



NAVRHOVÁNÍ A TESTOVÁNÍ OCHRANNÝCH STAVEB

Jiří Štoller¹, Petr Dvořák², Josef Fládr³, Jan Hanudel⁴

ABSTRAKT

Článek pojednává o výzkumu v oblasti ochranných staveb na katedře ženijních technologií Univerzity obrany. Výzkum je zaměřen na navrhování a testování ochranných staveb. Navrhování staveb je zaměřeno na hledání vhodného materiálu pro nosnou konstrukci ve spolupráci s ČVUT. V současnosti směřuje vývoj materiálového modelu k cementovému kompozitu vyztuženému drátky. Testování materiálu a konstrukcí probíhá ve vojenských výcvikových prostorech v těsné spolupráci s jednotkami ženijního vojska AČR.

Klíčová slova: kritická infrastruktura, ochranná stavba, drátkobetonu

ABSTRACT

The article discusses the research in the field of protective structures at the Department of Engineer Technology, University of Defence. Research is focused on the design and testing of protective structures. The design is aimed at finding a suitable material for the supporting structure in cooperation with the Czech Technical University. Currently the development of a material model is aimed at cementitious composites reinforced with wires. Testing of materials and structures takes place in military training areas in close collaboration with the engineer units of the Army of the Czech Republic.

Key words: critical infrastructure, protective construction, steel fibre reinforced concrete

¹ Jiří Štoller, Ing., Ph.D., Univerzita obrany, Katedra ženijních technologií, Kounicova 65, 662 10 Brno, Česká Republika, email: jiri.stoller@unob.cz

² Petr Dvořák, Ing. Ph.D. Univerzita obrany, Katedra ženijních technologií, Kounicova 65, 662 10 Brno, Česká Republika, email: petr.dvorak@unob.cz

³ Josef Fládr, Ing. Stavební fakulta ČVUT v Praze, Thákurova 7, 166 29, Praha 6, Česká Republika, email: josef.fladr@fsv.cvut.cz

⁴ Jan Hanudel, Ing. Univerzita obrany, Katedra ženijních technologií, Kounicova 65, 662 10 Brno, Česká Republika, email: jiri.stoller@unob.cz

ÚVOD

Nutnost balistické ochrany kritické infrastruktury je jednou z možných odpovědí na hrozby, které vyplývají z antropogenních hrozeb v současné společnosti. Nemusí se nutně jednat o teroristický útok nebo ohrožení vlivem válečného konfliktu ale může být odpovědí na havárie způsobené selháním technologie či lidského faktoru. Tuto teorii podporuje nedávná politováníhodná událost v muničním skladu ve Vrběticích. V objektech kritické infrastruktury slouží nebo mohou sloužit ochranné stavby jako úkryt před možným nebezpečím v důsledku jakékoliv havárie. Tyto ochranné stavby mohou sloužit také jako chráněná místa ke zdolávání následků havárií. V současné době není problematice ochranných staveb u kritické infrastruktury věnována dostatečná pozornost. V mnoha případech jakákoliv ochranná stavba chybí. Tato skutečnost může ztěžovat práci složkám, které jsou odpovědné za likvidaci následků havárií.

V současnosti používané materiály pro balistickou ochranu jsou ve většině případů na bázi kovových materiálů, různých necementových kompozitních materiálů a betonů. U ochranných staveb je používán především beton, zejména z důvodu schopnosti pohltit energii tlakové vlny.

Ve 20. století byl na vojenské ochranné stavby používán železobeton zejména z důvodu jeho vhodných vlastností vůči balistickému zatížení. I přesto, že materiál v té době vykazoval dobré vlastnosti, s pokračujícím vývojem nových prostředků ničení vzrostl i požadavek na nové, odolnější stavební materiály.

Výzkum vysokopevnostního drátkobetonu pod balistickým zatížením probíhal na Univerzitě obrany v letech 2004 až 2006 v rámci zpracování disertační práce [1]. Zkušební vzorky vykazovaly třikrát větší odolnost vůči výbuchu plastické trhaviny PIHx 30 v porovnání se zkušebními vzorky z prostého betonu [1]. Použitá receptura betonové směsi byla stejná u obou typů vzorků. Pouhým přidáním drátků do směsi došlo k výraznému zvýšení odolnosti vůči průrazu. [1]

Později byl podobný projekt řešen na Vojenském výzkumném ústavu v Brně (2008), kde byly testovány vzorky drátkobetonu pod balistickým zatížením (průstřel). Výsledky výzkumu jsou využitelné pro navrhování nových a zatřídění stávajících ochranných staveb dle standardu Severoatlantické aliance.

