

ANALÝZA SCHODIŠŤOVÉHO STUPNĚ Z ULTRAVYSOKOHODNOTNÉHO BETONU

ANALYSIS OF THE ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE STAIR TREAD

Dominik Lisztwan^{*1}, Petr Daněk¹

^{*}Dominik.Lisztwan@vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veverí 331/95, 602 00 Brno-střed

Abstrakt

Článek popisuje experimentální a numerickou analýzu modelu štíhlého železobetonového schodišťového stupně v měřítku 1:1 vyrobeného z ultra vysokohodnotného betonu pro ověření reálného chování stupně a jeho odezvy na působící zatížení. Experimentální část v podobě statické zatěžovací zkoušky provedené metodou vakuování je doplněna numerickou nelineární analýzou pomocí metody konečných prvků s využitím softwaru ATENA Science. Výsledky jednotlivých částí analýzy jsou navzájem porovnány a je diskutováno netypické chování zkoušeného dílce.

Klíčová slova

Zatěžovací zkouška, vakuování, nelineární numerická analýza, metoda konečných prvků, ultra vysokohodnotný beton

Abstract

In this contribution, experimental and numeric analysis of slender stair tread model made of an ultra-high performance concrete, is described. Task of the analysis is to determine the behaviour of the model under acting load. The experimental part is represented by the static load test with the use of a vacuum method. Besides that, nonlinear numerical analysis in the environment of the ATENA Science software, is described. Gained results from both parts of the analysis are compared and unusual behaviour of the model is discussed.

Key words

Load test, vacuum method, nonlinear analysis, finite element method, ultra-high performance concrete

1 ÚVOD

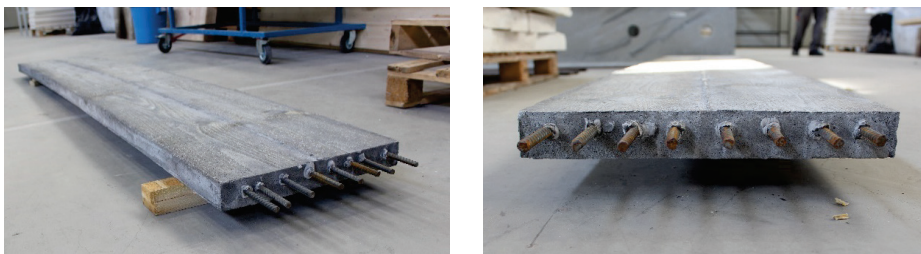
Použití vysokohodnotných (HPC), či ultra-vysokohodnotných (UHPC) betonů je v současnosti čím dál tím běžnější. Tyto betony oproti konvenčním betonům vykazují mnohem lepší mechanické vlastnosti. Dosahují především vysokých hodnot pevnosti v tlaku, tahu i modulu pružnosti. Z výhod vysokohodnotných betonů lze čerpat například při použití v konstrukcích, které jsou extrémně namáhány, či vystaveny nepříznivým vlivům. Dalším velmi častým případem použití těchto speciálních betonů je při návrhu štíhlých konstrukcí. Právě výhody vysokohodnotných betonů se často využívají pro konstrukce architektonicky zajímavé [1]. Tento trend se týká i dílce, který byl analyzován v rámci následujícího textu. Jednalo se o model tenkého schodišťového stupně z UHPC v měřítku 1:1, který byl podroben statické zatěžovací zkoušce, pomocí které se stanovovala odezva na působící zatížení. Mimo statickou zatěžovací zkoušku byl dílec modelován v prostředí programu GiD a následně byla simulována provedená statická zatěžovací zkouška s využitím metody konečných prvků v softwaru ATENA Science.

I když se v současnosti v drtivé většině k návrhu a posuzování stavebních konstrukcí používá moderní výpočetní technika, tak je mnohdy neefektivnějším způsobem, jak určit chování konstrukce při působícím zatížení podrobit zkoušenou konstrukci, či její model zatěžovací zkoušce. Právě zatěžovací zkouška nám dá reálný obraz toho, jak se konstrukce během zatěžování chová. Základní ustanovení, požadavky a hodnotící kritéria jsou stanoveny v příslušných normách a doporučeních. V ČR to je především norma ČSN 73 2030 Statické zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí [2].

