

VLIV KRITÉRIA PORUŠENÍ NA ODHAD TVARU A VELIKOSTI LOMOVÉ PROCESNÍ ZÓNY U CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ

INFLUENCE OF FAILURE CRITERION ON ESTIMATION OF SHAPE AND SIZE OF FRACTURE PROCESS ZONE IN CEMENTITIOUS COMPOSITES

Václav Veselý¹, Petr Frantík², Zbyněk Keršner³

Abstract

The paper is focused on selected aspects of estimation of the extent and shape of the fracture process zone accompanying the quasi-brittle fracture in cementitious materials. The zone is determined based on an amalgamation of multi-parameter fracture mechanics, equivalent elastic crack approach and cohesive crack approach. An influence of the failure criterion chosen for the fracture process zone evaluation and an influence of the accuracy of the stress field approximation in the cracked body are also investigated in the paper. Some recommendations for the procedure of determination of the fracture process zone in application to cementitious composites are proposed.

1 Úvod

Výpočetní nástroje pro analýzu, návrh a posouzení stavebních konstrukcí a prvků z kvazikřehkých materiálů se opírají o pokročilé teorie porušování, mezi něž pro případ porušení tahem patří nelineární lomová mechanika (pro přehled viz např. [1], [2], [3]). Chování modelů vycházejících z této teorie je determinováno sadou parametrů, jejichž hodnoty je třeba dostatečně spolehlivě určit či odhadnout, aby odezva těchto modelů odpovídala realitě. Nejpoužívanějšími nelineárními lomovými modely v oblasti numerické analýzy přetváření a porušování (železo)betonových stavebních konstrukcí jsou modely kohezivní trhliny. Stěžejním lomově-mechanickým parametrem těchto modelů je specifická lomová energie, a to zejména proto, že pro její experimentální určení existují doporučení – standardizované metody [4] – a v rámci dostupných softwarových prostředků pracujících s těmito modely (např. ATENA [5]) bývá obvykle jako vstup explicitně požadována. A to na rozdíl od dalších parametrů ovlivňující kvazikřehkou lomovou odezvu (pevnost v tahu, funkci tahového změkčení), jejichž přímé měření je technicky značně problematické.

Určování lomové energie je ovšem spojeno s mnoha zdroji nepřesností; nejdůležitějšími jsou vlivy velikosti a geometrie zkušebních těles. Tato problematika je autory článku zkoumána již delší dobu (např. [6], [7], [8]). V současnosti se zabývají možnostmi eliminovat tyto efekty prostřednictvím vztahení energie disipované během lomu v lomové procesní zóně (LPZ) vyvíjející se u čela makroskopické trhliny k objemu této zóny [9], [10]. Tento článek se soustředí na některé aspekty určování rozsahu a tvaru LPZ.

¹ Ing. Václav Veselý, Ph.D., VUT v Brně, FAST, Ústav stavební mechaniky, tel.: 541 147 362, e-mail: vesely.v1@fce.vutbr.cz

² Ing. Petr Frantík, Ph.D., VUT v Brně, FAST, Ústav stavební mechaniky, tel.: 541 147 376, e-mail: kitnarf@centrum.cz

³ doc. Ing. Zbyněk Keršner, CSc., VUT v Brně, FAST, Ústav stavební mechaniky, tel.: 541 147 362, e-mail: kersner.z@fce.vutbr.cz

2 Lomová procesní zóna

Pod pojmem lomová procesní zóna bývá míněna oblast před čelem makroskopické trhliny v kvazikřehkých materiálech, ve které dochází k různým procesům porušování vedoucím k tzv. tahovému změkčení, tj. postupnému snižování napětí v této zóně směrem k otevřeným lícům trhliny. Těmito mechanismy je disipována energie dostupná lomovému procesu. Tento jev bývá popisován skrze tzv. kohezivní zákon, tj. závislost napětí přenášeného mezi lící otevírající se trhliny (resp. pásu trhlin rozetřeného po určitém objemu kontinua) a otevřením této trhliny (resp. neelastickým poměrným přetvořením v daném objemu kontinua).

