

VLIV OKOLNÍHO PROSTŘEDÍ NA VÝSLEDNÉ VLASTNOSTI BETONU ■ INFLUENCE OF SURROUNDING ENVIRONMENT OVER FINAL PROPERTIES OF CONCRETE

Vít Hanuš, Petr Štemberk

Článek popisuje problematiku vlivu agresivního prostředí na beton a přístupy k eliminaci dopadu působení agresivních činitelů. Článek řeší použití popílkových cementů se snahou zvýšit odolnost a trvanlivost výsledných směsí. Teorie byla ověřována numerickou simulací společně s laboratorními testy. ■ This paper deals with the influence of aggressive environment on final properties of concrete and attempts to eliminate effect of aggressive agents. Paper shows usage of cements with portion of fly ash to increase chemical resistance and durability of concrete mixtures. This theory was being verified by numerical simulations and laboratory tests.

KOROZE BETONU VLIVEM AGRESIVNÍHO PROSTŘEDÍ

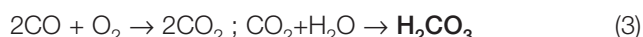
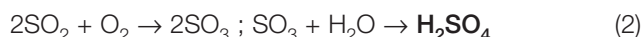
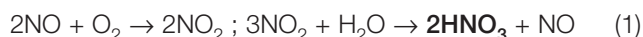
Agresivní prostředí působí na všechny složky betonu. Primární vliv má na produkty vzniklé hydratací cementu. Obecně lze říci, že vlivem agresivních látek dochází ke změně mikrostruktury betonu, a to buď vyluhováním pojiva, nebo rekonfigurací základní báze za sekundárního vzniku modifikovaných krystalů, které se dále rozpinají a expanzními tlaky beton narušují.

Koroze betonu je zapříčiněna kombinací dvou procesů, procesem transportu a procesem chemických reakcí. Chemické vlivy budou analyzovány v dalších pasážích na základě fyzikálních testů, které byly provedeny na normovaných, reprezentativních vzorcích. Procesy transportu jsou simulovány pomocí aplikovaného matematického modelu. Proces transportu je do značné míry ovlivněn mikrostrukturou materiálu. Mikrostrukturu i chemické reakce probíhající při korozi betonu lze ovlivnit vhodným složením betonové směsi. Chemické reakce probíhají mezi agresivním médiem a složkami betonu. Pro průběh těchto chemických reakcí připravují podmínky jednotlivé transportní děje. Chemické korozivní účinky lze rozdělit na tři základní skupiny (tab. 1).

Falešným ztuhnutím (viz koroze 3. druhu, tab. 1) označujeme stav, kdy dochází k postupnému zaplňování pórů a tedy k dočasnému nárůstu pevností vůči normálním podmínkám. Teprve po delším průběhu krystalizačních tlaků nastane náhlé snížení pevností. To mnohdy znemožňuje včas korozi tohoto typu rozpoznat. Doba, kdy dochází k náhlému poklesu pevností, záleží na pórovém systému daného betonu. U hutnějších betonů dochází k tomuto jevu až po několika letech. Mezi tento typ koroze se řadí především koroze solná a síranová.

Pro beton je nejnebezpečnější chemická koroze, kde přenosným médiem je voda. Dochází tak k transportu agresivních látek pomocí vlhkosti. Voda v okolním prostředí může být přítomna v řadě forem, například jako voda dešťová (kyselé deště), podzemní, vodní pára, či v podobě různých roztoků. Podle toho, jakou látku voda obsahuje, můžeme rozpoznávat různé druhy koroze. Kyselinová koroze přímo závisí na hodnotě pH daného roztoku. Hydratovaná cementová pasta vytváří alkalické prostředí, při kterém beton nekoroduje. Původně alkalické prostředí se mění na kyselé a to reaktivním působením kyselin se složkami cementového kamene.

Zvláštním typem kyselinové koroze je působení kyselin uhlíčitých, tedy kyselých dešťů, které se vyznačují hodnotou pH nižší než 5,6. Vlivem průmyslových exhalací dochází k hromadění oxidů dusíku, síry a uhlíku (NO_x , NO_2 , CO_2 , CO , SO_2) v ovzduší. Tyto oxidy reagují s vodou obsaženou v atmosféře za vzniku kyselin (1, 2, 3).



Kyselé deště ovlivňují pH povrchových vod, což je patrné ze schematické mapky ČR (obr. 3), která názorně ukazuje přibližné rozložení pH povrchových vod za běžného stavu. Z obrázku je patrné, že pH na mnohých místech České republiky klesá pod hodnotu 6. Při této hodnotě je agresivita kyselých roztoků na beton výrazná. Z tohoto důvodu byla provedena následující experimentální analýza působení chemických činitelů na beton.