Katedra ženižních technologií se dlouhodobě zabývá účinky zbraní na konstrukce vojenských staveb a tak je celkem logické, že došlo k domluvě o spolupráci v této oblasti s Katedrou betonových a zděných konstrukcí ČVUT v Praze, která vyústila v návrh zkoušek tohoto materiálu, které jsou nastíněny dále v textu článku.

1 MATERIÁLY PRO OCHRNNÉ STAVBY

1.1 BETON A ŽELEZOBETON

Beton jako konstrukční materiál široce používaný ve stavebnictví, má i podstatné dvě nevýhody. Je to jednak nízká pevnost při namáhání tahem a křehký charakter jeho porušení. Tyto nevýhody jsou v běžných konstrukcích odstraněny klasickým vyztužením, v podobě samostatných ocelových prutů, sítí nebo mřížovin. Tak jsou obě nevýhody betonu odstraněny, neboť vhodně umístěná výztuž je schopna zachytit jak výslednici tahových napětí, tak i zabránit křehkému porušení jednotlivých prvků konstrukce.

Umístěním prutové výztuže se sice změní chování konstrukce, avšak vlastnosti samotného betonu v konstrukci zůstávají stejné. Zvětšení tahové pevnosti a změny křehkého charakteru porušení betonu lze dosáhnout pouze přímým vyztužením jeho struktury. K takovému vyztužení je třeba použít výztužných prvků, jejichž velikost odpovídá velikosti složek, které strukturu betonu vytvářejí.

Tímto výztužným prvkem je krátké vlákno. Významnou předností betonu je to, že veškeré technologie jeho výroby vyztužení vlákny umožňují. Vlákna ovlivňují nejen vlastnosti ztvrdlého vláknobetonu, ale i vláknobetonu tvrdnoucího, popř. tuhnoucího, a v neposlední řadě také vlastnosti vláknobetonové směsi čerstvého drátkobetonu.

1.2 MATERIÁL HPFRC (HIGH PERFORMANCE FIBRE REINFORCED CONCRETE)

Cementové kompozity jsou materiály se slibnou budoucností. Možnosti tohoto materiálu ještě nebyly zcela objeveny a využity. Množství vědeckých institucí bádá v oblasti cementových kompozitů a snaží se odhalit nové možnosti v postupech míchání a vztahu použitých složek, technologie a výsledných vlastností.

Po nedávných pokusech zvýšit pevnost v tlaku je v současnosti možné ovlivnit a zlepšit další vlastnosti cementových kompozitů, jako například pevnost v tahu, tažnost, trvanlivost, mrazuvzdornost, elektrická vodivost, odolnost vůči namáhání chloridy, požární odolnost, objemovou stálost (smrštění nebo rozpínání), dále také odolnost materiálů například proti opotřebení nebo schopnost odolávat poškození v důsledku znečištění ovzduší.

Bylo vyvinuto mnoho typů speciálních materiálů obsahující cementy: beton vyztužený vlákny (FRC – fibre reinforced concrete), drátkobeton (SFRC – steel fibre reinforced concrete), beton vyztužený syntetickými vlákny (SSFRC – syntetic structural fibre reinforced concrete), samozhutnitelný beton (SCC – self-compacting concrete), vysokohodnotný beton (HPC – high performance concrete), ultra-vysokohodnotný beton (UHPC – ultra high performance concrete), vysokohodnotný beton vyztužený vlákny (HPFRCC - high performance fibre reinforced cementitious

composite), ultra-vysokohodnotný beton vyztužený vlákny (UHPFRCC - ultra high performance fibre reinforced cementitious composite), tvárný kompozitní materiál na bázi cementu standardně s rozptýlenou výztuží obvykle z polypropylénových mikrovláken (ECC - Engineered Cementitious Composite – High-Ductility Concrete), DUCTAL – obchodní značka pro vysokohodnotný beton od firmy LAFARGE, cementový kompozit získaný infiltrací cementové suspenze složené z cementu, popílku, plastifikátoru a vody, nebo z malty obsahující navíc písek do vrstvy ocelových vláken (SIFCON - slurry infiltrated fibre concrete) a další druhy cementových kompozitů. V průběhu let byly objeveny principy ovlivňující pevnost cementových kompozitů. Existuje mnoho faktorů ovlivňujících výslednou pevnost a další vlastnosti materiálů, ale jejich vzájemné spolupůsobení není přesně známo.

