

INFLUENCE OF INTERFACIAL TRANSITION ZONE OF CEMENT PASTE–AGGREGATE ON CRACK PROPAGATION: FINITE ELEMENT MODELLING

Z. Keršner*, L. Náhlík**, Z. Knésl**

Summary: *Concrete is represented as a three-phase material in this paper. Behaviour of a single macrocrack approaching to the interface between hardened cement paste (matrix) and aggregate (particle) is modelled and interfacial transition zone is taken into account. Results of these analyses are useful for description of fracture behaviour of macrocrack propagation with respect to material parameters of matrix, interfacial transition zone and particle. FEM is used in this study.*

1. Úvod

Beton patří k nejpoužívanějším stavebním materiálům. Jde o kompozit značně heterogenní, jehož vlastnosti jsou primárně ovlivňovány vlastnostmi složek – zatvrdlé cementové pasty a plniva (kameniva). Ukázalo se však, že důležitou úlohu hraje také přechodová zóna mezi pastou a zrnem kameniva (tzv. *interfacial transition zone*, ITZ).

Z hlediska lomového chování se beton řadí mezi tzv. kvazikřehké materiály (Karihaloo 1995, Bažant & Planas 1998). Pro popis tohoto chování je nezbytné vyšetřovat také jeho odpor proti šíření trhlin. V řadě případů je pro popis šíření makrotrhliny v betonu klíčovou konfigurací situace, kdy se vrchol trhliny nachází na rozhraní matrice–částice, resp. částice–matrice. V těchto případech není možno použít standardních kritérií lineárně elastické lomové mechaniky a do modelování je nutno zahrnout i vliv rozdílnosti materiálových parametrů obou složek (Knésl et al. 1998, Keršner et al. 2002). Pro popis trhliny v tomto případě mohou být navíc rozhodující vlastnosti rozhraní mezi oběma složkami, zejména pak existence přechodové zóny mezi maticí a kamenivem, která v dosavadních pracích nebyla uvažována.

V příspěvku je beton modelován jako 3 fázové prostředí, sestávající ze zatvrdlé cementové pasty (matrice) a kameniva (částice), včetně zmíněné přechodové vrstvy ITZ. Výsledky analýzy takto modelovaného betonu umožňují popsat lomové chování makrotrhliny šířící se v tomto prostředí v závislosti na materiálových parametrech jednotlivých složek. Výpočty jsou realizovány MKP a pro reálná materiálová data matrice, ITZ a částice jsou presentovány relevantní výsledky. Získané poznatky mohou přispět k lepšímu porozumění procesů souvisejících s lomovým chováním betonu.

* doc. 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., prof. RNDr. Zdeněk Knésl, CSc.: Ústav fyziky materiálů, Akademie věd ČR; Žižkova 22; 616 62 Brno; tel: +420.532 290 351, 358; e-mail: nahlik@ipm.cz, knesl@ipm.cz

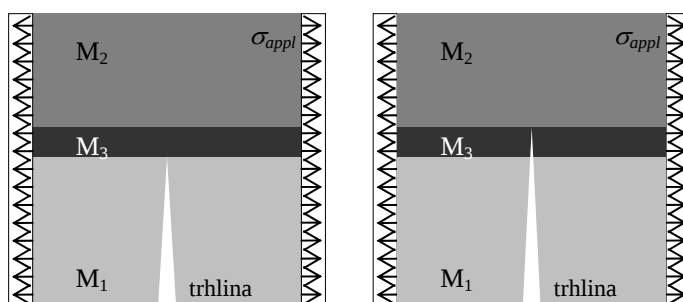
2. Přechodová zóna mezi pastou a zrnem kameniva, model trhliny na rozhraní

Bylo již zmíněno, že důležitou úlohu hraje u vlastností a chování betonu přechodová zóna mezi zatvrdlou cementovou pastou a zrnem kameniva (ITZ). Nejruznější aspekty této problematiky jsou v posledních dekádách celosvětově studovány a modelovány – viz např. nejnovější State-of-Art Maso ed. (2005) či Šmilauer (2005). V předkládané studii se věnuje pozornost modelování trhliny na rozhraní zatvrdlá cementová pasta a ITZ, jakož i na rozhraní ITZ a zrno kameniva, přičemž je využito zjednodušení na obr. 1. Poznamenejme, že rozhraní se uvažuje jako ideální (dokonalá adheze).

