

POROVNÁNÍ VÝBUCHOVÉ ODOLNOSTI DVOU UHPFRC SMĚSÍ S BĚŽNĚ POUŽÍVANÝMI BETONY NA ZÁKLADĚ TYPU PORUŠENÍ

COMPARISON OF THE BLAST RESISTANCE OF TWO UHPFRC MIXES WITH THAT OF ORDINARY CONCRETE BASED ON A PREDICTION OF THE FAILURE MODE

TEXT Ondřej Janota, Marek Foglar, Emanuel Bonnet

Článek popisuje výsledky z experimentálního programu, který byl proveden Fakultou stavební ČVUT v Praze ve spolupráci s Lafarge Holcim Centre de Recherche. Během experimentu byly dvě patentované směsi UHPFRC testovány na výbuchovou odolnost při kontaktním a blízkém výbuchu. Během experimentu bylo vyzkoušeno celkem 28 čtvercových desek o tloušťkách 100, 150 a 200 mm. Odlišných zatěžovacích podmínek bylo dosaženo pomocí změny hmotnosti nálože (100 až 1 000 g) a její vzdálenosti od horního povrchu vzorku (0 až 100 mm). Výsledky byly vyhodnoceny z hlediska typu porušení a porovnány s výsledky dostupnými v literatuře.

This paper presents results of an extensive experimental programme which was carried out in cooperation of CTU Prague with the Lafarge Holcim Centre de Recherche. Two proprietary UHPFRC composite materials were tested for their blast resistance when in contact or near-by. In total, twenty-eight slabs with thicknesses of 100, 150 and 200 mm were tested. Specimens were loaded with explosive charge with a mass of 100 - 1000 g in various distances from the specimens' top surfaces (0 - 100 mm). All specimens were visually evaluated for the extent of damage failure mode and crack pattern. Results from the experiment were evaluated and compared with results for normal strength reinforced concrete available in publications.

Experimentální program

Experiment zaměřený na stanovení výbuchové odolnosti dvou UHPFRC směsí byl proveden v roce 2018. Během experimentu bylo odzkoušeno 28 čtvercových desek o hraně 1 000 mm a o třech různých tloušťkách (100, 150 a 200 mm). Rozměr testovaných vzorků byl stanoven na základě dvou kritérií. Prvním kritériem byla podmínka prostupu přetlakové vlny vzorkem. Poměr jednotlivých délek stran vzorku a tloušťky vzorku musí zajistit, aby došlo dříve k odrazu od spodního povrchu vzorku než od jeho bočních stěn. Druhým kritériem pro návrh rozměrů bylo osazení úchytů umožňujících manipulaci se vzorkem. Zatímco druhé kritérium bylo zajištěno pomocí dostupných statických programů, pro ověření první-

ho kritéria musel být vytvořen numerický model simulující zatížení panelu výbuchem.

Pro vytvoření výbuchu byla použita výbušnina Semtex 1A. Všechny nálože byly ve tvaru válce s poměrem délky ku průměru 1:1. Rozbuška byla vždy zanořena do hloubky 20 mm od horního povrchu nálože. Hmotnost nálože se pohybovala v rozmezí 100 až 1 000 g. Vzdálenost výbušniny od horního povrchu vzorku se pohybovala od 0 do 100 mm. Variacemi hmotnosti a vzdálenosti výbušniny od vzorku bylo dosaženo různých zatěžovacích stavů v oblasti kontaktního a blízkého výbuchu.

Vzorky byly uloženy na ocelovou stoličku tak, aby uložení desky mohlo být uvažováno po všech čtyřech stranách jako kloubové (obr. 1 a 2).

Ocelový rám, na kterém ležely vzorky, byl umístěn ve výšce 720 mm od země. Tato vzdálenost zajistila, že odraz tlakové vlny od země neovlivnil výsledky [1], [2], [3].

