

Trvanlivost betonu s popílkem vystavenému extrémním klimatickým podmínkám

(ze sborníku 2. kongresu cementobetonových vozovek CCC)

Autoři příspěvku: Malgorzata Lelusz, Marta Kosior-Kazberuk

Abstrakt

Mnoho betonových konstrukcí se spíše potýká s problémem malé trvanlivosti, než s problémem nízké pevnosti. Odolnost proti pronikání chloridů a odolnost při cyklech zmrazování-rozmrazování jsou důležitými vlastnostmi betonu, jež ovlivňují jeho trvanlivost. Cílem tohoto příspěvku je zdokumentovat vliv popílku – levné a dostupné příměsi – na odolnost betonu proti agresivním environmentálním vlivům (cyklům zmrazování-rozmrazování a pronikání rozmrazovacích solí). Výsledky tohoto zkoumání, které se zaměřuje na sledování změn odolnosti betonu proti pronikání chloridů v závislosti na obsahu popílku k celkové hmotnosti cementu, a stejně tak i doba zrání, jsou obsahem tohoto příspěvku. Pronikání chloridů bylo posuzováno pomocí zkoušky neustálé migrace vhodné pro výpočet koeficientu difuze. Odolnost proti odlupování betonu nasyceného rozmrazovacími solí při vystavení cyklickému zmrazování a rozmrazování byla analyzována Borásovou metodou. Je to nejtvrďší zkouška mezi metodami posuzujícími mrazuvzdornost. Navíc byly analyzovány výsledky pevnosti v tlaku po 2, 28, 90 a 180 dnech. V rámci tohoto krátkého programu byly zkouškami také zjišťovány hodnoty jiných vlastností popílku v betonu.

Přidání popílku do betonu může významně podpořit jeho vlastnosti, neboť tento materiál zlepšuje trvanlivost betonu.

1 Úvod

Přidáním vedlejšího produktu průmyslu, jakým je popílek, struska a křemičitý úlet do betonu může významně podpořit jeho základní vlastnosti, a to jak v čerstvém, tak i zatvrdlém stavu. Tyto materiály významně zlepšují trvanlivost betonu – regulují vysoké teplotní gradienty, vyplňují mezery, minimalizují cementové alkálie, zvyšují odolnost proti vniknutí chloridů a síranů kontinuálním mikrostrukturálním vývojem v dlouhodobé hydrataci a při pucolánových reakcích. Použití vedlejších produktů jako částečného nahrazení cementu má významné ekonomické, environmentální a technické přínosy jako je snížení množství odpadů, čistější životní prostředí, snížení potřeby energie, dobré funkční charakteristiky po dobu životnosti a úspora nákladů.

Tento příspěvek se zabývá betonem, jehož součástí je i popílek. Díky nízké ceně a snadné dostupnosti jsou popílky vzniklé spalováním uhlí nejčastěji používaným materiálem při výrobě směsí s cementem, které zlepšují jejich mikrostruktury.

V příspěvku jsou prokazovány výborné funkční vlastnosti betonu obsahujícího Alternativní cementované materiály (ACM), jakým je popílek, granulovaná vysokopecní struska nebo mikrokřemen v solí nasyceném prostředí. Odolnost vykazovaná těmito betony se vztahuje k nízké mobilitě iontů chloridu a to snížením počtu propojených mezer, což je výsledkem buď pucolánové reakce ACM nebo chemické vazby cementových hydrátů. Chemické vazby se v betonu z portlandského cementu obsahujícím ACM při reakci vyvíjejí pozvolna a stejně tak se vyvíjí pozvolna i odolnost proti klimatickým vlivům.

Za dva hlavní agresivní vlivy prostředí ovlivňující trvanlivost betonové vozovky jsou považovány: cyklické zmrazování a rozmrazování a vnikání iontů chloridu. Obsahem tohoto příspěvku je posouzení odolnosti povrchu betonu proti odlupování

a sledování změn odolnosti betonu proti vnikání chloridů v závislosti na obsahu popílku k celkové hmotnosti cementu, a stejně tak i doba zrání.

