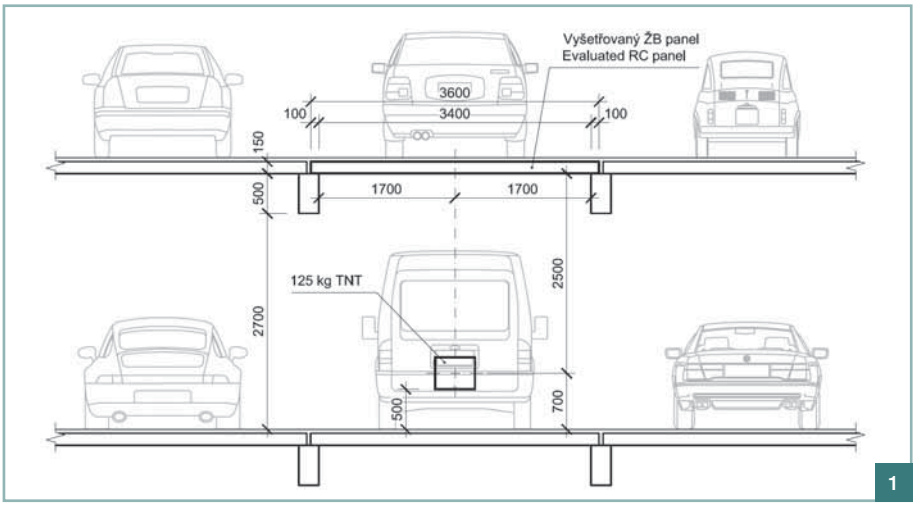
EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA STROPNÍCH PANELŮ Z RŮZNÝCH DRUHŮ BETONU VYSTAVENÝCH VÝBUCHU A NÁSLEDNÉMU POŽÁRU ▮ EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FLOOR PANELS MADE OF VARIOUS TYPES OF CONCRETE EXPOSED TO BLAST AND SUBSEQUENT FIRE

Radek Štefan, Marek Foglar, Radek Hájek, Josef Fládr

Článek je zaměřen na popis návrhu, realizace a vyhodnocení zkoušek stropních panelů vystavených výbuchu a následnému požáru. Zkoušky byly provedeny v roce 2014 v rámci projektu bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra České republiky a navazovaly na předchozí materiálový výzkum chování různých druhů cementových kompozitů vystavených požáru. ▮ The paper describes preparation, realization and evaluation tests of floor panels exposed to blast and subsequent fire. These tests were performed in 2014, within the framework of a security research project supported by the Ministry of Interior of the Czech Republic, as a complement to the previous material research on behaviour of several types of cementitious composites exposed to fire.



1

Při návrhu konstrukcí je nutné zohlednit veškeré návrhové situace a příslušná zatížení, kterým může být daná konstrukce během své životnosti vystavena – a to včetně zatížení vyvozených v důsledku mimořádných událostí (např. teroristický útok, nehoda, přírodní katastrofa apod.) [1].

Metodika posuzování konstrukcí na účinky jednotlivých mimořádných zatížení (požár, vnitřní výbuch, náraz, seismicita) je popsána v příslušných návrhových normách. Studiu chování materiálů a konstrukcí vystavených těmto zatížením je věnována také rozsáhlá odborná literatura (včetně prací autorů tohoto článku, např. [2], [3], [4]).

Nedostatkem dosavadního přístupu je to, že účinky mimořádných zatížení jsou posuzovány odděleně. Přitom je zřejmé, že ve skutečnosti mohou tato zatížení působit současně nebo pouze s malým časovým odstupem. Jako příklady lze uvést: náraz dopravního prostředku do nosné konstrukce, jeho následný výbuch a požár; výbuch automobilu uvnitř budovy a jeho následný požár; požár v budově, kde jsou přítomny výbušiny, následná exploze atd. Vzhledem ke složitosti jevů doprovázejících tyto situace je výše popsaný přístup (posouzení účinků jednotlivých typů mimořádných zatížení odděleně na nepoškozené konstrukci) pochopitelný a z hlediska inženýrského návrhu obvykle jediný prakticky proveditelný. Přesto se v poslední době začínají objevovat snahy postihnout vzájemnou provázanost jednotlivých mimořádných zatížení a zohlednit jejich interakci při návrhu konstrukcí [5 až 8].

Tento článek je zaměřen na studium chování železobetonových stropních panelů z různých druhů betonu vystavených ze spodní strany výbuchu a následnému požáru. Experiment byl realizován v rámci projektu bezpečnostního výzkumu Ministerstva vnitra ČR v roce 2014 a navazoval na přechozí materiálový výzkum pro zjištění chování různých druhů cementových kompozitů vystavených požáru [9].