1.3 NÁVRH SMĚSI

Při složení materiálu na bázi HPFRC (obr. 1) je nejdůležitější složkou kamenivo, kdy nejvhodnějším je kamenivo z vyvřelých hornin (čedič). Kromě vhodného mineralogického složení je důležitá křivka zrnitosti kameniva. Ideální čára zrnitosti by se měla přibližovat idealizované čáře zrnitosti podle Bolomeye. Tato čára je platná pro drobné a hrubé složky kameniva. Při dodržení této čáry zrnitosti je zaručeno, že kamenivo bude tvořit pevnou kostru vyráběného materiálu. Zhotovená kostra kameniva je ztužena ocelovými drátky. Ocelové drátky musí být vyrobeny z vysokopevnostní oceli (pevnost v tahu kolem 200 MPa). Další významnou složkou je jemné (filer) kamenivo, které spolu s cementem vyplňuje malé póry a zabraňuje vzniku vzduchových dutin. Při výrobě HPFRC je nutné dodržet co nejnižší vodní součinitel w , protože velké množství vody zvyšuje pórovitost.

Zkušební vzorky, které byly testovány v rámci této zprávy, byly vyrobeny z HSFRC (high strength fibre reinforced concrete), vyvinutého na ČVUT v Praze, Fakultě stavební, Katedře betonových a zděných konstrukcí. Zkoušené vzorky z HSFRC jsou z kompozit na bázi cementu s užitím dvou rozdílných typů drátků, a to nejen v pevnostních charakteristikách, geometrii, ale i ve způsobu jejich výroby. Oba typy drátků jsou získány z odpadových materiálů. Tato skutečnost by měla být předností, před ostatními vláknobetonu neboť likvidace kovového odpadu zlepšuje životní prostředí.



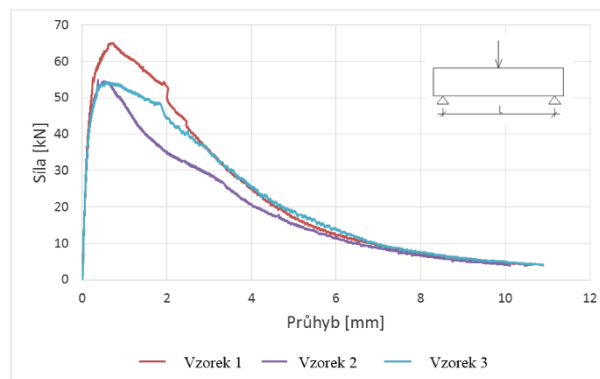
Obrázek 1 Řez vzorkem HPFRC

1.4 OVĚŘENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ

Ze směsi HPFRC použité pro výrobu zkušebních desek byla vyrobena zkušební tělesa, na kterých byly testovány základní materiálové vlastnosti jako tah za ohybu na trámcích o rozměru 150x150x700 mm (viz obr. 2), osový tlak na krychlích o hraně 150x150x150 mm, osový tlak na válcích rozměru 150x300 mm a příčný tah na krychlích o hraně 150x150x150 mm.

Zkušební tělesa pro uvedené zkoušky byla vyrobena na Fakultě stavební, ČVUT v Praze pro první sérii, vzorky pro druhou sérii byly vyráběny ve firmě IP systém v Olomouci.

Následující výsledky destruktivně zkoušených vzorků pocházejí z doprovodných zkoušek při výrobě druhé série ve firmě IP Systém v Olomouci.



