

# VÝBUCHOVÁ ODOLNOST MOSTNÍ KONSTRUKCE ZE ŽELEZOBETONU A ŽELEZOBETONU S PP VLÁKNY ■ BLAST RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE WITH PP FIBRES BRIDGE DECK

Marek Foglar, Eva Sochorová, Martin Kovář,  
Alena Kohoutková, Vladimír Křístek

Príspevek shrnuje výsledky zkoušek výbuchové odolnosti železobetonové mostní konstrukce a mostní konstrukce ze železobetonu s PP vlákny konaných za spolupráce s Policií ČR a Armádou ČR ve vojenském prostoru Boletice v listopadu 2010. ■ Field tests of FRC and reinforced concrete specimens were performed in cooperation with the Czech Army corps and Police of the Czech Republic in the military training area Boletice. The test were performed using real scale precast slabs and 25kg of TNT charges placed in distance from the slab for better simulation of real in-situ conditions. The paper presents primary results of the tests.

V souvislosti se současnou celosvětovou politickou situací a nárůstem objemu teroristických útoků na objekty dopravní a veřejné infrastruktury je nutné věnovat zvýšenou pozornost výbuchové odolnosti staveb. Mostní stavby představují velice vítané cíle pro militantní extremisty všeho druhu, kteří chtějí pomocí malého množství lokálních útoků dosáhnout svých do značné míry globálních cílů.

V návaznosti na článek [3] bylo v rámci řešených výzkumných úkolů přistoupeno k experimentálnímu ověření nabytých znalostí v oblasti výbuchové odolnosti železobetonu a vláknobetonu, šíření výbuchové rázové vlny v prostoru a jejího vlivu na zdraví osob.

Pro tento účel byla provedena rozsáhlá rešeršní činnost dostupné zahraniční literatury v oblasti výbuchové odolnosti prvků ze železobetonu a vláknobetonu ([1], [2], [5], [6], [7], [8], [9] a mnohé další). Bylo zjištěno, že až na zcela ojedinělé experimenty publikované v [6] a [7] jsou výbuchové experimenty prováděny na relativně malých vzorcích. Zcela výjimečně jsou užívána zkušební tělesa o jednom rozměru větším jak 2 m. Důvody jsou celkem pochopitelné: příprava i realizace výbuchových experimentů jsou organizačně i finančně velice náročné a podléhají rozsáhlým bezpečnostním omezením. Proto jsou i používané náložky relativně malé a neodpovídají tak velikostem náloží, které mohou být na mostní konstrukci dopraveny pěšky, či v prostředích hromadné dopravy se pohybujícím jednotlivým útočníkem.

## EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Experimentální program si klade za cíl (i při omezeném rozpočtu) poskytnout relevantní a dále využitelné údaje. Článek obsahuje popis uspořádání uskutečněných experimentů a jejich výsledky.

### Zkušební tělesa

Rozměry zkušebních těles byly navrženy s ohledem na vyvíjející schopnost experimentů a přepravní a manipulační možnosti.

Zkušební tělesa byla navržena v plném měřítku jako most malého rozpětí, výšky 0,3 m při délce 6 m. Šířka byla z pře-

pravních a manipulačních důvodů omezena na 1,5 m. Oba zkušební vzorky byly vyztuženy běžnou betonářskou výztuží, 11Ø16 při obou površích v podélném směru, Ø10 po 150 mm ve směru příčném. Smyková výztuž byla tvořena sponami Ø8 (9 ks/m<sup>2</sup>). Byl užit beton C30/37-X0 a betonářská výztuž B500B podle ČSN EN 1992-1-1.

Do betonu druhého zkušebního tělesa bylo navíc přidáno 4,5 kg/m<sup>3</sup> PP vláken Forta Ferro délky 54 mm.

### Uspořádání experimentů

Sada zkoušek byla provedena za spolupráce s Policií ČR a Armádou ČR ve vojenském prostoru Boletice v listopadu 2010. Zkoušky byly připraveny v místech bývalé dopadové plochy dělostřelecké střelnice v nadmořské výšce 900 m n. m., která je v současné době užívána pro zneškodňování munice s prošlou dobou trvanlivosti a munice z 2. světové války nalézané při stavebních pracích.

