

Táňa HOLUŠOVÁ¹, Stanislav SEITL², Alfonso FERNÁNDEZ-CANTELI³

NUMERICKÁ PODPORA EXPERIMENTÁLNÍ ZKOUŠKY EXCENTRICKÝM TAHEM
NA VÁLCOVÝCH BETONOVÝCH TĚLESECH

NUMERICAL SUPPORT OF EXPERIMENTAL COMPACT TENSION TEST
ON CONCRETE CYLINDRIC SPECIMENS

Abstrakt

Stanovení rychlosti šíření trhliny v kvazikřehkých materiálech je v posledních letech často studovanou problematikou lomové mechaniky. Článek je zaměřen na porovnání lomových parametrů získaných ze dvou tvarově velmi blízkých lomových zkoušek, a to zkoušky štípáním klínem a zkoušky excentrickým tahem, obě aplikované na cementový kompozit kruhového průřezu. Numerické studie obou zkušebních konfigurací jsou provedeny programem ATENA (MKP). Bylo porovnáno množství energie spotřebované při lomovém procesu u jednotlivých konfigurací.

Klíčová slova

Lomová energie, šíření trhlin, excentrický tah, klínové štípání, cementový kompozit.

Abstract

The assessment of crack growth speed in quasi-brittle materials is lately very often studied problem of fracture mechanics. This contribution is focused on comparison of fracture parameters obtained from two fracture tests with similar shape of specimen - wedge splitting test and compact tension test. Both tests are applied on cylindrical specimens made from cement based composite. Numerical simulations for both configurations are performed in software ATENA (FEM). The amount of fracture energy consumed during fracture process has been compared for particular configurations.

Keywords

Fracture energy, crack growth, compact tension, wedge-splitting test, cement-based composite.

1 ÚVOD

Moderní pojetí architektury je zaměřeno na stavby vysoké, lehké a efektivní. Tyto převážně betonové konstrukce jsou namáhány extrémním zatížením. Zejména jde o konstrukce silničních mostů, dálničních viaduktů a mostů vedených nad železnicí. Dále o konstrukce větrných elektráren nebo části energetických zařízení. U těchto konstrukcí může nastat situace, kdy dominantním zatížením není statické, ale zatížení únavové [11].

¹ Ing. Táňa Holušová, Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, e-mail: holusova.t@fce.vutbr.cz.

² Ing. Stanislav Seitzl, Ph.D., Ústav fyziky materiálů, Akademie věd České republiky, v. v. i., Žižkova 22, 616 62 Brno, tel.: (+420) 532 290 361, e-mail: seitzl@ipm.cz.

³ Prof. Alfonso Fernández-Canteli, University of Oviedo, Dpt. of Construction and Manufacturing Engineering, Campus de Viesques, 332 03 Gijón, Spain, e-mail: afc@uniovi.es.

V těchto extrémně namáhaných konstrukcích vznikají během jejich životnosti tzv. únavové trhliny [16]. U takto poškozených konstrukcí je důležité stanovit zbytkovou životnost dané konstrukce, popřípadě stanovit interval pravidelných kontrol na základě předpokládané rychlosti šíření trhliny [9], [19].

Kvazikřehké materiály, k nimž patří i cementové kompozity, jsou samy o sobě vysoce heterogenní materiály. Procesy probíhající ve struktuře takovýchto materiálů při namáhání cyklickým zatížením jsou mnohem komplikovanější než například procesy v kovových materiálech [16].

Pro určování lomových parametrů kvazikřehkých materiálů bylo v průběhu předchozích desítek let navrženo hned několik možných konfigurací lomových zkoušek. Asi nejznámější jsou klasické zkoušky v tříbodovém (3PB) a čtyřbodovém (4PB) ohybu, například viz Karihaloo [7]. Na přípravu jednoho zkušební tělesa je však třeba velké množství materiálu, vzorek je poměrně těžký a v laboratorních podmínkách těžko manipulativní. Při zkoušení či numerických simulacích, zvláště u tříbodového ohybu, bylo zjištěno, že hlavní lomový proces probíhá jen v poměrně malém pruhu zkušební tělesa, tzv. lomové procesní zóně. Tato skutečnost dala vzniknout jiné lomové zkoušce, tzv. klínovému štípání. Tato zkouška je prováděna na vzorcích malého čtvercového či kruhového průřezu. Poprvé byla představena Linsbauerem et al. [12] a dále rozvinuta v práci Brühwiler et al. [3], parametrickou studii pro výpočet součinitele intenzity napětí publikoval Guinea et al. [5], over deterministic method (ODM, český ekvivalent – přeurtčitá metoda) pro výpočet vyšších členů Williamsovy řady použil Sobek et al. [15]. Rychlostí šíření trhliny způsobené únavovým procesem v cementových kompozitech se v minulosti zabývali například Bažant et al. [1] a [2], Lee et al. [11] nebo Seitzl et al. [13] a [14].

