

ZPŘESNĚNÍ NUMERICKÉ SIMULACE PANELU Z BETONU VYZTUŽENÉHO DRÁTKY

*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 numerickou simulaci deskového panelu z betonu vyztuženého ocelovými drátky. Simulace byla provedena autorem v prosinci 2021 v rámci 2. ročníku mezinárodní soutěže „Blind Simulation Competition“, kterou pořádala organizace fib (Fédération Internationale du Béton). Na této simulaci je vyzkoušen experimentální software APIS FRC sloužící k identifikaci vstupních hodnot numerického materiálového modelu 3D Nonlinear Cementitious 2 User při nelineárních simulacích v softwaru ATENA. Cílem je popsat jeden z možných postupů zjištění těchto hodnot, zpřesnit dosažené výsledky numerické simulace a porovnat je s výsledky reálné zatěžovací zkoušky deskového panelu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Drátkobeton • APIS FRC • nelineární analýza • software ATENA • numerická simulace

ABSTRACT

This article is a follow-up to the numerical simulation of a slab strip made by steel fibre reinforced concrete. The simulation was carried out by the author in December 2021 in the context of the 2nd International Blind Simulation Competition, organized by fib (Fédération Internationale du Béton). The experimental software APIS FRC used to identify the input values of the numerical material model 3D Nonlinear Cementitious 2 User in nonlinear simulations in ATENA software is tested in this simulation. The aim is to describe one possible procedure to identify these values, to refine the numerical simulation results obtained and to compare them with the results of a real slab strip load test.

KEYWORDS

Steel fibre reinforced concrete • APIS FRC • Non-linear analysis • Software ATENA • Numerical simulation

1. ÚVOD

Numerické modelování umožňuje predikovat skutečné chování konstrukcí při definovaných zatěžovacích stavech. Aby byla dosažena shoda s realitou, je nutné dostatečně vhodně po-

stihnout geometrii konstrukce, okrajové podmínky, způsob zatěžování, typ výpočtu s uvážením lineárního nebo nelineárního chování, materiálové charakteristiky použitých materiálů, případně další specifické vlastnosti konkrétní zkoumané konstrukce. Do numerického modelu tedy vstupuje celá řada proměnných, kdy na jedné straně je jejich získání jednoduché (např. geometrie konstrukčního prvku) a na druhé straně se objevují vstupy, jejichž získání předchází celá řada zkoušek, podrobných zkoumání a inženýrských úvah. Všechny vstupní údaje dohromady rozhodují o úspěchu predikce skutečného chování konstrukce.

Pokud zkoumáme konstrukci v oblastech meze porušení, zpravidla vždy je nutné použít nelineární výpočet, který postihuje plastické přetváření materiálů, případně porušení materiálů trhlinami. K tomu jsou určeny sofistikované výpočetní softwary nabízející různé numerické materiálové modely. Jejich složitost se odvíjí od vlastností zkoumaného materiálu.

V případě konstrukcí z betonu vyztuženého ocelovými vlákny se objevuje specifický problém popsání materiálových zejména tahových charakteristik zkoumaného vláknobetonu. U klasického železobetonového prvku, kde jsou tahová namáhání přenášena betonářskou výztuží, nejsou tahové parametry betonu rozhodující. Naproti tomu u vláknobetonu (zejména pokud se jedná o materiál se zpevněním např. dle TP ČBS 07: Ultra vysokohodnotný beton (UHPC) [1]) je příspěvek od samotného betonu s vlákny k tahové pevnosti významný a konkrétně u ohýbaných prvků z UHPFRC lze v některých případech betonářskou výztuž i vypustit. Proto je nutné podrobně charakterizovat tahové vlastnosti tohoto materiálu.

Na numerické modelování železobetonových konstrukcí je zaměřen software ATENA (Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis) [2] od firmy Červenka Consulting s.r.o. V rámci numerického materiálového modelu 3D Nonlinear Cementitious 2 User s variabilními materiálovými parametry je možné simulovat chování vláknobetonových konstrukcí. Toho autor využil při predikci chování deskového panelu při zatěžovací zkoušce, která byla následně zrealizována v rámci 2. ročníku mezinárodní soutěže „Blind Simulation Competition“ pořádané pracovní skupinou „fib Working Group WP 2.4.1 Modelling of Fibre Reinforced Concrete Structures“. Tento článek navazuje na uvedenou predikci s cílem zpřesnit chování numerického modelu využitím experimentálního modulu APIS FRC v softwarovém balíku ATENA.

