

EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ OHYBOVÉ ÚNOSNOSTI PANELŮ ZESÍLENÝCH POMOCÍ UHPC

Lukáš Boháček, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Tháškova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
lukas.bohacek@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

UHPC (ultra vysokohodnotný beton) jsou betony, které mají výrazně lepší vlastnosti než běžně používané betony. Dají se použít jak pro nové konstrukce, tak pro rekonstrukce. S ohledem na cenu a komplikovanost provádění se zatím využívají minoritně. Kromě běžně udávaných tlakových a tahových pevností je výhodou také větší trvanlivost a odolnost.

Tento článek se zabývá experimentálním zjištěním ohybové únosnosti betonových panelů, které byly zesíleny pomocí UHPC a porovnáním zjištěné únosnosti s panely bez zesílení a vypočtenými hodnotami. Ohybová únosnost byla zjištěna pomocí zkoušky čtyřbodovým ohybem. Výsledkem bylo zjištěno, že u zkoušených panelů bylo dosaženo výrazně vyšší únosnosti a duktility oproti panelům bez zesílení.

KLÍČOVÁ SLOVA

UHPC • zesílení • ohybová únosnost • zkouška

ABSTRACT

UHPC (ultra high performance concrete) means concrete with significantly better properties compared to generally used concretes. These concretes can be used both for strengthening existing structures and new structures. Nowadays, these types of concrete are in minority due to higher price and complicated casting. Usually mentioned advantages are compression and tension strength but high durability is also big advantage.

This article is about experiments to find out bending load capacity of concrete beams strengthened using UHPC. Then load capacity of beams without UHPC and strengthened beams was compared and then the experimental results were compared to calculation. Bending load capacity was determined using four-point flexural test. After experiments was found that the load capacity and ductility of beams were much larger in comparison to beams without strengthening.

KEYWORDS

UHPC • strengthening • bending load capacity • experiment

1. ÚVOD

Předmětem článku jsou zkoušky ohybové únosnosti prefabrikovaných betonových panelů, které byly zesíleny vrstvou UHPC (ultra vysokohodnotný beton) dobetonovanou k hornímu povrchu a porovnání výsledků s výpočtem a nezesílenými panely. Vzhledem k uspořádání zkoušky (čtyřbodový ohyb) se dobetonovaná vrstva UHPC nachází v tlacené oblasti. Dalším cílem bylo ověřit, zda i bez mechanického spřažení bude dosaženo ohybové únosnosti panelů, aniž by došlo k delaminaci prvků. Dříve byly provedeny zkoušky odtrhů, ze kterých se ukázalo že nejlepší cesta bez mechanického spřažení je provést tryskání vodním paprskem a přímé nabetonování UHPC.

Pro experimenty byly použity betonové panely o půdorysných rozměrech 5500 x 490 mm, jejichž tloušťka je 120 mm. Tyto panely jsou staré v řádu jednotek let a byly uskladněny v exteriéru (byly tedy vystaveny vlivu vnějšího prostředí). K panelům bohužel nebyla známá žádná dokumentace a jejich vlastnosti bylo nutné ověřit zkouškami.

Při experimentu byly zkoušeny 3 typy panelů; původní panely zesíleny pouze betonářskou výztuží, panely zesílené betonářskou výztuží a 30 mm UHPC a panely zesílené betonářskou výztuží a 50 mm UHPC. Od každého typu panelů byly použity 3 vzorky.

Výsledky získané z experimentů byly následně ověřeny výpočtem ohybové únosnosti jednotlivých průřezů.

2. PŘÍPRAVA EXPERIMENTŮ

2.1. Diagnostika panelů

Jelikož nebyla k panelům dostupná žádná technická dokumentace, tak bylo nutné provést diagnostiku panelů pro zjištění způsobu vyztužení panelů a charakteristik betonu.

