

ZESILOVÁNÍ DESKOVÝCH KONSTRUKCÍ POMOCÍ UHPC

Lukáš Boháček, *

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

ABSTRAKT

Použití ultravysokohodnotných betonů je stále častější, a také možnosti využití jsou rozmanitější. Nejčastěji se používají pro nové, prefabrikované konstrukce, ale UHPC je možné použít i pro rekonstrukce. Často je UHPC vhodným materiálem a může být variantou, která významně prodlouží životnost konstrukce.

Tento článek se zabývá zejména experimenty, které analyzovaly vhodnost použití UHPC pro zesílení deskových konstrukcí v protlačení. Zároveň také shrnuje již dříve prezentované výsledky experimentů zaměřených na ohýbané konstrukce.

V článku jsou shrnuty základní poznatky a doporučení pro použití UHPC na zesílení zejména deskových konstrukcí. Na základě provedených experimentů se ukazuje, že UHPC je pro tento způsob zesílení vhodný materiál, ale je třeba jej používat jen v případech, kdy je skutečně přínosem.

KLÍČOVÁ SLOVA

UHPC • protlačení • beton • zesílení • ohyb

ABSTRACT

Using of ultra-high performance concretes is still growing with many variations of applications. The most often, UHPC is used for new precast structural elements. However, UHPC is also suitable for strengthening of existing structures. It can be frequently a suitable option for reconstructions and it can significantly extend a service life of a structure.

This paper mainly deals with experiments focused on punching of concrete element and suitability of UHPC for increasing bearing capacity of the elements. There are also summarized experiments on bending. These experiments were presented before.

The elementary findings and recommendations for strengthening of slab structures using UHPC are summarised. Based on the experiments, UHPC is suitable material for strengthening, but it should be used only there, where its advantages can be efficiently used.

KEYWORDS

UHPC • punching • concrete • strengthening • bending

1. ÚVOD

Protlačení je jeden ze základních způsobů porušení deskové konstrukce. Ve své podstatě se jedná o porušení smykovým namáháním v místě koncentrovaného zatížení. K protlačení tedy může dojít jak v místě podepření (zejména lokálního, např. sloup), tak například v blízkosti svislého lokálního břemene.

Níže prezentované experimenty jsou součástí rozsáhlého experimentálního programu na zesilování betonových konstrukcí pomocí UHPC. Způsob zesilování konstrukcí pomocí UHPC je v tomto případě vybetonování tenké vrstvy UHPC na stávající deskovou betonovou konstrukci v její ploše. Tato vrstva UHPC může být aplikována buď na úroveň stávajícího betonu (po opracování), nebo může být např. nahrazena odfrézovaná část původního betonu. Maximální nahrazení stávajícího betonu je z hlediska provádění výhodné k nejbližší vrstvě výztuže. Pro co nejsnazší provádění nebylo uvažováno se spřahujícími prvky, a vrstva UHPC byla vybetonována na opracovaný povrch stávajícího betonu. V dřívějších experimentech byl tento způsob dostačující.

UHPC má díky svým vlastnostem (pevnost v tahu, kamenivo s malým průměrem), velmi dobrou přilnavost a soudržnost s povrchem, ke kterému je přibetonováno. Soudržnost s běžným betonem bývá lepší, než tahová pevnost původního betonu a dochází k odtržení v původním betonu.

Zkoušeny byly prvky vyrobené přímo pro tyto experimenty. Tyto vzorky byly navrženy s ohledem na okrajové podmínky (možnosti laboratoře, komplikovanost výroby a zkoušení atd.)

Dále jsou v článku shrnuty již dříve provedené a prezentované experimenty prováděné na ohýbaných prvcích. Tím jsou prakticky shrnuty základní způsoby porušení deskových konstrukcí (ohyb a protlačení) a přínos UHPC pro zesílení deskových konstrukcí. Na základě všech těchto experimentů jsou tedy uvedeny základní zjištění a doporučení pro zesílení konstrukcí pomocí UHPC.