2 METODIKA

Popis zkoušeného dílce

Analyzován byl model schodišťového stupně viz Obr. 1, o půdorysných rozměrech 2600×400 mm a výšce 50 mm. Dílec byl vyroben z UHPC, jehož receptura byla navržena pracovníky Ústavu technologie hmot a dílců. Bližší specifikace použitého betonu není pro tuto práci relevantní. Schodišťový stupeň byl vyztužen osmi pruty betonářské výztuže značky B500 o průměru 12 mm s krytím od spodního líce 10 mm. Z konstrukčních důvodů jednotlivé pruty betonářské výztuže přesahovaly z betonového dílce.



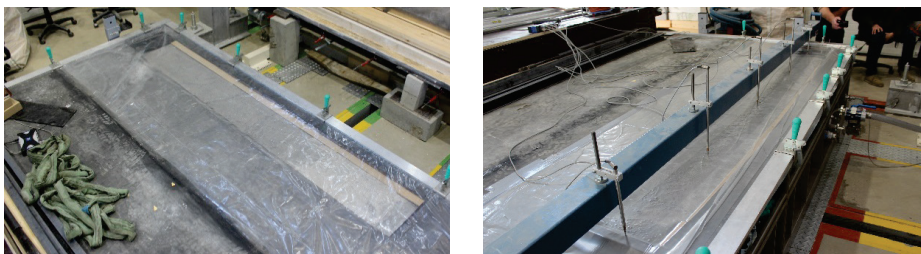
Obr. 1 Zkoušený model schodišťového stupně z UHPC.

Statická zatěžovací zkouška

Experimentální část zahrnovala provedení statické zatěžovací zkoušky v ohybu pro stanovení odezvy zkoušeného dílce na působící zatížení. Bylo zvoleno statické působení schodišťového stupně jako prostý nosník s rozpětím 2500 mm. Zatěžování dílce probíhalo plošně – zatěžovalo se metodou tzv. vakuování. Princip této metody spočívá v umístění zkoušeného prvku do speciální vzduchotěsné komory z nerezavějící oceli, ze které se následně, pomocí systému vývěvy a dmyhadla, odsává vzduch z prostoru pod zkoušeným prvkem. V důsledku rozdílu tlaku uvnitř komory a tlaku okolního prostředí (atmosférického tlaku) působí na zkoušený dílec ideální plošné zatížení.

Zatěžovací zkouška probíhala ve výzkumném centru AdMaS, které disponuje systémem pro plošné zatěžování vakuováním. Do vakuovací komory o rozměru $6180 \times 4180 \times 440$ mm byl horizontálně umístěn zkoušený dílec. Okrajové podmínky (liniové kloubové podpory) představovaly ocelové stoličky opatřeny na horním líci gumovou podložkou. Nevyužitý prostor vakuovací komory byl vyplněn extrudovaným polystyrenem. Horní část dílce byla překryta PE fólií a všechny spoje mezi okraji formy a fólií se následně utěsnily. Během zkoušky se vzduch z komory odsával suchou šroubovou vývěvou Edwards GSX250.

Během zkoušky se snímalo působící zatížení pomocí diferenčního snímače tlaku na výstupní přírubě vakuovací komory, deformace dílce byly měřeny pomocí indukčnostních snímačů dráhy HBM WA50 v ose uložení a HBM WA100 v podélné ose schodišťového stupně. Celkem bylo zvoleno pět míst pro měření deformací: pokles v podpoře 1, průhyb v $1/4$ rozpětí, průhyb v $1/2$ rozpětí, průhyb ve $3/4$ rozpětí a pokles v podpoře 2. Způsob uložení dílce a rozmístění snímačů viz Obr. 2. Všechny měřené veličiny se zaznamenávaly pomocí měřící ústředny se vzorkovací frekvencí zápisu 5 Hz.



Obr. 2 Dílec uložený ve zkušební komoře a dílec osazen snímači deformace.

Na základě předběžných statických výpočtů a požadavků platných norem pro navrhování konstrukcí, především ČSN EN 1991 [3], byla navržena zatěžovací rozvaha v této podobě:

- zatížení na hodnotu 3 kN/m²,
- odtížení,
- zatížení na hodnotu 6 kN/m²,
- odtížení,
- zatížení na hodnotu 9 kN/m²,
- odtížení,
- zatížení na hodnotu 21,5 kN/m²,
- odtížení.

