

NUMERICKÉ OVĚŘENÍ ŽELEZOBETONOVÝCH PRVKŮ ZESÍLENÝCH UHPC V TLAČENÉ OBLASTI

*Kryštof Toman, **

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

ABSTRAKT

Tento článek navazuje na sérii experimentálních zkoušek zabývajících se zesilováním železobetonových prvků materiálem UHPC v tlačené oblasti. S využitím počítačové simulace jsou potvrzeny výsledky zkoušek, kdy došlo ke zvýšení únosností zkušebních prvků. Na numerickém modelu jsou zkoumány průběhy napětí v kritickém průřezu na mezi únosnosti a způsoby porušení prvků. Na základě těchto poznatků jsou nastíněna doporučení pro efektivnější využití materiálu UHPC.

KLÍČOVÁ SLOVA

Materiál UHPC • zesilování betonových konstrukcí • nelineární analýza • software ATENA • ohybová zkouška

ABSTRACT

The article relates to a series of the experimental tests which deal with the strengthening of reinforced concrete elements with UHPC material in the compressed zone. The test results, where the load-bearing capacity of the test elements was increased, are confirmed with the use of computer simulation. The numerical model is used to examine stress distribution in the critical cross section at the ultimate state and describes the methods of collapse of the elements. Based on these findings, recommendations for more efficient use of UHPC material are outlined.

KEYWORDS

UHPC material • strengthening concrete structures • non-linear analysis • software ATENA • bending test

1. ÚVOD

Část výzkumu ultra-vysokohodnotných betonů (UHPC) se zaměřuje na praktickou aplikaci těchto materiálů. Doplněním vrstvy UHPC na stávající betonové konstrukce má dvě základní funkce. První funkcí je funkce ochranná. Díky své hutné struktuře UHPC vykazují vysokou odolnost proti působení vnějších vlivů. Na povrchu původní konstrukce tak velice efektivně zamezují degradaci původního materiálu a to zejména pokud jsou aplikovány mimo taženou část průřezu,

kde nehrozí porušení trhlinami. Druhou funkcí je samotné zesílení konstrukce. Doplněním vrstvy UHPC na tlačený povrch ohybaného prvku dochází jak ke zvýšení výšky průřezu, tak i k dosažení větší pevnosti v tlakové oblasti. Tyto dvě funkce již byly v praxi využity při opravách železobetonových mostních konstrukcí v zahraničí [1], [2]. Toto uplatnění se nabízí i na našem území při opravách dopravních staveb a jiných konstrukcí vystavených nepříznivým klimatickým podmínkám s nutností zesílení.

Cílem tohoto výzkumu je výše uvedené poznatky potvrdit a prověřit limity způsobu zesilování konstrukcí pomocí UHPC. Na základě podrobnější analýzy je možné popsat způsob porušení prvku a zefektivnit návrh tohoto typu zesílení. Tímto úkolem se zabývá následující článek.

2. OVĚŘOVANÉ ZKOUŠEBNÍ PRVKY

V rámci projektu TRIO č. FV 20472 proběhly experimentální ohybové zkoušky železobetonových panelů zesílených vrstvou UHPC na horním povrchu. Experimentální zkoušky se zabývaly dvěma úkoly. V prvním úkolu se ověřovala soudržnost původního betonu a nové nabetonované vrstvy. V rámci výzkumu se soudržnost ukázala jako dostatečná při dodržení základních podmínek ošetření původního povrchu betonu, více viz [3]. Následným úkolem bylo ověřit, jakým způsobem se zvýší únosnost při provedení dodatečné vrstvy z UHPC v tlačené oblasti.

Ohybové zkoušky únosnosti byly rozděleny do tří variant. V první variantě byly experimentálně zkoušeny původní panely bez UHPC a tato sada zkoušek byla uvedena jako referenční. V druhé variantě se panely zesílily vrstvou UHPC tloušťky 30 mm. V poslední variantě se použilo zesílení panelů vrstvou UHPC tloušťky 50 mm s vloženou KARI sítí. V každé variantě byla provedena sada měření tří vzorků až do meze porušení.