Parametry zjišťované na laboratorně vyrobených tělesech odpovídají reálné pouze do jistého stáří konstrukce, později je třeba pro lomové zkoušky odebrat vzorek přímo z reálné konstrukce, což se provádí jádrovým vývrtem. Vzniká tak válec, jenž se dá nařezat na několik zkušebních vzorků, jak pro klínové štípání, tak pro modifikovanou zkoušku excentrickým tahem na kruhových tělesech.

Cílem práce je posoudit vliv okrajových podmínek pro dvě zkušební konfigurace lomové mechanických zkoušek používaných pro určování lomových parametrů materiálů. První z nich je zkouška štípáním klínem (viz obr. 1) a druhou zkouška excentrickým tahem (viz obr. 2), která je používána a známá spíše ze zkoušek na kovových materiálech.

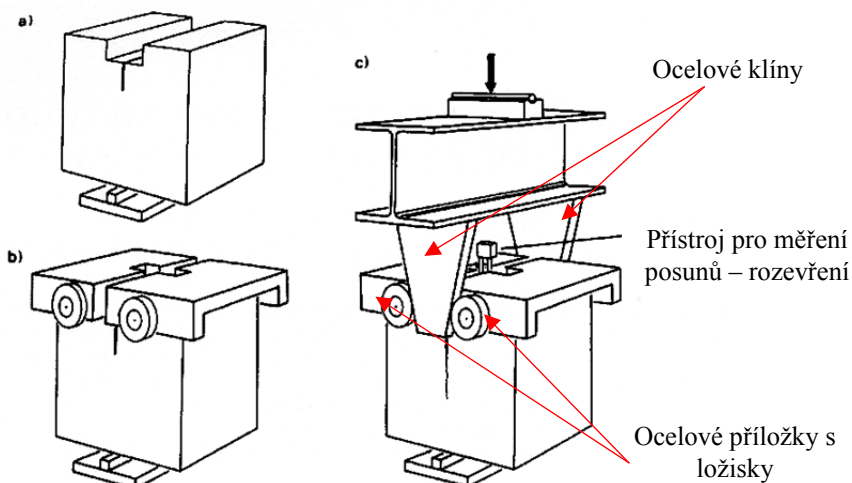
2 POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ KONFIGURACE

Při numerické studii modifikované zkoušky se vychází ze znalostí již dříve používaných experimentů. Proto jsou v následujících odstavcích uvedeny základní údaje o zkušebních konfiguracích. Jedná se o tzv. klínové štípání (wedge-splitting test), která je již několik let předmětem výzkumu zkušebních konfigurací pro určování lomové mechanických parametrů kvazikřehkých materiálů, viz například Guinea et al. [5], Karihaloo et al. [8], Veselý et al. [17] a [18] nebo Holušová [6], a zkoušku excentrickým tahem (compact tension test) [10], obě zkoušky prováděné na tělesech kruhového průřezu.

2.1 Wedge-splitting test

Wedge-splitting test (WST), tedy klínové štípání, je standardní lomová zkouška pro určování lomové mechanických parametrů kvazikřehkých materiálů [7]. Je prováděna na tělesech čtvercového nebo kruhového průřezu, základní průměr nebo délka strany čtverce je 150 mm. Kruhová tělesa pak musí být oříznuta o kruhovou úseč pro dobré usazení ocelových příložek.

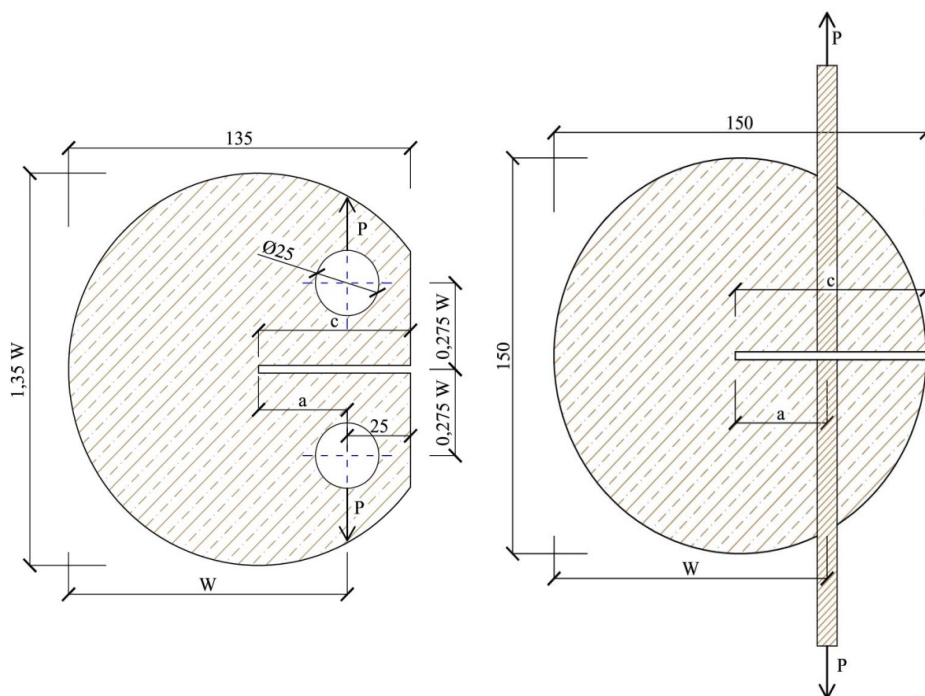
WST poprvé publikovali Linsbauer a Tschegg [12], kteří na krychlových tělesech určovali lomově-mechanické parametry betonu, zejména lomovou energii. Na jejich práci pak navázali Brühwiler a Wittmann [3], kteří tuto konfiguraci zařadili mezi standardní lomové mechanickou zkoušku. Konfigurace WST a způsob vnášení zatížení do tělesa jsou znázorněny na obr. 1. Ocelové klíny, umístěné vně tělesa, pojíždí po ocelových ložiscích, ukotvených na ocelových příložkách, umístěných v drážce vytvořené v tělese. Přes ložiska je do tělesa vnášeno zatížení a jezdící ocelový klín těleso postupně rozevírá a štípe na dvě části.