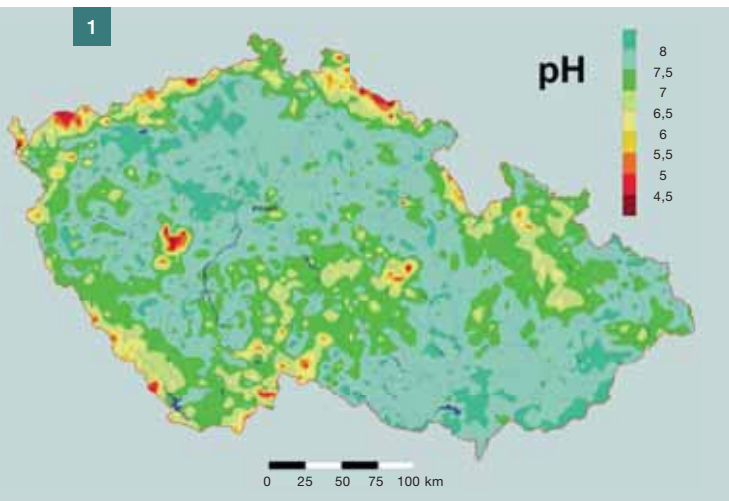
V laboratoři proběhl test, jehož účelem bylo vytvoření kyselého prostředí vhodného pro degradaci betonu. Pro tento účel byl zvolen akcelerovaný test s reaktivním činidlem – ředěnou kyselinou chlorovodíkovou (HCl).

Struktura materiálů směsných betonů

Působení agresivního prostředí na betonové prvky se lze bránit několika způsoby. Jednu skupinu ochrany tvoří možnost změny složení betonové směsi a tedy modifikace primární struktury materiálu. S tím souvisí změna mikrostruktury betonového elementu (popisováno viz výše). Na základě těchto informací byl výzkum zaměřen na alternativní použití

Tab. 1 Druhy chemické koroze betonu ■ Tab. 1 Category of concrete chemical corrosion

Druh koroze	Průběh koroze	Typické reakce	Výskyt
1.	Nastává účinkem vody, či vodných roztoků. Dochází k rozpouštění složek cementového kamene.	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	Účinek vody s nízkou přechodnou tvrdostí (tzv. hladová voda), (obr. 1)
2.	Probíhá vzájemná reakce mezi složkami cementového kamene a agresivního roztoku. Vznikají produkty lehko rozpustné ve vodě nebo amorfni hmoty bez vazebných vlastností.	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	Koroze kyselinová, uhlíčitá, hořečnatá a způsobená alkáliemi.
3.	Procesy, při kterých se v pórech cementového kamene hromadí a krystalizují málo rozpustné hydratační produkty spojené s výrazným zvětšením objemu pevné fáze. Vyloučená pevná fáze a růst krystalů v pórech způsobují tlaky na stěny pórů, to má za následek rozrušení betonové hmoty. Dochází k tzv. „falešnému ztuhnutí“.	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	Především síranová (obr. 2) a solná koroze (obr. 14)



Tab. 2 Hlavní slídkové minerály v průběhu zrání ■ Tab. 2 Main clinker minerals in the period of hardening

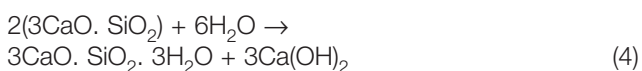
Minerál	Značení	Chemický vzorec	Zastoupení [%]
Alit	C ₃ S	3CaO.SiO ₂	45-80
Belit	C ₂ S	2CaO.SiO ₂	5-32
Celit	C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃	4-16
Ferit	C ₄ AF	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	6-12

směsných cementů s přidáním popílku, k dosažení výsledné změny struktury materiálu.

Mezi směsné cementy řadíme ty, které se vyznačují směsí portlandského cementu s příměsí popílku. Jedním z nejvíce používaných cementů je cement portlandský. Skládá se ze dvou hlavních složek, a to z portlandského slínku a síranu vápenatého. Portlandský slínek vzniká vypálením surovinné moučky a obsahuje vhodný poměr CaO, SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃. Síran vápenatý se nejčastěji vyskytuje v podobě sádrovce, hemihydrátu, anhydritu, či jejich směsí. Rozoznáváme několik hlavních slídkových minerálů viz tab. 2.

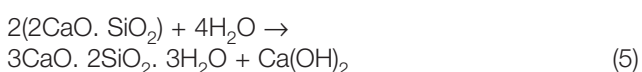
Hydrataci cementu lze rozdělit do tří základních period, které jsou charakteristické dobou trvání a chemickou reakcí, která v této době probíhá.

První perioda je indukční, která se vyznačuje rozpouštěním aluminátů a síranů za vzniku portlanditu – Ca(OH)₂ a ettringitu (4). Následuje úbytek silikátů, kdy se tvoří první C-S-H, CH a další ettringit. Poté voda proniká k dalším zrnům cementu, a tvoří se tak nové produkty hydratace. Jednou z typických reakcí této periody je reakce C₃S.

