VYUŽITÍ MODERNÍCH KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ V REÁLNÝCH APLIKAČNÍCH OBLASTECH ▮ USE OF ADVANCED COMPOSITE MATERIALS AS REINFORCEMENT IN REAL APPLICATION AREAS

František Girgle, Vojtěch Kostiha, Jan Prokeš, Petr Daněk, Petr Štěpánek

Příspěvek je zaměřen do oblasti využití moderních kompozitních materiálů v reálných aplikačních oblastech konstrukcí vystavených extrémnímu environmentálnímu namáhání. Věnuje se návrhu prefabrikovaného prvku vyztuženého vnitřní nekovovou výztuží a jeho následnému experimentálnímu ověření. Na základě provedené analýzy trhu byl vybrán prvek přímo pojížděné zákrytové desky, jenž je značně exponován agresivním prostředím a přímo pojížděn kolovými vozidly. Jako pilotní výrobek byla zvolena zákrytová deska jednoduchého čtvercového půdorysu o rozměrech 2,1 x 2,1 m. Veškerá výztuž, tj. ohybová i smyková, byla navržena jako kompozitní, přičemž návrh byl proveden dle platných evropských a amerických návrhových doporučení. Správnost návrhu byla ověřena numerickou simulací a následnou zatěžovací zkouškou segmentu vyhotoveného ve skutečné velikosti. ▮ The paper is focused on the use of advanced composite materials in the real application areas of buildings exposed to extreme environmental stress. The design of a structural element reinforced with inner non-metallic reinforcement and its subsequent experimental verification is described in the article. Based on the analysis of the market, the cover slab straightly loaded by vehicular traffic was selected. The cover slab is exposed to very aggressive environment and direct running of wheel vehicles. A simple square-shaped slab with dimensions of 2.1 x 2.1 m was chosen as a pilot element. All reinforcement, i. e., bending and shear, was designed as composite reinforcement according to the instructions introduced in valid European and American guidelines. The design has been verified by numerical simulation and subsequent loading test of the real scale segment.

Betonové prvky vystavené působení agresivního prostředí, u nichž vlivem vzniku a rozvoje trhlin dochází ke korozi výztuže, jsou perspektivní aplikační oblastí pro použití kompozitní výztuže (FRP; fiber reinforced polymer).

V současné době jsou výhody využití těchto moderních výztužných materiálů dobře známé a je tedy zřejmé, že použití nekorodující a z hlediska enviromentálního namáhání velmi odolné výztuže vede k maximalizaci životnosti konstrukčního prvku. Návrhová životnost prvku se správně navrženou nekovovou výztuží je teoreticky neomezená, prakticky ji determinuje kvalita provedení prvku a životnost betonových částí průřezu. S ohledem na výše uvedené odpadá nutnost respektovat doporučení normativních podkladů [2] z hlediska trvanlivosti konstrukce. Je tedy možno velmi účinně snížit staticky neúčinnou krycí vrstvu výztuže navrženou z hlediska trvanlivosti konstrukce a využít pouze nutnou minimální krycí vrstvu z hlediska soudržnosti (obvykle rovnu průměru nosné výztuže zvětšené o bezpečnostní složku krytí z hlediska provádění), čímž dochází k odlehčení prvku a úspoře betonové směsi.

Po provedení analýzy možných aplikačních oblastí využití nekovových výztuží v rámci prefabrikovaných odolných konstrukčních prvků využitelných v české stavební praxi byl vybrán prvek přímo pojížděné zákrytové desky. Využití těchto zákrytových desek je především v oblasti extrémně agresivních prostředí: předpokládá se přímé pojíždění kolovými vozidly a zakrývané prostory instalačních šachet vykazují též velmi vysoké koncentrace vodních par. Z hlediska využití kompozitní výztuže jde tedy o ideální aplikační oblast.

KONCEPČNÍ PŘÍSTUP K NÁVRHU ZÁKRYTOVÉ DESKY VYZTUŽENÉ FRP VÝZTUŽÍ

Zákrytové desky jsou navrhovány jako krátké mostní jednopolové objekty, jež svým statickým působením odpovídají křížem vyztuženým po obvodě podepřeným deskám. Zatížení je dle doporučení platných normativních podkladů [3] uvažováno v souladu se zatížením definovaným pro mostní konstrukce. Způsob užívání těchto konstrukčních dílců určuje i způsob namáhání, kdy dominantní složkou působícího zatížení je zatížení cyklické (dynamické) – tj. zatížení vyvozující únavu jednotlivých, v konstrukci zastoupených, materiálů.

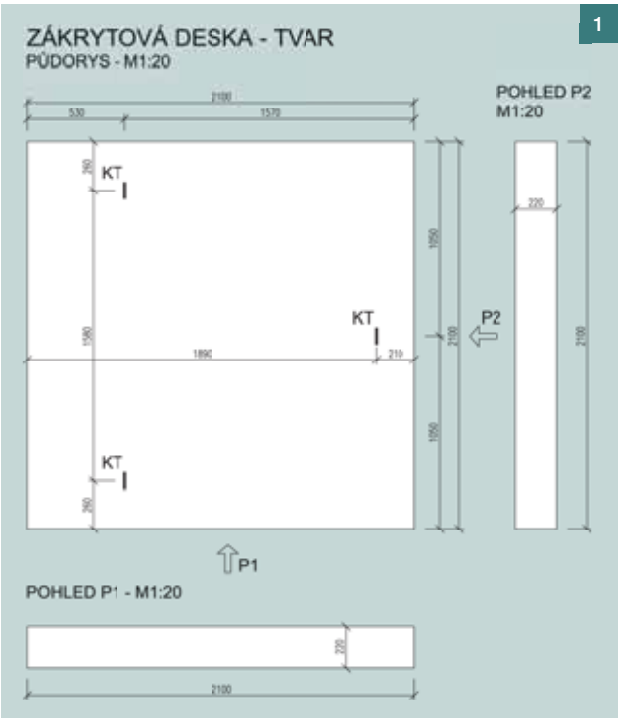
Jako pilotní prvek pro experimentální ověření funkčnosti navrženého dílce byla vybrána zákrytová deska jednoduchého čtvercového půdorysu o rozměrech 2,1 x 2,1 m (tj. světlý rozměr zakrývané šachty je v obou na sebe kolmých směrech 2 m) a tloušťky 220 mm. Tato byla pro snadnější interpretaci získaných dat v první fázi vývoje uvažována bez obslužných otvorů, přičemž následně bylo přikročeno k ověření chování prvku s jedním otvorem, který je běžnou součástí výrobního sortimentu společnosti Prefa Brno, a. s. Tvarové řešení segmentu je patrno z obr. 1.

