NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ UHPFRC DESEK VYSTAVENÝCH KONTAKTNÍMU A BLÍZKÉMU VÝBUCHU

*Ondřej Janota, **

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

ABSTRAKT

Předmětem tohoto příspěvku je shrnutí získaných poznatků na poli numerického modelování z dvou experimentů zaměřených na stanovení výbuchové odolnosti prvků z vysokohodnotného drákobetonu (dále UHPFRC). V rámci obou na sobě nezávislých experimentů, bylo sledováno chování UHPFRC desek při zatížení jak kontaktním, tak blízkým výbuchem. I přes původní snahu nebylo možné, vzhledem k charakteru zatížení, detailně zachytit chování prvků přímo během zatížení výbuchem. Pro tento účel byly vytvořeny numerické výpočetní modely, na kterých bylo možné simulovat a následně vyhodnotit chování prvku během výbuchu. Numerické modely byly vytvořeny se třemi variantami simulace výbuchu. Tyto varianty byly mezi sebou porovnány a následně vybrána nejvýstižnější. Dále byla na základě porovnání výsledků numerických modelů s výsledky experimentů byla posouzena výstižnost modelů. Výsledky ukazují, že je možné obecně simulovat jednotlivé děje (šíření trhlin, kumulace napětí, poškození prvků) pomocí numerických modelů. Nicméně při porovnání experimentu a numerických modelů z hlediska exaktně měřených veličin se výsledky rozcházejí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Výbuchová odolnost • UHPFRC desky • numerické modely • trhliny

ABSTRACT

This paper presents achievements in the field of the numerical simulation of the fibre reinforced concrete (FRC) and ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). The numerical simulations were performed to verify results of two experimental programmes focused on the blast resistance of FRC and UHPFRC. The response of the FRC and UHPFRC slabs to the contact and near-field blast was studied in these two experiments. As the detail behaviour of specimens could not be observed because of the blast load, the numerical models were prepared. The accuracy of the numerical models was evaluated based on the comparison of numerical and experimental results. Different approaches for blast simulation were tested and compared. The results indicate that the various phenomena (e.g. overpressure propagation, stress cumulation, crack propagation and damage extend) can be successfully simulated. However, the comparison of the soffit velocity, measured with the PDV unit and numerical model showed shortcomings of the numerical model. These numerical model inaccuracies are discussed and their reasons presented.

KEYWORDS

Blast resistance • UHPFRC slabs • numerical models • cracks

1. ÚVOD

V minulých letech byla provedena série experimentů provedených v rámci několika výzkumných programů. Cílem těchto experimentů bylo získání vhledu do problematiky chování železobetonových a drákobetonových prvků při zatížení výbuchem. V rámcí první série byly vyzkoušeny desky o rozměrech 6,0 x 1,5 m a tloušťce 0,3 m. Vzorky byly vyztuženy jak pomocí rozptýlené výztuže, tak běžně používaných betonových prutů. Do některých desek byly přidány prvky, zvyšující heterogenitu prvku a simulující princip sendvičové konstrukce. Vzhledem k rozsahu těchto experimentů, které byly provedeny jako full-scale experimenty, a jejich finanční náročnosti, bylo přistoupeno k vytvoření numerických modelů, které měly ověřit získané výsledky. V rámci těchto modelů byla vyvinuta metodika pro modelování kontaktního výbuchu, interakce betonu a betonářské výztuže. Dále byly vytvořeny modely ve snaze zohlednit prvky zvyšující heterogenitu.

Druhý experiment vznikl ve spolupráci Českého vysokého učení v Praze a LAFARGE Centre de Recherche. V rámci experimentu byly vyzkoušeny dvě směsi UHPFRC s rozdílnými vlastnostmi v tahu a tlaku a stanovena jejich výbuchová odolnost. Znalosti získané během numerických simulací vzorků ze série prvotních experimentů byly následně použity pro vytvoření přesnějších numerických modelů v rámci druhého experimentu.

