoje trhlin ve stojině komorového mostu, která je složena

z jednotlivých prefabrikovaných desek z UHPC vetknutých do spodní a horní desky mostu. Tvar desek je společně s předpětím v rámci návrhu optimalizován tak, aby průběh napětí byl co nejpříznivější.

Použití vykrojených předpjatých prvků vychází z optimalizace na základě průběhu hlavních napětí, kdy respektuje směry tažené a tlačené diagonály, které jsou vyvolány přenosem smykových sil mezi spodní a horní deskou. Stojina komorového průřezu mostu je díky tomu vylehčena a je pak možné takovouto technologii použít pro mosty s rozpětím až 100 m. Návrh stěnových prvků komory vychází a rozšiřuje koncepční návrh tzv. „butterfly web bridges“ neboli návrh mostu se stojinami typu motýlích křídel. Prefabrikované panely spolu vzájemně po délce mostu nespolupůsobí a z hlediska statického působení se most chová podobně jako příhradový nosník, působení panelů je analogické s diagonálami dvojitého Warrenova příhradového systému. Alternativní aproximací je Viendeelův nosník, kde jednotlivé prefabrikované dílce stěn působí jako svislé stojiny vetknuté do spodní a horní desky komorového průřezu.

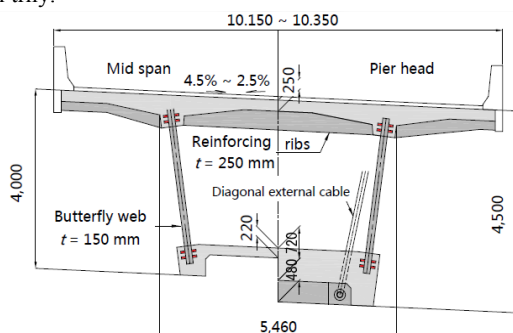


Obr. 1: Vizualizace mostu se stěnami z prefabrikovaných UHPC panelů.

První mosty tohoto typu byly postaveny v Japonsku. Most Takubogawa (Kasuga et al. 2010) byl vyroben z HPC betonu s charakteristickou pevností 80 MPa a tloušťkou stěn je 150 mm. Kromě rozptýlené výztuže z drátků o vysoké pevnosti byly prvky předepnuty předem předpjatými lany ve směru hlavních

* Školitel: Doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.

tahových napětí, betonářská výztuž je v prvku použita pouze pro účely zajištění sprážení s horní a spodní monolitickou deskou mostovky. Betonářská výztuž je dále doplněna ocelovými trny.



Obr. 2: Příčný řez mostu Takubogawa Bridges butterfly webs stojinami.

Použití lehkých HPC stojin má podobně jako v případě stěn z ocelového trapézového plechu anebo příhradových stojin vliv na redukci vlastní tíhy hlavní nosné konstrukce i dalších konstrukcí (pilíře a základy). V rámci studie (Kata et al. 2013) byl porovnán letmo betonovaný most stejného rozpětí zhotovený klasicky s mostem s vylehčenými UHPC stěnami. Objem potřebného betonu byl redukován o 8%, redukce množství betonářské (i rozptýlené) výztuže byla 6% a redukce množství předpínací výztuže 19%. Celková environmentální náročnost mostu byla snížena o 186 tun CO₂, tedy cca o 6%.

1. EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ CHOVÁNÍ UHPC NOSNÍKU

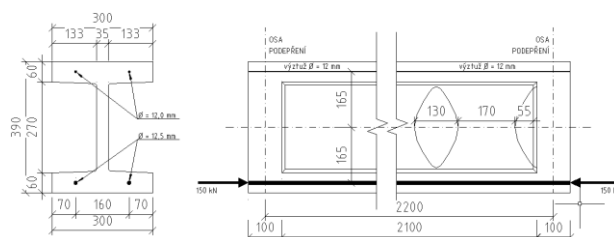
1.1. Popis zkoušených UHPC nosníků

Z důvodu ověření působícího napětí u štíhlých smykem zatížených konstrukcí byly navrženy dva typy nosníků – jeden s plnou stojinou a druhý se stojinou vylehčenou v podélném směru. Jedná se o nosníky I tvaru se štíhlou stojinou a s dostatečně tuhými pánsnicemi s podélným předpětím, které brání vzniku tahových oblastí od ohybu.