Obrázek 2 Tah za ohybu

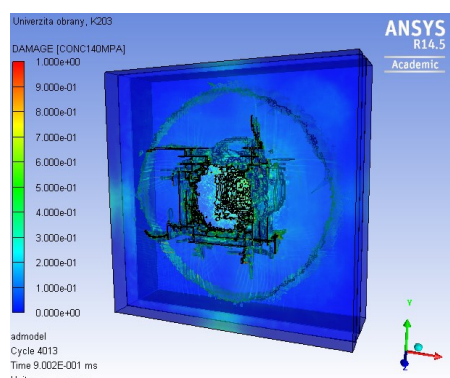
1.5 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ

Byly řešeny dva základní případy interakce rázové vlny s HPFRC deskou, výbuch plastické trhaviny na povrchu desky a výbuch nálože TNT v určité vzdálenosti od desky a její interakce s tlakovou vlnou. Všechny simulace byly provedeny v prostředí systému AUTODYN, jehož verzi určenou pro výzkumné účely vlastní Univerzita obrany. Jako základní materiálový model pro popis chování reálných drátkobetonových desek byl použit materiál CONC140MPA [3], který se z knihovnických materiálů obsažených v AUTODYNu nejvíce blíží námi použitému drátkobetonu. Vzhledem k vyšší pevnosti (cca o 10-30%) jsou vypočtené hodnoty příznivější, ale dají se uvažovat jako horní příznivá mez.

Simulace výbuchu plastické trhaviny na povrchu HPFRC desky



Obrázek 3 Sendvičová deska – příprava experimentu



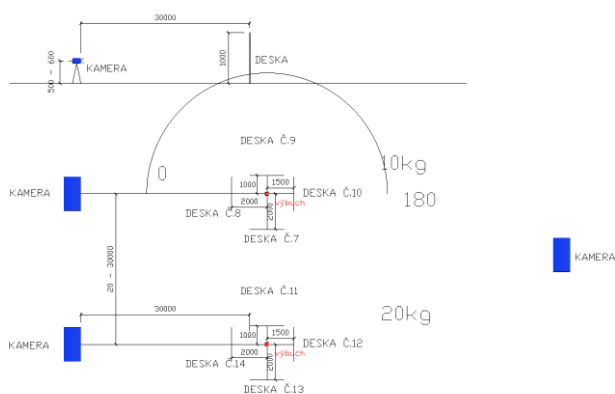
Obrázek 4 Sendvičová deska – Výsledné poškození sendvičové desky při kontaktním výbuchu 250g PlNp 10 – lícová strana

Pro účely porovnání výsledků numerické simulace a experimentu byl simulován výbuch 250 g PlNp 10 (obr. 3, 4) na povrchu sendviče z desek tloušťky 50 a 100 mm proložených pěnovým polystyrenem tloušťky 50 mm. Numerický model byl vytvořen v prostředí systému AUTODYN, kdy velikost elementu byla z hlediska vyvážení akceptovatelné přesnosti simulace a délky výpočtu stanovena na max. 2mm, byl tvořen celkem 8 mil. elementů, délka simulace byla stanovena na 1ms a celková doba trvání výpočtu na pracovní stanici HP Z800 (96 GB RAM, 2x6 \core XEON) byla asi 10 dní.

2 POLNÍ ZKOUŠKY ODOLNOSTI DESEK Z HPFRC ZATÍŽENÉ VÝBUchem TNT

2.1 USPOŘÁDÁNÍ EXPERIMENTU

Při experimentu byly použity panely rozměrů 0,05x1x1m a 0,1x1x1m. Panely byly umístěny do stojanů vyrobených z tenkostěnných uzavřených profilů. Profily byly fixovány proti posunu pomocí dřevěných kolíků. Panely byly testovány ve trojicích nebo čtveřicích (Obr. 5) na jednom pracovišti. Každá zkouška se sestavovala ze dvou pracovišť, tedy dvou výbuchů odpálených současně. Nálož se nacházela vždy uprostřed těchto panelů. Výsledné poškození sendvičové desky je vidět na obrázku 6. Výška nálože nad terénem byla 0,5 m. Nálož byla složena ze ženijních náložek TNT [2]. Náloživo, instalaci a odpálení zabezpečoval 15. ženijní pluk.



