

VLIV PEVNOSTI BETONU A OBSAHU VLÁKEN NA VÝBUCHOVOU ODOLNOST ŽELEZOBETONOVÝCH PRVKŮ ■ CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH AND FIBER DOSAGE AND THEIR INFLUENCE ON BLAST PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

Marek Foglar, Martin Kovář,
Alena Kohoutková

Článek shrnuje výsledky druhého běhu zkoušek výbuchové odolnosti železobetonových prvků konaných za spolupráce s Policií ČR a Armádou ČR ve vojenském prostoru Boletice. Policie ČR poskytla trhavinu a zajistila spolupráci se složkami IZS, Armáda ČR poskytla prostor a zajistila přípravu místa a odpal náloží. Výsledky jsou využitelné pro civilní praxi, jejich využití pro ochranné stavby stavené Armádou ČR není dosud předmětem výzkumu; budoucí spolupráci nelze vyloučit.

■ The paper summarizes results of the second run of experiments focused on blast performance of reinforced concrete specimens. The experiment has studied and evaluated effect of PP fibers dosage and concrete compressive strength.

V souvislosti se současnou nestabilní celosvětovou politickou situací a nárůstem objemu a rozsahu teroristických útoků na objekty dopravní a veřejné infrastruktury je pokračováno v studiu odolnosti staveb proti extrémním zatížením, zejména zatížení výbuchem a nárazy.

Článek prezentuje výsledky experimentů zaměřených na vliv přidaných vláken, třídy pevnosti betonu a jejich kombinace na výbuchovou odolnost železobetonu; doplňuje výsledky prezentované v [1] o výsledky experimentů konaných v červenci 2011.

EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM

Popis zkušebních těles

Rozměry zkušebních těles byly navrženy s ohledem na vypovídající schopnost experimentů a přepravní a manipulační možnosti a jsou detailně popsány v [1].

Jedná se o železobetonové desky rozměrů 0,3 × 1,5 × 6 m, vyztužené 11 Ø 16 při obou površích v podélném směru, Ø 10 po 150 mm ve směru příčném. Smyková výztuž je tvořena sponami Ø 8 (9 kusů/m²). Byl užit beton X0 a betonářská výztuž B500B podle ČSN EN 1992-1-1. Při experimentech jsou užitá PP vlákna Forta Ferro délky 54 mm.

Kvalita betonu a obsah PP vláken jsou proměnné (tab. 1). Vzorek 1 je navržen z betonu C30/37 bez vláken, vzorek 2 z betonu C30/37 s obsahem vláken 4,5 kg/m³, vzorek 3 z betonu C55/67 bez vláken, vzorek 4 z betonu C55/67 s obsahem vláken 4,5 kg/m³ a vzorek 5 z betonu C30/37 s obsahem vláken 9 kg/m³.

Uspořádání experimentů

Experimenty probíhaly za spolupráce s Policií ČR a Armádou ČR ve vojenském prostoru Boletice. Policie ČR poskytla trhavinu a zajistila spolupráci se složkami IZS, Armáda ČR poskytla prostor a zajistila přípravu místa a odpal náloží. Výsledky jsou využitelné pro civilní praxi, jejich využití pro ochranné stavby stavené Armádou ČR není dosud předmětem výzkumu; budoucí spolupráci nelze vyloučit.

První sada zkoušek (vzorky č. 1 a 2) byla provedena v listopadu 2010, druhá (vzorky č. 3, 4 a 5) v červenci 2011 na stejném místě. Zkoušky probíhaly v místech bývalé dopadové plochy dělostřelecké střelnice v nadmořské výšce cca 900 m n. m. Tato plocha je v současné době užívána pro zneškodňování munice s proslulou dobou trvanlivosti a při stavebních pracích stále nalézané munice z 2. světové války. Uspořádání experimentů je detailně popsáno v [1].