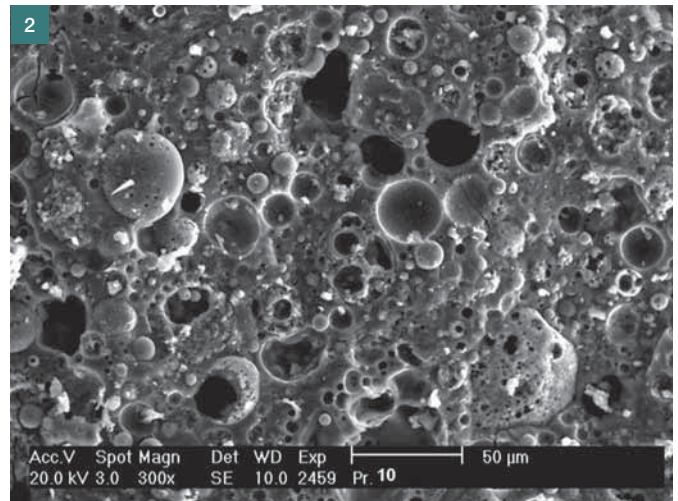


Druhá perioda zahrnuje dobu přechodu do tuhého skupenství. Tato perioda rozhoduje o výsledné mikrostrukturu cementového kmene. Vzniká C-S-H gel a krystaly portlanditu.

Poslední periodou je stupeň stabilizace struktury. V této periodě dochází k hydrataci belitu.



Následnou rekrystalizací, která nastává v prostorech mezi cementovými zrny, vznikají difúzí vody hydratační produkty. Ve vodním roztoku mimo zrna vznikají vnější hydratační produkty, které vyplňují kapiláry a póry cementového kamene. Výsledným produktem hydratace jsou tyto produkty: C-S-H gel, hydroxid vápenatý (portlandit), monosulfát a ettringit.



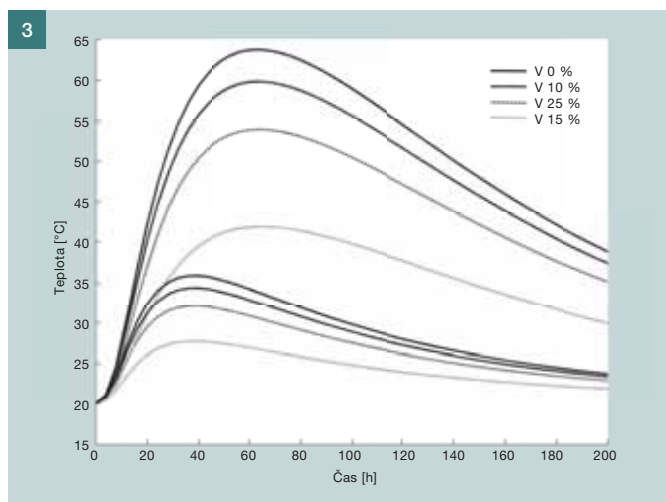
Obr. 1 Rozložení pH povrchových vod na území ČR za běžného stavu [7] ■ Fig.1 Distribution of pH of surface water on the area of the Czech Republic during standard conditions [7]

Obr. 2 Mikrostruktura popílku [8] ■ Fig. 2 Microstructure of fly ash [8]

Ve struktuře se dále vyskytuje voda a nehydratované části cementu. Z hlediska odolnosti vůči agresivnímu prostředí je nejméně stabilní částí cementového kmene portlandit, který se snadno rozpouští ve vodě. Naopak nejstabilnější částí je C-S-H gel.

Popílek se vyznačuje pucolánovými vlastnostmi, to znamená, že sám o sobě je omezeně schopen reagovat s vodou (není hydraulický). Popílek je ze všech minerálních složek nejméně reaktivní. Získávání popílku probíhá mechanickým či elektrostatickým odlučováním prachových částic z kouřových plynů topenišť, na kterých je spalováno práškové uhlí. Složení a tvar částic popílku závisí na druhu spalovaného uhlí.

Částice popílku se vyznačují kulovitým tvarem různých velikostí. Střední velikost zrna se pohybuje v rozmezí od 10 do 30 μm (obr. 2). Dále rozlišujeme, jestli jsou částice duté (vyplněné plyny ze spalování), multisférické (většinou vyplněny dalšími částicemi), s houbovitou strukturou (nepravidelné s porézní strukturou obsahující otevřené či uzavřené póry) a nepravidelné. Přibližně 20 % všech částic je vyplněno některým ze zmiňovaných plynů: H₂, N₂, CO, Ar, CO₂, H₂O. Přítomnost tohoto plynu může sekundárně ovlivnit vlastnosti betonové směsi. Z tohoto hlediska je vhodné při návrhu směsi vliv příměsí plynu zohledňovat. Ve složení popílku je dominantní fáze sklovitá, většinou zastupuje více než 50 %. Dále může obsahovat krystalické fáze jako křemík (SiO₂), hematit (Fe₂O₃), magnetit (Fe₃O₄), mulit (3Al₂O₃·2SiO₂) a jiné. Popřípadě můžeme nalézt zbytky nespáleného uhlí. Pucolánovou reakci popílků lze definovat jako reakci SiO₂ a Al₂O₃ z popílku s hydroxidem vápenatým – Ca(OH)₂, přičemž vznikají kalciumsilikátové (CS) a kalciumaluminátové (CA) hydratační produkty. Čím více je reaktivního oxidu křemičitého a oxidu hlinitého, tím vyšší je hydraulická aktivita popílku. Při hodnocení této aktivity je nutno brát v potaz nejen schopnost vázat Ca(OH)₂, ale i časový průběh reakce mezi popílkem a hydroxidem vápenatým. Oxid křemičitý a hlinitý zaručují tuhost a pevnostní mřížku sestavenou z hydrátu CS či CA.