V případě vylehčeného nosníku můžeme předpokládat podobné chování jako u stojiny nosníku z příhradových prvků. Cílem experimentu je ověření tohoto chování v tahových a tlakových oblastech stojiny u plnostěnného i vylehčeného nosníku, které simulují použití prefabrikovaných prvků jako součást mostů velkých rozpětí.

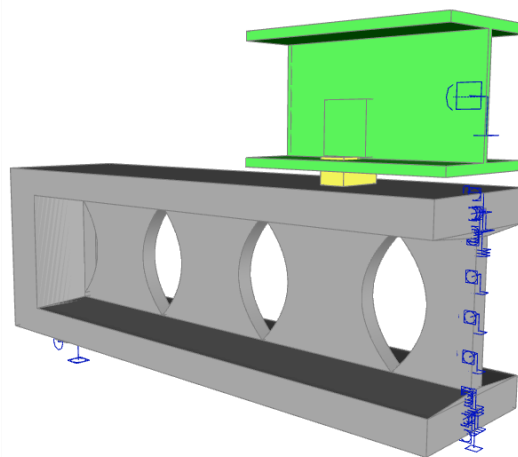
Na základě proběhlého experimentu pak přesně nastavit a korigovat numerickou analýzu vlastnosti a chování betonu pro další kroky výzkumu – návrh stěnového prefabrikovaného prvku, který bude vhodně kombinován s předpětím a návrhu sprážení tohoto prvku s monolitickou částí komorového mostu.

Rozměry nosníků byly zvoleny s ohledem na možnosti přepravy prvků z výroby a samotnou manipulaci při provádění experimentu. Nosníky je dlouhé 2,3 m a vysoké 0,39 m. Spodní pánsnice jsou předepnuty dvěma lany silou 150 kN. Vzhledem ke svým dimenzím nejsou tahové diagonály u vylehčeného nosníku předepnuty.



Obr. 3: Tvar UHPC nosníků

Ve výpočetním programu Scia Engineer 18 je nosník reprezentován jako polovina celého nosníku pro optimalizaci doby výpočtu. Síť je v místě oblastí, kde je očekávána trhлина zhuštěna pro získání přesnějších výsledků.



Obr. 4: Vizualizace výpočetního modelu vylehčeného nosníku

1.2. Výroba vzorků a popis experimentu

Nosníky byly vyrobeny na předpínací dráze, vždy dva za sebou. Bednění pro nosníky bylo vyrobené na míru z překližek. Pro zajištění vylehčení nosníku byly do bednění vloženy a připevněny polystyrenové dílce. Samotná betonáž probíhala v jedné fázi postupným plněním bednicí formy samozhutnitelnou betonovou směsí UHPC ve svislé poloze.



Obr. 5: Betonáž nosníku na předpínací dráze

Měření napětí v nosnících bylo zajištěno pomocí strunových tenzometrů, které byly umístěny na nosník symetricky, vždy do stejných míst, ať už se jednalo o plný či vylehčený nosník. Celkem na nosník byly umístěny vždy 4 tenzometry. Při zatěžování nosníku byl také zaznamenáván jeho průhyb ve středu rozpětí a nad podporami. Nosník byl prostě uložen v osách krajních zesílení a byl zatěžován silou, která byla pomocí ocelového nosníku roznesena do cca jeho třetin a jejíž velikost byla řízena posunem.



Obr. 6: Vybetonovaný nosník při zatěžování

Celkem se experimentu podrobilo 6 nosníků – tři nosníky s plnou stojinou s označením P1, P2, P3 a tři nosníky s vylehčenou stojinou s označením V1, V2, V3.

Během zatěžování posunem byla zaznamenávána data o aktuálním průhybu uprostřed rozpětí, dále informace z tenzometrů a výsledná působící síla. První nosník z každé sady byl při čtyřbodovém ohybu zatěžován plynule do porušení. Druhý a třetí nosník z každé sady byl nejprve zatěžován cyklicky a následně byl řízenou deformací zatěžován do porušení.

1.3. Charakteristika směsi UHPC

Použití numerické simulace, jejímž cílem je vystihnout co nejpřesněji reálné chování konstrukce, vyžaduje znalost přesných vlastností použité směsi UHPC. V rámci betonáže nosníků byly vyrobeny zkušební vzorky pro následné stanovení materiálových charakteristik.

