

VLIV DRUHU SPŘAŽENÍ NA ODOLNOST OCELOBETONOVÝCH PANELŮ VYSTAVENÝCH ÚČINKŮM VÝBUCHU

Vojtěch Šulc, *

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

ABSTRAKT

Předmětem článku je představení části probíhajícího experimentálního programu zabývající se charakterizací chování spřažených kompozitních konstrukcí ocel-beton vystavených zatížení výbuchem. Součástí experimentu jsou 2 sady materiálů různých vzorků po 6 odlišných konfiguracích vyztužení, resp. spřažení. Tento článek se detailně zabývá třemi prvky z betonu běžných pevností spřažených různými způsoby se spodní ocelovou deskou. Právě odlišné způsoby spřažení jsou společným jmenovatelem vybraných vzorků k porovnání. Článek obsahuje vzájemné porovnání experimentálně získaných dat jak mezi sebou, tak s vytvořenými výpočetními modely. Mezi experimentálně získaná data jsou zejména řazeny průběhy rychlostí spodního povrchu zkoušených vzorků. Z nich jsou pomocí integrace vypočteny deformace. Hlavním cílem příspěvku je přiblížit čtenáři problematiku chování kompozitních materiálů ocel-beton vystavených blízkému výbuchu a popsat fenomény, na které bylo naraženo při pracích v rámci experimentálního programu. V závěru článku jsou mimo jiné uvedeny předběžné směry výzkumu do budoucna.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton • Kompozit • Ocel • PDV • Photonic Doppler Velocimetry • Výbuch

ABSTRACT

The subject of the article is the presentation of a part of the ongoing experimental program dealing with the characterization of the behaviour of composite steel-concrete structures exposed to blast loads. Part of the experiment are 2 sets of materials with different specimens of 6 different configuration reinforcements, respectively connection between these 2 materials. This article deals with 3 specimens made of normal strengths concrete connected in different ways to the bottom steel slab. The different kinds of connection were chosen for comparison. The article therefore contains a mutual comparison of the experimentally obtained data both with each other and with the created numerical models. Among the experimentally obtained data, the velocity curves of the lower surface of the tested specimens are listed in particular. From them, the deformations are determined by integration. The

main goal of the contribution is to bring the reader closer to the issue of steel-concrete composite materials exposed to a near explosion and to describe the phenomena that were encountered during work within the experimental program. At the end of the article, preliminary plans for the future are presented.

KEYWORDS

Blast • Composite • Concrete • PDV • Photonic Doppler Velocimetry • Steel

1. ÚVOD

Jedním z největších problémů u konstrukcí vystavených blízkému výbuchu jsou odletující úlomky. Ty velmi často představují mnohem větší riziko než vzdušná rázová vlna od samotného výbuchu. Mezi tímto způsobem potenciálně okolí ohrožujícími materiály lze řadit mimo jiné i beton, resp. železobeton. Jedním z možných řešení je obklopení betonu materiálem, který není po výbuchu roztržštěn na více malých úlomků. Z tohoto hlediska se jeví spřažené kompozitní panely ocel-beton jako ideální. Spřažením těchto dvou materiálům lze dosáhnout i velmi tuhého ale zároveň duktilního kompozitu. To vše bylo motivací v tomto experimentálním programu. Užitím k betonu běžné pevnosti i UHPFRC vzniká rozmanitá škála vzorků, které byly posuzovány. Tento článek se však kvůli své omezené délce podrobně zabývá pouze trojicí kompozitních panelů z betonu běžné pevnosti. Všechny 3 mají pouze spodní ocelovou desku a liší se typem jejího spřažení s betonem. Představení právě vlivu spřažení je jedním z hlavních cílů tohoto článku.

2. EXPERIMENT

2.1. Popis experimentu

V rámci experimentu bylo zkoumáno celkem 6 různých betonových panelů ve dvou variantách betonu. Při prvním experimentálním dnu byl použit běžný beton. Při druhém dnu byly zkoumány prvky stejně uspořádané, ale byly zkoušeny prvky z UHPFRC.

