

VLIV OKRAJOVÝCH PODMÍNEK NA ODOLNOST CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ VŮČI VÝBUCHU

Jakub Zima, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
jakub.zima@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Tento příspěvek popisuje vliv materiálových heterogenit a okrajových podmínek v panelu z cementového kompozitu na poškození způsobené blízkým výbuchem. Experimentální je vyhodnocováno pomocí numerických simulací. Vyhodnocení výsledků je především zaměřeno na poškození v cementovém kompozitu s rozptýlenými vlákny, šíření rázové vlny způsobené výbuchem, odrazů rázové vlny na rozhraní materiálů a rychlosti odletujících částí panelu. Zkoumán je vliv rychlosti odletujících částic a rozsahu poškození v závislosti na dopadu ocelové stoličky, na které je výbušnina umístěna.

KLÍČOVÁ SLOVA

Materiálové heterogenity • Okrajové podmínky • Čedičové rohože • Rozsah poškození panelu vlivem ocelové stoličky • Numerické modelování blízkého výbuchu

ABSTRACT

This paper describes the influence of material and boundary conditions in cement composite specimen on the damage induced by near field blast. Experimental measurements are evaluated by numerical simulations. The evaluation of the results is mainly focused on the damage range in the cement composite with dispersed fibres, the propagation of the overpressure caused by the blast, reflection of the shock wave at the material interface and velocity of the ejected parts from the specimen. The influence of the velocity of ejected parts and damage range from specimen depending on impact of steel plate which is carry explosive is examined.

KEYWORDS

Materials heterogeneity • boundary conditons • basalt mesh • range of damage by steel plate • numerical simulation of near blast

1. NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ

Numerické modelování bylo provedeno v programu ANSYS LS DYNA. Pro výpočet numerického modelu byla použita metoda konečných prvků, výpočet probíhal explicitní metodou.

Numerický model byl modelován pro vyhodnocení šíření rázové vlny, rychlost odletujících částic, a především na vliv heterogenity a rozsahu poškození cementového kompozitu. Během vyhodnocování stanovených výsledků, byly vyhodnocovány další veličiny. Ty sloužili pro verifikaci numerických modelů. Toto numerické modelování a následně vyhodnocení neslouží k ověření výsledků z experimentálního měření. Je však s ním velmi spjato, jednotlivé modely s drobnými modifikacemi odrážejí experimentální měření. Vyhodnocení slouží k pochopení a popsání jevů uvnitř cementového kompozitu při zavedení různých okrajových podmínek při zatížení kompozitu blízkým výbuchem

1.1. Popis modelu

Parametry materiálových modelů byly převzaty z (Kovář 2014, Hájek 2015). Do každého modelu je heterogenita uvážena zavedením více materiálů.

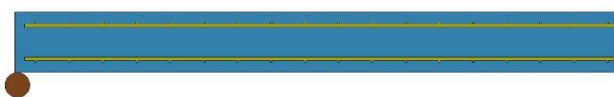
Beton je modelován pomocí materiálového modelu MAT_CSCM. Betonářská výztuž a čedičové rohože byly modelovány pomocí materiálového modelu MAT_PLASTIC_KINEMATIC což představuje standardní materiálový model programu LS-DYNA (Hallquist 2006, 2007). Jednotlivým materiálovým modelům byly přiřazeny příslušné parametry. Betonový panel byl následně doplněn o dřevěnou kulatinu s příslušnými okrajovými podmínkami odpovídající experimentálnímu měření.

Pro snížení výpočetního času byly vytvořeny modely obsahující pouze čtvrtinu panelu, při kterých se využily principy symetricky zatížené konstrukce. Takto zjednodušený model je následně přehlednější pro interpretaci výsledků.

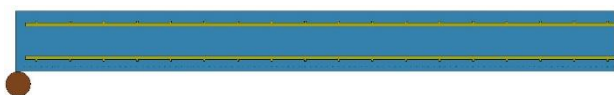
Byly vytvořeny numerické modely z různých betonových směsí s následujícími parametry:

- S betonářskou výztuží a rozptýlenými vlákny,
- betonářská výztuž a rozptýlená vlákna doplněna o jednu vrstvu z čedičových rohoží,
- betonářská výztuž a rozptýlená vlákna doplněna o pět vrstev z čedičových rohoží.

