

INTERACTION OF CRACK AND AGGREGATE IN CONCRETE

Z. Keršner^{*}, L. Náhlík^{**}, Z. Knésl^{***}

Summary: *Concrete is represented as a two-phase material in this paper. Behaviour of a single macrocrack approaching to the interface between hardened cement paste (matrix) and aggregate (particle) is modelled. It is shown that if Young modulus of cement paste is greater than those of aggregates, the effective fracture toughness of concrete is predominantly given by fracture properties of aggregates.*

1. Úvod

Beton patří k velmi rozšířeným stavebním materiálům a jeho stálá obliba souvisí také s posledními trendy vývoje technologie tohoto cementového kompozitu, návrhem směsí pro dosahování vysokých pevností či vysokých/řízených užitečných vlastností. Sledování šíření trhlin s použitím metod lomové mechaniky v oblasti těchto materiálů a konstrukcí z nich může představovat značný přínos pro vývoj těchto kompozitů, zlepšení vybraných vlastností, odhalování vztahů mezi lomovými a mikrostrukturními parametry s výrazným ekonomickým dopadem – Karihaloo (1995), Bažant & Planas (1998).

Ke stanovování lomových charakteristik betonu lze užít zkoušku tříbodovým ohybem trámů s centrálním zářezem v tažených vláknech. Zaznamenává se závislost zatížení a průhybu uprostřed rozpětí, zatěžování se provádí s řízeným přírůstkem deformace. K typickému výstupu této zkoušky patří lomová houževnatost (resp. její efektivní hodnota), jež závisí na vlastnostech složek betonu, tj. zatvrdlé cementové pasty a kameniva, uspořádání zrn kameniva, jejich velikosti atd.

V příspěvku je v rámci lineární elastické lomové mechaniky numericky simulováno chování trhlin v betonu. Beton se uvažuje jako dvoufázové prostředí složené z matrice (cementová pasta) a z částic (kamenivo) a je modelován jako dvourozměrné kontinuum. V závislosti na délce trhliny, velikosti částice a materiálových parametrech obou složek jsou pro zvolené okrajové podmínky a zatěžování vypočteny metodou konečných prvků (systém MKP ANSYS) hodnoty faktoru intenzity napětí pro trhlínu šířící se v matrici v okolí částice. Mechanické vlastnosti cementové pasty a kameniva (Youngův modul pružnosti, Poissonovo číslo a lomová houževnatost) se mění v širokém rozsahu reálně možných hodnot.

* Ing. Zbyněk Keršner, CSc.: Ústav stavební mechaniky, FAST VUT v Brně; Veveří 331/95; 602 00 Brno; tel: +420.541 147 362; e-mail: kersner.z@fce.vutbr.cz

** Ing. Luboš Náhlík, Ph.D.: Ústav fyziky materiálů, Akademie věd ČR; Žižkova 22; 616 62 Brno; tel: +420.532 290 351; e-mail: nahlik@ipm.cz

*** Prof. RNDr. Zdeněk Knésl, CSc.: Ústav fyziky materiálů, Akademie věd ČR; Žižkova 22; 616 62 Brno; tel: +420.532 290 358; e-mail: knesl@ipm.cz

V případě, kdy je poměr modulů pružnosti kameniva a cementové pasty větší než jedna má trhlinka šířící se v blízkosti částice tendenci změnit směr šíření tak, že se šíří mimo tuto částici. V opačném případě se trhlinka šíří směrem k sledované částici, např. Lipetzky & Kněsl (1995), Náhlík (2004). Důsledkem této skutečnosti může v závislosti na velikosti lomové houževnatosti obou komponent dojít ke zlepšení (případně zhoršení) lomové mechanických vlastností betonu. Výsledky lze využít při návrhu betonových směsí. Oba dva případy mohou vést k návrhu složení betonu s lepšími užitnými vlastnostmi.