Výsledky experimentů

Za kontrolní vzorek je považován panel č. 1 z betonu C30/37 bez vláken. Tento prvek je nejvíce poškozen. Bylo dosaženo průrazu s plochou 0,43 m², tedy 0,12 m³ objemu betonu (4,4 % celkového objemu betonu v panelu). Celkový objem vytrženého betonu (ztráty hmoty) byl 0,23 m³ (8,5 % z původního objemu betonu). Poškození průrazem činí 52 % z vytrženého betonu. Boky byly poškozeny po celé výšce panelu. Tvar se po výšce panelu směrem dolů rozšiřoval. Vzhled poškození (tvar průřezu) odpovídal prvku ohýbanému rovnoměr-

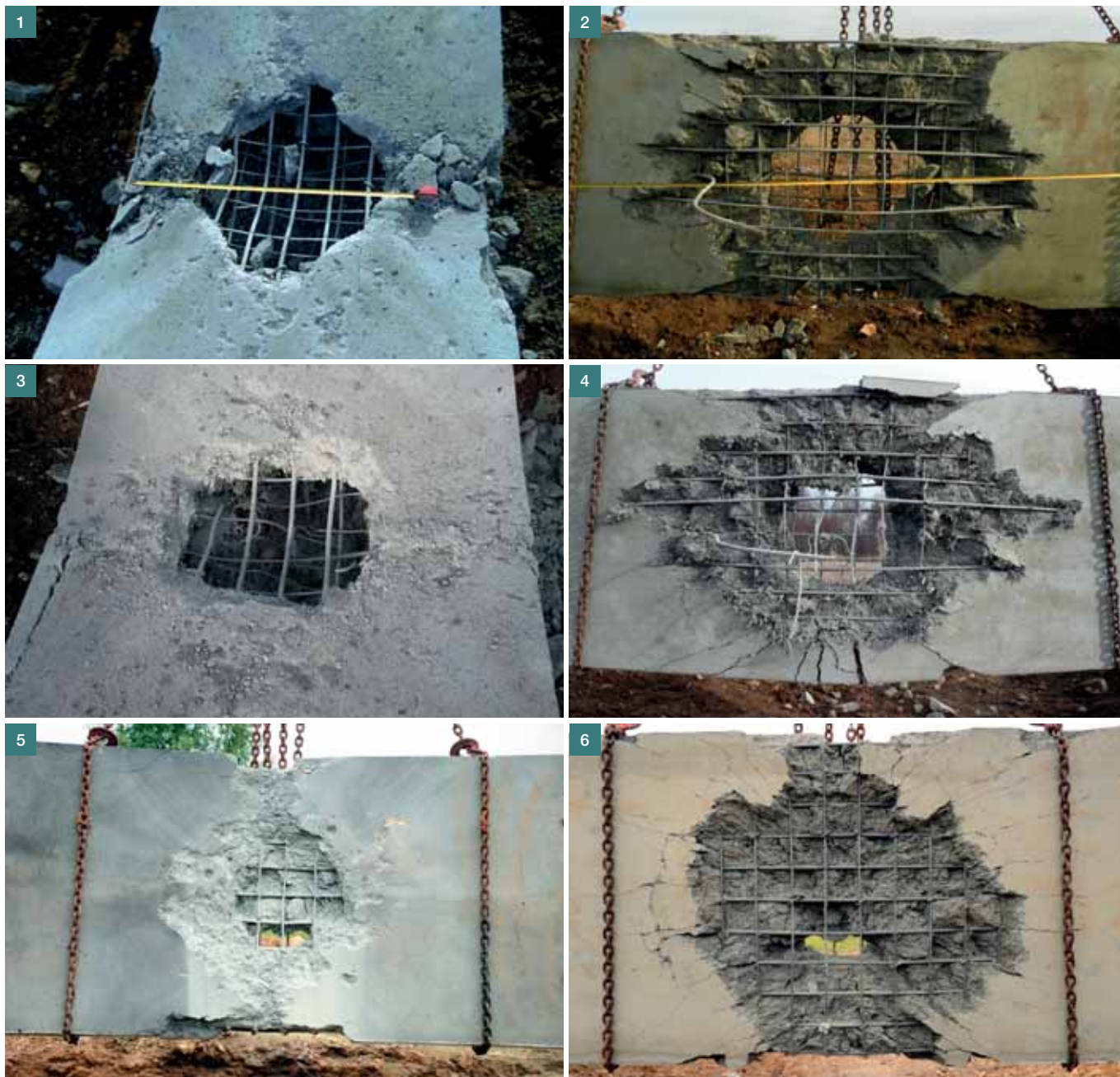
ným zatížením. Průhyb panelu byl označen 295 mm na levém a 310 mm na pravém boku.