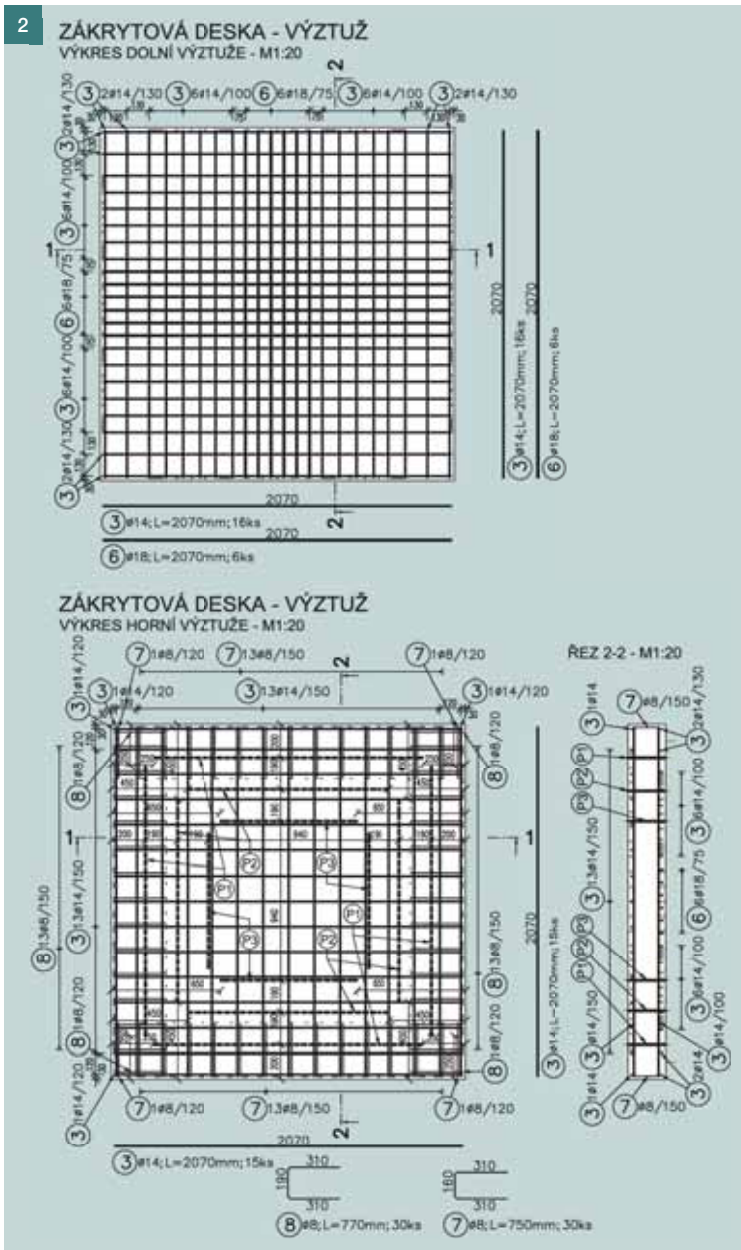
Předpokládané stupně vlivu prostředí relevantní pro přímo pojížděnou zákrytovou desku nad parovody jsou definovány dle platné technologické normy [2] a základní normy pro návrh betonových konstrukcí [1] jako XD3, XF4. Dle téže normy (se zřetelem na změnu Z3 této normy) je doporučena minimální třída betonu C35/45, krytí z hlediska trvanlivosti pro klasickou ocelovou betonářskou výztuž (s bezpečnostním přídavkem 10 mm z hlediska provádění, konstrukční třída S3) pak 50 mm.

S ohledem na využití vyvinuté kompozitní výztuže je možné účinně krycí vrstvu snížit na nutné minimum z hlediska soudržnosti, v tomto konkrétním případě tedy 20 mm (předpokládá se využití kameniva největšího zrna dg = 16 mm). Dochází tak ke zvýšení účinné výšky prvku o 30 mm, což u deskových konstrukcí není nezanedbatelný příspěvek redukující spotřebu výztužných prutů; nebo k redukci spotřebovaného betonu, a tím i vlastní váhy prvku při zachování účinné výšky průřezu shodné s případem s klasickou výztuží. Výrazně nižší tloušťka krycí vrstvy se také kladně projeví v chování prvku z hlediska mezního stavu omezení šířky trhlin.

