

VLIV KOMBINACE VYSOKOPECNÍ JEMNĚ MLETÉ GRANULOVANÉ STRUSKY A INERTNÍCH PŘÍMĚSÍ NA FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ PARAMETRY BETONU

EFFECT OF THE COMBINATION OF BLAST-FURNACE FINELY GROUND GRANULATED SLAG AND INERT ADMIXTURES ON PHYSICAL-MECHANICAL PARAMETERS OF CONCRETE

Milan Meruňka^{*,1}, Rudolf Hela¹

*merunka.m@fce.vutbr.cz

¹Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří 331/95, 602 00 Brno

Abstrakt

Tato práce se zabývá kombinací vysokopecní jemně mleté granulované strusky (VJMGS) v optimálním poměru s příměsí inertní. Cílem této práce je ověřit vliv vzájemné kombinace příměsí na fyzikálně-mechanické parametry betonové směsi, konkrétně na pevnost betonu v tlaku. Získané výsledky naznačují, že i s poloviční dávkou VJMGS ve směsi se dají získat velmi obdobné fyzikálně-mechanické parametry betonu v porovnání s recepturou obsahující pouze VJMGS, což může být výhodné nejen z ekonomického hlediska, ale také z hlediska ekologického.

Klíčová slova

Vysokopecní jemně mletá granulovaná struska, inertní příměsí, pevnost betonu v tlaku

Abstract

This paper deals with the combination of blast furnace finely ground granulated slag (VJMGS) in an optimal ratio with an inert admixture. The aim of this work is to verify the influence of the mutual combination of admixtures on the physical-mechanical parameters of the concrete mixture, specifically the compressive strength of concrete. The obtained results suggest that even with half the dose of VJMGS in the mixture it is possible to obtain very similar physical-mechanical parameters of concrete in comparison with the recipe containing only VJMGS, which can be advantageous not only from an economic point of view but also from an ecological point of view.

Key words

Ground Granulated Blast-furnace Slag, inert admixtures, compressive strength of concrete

1 ÚVOD

Z důvodu stále zvyšujícího se tlaku na výrobu směsných cementů, ekonomické náročnosti z důvodu mletí či uzavírání vysokých pecí a s tím související delší dopravní vzdálenosti, způsobují zhoršenou dostupnost, potažmo zvyšování ceny této suroviny. V případě čerstvé betonové směsi lze za pomoci VJMGS redukovat například riziko vzniku bleedingu, neboť zrno vysokopecní jemně mleté granulované strusky disponuje velkým měrným povrchem a dobrou nasákavostí. V průběhu zrání betonu a jeho zatvrdlém stavu dochází vlivem latentní hydraulicity VJMGS k reakci s $\text{Ca}(\text{OH})_2$, přičemž dochází ke vzniku hydratačních produktů zahušťujících mikrostrukturu [1], což by v konečném důsledku mělo zvyšovat trvanlivost betonového kompozitu.

Hlavním cílem tohoto experimentu bylo zjistit vliv částečné náhrady VJMGS příměsí inertní v optimálním poměru mísení zajišťujícím maximální hutnost matrice. Nejdůležitějším parametrem pro navržený způsob optimalizace dávkování příměsí byla granulometrie jednotlivých vstupních příměsí, díky čemuž byl stanoven jejich optimální poměr mísení s cílem dosáhnout maximální hutnosti jemných složek společně s cementem v suchém stavu. Dosažení maximální hutnosti betonového kompozitu by mělo vést ke zvýšení jeho trvanlivosti.

