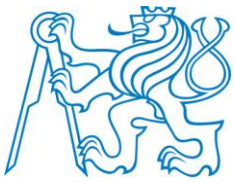


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ing. Marek Foglar, Ph.D.

Výbuchová odolnost železobetonových prvků a prvků z vláknobetonu

Performance of reinforced concrete and fiber reinforced concrete elements subjected to blast loading

Summary

According to recent publications, from 2005 to 2008 there were more than 13000 terrorist attacks around the world, which took more than 73000 human lives. The attacks were targeted mainly on the technical and civic infrastructure, like governmental buildings, bridges, etc.

Due to improved ductility, fibre-reinforced concrete (FRC) shows better performance under blast and impact loading compared to conventionally reinforced concrete.

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 reinforced concrete precast slabs with varying fiber content and concrete strength class and 25 kg of TNT charges placed in distance from the slab for better simulation of real in-situ conditions. The paper presents conclusions from two sets of tests and results of their numerical evaluation.

Souhrn

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.

Příspěvek shrnuje výsledky zkoušek výbuchové odolnosti železobetonové mostní konstrukce a mostní konstrukce ze železobetonu s PP vlákny konané za spolupráce s Policií ČR a Armádou ČR ve Vojenském prostoru Boletice v listopadu 2010 a v srpnu 2011.

Experimenty byly prováděny na vzorcích plné velikosti s variujícím obsahem přidaných vláken a pevnostní třídou betonu zatížených blízkým výbuchem 25kg náloží TNT.

Text prezentuje výsledky experimentů zaměřených na vliv přidaných vláken, třídy pevnosti betonu a jejich kombinace na výbuchovou odolnost železobetonu

Klíčová slova

Výbuchová odolnost

Železobeton

Vláknobeton

Vysokopevnostní beton

Keywords

Blast resistance

Reinforced concrete

Fiber reinforced concrete

high performance concrete

Obsah

Výbuchová odolnost železobetonových prvků a prvků z vláknobetonu 6
Úvod 6
Chování betonových konstrukcí při zatížení výbuchem 6
Popis zkušebních těles 8
Uspořádání experimentů 8
Šíření tlakové vlny od výbuchu 9
Výsledky experimentů 11
Numerické modelování výbuchu 17
Materiálový model vláknobetonu 20
Porovnání numerického modelu s experimentem 24
Závěr 24
Literatura 25

Výbuchová odolnost železobetonových prvků a prvků z vláknobetonu

Úvod

Ministerstvo vnitra USA vydává od roku 2005 zprávu o vývoji terorismu ve světě. Z této zprávy vyplývá, že v letech 2005 až 2008 bylo po světě spácháno v průměru 13000 teroristických útoků ročně, které si v součtu vyžádaly více než 73000 lidských životů. Útoky, zaměřené hlavně na stavby technické a občanské infrastruktury, ukázaly jejich velkou zranitelnost, viz útoky v Londýně (2005), Madridu (2004), Istanbulu (2003), Bali (2002) a New Yorku (2001).

Mezi stavby, které jsou vystaveny zvýšenému riziku teroristického útoku, patří zejména vládní budovy, vojenská a finanční centra, strategické dopravní stavby (mosty, nádraží, letiště), chemické provozy a jaderné elektrárny. V případě těchto budov jsou hlavně v USA a ve Velké Británii podnikána opatření pro zvýšení jejich odolnosti proti zatížení výbuchem a nárazy.

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

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 výjimečné 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 2m. Příčiny jsou celkem pochopitelné: příprava i realizace výbuchových experimentů je organizačně i finančně velice náročná a podléhá rozsáhlým bezpečnostním omezením. Z těchto důvodů jsou i používané nálože relativně malé a neodpovídají tak velikostem náloží, které mohou být na mostní konstrukci dopraveny pěšky, či v prostředích hromadné dopravy, se pohybujícím jednotlivým útočníkem.

V této části jsou shrnuty znalosti nabyté studiem této problematiky a je popsán provedený experimentální program.

Chování betonových konstrukcí při zatížení výbuchem

Působení výbuchu v reálném prostředí nám umožňují s různou mírou přesnosti popsat matematické modely odvozené pro idealizovaná prostředí. Prostředí může být stlačitelné či nestlačitelné, s omezeným povrchem, či neomezeným povrchem. Energie výbuchu se uvolní v čase t=0 a v prakticky nekonečně krátkém okamžiku se přemění v energii výbuchové vlny, jež se pak bezprostředně rozšíří do celého okolního prostoru. Částice vzduchu jsou v rázové vlně stlačeny a pohybují se. Při normálovém dopadu vlny na tuhou překážku se vedle hydrostatického přetlaku uplatní náraz částic a přetlak odrazu je větší než přetlak ve vlně před dopadem.

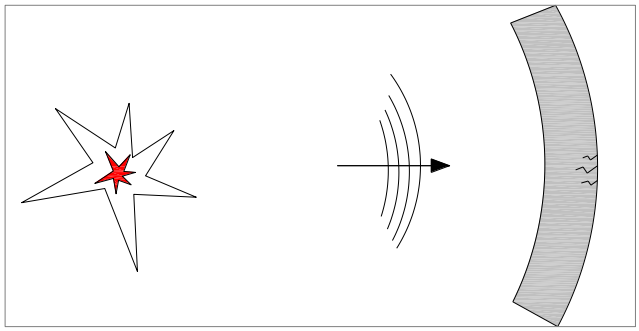
Pro přetlak rázové vlny ΔP_S platí:

$$\Delta P_S = \frac{93{,}2}{Z} + \frac{383}{Z^2} + \frac{1275}{Z^3} \quad , \tag{0}$$

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

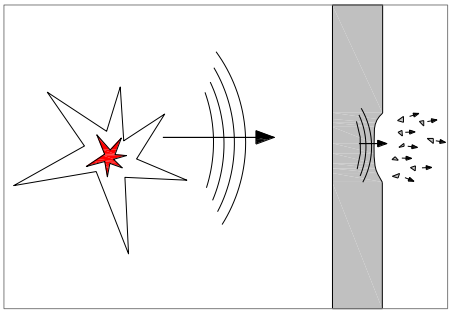
Běžný železobeton nevykazuje uspokojivou schopnost vzdorovat zatížení výbuchem či nárazem. Z hlediska vzdálenosti výbuchu můžeme rozlišit tři případy: výbuch ve větší vzdálenosti, výbuch v blízkosti prvku, výbuch v těsné vzdálenosti od prvku.

Výbuch ve větší vzdálenosti od betonového prvku působí jako homogenní plošné zatížení na betonový prvek a dá se přirovnat například k zatížení větrem. Ve svém důsledku může způsobit selhání betonového prvku ohybového charakteru, viz Obr. 1.