S ohledem na možnosti zkušebních zařízení pro plánovanou zkoušku bylo nutné panely příčně rozříznout na dvě poloviny, takže bylo snadné zjistit umístění podélné betonářské výztuže. Podélná výztuž zahrnuje čtyři pruty o průměru 12 mm, z nichž jsou dva u horního povrchu a dva u spodního povrchu. Umístění výztuže v příčném řezu včetně zaměření je znázorněno na Obrázku 1. Vlastnosti výztuže zjišťovány nebyly a

Naformátováno: Neprovádět kontrolu pravopisu ani gramatiky

Naformátováno: Mezera Za: 8,5 b.

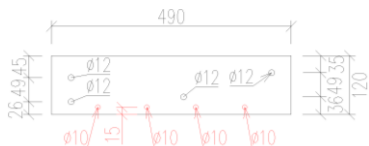
Naformátováno: Mezera Za: 8,5 b.

Naformátováno: Mezera Za: 8,5 b.

Naformátováno: Mezera Za: 8,5 b.

* Školitel: prof. Ing. Jan L. Vitek, CSc., FEng.

byly použity charakteristické hodnoty betonářské výztuže B500B dle ČSN EN 1992-1-1.



Obrázek 1: Příčný řez panelem. *(.jpg file)*

Po provedení ohybových zkoušek byly u jednoho z referenčních panelů provedeny vývrty, na kterých byly provedeny zkoušky betonu v tlaku. Z těchto zkoušek byla vyhodnocena průměrná válcová pevnost betonu panelů v tlaku $f_{c,cyl,pan} = 32.3$ MPa. Dále bylo Schmidtovým tvrdoměrem zjištěno, že vlastnosti jednotlivých panelů si odpovídají, tudíž se dá předpokládat, že si odpovídají tlakové pevnosti panelů.

2.2. Zesílení panelů

Vzhledem k malému množství betonářské výztuže (viz předchozí kapitola) bylo přistoupeno k zesílení panelů další betonářskou výztuží, aby experiment lépe odpovídal používanému množství výztuže v konstrukcích typu stropní desky apod. Do všech panelů byly u spodního povrchu vyfrézovány čtyři drážky hl. 24 ± 0 mm a do každé této drážky byl vložen prut výztuže B500B o průměru 10 ± 0 mm. Těžšíte výztuže je tedy přibližně 15 mm od spodního povrchu. Tyto drážky byly následně vyplněny betonem pro zajištění soudržnosti mezi panelem a výztuží.

Celkem bylo použito devět panelů, z toho tři panely byly ponechány jako referenční a u zbylých šesti panelů bylo provedeno zesílení. Jako příprava povrchu panelů bylo provedeno ruční tiskání vodním paprskem. Na tři panely byla následně vybetonována vrstva UHPC tloušťky 30 ± 0 mm a na zbylé tři panely byla vybetonována vrstva tloušťky 50 ± 0 mm UHPC s vloženou výztuží typu kari sítě. Zkoušky byly prováděny přibližně jeden měsíc po vybetonování vrstev z UHPC.

Z vlastností UHPC je nejdůležitější průměrná pevnost betonu v tlaku $f_{c,cyl,UHPC} = 140 \pm 0$ MPa, která vyšla z experimentů.

3. EXPERIMENTY

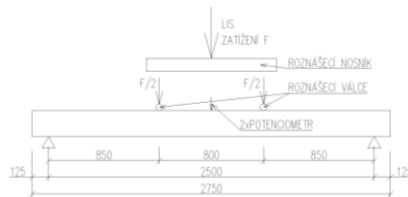
3.1. Uspořádání experimentů

Zkouška byla uspořádána jako čtyřbodový ohyb. Hlavními výhodami tohoto uspořádání je eliminace posouvající síly v nejvíce namáhaných průřezech a zároveň je maximální ohybový moment rozprostřený na větší délku nosníku a je možné postihnout nejslabší průřez v dané oblasti.

