

ODOLNOST SENDVIČOVÝCH BETONOVÝCH DESEK PROTI VÝBUCHU

BLAST RESISTANCE OF SANDWICH CONCRETE SLABS

TEXT Josef Fládr, Roman Chylík, Karel Šeps, Tomáš Trtík, Jiří Štoller

Odolnost běžného betonu proti výbuchu je známa řadu let, ale odolnost drátkobetonu, nebo dokonce vysokohodnotných betonů je nové téma s velkou budoucností, protože ztužení cementové struktury ocelovými vlákny významně ovlivňuje lomové vlastnosti materiálu. V článku jsou prezentovány výsledky prvotních zkoušek vysokohodnotných betonů na panelech různé tloušťky, a to jednovrstvých i sendvičových. Odezva panelu na zatížení kontaktním výbuchem je měřena pomocí ultrazvuku před výbuchem a po něm. Pro zkoušky byla použita výbušnina Pentrit o hmotnosti 150, 300 a 500 g. Získané výsledky jasně ukázaly, že vhodně složená sendvičová konstrukce je mnohem účinnější než jednovrstvá konstrukce o shodné tloušťce.

Resistance of ordinary concrete against explosions has been known for a long time, however, resistance of steel-fibre-reinforced concrete and, moreover, that of high-performance concretes is a new area with a bright future. Reinforcement of the cementitious matrix by steel fibres significantly affects the fracture mechanism of the material. The paper shows the results of preliminary tests using high-performance concrete in panels of varying thicknesses, both made as single skin and sandwich ones. The response of a panel to being loaded by a contact-explosion was measured by ultrasound both before and after the test. The explosive used was Pentrit with a mass of 150, 300 and 500 g. Results showed clearly that a sandwich structure appropriately designed was much more effective than a single-layer one of the same thickness.

S rostoucím geopolitickým napětím ve světě se v posledních letech zvyšuje důraz na dříve často zanedbávaná zatížení tlakovou vlnou, nárazem nebo průstřelem. U objektů patřících do tzv. kritické infrastruktury (přehrady, mosty nebo elektrárny) [1], [2] se s tímto zatížením konstrukce uvažuje již ve fázi jejího návrhu. Teroristé se však nezaměřují pouze na objekty kritické infrastruktury, ale velmi často jsou jejich cílem veřejné budovy, u kterých po útoku bývá poškození konstrukce značné proto, že na dané zatížení nebyla dimenzována. Vývoj materiálu a konstrukcí, které by dokázaly zvýšit odolnost veřejných budov, je tedy jistě přínosem.

Prezentované prvotní výsledky v tomto článku porovnávají odolnost proti zatížení kontaktním výbuchem u vysokohodnotného be-

tonu s různým ztužením cementové matrice ocelovými drátky [3]. Odolnost byla zkoušena na panelech s různou tloušťkou, panely byly testovány samostatně nebo vrstveně [4].

Realizovaný experiment

Zkoušky byly realizovány na devíti čtvercových panelech o délce hrany 1 000 mm a tloušťce 50 mm pro panely jednovrstvé (A1 až A4) a 150 mm pro panely sendvičové (A5 až A9). Sendvič se vždy skládal ze dvou 50mm desek z vysokohodnotného betonu, mezi něž byla do středu panelu vložena čtvercová tlumicí deska z recyklované gumy o délce hrany 700 mm a tloušťce 50 mm (patrně např. na obr. 9b). Pro tlumicí vrstvu byl použit granulát vzniklý recyklací pneumatik, který byl následně lisován do desek s objemovou hmotností 1 050 kg/m³, osazených

do panelů A5 a A6, a desek s objemovou hmotností 700 kg/m³, osazených do panelů A7 a A8 (tab. 1).

Do panelu A9 byla místo vylehčovací desky osazena ocelová styčnicková deska s lisovanými trny typu gang-nail. Styčnicková deska byla osazena stejně jako vylehčovací desky, s tím rozdílem, že výsledný sendvič měl tloušťku pouze 100 mm (2× 50 mm vysokohodnotného betonu, vlastní tloušťka styčnickové desky je zanedbána). Soupis všech testovaných vzorků je přehledně shrnut v tab. 1.