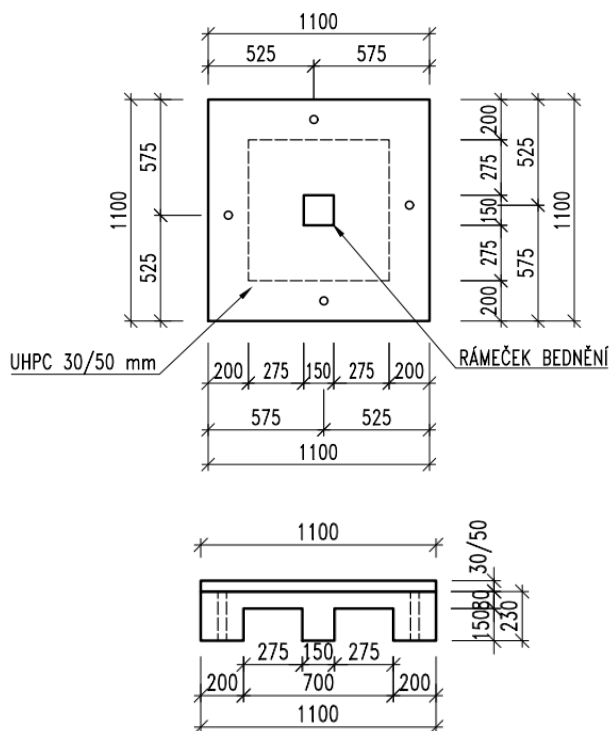
* Školitel: prof. Ing. Jan L. Vitek, CSc., FEng

2. EXPERIMENTY - PROTlačENÍ

2.1. Popis experimentů

Samotné experimenty byly poměrně limitovány laboratorními podmínkami. Únosnost běžné železobetonové desky v protlačení je poměrně vysoká, tudíž bylo nutné zvolit menší rozměry vzorků. Byly navrženy vzorky o tloušťce desky 80 mm s jednou úrovní výztuže (výztuž uložena ve dvou na sebe kolmých směrech). Světlé rozpětí této desky bylo 0.7 m a po jejích okrajích byl ztužující rám, aby byla nahrazena tuhost navazující desky ve skutečné konstrukci (Obrázek 1). Uprostřed desky byl vybetonovaný sloupek 150 x 150 mm, který reprezentuje sloup podpírající desku v konstrukci. U prvků zesílených UHPC byl ve vrstvě nabetonávky vynechaný prostor, jelikož by zde byl navazující sloup. Desková část vzorku byla vyztužená sítí 10/100 – 10/100. Ve středních částech byla doplněna prutová výztuž, aby nedošlo k porušení v ohybu.

Původní vzorky byly provedeny z betonu běžné pevnosti. Charakteristická krychelná pevnost byla 34.3 MPa, což splňuje požadavky pro třídu betonu C30/37. Použitá výztuž byla třídy B500B. Pevnost použitého UHPC v tlaku se pohybovala okolo 140 MPa, pevnost v prostém tahu byla přibližně 4.9 MPa. Bylo použito UHPC s ocelovou rozptýlenou výztuží.



Obrázek 1: Schéma zkušebního vzorku

Vzorek byl kotvený čtveřicí předpínacích tyčí ve středech hran, které vedly chráničkami připravenými ve ztužujícím rámu. Zatížení probíhalo pomocí hydraulického lisu, který tlačil na vybetonovaný sloupek (Obrázek 2). Experimenty byly řízeny deformací, tudíž je zřejmá i větev s poklesem zatížení. Byla měřena svislá deformace uprostřed rozpětí vzorku.

Byly vyzkoušeny tři typy vzorků – referenční vzorky bez zesílení, vzorky s 30 mm UHPC a vzorky s 50 mm UHPC a svařovanou sítí (10/100 – 10/100). Od každého typu vzorku byly vyzkoušeny tři vzorky.

Experimenty byly ukončeny až po poklesu z maximální únosnosti vzorků a při viditelných poškozeních. Po dokončení experimentů byly vzorky rozříznuty podélně, aby bylo názorně viditelné, k jakému došlo poškození.