Kompletní výsledky jednotlivých experimentů budou publikovány samostatně.

2. NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ VÝBUCHU

Jak již bylo řečeno v úvodu, numerické modelování experimentů zabývajících se výbuchem má pomoci detailně pochopit děje, které ve zkoušených vzorcích probíhají. Při

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

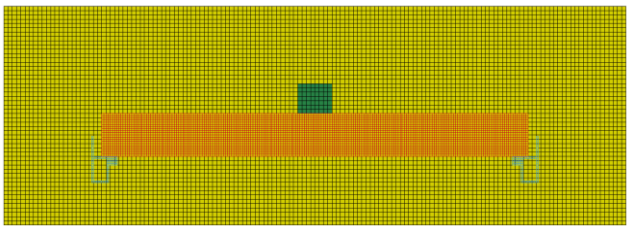
úspěšné numerické simulaci je pak možné variovat různé materiálové modely a okrajové podmínky a porovnat výsledky. V současné době není možné simulovat zatížení výbuchem v běžně používaných softwarech a je potřeba využít specializovaných softwarů, které jsou schopny simulovat jak chování běžných materiálů při zatížení výbuchem, tak obsáhnout chování plynů a energetických materiálů. Mezi tyto softwary patří program LS-DYNA, který je hojně používán pro výpočet nelineárních úloh závislých na čase a simulaci rychlých jevů a byl použit pro vytvoření numerických modelů v případě obou experimentů. Pro správnou implementaci numerického modelu jsou pak hlavní dva faktory. Prvním faktorem je materiálový model, který je schopný zohlednit chování betonu/drátkobetonu při zatížení rychlými jevy (materiálové zpevnění a změkčení; strain rate effects a s ním spojený dynamický faktor zvyšující pevnost materiálu při zatížení rychlými jevy). Druhým faktorem je pak samotná definice zatížení výbuchem a jeho síla.

2.1. Materiálový model

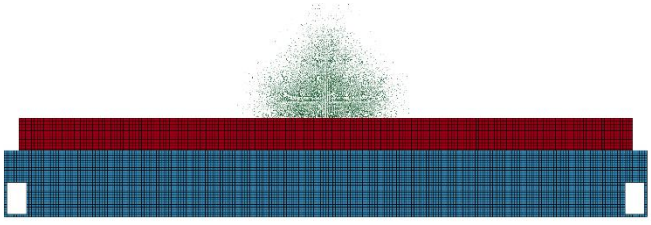
Vzhledem ke komplexnosti úlohy nejsou běžně používané materiálové modely dostačující. Ze stanovení správného materiálového modelu se tak stává jedna z nejsložitějších úloh při vytváření numerického modelu. V rámci programu LS-DYNA je dostupná knihovna materiálových modelů, která obsahuje více možností, jak simulovat chování betonu. Společným problémem všech dostupných materiálových modelů fakt, že všechny byly vyvinuty pro simulaci prostého betonu a jejich adaptace na chování drátkobetonu je velmi problematická nebo dokonce nemožná. Hojně používaným materiálovým modelem pro tyto účely je materiálový model MAT72_Rel3 [1], [2], [3]. MAT72_Rel3 je definován pomocí tří plastických povrchů a stavové rovnice, zajišťující zohlednění výše uvedených jevů. Matematický popis stavové rovnice a jednotlivých povrchů je pro uživatele dostupný a je možné jejich definice modifikovat. V kombinaci s dalšími vstupními parametry je otevřenost modelu jedním z hlavních faktorů proč je tento materiál používaný pro simulace drátkobetonu. V případě vývoje vlastního materiálového modelu se nabízejí dvě možnosti.
Pro běžně používané betony je možné nechat programem vygenerovat jednotlivé parametry na základě požadované pevnosti betonu. Získané parametry následně modifikovat tak, aby tahové chování materiálového modelu odpovídalo drátkobetonu nebo UHPC/UHPFRC. Druhou možností je vlastní definice všech parametrů. Vzhledem k počtu těchto parametrů je pro jejich přesné stanovení nutné provést značné množství zkoušek, které nejsou běžně používané (jednoosé tahové zkoušky, tříosé tlakové zkoušky pro různé velikosti tlaku).

