

ZAVEDENÍ EXPERIMENTŮ PRO IDENTIFIKACI MATERIÁLOVÝCH PARAMETRŮ DO PŘEDMĚTŮ STAVEBNÍ MECHANIKY

THE INTRODUCTION OF EXPERIMENTS INTENDED TO IDENTIFY MATERIAL PARAMETERS INTO
STRUCTURAL MECHANICS COURSES

Martina Šomodíková¹, Jana Kaděrová²

Abstract

The contribution describes the solution and the main results of a project focused on an introduction of experimental testing into some courses taught at the Institute of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology. A set of experimental samples for four different tests was produced from plain concrete to be tested by students and compared with numerical simulations of such problems (three- and four-point bending tests of concrete beams without notch, three-point bending test of concrete beams with a notch and wedge-splitting test of concrete block). Such practical examples should demonstrate the real behaviour of material during experimental testing and thereby help to understand the problems of fracture mechanics.

Keywords

Experiment, three-point bending test, four-point bending test, wedge-splitting test, ARAMIS 3D.

1 ÚVOD

Příspěvek popisuje řešení a výsledky projektu, jehož hlavním cílem bylo rozšíření vybraných předmětů stavební mechaniky vyučovaných na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně o reálné experimenty. Ty by měly studentům umožnit sledování skutečného chování studovaného materiálu během jeho zatěžování, a lépe tak pochopit problémy lomové mechaniky, s nimiž se v rámci výkladu setkávají. Smyslem experimentů je rovněž srovnání jejich výsledků s dosud prováděnými numerickými simulacemi a identifikace materiálových parametrů pro zpřesnění numerického modelu.

Pro testování byly zvoleny tři typy experimentů, které budou prezentovány a prováděny v rámci výuky. Jedná se o ohybový test na trácích bez zářezu dvou různých délek (tříbodový a čtyřbodový ohyb), na němž bude demonstrován vliv velikosti na únosnost prvku, dále o ohybový test na trámci se zářezem (tříbodový ohyb) a test štípnání klínem (wedge-splitting test). V rámci projektu tedy bylo vyrobeno dostatečné množství laboratorních vzorků pro zmíněné typy testů, přičemž část vzorků již byla otestována kvůli odladění rychlosti zatěžování, a byly připraveny ukázkové simulace testů v programu ATENA 2D [1].

2 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Betonové vzorky byly vyrobeny ve třech záměsích. Pro betonáž byla použita zakoupená suchá směs pro výrobu betonu třídy C16/20 z důvodu zajištění homogenity materiálu. K výrobě tráců pro tříbodový (3PB) a čtyřbodový (4PB) ohyb byly využity ocelové formy o standardních rozměrech 100 × 100 × 400 mm, do kterých byly vyrobeny vložky ze silonu s ocelovou drážkou, které umožnily v jedné formě vyrobit vždy dva trámce o rozměrech 45 × 45 × 400 mm (Obr. 1). Pro wedge-splitting test (WS test) byly vybetonovány krychle o hraně délky 150 mm. Z každé záměsi bylo zhotoveno vždy 24 tráců a 3 krychle (Obr. 2).

Typ testu	Rozměry vzorku [mm]	Počet vzorků v záměsi č.			
		I	II	III	Celkem
Tříbodový ohyb vzorku se zářezem (3PBN)	45 × 45 × 200	12	12	12	36
Tříbodový ohyb vzorku bez zářezu (3PB)	45 × 45 × 200	12	12	12	36
Čtyřbodový ohyb vzorku bez zářezu (4PB)	45 × 45 × 400	12	12	12	36
Wedge-splitting test (WS)	150 × 150 × 75	6	6	6	18

Tab. 1 Přehled rozměrů a množství vyrobených vzorků

¹ Martina Šomodíková, Ing., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, Veveří 331/95, 602 00 Brno, somodikova.m@fce.vutbr.cz

² Jana Kaděrová, Ing., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, Veveří 331/95, 602 00 Brno, kaderova.j@fce.vutbr.cz