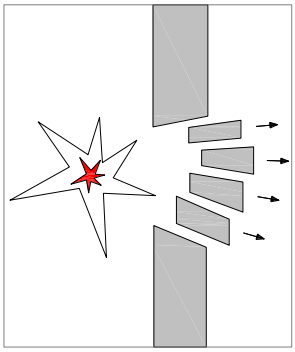
Obr. 1 Výbuch ve větší vzdálenosti od betonového prvku

Výbuch v blízkosti prvku z železového betonu způsobí tlakovou vlnu, která se pohybuje velkou rychlostí k jeho povrchu. Když jej dosáhne, část energie tlakové vlny se odrazí do prostoru, zatímco zbytek pokračuje betonovým prvkem. Když tato tlaková vlna dosáhne rubového povrchu prvku, hlavní část vyjde do vzduchu za betonovým prvkem, zatímco část se odrazí. Tento odraz způsobuje tahová napětí na rubu betonového povrhu, která vyvolávají odlupování krycí vrstvy výztuže a vystřelování drobných částeček kameniva, viz Obr. 2. Betonářská výztuž tomuto problému nemůže zamezit. Pokud jsou ale do betonu přidána vlákna, která zvýší jeho tahovou pevnost a zejména houževnatost, je možné rozměr odštěpků na rubu betonového prvku při zatížení výbuchem (případně rázem) značně redukovat.



Obr. 2 Výbuch v blízkosti betonového prvku

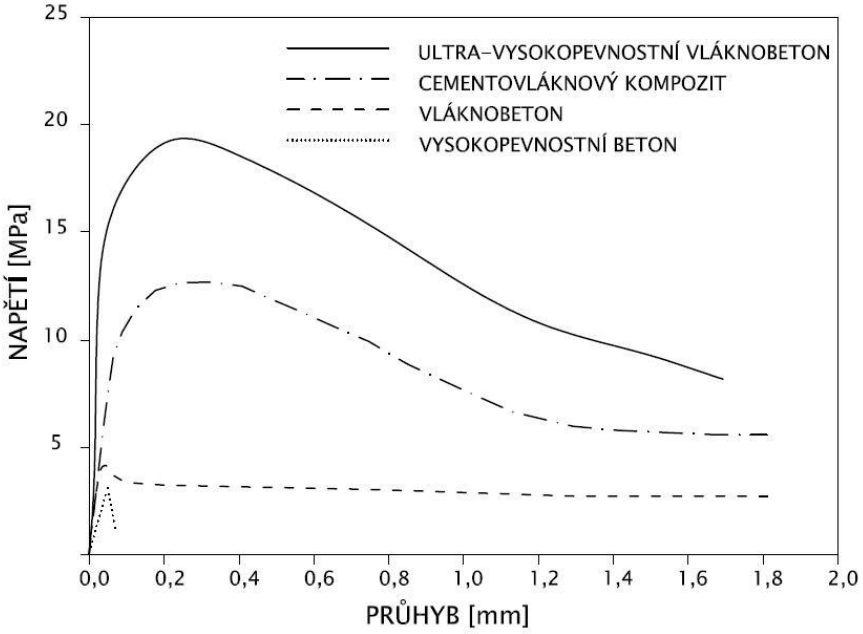
Výbuch v těsné blízkosti železobetonového prvku způsobí většinou lokální porušení prvku způsobené jeho smykovým selháním. Velká tuhost a setrvačná hmota betonového prvku v počátku působení zatížení totiž způsobí pouze jeho lokální odezvu, aniž by mohlo dojít k přenosu zatížení prvku jeho ohybem. Výbuchu v těsné blízkosti železobetonového prvku odpovídá z hlediska zatížení náraz projektilu (kulka, dělostřelecký granát). V tomto případě dochází k lokálnímu porušení v místě dopadu a k odštěpkům betonu na rubu prvku, viz Obr. 3.



Obr. 3 Výbuch v těsné vzdálenosti od betonového prvku

Při prvním pohledu na pracovní diagram vláknobetonu, či vysokopevnostního vláknobetonu, je patrné, že vláknobeton má větší potenciál absorbovat energii výbuchu díky větší pevnosti v tahu za ohybu a schopnos-

ti vzdorovat větším přetvořením při toto způsobu namáhání, viz Obr. 4. Tyto vlastnosti předurčují vláknobeton k užití v zařízeních sloužících k ochraně staveb proti teroristickým útokům, či ve vojenských aplikacích.



Obr. 4 Chování různých druhů betonu v tahu za ohybu

Vláknobeton se v zahraničí s výhodou uplatnil již v mnoha projektech, kdy byla dodatečně zvyšována odolnost staveb technické a občanské infrastruktury proti zatížení výbuchem a nárazy. Je třeba zdůraznit poměrně často opomíjenou skutečnost, že vláknobeton je v současné době již konstrukční materiál s jasně definovanými pevnostními a přetvárnými charakteristikami, stejně jako beton nebo betonářská výztuž, umožňujícími s výhodou plně využít jeho nejcharakterističtější vlastnosti – schopnost přenosu tahových napětí po vzniku trhliny.

Popis zkušebních těles

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

Zkušební tělesa byla navržena v plném měřítku jako most malého rozpětí, výšky 0,3m při délce 6m. Šířka byla z přepravních a manipulačních důvodů omezena na 1,5m. Jedná se o železobetonové desky rozměrů 0,3x1,5x6m, vyztužené 11∅16 při obou površích v podélném směru, ∅10 po 150mm ve směru příčném. Smyková výztuž je tvořena sponami ∅8 (9ks/m^2). Byl užit beton X0 a betonářská výztuž B500B podle ČSN EN 1992-1-1.

Při experimentech jsou užita PP vlákna Forta Ferro délky 54mm.

Kvalita betonu a obsah PP vláken jsou proměnné. Vzorek 1 je navržen z betonu C30/37 bez vláken, vzorek 2 z betonu C30/37, obsah vláken 4,5kg/m^3, vzorek 3 z betonu C55/67 bez vláken, vzorek 4 z betonu C55/67, obsah vláken 4,5kg/m^3 a vzorek 5 z betonu C30/37, obsah vláken 9kg/m^3.

Uspořádání experimentů

Sada zkoušek byla provedena za spolupráce s Policií ČR a Armádou ČR ve Vojenském prostoru Boletice v listopadu 2010 a v červenci 2011. Zkoušky byly provedeny v místech bývalé dopadové plochy dělostřelecké střelnice v nadmořské výšce 900m n. m. Tato plocha je v současné době užívána pro zneškodňování munice s prošlou dobou trvanlivosti a při stavebních pracích stále nalézané munice z 2. světové války.

Zkušební vzorky byly umístěny na dvou dřevěných kmenech průměru cca 35cm, které byly zajištěny proti posunutí beraněnými ocelovými trubkami. Mezi kmeny v místě pod budoucím zkušebním vzorkem byl zřízen výkop o průměru cca 4,5m a hloubce 1m. Výkop měl zmírnit vliv odrazu výbuchové rázové vlny na experimentální těleso.

Nálože 25kg TNT byly uloženy na ocelové stoličky zřízené ze 3 třmínků z betonářské výztuže ∅10mm (betonářská výztuž B500B) přivařených na ocelový plech tloušťky 3mm (ocel S235) umístěné uprostřed zkušebních těles. Stoličky zajistily 45cm odstup nálože od zkušebního vzorku, což, spolu s užitím výše zmíněného technického řešení, odpovídá průměrné výšce zavazadlového prostoru osobního vozidla nad povrchem komunikace.

