

Ocena właściwości mechanicznych i urabialności betonu samozagęszczającego się z dużą zawartością mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego

Mechanical and workability evaluation of self-compacting concrete incorporating high volume ground granulated blast furnace slag

1. Wprowadzenie

Beton samozagęszczający się [BSZ] stał się pożądanym materiałem ułatwiającym wiele prac budowlanych odkąd w konstrukcjach konieczne jest zastosowanie betonu o lepszej urabialności, szczególnie w przypadku gęstego zbrojenia lub skomplikowanych szalunków. Beton samozagęszczający się można zdefiniować jako beton specjalny zdolny do zagęszczania się pod wpływem siły ciężkości, bez konieczności wibrowania mieszanki (1, 2). BSZ, pierwszy raz zastosowany przez Okamura w 1986 (3), wykazuje wiele korzystnych cech w porównaniu do standardowego betonu, do których zaliczyć można brak konieczności zagęszczania mechanicznego, ułatwienie realizacji robót w przypadku skomplikowanych konstrukcji oraz wzmocnienie strefy przejściowej matrycy cementowej z kruszywem. W związku z opisanymi korzystnymi cechami BSZ, jego właściwości, projektowanie oraz eksploatacja stały się przedmiotem zainteresowania wielu badaczy (4-8). Pomimo, że przy projektowaniu BZS dąży się do skrócenia czasu budowy i zmniejszenia kosztów, to właśnie koszt produkcji jest jedną z głównych wad tego betonu, co wynika z konieczności stosowania dużej zawartości cementu portlandzkiego w tym kompozycie. Jedną z najlepszych metod na uniknięcie konieczności stosowania dużych ilości cementu portlandzkiego w BSZ jest jego zastępowanie dodatkami mineralnymi, a przede wszystkim granulowanym żużlem wielkopieczowym, popiołem lotnym lub mielonym kamieniem wapiennym.

W kilku dotychczasowych pracach opisano wpływ różnych rodzajów i ilości dodatków mineralnych na właściwości mieszanek betonu samozagęszczającego się (9-13).

Zastosowanie dodatków mineralnych wiąże się z koniecznością stosowania domieszek zmniejszającej dodatek wody, co zapewnia uzyskanie odpowiedniej urabialności. Dzięki temu BSZ może płynąć pod wpływem siły ciężkości (14). W pewnych przypadkach dodatki mineralne mogą również zmniejszać ilość domieszki stosowanej w celu zapewnienia odpowiedniej konsystencji (15),

Autor do korespondencji: oozturk@selcuk.edu.tr

1. Introduction

Since the structural systems require concrete that exhibits better workability properties especially in the case of dense reinforcement and complex formworks, self-compacting concrete (SCC) has become efficient for satisfying the demand of easiness in many construction works. Self-compacting concrete can be defined as special type of concrete that can consolidate itself without necessity of any compacting process (1, 2). SCC, initially introduced by Okamura in 1986 (3) has many superiorities in concrete technology compared to conventional concrete including; no consolidation works, easiness of constructability where intensive labour force is required and enhancement of interfacial transition zone (ITZ) between cement matrix and aggregates. Due to aforementioned favourable properties of SCC, its performance, design and utilization have become a subject of interest to many researchers (4-8). Although SCC designs contribute to decrease in construction time and cost, production cost is one of the drawbacks of SCC since the use of high volumes of Portland cement is required to develop self-compacting concrete mixtures. One of the best way to offset high volumes of Portland cement in SCC is to benefit from mineral additions such as ground granulated blast furnace slag (GGBFS), fly ash (FA), or limestone powder.

Several previous studies have made efforts to determine the effects of different types and volumes of mineral additions on the self-compacting properties of concrete mixtures (9-13). Together with mineral additives usage, it is necessary to add high range water-reducing admixture (HRWRA) into concrete mixtures due to high workability demand so that SCC can flow under its own weight (14). Moreover, it should be noted that mineral additives can also serve as a reducer of HRWRA content to obtain a given fluidity (15) provided that particle size distribution and specific surface area of mineral additions are well examined when used in mixtures. Successful modification of mix proportions of concrete ingredients can meet a requirement of self-compacting concrete without any risk of segregation or bleeding. It has reported that

Corresponding author: oozturk@selcuk.edu.tr

o ile wcześniej dokładnie oznaczy się krzywą uziarnienia oraz powierzchnię właściwą tych dodatków. Dzięki odpowiedniej proporcji składników mieszanki, wymagania w stosunku do betonu samozagęszczającego się mogą zostać spełnione bez ryzyka segregacji składników, czy wydzielenia mleczka. Stwierdzono, że czynniki, do których należą stosowane rodzaje surowców, domieszek chemicznych lub stosunek wodno-cementowy mają duży wpływ na wytrzymałość BSZ (16). Zostało przeprowadzonych szereg badań związanych z projektowaniem mieszanek BSZ. Jednak nadal brak wystarczającej znajomości niektórych czynników mających wpływ na właściwości BSZ, zwłaszcza w przypadku mieszanek z dodatkiem mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego.