Obr. 1 Ocelová forma s vyrobenou vložkou



Obr. 2 Čerstvě zhotovená série vzorků jedné záměsi

Vybetonované vzorky zrály po dobu tří měsíců v místnosti s vysokou vlhkostí a konstantní teplotou. Následně byly přemístěny do laboratoře Ústavu stavební mechaniky a připraveny k testování do své konečné podoby. Vzorky pro 3PB o rozměrech $45 \times 45 \times 200$ mm byly připraveny z vybetonovaných trámčů jejich rozřezáním, na polovině z nich pak byl vyřezán zářez do hloubky 15 mm, tedy do třetiny výšky vzorku. Pro WS test byly z každé krychle vyrobeny dva vzorky o rozměrech $150 \times 150 \times 75$ mm, které byly opatřeny výřezem pro umístění ocelových příložek a zářezem hloubky 30 mm. Přehled o množství vyrobených vzorků je shrnut v Tab. 1.

Z důvodu odladění experimentů a nastavení optimální rychlosti zatěžování byly z každé záměsi vybrány 2 vzorky pro každý z ohybových testů a 1 vzorek na test štípnání klínem, které již byly otestovány. Povrch těchto testovacích těles byl před experimentem dodatečně upraven tak, aby bylo možné snímat pole deformací bezdotykovým optickým 3D měřicím systémem ARAMIS [2]. Nejprve byl povrch vzorku vyrovnán nanesením sádrové kaše a po vytvrdnutí natřen bílou barvou. Poté byl na vzorek černým sprejem nanesen stochastický rastr, aby byl systém ARAMIS schopen identifikovat jednotlivé body povrchu a přiřadit jim souřadnice, z nichž jsou následně dopočítávány deformace. Ukázka připraveného vzorku je na Obr. 3, kamery zařízení ARAMIS připravené pro záznam experimentu pak na Obr. 4.



Obr. 3 Připravený vzorek na WS test



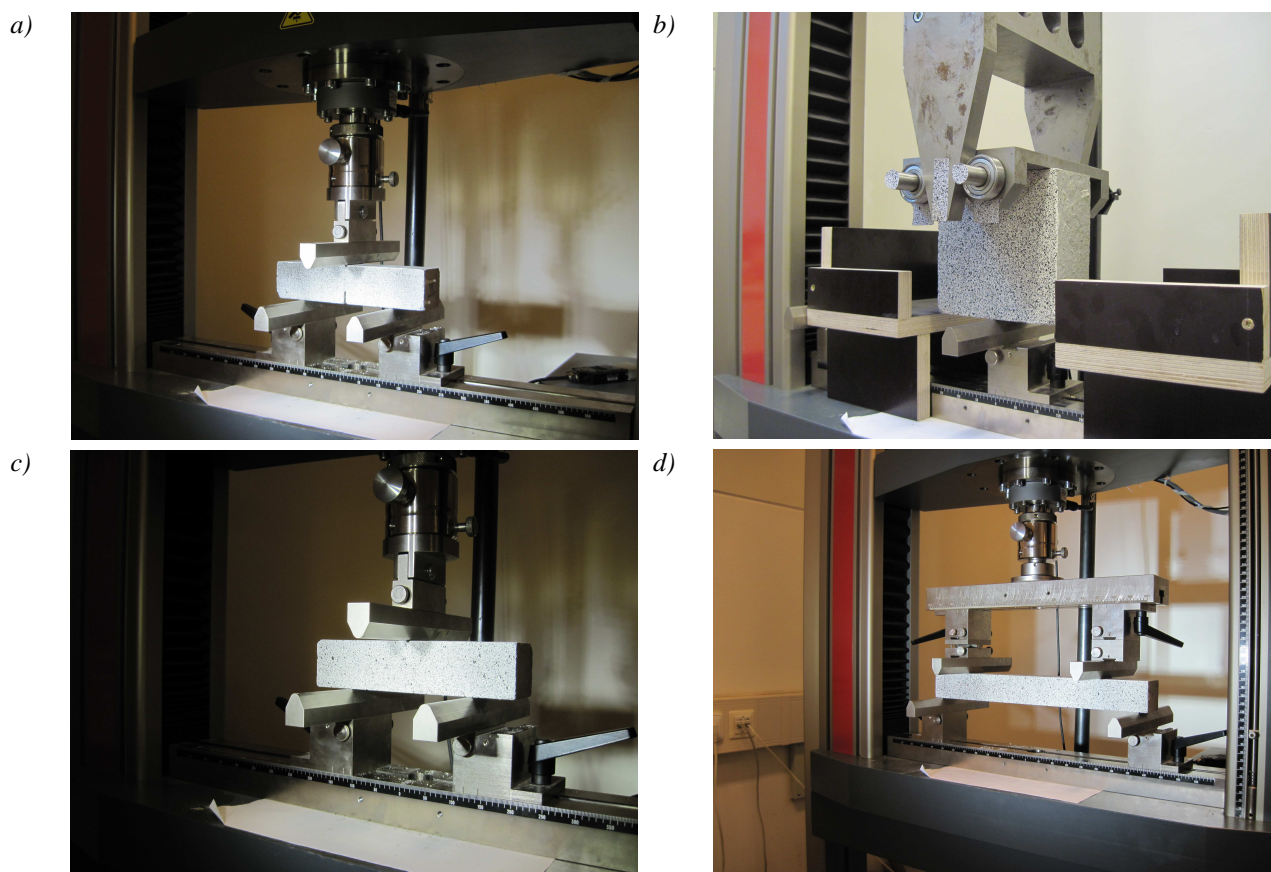
Obr. 4 Kamery systému ARAMIS připravené ke snímání experimentu