Výpočtový model byl vytvořen s využitím MKP programu ANSYS (2001). Vzhledem k velkým rozdílům v tloušťce přechodové vrstvy a materiálu zatvrdlé cementové pasty či kameniva (až 1:1000) obsahoval model řádově stovky tisíc elementů (typicky 300 000–500 000), což umožňuje dostatečně přesně popsat napětí v tenké přechodové vrstvě. Vzhledem ke skutečnosti, že zobecněný faktor intenzity napětí byl určován pomocí tzv. přímé metody, musela být síť dostatečně jemná v ITZ před vrcholem trhliny, aby bylo možno kvantifikovat singularitu napětí, která se zde nachází. Tento fakt si vyžádal další značné lokální zjemnění sítě přímo před vrcholem trhliny.

Vzhledem k cílům studie byly vyšetřovány dvě konfigurace trhliny na rozhraní. První konfigurace odpovídá trhlíně šířící se v matici v okamžiku, kdy se její vrchol nachází na rozhraní matice–ITZ (viz obr. 1 vlevo). Druhý případ odpovídá situaci, kdy trhlina prošla ITZ a zastavila se na rozhraní ITZ–částice (viz obr. 1 vpravo). V obou těchto případech je následkem skokové změny materiálových vlastností fází modifikován typ singularity napětí v okolí vrcholu trhliny. Tato skutečnost znemožňuje přímou aplikaci standardních postupů lomové mechaniky pro vyjádření kritického napětí nutného pro přechod trhliny přes rozhraní mezi materiály – viz např. Knésl et al. (1998), Keršner et al. (2003). Konečným cílem numerické analýzy je posoudit vliv existence ITZ na šíření makrotrhliny v betonu.

Pro každou z uvedených konfigurací byly nejprve vypočteny hodnoty zobecněného faktoru intenzity napětí a následně určena odpovídající kritická napětí pro materiálové konstanty všech tří složek (viz tab. 1.) a různé tloušťky ITZ.



Obrázek 1 Model studovaných situací trhliny na rozhraní.

Tabulka 1 Vstupní parametry modelu.

Materiál	Modul pružnosti [GPa]	Lomová houževnatost [MPa.m ^{1/2}]	Poissonovo číslo [–]
Zatvrdlá cementová pasta (M ₁)	20; 40	1,00	0,21
Přechodová zóna ITZ (M ₂)	5; 10; 15; 20; 30; 40	0,25; 0,50; 0,75; 1,00	0,21
Částice kameniva – žula (M ₃)	80	1,80; 6,30	0,21

