

Stanislav SEITL¹, Václav VESELÝ² Ladislav ŘOUTIL³

ANALÝZA VLIVU PROPORCÍ VÁLCOVÉHO ZKUŠEBNÍHO TĚLESA NA LOMOVÉ
PARAMETRY PŘI ZKOUŠCE KLÍNOVÝM ŠTÍPÁNÍM

ANALYSIS OF INFLUENCE OF CYLINDRICAL SPECIMEN'S PROPORTIONS ON FRACTURE
PARAMETERS FROM WEDGE SPLITTING TEST

Abstrakt

V příspěvku je analyzován test klínovým štípáním na zkušebních tělesech válcového tvaru, připravených z jádrových vývrtů odebraných z existujících konstrukcí. Numerická studie je provedena v rámci lineární elastické lomové mechaniky za použití konečnoprvkového systému ANSYS. Cílem příspěvku je analyzovat vliv rozměru a proporcí drážky pro vložení čelistí přenášejících do tělesa zatížení ze zkušebního zařízení na kritické hodnoty lomové mechanických parametrů (součinitel intenzity napětí a T-napětí) během experimentu.

Klíčová slova

Test klínovým štípáním, lomová mechanika, numerické simulace, jádrové vývrty, součinitel intenzity napětí, T-napětí.

Abstract

In this paper, what is known as wedge splitting test on a cylinder-shaped specimens is analyzed, i.e. the testing configuration utilizing specimens prepared from cores drilled from existing structures. The numerical study is performed in the framework of linear elastic fracture mechanics using finite element method system ANSYS. The aim of the presented contribution is to investigate the influence of the size and proportions of the groove for inserting loading platens on the critical values of the fracture parameters (stress intensity factor – SIF and T-stress) during the laboratory measurement.

Keywords

Wedge splitting test, fracture mechanics, numerical simulations, core drilled specimens, stress intensity factor, T-stress.