Lomovou procesní zónu nelze přímo srovnávat s plastickou zónou vyvíjející se u čela trhliny v materiálech s duktilním lomem (např. u kovů). Makroskopické chování materiálu v plastické zóně se popisuje spíše jako tečení či (nelineární) zpevnění a změkčení se u těchto materiálů neobjevuje. Proto také konstrukce zóny porušení u kvazikřehkých materiálů se liší od plastické zóny u materiálů tažných.

Podrobný popis určování odhadu LPZ je proveden v [9]. Zde pro osvětlení pouze uvedme, že do konstrukce takovéto LPZ vstupuje zmíněný kohezivní zákon a LPZ je tedy tvořena sjednocením plastické zóny pro aktuální vrchol trhliny a plastických zón vzniklých pro vrcholy trhliny odpovídající předcházejícím stádiím lomu (v tomto stádiu se jedná již o body na lících trhliny), pro které kohezivní napětí nabývá nenulových hodnot.

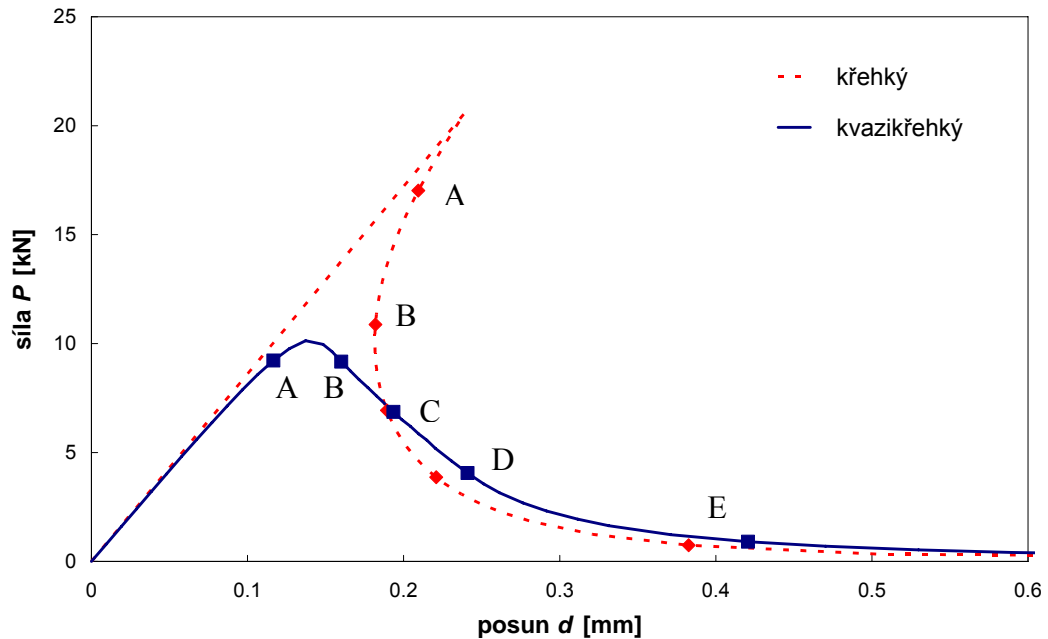
Plastická zóna pro libovolný vrchol trhliny je určována z podmínky porovnání charakteristické (srovnávací, ekvivalentní) hodnoty pole napětí v okolí vrcholu trhliny s tahovou pevností materiálu. Toto ekvivalentní napětí je určováno z aproximace pole napětí v tělese s trhlinou pomocí Williamsova mocninného rozvoje [11] a může zohlednit víceosou napjatost v bodech v blízkosti vrcholu trhliny (to v závislosti na použité podmínce porušení).