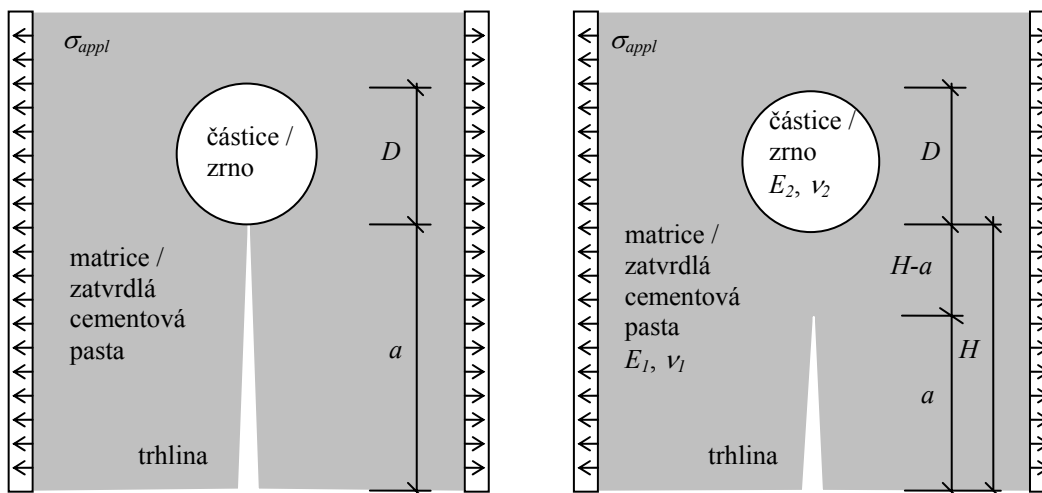
2. Trhlinka v dvoufázovém prostředí

Studiu chování trhlinky šířící se ve dvoufázovém prostředí matrice/částice bylo věnováno několik níže uvedených příspěvků autorů, včetně příspěvků v posledních ročnících konference Inženýrská mechanika. Šíření takové trhlinky je ovlivněno mnoha faktory, které souvisejí s geometrickým uspořádáním, velikostí částic a s materiálovými parametry obou složek. Významnou úlohu může hrát kvalita spojení mezi maticí a částicemi, prozatím byla vždy uvažována dokonalá adheze částice a matrice.

V předchozích pracích byla studována vzájemná interakce trhlinka-částice (Keršner et al., 2002a). Připomeňme, že základní mechanizmy, které se podílejí na zhouževňování betonu v souvislosti se vzájemnou interakcí trhlinka-částice, jsou procesy související s vychylováním makrotrhlinky z jejího původního směru, přemostování trhlinky částicemi a zachycení trhlinky na rozhraní matrice-částice. V uvedeném příspěvku byla vyšetřována konfigurace, kdy se vrchol trhlinky nachází na rozhraní matrice-částice, což může výrazně (kladně i záporně) ovlivnit hodnotu naměřené lomové houževnatosti. V případě, kdy je vrchol trhlinky uchycen na rozhraní matrice-částice, rozhodují o tom, zda se trhlinka bude šířit přes částici (tj. zda se zrno kameniva rozlomí) elastické konstanty obou složek i lomově-mechanické vlastnosti částice. Výsledné napětí nutné k rozlomení zrna kameniva (a tím i ke skokové změně velikosti trhlinky) může být větší nebo menší než je odpovídající napětí pro šíření makrotrhlinky v matici samotné. Toto kritické napětí pro lom kameniva a tedy i pro další šíření makrotrhlinky závisí v nejjednodušším případě na pěti materiálových parametrech. Čtyři z nich, tj. elastický modul matrice a částice a Poissonovo číslo matrice a částice určují efektivní napětí v matici v okolí částice s trhlinkou a pátý parametr, lomová houževnatost částice (kameniva) pak určuje, zda k vlastnímu rozlomení zrna kameniva při dané konfiguraci a zatížení dojde či nikoli (Keršner et al., 2002b). Vlivem velikosti částic na hodnotu kritického napětí se zabývá článek Náhlík et al. (2003).

V příspěvku Keršner et al. (2003) bylo konstatováno, že vzhledem ke struktuře studovaných materiálů (matrice – cementová pasta, částice – kamenivo) nejsou hodnoty materiálových parametrů známy s dostatečnou přesností; pro hodnocení jejich vlivu na výsledné měřené veličiny byly tyto veličiny modelovány jako náhodné, zadané středními hodnotami, proměnlivostí (směrodatná odchylka, variační koeficient) a typem pravděpodobnostního rozdělení. Bylo tak možno posoudit vliv možného statistického rozptylu v hodnotách vstupních parametrů na výsledné kritické napětí potřebné pro rozlomení částice (statistická analýza), jakož i vliv proměnlivosti vstupních veličin na proměnlivost kritického napětí (citlivostní analýza).

