

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra technologie staveb**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
Trvanlivost betonů s pojivem na bázi
sulfátovápenatého popílku**

**Matouš Krása
2017**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předkládanou bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne

.....

Matouš Krása

Poděkování:

Na prvním místě bych chtěl poděkovat panu Ing. Rostislavu Šulcovi, Ph.D., za trpělivost, odborné rady a pomoc při vytváření této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům Experimentálního centra fakulty stavební na Českém vysokém učení technickém v Praze, zvláště pak panu Ing. Pavlu Reitermanovi, Ph.D. Na závěr velké poděkování patří mé rodině a přátelům, kteří mě provázeli a podporovali během celého studia.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Krása</u>	Jméno: <u>Matouš</u>	Osobní číslo: <u>424453</u>
Zadávací katedra: <u>K122 - Katedra technologie staveb</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Příprava, realizace a provoz staveb</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovápenatého popílku</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>The durability of concrete with binder based on sulfocalcic ash</u>	
Pokyny pro vypracování:	
1) Rešerše odolnosti betonů proti působení chemických rozmrazovacích látek a zmrazovacích cyklů.	
2) Rešerše k opatřením vedoucím ke zvýšení odolnosti betonů proti korozním jevům způsobeným působením CHRL.	
3) Rešerše k odolnosti betonů s vysokým obsahem popílků proti působení CHRL.	
4) Návrh betonů s pojivem Sorfix s ohledem na zvýšení odolnosti proti CHRL, zmrazovacím cyklům.	
5) Vyjasnění závislosti mezi obsahem vzduchu v Sorfix-betonu, prostorovým rozložením pórů, mechanickými vlastnostmi a CHRL.	
6) Optimalizace navrženého betonu.	
Seznam doporučené literatury:	
1) ČSN 731322 Stanovení mrazuvzdornosti betonu	
2) ČSN 731326 - Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek	
3) Možiš, Z. - FPC betony na bázi upravených sulfátovápenatých popílků - diplomová práce	
4) VALENZA, J. John II. a SCHERER, W. George. A review of salt scaling: II. Mechanisms	
5) DOHNALEK, Jiří. Vliv Mrazuvzdornosti na jeho povrchové úpravy	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>27.02.2017</u>	Termín odevzdání bakalářské práce: <u>28.05.2017</u>
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
_____	_____
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutně uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

_____	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Anotace

Tato bakalářská práce pojednává o trvanlivosti B-FPC betonů. Na začátku, v teoretické části, je řešeno o mrazuvzdornosti betonů, jejich odolnosti proti chemickým, rozmrazovacím látkám (CHRL) a o opatřeních, kterými se dá trvanlivost betonů prodloužit. Autor zde také píše o popílcích, o trvanlivosti betonů s vysokým obsahem popílků, o vlastnostech pórů a o B-FPC betonech. Praktická část je věnována jednotlivým vstupním materiálům a pracovním postupům jak pro výrobu, tak pro zkoušení vzorků. Dále je zde popsána metodika návrhu jednotlivých směsí a jsou zde uvedeny výsledky z jednotlivých zkoušek a jejich porovnání. Na závěr je provedeno shrnutí celé práce a její hodnocení.

Klíčová slova

- Fluidní popílek
- Trvanlivost
- Chemické rozmrazovací látky
- Pevnost v tlaku
- Obsah vzduchu
- Konzistence

Annotation

This bachelor thesis deals with durability of B-FPC concrete. In the theoretical part, there is the search about frost resistance of concrete, its resistance to salt scaling and about measures, by which we can prolong durability of concrete. The author also examines fly ash, durability of concrete with a high volume fly ash, properties of air void and B - FPC concrete. The practical part is dedicated to raw materials and to workflows for both production and testing. In the next part, the methodology of the design of the mixtures is described and results of each test are presented and compared. In the final section, the thesis is summarized and evaluated.

Keywords

- Fluid fly ash
- Durability
- Chemical thaw substances
- Compressive strength
- Air content
- Consistency

Obsah

Úvod.....	8
1 Teoretická část	10
1.1 Odolnost betonu proti zmrazovacím cyklům a působení CHRL.....	10
1.1.1 Teorie degradačních procesů vlivem mrazu bez CHRL	11
1.1.2 Teorie degradačních procesů vlivem mrazu - působení CHRL.....	11
1.2 Opatření ke zvýšení odolnosti betonů proti CHRL.....	12
1.2.1 Provzdušňující přísady.....	13
1.2.2 Vodní součinitel, pevnost a provzdušnění	13
1.2.3 Podmínky pro zrání	14
1.2.4 Ošetřující přípravky	14
1.3 Popílek.....	15
1.3.1 Fluidní spalování	15
1.3.2 Stacionární fluidní kotle	15
1.3.3 Fluidní kotle s cirkulující vrstvou.....	15
1.3.4 Fluidní popílek.....	16
1.4 Odolnost betonů s vysokým obsahem popílků proti CHRL.....	16
1.5 Stanovení vlastností vzduchových pórů.....	17
1.5.1 Příprava zkušební vzorku	17
1.5.2 Postup zkoušky.....	17
1.5.3 Pojmy	18
1.5.4 Výpočty	18
Seznam použitých zdrojů	20
Seznam obrázků	24
Seznam grafů.....	25
Seznam tabulek	26