NÁVRH EXPERIMENTU

Hlavní předpoklady stanovené pro provedení experimentálního programu lze shrnout do následujících bodů:

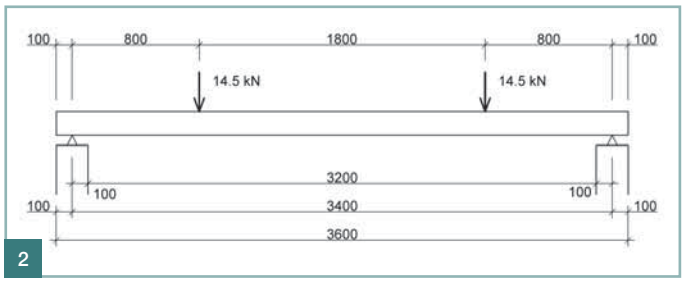
- experiment má simulovat chování železobetonových stropních panelů, vyrobených ze tří druhů betonu, vystavených výbuchu silné nálože v podlaží pod stropním panelem (předpokládaná nálož TNT o hmotnosti 125 kg ve vzdálenosti 2 500 mm od spodního povrchu stropního panelu) a následnému požáru ze spodní strany (požár dle normové teplotní křivky ISO 834, např. EN 1991-1-2 [11], vztah (3.4));
- z horní strany působí na vyšetřovanou stropní konstrukci proměnné zatížení odpovídající provozu v garážích a dopravních plochách dle normy ČSN EN 1991-1-1 [10], odst. 6.3.3, kategorie F;
- stropní konstrukce má být navržena tak, aby vyhověla za běžné teploty požadavkům normy ČSN EN 1992-1-1 [12] a zároveň aby i po vystavení výbuchu vzdorovala danému zatížení při požární expozici minimálně po dobu 60 min a vyhověla tak požadavku REI 60 při posouzení podle normy ČSN EN 1992-1-2 [13]; požadavek REI 60 byl zvolen s ohledem na obvyklé hodnoty požární odolnosti požadované v daných provozech (v praxi by byl konkrétní požadavek stanoven v rámci požárně bezpečnostního řešení příslušného objektu podle norem řady ČSN 73 08xx).

Nehodová situace simulovaná v rámci experimentu je ilustrována na obr. 1.

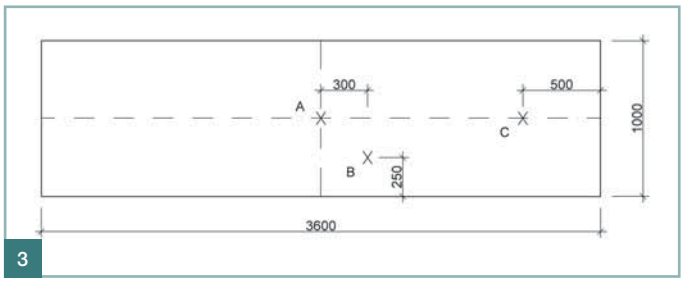
V rámci experimentálního programu byly testovány tři sady zkušebních vzorků. Pro každou sadu byl použit jiný druh betonu třídy C 30/37: referenční – materiál č. 1, beton s polypropylenovými vlákny délky 6 mm a průměru 18 μm (PP vlákna 6/0,018) – materiál č. 2 (vláknobeton) a beton s ocelovými vlákny délky 30 mm a průměru 0,38 mm (drátky 30/0,38) – materiál č. 3 (drátkobeton), srov. [9].

Každá zkušební sada obsahovala:

- dva stropní panely o rozměrech $l \times b \times h$ = 3 600 × 1 000 × 150 mm (jeden panel pro zatížení výbuchem



2



3

4

Obr. 1 Nehodová situace studovaná v rámci experimentu ▮ Fig. 1 Accidental situation studied within experiment

Obr. 2 Zatěžovací schéma pro požární experiment ▮ Fig. 2 Loads scheme for the fire test

Obr. 3 Schéma umístění termočlánků (pohled shora) ▮ Fig. 3 Scheme of the thermocouples arrangement (upper view)

Obr. 4 Osazení termočlánků ▮ Fig. 4 Arrangement of the thermocouples

a následným požárem, druhý panel pouze pro požární zkoušku);

- tři zkušební krychle o hraně 150 mm pro zjištění pevnosti betonu v tlaku (dvě krychle pro zkoušku pevnosti za běžné teploty, jedna krychle pro zjištění reziduální pevnosti po vystavení požáru);
- tři zkušební trámce o rozměrech 150 × 150 × 700 mm pro stanovení modulu pružnosti za běžné teploty (dva vzorky) a po požáru (jeden vzorek) a následnou zkoušku pevnosti v tlaku (na úlomcích ze vzorků).

Norma ČSN EN 1991-1-1 [10] předepisuje pro garáže a dopravní plochy (kategorie F) spojité proměnné zatížení q_k = 2,5 kN m^{-2} a dále zatížení osamělým břemenem Q_k = 20 kN rozděleným na dvě části působící ve vzdálenosti 1,8 m od sebe (simuluje zatížení nápravou, ČSN EN 1991-1-1 [10], obr. 6.2).

Pro účely experimentu byla velikost působících sil stanovena tak, aby jejich účinek pokrýval také vliv předepsaného spojitého proměnného zatížení (aby bylo dosaženo ekvivalentního ohybového momentu uprostřed rozpětí). Výsledné zatěžovací schéma pro požární experiment je uvedeno na obr. 2.

S ohledem na rozměry panelu a velikost zatížení byl proveden návrh ohybové výztuže panelu. Předpoklady návrhu a jeho výsledek lze shrnout do následujících bodů:

- materiály: beton C 30/37, výztuž B500B,
- tloušťka krycí vrstvy: c = 20 mm,
- účinná výška průřezu: d = 124 mm,
- vyztužení: ∅ 12 mm po 150 mm (sedm profilů, A_s = 792 mm^2) při obou površích.