Receptura pro výrobu vzorků

Receptura vysokohodnotného betonu vycházela z dlouhodobých zkušeností pracoviště, kde byla receptura vyvinuta a patentována. Pro realizaci vzorků bylo nutné originální recepturu lehce upravit, protože výroba probíhala ve výrob-

ním závodě B&BC betonárna Zbůch, která využívá produktů jiného dodavatele chemických přísad do betonu, a také bylo nutné upravit i konzistenci pro jednodušší transport čerstvého betonu. Složení jednotlivých receptur vysokohodnotného betonu je uvedeno v tab. 2.

Zkoušky mechanických vlastností

Výroba hlavních panelů pro zkoušky výbuchové odolnosti byla doplněna o výrobu doprovodných zkušebních těles, která sloužila k ověření mechanických vlastností vyráběného betonu. Jednalo se o krychle o délce hrany 150 mm pro zkoušky tlakové pevnosti a o trámce 100 × 100 × 400 mm pro zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Tlaková pevnost byla měřena vždy na šesti tělesech od každého materiálu (Z1, Z2 a Z3). Publikované výsledky jsou aritmetickým průměrem z těchto měření. Pevnost v tahu za ohybu byla zjištěna pomocí čtyřbodové zkoušky na zkušebních tělesech bez zářezu, pro každý z materiálů byla vyrobena tři zkušební tělesa a prezentované výsledky jsou vždy aritmetickým průměrem z těchto měření. Zkoušky mechanických vlastností byly realizovány ve stáří vzorků 28 dní. Výsledky realizovaných zkoušek jsou uvedeny v tab. 3.

Zkoušky výbuchové odolnosti

Zkušební panely byly osazeny do ocelového stojanu tak, aby panel stál vždy svisle. Výbušnina byla umístěna vždy do středu panelu a k povrchu byla připevněna průmyslovou lepicí páskou. Styčná plocha nálože se u hmotnosti 150 a 300 g lišila, což částečně ovlivnilo výsledky. Rozbuška byla umístěna vždy do středu nálože a kolmo k povrchu panelu. Jako výbušnina byl použit Pentrit (pentaerythritol tetranitrát – $C(CH_2ONO_2)_4$). Pentrit byl vybrán kvůli své chemické stabilitě, výbuchovým parametrům a jednoduchému dělení. Energie výbuchu se u Pentritu uvádí 5 810 kJ/kg a jeho detonační rychlost je cca 8 250 m/s. Pentrit je široce využíván hlavně pro fragmentační a trhací práce.

Tab. 1 Přehled zkoušených panelů

Tab. 1 Summary of the tested panels

Označení panelu	Označení receptury	Materiál vylehčovací desky	Celková tloušťka [mm]	Hmotnost nálože [g]
A1	Z1	-	50	300
A2	Z1	-	50	150
A3	Z2	-	50	300
A4	Z2	-	50	150
A5	Z3	Guma 1	150	300
A6	Z3	Guma 1	150	500
A7	Z3	Guma 2	150	300
A8	Z3	Guma 2	150	500
A9	Z3	ocelová deska	100	500



1



2



3

Tab. 2 Receptura betonu

Tab. 2 Concrete mix design

Složka	Z1 [kg/m ³]	Z2 [kg/m ³]	Z3 [kg/m ³]
cement 42,5R CEM I	600	600	600
voda	160	160	160
čedičové kamenivo	1 710	1 710	1 710
superplastifikátor	19	19	19
mikrosilika	80	80	80
ocelová vlákna délky 13 mm	80	80	80
ocelová vlákna délky 30 mm	-	30	60
kordová vlákna délky 30 mm (vzniklá při recyklaci pneumatik)	60	30	-

Tab. 3 Mechanické vlastnosti vyráběného betonu

Tab. 3 Mechanical properties of the produced concrete

Receptura	Tlaková pevnost f_c [MPa]	Tahová pevnost $f_{t,n}$ [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
Z1	124,2	7,9	2 760
Z2	123,4	8,9	2 755
Z3	126,0	9,8	2 830