W pracy zbadano wpływ dodatku mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego na właściwości mieszanki betonowej i stwardniałego BSZ. Badania opadu stożka, będące praktyczną metodą oceny urabialności mieszanki betonowej na miejscu budowy, wykonano po różnym czasie od zarobienia. W celu określenia wpływu stosunku w/c, zawartości cementu, stosunku kruszywa drobnego do grubego oraz superplastyfikatora na właściwości betonu samozagęszczającego się, przygotowano mieszanki o różnym składzie oraz odpowiadające im próbki betonowe odniesienia. Poza szeregiem doświadczeń obejmujących właściwości mieszanek BSZ, oznaczono także wytrzymałość na ścislenie po 7 i 28 dniach w celu określenia właściwości mechanicznych betonu zawierającego żużel, z różnym dodatkiem superplastyfikatorów, zmiennym stosunkiem kruszywa drobnego do grubego oraz różną zawartością cementu.

2. Program badań

2.1. Materiały

Mieszanki betonowe przygotowywano z cementu CEM I 42.5, zawierającego około 95% - 100% klinkieru, zgodnie z normą europejską EN-197-1 oraz z żużla, spełniającego wymagania normy ASTM C 618, a ich właściwości podano w tablicy 1. Trzy frakcje kruszyw 0/4 mm, 4/12 mm i 12/20 mm, uzyskanych z lokalnej kopalni, zmieszano ze sobą w różnych proporcjach. Zgodnie z wytycznymi EFNARC (17), maksymalne uziarnienie kruszywa ograniczono do 20 mm

W badaniach zastosowano różny dodatek superplastyfikatora polikarboksylianowego w postaci cieczy zawierającej 30% substancji stałych, którego gęstość wynosiła 1,06. Wiadomo, że ten rodzaj superplastyfikatora stosowany jest w celu utrzymania odpowiedniej konsystencji, a nawet pompowalności betonu na miejscu budowy. Podczas dostosowywania ilości superplastyfikatora we wstępnych doświadczeniach wzięto pod uwagę lepkość plastyczną mieszanki betonowej, odpowiednią urabialność oraz właściwości dynamiczne świeżej mieszanki.

2.2. Skład mieszanek

Powszechnie wiadomo, że w produkcji BSZ można stosować lokalnie dostępne materiały przy zachowaniu odpowiednich standardów

elements comprising raw materials, chemical admixtures and water to cement ratio (w/c) have prominent effect on the strength properties of SCC (16). Numerous studies were undertaken on mixture design of SCC by many researchers from all over the world. On the other hand there is a still lack of factors to assess the SCC design process especially in GGBFS incorporated concrete mixtures.

In the present study, influence of GGBFS on the fresh and hardened properties of SCC was investigated. Slump test, one of the practical way of assessing workability demand of concrete on site, was conducted in different time intervals. Different mixtures were produced along with the reference specimens in order to specify effects of w/c ratio, cement factor, fine/coarse aggregate ratio and superplasticizer on the self-compacting of specimens. In addition to comprehensive investigation of fresh properties of SCC mixtures, 7th and 28th day compressive strength of specimens were determined for evaluation of mechanical behaviour of specimens in the presence of slag, different amount of superplasticizers, fine/coarse aggregate ratios and cement dosage.

2. Experimental programme

2.1. Materials

In this study, the concrete mixtures were prepared from cement CEM I 42.5, containing approximately 95% - 100% of clinker complying with European Standards EN-197/1 and slag used in the present investigation meets the specifications of ASTM C 618 presented in Table 1. Three types of locally available aggregates i.e., 0-4 mm, 4-12 mm and 12-20 mm were mixed together in different ratios as given in Fig. 1. Maximum size of aggregate is limited to 20 mm, due to advice of EFNARC specifications (17).

Tablica 1 / Table 1

WŁAŚCIWOŚCI CEMENTU I ŻUŻLA
PROPERTIES OF CEMENT AND SLAG

Składnik / Component, %	Cement Cement	Żużel Slag
Skład chemiczny / Chemical composition		
CaO, %	61.43	34.48
SiO ₂ , %	20.77	38.40
Al ₂ O ₃ , %	5.55	10.96
Fe ₂ O ₃ , %	3.35	0.81
MgO, %	2.49	7.14
SO ₃ , %	2.49	1.48
K ₂ O, %	0.77	0.86
Na ₂ O, %	0.19	0.18
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	29.37	50.17
Strata prażenia / Loss on ignition, %	2.20	3.00
Właściwości fizyczne / Physical properties		
Ciężar właściwy / Specific gravity	3.06	2.88
Powierzchnia właściwa / Blaine, cm ² /g	3250	4250