3 Numerická studie

Byla provedena numerická studie, která mapovala vhodnost použití různých podmínek porušení a vliv počtu členů Williamsova rozvoje použitého pro aproximaci pole napětí v tělese s trhlinou na tvar a velikost LPZ. V této studii se použily výsledky testů na trámčích se zářezem (zatěžovací diagramy, $P-d$ diagramy). Pro kvazikřehký materiál byl $P-d$ diagram nasimulován numericky za použití softwaru ATENA 2D [5] a pro porovnání byl také vytvořen $P-d$ diagram odpovídající ideálně křehkému materiálu. Zde se jedná o zkoušku tříbodově ohýbaného trámce o výšce $W = 0,32$ m (délka $L = 6W$, rozpětí $S = 5W$, tloušťka $B = W$) se zářezem o délce $a_0 = 0,032$ m. Detaily týkající se numerických simulací je možno nalézt v [6], [7], [8]. $P-d$ diagram pro ideálně křehký materiál byl vygenerován ze známé hodnoty houževnatosti G_c , která byla položena na úroveň hodnoty lomové energie vstupující do numerické simulace, čili $G_F = 93 \text{ Jm}^{-2}$. Zatěžovací diagramy jsou uvedeny v grafu na obr. 1.

Pro stanovení rozsahu plastických zón byla uvažována kritéria porušení [12], [13], ve kterých se tahová pevnost materiálu f_t porovnávala s:

- napětím otevírajícím trhlinu (označeno symbolem I);
- hlavním tahovým napětím (Rankinovo kritérium – symbol II);
- srovnávacím napětím vycházejícím z Misesovy podmínky porušení (III);
- srovnávacím napětím vycházejícím z Druckerovy-Pragerovy podmínky porušení (IV).



Obr. 1: Zatěžovací diagramy pro těleso z křehkého a kvazikřehkého materiálu

Pole napětí v tělese s trhlinou bylo aproximováno pomocí Williamsova rozvoje s použitím prvních až čtyř členů. Jejich hodnoty pro danou zkušební konfiguraci byly určeny z tabulek publikovaných v [14]. V této práci se porovnávají varianty s použitím pouze prvního členu (označeno číslem „1“ za symbolem označujícím použitou podmínku porušení) a prvních čtyř členů tohoto rozvoje (4).

