

EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM OCELOBETONOVÝCH SLOUPŮ ZATÍŽENÝCH KONTAKTNÍM VÝBUchem

*Vojtěch Šulc, **

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

ABSTRAKT

Použití ocelobetonových kompozitních konstrukcí v oblasti odolnosti proti výbuchu nabývá v posledních letech na významu, protože všech druhů beton není schopen odolat vyššímu výbuchovému zatížení. Bylo navrženo experimentální zařízení pro zkoušení ocelobetonových kompozitních sloupů vystavených současně osovému a výbuchovému zatížení. Vyvinuté experimentální zařízení ve smyslu uzavřeného ocelového rámu umožnilo testovat prosté ocelové sloupy, kompozitní ocelobetonové sloupy a kompozitní ocelovo-UHPFRC sloupy. Vzorek byl zatížen kontaktní náloží 800 g a zároveň vystaven osovému tlakovému zatížení různé velikosti. Odezva vzorku byla získána pomocí fotonicko-dopplerovské velocimetrie (PDV) a vyhodnocena. Článek prezentuje výsledky experimentu dokumentující přínos kompozitního působení na odolnost testovaných sloupů proti výbuchu. Příznivé účinky prokázalo i použití UHPFRC.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton • Ocel • Kompozit • Výbuch • Sloupy

ABSTRACT

The use of steel-concrete composites in blast resistance has gained importance in recent years, since concrete is not able to resist higher explosive charges. An experimental setup was designed for testing steel-beton composite columns subjected to simultaneous axial and blast loading. The developed experimental device in a shape of a closed steel frame allowed to test plain steel columns, composite steel-concrete columns and composite steel-ultra-high performance fiber-concrete columns. The specimen was loaded with contact charge of 800g explosive while subjected to axial compressive loading of varying magnitude. The response of the specimen is acquired using photonic-doppler velocimetry (PDV) and evaluated. The paper presents results of the experiment documenting the benefits of composite action on blast resistance of the tested columns. The use of UHPFRC also showed its beneficial effects.

KEYWORDS

Blast • Column • Composite • Concrete • Modelling • Steel

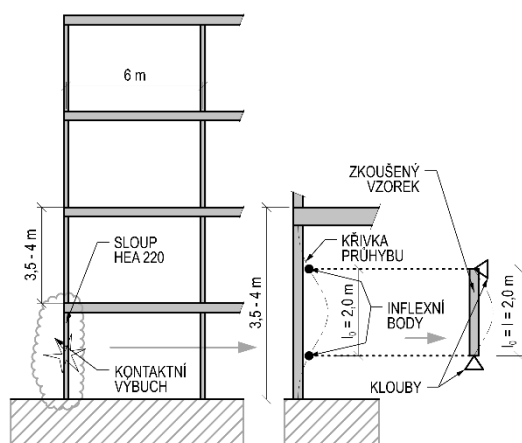
1. ÚVOD

Velmi důležitou vlastností sloupů budov, mostních pilířů a podobných diskretních svislých nosných prvků je jejich odolnost proti výbuchu. Selhání takového konstrukčního prvku může mít za následek zřícení celé stavby nebo její části. Sloupy jsou navrženy především tak, aby odolávaly osovému tlakovému zatížení. Náhodné nebo úmyslné zatížení výbuchem nebo nárazem by mělo za následek dodatečné vodorovné boční zatížení, které by se kombinovalo s osovým stálým primárním zatížením. Vliv osového zatížení na odolnost sloupů proti výbuchu nebyl dosud řádně diskutován, ačkoli je tato interakce nevyhnutelná. Řada prací je zaměřena na experimenty a numerické výzkumy použití nových materiálů, jako je ultra-vysoce výkonný beton vyztužený vlákny (UHPFRC) nebo kompozity vyztužené skleněnými vlákny (GFRC), při navrhování nových nebo modernizaci stávajících konstrukcí. Vědecké zaměření se obrací ke zkoumání nových kompozitních konstrukcí, které kompenzují slabiny běžných betonových konstrukcí, namísto podrobného studia standardních kompozitních konstrukcí.

2. EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Jako modelový příklad skutečné stavby byla vybrána čtyřpodlažní vládní budova. Jako reprezentativní konstrukční systém pro tento typ budovy byla použita rozteč sloupů 6 m a výška podlaží 3,5 až 4 m. Ve scénáři náhodného zatížení použitým pro tento článek je sloup umístěný ve vstupní hale vystaven kontaktnímu zatížení výbuchem. Sloup je trvale vystaven osovému zatížení od stálých i proměnných zatížení z vyšších podlaží a náhodnému bočnímu výbuchu, viz Obrázek 1.

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



Obrázek 1: Schéma umístění zkoušeného sloupu ve skutečné budově

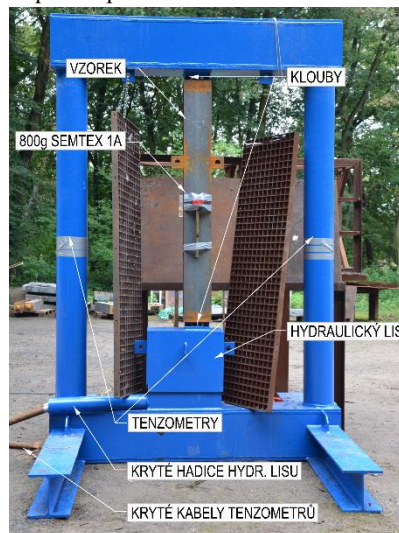
Pro experimentální program byl vyvinut jedinečný testovací aparát. Přístroj musí umožnit, aby byl zkoušený sloup současně vystaven osovému tlakovému zatížení a zatížení výbuchem, aby bylo možné simulovat skutečné chování ocelového nebo ocelo-betonového kompozitního sloupu v reálné konstrukci. Zkouší se pouze úsek ze sloupu mezi inflexními body, aby se zmenšila velikost vzorku i zkušebního zařízení. Okrajové podmínky pro vzorek jsou nastaveny jako neposuvné klouby. Vzorek je po celou dobu trvání experimentu osově zatěžován hydraulickým lisem.

Zkušební zařízení bylo navrženo jako uzavřený vertikální ocelový rám, viz Obrázek 2. Rám se skládá ze dvou 2,68 m dlouhých ocelových trubkových sloupů o průměru 245 mm a tloušťce stěny 35 mm rovnoběžných se vzorkem. Nahoře a dole jsou sloupy přivařeny k 2,3 m dlouhým vodorovným nosníkům HEA 400 vyztuženým ocelovými deskami přivařenými k vnějším stranám přírub a dalšími vloženými příčnými ztužujícími deskami. Prostorovou stabilitu aparatury zajišťuje vodorovná základna z 1,2 m dlouhých nosníků HEA 260. Na horní i spodní straně vzorku je sférické pouzdro pro ideální kloubové uložení. Spodní část sloupu je umístěna na ocelovém boxu, pod kterým je skrytý hydraulický lis, který vytváří požadované osově zatížení vzorku. Rám byl navržěn tak, aby odolal plánovanému rozsahu osově síly shrnutému v Tabulce 1. Na konci každého experimentu lze zvedák výrazně spustit a vyměnit vzorek.

Tabulka 1: Přehled všech zkoumaných vzorků

Vzorek	Typ	Osová síla [kN]	Pevnost betonu (válec/krychle)
S-100	Jen ocel	100	-
S-700		700	-
S-1300		1.300	-
N-100	ocel & NSC	100	36,5/43,9
N-700		700	36,5/43,9
N-1000		1.000	36,5/43,9
N-1300		1.300	36,5/43,9
U-100	ocel & UHPFRC	100	131,9/146,4
U-700		700	131,9/146,4
U-1000		1.000	131,9/146,4
U-1300		1.300	131,9/146,4

Každý sloup byl tvořen za tepla válcovaným ocelovým profilem HEA 220 (délka 2 m), vyrobeným z konstrukční oceli třídy S 355. Ocelový profil byl na obou koncích uzavřen 40 mm plechy. Na každém konci byl umístěn ocelový kulový kloub (100x100x40 mm, opracovaný na poloměr 73 mm), který simuloval ideálně připevněné okrajové podmínky pro účely následného numerického modelování a také zajišťoval rovnoměrné rozložení napětí současného osově zatížení v celém průřezu vzorku. Další boční desky viditelné na obrázcích byly přidány pro usnadnění manipulace se vzorky bez konstrukčního účelu a byly umístěny tak, aby neprekážely při experimentech. Svařované háky o průměru 8 mm z výztužné oceli zajišťovaly kompozitní působení betonové výplně. Betonová výplň byla odlita nejméně 28 dní před experimentem.