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

Uspořádání experimentů v listopadu 2010 je uvedeno na Obr. 5.

Obr. 5 Uspořádání experimentů

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

Experimenty probíhaly za spolupráce s Policií ČR a Armádou ČR ve vojenském prostoru Boletice. Policie ČR poskytla trhaviny 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 stavěné 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.

Šíření tlakové vlny od výbuchu

Jak již 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 vypočet 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 30m od nálože. Pro výpočet hodnoty přetlaku byl užit následující vzorec:

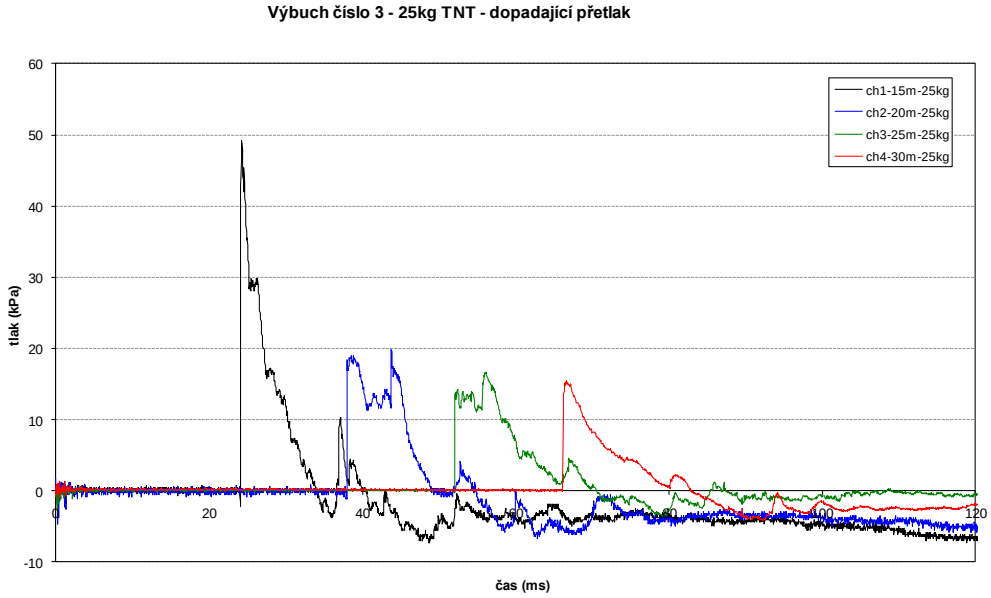
$$\Delta P_S = \frac{93{,}2}{Z} + \frac{383}{Z^2} + \frac{1275}{Z^3}, \qquad (1)$$

kde Z je redukovaná 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. Přepočet napětí na tlak byl proveden na základě údajů kalibračních certifikátů jednotlivých čidel. Pro spouštění měření byl použit externí signál 17V 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 1m nad okolní terén. Čidla byla rozmístěna tak, aby se žádné dvě nevyskytovaly v zákrytu směrem od nálože.

Tab. 2 ukazuje výsledky měření dopadajícího přetlaku v čele výbuchové vlny a její porovnání s vypočtenými hodnotami, Obr. 6 poskytuje časový průběh tlaku VRV při výbuchu číslo 3. Vzhledem k místním podmínkám a uspořádání experimentu je shoda velice dobrá.



Obr. 6 Časový průběh tlaku VRV při výbuchu č.3

Tab. 0-1 Přetlaky v čele VRV a impulzy přetlakových částí, porovnání měření a výpočtu

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	14,0
naměřený / vypočtený přetlak	110%	71%	75%	110%

Z porovnání hodnot uvedených v Tab. 1-1 se zranitelností osob přetlakem publikovaným v [4] je patrné, že výbuch nálože síly 25kg TNT ekvivalentu by jen účinkem své tlakové vlny způsobil jistou smrt osob s okruhu 8m od epicentra, smrtelná a těžká zranění osob do vzdálenosti 19m. Hodnocen není devastující účinek střepů či úlomků konstrukcí a vozidel na lidské životy.

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 0,43m^2, tedy 0,12m^3 objemu betonu (4,4% celkového objemu betonu panelu). Celkový objem vytrženého betonu (ztráty hmoty) byl 0,23m^3 (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 průhybu) odpovídal prvku ohýbanému rovnoměrným zatížením. Průhyb panelu byl zaznamenán 295 mm na levém a 310 mm na pravém boku.

Přidání 4,5kg/m^3 vláken do stejného betonu, vzorek 2, vedlo k jinému způsobu porušení panelu. Tvar průhybu poškozeného panelu byl ve tvaru zlomu. Prvek s vlákny byl porušen hlavní ohybovou trhlinou velké šířky dlouhé téměř přes 4/5 výšky průřezu. Horní část betonového průřezu byla poškozena drcením betonu (tlakem). Tvar průhybu byl spíše trojúhelníkový. Bylo dosaženo menších hodnot poškození (sloupce 1x2 v Tab. 2). Plocha průrazu se zmenšila o 40%. Plochy poškození horního a dolního povrchu se snížily také o 40%. Poškození boků zaznamenalo největší pokles. Levý bok nebyl téměř poškozený 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 díky svým mechanickým vlastnostem.

Přidání dvojnásobného množství vláken (9kg/m^3), vzorek 5, způsobilo další snížení poškození panelu. Oproti panelu bez vláken byly změny následující. Tvar průhybu 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 průhybu byl spíše trojúhelníkový. Bylo dosaženo menších hodnot poškození (sloupce 5x1 v Tab. 2). Průraz se omezil zcela úplně. 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. Ty bylo způsobeno tím, že u kontrolního prvku 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% (neproražený beton, který zůstal, je rozdrcený). Tvar a způsob porušení byly přibližně stejné. Rozsah poškození se velmi snížil (sloupec 3 vs. sloupec 1 v Tab. 2). 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 4,5kg/m^3 vláken vykazoval přibližně stejné poškození jako vzorek 5, Tab. 2 (sloupec 4 vs. sloupec 5 v Tab. 2). Z toho je možné usoudit, žedvojnásobné zvětšení množství vláken ze 4,5 na 9kg/m3 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 0,05m^3 (1,9% z celkového objemu) u prvku C55/67 se 4,5kg/m3 vláken a 0,06m3 (2,2% z celkového objemu) u prvku C30/37 a 9kg/m^3 vláken. I ostatní hodnoty z Tab. 2 jsou u těchto prvků podobné. Rozdíl v průhybech je 30/26cm (15%). Pouze způsob porušení se u těchto vzorků lišil, viz porovnání sloupců 1 a 2 v Tab. 2.

Porovnání dvou prvků z betonu C30/37, ale s různým obsahem PP vláken (9x4,5kg/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. 2). 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 spodního 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. 2). 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%.