Obr. 3 Simulace průběhu teploty betonu v betonovém pilíři s příměsí popílku ■ Fig. 3 Simulation of heat evolution process in concrete pillar with portion of fly ash

Obr. 4 Porovnání pevnostních zkoušek pro vzorek směsi 1 v testovaných prostředích ■ Fig. 4 Comparison of results of mixture 1 in tested environments

Tab. 3 Hmotnostní zastoupení komponentů zkoušených betonových směsí (1 dm³) ■ Tab. 3 Mass composition of concrete mixtures agents

Složka směsi	Směs č. 1	Směs č. 2	Směs č. 3
Cement [g]	503,2	267,7	381
Popílek – křemičitý [g]	–	89,3	135,2
Kamenivo 0–4 [g]	1015	1173,1	1003,8
Kamenivo 4–8 [g]	750,1	663	773,2
Sika ViscoCrete – 1035/35 [g]	1,5	–	1,5
H ₂ O [g]	175	207,4	175

Jednou z velmi důležitých vlastností popílku, který je používán jako příměs do cementů, je jemnost měřená Blaineovou metodou a obvykle je rozdělena do tří základních skupin. Tyto skupiny jsou postupně: jemné (> 400 m².kg⁻¹), střední (300 až 400 m².kg⁻¹) a hrubé (< 300 m².kg⁻¹). Synná hmotnost popílku se pohybuje v rozmezí 800 až 1 200 kg.m⁻³ a objemová hmotnost od 1 800 až 2 900 kg.m⁻³.

Dle ČSN 72 2071 rozlišujeme v České republice popílek křemičitý a popílek vápenatý. Dělení zohledňuje celkový obsah látek: CaO a SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃. Nejčastěji používaným typem popílku je popílek křemičitý, který se skládá hlavně z reaktivních složek SiO₂ a Al₂O₃. Jednotlivé složky jsou procentuálně omezeny. Obsah aktivního oxidu křemičitého musí být minimálně 25 % hmotnosti. Naopak obsah aktivního oxidu vápenatého nesmí přesáhnout hranici 10 % hmotnosti a volný oxid vápenatý musí být zastoupen maximálně 1 % hmotnosti. Je známo, že za přítomnosti portlanditu dochází na záporně nabitým povrchu sklovitých částic popílku k absorpci iontů Ca²⁺ a do tohoto procesu vstupují všechna malá zrna. Křemičitý popílek však samovolně nehydratuje.

Použití popílku jako náhrady části cementu má bezesporu velký vliv na výslednou mikrostrukturu. Jsou zlepšeny vazebné schopnosti pojiva mezi ploškami složek betonu a cementové pasty. Úpravou poměru popílku a cementu v kombinaci s vodním součinitelem lze výrazně ovlivnit celkovou mikrostrukturu. Tento předpoklad byl využit při návrhu směsi a sestavení koncepce laboratorních testů. Reakce mezi popílkem a hydroxidem vápenatým způsobuje, že C-S-H gel má nižší kalcium-silikátový poměr než běžný beton. Je dokázáno, že čím větší procento zastoupení křemičitého popílku ve směsi je, o to méně se vyvíjí hydratační teplo. Tím se potvrzuje skutečnost, že zhydratuje méně popílku i cementu. Tato skutečnost má za následek změny struktury materiálu. Bylo prokázáno, že po devadesáti dnech zreguje přibližně 14 až 22 % popílku. Z toho lze vyvodit, že po této době zůstane nezhydratováno okolo 80 % popílku a 40 % cementu. To má velký význam především pro odolnost těchto typů betonu vůči agresivnímu prostředí. Při procesu hydratace vznikají kvalitnější slínkové minerály (alit, belit, celit a ferit). Nezhydratované složky poté slouží jako mikroplnivo, betonová směs vykazuje mnohem menší difuzivitu a má jemnější strukturu.

Křivka vývinu hydratačního tepla se liší dle sledovaného bodu na daném betonovém prvku. Pro porovnání teplot povrchových vrstev a teplot v jádře průřezu byl zhotoven numerický model v programu Popílek.exe. Byl vymodelován

nechráněný betonový pilíř o rozměrech 2 x 4 m a použity tyto parametry výpočtu: cement CEM II/A, obsah cementu 350 kg.m⁻³, objemová hmotnost 2 400 kgm⁻³, součinitel tepelné vodivosti $\alpha = 3 \text{ J(sm}^2\text{C)}^{-1}$, koeficient přestupu tepla $\alpha = 12 \text{ J(sm}^2\text{C)}^{-1}$, teplota okolního prostředí $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Postupně bylo nahrazeno 10, 25 a 55 % cementu křemičitým popílkem. Výsledky byly porovnány s hodnotami pro běžný beton. Graf na obr. 3 popisuje průběh teplot v jádře (křivka dosahující vyšší teploty) a na povrchu prvku (křivka dosahující nižší teploty).