3 PRŮBĚH EXPERIMENTŮ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Pro samotné testování byly v softwaru řídícím zatěžovací stroj vytvořeny zatěžovací programy pro jednotlivé typy testů. Z provedených experimentů byly získány $l-d$ (load-displacement) křivky, tedy křivky závislosti zatížení na řízeném posunu zatěžovací hlavy lisu. Průběh každého experimentu byl zároveň snímán optickým systémem ARAMIS. Po ukončení experimentů byla všechna data z lisu i z optického měření zpracována a vyhodnocena a výsledky byly následně porovnávány s výsledky numerických simulací zatěžování betonových prvků v programu ATENA 2D.

První sadu již otestovaných vzorků tvořilo 6 trámčů se zářezem, které byly zatěžovány třibodovým ohybem. Wedge-splitting test byl v rámci odladění experimentu proveden na 3 vzorcích. Třetí a čtvrtou skupinou vzorků byly trámce bez zářezu dvou různých délek zatěžované třibodovým, resp. čtyřbodovým ohybem. U obou délek bylo zachováno stejné smykové rozpětí 60 mm, zatímco ohybové rozpětí mělo hodnotu 0 pro 3PB, resp. 250 mm pro 4PB. Konfigurace zvolených typů zkoušek jsou zřejmé z Obr. 5a) – d).

Na Obr. 6a) – d) jsou souhrnně vykresleny $l-d$ křivky získané ze zatěžovacího programu (plná čára) a měřením systémem ARAMIS (čárkovaná čára) pro jednotlivé typy testů. Šedou barvou jsou vykresleny výsledky jednotlivých testovaných vzorků, černá čára pak reprezentuje střední odezvu. Různý sklon počátečních tečen je způsoben zahrnutím tuhosti zatěžovací hlavy lisu při snímání posunu a zatížení zatěžovacím strojem. Naproti tomu systém ARAMIS snímá pouze povrch testovaného vzorku a dopočítává změny souřadnic jednotlivých bodů, tedy zohledňuje pouze skutečnou tuhost vzorku.



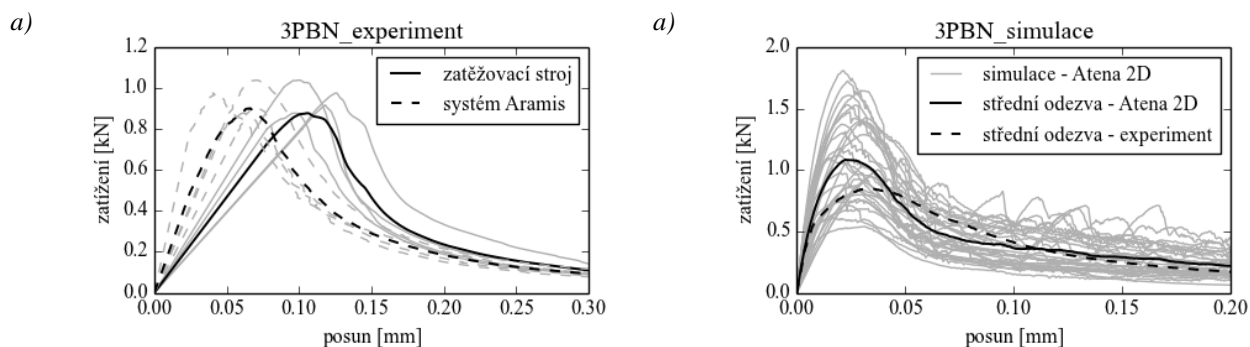
Obr. 5 Konfigurace jednotlivých typů zkoušek: a) 3PB test vzorku se zářezem, b) WS test, c) 3PB test, d) 4PB test