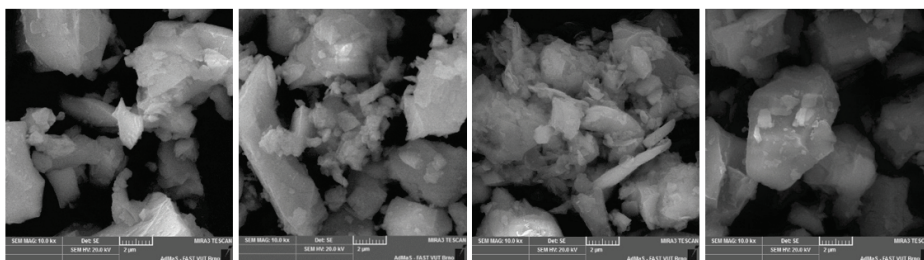
Vlivem nižší porozity by mělo docházet například k nižšímu průniku chloridových iontů do struktury betonu, které způsobují korozi výztuže či průniku CO_2 způsobujícího karbonataci betonu [2]. Zvýšení hutnosti cementové matrice vede zároveň i ke snížení pórovitosti kompozitu či tranzitních zón, což by se mělo pozitivně projevit na fyzikálně-mechanických parametrech kompozitu a zlepšení trvanlivosti při cyklickém zmrazování za přítomnosti vody či chemicky rozmrazovacích látek (CHRL). V konečném důsledku by se optimální kombinace příměsí mohla jevit výhodná nejen z ekologického, ale také z ekonomického hlediska, neboť v důsledku zvýšení fyzikálně-mechanických parametrů by mohlo dojít ke snížení dávek cementu.

Inertní příměsí jsou dle EN 206+A2 [3] látky, které vzhledem ke svému chemickému či mineralogickému složení netuhnou či netvrdnou ani po přidání tzv. budiče. Většinou se jedná o látky, jejichž úkolem je zvýšit hutnost cementové matrice a modifikovat reologické vlastnosti betonu (zlepšit čerpatelnost či snížit riziko odlučivosti vody z betonu, tzv. bleedingu). Ačkoliv se mezi inertní příměsí řadí dle normy i mikromletý vápenc, v rámci mnoha experimentů byla prokázána tzv. skrytá aktivita vápenců [4], [5]. Jemné částice tvoří krystalizační zárodky, na které se mohou reakční produkty slínku vysrážet. Přítomnost těchto zárodků urychluje růst krystalů, vede k větší hydrataci slínku a ovlivňuje i fyzikálně-mechanické parametry kompozitu. Mezi další pozitivní tohoto druhu příměsí se dá zařadit povrchová adsorpce vody. Ta je závislá zejména na měrném povrchu, který je dán jemností mletí. Obecně lze proto konstatovat, že se přidáním mikromletého vápence do betonové směsi snižuje riziko odlučivosti vody z betonu [6].

Další surovinou řadící se mezi inertní příměsí jsou kamenné odprašky (filler, moučka). Jedná se o jemné kamenné podíly vzniklé v lomech při drcení kameniva. Velikost částic se pohybuje v rozmezí 0,01 až 0,125 mm a jejich další vlastnosti jsou závislé na petrografickém druhu drcené suroviny. Nejen z důvodu velkého měrného povrchu, ale také z důvodu nepravidelného, ostrohranného tvaru zrn, je pak nutné při výrobě betonu použít vyšší množství záměšové vody. To však v konečném důsledku může způsobit zhoršení fyzikálně-mechanických parametrů a zároveň zvýšení rizika segregace kameniva či množství odloučené vody z betonové směsi.

2 ANALÝZA VSTUPNÍCH SUROVIN

Aby bylo možné provést správný návrh betonové směsi a poměr optimálního mísení, bylo nutné jednotlivé vstupní suroviny pečlivě analyzovat. Konkrétně se jednalo o VJMGS z elektrárny Dětmorovice (STR). Z inertních příměsí byly vybrány mikromleté vápence společností Carmeuse Mokrá číslo 7 (VÁP 7) a 9 (VÁP 9), které se vzájemně lišily jemností mletí. Dále byly vybrány dva kamenné fillery z odlišných lokalit, konkrétně z lomu Zárubka (ZAR) a Bílý Kámen (BK). V obou případech se jedná o granodiorit, tedy hlubinnou vyvřelou horninu s podstatným množstvím křemene. Na Obr. 1 je zachycena morfologie zrn jednotlivých vstupních příměsí za použití skenovacího elektronového mikroskopu (SEM). Tab. 1 udává základní vstupní parametry použitých příměsí.



