

## DETERMINATION OF INTRINSIC BRITTLENESS OF CONCRETE USING FRACTURE EXPERIMENT AND ITS SIMULATION

**Z. Keršner\*, D. Lehký\***

**Summary:** *Procedure for estimation of fracture process zone size of concrete as value of characteristic length which quantifies intrinsic brittleness of the material is presented in this paper. The procedure is based on the combination of results of fracture experiments – three-point bending of specimens with a central edge notch – with results of the subsequent numerical simulations of these tests by FEM program ATENA and identification of material parameters of selected model using artificial neural networks. For illustration, three types of concrete were analysed.*

### 1. Úvod

Beton představuje nejpoužívanější stavební materiál současnosti. Konstrukční prvky z tohoto materiálu vykazují tzv. kvazikřehkou odezvu na zatížení, takže při potřebě popisu této odezvy je požadována znalost hodnot lomově-mechanických parametrů – např. lomové houževnatosti, lomové energie apod. Hodnoty základních lomově-mechanických parametrů lze získat vyhodnocením experimentů se vzorky opatřenými koncentratory napětí zatěžovanými ve vhodné zkušební konfiguraci.

Zvyšování zmíněné lomové houževnatosti betonu s jeho pevností (v tlaku i tahu) bývá obvykle vnímáno jako zvyšování jeho tažnosti, resp. snižování křehkosti. Stupeň křehkosti (či tažnosti), který vykazuje betonová konstrukce v reakci na vnější zatížení, závisí samozřejmě nejen na vlastní, strukturní křehkosti materiálu, ale také na její velikosti, resp. na poměru velikosti konstrukce a maximálního zrna kameniva (Karihaloo, 1995). Dále bude nicméně pozornost zaměřena právě na strukturní křehkost betonu a možnost její kvantifikace.

V předkládaném příspěvku se aplikuje postup stanovení strukturní křehkosti pro vzorky tří vyšetřovaných betonů, přičemž provedené lomové testy se následně simulují MKP programem ATENA (Červenka a kol., 2007) a parametry vybraného materiálového modelu se identifikují pomocí umělých neuronových sítí (Novák & Lehký, 2006). Při výpočtu tzv. charakteristické délky studovaných betonů se využije kombinace relevantních hodnot parametrů získaných z lomových testů, resp. z jejich simulace.

### 2. Charakteristická délka kvazikřehkého kompozitu

Připomeňme, že v nelineárních lomových teoriích a přibližných modelech lomu je křehkost betonu charakterizována parametry, které zahrnují lomové či pružnostní konstanty. Takovým-

---

\* doc. Ing. Zbyněk Keršner, CSc., Ing. David Lehký, Ph.D.: Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně; Veveří 331/95; 602 00 Brno; tel.: +420.541 147 362, +420.541 147 376, fax: +420.541 240 994; e-mail: kersner.z@fce.vutbr.cz, lehky.d@fce.vutbr.cz

to parametrem může být např. míra velikosti lomové procesní zóny (LPZ): čím je menší, tím křehčí je materiál. Je známo několik postupů, jak určit tzv. strukturní křehkost, tedy jak kvantifikovat křehkost materiálu bez závislosti na dané konstrukci – viz např. Karihaloo (1995).

V modelu fiktivní trhliny lze křehkost betonu kvantifikovat veličinou nazvanou charakteristická délka  $l_{ch}$ , která by měla přibližně odpovídat velikosti LPZ. Charakteristickou délku betonu vyčíslíme ze vztahu:

$$l_{ch} = \frac{EG_F}{f_t^2} \quad (1)$$

kde  $E$  představuje statický modul pružnosti,  $G_F$  specifickou lomovou energii a  $f_t$  pevnost v tahu.

Hodnoty specifické lomové energie a modulu pružnosti obdržíme např. z lomového experimentu v konfiguraci třibodového ohybu betonového vzorku s centrálním zářezem v oblasti tažených vláken na základě vyhodnocení získaného diagramu zatížení vs. posun ( $l-d$  diagram), včetně zohlednění možné ztráty stability při zatěžování posunem (Frantik & Keršner, 2006).