Úvod

Velmi často slyšíme v médiích otázky ohledně ochrany životního prostředí, nakládání s odpady a jejich recyklaci. Mimo běžné odpady, které produkuje každá domácnost, si většina lidí ani neuvědomuje, kolik odpadu vyprodukuje používáním elektrických spotřebičů, elektřiny obecně a jiných energetických produktů. Když k domácnostem přičteme ještě průmysl a další odvětví, jedná se o 13,7 miliónů tun (údaj z roku 2014) vedlejšího energetického produktu (VEP), který se v České republice vyprodukuje za jeden rok. [6] Jedná se o odpad z tepelných elektráren a tepláren, konkrétně o popílek, strusku, škváru, popel a produkty, které vznikají v průběhu odsiřování kouřových plynů. V současné době je snaha o využití těchto produktů, zvláště pak ve stavebnictví.

Fluidní popílek, který jako vedlejší produkt vzniká při fluidním spalování, začíná tvrdnout za pouhého smíchání s vodou. Mnoho patentů popisuje jak po náležité technologické úpravě, začít využívat tento popílek jako pojivo v betonových směsích, místo dosud používaného cementu.

Ve své práci bych chtěl proto navázat na odborné publikace věnované B-FPC betonům, tedy betonům s pojivem z fluidních popílků, zvláště pak na diplomovou práci Zdeňka Možiše. Hlavně bych se chtěl věnovat odolnosti těchto betonů proti chemickým rozmrazovacím látkám, kde betony tohoto typu nespĺnily požadavky příslušných norem.

Konkrétně se jedná o přípravu směsi, určenou pro realizaci betonového silničního panelu v kategorii CB I (letiště, dálnice, silnice I třídy...), CB II (silnice II a III třídy...) a CB III (obslužné místní komunikace, odstavné a parkovací plochy...) [17]. Požadavky pro tyto skupiny, kterých bych chtěl dosáhnout, jsou dle normy ČSN 73 6123-1 následující: Třída pevnosti v tlaku C25/30 pro CB III a C 30/37 pro CB I a II. Odolnost proti CHRL metodou A v případě CB I maximální odpad 1000 g/m² po 100 cyklech a v případě CB II 1000 g/m² po 75 cyklech, pro CB III není v normě hodnota specifikována. Požadavek na obsah vzduchu pro jednotlivé stupně agresivity dle ČSN EN 206 je 4,0 % pro XF4. Dle již neplatné normy ČSN EN 206-1/Z3 je požadavek pro dopravní a jiné významné stavby 4,5 % pro XF4.

České vysoké učení technické

Fakulta stavební

Katedra technologie staveb

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovápenatého popílku

Cíle práce:

- Uvedení do problematiky trvanlivosti betonů
- Rešerše o fluidních popílcích a o fluidním spalování
- Rešerše o pevnosti v tlaku a odolnosti proti CHRL B-FPC betonů
- Optimalizace receptury směsi, splňující požadavky normy ČSN 73 6123-1 a ČSN EN 206-1/Z3
- Zkouška 28 denní pevnosti v tlaku
- Zkouška odolnosti proti chemickým, rozmrazovacím látkám

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovépenatého popílku

1 Teoretická část

1.1 Odolnost betonu proti zmrazovacím cyklům a působení CHRL

Téma mrazuvzdornosti a odolnosti betonů proti působení chemických rozmrazovacích látek (CHRL) je velice aktuální téma, kterému je věnováno mnoho odborných publikací. I přesto na něj projektanti při návrhu nekladou patřičný důraz. Díky normě ČSN EN 206, jsou definovány jednotlivé stupně agresivity prostředí (Tab. 1), v závislosti na podmínkách, v kterých se daný konstrukční prvek nachází, pomocí kterých můžeme jednoduše definovat požadavky na beton. [18]

5 Působení mrazu a rozmrazování s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich		
Pokud je mokřý beton vystaven významnému působení střídavého mrazu a rozmrazování, určí se vliv prostředí následovně:		
XF1	Mírně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků.	Svislé betonové povrchy vystavené dešti a mrazu.
XF2	Mírně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky.	Svislé betonové povrchy silničních konstrukcí vystavené mrazu a rozmrazovacím prostředkům rozptýleným ve vzduchu.
XF3	Značně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků.	Vodorovné betonové povrchy vystavené dešti a mrazu.
XF4	Značně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou.	Vozovky a mostovky vystavené rozmrazovacím prostředkům. Betonové povrchy vystavené přímému ostříku rozmrazovacími prostředky a mrazu. Omývaná část staveb v moři vystavená mrazu.