Návrh vyztužení zákrytové desky

Na základě definovaných geometrických a materiálových parametrů byly statickým výpočtem zjištěny hodnoty dimenzačních veličin. Konstrukce je dimenzována na extrémní účinky vyvozené zatěžovacím modelem LM2 (dle [3], přičemž v normové hodnotě zatížení jsou zahrnuty i dynamické účinky po-





Obr. 1 Tvar řešeného prefabrikovaného segmentu ▮ Fig. 1 The precast member shape

Obr. 2 Vyztužení zákrytové desky – dolní a horní výztuž včetně řezu prvkem ▮ Fig. 2 The cover slab reinforcement – bottom and upper reinforcement including section

jezdu nápravy). Dynamické účinky kolové dopravy jsou pak ve výpočtu uvažovány dle [3] únavovým modelem 1. Ten je uvažován v časté kombinaci zatížení pro stanovení účinku zatížení při vysokocyklickém opakovaném namáhání (tedy namáhání, které redukuje materiálové charakteristiky s ohledem na vliv únavy materiálu).

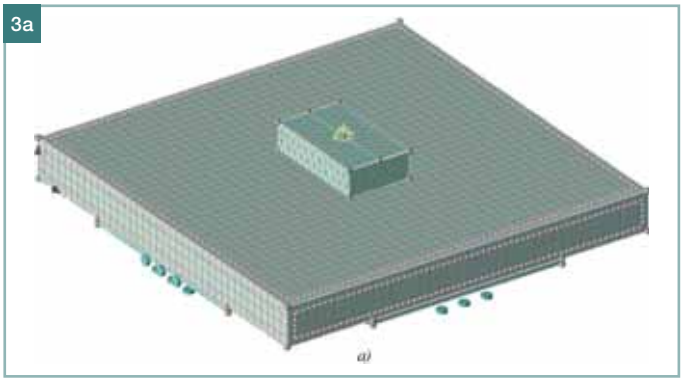
Pro návrh a též i následnou výrobu segmentu byl použit beton třídy C35/45 standardní záměsi s maximálním zrnem kameniva dg = 16 mm. Vyztužení bylo navrženo z výztužných tyčí Prefa Rebar (typ C) vyvinutých a vyrobených ve společnosti Prefa Kompozity, a. s. [7]. Jde o hybridní C-GFRP *(carbon-glass fiber reinforced polymer)* výztuž, která kombinuje výhody skelných alkali-rezistentních (AR) vláken a uhlíkových vysokopevnostních (HS) vláken se střední tahovou pevností 1 050 MPa a modulem pružnosti 50 GPa (obě veličiny měřeny ve směru vláken).

Vzhledem k nízké únosnosti tvarově zakřivených prutů z vláknových kompozitů (po zakřivení mají cca 20 až 30 % původní tahové únosnosti) a pro snížení pracnosti vyvázání byla jako smyková výztuž navržena kompozitní mřížovina s výrobním označením Prefa Grid [8]. Lité rošty (mřížky) této výztuže jsou vyrobeny technologií lití do forem a obsahují až 40 % skelných vláken. Výhodnost použití litých FRP roštů spočívá především v jejich vysoké příčné tuhosti, a tím i dobrém zakotvení v betonu prvku na velmi krátké délce díky příčným prutům, což ve výsledku přináší vysokou smykovou únosnost betonového dílce vyztuženého tímto typem smykové výztuže.

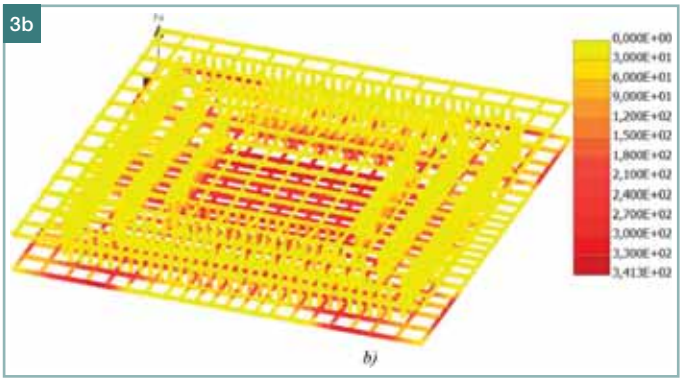
Návrh výztuže je proveden při respektování doporučení dle amerických standardů ACI řady 440 [4], postupů definovaných v rámci *fib* Bulletin No. 40 [5] a s přihlédnutím k pokynům k návrhu dynamicky zatížených konstrukcí (především z hlediska hladiny napětí ve výztuži vyvozené dynamickým zatížením). Vyztužení zákrytové desky je patrno z obr. 2.

Vzhledem k situaci, kdy je při návrhu prvku využíváno amerických a evropských doporučení a zatěžovací údaje jsou stanoveny v souladu s normami platnými v České republice, je třeba zvýšenou míru pozornosti věnovat stanovení dosažené (navržené) míry bezpečnosti (spolehlivosti) konstrukce. Normy řady ACI a EC použité při návrhu nepoužívají shodné parciální součinitele spolehlivosti. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto ověřit chování prvku pomocí numerické simulace a též