Tablica 2 / Table 2

SKŁAD MIESZANEK BETONOWYCH

CONCRETE MIX PROPORTIONS

Składniki / Materials	Control-1	GGBFS50-1	Control-2	GGBFS50-2	Control-3	GGBFS50-3
Cement portlandzki Portland cement, kg/m ³	430	215	430	215	330	165
Żużel / Slag, kg/m ³	-	215	-	215	-	165
Stosunek woda/spoiwo Water/binder ratio	0,55	0,55	0,48	0,48	0,50	0,50
Domieszka zmniejszająca dodatek wody / HRWR, kg/m ³	-	-	1,6	1,6	1,4	1,4
Kruszywo / Aggregate 0-4 mm, kg/m ³	840,75	830,25	991,65	1010,90	1187,16	1181,16
Kruszywo / Aggregate 4-12 mm, kg/m ³	504,45	498,15	540,90	551,40	593,58	590,58
Kruszywo / Aggregate 12-20 mm, %	336,30	332,10	270,45	275,70	197,86	196,86

dla takich mieszank. Mieszanki betonowe w prowadzonych doświadczeniach zaprojektowano zgodnie z wytycznymi EFNARC. Skład mieszank do badań wstępnych i opisanych w pracy dostosowano w próbach laboratoryjnych. Proporcje piasku i kruszywa grubego zmieniano w zależności od zawartości superplastyfikatora. W celu określenia punktu nasycenia domieszki zmniejszającej dodatek wody wykonano także kilka dodatkowych prób. Po badaniach wstępnych, przygotowano sześć różnych mieszank z dodatkiem lub bez dodatku żużla i zbadano ich właściwości. Dla każdego rodzaju mieszanki z różną zawartością składników, jak podano w Tablicy 2, wykonano po sześć próbek.

2.3. Przygotowanie próbek i metody badań

Mieszanki betonowe przygotowano w mieszarce typu 108 L. Wytrzymałość na ścislenie po 7 i 28 dniach oznaczano na próbkach sześciennych o objętości 150 mm³. Suche składniki, czyli kruszywo grube, kruszywo drobne [o wielkości ziaren mniejszych od 4 mm, zgodnie z EN 12620 (18)], żużel i cement uśredniano w mieszarce przez 2 minuty. Następnie dodano wodę i mieszano przez kolejne 2 minuty. Na końcu wlewano do mieszarki superplastyfikator w wodnej zawieszynie, stopniowo przez 20 sekund. Po procesie mieszania obejmującym łącznie 6 minut [rysunek 1] badano konsystencję mieszank za pomocą ściętego stożka o średnicy podstawy wynoszącej 203 mm, średnicy górnej 102 mm i wysokości 305 mm, zgodnie z ASTM C143 (19).

2.3.1. Opad stożka i czas rozplywu

Opad stożka i czas rozplywu t_{50} , które można wykonać zarówno w laboratorium jak i na budowie, przeprowadzono w celu oceny zdolności do szczelnego wypełniania szalunków przez mieszankę betonową. Te dwa oznaczenia wykonano bezpośrednio po mieszaniu aby uniknąć utraty urabialności. Podczas badania czasu rozplywu t_{50} , określano okres, po którym rozplyw osiągnął 500 mm. Pomiary wykonywano po różnych czasach od zarobienia. Czasy

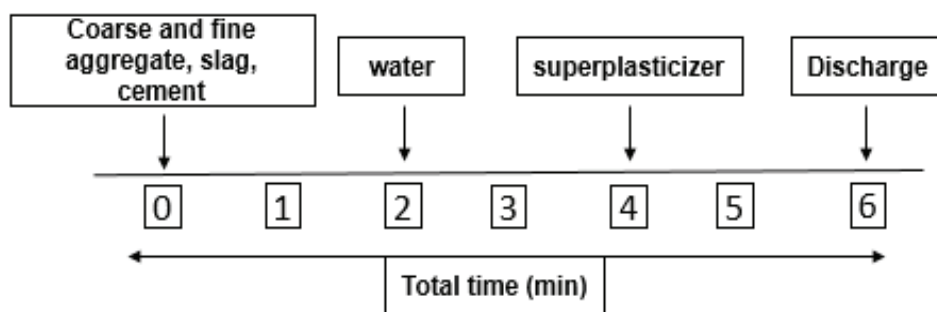
In this study different additions of polycarboxylate based superplasticiser were used as liquid having 30% of solids and 1.06 specific density. It is known that this kind of superplasticisers are utilized on the purpose of preserving consistency considering the pumpability of concrete in construction sites. Adjusting the amount of superplasticizer used in the pre-experiments was based on factors such as low concrete viscosity, preferred workability for SCC and dynamic properties of fresh concrete.

2.2. Mix proportions

It is well known that SCC can be produced by taking the advantage of local materials providing optimum mix design taken into consideration. In the presented study, mix design method was used considering the EFNARC specifications. From pre-experiments to actual experiments adjustment of the mix was determined by laboratory trials. Proportions of the sand and coarse aggregates were modified along with adjusting the dosage of the superplasticizer. In order to assess the saturation dosage of HRWD several trials were also produced. After preliminary studies, six mixtures with and without slag were prepared and investigated to determine the properties of self-compacting behaviour. For each type of mixture, six specimens were produced with different content of concrete ingredients as presented in Table 2.