Tab. 1: Stupně vlivu prostředí - střídavé působení mrazu a rozmrazování [9]

Mimo jiné tato norma pro jednotlivé stupně vlivu prostředí specifikuje následující požadavky na vlastnosti a složení směsi: maximální vodní součinitel w/c , minimální množství cementu, minimální pevnostní třídu, minimální obsah vzduchových pórů a požadavky na použité kamenivo. [9]

	Stupeň vlivu prostředí			
	XF1	XF2	XF3	XF4
Maximální vodní součinitel w/c	0,55	0,55	0,50	0,45
Minimální pevnostní třída	C 30/37	C25/30	C30/37	C30/37
Minimální obsah cementu (kg/m^3)	300	300	320	340
Minimální obsah vzduchu (%)	-	4,0	4,0	4,0
Jiné požadavky	Kamenivo podle EN 12620 s dostatečnou mrazuvzdorností			

Tab. 2: Požadavky na vlastnosti a složení betonu dle ČSN EN 206 [9]

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovépenatého popílku

1.1.1 Teorie degradačních procesů vlivem mrazu bez CHRL

Téma mechanismu degradačních procesů je komplikované a nejednoznačné. Existuje mnoho teorií, které se vzájemně mezi sebou liší. Jednoduše by si člověk mohl říci, že příčinou je tahové napětí způsobené zvětšením objemu při změně skupenství vody v led. Toto tvrzení je ale velice nepřesné. Pórový systém betonu je složitý a skládá se ze systému makropórů (gelové, kapilární, vzduchové), které jsou rozdílným způsobem nasyceny vodou měnící se v led při různých teplotách. V některých typech pórů nedochází k přeměně vody v led ani při -30 až -40°C

Postupné tvoření ledu vytváří hydraulický tlak, kterým je voda tlačena do kapilár. V případě, že je tento tlak větší než tahová pevnost cementové matrice, dochází k degradaci betonového tělesa.

Musíme mít také na mysli teorie založené na jiné teplotní roztažnosti kameniva, cementové matrice a ledu. [18]

1.1.2 Teorie degradačních procesů vlivem mrazu - působení CHRL

Pro degradační proces vzniklý při působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek, anglicky označovaný jako „salt scaling“ (odlupování betonu vlivem soli), existuje také mnoho teorií. Abychom mohli považovat případný mechanismus, jako původce této degradace, musí splňovat následující charakteristiky:

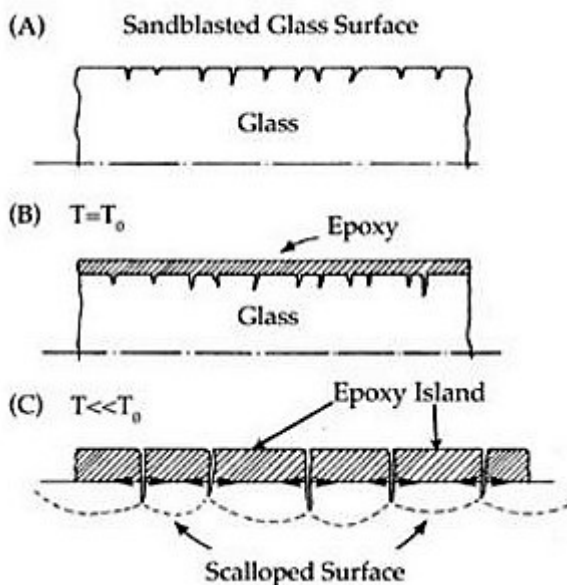
- a) Degradace spočívá v postupném odstraňování malých úlomků tmelu.
- b) Nejhorší stav – roztok o koncentraci $\sim 3\%$, nezávisle na roztoku, který použijeme.
- c) V případě, že na povrchu není vrstva roztoku, nedochází k odlupování.
- d) Degradace nenastává, pokud je minimální teplota nad -10°C . Množství poškození se zvětšuje, když minimální teplota klesá pod -10°C a s delším časem na minimální teplotě.
- e) Provzdušnění zlepšuje odolnost.
- f) Koncentrace soli ve vrstvě roztoku na povrchu je důležitější než koncentrace soli v pórech.
- g) Náchylnost k odlupování vlivem soli nesouvisí s náchylností na vnitřní působení mrazu.
- h) Síla povrchu určuje schopnost odolávat odlupování betonu vlivem soli. [32]

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovépenatého popílku

Hlavní příčina „salt scaling“ a mechanismus, který splňuje všechny tyto charakteristiky, se nazývá „Glue spalling“. Originálně se toto označení používá pro metodu zdobení skla, na jejímž principu je vysvětlen mechanismus odlupování betonu.

Tato metoda spočívá v pískování skla a následné aplikaci epoxidu za vysoké teploty. Takto vytvořený kompozit se poté schladí. V důsledku většího smršťování epoxidu dojde k jeho popraskání a vzniku tahového napětí po obvodu prasklin, které má za následek odloupení tenkých slupek skla.