Jedná se o sady betonových panelů s různými vlastnostmi. Odlišují se různými konfiguracemi umístění ocelových desek i

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

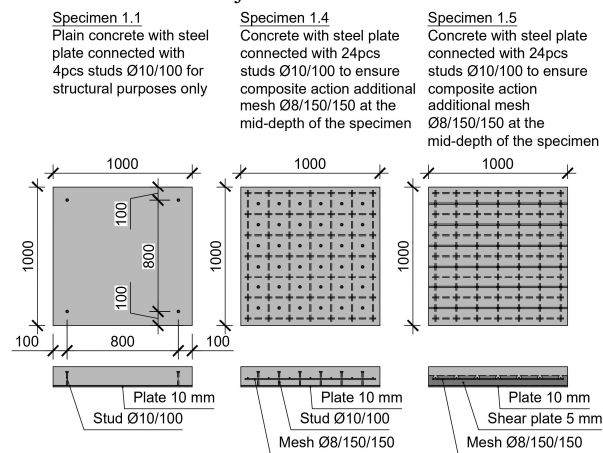
různými spráhujícími prostředky, resp. v některých případech hustotou jejich použití.

Všechny varianty vzorků jsou uvedeny v Tabulka 1, přičemž řešené vzorky jsou zvýrazněny.

Tabulka 1 - Přehled všech zkoumaných vzorků z betonu běžné pevnosti

Označení vzorku	Popis vzorků
1.0	Beton vyztužen sítí Ø8/150/150, krytí 30 mm
1.1	Prostý beton se spodní ocelovou deskou tl. 10 mm, sprážení pomocí 4 trnů Ø10/100 v rozích
1.2	Prostý beton se spodní i horní ocelovou deskou tl. 10 mm, spojení pomocí 4 závitových tyčí M10 v rozích
1.3	Prostý beton se spodní i horní ocelovou deskou tl. 10 mm, spojení pomocí 24 závitových tyčí M10
1.4	Beton vyztužen sítí Ø8/150/150 uprostřed výšky, spodní ocelová deska tl. 10 mm, sprážení pomocí 24 trnů Ø10/100
1.5	Beton vyztužen sítí Ø8/150/150 uprostřed výšky, spodní ocelová deska tl. 10 mm, sprážení pomocí 6 spráhovacích lišt tl. 5 mm

Předmětem tohoto článku jsou pouze vzorky 1.1, 1.4 a 1.5 zhotovené z betonu běžné pevnosti. Schéma vzorků, ke kterým je vztahován tento článek je uvedeno na Obrázek 1.



Obrázek 1 - Přehled řešených vzorků

Vybrané zkoumané vzorky mají všechny pouze spodní ocelovou desku. Liší se hlavně charakterem použitého spráhovacího prvku. U vzorku 1.1 je spodní ocelová deska sprážená s betonem pouze konstrukčně pomocí 4 trnů Ø10/100. Spodní deska vzorku 1.4 je sprážená 24 trny stejných dimenzí jako v předchozím případě, a navíc je zde doplněna výztužná síť Ø8/150/150 ve středu výšky. Na sprážení ocelové desky s betonem v případě vzorku 1.5 bylo použito celkem 6 spráhovacích lišt tl. 5 mm s kruhovými otvory pro vedení výztužné sítě Ø8/150/150 ve středu výšky.

Prvky z betonu běžné pevnosti byly zhotoveny z betonu C30/37 XF2 (F.1.1) S4 Dmax16 CEM I 42,5 R CI 0,2. Všechny vzorky byly betonovány v Kloknerově ústavu ČVUT. Pro kontaktní výbuch bylo použito u všech vzorků 0,5kg Semtexu 1A.

Rozměry všech vzorků jsou shodně 1,0x1,0x0,15 m. Právě volba rozměrů panelů a hmotnost nálože je zásadní. Napříč škálou zkoumaných vzorků se nachází diametrálně odlišné odolné vzorky (např.: velmi odolný vzorek 1.5, respektive většina prvků z UHPFRC, oproti tomu křehký vzorek 1.0). Zároveň bylo nutné zvolit velikost prvků takovou, aby na jeho ploše bylo možné realizovat určitou škálu možností sprážení.

Porovnání vlivu zmiňovaných různých druhů sprážení bylo jedním z cílů experimentu.

Na Obrázek 2 je patrný panel připravený být vystaven účinkům výbuchu. Na jeho povrchu je umístěna výbušnina. Po stranách jsou patrné manipulační úchyty. Panel je usazen na svařené ocelové stolici. Pod panelem jsou umístěny zařízení pro měření PDV.

Experiment byl uspořádán na Univerzitě Pardubice za spolupráce se zaměstnanci Ústavu energetických materiálů.