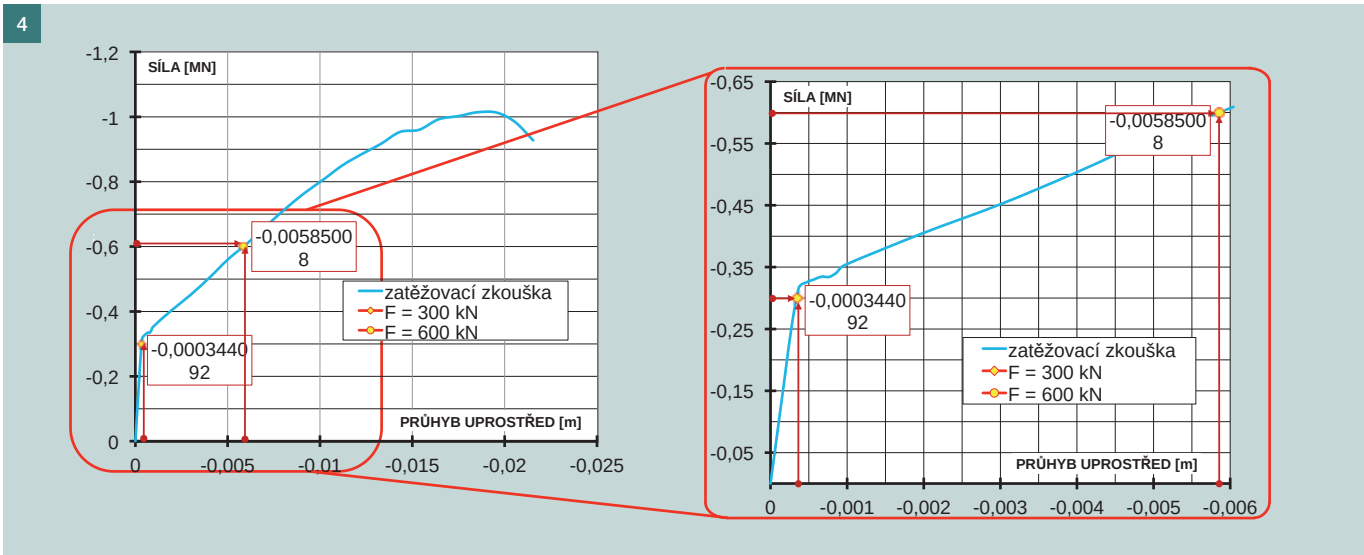
3a



3b



4



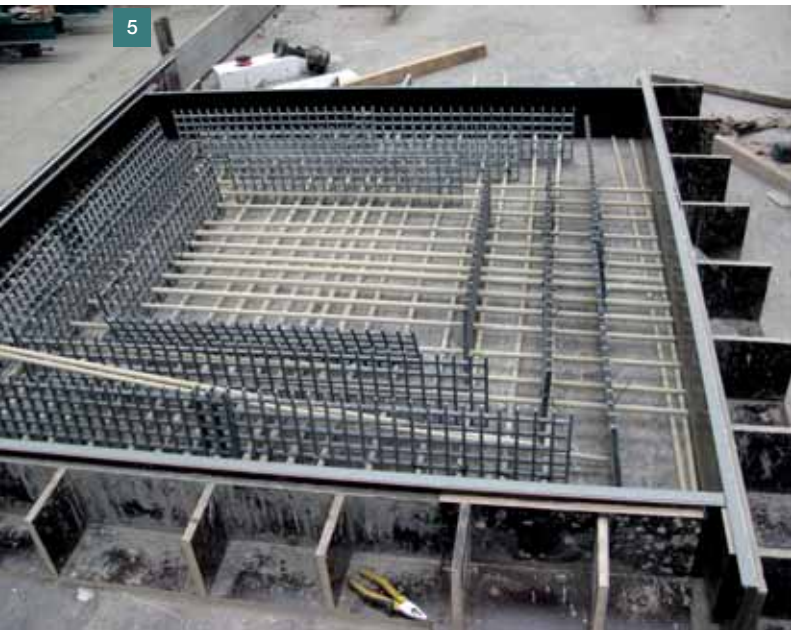
i provedením reálné full-scale zatěžovací zkoušky a poté na základě získaných údajů stanovit reálnou míru spolehlivosti zákrytové desky.

Dle výsledků provedeného statického návrhu lze konstatovat, že k porušení navrženého prvku dojde drcením betonu, což není s ohledem na značnou deformační kapacitu a lineární chování (elastické působení až do porušení bez plastické větve) použité FRP výztuže překvapivé. Kolaps konstrukce však bude předznamenán značným rozvojem trhlin a nárůstem průhybu.

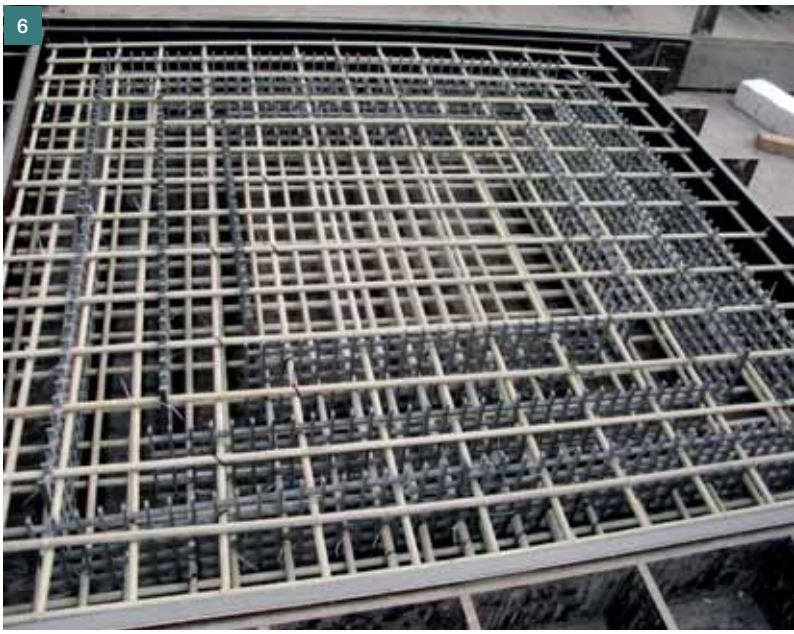
Numerické simulace

Provedený statický návrh byl ověřen nelineární numerickou simulací zatěžovací zkoušky v MKP programu ATENA 3D [6] umožňujícím simulování reálného chování kvazikřehkých materiálů. Nelineární numerický model desky byl vytvořen s důrazem na dodržení skutečných materiálových a geometrických parametrů při zachování okrajových podmínek (tj. způsob zatížení i podepření) odpovídajícím reálnému chování při zatěžovací zkoušce. Zatížení bylo z tohoto důvodu (na základě statickým výpočtem přijatých předpokladů) vnášeno deformačně na ploše cca 350 x 600 mm, což odpovídá modelu zatížení LM2 [3].