Každý vzorek byl natáčen dvěma rychloběžnými kamerami. První kamera zachycovala celý průběh experimentu, druhá snímala chování spodního povrchu. Prostor pod vzorkem byl využit pro umístění zrcadla, které umožňovalo snímání spodního povrchu vysokorychlostní kamerou. Schéma experimentu je patrné z obr. 3.

Zkoušené materiály

Během experimentu byly zkoumány dvě patentované UHPFRC směsi. Směs A měla deklarovanou tlakovou pevnost minimálně 170 MPa, směs B



1

1 Vzorek s náloží a rozbuškou uložený na ocelové stoličce 2 Schéma vzorku na ocelové stoličce 3 Schéma experimentu
 1 A test specimen with an explosive charge and a detonator, placed on a steel frame 2 Cross-section of a specimen supported by a steel frame 3 Layout of the experiment

minimálně 150 MPa. Množství drátků, jejich délka, tvar a pevnost byly pro obě směsi stejné. Podrobnější informace o zkoušených směsích lze najít v tab. 1 [7].

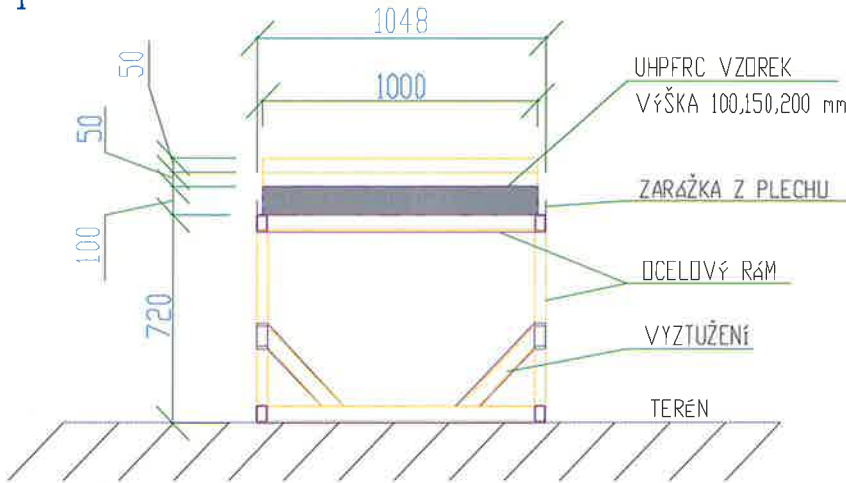
Experimentální výsledky

Výsledky prezentované v tomto článku jsou založeny pouze na vizuálním pozorování a na měření poškození jednotlivých prvků. Z 28 vzorků bylo pět vzorků poškozeno pouze na kontaktní straně, čtrnáct vzorků bylo poškozeno jak na kontaktní, tak odvrácené straně, tři vzorky byly poškozeny pouze na odvrácené straně a šest vzorků bylo proraženo. Schéma různých typů porušení je uvedeno na obr. 4. Celkový přehled všech provedených odstřelů včetně jejich dispozic a výsledného porušení je uveden v tab. 2.

