VÍCEÚROVNĚOVÉ STANOVENÍ LOMOVĚ-MECHANICKÝCH PARAMETRŮ BETONU ZE ŠTÍPACÍCH TESTŮ

MULTILEVEL DETERMINATION OF MECHANICAL FRACTURE PARAMETERS OF CONCRETE FROM WEDGE SPLITTING TESTS

Martin Lipowczan^{*,1}, Martina Šomodíková¹, David Lehký¹

^{*}lipowczan.m@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Článek představuje výsledky části výzkumu zaměřeného na vývoj komplexní experimentálně-výpočtové metodiky pro stanovení hodnot lomově-mechanických parametrů betonu nezávisle na velikosti a geometrii vzorku. K tomuto účelu byly provedeny laboratorní zkoušky štípaní klínem na vzorcích třech různých velikostí se dvěma rozdílnými hloubkami zářezů. Na základě experimentálně získaných odezev zkušebních vzorků byla provedena identifikace lomově-mechanických parametrů všech vzorků pomocí inverzní analýzy. Získané parametry byly použity při numerické simulaci zkoušek a analyzovány z hlediska jejich závislosti na velikosti počátečního neporušeného ligamentu.

Klíčová slova

Inverzní analýza, štípací test, lomově-mechanické parametry, numerická simulace, vliv velikosti

Abstract

The paper presents the results of a part of the research focused on the development of a complex experimental-computational methodology for determining the values of mechanical fracture parameters of concrete independent of the specimen size and geometry. For this purpose, laboratory wedge splitting tests were carried out on specimens of three different sizes with two different notch depths. Based on the experimentally obtained responses of the test specimens, the fracture mechanical parameters of all specimens were identified by inverse analysis. The obtained parameters were used in the numerical simulation of the tests and analysed in terms of their dependence on the size of the initial uncracked ligament.

Key words

Inverse analysis, wedge-splitting test, mechanical fracture parameters, numerical simulation, size effect

1 ÚVOD

Pokročilé hodnocení spolehlivosti a životnosti konstrukcí z kvazikřehkých materiálů, např. betonu, s využitím prostředků numerické simulace vyžaduje znalost odpovídajících lomově-mechanických parametrů. Běžným postupem, jak stanovit jejich hodnoty, je přímé vyhodnocení experimentálně získaného zatěžovacího diagramu [1], [2]. Získané hodnoty jsou ovšem v jisté míře závislé na velikosti a tvaru zkušebního vzorku [3], [4]. Druhou možností, jak získat lomově-mechanické parametry, je inverzní analýza založená na metodě umělých neuronových sítí v kombinaci s numerickou simulací zkoušky [5], [6].

K ověření vlivu velikosti a geometrie vzorku na lomově-mechanické parametry je postupně vyvíjen komplexní víceúrovňový přístup pro experimentálně-výpočtové stanovení materiálových parametrů betonu. Je v něm zahrnuto testování, pokročilé vyhodnocování a identifikace vzorků o různých velikostech v různých zkušebních konfiguracích na základě metod soft computing a analýzy lomových procesů pomocí víceúrovňového přístupu při modelování. Cílem článku je představit výsledky identifikace lomově-mechanických parametrů betonu pomocí inverzní analýzy založené na umělých neuronových sítích. K tomu jsou využity výsledky experimentálního programu, zejména odezvy zkušebních vzorků různých velikostí a počátečních hloubek zářezů, které byly podrobeny štípacímu testu.

2 NUMERICKÁ SIMULACE ŠTÍPACÍHO TESTU

Lomové experimenty

Pro účely článku byly využity výsledky rozsáhlého experimentálního programu provedeného v laboratořích VUT v Brně s cílem získání velikostně nezávislých hodnot lomově-mechanických parametrů [7]. V rámci zmíněného programu byly provedeny zkoušky tříbodovým ohybem a štípacím testem (wedge splitting test, WST) [8] zkušebních vzorků vyrobených z jednotné betonové směsi třídy C30/37. Maximální velikost zrna kameniva byla 16 mm. Během provádění testů bylo stáří betonových vzorků přibližně 100 dní. Článek představuje identifikaci materiálových parametrů na základě výsledků štípacího testu kvádrů s centrálním zářezem.

Obr. 1 Zkušební vzorky tří různých velikostí testované štípacím testem (vlevo), získané experimentální odezvy všech zkušebních vzorků (vpravo).