V předkládaném příspěvku je pozornost soustředěna na situaci, kdy se trhlinka délky a nachází v matici (zatvrdlé cementové pastě) a šíří se k částici (zrno kameniva) o průměru D , která leží v matici ve vzdálenosti H od povrchu – viz Obrázek 1.



Obrázek 1 Model částice kameniva v zatvrdlé cementové pastě – situace studovaná v příspěvcích Keršner et al. 2002a,b, 2003 (vlevo) a v předkládaném příspěvku.

3. Deterministický výpočtový model

Vyšetřujeme-li šíření trhliny matricí, lze využít klasickou lineární elastickou lomovou mechaniku (LELM), která je formulována právě pro popis těles s trhlinou a jejíž základní úlohou je stanovit, zda a jak se za daných podmínek bude trhlina šířit. Připomeňme, že základní pojmy a definice LELM vycházejí z předpokladu rozložení napětí v okolí vrcholu trhliny, s dostatečnou přesností charakterizovaného výrazem typu

$$\sigma_{ij} = K_I / \sqrt{2\pi r} f_{ij}(\varphi) \quad (1)$$

kde (r, φ) jsou polární souřadnice s počátkem ve vrcholu trhliny, K_I je hodnota faktoru intenzity napětí (omezíme se na normálový mód) a f_{ij} je známá funkce polárního úhlu φ .

Podstatným rysem je singulární závislost napětí na vzdálenosti od vrcholu trhliny typu $1/\sqrt{r}$. Trhlinu můžeme tedy chápat jako singulární koncentrátor napětí s exponentem singularity $1/2$. Kritická hodnota faktoru intenzity napětí je lomová houževnatost K_{Ic} a nejjednodušší a také nejužívanější kritérium stability trhliny v LELM má tvar

$$K_I < K_{Ic}. \quad (2)$$

Faktor intenzity napětí, lomová houževnatost, hnací síla trhliny a tedy i uvedené kritérium stability trhliny jsou definovány právě pro tento případ singularity a pokud je exponent singularity odlišný od $1/2$ (typicky pro trhlinu na rozhraní dvou materiálů) ztrácejí svůj význam, případně je nelze definovat vůbec – viz např. Knésl et al. (1998, 2001), Keršner et al. (2002a).

Hodnota faktoru intenzity napětí $K_I(\sigma_{appl})$ pro zadané vnější aplikované zatížení byla určena numericky pomocí MKP systému ANSYS (Ansys v. 6.1, 2002). Při výpočtu byla částice modelována jako kruhová inkluze o průměru D , viz Obrázek 1. Pro zjednodušení předpokládáme, že můžeme zanedbat interakci vrcholu trhliny s ostatními částicemi. Jak již bylo zmíněno, předpokládá se ideální adheze částice/matrice.

4. Vstupní veličiny modelu

Jak již bylo uvedeno, vstupními materiálovými veličinami modelu jsou elastické parametry E , ν v zatvrdlé cementové pasty (E_1, ν_1) a kameniva (E_2, ν_2) – viz Tabulka 1.