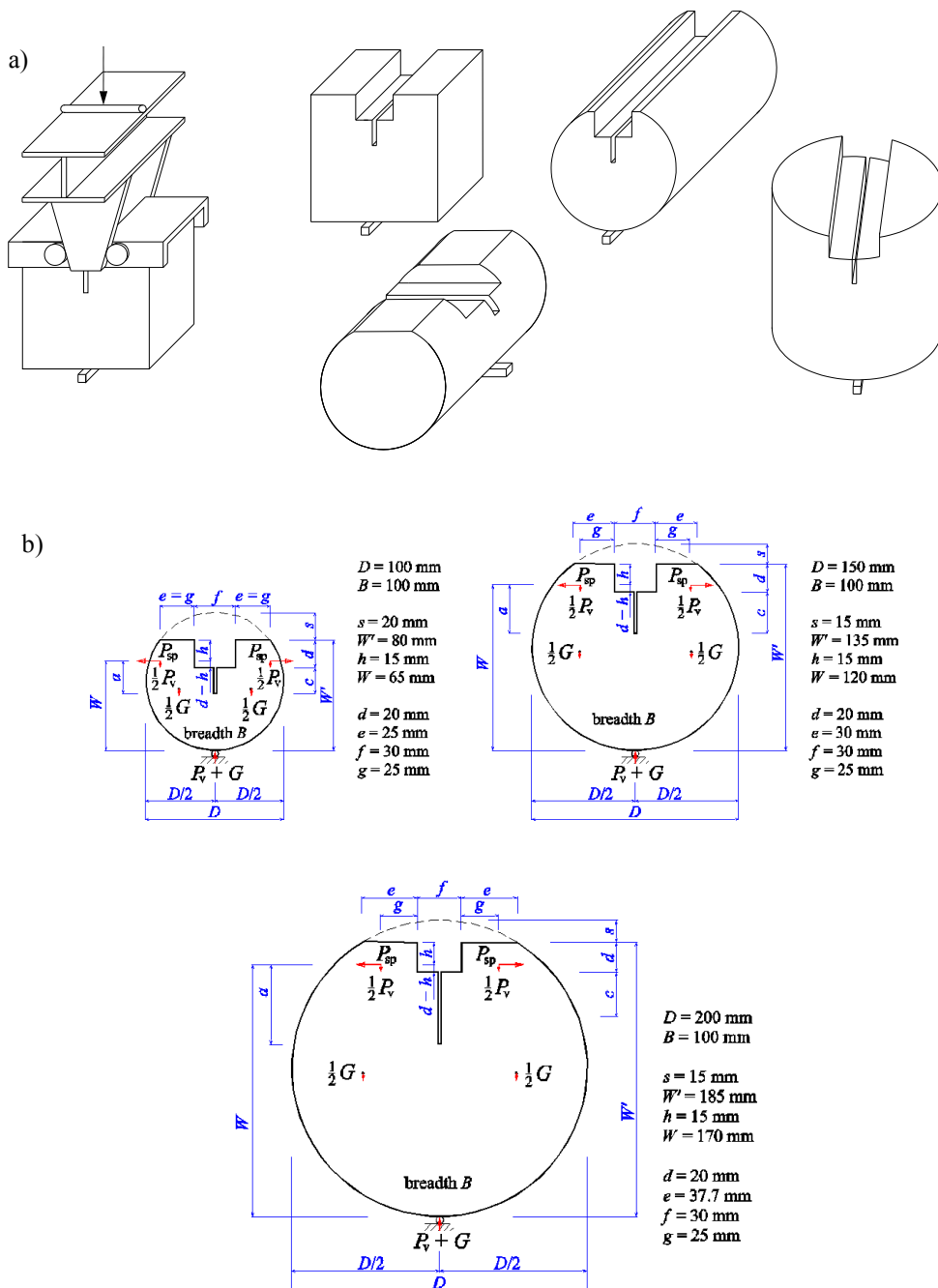
1 ÚVOD

V případě potřeby posouzení životnosti již existujících betonových konstrukcí je z hlediska jejich únosnosti vhodné odebrat vzorek z dílce/části konstrukce tak, aby vznikla v okolí odběrného místa co nejmenší koncentrace napětí. Provádějí se tedy jádrové vývrty, které jsou vhodné pro zjišťování materiálových parametrů (včetně lomově-mechanických) jedná se o zkušební tělesa s kruhovým průřezem. V případě určování lomových charakteristik se tato zkušební tělesa opatřují

¹ Ing. Stanislav Seitl, Ph.D., Ústav fyziky materiálů, Akademie věd České republiky, Žitkova 22, 616 62 Brno, tel.: (+420) 532 290 361, e-mail: seitl@ipm.cz

² Ing. Václav Veselý, Ph.D., Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, tel. (+420) 541 247 362, e-mail: vesely.v1@fce.vutbr.cz

³ Ing. Ladislav Řoutil, Ústav stavební mechaniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Veveří 331/95, 602 00 Brno, tel. (+420) 541 247 370, e-mail: routil.l@fce.vutbr.cz



Obr.1 – a) Test klínovým štípáním (Wedge splitting test) - konfigurace a příklady používaných zkušebních těles viz [7], b) Tvar a rozměry studovaných těles z jádrových vývrtů. Pozn.: délka trhliny a je měřena od průmětu bodu působíště zatěžující síly P_{sp} do roviny trhliny ke kořeni trhliny.

zářezem a drážkou pro uchycení zatěžovacích čelistí a následně se podrobují lomovým zkouškám, z nichž zkouška klínovým štípáním (wedge splitting test – WST) navržená v práci [7] a dále rozvinutá v [3] představuje velmi výhodnou alternativu. Zdůrazněme, že se jedná o test se stabilním růstem trhliny a jeho nespornou výhodou je použití relativně malého množství materiálu na rozdíl od

standardně užívaných testů jako jsou např. tříbodový nebo čtyřbodový ohyb trávce se zářezem (RILEM [9]).

Přes již rozsáhlé použití WST v materiálovém výzkumu (např. [21, 23, 25]) doposud nebyla provedena podrobná analýza vlivu okrajových podmínek WST tělesa s kruhovým průřezem na průběh lomu. Cílem příspěvku je za použití metody konečných prvků (MKP) analyzovat vliv velikosti průměru jádrových vývrtů (viz obr. 1) při stálém rozměru čelistní drážky na lomové mechanické parametry zjišťované pomocí zkoušky klínovým štípáním (WST). V této souvislosti poznamenejme, že velikost průměru odebíraného tělesa je třeba vhodně volit z hlediska poměru velikosti zrna kameniva a zkušebního tělesa, resp. délky ve zkušebním tělese existujícího ligamentu.

Tento příspěvek uceluje analýzu šíření trhliny ve vzorcích pro WST, a tedy navazuje na předchozí práce spoluautorů, které se zejména zaměřovaly zejména na WST tělesa ve tvaru krychle [10, 13, 14, 15, 17, 22].