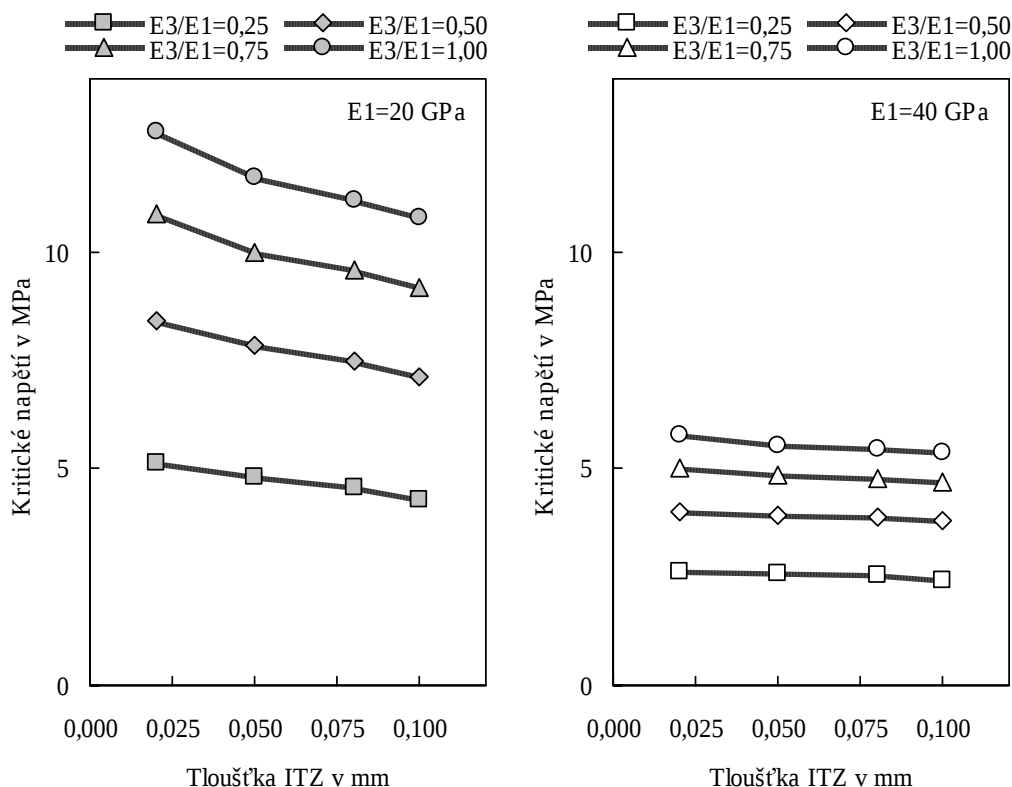
3. Výsledky modelování a jejich diskuse

V prezentovaném příspěvku jsme se soustředili na oblast modelování šíření makrotrhliny v betonu a na její možnou interakci s částicemi kameniva. Tradičně je beton studován jako dvoufázové prostředí složené z částic kameniva a zatvrdlé cementové pasty. Většina numerických modelů navíc předpokládá mezi kamenivem a pastou ideální adhezi, např. Knésl (1998), Keršner (2002). Tento předpoklad však neodpovídá skutečné struktuře betonu a navíc se ukazuje jako limitující pro modelování celé řady souvisejících jevů (např. šíření trhliny v rozhraní mezi částicí a maticí).

Je všeobecně známo, že existence přechodové vrstvy mezi maticí a kamenivem může mít na chování betonu podstatný vliv a to jak v makroskopickém měřítku tak i v mezo oblasti. Přechodová oblast reprezentuje nejslabší článek spojující pastu a kamenivo a její vlastnosti mohou ovlivňovat řadu důležitých aspektů určujících makroskopické chování betonu. Pro popis vlastností přechodové zóny, případně studium jejího vlivu na vlastnosti betonu se modeluje beton jako třífázové prostředí (matrice, přechodová vrstva, kamenivo). V literatuře existuje dostatek poznatků popisujících vlastnosti přechodové zóny z různých hledisek a problematika vlivu zóny na vlastnosti betonu je intenzivně studována. Všeobecně je přijímáno i tvrzení, že přechodová vrstva výrazně ovlivňuje dráhu trhliny. Menší pozornost (pokud vůbec) je však věnována vlivu přechodové zóny na chování trhliny ukotvené na rozhraní vrstva–matrice (příp. kamenivo). S cílem popsat vliv mechanických vlastností přechodové zóny na velikost kritického napětí při šíření trhliny napříč kamenivem byl navržen zjednodušující model přechodové vrstvy (obr. 1). I když tento model neuvažuje skutečný tvar částic, umožňuje na základě získaných výsledků kvalitativně posoudit vliv vlastností přechodové vrstvy na lomově-mechanické chování trhliny. Následně lze pak získané výsledky použít pro sledování vlivu struktury betonu na hodnoty lomové houževnatosti. Pro výpočet kritického napětí je ve všech případech použit postup podle Knésl (1998), Keršner (2002), který umožňuje zahrnout do úvah vliv změny v singularitě napětí v okolí kořene trhliny v důsledku skokové změny materiálových vlastností.