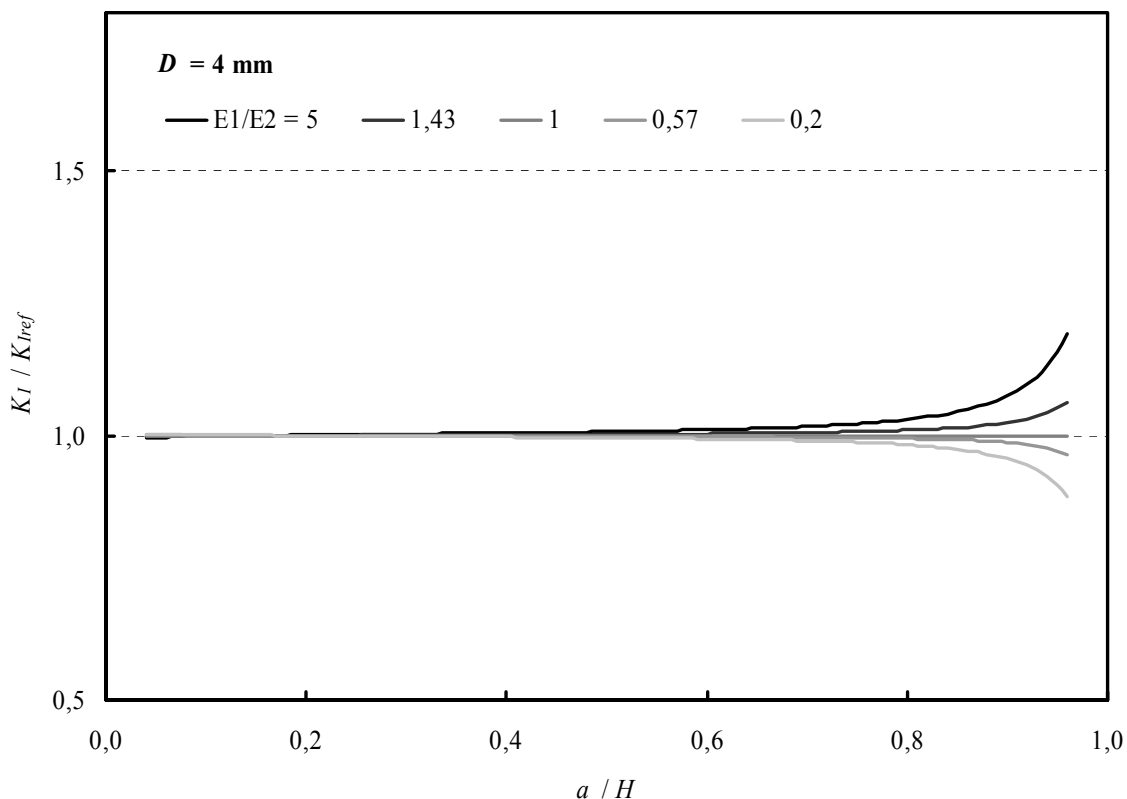
Tabulka 1 Uvažované vstupní veličiny modelu

Veličina	Symb.	Jednotka	Uvažované hodnoty
Modul pružnosti matrice	E_1	GPa	35 (zatvrdlá cementová pasta)
Modul pružnosti částice	E_2	GPa	20 (pískovec), 35 (pasta), 50 (žula)*
Poissonovo číslo matrice	ν_1	–	0,3
Poissonovo číslo částice	ν_2	–	0,3

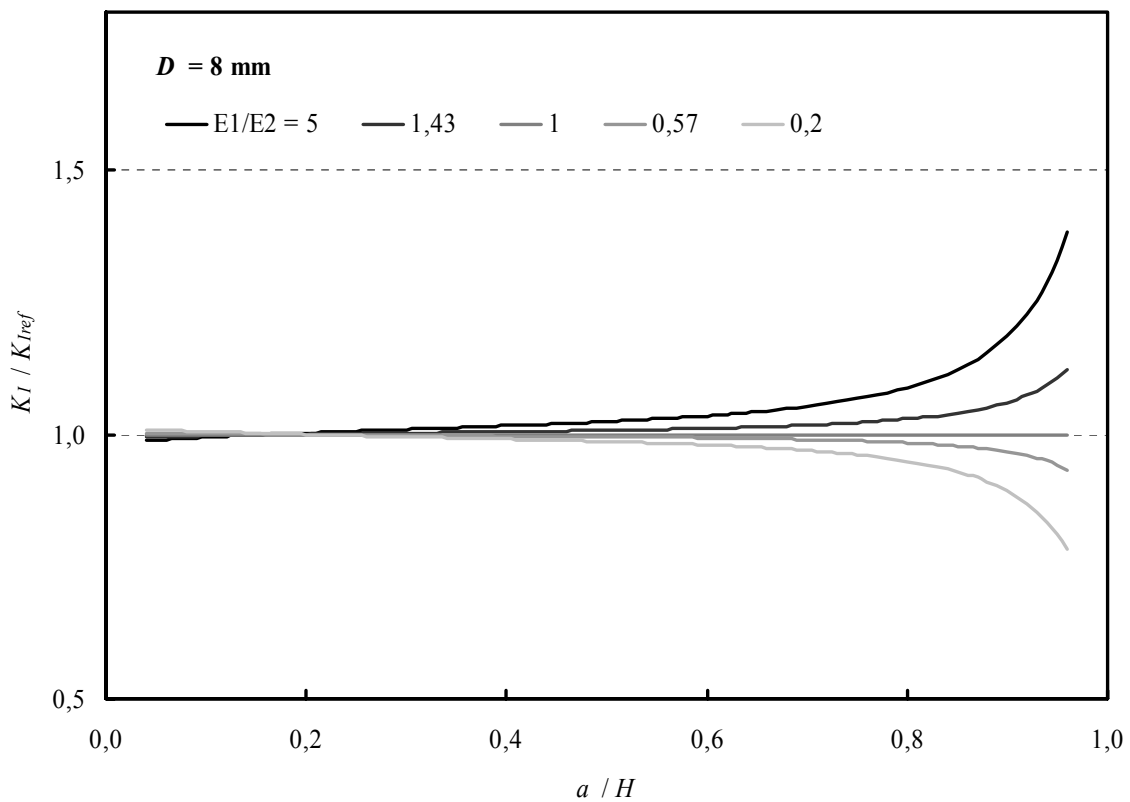
* dále jsou uvažovány hodnoty 175 GPa (5 x 35) a 7 GPa (35 / 5) – násobky odvozené ze střední hodnoty modulu pružnosti matrice