1 Panel před zkouškou s vyznačenými měřicími body 2 Panel po zkoušce 3 Ukázka z výroby zkušebních panelů

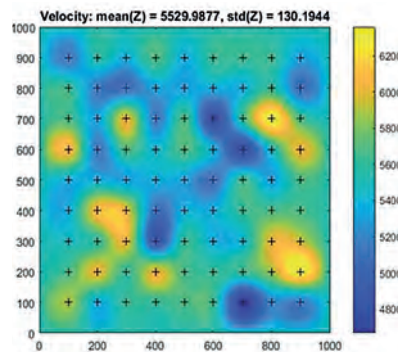
1 Panel before explosion showing the measurement points 2 Panel after the test 3 The process for production of the test panels

Výsledky

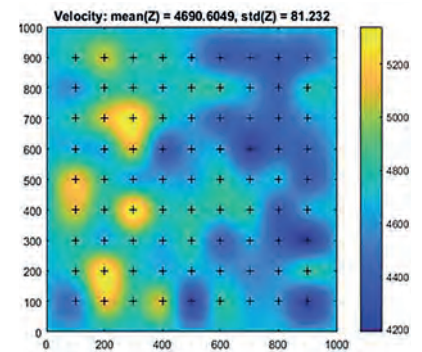
Panely bez tlumivé vrstvy

První fáze zkoušek se věnovala jen jednoduchým panelům (A1 až A4), aby bylo u sendvičových panelů možné oddělit vliv betonu od vlivu tlumivé vrstvy. Panely A1 a A3 byly zatíženy výbuchem nálože s hmotností 300 g Pentritu a panely A2 a A4 byly zatíženy jen poloviční náloží, tedy 150 g Pentritu. Měření celistvosti panelu probíhalo pomocí ultrazvukového přístroje Pundit Lab+. Zkušební panel byl vždy proměřen v měřické síti s rastrem 100 × 100 mm před zatížením výbuchem a po zatížení. Ze známé tloušťky panelu byla vždy stanovena rychlost průchodu ultrazvukové vlny mezi měřickými sondami. Získané hodnoty jsou graficky znázorněny na

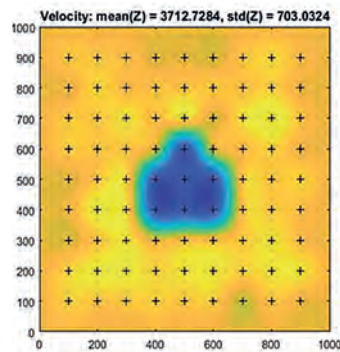
- 4** Zobrazení rychlosti ultrazvukové vlny v panelu před zatížením výbuchem: a) panel A1, b) panel A2
- 5** Zobrazení rychlosti ultrazvukové vlny v panelu po zatížení výbuchem: a) panel A1, b) panel A2
- 6** Rozdíl v rychlosti ultrazvukové vlny v panelu před a po zatížení výbuchem: a) panel A1, b) panel A2
- 7** Reálná fotka poškození doplněná o záznam z ultrazvukového měření: a) panel A1, b) panel A2
- 8** Rozdíl v rychlosti ultrazvukové vlny v panelu před a po zatížení výbuchem: a) panel A3, b) panel A4
- 9** Zobrazení rychlosti ultrazvukové vlny v panelu před zatížením výbuchem: a) panel A5, b) panel A6
- 10** Zobrazení rychlosti ultrazvukové vlny v panelu po zatížení výbuchem: a) panel A5, b) panel A6
- 11** Rozdíl v rychlosti ultrazvukové vlny v panelu před a po zatížení výbuchem: a) panel A5, b) panel A6
- 12** Reálná fotka poškození doplněná o záznam z ultrazvukového měření: a) panel A5, b) panel A6
- 13** Ukázka poškození panelu po zatížení výbuchem: a) panel A7, b) panel A8



