

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ECC MECHANICAL PROPERTIES AFTER EXPOSURE TO AGGRESSIVE ENVIRONMENT

J. Pekař, P. Kabele*

Summary: *The effects of aggressive environment on the mechanical behavior of a strain-hardening fiber reinforced cementitious composite (PVA-ECC) are experimentally investigated. It was found that exposing PVA-ECC to cycles of immersion in chloride solution and drying at elevated temperature causes embrittlement of the composite, though it still retains some of the hardening ability under uniaxial tension. Immersion in nitrate solution, on the other hand, causes reduction in strength but improvement of the strain-hardening behavior*

1. Úvod

Cementové kompozity s řízenými vlastnostmi (ECC – Engineered Cementitious Composites) patří do třídy cementových kompozitů s tahovým zpevněním (v anglické literatuře se používá označení SHCC - Strain Hardening Cementitious Composites nebo také HPFRCC – High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites). Matrice cementového kompozitu (dále ECC) je vyztužena rozptýlenými PVA (poly-vinyl-alkohol) vlákny. Tyto vlákna jsou 12mm dlouhá o průměru 40 μm . V průběhu zatěžování vzniká velké množství paralelně rozptýlených trhlin, které jsou přemostěny vlákny.

S ohledem na využití ECC ve stavební praxi a to zejména v konstrukcích vystavených nepříznivým vlivům prostředí, ať už přírodního charakteru např. mořská voda, nebo umělého jako je ošetřování vozovek, je nutné dostatečně popsat změny mechanických vlastností jež vznikají vlivem agresivního prostředí. V tomto článku jsou popsány experimentální postupy pomocí nichž je popsáno chování ECC vystaveného chemické expozici. Vlastnosti kompozitu jsou sledovány na mikro i mezo úrovni.

Při simulování agresivního prostředí byly vzorky kompozitu vystaveny dvěma druhům chemické expozice : cyklickému zatížení chloridy a louhování v dusičnanu amonném. Tyto dva druhy zrychleného vlivu agresivního prostředí byly zvoleny tak, aby co nejvíce odpovídaly reálnému působení okolí v konstrukcích v nichž je ECC používán jako jsou např. mostovky, odvodňovací kanály, opěrné zdi, hráze apod.

* Ing. Jaroslav Pekař , Doc.Ing.Petr Kabele Ph.D.: Katedra mechaniky , fakulta stavební , ČVUT v Praze, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice; Tel: (+420) 224 354 498, email jaroslav.pekar@fsv.cvut.cz

2. Materiál a výroba zkušebních těles

K experimentům byl použit komerčně dostupný materiál prodáváný ve formě suché směsi pod označením ECC-crete od firmy Futase. V tomto materiálu jsou použita PVA vlákna Kuralon II REC 15 (Mixing manual 2006). K použití tohoto materiálu vedly zejména tyto důvody:

- Materiál je použit v již realizovaných stavbách, takže výzkum má praktický význam
- Vlastnosti materiálu byly široce popsány, výzkum doplňuje současný stav poznání
- Složení kompozitu je dobře vyladěno

Hlavní složky kompozitu tvoří : cement (C), popílek (P), jemnozrný písek (S) a PVA vlákna (12mm dlouhá, $\text{Ø}40 \mu\text{m}$). Suchá směs je smíchána s vodou (W) a aditivy (plastifikátor, provzdušňovač a proti smršťovací přísada). Poměr $(W/(C+P)) = 0.42$. Množství aditiv může mírně kolísat v závislosti na teplotě a prostředí výroby (podrobně viz. Mixing manual 2006).

Směs byla vybetonována do dřevěných bednění o rozměrech 300x80x15mm a byla zakryta PE folií. Desky byly odbedněny po dvou dnech a uloženy v plastových dózách. Ve stáří 28 dnů byly z desek vyřezány zkušební tělesa. Dimenze těles jsou: pro tahovou zkoušku 150x20x10mm, pro tlakovou zkoušku 12x12x70mm a pro trojbodový ohyb 150x20x10mm. Tělesa pro ohyb byla opatřena zářezy hlubokými 4-5mm umístěnými v polovině rozpětí. Souběžně s betonováním desek byly vyrobeny vzorky pro pull – out testy. Bednění je vyrobeno z plastových válečků o průměru 32mm. Před betonáží je horní víčko opatřeno jehlou s vláknem, které je zabetonováno do matrice.