2.3. Specimens preparation and testing procedure

In this study, an 108 L pan mixer was utilized to produce concrete specimens. 150 mm³ cubic samples were used for the determination of compressive strength at the 7 and 28 days. Dry mix, comprised of the coarse aggregate, fine aggregate [below 4 mm particle size according to EN 12620 (18)], slag, cement were fed into mixer and mixed for 2 minutes. After dry mixing, water was added and mixing continued for another 2 minutes. Finally HRWR



Rys. 1. Etapy mieszania

Fig. 1. Mixing duration

te dobierano w celu określenia momentu utraty urabialności mieszanki betonowej. Pomiarów wykonywano co dwie godziny, przy czym łącznie przeprowadzano sześć takich pomiarów dla każdej z sześciu rodzajów mieszanek. Oprócz tych pomiarów, podczas wykonywania doświadczeń określano także odporność mieszanek na segregację.

2.3.2. Wytrzymałość betonu na ściskanie

Wytrzymałość na ściskanie badano na kostkach o wymiarach 15 x 15 x 15 cm po dwóch różnych okresach twardnienia: 7 i 28 dni. Wszystkie kostki, których było sześć dla sześciu rodzajów badanych mieszanek, formowano w plastikowych formach. Próbek nie wibrowano ani nie zagęszczano, co miało odpowiadać warunkom na budowie, gdzie wymagane jest uzyskanie odpowiedniego zagęszczenia pozwalającego na dokładne wypełnianie szalunków. Jedynie warstwę wierzchnią każdej kostki wyrównywano. Po 24 godzinach dojrzewania próbki rozformowano. W żadnej rozformowanej próbce nie zaobserwowano zakłóceń w procesie wiązania, pomimo zastosowania dużych ilości żużla w niektórych z nich. Próbki przechowywano w wannach z wodą w temperaturze 20°C aż do pomiarów wytrzymałości czyli do 7 i 28 dnia. Wytrzymałość na ściskanie oznaczono w maszynie wytrzymałościowej o zakresie obciążeń do 3000 kN.

3. Wyniki badań i dyskusja

Badania właściwości mieszanek i betonów objęły próbki, w których 50% cementu zastąpiono żużlem. Urabialność betonów samozagęszczających się określono za pomocą badań opadu stożka i czasu rozplywu t_{50} (18). Trwałość statyczną i dynamiczną wszystkich próbek określono wizualnie, jednak nie stwierdzono żadnych problemów związanych z segregacją składników mieszanek ani przed ani po ich zafornowaniu.

3.1. Właściwości mieszanek betonowych

Właściwości mieszanek betonowych przedstawiono w tablicy 3. Na rysunku 2 pokazano wyniki badań opadu stożka po różnym czasie od zarobienia betonu z żużlem i bez żużla zawierających różny dodatek superplastyfikatora i różny stosunek kruszywa grubego do drobnego. Wszystkie mieszanki zawierające żużel miały lepszą

was poured into mixer gradually in 20 seconds. After total 6 minutes mixing process, also given in Fig. 1, determination of slump of concrete was conducted by using frustum cone with the base 203 mm in diameter, the top 102 mm in diameter, and the height 305 mm in conformity with ASTM C143 (19).

2.3.1. Slump and flow time test

Concrete slump test and T_{50} flow time test, suitable for laboratory and on site use, were conducted with the intent of assessing filling ability of fresh concrete. Immediately after the mixing was finished, the two tests were carried out by avoiding any loss of workability. During the T_{50} flow time test, time to reach 500 mm length of slump-flow radius was measured and recorded for each mixture. Concrete slump test was also measured for each type of mixture with different time intervals. These time intervals were selected to assess workability retention of fresh concrete. For that purpose, once every two hours, i.e. total six readings were recorded for six different mixture designs. Beside aforementioned tests, resistance to segregation was examined during experiments.

2.3.2. Compressive strength of concrete

In the study, for compressive strength test the cubes 15 x 15 x 15 cm at two different ages: 7 and 28 days were used. Total 36 cube specimens, i.e. six specimens for each six different mixtures, were prepared and cast in plastic molds. All specimens were not subjected to any vibration or compacting in order to represent the applications on site where complete filling of formwork with maintained homogeneity is required. Only surface finishing was applied for each cube. After 24 hour of casting the concrete samples were demoulded. Although high volume of slag was used in cube specimens no setting problem was observed in all demoulded specimens. Cube specimens were cured in tanks in water at 20°C till the day of testing and tests were carried out at the age of 7 and 28 days. All compressive strength tests were performed on a compression testing machine of 3000 kN capacity.