Obrázek 5 Umístění zkušebních desek do čtveřic a vysokorychlostních kamer při testech odolnosti proti tlakové vlně



Obrázek 6 Sendvičová deska – výsledné poškození desky při kontaktním výbuchu 250g PINp 10

2.2 ZKUŠEBNÍ VZORKY

Zkušební vzorky (panely rozměru 1x1 m tloušťek 50 a 100 mm) pro zkoušení odolnosti proti tlakové vlně byly vyrobeny z vysokohodnotného betonu vyztuženého ocelovými vlákny – drátky (z angl. High Performance Fibres Reinforced Concrete, dále jen HPFRC). Tento materiál se vyznačuje zvýšenými hodnotami mechanických vlastností. Nejdůležitější je tlaková pevnost, která musí být vyšší než 60 MPa podle předpisů sdružení RILEM. Dalším významným parametrem je vodonepropustnost, která je způsobena speciálním složením hrubého kameniva, písku a drobného kameniva.

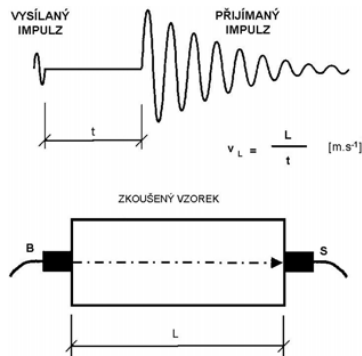
Průsak tlakové vody podle ČSN EN 12390-8 dosahuje hodnoty kolem 20 mm. Mezi další významné vlastnosti patří odolnost proti cyklickému zmrazování a rozmrazování, kdy materiál běžně odolává 150 až 200 cyklům zkoušených podle ČSN EN 12390-9. Všechny výše zmíněné vlastnosti umožňují jeho používání pro konstrukce vystavené působení povětrnosti. I při náročných klimatických podmínkách dosahuje daný materiál dlouhé životnosti bez nutnosti údržby

2.3 MĚŘENÍ DESEK PŘED A PO ZATÍŽENÍ VÝBUchem TNT POMOCÍ ULTRAZVUKU

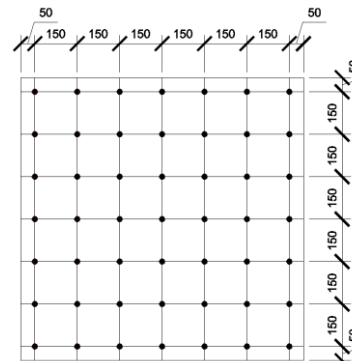
Ultrazvuková impulsová metoda je založena na měření rychlosti šíření impulsů ultrazvukového (UZ) vlnění. U různých materiálů je rychlost šíření UZ vln funkcí jejich vlastností (pro vzduch cca 330 m.s⁻¹, ve vodě cca 1500 m.s⁻¹, v oceli cca 5000 - 6000 m.s⁻¹, v betonu cca 3000 – 5000 m.s⁻¹). Ultrazvuková metoda byla zvolena pro zjištění kvality materiálu a změn, které nastanou po zatížení desky výbuchem TNT.

Pro stanovení rychlosti šíření ultrazvuku měříme, pomocí ultrazvukového přístroje, dobu průchodu ultrazvukových impulsů materiálem mezi budičem a snímačem (viz obr. 7). Měření bylo provedeno na síti bodu dle obrázku 8. Pokud je

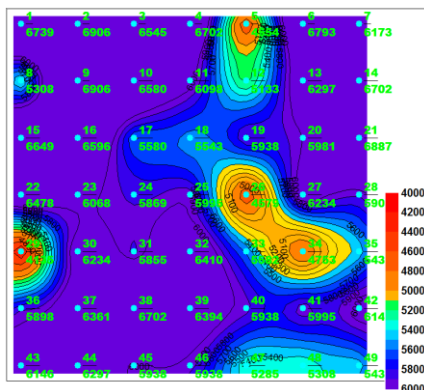
teplota zkušební vzorku při měření v rozmezí +5°C až +30°C, výsledky se s ohledem na teplotu nekorigují.