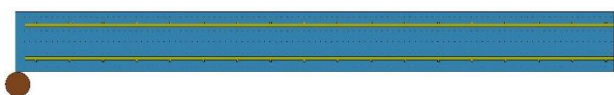
* Školitel: doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.



Obrázek 3: Podélný řez, bez čedičových rohoží.



Obrázek 4: Podélný řez, 1 vrstva čedičových rohoží.



Obrázek 5: Podélný řez, 5 vrstev čedičových rohoží.

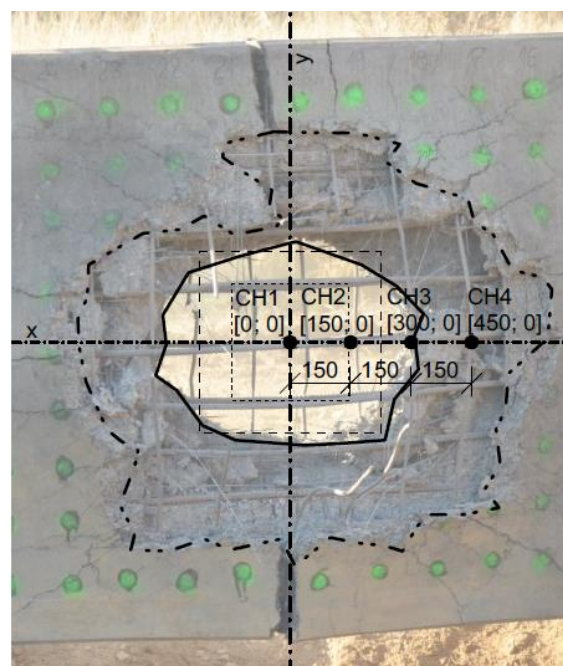
Samotný výbuch byl modelován pomocí funkce `LOAD_BLAST_ENHANCED`. Funkce při zadání vzdálenosti nálože od zkoumaného prvku a hmotnosti této nálože v ekvivalentu k TNT přepočítá zatížení výbuchem na dynamické zatížení působící na jednotku plochy. K tomuto přístupu popisu výbuchu bylo přistoupeno na základě ověření shody výsledků s časově náročnějším výpočtovým modelem obsahující ALE prvky (Foglar et al. 2017). V modelu bohužel není zavedena ocelové stolička, která vnáší do porovnání experimentálních měření a numerických modelů jisté nepřesnosti.

1.2. Rychlost odletujících částic

Během experimentálních měření byly měřeny rychlosti odletujících částic na spodní ploše cementového kompozitu v bodech uprostřed rozpětí panelu, 150, 300 a 450 mm od středu. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno ke zkoumání bodů se shodnými půdorysnými souřadnicemi. Rychlost odletujících částic je tedy zkoumána uprostřed jak v příčném, tak v podélném směru.

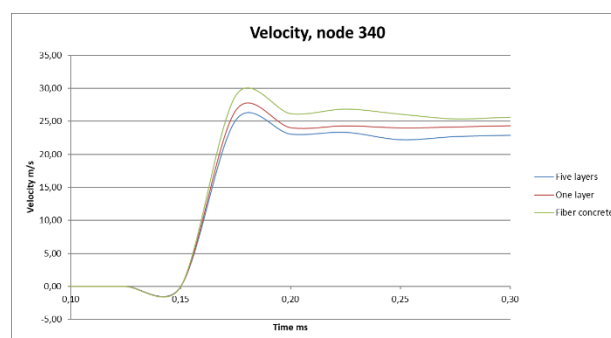


Obrázek 6: Poloha měřících bodů, rychlost odletujících částic.



Obrázek 7: Poloha měřících bodů, rychlost odletujících částic.