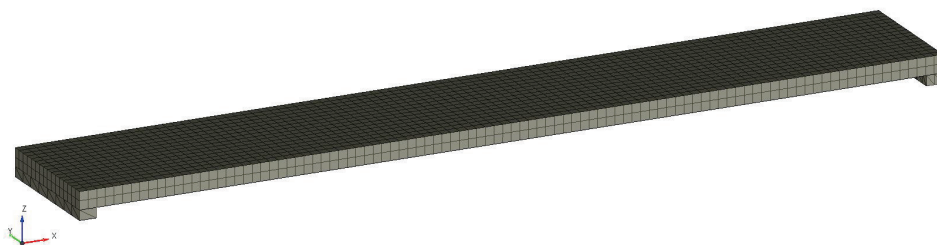
Na každé úrovni zatížení (respektive odtížení) byla časová výdrž přibližně 90 vteřin pro zajištění ustálení deformací. Nárůst zatížení probíhalo plynule, rychlostí přibližně 0,1 kN/m² za vteřinu.

Z naměřených dat se následně vyjádřil časový průběh zkoušky, konkrétně závislost působícího zatížení na čase a závislost průhybu ve třetinách a v polovině rozpětí na čase. Dále byl vyhodnocen vztah mezi působícím plošným zatížením a průhybem prvku. Konečný průhyb byl opraven o hodnoty svislého posunu (poklesu) v podporách.

Numerická analýza

V druhé fázi analýzy byla provedena simulace statické zatěžovací zkoušky pomocí nelineární analýzy metodou konečných prvků (nonlinear finite element analysis – NLFEA) pomocí software ATENA Science viz Obr. 3. Trojrozměrný model odpovídal provedenému experimentu geometrií, okrajovými podmínkami i materiálovými modely. Zatěžovací kroky také odpovídaly průběhu experimentu, avšak byly provedeny pouze první tři zatěžovací kroky:

- zatížení na hodnotu 3 kN/m²,
- odtížení,
- zatížení na hodnotu 6 kN/m²,
- odtížení,
- zatížení na hodnotu 9 kN/m²,
- odtížení.



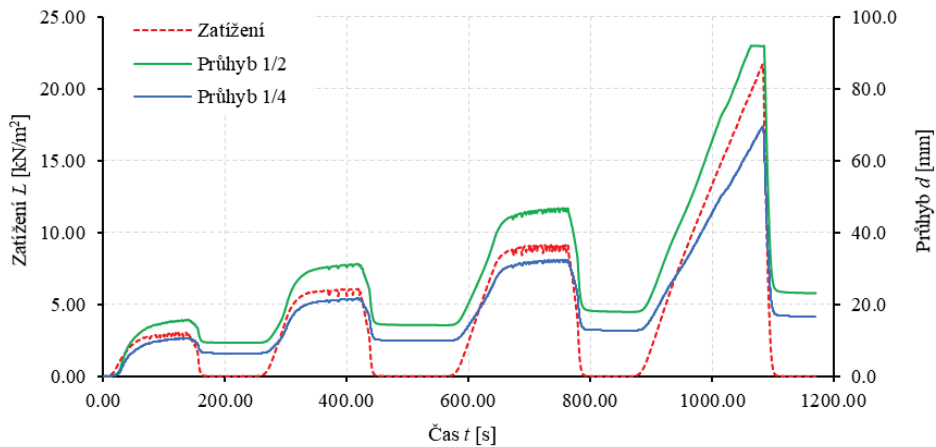
Obr. 3 Model pro numerickou analýzu.

Simulace zatěžování probíhala přírůstkem plošného zatížení obdobně jako v experimentu. Jednotlivé zatěžovací kroky byly dále rozděleny do výpočetních kroků, kdy každý jednotlivý krok byl reprezentován přírůstkem plošného zatížení o hodnotě 0,1 kN/m². Zájmové veličiny byly snímány pomocí příslušných monitorů, jejichž hodnoty byly následně exportovány a zpracovány do grafické podoby.