2 ZÁKLADNÍ VZTAHY

Pole napětí v okolí kořene trhliny je v rámci příspěvku charakterizováno pomocí dvouparametrové lineárně elastické lomové mechaniky (DLELM) [1, 5]. DLELM rozšiřuje klasickou lomovou mechaniku tím, že bere v úvahu nejenom první, singulární člen Williamsova rozvoje [24], ale i jeho druhý, konstantní člen, který charakterizuje stísněnost (constraint) v okolí kořene trhliny. V případě, že trhlina je orientovaná podél osy x a r , θ jsou polární souřadnice s počátkem ve vrcholu trhliny, lze pro případ normálového namáhání působícího ve směru osy y (mód I) vyjádřit složky napětí v následující podobě:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) + T \delta_{1i} \delta_{1j}, \quad (1)$$

kde:

K_I – součinitel intenzity napětí,

T – T-napětí,

δ_{kl} – Kroneckerovo delta,

f_{ij} – tvarová funkce úhlu θ .

Poznamenejme, že T-napětí představuje složku napětí σ_{xx} působící rovnoběžně s povrchem trhliny, je nenulové pro normálové namáhání. Jak je uvedeno výše, T kvantifikuje velikost constraintu – záporná hodnota odpovídá malému constraintu a kladná hodnota T-napětí odpovídá vysokému constraintu.

Z praktických důvodů je výhodnější používat jako lomové charakteristiky bezrozměrné parametry. Pro součinitel intenzity napětí pro geometrii WST platí:

$$K_{norm} = \frac{K_I}{K_0}, \text{ přičemž } K_0 = \frac{P_{sp}}{B\sqrt{W}}, \quad (2)$$

kde:

P_{sp} – síla rozevírající trhlinu (splitting force),

B – tloušťka tělesa,

W – charakteristický rozměr WST tělesa.

Pro vyjádření hodnoty T-napětí zavedli Leever s Radonem [6] bezrozměrný parametr biaxiality:

$$B = \frac{T\sqrt{\pi a}}{K_I}, \quad (3)$$

kde:

a – délka trhliny, resp. počátečního zářezu (měřeno od průmětu bodu působíště zatěžující síly P_{sp} do roviny trhliny).

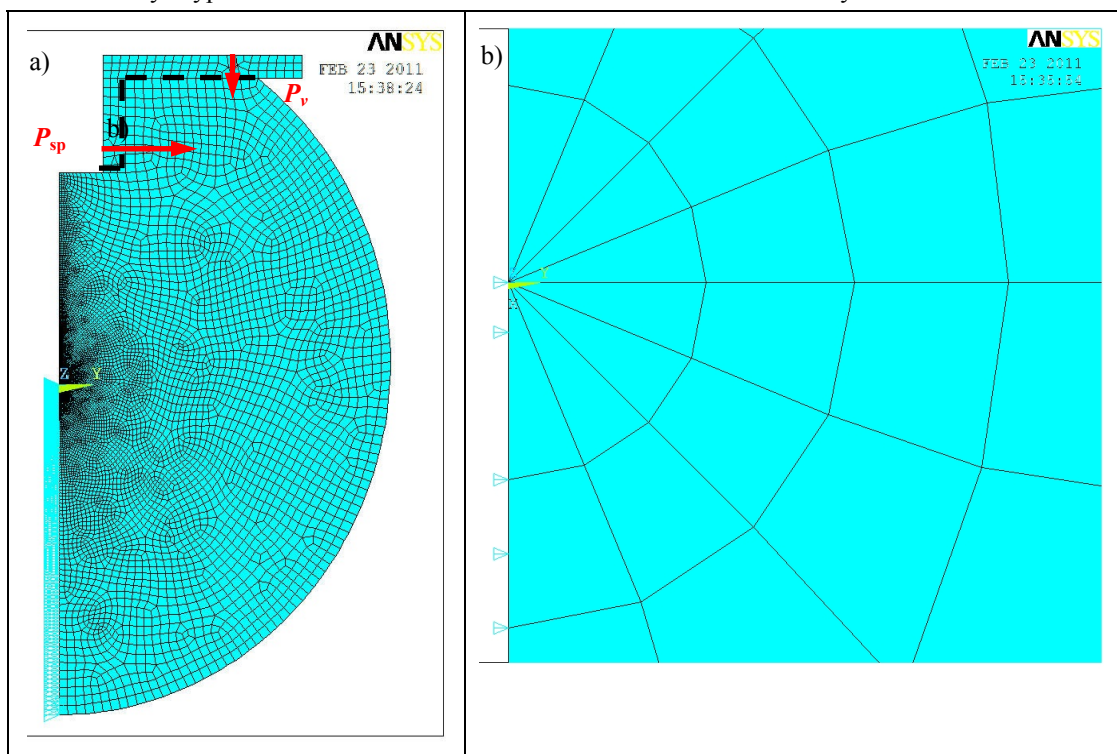
Poznamenejme, že hodnoty faktoru intenzity napětí jsou pro běžně používané geometrické konfigurace těles zpracovány parametricky, viz např. [5, 8, 19], pro WST [4]. Pro složitější reálné konstrukce je možno stanovit hodnoty K -faktoru pomocí metody konečných prvků nebo pomocí hraničních prvků [18]. Hodnoty charakterizující velikost constraintu jsou pro základní tělesa uvedeny např. v [5].