Obrázek 2: Zkouška v laboratoři

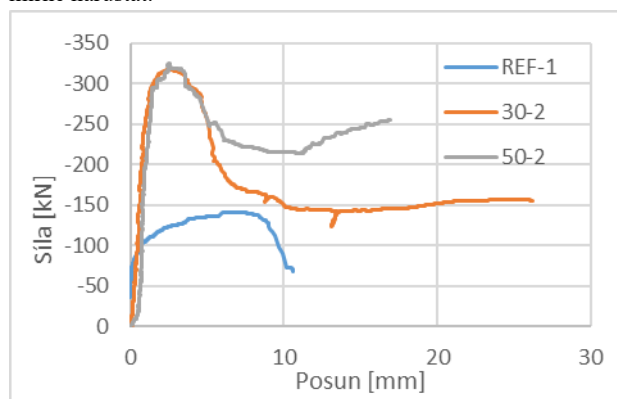
3. VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ - PROTlačENÍ

V Tabulce 1 jsou uvedeny číselné výsledky experimentů. Je zřejmé, že maximální únosnost referenčních vzorků je menší, než u zesílených vzorků. Průměrná únosnost nezesílených vzorků je 146.5 kN a výsledky jsou velmi konzistentní, jelikož variační koeficient je velmi malý – 4.2 %. Vzorky zesílené 30 mm UHPC mají únosnost prakticky dvojnásobnou – 307.2 kN. Variační koeficient je 5.4 %, tudíž jsou výsledky také velmi konzistentní. U vzorků s 50 mm UHPC došlo k problému u vzorku 50-3. Vzorek byl chybě uchycen, jelikož byl moc sepnutý a nedošlo tedy k delaminaci jako u ostatních vzorků. Tento vzorek byl tedy vyřazen z dalších výsledků. Vzorky zesílené 50 mm UHPC mají průměrnou únosnost 327 kN. Z provedených experimentů se zdá, že zesílení zvýšilo únosnost prvků, nicméně není velký rozdíl mezi prvky s 30 mm UHPC a 50 mm UHPC.

Tabulka 1: Souhrn výsledků experimentů

Vzorek	max [kN]	max,prům [kN]	max,σ [kN]	Variační k [%]
REF-1	141.75			
REF-2	142.51	146.48	6.16	4.2
REF-3	155.19			
30-1	320.55			
30-2	317.24	307.17	16.63	5.4
30-3	283.72			
50-1	329.30	327.11	2.19	0.0
50-2	324.91			
50-3	473.44	-	-	-

Průběh experimentů je zobrazen na obrázku 3. U referenčního prvku je zřejmé, že má nejmenší únosnost a to necelých 150 kN. Zároveň je ale vidět, že tato únosnost je na poměrně velkém rozmezí deformace a dá se říct, že vzorek má poměrně dobré plastické chování. Zkoušky prvků zesílených pomocí UHPC (30-2 a 50-1) mají velmi podobný průběh. Dochází k poměrně velkému nárůstu síly při malé deformaci, ale poté poměrně rychle síla klesá, tedy prvek ztratil únosnost. Maximální síla pro oba zesílené prvky je cca 320-330 kN. U prvků s 30 mm UHPC dojde k poklesu síly na hodnotu cca 150 kN, a poté se síla zásadně nemění, což je důsledek delaminace a ztráty efektu zesílení. U prvků s 50 mm došlo k poklesu na hodnotu cca 200 kN, následně síla začala opět mírně narůstat.

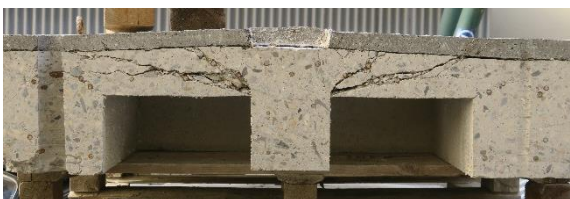


Obrázek 3: Průběh experimentů vybraných prvků

Na obrázcích 4, 5 a 6 jsou zobrazeny podélně rozříznuté prvky. U referenčního vzorku je názorná trhlinka, která odpovídá poškození v protlačení. Jedná se o smykovou trhlinku vedoucí od sloupku šikmo, směrem k hornímu povrchu. U prvků zesílených pomocí UHPC (v obou případech) je však zřejmé větší množství trhlin v různých sklonech. Zároveň je u prvků s UHPC zřejmá delaminace v úrovni rozhraní mezi původním betonem a UHPC.