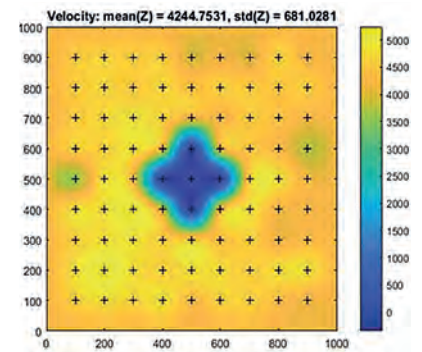
4a



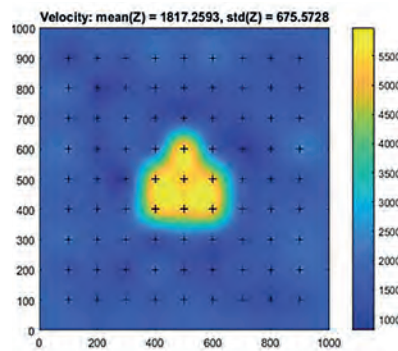
4b



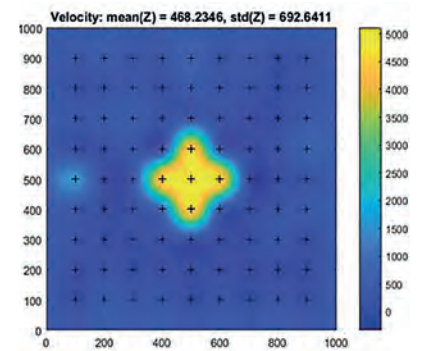
5a



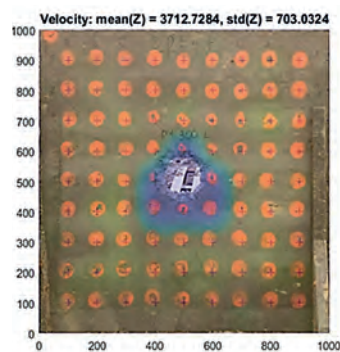
5b



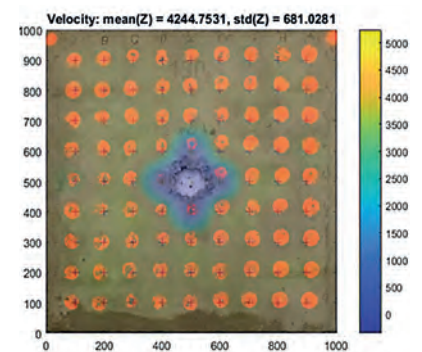
6a



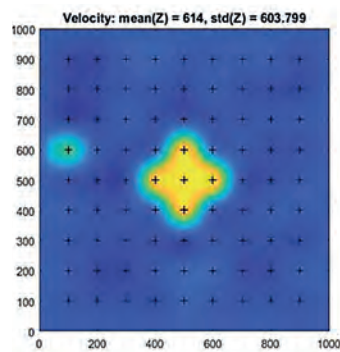
6b



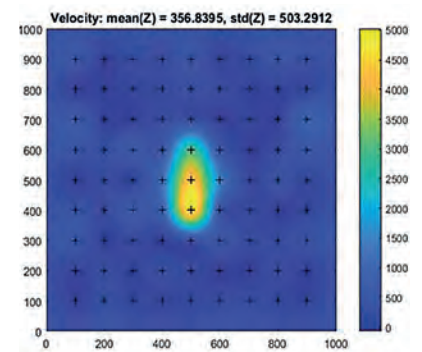
7a



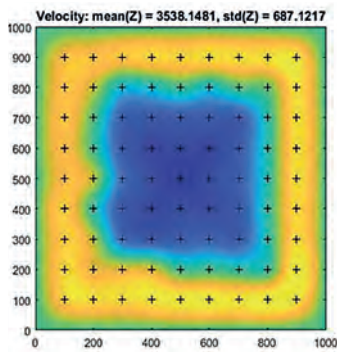
7b



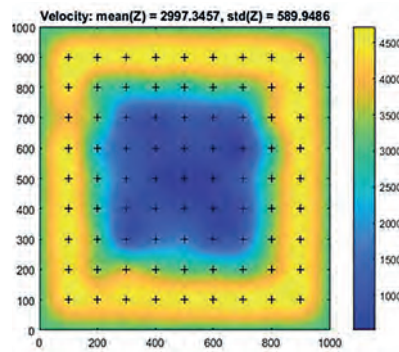
8a



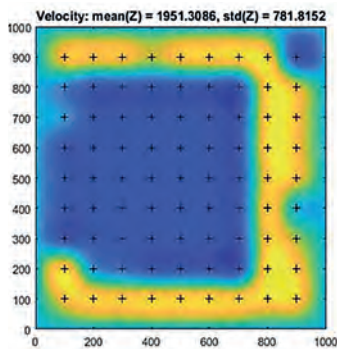
8b



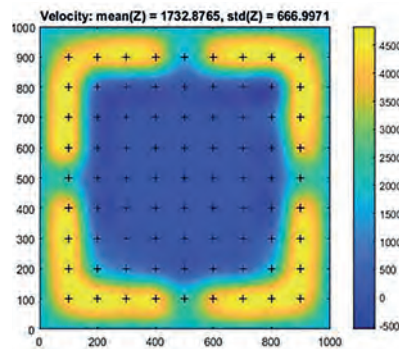
9a



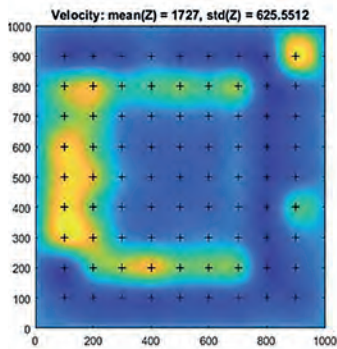
9b



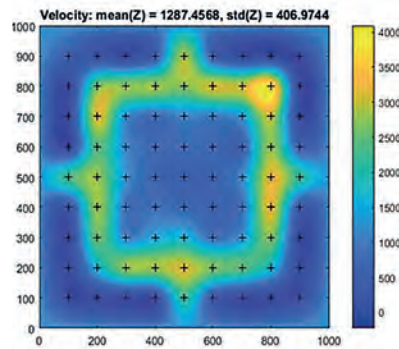
10a



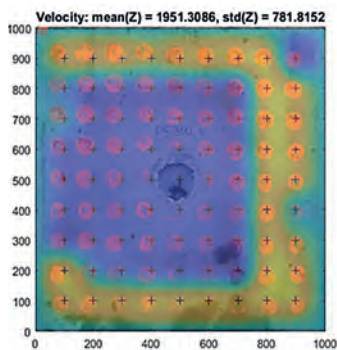
10b



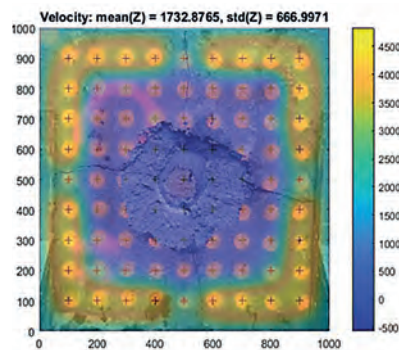