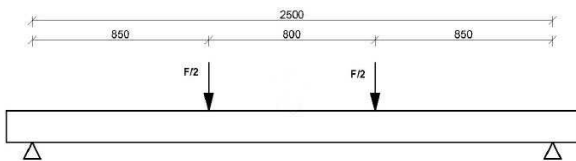
Pro experiment se využily prefabrikované železobetonové panely ze skladových zásob prefa závodu vyrobené v roce 2018 s rozměrem průřezu 490 mm x 118 mm. Destruktivními zkouškami se ověřilo stávající vyztužení panelů. Hlavní podélná vyztuž prvků se sestávala z betonářské vyztuže Ø12 mm v každém rohu průřezu. Vzhledem k nízkému stupni vyztužení byly všechny panely posíleny vlepenou betonář-

* Školitel: doc. Ing. Iva Broukalová, Ph.D.

skou výztuží 4x Ø10 mm v tažené oblasti. Posílením mělo být zajištěno, že dojde k využití nabetonávky z UHPC v tlaku a výztuž nebude slabým místem experimentu.

V rámci experimentu byly odebrány vzorky betonu panelů pro stanovení tlakové pevnosti. Destruktivními zkouškami a statistickým zpracováním byla stanovena válcová pevnost betonu $f_{c,cyl} = 32,3$ MPa. Převodními součiniteli byla dopočítána krychelná pevnost betonu $f_{c,cube} = 38,2$ MPa. Beton panelů tak odpovídá návrhové třídě C30/37.

Pro zatěžování panelů byla využita čtyřbodová zatěžovací zkouška na rozpon 2,5 m. Horní povrch se zatěžoval hydraulickým válcem. Síla z válce byla rozložena do dvou míst vzdálených 0,4 m od poloviny rozpětí.

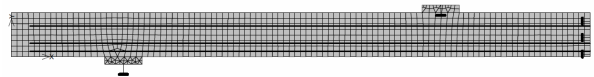


Obr. 01: Schéma čtyřbodové ohybové zkoušky [3]

3. NUMERICKÉ MODELY

3.1. Vstupní parametry

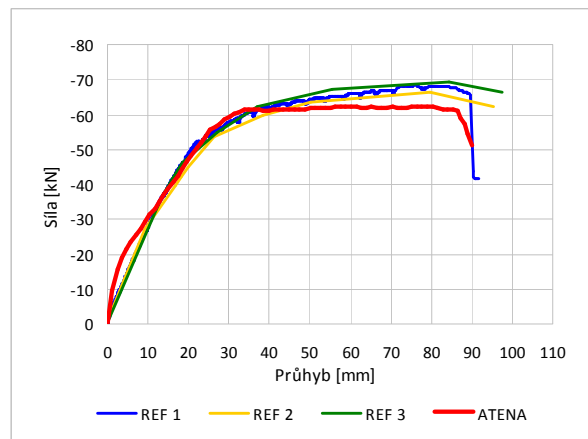
Pro numerickou modelaci zkoušek panelů byl využit software ATENA (Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis) od firmy Červenka Consulting s.r.o. Software umožňuje modelovat skutečný průběh zatěžovací zkoušky železobetonových prvků. Pro definování původního betonu i vrstvy UHPC byl využit materiálový model 3D Nonlinear Cementitious 2 popisující nelineární chování betonu v tlaku i v tahu [4]. Vzhledem k tomu, že UHPC byl namáhán zejména v tlaku, nebylo nutné hledat přesnější parametry pro definování materiálového modelu. V základu byl použit beton s pevností $f_c = 140$ MPa a navazující materiálové parametry byly vygenerovány automaticky. Následně byly poupraveny pouze pevnost v tahu na $f_{ctm} = 20$ MPa a modul pružnosti na $E_{cm} = 40$ GPa. Zvolené hodnoty se více blíží skutečným hodnotám UHPC podobných receptur. Původní beton byl popsán materiálovým modelem s tlakovou pevností $f_c = 32,3$ MPa. Vzhledem k absenci dalších materiálových charakteristik z experimentálních zkoušek byly pevnost v tahu a modul pružnosti dopočítány dle vztahů uvedených v ČSN EN 1992-1-1 [5]. V softwaru byly základní hodnoty upraveny na $f_{ctm} = 3,043$ MPa, respektive $E_{cm} = 30,255$ GPa. Betonářská výztuž byla definována idealizovaným bilineárním pracovním diagramem se zpevněním s mezí kluzu $\sigma_y = 550$ MPa a mezí pevnosti $\sigma_x = 594$ MPa při limitní deformaci $\epsilon_{lim} = 0,05$. Toto nastavení odpovídá betonářské výztuži B500 B. Geometrie výpočetního modelu byla převzata ze skutečných rozměrů experimentální zkoušky. Modelována byla pouze polovina nosníku a řez v polovině rozpětí byl doplněn posuvnou podporou ve svislém směru. Tato úprava je možná u symetrických modelů a vede ke snížení výpočetního času.