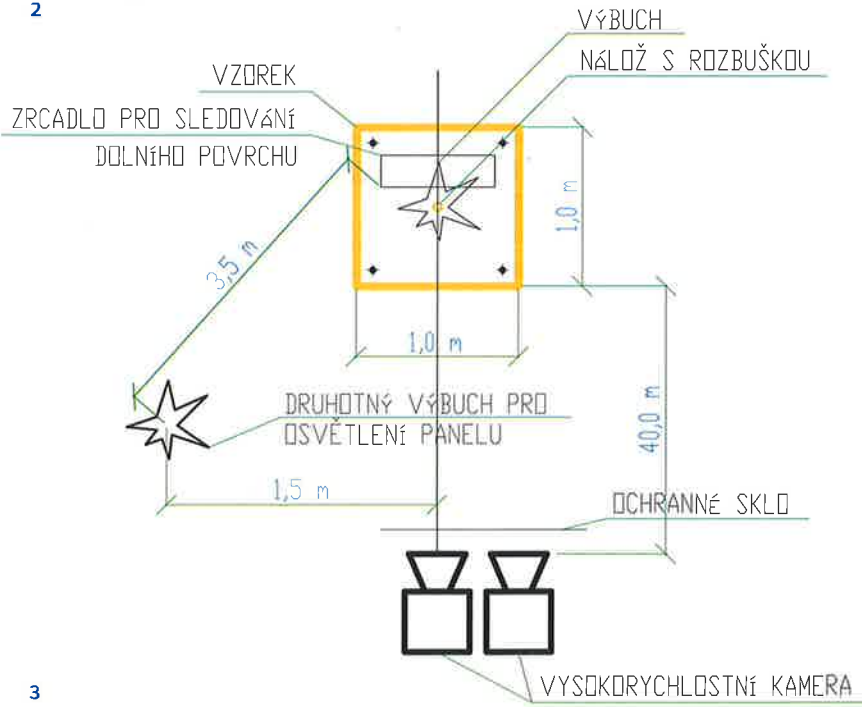
Základní parametry poškození jako hloubka, tvar, rozsah a typ porušení byly zaznamenány za účelem porovnání dosažených výsledků s výsledky běžně používaných betonů.

Tyto výsledky lze obecně vyjádřit empirickými metodami pro odhad porušení vzorků (empirické metody jsou popsány detailněji v následující kapitole). Vzhledem k praktičnosti těchto empirických přístupů používaných pro betony běžných pevností se nabízí stejné použití pro vysokohodnotné betony a drátkobetony. Kvůli odlišným tlakovým a tahovým vlastnostem je použití těchto přístupů nutné nejdříve ověřit a dříve odvozené výsledky revidovat pro nově používané materiály. Vzhledem k velkému množství zkoušených vzorků bylo ověření těchto přístupů stanoveno jako jeden z cílů experimentu.

Na odstřelených vzorcích byl kromě rozsahu porušení dále pozorován systém trhlin a charakter porušení na odvrácené straně.



2



3

System trhlín

Trhliny vznikající při zatížení vzorku výbuchem lze rozdělit na dva systémy (obr. 5).

První systém trhlín, který lze nazvat jako radiální, se objevil na všech proražených vzorcích a na většině vzorků poškozených jak na kontaktní, tak na odvrácené straně. Radiální trhliny byly široké a často prostoupily skrze celou tloušťku vzorku (stejná trhлина na obou površích o šířce 0 až cca 20 mm). Trhliny vycházely z porušené části vzorku a pokračovaly směrem k okraji vzorku, nejčastěji k okraji osazenému manipulačními úchyty. Vzhledem k charakteru těchto trhlín se předpokládá, že vznikly až po průchodu tlakové vlny vzorkem a odpovídají spíše ohybovému namáhání vzorku.

Druhý systém trhlín se skládal z tenkých povrchových trhlín, které se objevovaly zejména na kontaktní straně, zaznamenány byly však i na odvrácené straně. Trhliny neprostupovaly vzorkem a jejich šířka byla v řádech desetin milimetru. Tyto obvodové trhliny, které byly pozorovány na vzorcích všech typů porušení, kopírovaly okraje vzorku a u některých vzorků vytvořily uzavřený spojitý systém. Vznik trhlín byl způsoben odrazem přetlakové vlny od bočních okrajů vzorku, při kterém vznikají tahová namáhání.

Odraz přetlakové vlny na odvrácené straně vzorků

Rozdíly v hladkosti povrchu na odvrácené straně pravděpodobně indikují různý počet odrazů přetlakové vlny od spodního povrchu (rozhraní beton-vzduch). S každým dalším odrazem vlny může dojít k nové výtrži povrchu (nebo k rozšíření předcházející výtrže). V případě, že na vzorku dojde pouze k jednomu odrazu přetlakové vlny, je pravděpodobné, že bude povrch hladký a bez zlomů. V případě, že dojde k několikanásobnému odrazu, je pravděpodobné, že povrch bude hrubý se zlomy. Každý zlom