Obrázek 2 – Umístění vzorku před výbuchem

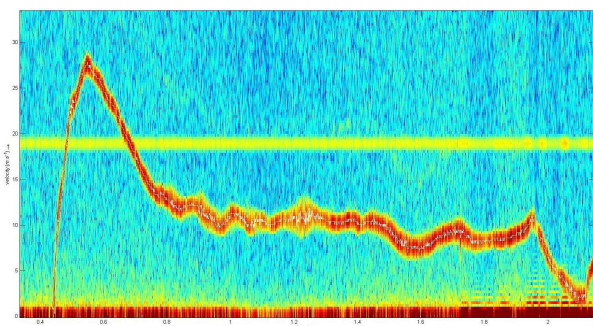
V rámci experimentu byla měřena rychlost spodního povrchu vzorků během odezvy na zatížení výbuchem.

Dále bylo provedeno vyšetření panelů ultrazvukem před a po výbuchu. To bylo učiněno v rastru 200x200 mm. Bohužel u některých vzorků došlo ke kompletní delaminaci vrstev a při měření ultrazvukem nebyly naměřeny žádné hodnoty.

2.2. Stručný popis metody Photonic Doppler Velocimetry (PDV)

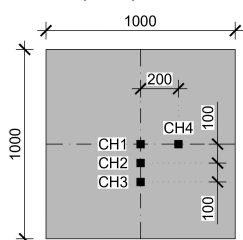
V experimentu použitá metoda Photonic Doppler Velocimetry, zkráceně PDV, je interferometrická laserová metoda. V principu je založená na současném vysílání a přijímání téhož laserového paprsku pomocí kolimátoru. V jeden okamžik jsou paralelně vysílány 2 ramena. Jedno referenční rameno a druhé, skrze které probíhá měření v několika kanálech. V měřícím ramenu dochází vlivem pohybu měřeného objektu k posunu frekvence. Zjednodušeně řečeno, při měření dochází k Dopplerově jevu. Při vyhodnocování jsou používány buď Fourierova transformace nebo vlnková transformace. Tato metoda je často využívána pro měření vysokorychlostních jevů až do rychlosti desítek km/s.

Na Obrázek 3 je vykreslen časově-frekvenční spektrogram frekvenčně posunutého měření. V tomto experimentu byly použity 4 kanály. Výsledky byly v drtivé většině čitelné do cca 2,5 ms. Ve většině případů je záznam v delším čase nečitelný, jelikož je měření již začíná být zatíženo větším množstvím vnějších vlivů, které záznam činí neprůkazný.



Obrázek 3 - Výstup z měření PDV

Jak již bylo zmíněno, byly měřeny celkem 4 body na spodním povrchu všech panelů (CH1-CH4). Jednalo se o body ve středu panelu (CH1), dvojici bodů ve vzdálenosti 200 mm od středu ve dvou na sobě kolmých směrech (CH3, CH4) a bod ve vzdálenosti 100 mm od středu (CH2).



Obrázek 4 - Schéma umístění měřených bodů

3. NUMERICKÉ MODELY

3.1. Popis modelu

Pro potřeby experimentu byly vytvořeny výpočetní modely v softwaru LS-DYNA. Jedná se o konečně-prvkový model řešený metodami explicitní dynamiky. Zkoumané vzorky jsou modelovány pomocí objemových prvků. Všem prvkům jsou přisouzeny příslušné materiálové vlastnosti. V této fázi prací na projektu nebylo přistoupeno k modelování okolního prostředí pomocí objemových prvků. Výbuch je modelován pomocí funkcionality LOAD_BLAST_ENHANCED přítomné v použitém softwaru. Byl proveden přepočítání použité hmotnosti výbušniny (Semtexu) na ekvivalent TNT.

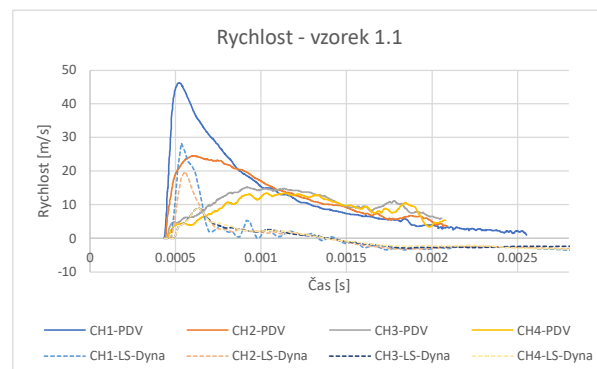
Všechny modely jsou shodně podepřeny po jejich obvodu podporami působícími pouze v tlaku. Pro zpřesnění výpočetního modelu je možné přejít i k modelaci podpěrné ocelové stolice. Tento postup zatím proveden nebyl, ale je veden v patrnosti. Výpočet byl proveden do času 10 ms. Velikost sítě konečných prvků byla s ohledem na vlastnosti vzorků zvolena 5 mm. Spřáhovací prvky i betonářská výztuž je modelována objemovými prvky, stejně jako beton i ocelové desky. V současné době stále probíhá validace výpočetních modelů.