Tab. 2 Porovnání výbuchové odolnosti jednotlivých vzorků

PRVEK	1	2	3	4	5
Beton	C30/37	C30/37	C55/67	C55/67	C30/37
Vlákna	-	4,5kg/m^3	-	4,5kg/m^3	9,0kg/m^3
Průraz při horním povrchu	0,43 m^2	0,26 m^2	0,02 m^2	NE	NE
Odštípnutá vrstva betonu při spodním povrchu < krytí výztuže	2,35 m^2	1,89 m^2	1,51 m^2	0,73 m^2	0,61 m^2
Odštípnutá vrstva betonu při spodním povrchu > krytí výztuže	1,71 m^2	1,09 m^2	1,2 m^2	0,44 m^2	0,37 m^2
Odštípnutá vrstva betonu při horním povrchu < krytí výztuže	0,43 m^2	0,26 m^2	0,89 m^2	0,68 m^2	0,66 m^2
Odštípnutá vrstva betonu při horním povrchu > krytí výztuže	0,43 m^2	0,26 m^2	0,29 m^2	0	0,08 m^2
Odštípnutá vrstva betonu při levém okraji < krytí výztuže	0,52 m^2	0,05 m^2	0,08 m^2	0	0
Odštípnutá vrstva betonu při levém okraji > krytí výztuže	0,35 m^2	0	0,02 m^2	0	0
Odštípnutá vrstva betonu při pravém okraji < krytí výztuže	0,34 m^2	0,16 m^2	0,08 m^2	0	0
Odštípnutá vrstva betonu při pravém okraji > krytí výztuže	0,23 m^2	0,11 m^2	0,02 m^2	0	0
Vytržený beton celkem	0,23 m^3	0,15 m^3	0,20 m^3	0,05 m^3	0,06 m^3
Trvalý průhyb	0,31 m	0,37 m	0,28 m	0,30 m	0,26 m

Výsledky experimentů jsou dokumentovány na Obr. 7-16.

Obr. 7 – Vzorek č. 1 poškozený výbuchem – horní povrch

Obr. 8 – Vzorek č. 1 poškozený výbuchem – dolní povrch

Obr. 9 – Vzorek č. 2 poškozený výbuchem – horní povrch

Obr. 10 – Vzorek č. 2 poškozený výbuchem – dolní povrch

Obr. 11 – Vzorek č. 3 poškozený výbuchem – horní povrch

Obr. 12 – Vzorek č. 3 poškozený výbuchem – dolní povrch

Obr. 13 – Vzorek č. 4 poškozený výbuchem – horní povrch

Obr. 14 – Vzorek č. 4 poškozený výbuchem – dolní povrch

Obr. 15 – Vzorek č. 5 poškozený výbuchem – horní povrch

Obr. 16 – Vzorek č. 5 poškozený výbuchem – dolní povrch

Numerické modelování výbuchu

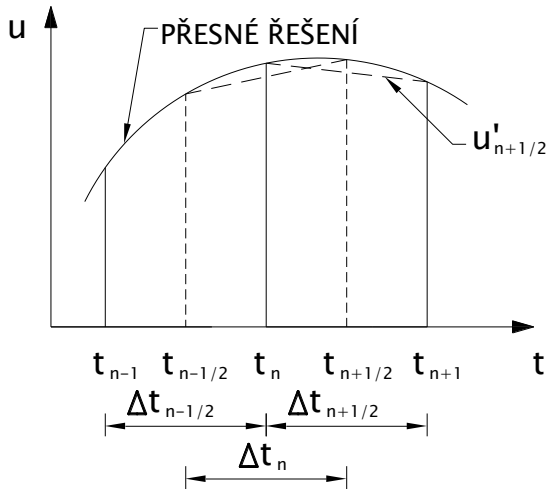
Rychlé dynamické jevy se obvykle řeší metodou explicitní časové integrace (diferenční metoda), Obr. 17. Pohybová rovnice (1)

$$M \cdot u''(t) + C \cdot u'(t) + K \cdot u(t) = p(t) \qquad (2)$$

se pak vyjádří jako (2)

$$M_n \cdot u_n'' + C_n \cdot u_n' + K_n \cdot u_n = p_n \qquad (3)$$

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



Obr. 17 - Metoda explicitní časové integrace (diferenční metoda)

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

$$u'_{n+1/2} = \frac{1}{\Delta t_{n+1/2}}(u_{n+1} - u_n)\,, \tag{4}$$

což se pak dosadí do rovnice zrychlení

$$u'' = \frac{1}{\Delta t_n}(u'_{n+1/2} - u'_{n-1/2})\,. \tag{5}$$

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

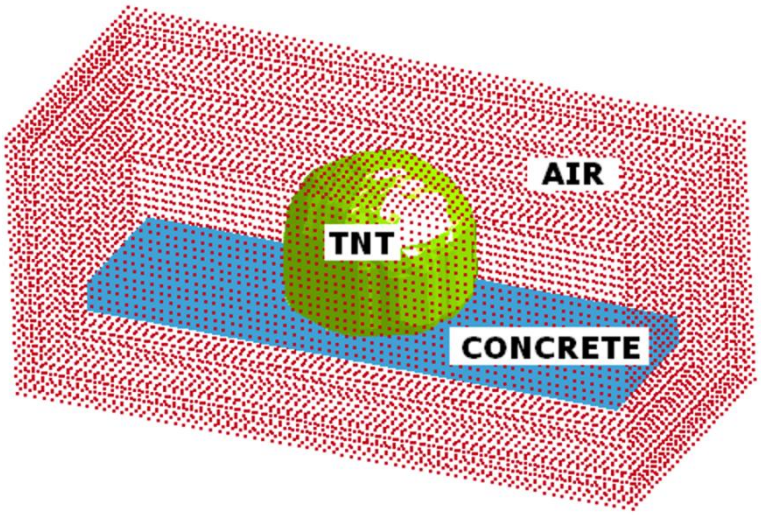
$$(\frac{1}{\Delta t^2}M_n + \frac{1}{2\Delta t}C_n)\cdot u_{n+1} = p_n - (K_n - \frac{2}{\Delta t^2}M_n)\cdot u_n - (\frac{1}{\Delta t^2}M_n - \frac{1}{2\Delta t}C_n)\cdot u_{n-1}$$

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} – 10^{-8} s. Z tohoto vyplývá, že metoda explicitní časové integrace vhodná pouze pro krátké procesy.

Numerické modelování prováděných 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, 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 prky. Příklad uspořádání modelu je uveden na Obr. 18.