Tab. 1 Materiálové vlastnosti zkoušených směsí [7]

Tab. 1 Properties of the mix designs tested [7]

	Cement [kg/m ³]	Drátky [kg/m ³]	Voda [kg/m ³]	Superplastifikátor [kg/m ³]	f_{cm} [MPa]	E_c [MPa]	$f_{ct,m}$ [MPa]
směs A	2 200	156	158	25	150	55	8,3
směs B	2 170	156	158	35	170	60	11

Tab. 2 Seznam jednotlivých střel včetně jejich základních dispozic

Tab. 2 List of the individual projectiles and their parameters

Číslo odštělu [-]	Směs [-]	Tloušťka vzorku [mm]	Hmotnost nálože [g]	Délka nálože [mm]	Vzdálenost nálože od vzorku [mm]	Typ porušení [-]	Normovaná vzdálenost [m/kg ^{1/3}]
1	A	100	400	61	0	průraz	0,051
2	A	100	200	58	0	poškození obou povrchů	0,060
3	A	150	400	66	0	poškození obou povrchů	0,057
4	A	100	400	74	100	bez poškození	0,192
5	A	100	1 000	90	60	poškození obou povrchů	0,119
6	A	100	400	60	10	poškození obou povrchů	0,062
7	A	100	200	58	0	poškození obou povrchů	0,060
8	A	200	1000	95	20	poškození obou povrchů	0,087
9	B	100	400	700	100	poškození odvráceného povrchu	0,187
10	A	100	400	700	100	poškození odvráceného povrchu	0,187
11	A	100	400	700	100	bez poškození	0,187
12	A	100	400	700	0	průraz	0,062
13	A	100	400	60	0	průraz	0,050
14	A	150	1 000	96	0	průraz	0,070
15	A	200	1 000	90	30	poškození obou povrchů	0,092
16	A	100	200	55	25	poškození obou povrchů	0,094
17	B	100	300	70	100	poškození obou povrchů	0,205
18	B	100	300	70	0	poškození obou povrchů	0,068
19	B	200	500	75	0	poškození obou povrchů	0,063
20	B	100	1000	80	60	průraz	0,110
21	B	100	200	50	100	poškození odvráceného povrchu	0,204
22	B	100	150	45	25	poškození obou povrchů	0,086
23	B	150	500	75	40	poškození obou povrchů	0,110
24	B	100	500	75	20	průraz	0,087
25	B	100	100	47	25	poškození kontaktního povrchu	0,103
26	B	150	400	64	30	poškození kontaktního povrchu	0,092
27	B	100	800	76	60	poškození obou povrchů	0,114
28	B	200	300	50	0	poškození kontaktního povrchu	0,041

☀️ VÝBUCH

POŠKOZENÍ
KONTAKTNÍHO
POVRCHU



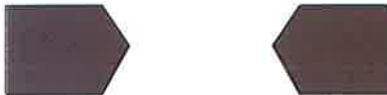
☀️ VÝBUCH

POŠKOZENÍ
OBOU POVRCHŮ



☀️ VÝBUCH

PRŮRAZ



5



6a



6b

na povrchu by měl indikovat právě odraz přetlakové vlny od rozhraní beton-vzduch (obr. 6).

Empirické přístupy pro stanovení typu a rozsahu porušení betonových vzorků zatížených výbuchem

Pro vyhodnocení výbuchové odolnosti betonových vzorků se běžně používají dva základní empirické přístupy, které stanovují předpokládaný typ porušení nebo rozsah poškození. Detailní popis těchto metod je možné najít v [4], [5] a [6]. Oba přístupy jsou založeny na následujících základních parametrech:

- normovaná tloušťka $T/W^{1/3}$ (poměr tloušťky vzorku a třetí odmocniny z hmotnosti nálože),
- normovaná vzdálenost $R/W^{1/3}$ (poměr vzdálenosti výbuštiny od horního povrchu vzorku a třetí odmocniny z hmotnosti nálože),
- normovaná hloubka poškození $(C_p + S_p)/T$ (poměr součtu hloubky poškození obou povrchů a tloušťky vzorku),
- typ porušení – při výbuchových experimentech jsou obecně rozlišovány tři základní typy porušení (obr. 4).