Mechanické vlastnosti ztvrdlého betonu byly ověřeny pomocí standardních postupů na zkušebních tělesech ve

tvarech a rozměrech, které jsou předepsány příslušnými normami.

Pevnost betonu v tlaku byla stanovena na krychlích o rozměrech 100 x 100 x 100 mm.

Tabulka 1: Pevnost UHPC směsi v tlaku

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
1032-1	100,5	100,6	100,2	2494	2460	1712	169,3
1033-2	100,2	100,4	100,1	2477	2460	1572	156,3
1034-3	100,2	102,4	100,6	2446	2370	1574	153,4
1	100,1	98,6	100,2	2435	2460	1513	153,3
2	100,6	97,7	100,4	2454	2490	1551	157,8
3	100,4	99,2	100,2	2445	2450	1516	152,2
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2450		157,1
Směrodatná odchylka					40,7		6,4
Variační koeficient [%]					1,7		4,1

Pevnost betonu v tahu za ohybu a tlaková pevnost byla stanovena na trámcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm.

Tabulka 2: Pevnost UHPC směsi v tahu za ohybu

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objem. hmotnost [kg.m ⁻³]	Tah za ohybu	
	b [mm]	h [mm]	l [mm]			Síla [kN]	Napětí [MPa]
1035-A	40,3	40,0	159,6	622	2418	11,54	26,8
1035-B	39,8	40,2	159,1	610	2396	12,61	29,4
1035-C	38,9	40,3	159,5	599	2396	11,72	27,8
1036-A	40,0	40,0	161,1	618	2398	13,39	31,4
1036-B	41,2	40,1	160,7	642	2418	13,02	29,5
1036-C	40,9	39,7	160,6	622	2385	13,73	31,9
1	40,8	40,4	159,9	642	2436	11,57	26,1
2	41,3	40,2	160,1	639	2404	12,36	27,8
3	40,9	40,2	162,2	633	2374	10,71	24,3
4	40,1	40,3	159,9	625	2419	11,72	27,0
5	38,3	40,6	160,2	606	2433	12,49	29,7
6	40,2	40,3	160,0	631	2434	10,67	24,5
Průměrná hodnota:					2410		28,0
Směrodatná odchylka					20,2		2,4
Variační koeficient [%]					0,8		8,7

Statický modul pružnosti byla stanovena na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm.

Tabulka 3: Modul pružnosti UHPC

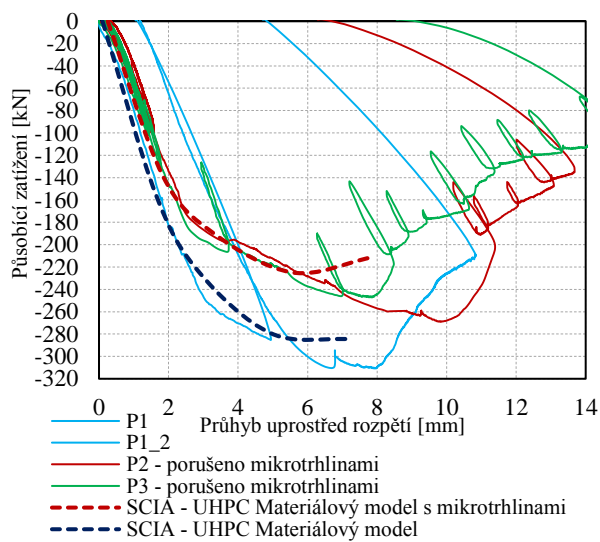
Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu $\Delta\sigma$ [MPa]	Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	\varnothing [mm]	h [mm]						
1	150,1	288,9	12645	2480	2613	147,8	47,56	51,6
2	150,3	287,5	12667	2480	2605	146,8	47,40	52,4
3	150,3	287,0	12760	2510	2615	147,4	47,40	51,4
4	149,7	291,5	12564	2450	2370	134,7	47,78	55,0
5	149,6	288,2	12383	2440	2561	145,7	47,85	49,8
6	149,6	291,1	12679	2480	2583	147,0	47,88	49,7
Průměr				2470		144,9		51,6
Směrodatná odchylka				25,0		5,1		1,9
Variační koeficient				1,0		3,5		3,8

2. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

V této kapitole jsou uvedeny pro obě varianty nosníků výsledné diagramy odolnosti, které byly následně aproximovány numerickým modelem v programu Scia Engineer 18 za použití nelineárního materiálového modelu, který reprezentuje chování drátkobetonu. Základní charakteristiky materiálového modelu byly nastaveny dle provedených doprovodných zkoušek (pevnost UHPC v tlaku, pevnost UHPC v tahu za ohybu, modul pružnosti UHPC) provedených ve stejném stáří vzorků jaké bylo stáří nosníků při provedení experimentu. Pro oba typy nosníků bylo modelováno realizované předpětí s uvažovanými krátkodobými a dlouhodobými ztrátami 15% (stáří nosníků v době experimentu bylo přibližně 90 dní).

2.1. Vyhodnocení plnostěnného nosníku

Plnostěnné nosníky byly ve 4 bodovém ohybu ověřovány ve 2 různých scénářích. V prvním scénáři byl nosník zatěžován řízenou deformací až do porušení a ve druhém scénáři bylo na začátku zatěžování na nosník aplikováno cyklické zatěžování. Bylo aplikováno 5 zatěžovacích cyklů mezi 0 – 100 kN a následně byl nosník zatěžován řízenou deformací do porušení. Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny na grafu níže.

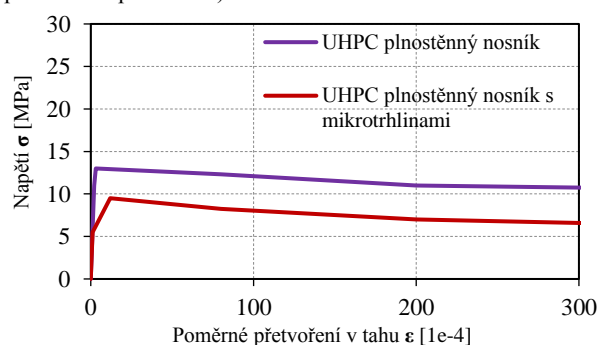


Obr. 7: Graf odolnosti nosníku při čtyřbodovém ohybu

Z diagramu odolnosti na Obr. 7 je patrné mírné změkčení nosníku (do hodnoty působícího zatížení cca 150 kN), který byl na počátku zatěžování zatěžován cyklickým zatížením. V lineární oblasti působení a dále je patrný dřívější rozvoj smykové makrotrhliny, než tomu je u nosníku, který nebyl zatížen cyklickým zatížením. Tento efekt je důsledkem rozvoje mikrotrhlin při aplikaci cyklického tahového napětí. Z experimentu bylo zjištěno, že tento efekt má významný vliv jak na tahovou pevnost UHPC, tak i na jeho reziduální pevnost.

Pro numerický model plnostěnného nosníku byly použity materiálové modely UHPC s charakteristikami patrnými v grafu níže. Materiálové modely byly určeny iterativně tak, aby byl v numerickém modelu stejný diagram odolnosti

nosníku a zároveň typ porušení a tvar makrotrhlin odpovídal skutečností zjištěných při experimentu. Hodnoty přetvoření v pracovním diagramu pro numerický model jsou závislé na volbě sítě, v tomto případě byla síť pro analýzu volena velikosti 10 mm a limitní uvažované rozvětvení trhliny v modelu 5 mm odpovídá tedy poměrnému přetvoření 50% (pro čitelnost je vykreslena v grafu pouze jeho část do 3% poměrného přetvoření).