Obr. 18 – Uspořádání výpočetního modelu

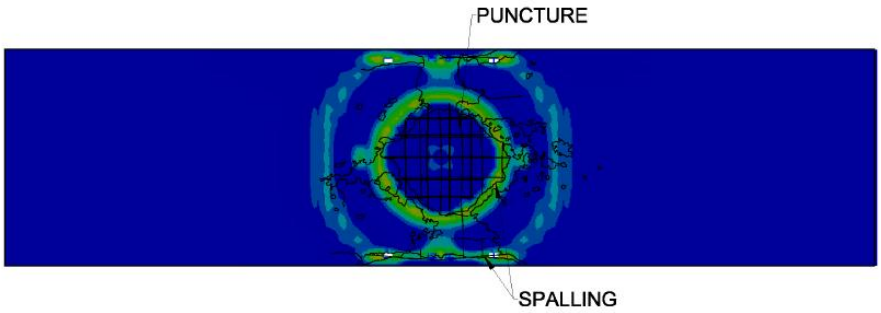
Vzduch je modelován materiálem 009-Null s nedeformovatelnou sítí konečných prvků. Betonový prvek je modelován materiálem 159-CSCM_Concrete_material_model jako křehký materiál s poškozením. Výbušnina je modelována materiálem 008-High_explosive_burn_material. Přetlak v čele rázové vlny výbuchu je vypočten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

$$p = A\left(1-\frac{\omega}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \qquad (6)$$

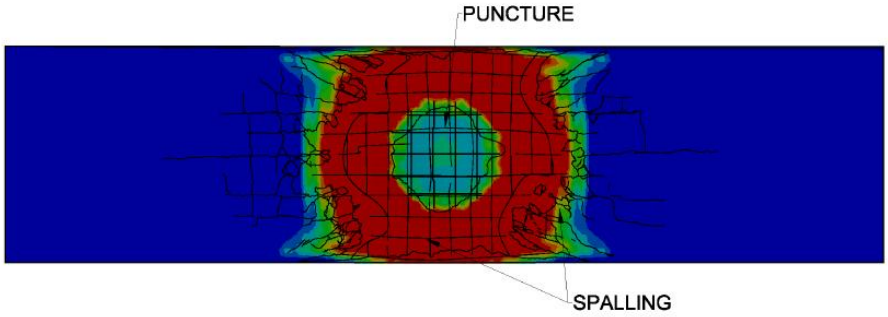
Byly zpracovány výpočetní modely železobetonových zkušebních prvků se zahrnutím podélné i příčné výztuže, včetně spon. Výztuž byla modelována jako prutové prvky odpovídajících materiálových a průřezových charakteristik.

Velikost sítě konečných prvků byla zvolena 30mm pro beton a 50mm pro vzduch. Výztuž je modelována prutovými prvky umístěnými v hranách objemových prvků betonu.

Solver LS-DYNA vyřazuje prvky z modelu, pokud je překročena jejich pevnost, prvky tzv. erodují. První prvky erodují, když tlaková vlna dosáhne povrch betonového prvku pod epicentrem výbuchu v čase 0,25ms. Výsledky numerického modelu vykazují velkou shodu s železobetonovými prvky (vzorky 1 a 3), viz Obr. 19 a 20.

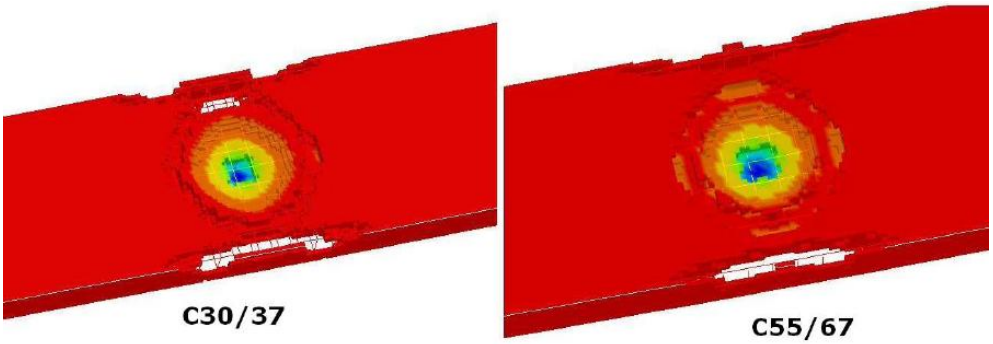


Obr. 19 – Porovnání numerického modelu a experimentu pro vzorek č. 1 (beton C30/37 bez vláken) – horní povrch vzorku



Obr. 20 – Porovnání numerického modelu a experimentu pro vzorek č. 1 (beton C30/37 bez vláken) – spodní povrch vzorku

Byl studován vliv tlakové pevnosti betonu. Rozdíl v poškození betonu různých pevnostních tříd je uveden na Obr. 21.

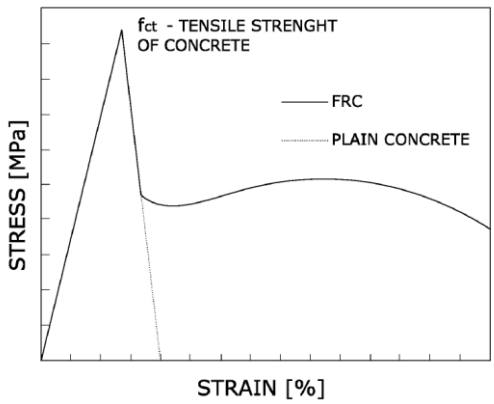


Obr. 21 – Porovnání výsledků numerického modelu pro vzorek č. 1 (beton C30/37 bez vláken) a č.3 (beton C55/67 bez vláken)

Materiálový model vláknobetonu

Pro vyhodnocení vzorků č. 2, 4 a 5 byl materiálový model upraven, aby jeho přetvárné chování odpovídalo chování vláknobetonu. Kalibrace materiálových modelů vláknobetonu byla provedena na základě experimentů popsaných v [12].

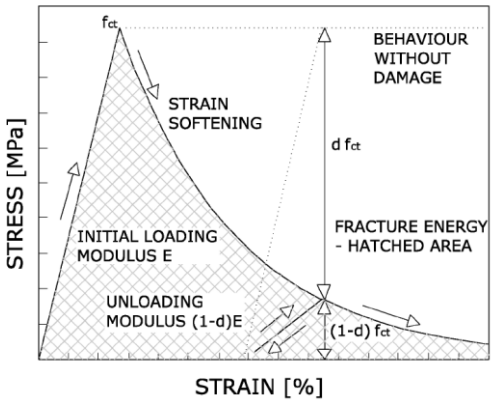
Vláknobeton se vyznačuje jiným přetvárným chováním než běžný beton. Zatímco prostý beton selže po dosažení své tahové pevnosti, v případě vláknobetonu se tuhost vzorku sníží po vytvoření první trhliny. Vlákna převezmou tahové napětí a materiál dále funguje se zbytkovou tahovou pevností (cca 1/3 původní tahové pevnosti v závislosti na typu vláken, jejich geometrii a obsahu. Rozdíl v pracovním diagramu prostého betonu a vláknobetonu je patrný z Obr. 22.



Obr. 22 – Pracovní diagram prostého betonu a vláknobetonu v tahu

Materiálový model betonu MAT159_CSM (materiálový model s poškozením a plasticitou) užitý v solveru LS-DYNA musí být překalibrován, aby jeho chování odpovídalo chování vláknobetonu, tedy aby bylo duktilní.

Analytický popis chování modelu MAT159_CSM je uveden na Obr. 23.



Obr. 23 – Pracovní diagram materiálu s poškozením podle [13]

Klíčem k překalibrování materiálového modelu MAT159_CSM je nastavení jeho odtěžující části tak, aby popisovala věrně duktilní chování vláknobetonu bez ovlivnění zatěžovací části (vliv vláken na tahovou/tlakovou pevnost prostého betonu může být zanedbán).