První přístup (McVay) byl odvozen na základě velkého množství výsledků výbuchových experimentů provede-

4 Běžně rozlišované typy porušení: a) poškození kontaktního povrchu, b) poškození obou povrchů, c) průraz 5 Systém trhlin: červeně – radiální trhliny, zeleně – obvodové trhliny

6 Poškození odvrácené strany se zřetelnými zlomy reprezentujícími odraz přetlakové vlny na rozhraní beton-vzduch: a) více odrazů, hrubý povrch výtrže, b) pouze jeden odraz, hladký povrch výtrže

4 Recognized types of damage: a) damage of the surface in contact, b) damage of both surfaces, c) penetration 5 Cracks patterns: red – radial cracks, green – peripheral cracks 6 Damage of the rear surface with clearly marked fractures indicating the reflection of the pressure wave at the concrete-air interface: a) multiple reflections, a rough fracture surface, b) a single reflection, smooth fracture surface

ných na betonových vzorcích. Pomocí tohoto empirického přístupu je možné stanovit výsledný typ porušení zkoušeného vzorku na základě normované tloušťky a vzdálenosti. Metodika byla odvozena pro betony běžných pevností, které se od dnešních vysokohodnotných betonů a drátkobetonů liší svými vlastnostmi.

Druhý a novější přístup (Morishita) je založen na odhadu typu porušení vzorku a normované hloubky poškození pomocí normované tloušťky. Tento přístup byl, obdobně jako předešlý, odvozen pro betony normálních pevností na základě výsledků experimentů s kontaktním výbuchem. Na základě těchto výsledků byly stanoveny limity normované tloušťky pro jednotlivé typy porušení a dále i předpokládaná normovaná hloubka porušení vzorku.

McVayova metodika pro odhad typu porušení vzorku

Přestože během experimentu byly zkoumány vzorky pouze v omezeném rozsahu normované vzdálenosti, velký počet vzorků vytvořil vhodnou datovou základnu pro porovnání výsledků UHPFRC s betony běžných

7 Porovnání experimentálních výsledků UHPFRC s předpokládanými výsledky běžně používaných betonů: a) metodika McVay, b) metodika Morishita