Přidání 4,5 kg/m³ vláken do stejného betonu, vzorek 2, vedlo k jinému způsobu porušení panelu. Tvar průřezu poškozeného panelu byl ve tvaru zlomu. Prvek s vlákny byl porušen hlavní ohybovou trhlinou velké šířky dlouhou téměř přes 4/5 výšky průřezu. Horní část betonového průřezu byla poškozena drcením betonu (tlakem). Tvar průřezu byl spíše trojúhelníkový. Bylo dosaženo menších hodnot poškození (sloupce 1 × 2 v tab. 1). Plocha průrazu se zmenšila o 40 %. Plochy poškození horního a dolního povrchu se snížily také o 40 %. Poškození boků znamenalo největší pokles. Levý bok nebyl téměř poškozen a na pravém boku se poškození snížilo o více než 50 %. Celkový objem vytrženého betonu se snížil o 35 %. Průhyby se oproti kontrolnímu prvku zvýšily o 19 %. Tento jev se přikládá větší schopnosti vláknobetonu pohltit více energie vzhledem ke svým mechanickým vlastnostem.

Přidání dvojnásobného množství vláken (9 kg/m³), vzorek 5, způsobilo další snížení poškození panelu. Oproti panelu bez vláken byly změny následující. Tvar průřezu poškozeného panelu byl ve tvaru zlomu. Prvek s vlákny byl porušen hlavní ohybovou trhlinou velké šířky dlouhé téměř přes 2/3 výšky průřezu. Tlačená část betonového průřezu byla porušena tlakem, který vedl k drcení betonu. Tvar průřezu byl spíše trojúhelníkový. Bylo dosaženo menších hodnot poškození (sloupce 5 × 1 v tab. 1). Po-

Tab. 1 Porovnání výbuchové odolnosti jednotlivých vzorků ■ Tab. 1 Summary of blast performance of RC and RC with plastic fibres

PRVEK	1	2	3	4	5	
Beton	C30/37	C30/37	C55/67	C55/67	C30/37	
Vlákna [kg/m ³]	-	4,5	-	4,5	9	
Průraz při horním povrchu [m ²]	0,43	0,26	0,02	NE	NE	
Odstřipnutá vrstva betonu	při spodním povrchu < krytí výztuže [m ²]	2,35	1,89	1,51	0,73	0,61
	při spodním povrchu > krytí výztuže [m ²]	1,71	1,09	1,2	0,44	0,37
	při horním povrchu < krytí výztuže [m ²]	0,43	0,26	0,89	0,68	0,66
	při horním povrchu > krytí výztuže [m ²]	0,43	0,26	0,29	0	0,08
	při levém okraji < krytí výztuže [m ²]	0,52	0,05	0,08	0	0
	při levém okraji > krytí výztuže [m ²]	0,35	0	0,02	0	0
	při pravém okraji < krytí výztuže [m ²]	0,34	0,162	0,08	0	0
	při pravém okraji > krytí výztuže [m ²]	0,23	0,11	0,02	0	0
Vytržený beton celkem [m ³]	0,23	0,15	0,2	0,05	0,06	
Trvalý průhyb [m]	0,31	0,37	0,28	0,3	0,26	



škození desky průrazem se vůbec neprojevilo. Horní povrch byl poškozen pouze krátery od projektilů stoličky. Plochy poškození horního a dolního povrchu se snížily přibližně o 75 %. Pouze plocha odtržené krycí vrstvy u spodního povrchu se zvýšila. To bylo způsobeno tím, že u kontrolního prvku (č. 1) činil velkou část této plochy průraz. Poškození boků bylo zcela eliminováno. Celkový objem vytrženého betonu se snížil o 75 %. Průhyby se oproti kontrolnímu prvku snížily o 16 %.

Použití vyšší třídy betonu C55/67, vzorek 3, způsobilo u prvku bez vláken snížení průrazu o 95 % (neporážený beton, který zůstal, je rozdrčený). Tvar a způsob porušení byly přibližně stejné. Rozsah poškození se velmi snížil (sloupec 3 vs. sloupec 1 v tab. 1). U horního

i spodního povrchu se plochy poškození snížily o 30 %. U boků bylo snížení výraznější. U betonu vyšší třídy se poškození boků snížilo o 85 %. Celkový objem vytrženého betonu se snížil o 13 %. Průhyby se oproti kontrolnímu prvku snížily o 10 %.