2.2. Zatížení výbuchem

Software LS-DYNA umožňuje využít hned několik přístupů pro modelování výbuchu a jím vytvořené zatížení (tlakovou vlnu). Použitelnost jednotlivých metod je detailně popsána v [4]. V případě kontaktního a velmi blízkého výbuchu jsou použitelné tři metody. První možností je použít Lagrangian – Eulerianovskou (ALE) síť prvků, viz. Obr. 1. V rámci této sítě se Eulerovské prvky volně pohybují v Lagrangiovské síti. Tato metoda je schopná simulovat chování plynů a materiálů s velkou deformací. Do této sítě je pak přidána druhá síť, která tvoří samotný vzorek UHPFRC desky a interaguje s Eulerovskými prvky. Výhodou této metody je možnost sledovat šíření výbušniny a velikosti přetlakové vlny, možnost volby materiálového modelu výbušniny a její stavové rovnice. Nevýhodou je pak zejména nutnost vytvoření domény, která simuluje vzduch okolo testovaného vzorku a závislost výsledku na zvoleném tvaru Lagrangiovské sítě. Tato doména je potřeba pro správné šířený tlakové vlny a rozpínání výbušniny. Existence dvou sítí vedena na výrazné navýšení potřebného výpočtového času. Druhý přístup využívá takzvané meshless metody [5] (Smoothed particle hydrodynamice, SPH). Výbušnina není modelována pomocí prvkové sítě, ale pomocí částic, viz. Obr. 2. Jednotlivé částice jsou svázány materiálovým modelem, stavovou rovnicí a dále jejich vzdáleností. Zatížení je na panel přeneseno kolizí jednotlivých částic s testovaným vzorkem. Výhodou tohoto přístupu je snížení výpočetní náročnosti a výpočtového času, absence sekundární sítě simulující okolné vzduch a tvarová variabilita výbušniny. Nevýhodou je pak závislost výsledného zatížená na celkovém počtu částic a v případě nižšího počtu částic viditelná diskretizace zatížení. Třetí přístup umožňující modelování výbuchu v programu LS-DYNA, je využití vnitřního mechanismu nazvaného PARTICLE BLAST METHOD (PBM). Tato metoda je velmi podobná s druhým přístupem. Výbušnina je nahrazena systémem částic, které reprezentují ideální plyn a chovají se podle Newtonových pohybových zákonů [6]. Výhodou této metodiky je její snadné použití a velmi malá výpočtová náročnost. V implementaci stačí definovat tvar výbušniny, počet částic simulující výbušninu a základní parametry materiálu výbušniny. Nevýhodou je pak nemožnost stanovit vlastní stavovou rovnici a omezená možnost definice materiálových vlastností výbušniny.



Obrázek 1: *Model ALE s prvky - dvě samostatné sítě pro vzduch s výbušninou a panel.*