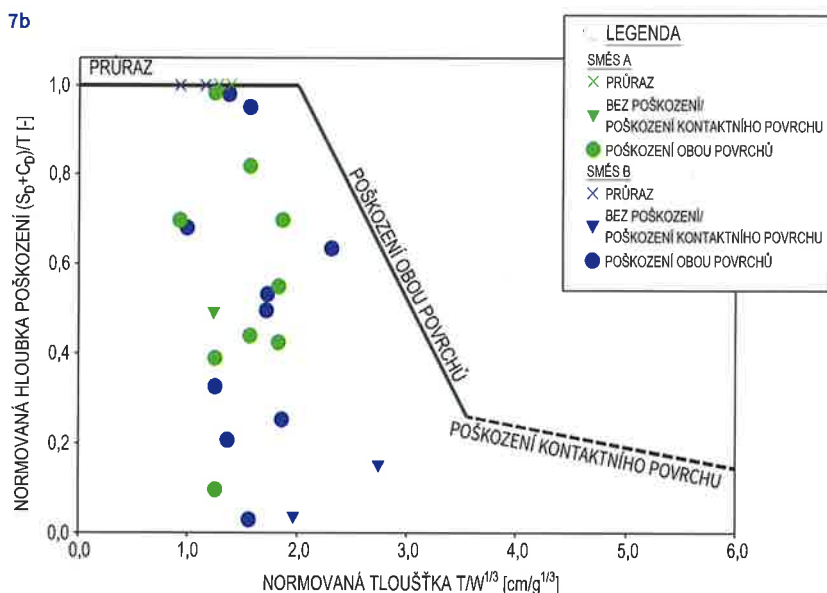
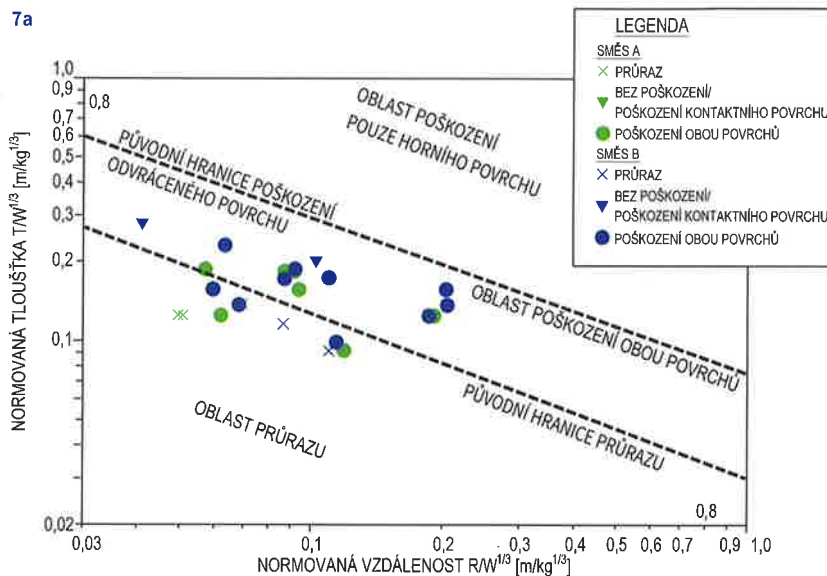
7 Comparison of the results from tests on UHPFRC with those predicted for ordinary concrete: a) McVay's method, b) Morishita's method

pevností. Výsledky uvedené v grafu na obr. 7 ukazují, že původně odvozené hranice pro jednotlivé typy porušení neplatí pro zkoušené směsi UHPFRC. Přes omezený počet vzorků porušených průrazem nebo výtrží na kontaktní straně je ve zkoušené oblasti normované vzdálenosti jasně patrný přechod mezi jednotlivými typy porušení. Obě hranice mezi jednotlivými typy porušení jsou posunuty směrem k menším hodnotám normované tloušťky při předpokládaném zachování jejich sklonu vůči osám. Výsledky dále ukazují, že posun rozhraní mezi poškozením na kontaktní straně a obou stranách vzorku je větší než pro rozmezí mezi průrazem a poškozením vzorku na obou stranách. Z výše uvedeného vyplývá, že zkoušený UHPFRC materiál je z hlediska poškození materiálu více odolný při zatížení výbuchem, a tudíž pro dosažení výtrže na obou stranách vzorku musí být vyvinuto více energie.

I přesto, že obě zkoušené směsi vykazovaly velmi podobné chování při zatížení výbuchem, jsou zde nepatrné rozdíly. Z obr. 7 je patrné, že vzorky ze směsi B byly proraženy při mírně větších hodnotách normované tloušťky než v případě směsi A. Stejný princip byl patrný i pro vzorky s výtrží na obou stranách vzorku. V případě směsi B docházelo k porušení na odvrácené straně u ran s vyšší normovanou tloušťkou než v případě vzorku ze směsi A. Rozdíl ve výbuchové odolnosti mezi jednotlivými směsmi byl patrně způsoben rozdílem v materiálových vlastnostech.

Morishitova metodika pro odhad typu porušení vzorku

Morishitův empirický odhad poškození prvků zatížených výbuchem je



založen na výsledcích zatížení kontaktním výbuchem. Z toho důvodu není do metodiky zanesen vliv normované vzdálenosti. Zde je nutné podotknout, že pouze část testovaných desek v rámci experimentálního programu byla zatížena kontaktním výbuchem a prezentované výsledky mohou být tímto faktem ovlivněny. Aplikace Morishitových rovnic pro odhad poškození vzorků je zachycena na obr. 8. Z obrázku je patrné, že původní limity pro průraz (normovaná tloušťka menší než 2,1 cm/g^{1/3}) a pro poškození na obou stranách vzorku (normovaná tloušťka menší než 3,6 cm/g^{1/3}) nejsou v případě prezentovaných materiálů platné.

Z grafu je dále možné predikovat polohu nových hranic porušení platných pro zkoušené UHPFRC směsi. Hodnoty normované tloušťky pro hranici mezi porušením pouze na kontaktní straně a na kontaktní a odvrácené straně je nově možno předpokládat při hodnotě normované tloušťky 2,1 cm/g^{1/3} (posun z původních 3,6 cm/g^{1/3}). Rozhraní pro porušení prvku průrazem se posunulo na hodnotu 1,3 cm/g^{1/3} (z původních 2,1 cm/g^{1/3}). Posun hranic pro jednotlivé typy porušení blíže k sobě indikuje, že křivka popisující závislost normované hloubky porušení na normované tloušťce je strmější. Rozdílný posun jednotlivých hranic poškození je v souladu s výsledky získanými z aplikace McVayova přístupu.

Závěr

V článku byly prezentovány vybrané výsledky z experimentálního programu zaměřeného na stanovení výbuchové odolnosti dvou UHPFRC směsí. V rámci programu byly vzorky ze dvou UHPFRC směsí zatíženy kontaktním a blízkým výbuchem. Celkem bylo během experimentu odstřeleno 28 čtvercových desek (čtrnáct desek pro každou směs) o hraně 1 000 mm. Tloušťky vzorků byly 100, 150 a 200 mm. Pro každou střelu byly stanoveny různé zatěžovací podmínky, kterých bylo dosaženo změnou hmotnosti a vzdálenosti nálože. Výsledky prezentované v tomto článku jsou založeny na měření rozsahu výsledného poškození, tj. hloubky, tvaru a typu porušení. Následně byly výsledky testovaných UHPFRC vzorků porovnány s výsledky běžně používaných betonů, které jsou zastoupeny empirickými metodami pro odhad rozsahu a typu porušení.

Na vzorcích vystavených výbuchu byly sledovány dva odlišné systémy trhlin. První systém byl reprezento-

ván radiálními trhlinami, které se objevily na většině vzorků. Tyto trhliny byly široké a hluboké, často pronikaly celou tloušťkou vzorku a došlo k prokreslení jedné trhliny na obou sledovaných površích. Druhý systém trhlin se skládal z velmi malých, pouze povrchových trhlin, které kopírovaly okraje vzorku a v některých případech utvořily spojitou soustavu. Tyto trhliny se objevovaly zejména na kontaktním povrchu a v některých případech i na odvrácené straně a vznikaly při odrazu přetlakové vlny od okrajů vzorku vlivem vzniku tahových napětí, na rozdíl od radiálních trhlin, které pravděpodobně vznikaly ohybovým namáháním po průchodu přetlakové vlny.

Aplikováním dvou empirických metod pro stanovení rozsahu poškození zkoušených vzorků bylo dokázáno, že v případě výbuchové odolnosti jsou zkoušené UHPFRC směsi vhodnější než běžně používané betony. V případě použití zkoušených směsí bylo pro dosažení stejného rozsahu poškození a typu porušení nutné vy-

vinout více energie v poměru k tloušťce vzorku (použití větší nálože, umístění nálože blíže vzorku, použití tenčího vzorku). V případě McVayovy metody je tento fakt vyjádřen posunem hranic mezi jednotlivými typy porušení směrem k menším hodnotám normované tloušťky. Aplikací Morishitova přístupu, který nebere v úvahu normovanou vzdálenost, nýbrž pouze tloušťky vzorků, bylo dosaženo obdobných výsledků. Nicméně vliv tohoto parametru, který nemůže být jednoduše zanedbán, Morishitův přístup značně znehodnocuje. Morishitův přístup se tak jeví jako méně použitelný pro tento typ experimentů.