Jelikož byl použit pouze jeden lis, tak bylo nutné sílu roznést pomocí ocelového nosníku do dvou zatěžovacích míst. Tato dvě místa představovaly ocelové tyče, které byly již přímo v kontaktu s betonem a na povrchu betonu působily jako liniové zatížení kolmo na podélnou osu panelů. Vzdálenost podpor byla 2.5 m a vzdálenost ocelových tyčí byla 0.8 m.

Pro měření byly použity dva potenciometry uprostřed rozpětí panelů, které měřily průhyb panelu. Každý z těchto potenciometrů byl na jedné straně, aby bylo možné zachytit případné nerovnoměrné prohýbání panelu.

Schéma zkoušky a její uspořádání ve skutečnosti viz Obrázek 2 a Obrázek 3.



Obrázek 2: Schéma uspořádání zkoušky. *(.jpg file)*



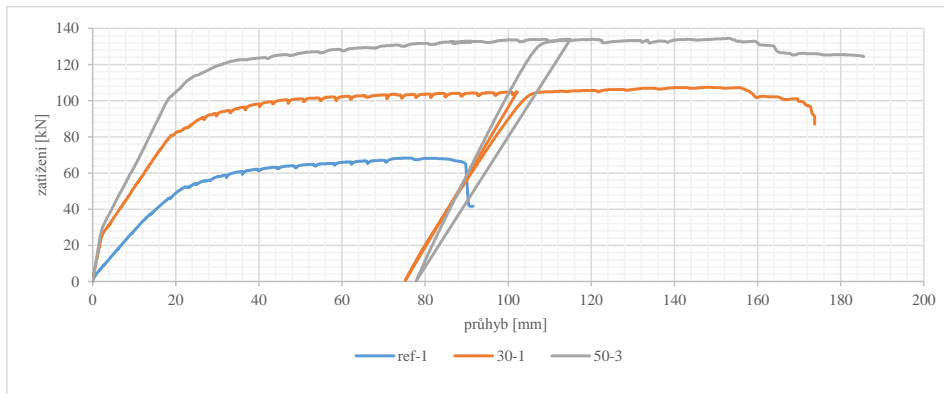
Obrázek 3: Uspořádání zkoušky v laboratoři *(.jpg file)*.

3.2. Průběh experimentů

Panely byly zkoušeny přibližně měsíc po zesílení, kdy by mělo být dosaženo plné pevnosti UHPC. Zkoušky probíhaly ve dvou dnech, takže vliv různého stáří UHPC je zanedbatelný.

Při zkoušení zesílených panelů došlo k situaci, kdy rozsah potenciometrů nedostačoval průhybu panelů a došlo k jejich plnému využití. V tomto případě bylo nutné zkoušku přenastavit, aby bylo možné dále měřit průhyb. Přenastavení proběhlo tak, že byl panel odtížen a byla odečtena zbytková deformace – tedy průhyb nezatiženého panelu, který byl oslaben trhlinami a ovlivněn případným plastickým přetvořením. Následně byly potenciometry přenastaveny a probíhal druhý cyklus zkoušky. Při vyhodnocení byla zbytková deformace přičtena k dále čteným průhybům. Kdy byl tento postup proveden je viditelné v grafech průběhů zkoušek.

Na obrázku 4 jsou zobrazeny průběhy zkoušek vybraných panelů od jednotlivých typů (ref – referenční panely bez vrstvy UHPC, 30 – panely s 30 ± 0 mm UHPC, 50 – panely s 50 ± 0 mm UHPC).



Obrázek 4: Vybrané průběhy zkoušek.

3.3. Vyhodnocení experimentů

Při všech experimentech došlo ke ztrátě únosnosti panelu rozdrčením betonu za vzniku viditelných trhlin u spodního povrchu panelu.

Na průběhu zkoušky referenčního panelu (Obrázek 4) je zřetelné, že sklon křivky vyjadřující závislost síly a průhybu má poměrně jednotný sklon až do síly 50 kN (odpovídající průhyb cca 20 mm). Od této síly se začíná sklon měnit a začíná docházet k výraznému plastickému přetváření výztuže, takže s malou změnou síly výrazněji roste průhyb. Průhyby referenčních panelů při ztrátě únosnosti se pohybovali okolo 90 mm a maximální přenesené síly byly blízko 65 kN.