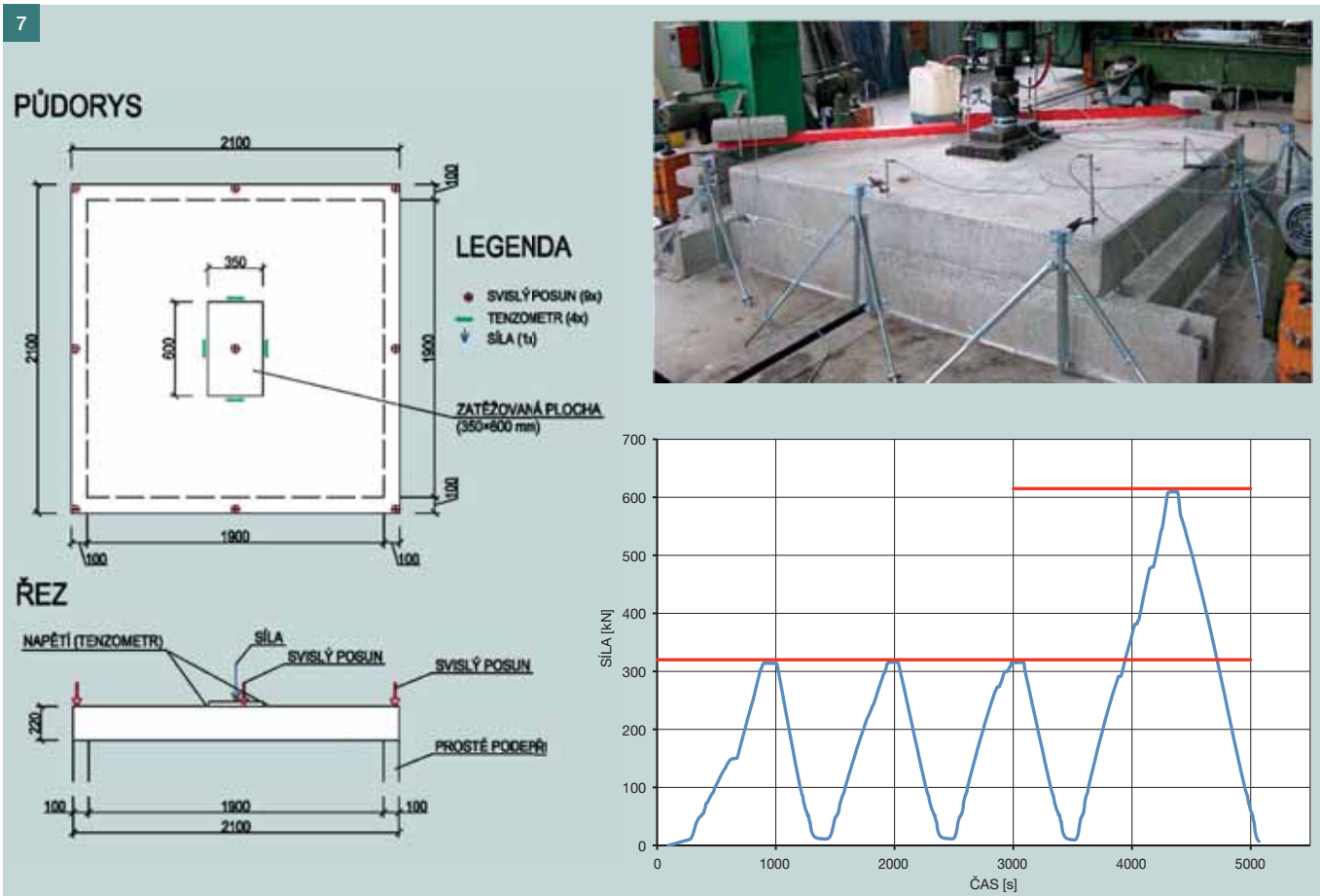
5



6



7



Zatěžovací síla (resp. deformace) byla vnášena v místě největšího účinku, což vzhledem k pravidelnému čtvercovému tvaru desky představovalo její střed. Deska byla po obvodě podepřena, přičemž byla uvážena pouze jednostranná vazba podpor zamezující vnášení tahových sil v místě podepření (tj. bylo umožněno zvedání rohů desky, obr. 3).

Veškeré použité materiálové charakteristiky (tj. beton, ohybová i smyková výztuž) byly stanoveny experimentálně a z důvodu zjištění chování prvku při reálné zatěžovací zkoušce uvažovány ve středních hodnotách.

Výsledkem nelineárního numerického řešení byla zatěžovací křivka prvku (tzv. pracovní diagram), na jejímž základě byly následně definovány intenzity zatížení pro zatěžovací zkoušku (obr. 4).

EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ NÁVRHU – ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA SEGMENTU

Výroba zkušebního vzorku

Na základě provedeného statického návrhu a numerické simulace zatěžovací zkoušky byl v závodě Prefa Brno, a. s., vyroben zjednodušený prototyp zákrytové desky pro zatěžovací zkoušku (z důvodu usnadnění interpre-

Obr. 3 Numerický model v programu ATENA 3D, a) tvar, b) ukázka vyhodnocení – napětí ve výztuži při porušení prvku ▮ Fig. 3 Numerical solution in ATENA 3D software, a) shape, b) example of evaluation – stress in the reinforcement at failure

Obr. 4 Zatěžovací křivka segmentu získaná z nelineární simulace ▮ Fig. 4 The "force-displacement" diagram of tested element obtained from a non-linear solution

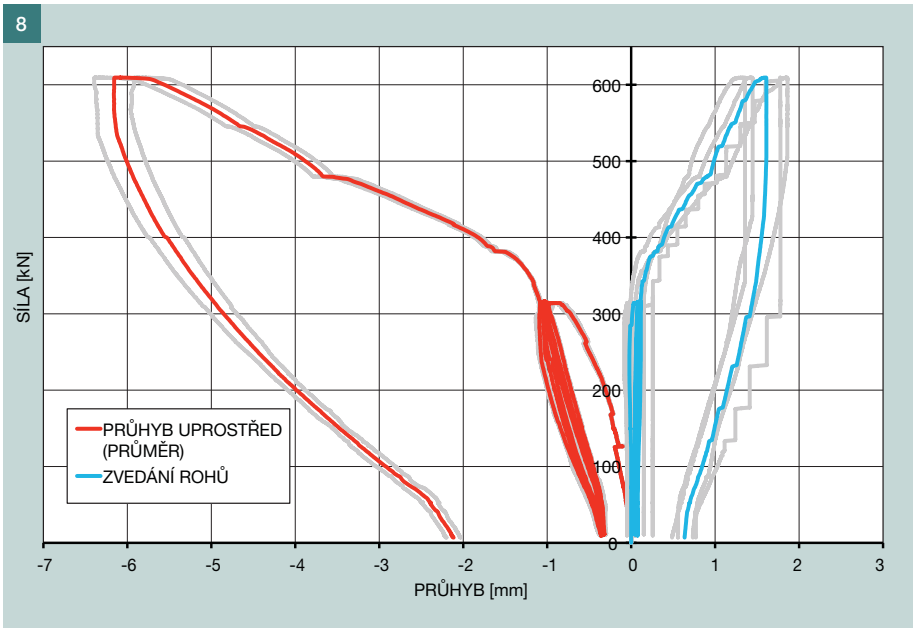
Obr. 5 Průběh vázání FRP výztuže segmentu ▮ Fig. 5 Placing of the FRP reinforcement

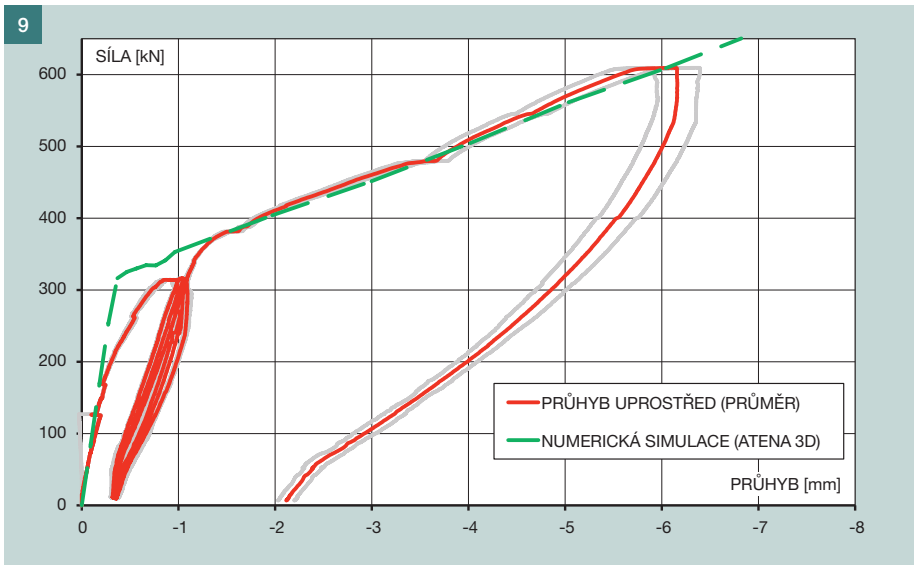
Obr. 6 Finální vyztužení zákrytové desky, pohled do bednění ▮ Fig. 6 Final set-up of the cover slab reinforcement, view into the formwork

Obr. 7 Provedení zatěžovací zkoušky: osazení snímačů; reálné provedení; záznam vnášené síly ▮ Fig. 7 Performance of the load test: set-up of sensors; real implementation; record of the loading force

Obr. 8 Závislost vnášené síly na deformaci uprostřed a v rohu segmentu ▮ Fig. 8 The force – deformation dependence in the middle and in the corner of a segment

8





Obr. 9 Porovnání numerické simulace s výsledky reálné zatěžovací zkoušky ▮ Fig. 9 Comparison of the results obtained from the numerical solution and from the real loading test

Obr. 10 Porovnání numerické simulace zákrytové desky s otvorem a bez něj ▮ Fig. 10 Comparison of the results obtained from the numerical solution of cover plate with and without a hole

tace získaných dat bez obslužných otvorů) (obr. 5 a 6). Navržená kompozitní výztuž byla dle připraveného výkresu výztuže vázána přímo do bednění. Využité kompozitní rošty tvořící smykovou výztuž velmi účinně sloužily též jako distanční výztuž. Krytí bylo zajištěno pomocí vláknobetonových prvků.

Po nutné technologické odstávce byl prvek přepraven k zatěžovací zkoušce, kterou zajišťoval Technický a zkušební ústav stavební (TZÚS Praha, s. p., zkušebna Brno).