První studovaná konfigurace odpovídá trhlíně s vrcholem na rozhraní mezi maticí a přechodovou vrstvou (obr. 1 vlevo). Byla provedena parametrická studie vlivu materiálových vlastností přechodové vrstvy na kritické napětí nezbytné pro šíření trhliny z matrice do přechodové vrstvy. Základní výsledky jsou uvedeny na obr. 2. Řídící veličiny pro růst trhliny z rozhraní matrice–vrstva jsou poměry odpovídajících elastických parametrů E_3/E_1 a lomová houževnatost vrstvy K_{Ic3} . Vlastnosti částice kameniva nejsou v tomto případě rozhodující, i když, zejména pro velmi tenké přechodové vrstvy, mohou výsledky kvantitativně ovlivnit. Poznamenejme, že $E_3/E_1 = 1,0$ odpovídá případu, kdy má vrstva stejné materiálové vlastnosti jako matrice, což odpovídá modelu dvoufázového prostředí bez přechodové vrstvy. Výsledky ukazují, že ve všech případech dochází s poklesem poměru E_3/E_1 i k poklesu kritického napětí (ve srovnání s případem bez vrstvy). Tento pokles je vyvolán jednak snížením hodnot lomové houževnatosti vrstvy ve srovnání s maticí z hodnoty $1,0 \text{ MPa m}^{1/2}$ na $0,25 \text{ MPa m}^{1/2}$ a jednak zvýšením rozdílu mezi materiálovými vlastnostmi vrstvy a matrice, který je charakterizován poměrem E_3/E_1 . Porovnání obr. 2 vlevo a vpravo ukazuje, že pro stejné poměry E_3/E_1 vede zvýšení velikosti E_1 matrice z hodnoty 20 GPa na 40 GPa (při konstantní hodnotě E_2) k výraznému snížení kritického napětí. Obecným rysem přechodové vrstvy, která souvisí s jejími materiálovými charakteristikami, je tedy skutečnost, že trhlina šířící se v matici pronikne snáze přechodovou vrstvou až na rozhraní vrstva–částice, než v případě neexistence přechodové vrstvy (obr. 2, srovnání křivky

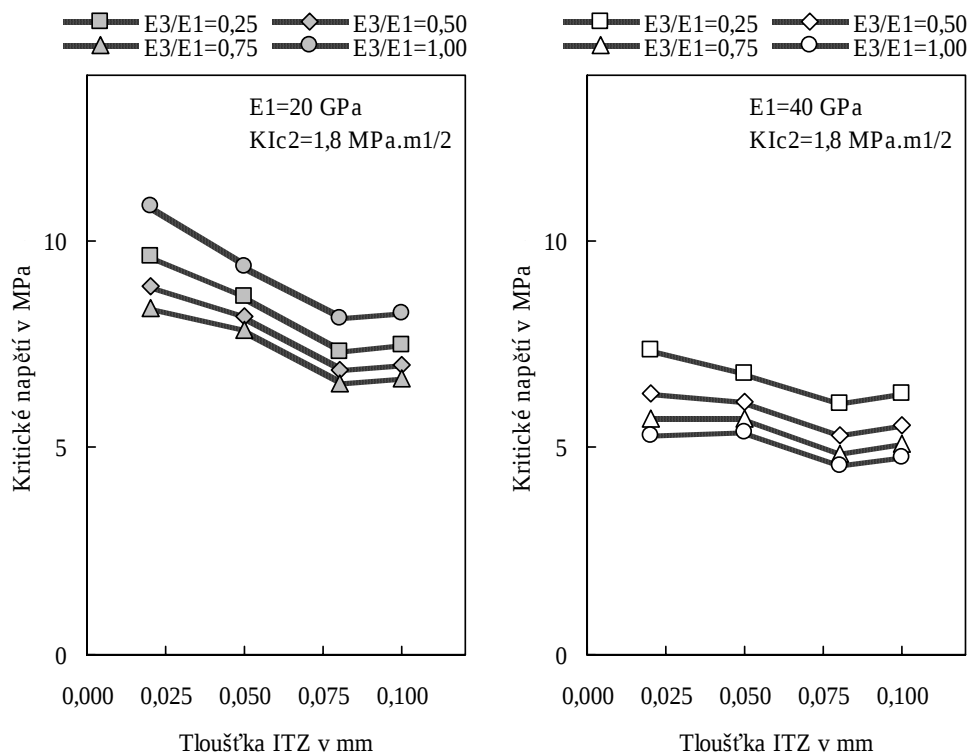
$E_3/E_1 = 1,0$ s ostatními). Konfigurace trhliny ukotvené na povrchu částice se bude vyskytovat častěji. Velikost tloušťky přechodové vrstvy přitom nehraje dominantní roli.