3.2. Porovnání rychlostí a deformací

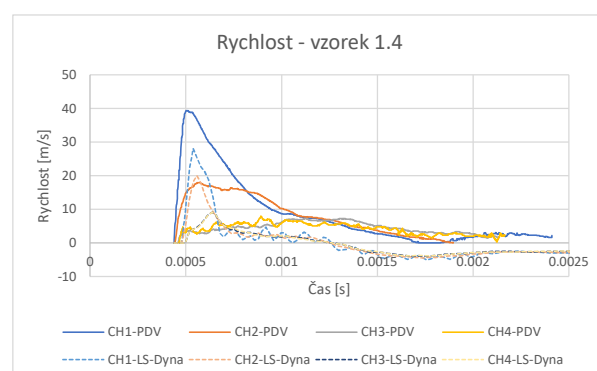
Jednou z možností, jak porovnat výsledky z výpočetního modelu se skutečností, je zobrazení rychlostí prvků na spodním povrchu ve stejných polohách, jako jsou polohy, ve kterých byla tato rychlost měřena.

Nulový čas ve výpočetním softwaru a v grafech jež jsou výstupem z měření PDV, nejsou vždy stejné. Pro účely vzájem-

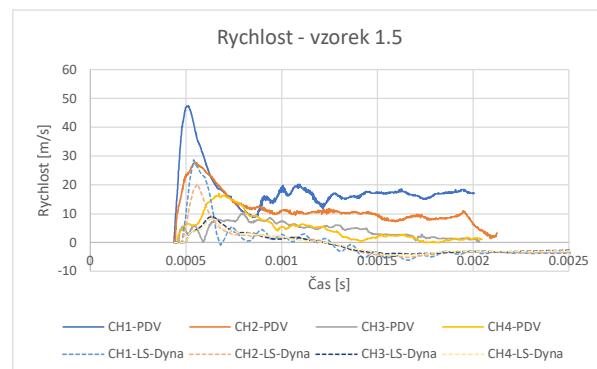
ného porovnání výsledků z experimentu a z výpočetního modelu byl posunut graf ze softwaru o příslušný čas tak, aby jevy začínaly přibližně shodně.



Obrázek 5 - Rychlost spodní povrch - vzorek 1.1



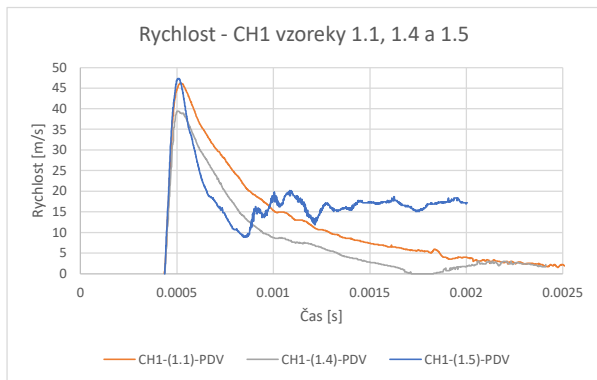
Obrázek 6 - Rychlost spodní povrch - vzorek 1.4



Obrázek 7 - Rychlost spodní povrch - vzorek 1.5

Z předložených grafů na Obrázek 5 - Obrázek 7 je patrné, že ve výpočetním modelu nebylo téměř v žádném bodu dosaženo stejné nebo větší rychlosti, než bylo naměřeno při experimentu. Je možné, že ve výpočetním modelu nebyla zastížena špička zatížení výbuchem, ale až jeho zmenšená hodnota.

Z naměřených hodnoty při experimentu je vidět, že nejrychlejší byl vždy bod uprostřed vzorku.