5. Výsledky

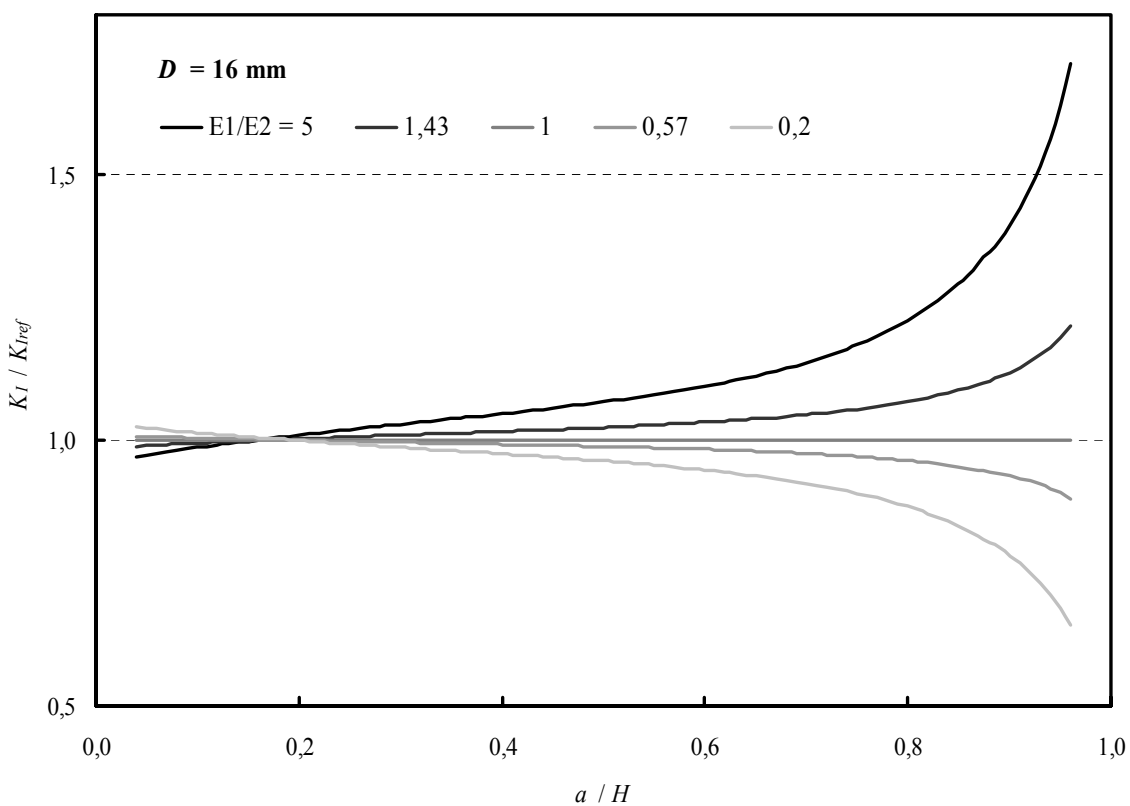
Výsledky jsou obsaženy v následujících grafech. Na Obrázcích 2 až 4 lze nalézt závislosti faktoru intenzity napětí K_I (normovaných referenčními hodnotami K_{Iref} pro částici se stejnými elastickými konstantami jako matrice) na délce trhliny a (normovanou vzdáleností H částice od povrchu) – pro průměry částice $D = 4, 8$ resp. 16 mm. Poznamenejme, že závislosti byly získány výpočtem na modelu konečného tělesa, v případě polonekonečného tělesa lze výsledky uvedené na Obrázcích 2 až 4 vhodně normovat velikostí částice D .