Zkušební vzorky byly umístěny na dvou dřevěných kmenech průměru cca 350 mm, které byly zajištěny proti posunutí beraněnými ocelovými trubkami. Mezi kmeny v místě pod budoucím zkušebním vzorkem byl zřízen výkop o průměru cca 4,5 m a hloubce 1 m. Výkop měl zmírnit vliv odrazu výbuchové rázové vlny na experimentální těleso.

Náložky 25 kg TNT byly uloženy na ocelové stoličky zřízené ze tří třmínků z betonářské výztuže Ø10 mm (betonářská výztuž B500B) přivařených na ocelový plech tloušťky 3 mm (ocel S235) umístěné uprostřed zkušebních těles. Stoličky zajistily 450 mm odstup náložky od zkušebního vzorku, což, spolu s užitím výše zmíněného technického řešení, odpovídá průměrné výšce zavazadlového prostoru osobního vozidla nad povrchem komunikace.

Náložky byly zakryty vlněnou příkrývkou. Podle spolupracujícího pyrotechnika Policie ČR je pomocí zakrytí docíleno zvýšení lokálního účinku výbuchové rázové vlny o cca 10 až 20 %. Zároveň představuje vlněná příkrývka maskování náložky v zavazadlovém prostoru, a znesnadňuje tak její objevení při rutinní silniční prohlídce.

Před konáním ostrých zkoušek byly provedeny dva zkušební výbuchy (5 a 25 kg TNT) pro kalibraci měřicí aparatury zaznamenávající přetlak na čele rázové vlny.

Uspořádání experimentů je dokumentováno na obr. 1. Náložky byly odpáleny dálkově příslušníky Armády ČR.

### Výsledky experimentů

Experimenty prokázaly pozitivní vliv přidání PP vláken na výbuchovou odolnost železobetonových zkušebních těles. Těleso s přidáním vláken mělo menší hodnotu průrazu při horním i dolním povrchu (60 %) a také menší plochu odštípnuté krycí vrstvy betonu pod spodní betonářskou výztuží (64 %) i po stranách zkušebních prvků.

Průraz horního povrchu železobetonového vzorku je zobrazen na obr. 2, průraz horního povrchu vzorku z vláknobetonu na obr. 3. Stav spodního povrchu obou vzorků po výbuchu je zachycen na obr. 4.



Obr. 1 Uspořádání experimentů ■ Fig. 1 Layout of the experiments

Obr. 2 Průřez horního povrchu železobetonového vzorku ■ Fig. 2 Top surface of the RC specimen after the blast

Obr. 3 Průřez horního povrchu vláknobetonového vzorku ■ Fig. 3 Top surface of the FRC specimen after the blast

Obr. 4 Porovnání stavu spodního povrchu obou zkušebních těles po zkouškách ■ Fig. 4 Soffit of the specimens after the blast



Odštípnutí krycí vrstvy betonu sleduje průběh podélné výztuže prvku. Na zkušebních vzorcích došlo i k oddělení betonu od výztuže po jejich stranách. Lze předpokládat, že v případě širších zkušebních vzorků by převážilo deskové chování a k poškození krajů desky by nedocházelo, poškození by se lokalizovalo pod náloží; obvod porušeného betonu by byl větší, ale pravidelný, bez dosahů přes okraje. Větší vzorky nebylo bohužel možné z přepravních a tím indukovaných finančních důvodů realizovat.

Naopak trvalý průhyb zkušebního železobetonového vzorku s přidáním vláken byl o 22 % větší. Tento fakt lze přisoudit větší schopnosti vzorku z vláknobetonu pojmout energii výbuchu, aniž by došlo ke smykovému selhání (*shear-punching failure*).

Přehled výsledků experimentu, rozdíly v průřezech, odštípnuté vrstvě vespod i na stranách zkušebních těles a průhybech, je uveden v tab. 1.