Obrázek 2: Uspořádání experimentu

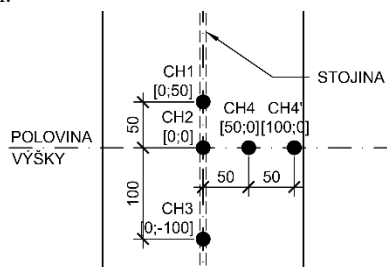
Před experimentem byl každý vzorek upevněn ve zkušebním zařízení a bylo na něj aplikováno předepsané osově tlakové zatížení. Výbuchové zatížení bylo generováno pomocí 800 g nálože plastické trhavy SEMTEX 1A umístěné na vnějším povrchu ocelové příruby ve středním výšce vzorku v podélném směru a

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

v ose vzorku v příčném směru. Trhavina byla vytvarována do tvaru krychle o délce strany přibližně 80 mm.

Přístroj byl vybaven dalšími nekonstrukčními ochrannými stěnami, aby se zabránilo poškození samotného přístroje nebo přístrojového vybavení fragmentací, jakož i okolních konstrukcí. Ochranné zástěny byly navrženy tak, aby měly zanedbatelný vliv na výsledky experimentu a měření.

Odezva samotného vzorku na výbuch byla měřena pomocí elektrooptických laserových senzorů využívajících principy fotonické dopplerovské velocimetrie (PDV). Podrobný vývoj posunutí v čase byl měřen na čtyřech diskretních místech na vzdálenějším lici vzorku naproti výbušné náloži, viz obrázek 4. Během výbuchu a po něm byla měřena také deformace ve sloupech aparatury pro případ budoucí potřeby izolovat odezvu samotné aparatury na výbuch, i když aparatura byla záměrně navržena tak, aby byla výrazně tužší než vzorek a neovlivňovala experimentální měření.



Obrázek 3: Umístění senzorů PDV

3. VÝSLEDKY AKTUÁLNÍHO VÝZKUMU

Kontaktní výbuch vytváří vysoce koncentrované zatížení na povrchu přiléhajícím k náloži. Lokalizované zatížení má za následek místní poddajnost ocelového přírubu a pásnice. Rozsah poškození oceli a/nebo betonu se liší podle typu vzorku a osového zatížení, viz Tabulka 2 a následující obrázky. Navzdory symetrickému uspořádání experimentu nebyla odezva vzorku a jeho poškození ideálně symetrické, což bylo pravděpodobně způsobeno nedokonalostmi v umístění nálože a rozbušky. Všechny protilehlé příruby byly ve směru výbuchu příčně ohnuté.

Obecně došlo u ocelových vzorků k lokálnímu porušení příruby přiléhající k výbuchu, což mělo za následek částečnou fragmentaci, viz Obrázek 5. Úlomky byly vymrštěny směrem k protilehlému přírubě a narazily do ní, čímž došlo k jejímu sekundárnímu poškození. Globální průhyb se zvyšoval s rostoucím osovým zatížením.



Obrázek 4: Vzorek S-100 (reprezentativní pro ocelové vzorky)

U kompozitních vzorků došlo k výtrhu betonové výplně způsobenému lokálním průhybem příruby a pásnice vyvolaným výbuchem (viz Obrázky 5, 6 a 8). Drcení betonu a příčné pnutí vedlo k odlupování betonu v okolí pásnice.



Obrázek 5: Vzorek N-700 (reprezentativní pro NSC vzorky)



Obrázek 6: Vzorek U-700 (reprezentativní pro UHPFRC vzorky)