3. Results and discussions

In the presented study, mix concrete and hardened concrete specimens were investigated at 50% cement replacement by slag. Workability of the self-compacting concrete mixes was measured

Tablica 3 / Table 3

OPAD STOŻKA I CZAS ROZPŁYWU MIESZANEK BETONOWYCH

SLUMP VALUES OF FRESH CONCRETE

	Control-1	GGBFS50-1	Control-2	GGBFS50-2	Control-3	GGBFS50-3
Gęstość pozorna Bulk density	2305	2305	2342	2395	2392	2417
Gęstość Specific density	2348	2327	2441	2476	2475	2465
Początkowy opad stożka First slump, 0 hour, cm	20	20	22	23	23	23
Opad stożka po 2 godzinach, Slump after 2 hour, cm	8	10	21	22	22	22
Opad stożka po 4 godzinach, Slump after 4 hour, cm	-	-	20	21	20	21
Opad stożka po 6 godzinach, Slump after 6 hour, cm	-	-	18	20	13	19
Opad stożka po 8 godzinach, Slump after 8 hour, cm	-	-	17	19	-	16
Opad stożka po 10 godzinach, Slump after 10 hour, cm	-	-	16	18	-	-
Czas rozplwyu t_{50}/T_{50} , s	7.7	7.5	4.2	4.1	4.3	4.2

urabialność w porównaniu do mieszanek kontrolnych. Pomimo, że badanie opadu stożka nie może być uznawane za bezpośrednie badanie urabialności w przypadku BSZ (20), to wyniki tego badania stanowią ważną ocenę zdolności płynięcia świeżego betonu pod wpływem siły ciężkości (21). Zgodnie z normą EN-206-1 (22), która do mieszanek o konsystencji ciekłej zalicza te, w których opad stożka jest większy od 16 cm, mieszanki GGBFS50-1, GGBFS50-2 i GGBFS50-3 zachowują ciekłość nawet po 6 godzinach. Po 6 godzinach, nawet jeśli żadna z próbek nie miała właściwości koniecznych do pompowania, zresztą zgodnie z oczekiwaniami, próbki z dodatkiem żużla, o różnej zawartości piasku i superplastyfikatora, nadal wykazywały zdolność do płynięcia pod wpływem siły ciężkości. Do innych czynników, które bezpośrednio wpływały na konsystencję betonu należały stosunek kruszywa grubego do drobnego oraz dodatek superplastyfikatora. Z rysunku 2 wynika, że przy pewnym stosunku kruszywa grubego do drobnego i dodatku superplastyfikatora, zawartość żużla powoduje większy opad stożka w mieszankach GGBFS50-2 oraz GGBFS50-3 niż odpowiadających im próbek kontrolnych bez żużla Control-2 i Control-3. Oczywistym jest także, że bez superplastyfikatora i dużego stosunku kruszywa drobnego do grubego, nie można uzyskać betonu samozagęszczającego się, niezależnie od dodatku żużla. Na podstawie danych zawartych w tablicach 2 i 3 można łatwo porównać wpływ dodatku żużla i superplastyfikatora. Na przykład, mieszanka GGBFS50-2 miała większy opad stożka pomiędzy 6 a 10 godziną w porównaniu do GGBFS50-3. To wyjaśnia, że dodatek 50% żużla w obu mieszankach jest dobrze dobrany dla utrzymania ciekłej konsystencji świeżego betonu przez długi okres. Ziarna żużla wypełniając przestrzeń pomiędzy ziarnami cementu powodują korzystniejsze ich rozproszenie, co z kolei przyczynia się do uzyskania lepszej ciekłości mieszanki betonowej. Wyniki te są zgodne z wnioskami zawartymi w pracy Sethy i in.

applying concrete slump test and T_{50} flow time test (18). In all specimens static and dynamic stability of fresh concrete was examined by visual inspection and problems related to segregation during and after casting were not found.

3.1. Fresh concrete properties

In Table 3 the results of the experiments with fresh concrete are presented. For the fixed superplasticizer dosage and coarse/fine aggregate ratio, variation of concrete slump in relation to slag content in relevant fresh concrete mixtures is shown in Fig. 2. For each type of mixture, slag containing specimens have exhibited better performance than the reference mixtures in regards to workability. Although concrete slump test cannot be considered as direct indicator of workability for SCCs (20), concrete slump values is a judgement input for the ability of fresh concrete to flow under its own weight (21). GGBFS50-1, GGBFS50-2 and GGBFS50-3 mixtures have shown fluidity properties even after 6 hour as EN-206-1 (22) stated for "fluid concrete" that have 15.0-17.5 cm consistency value. After 6 hours, even if all specimens have lost its pumpability as expected, slag incorporated specimens that have different sand and superplasticizers ratios had been still flowing under its own weight. Another factors that directly affect the concrete slump were coarse/fine aggregate ratio and HRWR dosage. From the Fig. 3, it can be deduced that at given coarse/fine aggregate ratio and HRWR dosage, addition of slag resulted in higher concrete slump in GGBFS50-2 and GGBFS50-3, compared to reference specimens, Control-2 and Control-3 respectively. It is also obvious that without HRWR and utilization of high fine/coarse aggregate ratio, self-compacting concrete cannot be produced, independent from slag addition. In Tables 2 and 3, relation of HRWR and slag can be easily correlated. For example GGBFS50-2 compared to GGBFS50-3 has revealed higher slump between 6 and 10 hour.