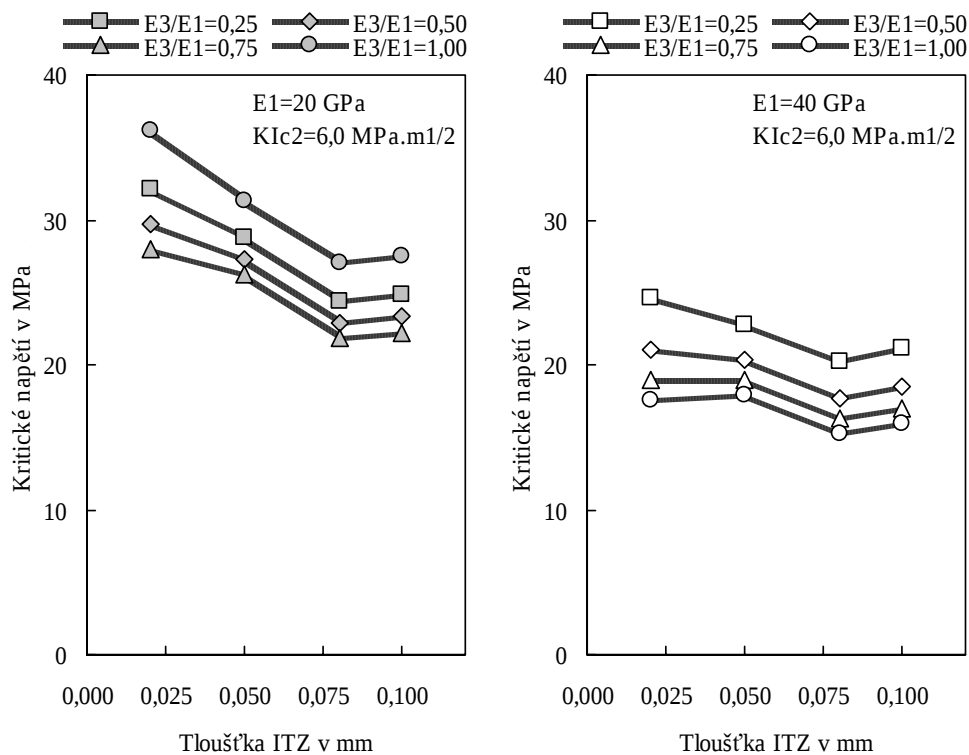
Obrázek 2 Trhlina na rozhraní M_1/M_3 : Kritické napětí vs. tloušťka ITZ pro různé poměry E_3/E_1 a dvě hodnoty E_1 . Lomová houževnatost ITZ vždy odpovídá číselně poměru E_3/E_1 .