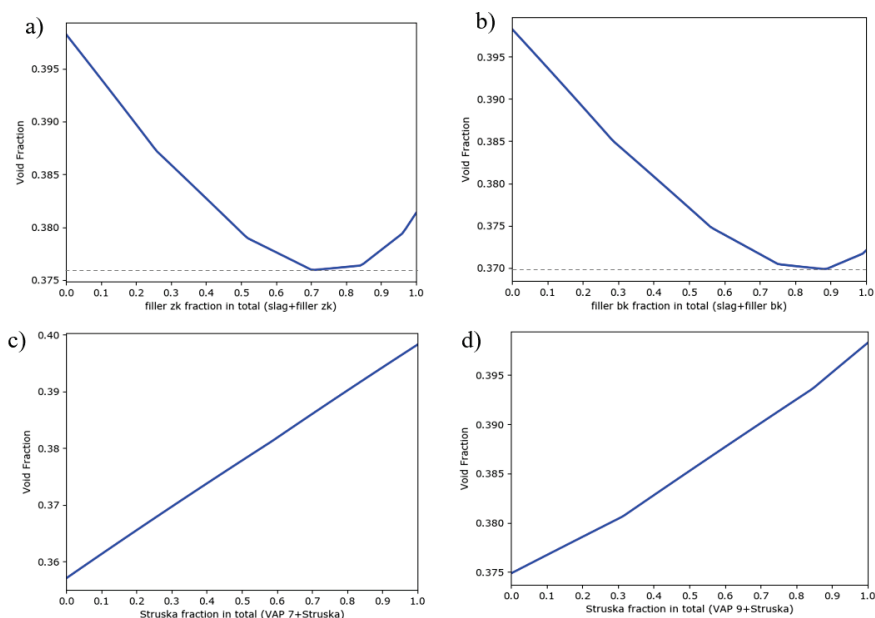
Obr. 1 Snímky ze SEM zleva: STR (a), VÁP 7 (b), ZAR (c), BK (d).

Tab. 1 Vstupní parametry použitých příměsí.

Surovina	STR	VÁP 7	VÁP 9	ZAR	BK
Měrná hmotnost [kg/m^3]	2920	2770	2750	2780	2680
Měrný povrch [cm^2/g]	3840	3120	4490	2320	3350

Pro dosažení maximální hutnosti cementové matrice bylo použito speciálního algoritmu sestaveného dle výzkumné práce T. Reschke [7]. Tento algoritmus na základě granulometrie jednotlivých surovin dokáže stanovit nejvhodnější objemový poměr mísení příměsí pro získání co nejnižší mezerovitosti této kombinace. V případě, že nebyl nalezen optimální poměr, jak je tomu například při kombinaci STR a mikromletého vápence 7, byl zvolen objemový poměr mísení 50% : 50%. Nenalezení optimálního poměru mísení těchto surovin je dáno

jejich podobnou granulometrií. Výrazně blízká vzájemná granulometrie má za následek, že jakékoliv jejich mísení obecně zhoršuje mezerovitost směsi, která by byla nejnižší pouze při použití jednoho druhu příměsí. Veškeré objemové dávkování kombinací příměsí a vypočtené mezerovitosti, potažmo maximální hutnosti tohoto systému jsou znázorněny na Obr. 2 a pro přehlednost jsou také uvedeny v Tab 2.



Obr. 2 Optimální poměr mísení STR s kamennými fillery ZAR (a), BK (b) a mikromletými vápenci VÁP 7 (c) a VÁP 9 (d).

Tab. 2 Objemový poměr mísení příměsí pro dosažení maximální hutnosti v suchém stavu.

Druh a množství příměsí [% obj.]	STR	ZAR	BK	VÁP 7	VÁP 9	Maximální hutnost [%]	Měrná hmotnost [kg/m ³]	Měrný povrch [cm ² /g]
STR + ZAR	27	73	—	—	—	62,40	2820	2760
STR + BK	10	—	90	—	—	63,01	2710	3400
STR + VÁP 7	50	—	—	50	—	—	2850	3480
STR + VÁP 9	50	—	—	—	50	—	2830	4165