3. Simulace agresivního prostředí

Nařezané vzorky byly rozděleny do 3 skupin. První skupinu vzorků tvořily referenční tělesa, jež byla uchována po celou dobu v pokojových podmínkách (,O-series‘). Druhá skupina (,S-series) byla vystavena cyklickému zatížení chloridy. Tělesa byla v 10 cyklech ponořena po dobu 5 dnů v plně nasyceném roztoku NaCl a poté následovaly 2 dny sušení v odvětrávané troubě při teplotě 47°C. Toto zatížení simuluje např. působení rozmrazovací soli při údržbě vozovek. Poslední skupina (,N-series) byla umístěna do uzavřené plastové nádoby naplněné roztokem NH_4NO_3 o koncentraci 6 mol/l. Louhování trvalo po dobu 70 dnů. Po ukončení chemické expozice byly tělesa ponechána před testováním v pokojových podmínkách po dobu 18-32 dnů.

4. Zkouška v trojbodovém ohybu se zářezem

Při zkoušce v trojbodovém ohybu jsou určovány mikromechanické parametry popisující lomové charakteristiky ECC. Zkouška je řízena posunem a v jejím průběhu jsou zaznamenávány: síla, posun hlavy válce a rozevření na spodním okraji v místě zářezu (hloubka zářezu 4-5mm) měřené extensometrem.

Z naměřených veličin můžeme určit lomovou energii J_{tip} , jež popisuje odolnost materiálu před začátkem šíření trhliny v místě zářezu.

Náhlá změna v zatěžovací křivce značí vznik trhliny při síle P_{cr} . Za použití lineární lomové mechaniky můžeme vypočítat kritický faktor intenzity napětí $K_{I,tip}$.

$$K_{I,tip} = \frac{6P_{cr}s}{4b^2t} \sqrt{\pi a} F(a,b) \quad (1)$$

kde,

s: rozpětí nosníku

b: výška nosníku

t: tloušťka nosníku

a: výška zářezu

F: tvarová funkce

Lomová energie se pak vypočítá:

$$J_{tip} = \frac{K_{I,tip}^2}{E} \quad (2)$$

E je Youngův modul pružnosti.

Vzhledem k malé velikosti vzorků došlo k porušení většiny těles v jedné trhlíně. Poslední počítanou veličinou je lomová energie vyjadřující schopnost vláken přenášet zatížení přes trhlínu.

$$J_{tot} = \frac{\int_{u=0}^{u_0} P du}{t(b-a)} \quad (3)$$

kde,

P: síla

u: posun hlavy zatěžovacího válce

u_0 : posun při úplném rozdělení

5. Pull out test

K popsání chování a funkce vláken při zatěžování kompozitu byl použit pull out test. Při tomto testu je zabetonováno samostatné vlákno do matrice bez vláken. Vlákno je zabetonované v cylindrické formě jež je upevněna k zatěžovacímu válci. Volný konec vlákna je pak přichycen zatěžovacímu válci přes ocelový nástavec.

Zkouška je řízena posunem hlavy a v průběhu je zaznamenávána síla, posun hlavy válce a posun volného konce vlákna vůči zabetonovanému povrchu.

6. Tahová zkouška

Pro tahovou zkoušku jsou použity vzorky o rozměrech: 10x20x150mm. Zkoušky jsou prováděny na přístroji Alliance RT 30 od firmy MTS s 30kN siloměrem. Průběh zkoušky je řízen posunem tak, aby mohla být popsána i oblast deformace po dosažení max. tahové pevnosti.

Po nastavení všech potřebných parametrů v řídicím programu (volba zkušební metody, velikost posunu hlavy zatěžovacího válce aj.) je vzorek usazen do upínacích čelistí zkušebního stroje. Upnutí působí jako dvojité vetknutí. Je nutné zajistit, aby byly čelisti natočeny v rovině vzorku a nezpůsobovaly kroucení a ohyb vzorku.

V průběhu zkoušky jsou zaznamenávány následující údaje : posun hlavy zatěžovacího válce, deformace - pomocí extenzometru připevněného na vzorku a síla . Při testování je pořizována foto-dokumentace, která zaznamenává vznik, vývoj a počet trhlin při maximálním zatížení. Z naměřených hodnot můžeme určit napětí, při kterém došlo ke vzniku a rozvoji trhlin σ_{fc} , tahovou pevnost materiálu σ_{pc} i deformační kapacitu každého vzorku ε_{pc} .