Testovány byly tři různé velikosti vzorků v poměru 1:3. Jednalo se o vzorky nejmenších rozměrů $100 \times 100 \times 100$ mm s označením W_100, střední velikosti $200 \times 200 \times 100$ mm s označením W_200 a s největší velikostí $300 \times 300 \times 100$ mm označené jako W_300. Každá velikost vzorků byla dále testována pro dvě různé startovací relativní hloubky zářezu a/D , kde a je hloubka zářezu a D je celková výška vzorku (Obr. 1 vlevo) – zářezy označené písmenem S měly poměr 0,2 (mělké zářezy) a L poměr 0,5 (hluboké zářezy). Výjimkou byly nejmenší vzorky, kde z důvodu osazení testovacích přípravků bylo možné testovat pouze hluboké zářezy. Analyzovány byly 3 vzorky každé velikosti krom nejmenších, kterých bylo 6. Pro každý vzorek byla získána odezva ve formě diagramu zatížení–rozevření v ústí trhliny CMOD (Obr. 1 vpravo). Cílem experimentů bylo sledování vlivu velikosti vzorků s různými hloubkami zářezů.

Numerický model

Deterministický výpočtový model zkoušených vzorků byl vytvořen v MKP softwaru ATENA 2D [9]. Pro kvazikřehké materiály se běžně používá materiálový model 3D Non Linear Cementitious 2, který má v sobě zabudovanou funkci exponenciálního tahového změkčení dle Hordijka [10].

Pro každou velikost vzorku a hloubku zářezu byl vytvořen samostatný numerický model viz Obr. 2, kde jsou srovnány modely pro nejmenší, střední a největší vzorek. Hustota sítě byla/zůstala stejná pro všechny velikosti zkušebních vzorků. V místě šíření trhliny nad zářezem byla ponechána konstantní šířka prvků, tzn. že charakteristická šířka pásu trhlín L_{ch} byla stejná pro všechny velikosti vzorků a její velikost byla 4 mm.

Obr. 2 Výpočtové MKP modely vzorků tří různých velikostí zkoušených štípacím testem.

Stanovení lomově-mechanických parametrů

Identifikace hodnot materiálových parametrů betonu byla provedena s využitím inverzní analýzy založené na metodě umělých neuronových sítí. Cílem identifikace bylo získat pro každý testovaný vzorek odpovídající kombinaci hodnot lomových parametrů, které mají největší vliv na odezvu štipacího testu – modul pružnosti E , lomovou energii G_f a tahovou pevnost f_t .

Pro parametry, které jsou předmětem identifikace, se nejprve sestaví stochastický model, tedy definují se statistické momenty a příslušná pravděpodobnostní rozdělení. Stochastický model byl vytvořen v softwaru FReET [11]. Hledané parametry měly shodně rovnoměrné rozdělení, tedy byly definovány rozsahem od a (minimum) po b (maximum). Simulační metodou LHS [12] bylo provedeno vzorkování náhodných veličin, počet simulací byl padesát. Opakovanou analýzou deterministického výpočtového modelu byly získány náhodné odezvy. Náhodné realizace hledaných parametrů a k nim příslušné náhodné odezvy vzorků byly následně použity při sestavení učící množiny pro umělou neuronovou síť.

V následujícím kroku se vytvoří struktura sítě a poté probíhá její učení. Na vstupu sítě byly uvažovány tři parametry odezvy: síla F_{lin} v lineární oblasti – síla při CMOD: 0,012 mm (W_100_L a W_200_S), 0,018 mm (W_300_S), 0,020 mm (W_200_L) a 0,028 mm (W_300_L), maximální síla $\bar{F}_{max}$ (vrchol diagramu) a lomová práce $\bar{W}$, což je celková plocha pod křivkou zatěžovacího diagramu až do deformace 1 mm (W_100_L) a 2 mm (ostatní sady vzorků). Její hodnota byla získána pomocí numerické integrace. Síla F_{lin} byla stanovena pro každou sadu vzorků zvlášť, a to na základě numerické simulace se středními hodnotami hledaných parametrů. Ze získané odezvy byla stanovena maximální dosažená síla, z ní dopočítána jedna třetina síly a odpovídající CMOD.

Naučená síť, která s dostatečnou přesností aproximuje inverzní funkci, slouží následně ke stanovení hledaných materiálových parametrů (3 výstupy sítě) jednotlivých zkušebních vzorků. Ověření přijatelné přesnosti aproximace inverzní funkce bylo provedeno pomocí testovací množiny, která byla tvořena pěti uspořádanými dvojicemi nezávislými na učící množině.