Obr. 1: Princip WST: a) zkušební těleso se zářezem; b) 2 ocelové příložky s ložisky; c) ocelové klíny vložené mezi ložiska pro rozdělení tělesa na dvě části (převzato z [3])

2.2 Compact tension test

Compact tension (CT) test je tzv. zkouška excentrickým tahem. Tato zkouška je využívána hlavně pro určování lomových parametrů kovových materiálů. Oproti WST, kdy je zatížení do tělesa vnášeno ocelovým klínem přes ložiska, kde se pak hlavní zátěžná síla v ložiscích dělí na horizontální a vertikální složku, je CT těleso opatřeno úchyty a je rozevíráno přímo horizontálními silami. Schéma a konfigurace zkoušky excentrickým tahem je uvedena na obr. 2.



Obr. 2: Standardní CT těleso pro zkoušku excentrickým tahem: a) pro kovové materiály; b) modifikované těleso pro cementové kompozity

3 NUMERICKÉ SIMULACE

Modely jsou vytvořeny v dvourozměrném prostředí v programu ATENA [4]. Pro modelování části z cementového kompozitu (betonu) byl použit implementovaný materiálový model 3D Nonlinear cementitious 2 v modifikaci pro rovinnou deformaci. Pro modelování podpory, ocelových příložek a ocelového klínu bylo využito materiálu Pružný - rovinná deformace. Parametry krychelné a tahové pevnosti betonu, modulu pružnosti betonu a oceli a objemové hmotnosti oceli jsou uvedeny v tab. 1.

Modely těles obou posuzovaných konfigurací jsou kruhového průřezu s průměrem 150 mm. Je využito shodných materiálových modelů implementovaných v programu ATENA 2D se zadanými charakteristikami z tab. 1. Tloušťka modelů je vždy 100 mm.

Tab. 1.: Charakteristiky betonu a oceli

	Krychelná pevnost f_c [MPa]	Tahová pevnost f_t [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
Beton	30	2,568	32,29	2300
Ocel	-	-	210	7850

Základní tvar výpočtového modelu WST byl převzat z diplomové práce autorky, viz Holušová [6]. Je přepracována použitá síť konečných prvků, a model je podepřen jen jednou podporou, materiálové charakteristiky betonu jsou uvedeny v tabulce výše.

Monitorovací body horizontálních posunů u CT tělesa jsou umístěny tak, aby odpovídaly monitorovacím bodům posunů v ložiscích u WST tělesa, viz modré křížky na obr. 3 a obr. 5.

Pro parametrickou studii bylo zvoleno pět relativních délek zářezů, jež jsou u obou konfigurací shodné, liší se jen délkou počátečního zářezu, což vyplývá z konfigurace WST, kdy je těleso seříznuto o úseč vysokou 15 mm a opatřeno drážkou o výšce 20 mm.

Relativní délka tělesa α je bezrozměrné číslo a je definováno jako poměr délky zářezu od osy vnášeného zatížení a vzdálenosti parpsku zatížení od protějšího okraje tělesa:

$$\alpha = \frac{a}{W}, \quad (1)$$

kde:

α – je relativní délka zářezu [-],

a – délka zářezu měřená od osy ložiska [m] a

W – vzdálenosti osy ložiska od protějšího okraje tělesa [m].