11a



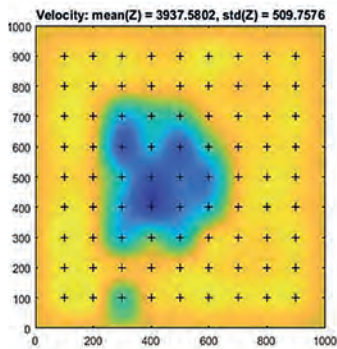
11b



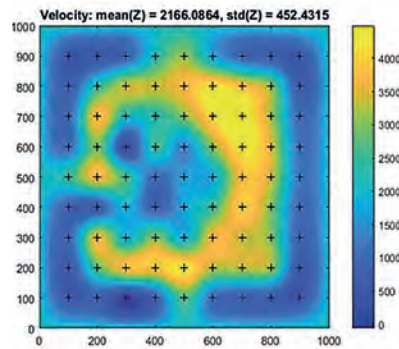
12a



12b



13a



13b

obr. 4a až 8b (barevná škála ukazuje vždy na daném panelu rychlosti ultrazvuku od minimální hodnoty (modrá) po hodnotu maximální (žlutá)), pro grafické znázornění byl použit program SVDult, vyvinutý R. Štefanem a M. Foglarem [5].

Pro panely A1 a A2 jsou výsledky prezentovány podrobněji.

Na obr. 4 jsou zobrazeny výsledky rychlosti šíření ultrazvukové vlny v neporušeném stavu, tedy před zkouškou. Rozdíl v hodnotách je způsoben pouze chybou měření spolu s výrobní nehomogenitou. V ideálním případě by oba obrázky byly světle zelené, tedy bez žlutých a modrých míst.