Nižší průběhy teplot jsou příznivým faktem vzhledem k trvanlivosti. Jak bylo zmíněno, menší vývin hydratačního tepla má příznivý vliv na mikrostrukturu betonové směsi, zmenšuje a modifikuje se tak i požadovaná difuzivita materiálu a jakost sledované povrchové vrstvy betonových prvků.

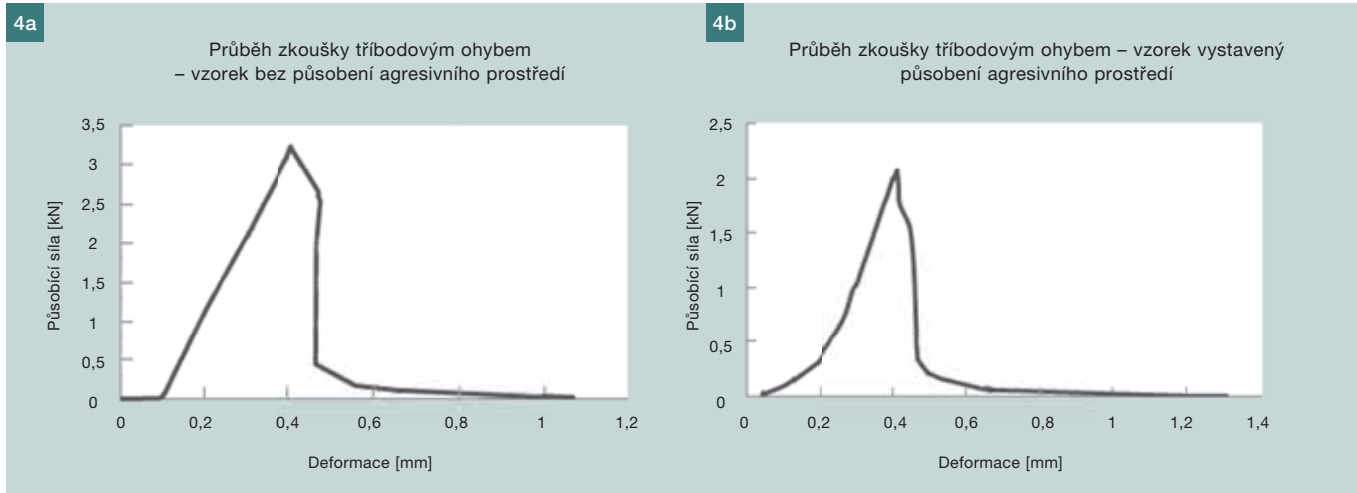
LABORATORNÍ TESTOVÁNÍ

Rozeznáváme tři základní stupně zkoušek – malé laboratorní testy, rozsáhlé simulace a testy in-situ. Kromě zkoušek těchto typů lze volit i jednotlivé parametry zkoušky a dosáhnout tak akcelerace. Stupeň zkušební metody má velký vliv na konečné výsledky testů. Z toho důvodu byl výzkum zaměřen na dlouhodobé sledování akcelerovaného testu, jehož parametry se dají dobře korigovat a následně interpretovat.

V experimentální části práce byl vybrán test akcelerovaný zvýšením koncentrace agresivního prostředí. Byl zvolen test zaměřený na sledování působení kyselinových roztoků, především slabého roztoku kyseliny chlorovodíkové. Kyselina chlorovodíková v procesu koroze reaguje s portlanditem (Ca(OH)₂) za vzniku soli a vody, dochází tedy k tak zvanému vyluhování dle rovnice: Ca(OH)₂ + 2HCl → CaCl₂ + 2H₂O. Vzniklá sůl nadále krystalizuje a nastává koroze třetího druhu.

Cílem teze bylo zajistit vyšší odolnost betonových směsí s aditivem a substitutem popílku, se snahou snížit účinky agresivního prostředí. Pro ověření této predikce bylo připraveno několik směsí s využitím popílkových a portlandských cementů. Jedna ze zkoušených variant rovněž zohledňuje vliv vodního součinitele, použití plastifikátoru a další faktory působící na změnu mikrostruktury materiálu. Přesné poměry jednotlivých složek betonové směsi jsou uvedeny v tab. 3.

Použitý křemičitý popílek vykazoval následující vlastnosti: měrný povrch 328 m².kg⁻¹; objemová hmotnost 2 140 kg.m⁻³; ztráta žíháním max. 5 % hm.; obsah chloridů max. 0,1 % hm.; obsah oxidu sírového max. 3 % hm.; jemnost (zbytek na síť 0,045 mm) max. 40 %; index účinnos-



ti po 28 dnech min. 75 %; index účinnosti po 90 dnech min. 85 %; objemová stálost max. 10 mm; hmotnostní aktivita R_a 226 max. 300 Bq/kg; index hmotnostní aktivity I max. 2. Typ použitého cementu byl CEM II/A, pevnostní třídy 42,5N.