### 3. Numerická simulace lomového experimentu

Chování vzorku při výše zmíněném lomovém experimentu lze současně numericky simulovat např. metodou konečných prvků (MKP) – zde byl použit program ATENA (Červenka a kol., 2007). Popis chování prvků/konstrukcí z kvazikřehkých materiálů vyžaduje užití pokročilého materiálového modelu, který obsahuje celou řadu parametrů, které je nezbytné s využitím vhodné metody inverzní analýzy identifikovat, a to na základě naměřeného  $l-d$  diagramu. Lze tak mimo jiné získat i relevantní hodnotu pevnosti v tahu materiálu vzorku, potřebnou pro výpočet charakteristické délky betonu, viz (1).

Jednou z vhodných metod identifikace je metoda založená na kombinaci umělých neuronových sítí se stochastickou analýzou. Podrobný popis jejího fungování je možné najít v práci Novák & Lehký (2006). Tato metoda byla použita i při výpočtu parametrů níže studovaných vzorků betonu.

### 4. Aplikace navrženého postupu odhadu velikosti lomové procesní zóny

Výše uvedený postup byl aplikován při odhadu velikosti LPZ, resp. výpočtu charakteristické délky tří vybraných betonů, označených dále jako B1, B2 a B3. Pro účely tohoto příspěvku nejsou důležité detaily vyšetřovaných betonů a testů, zmiňme jen, že vzorky z těchto materiálů byly před zkouškou třibodovým ohybem opatřeny diamantovou pilou v oblasti tažených vláken zářezem do přibližně 1/3 výšky tělesa. V případě těles z betonu B1 šlo o materiál panelů tuzemského výrobce, zbývající představovaly betony vyrobené pro účely výzkumu na spolupracujících pracovištích ve Vídni (B2) a v Mnichově (B3).

Výsledky experimentů i simulací jsou shromážděny v Tab. 1; lze tu nalézt hodnoty statického modulu pružnosti a specifické lomové energie získané testem a identifikací, a také identifikované hodnoty pevnosti v tahu. Tabulka obsahuje hodnoty charakteristické délky jednotlivých betonových vzorků a základní statistiky. Aritmetické průměry a výběrové směrodatné odchylky charakteristických délek všech tří betonů uvádí Obr. 1. Charakteristické délky byly vyčíslvány dvojím způsobem: 1) Hodnoty vstupních parametrů  $E$  a  $G_F$  se použily z vyhod-

nocení lomových experimentů, hodnoty  $f_i$  výše zmíněnou identifikací (v obrázku označeno „test + identifikace“); 2) Hodnoty  $E$ ,  $G_F$  a  $f_i$  získány výhradně identifikací.