Obrázek 2 Faktor intenzity napětí vs. délka trhliny – $D = 4$ mm.



Obrázek 3 Faktor intenzity napětí vs. délka trhliny – D = 8 mm.



Obrázek 4 Faktor intenzity napětí vs. délka trhliny – D = 16 mm.

6. Diskuse a závěr

Hodnota efektivní lomové houževnatosti betonu je výsledkem celé řady vzájemně závislých a mnohdy protichůdných jevů. Klíčovým krokem pro pochopení alespoň některých z nich je studium chování magistrální trhliny šířící se v betonu v okolí kameniva. O výsledném chování trhliny v takovém případě rozhodují zejména materiálové parametry (včetně lomově-mechanických parametrů) obou fází. V příspěvku je modelována interakce trhliny šířící se v zatvrdlé cementové pastě s kamenivem v rámci předpokladů lineární lomové mechaniky. Jako model je použita geometrie odpovídající vzorku pro tříbodový ohyb. Interakce mezi trhlinou a částicí kameniva je explicitně vyjádřena pomocí změny hodnot faktoru intenzity napětí v závislosti na elastických parametrech (Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo) obou materiálových složek. Je studován případ magistrální trhliny šířící se matricí v blízkosti jediné částice kameniva (modelované jako kruhová inkluze). Studie Náhlík (2004) ukazuje, že v případě, kdy jsou částice tužší než cementová pasta (tj. v našem případě $E_2 > E_1$) má šířící se trhlina tendenci míjet částice, v opačném případě ($E_1 > E_2$) bude trhlina částicí přitahována. O tom, jak velká je zóna, ve které je chování takovou interakcí ovlivněno, rozhodují v případě použitého modelu zejména materiálové charakteristiky obou komponent. Velikost interakce mezi trhlinou a částicí lze v rámci lomové mechaniky kvantifikovat hodnotami faktoru intenzity napětí, tj. v našem případě hodnotami K_I . Výsledky presentované na Obrázcích 2 až 4 indikují v případě tužší matrice ($E_1 > E_2$) nárůst odpovídajících hodnot faktoru intenzity napětí v případě trhliny s vrcholem blížícím se ke kamenivu. Z tohoto hlediska existují tedy dva základní typy konfigurace trhlina-kamenivo v betonu. V jednom případě jsou trhliny přitahovány kamenivem a výslednou konfigurací je trhlina s vrcholem na rozhraní. Tyto konfigurace převládají v případě, že cementová pasta je tužší než kamenivo ($E_1 > E_2$). V druhém případě jsou to trhliny šířící se mimo částice. Na výslednou hodnotu efektivní lomové houževnatosti bude mít největší vliv ta konfigurace, při které dojde nejnáze k dalšímu šíření trhliny vedoucí v závěrečné fázi ke konečnému lomu. Z tohoto hlediska jsou nebezpečné směsi složené z velkých částic kameniva, které jsou méně tuhé než cementová pasta (tj. $E_1 > E_2$) a přitom mají menší hodnotu lomové houževnatosti K_{IC} než cementová pasta. V těchto případech se může často vyskytovat konfigurace trhliny ukotvené na kamenivu a při zvětšení hodnoty aplikovaného namáhání může dojít k snadnému rozlomení částice kameniva a tím poměrně velkému nárůstu hodnoty faktoru intenzity napětí pro sledovanou trhlinu. Pokud tato hodnota přesáhne hodnotu lomové houževnatosti K_{IC} cementové pasty, může dojít i k finálnímu dolomení tělesa. Při stejných materiálových parametrech je poněkud výhodnější směs s menší velikostí kameniva, kde není nárůst hodnot faktoru intenzity napětí vyvolaný dolomením kameniva tak velký. Lepší vlastnosti pak bude mít kompozit, kde je hodnota lomové houževnatosti kameniva větší než u cementové pasty. V takovém případě zůstávají trhliny ukotvené na částicích kameniva, což bylo studováno dříve, např. Keršner et al. (2002b). V případě, kdy je cementová pasta tužší než částice kameniva, lze v betonu nalézt konfigurace odpovídající spíše trhlinám šířícím se mimo kamenivo a o hodnotě efektivní lomové houževnatosti opět rozhodují více lomové parametry cementové pasty. Vliv částic kameniva pak působí na zhouževnatění betonu tím, že trhlina se nešíří přímo.