BETOSAN®
DRŽITEL CERTIFIKÁTU ČSN EN ISO 9001 A 14001
alternativa, kterou oceníte
Zesilování konstrukcí – systém TYFO
UHLÍKOVÉ LAMELY
UHLÍKOVÉ TKANINY
SKELNÉ TKANINY
BAZALTOVÉ TKANINY
POJISTNÉ VLÁKNITÉ KOTVY
www.betosan.cz
OBCHODNĚ-TECHNICKÁ KANCELÁŘ
Nová cesta 291/40 tel./fax: 241 431 212
140 00 Praha 4 e-mail: praha@betosan.cz
Firemní prezentace

Obr. 5 Rozmístění panelů pro výbuchový experiment ▮ Fig. 5 Arrangement of panels for the blast experiment

Obr. 6 Umístění nálože ▮ Fig. 6 Arrangement of the charge

Obr. 7 Výbuch nálože ▮ Fig. 7 Charge explosion

Obr. 8 Vlasová trhlina na boční stěně panelu po výbuchu ▮ Fig. 8 Hairline crack on the lateral side of the panel after the blast

Obr. 9 Ultrazvukové měření panelů ▮ Fig. 9 Ultrasonic analysis of the panels

Obr. 10 Pohled na zkušební vzorky uvnitř pece: panely vzájemně odděleny izolací z minerální vaty, malé vzorky pro následné měření reziduálních materiálových vlastností ▮ Fig. 10 Test specimen inside the furnace: panels separated one from each other by mineral wool insulation, small specimens for subsequent measuring of residual material properties

Obr. 11 Zatížení panelů betonovými trámci ▮ Fig. 11 Loading of the panels with concrete blocks

Obr. 12 Pohled do pece v průběhu zkoušky ▮ Fig. 12 View into the furnace during the test

Obr. 13 Okamžik ukončení zkoušky ▮ Fig. 13 Time of termination of the test

Obr. 14 Měření hloubky odštěpení ▮ Fig. 14 Measuring of the spalling depth

Při posouzení mezního stavu únosnosti v ohybu za běžné teploty navržený panel vyhoví s dostatečnou rezervou (využití 62 %).

Únosnost při požáru (normová teplotní křivka ISO 834) byla stanovena metodou izotermy 500 °C (ČSN EN 1992-1-2 [13], Příloha B.1). Rozvoj teploty uvnitř průřezu v čase byl určen na základě experimentálních výsledků získaných v rámci požárního experimentu na malých vzorcích provedeného v roce 2013 [9]. Konkrétně byla použita data naměřená na vzorku o rozměrech 300 × 300 × 120 mm vyrobeném z betonu C 30/37 (vzorek 1_{12} [9]).

Na základě provedeného výpočtu bylo ověřeno, že požární zkouška by neměla být ukončena kolapsem žádného z šesti zkoušených panelů dříve než po 60. minutě působení požáru (výpočtem stanovený čas kolapsu byl 71 min), což je minimální doba požární zkoušky, která byla v rámci tohoto experimentálního programu požadována.

Stanovený čas kolapsu byl samozřejmě pouze orientační, neboť tři ze šesti zkoušených panelů byly před požární zkouškou poškozeny předchozím výbuchem (což by mělo únosnost snížit). Na druhou stranu ale byla při výpočtu uvažována charakteristická pevnost betonu (skutečná pevnost byla vyšší), nebyla zohledněna výztuž u horního povrchu, teplota výztuže byla stanovena z výsledku naměřeného na vzorku, u kterého došlo k významnému odštěpení ([9], obr. 14a), a vlastní posouzení mezního stavu únosnosti podle evropských návrhových norem je ze své podstaty konzervativní. Bylo tedy možné předpokládat, že výsledná požární odolnost zkoušených panelů bude výrazně vyšší.

VÝROBA VZORKŮ

Pro výrobu vzorků byly použity tři druhy betonu: referenční (materiál č. 1), vláknobeton (materiál č. 2) a drátkobeton (materiál č. 3). Receptura referenčního betonu byla vhodně modifikována pro použití vláken (PP vlákna 6/0,018 v množství 1,5 kg na 1 m^3 směsi) a drátků (drátky 30/0,38 v množství 40 kg na 1 m^3 směsi).

Z každého materiálu byly vyrobeny dva panely o rozměrech $l \times b \times h$ = 3 600 × 1 000 × 150 mm a dále tři zkušební krychle o hraně 150 mm pro zjištění pevnosti betonu v tlaku a tři zkušební trámce o rozměrech 150 × 150 × 700 mm pro zkoušku tahu za ohybu.

Výroba zkušebních vzorků byla zadána společnosti ŽPSV, a. s., závod Litice. Betonáž proběhla na přelomu října a listopadu 2014. Před vlastní betonáží panelů byly do připravených forem umístěny termočlánky pro měření vývoje teploty uvnitř vzorku při požární zkoušce. Termočlánky byly instalovány vždy na třech místech v ploše panelu ve vzdálenostech 10, 20, 50 a 100 mm od spodního líce a dále na dolní podélné výztuži (obr. 3 a 4).

Po odbednění byly panely popsány a uskladněny v areálu výrobny. Poté byly vzorky převezeny na místo provedení výbuchového experimentu a následně do požární zkušebny PAVUS, a. s., Veselí nad Lužnicí.

Malé vzorky (tři krychle a tři trámce od každého materiálu) byly po odbednění popsány a převezeny do laboratoře Fakulty stavební ČVUT v Praze k dalšímu zkoušení (zkouška tlakové pevnosti, zkouška tahu za ohybu), z toho jedna kostka a jeden trámec od každého materiálu byly poté přepraveny do požární zkušebny, kde byly uloženy do zkušební pece za účelem následného stanovení reziduálních materiálových vlastností po požáru.