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

Tabulka 2: Výtrže, deformace a rychlosti jednotlivých vzorků

		S - STEEL			N - NSC				U - UHPFRC			
		100	700	1 300	100	700	1 000	1 300	100	700	1 000	1 300
Výtrž [$\times 10^6 \text{mm}^3$]		-	-	-	8.87	10.7	7.60	9.09	3.46	3.79	3.33	2.56
Zbytkový posun [mm]		59	129	139	6	11	11.5	12.5	5	5.5	12	6
Maximální rychlost [ms^{-1}]	CH1	N/A	N/A	25	20	N/A	N/A	23	27	N/A	N/A	N/A
	CH2	30	22	24	34	25	24	26	27	28	28	34
	CH3	18	18	20	19	20	17	21	17	19	21	20
	CH4	56	228	240	29	29	28	29	35	35	34	26
Dynamický posun [mm]	CH1	-	-	-	2.9	N/A	N/A	3.3	2.9	N/A	N/A	N/A
	CH2	-	-	-	3.2	3.5	3.6	4.0	2.6	2.9	2.8	4.6
	CH3	-	-	-	2.7	3.2	3.7	3.1	2.2	1.7	2.3	2.4
	CH4	-	-	-	10.8	7.0	7.2	3.7	9.4	8.4	6.8	2.7
$\Delta_{(CH4-CH2)} @ 1 \text{ ms}$		0.7	26.9	52.8	5.7	2.8	2.5	1.1	6.3	4.8	3.2	-4.0

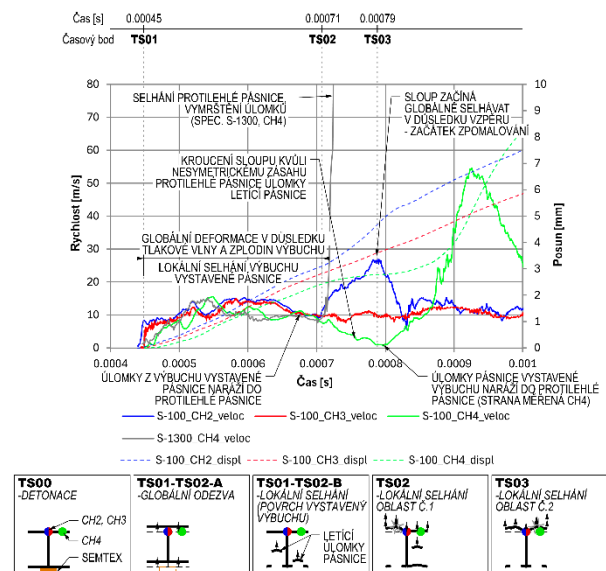
3.1. Vývoj deformace vzorku

Chování sloupu při zatížení výbuchem bylo hodnoceno na základě pozorování průhybů během a po zatížení výbuchem, viz Tabulka 2. Průhyb po zatížení výbuchem (tzv. zbytkový posun) se vyhodnocuje na vzorku vyjmutém ze zkušebního zařízení. Vývoj posunutí během výbuchu byl získán z měření rychlosti pomocí fotonické dopplerovské velocimetrie (PDV) numerickou integrací rychlostních grafů v čase.

U kompozitních vzorků se po počátečním zrychlení sloupu při cca. 0,5 ms od detonace vzorek zpomaluje až do cca 0,7 ms. Poté začaly hodnoty rychlosti bez zjevného důvodu kolísat. V tomto okamžiku si autoři nejsou jisti, zda oscilaci přisuzovat globálním vibracím celého zkušebního zařízení vyvolaným výbuchem, nebo trvale běžícímu čerpadlu, které natlakovalo hydraulický okruh ovládající 150tunový hydraulický lis. Vyšetřování tohoto jevu pokračuje. Vzhledem k výše popsané nejistotě měření rychlosti bylo rozhodnuto omezit rozsah výsledků na konec zpomalení vzorku v době cca 0,7 ms po výbuchu. Tato hodnota je v Tabulce 2 označena jako dynamický posun, resp. dynamický posun při 1 ms. Vzhledem k tomu, že vývoj rychlosti vzorku pouze z oceli neumožňuje ekvivalentní interpretaci, není tato hodnota pro vzorky pouze z oceli stanovena.

Maximální rychlosti se liší podle typu vzorku a osové síly a jsou uvedeny v Tabulce 2. Obecně platí, že u vzorků UHPFRC dochází k vyšším špičkovým rychlostem ve srovnání s ostatními typy vzorků. Na druhou stranu se vzorky UHPFRC chovají rovnoměrněji s menšími rozdíly v odečtech kanálů s výjimkou kanálu CH4.

Chování nekompozitních ocelových vzorků se liší od chování kompozitních vzorků. Neexistuje žádný výrazný počáteční vrchol rychlosti, rychlosti všech kanálů jsou přiměřeně menší, každý kanál vykazuje specifický vzorec chování. Protože pásnice a příruby nejsou vyztuženy kompozitním působením, dojde u výbuchu sousední příruby k terminálnímu poškození a její úlomky jsou vymrštěny ze své polohy, pohybují se rychlostí přesahující 220 m/s průřezem a pronikají protilehlou přírubou.