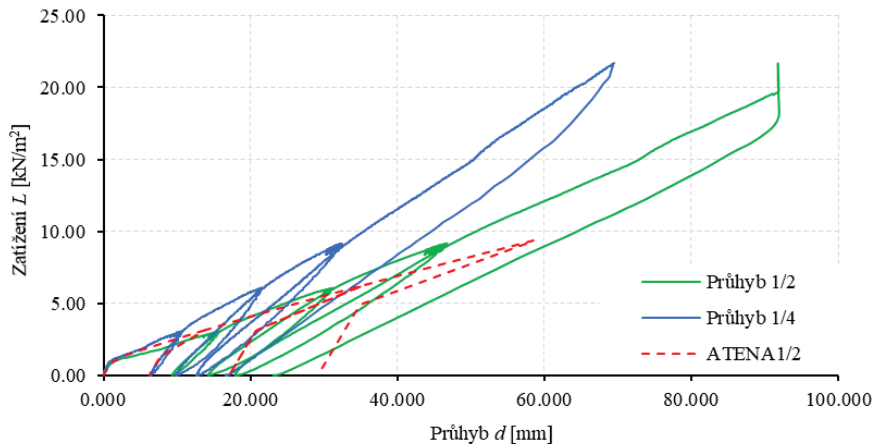
Nelineární analýza dříve sloužila především pro porovnání výsledků s experimentem a získání bližších informací, které nebyly v rámci experimentu měřeny, zejména poměrná přetvoření, napjatost v betonu a betonářské výztuži. Hlavním výstup z provedené nelineární analýzy představuje graf závislosti průhybu na působícím zatížení.

3 VÝSLEDKY

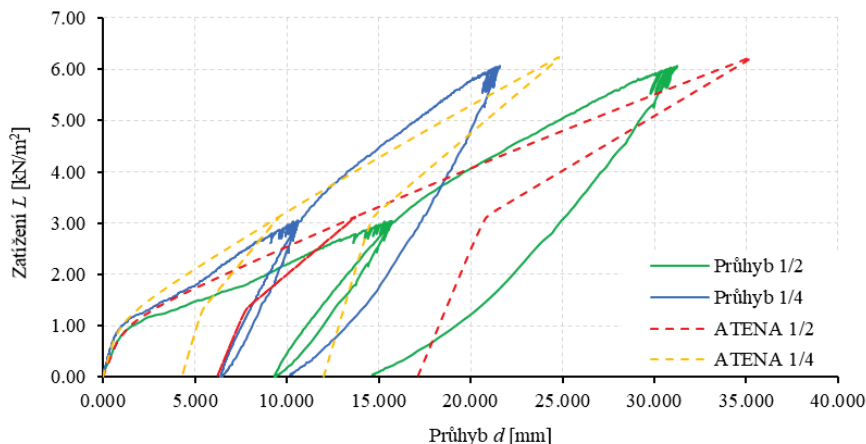
V této kapitole jsou přehledně graficky vyjádřeny výsledky experimentu i numerické analýzy. Celkový časový průběh zkoušky se zobrazenou intenzitou působícího plošného zatížení a průhybu ve čtvrtině a polovině rozpětí zobrazuje Obr. 4. Závislost průhybu dílce na velikosti působícího zatížení reprezentuje Obr. 5. Obdobným způsobem je v Obr. 6 vyjádřen průběh zatěžovací zkoušky zahrnující pouze první až čtvrtý zatěžovací krok (úrovně zatížení 3 kN/m² a 6 kN/m²). Pro přehlednost je záměrně vynechán měřený průhyb ve 3/4 rozpětí dílce. Hodnoty průhybu v 1/4 a ve 3/4 byly srovnatelné.



Obr. 4 Časový průběh zkoušky.



Obr. 5 Deformační diagramy UHPC schodišťového stupně.



Obr. 6 Detail odezvy dílce při prvním až čtvrtém zatěžovacím kroku.

Výsledky pro jednotlivé zatěžovací kroky jsou vyjádřeny číselnou hodnotou působícího zatížení a odpovídajícího průhybu při experimentu i numerické analýze. Mimo to jsou v Tab. 1 uvedeny hodnoty λ_1 , které vyjadřují poměr mezi trvalým a maximálním průhybem v polovině rozpětí pro každou úroveň zatížení.

Tab. 1 Výsledky experimentu a numerické analýzy.

Zatěžovací krok	Zatížení [kN/m ²]	Průhyb 1/2		λ_1	
		Experiment [mm]	ATENA [mm]	Experiment [-]	ATENA [-]
0	0,0	0,00	0,00	-	-
1	3,0	15,69	13,05	0,59	0,48
2	0,0	9,33	6,21	0,46	0,51
3	6,0	31,17	33,74	0,38	0,52
4	0,0	14,23	17,11	-	-
5	9,0	46,58	56,17	-	-
6	0,0	17,91	29,15	-	-
7	15,0	72,92	-	-	-
8	21,0	91,79	-	-	-
9	0,0	23,10	-	0,25	-