3 METODIKA

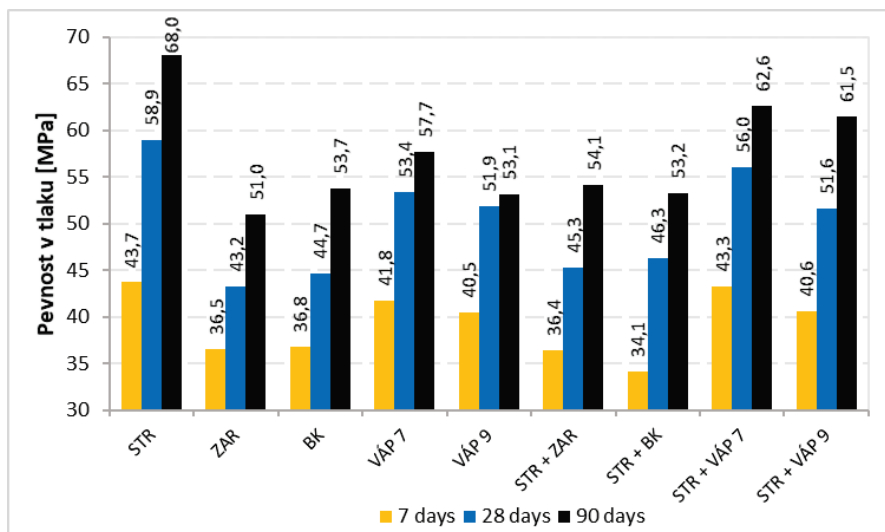
V rámci experimentální části bylo navrženo celkem 9 receptur betonů pevnostní třídy C 30/37. Pět receptur obsahující pouze jeden druh příměsí a zbývající čtyři receptury kombinací VJMGS s příměsí inertní v poměru stanoveném výpočtovým algoritmem. Jako cement byl použit CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá. Jeho množství v jednotlivých recepturách příměsí bylo upraveno tak, aby byla dosažena přibližně srovnatelná pevnost betonového kompozitu po 28 dnech normového zrání při shodné konzistenci. Množství příměsí v recepturách bez jejich vzájemné kombinace bylo 120 kg/m³. Následná kombinace inertní příměsí s VJMGS probíhala dle Tab. 2. Aby se zamezilo ovlivnění mechanických parametrů vlivem rozdílné skladby směsi kameniva, byla pro veškeré receptury navržena shodná křivka zrnitosti směsi kameniva. Pro dosažení shodné konzistence všech receptur stanovené metodou sedimentu kužele dle ČSN EN 12350 – 2 [8] s hodnotou cca 180 mm v čase 5 minut, se množství záměsové vody v betonové směsi pohybovalo v rozmezí 175 l/m³– 180 l/m³ a množství superplastifikační přísady Mapei Dyna mon SX 14 v rozmezí 4,0 – 4,7 kg/m³. Hodnota vodního součinitele byla vypočtena jako poměr hmotnosti vody k celkové hmotnosti cementu a příměsí bez ohledu na k-hodnotu dle ČSN EN 206+A2 [3]. Přesné složení jednotlivých betonových receptur je uvedeno v Tab 3.

Tab. 3 Složení betonových receptur.

Receptura/Surovina [kg/m ³]	STR	ZAR	BK	VÁP 7	VÁP 9	STR + ZAR	STR + BK	STR + VÁP 7	STR + VÁP 9
CEMI 42,5 R, Mokrá	300	315	315	315	315	300	300	300	300
STR Dětmarovice	90	—	—	—	—	25	10	46	46
Filler Zárubka	—	120	—	—	—	65	—	—	—
Filler Bílý Kámen	—	—	120	—	—	—	80	—	—
Vápenec 7 Mokrá	—	—	—	120	—	—	—	44	—
Vápenec 9 Mokrá	—	—	—	—	120	—	—	—	443
DTK 0/4 Hrušovany	765	730	730	735	735	760	760	760	760
HTK 4/8 Hrušovany	240	230	235	235	235	240	240	240	235
HDK 8/16 Želešice	475	470	470	470	470	475	475	475	475
HDK 11/22 Želešice	365	355	360	360	360	365	365	365	365
Voda	175	180	175	175	175	175	175	175	178
Mapei Dynamon SX 14	4,1	4,7	4,0	4,2	4,3	4,5	4,0	4,5	4,5
Vodní součinitel	0,45	0,41	0,40	0,40	0,40	0,45	0,45	0,45	0,46