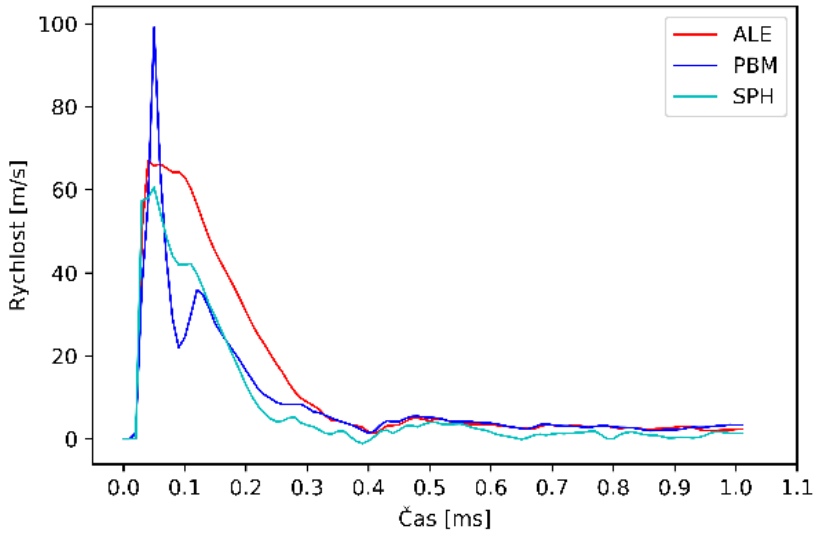


Obrázek 2: (normálně): *Model SHP – výbušnina je simulována pomocí částic.*

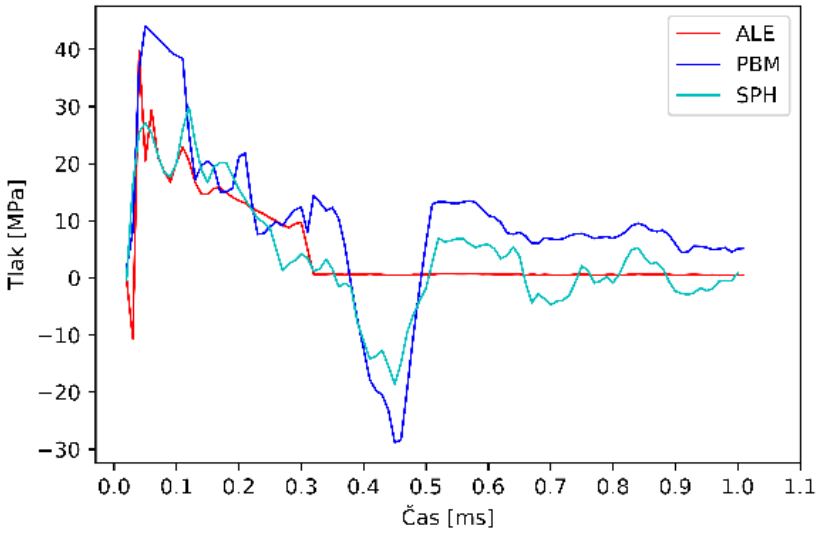
3. VÝSTIŽNOST NUMERICKÝCH MODELŮ

3.1. Porovnání výbuchových metod

Porovnání jednotlivých metod bylo provedeno na základě získaných výsledků měření průběhu přetlakové vlny na spodní straně vzorku a rychlosti spodního povrchu testovaného vzorku viz Obr. 3 a Obr. 4. Výsledky ukazují na velmi dobrou schodu mezi jednotlivými metodami. V případě zrychlení spodního povrchu se rozdíl mezi metodou ALE a SPH pohybuje do 10 %. Výraznější rozdíl je zřetelný v případě metody PBM kde je dosaženo o cca 40 % větší maximální rychlosti. Následně se, rychlost sníží obdobné hodnoty jako v případě ALE a SPH metody. Průběh tlaku na spodním povrchu testovaném vzorku je stejně jako v případě rychlosti povrchu obdobný pro všechny tři přístupy. Z výsledku je zřetelné, že rozdíl mezi jednotlivými přístupy je minimální a metody můžou být považovány za rovnocenné. Bez experimentálního měření dané výbušniny, ale není možné stanovit přesnost metod z hlediska výsledného zatížení na testované vzorky.