3 POPIS NUMERICKÉHO MODELU

3.1 Geometrie

MKP výpočty byly prováděny v programu ANSYS [2]. Pro studii byly použity výše uvedené WST konfigurace plánované pro určování hodnot lomové mechanických parametrů kompozitů se silikátovou maticí z jádrových vývrtů – viz obr. 1. Těleso bylo modelováno za podmínek rovinné deformace (2D) současně s ocelovými příložkami z důvodu zajištění odpovídajícího přenosu sil na studovaný model. Obr. 2 představuje typický výpočtový model studovaného tělesa, kontakt ocelové příložky a zkušební tělesa je v obrázku naznačen čárkovanou čarou. Modely byly připraveny pro tři průměry $D = 100, 150, 200$ mm s měnící se hloubkou/délkou trhliny a .

Jednotlivé modely obsahovaly okolo 10000 isoparametrických elementů – PLANE 82 s 6 nebo s 8 uzly. Typická velikost elementu v blízkosti vrcholu ostrého vrubu byla 4×10^{-3} mm.



Obr. 2 – MKP model WST – a) výpočtový model, včetně znázornění okrajových podmínek; b) detail MKP sítě v okolí kořene trhliny (použití trhlinového prvku)

3.2 Materiálové modely

Předpokládá se – při uvedené tloušťce tělesa ($t = 100$ mm) – stav rovinné deformace. Hodnoty materiálových charakteristik pro cementové kompozity mají při měření nezanedbatelný rozptyl. Ve

výpočtech byla uvažována hodnota Youngova modulu $E = 44$ GPa a Poissonova čísla $\nu = 0,2$. Materiálové parametry pružného izotropního kontinua pro příložky byly uvažovány o hodnotách $E = 210$ GPa a $\nu = 0,33$, tedy materiálové charakteristiky oceli.

3.3 Zatížení tělesa

Zatížení tělesa přenášené z čelistí zkušebního zařízení je rozloženo vlivem zatěžovacího klínu do dvou komponent: první označená P_{sp} působí na těleso v horizontálním směru a rozevívá trhlinu, druhá síla označená P_v je vertikální a přitlačuje zkušební těleso k podpoře na dolní straně tělesa. Vzájemná závislost sil P_{sp} a P_v je odvozena např. ve zprávě RILEM [9] a je dána vztahem:

$$P_v = P_{sp} k, \text{ přičemž } k = \frac{2 \tan \alpha_w + \mu_c}{1 - \mu_c \tan \alpha_w}, \quad (4)$$

kde:

α_w – úhel rozevívajícího klínu,

μ_c – značí koeficient tření v ložisku.

Poznamenejme, že koeficient tření v ložisku leží v intervalu (0,001; 0,005) a má tedy pouze nepatrný vliv na hodnoty součinitele intenzity napětí i constraintu [13]. Dále tedy síla vznikající třením v ložiscích nebude ve výpočtech uvažována. Použijeme-li standardní úhel rozevívajícího klínu $\alpha_w = 15^\circ$, pak závislost mezi silami lze vyjádřit následovně: $P_v = 0,5359 P_{sp}$.

3.4 Výpočet parametrů

Výpočet hodnot součinitelů intenzity napětí byl proveden pomocí příkazu KCALC, který je implementován v použitém výpočtovém systému ANSYS. Pro kontrolu byly hodnoty součinitelů intenzity napětí pro normálový mód vypočteny s použitím J-integrálu.

Hodnoty T-napětí byly získány s použitím speciálního trhlinového elementu s posunutým uzlem do jedné čtvrtiny délky jeho strany ([20], viz obr. 2):

$$T = -\frac{2E}{(1-\nu^2)l} \left[u^{(A)} - 4u^{(B)} + 2u^{(C)} \right], \quad (5)$$

kde:

E – Youngův modul [MPa]

ν – Poissonovo číslo [-]

l – délka elementu [mm],

$u^{(k)}$ – posuv uzlů na elementu [mm]; A značí uzel ve vrcholu trhliny, B posunutý uzel a C uzel na konci elementu.

Pro kontrolu správnosti výpočtu T-napětí byla použita také diferenční metoda, která vychází ze vztahu:

$$T = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{xx} - \sigma_{yy}). \quad (6)$$

Složky napětí σ_{xx} a σ_{yy} jsou vypočteny pro $\theta = 0$. Hodnota T-napětí pak byla získána extrapolací lineární části závislosti pro $r \rightarrow 0$. Obě použité metody poskytovaly prakticky stejné výsledky – rozdíly v hodnotách jsou v řádu jednotek procent.