7. Zkouška v tlaku

Při stanovování mechanických vlastností ECC v tlaku jsou použity modifikované postupy popsané v normách pro zkoušení betonu. Modifikace spočívá v odlišných rozměrech zkušebních vzorků a rychlosti zatěžování. Pro tlakovou zkoušku byly zvoleny vzorky velikosti 12x12x70mm. Při zkoušce je na vzorku připojen jeden extenzometr propojený s počítačem. Průběh zkoušky je řízen posunem tak, aby nedošlo k předčasnému rozdrčení vzorku a mohla být popsána i oblast deformace kdy dochází ke změkčení materiálu.

Výstupem zkoušky je pevnost a Youngův modul, který je určen z lineární oblasti zatěžovací křivky napětí - deformace.

8. Analýza měřených dat

Průměrné hodnoty naměřených a vypočítaných veličin jsou shrnuty v tabulce 1.

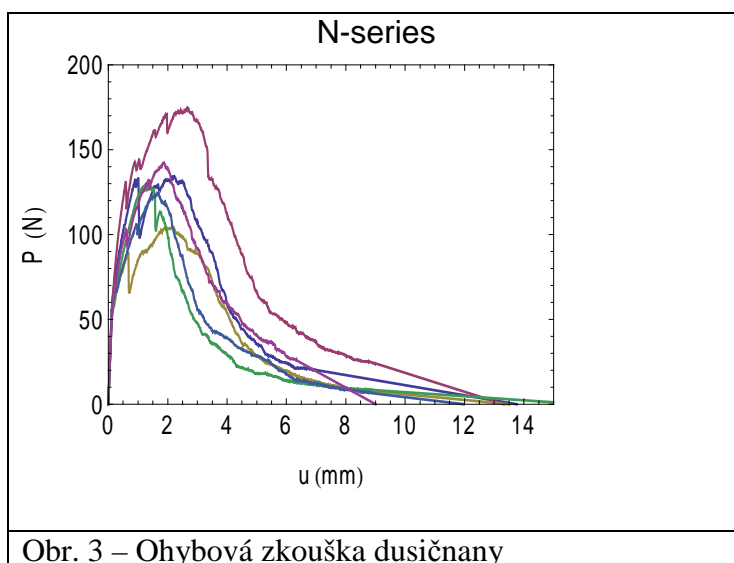
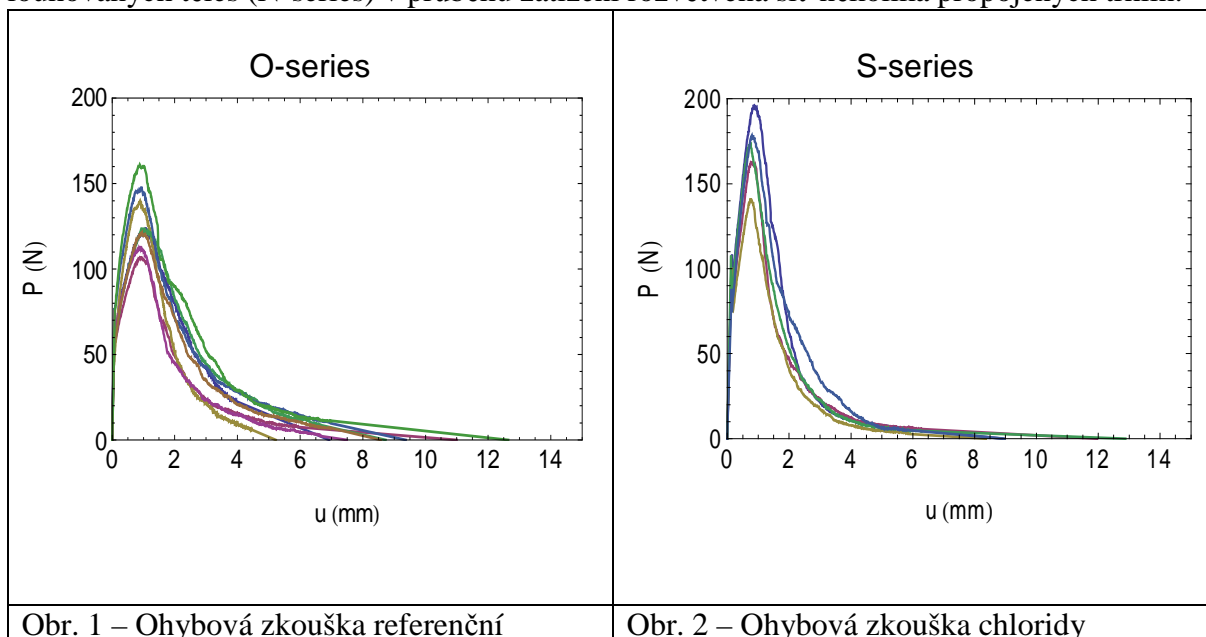
Typ	Ohyb se zářezem			Tah			Tlak	
	$K_{I,tip}$ ($N \cdot mm^{-3/2}$)	J_{tip} (10^{-3} N/mm)	J_{tot} (N/mm)	σ_{fc} (MPa)	σ_{pc} (MPa)	ε_{pc} (%)	E (GPa)	Pevnost (MPa)
O	13.4	6.65	2.06	3.68	3.47	0.62	27.8	54.6
S	17.3	10.7	1.72	5.83	4.11	0.26	28.0	48.2
N	11.0	12.0	3.48	1.81	2.62	2.25	10.1	23.7