Obr. 5 zobrazuje naměřené hodnoty rychlosti průchodu ultrazvukové vlny porušeným panelem. Modré oblasti ukazují místa s nejnižší rychlostí, tedy místa, kde vlivem poškození výbuchem trval průchod ultrazvukové vlny nejdéle.

Obr. 6 zobrazuje rozdíly v naměřených hodnotách průchodu ultrazvukové vlny před a po zkoušce. Čím vyšší je rozdíl v rychlosti průchodu ultrazvukové vlny poškozeným panelem, tím vyšší je poškození materiálu, modrá část je nepoškozená a žlutá část je významně poškozená. Kdyby byl zkušební panel před zkouškou zcela homogenní, což víme, že není reálné, jednalo by se zde o inverzní zobrazení oproti obr. 5a a 5b. Zobrazení výsledků na obr. 6a a 6b je tedy nejčinnější výsledek, protože jasně ukazuje, jaké poškození způsobila vlastní zkouška.

Obr. 7 kombinuje fotografii panelu po zkoušce se zobrazením rychlosti ultrazvukové vlny po zkoušce. Kombinace těchto výsledků slouží ke kontrole měření, protože velké změny v rychlosti průchodu ultrazvukové vlny zkušebním panelem musí korespondovat s jeho poškozením, tedy s proraženým otvorem nebo trhlinou.

Výsledky změřené na zkušebních panelech A3 a A4 jsou pro zjednodušení prezentovány už jen formou rozdílu v průchodech ultrazvukové vlny před a po zatížení výbuchem (obr. 8).

Zdroje:

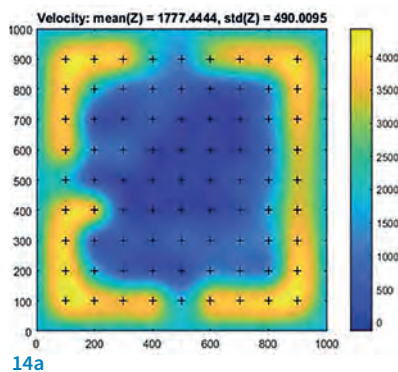
- [1] BÍLÝ, P., KOHOUTKOVÁ, A. Numerical analysis of anchorage between steel liner and prestressed nuclear containment wall. In: *Proceedings of the 10th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, 2014*. Quebec: Université Laval, 2014. pp. 529–534.
- [2] BÍLÝ, P., KOHOUTKOVÁ, A. An estimation of the effect of steel liner on the ultimate bearing capacity of prestressed concrete containment. *Nuclear Engineering and Design*. 2018, Vol. 328, pp. 197–208.
- [3] FOGLAR, M., KOVÁŘ, M. Conclusions from Experimental Testing of Blast Resistance of FRC and RC Bridge Decks. *International Journal of Impact Engineering*. 2013, Vol. 59, pp. 18–28. ISSN 0734-743X.
- [4] FOGLAR, M., HÁJEK, R., FLÁDR, J., PACHMAN, J., ŠTOLLER, J. Full-scale experimental testing of the blast resistance of HPPFRC and UHPFRC bridge decks. *Construction and Building Materials*. 2017, Vol. 145, pp. 588–601. ISSN 0950-0618.
- [5] ŠTEFAN, R., FOGLAR, M. *SVData – Software for visualisation of data from ultrasound measurements of concrete samples*. Prague: Department of Concrete and Masonry Structures, Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague, 2015.
- [6] ŠTOLLER, J. Využití přetvárných vlastností vláknobetonu pro zvýšení odolnosti staveb proti zatížení výbuchem. *Beton TKS*. 2010, roč. 10, č. 5, s. 84–86. ISSN 12133166.

Panely s tlumicí vrstvou

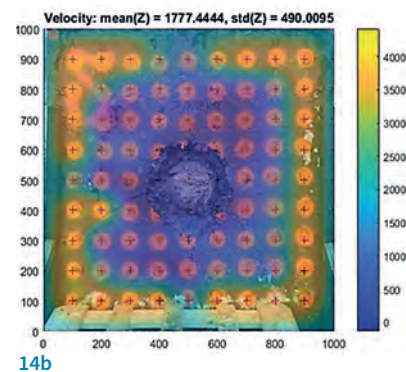
Na obr. 9 až 13 je stejná analogie jako u obr. 4 až 8, tentokrát pro zkušební panely A5 a A6 s tlumicí vrstvou z materiálu označeného jako Guma 1. Panely A5 a A7 byly zatíženy kontaktním výbuchem Pentritu o hmotnosti 300 g, panely A6 a A8 náloží o hmotnosti 500 g.