4 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY

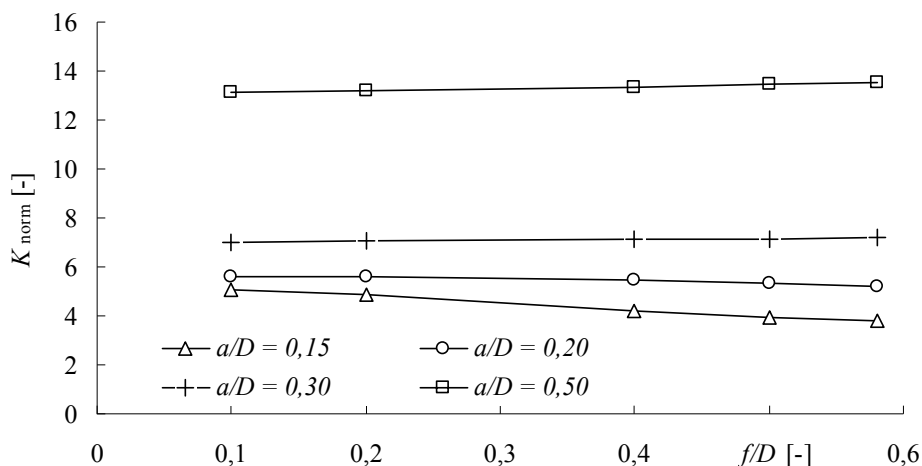
Získané výsledky z numerické studie WST provedené na válcových tělesech jsou rozděleny do dvou podkapitol. První se zabývá podrobnou studií vlivu šířky drážky pro aplikaci zatížení (na obr. 1 – označená jako f) na tělese se základním rozměrem jádrového vývrtu $D = 100$ mm. Snahou bylo pak zachytit všechny reálně možné případy pro daný poměr f/D . V druhé podkapitole pak jsou provedeny

podrobné studie pro šířku drážky pro aplikaci zatížení $f = 30$ mm pro tři používané průměry $D = 100, 150, 200$ mm.

4.1 Studie I – $D = 100$ mm, f nabývá hodnot od 0,1 do 0,6 D

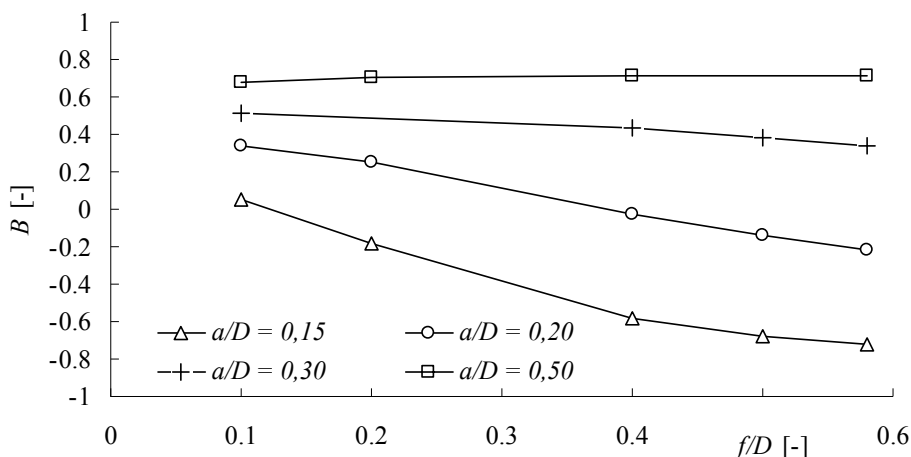
Dosažené výsledky jsou zobrazeny na obr. 3 a 4, kde jsou uvedeny normované hodnoty součinitele intenzity napětí K_{norm} (rov. (2)) a hodnoty parametru biaxiality charakterizující constraint B (rov. (3)) v závislosti na poměru f/D . Poznamenejme, že výsledky navazují na numerickou analýzu uvedenou v [11, 12, 16], kde byly provedeny základní studie na tělesech pro WST válcových tvarů a získané hodnoty byly porovnány s hodnotami lomové mechanických parametrů pro tvarově příbuzné CT (compact tension) vzorky.

Obr. 3 vyjadřuje závislost normované hodnoty součinitele intenzity napětí K_{norm} na poměru f/D , přičemž jsou zde uvedeny hodnoty pro jednotlivé relativní délky trhlin $a/D = 0,15; 0,20; 0,30; 0,50$. Z grafu je patrný pokles normovaných hodnot součinitele intenzity napětí K_{norm} s rostoucími hodnotami poměru f/D ; výrazný je především u těles s vyššími hodnotami a/D . Trend plynoucí ze závislosti na poměru a/D ukazuje, že pro delší zářezy klesá vliv studovaného koncentrátoru napětí (tj. rohu drážky) na průběh hodnot K_{norm} .