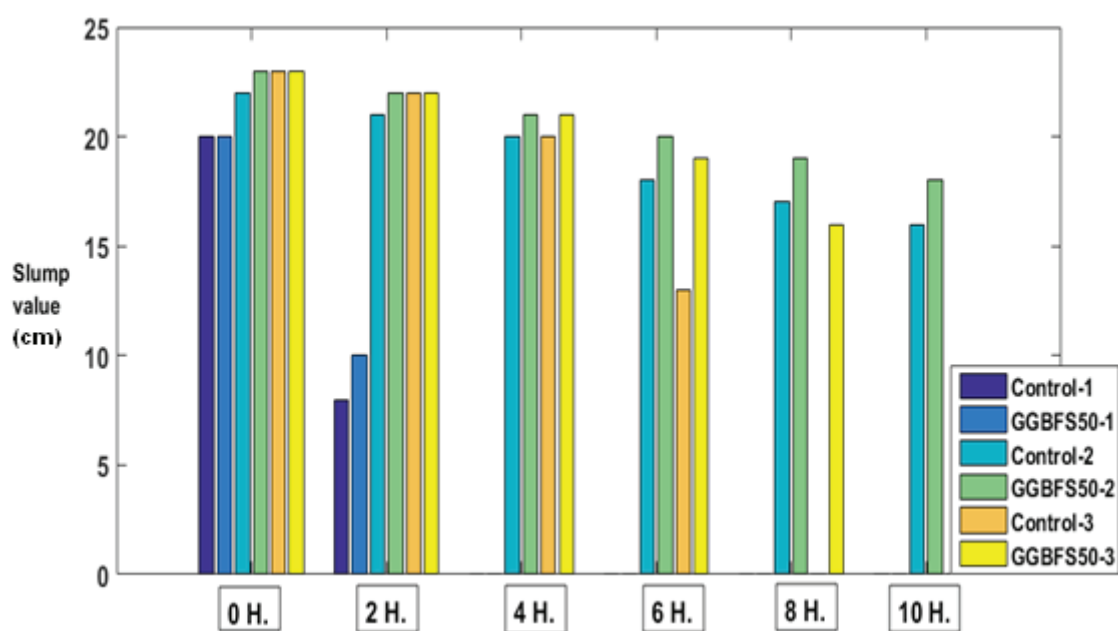
(10). Ogólnie ujmując, we wszystkich badanych próbkach betonu zawierających żużel, ten dodatek mineralny korzystnie wpływa na zdolność szczelnego wypełniania szalunków przez mieszankę betonową. Potwierdzają to zmiany opadu stożka po 2 godzinach pokazane na rysunku 3.

Inne przeprowadzone badania zdolności szczelnego wypełnienia szalunków, do których należy czas rozplywu t_{50} , są również powiązane z konsystencją mieszanek betonowych. Badania czasu rozplywu t_{50} , przeprowadzono zgodnie z wytycznymi EFNAR, pokazały, że przy danej wodożądności oraz zawartości żużla, wzrost stosunku kruszywa drobnego do grubego zapewnia większą ciekłość mieszanki betonowej. Jak podano w tabelicy 3, mieszanka GGBFS50-2 w krótszym czasie osiągnęła średnicę rozplywu 500 mm. To wskazuje na większą ciekłość tej mieszanki i może być uważane za wskaźnik odporności na segregację tego betonu. Inną prawdopodobną przyczyną lepszej urabialności mieszanek zawierających żużel jest efekt smarny związany z rozkładem wielkości ziaren tego materiału o dużej mialkości.

Poza zmniejszeniem tarcia pomiędzy ziarnami, domieszka zmniejszająca dodatek wody ma także znaczny wpływ na konsystencję BSZ, a więc odpowiednia jej ilość prowadzi do osiągnięcia pożądaných właściwości betonu samozagęszczającego się. Segregację w trakcie wytwarzania mieszanek kontrolowano wizualnie i nie stwierdzono problemów związanych z tym zjawiskiem w żadnym z badanych betonów. W związku z tym, że badanie czasu rozplywu było drugim wskaźnikiem określającym konsystencję, to próbki o krótszym czasie rozplywu można uznawać za odporne na segregację. Na rysunku 3 pokazano czas, po którym mieszanki osiągnęły rozplyw 50 cm. Wszystkie mieszanki zawierające dodatek superplastyfikatora osiągnęły czas mniejszy od 5 sekund. Dodatek żużla do mieszanek spowodował lepszą urabialność w porów-

This explains that at given slag ratio, i.e. 50% in both mixture, dosage of slag is effective for determining the long term properties of fresh concrete. It can make sense that slag particles fills the gap among cement and this leads to better particle size distribution so that fresh concrete exhibits higher fluidity. These results were also consistent with the work of Sethy et al. (10). In general, all specimens demonstrated that inclusion of slag as mineral admixture is effective for developing fresh concrete that has better filling ability. This trend can be clearly seen from Fig. 2. Another filling ability test, T_{50} flow time, was also carried out in order to support concrete slump values measured in this study. T_{50} flow time tests were conducted according to EFNARC specifications. Results revealed that at given water demand and slag volume, increment of fine/coarse aggregate ratio induced more flowability of fresh concrete. As it is given in Table 3, GGBFS50-2 exhibited lowest time to reach 500 mm spread circle. This indicates greater flowability of fresh concrete and can be also considered as the indication of resistance to segregation. Another reason that mixtures contain slag have shown better workability is probably due to lubricating effect that is triggered by particle distribution of powder.