V případě, kdy trhlina projde přechodovou oblastí a zastaví se s vrcholem na rozhraní vrstva–částice (obr. 1 vpravo), je vliv tloušťky vrstvy na hodnoty kritických napětí výraznější (obr. 3, 4), a to zejména v případech menších hodnot E_1 matrice, což lze vysvětlit skutečností, že v tomto případě bude vrstva, v závislosti na své tloušťce, více či méně ovlivňovat otevření trhliny. Srovnání výsledků uvedených na obr. 3 a 4 jasně ukazuje na dominantní roli velikosti lomové houževnatosti kameniva. Tento závěr však platí obecně a není přímo spjat existencí přechodové vrstvy. Podstatné však je, že vlivem změkčení přechodové vrstvy (vzhledem k matici i částici) zde dochází k nárůstu kritického napětí ve srovnání s případem, kdy přechodová vrstva neexistuje. Tento fakt má za následek tendenci trhliny zůstat zakotvenou na rozhraní vrstva–částice i pro větší hodnoty aplikovaného namáhání (než v případě bez vrstvy). Navíc, pokud je lomová houževnatost vrstvy dostatečně malá, lze pak předpokládat, že trhlina nebude růst přes částici, ale začne se šířit v přechodové vrstvě podél částice. Zda tento jev vede ke zvýšení nebo ke snížení lomové houževnatosti nelze obecně rozhodnout.

Výsledky byly získány pomocí numerického modelu dle obr. 1. Vzhledem k charakteru řešeného problému lze však předpokládat, že i v případě modelování skutečného tvaru kameniva zůstanou tyto závěry kvalitativně nezměněny.



Obrázek 3 Trhlina na rozhraní M_3/M_2 : Kritické napětí vs. tloušťka ITZ pro různé poměry E_3/E_1 a dvě hodnoty E_1 . Hodnota $K_{Ic2} = 1.8 \text{ MPa m}^{1/2}$ odpovídá minimální hodnotě K_{Ic} žuly.



Obrázek 4 Trhlina na rozhraní M_3/M_2 : Kritické napětí vs. tloušťka ITZ pro různé poměry E_3/E_1 a dvě hodnoty E_1 . Hodnota $K_{Ic2} = 6.3 \text{ MPa m}^{1/2}$ odpovídá maximální hodnotě K_{Ic} žuly.

4. Závěr

V příspěvku byl beton modelován jako 3 fázové kontinuum, sestávající ze zatvrdlé cementové pasty, přechodové vrstvy a částice kameniva. Výsledky numerické analýzy MKP takto modelovaného betonu umožnily popsat lomové chování makrotrhliny šířící se v tomto prostředí v závislosti na materiálových parametrech jednotlivých složek. Obecně lze uzavřít, že existence přechodové vrstvy snižuje tendenci trhliny šířit se přes částice kameniva. V závislosti na hodnotě lomové houževnatosti přechodové vrstvy se pak trhlina může snáze šířit podél částice.

5. Poděkování

Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT, projekt 1M6840770001, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS, výzkumného záměru AV 0Z 204 105 07 a grantového projektu GA ČR 106/04/P084.

6. 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. (2002) Analýza interakce kamenivo-trhlina z hlediska lomových charakteristik betonu. *Beton*, 5, 40-43.
- 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.
- Maso, J. C. (ed.) (2005) Interfacial Transition Zone in Concrete. *RILEM Report*, Taylor & Francis Group, 0-203-63109-9.
- Náhlík, L., Keršner, Z. & Knésl, Z. (2005) Influence of degradation of hardened cement paste on fracture behaviour of concrete. *CD sborník Inženýrská mechanika 2005*, Svratka, 6.
- Šmilauer, V. (2005) *Elastic Properties of Hydrating Cement Paste Determined from Hydration Models*. Disertační práce, FSv ČVUT v Praze.