VÝBUCHOVÝ EXPERIMENT

Výbuchový experiment měl simulovat chování stropních železobetonových panelů vystavených výbuchu silné ná-

10

lože v podlaží pod stropním panelem (předpokládaná nálož TNT o hmotnosti 125 kg ve vzdálenosti 2 500 mm od spodního povrchu stropního panelu).

Zatížení výbuchem nebylo z bezpečnostních a prostorových důvodů možné provést v plném měřítku. Bylo proto stanoveno ekvivalentní zatížení vyvolávající srovnatelné působení na vzorek. Podle dostupné literatury byla stanovena ekvivalentní nálož o hmotnosti 500 g ve vzdálenosti 600 mm od povrchu panelu. Při redukování měřítka bylo třeba zohlednit jak dopadající přetlak rázové vlny závislý na redukované vzdálenosti, tak dynamický přetlak rázové vlny, který závisí na vzdálenosti odlišným způsobem.

Výbuchový experiment byl proveden 20. listopadu 2014. Panely byly z výrobny dovezeny do prostoru odpalu, kde byly prostě uloženy na rozpětí 3 400 mm na dřevěné kulatiny (obr. 5). Byly zkoušeny celkem tři panely, na každém panelu byla odpálena nálož plastické trhaviny o hmotnosti 500 g. Nálož ve tvaru válce o průměru 120 mm a výšce 20 mm byla zavěšena na ocelovém rámu v požadované vzdálenosti od exponovaného povrchu panelu (obr. 6 a 7). Pro snazší provedení výbuchového experimentu byl panel zkoušen v obrácené poloze a nebyl zatížen statickým zatížením (kromě vlastní tíhy, která však působila opačným směrem, než by tomu bylo v modelové situaci, obr. 1). Toto uspořádání experimentu je u podobných výzkumů obvyklé a lze předpokládat, že výsledné poškození panelu od výbuchu je srovnatelné s tím, jaké by bylo dosaženo při zkoušení plně zatíženého panelu v reálné poloze (poškození od výbuchu není způsobeno ohybovými účinky, ale prostupem a šířením rázové vlny v betonu).

Po výbuchu byly na všech panelech patrné známky poškození. Na obou bocích panelů se objevily vlasové trhliny (obr. 8). Nálož byla volena záměrně tak, aby poškození panelů nebylo příliš veliké, což by mohlo zamezit korektnímu provedení požární zkoušky, případně by mohlo dojít k poškození termočlánků.

Panely vystavené výbuchu i panely nepoškozené byly následně přepraveny do požární zkušebny, kde bylo ultrazvukovým měřením podrobně zmapováno poškození výbuchem a provedena požární zkouška.

ULTRAZVUKOVÉ MĚŘENÍ PANELŮ

Po převozu panelů do požární zkušebny bylo 2. prosince 2014 provedeno měření poškození panelů pomocí ultrazvukového měřiče Pundit Lab+ s měřicími sondami s frekvencí 54 kHz (obr. 9). Úroveň poškození byla stanovena nepřímo změřením rychlosti průchodu ultrazvukové vlny daným materiálem (resp. dobou průchodu ultrazvukové vlny vzorkem dané tloušťky).

Podrobně byly analyzovány zejména panely, které byly vystaveny výbuchu. Nepoškozené panely nebylo nutné měřit na více bodech, neboť vykazovaly homogenní charakter.

Kontrolní měření bylo provedeno také po požární zkoušce za účelem zjištění míry poškození panelů v důsledku vystavení vysokým teplotám.

POŽÁRNÍ ZKOUŠKA

Požární zkouška proběhla 5. prosince 2014 v požární zkušebně. Panely byly osazeny na zkušební pec dle předepsaného schématu (obr. 2). Do pece byly umístěny také malé vzorky pro měření reziduálních vlastností materiálů po požáru (obr. 10).

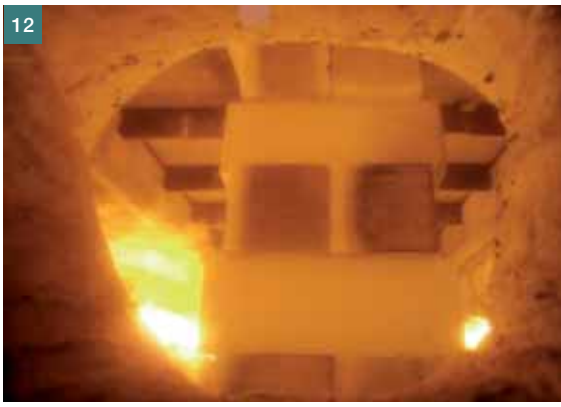
Předepsané zatížení bylo vyvozeno betonovými trámci odpovídající hmotnosti umístěnými na ocelové roznášecí nosníky (obr. 11). Termočlánky byly zapojeny do měřicí stanice a všechny panely byly vystrojeny pro měření průhybů uprostřed rozpětí.

Zkouška probíhala standardním způsobem (obr. 12). V průběhu zkoušky bylo patrné značné odpařování vlhkosti a její transport na neohřívanou stranu panelů. Dále bylo možné pozorovat (vizuálně i akusticky) masivní odštěpování betonu.

Zkouška byla ukončena v čase 2 h 15 min z důvodu dosažení limitního průhybu (obr. 13).