Obrázek 4: Referenční vzorek po experimentu



Obrázek 5: Zesílený vzorek po exp. (30 mm UHPC)



Obrázek 6: Zesílený vzorek po exp. (50 mm UHPC)

4. DISKUZE VÝSLEDKŮ - PROTlačENÍ

Z obrázku 4 je vidět, že došlo k jednoznačnému porušení protlačení. Sklon trhliny se pohybuje mezi 1:3 a 1:1. Z obrázků 5 a 6 je evidentní, že došlo k delaminaci mezi původním betonem a UHPC. Je možné, že při větší kontaktní ploše (tedy větším prvku) by k delaminaci nedošlo, nicméně to nyní nelze jednoznačně říci a nelze na to spoléhat. Z porovnání poškození referenčního vzorku a původního betonu zesíleného vzorku je zřejmé, že u zesílených vzorků vzniklo více trhlin v různých sklonech. Dá se předpokládat, že to je dáno stavem, kdy původní beton je již poškozen, došlo k delaminaci a začíná se zatlačovat protlačena část do UHPC. UHPC se začíná prohýbat a dochází k postupnému odlamování krajních částí původního betonu.

Z výsledků (Tabulka 1) je patrné, že maximální únosnost zesílených prvků byla prakticky shodná bez ohledu na tloušťku vrstvy. Jelikož je zřejmé, že došlo k delaminaci stávajícího betonu a UHPC je pravděpodobné, že síla 300-330 kN je hodnota, při které právě dochází k delaminaci mezi materiály, a proto se shoduje u obou způsobů zesílení.

Obrázek 3 ukazuje rozdíly v chování mezi referenčním vzorkem a zesílenými vzorky. Referenční vzorek má poměrně rychlý nárůst síly, pak ale dojde k chování, kdy je porušen beton a začíná se plasticky přetvářet výztuž, a následně dochází k velmi malému nárůstu síly s rostoucí deformací.

Zesílené vzorky vykazují také velmi rychlý nárůst síly, nicméně po dosažení nejvyšší hodnoty zatížení dochází k rychlejšímu poklesu síly. To znamená, že zesílené prvky vykazují menší plastické chování. Pokles se sice zastaví na hodnotě 150 kN pro vzorky s 30 mm UHPC, resp. 215 kN pro vzorky s 50 mm UHPC, toto chování je ale dané zřejmě uspořádáním experimentů.

Z fotografií zničených prvků lze soudit, že po protlačení původního betonu došlo k namáhání pouze UHPC. V tomto případě již docházelo ke kombinaci protlačení a ohybu nabetonávky. UHPC bylo stále uchyceno na 4 místech, jeho únosnost na takto malé rozpětí je poměrně velká a kotevní tyče byly poměrně blízko na to, aby došlo ke skutečnému protlačení.

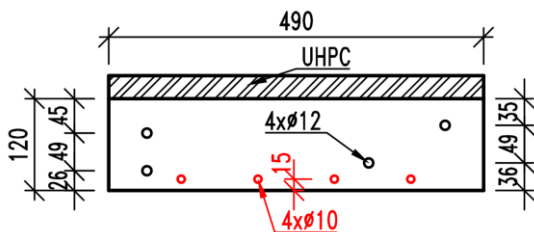
5. OHÝBANÉ PRVKY

V dřívějších letech byly již provedeny a zpracovány experimenty pro ověření zvýšené únosnosti ohýbaných prvků zesílených pomocí UHPC (Vítek et al, 2020). Bylo ověřeno zesílení v tlacené i tažené oblasti. Způsob zesílení byl shodný se vzorky zatíženými protlačení – nevztyžená vrstva 30 mm UHPC a vrstva UHPC tloušťky 50 mm se svařovanou sítí.