Jednotlivé relativní a skutečné délky zářezu měřené od okraje – zobrazené pro těleso WST na obr. 3 a pro těleso CT na obr. 5 jsou uvedeny v následující tab. 2:

Tab. 2: Vybrané hodnoty relativních a skutečných délek zářezu pro použitá WST a CT tělesa

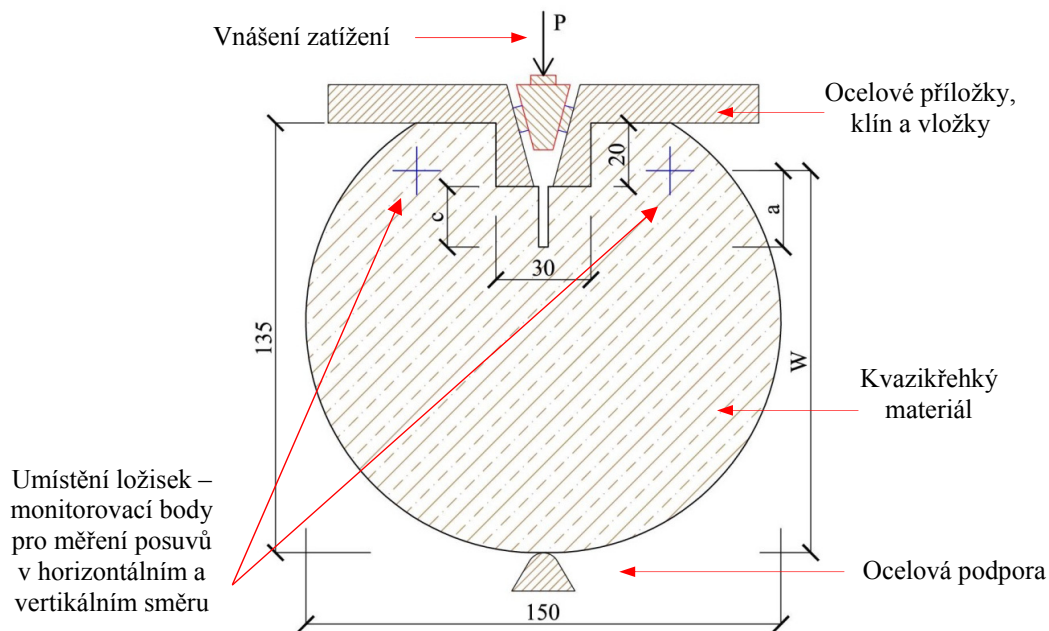
α		0,08	0,1	0,125	0,15	0,2
a		9,6	12	15	18	24
c	WST	4,6	7	10	13	19
	CT	39,6	42	45	48	54

Červenou barvou v zatěžovacích diagramech (viz níže) jsou označeny zatěžovací křivky pro zkoušku štípáním klínem (WST) a modrou barvou křivky pro modifikovanou zkoušku excentrickým tahem.

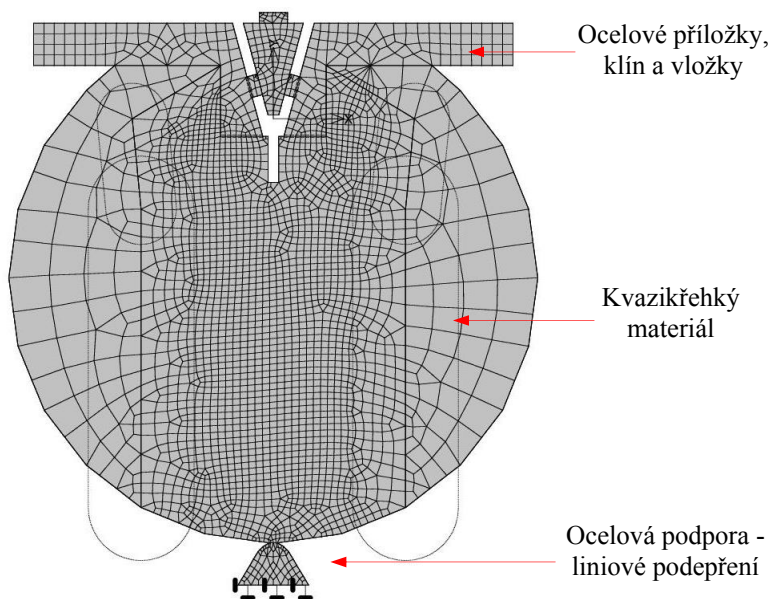
3.1 Model WST

Na obr. 3 je uveden model zkušebního tělesa zatěžovací zkoušky pro numerické simulace. Jedná se o těleso s kruhovým průřezem o průměru 150 mm. Těleso pro laboratorní zkoušky je třeba

seříznout na horní straně o úseč vysokou 15 mm. Poté je do něj vykrojena drážka o šířce 30 mm a hloubce 20 mm. Do drážky a na oříznuté plochy se osadí ocelové příložky, na jejichž koncích jsou z obou stran ložiska, po kterých jezdí ocelový klín. Zatížení je přes tyto ložiska vnášeno do tělesa, čímž ho rozevře a štípá ve dvě. Na obr. 3 jsou modrými křížky označeny osy ložisek, ve kterých jsou také umístěny monitorovací body posunů v horizontálním i vertikálním směru.