Obr. 3: Závislost součinitele intenzity napětí, vyjádřeného pomocí K_{norm} , na poměru f/D pro jednotlivé rozměry $a/D = 0,15; 0,20; 0,30; 0,50$.

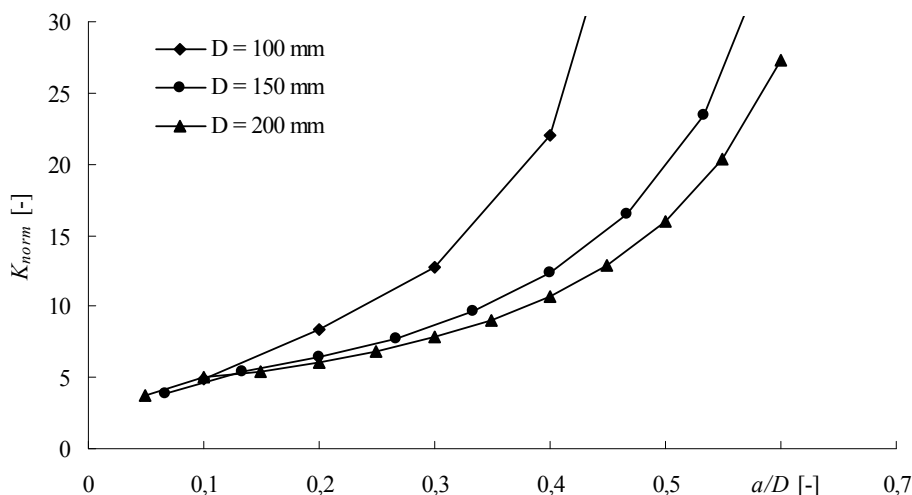
Na obr. 4. jsou vyneseny hodnoty pro T -napětí charakterizované bezrozměrným parametrem biaxiality B , v závislosti na poměru f/D pro jednotlivé poměry a/D . Trend křivek pro B je obdobný jako pro K_{norm} , zejména s rostoucí vzdáleností koncentrátorů (rohů drážky) od líců zářezu klesá jeho vliv na pole napětí v okolí kořene trhliny. Poznamenejme, že uvedený graf je obecně nezbytný při přenosu experimentálně zjištěných výsledků lomové houževnatosti z WST na reálné stavební konstrukce.



Obr. 4: Závislost T-napětí, vyjádřeného pomocí bezrozměrného parametru biaxiality B , na poměru f/D pro jednotlivé rozměry $a/D = 0,15; 0,20; 0,30; 0,50$.

4.2 Studie II – $D = 100, 150, 200$ mm, f je konstantní

Pro porovnání vlivu velikosti těles jsou na následujících obrázcích uvedeny normované hodnoty pro součinitel intenzity napětí a parametr biaxiality pro studované konfigurace při stálé velikosti čelistní drážky pro jednotlivé průměry vzorků $D = 100; 150; 200$ mm. Poznamenejme, že velikost čelistní drážky je $f = 30$ mm, tedy poměry f/D se mění a nabývá hodnot 0,3; 0,2; 0,15. Je zřejmé, že při zachování velikosti čelistní drážky pro všechny tři studované konfigurace jsou hodnoty lomových parametrů nejvíce ovlivněny touto okrajovou podmínkou v případě nejmenšího průměru zkušebního tělesa.