5.1. Zesílení pomocí UHPC v tlačené oblasti

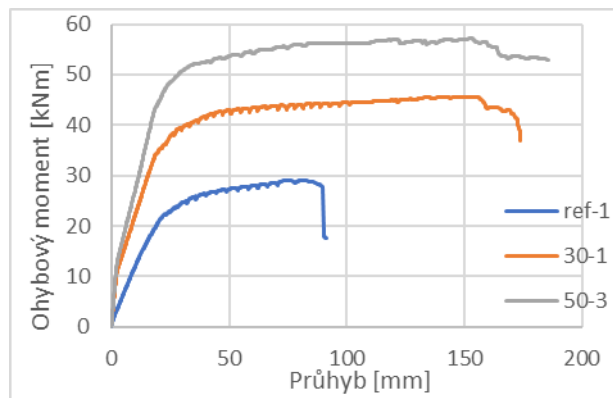
Zesílení použitím UHPC v tlačené oblasti je poměrně ideální způsob, jelikož UHPC má velmi vysokou pevnost v tlaku. Experimenty byly prováděny pomocí čtyřbodového ohybu.

Na obrázku 7 je schéma příčného řezu zkoušených prvků. Je zřejmé, že původní prvky byly poměrně nízké a procentuální zvýšení únosnosti panelu je dáno i značným navýšením výšky. Pro tyto experimenty byly provedeny výpočty, které prokázaly, že se průřez chová dle očekávání. Důležité také bylo, že nedošlo k delaminaci mezi betonem a UHPC i bez použitých sřpahujících prvků.



Obrázek 7: Ohýbané prvky s UHPC v tlaku – schéma

Na obrázku 8 jsou zřejmé průběhy zkoušek, a to ohybový moment v závislosti na průhybu. Tvary křivek prakticky odpovídají běžnému ohýbanému železobetonovému prvku. Je zřejmé, že zvýšení únosnosti bylo výrazné, a to o cca 60 % v případě zesílení 30 mm UHPC a o 100 % v případě zesílení pomocí 50 mm UHPC a svařované sítě. V tomto případě však byla zásadní tlaková pevnost UHPC a přínos výztuže je zanedbatelný. Zesílené prvky byly dostatečně duktilní.



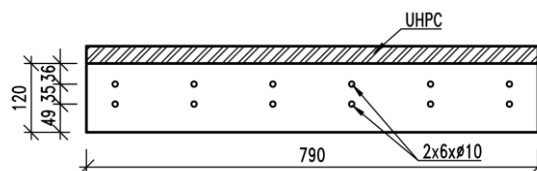
Obrázek 8: Ohýbané prvky s UHPC v tlaku – průběh

Zároveň byl proveden výpočet fiktivního průřezu zesíleného pomocí běžného betonu tloušťky 50 mm. Pro běžný beton je tloušťka 50 mm prakticky nepoužitelná, jelikož není možné použít běžnou betonářskou výztuž. V praxi by byla použita větší tloušťka, alespoň 70 mm. Pomocí výpočtu bylo zjištěno, že únosnost takového průřezu by byla cca 45.8 kNm. Hodnota při zesílení pomocí UHPC je 51.6 kNm, což je 13 % více. Avšak přetížení konstrukce při použití UHPC je menší.

5.2. Zesílení pomocí UHPC v tažené oblasti

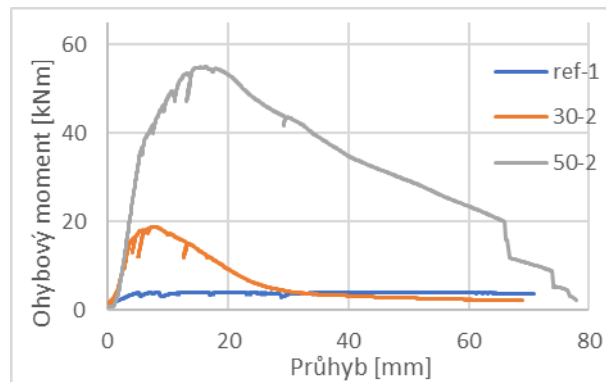
UHPC v tažené oblasti je možné použít, díky tahové pevnosti tohoto materiálu, i bez betonářské výztuže. To je významná výhoda oproti běžnému betonu. Na obrázku 9 je schématický příčný řez zesíleného panelu. Jak je zřejmé, tak výška původního panelu byla 120 mm, tudíž vliv výšky průřezu na zesílení je opět významný.