Z uvedeného rozboru je patrné, že modelování betonu jako dvoufázového kontinua a studium zákonitostí šíření magistrální trhliny v takovém prostředí přináší výsledky, které lze bezprostředně využít pro odhad vlivu jednotlivých materiálových parametrů (E , ν , K_{IC} obou složek) na výsledné užité vlastnosti sledovaného kompozitu.

7. Poděkování

Práce na tomto příspěvku byly podporovány z prostředků projektů GA ČR 103/03/1350, GA ČR 106/04/P084, GA AV K2076106 a výzkumného záměru CEZ: J22/98: 261100009.

8. Literatura

- ANSYS, Users Manual (2002) Version 6.1, Swanson Analysis System, Inc., Houston, Pennsylvania.
- Bažant, Z. P. & Planas, J. (1998) Fracture and Size Effect in Concrete and other Quasibrittle Materials, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Karihaloo, B. L. (1995) Fracture mechanics of concrete. Longman Scientific & Technical, New York.
- Keršner, Z., Náhlík, L. & Knésl, Z. (2002a) Lomová procesní zóna betonu: interakce trhliny – kamenivo. *CD sborník Inženýrská mechanika 2002*, Svratka, 10.
- Keršner, Z., Náhlík, L. & Knésl, Z. (2002b) Analýza interakce kamenivo-trhliny z hlediska lomových charakteristik betonu. *Beton*, 5, 40-43.
- Keršner, Z., Náhlík, L. & Knésl, Z. (2003) Beton jako dvoufázový materiál: statistická a citlivostní analýza lomu. *CD sborník Inženýrská mechanika 2003*, Svratka, 9.
- Knésl Z., Knápek A. & Bednář K. (1998) Evaluation of the critical stress in bonded materials with a crack perpendicular to the interface. *Proc. Int. Conf. Surface Modification Technologies XI*. (T. S. Sudarshan, M. Jeandin & K. A. Khor eds), The Institute of Metals, London, 153-159.
- Knésl, Z., Náhlík, L. & Keršner, Z. (2001) Calculation of the critical stress in two-phase materials. *Proc. Int. Conf. Structural Engineering, Mechanics and Computation SEMC 2001*, Cape Town, 737-744.
- Lipetzky P. & Knésl Z. (1995) Crack-particle interaction in a two-phase composite. Part II: crack deflection. *International Journal of Fracture*, 73:1, 81-92.
- Merchant, I. J., Macphee, D. E., Chandler, H. W., Henderson R. J. (2001) Toughening cement-based materials through the control of interfacial bonding. *Cement and Concrete Research*, 31, 1873-1880.
- Náhlík, L. (2004) Crack trapping in the interface between matrix and inclusion. *Proc. Int. Conf. on Computational & Experimental Engineering and Sciences ICCES'04*, Madeira (in print).
- Náhlík, L., Keršner, Z. & Knésl, Z. (2003) Modelování dvoufázového prostředí: vliv tvaru a velikosti částic. *Sborník Modelování v mechanice 2003* (J. Brožovský & I. Kološ eds), Fakulta stavební VŠB-TUO, Ostrava, 112-117.