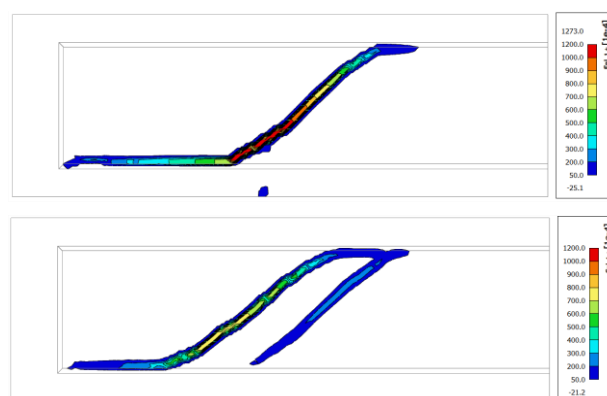


Obr. 8: Pracovní diagramy UHPC – tahová větve

Typ a tvar porušení je zobrazen na Obr. 9 níže a porovnán s porušením určeným z numerického modelu. Na Obr. 10 z programu Scia Engineer 18 je vyobrazeno celkové tahové plastické přetvoření stojiny z UHPC. Tvar smykové trhliny byl pro oba scénáře zatěžování shodný a stejně tomu je i v numerickém modelu. V případě spojitě stojiny a díky vysoké reziduální pevnosti UHPC je možné sledovat náhodně iniciace více než jedné smykové makrotrhliny.



Obr. 9: Analýza módu poškození; foto porušeného vzorku

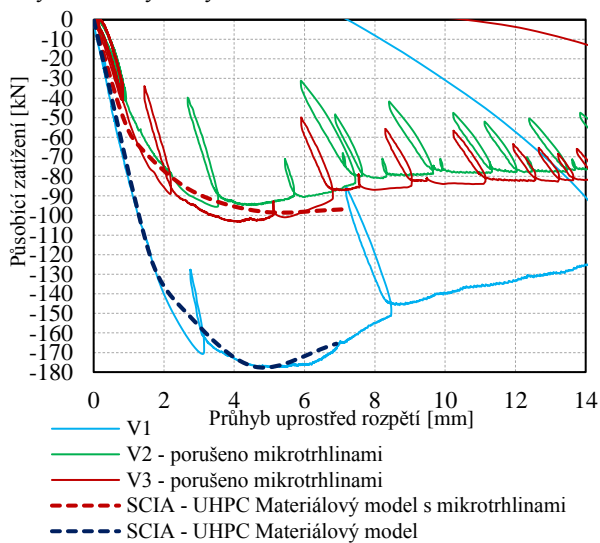


Obr. 10: Analýza módu poškození; šíření jedné, nebo 2 makrotrhlin v numerickém modelu

2.2. Vyhodnocení vylehčeného nosníku

Vylehčené nosníky byly ve 4 bodovém ohybu ověřovány ve 2 různých scénářích stejně, jako v případě plnostěnných nosníků. Ve druhém scénáři zatěžování bylo aplikováno 5 zatěžovacích cyklů mezi 0 – 40 kN a následně byl nosník zatěžován řízenou deformací do porušení. Výsledky těchto zkoušek jsou uvedeny na grafu níže.

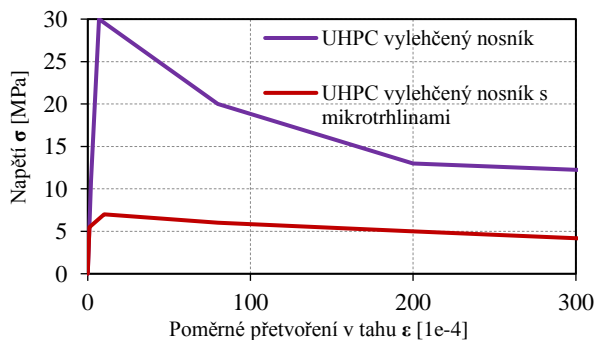
Z diagramu odolnosti na Obr. 11 je patrné výrazné změkčení nosníku (do hodnoty působícího zatížení cca 50 kN), který byl na počátku zatěžování zatěžován cyklickým zatížením. V lineární oblasti působení a dále je patrný dřívější rozvoj smykové makrotrhliny, než tomu je u nosníku, který nebyl zatížen cyklickým zatížením.



Obr. 11: Graf odolnosti nosníku při čtyřbodovém ohybu

Pro nosník zatěžovaný do porušení bez aplikace cyklického zatěžování je patrná významně lepší únosnost v porovnání s cyklováním vzorkem, než je tomu v případě porovnání nosníků plnostěnných. Tento efekt je velmi důležitý a je důsledkem násobné tahové pevnosti za ohybu oproti pevnosti v prostém tahu. Tahová pevnost za ohybu byla zjišťována pro omezení size-effectu na doprovodných trémciích průřezu 40x40x160 mm, což jsou dimenze srovnatelné s tloušťkou segmentu stojiny (35 mm).