Pro zjednodušení jsou pro panely A7 a A8 zobrazeny výsledky pouze ve variantě po zatížení (obr. 13). Panely A7 a A8 jsou také sendvičové s tlumicí vrstvou z materiálu označeného jako Guma 2.

Panel A9 byl zatížen kontaktním výbuchem 500 g Pentritu, ale jeho tloušťka byla jen 100 mm. Místo tlumicí vrstvy byl panel doplněn ocelovou deskou s lisovanými trny. Odezva sendvičového panelu je zobrazena na obr. 14.



14a



14b

14 Panel A9: a) zobrazení rychlosti ultrazvukové vlny před zatížením výbuchem, b) reálná fotka poškození doplněná o záznam z ultrazvukového měření

14 Panel A9: a) speed of the ultrasonic wave after the explosion, b) real photo of damage combined with the result of the ultrasonic wave measurement

Závěr

Jednovrstvé panely se porušovaly úměrně hmotnosti použité nálože. Velmi pozitivní zjištění bylo, že se poškození panelu soustředilo pouze v místě kontaktu s výbušninou a okolní panelu poškozeno nebylo, jak je patrné z obr. 6 a 8. Zjištěné výsledky ukazují významný pokrok proti běžným betonům zkoušeným pplk. Jiřím Štollerem a prezentovaným v článku [6]. Získané výsledky dále ukazují, že panely A1 a A2, které mají svoji matici ztuženou kordovými vlákny, získanými z recyklace pneumatik, mají v obou případech horší odolnost než panely A3 a A4, které jsou ztuženy pouze drátky z vysokopevnostní oceli.

Sendvičové panely ve všech případech vykazovaly větší poškození na lící straně k výbušnině a menší poškození na rubové straně, což byl významný rozdíl proti výsledkům získaným u jednovrstvých panelů. Oblast poškození na lící straně byla u sendvičových panelů vždy větší, což svědčí o pohlcení většího množství energie z výbuchu než u jednovrstvých panelů. Rychlosti výtrže během výbuchu na rubové straně byly u sendvičových panelů také nižší než u jednovrstvých panelů, což bylo zjištěno ze záznamů z rychloběžné kamery, která byla během testů používána. Pokles rychlosti byl zhruba o 30 %.

Porovnání tlumicí vložky z Gummy 1 a Gummy 2 vychází ve prospěch Gummy 2, což jsou desky lisované na nižší objemovou hmotnost. Panely A7 a A8 ma-

jí tedy větší poškození, což opět znamená, že pohltily větší množství energie způsobené výbuchem. Změna rychlosti výtrže na rubové straně však zaznamenána nebyla. Přínos tlumicí vrstvy je tedy výraznější, když má použitá tlumicí vrstva odlišnou objemovou hmotnost od základního materiálu, v našem případě betonu.

Panel A9 s ocelovou vložkou měl největší poškození na rubové straně, protože ocelová deska roznesla zatížení do velké plochy, ale rychlost výtrže byla ze všech zkoumaných vzorků nejnižší. Tento sendvičový panel zároveň dobře splňoval i předchozí podmínku o rozdílných objemových hmotnostech.

Tento příspěvek byl připraven díky podpoře Studentské grantové soutěže (SGS) s názvem Beton a vláknobeton specifických vlastností – analýza a aplikace, číslo SGS18/115/OHK1/2T/11.



Ing. Josef Fládr, Ph.D.
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných konstrukcí
josef.fladr@fsv.cvut.cz



Ing. Roman Chylík
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných konstrukcí
roman.chylik@fsv.cvut.cz



Ing. Karel Šeps, Ph.D.
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných konstrukcí
karel.seps@fsv.cvut.cz



Ing. Tomáš Trtík
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných konstrukcí
tomas.trtik@fsv.cvut.cz



pplk. Ing. Jiří Štoller, Ph.D.
Fakulta vojenských technologií UO v Brně
Katedra ženijních technologií
jiri.stoller@unob.cz