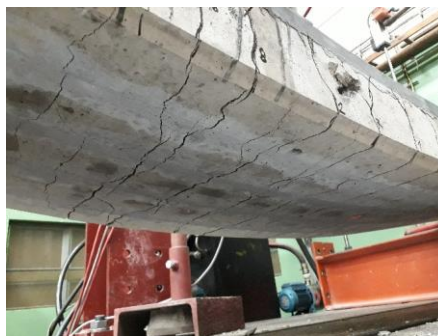


Obrázek 5: Trhliny po zničení referenčního panelu. ([jpg file](#))

Z Obrázku 5 je zřejmé, že panel ztratil únosnost při poměrně malém počtu užších trhlin u spodního povrchu, z čehož je patrné, že došlo k relativně malému poměrnému přetvoření výztuže.

Z průběhu zkoušky u panelu s 30 mm vrstvou UHPC je viditelné, že změna závislosti průhybu na síle proběhla při síle okolo 80 kN (odpovídající průhyb cca 18 mm). Od tohoto

bodů začalo docházet k výraznější plastické deformaci betonářské výztuže. Maximální dosažená síla byla necelých 110 kN a maximální deformace se pohybovala okolo 170 mm.



Obrázek 6: Trhliny po zničení panelu s 30 mm UHPC. ([jpg file](#))

Na Obrázku 6 je názorně vidět hustší síť trhlin větší šířky než u referenčního panelu, z čehož je patrné, že došlo k většímu protažení a využití výztuže při dosažení maximální ohybové únosnosti.

U panelů s 50 mm UHPC je viditelná změna sklonu křivky závislosti průhybu a síly při síle 100 kN (odpovídající průhyb cca 17 mm). Od této zatěžovací síly začala narůstat deformace výrazněji a docházelo tedy k plastickému přetváření betonářské výztuže. Maximální dosažená síla se pohybovala okolo 135 kN a maximální průhyby byly naměřeny okolo 170 mm.

Obrázek 7 ukazuje porušení panelu 50-3 při dosažení únosnosti, ze kterého je patrné, že došlo k rozdrčení betonu při vzniku velké trhliny – tedy při velkém poměrném přetvoření výztuže.



Obrázek 7: Trhliny po zničení panelu s 50-~~m0~~ mm UHPC
([jpg file](#))

Výsledky zkoušek (maximální zatížení a odpovídající ohybové momenty a průměry pro jednotlivé typy panelů) jsou shrnuty v Tabulce 1. Z tabulky je vidět, že únosnosti zesílených panelů jsou si ve všech experimentech velmi podobné a únosnosti se od průměrné hodnoty odlišují maximálně o 1.3 %. Největší rozdíl je u referenčních panelů, kdy se panel ref-2 výrazněji odlišuje od zbylých dvou. I v tomto případě se však jedná o rozdíly v jednotkách procent, takže jsou výsledky poměrně konzistentní.

Tabulka 1: Shrnutí výsledků experimentů.

vzorek	F_{max}	M_{max}	F_{max}	M_{max}
	[kN]	[kNm]	průměr [kN]	průměr [kNm]
ref-1	68.3	29.0		
ref-2	63.5	27.0	67.0	28.5
ref-3	69.3	29.4		
30-1	107.4	45.6		
30-2	108.0	45.9	107.3	45.6
30-3	106.5	45.2		
50-1	137.6	58.5		
50-2	136.7	58.1	136.2	57.9
50-3	134.4	57.1		

Při výpočtu únosnosti je k zatížení od válce nutné připočítat také ohybový moment od vlastní tíhy. Velikost ohybového momentu od vlastní tíhy byla uvažována z průběhu ohybového momentu na prostém nosníku od spojitého zatížení. Jelikož velikost ohybového momentu od vlastní tíhy byla výrazně menší než ohybový moment od zatížení při experimentu, bylo zjednodušeně uvažováno s maximální hodnotou ohybového momentu od vlastní tíhy uprostřed rozpětí nezávisle na

tom, kde došlo ke skutečnému porušení panelu. Celkové ohybové momenty při dosažení únosnosti jsou v Tabulce 2.