V našem případě se jedná o kompozit složený ze samotného betonu a zmrzlého solného roztoku na jeho povrchu, který v případě, že dochází ke snižování teploty pod jeho bod tání, se začne smršťovat pětikrát více než beton. Vzniklé napětí má za následek prasknutí určité vrstvy ledu. Tyto praskliny pronikají do cementového tmelu, pokračují rovnoběžně s rozhraním kompozitu a následně dojde k odloupení části betonu. [33]



Obr. 1: Schéma mechanismu "Glue spalling" [33]

1.2 Opatření ke zvýšení odolnosti betonů proti CHRL

Nejjednodušším opatřením je beton takovému prostředí vůbec nevystavovat, což ale většinou nelze splnit. Proto existují opatření, která pomáhají jeho odolnost zvyšovat a chránit tak beton před jeho degradací.

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovépenatého popílku

1.2.1 Provzdušňující přísady

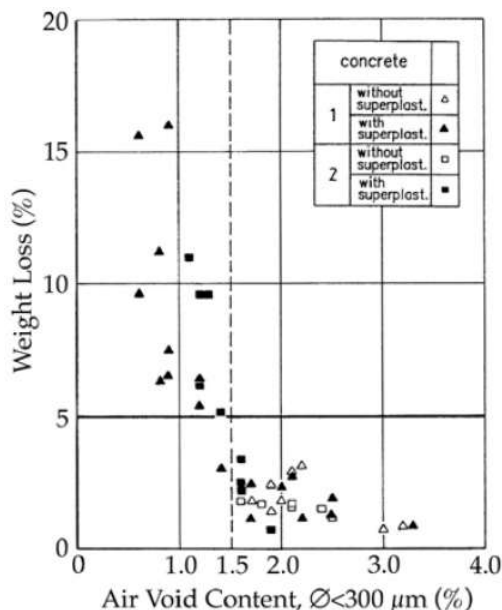
Provzdušněním betonu zvyšujeme jeho odolnost proti CHRL, abychom však dosáhli vyhovující odolnosti, musíme dodržet hodnotu spacing factoru (pojem vysvětlen v kapitole 2.3.7 Stanovení vlastností vzduchových pórů) menší než 300 μm .

Vliv provzdušnění:

1. Snižuje krvácení betonu a tím způsobené snižování povrchové pevnosti. Krvácení způsobuje rozdílnou hustotu betonu v jeho průřezu, kdy její největší hodnota je u dna. Tyto změny hustoty odpovídají změnám pevnosti, proto je pak na povrchu beton o nejmenší pevnosti. Vytvořené vzduchové bubliny se nalepí na částice cementu a umožní jim pohyb směrem vzhůru.

2. Počáteční mráz ve vzniklých vzduchových bublinách vyvolává sání v tekutinách pórů, toto sání má za následek stlačení skeletu pórů, kterým snížíme napětí vzniklé teplotní roztažností na jednu třetinu.

Na grafu (Graf 1) je vidět, že ideální je, aby směs měla obsah pórů s průměrem menším jak 300 μm více jak 1,5 %. [32, 33]



Graf 1: Závislost úbytku hmotnosti na obsahu pórů s $\text{Ø} < 300 \mu\text{m}$ [32]

1.2.2 Vodní součinitel, pevnost a provzdušnění

Vodní součinitel má velký vliv na trvanlivost betonu (pevnost, propustnost), při klesajícím w/c, se snižuje krvácení a zvyšuje pevnost, čímž dosahujeme větší odolnosti proti „salt scaling“. Beton o nízkém vodním součiniteli w/c do 0,3 se nemusí

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovépenatého popílku

provzdušňovat, jeho krvácení je velice malé, odpovídá betonu o $w/c = 0,45$ a 20 % vzduchu. [26, 32]

Aby provzdušněný beton byl odolný proti CHRL, při obvyklém vodním součiniteli 0,4 až 0,45, je třeba dosáhnout pevnosti okolo 40-45 MPa. [32]

1.2.3 Podmínky pro zrání

Čím déle bude ošetřován beton ve vlhku, tím vyšší pevnosti se dosáhne a naopak, když bude vysušován a vystavován vysokým teplotám, výsledná pevnost bude nižší.