Ze zmíněných testovaných směsí byly vytvořeny série normovaných experimentálních vzorků. Testované směsi byly hutněny do ocelových forem o přibližných rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Přesné rozměry byly u každého elementu kontrolovány, měřeny a dále zhodnocovány. Tyto vzorky byly uloženy do dvou různých prostředí, a to do agresivního roztoku a vodného roztoku, při stabilních běžných pokojových teplotách a podmínkách. Jako agresivní prostředí byl zvolen 4,38% vodný roztok HCl. Tento roztok byl aplikován do skleněných sběrných nádob a následně byly vloženy sledované prvky. Doba procesu degradace byla 92 dní. Ve stanovených časových intervalech (7 dní) byl sledován pokles pH roztoku kyseliny chlorovodíkové, který vykazoval postupné zpomalování probíhajících chemických reakcí. Vzorky byly zkoušeny třibodovým ohybem, kde rozpětí podpor bylo zvoleno 120 mm. Vzorky bez vlivu agresivního prostředí byly uloženy po stejnou dobu (92 dní) v hermeticky uzavřeném systému s běžnou pitnou vodou (Praha 6). V rámci experimentu byly vzájemně porovnávány prvky s částečnou náhradou popílku (25% náhrada cementu popílkem) a vzorků bez této náhrady. Kromě posuzování únosnosti prvků byly sledovány a kontrolovány hmotnosti a rozměry prvků. Všechny naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány. V následujícím textu jsou uváděny střední hodnoty odpovídající statistickému vyhodnocení každé sady vzorků.

Z grafů (obr. 4) je zřejmé, že prvek vystavený agresivnímu prostředí dosahuje menší únosnosti, než vzorek uložený do vody. To potvrzuje teorii, která uvádí snížení pevností prvků vystavených agresivnímu prostředí. Střední hodnoty referenčních vzorků odpovídaly maximální síle (před porušením vzorku) $F_{max} = 3,24$ kN. To odpovídá tahovému napětí $\sigma = 9,115$ MPa. Vzorky vystavené agresivnímu prostředí dosahovaly maximální síly $F_{max} = 2,02$ kN.

Značný pokles lze sledovat i u úbytků hmotností. Hmotnost referenčních vzorků po vysušení byla 620 g. U vzorků vystavených agresivnímu prostředí referenční hodnota klesla na hodnotu 564 g. Je zřejmé, že hmotnost trámečků klesla o cca 9 % během tří měsíců. Na obr. 5 je vidět značně rozrušená povrchová vrstva. Tato vrstva se vyznačuje povrchovým narušením s typickým odloučením pojivových částic. Následně došlo k odseparování povrchových vrstev

v tloušťce cca 6 mm, až na zdravé (nerozrušené) jádro betonového vzorku.

Pro ověření nulové únosnosti degradované vrstvy byl přibližně přeměřen vzorek ze směsi č. 1. Rozměry tohoto vzorku v průřezu 32,23 x 35,16 mm. Po přepočítání únosnosti prvku, dle jeho rozměrů vychází maximální síla, před vznikem trhlin na 2,016 kN. Což je rozdíl oproti naměřeným hodnotám, který dostatečně odpovídá výsledkům testů a naměřeným hodnotám. Je zřejmé, že rozrušená vrstva materiálu přispívá zanedbatelnou měrou k aktivnímu spolupůsobení z hlediska únosnosti prvku.

Dále bylo vytvořeno srovnání vlivu popílku a vodního součinitele betonových směsí na výsledné únosnosti daných vzorků. Toto porovnání je patrné z grafu jednotlivých směsí na obr. 6.

Z napětí referenční vzorků a hodnoty maximální síly vzorku po degradaci byla dopočítána poškozená tloušťka vrstvy, která nepřispívá k únosnosti prvku. Ve výpočtu byla uvažována konstantní hloubka degradace po celém povrchu prvku. Při výpočtu bylo uvažováno lineární rozdělení napětí na zdravé části vzorku. Degradovaná vrstva byla zanedbána, napětí v této vrstvě bylo uvažováno nulové. U každé betonové směsi bylo pro výpočet uvažováno maximální napětí v tahu, dle střední hodnoty referenčního vzorku. Z tohoto napětí byly dopočítány rozměry zdravé části degradovaného vzorku. Porovnávány byly celkové únosnosti po a před degradací. Výpočtem byla stanovena hodnota tloušťky degradace u vzorků ze směsi číslo 1. Tato hodnota je 5,84 mm, což přibližně odpovídá zprůměrovaným hodnotám po naměření.