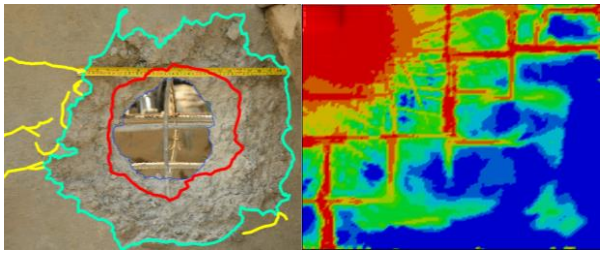
Obrázek 3: *Rychlosti spodního povrchu desky.*



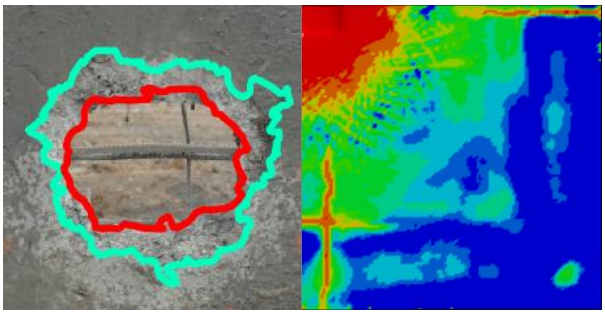
Obrázek 4: *Průběh napětí na spodním povrchu desky.*

3.2. Poškození desek

Jedním z parametrů, které byly sledovány v rámci stanovení výbuchové odolnosti UHPFRC prvků byl rozsah poškození kontaktní a odvrácené strany a hloubka porušení. U testovaných desek je rozsah poškození jasně měřitelný a definovaný. V případě numerických modelů je poškození závislé na zvoleném materiálovém modelu. V případě materiálu MAT72_Rel3 není poškození materiálu definováno. Obecně se tedy pro stanovení poškození nejčastěji používá materiálový parametr „Effective Plastic Strain, který na základě přetvoření a napětí stanovuje polohu mezi jednotlivými plochami plasticity. Obr. 5 a Obr. 6 zobrazují rozdíl poškození mezi FRC a UHPFRC vzorkem doplněné o betonářskou výztuž. Na numerických výsledcích je jasně patrný rozdíl ve velikosti poškození a systému trhlin na povrch. V případě FRC vzorku s nižší pevností dochází ke vzniku trhlin v rastru betonářské výztuže vlivem kumulace napětí okolo výztuže. V případě UHPFRC vzorku tyto trhliny nevznikají, beton je schopen vzniklé napětí přenést bez vzniku trhlin.



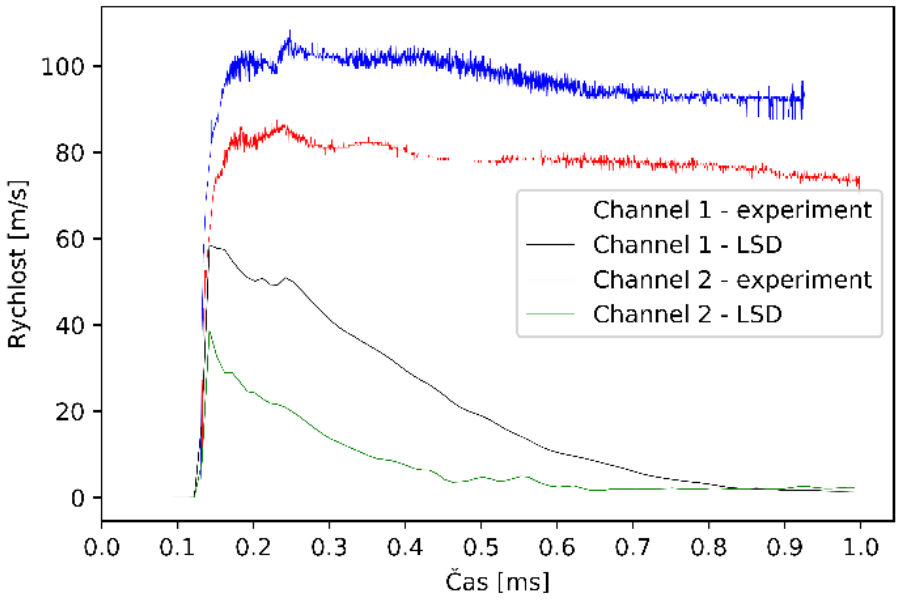
Obrázek 5: *Porovnání poškození kontaktního povrchu – vzorek s pevností 72,3 MPa*