3 VÝSLEDKY

Hledané parametry byly získány na základě inverzní analýzy, kdy na vstupu byly odpovídající síti předloženy příslušné parametry odezvy získané z experimentální zkoušky. Tento proces stanovení hledaných parametrů byl opakován u všech 18 vzorků. Výsledné hodnoty identifikovaných parametrů všech vzorků jsou uvedeny v Tab. 1. Střední hodnoty hledaných parametrů jednotlivých sad vzorků jsou zvýrazněny tučně a variační koeficienty jsou uvedeny v závorkách.

Tab. 1 Hodnoty identifikovaných parametrů, střední hodnoty (tučně) a variační koeficienty (v závorce v %).

Vzorky	Modul pružnosti E (GPa)		Pevnost v tahu f_t (MPa)		Lomová energie G_f (J/m ²)	
W_100_L	28,49		2,83		160,81	
	28,31		3,69		155,56	
	32,70	30,37	3,61	3,55	149,42	146,76
	30,53	(6,3)	3,84	(10,7)	140,52	(7,2)
	29,69		3,48		142,00	
W_200_L	32,48		3,86		132,23	
	23,58	23,58	2,84		209,05	
	25,55	(8,4)	3,48	3,37	185,38	195,85
	21,61		3,79	(14,4)	193,13	(6,2)
	26,81		3,02		235,41	
W_200_S	37,73	31,30	2,32	2,75	166,63	187,99
	29,37	(18,2)	2,91	(13,6)	161,93	(21,9)
	28,70		2,97		199,40	
W_300_L	28,59	28,57	3,13	3,17	219,45	206,92
	28,43	(0,5)	3,42	(7,3)	201,92	(5,3)
	37,96		2,47		254,34	
W_300_S	32,78	34,73	2,35	2,52	233,50	237,37
	33,45	(8,1)	2,74	(8,0)	224,26	(6,5)
W_všechny		29,82 (14,3)		3,15 (16,2)		186,94 (20,0)

Výsledné průměrné hodnoty lomově-mechanických parametrů betonu C30/37 získané ze všech zkoušených vzorků štípacího testu uvedené v Tab. 1 (označení $W_{\text{všechny}}$) byly následně použity během numerické simulace všech pěti zkušebních konfigurací. Numericky získané diagramy síla vs. CMOD byly porovnány s 95% intervalem spolehlivosti experimentálních hodnot viz Obr. 3.

Obr. 3 Diagramy dělicí síla vs. posun v ústí trhliny (CMOD) získané z numerické simulace WST se středními hodnotami identifikovaných parametrů všech vzorků a jejich porovnání s 95% intervalem spolehlivosti experimentálních hodnot.

4 DISKUZE

Výsledné diagramy z numerické analýzy se středními hodnotami hledaných parametrů všech vzorků dosahují poměrně dobré shody s 95% intervalem spolehlivosti experimentálních hodnot, jak lze vidět na Obr. 3. Mírná nekonzistentnost je patrná pouze u vzorků W_{300_S} , a to na sestupné větvi diagramu. Může to být dáno určitou nestabilitou při záznamu experimentálních zkoušek. Hodnoty lomové energie G_f tak mohou být v tomto případě lehce nadhodnocené.

Na Obr. 4 jsou znázorněny průměrné hodnoty identifikovaných parametrů pro každou sadu analyzovaných vzorků: modul pružnosti E , lomová energie G_f a tahová pevnost f_t v závislosti na neporušeném ligamentu nad zářezem. Získané hodnoty parametrů z identifikace jsou doplněny o výsledky přímého vyhodnocení experimentů: modulu pružnosti E a lomové energie G_f získané pomocí metody lomové práce a efektivního modelu

trhliny, podrobněji viz [5]. Jak je patrné, z přímého vyhodnocení experimentů nelze získat hodnoty tahové pevnosti. Naopak inverzní analýzou ano, což může být bráno jako dobrý nástroj k doplnění chybějících dat.

Dosažené výsledky potvrzují nezávislost modulu pružnosti E na velikosti neporušeného ligamentu nad zářezem. Lomová energie G_f a pevnost v tahu f_t vykazují výraznější závislost na velikosti neporušeného ligamentu. Tato zjištění jsou platná jak u hodnot získaných identifikací, tak z experimentů.

Obr. 4 Závislost získaných lomově-mechanických parametrů betonu vzorků na velikosti neporušeného ligamentu nad zářezem – identifikace vs. experiment.

