

KOTEVNÍ OBLASTI V KONSTRUKCÍCH Z MATERIÁLU UHPFRC A EXPERIMENTÁLNÍ ZJIŠTĚNÍ ÚNOSNOSTI

Jan Prchal¹

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
jan.prchal.1@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Článek je věnován problematice kotvení v prvcích z materiálu Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). V úvodu je představen systém prefabrikovaných prvků, na kterých byla provedena série experimentů za účelem ověření únosnosti kotvení. Průběh zkoušení a dosažené výsledky jsou detailně dokumentovány. Dále je poukázáno na platné předpisy pro navrhování kotvení v běžném betonu, které však nejsou smysluplně použitelné pro návrh kotvení v betonech vyšších pevností.

V textu je dále nastíněn postup výzkumu, při kterém budou analyzovány parametry, které ovlivňují návrh a výsledné vlastnosti kotvení v prvcích z UHPFRC. Výsledkem této snahy by měla být úprava návrhového postupu pro betony vyšších pevností.

KLÍČOVÁ SLOVA

UHPFRC • Kotvení • Manipulace • Prefabrikáty • Zkoušení

ABSTRACT

This paper focuses on field of fastenings for use in members made of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). The system of precast elements and program of testing of load bearing capacity of fastening is described. The testing process and results are documented in detail. Standards for design of fastening for use in ordinary concrete is also discussed.

The object of following part is to described future research on fastening for use in UHPFRC. Study of parameters influencing load bearing capacity is a major part of future work. The results of research should be a modification of the design and assessment procedure of fastenings for high-strength concretes.

KEYWORDS

UHPFRC • Fastening • Manipulation • Precast elements • Testing

1. ÚVOD

1.1. Materiál UHPC

Ultra-vysokohodnotný beton (Ultra-High Performance Concrete neboli UHPC²) je moderní materiál na cementové bázi a na jeho výzkumu pracuje více než 30 let velké množství odborných pracovišť napříč celým světem. Díky svým vlastnostem, jakými jsou vysoké pevnosti, vynikající odolnost proti působení agresivních látek a minimální nasákavost, nachází neustále nová uplatnění v různých odvětvích stavebnictví i mimo něj.

Vývoj UHPC během posledních dekád značně pokročil. Z takřka laboratorního prostředí se materiál začal postupně rozšiřovat a uplatňovat přes drobnější aplikace o objemech desítek litrů materiálu až k použití ve větším měřítku s objemy v řádu desítek kubických metrů. Vzhledem k množství jednotlivých složek zastoupených ve směsi, nutnosti velmi přesného dávkování těchto složek a kázni, jež je nezbytná při ukládání a následném ošetřování UHPC, se výroba do značné míry odlišuje od produkce jiných, běžnějších betonů. Není proto divu, že současným trendem je výrobu UHPC a konstrukcí z něho realizovat v podmínkách alespoň částečně se blížících laboratornímu prostředí – výrobnách prefabrikátů.

1.2. Kotevní oblasti v UHPC

Poměrně rozsáhlá problematika, jakou je kotvení v betonových konstrukcích všeobecně, je v této práci zúžena a zasazena do kontextu prefabrikace prvků z UHPC. Při navrhování, výrobě i montáži betonových prefabrikátů jsou kotevní prvky až na výjimky neodmyslitelnou součástí betonových dílců. Využití kotevních prostředků je od první manipulace s dílcem (zpravidla při zvedání z formy) přes přepravu, montáž, vzájemné spojení více dílců až po kotvení dalších součástí konstrukce. Pro prefabrikované konstrukční prvky z UHPC jsou využívány kotevní prostředky zpravidla předem instalované do formy a následně zabetonované.

S ohledem na mechanické vlastnosti UHPC a na skutečnost, že většina aplikací UHPC je řešena s využitím prefabri-

¹ Školitel: doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEng.