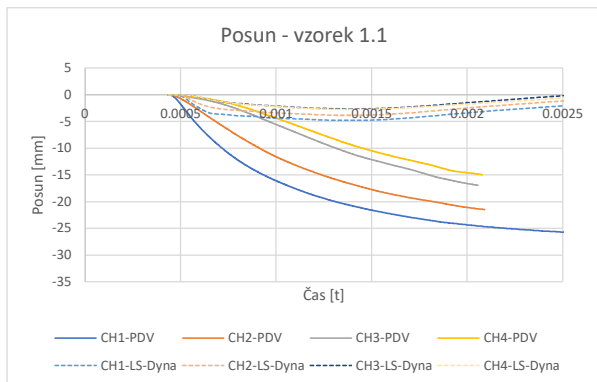


Obrázek 8 - Rychlost středů všech řešených panelů

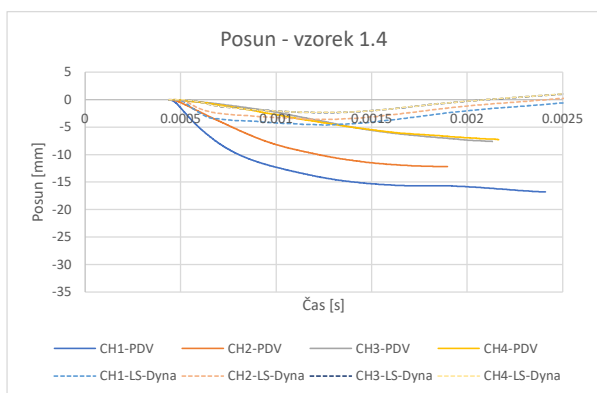
Maximální rychlosti bodů CH1 z výpočetního modelu jsou u všech vzorků velmi podobné a rozdíl mezi nejrychlejším (1.5 – 28,66 m/s) a nejpomalejším (1.4 – 28,12 m/s) je 0,5 m/s.

Tato maximální hodnoty jsou vzájemně mírně odlišné u hodnot získaných metodou PDV. Ty jsou spolu v grafu uvedeny na Obrázek 8. Jak již bylo zmíněno, jsou v absolutní hodnotě větší než vypočtené. Zde rozdíl mezi nejrychlejším (1.5 – 47,35 m/s) a nejpomalejším (1.4 – 39,36 m/s) vzorkem je téměř 8 m/s.

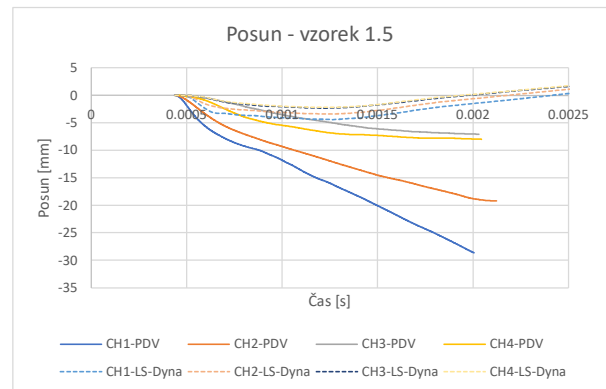
Mezi rychlostí a posunem platí jednoduchý vztah, kdy rychlost je derivací posunu podle času. Posun tak lze získat integrací rychlostí. Tímto způsobem byli z PDV rychlostí získány posuny bodů naměřené při experimentu.



Obrázek 9 - Posuny spodní povrch - vzorek 1.1



Obrázek 10 - Posuny spodní povrch - vzorek 1.4



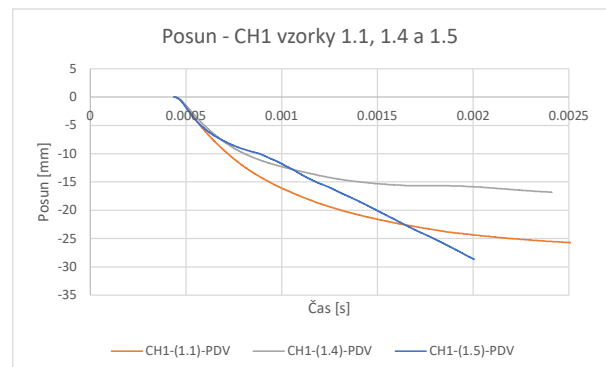
Obrázek 11 - Posuny spodní povrch - vzorek 1.5

Z grafů na Obrázek 9 až Obrázek 11 je jasné, že při experimentu došlo k větším posunům spodního povrchu, než bylo následně spočteno ve výpočetním programu.

Lze se domnívat, že v případě vymodelování podporující ocelové stolice by ve výpočtu bylo dosaženo větších deformací.