Konfigurace zatěžovací zkoušky

Pro dostatečně výstižný záznam chování prvku během zatěžování byla osazena řada snímačů (obr. 7). Deformaci desky, resp. změnu polohy ve snímaných bodech, zaznamenávaly indukčnostní snímače dráhy, které byly osazeny uprostřed a po obvodě desky. Jejich rozmístění umožňovalo popsat průhyb v místě vnášení zatížení v obou hlavních směrech a také zohlednit deformaci v místech podepření (tj. zvedání volných okrajů desky). Pro přesnější popis chování betonu v tlaku, jenž měl být dle provedených výpočtů nejslabším článkem segmentu, byly na desku v oblasti předpokládaného tlakového napětí umístěny odporové tenzometry. V neposlední řadě byla zaznamenávána síla vnášená zatěžovacím lisem.

Zatěžovací zkouška byla rozdělena do dvou částí.

V první části, simulující nízko-cyklické zatížení, proběhlo cyklování zatížení s maximální hodnotou vnášené síly 300 kN a následným odtížením až na nulovou hodnotu zatěžovací síly. Intenzita zatížení byla volena v oblasti lineárního chování prvku. Bylo tak možno při opakovaném zatížení sledovat případný nárůst nevratné složky deformace.

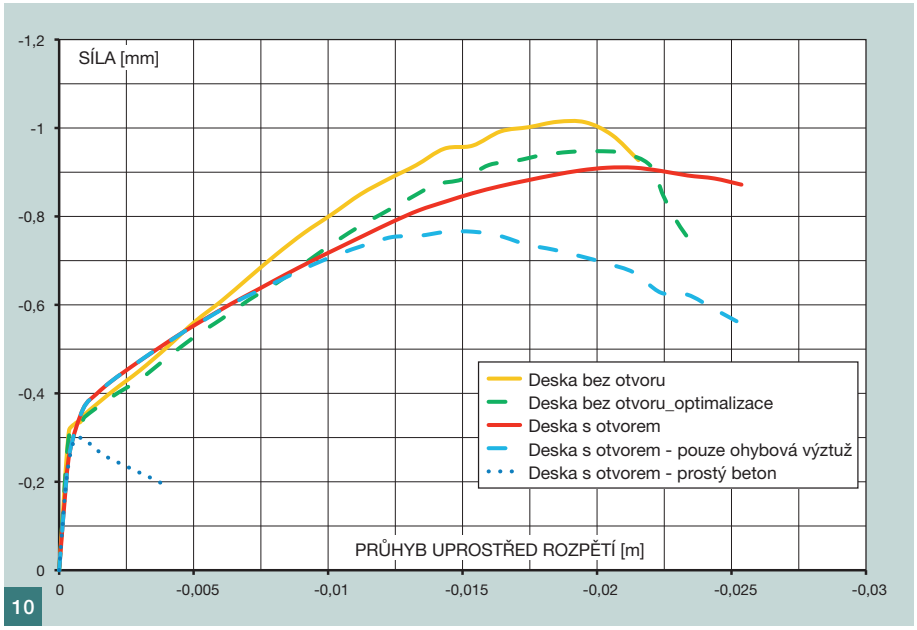
Druhá část zkoušky spočívala v maximálním přitížení vzorku (v ideálním případě až do porušení) a zjištění jeho mezní únosnosti. Maximální možné zatížení bylo determinováno kapacitou zkušebního zařízení, tj. hodnotou 600 kN.

Vyhodnocení zatěžovací zkoušky

Chování prvku v průběhu zatěžovací zkoušky je patrné z grafu na obr. 8. Při maximálním vneseném zatížení (vzhledem k možnostem zkušebny odpovídající hodnotě 600 kN) docházelo k průhybu uprostřed desky okolo 6,1 mm, současně bylo dosaženo maximálního nadzvednutí rohu desky cca 1,6 mm. Ohybové trhliny se na spodním líci prvku objevily při vnášeném zatížení v úrovni cca 350 kN.

Předpoklad porušení drcením betonu při zatěžovací zkoušce nemohl být ověřen, nicméně vzhledem k značné deformační kapacitě FRP výztuže je tento předpoklad opodstatněný. Způsob porušení prvku též určují limitní hodnoty napětí ve výztuži pro konstrukce vystavené cyklickému (únavovému) zatížení, které mají zabránit nekontrolovatelnému dotvarování výztuže. Konzervativně bylo při návrhu přihlédnuto k doporučeným hodnotám definovaným v [4], které redukují hodnotu maximálního napětí ve výztuži vyvozeného cyklickým a stálým zatížením pouze na 20 % hodnoty jejího krátkodobého limitního napětí (platí pro GFRP výztuž). Tato hodnota je americkou normou [4] stanovena velmi konzervativně a v současné době je předmětem intenzivní výzkumné činnosti. Předpokládá se zvýšení této hodnoty, a tím i dosažení úspory v objemu navržené výztuže.

Srovnání experimentálně dosažených výsledků s provedenou numerickou si-



mulací je patrno z obr. 9. Experimentálně určená hodnota průhybu uprostřed desky cca 6,15 mm při maximálním zatížení (cca 610 kN) je téměř shodná s hodnotou průhybu 6,04 mm dosaženou nelineárním řešením úlohy (odchylka 1,8 %). Viditelnější rozdíly v chování prvku lze pozorovat v oblasti nižších hodnot zatížení v rozmezí 300 až 320 kN (oblast před vznikem první ohybové trhliny).

Porovnáním průhybů experimentální zkoušky (až cca 1,18 mm) a numerické simulace (cca 0,47 mm) je patrné, že oproti předpokladům numerického modelu již docházelo k postupné inicializaci prvních ohybových trhlin, a tedy k viditelnému změkčení v záznamu chování prvku. Prezentovaný nesoulad jde především na vrub materiálového modelu betonu, jehož tahové parametry nebyly před zatěžovací zkouškou experimentálně stanoveny a materiálový model tak vycházel z přednastavených hodnot platných pro definovanou střední tlakovou pevnost.