Obr. 3: Výpočtový model zkušebního kruhového tělesa pro WST (převzato a modifikováno z [6])



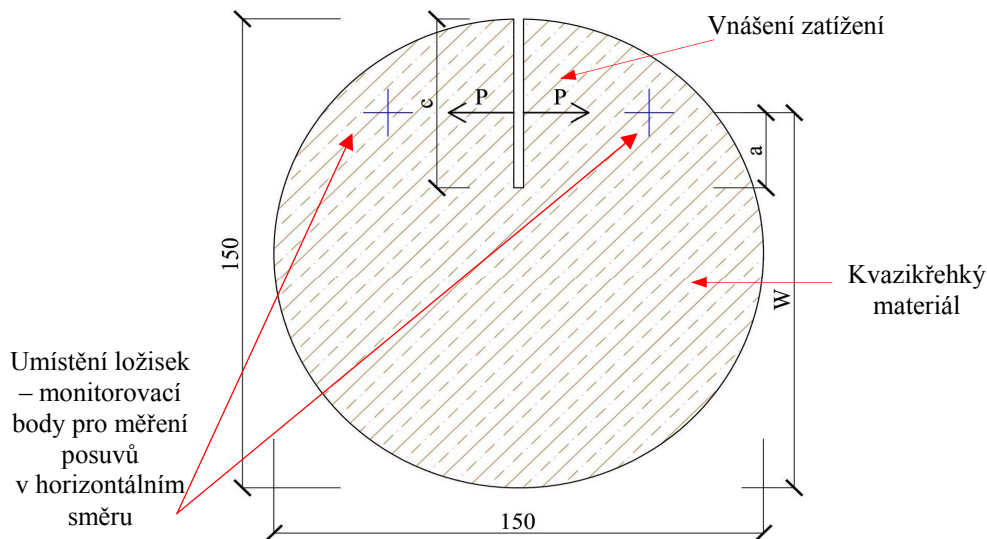
Obr. 4: Použitá síť konečných prvků a okrajové podmínky pro kruhové WST těleso

Na obr. 4 je zobrazena použitá výpočtová síť konečných prvků. Hlavní lomový proces probíhá směrem k dolní podpoře tělesa, proto zde byla síť zhuštěna na velikost prvku 2 mm. Stejná délka strany prvku byla použita i pro podporu a klín. Jedna podpora je použita s ohledem na budoucí

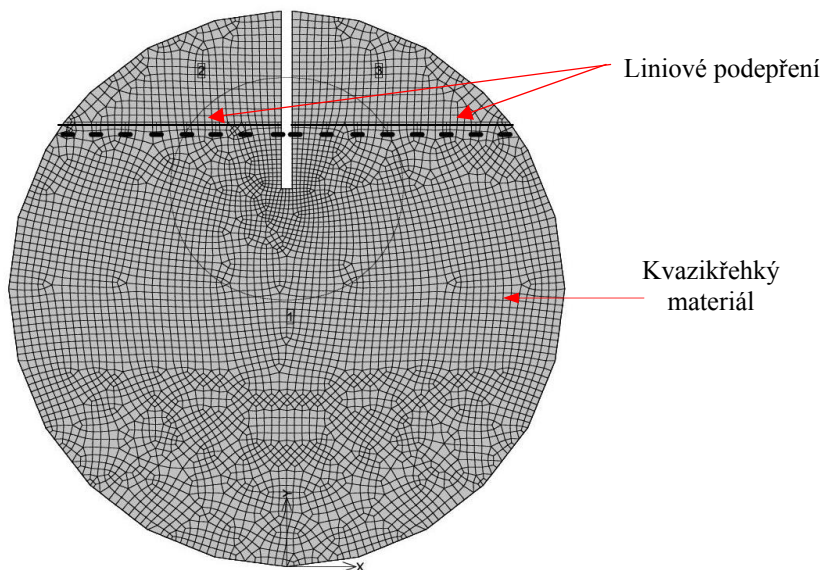
rozsáhlou experimentální studii WST těles na Ústavu stavební mechaniky Fakulty stavební Vysokého učení technického, kde je těleso podepřeno jen jednou podporou. Vliv okrajových podmínek na křehkých tělesech pro zkoušku štípáním klínem byl studován například v práci Veselý et al. [17].

3.2 Model CT

Na obr. 5 je zobrazen model zkušební tělesa pro modifikovanou zkoušku excentrickým tahem na kruhovém tělese.



Obr. 5: Modifikovaný výpočtový model zkušební kruhového tělesa pro CT



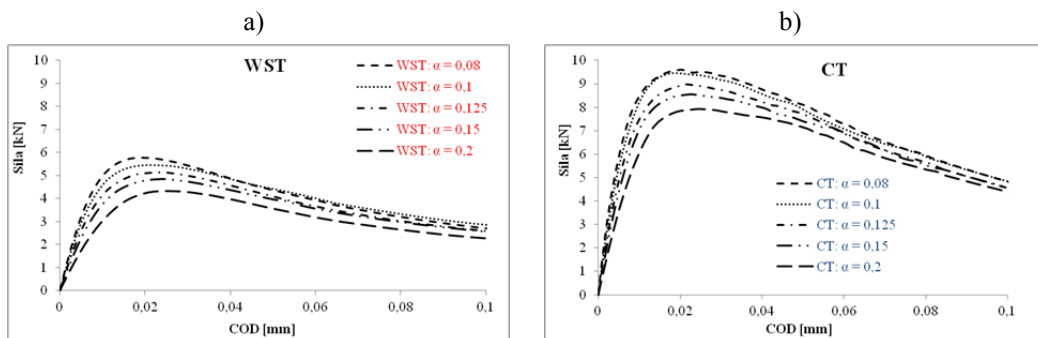
Obr. 6: Použitá síť konečných prvků a okrajové podmínky pro kruhové CT těleso