Původní zesílené prvky nebyly původně navrženy na ohybové namáhání, čemuž odpovídalo i množství výztuže. Navíc, skutečné polohy betonářské výztuže byly různé. Tudíž, jak je zřejmé na obrázku 10, únosnost nezesílených vzorků se pohybovala okolo hodnoty 5 kNm. Zesílením pomocí 30 mm UHPC byla průměrná únosnost zvýšena na 20 kNm, což je únosnost prakticky čtyřnásobná oproti referenčním vzorkům. Při použití 50 mm UHPC s výztuží byla únosnost zvýšena až na hodnotu 57 kNm.



Obrázek 9: Ohýbané prvky s UHPC v tahu – schéma

Nevýhodou zesílení pomocí 30 mm UHPC je poměrně malá duktilita prvku, tudíž poměrně rychlý pokles na hodnotu únosnosti nezesíleného panelu. U prvku s 50 mm UHPC, díky výztužné síti, byla únosnost i po dosažení maximální hodnoty stále velmi vysoká a pokles byl pomalejší.



Obrázek 10: Ohýbané prvky s UHPC v tahu – průběh

6. SHRNUTÍ A DOPORUČENÍ

Na základě provedených experimentů se dá poměrně jednoznačně říci, že zesílení deskové konstrukce pomocí UHPC je proveditelné. Toto zesílení zvyšuje únosnost v nejběžnějších způsobech porušení deskové konstrukce – ohyb a protlačení. Výhodou tohoto zesílení je také poměrně jednoduchá aplikace – vybetonování vrstvy UHPC na původní beton se základním opracováním (např. tryskání vodním paprskem). Například není nutné žádné plošné přidávání betonářské výztuže. V určitých případech se aplikace obejde kompletně bez betonářské výztuže.

Oproti podobnému způsobu zesílení běžným betonem má UHPC jednoznačnou výhodu v malé tloušťce přibetonávky. UHPC může být vybetonováno i v tenké vrstvě, například 30 mm. Již takto tenká vrstva zvýší únosnost ve všech případech porušení. Při použití běžného betonu by bylo nutné přibetonávku vyztužit. S uvažováním krycí vrstvy alespoň 35 mm při horním povrchu by tloušťka přibetonávky byla minimálně 70 mm. Tato vrstva znamená výrazné přetížení konstrukce a také zmenšení volného prostoru místnosti.

Z hlediska praktického použití technologie zesílení je důležité znát rozhodující způsoby namáhání konstrukce. V případě, že rozhodují kladné ohybové momenty uprostřed rozpětí, nabízí se jednoznačně varianta provedení tenké nabetonávky 30 mm UHPC. V případě, že rozhodují záporné momenty nad podporami, záleží jak velké zvýšení únosnosti je nutné.

V případě nutnosti menšího zvýšení únosnosti je možné použít také pouze tenkou vrstvu UHPC. V případě vyšších požadavků na zvýšení únosnosti je vhodné použít vrstvu UHPC větší tloušťky a betonářskou výztuž. Nejjednodušší je provést v celé ploše vrstvu 50 mm UHPC s výztuží, ale ne vždy je to nejefektivnější varianta. Je totiž také možné provést ve většině plochy pouze 30 mm UHPC a v potřebných místech 50 mm UHPC s výztuží. To je možné provést například frézováním části krycí vrstvy původního betonu a nahradit tento prostor UHPC. Případně, při provádění skladby podlahy, provést více úrovní UHPC a rozdíl vyrovnat například v izolaci.