Tabulka 2: Celková ohybová únosnost panelů

Panely	$M_{v.tíha}$	$M_{zat.}$	$M_{celk.}$
	[kNm]	[kNm]	[kNm]
ref	1.1	28.5	29.6
30	1.4	45.6	47.0
50	1.6	57.9	59.5

Následně bylo zajímavé sledovat rozdíl poměrů výšek a únosnosti zesílených panelů vůči původním panelům, což je shrnuto v Tabulce 3. Zjednodušeně by se dalo říci, že při použití betonu shodného s původním betonem panelu by ohybová únosnost měla narůst změnou ramena vnitřních sil (tlaková síla v betonu a tahová síla ve výztuži), které je přímo úměrné výšce průřezu. Další zvýšení by nastalo větším využitím betonářské výztuže při uvažování pracovního diagramu se zpevněním. Teoreticky by tak měla únosnost panelu narůst v mírně větším poměru než jeho výška. Z Tabulky 3 je však zřejmé, že ačkoliv při použití 30-~~m0~~ mm UHPC narostla výška panelu o 25 %, tak došlo k navýšení únosnosti o 59 % a pro panely s 50-~~m0~~ mm UHPC vychází zvýšení ohybové únosnosti o 101 % při nárůstu výšky panelu o 42 %. Únosnosti tedy narostly o více než dvojnásobek v porovnání s výškou panelu. Tento jev se dá přičíst tomu, že při použití betonu vyšších pevností dochází ke zmenšení tlačené oblasti v betonu, čímž se také zvětšuje rameno vnitřních sil. Tento vliv je výrazný s ohledem na malou původní výšku panelů a u konstrukcí s vyšší tloušťkou by tento vliv klesal. Dalšími vlivy je větší využití výztuže, které je umožněno použitím betonu vyšších pevností a v neposlední řadě také větší tahová pevnost betonu, která se při zjednodušeném výpočtu ohybové únosnosti zanedbává (použitý UHPC byl vyztužen vláknem, která výrazně zvyšují tahovou únosnost betonu a tento vliv je tedy větší).

Tabulka 3: Porovnání výšky a únosnosti panelů

Poměr	Výška	Únosnost
30/ref	1.25	1.59
50/ref	1.42	2.01

Zjednodušeně se dá říci, že únosnost panelu v tomto případě vzrůstala více než dvojnásobně oproti změně výšky.

4. SROVNÁVACÍ VÝPOČET

4.1. Vstupní data do výpočtu

Výpočet spočíval ve zjištění ohybové únosnosti jednotlivých typů panelů. Ohybová únosnost byla získána z normálových napětí průřezu v plastickém stavu při porušení jednoho z materiálů při nulové výslednici normálové síly průřezu za předpokladu lineárního průběhu přetvoření po výšce průřezu. Vzhledem k uspořádání zkoušky připadají v úvahu dvě možnosti porušení; maximální tlakové poměrné přetvoření

Naformátována tabulka

Naformátována tabulka

Naformátována tabulka

betonu u horního povrchu panelu nebo maximální tahové poměrné přetvoření betonářské výztuže při spodním povrchu. Ve výpočtech bylo vždy rozhodující porušení betonu v tlaku, což koresponduje se zjištěními z experimentů.