Rychlost odletujících částic při spodním povrchu je pomalejší u vysokopevnostního betonu. Pohyb částic nastává v dřívějším čase než u běžně používaného betonu. Energie spotřebovaná prostupem u vysokopevnostního betonu je vyšší, a tím je rychlost odletujících částic nižší. Zároveň lze pozorovat, že rychlost odletujících částic směrem od středu panelu se snižuje, a to u různých betonových směsí. Z obrázků níže je zřejmé, že umístěním čedičových rohoží v jedné, popřípadě v pěti vrstvách lze snížit rychlost odletujících částic. Vhodným umístěním čedičových rohoží po výšce průřezu, lze snížit rychlosti odletujících částic až o 15 %. Tento jev je způsoben tím, že průchodem rázové vlny dochází k odrazům této vlny. Dochází k většímu poškození uvnitř panelu, avšak rychlost odletujících částic je menší.



Obrázek 8: Rychlost odletujících částic, node 340.

1.3. Šíření rázové vlny

Při vyhodnocení numerického modelu s ohledem na prostup vlny bylo zjištěno, že u modelu s vysokopevnostním betonem (UHPC) je prostup vlny rychlejší než u běžně používaného betonu. Vysokopevnostní beton má větší objemovou hmotnost, oproti běžnému betonu je také více homogenní. Menší frakce

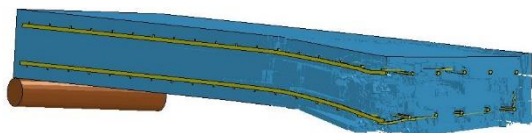
kameniva, větší podíl pojiva a rozptýlená vlákna způsobují rychlejší postup rázové vlny. Časový rozdíl prostupu vlny v závislosti na materiálu je cca 0,01 ms.

Při prostupu vlny je možné pozorovat, že dochází ke koncentraci napětí v okolí betonářské výztuže a odrazů rázové vlny na rozhraní beton, ocel. Napětí koncentrováno ve výztuži se dále redistribuuje směrem od středu panelu k okraji. Koncentrací napětí dochází ke snížení soudržnosti mezi betonovou směsí a betonářskou výztuží a dochází tak delamnici cementového kompozitu. Tyto jevy odvozené ze zkoumání numerických modelů lze pozorovat na experimentálních vzorcích po vzniklém zatížení.

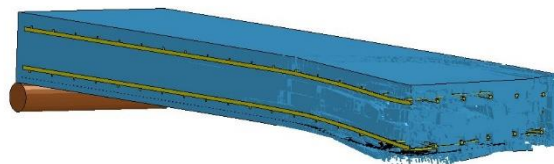
U panelů s čedičovou výztuží je pak možné pozorovat, koncentraci napětí v blízkosti této rohože. Zároveň je možné pozorovat redistribuci vzniklého napětí po odrazu rázové vlny od spodního povrchu panelu. Napětí se následně redistribuuje v krycí vrstvě betonu od středu směrem k okraji panelu.

1.4. Rozsah poškození průřezu

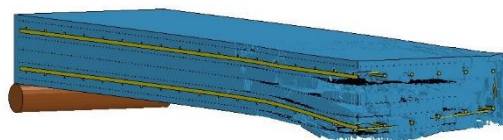
Na obrázcích 9 až 11 je možné pozorovat poškození průřezu vystaveného zatížením způsobeným blízkým výbuchem. Z obrázků je zřejmé, že nedojde k průrazu cementového kompozitu. To je však v rozporu s experimentálním měřením viz. obrázek 7. Z něho je zřejmé, že dojde k průrazu panelu. Ocelová stolička a půdorysných rozměrech 450 x 450 mm způsobuje průraz cementového kompozitu. Její půdorysný rozměr, téměř odpovídá průrazu cementového kompozitu. Z tohoto důvodu bylo v minulém roce uděláno startovací experimentální měření. Cementové kompozity ve zmenšeném měřítku byly vystaveny shodnému zatížení výbuchem. V jednom případě byl mezi panel a plastickou trhavinu umístěn plech o rozměrech 50 x 50 x 4 mm (obrázek 15) a v druhém případě byla do blízkosti panelu umístěna pouze plastická trhavina. Na obrázcích 12 a 13 je pak možné pozorovat porušení cementového kompozitu při horním (obrázek 12) a spodním (obrázek 13) povrchu. Z obrázků je zřejmé, že v případě umístění plechu mezi výbušninu a cementový kompozit způsobuje průraz kompozitu a separaci krycí vrstvy při spodním povrchu. Při absenci ocelového plechu pak k úplnému průrazu nedojde, krycí vrstva je poškozena, avšak nedojde k její separaci od cementového kompozitu.