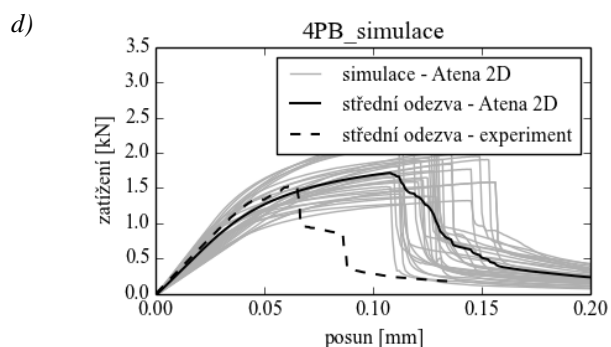
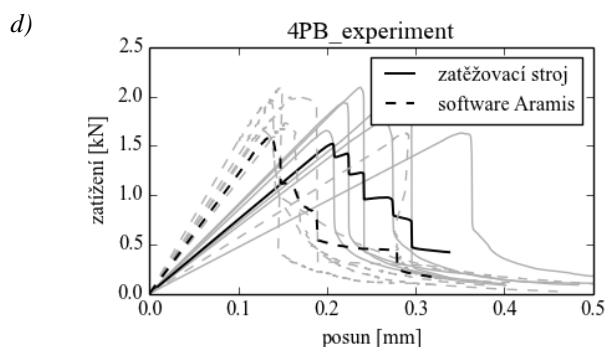
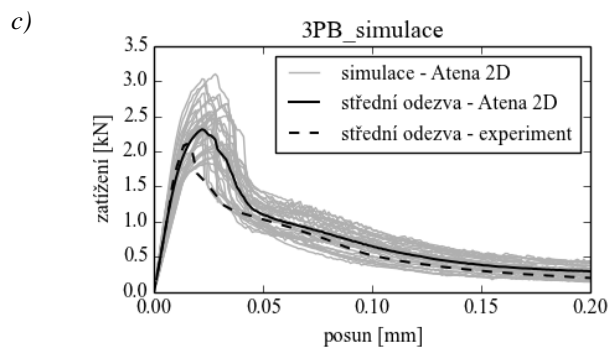
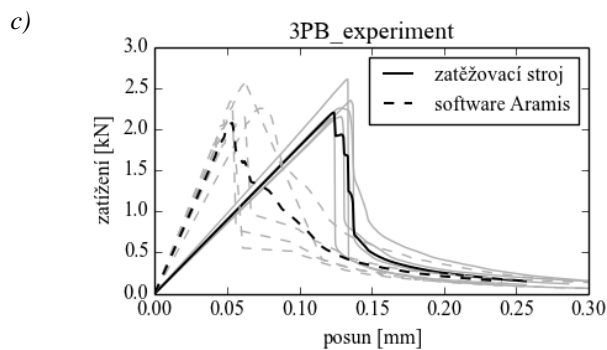
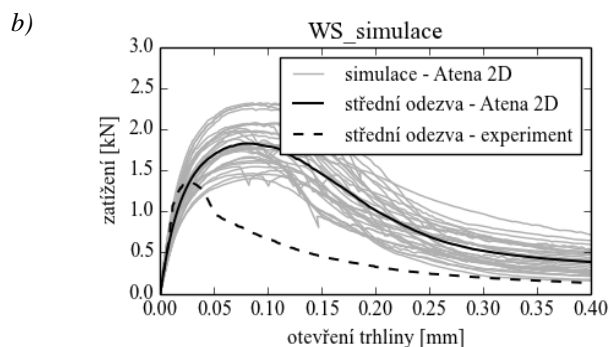
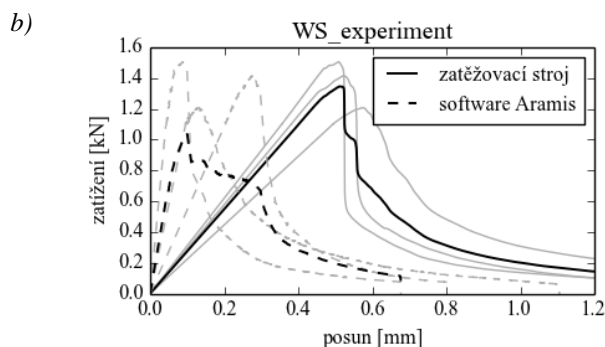
4 NUMERICKÉ SIMULACE A IDENTIFIKACE MATERIÁLOVÝCH PARAMETRŮ