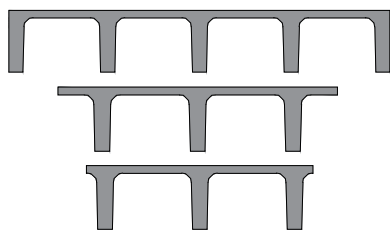
² UHPC se pro účely tohoto textu rozumí zároveň také vyztužená varianta matrice označovaná též jako Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC).

kace, je možné a také žádoucí navrhovat prvky štíhlé a vylehčené. Poněkud protichůdné požadavky plynou při návrhu kotevních či manipulačních prostředků z norem a technických podkladů výrobců těchto prostředků, které jsou zpravidla vytvořeny pro betony běžných pevností. Současně neexistují žádné platné předpisy pro navrhování kotvení do betonu vyšších pevností. Návrh prostředků při současném dodržení dostupných konstrukčních zásad by do jisté míry znamenal popření výhod, které UHPC přináší, a vzniklá řešení by se stala nekonkurenceschopnými. Na základě toho se autor domnívá, že zkoumáním a přesnějším popisem chování kotevních prvků v materiálu UHPC lze vyplnit pomyslnou mezeru a posunout hranice navrhování a provádění konstrukcí z UHPC.

Dodatečné kotvení v materiálu UHPC není z různých důvodů v praxi příliš využíváno a není tak ani předmětem této práce. Součástí výzkumu není ani problematika kotvení výztuže (betonářské či předpínací) do betonu a k tomuto příbuzná témata, byť je tu možné nalézt řadu společných aspektů.

2. STUDIE

V rámci vývoje inovativního systému prefabrikovaných prvků pro konstrukce lávek a mostů využívajících materiálu UHPC bylo navrženo několik typů kotevních přípravků, které jsou využívány pro manipulaci s prefabrikátem, a to jak při výrobě, tak při montáži, a zároveň obecně ke kotvení do prefabrikátu z UHPC. Systém lávek je tvořen nosíkovými předem předpjatými prvky, které jsou složeny z tenké desky (zpravidla bez konvenční betonářské výztuže), kterou ztužují podélná žebra, ve kterých je vedena předpínací výztuž. Prvky jsou vyráběny z materiálu UHPC vyztuženého ocelovými vlákny. Prefabrikáty lze vyrábět do celkové délky 20 metrů a s maximální výškou 500 mm. Varianty příčných řezů a s nimi souvisejících okrajů předmětných prefabrikátů jsou patrna z obrázku (Obrázek 1).