4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Od každé receptury byly vyrobeny betonové krychle o hraně 150 mm, na kterých byla ve stáří 7, 28 a 90 dní stanovena objemová hmotnost betonu dle ČSN EN 12390 – 7 [9] a dle ČSN EN 12390 – 3 [10] pevnost betonu v tlaku. Fyzikálně-mechanické parametry jednotlivých receptur jsou znázorněny na Obr. 3. Uváděná průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku byla vždy stanovena na 5 zkušebních tělesech v daném stáří.



Obr. 3 Fyzikálně-mechanické parametry jednotlivých receptur ve stáří 7, 28 a 90 dní.

Jak znázorňuje Obr. 3, nejvyšší pevnost betonu v tlaku po 7 dnech normového zrání vykazuje betonová směs STR, 43,7 MPa. Velice obdobné pevnosti betonu v tlaku po 7 dnech zrání vykazovaly také betonové směsi v kombinaci STR s mikromletými vápenci. V případě směsi STR + VÁP 7 byly získány téměř totožné fyzikálně-mechanické parametry. Je nutné ovšem připomenout, že tyto směsi obsahovali pouze poloviční dávku VJMGS v porovnání s betonovou směsí vykazující nejvyšší fyzikálně-mechanické parametry. Je možno se domnívat, že získání takovýchto pevností bylo způsobeno tzv. skrytou aktivitou vápenců, kdy jemné částice tvoří krystalizační zárodky, na které se mohou reakční produkty slínku vysrážet. Nejnižší pevnost betonu v tlaku po 7 dnech zrání vykazovala betonová směs STR + BK, 34,1 MPa.

Po 28 dnech normového zrání vykazovala nejvyšší pevnost betonu v tlaku betonová receptura STR - 58,9 MPa. Velice dobré pevnosti betonu v tlaku vykazovaly opět betonové směsi obsahující kombinace STR

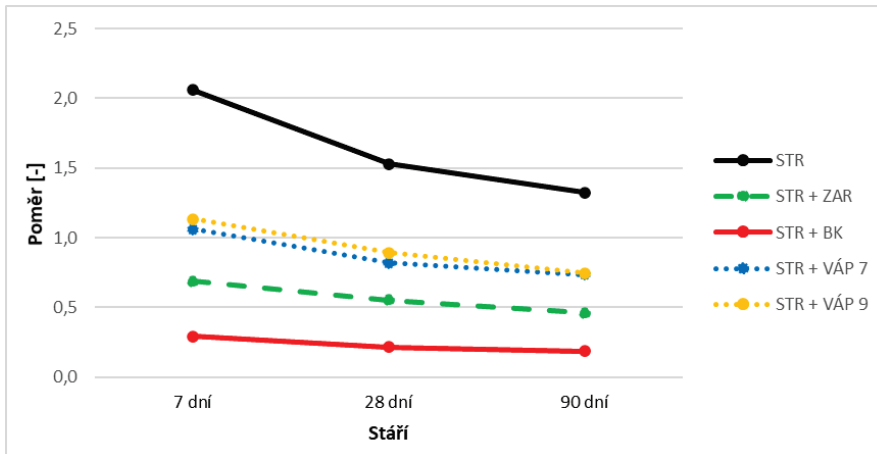
a mikromletých vápenců. Naopak nejnižší pevnost betonu v tlaku (43,2 MPa) po 28 dnech zrání vykazovala směs s příměsí kamenného filleru z lokality Zárubka. Dle složení této receptury je ovšem patrné, že vlivem nepravidelnosti a zvýšené nasákavosti zrn kamenného filleru vyžadovala tato směs jednu z největších dávek záměsově vody i superplastifikační přísady.

Dle získaných hodnot pevností betonu v tlaku jednotlivých směsí lze konstatovat, že veškeré receptury splňují požadovanou pevnostní třídu C30/37.