Další jev, který je patrný z vypočtených hodnot, je následný protikmit všech panelů. Ten není, kvůli omezení délce záznamu, patrný na žádné křivce posunů integrovaných z PDV. Dá se předpokládat, že i ve skutečnosti k tomuto dokmitání zkoumaných objektů docházelo, u ocelových konstrukcí je to obecně známý jev. V současné chvíli ale není možné určit do jaké míry se to u jakých vzorků událo.

Na Obrázek 12 jsou posuny středů získané při experimentu. Z grafu je vidět, že nejmenší průhyb byl zaznamenán u vzorku 1.4.



Obrázek 12 - Posun středů všech řešených panelů

3.3. Vizualní porovnání

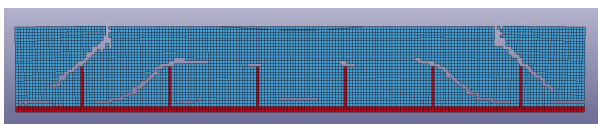
Mimo záznamy z PDV je možné zkoumané vzorky vzájemně porovnávat i z vizuálního hlediska. V použitém výpočetním softwaru LS-DYNA dochází k odstranění (tzv. erozi) prvků, u kterých byla vyčerpána jejich únosnost. Pro zobrazení, jak blízko své limitní pevnosti se prvek aktuálně nachází je v softwaru zavedena veličina Effective Plastic Strain, která nabývá hodnot z intervalu $\langle 0;1 \rangle$, kdy při hodnotě 1,0 je z modelu odstraněn, z hlediska hmotnosti v modelu ale zůstává.

Ve spojení s použitým softwarem se tak nabízí i vzájemné porovnání dat z výpočetního modelu a dat z experimentu.

Při pohledu z boku kolmo na spřahovací lišty panelů 1.5 na Obrázek 13 a Obrázek 14 jsou na obou výstupech patrné trhliny v horní části lišt. Při experimentu nebyly objeveny šikmé trhliny mezi poslední a předposlední lištou.



Obrázek 13 - Pohled kolmo na spřahující lišty prvku 1.5 (experiment)

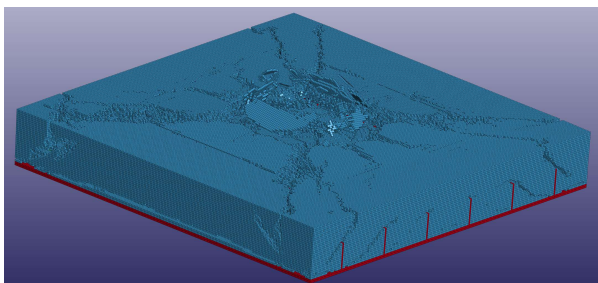


Obrázek 14 - Pohled kolmo na spřahující lišty prvku 1.5 (LD-DYNA)

Ve výpočetním modelu došlo v druhém směru (rovnoběžném s lištami) k delaminaci betonové části od ocelové desky a ke vzniku šikmých trhlin.



Obrázek 15 - Pohled rovnoběžně se spřahujícími lištami prvku 1.5 (experiment)



Obrázek 16 - Axonometrický pohled na prvek 1.5 (LS-DYNA)

Při experimentu rovněž došlo k částečné delaminaci. Při experimentu byla zaznamenána vlasová trhlina ve středu panelu kolmo na spřahovací lišty. Ke vzniku této trhliny ve výpočetním softwaru nedošlo. Při celkovém porovnání míry poškození skutečného panelu a panelu ve výpočetním programu lze dojít k názoru, že panel v softwaru vykazuje více trhlin, které jsou

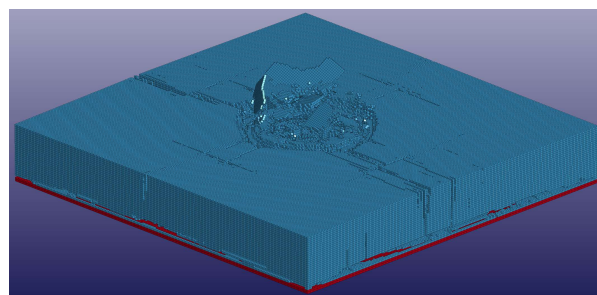
více rozvinuté. V následujících pracích na výpočetních modelech budou upravovány materiálové charakteristiky betonu, jehož chování se jeví více křehčí, než bylo pozorováno při experimentu.

Zajímavé výsledky byly získány u vzorku 1.1. Při experimentu došlo k významnému porušení betonového panelu. Dalo by se předpokládat, že k tomuto porušení došlo postupným rozvojem hlavních diagonálních trhlin šířících se přímo přes spřahovací trny umístěny v rozích panelu. Tyto trhliny byly doplněny dalšími trhlínami.