2 Materiály a zkušební metody

2.1 Betony, zrání a příprava zkušebních těles

Zkoušky byly prováděny na drobnozrnném betonu. Použil se běžně dostupný cement: portlandský cement CEM I 32,5 R. Mineralogické složení použitého slínku v cementu je uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1 – Mineralogické složení použitého slínku v cementu

Složka	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Obsah (%)	62,1	14,5	8,6	9,3

Použil se popílek z místní elektrárny. Fázové složení popílku bylo stanoveno difrakční analýzou rentgenovými paprsky. Byly zjištěny dvě krystalické fáze: β-křemen a mulit (nerostný křemičitan hlinitý). Popílek také obsahoval anhydrit, oxid vápenatý a velmi malé množství vápníku a sádrovce. Obsah volného CaO podle analytické zkoušky byl 0,25 %.

Ztráta žíháním sledovaná po dobu 25 dní nepřekročila 4,8 %. Specifická hmotnost minerální příměsi byla 2,23 kg/dm³.

Jako drobné kamenivo se použilo těžené říční kamenivo o maximální velikosti zrna 2 mm a jako hrubé čedičové kamenivo o maximální velikosti zrna 8 mm.

Zkoušky byly prováděny na zkušebních tělesech připravených ze směsí s třemi odlišnými hodnotami obsahu popílku: 10, 20 a 30 % hmotnosti cementu a také kontrolní zkušební tělesa bez přídavku popílku. Část popílku (20 %) bylo počítáno jako pojivo a zbytek jako filer. Obsah cementu v kontrolním betonu byl 350 kg/m³. Voda v poměru s pojivem byla ve zkoušených betonových směsích konstantní (w/b = 0,50).

Betonová směs se nalila do forem a ztuhlila vibrací. Po 24 hodinách byla zkušební tělesa vyjmuta z forem a uložena ve vodě při teplotě 18 ± 2 °C.

2.2 Zkušební metody

Odolnost betonu proti odlupování vystavením cyklickému zmrazování rozmrazování a nasycení v rozmrazovací soli bylo stanoveno podle standardní Borásovy metody. Jedná se o nejtvrďší metodu při zkoušení mrazuvzdornosti. Chování betonu při vystavení klimatickým podmínkám je simulováno, typ poruchy je objeven v reálných strukturách. Ve zmrazovací komoře s regulovanou teplotou a časem systémů mražení a ohřevu jsou zkušební tělesa vystavována opakovaně zmrazování a rozmrazování. Povrchy zkušebních těles byly v kontaktu s 3% roztokem NaCl. Každých sedm dní byl roztok NaCl vyměněn. Materiál, který vykázal odlupování, byl shromážděn a sušen na konstantní hmotnost. Množství odloupeného materiálu na sledované ploše tělesa po n cyklech m_n se vypočítala pro každé měření a každé těleso. Doba cyklu byla 24 hodin.

Průměrná hmotnost odloupeného materiálu po 28 a 56 cyklech se používá pro hodnocení odolnosti proti odlupování podle kritérií uvedených v normě (viz literatura). Pro posouzení účinku popílku na mrazuvzdornost směsi byl ve zkoušce použit vzduchem neinfiltrovaný beton.

Elektrochemická metoda, často uváděná jako Zrychlená zkouška migrace chloridu (RCMT) byla v této studii použita pro stanovení hodnoty koeficientu migrace v prostředí neustálé migrace. Použil se externí elektrický potenciál v ose válcového tělesa a tím ionty chloridu migrovaly směrem do tělesa. Použité napětí a doba

zkoušky závisely na měřeném počátečním proudu, ačkoliv byl efekt zahřívání tělesa eliminován. Válcová betonová tělesa byla vystavena napětí 30 voltů pomocí externích nerezových elektrod umístěných na druhém konci tělesa.

Katodový roztok byl 10% NaCl a anodový roztok byl 0,3 mol/dm³ NaOH. Na konci zkoušky (po 24 hodinách) bylo betonové válcové těleso rozděleno na dva půlválce. Nově vystavený povrch byl nastříkán indikačním roztokem (AgNO₃) pro stanovení hloubky vniknutí chloridů. Kolorimetrická metoda použitím AgNO₃ reaguje změnou barvy při koncentraci chloridů $c_d = 0,07 \text{ mol/dm}^3$. Hloubka vniknutí chloridů byla měřena viditelnou bílou stříbrnou chloridovou sraženinou na 7 bodech plochy povrchu. Průměrná hloubka vniknutí x_d je výsledným parametrem zkušebního postupu.

Předmětem zkoušek byly také ostatní fyzikální a mechanické vlastnosti charakterizující betony.

3 Výsledky a diskuze

3.1 Vlastnosti betonu s popílkem

Před posuzováním odolnosti betonu proti agresivním vlivům byly zkoušeny základní vlastnosti. Výsledky zkoušek vybraných vlastností popisujících ztvrdlý beton, a také ovlivňující trvanlivost, byl shrnuty v tabulce 2.