### Šíření tlakové vlny od výbuchu

Jak bylo uvedeno v úvodu, experiment se zaměřil nejen na výbuchovou odolnost betonu, ale kladl si za cíl ověřit šíření výbuchové rázové vlny (VRV) v prostoru a výpočet hodnoty dopadajícího přetlaku v jejím čele. Bylo navrženo rozmístění měřících bodů na spirále se středem v místě nálože.

Z důvodu bezpečnosti osob a měřícího vybavení bylo rozhodnuto o rozmístění čtyřech čidel ve vzdálenostech 15, 20, 25 a 30 m od nálože. Pro výpočet hodnoty přetlaku byl užit následující vzorec:

Tab. 1 Shrnutí výsledků experimentů ■ Tab. 1 Comparison of blast performance of RC and RC with plastic fibers

Poškození	Železobetonový vzorek (1)	ŽB vzorek s plastovými vlákny (2)	(2)/(1) [%]
Průřaz při horním povrchu [m <sup>2</sup> ]	0,43	0,26	60
Odštipnutá vrstva betonu při spodním povrchu < krytí výztuže [m <sup>2</sup> ]	2,35	1,89	80
Odštipnutá vrstva betonu při spodním povrchu > krytí výztuže [m <sup>2</sup> ]	1,71	1,09	64
Odštipnutá vrstva betonu při levém okraji < krytí výztuže [m <sup>2</sup> ]	0,35	0	-
Odštipnutá vrstva betonu při levém okraji > krytí výztuže [m <sup>2</sup> ]	0,52	0,05	10
Odštipnutá vrstva betonu při pravém okraji < krytí výztuže [m <sup>2</sup> ]	0,23	0,11	48
Odštipnutá vrstva betonu při pravém okraji > krytí výztuže [m <sup>2</sup> ]	0,34	0,16	47
Trvalý průhyb [m]	0,31	0,37	122

Tab. 2 Přetlaky v čele VRV a impulzy přetlakových částí, porovnání měření a výpočtu ■ Tab. 2 Blast overpressures, comparison of calculated and measures values

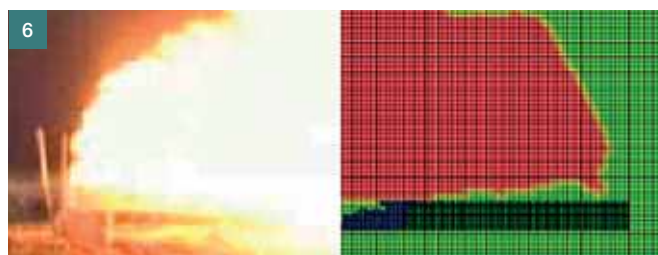
Výbuch číslo 3	čidlo 1	čidlo 2	čidlo 3	čidlo 4
hmotnost nálože [kg]	25	25	25	25
vzdálenost [m]	15	20	25	30
naměřený dopadající přetlak [kPa]	49,2	18,7	13,8	15,5
impulz přetlakové části [kPa·ms]	159,6	129,2	127,5	89,9
vypočtený dopadající přetlak [kPa]	44,8	26,4	18,5	14
naměřený / vypočtený přetlak [%]	110	71	75	110

$$\Delta P_s = \frac{93,2}{Z} + \frac{383}{Z^2} + \frac{1275}{Z^3},$$

kde Z je redukováná vzdálenost,  $Z = R / W^{1/3}$ , R je vzdálenost od epicentra výbuchu, W je hmotnost nálože (TNT).

Za spolupráce s Technickou univerzitou Pardubice byly během experimentů zaznamenávány hodnoty přetlaku v čele rázové vlny výbuchu. Měření vzdušných rázových vln bylo provedeno pomocí tužkových tlakových senzorů typ ICP 137A23 firmy PCB. Signál ze snímačů byl pomocí převodníku PCB odečítán na čtyřkanálovém osciloskopu Tektronix TDS3014B. Napětí byli přepočítáno na tlak na základě údajů kalibračních certifikátů jednotlivých čidel. Pro spouštění měření byl použit externí signál 17 V generovaný vybitím kondenzátorů po zkratování ionizačního čidla umístěného na trhavině.