Pro numerický model vylehčeného nosníku byly použity materiálové modely UHPC s charakteristikami patrnými v grafu na Obr. 12 níže.

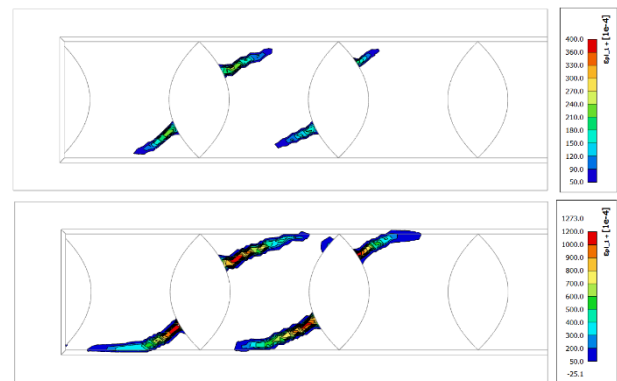


Obr. 12: Pracovní diagramy UHPC – tahová větev

Typ a tvar porušení je zobrazen na Obr. 13 níže a porovnan s porušením určeným z numerického modelu. Tvar smykových trhlin byl pro oba scénáře zatěžování shodný a stejně tomu je i v numerickém modelu.



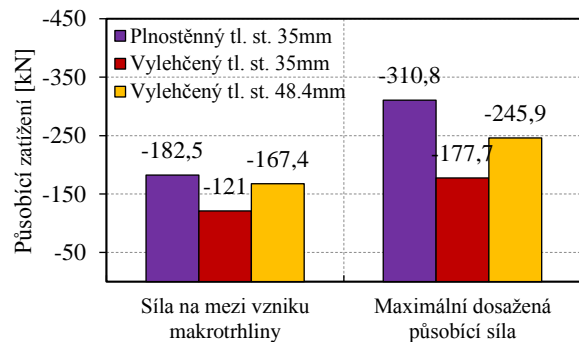
Obr. 13: Analýza módu poškození; foto porušeného vzorku



Obr. 14: Analýza módu poškození – vznik a šíření makrotrhlin v numerickém modelu

2.3. Porovnání plnostěnné a vylehčené varianty

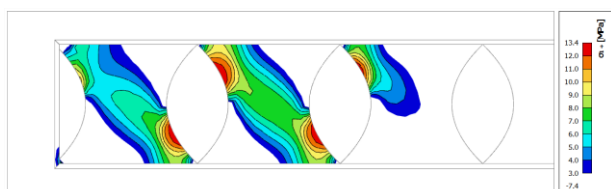
Pro objektivní srovnání plnostěnného nosníku a vylehčeného nosníku zatěžovaného do porušení (scénář 1) je vhodné dopočítat hodnoty maximálních zatížení pro vylehčený nosník, na které by bylo použito stejné množství materiálu, jako na nosník plnostěnný. Takovýto nosník by měl tloušťku stojiny vyšší o **38%, tedy 48,4 mm**. Na grafu níže jsou porovnány působící síly při vzniku makrotrhliny a maximální dosažené zatížení.



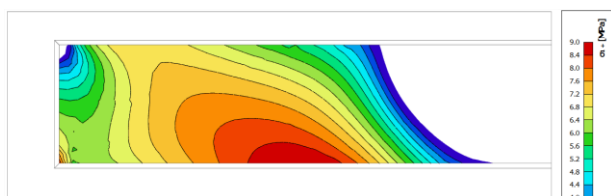
Obr. 15: Porovnání odezvy nosníku; plnostěnný, vylehčený a vylehčený s upravenou tloušťkou stěny

Pozorovaný pokles celkové tahové i reziduální pevnosti UHPC pro nosník zatěžovaný na začátku zatěžování cyklickým zatížením je vyšší u vylehčeného nosníku, než v případě nosníku plnostěnného. Tento efekt je způsoben tvarem segmentů vylehčených stojin a vyšším tahovým napětím při

cyklování v lokalizovaných místech na hranách vylehčených segmentů (do hodnoty tahových napětí 13,5 MPa), kde docházelo k vyššímu rozvoji makrotrhlin v UHPC, než v případě plnostěnného nosníku (tahová napětí při cyklickém zatěžování dosahovala hodnot 9,0 MPa). Rozložení hlavních tahových napětí od kombinace vlastní tíhy, předpětí bez ztrát a amplitudy cyklujícího zatížení je patrné níže na Obr. 16 a Obr. 17.