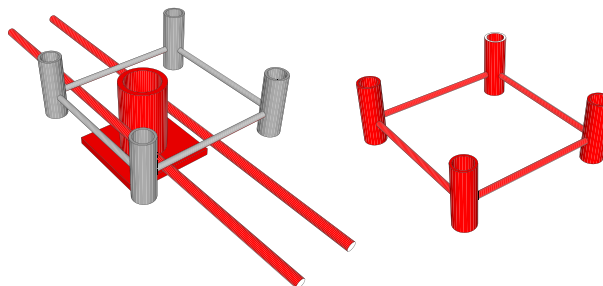


Obrázek 1: Provedení příčného řezu prefabrikovaných nosníků z UHPC

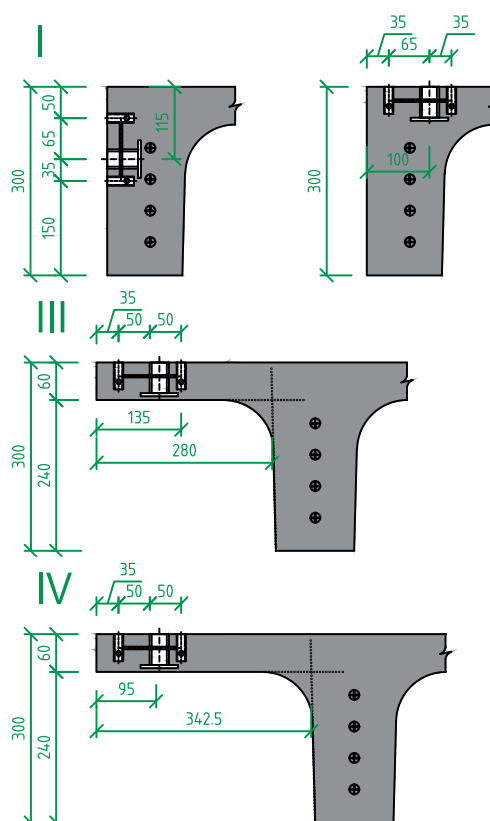
2.1. Návrh kotevních přípravků

Byly navrženy kotevní přípravky dvojího typu. Jsou tvořeny komerčně vyráběnými závitovými pouzdry a kotvami, které jsou vhodně svařeny a vzájemně spojeny ocelovými prvky, blíže na vizualizaci (Obrázek 2). Přípravky jsou instalovány na povrch betonu v různých částech prefabrikátů. Kotevní oblasti se zpravidla liší jednak tloušťkou betonu pod kotevním přípravkem, zá-

roveň polohou přípravku vzhledem k okrajům prefabrikátu. Přehled kotevních oblastí podle provedení příčného řezu konstrukce lávky je patrný z obrázku (Obrázek 3).



Obrázek 2: Kotevní přípravky; X – vlevo, Y – vpravo³



Obrázek 3: Umístění kotevních prostředků v rámci příčného řezu variantního provedení

2.2. Předběžné posouzení

Jak bylo naznačeno již v úvodní části 1.2, v současnosti není v platnosti žádný předpis, který by upravoval návrh kotevních prostředků v UHPC. Za účelem předběžného a ryze informativního posouzení kotevních oblastí byla využita platná norma EN 1992-4, která je mimo jiné určena pro navrhování předem zabetonovaných kotevních prvků. Tabulka 1 zobrazuje přehled možných způsobů porušení kotevních oblastí. Jednotlivé módy jsou











³ Závit, za které je prováděna manipulace, jsou označeny červeně.

charakterizovány svou únosností a v procesu početního ověřování představují dílčí posudek. Pro kotevní oblast je poté celková únosnost určena jako minimum z hodnot pro daný způsob namáhání, tj. tah, nebo tlak. V případě namáhání kotvy kombinací tahu a smyku lze využít vztahu:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{Rd,i}}\right)^a + \left(\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,i}}\right)^a \leq 1 \quad (1)$$

kde N_{Ed} a V_{Ed} jsou návrhové účinky zatížení, $N_{Rd,i}$ a $V_{Rd,i}$ jsou rozhodující únosnosti kotev a a je součinitel.⁴

Tabulka 1: Módy porušení kotevních oblastí podle EN 1992-4

Č.	Způsob porušení	Ozn.	Schéma
TAH			
1.	Porušení ocelové kotvy	$N_{Rk,s}$	
2.	Vytržení kuželu betonu	$N_{Rk,c}$	
3.	Vytržení kotvy	$N_{Rk,p}$	
4.	Kombinované porušení (2 a 3)	$N_{Rk,p}$	
5.	Porušení betonového prvku	$N_{Rk,sp}$	
6.	Vylomení betonu	$N_{Rk,cb}$	
SMYK			
1.	Ustříhnutí ocelové kotvy	$V_{Rk,s}$	
2.	Porušení ocelové kotvy (síla na rameni)	$V_{Rk,s,M}$	
3.	Vylomení betonu	$V_{Rk,cp}$	
4.	Porušení okraje betonu	$V_{Rk,c}$	
TAH A SMYK			
1.	Porušení pomocné výztuže	$N_{Rk,re}$	-
2.	Ztráta soudržnosti výztuže	$N_{Rk,a}$	-

Norma EN 1992-4 má jistá omezení; například dovoluje při výpočtu využít maximálně pevnost betonu v tlaku o velikosti $f_{ck} = 60 \text{ MPa}$ i v případě, že by použitý beton náležel do vyšší pevnostní třídy. Lze předpokládat, že právě významně vyšší pevnost UHPC v tlaku (kolem 150 MPa) a také jeho tahová pevnost bude hrát v únosnosti kotvení klíčovou roli. Při výpočtu únosnosti dále nelze započítat přídatnou výztuž orientovanou

⁴ V normě jsou též popsány další způsoby namáhání, jakými je například ohyb nebo kroucení kotevních oblastí složené z více kotevních prostředků.

kolmo na směr zatížení, v tomto případě v rovině desky prefabrikátu. Dle výsledků experimentů uvedených dále tato výztuž redukuje porušení vytržením betonového kuželu.