Obrázek 6: *Porovnání poškození kontaktního povrchu – vzorek s pevností 127,1 MPa.*

3.3. Rychlost spodního povrchu

Obr. 7 zobrazuje porovnání experimentálních a numerických výsledků průběhu rychlosti spodního povrchu UHPFRC desky zatížené výbuchem u které došlo k průrazu. V případě numerického modelu nelze namodelovat fragmentaci vzorku. Po proběhnutí počátečního akcelerace spodního povrchu nedojde k utržení měřeného místa a ustálení rychlosti, ale k deceleraci měřeného místa až na nulovou rychlost. Při porovnání dosažené maximální rychlosti po proběhnutí počáteční akcelerace není v numerickém modelu dosaženo stejných hodnot jako v případě experimentálního měření.



Obrázek 7: Rychlost spodního povrchu desky zatížené výbuchem.

4. ZÁVĚR

V rámci vytváření numerických modelů byly sledovány a porovnány tři různé přístupy pro modelování výbuchu v programu LS-DYNA. Výsledky ukazují, že i přes odlišnou definici výbušniny a mechanismu šíření výbuchu, jsou přístupy rovnocenné. Porovnání experimentálních a numerických výsledků ukazuje na výstižnost numerických modelů v případě výsledného poškození a šíření trhlin. Výsledky jsou však zatížené nemožností simulovat fragmentaci vzorku a nejasnou definicí poškození. V případě porovnání exaktně měřené veličiny, rychlost spodního povrchu, vykazuje numerický model značné nedostatky. Průběh počáteční akcelerace je totožný s experimentálními výsledky, ale v numerickém modelu je není dosaženo stejné maximální rychlost. Následující průběh rychlosti spodního povrchu je zcela nevýstižný. Rozdíl je opět způsoben nemožností zohlednit fragmetnaci vzorku v numerickém modelu. Pro další zpřesnění numerického modelu je nutné jasně stanovit zatížení, které působí na daný vzorek. V případě znalosti tohoto zatížení je možné rozlišit, zda je simulace výbuchu v programu dostatečně přesná nebo zda je nutné dále upravit materiálový model zkouseného vzorku, který je odvozen na základě statických zkoušek a nemusí přesně vystihovat materiálové chování při zatížení výbuchem.

PODEKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory České grantové agentury v rámci projektu číslo 17-23067S „Charakterizace chování betonu vystaveného výbuchu a následnému požáru“ a Studentské grantové soutěže ČVUT v rámci projektu Studium vlastností cementových kompozitů vystavených kombinovanému zatížení výbuchem a následným požárem.

LITERATŮRA

[1] SCHWER, L. E., MALVAR L.J., Simplified Concrete Modeling with *MAT_CONCRETE_DAMAGE_REL3 [online]. 2005.

[2] MALVAR L.J., CRAWFOR, J.E, WESEVICJ, J.W. and SIMONS, D. A new concrete material model for DYNA36, Karagozian and Case. Report No. TR94-14.3, 1994

[3] MARKOVICH N., KOCHAIV E., BEHN-DOR G. Calibration of a Concrete Damage Material Model in LS-DYNA for a Wide Range of Concrete Strengths, Protective Technologies Research and Development Center, Finite Elements in Analysis and Design, Volume 47, Issue 11, 1280-1290 (2011)

[4] HILDING D., Methods for Modelling Air Blast on Structure in LS-DYNA, Nordic LS-DYNA Users‘ Conference 2016

[5] XU J., WANG J., Interaction Methods for the SPH Parts (Multiphase Flows, Solid Bodies) in LS-DYNA, 13th International LS-DYNA Users Conference.

[6] TENG H., WANG J., Particle Blast Method (PBM) for Simulation of Blast Loading, 13th International LS-DYNA Users Conference.