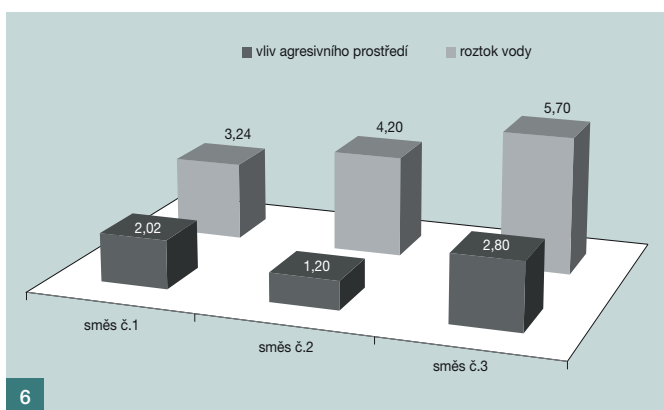
Narušené vzorky ze směsi č. 2 dosahovaly při zkoušce třibodovým ohybem střední hodnoty maximální síly $F_{max} = 1,2$ kN. Referenční vzorek dosahoval maximálního napětí 11,812 MPa (pro maximální sílu 4,2 kN). To dokazuje teorii, že betony s nízkým obsahem popílku a pojivových částic (cementu) v kombinaci s absencí plastifikační přísady (zvýšeným vodním součinitelem) dosahují podstatného zhoršení výsledných vlastností zatvrdělého betonu. V tomto případě byl vodní součinitel nadprůměrný (0,78) a zapříčinil zvýšení zastoupení pórů v prvku. Tato skutečnost zapříčinila proniknutí agresivního prostředí do velké části prvku a následkem byla jeho kompletní degradace. Pro betony s vysokým vodním součinitelem a vysokou pórovitostí se tento postup ukázal pro výpočet tloušťky narušené vrstvy jako nevhodný. Pro porovnání byla vypočtena hodnota porušené vrstvy 13,65 mm. U čistě chemického působení je vytvo-



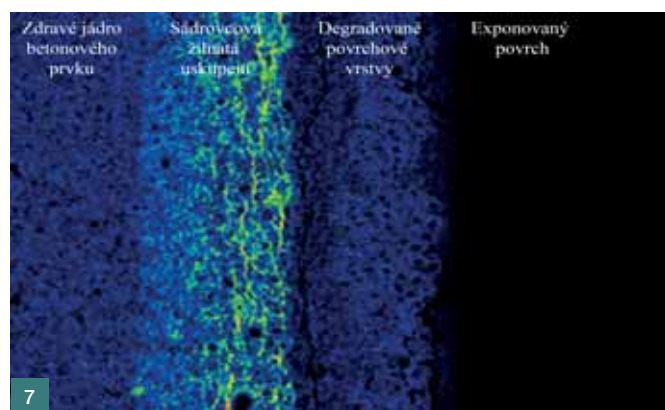
5a



5b



6



7

Tab. 4 Srovnávací tabulka měřených a vypočtených hodnot únosností degradovaných vzorků z referenčních směsí č. 1, 2 a 3 pod účinky zasolování ■ Tab. 4 Comparative table of measured and calculated values of the capacity of the degraded specimen prepared from the reference mixtures 1, 2 and 3 with the salinization effect

Vzorky	Maximální síla referenčního vzorku [kN]	Maximální tahové napětí referenčního vzorku [MPa]	Maximální síla degradovaného vzorku [kN]	Úbytek únosnosti [%]	Tloušťka degradované vrstvy [mm]	Úbytek objemu [%]
Směs č. 1	3,24	9,115	2,02	37,65	5,84	27,07
Směs č. 2	4,20	11,812	1,2	71,43	13,65	56,60
Směs č. 3	5,70	16,031	2,80	50,88	8,44	37,75

řena vrstva zkorodovaného materiálu, která může zpomalit další reakce (obr. 7). V kombinaci s mechanickým působením dochází k odstraňování degradované vrstvy. Následuje nový chemický proces působení prostředí, který může proces rozkladu urychlit.

Směs č. 3 prokázala lepší odolnost vůči agresivnímu prostředí, oproti směsi č. 1 a 2. U této směsi byl použit substitut popílek a plastifikační přísady pro zmenšení vodního součinitele. Maximální dosažená síla po degradaci odpovídá hodnotě 2,8 kN a maximální napětí v tahu referenčního vzorku odpovídá hodnotě $\sigma = 16,031$ MPa (pro maximální sílu 5,7 kN). Tloušťka degradované vrstvy je po přepočítání 8,44 mm. Z těchto výsledků je patrná výhoda použití popílků a zmenšení vodního součinitele, pro zlepšení vlastností betonových směsí zatížených agresivním prostředím. Z grafu na obr. 6 lze pozorovat nárůst pevností u referenčních vzorků, po přidání popílků. U elementů ze směsi č. 2 byly po průběhu degradace naměřeny menší hodnoty měřených veličin než u ostatních elementů. Testované vzorky vykázaly nárůst pevností v případě použití 25% substituce popílků za cement (po uplynutí doby 92 dní). Největší odolnost vůči agresivnímu prostředí prokázala směs č. 3. Celkové porovnání únosností a degradovaných vrstev je patrné z tab. 4. Všechny výsledky jsou uváděny ve středních hodnotách.

Jednou z nevýhod použití popílků jako náhrady části cementu je snížení pevnosti malty v raném období pro ty druhy aplikací, kde je požadován rychlý nárůst pevností. Malá pevnost v raném stáří je zapříčiněna nedokončenou pulcolánovou reakcí a nepřeměněnou mikrostrukturou prvku. Z těchto výsledků lze usoudit, že složení jednotlivých směsí má velký vliv na odolnost prvku vůči agresivnímu prostředí.