Tabulka 2 shrnuje spočtené únosnosti jednotlivých kotevních oblastí. Únosnost byla stanovena podle kapitoly 7 normy EN 1992-4 a zahrnuje únosnost kotev v tahu, respektive ve smyku, v závislosti na poloze kotevních oblastí. Vzhledem k rozsahu textu, k velkému množství výpočtů a ke skutečnosti, že výsledky jsou pouze orientační, jsou uvedeny pouze výsledné únosnosti. V tabulce je dále provedeno srovnání s mezním zatížením, které bylo zjištěno experimentálně.

3. EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Cílem zkoušení bylo ověření únosnosti a použitelnosti navržených kotevních prostředků. Tento postup byl zvolen především s ohledem na neexistenci potřebných předpisů pro navrhování UHPC, které by přesněji popisovaly chování kotvení.

3.1. Zkušební vzorky

Za účelem co nejvěrohodnějšího napodobení podmínek při manipulaci s prefabrikáty byly vyrobeny dvě zkušební lávky z materiálu UHPC C110/130 XF4. Lávky se lišily provedením okrajů v příčném řezu. Kotevní přípravky (Obrázek 2) byly zabudovány v různých částech příčného řezu (Obrázek 3) a tímto způsobem bylo vytvořeno celkem 8 různých kotevních oblastí. Stáří vzorků v okamžik zkoušení bylo 3 dny, což je okamžik, ve kterém zpravidla probíhá první manipulace s dílcem při jeho vyjmutí z formy. Spolu se vzorky byla vyrobena také zkušební tělesa, na kterých byly prováděny materiálové zkoušky UHPC.

Oproti skutečné konstrukci nebyly zkušební dílce předepnuty a byly vyztuženy pouze běžnou betonářskou výztuží. Lze se domnívat, že předpětí může mít pozitivní účinky na únosnost kotevních přípravků.

3.2. Zkoušení

Tabulka 2 zpřehledňuje značení zkoušek spolu se schematickým znázorněním kotevních oblastí a typu použitého přípravku. Na každém typu kotvení byly provedeny dvě zkoušky, které jsou odlišeny jako A/B.

Při zkouškách bylo simulováno zatížení při manipulaci s prefabrikátem, přičemž reálné zatížení vychází z vlastní tíhy betonového prvku. Zkoušené vzorky byly zatěžovány do porušení, případně do okamžiku vzniku prvních viditelných trhlin. Všechny prvky byly zatěžovány shodně, a to svislou silou působící kolmo na pochozí povrch konstrukce. Toto zatížení vyvolávalo v kotevních oblastech jednak tahové namáhání (umístění kotev shora v desce), nebo smykové síly (u kotev umístěných z boku v žeburu).⁵

Zatížení bylo vnášeno hydraulickým válcem. Spojení válce a vzorku zajišťovaly pomocné ocelové přípravky, které byly přesně zhotoveny pro každý typ kotevních přípravků zvlášť

⁵ Vzhledem k výrobním odchylkám na straně prefabrikátu a nepřesnostem při vnášení zatížení docházelo v některých případech k páčení šroubů a také k namáhání kotevních oblastí ohybem.

(Obrázek 4). Během zkoušení byl zaznamenáván pohyb válce a síla.

Prvky, na nichž je kotva umístěna ve vykonzolované desce, byly zkoušeny jednak s umožněním průhybu konzoly (zkoušky číslo 13A, 14B, 16A, 17B), a zároveň s fixací bránící průhybu konzoly (zkoušky číslo 16B a 17A).



Obrázek 4: Zkušební přípravky ke spojení válce se vzorkem

3.3. Výsledky zkoušek

Tabulka 2 shrnuje výsledné síly, které byly zaznamenány při porušení jednotlivých kotevních oblastí. Grafickou závislost mezi působící silou a deformací znázorňuje obrázek (Obrázek 10).