Obrázek 9: Poškození panel bez čedičových rohoží, $t = 5$ ms.



Obrázek 10: Poškození panelu, umístění čedičových rohoží u spodního povrchu, $t = 5$ ms.



Obrázek 11: Poškození panelu, umístění čedičových rohoží rovnoměrně po výšce panelu, $t = 5$ ms.



Obrázek 12: Poškození horního povrchu kompozitu, experimentální měření.



Obrázek 13: Poškození dolního povrchu kompozitu, experimentální měření.



Obrázek 14: Poloha plastické trhliny.



Obrázek 15: Nálož a ocelový plech.

2. ZÁVĚR

Pro numerické modelování bylo využito programu ANSYS LS DYNA. Blízký výbuch byl modelován pomocí náhradního zatížení ConWep, které převádí zatížení výbuchem na spojité zatížení o ekvivalentní hodnotě. Numerické modely sloužily především pro vyhodnocení šíření rázové vlny, stanovení rychlosti odletujících částic s přihlédnutím k materiálovým vlastnostem a okrajovým podmínkám cementového kompozitu.

Vhodným zavedením průřezových heterogenit, v tomto případě umístěním čedičových rohoží po výšce průřezu, lze snížit rychlosti odletujících částic až o 15 % oproti modelům bez těchto rohoží. Zároveň bylo také prokázáno, že vstup rázové vlny je rychlejší u vysokopevnostních betonů, než u betonů běžných pevností. Rychlost odletujících částic je však nižší, jelikož dochází k pohlcení energie. Těmito dvěma kombinacemi tedy lze, úspěšně zvyšovat ochranu civilního obyvatelstva před účinky odletujících částic cementových kompozitů vystavených extrémnímu zatížení vlivem blízkého výbuchu.

Z numerických modelů je pak zřejmé, že absence ocelové stoličky v numerických modelech způsobuje rozdílné výsledky v poškození cementového kompozitu a v rychlosti odletujících částic. Ocelové stolička způsobí průraz cementovým kompozitem a tudíž nedojde k pohlcení energie způsobené výbuchem. Rychlost odletujících částic je tedy několikanásobně vyšší. Vliv poškození ocelovou stoličkou pak dokazuje experiment ve zmenšeném měřítku. V tomto roce bude pokračovat experimentální měření ve zmenšeném měřítku, zaměřené na vliv poškození cementového kompozitu v závislosti na velikosti stoličky a vzdálenosti stoličky od cementového kompozitu.

ACKNOWLEDGEMENTS

Príspevek vznikl za finanční podpory SGS19/035/OHK1/1T/11, Českého Vysokého učení technického v Praze.

Reference

- Foglar, M., Hajek, R., Kovar, M., & Štoller, J. (2015), Blast performance of RC panels with waste steel fibers, in 'Construction and Building Materials', Vol. 94, pp. 536-546.
- Kovar, M., Foglar, M., & Hajek, R. (2014), Blast performance of real-scale reinforced concrete specimens with varying fiber type and content, in 'WIT Transactions on The Built Environment', Vol. 141, pp. 159-169.
- Hajek, R., Kovar, M., Foglar, M., Pachman, J., & Štoller, J. (2015), Field testing of concrete members subjected to contact and adjacent blast, in 'Advanced Materials Research', Vol. 1106, pp. 164-167.
- Hallquist, J. O. (2006), *LS-DYNA theory manual*. Livermore software Technology corporation, pp. 25-31.
- Hallquist, J. (2007), *LS-DYNA keyword user's manual version 971*. Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA.
- Foglar, M., Hajek, R., Fladr, J., Pachman, J., & Stoller, J. (2017), Full-scale experimental testing of the blast resistance of HSPFRC and UHPFRC bridge decks, in 'Construction and Building Materials', Vol. 145, pp. 588-601.