Nejvyšší fyzikálně-mechanické po 90 dnech zrání vykazovala betonová směs STR - 68,0 MPa. Velmi dobré pevnosti betonu v tlaku vykazovaly také betonové směsi s kombinací příměsí STR a mikromletým vápencem 7 i 9. V porovnání s recepturami obsahující pouze mikromletý vápenc 7 či 9 došlo k poměrně výraznému zvýšení mechanických parametrů. Lze tedy konstatovat, že kombinace mikromletého vápence s aktivní příměsí má pozitivní vliv na mechanické parametry betonové směsi a tato kombinace aktivní příměši s příměsí inertní se jeví velice zajímavě. Nejnižší pevnost betonu v tlaku (51,0 MPa) vykazovala receptura s kamenným fillerem z lokality Zárubka. Při kombinaci tohoto kamenného filleru s aktivní příměsí ovšem došlo ke zvýšení mechanických parametrů směsi, a proto lze kombinaci aktivních a pasivních příměsí považovat za výhodnou z hlediska zvýšení mechanických parametrů směsi.

5 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Vhodná kombinace aktivní příměši s příměsí inertní se v některých případech jeví z hlediska dosažení obdobných fyzikálně-mechanických parametrů porovnávaných směsí jako velice zajímavá. Zda by se jejich kombinace jevila výhodně i z ekonomického hlediska, je možné sledovat na Obr. 4, kde je zobrazen poměr hmotnosti VJMGS a pevnosti betonu v tlaku pro jednotlivé receptury obsahující VJMGS či její kombinaci s inertní příměsí. Vzhledem ke zvyšující se poptávce po tomto druhu aktivní příměši a jeho nedostatku z důvodu uzavírání vysokých pecí či ekonomické náročnosti z důvodu mletí se dá předpokládat další zvyšování ceny této komodity. Proto při nižším poměru se dá predikovat nižší množství VJMGS ve směsi, což by se mělo pozitivně projevit na nákladech na vstupní suroviny. Obsah cementu v porovnávaných recepturách je konstantní a použité příměši jsou vyjma VJMGS z normativního hlediska považovány za inertní. Fyzikálně-mechanické parametry by tedy měly být ovlivněny primárně obsaženou dávkou VJMGS v dané receptuře.



Obr. 4 Poměr hmotnosti STR k fyzikálně-mechanickým parametrům betonového kompozitu.

V případě betonové směsi obsahující pouze STR lze pozorovat, že poměr celkové hmotnosti STR k dosaženým fyzikálně-mechanickým parametrům je nejvyšší, což může nasvědčovat o nepříliš efektivním využívání tohoto druhu příměši vzhledem k jejím vysokým dávkám a dosaženým pevnostem betonu v tlaku. V důsledku vytváření betonového kompozitu a tvorbě novotvarů lze pozorovat, ostatně jako u veškerých receptur, snižující se trend dané křivky, z důvodu navyšování fyzikálně-mechanických parametrů. Při kombinaci STR s mikromletými vápenci či kamennými fillery, dochází v důsledku nižší dávky aktivní příměši k dosažení nižšího poměru, což by mohlo nasvědčovat o efektivnějším využití aktivní příměši. Při porovnání fyzikálně-mechanických parametrů betonové směsi STR a fyzikálně-mechanických parametrů betonové receptury s kombinací STR a VÁP 7 či receptury s kombinací STR a VÁP 9 bylo dosaženo velice obdobných hodnot, ovšem při poloviční dávce aktivní příměši ve směsi. Tyto výsledky poukazují na možný směr moderního návrhu

betonové směsi s optimálním využitím všech pozitiv jednotlivých druhů příměsí. V případě betonových receptur obsahujících kombinaci aktivní příměsí a kamenných fillerů byla dávka VJMGS ve směsi velice nízká, proto se může vzhledem k nejnižšímu poměru jako nevhodnější varianta. Ovšem s přihlédnutím na dosažené fyzikálně-mechanické parametry je nutné konstatovat, že by v technické praxi muselo dojít k úpravě receptury, např. zvýšením množství cementu ve směsi a zvýšením dávky plastifikační přísady, aby byly získány vyšší fyzikálně-mechanické parametry. Tudíž se jako nevhodnější varianta jeví kombinace STR s mikromletými vápenci.