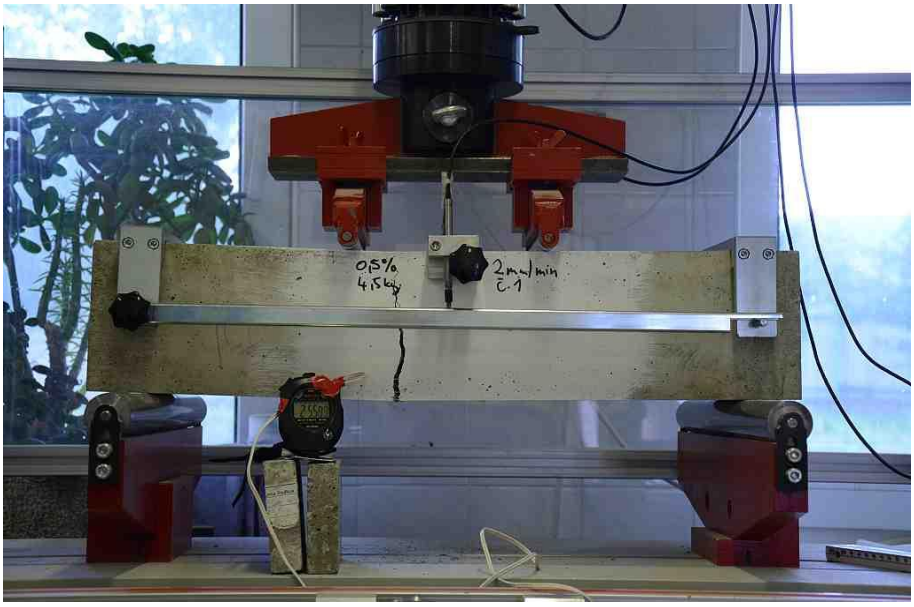
Lomová energie G_f je vyjádřena jako integrál plochy pod pracovním diagramem:

$$G_f = \int_0^{\infty} (1-d)\, f_{ct}\, dx \tag{7}$$

Kde: d je poškození (od 0 do 1) a f_{ct} je tahová pevnost betonu.

V souladu s definovaným přístupem je plocha pod křivkou pracovního diagramu užita pro ověření hodnoty lomové energie betonu. Materiálový model vláknobetonu byl kalibrován na základě speciálně navržených experimentů, které měly za úkol poskytnout pracovní diagramy různých druhů vláknobetonu v závislosti na rychlosti zatěžování [12].

Pro navržený zkušební program bylo vyrobeno celkem 40 trámců o rozměrech 150/150/700 mm z betonu C30/37-X0 s polypropylénovými vlákny Forta Ferro délky 54 mm (receptura jako u polních experimentů). Pro první polovinu trámců bylo užito 4,5 kg/m^3 (ρ = 0,5 %), pro druhou 9,0 kg/m^3 (ρ = 1,0 %). Dále byly pro doprovodné zkoušky zhotoveny krychle o straně 150 mm (stanovení pevnosti v tlaku) a válce o průměru 150 mm a výšce 300 mm (stanovení modulu pružnosti v tlaku). Zkušební tělesa byla vyrobena v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze. Vlastní zkoušky pak byly prováděny na pracovišti firmy BETOTECH s.r.o., poté co zkušební vzorky dosáhly stáří 28 dní. Zkoušení trámců bylo prováděno čtyřbodovým ohybem (viz Obr. 1-24), zkoušení krychlí a válců potom v prostém tlaku.

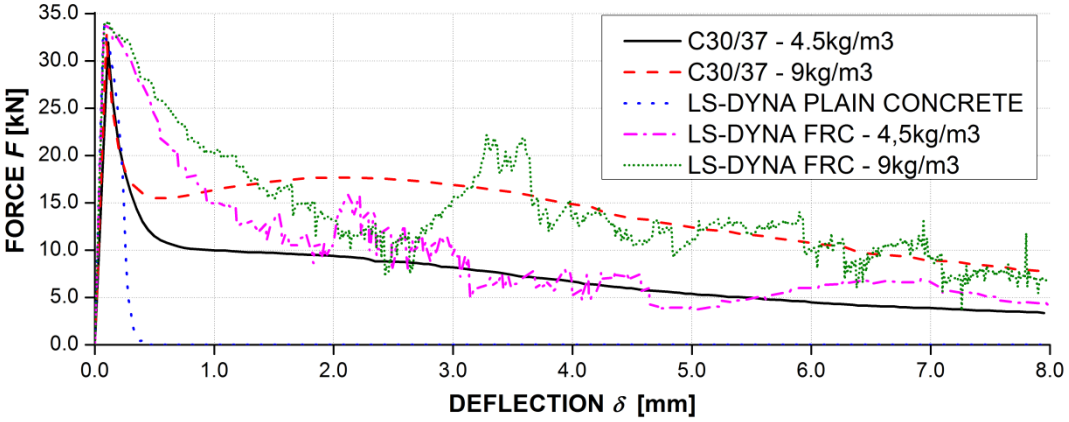


Obr. 24 – Upořádání experimentu a pohled na těleso po ukončení zkoušky při průhybu 8,0 mm [13]

Průběh zkoušek byl řízen deformací vzorků ve středu jejich rozpětí. Celkem bylo pro každý stupeň vyztužení (ρ = 0,5 % a ρ = 1,0 %) provedeno 6 sad po třech zkušebních tělesech. Rychlosti nárůstu deformace υ pro jednotlivé sady vzorků byly voleny v hodnotách 0,2; 1,0; 2,0; 4,0 a 6,0 mm/min. Zkoušky byly ukončeny při dosažení průhybu vzorku 8,0 mm.

Kalibrační modely byly připraveny v solveru LS-DYNA, velikost prvků byla volena stejná jako v případě numerických modelů výbuchů. Hodnota tahové lomové energie v materiálovém modelu betonu byla modifikována tak, aby byla plocha pod diagramem odolnosti v numerickém experimentu stejná jako v kalibračních experimentech.

Lomová energie může být v modelu MAT15_CSCM modifikována pouze změnou sklonu její odlehčující větve. Jelikož je digram odolnosti vláknobetonu komplikovaný, je možnost shody omezená, viz Obr. 25.



Obr. 25 – Diagramy odolnosti, porovnání kalibračního experimentu a jeho numerického modelu

Podle doporučení RILEM [14] je standardní metoda pro stanovení lomové energie založena na tříbodovém ohybu. Lomová energie G_f [N/m] je pak definována jako práce A_F [N . m] síly P [N] vyvolávající průhyb δ_{max} [m]:

$$A_F = \int_0^{\delta_{max}} P \, d\delta \tag{8}$$

Tato vztažená na jednotu průřezu vzorku BW [m^2]:

$$G_F = \frac{A_F}{BW} \tag{9}$$

kde *B* [m] je šířka vzorku a *W* [m] je výška trhliny.

V kalibračních experimentech užitý čtyřbodový ohyb je vhodnější pro vláknobeton, neboť není trhlina umístěna v polovině rozpětí, ale v nejslabším místě podle rozmístění vláken.