Porovnáním hodnot vzorků vystavených cyklickému zatížení chloridy (S-series) a sušení s referenčními (O-series) vyplývá pouze mírná ztráta tlakové pevnosti zatímco modul pružnosti je nedotčen. Vzorky louhované v 6-ti molárním roztoku NH_4NO_3 (N-series) vykazují výrazné snížení jak pevnosti tak i Youngova modulu.

Z průběhu ohybové zkoušky se zářezem je zřetelné zvýšení kritické síly u vzorků (S-series), při které dochází k vzniku trhliny na vrcholu zářezu a z toho plynoucí zvýšení faktoru intenzity napětí $K_{I,tip}$. V důsledku nezměněného modulu pružnosti je pak znatelný nárůst i lomové energie J_{tip} . U skupiny vzorků (N-series) naproti tomu výrazně poklesla síla P_{cr} , při které se začíná šířit trhlina a tím i $K_{I,tip}$. Na druhé straně v důsledku výrazné redukce modulu pružnosti E došlo ke zvýšení lomové energie J_{tip} v porovnání s O,S-series. Průběh zkoušek je zaznamenán na Obr. 1,2,3 v grafech síla-posun.

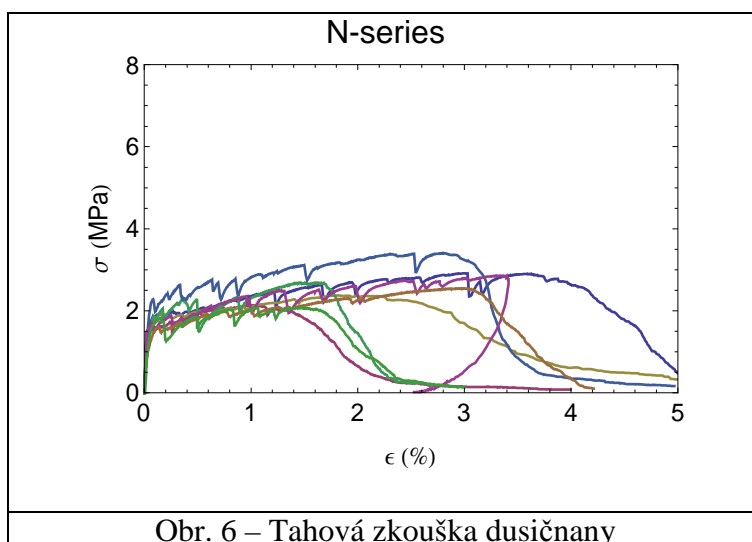
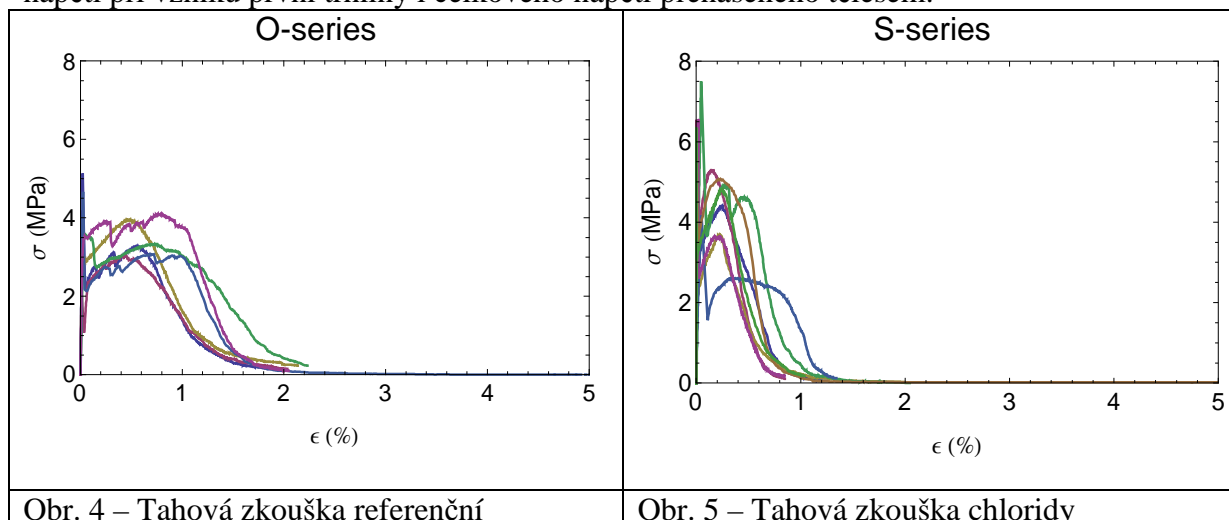
Grafy jasně určují vyšší kritickou sílu u (S-series) i její strmější nárůst oproti referenčním tělesům. Nadruhou stranu také výrazně rychlejší změkčení po dosažení maximální hodnoty. To naznačuje, že (S-series) vykazují nárůst pevnosti, ovšem stávají se vlivem cyklického zatížení také křehčími. Oproti tomu tělesa (N-series) dosahují nižších hodnot kritické síly,

ovšem s pozvolným růstem i snižováním zatížení v průběhu deformace. Jejich chování lze do jisté míry označit za duktilní. Na rozdíl od referenčních (O-series) a chloridových vzorků (S-series), kdy docházelo k šíření pouze jedné hlavní trhliny od čela zářezu, vznikala u některých louhovaných těles (N-series) v průběhu zatížení rozvětvená síť několika propojených trhlin.



Na obrázcích 4, 5, 6 jsou vidět zatěžovací křivky napětí – deformace z průběhu tahových zkoušek. U referenčních těles (O-series) docházelo k mírnému deformačnímu zpevnění a vzniku rozptýlených trhlin. Průměrná deformační kapacita $\epsilon_{pc} \sim 0,6\%$. Ve většině případů bylo napětí při vzniku trhliny současně i maximální hodnotou pevnosti těles. K deformačnímu zpevnění docházelo již po vzniku první trhliny následovaném poklesem zatěžovací síly. U chloridových vzorků (S-series) bylo dosaženo zdatelně vyšších hodnot napětí jak při vzniku trhliny tak i při rozvoji trhlin. V případě (S-series) docházelo ke vzniku malého počtu trhlin. U (N-series) byl průběh zkoušky a chování těles ve shodě se zkouškou v trojbodovém ohybu. Při tahové zkoušce docházelo ke vzniku mnoha rozptýlených trhlin což v důsledku výrazně

ovlivnilo velikost deformační kapacity $\epsilon_{pc} \sim 2,0\%$. Toto chování bylo doprovázeno snížením napětí při vzniku první trhliny i celkového napětí přenášeného tělesem.



9. Závěr

Výsledky prováděných zkoušek ukazují, že cyklické zatížení ECC chloridy (S-series) způsobuje zvýšení křehkosti kompozitu. Stále však vykazují (snížené) deformační zpevnění. Louhování v dusičnanu amonném způsobuje výrazné snížení pevnostních charakteristik kompozitu. Na druhé straně má však oslabení matrice kompozitu pozitivní vliv na zapojení PVA vláken v průběhu zatěžování a tím i na celkovou deformační kapacitu.

10. Poděkování

Poděkování Presentovaný výzkum vznikl za podpory Výzkumného záměru MŠMT VZ 03 CEZ MSM 6840770003 a grantu GAČR 103/05/0896.

11. Literatura

Victor C. Li (2003) On Engineered Cementitious Composites (ECC) *Journal of Advanced Concrete Technology Vol.1, No.3, 215-230*

Mixing manual of ECC Dry Mix for Casting (2006) *Kajima Technical Research Institute*

RILEM TC-50 FMC, "Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-Point Bend Tests on Notched Beams," *Materials and Structures*, Vol. 18