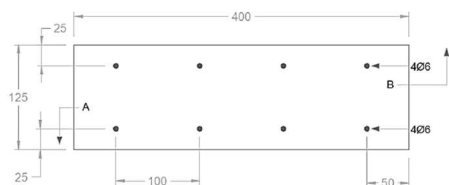
* Školitel: doc. Ing. Iva Broukalová, Ph.D.

2. MODUL APIS FRC

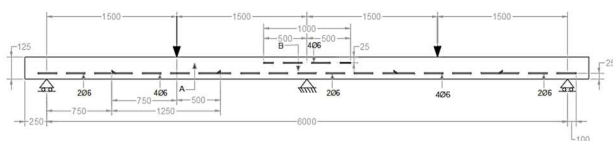
Modul APIS FRC (Atena Parameter Identification Software) je experimentální software [3] sloužící k identifikaci vstupních hodnot numerického materiálového modelu při nelineárních simulacích v programu ATENA. Modul porovnává výstupní hodnoty z numerické simulace s hodnotami z experimentální zkoušky. V každém dalším iteračním kroku optimalizuje hodnoty numerického modelu tak, aby byla dosažena požadovaná shoda skutečného experimentu a numerického modelu. Podle volby počtu iterací a cílové odchylky je nalezena konkrétní sada materiálových hodnot. V případě simulace chování vláknobetonů lze tímto modulem nalézt tahovou část pracovního diagramu numerického materiálového modelu 3D Nonlinear Cementitious 2 User.

3. OVĚŘOVANÝ EXPERIMENT

Pro otestování schopností modulu APIS FRC byl využit experiment provedený v rámci mezinárodní soutěže, jejíž cílem bylo ověřit možnosti modelování vláknobetonových konstrukcí. Zadáním soutěže bylo predikovat chování deskového panelu zatěžovaného jako spojitý dvupolový nosník při zatížení dvěma břemeny v polovině rozpětí každého pole. Panel byl proveden z betonu třídy C50/60-XD3(P)CL0.20-D_{max}12.5. Do betonové směsi byla přidána ocelová vlákna HE ++ 90/60 s tahovou pevností 1900 MPa. Panel byl doplněn klasickou betonářskou výztuží u spodního povrchu po celé délce a u horního povrchu v oblasti nad střední podporou.



Obrázek 01: Příčný řez panelem [4]



Obrázek 02: Geometrie ohybové zatěžovací zkoušky [4]

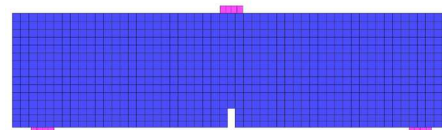
Z betonové směsi byly v úvodu soutěže odlity zkušební vzorky. Na vzorcích byla určena tlaková válcová pevnost betonu, která činila 57,8 MPa, a sečnový modul pružnosti dle EN 12390-13:2014 o hodnotě 31,9 GPa. Pro popsání tahových charakteristik vláknobetonu byla provedena zkouška dle EN 14651+A1 [5] v třibodovém ohybu na trámcích se zářezem celkem na 6 vzorcích. Při této zkoušce se měří velikost působící síly v závislosti na rozevření trhliny/zářezu na spodním povrchu zkoušeného trámece (CMOD – Crack Mouth Opening Displacement). Výsledkem bylo 6 diagramů závislosti dosažené síly a rozevření trhliny CMOD.

4. ZPŘESNĚNÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÉ SIMULACE

4.1. Numerický model třibodové ohybové zkoušky na trámcích se zářezem

Vstupy do modulu APIS FRC jsou numerický model zkušební vzorku a porovnávané experimentálně zjištěné hodnoty. V tomto případě se konkrétně jedná o numerický model třibodové ohybové zkoušky na trámcích se zářezem dle EN 14651+A1 a zjištěné hodnoty síly v závislosti na CMOD. V prvním kroku bylo tedy nutné sestavit numerický model této třibodové normové zkoušky a do modelu zavést monitory pro odečítání porovnávaných hodnot. Geometrie numerického modelu byla převzata z normy EN 14651+A1 a velikost konečných prvků byla nastavena na 10 mm. Jako materiálový model byl použit 3D Nonlinear Cementitious 2 User, kde byly nastaveny následující hodnoty: modul pružnosti $E = 31,9$ GPa, Poissonovo číslo $\mu = 0,2$, pevnost v tahu $f_t = 5,2$ MPa, pevnost v tlaku $f_c = 57,8$ MPa. Tahová pevnost byla odvozena z diagramů CMOD, kde odpovídá maximálnímu dosaženému tahovému napětí v betonu před vznikem prvních trhlin. Tahové parametry byly ponechány ve výchozím nastavení, pouze byl upraven parametr charakteristické délky na velikost odpovídající velikosti konečného prvku v souladu s doporučením [6]. Průběh tahového diagramu byl následně nalezen samotným modulem. V záložce tlakových parametrů byl opět upraven parametr charakteristické délky na velikost konečného prvku a první bod diagramu tlakové funkce byl zvýšen 100x v souladu s doporučením [6]. Zvýšení zahrnuje vliv vyšší duktility vláknobetonových prvků vůči obyčejnému betonu. Redukce tahové pevnosti tlakem byla v numerickém modelu potlačena opět v souladu s doporučením [6].

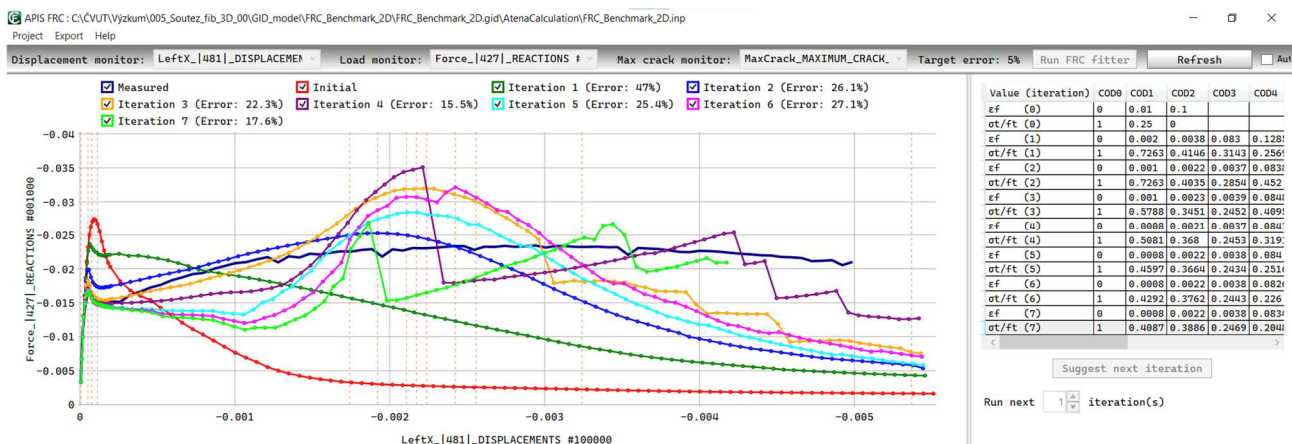
Do numerického modelu byly přidány monitory pro získávání porovnávaných hodnot. Konkrétně se jedná o zatěžovací sílu a vodorovný posun v místě zářezu na té polovině nosníku, kde se nachází volné uložení ve vodorovném směru.



Obrázek 03: Numerický model zkoušky dle EN 14651+A1 včetně sítě konečných prvků

4.2. Tahový diagram získaný modulem APIS FRC

Do modulu APIS FRC byl zadán výše popsaný numerický model a závislost zatěžovací síly a CMOD na zkušebním vzorku z reálného experimentu. Z šesti dostupných diagramů byl vybrán ten trámeček, který odpovídal průměrným hodnotám ze všech měření. V modulu APIS FRC bylo provedeno celkem 7 iteračních kroků. Poslední 7. krok vykázal v konečné fázi poměrně značnou nestabilitu a značné nároky na výpočetní čas. Proto nebyly provedeny další iterace. Výsledná celková odchylka skutečného zatěžovacího diagramu a numericky nalezeného zatěžovacího diagramu činí 17,6 % dle modulu APIS FRC. V počáteční fázi diagramu v oblasti kolem dosažení tahové pevnosti betonu se shoda jeví jako dostatečná dle obrázku 4.