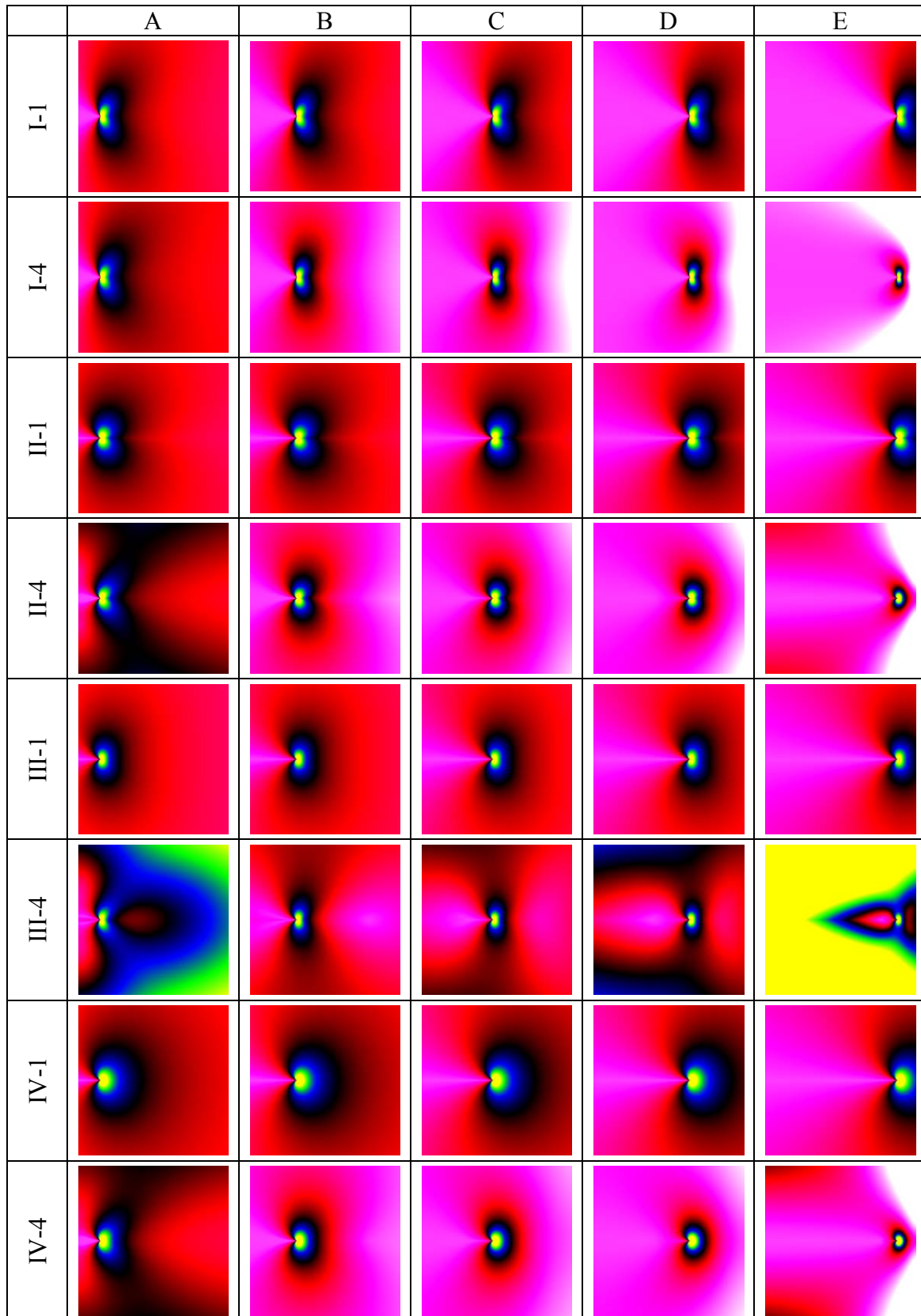
V tabulce na obr. 2 resp. 3 jsou zobrazeny plastické zóny pro výše uvedená kritéria porušení ve variantách s jedním a čtyřmi členy Williamsova rozvoje pro ideálně křehké resp. kvazikřehké zkušební těleso. Tyto zóny jsou vykresleny v pěti stádiích lomu A, B, C, D a E odpovídajících hodnotám relativní délky trhliny $\alpha = a/W$ rovným 0,15; 0,31; 0,48; 0,64 a 0,87. Tato stádia jsou vyznačena také v zatěžovacích diagramech na obr. 1.

V obr. 4 jsou vykresleny odhady LPZ odpovídající stádiím lomu A a D pro Rankinovo kritérium porušení s použitím čtyř členů rozvoje, a to ve dvou variantách. Ve variantě označené „basic“ je LPZ tvořena jako sjednocení plastických zón po délce trhliny, kde je kohezivní napětí různé od nuly. U varianty „scale“ je to provedeno stejně, avšak rozsah jednotlivých sjednocovaných plastických zón je zmenšován v měřítku relativní hodnoty kohezivního napětí σ_{koh}/f_t . Pro konstrukci LPZ byl použit kohezivní zákon z numerické simulace softwaru ATENA.