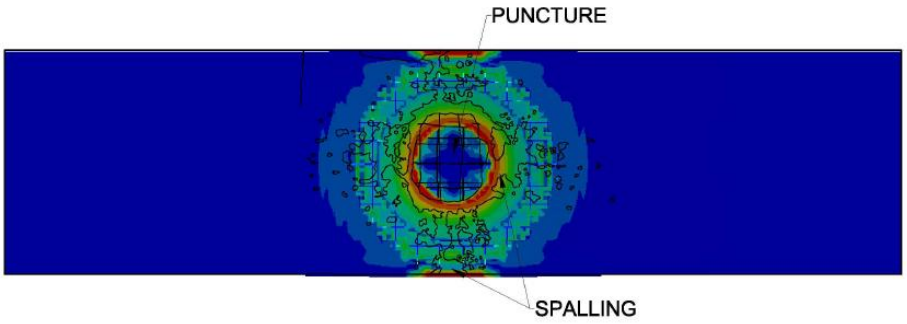
Získané hodnoty lomové energie pro různé třídy pevnosti betonu a různé obsahy vláken jsou uvedeny v Tab. 3, levý sloupec poskytuje hodnoty plochy pod diagramem odolnosti, pravý sloupec hodnoty lomové energie, tedy hodnotu z levého sloupce normalizovanou na jednotku plochy průřezu.

Tab. 3 Lomové energie betonu pro různé třídy pevnosti a obsah vláken

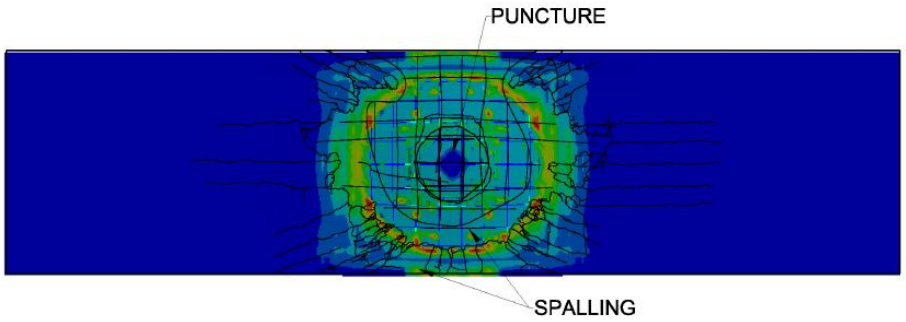
Vzorek	plocha pod diagramem odolnosti [N*m]	Lomová energie (normalizovaná k jednotce průřezu) [N/m]
LS-DYNA – Plain concrete	5,6	248,9
Kalibrační experiment C30/37 – 4,5 kg/m^3	62,0	2755,6
LS-DYNA – FRC 4,5 kg/m^3	68,6	3048,9
Kalibrační experiment C30/37 – 9 kg/m^3	109,3	4857,8
LS-DYNA – FRC 9 kg/m^3	102,9	4573,3

Hodnota vstupního údaje lomové energie v tahu materiálového modelu MAT159 je pak přenásobena poměrem lomové energie vláknobetonu a prostého betonu podle Tab. 3.

Kalibrovaný materiálový model byl pak užit pro vyhodnocení vzorků č.2 a 5. Příklad výsledků poskytuje Obr. 26 a 27. Kalibrační experimenty pro vzorek č. 4 jsou vyhodnocovány v současné době.



Obr. 26 – Porovnání numerického modelu a experimentu pro vzorek č. 2 – horní povrch vzorku



Obr. 27 – Porovnání numerického modelu a experimentu pro vzorek č. 2 – spodní povrch vzorku

Porovnání numerického modelu s experimentem

Popsaná metoda zvyšování lomové energie betonu pro zohlednění vlivu přidaných vláken na přetvárné charakteristiky betonu byla porovnána s výsledky experimentů a ukázala se jako velice vhodná. Popis shody výsledků numerických modelů s experimentem je uveden v Tab. 4.

Tab. 4 Poškození prvků vyjádřené objemem odprýsknutého betonu, porovnání vypočtených a změřených hodnot

Vzorek č.	1	2	5
Beton	C30/37	C30/37	C30/37
Vlákna	-	4,5kg/m^3	9,0kg/m^3
Průraz –model	0,41 m^2	0,19 m^2	-
Průraz – experiment	0,43 m^2	0,26 m^2	-
Průraz – shoda	95%	73%	100%
Odprýsknutí betonu (spodní povrch) – model	2,40 m^2	1,43 m^2	1,81 m^2
Odprýsknutí betonu (spodní povrch) – experiment	2,07 m^2	1,78 m^2	1,32 m^2
Odprýsknutí betonu (spodní povrch) – shoda	86%	80%	73%
Odprýsknutí betonu (horní povrch) – model	0,65 m^2	1,33 m^2	1,50 m^2
Odprýsknutí betonu (horní povrch) – experiment	0,53 m^2	0,96 m^2	1 m^2
Odprýsknutí betonu (horní povrch) – shoda	82%	72%	61%

Závěr

Text prezentuje výsledky experimentů zaměřených na vliv přidaných vláken, třídy pevnosti betonu a jejich kombinace na výbuchovou odolnost železobetonu. Experimenty byly prováděny na železobetonových deskách (0,3x1,5x6m) s 25kg TNT umístěnými v konstantní vzdálenosti od zkušebních vzorků.

Experimenty ukázaly pozitivní vliv přidaných vláken na výbuchovou odolnost vzorků. Snížil se objem úlomků, charakter porušení se změnil z křehkého na duktilní. Úlomky jsou vlákny drženy pohromadě, mají větší hmotnost a tím pádem mohou doletět jen omezeně daleko.

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 průrazu. Tvar odštípnutého betonu na spodním povrchu vzorků je obdobný, nicméně plocha se významně zmenšila.

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

Literatura

[1] Buchan, P.A. & Chen, J.F. (2007) Blast resistance of FRP composites and polymer strengthened concrete and masonry structures – A state-of-the-art review. Composites: Part B 38, pp. 509-522.

[2] Coughlin, A.M. & al. (2010) Behavior of portable fiber reinforced concrete vehicle barriers subject to blasts from contact charges. International Journal of Impact Engineering, 37, 5, pp. 521-529.

[3] Foglar, M. & al. (2010) Využití přetvárných vlastností vláknobetonu pro zvýšení odolnosti staveb proti zatížení výbuchem a nárazy. Beton TKS, 10, 2, 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. (2010) Dynamic enhancement of blast resistant ultra high performance fiber-reinforced concrete under flexural and shear loading. International Journal of Impact Engineering, 37, 4, pp. 405-413.

[6] Schenker, A. & al. (2008) Full-scale field tests of concrete slabs subjected to blast loads. International Journal of Impact Engineering, 35, 3, pp. 184-198.

[7] Seible, F. & al. (2008) Protection of our bridge infrastructure against man-made and natural hazards. Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 4, No. 6, 415-429.

[8] Wu, C. & al. (2009) Blast testing of ultra-high performance fibre and FRP-retrofitted concrete slabs. Engineering Structures, 31, 9, pp. 2060-2069.

[9] Štoller, J. (2010) Reakce na článek „Využití přetvárných vlastností vláknobetonu pro zvýšení odolnosti staveb proti zatížení výbuchem“. Beton TKS, 10, 5, pp. 84-86.

[10] Foglar, M., Sochorová, E., Kovář, M., Kohoutková, A., Křístek, V. (2011) Výbuchová odolnost mostní konstrukce ze železobetonu a železobetonu s PP vlákny. Beton TKS, 11, 4, pp. 36-39.