Pro výpočet průběhu napětí v betonu byl použitý pracovní diagram z Model Code 2010. K použití MC2010 bylo přistoupeno, jelikož v aktuálně používané normě ČSN EN 1992-1-1 jsou zpracovány vlastnosti (v tomto případě maximální poměrné přetvoření betonu v tlaku) pro betony jen do průměrné pevnosti v tlaku 98 MPa, kdežto MC2010 zahrnuje třídy betonu do průměrné pevnosti betonu v tlaku až do 128 MPa (maximální tlakové napětí je menší než u použitého UHPC, ale jedná se o bližší model). Jako maximální tlaková napětí byly uvažovány získané průměrné válcové pevnosti betonů ze zkoušek. Tahová únosnost betonu byla zanedbána.

Jelikož nebyly ověřeny skutečné vlastnosti betonářské výztuže, byly pro výpočet únosnosti uvažovány charakteristické vlastnosti výztuže B500B dle ČSN EN 1992-1-1 a jako pracovní diagram byl použitý pracovní diagram se zpevněním.

Z výše uvedeného plyne, že při výpočtu bylo poměrné přesně zohledněno chování betonu v tlaku, ale vypočtená únosnost bude podhodnocena zanedbáním betonu v tahu a použitím normově definovaných charakteristických vlastností betonářské výztuže, které jsou méně příznivé než skutečné pevnosti běžné výztuže. Zároveň nebylo analyzováno zatížení rozdílným smršťováním betonu – starší beton panelu brání mladšímu betonu ve smršťování, čímž dochází k vnesení napětí do průřezu. Toto zatížení by však mělo být zanedbatelné proti zatížení aplikovanému při experimentech.

Při výpočtu byl také uvažován „fiktivní“ panel, který byl uvažován celý z betonu původního panelu, byl shodně vyztužený a měl výšku 170 mm, tedy stejně jako panel s 50 mm UHPC.

4.2. Výpočet

V Tabulce 4 jsou vybrané vstupy a parametry výpočtu. Ve všech případech je zřejmé, že došlo k situaci, kdy na mezi únosnosti bylo dosaženo maximálního poměrného přetvoření betonu (-0.35 % pro běžný beton panelu a -0.30 % pro UHPC) a ve výztuži byla stále rezerva (maximální poměrné přetvoření ve výztuži bylo předpokládáno 5 %).

První zásadní rozdíl je vidět ve výšce tlačené oblasti. U referenčních panelů je tato výška přibližně 27.5 mm, kdežto u zesílených je to přibližně jen 10.5 mm. Menší výška tlačené oblasti je dána výrazně větší tlakovou pevností UHPC oproti původnímu betonu, kdy pro vyrovnání síly ve výztuži stačí výrazně menší plocha betonu. Tato změna výšky tlačené oblasti znamená zvětšení ramene vnitřních sil přibližně o dalších 10 mm, což je významná hodnota v porovnání s výškou panelu a tloušťkou vrstvy UHPC.

Další velký rozdíl je v poměrném přetvoření v dodatečně přidávané výztuži. Menší výškou tlačené oblasti je dosaženo výraznějšího gradientu poměrného přetvoření po výšce průřezu než u referenčního panelu. Díky tomuto gradientu je poměrné přetvoření výztuže při dosažení únosnosti větší u panelů s UHPC. Tento jev přináší velkou výhodu s ohledem na duktilitu průřezu a bezpečnost, jelikož by před dosažením únosnosti

došlo k velkým deformacím a bylo by zřejmé, že v konstrukci dochází k poruše.

Tabulka 4: Parametry výpočtu

	Panel			
	ref	30	50	fikt.
Poměrné přetvoření horního povrchu [%]	-0.35	-0.30	-0.30	-0.35
Poměrné přetvoření dolního povrchu [%]	1.17	4.00	4.53	1.55
Výška tlačené oblasti [mm]	27.6	10.5	10.6	31.3
Přetvoření dodatečné výztuže [%]	0.98	3.60	4.10	1.38
Napětí v dodatečné výztuži [MPa]	506	528	532	509.5
Únosnost [kNm]	25.7	43.2	51.6	45.8
Poměr ún. k ref. panelu	1.00	1.68	2.01	1.78

Z porovnání fiktivního panelu s panelem s 50 mm UHPC jsou názorně vidět výhody použití UHPC, jelikož bylo dosaženo ještě o čtvrtinu větší únosnosti oproti původnímu betonu. Zároveň bylo dosaženo většího protažení betonářské výztuže, což zvyšuje bezpečnost konstrukce.