CT zkušební tělesa pro experimentální testování není třeba dále upravovat pro usazení zatěžovacího aparátu. Pouze se v nich vytvoří počáteční zářez, jenž slouží k inicializaci trhliny a dále se do něj musí po obou stranách vyvrtat díry, do kterých se osadí ocelové tyče, které se poté uchyty do protijedoucích čelistí, které následně samotné těleso budou rozevírat.

Aby bylo docíleno podobnosti se zkouškou WST, byly ocelové tyče v modelu nahrazeny liniemi, které byly také liniově podepřeny. Použitá síť konečných prvků a již zmíněná okrajová podmínka jsou uvedeny na obr. 6. Délka strany prvku je 2 mm, v okolí zářezu je síť zhuštěna na 1 mm.

4 VÝSLEDKY WST VS. CT A DISKUZE

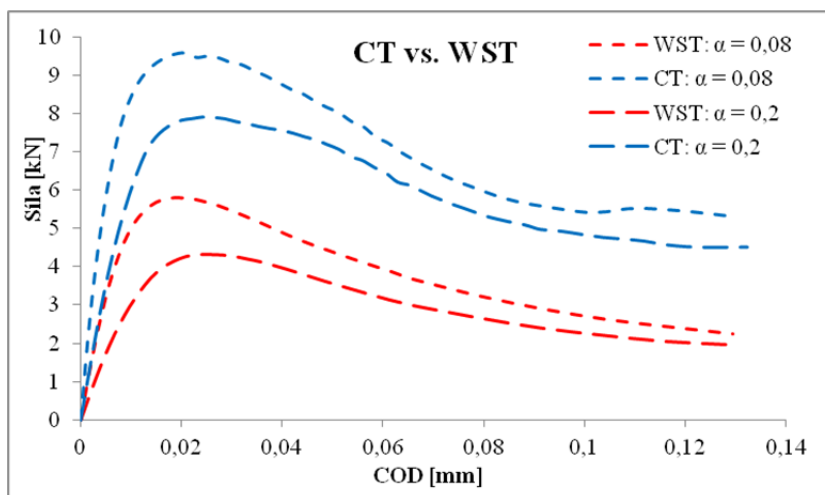
Při numerických simulacích byly monitorovány posuny na paprsku vnášené síly v místě ložisek u obou typů zkušebních konfigurací. Všechny výsledky jsou prezentovány zatěžovacími diagramy P – COD (Síla – rozevření trhliny).



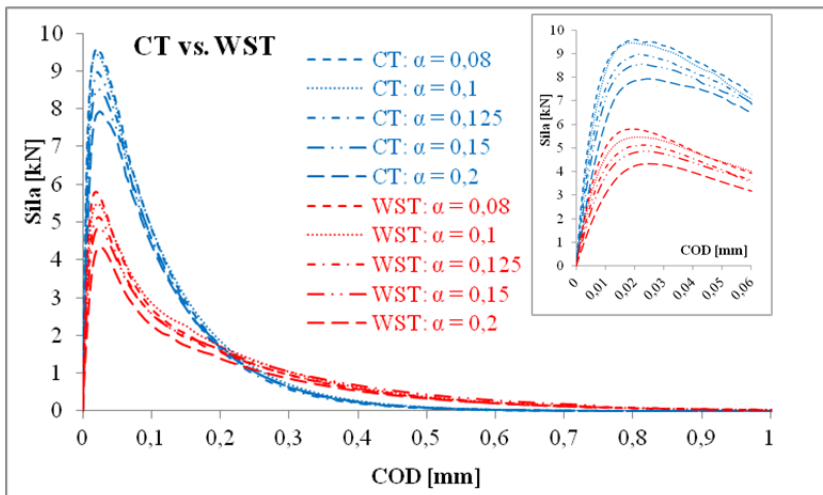
Obr. 7: Zatěžovací diagramy ze simulovaného zatěžovacího testu pro: a) WST konfiguraci; b) CT konfiguraci

V grafech na obr. 7 jsou uvedeny jednotlivé zatěžovací diagramy zvláště pro WST těleso (obr. 7a) a zvláště pro CT těleso (obr. 7b). Z diagramů vyplývá, že se zvětšující se relativní délkou zářezu, roste maximální zatěžovací síla, což platí u obou konfigurací. Okrajové podmínky modelů jednotlivých zkoušek vedou pro konfiguraci CT testu k větší odolnosti proti fatálnímu porušení než v případě WST testu, což lze snadno pozorovat v grafu na obr. 8, kde jsou pro srovnání uvedeny křivky pro relativní délky zářezu 0,08 a 0,2. Rozdíly mezi maximálními hodnotami zatížení jsou v intervalu (3,6 – 3,8) kN.