Z obrázků (Obrázek 5 až Obrázek 9) lze pozorovat způsoby, jakými došlo k porušení jednotlivých kotevních oblastí. Zkouška č. 3 byla ukončena porušením okraje betonu (Obrázek 5). Při zkoušce č. 5 došlo k porušení vylomením rozšířeného kužele betonu. Pro zkoušky č. 7 a 17A je charakteristické vytržení kotevních prostředků. S ohledem na technické řešení kotev typu Y (Obrázek 2) se zde na vnější straně aktivuje betonový kužel jen v omezené míře a blízký okraj prvku téměř neovlivňuje celkovou únosnost kotvení. Při zkouškách 16A a 17B došlo nejprve k porušení betonové konzoly, jejíž únosnost je značně nižší než únosnost kotvení.

Zkoušení a výsledné síly při porušení jsou určitým způsobem ovlivněny postupem zatěžování. Vzhledem k malým rozměrům zkušebních vzorků a poměrně velkému rozsahu poškození v oblasti porušených kotev je patrné snížení mezní síly pro druhou z prováděných zkoušek, při kterých je část betonu prostoupena množstvím trhlin ze sousední zkoušky. Uvedené je patrné také z tabulky (Tabulka 2), kde je uvedeno pořadí zkoušení.

Mezní síla při druhé provedené zkoušce je zpravidla nižší ze dvou hodnot.

Tabulka 2: Přehled zkoušek s vyznačením kotevních oblastí a typu přípravku

Označení zkoušky		Schéma kotevní oblasti (dle Obrázek 3)	Kotevní přípravek	Předpokládaná únosnost $R_{k,EN,1992-4}$	Pořadí zkoušení	Síla při porušení	vypočtená / skutečná únosnost
-	-		-	kN	-	kN	%
1	A		X	39,97	12	154,11	25,93
1	B		X	39,97	11	162,61	24,58
3	A		Y	17,93	10	137,02	13,09
3	B		Y	17,93	9	146,99	12,20
13	A		X	41,19	13	60,00	68,65
13	B		X	41,19	-	-	-
14	A		Y	15,47	-	-	-
14	B		Y	15,47	14	55,00	28,12
5	A		X	41,19	4	147,91	27,85
5	B		X	41,19	3	151,82	27,13
7	A		Y	15,47	2	111,41	13,88
7	B		Y	15,47	1	103,42	14,96
16	A		X	41,19	8	43,70	94,26
16	B		X	41,19	7	72,99	56,43
17	A		Y	15,47	6	72,99	21,19
17	B		Y	15,47	5	40,00	38,67