S ohledem na výše uvedené lze konstatovat, že výsledky experimentálních prací potvrdily (v oblasti rozsahu zkoušky) provedené numerické výpočty a z nich vyplývající závěry. Na základě zjištěných údajů byla též provedena optimalizace návrhu, kdy došlo k úspoře cca 15 % navržené výztuže, u níž bylo prokázáno její malé statické využití. Zatěžovací křivka „optimalizované“ zákrytové desky je uvedena v obr. 10.

EXTRAPOLACE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

Z uvedených závěrů je zřejmé, že provedené numerické modely dokázaly predikovat reálné chování navrhovaného segmentu vyztuženého vyvinutou kompozitní výztuží [7]. Z tohoto důvodu byly opět využity pro návrh segmentu s osazenými obslužnými otvory a experimentální ověření těchto segmentů se předpokládá (s ohledem na dostatečnou přesnost nelineárního výpočtu) až v poloprovozní fázi, tedy při zavádění prefabrikátu do výroby.

Numerický model simulující chování segmentu s obslužným otvorem byl v programu ATENA 3D vytvořen úpravou stávajícího modelu, tj. modelu desky bez otvoru. Geometrie segmentu byla upravena přidáním otvoru, jehož rozměry a umístění byly převzaty z výkresové dokumentace poskytnuté firmou Prefa Brno, a. s. Způsob podepření desky zůstal zachován, přičemž místo působení deformačního zatížení bylo upraveno s ohledem na její extrémní působení a tedy maximalizaci účinku. Pouze pro lepší porovnání dosažených výsledků byl následně vytvořen též model se shodným působištěm zatížení s případem segmentu bez otvoru.

Předpokládaný způsob porušení, tedy drcení betonu v tlačené oblasti, zůstal zachován i vzhledem ke značným přetvárným vlastnostem použité FRP výztuže. Oproti původnímu řešení bez otvoru (obr. 10) dochází k porušení prvku při intenzitě zatížení cca 910 kN, což představuje pokles v únosnosti o přibližně 10 %. Získané výsledky z numerického přepočtu budou opět sloužit pro stanovení intenzit zatížení pro následné provedení zatěžovací zkoušky na reálném segmentu.

ZÁVĚR

Z textu příspěvku je zřejmé, že navržené řešení zákrytové desky s využitím kompozitní výztuže je plně funkční a spolehlivé. Představuje velmi zajímavou a především trvanlivou alternativu ke klasické výztuži, která v některých aplikačních oblastech díky enviromentálnímu namáhání velmi rychle degraduje a není možno garantovat dostatečnou trvanlivost výrobků.

Nevýhodou prvků vyztužených kompozitní výztuží stále zůstávají vyšší náklady na realizaci díla. Bude-li ovšem investor nahlížet na konstrukční prvek vyztužený kompozitní výztuží s ohledem na celý životní cyklus konstrukce, kdy již musí být v cenové rozvaze zahrnuty položky údržby a sanačních prací, jeví se využití kompozitních výztuží jako zcela konkurenceschopné.

V rámci výzkumných aktivit v oblasti vývoje hybridní nekovové výztuže je v současné době kladen též důraz na verifikaci a případnou modifikaci velmi konzervativních hodnot redukujících mezní dovolenou dlouhodobou složku napětí, jež lze ve výztužných vložkách připustit z hlediska nežádoucího dotvarování. Předpokládá se úprava mezních hodnot, která dovolí více využít potenciál tohoto moderního stavebního materiálu, a tím dále snížit pořizovací náklady.

Prezentované výsledky byly získány za finanční podpory projektu MPO TIP FR TI 4/159 – Light structures – progresivní konstrukce z moderních kompozitních materiálů; dále projektu FAST-J-12-28 – Ověření účinků zesílení sloupů ovinutím FRP tkaninou. Člen autorského týmu je podpořen v rámci řešení projektu MŠMT CZ.1.07/2.3.00/30.0005

Literatura:

[1] ČSN EN 1992-1-1 (73 1201) Navrhování betonových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, 2006

[2] ČSN EN 206-1 (73 2403): Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, 2001

[3] ČSN EN 1991-2 (73 6203): Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou, 2005

[4] ACI 440.1R-06: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI Committee 440, 2006, ISBN 9780870312106

[5] FRP reinforcement in RC structures: technical report prepared by a working party of TG 9.3, FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures. 1st pub. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2007, 147 s. Bulletin *fib*, ISBN 978-2-88394-080-2

[6] *Procházková Z., Červenka J., Janda Z., Pryl D.:* Atena-GiD Tutorial & Manual, Praha, 2009

[7] Vnitřní výztuž PrefaREBAR, výrobce: Prefa Kompozity, a. s. Dostupné z: ***http://www.prefa-kompozity.cz/produkt/zesilovaci--systemy***

[8] Pochůzné lité rošty PrefaGRID, výrobce: Prefa Kompozity, a.s. Dostupné z: ***http://www.prefa-kompozity.cz/en/node/9***

Ing. František Girgle, Ph.D.
e-mail: girgle.f@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 871

Ing. Vojtěch Kostiha
e-mail: kostiha.v@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 871

Ing. Petr Daněk, Ph.D.
e-mail: danek.p@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 492

prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
e-mail: stepanek.p@fce.vutbr.cz
tel.: 541 147 848

všichni: VUT v Brně
Fakulta stavební
Veveří 95, 662 37 Brno
www.fce.vutbr.cz

Ing. Jan Prokeš, Ph.D.
Prefa Kompozity, a. s.
Kulkova 10/4231, 615 00 Brno
e-mail: prokes@prefa.cz
tel.: 541 583 294
www.prefa-kompozity.cz

Text článku byl posouzen odborným lektorem.