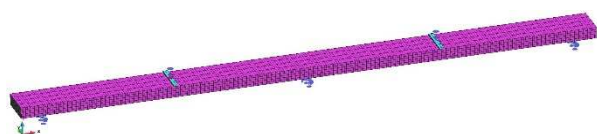
Obrázek 04: Průběh jednotlivých diagramů závislosti síly a CMOD v rámci iterací kroků v modulu APIS FRC

Tabulka 1: Tahový diagram získaný modulem APIS FRC

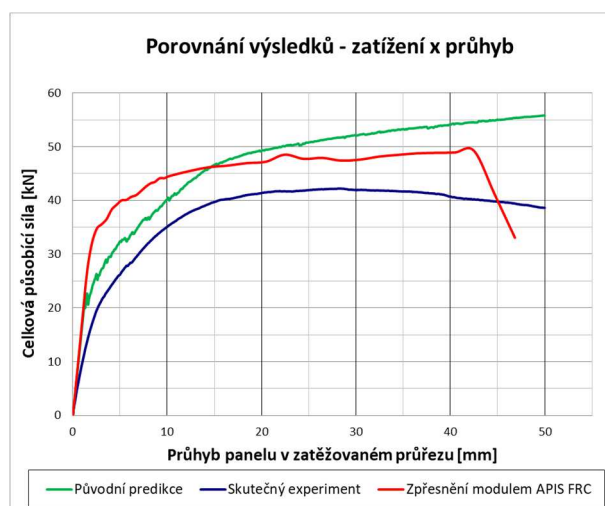
ϵ_f	0	0.0008	0.0022	0.0038	0.0834	0.0893	0.1026
σ_t/f_t	1	0.4087	0.3886	0.2469	0.2048	0.1611	0.1338
ϵ_f	0.1063	0.1101	0.1203	0.1283	0.1707	0.3132	
σ_t/f_t	0.1346	0.2765	0.2921	0.3241	1.279	0	

4.3. Numerická simulace deskového panelu

Získané materiálové charakteristiky byly následně vloženy do aktualizovaného numerického modelu deskového panelu. Původní model použitý v rámci soutěže byl přepracován do 3D prostředí, kdy si autor vyzkoušel v práci v modeláři GiD (původní prostředí ATENA 2D bylo voleno vzhledem ke zjednodušení výpočetního modelu). Geometrie a materiálové modely betonářských prutů a roznášecích ložisek byly zachovány původní. Velikost konečných prvků byla upravena na 25 mm (5 prvků na výšku panelu) z původních 12,5 mm. Velikost zatěžovacího kroku (jednalo se o zatěžovací zkoušku řízenou posunem) byla zvýšena z původních 0,1 mm na 0,5 mm v první části do průhybu 10 mm a na 2,0 mm ve zbývající části zatěžovací zkoušky. Tyto úpravy byly provedeny z důvodu úspory výpočetního času. Výsledkem numerické simulace byla predikce průběhu hodnot celkové zatěžovací síly (součet dvojice sil působící shora na panel) v závislosti na dosaženém průhybu uprostřed polí. V dále uvedeném porovnání je ponechána původní predikce odeslaná do soutěže. Tato predikce byla nalezena na materiálovém modelu Sbeta v prostředí ATENA 2D za pomoci inverzní analýzy prováděné autorem „ručně“.



Obrázek 05: Numerický model deskového panelu v modeláři GiD



Obrázek 06: Porovnání zatěžovacích diagramů

5. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Na základě předloženého porovnání numerické simulace a skutečného experimentu nelze učinit závěr, že by nalezený tahový diagram modulem APIS FRC výrazně zpřesnil výsledky numerického modelu deskového panelu. Numerický model se získaným tahovým diagramem modulem APIS FRC vykazuje v prvotní fázi zatěžovací zkoušky do průhybu 15 mm vyšší únosnosti než původní predikce a v této části je tedy shoda horší. Od průhybu 15 mm dále se chování modelu s tahovým diagramem z modulu APIS FRC více přibližuje chování skutečnému experimentu, přesto jsou celkové únosnosti obou numerických modelů nezanedbatelně vyšší oproti reálné zkoušce.