Obr. 16: Maximální hlavní tahová napětí ve stojině při cyklickém zatěžování vylehčeného nosníku



Obr. 17: Maximální hlavní tahová napětí ve stojině při cyklickém zatěžování plnostěnného nosníku

Dále je patrné, že po rozvoji mikrotrhlin v oblasti iniciace a následném rozvoji makrotrhliny, UHPC zrací svou vysokou tahovou pevnost danou ohybovým charakterem porušení segmentu vylehčené stojiny (viz dále).

3. DISKUZE

Na základě prezentovaných výsledků v předchozí kapitole je možné učinit následující pozorování a závěry:

Při srovnání plnostěnného nosníku s tloušťkou stojiny 35 mm a vylehčeného nosníku se stojinou tloušťky 48,4 mm (stejně množství použitého materiálu) vychází únosnost vylehčeného nosníku ve smyku cca o 22% nižší a první makrotrhliny vzniknou při hodnotě zatížení o 15% nižší. Nespornou výhodou vylehčených stěn jsou následující aspekty:

- Je možnost další optimalizace jejich tvaru (použití větší tloušťky v okolí míst, kde dochází k inicializaci makrotrhliny).
- Je možné rozdělení konstrukce na konstrukční díly a jejich prefabrikace pro zajištění nejvyšší jakosti konstrukčních prvků.
- Při prefabrikaci je možné doplnit stěnové prvky o předem předpjatá lana se soudržností, pro eliminaci tahových napětí a jejich rozkmitu v průběhu užívání konstrukce. Předpětí je možné volit efektivně, neboť místo vzniku makrotrhliny je přímo dané geometrií prvku.

- Oproti dříve provedené analýze a výchozí studii k problematice vylehčených UHPC nosníků (Kata et al. 2013), kde bylo uváděno chování aproximované tahovou a tlakovou diagonálou, se v případě vylehčeného nosníku chová vylehčený segment stojiny jako svislice Vierendeleva nosníku a je tedy ohýbána. Vzhledem ke skvělým vlastnostem UHPC v tahu za ohybu je tento typ chování nanejvýš výhodný.

Významný protichůdný efekt je únavová redukce pevnosti UHPC a eliminace násobně vyšší tahové únosnosti za ohybu při aplikaci cyklického tahového namáhání, které překračuje 30% tahové pevnosti betonu. V případě použití UHPC prvků na nosnicích realistických dimenzí (mostů) lze tento efekt zcela eliminovat předpětím vylehčených prvků stojin při jejich prefabrikaci.

4. ZÁVĚR

V příspěvku byly prezentovány výsledky a zhodnocení experimentální analýzy vylehčeného nosníku z UHPC, který v malém měřítku reprezentuje stěnu komorového nosníku z prefabrikovaných UHPC dílců spřažených s horní a spodní monolitickou deskou průřezu mostu. Nespojitý charakter chování prvků stěny bylo porovnáno s chováním spojitě stojiny nosníku. Z analýzy vyplývá vhodnost použití prefabrikovaných stojin z UHPC díky jeho skvělým vlastnostem v tahu a zejména v tahu za ohybu. Pokud jsou stěny doplněny předem předpjatými lany pro eliminaci tahových napětí, prefabrikované prvky předčí v únosnosti i spojitou stěnu srovnatelných dimenzí.

PODĚKOVÁNÍ

Teoretické podklady pro prezentované výsledky byly získány za finanční podpory z prostředků studentské grantové soutěže v rámci projektu SGS19/036/OHK1/1T/11 „Experimentální ověření chování UHPC prvků komorových mostních konstrukcí“.

Reference

- Kasuga, N. Nagamoto, K. Kata, H. Asai (2010), Study of a bridge with a new structural system using ultra high strength fiber reinforced concrete, *Proceedings of 3rd fib Congress, Washington*
- K. Kata, K., Ashizuka, K., Miyamoto, K., Nakatsumi, K., (2013), Design and Construction of Butterfly Web Bridge, *Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto*.
- Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., Frohlich, S. Ultra-High Performance Concrete UHPC. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2014. ISBN 978-3-433-03087-5.