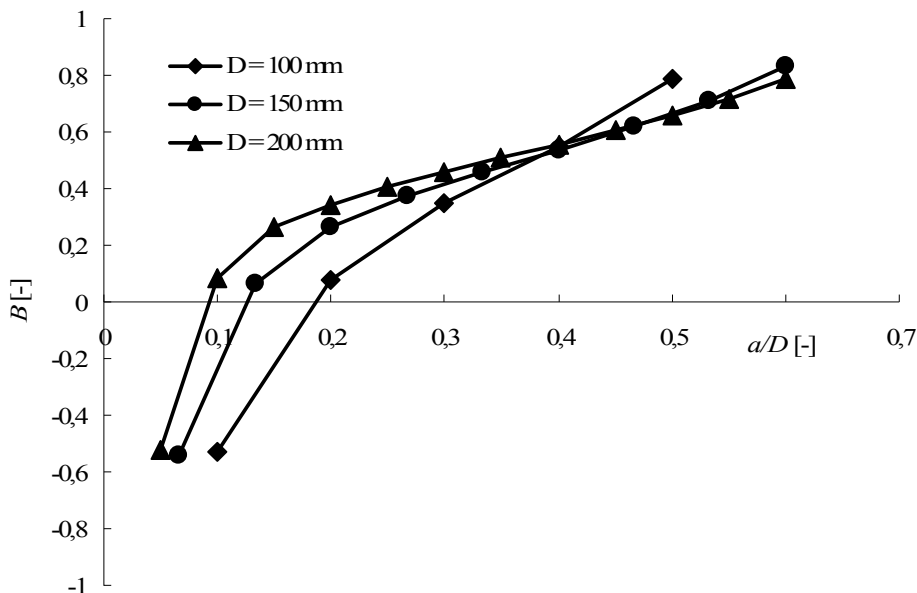


Obr. 5: Graf závislosti normované hodnoty součinitele intenzity napětí K_{norm} na relativní délce trhliny a/D

Poznamenejme, že pro přesnější stanovení hodnot lomové houževnatosti je výhodnější použít vzorky o větším průměru (křivka s nižším gradientem, viz obr. 5), kde chyba vyvolaná nepřesností

stanovení hodnoty délky trhliny neovlivňuje významněji výsledné hodnoty lomové houževnatosti. Při návrhu průměru jádrového vývrtu je třeba brát v úvahu také zvýšenou koncentraci napětí ve stavební konstrukci, vyvolanou odvtáním vzorku.

Na obr. 6 je opět uvedený graf, který je nezbytný při přenosu experimentálně zjištěných výsledků lomové houževnatosti na laboratorně malých tělesech ve studovaném případě z WST na reálné konstrukce. Hodnoty parametru biaxiality mají stejný trend – se zvětšujícím se průměrem D při stejné relativní délce trhliny jsou hodnoty do délky $a/D = 0,4$ vyšší, což znamená vyšší koncentraci napětí v okolí krátké iniciační trhliny.



Obr. 6: Graf závislosti bezrozměrného parametru biaxiality B na relativní délce trhliny a/D .

5 ZÁVĚR

V příspěvku je provedena numerická analýza pole napětí u vrcholu trhliny ve WST vzorku ve tvaru válce používaného při experimentálním stanovování lomové mechanických parametrů cementových kompozitů. Tento tvar WST tělesa je výhodný pro určování lomových parametrů materiálů stávajících konstrukcí, ze kterých může být odebrán ve formě jádrových vývrtů. Vyšetřoval se vliv blízkosti druhého možného singulárního koncentrátoru napětí, a to koutu drážky pro vložení přílozek přenášejících zatížení ze zkušebního zařízení do vzorku, na pole napětí v okolí kořene trhliny.

Vliv poměru f/D na hodnotu součinitele intenzity napětí je u uvažovaných vzorků zcela zanedbatelný, stanovené křivky závislosti K_{norm} na f/D se výrazně nemění. Pro v praxi nejčastěji se používaný poměr velikosti čelistní drážky k průměru zkušebního tělesa f/D , který leží intervalu (0,15; 0,3) jsou změny hodnot normovaného součinitele intenzity napětí zanedbatelné.

Vliv poměru f/D na hodnotu T-napětí se projevuje zejména u krátkých trhlín, kdy pole napětí okolo magistralní trhliny je ovlivněno blízkým koncentrátorem napětí (koutem čelistní drážky).

Prezentované kalibrační křivky ($K_{\text{norm}} - a/D$) budou používány v rámci metod pro určování lomově-mechanických parametrů cementových kompozitů (odpovídajících modelům ekvivalentní elastické trhliny a modelům kohezivní trhliny).

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek byl realizován za finančního příspěvní Grantových agentur ČR, projekty GA AV ČR č. KJB200410901 a GA ČR č. P105/11/1551.