Čidla byla vložena do polyuretanové pěny a zakopána tak, aby jejich citlivá část byla v úrovni terénu. Důvodem pro toto uspořádání byla snaha eliminovat zkreslení signálu případným odrazem od země v průběhu testování na panelech, kdy byla výška nálože cca 1 m nad okolní terén.



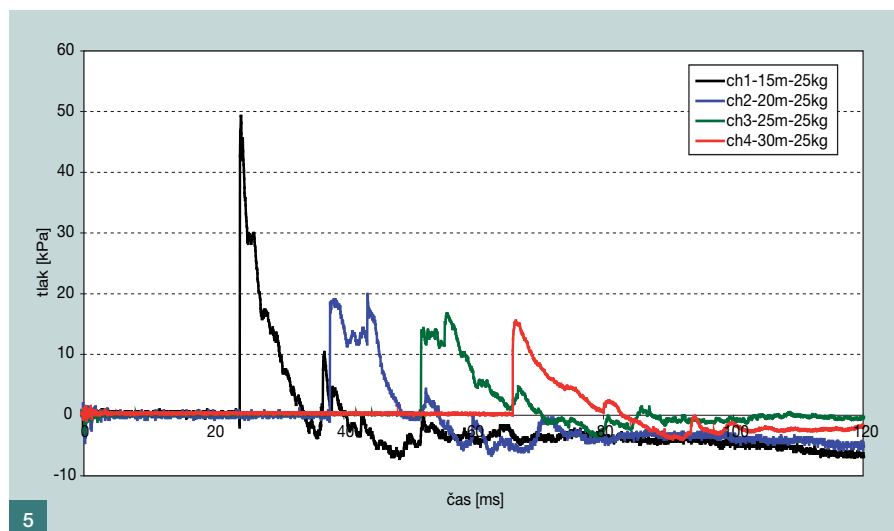
Čidla byla rozmístěna tak, aby se žádná dvě nevyskytovala v zákrytu ve směru od nálože.

Tab. 2 ukazuje výsledky měření dopadajícího přetlaku v čele výbuchové vlny a jejich porovnání s vypočtenými hodnotami, obr. 5 poskytuje časový průběh tlaku VRV při výbuchu číslo 3. Vzhledem k místním podmínkám a uspořádání experimentu je shoda velice dobrá.

Z porovnání hodnot uvedených v tab. 2 se zranitelností osob přetlakem publikovanou v [4] je patrné, že výbuch nálože síly 25 kg TNT ekvivalentu by jen účinkem své tlakové vlny způsobil jistou smrt osob v okruhu 8 m od epicentra, smrtelná a těžká zranění osob do vzdálenosti 19 m. Hodnocen není devastující účinek střepů či úlomků konstrukcí a vozidel na lidské životy.

### Numerické modelování výbuchu

Modelování výbuchů a rychlých dynamických jevů obecně vyžaduje užití speciálních výpočetních nástrojů a velký objem práce potřebný ke kalibraci komplexních materiálových modelů. Odměnou za vynaložené úsilí jsou vypočtené průběhy přetlaků v čele rázové vlny, časový průběh šíření výbuchové vlny v materiálu a tvar porušení prvku.



Obr. 5 Časový průběh tlaku VRV při výbuchu č. 3 ■ Fig. 5 Time-plot of the blast overpressure wave, blast No. 3

Obr. 6 Porovnání modelu a skutečného tvaru šíření výbuchové vlny ■ Fig. 6 Comparison of the FEM model and photo of the blast propagation