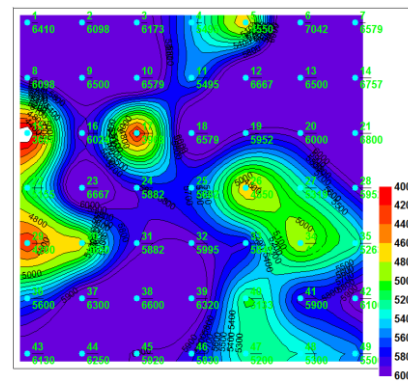
Obrázek 7 Měření doby průchodu impulsu UZ vlněním zkoušeným materiálem



Obrázek 8 Nakreslená síť na každé desce



Obrázek 9 Rozložení izovel zkušební desky před zatížením výbuchem



Obrázek 10 Rozložení izovel zkušební desky po zatížení výbuchem

Naměřené hodnoty jsou zpracovány do tabulek a graficky jsou výsledky zpracovány pomocí programu pro tvorbu vrstevnic FieldPro. Program byl použit zejména pro jeho možnost znázornění hladin stejných rychlostí v grafické podobě. Tím je dána možnost vizuálního porovnání výsledků (obr. 9 a 10).

Vzhledem k výsledkům UZ měření lze konstatovat, že desky byly vyrobeny z kvalitních materiálů a vzhledem k variačnímu součiniteli se dá říci, že byly vyrobeny v dobré kvalitě. Z výsledků změřených po zatížení desek výbuchem TNT lze posuzovat, jakým způsobem ovlivnila určitá nálož danou desku.

ZÁVĚR

V měsíci květnu loňského roku byly na VVP Březina – Hanácká Louka provedeny testy odolnosti desek HPFRC proti průrazu výbuchem PINp 10. Celkem bylo provedeno 11 testů, přičemž jedna deska byla opatřena sítí pro možnost prozvučení desky před a po zatížení výbuchem PINp 10. Podle výsledků prozvučení je nutné konstatovat, že deska byla vyrobena s laboratorní kvalitou. Po zatížení se výsledky prozvučení příliš nezměnily. To svědčí o výborné kvalitě vyrobené desky a o

velmi dobré odolnosti desky vůči průrazu. Přesto, že desky byly téměř vždy probity kontaktním výbuchem PINp 10 tak nedošlo k celkové destrukci desek tak jak tomu bylo u předešlých testů desek z prostého betonu a z drátkobetonu. U všech desek bylo použito stejné nálože 100 g PINp 10.

Lze konstatovat, že při menší tloušťce desky je materiál odolnější než desky z prostého betonu nebo z drátkobetonu. Oproti desce z prostého betonu C70/85 tl. 150 mm a desce z drátkobetonu C80/95 se deska, vyjma místa průrazu, neporušila. Deska z HPRFC materiálu se svými vlastnostmi blíží ocelové desce.

Hlavní výhodou HPFRC je velmi vysoká pevnost v tlaku, která umožňuje zmenšit průřezy konstrukčních prvků a snížit tak vlastní hmotnost celé konstrukce a stavba vykazuje výrazně delší trvanlivost [4]. Další nespornou výhodou je zvýšená odolnost materiálu vůči dynamickému zatížení. Výsledky provedených testů potvrzují schopnost materiálu lépe odolávat jak kontaktnímu výbuchu, tak i účinkům tlakové vlny výbuchu v porovnání s prostým betonem a drátkobetonem při dávce vláken 30 kg na 1m³ betonu (FRC – fibre reinforced concrete). Testy byly prováděny ve spolupráci s 15. ženijním plukem ve výcvikovém prostoru Boletice.

LITERATURA

- [1] ŠTOLLER, J.: Využití drátkobetonu pro ochranné stavby. [disertační práce] Univerzita obrany, Fakulta vojenských technologií. Brno: 2005.
- [2] ŠTOLLER, J., DVOŘÁK, P.: Field Test of High Performance Fibre Reinforced Concrete Slabs. International Conference on Military Technologies 2015, ICMT 2015, Brno, May 19 - 21, 2015: University of Defence, p. 235 - 239. ISBN 978-80-7231-976-3.
- [3] KRAVTSOV, A., SVOBODA, P.: Numerical Simulations of Shock Waves in contents of Building Protection and Secure, CTU Publ House 2012, ISBN: 978-80-01-05074-3.
- [4] MAŇAS, P., KROUPA, L.: The Blast Effects Simulation Tools within Force Protection Engineering and Critical Infrastructure Security. Drilling and Blasting Technology, 2012, vol. 2012, no. September, p. 42-48. ISSN 1788-5671.