LITERATURA

- [1] Anderson, T. L. *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*, Second Edition, CRC Press, 1995.
- [2] ANSYS *Users manual version 10.0 2005* Houston: Swanson Analysis System, Inc., 2005.
- [3] BRÜHWILER, E. & WITTMANN, F. H. The wedge splitting test, a new method of performing stable fracture mechanics test. *Engineering Fracture Mechanics*. 1990, 35, pp. 117–125.
- [4] GUINEA, G.V, ELICES, M & PLANAS, J. Stress intensity factors for wedge-splitting geometry. *International Journal of Fracture*. 1996, 81, pp. 113–124.
- [5] KNĚSL, Z. & BEDNÁŘ, K. Two parameter fracture mechanics: calculation of parameters and their values. Brno: IPM of the AS of the Czech Republic, 1997.
- [6] LEEVERS, P.S. & RADON, J.C. Inherent stress biaxiality in various fracture specimen geometries, *International Journal of Fracture*. 1983, 19, pp. 311–325.
- [7] LINSBAUER, H.N & TSCHEGG, E.K. Fracture energy determination of concrete with cube-shaped specimens. *Zement und Beton*. 1986, 31, pp. 38–40.
- [8] MURAKAMI, Y. & Co-editors, *Stress intensity factors handbook* Vol.1,2,3,4,5, The Society of Mat. Science & Elsevier Science, 1987–2001.
- [9] RILEM REPORT 5. 1991 *Fracture Mechanics Test Methods for Concrete*, Edited by S.P. Shah and A. Carpinteri, London: Hall, 1991.
- [10] ŘOUTIL, L., VESELÝ, V. & SEITL, S. Numerical study of wedge-splitting test on concrete specimens. In *Sborník konference Applied mechanics 2010*, J. Blekta (Ed.). Jablonec nad Nisou, April 19–24, 2010. TU Liberec, pp. 107–110, ISBN 978-80-7372-586-0.
- [11] SEITL, S. & VESELÝ, V., Wedge splitting test: Analýza vlivu proporcí válcového zkušebního tělesa na lomové parametry. In *Příprava, navrhovanie a realizácia inženiérskych staveb, konference CONECO*. Bratislava, 2011 (in press)
- [12] SEITL, S. Wedge splitting test: Numerická studie vlivu šířky drážky pro aplikaci zatížení na chování iniciační trhliny ve válcovém tělese. In *Modelování v mechanice 2011*. Ostrava. Ostrava: VŠB-TUO. 2011, (on CD).
- [13] SEITL, S., DYMÁČEK, P., KLUSÁK, J., ŘOUTIL, L. & VESELÝ, V. Two-parameter fracture analysis of wedge splitting test specimen. In *Proceedings of the 12th Int. Conf. on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, B.H.V. Topping, L.F. Costa Neves and R C. Barros (eds). Funchal, Civil-Comp Press, Stirling, UK: 2009.
- [14] SEITL, S., KLUSÁK, J., VESELÝ, V. & ŘOUTIL, L. Wedge-splitting test – determination of minimal starting notch length for various cement based composites. Part II: Crack and notch fracture mechanics approaches. *Key Engineering Materials*. 2011, Vols. 452-453, pp. 81–84.
- [15] SEITL, S., ŘOUTIL, L., VESELÝ, V. Numerical analysis of influence of own weight of wedge splitting specimen on constraint level at crack tip. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava*. 2009, číslo 1, ročník IX, řada stavební, článek č. 29, pp. 227–234.
- [16] SEITL, S., ŘOUTIL, L., VESELÝ, V. Numerical analysis of stress field for Wedge splitting geometry, *Applied Mechanics 2009*, Smolenice 6.-9.4. 2009, pp. 270-278
- [17] SEITL, S., VESELÝ, V., ŘOUTIL, L., Two parameter fracture mechanical analysis of a near-crack-tip stress field in wedge splitting test specimens, *Computer and structure* 2011 (in press)

- [18] SLADEK, J. & SLADEK, V. Evaluation of the elastic T-stress in three-dimensional crack problems using an integral formula, *International Journal of Fracture*. 2000, 101, p. L47–L52.
- [19] TADA, H., PARIS, P.C. & IRWIN, G.R. *The Stress Analysis of Cracks Handbook*. The American Society of Mechanical Engineers, New York: 2000.
- [20] TAN, C.L., WANG, X. The use of quarter-point crack-tip elements for T-stress determination in boundary element method analysis, *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70, pp. 2247–2252
- [21] TSCHEGG, E.K., JAMEKA, M. & LUGMAYR, R. Fatigue crack growth in asphalt and asphalt-interfaces. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011, (in press).
- [22] VESELÝ, V., ŘOUTIL, L. & SEITL, S. Wedge-splitting test – Determination of minimal starting notch length for various cement based composites. Part I: Cohesive crack modelling. *Key Engineering Materials*. 2011, Vols. 452-453, pp. 77–80.
- [23] WALTER, R., OSTERGAARD, R., OLESEN, J.F. & STANG, H. Wedge splitting test for a steel–concrete interface. *Engineering Fracture Mechanics*. 2005, 72, pp. 2565–2583.
- [24] WILLIAMS, M.L. On the stress distribution at the base of stationary crack. *ASME Journal of Applied Mechanics*. 1957, 24, pp. 109–114.
- [25] XIAO, J., SCHNEIDER, H., DONNECKE, C. & KONIG, G. Wedge splitting test on fracture behaviour of ultra high strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2004, 18, pp. 359–365.

Oponentní posudek vypracoval:

Ing. Martin Zajíček, Ph.D., Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 22, Plzeň.

Ing. Aleš Materna, Ph.D., Katedra materiálů, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze.