



INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005

NÁRODNÍ KONFERENCE

s mezinárodní účastí

Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

INFLUENCE OF DEGRADATION OF HARDENED CEMENT PASTE ON FRACTURE BEHAVIOUR OF CONCRETE

L. Náhlík *, Z. Keršner **, Z. Knésl ***

Summary: *Fracture behaviour of concrete is studied using two-phase material model. Propagation of a single macrocrack in hardened cement paste (matrix) and aggregate (particle) is modelled. Influence of carbonation of matrix on crack propagation in composite is assessed and discussed in this paper: degradation of hardened cement paste is important aspect of fracture behaviour of concrete.*

1. Úvod

Degradace stavebních materiálů patří k důležitým aspektům při odhadu životnosti či zbytkové životnosti konstrukcí, resp. konstrukčních prvků. Jedním z velmi rozšířených materiálů je beton, používaný pro širokou škálu konstrukcí – předpjaté, vyztužené ocelovými vložkami, vlákny apod. Změna vlastností tohoto kvazikřehkého materiálu na bázi cementu např. vlivem karbonatace je tradičně studována ve vztahu ke snižování úrovně ochrany betonové vrstvy zmíněných konstrukcí – krytí výztuže – proti korozi. Zmíněnými odhady životnosti železobetonových konstrukcí a také jejich spolehlivostními aspekty se pro tento případ degradace zabývají např. příspěvky Teplý et al. (2002, 2004), Rovnaníková et al. (2003).

Proces karbonatace může však způsobit i degradaci mechanických vlastností betonu. Např. v práci Chromá et al. (2005) byl vyšetřován experimentálně vliv karbonatace vzorků ze zatvrdlé cementové pasty na její lomově-mechanické vlastnosti.

Vyšetřování šíření trhlin metodami lomové mechaniky v oblasti betonu, resp. betonových konstrukcí může totiž představovat přínos i pro zlepšování těchto kompozitů, řízení jejich vlastností apod., např. Karihaloo (1995), Bažant & Planas (1998).

Ke stanovování efektivních lomových charakteristik betonu, malty či zatvrdlé cementové pasty se jeví užitečnou zkouška třibodovým ohybem vzorků s centrálním zářezem v tažených vláknech. Vyhodnocením diagramu zatížení-průhyb uprostřed rozpětí z tohoto lomového testu lze získat efektivní lomovou houževnatost, resp. kritické prodloužení trhliny, lomovou

* 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

** 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

*** 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

energii, jakož i modul pružnosti. Tyto charakteristiky jsou ovlivňovány vlastnostmi složek kompozitu (zatvrdlé cementové pasty a kameniva), uspořádáním zrn kameniva, jejich velikostí atd., také ovšem zmíněnou degradací/karbonatací cementové pasty.

Předkládaný příspěvek navazuje na výše citované práce autorů, přičemž je zaměřen na studium vlivu degradace zatvrdlé cementové pasty karbonatací na šíření trhliny v betonu, který je modelován jako dvoufázové prostředí. Výsledky lze použít pro zmenšení negativního vlivu karbonatce na užité vlastnosti betonu.

2. K modelování trhliny v dvoufázovém prostředí

Studiu chování trhliny šířící se ve dvoufázovém prostředí matrice/částice bylo věnováno několik níže uvedených příspěvků autorů, včetně několika příspěvků v posledních ročnících konference Inženýrská mechanika. Šíření takové trhliny 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 byl navržen postup umožňující kvantifikovat vliv rozdílu materiálových parametrů (elastic mismatch) obou fází betonu na chování trhliny šířící se nehomogenním materiálem. Detailně byla studována vzájemná interakce trhlina-částice (Keršner et al., 2002a). Byla vyšetřována konfigurace, kdy se vrchol trhliny nachází na rozhraní matrice-částice, což může výrazně ovlivnit hodnotu naměřené lomové houževnatosti. Kritické napětí pro lom kameniva a tedy i pro další šíření makrotrhliny závisí na elastickém modulu a Poissonovu číslu matrice i částice a na lomové houževnatosti částice (kameniva) (Keršner et al., 2002b). Vlivem velikosti částic na hodnotu kritického napětí se zabývá článek Náhlík et al. (2003). V příspěvku Keršner et al. (2003) byly hodnoty materiálových parametrů modelovány jako náhodné veličiny, zadané středními hodnotami, proměnlivostí (směrodatná odchylka, variační koeficient) a typem pravděpodobnostního rozdělení, což umožnilo posoudit vliv rozptylu v hodnotách vstupních parametrů na výsledné kritické napětí pro rozlomení částice. Studie Keršner et al. (2004) uvádí řešení situace, kdy se trhlina proměnné délky nachází v matici (zatvrdlé cementové pastě) a šíří se k částici (zrnu kameniva) o daném průměru, která leží v matici v určité vzdálenosti od povrchu.

3. K výpočtovému modelu

Kritickou konfigurací, která může zásadním způsobem ovlivnit lomové vlastnosti betonu představuje trhlina s vrcholem na rozhraní obou fází (tj. cementové pasty a kameniva). V důsledku různých elastických vlastností obou fází dochází v tomto případě ke změně charakteru singulárního rozdělení napětí v okolí vrcholu trhliny. Zejména exponent singularity p , který je v případě trhliny v homogenním tělese roven $\frac{1}{2}$ (což odpovídá singulárnímu rozdělení napětí typu $\sigma \sim 1/\sqrt{r}$, kde r je vzdálenost od vrcholu trhliny), nabývá hodnot $0 < p \neq \frac{1}{2} < 1$. Tato skutečnost komplikuje formulaci kritérií stability trhliny s vrcholem na rozhraní a tím obecně i hodnocení vlivu materiálových charakteristik na výslednou hodnotu lomové houževnatosti. Postup, navržený v Knésl et al. (1998), Keršner et al. (2002a) a použitý v tomto příspěvku, je založen na porovnání středních hodnot napětí pro šíření trhlin v homogenním a dvoufázovém prostředí. To umožňuje kvantitativní hodnocení vlivu mechanických vlastností obou složek na výsledné lomové chování tělesa.

Uvedme zde pouze, že výsledné kritické napětí pro šíření trhliny přes rozhraní obou fází lze vyjádřit zejména pomocí hodnot elastických parametrů obou složek (tj. zatvrdlé cementové pasty a kameniva) a jejich odpovídajících hodnot lomové houževnatosti.

$$\sigma_{\text{crit}} = \sigma_{\text{crit}}(E_{\text{pasta}}, E_{\text{kamenivo}}, K_{\text{Icpasta}}, K_{\text{IC kamenivo}}, \text{velikost kameniva}, \dots).$$

Hledané závislosti lze pak určit na základě numerického postup založeného na metodě konečných prvků, viz např. Náhlík et al. (2003). Citovaný postup umožňuje tedy na základě znalosti změn uvedených materiálových parametrů způsobené vlivem karbonatace odhadnout vliv tohoto jevu na výsledné kritické napětí pro šíření trhliny v betonu a následně tedy i vliv karbonatace na změnu lomových vlastností betonu.

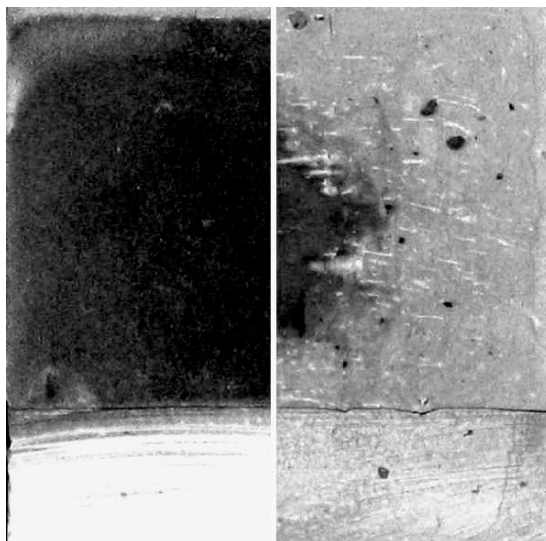
4. Vstupní veličiny modelu

Ke vstupním materiálovým veličinám modelu patří elastické parametry – modul pružnosti a Poissonovo číslo – zatvrdlé cementové pasty i kameniva a lomová houževnatost kameniva, uvažovaná extrémními hodnotami podle materiálu (Keršner et al., 2002a) – viz tabulka 1. Poissonovo číslo matric i částic bylo uvažováno hodnotou 0,3. Průměr uvažovaných částic byl ve všech případech stejný a činil 16 mm.

Tabulka 1 Parametry částic podle materiálu.

Materiál částice	Modul pružnosti [GPa]	Lomová houževnatost [MPa.m ^{1/2}]	
		Minimální	Maximální
Pískovec	20	0,28	0,52
Žula	50	1,80	6,30
Čedič	60	1,80	6,35

Potřebnou vstupní veličinou je také lomová houževnatost matrice – zatvrdlé cementové pasty. V tomto případě bylo možno využít výsledky lomových experimentů vzorků 4 × 4 × 16 cm s centrálním zářezem, které byly zatěžovány řízeným přírůstkem deformace v konfiguraci tříbodového ohybu. Vzorky zrály 6 týdnů před zkouškou ve dvou prostředích, lišících se úrovní CO₂ v obklopujícím vzduchu. Uložení srovnávací sady odpovídalo běžné úrovni CO₂ ve vzduchu a na těchto vzorcích karbonatace postoupila velice málo a její vliv na sledované vlastnosti lze považovat za zanedbatelný – viz ilustrační výřez z fotografie lomového povrchu po zkoušce na obrázku 1 vlevo. Druhá sada vzorků byla uložena v prostředí s vysokým obsahem CO₂ kvůli urychlení karbonatace – její hluboký průnik ilustruje obrázek 1 vpravo. Vybrané výsledky zkoušek vlastností (včetně lomové houževnatosti) pro sady vzorků „nezkarbonátovaných“ a sady vzorků s hlubokou karbonatací – „nezkarbonátovaných“ – uvádí tabulka 2. Podrobnosti lze nalézt v příspěvku Chromá et al. (2005). Poznamenejme, že vliv karbonatace na vlastnosti kameniva považujeme za nepodstatný.



Obrázek 1 Ilustrační výřezy z fotografií lomových povrchů vzorků po zkoušce třibodovým ohybem (zářez dole): vlevo vzorek prakticky nezkarbonátován (tmavá oblast), vpravo vzorek s hlubokou karbonatací.

Tabulka 2 Vybrané výsledky zkoušek (aritmetické průměry ze tří měření).

			Vzorek	
			Nezkarbonátovaný	Zkarbonátovaný
Objemová hmotnost	γ	kg/m ³	1545	1857
Pevnost v tlaku	f_c	MPa	25,4	48,7
Modul pružnosti	E	GPa	10,4	8,3
Lomová houževnatost	K_{Ic}	MPa.m ^{1/2}	0,345	0,244

5. Výsledky

Vypočtené výsledky jsou shromážděny v následujících tabulkách. V tabulce 3 lze nalézt hodnoty exponentů singularity. Tabulka 4 uvádí hodnoty kritického napětí pro varianty matrice ne- i zkarbonátované podle polohy trhliny.

Tabulka 3 Exponenty singularity (bezrozměrné).

Materiál částice	Nezkarbonátovaná matrice: trhlina		Zkarbonátovaná matrice: Trhlina	
	před částicí	za částicí*	před částicí	za částicí*
Pískovec	0,437338	0,43323	0,418072	0,59550
Žula	0,368555	0,67441	0,355735	0,69971
Čedič	0,358064	0,69490	0,346572	0,71965
Pasta	1/2	1/2	1/2	1/2

* za částicí = částice je přelomena

Tabulka 4 Kritická napětí (v MPa): rozhraní matrice/částice (před částicí) a částice/matrice (za částicí).

Materiál částice	Nezkarbonátovaná matrice: trhlina		Zkarbonátovaná matrice: Trhlina	
	před částicí	za částicí*	před částicí	za částicí*
Pískovec	0,58–1,08	0,56	0,63–1,17	0,41
Žula	3,60–12,60	0,66	3,50–12,30	0,50
Čedič	3,50–12,40	0,69	3,40–12,10	0,52
Pasta	0,94	0,52	0,67	0,36

* za částicí = částice je přelomena

6. Diskuse a závěr

V příspěvku byla studována degradace mechanických vlastností betonu vlivem karbonatace. Beton byl modelován jako dvoufázové prostředí a použitý model popisující šíření trhlin vychází z porovnání středních hodnot napětí v homogenním a dvoufázovém prostředí v okolí před čelem trhliny. Vstupní data pro numerické výpočty, které byly provedeny metodou konečných prvků systémem ANSYS byla převzata z literatury. Byly studovány dvě kritické konfigurace trhliny: trhlina s vrcholem na rozhraní pasta-kamenivo a kamenivo-pasta. Poznamenejme, že obě tyto konfigurace mohou rozhodujícím způsobem ovlivňovat velikost výsledné hodnoty efektivní lomové houževnatosti betonu. Obecně lze konstatovat, že vlivem karbonatace dochází k poklesu jak modulu pružnosti, tak i lomové houževnatosti zatvrdlé cementové pasty, viz tabulka 2. Obě tyto veličiny mají vliv na velikost kritického napětí pro šíření trhliny v betonu. V případě konfigurace trhliny s vrcholem na rozhraní matrice-částice (tj. před rozlomením částice) je vliv karbonatace na kritické napětí zanedbatelný, viz tabulka 4. Tento výsledek souvisí se skutečností, že karbonatace v podstatě neovlivňuje materiálové vlastnosti kameniva, které jsou rozhodující v případě šíření trhliny přes částici (tj. v případě přelomení kameniva). Jiná je situace nastane, když trhlina přechází rozhraní kamenivo-zatvrdlá cementová pasta (kamenivo je již přelomeno) a šíří se dále do matrice. V tomto případě má na kritické napětí negativní vliv jak změna modulu pružnosti tak i pokles hodnoty lomové houževnatosti zatvrdlé cementové pasty, viz tabulka 4.

Výsledky uvedené v tabulce 4 ukazují v tomto případě asi třetinový pokles kritického napětí. Tento pokles se může projevit v odpovídající poklesu výsledné efektivní hodnoty lomové houževnatosti betonu. Hodnotu tohoto poklesu lze ovlivnit např. velikostí a jakostí kameniva. Poznamenejme, že předpoklady použitého modelu odpovídají maximálním změnám kritického napětí (zejména předpoklad rovinného modelu) a v reálném případě lze tedy očekávat spíše hodnoty menší, obecně však ne zanedbatelné. Uvedený postup však umožňuje sledovat tyto nežádoucí jevy a podrobným rozбором výsledků minimalizovat jejich vliv.

7. Poděkování

Práce na tomto příspěvku byly podporovány z prostředků projektu GA ČR 103/03/1350 a 101/05/0227.

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.

Chromá, M., Rovnaník, P., Schmid, P. & Keršner, Z. (2005) Vliv karbonatace na lomově-mechanické vlastnosti zatvrdlé cementové pasty. *Sborník Problémy lomové mechaniky V., Lomová mechanika obecných singulárních koncentrátorů napětí* (P. Frantík & L. Náhlík eds), Brno (v tisku).

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.

Keršner, Z., Náhlík, L. & Knésl, Z. (2004) Interaction of crack and aggregate in concrete. *CD sborník Inženýrská mechanika 2004*, Svratka, 7.

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.

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.

Rovnaníková, P., Keršner, Z. & Teplý, B. (2003) Life-Cycle Design of Concrete Structures. *Proc. of 2nd Int. Symp. ILCDES 2003*, Kuopio, 163-181.

Teplý, B., Keršner, Z. & Rovnaníková, P. (2002) K navrhování železobetonových konstrukcí s ohledem na životnost. *Beton*, 6, 41-45

Teplý, B., Rovnaník, P., Keršner, Z. & Rovnaníková, P. (2004) Podpora navrhování betonových konstrukcí na životnost. *Beton*, 3, 43-45.