Obrázek 5: Detail porušení přípravku Y – zkouška 3

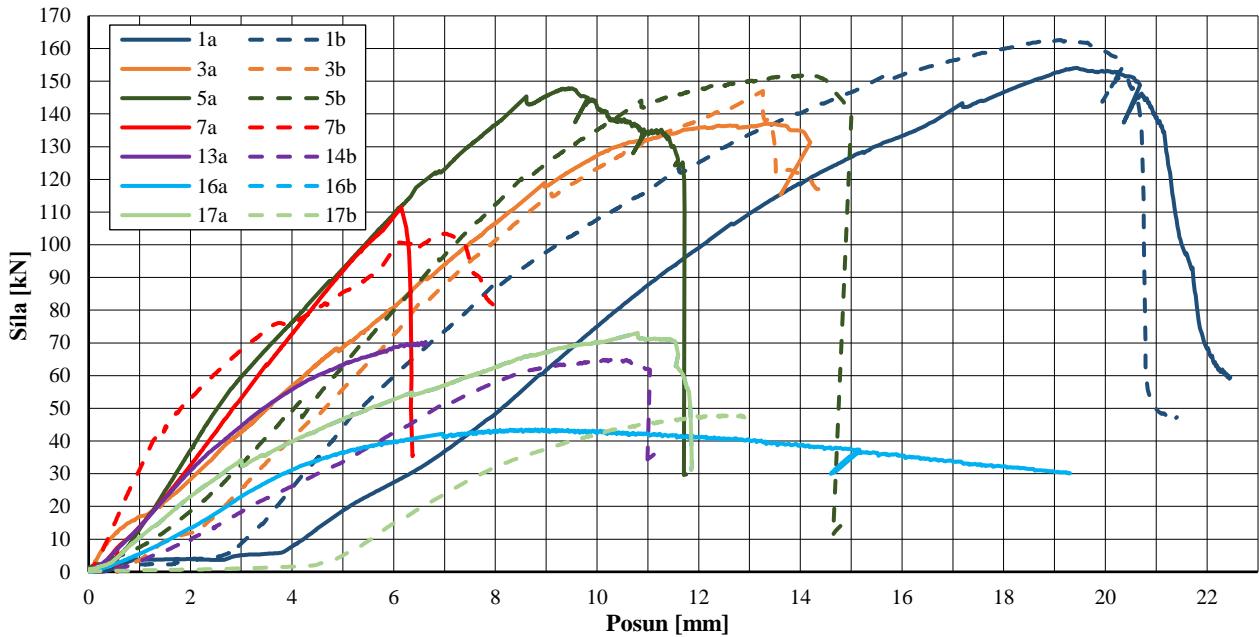


Obrázek 6: Detail porušení při-
pravku X – zkouška 5A

Obrázek 7: Detail porušení při-
pravku Y – zkouška 7A

Obrázek 8: Detail porušení kon-
zoly – zkouška 16A

Obrázek 9: Detail porušení při-
pravku Y – zkouška 17A



Obrázek 10: Souhrnný graf závislosti síly na posunu válce pro všechny proběhlé zkoušky

3.4. Zobecnění výsledků

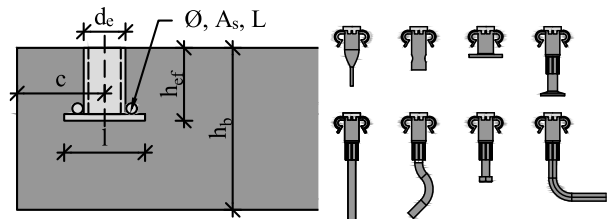
Série experimentů popsaných v části 3 byla provedena pro ověření únosnosti velmi specifické skupiny kotevnic prostředků, jejichž řešení vychází z okrajových podmínek určených tvarem prefabrikátů a z jejich hmotnosti. Dosažené výsledky lze pro obecný popis chování kotvení v UHPC využít jen omezeně, a to z důvodů složitosti navržených přípravků, kdy celkovou únosnost ovlivňuje více parametrů a tyto vlivy nelze sledovat odděleně.

4. PARAMETRICKÁ STUDIE KOTVENÍ

Na základě dosažených výsledků (jak výpočtů, tak zkoušek) se autor následně rozhodl analyzovat jednotlivé parametry kotevnic oblastí v UHPC, které ovlivňují celkovou únosnost. Pro přesnější popis se nabízí sledovat vliv parametrů odděleně. Tento oddíl shrnuje navržený postup další práce.

Prvním krokem je určení klíčových parametrů, které mají zásadní vliv na únosnost kotevnic oblastí. Řadu těchto parametrů lze převzít z norem, některé další je vhodné doplnit.

Proměnnými mohou být dle obrázku (Obrázek 11): velikost a typ kotvy d_e , l ; hloubka zapuštění kotvy h_{ef} ; celková výška betonu v místě kotevní oblasti h_b ; vzdálenost okraje prvku c ; parametry doplněné výztuže a především vlastnosti betonu UHPC se zřetelem na pevnost v tlaku a v tahu, množství drátků a největší velikost zrna kameniva.



Obrázek 11: Parametry kotevní oblasti (vlevo), typy kotevnic vložek výrobce Kontakt SK (vpravo)

S ohledem na omezení, kterými jsou zatíženy aktuálně platné předpisy, bude pro predikci únosnosti kotevnic oblastí vhodné použít numerický výpočet v některém z programů⁶

⁶ Vhodnými programy mohou být např. Atena či Ansys, případně výpočet založený na principu diskrétního modelování materiálu jako je např. Rigid Body Spring Model.

založeném na metodě konečných prvků a umožňujícím rovněž modelování drátkobetonu. Výsledky budou zároveň experimentálně ověřeny.

Po provedení dostatečného množství výpočtů a experimentů, jejichž výsledky budou ve vzájemné shodě, se lze pokusit o zobecnění výsledků. Na základě těchto výsledků bude možné nakalibrovat vztahy, které jsou popsány v normě pro beton běžných pevností, pro výpočet únosnosti kotvení při použití betonů vyšších pevností.