Beside reduction of friction between particles, HRWR has significant effect on slump values of SCC so that correct quantity of water can maintain the targeted self-compacting property. Segregation during production of mixtures were controlled visually and none of mixtures have exhibited segregation problem. Since T_{50} time is a secondary indication of flow, lower time can be judged as an indication of resistance to segregation. Figure 7 demonstrates the time for concrete to reach diameter of 50 cm. All mixtures contain HRWR were measured under 5 seconds. Slag addition to the mixtures have resulted in better workability compared to relevant reference specimens. Taking into account of T_{50} time, The Brite EuRam research [23] suggests a time of 3-7 seconds



Rys. 2. Opad stożka mieszanek betonowych

Fig. 2. Slump values of concrete specimens

naniu do odpowiadających im próbek kontrolnych. W opracowaniu „The Brite-EuRam” (23), autorzy podają czas rozplywu 3-7 sekund jako odpowiedni w obiektach inżynierii lądowej oraz 2-5 sekund w przypadku budownictwa mieszkaniowego. Wyniki pokazane na rysunku 3 wskazują na możliwość zastosowania mieszanek z żużlem i domieszka chemiczną w wielu obiektach inżynierii lądowej, które planuje się wykonać z BSZ. Zarówno w przypadku badania opadu stożka jak i czasu rozplywu t_{50} , większy stosunek kruszywa drobnego do kruszywa grubego spowodował poprawę urabialności z powodu korzystniejszego upakowania stosu okruszowego.

3.2. Właściwości mechaniczne

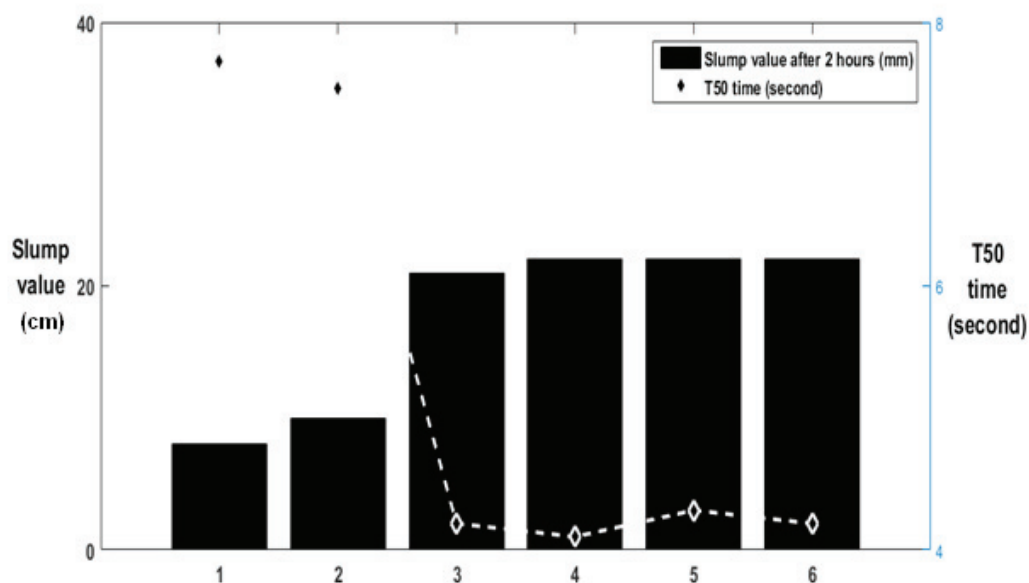
Wytrzymałość na ściskanie próbek betonowych zbadano, zgodnie z normą EN 12390-3 (24), po 7 i 28 dniach dojrzewania. W tabelicy 4 podano średnie wyniki wytrzymałości dla trzech różnych rodzajów betonów zawierających żużel oraz odpowiadających im betonom odniesienia.

W porównaniu do próbek odniesienia, próbki zawierające żużel mają mniejszą wytrzymałość na ściskanie po 7 dniach. Jednakże, reakcja pucolanowa odgrywa znaczną rolę po 28 dniach dojrzewania i po tym okresie wytrzymałość wszystkich próbek z dodatkiem żużla przekracza wartości uzyskane dla próbek kontrolnych. Oprócz reakcji pucolanowej żużla z wodorotlenkiem wapnia w zaczynie cementowym, twarde ziarna żużla również mogą zwiększać wytrzymałość betonu odgrywając rolę składnika wypełniającego pory.

Mikrostruktura betonu z dodatkiem żużla [rysunek 5], którą badano na próbkach po pomiarze wytrzymałości, jest jednorodna i pokazuje, że mieszanki BSZ nie ulegały segregacji.