Vystavení betonu vysokým teplotám na krátkou dobu hned po betonáži, má za následek snížení odolnosti proti CHRL. [32] Například, nechá-li se beton na jeden den při teplotě 38°C, jeho 28. denní pevnost se sníží o 10 %. [27] Vysoká teplota během zrání má tedy negativní vliv na odolnost betonu proti CHRL, protože snižuje jeho pevnost. [32]

U betonu (cement I), bylo dokázáno, že delší doba vlhkého ošetřování má pozitivní vliv na odolnost proti CHRL. [20, 22] Následné vysychání při pokojové teplotě však nemá podstatný vliv. Pokud by byla teplota vyšší, dochází k zhoršení odolnosti, z důvodu oslabení povrchu betonu. Toto oslabení může způsobit i vysychání při relativní vlhkosti menší jak 30 %. [32]

1.2.4 Ošetřující přípravky

Ošetřující přípravky a tmely – sealers pouze oddalují nástup degradace, v některých případech následně dochází k náhlému a značnému vzniku odpadu. [32] Při zkoušení tří různých druhů tmelů – sealers, došlo během zkoušky odolnosti proti CHRL pouze k opoždění příjmu vlhkosti díky vytvořenému hydrofobnímu povrchu. [28] I při použití podobných silikonových ošetřujících přípravků se obsah vlhkosti ošetřeného vzorku téměř vyrovnal neošetřenému po jednom dni ponoření a rozdíl byl nulový po třech dnech. [21] To odpovídá zabránění nástupu degradace během prvních 5 až 10 denních zmrazovacích/rozmrazovacích cyklů, neznamená to však schopnost ošetřujícího přípravku zabránit příjmu vlhkosti.

Jak již bylo řečeno, ošetřující přípravky pouze oddalují nástup degradace, ale nemají vliv na odolnost proti CHRL. [32]

1.3 Popílek

Popílek vzniká při spalování uhlí v tepelných elektrárnách, jsou to nespalitelné anorganické příměsi. S klesající kvalitou uhlí se zvyšuje množství těchto příměsí.

Podle typů topenišť se rozlišují různé druhy popílků, jako jsou například vysokoteplotní nebo díky modernímu způsobu spalování vzniklé fluidní popílků. Popílků dále dělíme na ložové, zůstávají na dně kotle nebo úletové, které se zachycují v odlučovačích. [19, 31]

1.3.1 Fluidní spalování

Jedná se o moderní metodu spalování založenou na efektu fluidizace. Spočívá v nahřátí inertního materiálu (popel nebo křemenný písek apod.) na teplotu spalování paliva a protékání vzduchu pro dosažení tekutého (fluidního) stavu sypkého materiálu.

U fluidních ohnišť jsou využívány kapalinové vlastnosti, proto dochází k přenosu tepla mezi kapalinou a výhřevnou plochou, díky tomu se dosahuje součinitele prostupu tepla většího ($200 - 800 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$), než u ostatních typů ohnišť ($10 - 100 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).

Do fluidní vrstvy se dávkuje palivo. Jeho okamžité množství je okolo 2 – 3 % celkové hmotnosti fluidní vrstvy. Spalovat se mohou různé druhy paliv, i méně kvalitních. Do fluidní vrstvy se přidává malé množství vápence a tím se zamezí tvorbě SO_3 a zmenší se exhalace oxidů dusíku.

Fluidní kotle se dělí na atmosférické a tlakové. Atmosférické se dále dělí na stacionární fluidní kotle a kotle s cirkulující vrstvou. [1, 25, 31]

1.3.2 Stacionární fluidní kotle

Vyznačují se nižší rychlostí fluidizace, dochází pouze k porušení stability vrstvy, k zvětšení jejího objemu a z původně heterogenní vrstvy se stává homogenní o nových fyzikálních vlastnostech. Mimo jiné se vyznačují i větší granulometrií.

[1, 25]

1.3.3 Fluidní kotle s cirkulující vrstvou

V tomto případě zde dochází k vyšší rychlosti fluidizace, nastává překročení stability fluidní vrstvy a k její cirkulaci. V cyklonu následně dochází k oddělování

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovápennatého popílku

tuhých částic, které se vrací zpět do spodní části ohniště, od spalin, které předávají teplo výhřevným plochám. [25]

1.3.4 Fluidní popílek

Mezi fluidním popílkem a popílkem, který se běžně přidává do betonu, je rozdíl jak chemický tak i mineralogický, obsahuje až 20 hm. % SO_3 , až 15 hm. % volného vysoce reaktivního CaO a občas vykazuje i větší ztráty žíháním až 15 hm. %. U fluidních a teplotně reaktivních popílků a popelů dochází již při smíšení s vodou k jejich tvrdnutí díky obsaženému anhydritu a volnému vápnu oproti vysokoteplotním elektrárenským popílkům, které vykazují pouze pucolánovou aktivitu.

Fluidní popel a popílek se nemůže hodnotit podle ČSN EN 450-1 (Popílek do betonu – Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody) ani podle ČSN EN 450-2 (Popílek do betonu – Část 2: Hodnocení shody), kvůli nesplnění charakteristik popílků používaných do betonu a většiny technických kritérií. [34]

1.4 Odolnost betonů s vysokým obsahem popílků proti CHRL

Tato část bude věnována betonům, kde dochází k náhradě cementu v určitých procentuálních podílech popílkem.