4 DISKUZE

Z výsledků experimentů se podařilo stanovit odezvu modelu schodišťového stupně vyrobeného z UHPC na působící plošné zatížení. Během zatěžovací zkoušky se ukázalo, že dílec vykazuje velké hodnoty průhybu při relativně malé intenzitě zatížení. V případě uvažování střední charakteristické hodnoty užitého zatížení pro kategorii zatížených ploch A - schodiště: 3,0 kN/m² ve smyslu normy ČSN EN 1991-1-1 [3] byl průhyb uprostřed rozpětí při experimentu roven hodnotě 15,69 mm, což je rovno průhybu o velikosti 1/160 z rozpětí zkoušeného dílce. Obecně přípustný průhyb pro železobetonové konstrukce je 1/250 z rozpětí prvku [4]. V případě maximálního zatížení 21,0 kN/m² byl dosažený průhyb při experimentu 91,79 mm, což je při rozpětí pouhých 2500 mm extrémní hodnota průhybu, avšak v případě schodišťového stupně tato intenzita zatížení nemůže prakticky nastat. Druhým zásadnějším výsledkem experimentu, byly extrémní hodnoty trvalých deformací při odlehčení prvku. Už při odtížení z prvního zatěžovacího kroku byl trvalý průhyb 9,33 mm. V případě hodnocení dílce podle normy [2], kdy se posuzuje poměr trvalých deformací k maximálním dosaženým deformacím, což

v Tab. 1 vyjadřuje hodnota λ_1 , by se tento poměr po odtižení ze zatížení 3,0 kN/m² rovnal hodnotě 0,59. Zmíněná norma uvádí limitní hodnotu λ_1 pro železobetonové konstrukce 0,25. Což by v případě hodnocení zkoušeného dílce znamenalo větší než přípustnou hodnotu trvalé deformace. Obdobných výsledků v kontextu trvalých deformací bylo dosaženo i v [5].

Při zatěžování byl kamerou umístěnou ve zkušební komoře pod dílcem pozorován vznik trhlin v tažené oblasti průřezu. Ukázalo se, že ani při maximálním vyvozeném zatížení v tažené oblasti nevznikly žádné viditelné trhliny. Toto zjištění se prokázalo následně i po vyjmutí zkoušeného dílce a bližším prozkoumání tažené oblasti betonu.

V případě výsledků nelineární numerické analýzy pomocí softwaru ATENA bylo dosaženo uspokojivých výsledků ve srovnání s reálným experimentem, a to i přes to, že v době sestavování modelu pro nelineární analýzu nebyly k dispozici všechny hodnoty materiálových charakteristik, které by následný model ještě dále zpřesnilo.

5 ZÁVĚR

Hlavním cílem experimentu bylo stanovit chování modelu schodišťového UHPC stupně při různých hladinách plošného zatížení. Pro tyto účely byla zvolena statická zatěžovací zkouška s vnášením plošného zatížení pomocí metody vakuování. Právě tato metoda zatěžování je velmi vhodná pro simulaci ideálního plošného zatížení především při zkoušení plošných dílců, jako jsou například desky nebo stěny. Výsledky konkrétní zatěžovací zkoušky ukazují poměrně vysoké hodnoty průhybu dílce už při nižších úrovních plošného zatížení a následně nadměrné hodnoty nevratných deformací po odlehčení. Lze předpokládat, že tento jev je způsoben malou výškou dílce v kombinaci se silným vyztužením a velkým rozpětím. Možným řešením problému nadměrných deformací by mohlo být pozměnění geometrie dílce případně jeho statického působení.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci projektu specifického vysokoškolského výzkumu Vysokého učení technického v Brně s označením FAST-J-21-7473 a ve spolupráci se společností DNA DESIGN s.r.o. v rámci vývoje exponátu DNA DESIGN pro Krkonošské muzeum ve Vrchlabí.

Použité zdroje

- [1] Schmidt M, Fehling E. Ultra-high-performance concrete: Research, development and application in Europe: Research, development and application in Europe. ACI Special Publication. 2005;228:51-78.
- [2] ČSN 73 2030. Statické zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí. ÚNMZ; 2019.
- [3] ČSN EN 1991-1-1. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. ÚNMZ; 2004.
- [4] ČSN EN 1992-1-1. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. ÚNMZ; 2006.
- [5] Ševčík S, Slánský B. Konstrukční výplň mostního zábradlí z UHPC panelu. 2014 [cited 2021-12-01]; Available from: http://www.cesti.cz/technicke_listy/tl2014/2014_WP3_TL3_6b.pdf