Srovnání celkových zatěžovacích diagramů pro obě konfigurace je uvedeno na obr. 9. V pravém horním rohu je zobrazen detail digramu v okolí maximálních sil. Tyto diagramy sloužily pro výpočet jednoho z nejdůležitějších lomových parametrů – lomové energie.



Obr. 8: Porovnání vybraných zatěžovacích křivek obou zkušebních konfigurací



Obr. 9: Srovnání celkových zatěžovacích diagramů obou zkušebních konfigurací a detail v okolí maximálních zatěžovacích sil

Lomová energie je parametr běžně používaný pro hodnocení kvality materiálu [7]. Proto v rámci studie WST a CT zatěžovacích zkoušek bylo provedeno vyhodnocení lomových energií, tedy množství energie potřebné pro šíření trhliny tělesem. Hodnota lomové energie G_f je dána vztahem:

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}}, \quad (2)$$

kde:

G_f – lomová energie [J/m^2],

W_f – lomová práce [J] a

A_{lig} – obsah plochy ligamentu tělesa [m^2].

V tabulce níže jsou uvedeny hodnoty koncových lomových energií, vlevo pro štípané těleso, vpravo pro těleso zatěžované excentrickým tahem.

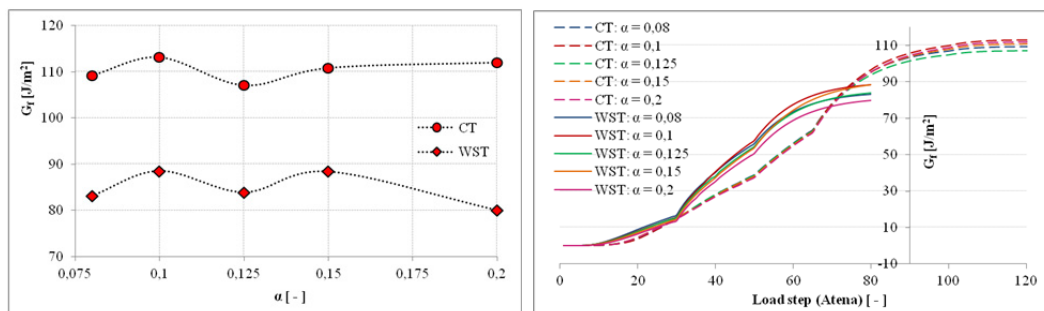
Tab. 3: Velikosti lomových energií obou zkušebních konfigurací

ø 150	WST těleso			CT těleso		
	Počáteční délka zářezu [mm]	Relativní délka zářezu α [-]	G_f [J/m^2]	Počáteční délka zářezu [mm]	Relativní délka zářezu α [-]	G_f [J/m^2]
1	24,6	0,08	83,1	39,6	0,08	109,1
2	27	0,10	88,5	42	0,10	113,1
3	30	0,125	83,9	45	0,125	107,0
4	33	0,15	88,4	48	0,15	110,8
5	39	0,20	79,9	54	0,20	112,0

Maximální a minimální hodnoty lomových energií se liší do 9,7 % pro WST konfiguraci, respektive do 5,4 % pro CT těleso. Průměrné hodnoty lomové energie jsou $84,7 \text{ J}/\text{m}^2$ pro WST konfiguraci, respektive $110,4 \text{ J}/\text{m}^2$ pro CT konfiguraci. Kvůli upevnění CT tělesa do čelistí bude hodnota lomové energie narůstat např. v důsledku zachycení vlastní hmotnosti tělesa, v důsledku neumožnění rotace jednotlivých částí tělesa a v neposlední řadě chybí tlakové zatížení na konci

tělesa. Z toho důvodu je potřeba provést korekci cca 24 % pro získání srovnatelných výsledků v případě použití modifikovaných CT těles pro únavové testy, aby bylo dosaženo hodnot odpovídajících WST testu.

V diagramech na obr. 10 jsou graficky znázorněny konečné hodnoty lomových energií (vlevo) a postupný růst lomové energie v průběhu zatěžovacího procesu (vpravo), kde lze pozorovat ustálení hodnoty lomové energie na konci zatěžovacího procesu.



Obr. 10: Grafické znázornění růstu lomové energie

5 ZÁVĚR

V uvedené práci byly představeny dvě tvarově velmi podobné konfigurace zatěžovacích zkoušek pro určování lomové mechanických parametrů, jmenovitě wedge-splitting test a compact tension test.

Hodnoty lomových energií při různé hloubce zářezu se pro konfiguraci WST liší do 9,7 % a pro konfiguraci CT do 5,4 % - tedy CT konfigurace je stabilnější. Z předchozích studií je známo, že lomová energie je parametr silně závislý na tvaru tělesa a konfiguraci zatěžovací zkoušky. Z představených výsledků vyplývá, že obě zkoušky vykazují stabilní lomový proces. V rámci připravených laboratorních zkoušek v laboratořích University Oviedo je třeba hodnoty získané z experimentálních prací upravit koeficientem $S_H = 0,76$.