V tomto případě se jedná o vysokoteplotní popílek (fly ash), vedlejší produkt uhelných elektráren, nebo elektráren spalujících práškový antracit, který je zachycen v odlučovačích. Jsou to kulové částice nejčastěji o průměru 1 – 100 μm , které jsou velikostně podobné zrnům nehydratovaného cementu. Popílek zabraňuje provzdušnění, pro dosažení požadovaného spacing factoru se musí dávkovat větší množství provzdušňující přísady. [32]

Zkoušky na odolnost betonu proti chemicky rozpustným látkám dokázali, že popílek obsažený v těchto betonech snižuje jejich odolnost proti CHRL. V případě, že bude beton s obsahem popílku ošetřován ve vlhku krátce (3-28 dní) má to za následek nižší pevnost. Aby měl popílek pozitivní vliv na pevnost betonu, musí být ošetřován delší dobu (1 až 2 měsíce). [32] Dvě studie, kde bylo použito 20%, 30 % a 58 % náhrady popílkem ukázaly, že pro dosažení snížené degradace vlivem CHRL je potřeba aby se 28 denní pevnost přibližovala 40 MPa, nebo aby vodní součinitel směsi byl menší nebo roven 0,5. Se zvyšujícím se obsahem popílku se zvyšuje krvácení betonu. Počáteční degradace probíhá právě na oslabeném povrchu. [5,6]

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovépenatého popílku

Při výzkumu pana Nowaka-Michty byly provedeny vzorky s 0%, 25%, 35% a 50% zastoupením cementu popílkem o vodních součinitelích 0,38 a 0,45. Byly použity popílky třech typů, každý o různé ztrátě žíháním (LOI) A - 1,9 %, B - 5,1 %, a C - 9,0 %. Zkoušení bylo prováděno podle polské normy PKN-CEN/TS 12390-9: 2007. Bylo provedeno 56 zmrazovacích cyklů v 3 % roztoku NaCl s požadavkem na maximální odpad 1,0 kg/m². Závěr z tohoto výzkumu byl následující: pro dosažení požadované odolnosti proti CHRL je důležité jak provzdušnění, tak požadovaný minimální vodní součinitel. V případě vzorků s w/b = 0,38, žádný nepřekročil požadovanou hranici odpadu oproti vzorkům w/b = 0,45, kde překročily všechny tuto hranici. U vzorků s vodním součinitelem 0,45 s 35% a 50% množstvím popílku byla velmi znát rozdílná ztráta žíhání jednotlivých popílků. U popílku s LOI = 9,0 % došlo k téměř pětkrát většímu odpadu než u popílků s LOI = 1,9 %. [24]

1.5 Stanovení vlastností vzduchových pórů

Celý průběh zkoušky, určení vlastností vzduchových pórů v betonových vzorcích, je popsán v normě ČSN EN 480-11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu.

Norma udává, že by se měli testovat vždy dva vzorky z dané série. [11]

1.5.1 Příprava zkušebního vzorku

Přibližně ze středu zkušební kostky se vyřízne vzorek o rozměrech 150 x 100 x 20 mm (v x š x tl).

Plocha vzorku (jedna ze dvou největších), určená pro následné zkoušení, se brousí za mokra pro dosažení rovinnosti. Odpad vzniklý při broušení se odstraní. Okraje pórů musí být ostré a nesmí dojít k výraznému podbroušení tmelu. [11]

1.5.2 Postup zkoušky

Pro samotnou zkoušku je zapotřebí manipulační (skenovací) stolek, osvětlovací zařízení, zařízení pro záznam velikostí úseček a celkového počtu protnutých vzduchových pórů a stereoskopický mikroskop.

Připravené zkušební vzorky se umístí na manipulační stolek, měřicí přímky musí být rovnoběžné s horním povrchem původní kostky. Minimální délka měřících přímek je 1200 mm na každý vzorek. Jejich umístění se řídí následujícími pravidly. Čtyři přímky se umístí v horní části, 6 mm od hrany a 6 mm od sebe. Další čtyři se

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovépenatého popílku

umístí ve spodní části, znovu 6 mm od hrany a 6 mm od sebe. Zbylé měřicí přímký (min. 4) se rozmístí ve středové části 6 mm od sebe.

Pomocí mikroskopu se sleduje daný povrch a měří se délky přímek T_s (pevné části povrchu) a T_a (póry).

Pokud je třeba znát rozdělení velikosti pórů a obsah mikropórů, musí se pomocí speciálního počítadla tětiv změřit jejich délka a počet v každé z 28 tříd. Díky této klasifikaci se může dosáhnout výpočtu rozdělení vzduchových pórů. [11]

1.5.3 Pojmy

Obsah mikroskopických vzduchových pórů A_{300} – tento parametr udává obsah vzduchových pórů, které mají průměr menší nebo roven 300 μm .

Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů (Spacing factor) – parametr, který za daných předpokladů vyjadřuje maximální vzdálenost mezi kterýmkoli bodem v cementovém tmelu a okrajem vzduchového póru, měřený v cementovém tmelu. [11]

1.5.4 Výpočty

Objem cementového tmele: P [%]

$$P = P_c + P_v + P_{př} \text{ [%]}$$

$$P_c = \frac{\text{obsah cementu [kg]}}{\text{měrná hm. cementu [kg} \times \text{m}^{-3}\text{]}} \times 100 \text{ [%]}$$

$$P_v = 0,1 \times \text{obsah vody [%]}$$

$$P_{př} = \frac{\text{obsah přísady [kg]}}{\text{měrná hm. (hustota) přísady [kg} \times \text{m}^{-3}\text{]}} \times 100 \text{ [%]}$$

Celková délka měřících přímek protínajících pevnou fázi: T_s

Celková délka měřících přímek přes vzduchové póry: T_a

Počet jednotlivých tětiv přes vzduchové póry v různých velikostních třídách: C_i

Celková délka soustavy měřících přímek:

$$T_{tot} = T_s + T_a \text{ [mm]}$$

Celkový obsah vzduchových pórů:

$$A = \frac{T_a \times 100}{T_{tot}} \text{ [%]}$$

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovépenatého popílku

Celkový počet měřených tětív:

$$N = \sum C_i$$

Měrný povrch vzduchových pórů:

$$\alpha = \frac{4 \times N}{T_a} [mm^{-1}]$$

Poměr tmel: vzduchových pórů:

$$R = \frac{P}{A}$$

Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů:

$$R > 4,342$$

$$L = \frac{3 \times [1,4 \times (1 + R)^{1/3} - 1]}{\alpha} [mm]$$

$$R \leq 4,342$$

$$L = \frac{P \times T_{tot}}{400 \times N} [mm]$$

[11]

Stupeň vlivu prostředí	XF1	XF2	XF3	XF4
Minimální obsah mikropórů A_{300} ve ztvrdlém betonu při zkoušce dle ČSN EN 480-11 [%]	-	1,0	1,0	1,8
Maximální součinitel rozložení vzduchových pórů (L) při zkoušce dle ČSN EN 480-11 [mm]	-	0,24	0,24	0,20

Tab. 3: Mezní hodnoty pro vlastnosti betonu dle ČSN EN 206-1/Z3 [10]

Konec zveřejněné části

Seznam použitých zdrojů

[1] ANDREOVSKÝ, Jan. *Spalování paliv – kotle*. Odborné vzdělávání úředníků pro výkon státní správy ochrany ovzduší v České republice. Seminář č. 2. [online]. Ústí nad Orlicí, 2013. Dostupné z:

http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/obrazky/seminare/ovzdusi/seminar2/10_dil_5b_tisk_andreovsky.pdf

[2] BASF STAVEBNÍ HMOTY ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. *GLENium ACE 40*. Technický list. č. 630. červenec 2007.

[3] BASF STAVEBNÍ HMOTY ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. *MICRO AIR 103*. Technický list. č. 642. březen 2007.

[4] BASF STAVEBNÍ HMOTY ČESKÁ REPUBLIKA s.r.o. *MASTER AIR 178*. Technický list. srpen 2015.

[5] BILODEAU, A. CARETTE, G. G. MALHOTRA, V. M. LANSLEY, W.S. *Influence of curing and drying on slat scaling resistance of fly ash concrete*. In: Malhotra, V. M. ACI Special Publication SP-126, American Concrete Institute, Detroit, 1991, s. 201-228.

[6] BILODEAU, A. MALHOTRA, V. M., *Concrete incorporating high volumes of ASTM class F fly ashes: mechanical properties and resistance to deicing salt scaling and to chloride-ion penetration*. In: Malhotra, V. M. (Ed.), ACI Special Publication SP-132, American Concrete Institute, Detroit, 1992, s. 319–349.

[7] Brio Hranice s.r.o. *Omílací buben 0M20f*. [informační systém stroje]

[8] ČEZ Energetické produkty, s.r.o. *Současný stav využitelnosti energetických produktů v ČR*. [online]. Skupina ČEZ. 6. 4. 2015. [cit. 21. 5. 2017]. Dostupné z:

<http://www.vumo.cz/wp-content/uploads/2015/06/04-soucasny-stav-vyuzitelnosti-energetickyh-produktu-v-cr-kvalita-budoucnost-disponibilita.pdf>

[9] ČSN EN 206, *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

[10] ČSN EN 206-1/Z3, *Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovépenatého popílku