Obrázek 7: Průběh rychlosti a deformace vzorku S-100

Na obrázku 8 je uvedeno komplexní vyhodnocení celého rychlostně-časového profilu spolu s diskusí o vyskytujících se jevech. Od 0,45 ms (časový bod 01) do 0,71 ms (časový bod 02) po výbuchu se vzorek globálně vychýlí od počátečního pře-

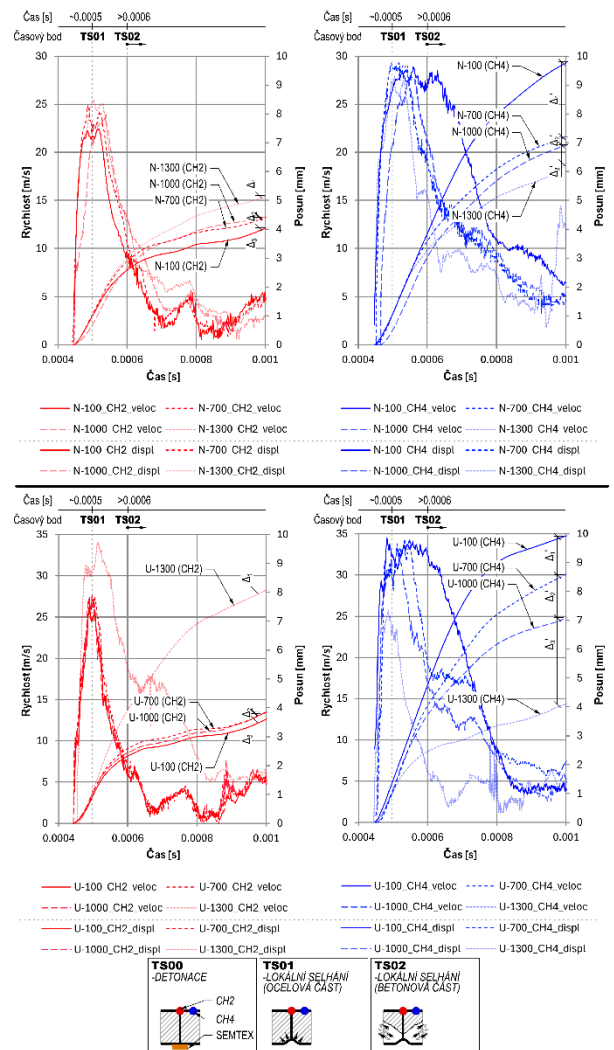
tlaku a zplodin výbuchu. Současně dochází k lokálnímu porušení příruby sousedící s výbuchem (S-700 a S-1300), úlomky jsou vymrštěny směrem k protilehlé pásnici (která je sledována PDV). Protější pásnice je zasažena vymrštěnými úlomky v časovém bodě 03 (CH2) a začne zrychlovat. V případě selhání protilehlé pásnice se odpovídajícím způsobem změní pohyb kanálu 4 (viz S-1300, CH4).

Umístění nálože a detonace podléhají nevyhnutelným nedokonalostem. Drobná excentricita způsobuje torzní zatížení sloupu. To lze pozorovat na odečtech kanálu CH4 od vzorku S-100 - sloup se otáčí proti odečtu kanálu CH4, čímž způsobuje zdánlivé zpomalení.

Poté, co vzorek utrpěl kritické poškození také na méně zatížené straně příruby, je fragment pásnice také vymrštěn směrem k opačné přírubě, zasáhne ji později, v 0,82 ms a přiměřeně ji zrychlí. V tomto případě také není prorážena protilehlá příruba.

Záznam kanálů CH2 a CH3 dokumentuje chování sloupce v ose stojiny. Rozdíl mezi odečítacím kanálem CH2 (středový bod výbuchu) a kanálem CH3 jasně dokumentoval poruchu vyboulení stojiny (viz čas 0,7 až 0,85 ms).

Obecně je zřejmé, že nedostatek podpory pásnice přilehlé k výbuchu u pouze ocelových sloupů má za následek vysokou možnost kolapsu stojiny. Vymrštěné úlomky mohou narazit na protější stojinu a také ji poškodit. Ztráta integrity obou pásnic průřezu má za následek výrazné zeslabení sloupu, které může iniciovat porušení ve vzpěru. Popsané chování při porušení lze úspěšně zmírnit betonovou kompozitní výplní.