V případě staticky neurčitých konstrukcí je také možné uvažovat s redistribucí sil v konstrukci. Pokud je nedostačující únosnost nad podporou, je možné počítat se vznikem plastického kloubu a přerozdělením ohybových momentů do středu rozpětí, které jsou zesílené pomocí UHPC.

Nejsložitější je situace v případě, kdy rozhoduje protlačení. Jak bylo ověřeno, zesílení pomocí UHPC zvyšuje i únosnost v protlačení, ale může zde být problém s delaminací materiálu. Do určité míry je možné počítat se soudržností mezi UHPC a stávajícím betonem, pro větší navýšení únosnosti v protlačení je však lepší provést sprážením stávajícího betonu a UHPC. Toto lze provést například betonářskou výztuží, kotevními trny, nebo kotvami. Použití je závislé zejména na tloušťce stávající desky. V případě malé tloušťky by bylo vhodné provést vrty skrz celou tloušťku desky a použít například závitové tyče s rozšířením pomocí matic na jejich koncích. V případě dostatečné tloušťky a množství výztuže na protlačení původního prvku by bylo možné použít chemické kotvení. Provést tedy vrty pouze do potřebné hloubky a použít kotevní prvky s rozšířením na konci kotveném v UHPC. V případě použití takových prvků by však bylo pravděpodobně nutné provést vrstvu UHPC větší tloušťky, s použitím výztuže. Tato vrstva však nemusí být aplikovaná v celé ploše, viz předešlé odstavce.

V případě zesílení za použití kotevních prvků je tato výztuž potřebná uvnitř tzv. základního kontrolovaného obvodu, ale také za tímto obvodem. Prvky uvnitř tohoto obvodu zvyšují únosnost v protlačení. Prvky, které jsou za tímto obvodem, jsou důležité pro zamezení delamanice mezi stávajícím betonem a UHPC. Je tedy nutné, aby tyto prvky přenesly sílu shodnou s reakcí desky do podpory.

7. ZÁVĚR

Zesilování deskových konstrukcí pomocí UHPC se ukazuje jako velmi vhodná možnost, která skýtá mnoho výhod (významný nárůst pevnosti při malé spotřebě materiálu), ale zároveň má i své nevýhody (vyšší cena, technologická náročnost) a nároky na provádění (opracování povrchu, případné kotvení). Při použití tenkých vrstev UHPC je možné dosáhnout významného zvýšení únosnosti při poměrně malém přetížení konstrukce. Zásadní vlastnosti UHPC pro toto využití jsou; možnost aplikace v tenkých vrstvách, vysoká pevnost v tlaku, pevnost v tahu a soudržnost k materiálu.

S uvažováním narůstajících nároků na ekologii veškerého průmyslu, tedy i stavebnictví, je velmi pravděpodobné, že zesilování a rekonstrukce konstrukcí bude stále častější. A při návrhu rekonstrukce je vhodné zvážit možnost použití UHPC.

PODĚKOVÁNÍ

Experimenty byly provedeny za podpory Ministerstva průmyslu a obchodu v rámci projektu ev. č. FV20472 „Aplikace vysokohodnotných cementových kompozitů na rekonstrukce betonových staveb. Zkušební vzorky byly vyrobeny za spolupráce společností Metrostav a.s. a TBG Metrostav s.r.o. Experimenty byly provedeny v Kloknerově ústavu ČVUT.

Reference

Vítek, J. L., Boháček, L., Coufal, R. & Čítek D. (2020), Zesilování betonových konstrukcí pomocí UHPC – experimentální ověřování, in ‘Sborník 27. Betonářské dny’, pp. 231-239

Zohrevand, P. et al. (2015), Punching Shear Enhancement of Flat Slabs with Partial Use of Ultrahigh-Performance Concrete, in ‘Journal of Materials in Civil Engineering’, 27(9)

De Sousa, A.M.D et al. (2021). Behavior and punching capacity of flat slabs with the rational use of UHPFRC: LNFEA and analytical predictions in ‘Engineering Structures’, 244