- [11] ČSN EN 480-11, *Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Zkušební metody – Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu*, Praha: Český normalizační institut, 2006
- [12] ČSN EN 933-1, *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*, Praha: Český normalizační institut, 1997
- [13] ČSN EN 12350-2, *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [14] ČSN EN 12350-7, *Zkoušení čerstvého betonu – Část 7: Obsah vzduchu – Tlakové metody*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [15] ČSN 12390-3, *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [16] ČSN 73 1326, *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*, Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1984
- [17] ČSN 73 6123-1, *Stavba vozovek – Cementobetonové kryty – Část 1: Provádění a kontrola shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [18] DOHNÁLEK Jiří. Vliv mrazuvzdornosti betonu na jeho povrchové úpravy. *Beton - Technologie - konstrukce, sanace*. 2012, 3, s. 44. ISSN 1213-3116.
- [19] FEČKO, Peter. *Fly ash*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2005, ISBN 80-248-0836-6
- [20] GAGNE, R. PIGEON, M., AITICIN, P. C. *Deicer salt scaling resistance of high strength concretes made with different cements*. In: Malhotra, V. M. (Ed.), ACI Special Publication SP-126, 1991, s. 185–199.
- [21] KLIEGER, P., PERENCHIO W. *Silicone influence on concrete resistance to freeze-thaw and de-icer damage*, Highw. Res. Rec. 18, 1963 s. 33-47.
- [22] LANLOIS, M. BEAUPRE, D. PIGEON, M. FOY, C. *The influence of curing on the salt scaling resistance of concrete with and without silica fume*. In: Malhotra, V. M. (Ed.), ACI Special Publication SP-114, American Concrete Institute, Detroit, 1989, s. 971–989.

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovápenatého popílku

[23] MOŽÍŠ, Zdeněk. *FPC betony na bázi upravených sulfátovápenatých popílků*. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. Vedoucí práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

[24] NOWAK-MICHTA, Aneta 2013. *Water-binder ratio influence on De-icing Salt Scaling of Fly ash*. *Procedia Engineering*. [online]. Elsevier. 57, s. 823-829. ISSN 1877-7058. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813008370?via%3Dihub#bibl0005>

[25] POLACH, Vladislav. *Parní kotle*. Plzeň, 2011. [online]. Dostupné z:

<http://slideplayer.cz/slide/6816422/>

[26] POWERS, T. C. *The Properties of Fresh Concrete*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1968.

[27] RICHARDSON, D. N. *Review of variables that influence measured concrete compressive strength*. *J. Mater. Civ, Eng.* 3 (2), 1991, s 95-112.

[28] SEDRAH, T. PIGEON, T. HAZRATI, M. *The influence of penetrating sealers on the deicer salt scaling resistance of concrete..* In: Nagataki, S., Nireki, T. Tomosawa, T. (Eds.), *Durability of Building Materials and Components*, vol. 6, E & FN Spon, London, 1993, s. 487-496.

[29] SNOPEK Roman. *Současný stav využívání vedlejších energetických produktů v ČR*. [online]. Odpady - online. 16. 7. 2013. [cit. 21. 5. 2017]. Dostupné z:

<http://odpady-online.cz/soucasny-stav-vyuzivani-vedlejsich-energetickyh-produktu-v-cr/>

[30] TKP 18, *Technické kvalitativní podmínky Staveb pozemních komunikací*. Praha: Ministerstvo dopravy Obor pozemních komunikací, 2005, [online] s. 45, [cit. 3. 5. 2017]. Dostupné z:

http://www.pjpk.cz/data/USR_001_2_6_TKP/TKP_18_2005.pdf

[31] TOPINKOVÁ, Michaela. *Anorganická pojiva*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Ostrava 2013. [online]. ISBN 978-80-248-3366-8. Dostupné z:

http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/18_Anorganicka_pojiva/Topinkova_Anorganicka_pojiva.pdf

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovápenatého popílku

[32] VALENZA, J. John II a SCHERER, W. George, *A review of salt scaling: I. Phenomenology. Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier, 2007. 37, s. 1007-1021, 2007. ISSN 0008-8846. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607000737>

[33] VALENZA, J. John II a SCHERER, W. George, 2007. *A review of salt scaling: II Mechanisms. Cement and Concrete Research* [online]. Elsevier, 2007. 37, s. 1022-1034. ISSN 0008-8846. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884607000713>

[34] Výzkumný ústav maltovin Praha, spol. s.r.o., Svaz výrobců cementu ČR. *Popílek a jeho použití do betonu*. [online]. 2002. Dostupné z:

http://www.vumo.cz/wp-content/uploads/2015/05/popilek_a_jeho_pouziti_do_betonu.pdf

České vysoké učení technické

Fakulta stavební

Katedra technologie staveb

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovápenatého popílku

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma mechanismu "Glue spalling" [33] 12

České vysoké učení technické

Fakulta stavební

Katedra technologie staveb

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovápenatého popílku

Seznam grafů

Graf 1: Závislost úbytku hmotnosti na obsahu pórů s $\varnothing < 300 \mu\text{m}$ [32] 13

České vysoké učení technické

Fakulta stavební

Katedra technologie staveb

Trvanlivost betonů s pojivem na bázi sulfátovápenatého popílku

Seznam tabulek

Tab. 1: Stupně vlivu prostředí - střídavé působení mrazu a rozmrazování [9] 10

Tab. 2: Požadavky na vlastnosti a složení betonu dle ČSN EN 206 [9] 10

Tab. 3: Mezní hodnoty pro vlastnosti betonu dle ČSN EN 206-1/Z3 [10] 19