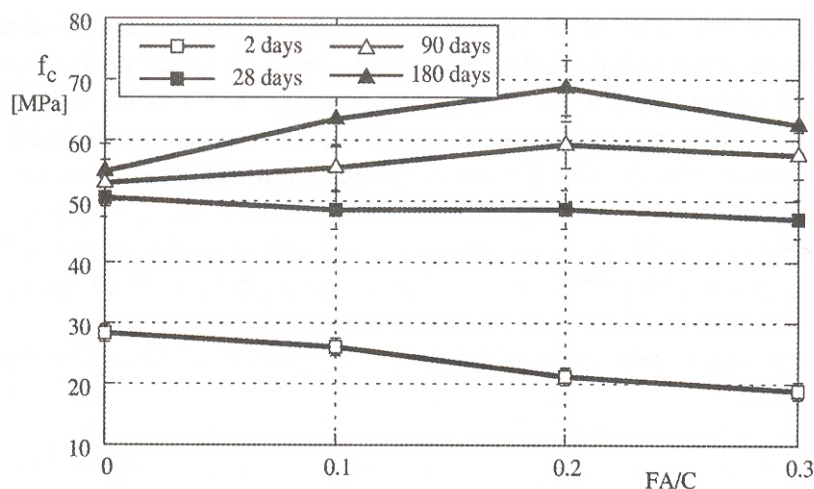
Tabulka 2 – Vybrané vlastnosti betonů s popílkem po 28 a 90 dnech zrání

Poměr popílek/cement FA/C	Objemová hmotnost (kg/dm ³)	Nasákavost (% wt.)	Kapilární zdvih 3% roztokem NaCl (kg/m ²)	Celková mezerovitost (%)
0,0	2,223	5,57	0,396	19,45
0,1	2,280	5,01	0,373	15,55
0,2	2,267	5,11	0,142	15,11
0,3	2,257	5,41	0,212	17,64

Vlastnosti byly stanoveny po 28 dnech zrání. Nasákavost je vyjádřena jako množství vody absorbované zkušební tělesem zcela ponořeným ve vodě na hmotnost suchého tělesa.

Jak ukazuje tabulka 2 příměs popílkem je uvažována poměrem k cementu, nemá žádný významný vliv na objemovou hmotnost a má velmi malý vliv na nasákavost. Vlastnost spojená s odolností proti odlupování – schopnost betonu kapilárního zdvihu 3% roztokem NaCl je tím nižší, čím je vyšší obsah popílkem v betonové směsi.

Změny pevnosti v tlaku v době zrání betonů je uvedena na obrázku 1. Graf ukazuje, že míra nárůstu pevnosti betonu obsahujícím popílek je pomalejší ve srovnání s pevností kontrolního betonu (bez příměsi popílkem). Získané výsledky pevnosti betonu prokazují vliv popílkem na nárůst pevnosti ve všech dobách zrání. Všeobecně lze konstatovat, že míra nárůstu pevnosti je nižší u směsí obsahujících popílek při počátečních fázích zrání. Nárůst pevnosti betonů s popílkem je významný mezi 28 a 180 dnem zrání. Betony obsahující příměs popílkem dosahovaly vyšších hodnot pevnosti v tlaku než kontrolní betony bez popílkem.



Legenda

Osa x znázorňuje poměr popílku v jednotce cementu (FA/C)

Osa y znázorňuje pevnost v tlaku f_c

Obrázek 1 – Nárůst pevnosti v tlaku betonu s příměsí popílku

3.2 Mrazuvzdornost

Posouzení odolnosti proti odlupování zkoušeného betonu je uvedeno v tabulce 3.

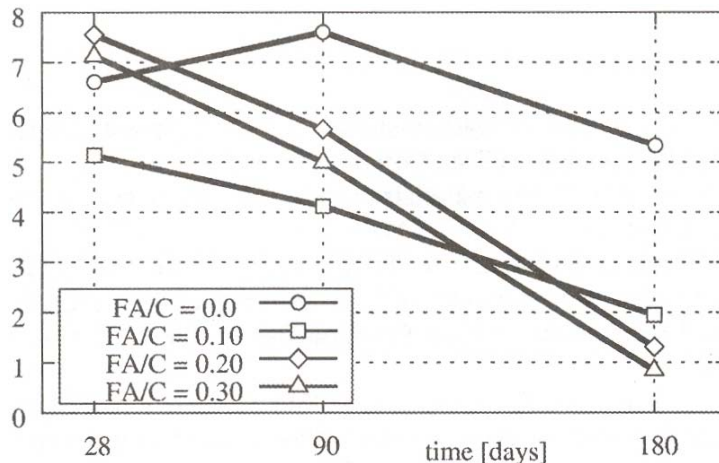
Tabulka 3 – Průměrná hodnota odloupnutého materiálu po n cyklech zmrazování-rozmrazování