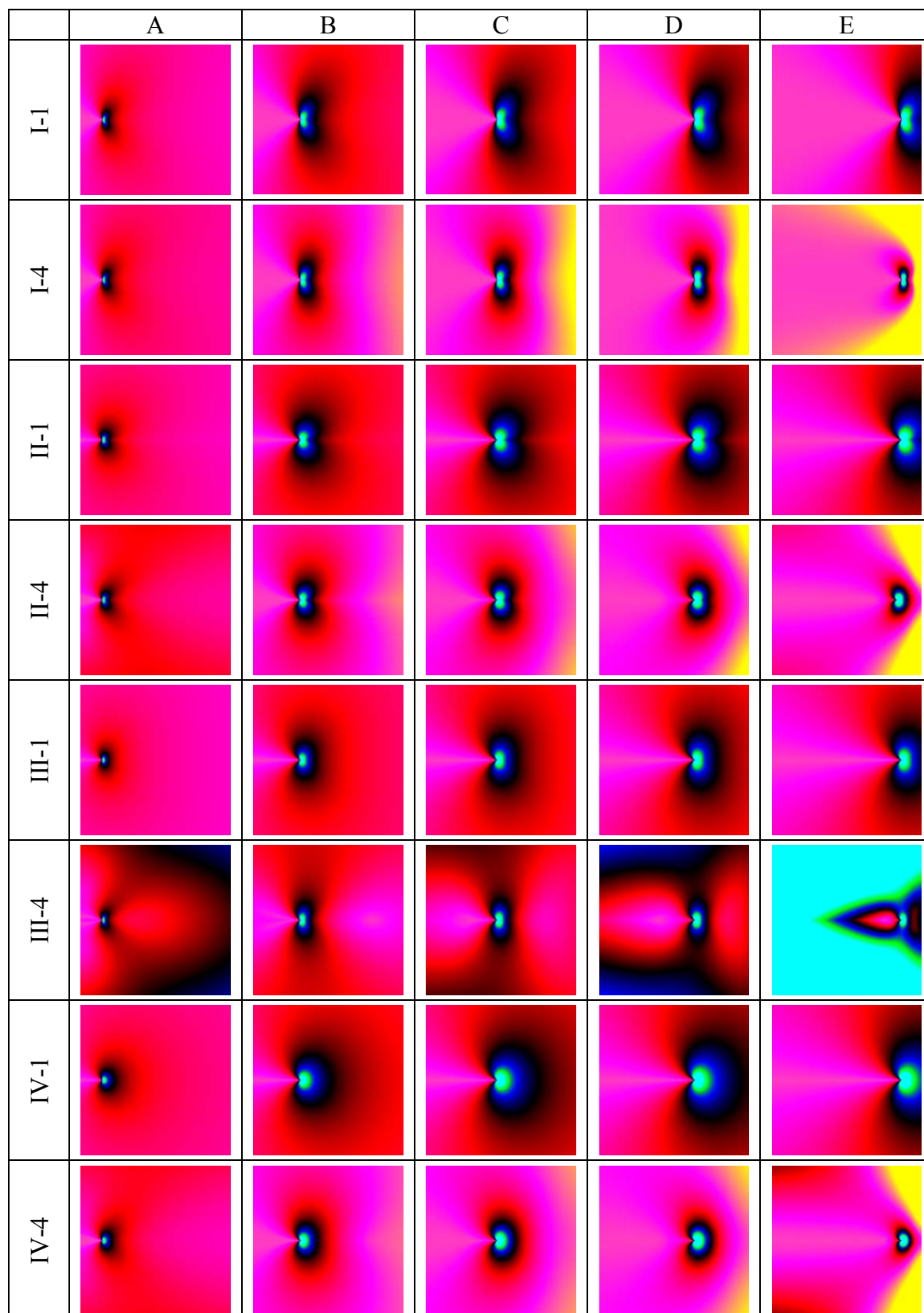
Obr. 5 porovnává tvar a velikost LPZ rekonstruovaných ve stádiích lomu C a E pro tři podmínky porušení a 4 členy Williamsova rozvoje. Pro stanovení těchto LPZ byla použita technika sjednocování plastických zón redukováných relativní hodnotou kohezivního napětí.