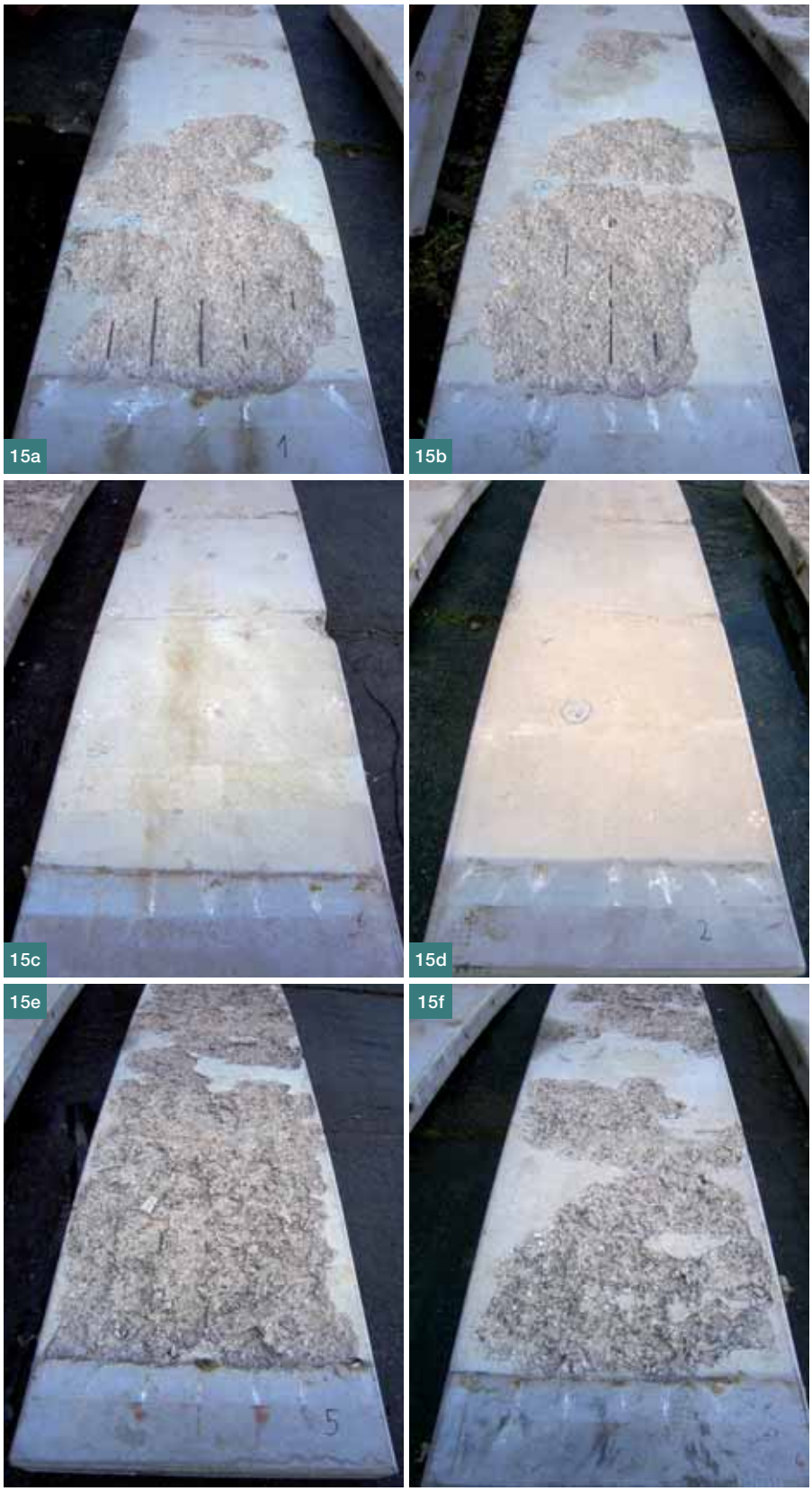
Po vychladnutí pece byly panely přemístěny do venkovního prostoru v areálu požární zkušebny, kde bylo provedeno kontrolní měření ultrazvukem a podrobně stanoven rozsah odštěpení povrchové vrstvy. Na exponovaném povrchu panelu byla vynesena síť s oky 100 × 100 mm, v uzlech této sítě byly změřeny hodnoty hloubky odštěpení pomocí posuvného měřítka (obr. 14) a takto získaná data byla dále analyzována v programu MATLAB (srov. [14], [15]). Malé vzorky byly přepraveny do laboratoře Fakulty stavební ČVUT v Praze pro stanovení reziduálních materiálových vlastností.

11


12

13

14



Obr. 15 Povrch vzorků: a) 1a, b) 1b, c) 2a, d) 2b, e) 3a, f) 3b ▮
Fig. 15 Surface of specimens: a) 1a, b) 1b, c) 2a, d) 2b, e) 3a, f) 3b

Tab. 1 Výsledky ultrazvukového měření panelů ▮ Tab. 1 Results of the ultrasonic analysis of the panels

Vzorek	Průměrná rychlost prostupu ultrazvukové vlny [m s^{-1}]	
	Před požární zkouškou	Po požární zkoušce ***)
1a	4 399 *)	2 752
1b	4 448	2 546
2a	4 504 **)	2 933
2b	4 228	2 412
3a	4 394	– ****)
3b	4 370	– ****)

*) Bylo provedeno měření pouze ve dvou bodech.
**) Bylo provedeno měření pouze v jednom bodě.
***) Bylo provedeno měření pouze ve dvou bodech.
****) Měření nebylo provedeno z důvodu odštěpení povrchu.