## Literatura:

- [1] *Buchan P. A. & Chen J. F.*: Blast resistance of FRP composites and polymer strengthened concrete and masonry structures – A state-of-the-art review. *Composites: Part B* 38, 2007, pp. 509–522
- [2] *Coughlin A. M. & al.*: Behavior of portable fiber reinforced concrete vehicle barriers subject to blasts from contact charges. *International Journal of Impact Engineering*, 37, 2010, 5, pp. 521–529
- [3] *Foglar M. & al.*: Využití přetvárných vlastností vláknobetonu pro zvýšení odolnosti staveb proti zatížení výbuchem a nárazy. *Beton TKS*, 10, 2/2010, pp. 71–73
- [4] *Makovička D., Makovička D. jr.*: Odezva konstrukce budovy a ohrožení jejích obyvatel výbuchem plynu, *Stavební obzor* 7/2006, s. 197–202
- [5] *Millard S. G. & al.*: Dynamic enhancement of blast resistant ultra high performance fiber-reinforced concrete under flexural and shear loading. *International Journal of Impact Engineering*, 37, 2010, 4, pp. 405–413
- [6] *Schenker A. & al.*: Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads. *International Journal of Impact Engineering*, 35, 2008, 3, pp. 184–198
- [7] *Seible F. & al.*: Protection of our bridge infrastructure against man-made and natural hazards. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 4, 2008, No. 6, 415–429
- [8] *Wu C. & al.*: Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs. *Engineering Structures*, 31, 2009, 9, pp. 2060–2069
- [9] *Štoller J.*: Reakce na článek „Využití přetvárných vlastností vláknobetonu pro zvýšení odolnosti staveb proti zatížení výbuchem“, *Beton TKS*, 10, 2010, 5, pp. 84–86

Práce na numerických modelech prezentovaných experimentů začaly dlouho před jejich konáním a nejsou dosud ukončeny. Vytvářeny a kalibrovány jsou 2D i 3D modely železobetonových i železobetonových prvků s vlákny za užití solveru LS-DYNA zaměřeného na rychlé dynamické jevy.

Obr. 6 poskytuje příklad porovnání modelu a skutečného tvaru šíření výbuchové vlny a poškození zkušební vzorku krátce po detonaci.

## ZÁVĚR

Polní experimenty zaměřené na výbuchovou odolnost prvků ze železobetonu a železobetonových prvků s PP vlákny prokázaly, že prvky z vláknobetonu se vyznačují díky svým přetvárným charakteristikám větší odolností proti zatížení výbuchem. Ta se projevuje menším průrazem a menším objemem vzniklých odštěpků betonu při spodním povrchu konstrukce. Prvky z vláknobetonu měly větší plastický průhyb způsobený jejich větší duktilitou, a tím danou schopností přežít extrémní zatížení, jemuž jsou vystaveny. Během experimentů byl zaznamenán průběh přetlaku na čele výbuchové rázové vlny, výsledky prokázaly shodu s teoretickým řešením.

Článek byl zpracován v rámci řešení VZ 04 CEZ MSM 6840770005, grantového projektu ČVUT v Praze SGS10/137/OHK1/2T/11 a projektu č. 103/09/2071 GA ČR.



Ing. Eva Sochorová

Ing. Marek Foglar, Ph.D.



Prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc.

Ing. Martin Kovář



Prof. Ing. Vladimír Křístek, DrSc.



všichni: Katedra betonových a zděných konstrukcí  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

# RSTAB RFEM

**Vyzkoušejte naše programy  
Bezplatné zapůjčení licence**



## RSTAB 7

Program pro výpočet prutových konstrukcí



## RFEM 4

Program pro výpočet prostorových konstrukcí metodou konečných prvků

■
■
■
■
■
■

- ➔ Podpora nových evropských norem
- ➔ Různé národní přílohy
- ➔ Cena programu již od 33 450 Kč
- ➔ Česká verze včetně manuálů

Bezplatná studentská verze

Demoverze zdarma ke stažení

**www.dlupal.cz**

Ing. Software Dlubal s.r.o.  
Anglická 28, 120 00 Praha 2  
Tel.: +420 221 590 196  
Fax: +420 222 519 218  
[www.dlupal.cz](http://www.dlupal.cz)  
[info@dlupal.cz](mailto:info@dlupal.cz)