Ve výpočetním modelu se prvek nejeví poškozen takovým způsobem, jako při experimentu. Dokonce ani nedošlo ke vzniku zmiňovaných diagonálních trhlin. Došlo ke vzniku ortogonálních trhlin. Došlo však k téměř kompletní delaminaci betonu a ocelové desky. Lze tedy předpokládat, že v případě dopočtení modelu do delšího času jevu, došlo by rovněž k oddělení některých betonových částí jako tomu bylo v experimentu.



Obrázek 17 - Pohled na porušený vzorek 1.1



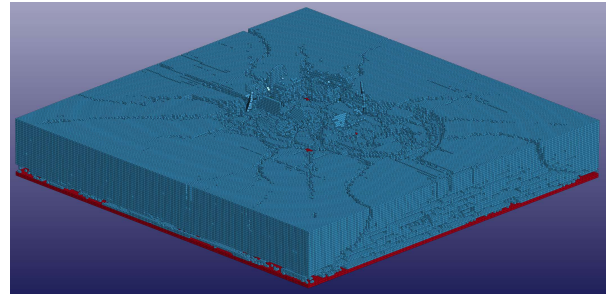
Obrázek 18 - Axonometrický pohled na prvek 1.1 (LS-DYNA)

Vzorek 1.4 se po zatížení kontaktním výbuchem jevil jako výrazně méně poškozený, než vzorek 1.1. Na panelu byly zaznamenány ortogonální trhliny. K delaminaci došlo v podstatně menší míře než u vzorku 1.1.

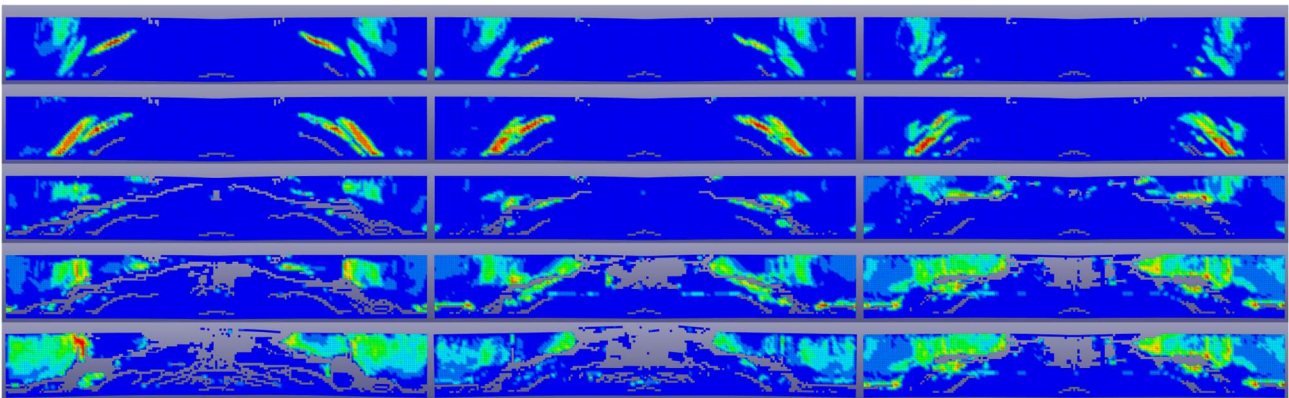
Při vizuálním porovnání kráteru po výbuchu na povrchu všech panelů po experimentu se jeví kráter nejmenší u vzorku 1.5, následuje podle očekávání vzorek 1.4 a nejvíce postižený je panel 1.1.



Obrázek 19 - Pohled na panel 1.4



Obrázek 20 - Axonometrický pohled na prvek 1.4 (LS-DYNA)



Obrázek 21 - Porovnání vzorků (zleva 1.1, 1.4, 1.5)

Na Obrázek 21 jsou zobrazeny všechny 3 vzorky z výpočetního modelu v řezu v jejich těžišti (řez u vzorku 1.5 je veden kolmo na spřahovací lišty). Modely jsou zobrazeny v 5 shodných časech. Jedná se o časy 0,28 ms, 0,38 ms, 1,38 ms, 1,98 ms, 4,98 ms.