Obr. 02: Numerický model referenčního panelu

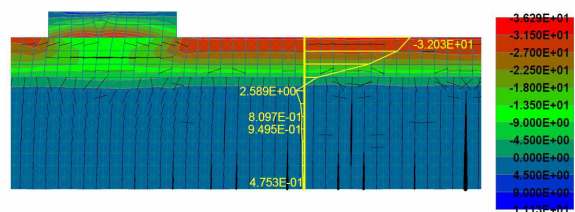
3.2. Referenční panel

Ověření správného fungování numerického modelu bylo provedeno na referenčním panelu. Po provedení výpočtů byly porovnány zatěžovací diagramy. Shoda zatěžovacích křivek se jeví jako dostatečná i přesto, že jsou patrné lokální odlišnosti. A to zejména na počátku zatěžování, kdy numerický model vykazuje vyšší tuhost a v konečné části, kdy skutečné panely vykazují o něco vyšší zbytkové únosnosti. Pro ověření celkové únosnosti panelu a způsobu jeho porušení nejsou tyto dvě oblasti rozhodující. Podstatná část grafu se nalézá při průhybu 30 až 40 mm, kdy betonářská výztuž dosahuje meze kluzu. Tím je vyčerpána hlavní únosnost prvku a dochází pouze k výrazné deformaci při minimálním nárůstu únosnosti.



Obr. 03: Porovnání zatěžovacích křivek referenčního panelu

Podrobnější zkoumání potvrdilo předpoklady obecného chování železobetonového prvku na mezi únosnosti. Zhruba při 30. kroku výpočtu, tzn. při průhybu 35 mm a síle 61,4 kN, se dostává tažená výztuž na mez kluzu ($\sigma_y = 550$ MPa) a v horních tlačných vláknech je dosažena tlaková pevnost betonu ($f_{c,cyl} = 32,3$ MPa).

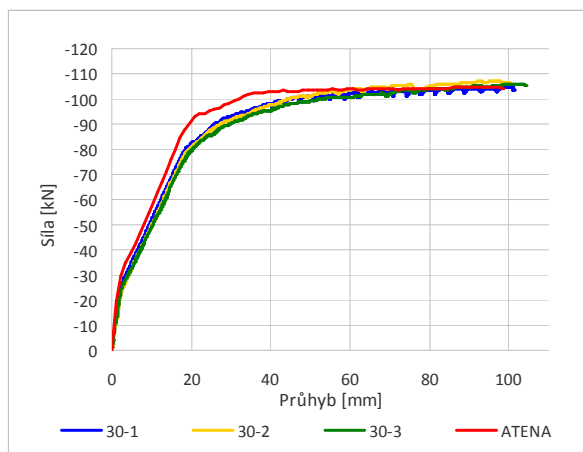


Obr. 04: Průběh napětí v betonu mezi břemeny po výšce průřezu referenčním panelu ($\sigma_{x,max} = 32,0$ MPa)

3.3. Panel s 30 mm UHPC

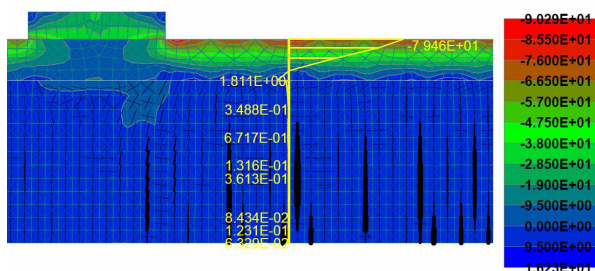
Úpravou výpočetního modelu přidáním dalšího makroprvku charakterizujícího 30 mm vrstvu UHPC byl vytvořen model zkoušky varianty č. 2. Po dopočtu všech

zadaných zatěžovacích kroků byl sestaven zatěžovací diagram a porovnán s experimentálním měřením. Zde je shoda v oblasti dosažení meze kluzu ve výztuži horší než v ostatních variantách. Je k diskusi, co přesně vede k nesouladu. Autor se domnívá, že umístění výztuže v průřezu může být mírně odlišné od skutečnosti vzhledem k tomu, že se pozice výztuže ověřovala pouze na jednom z panelů v jednom řezu. Přesto lze považovat shodu pro účely chování na mezi únosnosti za dostačující.