6 ZÁVĚR

Studie se zabývá kombinací VJMGS s inertní příměsí v optimálním poměru mísení s cílem dosáhnout co nejnižší mezerovitosti cementové matrice. Snížení mezerovitosti, potažmo zvýšení hutnosti cementové matrice, by mělo mít v důsledku pozitivní vliv nejen na fyzikálně-mechanické parametry, ale také na zvýšení trvanlivosti či odolnosti betonového kompozitu. Zejména v současnosti, kdy je zvýšený tlak na výrobu směsných cementů, a z VJMGS se stává velice obtížně dostupná surovina, se stále zvyšující se cenou, je nutné hledat nové možnosti a alternativy optimalizace složení betonové směsi. Kombinace aktivní příměsí společně s inertní by mohla být jedna z možných řešení.

Dle získaných výsledků z experimentu lze konstatovat, že nejvyšší fyzikálně-mechanické parametry vykazovala betonová směs obsahující pouze VJMGS. Velice dobré hodnoty pevnosti betonu v tlaku vykazovaly také betonové směsi v kombinaci STR a mikromletých vápenců, u kterých se čím dál více mluví o jejich tzv. skryté aktivitě. Jemné částice tvoří krystalizační zárodky přispívající k vyššímu stupni hydratace slínku. Je nutné také připomenout, že těchto fyzikálně-mechanických parametrů bylo dosaženo s poloviční dávkou aktivní příměsí v porovnání se směsí obsahující pouze VJMGS. Ze získaných výsledků lze také konstatovat, že téměř ve většině případů došlo při kombinaci aktivní a inertní příměsí ke zlepšení fyzikálně-mechanických parametrů, proto se lze domnívat, že vzájemná kombinace těchto dvou druhů příměsí může být v technické praxi velice přínosná.

Tento provedený experiment je počátkem studie možnosti optimalizace složení betonové směsi a možnosti kombinace aktivní příměsí společně s inertní. Pro další možnosti pozitivního přínosu vzájemné kombinace příměsí, například odolnost vůči CHRL či agresivním mediím je nutné provést další množství experimentů a stanovit přesný vliv a možnosti vzájemné kombinace příměsí.

Poděkování

Príspevek byl vytvořen v rámci řešení projektu: FAST-J-21-7431 Posouzení odolnosti betonového kompozitu v chemicky agresivním prostředí za pomoci nedestruktivních metod.

Použité zdroje

- [1] TAO, Jiavin a Xiaosheng WEI. Effect of ground granulated blast-furnace slag on the hydration and properties of cement paste. *Advances in Cement Research*. 2019, (31), 251-260.
- [2] APONTE, Diego Fernando, Marilda BARRA a Enric VÀZQUEZ. Durability and cementing efficiency of fly ash in concretes. *Construction and Building Materials*. 2012, (30), 537 – 546.
- [3] ČSN EN 206+A2. Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: ÚNMZ, 2021.
- [4] OEY, Tandré, Aditya KUMAR, Narayanan NEITHALATH, Gaurav SANT a G SCHERER. The Filler Effect: The Influence of Filler Content and Surface Area on Cementitious Reaction Rates. *Journal of the American Ceramic Society*. 2013, (Vol. 96), 1978-1990.
- [5] MOHAMED, Ashraf Ragab, Mona ELSALAMAWY a Marwa RAGAB. Modeling the influence of limestone addition on cement hydration. *Alexandria Engineering Journal*. 2015, 10 November 2014, (54).
- [6] ŤAŽKÝ, M.; Hela, R. High-Performance Concretes Intended for Deep Foundations of Constructions. *Civil Engineering and Architecture*, 2020, roč. 8, č. 2, s. 46-54. ISSN: 2332-1091.
- [7] RESCHKE, T. Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton, Ph.D. Thesis, Weimar, 2000.
- [8] ČSN EN 12350-2. Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím. Opr.1. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [9] ČSN EN 12390-7. Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Opr.1. Praha: ÚNMZ, 2019.
- [10] ČSN EN 12390-3. Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Opr.1. Praha: ÚNMZ, 2019.