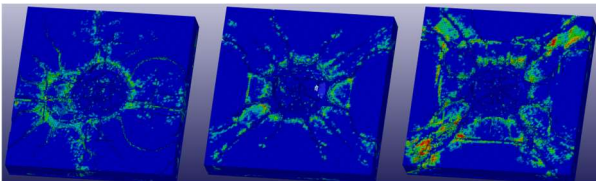
U vzorku 1.1 jsou patrné znatelně plošší trhliny, jejichž rozvoj je rychlejší než u ostatních vzorků.

V případě vzorku 1.5 vzniká porušení majoritně v horní části průřezu nad spřahovacími lištami. Napětí se zde převážně koncentruje v hlavách těchto lišt.

K delaminaci rohů vzorku 1.5 dojde již při čase cca 0,6 ms.

U vzorků 1.1 a 1.4 dochází k delaminaci postupně. Nejdříve shodně v čase přibližně 0,6 ms jsou delaminovány rohy a poté probíhá delaminace od středů k rohům.

V čase cca 1,5 ms dochází k erozi dominantní části prvků v blízkosti těžišť panelů.



Obrázek 22 - Axonometrické porovnání vzorků (zleva 1.1, 1.4, 1.5)

Na Obrázek 22 jsou předloženy pohledy na poškozené vzorky v čase 8 ms. U panelu 1.1 a 1.4 se vyskytuje jedna majoritní radiální trhlina ohraničující horní hranu výsledného kráteru. U

panelu 1.5 je radiálních trhlin více. Sekundární radiální trhliny nabývají mírně ortogonálnějšího charakteru. To by se teoreticky dalo vysvětlit tím, že vznik trhlin je z části předurčen polohou spřahujících lišt nad nimiž, jak bylo zmíněno, dochází ke koncentraci namáhání.

4. ZÁVĚR

Článek popisuje probíhající experimentální program zabývající se popisem chování spřahovaných konstrukcí ocel-beton vystavených zatížení výbuchem. Cílem článku primárně nebylo vysvětlení zastižených fenoménů. V této fázi se spíše jedná o popis daných jevů a jejich vzájemné porovnání.

Porušení, ke kterým v prvcích dochází, je velmi těžké jednoduše popsat. V panelech dochází k opakovaným odrazům tlakových vln mezi oběma povrchy.

Dalo by se předpokládat, že spřahovací lišty a hustě osazené spřahovací trny dostatečně spřáhly oba materiály do té míry, že vzorek zůstal relativně celistvý i po výbuchu. To se nedá prohlásit o spřažení pouze 4 trny u vzorku 1.1, kde byla významně porušena integrita téměř celé betonové části vzorku. Dá se tedy jednoznačně prohlásit, že vliv spřažení na

Do budoucna bude nutné řádně validovat výpočetní modely a případně provést jejich úpravy.

V dalších plánech týkající se tohoto experimentálního programu je jistě porovnání i ostatních vzorků z betonu běžných pevností a celkové zabývání se i druhé sady panelů zhotovených z UHFRPC a prioritně vysvětlení zastižených fenoménů.

ACKNOWLEDGEMENTS

Príspevek vznikl za finanční podpory Grantové agentury ČR, projekt číslo 22-33039S.

Reference

- WU, Chengqing, Jun LI a Yu SU. Development of Ultra-High Performance Concrete Against Blasts: From Materials to Structures. United Kingdom: Woodhead Publishing, 2018, 422 s. ISBN 978-0-08-102496-6.
- DOLAN, D.H. Extreme measurements with Photonic Doppler Velocimetry (PDV). Review of Scientific Instruments. 2020, 91(5). ISSN 0034-6748. Dostupné z: doi:10.1063/5.0004363
- KUČERA, Jindřich, Petr NESVADBA, Martin KUNZEL, Aline CARDOSO ANASTÁCIO a Jiří PACHMAN. Measurement of impact velocity of cladding metal by photonic Doppler velocimetry (PDV). In: Proceedings of the 19th Seminar on NTREM. Univerzita Pardubice, 2016. ISBN 978-80-7395-976-0.
- FOGLAR, Marek, Radek HÁJEK, Radek ŠTEFAN a Jiří STÖHR. Vyšetřování vlastností cementových kompozitů vystavených působení extrémních zatížení: experimenty, modelování, technologie. V Praze: České vysoké učení technické, 2016, 165 s. ISBN 978-80-01-05892-3.
- ZHAO, Chunfeng, Kaicheng HE, Lunhai ZHI, Xin LU, Rong PAN, Avinash GAUTAM, Jingfeng WANG a Xiaojie LI. Blast behavior of steel-concrete-steel sandwich panel: Experiment and numerical simulation. Engineering Structures. 2021, 246. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2021.112998