Obr. 05: Porovnání zatěžovacích křivek panelu s 30 mm UHPC

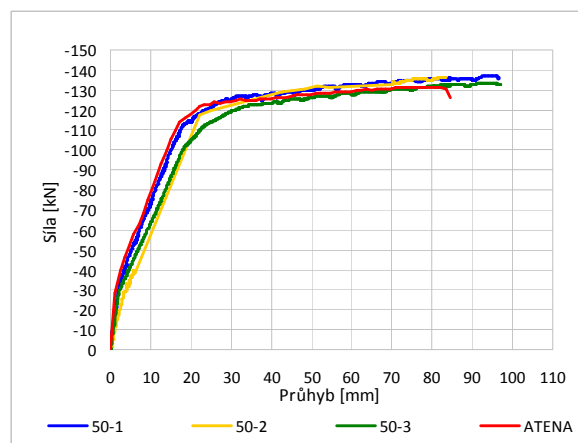
Meze kluzu bylo v betonářské výztuži dosaženo v 36. kroku výpočtu při síle 103,6 kN a průhybu 43 mm. Podrobnější výsledky v tomto výpočetním kroku ukazují průběh napětí po výšce průřezu v oblasti mezi břemeny. Je patrné, že celá tlačenná oblast průřezu se odehrává ve vrstvě UHPC, tzn. v horních 30 mm. Maximální tlakové napětí v této oblasti dosahuje hodnot do 80 MPa. Znamená to, že vrstva UHPC nebyla v tomto případě efektivně využita, jelikož její pevnost je cca 1,75x větší.



Obr. 06: Průběh napětí v betonu mezi břemeny po výšce průřezu panelu s 30 mm UHPC ($\sigma_{x,max} = 79,5 \text{ MPa}$)

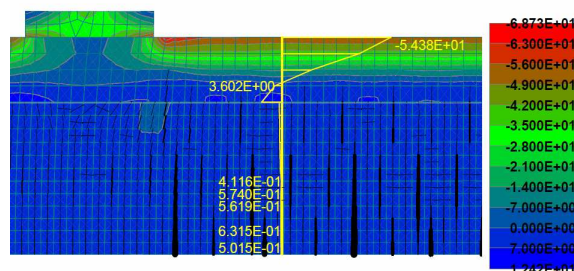
3.4. Panel s 50 mm UHPC

Zvětšením makroprvku UHPC na horním povrchu byl vytvořen poslední numerický model. Makroprvek byl zvětšen na tloušťku 50 mm a do modelu byl doplněn betonářský prut charakterizující KARI síť ve vrstvě UHPC. Porovnáním získaného zatěžovacího diagramu bylo ověřeno shodné chování se skutečnými experimentálními prvky.



Obr. 07: Porovnání zatěžovacích křivek panelu s 50 mm UHPC

Mez únosnosti definovaná mezí kluzu betonářské výztuže byla nalezena v kroku 22 při síle 124 kN a průhybu 26 mm. Podrobnějším zkoumáním bylo stanoveno maximální tlakové namáhání ve vrstvě UHPC na hodnotě $\sigma_x = 55 \text{ MPa}$. Celá tlačenná část průřezu se opět nalézá v horní vrstvě UHPC, jak je patrné z obrázku 08. Pevnost UHPC materiálu je využita méně než v předchozí variantě. Z průběhu napětí je také viditelné, že vrstva UHPC je částečně využita i v tahu.



Obr. 08: Průběh napětí v betonu mezi břemeny po výšce průřezu panelu s 50 mm UHPC ($\sigma_{x,max} = 54,4 \text{ MPa}$)

4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

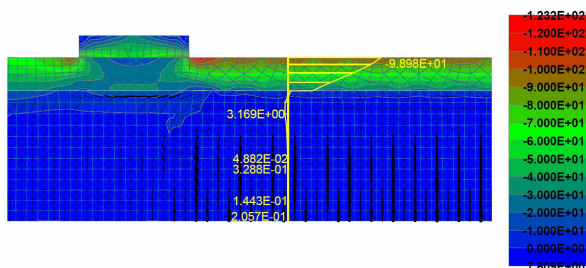
Na základě provedených simulací lze konstatovat, že numerická modelace vykazuje velice dobrou shodu se skutečným průběhem experimentálních zkoušek. Shoda se týká zatěžovacích ohybových zkoušek plošných prvků, kdy je materiál UHPC umístěn do tlačenné oblasti průřezu. Této skutečnosti lze využít při dalších podobných experimentech.