4 Diskuse výsledků

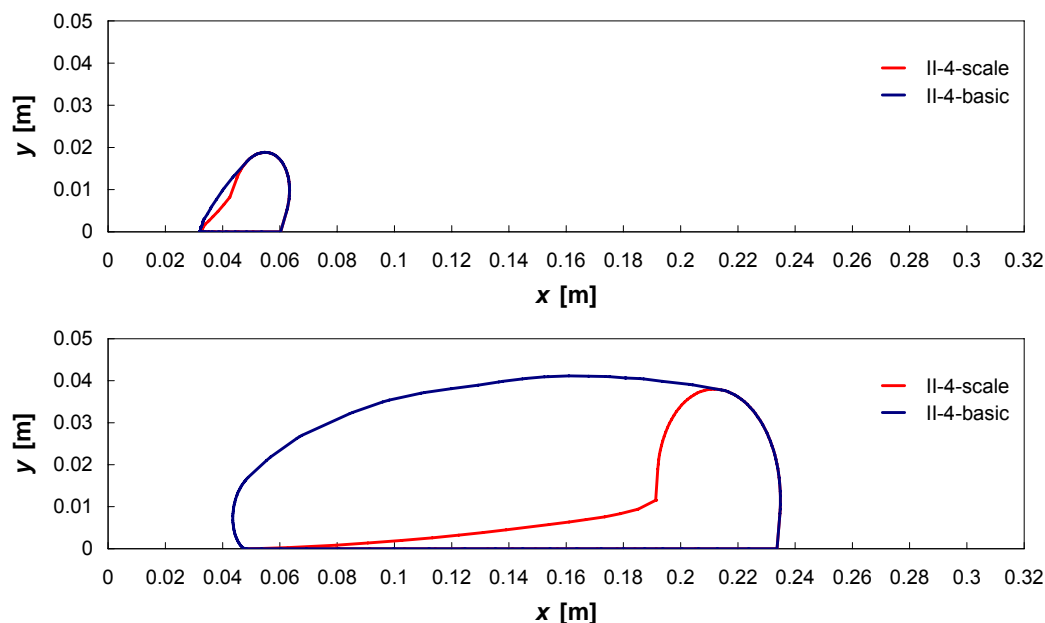
Z obr. 2 je pro všechny aplikované podmínky porušení patrné, že při použití jednoho členu Williamsova rozvoje pro aproximaci pole napětí v tělese s trhlinou se plastická zóna během lomu nemění. To odpovídá konstantní hodnotě G_c , pro kterou byl $P-d$ diagram odpovídající ideálně křehkému materiálu vytvořen. Pro lomový proces přibližující se k zadnímu povrchu tělesa (vpravo) je tato rekonstrukce nerealistická,



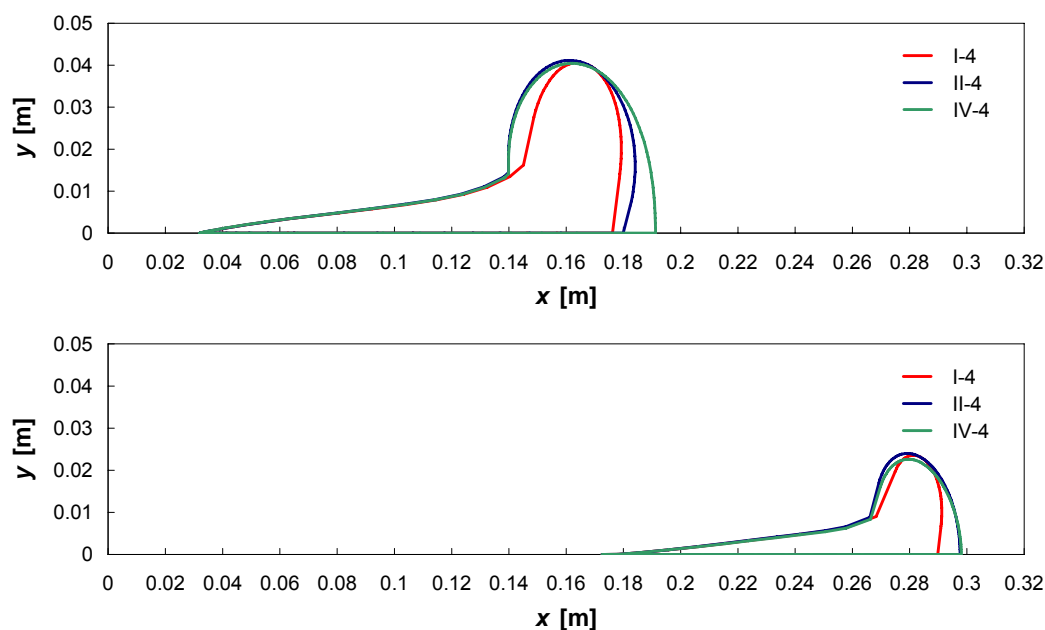
Obr. 2: Zobrazení plastické zóny (její hranice odpovídá černé barvě) během lomového procesu přes ligament ideálně křehkého tělesa při použití různých podmínek porušení a různých počtů členů Williamsova rozvoje pro aproximaci pole napětí v tělese s trhlinou