ZÁVĚR

Fyzikální a numerické modely byly zaměřeny na aplikaci a ověření teorie zdokonalování mikrostruktury materiálu pomocí využití směsných cementů se snahou zvýšit odolnost vůči agresivním činitelům působícím v praxi na nekryté a nechráněné betonové prvky. Z numerických modelů použitím softwaru Popilek.exe vyplývají poznatky, které byly dále použity u laboratorních testů. Výsledky z programu Popilek.exe dokazují vliv velikosti náhrady cementu popílkem na vývin hydratačního tepla a to ve dvou různých bodech průřezu prvku. Skutečnost, že na povrchu prvku s rostoucím procentuálním zastoupením popílků teploty klesají, byla nadále uvažována při konfiguraci laboratorních testů a složení jednotlivých směsí.

Experimentální část byla zaměřena na modifikaci struktury zatuhlé betonové směsi vlivem přídavku popílků do směsi

Obr. 5 a) Rozrušená vrstva materiálů, b) nenarušené jádro po odstranění degradované vrstvy ■ Fig. 5 a) Disrupted surface layer of concrete, b) non-impacted core of tested specimen

Obr. 6 Porovnání maximálních dosažených sil degradovaných vzorků ze směsí č. 1, 2 a 3 (viz. tab. 3) při zkoušce třibodovým ohybem ■ Fig. 6 Comparison of the maximal achieved forces of the degraded specimens from the reference mixtures 1, 2 and 3 (see tab. 3) during the three points bending test

Obr. 7 Vznikající vyluhovaná uskupení sádrovce a etringitu pod povrchem [6] ■ Fig. 7 Emerging infused formations of gypsum and ettringite in subsurface layers [6]

Literatura:

- [1] Procházka M., Hanuš V.: Modelling and simulation of heat evolution process in cementitious materials with portion of fly ash, AMSE MS'10 Prague, Praha 2010
- [2] Lelusz M., Kosior M.: Trvanlivost betonu s popílkem vystaveného extrémním klimatickým podmínkám, 2. Kongres cementobetonových vozovek CCC, sborník VŠCHT, Praha, 2002
- [3] Škvára F.: Chemie a technologie anorganických pojiv II., Ústav skla a keramiky VŠCHT, Praha 2003
- [4] Ferreira M., Jalali S., Gjov E.: Software for probability – based durability analysis concrete structures, University of Minho, Norwegian University of science and technology, NTNU, 2008
- [5] Procházka M.: Užití směsných betonů v betonovém stavitelství, Fakulta stavební – ČVUT v Praze, Praha 2010
- [6] Maltais Y., Samson E., Marchand J.: Predicting the durability of Portland cement systems in aggressive environments, Cement and Concrete Research 34 (2004) 1579–1589, March 2004
- [7] Hruška J., Kopáč J.: Kyselý déšť stále s námi – zdroje, mechanismy, účinky, minulost a budoucnost, Edice Planeta 2005 – Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha 2005
- [8] http://www.geopolymery.eu/aitom/upload/fotogalerie/02_mikrostruktura_alumosilikatoveho_polymeru/6_geopolymer_popilek_ji_800.jpg, říjen 2011

a úpravou vodního součinitele, pro zlepšení odolnosti betonových směsí vůči korozi vlivem působení agresivních činitelů. Jako agresivní činitelé byly alternativně používány chloridy ve formě solí a kyselin. Při porovnání výsledků zkoušených směsí na vliv působení agresivního prostředí je patrný vliv vodního součinitele. Z porovnání výsledků vyplývá správnost a ověření původní predikce. Betony s latentně hydraulickou příměsí popílku vykazují větší odolnost vůči agresivnímu prostředí.

V současné době stejný vědecký kolektiv a autoři tohoto článku zaštiťují na Katedře betonových a zděných konstrukcí ve spolupráci s Experimentálním centrem Fakulty stavební ČVUT v Praze následné testy a zušlechťování vlastních modelových směsí pod účinky zasolování a zaměřují se na zvyšování odolnosti vůči primární a sekundární degradaci vlivem okolního prostředí.

Článek vznikl za finanční podpory grantu Studentské grantové soutěže číslo SGS11/107/OHK1/2T/11 na Fakultě stavební ČVUT v Praze.

Ing. Vít Hanuš
tel.: 605 732 680
e-mail: vit.hanus@fsv.cvut.cz



Doc. Ing. Petr Štemberk, Ph.D.
tel.: 224 354 364
e-mail: stemberk@fsv.cvut.cz



oba: Katedra betonových a zděných konstrukcí
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Thákurova 7, 166 29 Praha 6–Dejvice

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

STAVÍME PROFESIONÁLNĚ



www.smp.cz



DÁLNIČE D3 TRASA 307 TÁBOR - SOBĚSLAV

Divize dopravních staveb, středisko 14 realizuje na trase D3 307 Tábor - Soběslav 2 stavební objekty. SO 7-232 Most na polní cestě a SO 7-213 Most přes lokální biokoridor. Oba mosty budou dokončeny v průběhu roku 2012.

SMP
SMP CZ

Společnost skupiny VINCI CONSTRUCTION