Pro každý z prováděných testů byly v programu ATENA 2D vytvořeny ukázkové numerické simulace zatěžování betonových prvků, jejichž výsledky byly rovněž srovnávány s výsledky reálných experimentů. Jako vstupní hodnoty materiálových parametrů betonu byly voleny defaultní hodnoty, které jsou dopočítávány ze zadané krychelné pevnosti betonu v tlaku dle vztahů převzatých z CEB-FIP Model Code 1990. Krychelná pevnost byla uvažována hodnotou 20 MPa.

Bylo provedeno celkem 30 náhodných simulací pro každý typ testu, přičemž za proměnné parametry byly zvoleny modul pružnosti, tahová pevnost a lomová energie betonu. Jednotlivé *l-d* křivky jsou vykresleny na Obr. 7a) – d) šedou barvou. Plná černá čára pak definuje střední odezvu numerických simulací. Na tomtéž obrázku je pro srovnání černou čárkovanou čarou vyznačena také průměrná odezva testovaných sad vzorků, jejíž parametry byly dále identifikovány tak, aby konečná simulovaná odezva co nejpřesněji kopírovala tvar experimentální *l-d* křivky. Identifikace parametrů modelu byla prováděna jednoduchým ručním měněním vstupních parametrů a následným porovnáním výsledků simulace s experimentálními daty.

Připravené vstupní soubory numerických simulací výše zmíněných testů v programu ATENA 2D, stejně jako výsledky laboratorních experimentů na zkušebních vzorcích ve formě *l-d* křivek, včetně jejich vzájemného srovnání, jsou studentům volně dostupné na webových stránkách Ústavu stavební mechaniky nebo přímo na adrese http://server.stm.fce.vutbr.cz/study/frvs_somodikova/frvs.html.





Obr. 6 Experimentální l-d křivky: a) 3PB test vzorku se zářezem, b) WS test, c) 3PB test, d) 4PB test

Obr. 7 Numerické simulace vs. experiment: a) 3PB test vzorku se zářezem, b) WS test, c) 3PB test, d) 4PB test

5 ZÁVĚR

Předmětem předloženého příspěvku byla prezentace výsledků projektu, jehož hlavním cílem bylo rozšíření vybraných předmětů o reálné experimenty, které budou studenti moci provádět v rámci výuky na Ústavu stavební mechaniky Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Vytvořené podklady do cvičení jsou účelným prostředkem k demonstraci a pochopení problémů lomové mechaniky, kde jsou pouhé numerické simulace nedostačující, a proto by připravené experimenty měly studentům pomoci získat komplexnější pohled na řešení těchto úloh.

PODĚKOVÁNÍ

Prezentované výsledky byly získány za podpory Fondu rozvoje vysokých škol, projekt č. 828/2013/G1 – Zavedení experimentů pro identifikaci materiálových parametrů do předmětů stavební mechaniky.

LITERATURA

- [1] VOŘECHOVSKÝ, Miroslav a Vladimír ČERVENKA. *Dokumentace programu ATENA: Část 2: Uživatelský manuál programu ATENA 2D*. Praha, 2002.
- [2] ARAMIS: GOM. *Optical Measuring Techniques: GOM* [online]. 10. 12. 2013 [cit. 2013-12-26]. Dostupné z: <http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/aramis.html>

RECENZOVAL

Václav Sadílek, Ing., Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, odborný asistent, Veveří 331/95, 602 00 Brno, +420 541 147 131, sadilek.v@fce.vutbr.cz