Obr. 3: Zobrazení plastické zóny (její hranice odpovídá černé barvě) během lomového procesu přes ligament kvazikřehkého tělesa při použití různých podmínek porušení a různých počtů členů Williamsova rozvoje pro aproximaci pole napětí v tělese s trhlinou



Obr. 4: Porovnání lomových procesních zón pro dvě metody sjednocování plastických zón při použití Rankinova kritéria porušení a čtyř členů Williamsova rozvoje – nahoře pro stádium lomu A, dole pro stádium D



Obr. 5: Porovnání lomových procesních zón pro tři kritéria porušení s uvažováním čtyř členů Williamsova rozvoje – nahoře pro stádium lomu C, dole pro stádium D

neboť plastická zóna vystupuje z tělesa. Při použití čtyř členů je již situace vystižena dobře, až na Misesovu podmínku, kdy je plastická zóna v některých krocích lomu neomezená.

Obdobně lze komentovat i obr. 3. Je zde patrný postupný nárůst plastické zóny a při použití 4 členů rozvoje i její postupné zmenšování na konci lomu. I v tomto případě se potvrzuje nevhodnost použití Misesova kritéria pro ohraničení zóny porušení kvazikřehkých materiálů. Zásadním důvodem je značný rozdíl hodnot tahové a tlakové pevnosti zkoumaného materiálu, se který Misesova podmínka nepočítá. V některých

oblastech na hranici LPZ se totiž nacházejí body ve stavu s hlavními napětími rozdílného znaménka a právě v oblasti tah–tlak Misesova podmínka přeceňuje srovnávací napětí odpovídající materiálům s rozdílnou hodnotou v tahu a tlaku.

Lomové procesní zóny vykreslené na obr. 4 mohou být nahlíženy jako krajní varianty rozsahu LPZ. Přestože rozdíl v jejich ploše je např. u stádia D markantní, stupeň disipace energie v oblasti tvořící jejich rozdíl je pravděpodobně velmi malý až zanedbatelný. Tato problematika je prozatím ve stádiu rozpracovanosti a vyžaduje další výzkum.

Z obr. 5 je patrné, že kritérium porušení porovnávající tahovou pevnost s napětím otevírajícím trhlinu, Rankinovo i Druckerovo-Pragerovo kritérium porušení poskytují podobné tvary a velikosti LPZ.

5 Závěr

V příspěvku byla představena studie vlivu uvažovaných kritérií porušení a přesnosti aproximace pole napětí v tělese s trhlinou na odhad tvaru a velikosti lomové procesní zóny vyvíjející se u čela trhliny při porušování/lomu kvazikřehkých materiálů. Ukazuje se, že vhodnými podmínkami porušení pro použití v rámci metody určování LPZ jsou například Rankinovo či Druckerovo-Pragerovo kritérium. Pro aproximaci pole napětí v tělese s trhlinou, rovněž vstupující do procedury určování LPZ, je nutné používat větší počet členů Williamsova rozvoje, oproti postupům běžným u klasické a dvouparametrové lomové mechaniky aplikované na kovové materiály. Jejich potřebný počet závisí na vzájemných relacích rozsahu LPZ a okrajů tělesa. Provedená studie ukazuje použití 4 členů jako dostatečné. Využití charakteristik LPZ se očekává v rámci metody pro určování lomově-mechanických parametrů kvazikřehkých materiálů pro specifikaci energie disipované uvnitř této oblasti.

Poděkování

Výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT, projekt IM0579, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS, a částečně za finančního přispění grantu GA ČR 103/07/1276.