Poměr popílek/cement FA/C	Průměrná hodnota odloupnutého materiálu po n cyklech zmrazování-rozmrazování (kg/m^2)			Odolnost proti odlupování podle normy (viz literatura)
	m_{28}	m_{56}	m_{56}/m_{28}	
0,0	0,199	0,396	1,98	dobrá
0,1	0,265	0,373	1,41	dobrá
0,2	0,118	0,142	1,20	dobrá
0,3	0,162	0,212	1,31	dobrá

Jak ukazuje tabulka 3 mrazuvzdornost zkoušených betonů, posuzovaných podle kritérií normy (viz literatura) byla dobrá. To znamená, že celková hmotnost odloupnutého materiálu po 56 cyklech zmrazování-rozmrazování byla nižší než $0,50 \text{ kg/m}^2$ a hodnoty poměru m_{56}/m_{28} byly nižší než 2. Hmotnost odloupnutého materiálu klesala s nárůstem obsahu popílku a pro betony obsahující 20 až 30 % příměsí popílku v cementu byla hmotnost odloupnutého materiálu nižší než $0,30 \text{ kg/m}^2$. Přidáním popílku do betonové směsi z portlandského cementu, v uvažovaném množství, nezhorší mrazuvzdornost směsi.

3.3 Odolnost proti proniknutí chloridů

Koeficienty stanovené zkouškou migrací v podmínkách neustálé migrace jsou uvedeny na obrázku 2.



Legenda

Osa x znázorňuje dobu ve dnech

Osa y znázorňuje koeficient difuze ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

FA/C je poměr popílku a cementu

Obrázek 2 – Koeficienty migrace chloridů v podmínkách neustálé migrace

Přidáním popílku do cementu má významný vliv na koeficient migrace chloridů. Analýza dosažených výsledků prokázala pozitivní vliv prodloužené doby zrání a obsahu popílku ve směsi na difuzivitu chloridů do betonu.

V případě betonů (na obrázku 2) obsahujících popílek, během 150 dní zrání (od 28 do 180 dní skladování) se koeficient migrace snížil sedminásobně. Je těžké jednoznačně stanovit vztah mezi poměrem popílek/cement a koeficientem migrace betonů zkoušených po 28 dnech zrání především asi z toho důvodu, že měření hloubky vniknutí chloridů pomocí kolorimetrické metody je nepřesná. Se zráním směsi (pozorování po 90 dnech a 180 dnech uskladnění) hodnoty koeficientu významně poklesly.

U betonových směsí portlandského cementu bez přidání popílku se koeficient výrazně nezměnil, jeho hodnoty byly stále nad $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

4 Závěry

Zkoumání bylo prováděno primárně pro posouzení trvanlivosti betonu obsahujícího popílek při vystavení agresivním vlivům cyklického zmrazování-rozmrazování a působení chloridů. Z výsledků lze vyčíst, že přidáním popílku do směsi dochází ke výraznému snížení množství chloridů, které pronikly do betonu jako mineralogická příměs. Bylo shledáno, že odolnost proti vniknutí chloridů se zvyšuje v čase. Beton s popílkem je charakterizován dobrou odolností proti odlupování povrchu vystavenému cyklickému zmrazování-rozmrazování v roztoku NaCl. Výsledky pevnosti v tlaku za 90 a 180 dní skladování ukazují, že pevnost u všech směsí s popílkem dosáhla vyšších hodnot, než u kontrolní betonové směsi bez příměsi popílků.

Příznivý vliv popílku přidáním do betonu z portlandského cementu je evidentní až po 28 dnech zrání, až se projeví výsledky procesu hydratace, pucolánové reakce a změny v mikrostrukturu. Analýza výsledků zkoušek demonstruje možnost získání vhodnějších vlastností směsi. Přidáním popílku do betonové směsi získává betonová vozovka vlastnosti zvyšující její odolnost a trvanlivost.

Literatura

švédská norma SS 13 7244 Zkušební metody betonu – Ztvrdlý beton– Odlupování mrazem