Tab. 1 Charakteristické délky betonů B1, B2 a B3: vstupní data a vyhodnocení

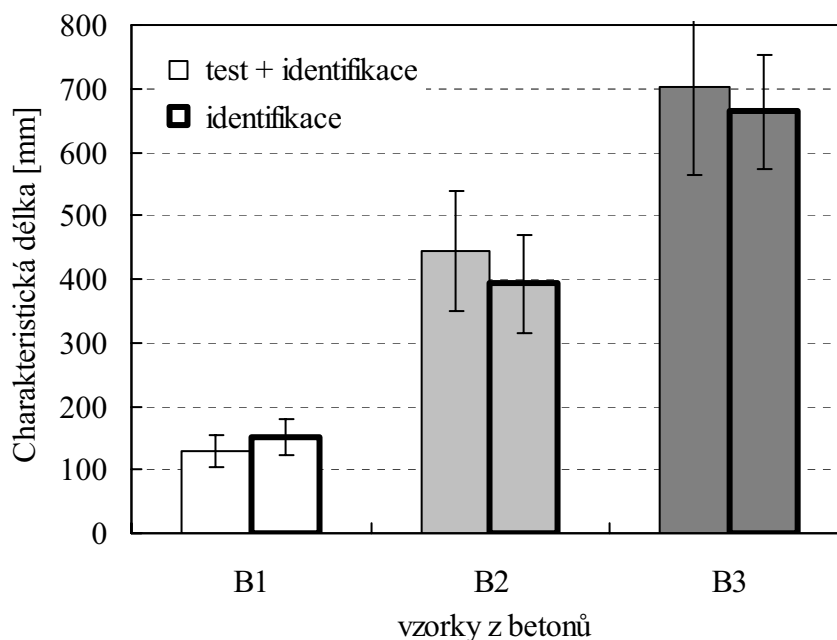
Vzorek	Modul pružnosti [GPa]: Test / Ident.	Pevnost v tahu [MPa]: Ident.	Lomová energie [J/m <sup>2</sup> ]: Test / Ident.	Charakteristická délka			
				Jednotlivé vzorky [mm]	Aritmetický průměr [mm]	Výběrová směrná odchylka [mm]	Variační koeficient [-]
B1_1	33,8 / 38,8	6,11	143,9 / 139,9	130,3 / 145,4	129,0 / 152,1	24,6 / 28,5	0,19 / 0,19
B1_2	34,5 / 39,6	4,82	103,0 / 107,6	153,0 / 183,4			
B1_3	32,9 / 39,0	5,83	107,2 / 111,2	103,8 / 127,6			
B2_1	35,4 / 32,0	3,80	245,4 / 225,0	601,6 / 498,6	443,2 / 392,5	95,2 / 77,4	0,22 / 0,20
B2_2	30,1 / 31,5	4,08	235,5 / 210,0	425,8 / 397,4			
B2_3	34,1 / 36,6	4,50	263,3 / 212,2	443,4 / 383,5			
B2_4	39,3 / 44,5	4,60	257,2 / 215,0	477,7 / 452,2			
B2_5	32,2 / 33,0	4,73	218,8 / 190,0	314,9 / 280,2			
B2_6	37,0 / 39,0	5,00	267,5 / 220,0	395,9 / 343,2			
B3_1	33,5 / 33,3	2,30	135,9 / 121,4	860,6 / 764,2	702,2 / 663,4	137,5 / 89,1	0,20 / 0,13
B3_2	30,3 / 30,3	2,22	102,7 / 96,8	631,4 / 595,1			
B3_3	28,9 / 30,9	2,22	104,8 / 100,6	614,5 / 630,7			

## 5. Závěr

V příspěvku byl pro vzorky ze tří vybraných betonů aplikován postup stanovení charakteristické délky, která kvantifikuje strukturní křehkost materiálu a slouží k odhadu velikosti lomové procesní zóny. Postup se zakládal na kombinaci výsledků provedených lomových experimentů tříbodovým ohybem vzorků s centrálním zářezem s výsledky následných simulací těchto testů MKP programem ATENA a identifikací parametrů vybraného materiálového modelu pomocí umělých neuronových sítí. Tímto způsobem byly stanoveny relevantní hodnoty charakteristické délky bez nutnosti dalších experimentů v jiné zkušební konfiguraci, resp. bez potřeby užívat odhad hodnoty tahové pevnosti např. na základě hodnot pevností tlakových.

Ačkoliv je výše uvedeno, že podrobnosti o vybraných kompozitech nejsou pro účely tohoto příspěvku důležité – šlo tu o prezentaci víceméně obecného postupu – pozornému čtenáři

jistě neunikly podstatné rozdíly kvantifikované křehkosti všech tří betonů. Možná ho napadne: charakteristická délka materiálu je zřejmě jeho velmi zajímavý parametr, proč jsem jej doposud nepoužil?



Obr. 1 Hodnoty charakteristických délek tří vybraných betonů – aritmetické průměry a výběrové směrodatné odchylky

## 6. Poděkování

Výsledky byly získány za finanční podpory grantu GA ČR 103/07/1276 „Komplexní modelování lomu pokročilých stavebních kompozitů“ a částečně za finančního příspěví MŠMT, projekt 1M0579, v rámci výzkumného centra CIDEAS „Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí“.

## 7. Literatura

- Červenka, V., Jendele, L. & Červenka, J. (2007) *ATENA Program Documentation – Part 1: Theory*. Cervenka Consulting, Prague.
- Frantík, P. & Keršner, Z. (2006) Vyhodnocení lomového experimentu s katastrofickou ztrátou stability, in: *Sborník mezinárodní konference Staticko-konstrukční a stavebno-fyzikální problémy stavebních konstrukcí*, Štrbské Pleso, str. 141–142
- Karihaloo, B. L. (1995) *Fracture mechanics of concrete*. Longman Scientific & Technical, New York.
- Novák, D. & Lehký, D. (2006). ANN Inverse Analysis Based on Stochastic Small-Sample Training Set Simulation. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 19, str. 731–740.