VÝSLEDKY A DISKUSE

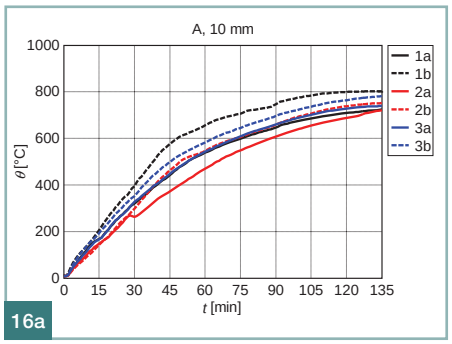
V průběhu experimentu byla zaznamenána data, která popisují nebo umožňují stanovit:

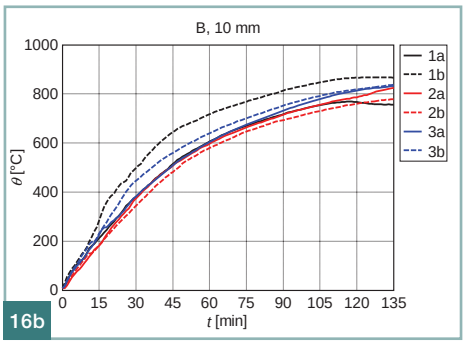
- homogenitu a míru poškození vnitřní struktury panelů (vystavených i nevystavených výbuchu) před požární zkouškou a po jejím ukončení (stanoveno ultrazvukovým měřičem),
- vývoj teploty uvnitř a na povrchu panelů v průběhu požární zkoušky,
- vývoj průhybu panelů uprostřed rozpětí v průběhu požární zkoušky,
- rozsah odštěpení povrchové vrstvy panelů po ukončení požární zkoušky,
- mechanické vlastnosti použitých materiálů za běžné teploty a po vystavení požáru.

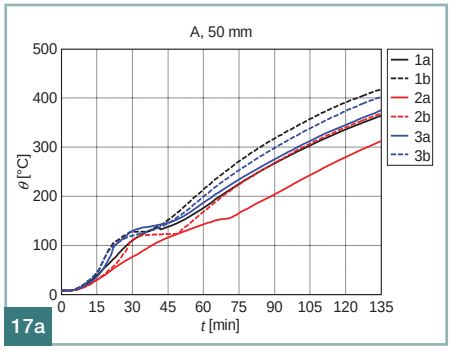
Pro přehlednost jsou v následujícím textu zkušební vzorky označovány číslem popisujícím daný materiál (1 – železobeton, 2 – vláknobeton, 3 – drátkobeton) a písmenem vyjadřujícím, zda se jedná o vzorek vystavený předchozímu výbuchu nebo vzorek referenční (a – referenční vzorek, b – panel vystavený výbuchu).

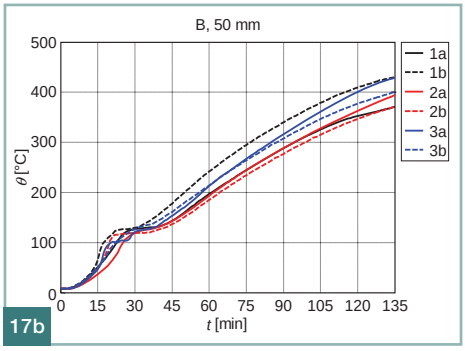
Vzhledem k tomu, že rozsah odštěpení povrchové vrstvy měl zásadní vliv na další měřené veličiny (teploty vzorků, průhyby), je vhodné začít s popisem výsledků právě u tohoto jevu. Z obr. 15 a z naměřených údajů (obr. 14) je patrné, že:

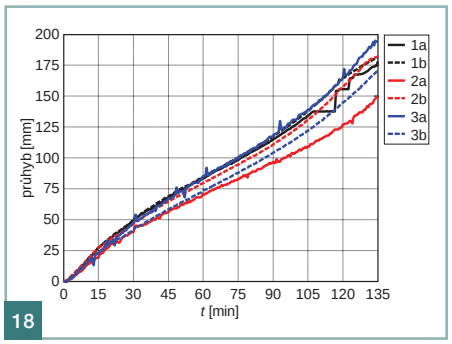
- u panelů ze železobetonu došlo k výraznému odštěpení v oblastech blízko podpor, maximální hloubka odštěpení dosahovala hodnoty 25 mm, střední oblasti panelů (uprostřed rozpětí) odštěpením zasaženy nebyly (obr. 15a,b);
- u vzorků z vláknobetonu k odštěpení povrchové vrstvy vůbec nedošlo (obr. 15c,d);
- panely z drátkobetonu byly v porovnání se vzorky z ostatních materiálů zasaženy odštěpováním nejvíce –











Obr. 16 Teploty ve vzdálenosti 10 mm od líce vystaveného požáru: a) bod A, b) bod B
▮ Fig. 16 Temperatures in the distance of 10 mm from the heated surface: a) point A, b) point B

Obr. 17 Teploty ve vzdálenosti 50 mm od líce vystaveného požáru: a) bod A, b) bod B
▮ Fig. 17 Temperatures in the distance of 50 mm from the heated surface: a) point A, b) point B

Obr. 18 Průhyb panelů uprostřed rozpětí ▮ Fig. 18 Midspan deflection of the panels

povrchová vrstva byla narušena téměř v celé ploše panelů, maximální hloubka odštěpení dosahovala hodnoty 30 mm (obr. 15e,f);

- předchozí vystavení výbuchu nemělo na rozsah odštěpení podstatný vliv.