Modifikovaná zkouška excentrickým tahem pro tělesa z cementových kompozitů představuje poměrně novou metodiku pro určování lomové mechanických parametrů kvazikřehkých materiálů, mezi něž se řadí i určování rychlosti šíření trhliny tělesem. Daná zkouška je výrazně jednodušší na přípravu experimentů v laboratorních podmínkách, vykazuje stabilní lomový proces, a výsledky získané během zatěžování se dají snadno transformovat (převést) na hodnoty odpovídající testu WST.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finančního přispění Grantové agentury ČR, projekt číslo P104/11/0833 a Juniorského specifického výzkumu FAST-J-13-2045.

LITERATURA

- [1] BAŽANT, Z., SCHELL, W. F. Fatigue Fracture of High-Strength Concrete and Size Effect, *ACI Materials Journal*, No. 90-M50, 1993, pp. 472-478, ISSN: 0889-325X.
- [2] BAŽANT, Z., XU, K. Size Effect in Fatigue Fracture of Concrete, *ACI Materials Journal*, No. 88-M46, 1991, pp. 390-399, ISSN: 0889-325X.
- [3] BRÜHWILER, E., WITTMANN, F. H. The Wedge Splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics tests, *Engineering Fracture Mechanics Vol. 35*, 1990, pp. 117-125, ISSN: 0013-7944.
- [4] Červenka Consulting, www.cervenka.cz - ATENA Program Documentation, Theory and User Manual.

- [5] GUINEA, G. V., ELICES, M., PLANAS, J. Stress intensity factors for wedge-splitting geometry, *International Journal of Fracture*, Vol. 81, 1996, pp. 113–124, ISSN: 0376-9429.
- [6] HOLUŠOVÁ, T. Analýza napjatosti a porušení ve zkušebních tělesech používaných pro určování lomové mechanických parametrů kvazikřehkých materiálů, *Diplomová práce*, 2012, VUT Brno.
- [7] KARIHALOO, B. L. *Fracture mechanics of concrete*, 1995, Longman Scientific & Technical, New York, ISBN: 0-582-21582-X.
- [8] KARIHALOO, B. L., XIAO, Q. Z. Higher order terms of the crack tip asymptotic field for a wedge-splitting specimen, *International Journal of Fracture*, Vol. 112, 2001, pp. 129–137.
- [9] KLESNIL, M., LUKÁŠ, P. Šíření únavových trhlin v oceli, *Studie ČSAV*, 1973, Akademie, Praha, 1973, ISSN: 0577-3652.
- [10] KNĚSL, Z., BEDNÁŘ, K. Dvoupárametrová lomová mechanika: výpočet parametrů a jejich hodnoty, 1998, ÚFM AVČR, Brno.
- [11] LEE, M. K., BARR, B. I. G. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26, Issue 4, 2004, pp. 299–305, ISSN: 0958-9465.
- [12] LINSBAUER, H. N., TSCHEGG, E. K. Fracture energy determination of concrete with cube shaped specimens, *Zement und Beton*, Vol. 31, 1986, pp. 38–40, ISSN: 0514-2946.
- [13] SEITL, S., KERŠNER, Z., BÍLEK, V., KNĚSL, Z. Glass fibre reinforced cement based composite: fatigue and fracture parameters, *Applied and Computational Mechanics*, Vol. 3, No. 2, 2009, pp. 363–374, ISSN: 1835-680X.
- [14] SEITL, S., KNĚSL, Z., ŠIMONOVÁ, H., KERŠNER, Z. Fatigue crack growth in cement based composites: Experimental aspects, *Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems*, London, 2013, pp. 1314–1317, ISBN 978-0-415-62126-7.
- [15] SOBEK, J., VESELÝ, V., ŠESTÁKOVÁ, L. Accuracy of approximation of stress and displacement fields in cracked body for estimation of failure zone extent, *Transaction of the VŠB – Technical University of Ostrava No. 2, Vol. XII, Civil Engineering Series*, 2012, pp. 361–370, ISSN: 1213-1962.
- [16] SURESH, S.: *Fatigue of Materials*, second edition, Cambridge University Press, 1998, ISBN: 0-521-57046-8.
- [17] VESELÝ, V., GROCHALOVÁ, E. *Numerická studie vlivu okrajových podmínek na průběh zkoušky WST pro určování lomových parametrů cementových kompozitů*, Konference Modelování v mechanice, Ostrava, 2010, CD, ISBN: 978-80-248-2234-1.
- [18] VESELÝ, V., ŘOUTIL, L., SEITL, S.: Wedge-Splitting Test – Determination of Minimal Starting Notch Length for Various Cement Based Composite, *Key Engineering Materials Vol. 452-453*, 2011, pp. 77–80.
- [19] VLK, M., FLORIAN, Z. Mezní stavy a spolehlivost, *Učební texty*, 2007, VUT Brno.

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Jiří Brožovský, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-TU Ostrava.

Ing. Radomír Pukl CSc., Červenka Consulting s.r.o., Praha.