5 ZÁVĚR

Předložený článek představuje výsledky identifikační části projektu, který se zabývá vývojem komplexního víceúrovňového přístupu pro experimentálně-výpočtové stanovení lomově-mechanických parametrů betonu. Na základě provedených experimentálních štípacích testů tří různých velikostí vzorků a dvou rozdílných hloubek zářezů byly identifikovány lomově-mechanické parametry betonu C30/37 pomocí inverzní analýzy založené na metodě umělých neuronových sítí.

Numericky získané diagramy závislosti síly na CMOD se středními hodnotami hledaných parametrů dosahují dobré shody s 95% intervalem spolehlivosti experimentálních hodnot, který respektuje přirozenou variabilitu výsledků. Pro získání lomových vlastností nezávislých na velikosti lze doporučit k provedení lomových zkoušek vzorky s nominální hloubkou 200 mm. Velikost počátečního neporušeného ligamentu je dostatečná pro obě hloubky zářezu. Zpětný výpočet parametrů pro ostatní velikosti vzorků a různé hloubky zářezů lze realizovat postupem dle Abdalla a Karihaloo [2].

Cílem dalšího bádání je nahrazení exponenciálního tahového změkčení ve výpočtových modelech např. bilineárním či trilineárním modelem tahového změkčení. Tato změna by mohla vést ke zpřesnění identifikace parametrů a lepšímu vystižení sestupné větve zatěžovacích diagramů.

Poděkování

Autoři by rádi poděkovali za podporu poskytnutou z projektu Grantové agentury České republiky (GAČR) MUFRAS č. 19-09491S a projektu juniorského specifického vysokoškolského výzkumu Vysokého učení technického v Brně registrovanému pod č. FAST-J-21-7552. Zvláštní poděkování patří Ing. Oldřichovi Žaludovi za přípravu betonové směsi, Ing. Barbaře Kucharczykové, Ph.D. a Ing. Petru Daňkovi, Ph.D. za provedení lomových testů a Ing. Haně Šimonové, Ph.D. za vyhodnocení lomových testů.

Použité zdroje

- [1] RILEM TC-50 FMC, Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*. 1985, vol. 18, iss. 4, pp. 287–290.
- [2] ABDALLA, H. M. and B. L. KARIHALOO. Determination of size-independent specific fracture energy of concrete from three-point bend and wedge splitting tests. *Magazine of Concrete Research*. 2003, vol. 55, pp. 133–141.
- [3] NALLATHAMBI, P., B. L. KARIHALOO and B. S. HEATON. Various size effect in fracture of concrete. *Cement and Concrete Composites*. 1985, vol. 15, pp. 117–126.
- [4] BAŽANT, Z. P. and M. T. KAZEMI. Size dependence of concrete fracture energy determined by RILEM work-of-fracture method. *International Journal of Fracture*. 1991, vol. 51, pp. 121–138.
- [5] NOVÁK, D. and D. LEHKÝ. ANN Inverse Analysis Based on Stochastic Small-Sample Training Set Simulation. *Engineering Application of Artificial Intelligence*. 2006, vol. 19, pp. 731–740. DOI: 10.1016/j.engappai.2006.05.003.
- [6] LEHKÝ, D., Z. KERŠNER and D. NOVÁK. FraMePID-3PB Software for Material Parameters Identification Using Fracture Test and Inverse Analysis. *Advances in Engineering Software*. 2014, vol. 72, pp. 147–154. ISSN 0965-9978, DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.10.001.
- [7] LEHKÝ, D., B. KUCHARCZYKOVÁ, H. ŠIMONOVÁ and P. DANĚK. 2020. Comprehensive fracture tests of concrete for the determination of mechanical fracture parameters. *Structural Concrete*, online, DOI: 10.1002/suco.202000496.
- [8] TSCHIEGG, E. K. New equipment for fracture tests on concrete. *Materialprüfung/Materials Testing*. 1991, vol. 33, no. 11-12, pp. 338–343, DOI: 10.1515/mt-1991-3311-1204.
- [9] ČERVENKA, V., L. JENDELE and J. ČERVENKA. ATENA program documentation – Part 1: theory. Cervenka Consulting, Prague, Czech Republic, 2016.
- [10] HORDIJK, D. A. Local approach to fatigue of concrete. PhD Thesis, Technische Universiteit Delft, Delft, Netherlands, 1991.
- [11] NOVÁK, D., M. VOŘECHOVSKÝ and R. RUSINA. FReET – Program Documentation: User's and Theory Guides. Version 1.5, Brno/Červenka Consulting, Česká republika, 2012, <http://www.freet.cz>.
- [12] MCKAY, M. D., R. J. BECKMAN and W. J. CONOVER. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*. 1979, vol. 21, No. 2, pp. 239–245.