5. DISKUZE

Po rozboru normativních předpisů (EN 1992-4, fib.58, EAD 330232-00-0601), po provedení řady výpočtů s využitím těchto norem a po následném experimentálním ověření vlastností kotvení v prvcích z UHPC lze konstatovat několik skutečností.

Ačkoli zmíněné normy plně nepokrývají oblast navrhování kotvení v betonu vyšších pevností, lze při hodnocení vlastností kotvení v UHPC vycházet z jednotlivých způsobů porušení uvedených v normách. Módy porušení jsou si svým charakterem blízké, liší se v některých ohledech. Únosnost kotvení je ovlivněna výztužnými vlákny, což se projevuje mj. na úhlu roznosu zatížení. Zřejmý je příznivý účinek příčné výztuže kotevních vložek, který by bylo vhodné zohlednit ve výpočtu.

Při návrhu a výrobě zkušebních vzorků je třeba zohledňovat roznos zatížení a vhodně podle něho přizpůsobit vzdálenost sousedících kotevních míst. Pro co nejvýstižnější výsledky zkoušek je zapotřebí osazovat kotvy s dostatečnou přesností a eliminovat tak nepřesnosti na straně zkoušeného vzorku. Při výpočtu je naopak vhodné zohledňovat výrobní i materiálové imperfekce, které mohou znamenat přídavné namáhání, například páčení kotevních prostředků v betonu.

6. ZÁVĚR

Článek byl zaměřen na problematiku kotvení v prvcích z materiálu UHPC. Nejprve byly popsány návrh a příprava vzorků, na kterých byla experimentálně ověřena únosnost. Průběh zkoušení a dosažené výsledky byly podrobně dokumentovány.

Na základě výsledků byl stanoven další postup výzkumu, při kterém bude autor analyzovat jednotlivé parametry, které ovlivňují návrh a výsledné vlastnosti kotvení. Výsledkem této snahy by měla být úprava návrhového postupu pro betony vyšších pevností. Cílem další práce je dosáhnout co nejvýstižnějšího popisu chování kotvení v UHPC. Získané znalosti budou následně přijatelnou formou interpretovány a měly by se stát podkladem pro navrhování a posuzování kotvení v konstrukcích z ultra-vysokopevnostního betonu.

ACKNOWLEDGEMENTS

Príspevek vznikl za finanční podpory studentské grantové soutěže v rámci projektu SGS21/043/OHK1/1T/11. Teoretické podklady pro prezentované výsledky byly získány za finanční podpory z programu Epsilon, TH02020373, TAČR a společnosti KŠ PREFA s.r.o.

References

- ČSN EN 1992-1-1, *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, 2006.
- ČSN EN 1993-1-8 *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-8: Navrhování styčnic*, 2013.
- EAD 330232-00-0601. *Mechanical fasteners for use in concrete*, 2016.
- EN 1992-4 *Eurocode 2 - Design of concrete structures – Part 4: Design of fastenings for use in concrete*, 2018.
- Fib: No. 58. *Design of anchorages in concrete. Guide to good practice*, 280 p. ISBN 978-2-88394-098-7, 2011.
- KALNÝ, Milan et al. *Metodika 2: Metodika pro navrhování prvků z UHPC*. Kloknerův ústav, ČVUT v Praze, 2015.
- Kloknerův ústav, ČVUT: *Expertní zpráva: Experimentální ověření kotvení v lávkách malého rozpětí z UHPC*, Kloknerův ústav, ČVUT v Praze, 2020.
- KOLÍSKO, Jiří et al. *Metodika 1: Metodika pro návrh UHPC a pro materiálové zkoušky*. Kloknerův ústav, ČVUT v Praze, 2015.
- KONTAKT SK. *Katalog produktů*, 2019.
- KŠ PREFA. *Lávky malého rozpětí z UHPC*. In: KŠ Prefa [online]. [cit. 2020-10-13]. Dostupné z: https://ksprefa.cz/wp-content/uploads/2020/10/KSP_TL_UHPC_03_LMR.pdf.