Literatura

- [1] BAŽANT, Z. P., PLANAS, J. FRACTURE SIZE EFFECT IN CONCRETE AND OTHER QUASIBRITTLE MATERIALS, BOCA RATON: CRC PRESS, 1998
- [2] SHAH, S. P., SWARTZ, S. E., OUYANG, C. FRACTURE MECHANICS OF STRUCTURAL CONCRETE: APPLICATIONS OF FRACTURE MECHANICS TO CONCRETE, ROCK, AND OTHER QUASI-BRITTLE MATERIALS', NEW YORK: JOHN WILEY & SONS, INC., 1995
- [3] KARIHALOO, B. L. FRACTURE MECHANICS AND STRUCTURAL CONCRETE, NEW YORK: LONGMAN SCIENTIFIC & TECHNICAL, 1995
- [4] RILEM COMMITTEE FMT 50 DETERMINATION OF THE FRACTURE ENERGY OF MORTAR AND CONCRETE BY MEANS OF THREE-POINT BEND TEST ON NOTCHED BEAMS, *MATER. STRUCT.*, 18, 285–290, 1985
- [5] ČERVENKA, V. ET AL. ATENA PROGRAM DOCUMENTATION, THEORY AND USER MANUAL. PRAGUE: CERVENKA CONSULTING, 2005
- [6] VESELÝ, V., KERŠNER, Z., KNĚSL, Z. FRACTURE OF ADVANCED BUILDING MATERIALS: ASPECTS OF MODELLING, IN PROCEEDINGS OF 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING, MECHANICS AND COMPUTATION –

- RECENT DEVELOPMENTS IN STRUCTURAL ENGINEERING, MECHANICS AND COMPUTATION* (BOOK OF EXTENDED ABSTRACTS + DVD-ROM), CAPE TOWN, SOUTH AFRICA, 10–12 SEPTEMBER 2007. A. ZINGONI (ED.). ROTTERDAM: MILLPRESS SCIENCE PUBLISHERS, 241–242 + DVD 6 p., 2007
- [7] VESELÝ, V., ŘOUTIL, L., KERŠNER, Z. STRUCTURAL GEOMETRY, FRACTURE PROCESS ZONE AND FRACTURE ENERGY, IN: CARPINTERI AL., GAMBAROVA, P., FERRO, G., PLIZZARI, G. (EDS.), *FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES (PROC. FRAMCOS-6)*, CATANIA, ITALY. TAYLOR & FRANCIS/BALKEMA, VOL. 1, 111–118, 2007
- [8] ŘOUTIL, L., VESELÝ, V., KERŠNER, Z., SEITL, S., KNĚSL, Z. FRACTURE PROCESS ZONE SIZE AND ENERGY DISSIPATED DURING CRACK PROPAGATION IN QUASI-BRITTLE MATERIALS, IN: POKLUDA ET AL. (EDS.), *PROC. OF 17TH EUROPEAN CONGRESS ON FRACTURE – ECF 2008* (BOOK OF ABSTRACTS + CD-ROM), BRNO. VUTIUM, 97 + CD 8 p., 2008
- [9] VESELÝ, V., FRANTÍK, P., DEVELOPMENT OF FRACTURE PROCESS ZONE IN QUASI-BRITTLE BODIES DURING FAILURE, PŘIJATO DO KONFERENCE *ENGINEERING MECHANICS 2009*, SVRATKA, 2009
- [10] VESELÝ, V., FRANTÍK, P., KERŠNER, Z. CRACKED VOLUME SPECIFIED WORK OF FRACTURE, ODESLÁNO DO KONFERENCE *CIVILCOMP 2009*, MADEIRA, 2009
- [11] WILLIAMS, M. L. ON THE STRESS DISTRIBUTION AT THE BASE OF STATIONARY CRACK, *ASME JOURNAL OF APPLIED MECHANICS* 24, 109–114, 1957
- [12] JIRÁSEK, M., ZEMAN, J. PŘETVÁŘENÍ A PORUŠOVÁNÍ MATERIÁLŮ – DOTVAROVÁNÍ, PLASTICITA, LOM A POŠKOZENÍ, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, 2008
- [13] WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA – STRESS (MECHANICS), YIELD SURFACE, <http://en.wikipedia.org>.
- [14] KNĚSL, Z., BEDNÁŘ, K. TWO PARAMETER FRACTURE MECHANICS: CALCULATION OF PARAMETERS AND THEIR VALUES, IPM OF AS OF CZECH REPUBLIC, 1997