Vzorek 4 s třídou betonu C55/67 a $4,5 \text{ kg/m}^3$ vláken vykazoval přibližně stejné poškození jako vzorek 5, tab. 1 (sloupec 4 vs. sloupec 5 v tab. 1). Z toho je možné usoudit, že dvojnásobné zvětšení množství vláken ze $4,5$ na 9 kg/m^3 má přibližně stejný význam z hlediska výbuchové odolnosti železobetonového prvku jako dvojnásobné zvýšení třídy pevnosti betonu, z C30/37 na C55/67. U obou prvků nebylo dosaženo průrazu. Celkový objem vytrženého betonu byl $0,05 \text{ m}^3$ (1,9 % z celkového ob-

jemu) u prvku C55/67 se $4,5 \text{ kg/m}^3$ vláken a $0,06 \text{ m}^3$ (2,2 % z celkového objemu) u prvku C30/37 a 9 kg/m^3 vláken. I ostatní hodnoty z tab. 1 jsou u těchto prvků podobné. Rozdíl v průhybech je $300/260 \text{ mm}$ (15 %). Pouze způsob porušení se u těchto vzorků lišil, viz porovnání sloupců 1 a 2 v tab. 1.

Porovnání dvou prvků z betonu C30/37, ale s různým obsahem PP vláken ($9 \times 4,5 \text{ kg/m}^3$): tvar a způsob porušení jsou přibližně stejné. Rozsah poškození se s rostoucím obsahem vláken velmi snížil (sloupec 5 vs. sloupec 2 v tab. 1). U prvku s více vlákny nebylo dosaženo proražení. Horní povrch byl poškozen pouze malými povrchovými výtržemi, pravděpodobně se jedná o krátery od projektilů stoličky nálože. Plochy porušení se u horního a spod-



Obr. 1 Vzorek č. 1 poškozený výbuchem – horní povrch ■ Fig. 1 Damaged specimen No. 1 after blast – top view

Obr. 2 Vzorek č. 1 poškozený výbuchem – dolní povrch ■ Fig. 2 Damaged specimen No. 1 after blast – bottom view

Obr. 3 Vzorek č. 2 poškozený výbuchem – horní povrch ■ Fig. 3 Damaged specimen No. 2 after blast – top view

Obr. 4 Vzorek č. 2 poškozený výbuchem – dolní povrch ■ Fig. 4 Damaged specimen No. 2 after blast – bottom view

Obr. 5 Vzorek č. 3 poškozený výbuchem – horní povrch ■ Fig. 5 Damaged specimen No. 3 after blast – top view

Obr. 6 Vzorek č. 3 poškozený výbuchem – dolní povrch ■ Fig. 6 Damaged specimen No. 3 after blast – bottom view

Obr. 7 Vzorek č. 4 poškozený výbuchem – horní povrch ■ Fig. 7 Damaged specimen No. 4 after blast – top view

Obr. 8 Vzorek č. 4 poškozený výbuchem – dolní povrch ■ Fig. 8 Damaged specimen No. 4 after blast – bottom view

Obr. 9 Vzorek č. 5 poškozený výbuchem – horní povrch ■ Fig. 9 Damaged specimen No. 5 after blast – top view

Obr. 10 Vzorek č. 5 poškozený výbuchem – dolní povrch ■ Fig. 10 Damaged specimen No. 5 after blast – bottom view

ního povrchu snížily o 67 %. Poškození boků bylo také zcela eliminováno. Celkový objem vytrženého betonu se snížil o 60 %. Průhyby se oproti kontrolnímu prvku snížily o 30 %.

Při porovnání dvou vzorků se stejným obsahem vláken, ale rozdílnou třídou betonu (C30/37 vs. C55/67) je patrné, že tvar a způsob porušení je přibližně stejný. Rozsah poškození se s vyšší třídou betonu velmi snížil (sloupec 4 vs. sloupec 2 v tab. 1). U prvku s vyšší třídou betonu nebylo dosaženo proražení tlakovou vlnou. Horní povrch byl poškozen pouze malými povrchovými výtržemi, pravděpodobně od projektilů stoličky nálože. Plochy porušení se u spodního povrchu snížily o 60 %. Poškození boků bylo také zcela eliminováno. Celkový objem vytrženého betonu se snížil

o 67 %. Průhyby se oproti prvku s nižší třídou betonu snížily o 19 %.

Výsledky experimentů jsou dokumentovány na obr. 1 až 10.

NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ VÝBUCHU

Rychlé dynamické jevy se obvykle řeší metodou explicitní časové integrace (diferenční metoda) (obr. 11). Pohybová rovnice (1)

$$Mu''(t) + C u'(t) + K u(t) = p(t) \quad (1)$$

se pak vyjádří jako (2)

$$M_n u_n'' + C_n u_n' + K_n u_n = p_n \quad (2)$$

a je řešena v čase t_n , tedy na začátku daného časového kroku. M značí matici hmotnosti, C matici útlumu a K matici tuhosti.

Metoda je založena na předpokladu lineární změny posunu. Rychlost je možné vyjádřit jako

$$u'_{n+1/2} = \frac{1}{\Delta t_{n+1/2}} (u_{n+1} - u_n), \quad (3)$$

což se pak dosadí do rovnice zrychlení

$$u'' = \frac{1}{\Delta t_n} (u'_{n+1/2} - u'_{n-1/2}). \quad (4)$$

V rovnici (2) zůstává neznámou u_{n+1} . Posun v čase t_{n+1} je

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\Delta t^2} M_n + \frac{1}{2\Delta t} C_n \right) u_{n+1} = \\ = p_n - \left(K_n - \frac{2}{\Delta t^2} M_n \right) u_n - \\ - \left(\frac{1}{\Delta t^2} M_n - \frac{1}{2\Delta t} C_n \right) u_{n-1}. \end{aligned}$$

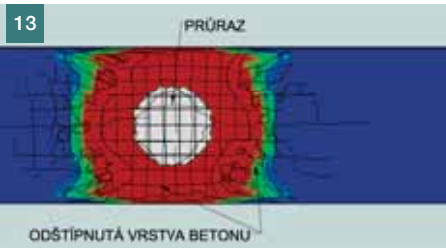
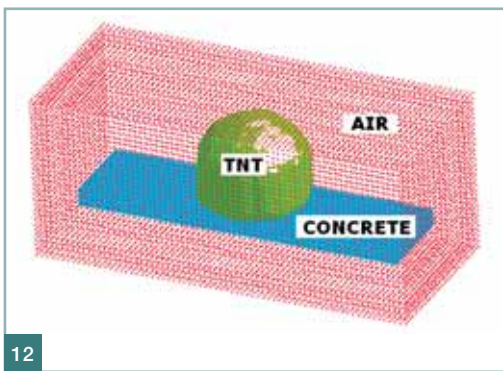
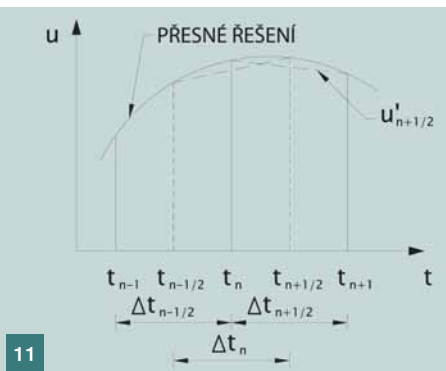
Matice M a C jsou diagonální, řešení jednoduché a rychlé.

Při explicitní časové integraci je soustava v rovnováze pouze v čase t_n , nikoli v čase t_{n+1} . Metoda nemá obvykle problém s konvergencí, je stabilní, pokud je časový krok, jehož velikost závisí na nejvyšší vlastní frekvenci soustavy, dostatečně malý. Explicitní časová integrace neřeší tedy velký počet rovnic, vyžaduje ale velký počet velmi malých časových kroků délky řádově 10^{-6} až 10^{-8} s. Z tohoto vyplývá, že meto-

Obr. 11 Metoda explicitní časové integrace (diferenční metoda) ■
Fig. 11 The explicit time integration method (finite difference method)

Obr. 12 Uspořádání výpočetního modelu ■ Fig. 12 Set-up of the FE model

Obr. 13 Srovnání výsledků numerického modelu vzorku č. 1 s experimentem ■
Fig. 13 Comparison of the numerical modelling and the experiment, specimen No. 1, C30/37 – no fibres, soffit of the specimen



da explicitní časové integrace je vhodná pouze pro krátké procesy.

Numerické modelování realizovaných experimentů je prováděno v solveru LS-DYNA určeném pro nelineární analýzu rychlých dynamických jevů, jako je výbuch a náraz. V rámci výpočtu se mění síť konečných prvků a jsou mazány prvky, u kterých byla vyčerpána jejich únosnost. Výpočetní model se skládá z několika částí. Vzduch (air) definuje hranice modelu, výbušnina (TNT) do něj přenáší energii výbuchu, kde se dále šíří. Betonový prvek (concrete) je modelován objemovými prvky. Příklad uspořádání modelu je uveden na obr. 12.

Vzduch je modelován materiálem 009-Null s nedeformovatelnou sítí konečných prvků. Betonový prvek je modelován materiálem 159-CSCM_Concrete_material_model jako křehký materiál s poškozením. Výbušnina je modelována materiálem 008-High_explosive_burn_material. Přetlak v čele rázové vlny výbuchu je vypočten pomocí stavové rovnice (JWL EOS):

$$\rho = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (5)$$

Byly zpracovány výpočetní modely železobetonových zkušebních prvků se zahrnutím podélné i příčné výztuže, včetně spon. Výztuž byla modelována jako prutové prvky odpovídajících materiálových a průřezových charakteristik.

Pro vyhodnocení vzorků č. 2, 4 a 5 byl materiálový model upraven, aby jeho přetvárné chování odpovídalo chování vláknobetonu. Kalibrace materiá-

lových modelů vláknobetonu byla provedena na základě experimentů popsaných v [3].

Numerické modelování železobetonových prvků i prvků ze železobetonu s PP vlákny ukázalo velkou shodu s provedenými experimenty. Shoda byla studována proložením kontur poškození vzorků do výstupů z numerických modelů (obr. 13). Detailní popis kalibrace numerických modelů bude předmětem dalších publikací autorů.

ZÁVĚR

Článek prezentuje výsledky experimentů zaměřených na vliv přidávaných vláken, třídy pevnosti betonu a jejich kombinace na výbuchovou odolnost železobetonu. Experimenty byly prováděny na železobetonových deskách (0,3 × 1,5 × 6 m) s 25 kg TNT umístěnými v konstantní vzdálenosti od zkušebních vzorků.

Experimenty ukázaly pozitivní vliv přidávaných vláken na výbuchovou odolnost vzorků. Snížil se objem úlomků, charakter porušení se změnil z křehkého na duktilní. Úlomky jsou vláknité drženy pohromadě, mají větší hmotnost, a tím pádem mohou doletět jen do omezené vzdálenosti. Experimenty prokázaly pozitivní vliv vyšší třídy pevnosti betonu na výbuchovou odolnost vzorků. Prvky z lepšího betonu byly méně poškozeny, vyznačovaly se menším průhybem, menší byla i plocha průřezu. Tvar odštipnutého betonu na spodním povrchu vzorků je obdobný, nicméně plocha se významně zmenšila.

Kombinace přidávaných vláken a zvýšení pevnosti betonu se ukázala velice efektivní pro zvýšení výbuchové odolnosti vzorků. Vzorek z vysokopevnostního betonu (C55/67) s 4,5 kg/m³ (0,5 % objemu) vláken se vyznačoval podobnou výbuchovou odolností jako prvek z betonu běžné pevnosti (C30/37) s dvojnásobným obsahem vláken (9 kg/m³, 1 % objemu), kterého je už ale obtížné dosáhnout na stavbě. Dvojnásobný obsah vláken zvýšil výbuchovou odolnost

vzorku stejně jako dvojnásobně zvýšená tlaková pevnost betonu.

V důsledku výbuchu jsou do okolí železobetonových vzorků vysokou rychlostí vystřelovány úlomky betonu z krycí vrstvy výztuže a chovají se jako projektily vystřelené z děla. Mohou způsobit těžká poranění osob, které se nacházejí ve vzdálenosti, která již není ohrožena primárním účinkem rázové vlny. Redukce objemu úlomků zvýšením třídy pevnosti betonu či přidáním vláken představuje význačné zvýšení celkové bezpečnosti betonových konstrukcí při extrémním zatížení.

Tento článek byl zpracován v rámci řešení grantového projektu ČVUT v Praze SGS12/029/OHK1/1T/ a projektu Ministerstva průmyslu a obchodu FR-TI3/531.

Ing. Marek Foglar, Ph.D.
e-mail: marek.foglar@fsv.cvut.cz



Ing. Martin Kovář

Prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc.



všichni: Katedra betonových konstrukcí
Fakulta stavební ČVUT v Praze 6
Thákurova 7, 166 00 Praha 6

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

Literatura:

- [1] Foglar M., Sochorová E., Kovář M., Kohoutková A., Křístek V.: Výbuchová odolnost mostní konstrukce ze železobetonu a železobetonu s PP vlákny. Beton TKS 4/2011, pp. 36–39
- [2] Foglar M., Karasová E., Křístek V., Kohoutková A. (2010): Využití přetvárných vlastností vláknobetonu pro zvýšení odolnosti staveb proti zatížení výbuchem a nárazy. Beton TKS 2/2010, 2, pp. 50–52
- [3] Drahorád M., Foglar M., Veselý P., Smiřinský S. (2012): Užítí dynamického faktoru nárůstu pevnosti pro zkrácení doby trvání zkoušek vláknobetonových vzorků, Beton TKS 1/2012, pp. 74–79