Výsledky dále ukazují i na rozdílnou výbuchovou odolnost obou zkoušených materiálů. Vzorky ze směsi A vykázaly lepší výsledky než vzorky ze směsi B. Tento zjištěný rozdíl, který může být zapříčiněn rozdílnými materiálovými parametry, nebyl v rámci experimentu stanoven. Vzhledem k nemožnosti stanovit statistickou odchylku provedených zkoušek není možné odvodit vliv této odchylky na případný rozdíl zkoušených materiálů.

Zdroje:

- [1] KOVAR, M., FOGAR, M., HAJEK, R. The blast performance of real-scale reinforced concrete specimens with varying fiber types and content. *Structures Under Shock and Impact XIII*. 2014, Vol. 141, pp. 159–169.
- [2] FOGAR, M., PACHMAN, J., PELIKAN, V., HÁJEK, R., KÜNZEL, M., KOVÁŘ, M. The structural response of a reinforced concrete specimen subjected to adjacent blast loading. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2014, pp. 171–179.
- [3] FOGAR, M., HAJEK, R., FLADR, J., PACHMAN, J., STOLLER, J. Full-scale experimental testing of the blast resistance of HPRC and UHPFRC bridge decks. *Construction and Building Materials*. 2017, Vol. 145, pp. 588–601.
- [4] McVAY, M. *Spall damage of concrete structures*. Technical report SL-88-22. Structures Laboratory, Department of the Army, Mississippi, USA, 1988.
- [5] MORISHITA, M., TANAKA, H., ANDO, T., HAGIYA, H. Effects of Concrete Strength and Reinforcing Clear Distance on the Damage of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Contact Detonations. *Concrete Research and Technology*. 2004, Vol. 15, Issue 2, pp. 89–98.
- [6] MORISHITA, M., TANAKA, H., ITO, T., YAMAGUCHI, H. Damage of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Contact Detonations. *Journal of Structural Engineering*. 2000, Vol. 46A, pp. 1787–1797, (in Japanese).
- [7] CADONI, E., FORNI, D., BONNET, E., DOBRUSKY, S. Experimental study on direct tensile behaviour of UHPFRC under high strain-rates. *Construction and Building Materials*, 2019, Vol. 218, pp. 667–680.



Ing. Ondřej Janota
Fakulta stavební ČVUT v Praze
ondrej.janota@fsvcvut.cz



doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.
Fakulta stavební ČVUT v Praze
marek.foglar@fsvcvut.cz

Emanuel Bonnet
LafargeHolcim Innovation Center
emmanuel.bonnet@lafargeholcim.com

NADCHÁZEJÍCÍ KONFERENCE ZAMĚŘENÉ NA TÉMA VLÁKNOBETON

ICFRACE 2021 - 15. INTERNATIONAL CONFERENCE ON FIBER REINFORCED CONCRETE WITH APPLICATION IN CIVIL ENGINEERING

14. až 15. ledna 2021, Bali, Indonésie - waset.org/fiber-reinforced-concrete-with-application-in-civil-engineering-conference-in-january-2021-in-bali

GRCA CONGRESS GRC2021 - 18. INTERNATIONAL CONGRESS OF THE GRCA

20. až 23. dubna 2021, Londýn, Velká Británie - grca.org.uk/grca-congress/2021-congress.php

ICFRCE 2021 - 15. INTERNATIONAL CONFERENCE ON FIBER REINFORCED CONCRETE IN CIVIL ENGINEERING

17. a 18. května 2021, Sydney, Austrálie - waset.org/fiber-reinforced-concrete-in-civil-engineering-conference-in-may-2021-in-sydney

ICFRC 2021 - 15. INTERNATIONAL CONFERENCE ON FIBER-REINFORCED CONCRETE

18. a 19. listopadu 2021, Londýn, Velká Británie - waset.org/fiber-reinforced-concrete-conference-in-november-2021-in-london