Tato jištění jsou v souladu s předchozími experimenty (srov. [9]) i s údaji uvedenými v odborné literatuře (např. [16]).

Na homogenitu a poškození vnitřní struktury panelů lze usuzovat z naměřených hodnot rychlosti prostupu ultrazvukové vlny napříč panelem (čím nižší rychlost, tím větší poškození – vnitřní trhliny a jiné projevy narušení struktury materiálu zpomalují průchod ultrazvukové vlny). V tab. 1 jsou uvedeny průměrné hodnoty změřené na jednotlivých vzorcích uprostřed rozpětí – na čtyřech bodech v polovině délky panelů, které nejlépe vypovídají o případném poškození panelů v důsledku výbuchu (obr. 9).

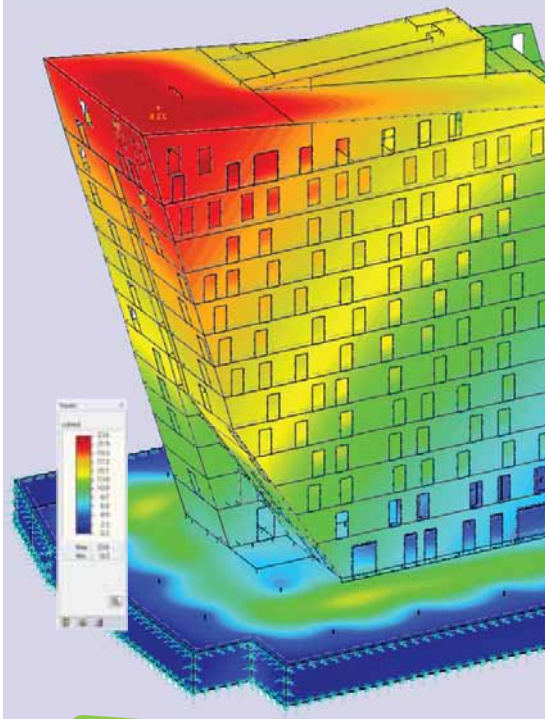
Z uvedených hodnot vyplývá, že poškození panelů po výbuchu nebylo příliš výrazné. Vzhledem k tomu, že požární experiment se prováděl na všech šesti panelech (tj. třech panelech neposkozených a třech panelech po vystavení výbuchu) najednou, mohlo by výrazné poškození panelů výbuchem ohrozit konání požární zkoušky. U panelů ze železobetonu byly dokonce změřeny nepatrně vyšší rychlosti na vzorku vystaveném výbuchu než na vzorku referenčním. U dalších dvou materiálů již byly hodnoty rychlosti nižší u vzorků vystavených výbuchu. Největší rozdíl v rychlostech (to znamená největší poškození výbuchem) byl zaznamenán u panelů z vláknobetonu.

Výsledky ultrazvukového měření po provedení požární zkoušky podle předpokladů ukázaly výrazné poškození vnitřní struktury vzorků v důsledku působení vysoké teploty a předepsaného zatížení. Větší poškození bylo zaznamenáno u panelů, které byly před požární zkouškou vystaveny výbuchu (vzorky 1b a 2b). Na panelech z drátkobetonu nebylo možné toto měření po požáru provést z důvodu výrazného odštěpení povrchové vrstvy (měření vyžaduje rovný povrch vzorku).

Teploty byly pomocí termočlánku měřeny na třech místech v ploše panelu (obr. 3). Na obr. 16 a 17 je znázor-

Firemní prezentace

RFEM 5
MKP Program pro výpočet 3D konstrukcí
RSTAB 8
Program pro výpočet prutových konstrukcí



ZKUŠEBNÍ VERZE ZDARMA NA www.dlubal.cz

Statika, která Vás bude bavit !

Dlubal
Dlubal Software s.r.o.
Anglická 28, 120 00 Praha 2
+420 227 203 206
info@dlubal.cz
www.dlubal.cz