5. POROVNÁNÍ EXPERIMENTU S VÝPOČTEM

V Tabulce 5 jsou porovnány průměrné únosnosti získané z experimentů s únosnostmi vypočtenými v předešlé kapitole. Z výsledků je zřejmé, že mezní únosnosti z experimentů vychází o 9 % - 15 % vyšší než vypočtené hodnoty. Tato nepřesnost je zřejmě dána výše uvedenými vlivy – neznámé vlastnosti betonářské výztuže a zanedbání betonu v tahu. Dalším vlivem je také použitý přibližný model pro výpočet ohybové únosnosti, který předpokládá lineární průběh poměrného přetvoření po výšce průřezu.

Tabulka 5: Porovnání experimentu a výpočtu

Únosnost	Panely		
	ref	30	50
Vypočtená ún. [kNm]	25.70	43.20	51.60
Experiment/výpočet	1.15	1.09	1.15

Jako důležité se ukazuje konzistentnost rozdílu mezi experimentem a výpočtem, tedy že tímto zjednodušeným výpočtem jsou získány výsledky, které jsou podhodnoceny o zhruba 13 % od průměrných hodnot. Dá se tedy říci, že i tento zjednodušený výpočet může sloužit jako podklad k zjištění únosnosti ohybové únosnosti zesíleného panelu.

6. ZÁVĚR

Tento experiment ukazuje přednosti použití UHPC pro zesílení konstrukcí. Díky větší pevnosti betonu bylo možné zvětšit rameno vnitřních sil nejen přidáním výškou, ale také

Naformátována tabulka

Naformátována tabulka

Naformátováno: Odsazení: Vlevo: 0 cm, Předšazení: 0,63 cm

tím, že se zmenšila velikost tlačené oblasti betonu. Další výhodou je výrazně větší poměrné přetvoření betonářské výtzuže což je potvrzeno i většími dosaženými průhyby v plastické části, které vychází z experimentů. Z tohoto plyne, že panely jsou duktilnější a při porušení panelu je dosaženo většího průhybu. Tento jev poskytuje bezpečnost konstrukce – dochází ke zřejmé deformaci, která je varovným signálem před kolapsem konstrukce.

Během experimentů se ukázalo, že k porušení panelů docházelo skutečně ohybovými účinky a nedocházelo k žádné delaminaci mezi vrstvami odlišných betonů. Tímto se potvrdilo, že UHPC má velmi dobrou soudržnost s původním betonem i bez použití speciálních přípravků.

Výsledky ohybových zkoušek byly porovnány s jednoduchým výpočtem ohybové únosnosti železobetonového průřezu a výpočet se ve všech případech ukázal jako podhodnocený o 9 % - 15 %. Jelikož byl trend rozdílu mezi výpočtem a výsledkem experimentu stabilní, tak se dá říci, že výpočet je dostatečně výstižný změny únosnosti zesíleného panelu.

Následně budou v rámci projektu provedeny nelineární výpočty, které budou mít za úkol simulovat průběhy experimentů pro získání detailnějšího vhledu do chování panelů.

PODĚKOVÁNÍ

Experimenty byly provedeny za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci projektu ev. č. FV20472 „Aplikace vysokohodnotných cementových kompozitů na rekonstrukce betonových staveb.“

References

- [Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. \(2011\). ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavy, ed. 2. Československý ústav pro normalizaci. Praha.](#)
- [FIB Fédération Internationale du Béton. \(2013\). fib Model Code for Concrete Structures 2010. Berlin: Ernst & Sohn.](#)
- [Model Code for Concrete Structures 2010. fib, 2013](#)