Do celého problému vstupuje řada proměnných, které mohou způsobovat tento nesoulad, a je obtížné přesně identifikovat konkrétní chybu. V oblasti experimentální zkoušky bude mít jistě vliv časový odstup provedení zkušebních vzorků pro zadání soutěže a samotného deskového panelu (zkušební vzorky musely být vybetonovány minimálně 2 měsíce před betonáží deskového panelu tak, aby byla data dostupná v zadání

soutěže) a tedy i jiné várky betonové směsi a nestejných podmínek ošetřování. Poloha výztuže v průřezu deskového panelu byla do výpočtu zavedena ze zadání a po destruktivní zkoušce panelu nebyla ověřována. Není tedy jisté, zda byla předepsaná poloha výztuže dodržena. V případě numerického modelu bude mít částečný vliv rozměrový efekt zkoušených trámů a desek a jejich dělení na síť konečných prvků. Parametry numerického modelu jsou hledány na zkušebních vzorcích o rozměrech 0,15 m x 0,15 m x 0,70 m. Zkoušený panel má rozměry 0,40 m x 0,125 m x 6,50 m. V numerických modelech je nutné optimalizovat velikost konečného prvku s ohledem na výpočetní čas a z tohoto důvodu není zvolena jednotná velikost sítě pro zkušební vzorky a deskový panel. V závěru do celého problému vstupuje hledaný materiálový model. Ten obsahuje celou řadu vstupů, jejichž modifikace má zásadní dopad na výsledky numerické simulace. I přes snahu autora zadat všechny parametry v souladu s doporučením autorů výpočetního softwaru, není jisté, zda je odezva numerického modelu dostatečně vypovídající.

Lze konstatovat, že zpřesnění výsledků numerické simulace pomocí nalezeného tahového diagramu modulem APIS FRC bylo v tomto případě neúspěšné. Dalším cílem autora bude snaha aktualizovat výpočetní model tak, aby byla nalezena dostatečná shoda. Dále bude modul APIS FRC vyzkoušen na jiných experimentálních zkouškách s cílem ověřit jeho vhodnost pro použití v numerickém modelování. Z pohledu uživatele totiž tento modul usnadňuje práci při hledání vstupních numerických materiálových parametrů při porovnání s „ruční“ inverzní analýzou, kdy jsou jednotlivé parametry upravovány manuálně, model přepočítán a následně posuzována shoda s tím, že se postup iteračně opakuje do dosažení požadované shody.

6. ZÁVĚR

Numerická simulace pomáhá predikovat chování skutečných konstrukcí. V oblasti materiálů se složitými mechanicko-fyzikálními vlastnostmi, jakým vláknobeton bezesporu je, je dosažení shody simulace a skutečného experimentu obtížné. V článku je popsáno využití modulu APIS FRC při hledání tahových parametrů numerického materiálového modelu s cílem zpřesnit numerickou simulaci panelu z betonu vyztuženého ocelovými vlákny. Jak je ve výsledcích uvedeno, tento postup nepřinesl v tomto případě zásadní zpřesnění původní numerické simulace. Přesto lze vyzdvihnout tento postup jako jednodušší než dohledávání jednotlivých parametrů ručně.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek vznikl za podpory projektu SGS22/090/OHK1/2T/11 Predikce a ověřování chování konstrukčních prvků z materiálů na silikátové bázi a za odborné pomoci docentky Ing. Ivy Broukalové, Ph. D., které tímto děkuji.

REFERENCE

- [1] COUFAL, R., KALNÝ, M., KOLÍSKO, J. a VÍTEK, J. *Technická pravidla ČBS 07: Ultravysokohodnotný beton (UHPC)*. Praha: Česká betonářská společnost ČSSI. 2022. ISBN 978-80-907611-7-9
- [2] ČERVENKA, V., JENDELE, L. a ČERVENKA, J. *ATENA Program documentation: Theory*. Praha, 2010.
- [3] Project APIS [vid. 02.03.2023]. Dostupné z: <https://apis.cervenka.cz/>
- [4] Barros, J., Sanz, B. (2022), *Experimental results of 2nd Blind Simulation Competition*.
- [5] EN 14651:200 + A1 2007 (09/2007), *Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)*.
- [6] SAJDLOVÁ, T. *ATENA Program documentation part 4-7: ATENA Science – GiD FRC Tutorial*. Praha, 2016.