Literatura:
[1] ČSN EN 1990, Eurokód: *Zásady navrhování konstrukcí.* Praha: ČNI, 2004.
[2] FOGLAR, M., KOVÁŘ, M. Conclusions from experimental testing of blast resistance of FRC and RC bridge decks. *International Journal of Impact Engineering*, 59 (2013), p. 18–28.
[3] FOGLAR, M., HÁJEK, R., KOVÁŘ, M., ŠTOLLER, J. Blast performance of RC panels with waste steel fibers. *Construction and Building Materials,* 94 (2015), p. 536–546.
[4] ŠTEFAN, R. *Transport Processes in Concrete at High Temperatures: Mathematical Modelling and Engineering Applications with Focus on Concrete Spalling.* PhD thesis. CTU in Prague, 2015.
[5] KAKOGIANNIS, D. et al. Blast performance of reinforced concrete hollow core slabs in combination with fire: Numerical and experimental assessment. *Fire Safety Journal,* 57 (2013), p. 69–82.
[6] KAMATH, P. et al. Full-scale fire test on an earthquake-damaged reinforced concrete frame. *Fire Safety Journal,* 73 (2015), p. 1–19.
[7] RUAN, Z., CHEN, L., FANG, Q. Numerical investigation into dynamic responses of RC columns subjected for fire and blast. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries,* 34 (2015), p. 10–21.
[8] WU, B., XIONG, W., WEN, B. Thermal fields of cracked concrete members in fire. *Fire Safety Journal,* 66 (2014), p. 15–24.
[9] ŠTEFAN, R., FOGLAR, M., FLÁDR, J. Experimentální výzkum chování různých druhů cementových kompozitů vystavených požáru. *Beton TKS,* 15, 6 (2015), s. 64–69.
[10] ČSN EN 1991-1-1, Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb.* Praha: ČNI, 2004.
[11] ČSN EN 1991-1-2, Eurokód 1: *Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru.* Praha: ČNI, 2004.
[12] ČSN EN 1992-1-1, Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.* Praha: ČNI, 2006.
[13] ČSN EN 1992-1-2, Eurokód 2: *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru.* Praha: ČNI, 2006.
[14] MINDEGUIA, J. C. *Contribution expérimentale a la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons.* PhD thesis. UPPA, 2009.
[15] OZAWA, M., UCHIDA, S., KAMADA, T., MORIMOTO, H. Study of mechanisms of explosive spalling in high-strength concrete at high temperatures using acoustic emission. *Construction and Building Materials,* 37 (2012), p. 621–628.
[16] KHOURY, A., ANDERBERG, Y. *Fire Safety Design. Concrete Spalling Review.* Swedish National Road Administration, 2000.

Tab. 2 Tlakové pevnosti materiálů za běžné teploty a po požáru ▮
Tab. 2 Strengths in compression of materials at normal temperature and after fire

Měřená veličina	Jednotka		Materiál 1	Materiál 2	Materiál 3
Pevnost v tlaku za běžné teploty	[MPa]	vzorek I	39,3	46,4	36,0
		vzorek II	46,9	42,5	46,2
		průměr	**43,1**	**44,4**	**41,1**
Reziduální pevnost v tlaku	[MPa]		**5,4**	**5,7**	**8,1**
	[%]		**12,5**	**12,8**	**19,7**

něn nárůst teploty panelů ve vzdálenosti 10, resp. 50 mm od líce vystaveného požáru.

Z uvedených grafů je zřejmé, že:

- nejnižších teplot bylo dosaženo u vzorků z vláknobetonu, což je dáno především tím, že vzorky z tohoto materiálu nebyly zasaženy odštěpováním;
- u panelů z železobetonu a z drátkobetonu byly naměřeny přibližně stejné teploty, což opět odpovídá charakteru odštěpení těchto vzorků (obr. 15);
- v případě železobetonu a drátkobetonu bylo dosaženo vyšších teplot u vzorků, které byly před požární zkouškou vstaveny výbuchu.

Vzhledem k omezenému rozsahu článku bude podrobná analýza teplotního chování panelů předmětem následujících publikací.

Časový vývoj průhybů panelů uprostřed rozpětí je znázorněn na obr. 18. Nejmenší průhyb byl zaznamenán u vzorku 2a, tedy u panelu z vláknobetonu, který nebyl vystaven výbuchu. Panel 2b, u kterého stejně jako u panelu 2a nedošlo k odštěpení povrchové vrstvy, dosáhl relativně velkého průhybu. Nabízí se vysvětlení, že tento rozdíl byl způsoben předchozím zatížením panelu 2b výbuchem. Stejně tak u vzorků ze železobetonu bylo většího průhybu dosaženo u panelu vystaveného výbuchu (vzorek 1b). V případě panelů z drátkobetonu se toto zjištění nepotvrdilo – u panelu 3a byl zaznamenán větší průhyb než u panelu 3b. Vzhledem k tomu, že byly oba tyto vzorky (3a a 3b) zasaženy výrazným odštěpením povrchové vrstvy, je možné, že vliv odštěpení převýšil vliv poškození výbuchem.

Pevnosti materiálů za běžné teploty a po požáru jsou uvedeny v tab. 2. Zajímavým zjištěním je to, že nejvyšší reziduální pevnost byla zaznamenána u drátkobetonu (materiál č. 3), ačkoli z hlediska odštěpování povrchové vrstvy se tento materiál choval prokazatelně nejhůře (obr. 15).

ZÁVĚR

V článku je popsán rozsáhlý experiment, jehož cílem bylo ověření chování železobetonových stropních panelů z různých druhů betonu vystavených výbuchu a následnému požáru. Kombinovaný účinek různých druhů mimořádných zatížení není doposud uspokojivě prozkoumán a i výsledky tohoto experimentu (v mnoha případech protichůdné, umožňující různé interpretace) ukazují, že se jedná o mimořádně složitou problematiku, kterou je nutné dále studovat.

Tato práce vznikla za podpory poskytnuté Ministerstvem vnitra České republiky v rámci projektu VG20132015114 – Užití vláknocementových kompozitů pro zvýšení ochrany technické infrastruktury a obyvatelstva proti teroristickému útoku.

Ing. Radek Štefan, Ph.D.
e-mail: radek.stefan@fsv.cvut.cz

doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.
e-mail: marek.foglar@fsv.cvut.cz

Ing. Radek Hájek
e-mail: radek.hajek@fsv.cvut.cz

Ing. Josef Fládr
e-mail: josef.fladr@fsv.cvut.cz

všichni: Fakulta stavební
ČVUT v Praze
Katedra betonových
a zděných konstrukcí

Text článku byl posouzen odborným lektorem.
The text was reviewed.