V konkrétním případě zkoumaných železobetonových panelů s nabetonávkou UHPC došlo vždy k dosažení meze kluzu v dolní tažené výztuži. V numerické simulaci bylo prokázáno, že napětí v UHPC vrstvě se v žádném z případů nepohybovalo na mezi pevnosti materiálu. Využití se pohybovalo na 58% pevnosti pro nabetonávku výšky 30 mm, respektive 40% pro nabetonávku výšky 50 mm.

Z předložených výpočtů je patrné, že vyšší celková únosnost panelů s nabetonávkou tloušťky 50 mm oproti nabetonávce tloušťky 30 mm je dána zejména zvýšením výšky průřezu a tím zvýšením ramene vnitřních sil. Využití pevnosti UHPC vrstvy v případě větší tloušťky klesá a tím i

ekonomická efektivita použitého druhu zesílení. Lze doporučit použití spíše menších tlouštěk nabetonávky z tohoto materiálu.

Je tedy k obecnému zvážení, zda zesilovat prvky takto kvalitním materiálem. Z hlediska ohybové únosnosti se to jeví jako neopodstatněné. Lze použít standardní vysokopevnostní beton třídy C80/95 nebo vyšší. U těchto betonů je nutné ověřit soudržnost s původním betonem. Pokud se přesto použije zesílení uvedeným UHPC, je možné docílit vyšších únosností doplněním výztuže do tažené oblasti, která byla v tomto experimentu slabým článkem. To povede k vyššímu využití UHPC v tlaku. I tento přístup má však svá omezení. Vzhledem k velmi vysokým pevnostem je tlačaná část průřezu velmi malé výšky. Pro dosažení mezního přetvoření v krajních vláknech betonu je nutné do průřezu doplnit velké množství výztuže. Orientačně byla v numerické simulaci v případě panelu zesíleného 30mm UHPC změněna dolní doplněná výztuž ze 4 x Ø10 mm na 6 x Ø16 mm (zvýšení plochy výztuže cca 4x). V této variantě nepřekročilo napětí v krajních tlačaných vláknech v betonu 100 MPa na mezi kluzu dolní výztuže. Doporučením autora je volit střední cestu – omezeně posilovat ohybovou výztuž v kritickém průřezu a k tomu použít zesilující vrstvu vysokopevnostního betonu v tlačané části s optimalizovanou pevností vůči stupni vyztužení.



Obr. 09: Průběh napětí v betonu mezi břemeny po výšce průřezu panelu s 30 mm UHPC a zvýšeným stupněm vyztužení ($\sigma_{x,max} = 99,0 \text{ MPa}$)

5. ZÁVĚR

Provedenou numerickou simulací byly potvrzeny výsledky získané z experimentálních zkoušek. Při podrobnějším zkoumání se ukázalo, že v rámci experimentu nebyla vrstva UHPC z hlediska ohybové únosnosti prvku efektivně využita. Pokud tomu nebrání jiné skutečnosti, je vhodné provádět zesilování prvků na ohybovou únosnost vrstvou pouze pomocí vysokopevnostních betonů, jejichž výroba je levnější. Docílí se tak ekonomického zefektivnění procesu zesílení konstrukcí.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory projektu SGS19/149/OHK1/3T/11 - Trvanlivost betonové konstrukce a hodnocení jejího životního cyklu na základě dat získaných v projektu FV20472 - Aplikace vysokohodnotných cementových kompozitů na rekonstrukce betonových staveb a za

odborné pomoci docentky Ing. Ivy Broukalové, Ph. D., které tímto děkuji.

REFERENCE

- [1] GUINGOT, L., DEKHIL, D., SOULIER, P. *Strengthening of hydraulic structures with UHPC*. RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete UHPFRC. Marseille, France, 2013. [ONLINE].www.researchgate.net
- [2] BRÜHWILLER, E., BASTIEN-MASSE, M., MÜHLBERG, H., HOURIET, B., FLEURY, B., CUENNET, S., SCHÄR, P., BOUNDRY, F., MAURER, M. *Strengthening the Chillon viaducts deck slabs with reinforced UHPFRC*. IABSE Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges. Geneva, Switzerland, 2015. [ONLINE].www.infoscience.epfl.ch
- [3] ČÍTEK, Adam: *Experimentální ověření betonových prvků zesílených pomocí UHPC*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019.
- [4] ČERVENKA, V., JENDELE, L. a ČERVENKA, J. *ATENA Program documentation: Theory*. Praha, 2010.
- [5] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2006, ZA 11/2019.