Obrázek 8: Průběh rychlosti a deformace kanálů CH2, CH4 vzorků NSC a UHPFRC

Účinek axiální síly lze pozorovat při měření rychlosti/posunu vzorku NSC a UHPFRC; viz Obrázek 9 pro zobrazení kanálů CH2 a CH4. Posun CH2 (osa stojiny) při 1 ms se zvyšuje spolu se zvyšující se osovou silou. Naopak posunutí CH4 (stojiny) se s rostoucí osovou silou zmenšovalo. Posuny v ose stojiny byly znatelně menší ve srovnání s kanály umístěnými excentricky vůči ose stojiny. Zdá se, že osová síla brání vychýlení pásnice. Naměřené hodnoty excentrických kanálů se přibližují naměřeným hodnotám na ose stojiny. NSC i UHPFRC vykazují obdobné chování.

4. ZÁVĚR

Na základě experimentálního programu provedeného na speciálně zkonstruovaném experimentálním zařízení bylo zkoumáno chování ocelových a ocelobetonových kompozitních sloupů (NSC i UHPFRC) vystavených současně osovému a výbuchovému zatížení.

Údaje PDV vzorků pouze z oceli jasně dokumentují lokalizované porušení a fragmentaci příruby blíže k náloži. Vymrštěné úlomky zasáhly protilehlý přírubový pás a rozšířily poškození na velkou část průřezu. Poté došlo k selhání oslabeného průřezu sloupu globálním vzpěrem.

U kompozitních vzorků došlo k odlupování betonové výplně sloupu způsobeného příčným napětím vyvolaným výbuchem v důsledku průhybu příruby/stojiny. Vzorky UHPFRC si vedly ve srovnání se vzorky NSC přiměřeně lépe. U žádného z kompozitních vzorků nedošlo ke globálnímu vybočení.

Na druhou stranu se zdálo, že osová síla stabilizuje průhyby podhledových pásů kompozitních sloupů NSC a UHPFRC. Posun v ose pásnice se zvyšoval s rostoucí osovou silou. Naopak posunutí příruby se s rostoucí osovou silou snižovalo. Posuny v ose pásnice byly ve srovnání s odečty na přírubě přiměřeně menší.

Experimentální zjištění jasně dokumentují příznivý vliv betonové kompozitní výplně tenkostěnných ocelových sloupů. Zatímco ocelový vzorek selhal v důsledku současně působícího osového zatížení, betonová výplň dokázala stabilizovat odezvu kompozitního vzorku na výbuch. Kvantifikace tohoto účinku je předmětem dalšího zkoumání.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za podpory GAČR 22-33039S a SGS25/037/OHK1/1T/11.

Reference

- ZHANG, Chunwei, Gholamreza GHOLIPOUR a Asma Alsaadat MOUSAVI. Blast loads induced responses of RC structural members: State-of-the-art review. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2020, 195. ISSN 13598368. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108066
- LIU, Yan, Jun-bo YAN a Feng-lei HUANG. Behavior of reinforced concrete beams and columns subjected to blast loading. *Defence Technology* [online]. 2018, 14(5), 550-559. ISSN 22149147. DOI: 10.1016/j.dt.2018.07.026
- SHI, Yanchao, Ye HU, Li CHEN, Zhong-Xian LI a Hengbo XIANG. Experimental investigation into the close-in blast performance of RC columns with axial loading. *Engineering Structures* [online]. 2022, 268. ISSN 01410296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114688
- ASTARLIOGLU, Serdar, Ted KRAUTHAMMER, Dave MORENCY a Thien P. TRAN. Behavior of reinforced concrete columns under combined effects of axial and blast-induced transverse loads. *Engineering Structures* [online]. 2013, 55, 26-34. ISSN 01410296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.12.040
- WANG, Hongwei, Chengqing WU, Fangrui ZHANG, et al. Experimental study of large-sized concrete filled steel tube columns under blast load. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 134, 131-141. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.096
- FU, Guo. Experimental Research on Interface Mechanic Behavior of the Composite Steel-Concrete Beams. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2012, 204-208, 4471-4475. ISSN 1662-7482. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.4471