[11] Foglar, M. Karasová, E., Křístek, V., Kohoutková, A. (2010) Využití přetvárných vlastností vláknobetonu pro zvýšení odolnosti staveb proti zatížení výbuchem a nárazy. Beton TKS, 10, 2, pp. 50-52.

[12] Drahorád, M., Foglar, M., Veselý, P., Smiřinský, S. (2012) Užití dynamického faktoru nárůstu pevnosti pro zkrácení doby trvání zkoušek vláknobetonových vzorků. Beton TKS, 12, 1, pp. 74-79.

[13] Bencardino, F., Rizzuti, L., Spadea, G., Swamy, R.N., Experimental evaluation of fiber reinforced concrete fracture properties, Composites Part B: Engineering, Volume 41, Issue 1, January 2010, Pages 17-24

[14] Rilem Commitee FMC-50. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means ofthe three-point-bend tests on notched beams. Materials and Structures, 18:285–290, 1985.

Ing. Marek Foglar, Ph.D.

Datum narození:	25. 7. 1980
Rodinný stav:	ženatý
Vzdělání:	ČVUT Praha, Fakulta stavební Obor Konstrukce a dopravní stavby (1999-2005 Ing., 2005-2008 Ph.D.)
Autorizace:	Autorizovaný inženýr v oboru mosty a inženýrské konstrukce Autorizovaný inžinier pre statiku stavieb Autorizovaný inžinier pre inžinierske stavby Oprávnění k výkonu hl. prohlídek na mostech poz. kom.
Ocenění:	Čestné uznání Inženýrské akademie ČR za rok 2010 projekt Mosty na Mimoúrovňovém propojení silnice II/468 a průmyslové zóny v Třinci-Balinách Cena rektora III. stupně za prestižní publikaci za rok 2009 za publikaci: „Strain development in concrete under cyclic loading: Theoretical uand experimental investigations“ Cena ČKAIT za rok 2009 za projekt Mosty na Mimoúrovňovém propojení silnice II/468 a průmyslové zóny v Třinci-Balinách Cena ČBS ČSSI za rok 2008, titul Vynikající disertační práce
Pedagogická činnost:	2009 - dosud odborný asistent na Katedře betonových a zděných konstrukcí Fakulty stavební ČVUT v Praze, 2005 - 2008 výzkumný pracovník tamtéž Výuka předmětů: 133BEK3 Betonové konstrukce 3, přednášky a cvičení pro obor K (ZS) a C (LS) celkem 7 semestrů 133BEKV Betonové konstrukce, přednášky a cvičení pro obor V a Z celkem 1 semestr 133CST5 Concrete structures 5, přednášky a cvičení pro obor CE společně s Prof. Procházkou, celkem 3 semestry Vedení studentských prací: Diplomové práce obor K a obor C, celkem 9 prací Bakalářské práce obor K a obor C, celkem 20 prací Studentské projekty; obor K, předmět 133YPJK, celkem více než 30 prací
Výzkumná činnost:	(výběr) Řešitel externích grantů pro roky 2013-2015: GA ČR 13-30441S „Studium chování betonu vystaveného extrémnímu zatížení“ MV ČR VG20132015114 „Užití vláknocementových kompozitů pro zvýšení ochrany technické infrastruktury a obyvatelstva proti teroristickému útoku“ TAČR TA03031099 „Optimalizace návrhu staveb dopravní infrastruktury s ohledem na zvýšení jejich trvanlivosti a bezpečnosti provozu“

GA ČR č. 103/09/2071 „Teoretické aspekty vlivu silnic a dálnic na životní prostředí“ (v letech 2009-2011)

Původce jednoho patentu a třech užitných vzorů:
Hrncový odvodňovač pro betonové lávky pro pěší, patent: Úřad průmyslového vlastnictví, 303423. 2012-09-05.
Integrovaný ekologický most pro výstavbu se zachovaným provozem na komunikaci, užitný vzor: Úřad průmyslového vlastnictví, 23216. 2012-01-09.
Styčník pro dřevěné konstrukce, zejména pro prvky z lepeného lamelového dřeva, užitný vzor: Úřad průmyslového vlastnictví, 24545. 2012-11-12.
Hrncový odvodňovač pro ocelové lávky pro pěší, užitný vzor: Úřad průmyslového vlastnictví, 22830. 2011-10-24.

Publikační činnost (výběr aktuálních a významných publikací)

Foglar, M. – Göringer, J.: Influence of the structural arrangement of bridges on the noise induced by traffic. In: Engineering structures 56 (2013) 642–655. ISSN 0141-0296, impact factor 1.713.

Foglar, M. - Kovář, M.: Conclusions from experimental testing of blast resistence of FRC and RC bridge decks In: International Journal of Impact Engineering 59 (2013) 18-28. ISSN 0734-743X, impact factor 1.701.

Foglar, M. - Lubas, A.: Network arch bridges at Trinec-Baliny In: Proceedings of the Institution Civil Engineers - Bridge Engineering. 2013, (in print). ISSN 1478-4637.

Foglar, M. - Křístek, V.: Cetre-line optimisation of buried arch bridges In: Proceedings of the Institution Civil Engineers - Bridge Engineering. 2012, vol. 165(3), no. 3, p. 159-168. ISSN 1478-4637.

Drahorád, M. - Foglar, M. - Veselý, P. - Smiřinský, S.: Užití dynamického faktoru nárůstu pevnosti betonu pro zkrácení doby trvání zkoušek vláknobetonových vzorků In: BETON-technologie, konstrukce, sanace. 2012, roč. 2012, č. 1, s. 74-79. ISSN 1213-3116.

Foglar, M. - Göringer, J.: Vliv konstrukčního řešení mostu na šíření hluku od dopravy In: Silnice železnice. 2012, roč. 7, č. 4, s. 73-84. ISSN 1801-822X.

Jiříček, P. - Foglar, M.: Numerická analýza nárazu nákladního vozidla do mostního pilíře In: Stavební obzor. 2012, roč. 21, č. 9, s. 266-271. ISSN 1210-4027.

Bogdan, V. - Foglar, M. - Bocek, R. - Křístek, V.: Zhodnocení účinnosti stávajících ekologických mostů v České republice In: Silniční obzor. 2011, roč. 72, č. 6, s. 162-166. ISSN 0322-7154.

Foglar, M.: Lávka pro pěší z parkovacího domu Rychtářka v Plzni In: Silnice a železnice. 2011, roč. 6, č. 5, s. 8-10. ISSN 1801-822X.

Foglar, M.: Strain Development in Concrete under Cyclic Loading 1. ed. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2010. 120 p. ISBN 978-3-8383-5093-6.

Projekční praxe: celkem 9 let

02/2012 – dosud	SUDOP PRAHA a.s., vedoucí projektant
01/2009 – 2/2012	HELIKA, a.s., vedoucí projektant
12/2008 – 04/2004	Mott MacDonald, s.r.o., zodpovědný projektant, projektant

Znalost cizích jazyků: anglicky (pokročilý), německy (pokročilý), francouzsky (začátečník)