4. Wnioski

Głównym celem pracy było zbadanie właściwości mechanicznych i urabialności betonu samozagęszczającego się z dodatkiem żużla. Żużel zastępujący cement wpłynął bardzo korzystnie na właściwości mieszanek z betonu samozagęszczającego się. Po-



Rys. 3. Opad stożka mieszanek BSZ po 2 godzinach i czas rozplywu t_{50}

Fig. 3. Slump values of SCC mixtures after 2 hours and T_{50} time

is acceptable for civil engineering applications and 2-5 seconds for housing applications. Figure 7 indicates that HRWR and slag incorporated mixtures are applicable for many civil engineering applications where SCC is desired. For both slump value and T_{50} time test, higher fine/coarse aggregate ratio yielded better workability properties due to packing factor that effects the better contact of different particles.

3.2. Mechanical properties

Concrete specimens were tested following the relevant standard (24) after 7 and 28 days of curing for the compressive strength. Table 4 presents the mean of compressive strength determined from three equivalent concrete specimens.

Compared to control specimens, slag containing samples have shown lower compressive strength at 7 days. However, pozzolanic reactions in matrix played significant role after 28 days and all mixtures with slag addition exceeded the mean strength of control samples. In addition to pozzolanic reaction of slag and calcium hydroxide in cement paste, hard slag particles can also increase strength of concrete specimens, as filler filling pores.

Microstructure of concrete with slag addition was analyzed on specimens after compressive strength measurement [Fig. 5]. From

Tablica 4/ Table 4

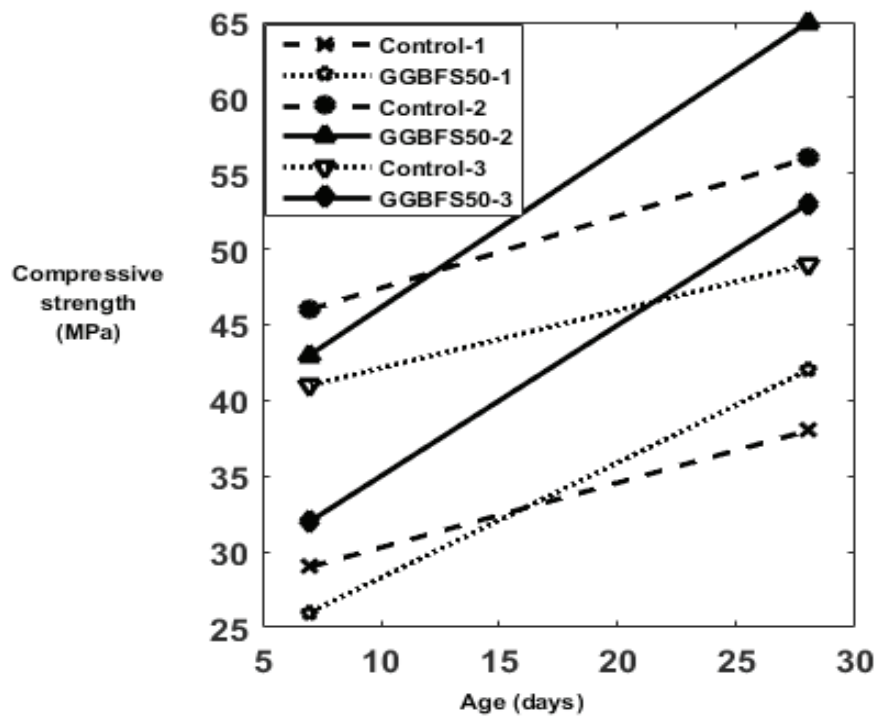
WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE MIESZANEK BSZ, MPa

COMPRESSIVE STRENGTH OF SCC MIXTURES, MPa

Czas/Time	Control-1	GGBFS50-1	Control-2	GGBFS50-2	Control-3	GGBFS50-3
7 dni/days	29	26	46	43	41	32
28 dni/days	38	42	56	65	49	53

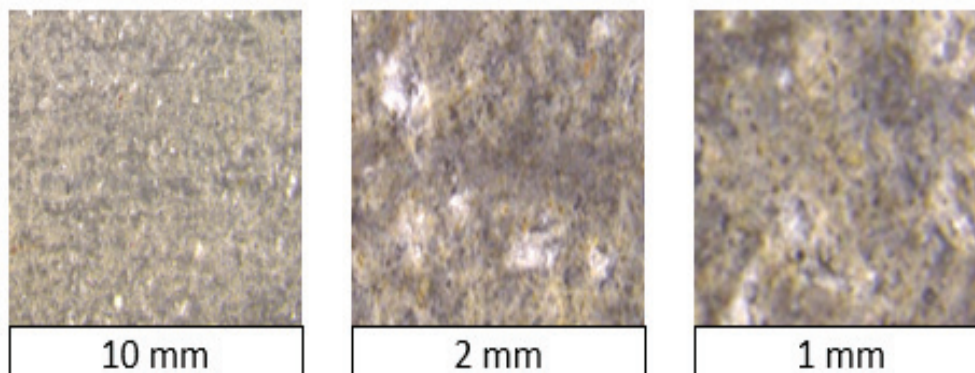
miary wytrzymałości pozwoliły natomiast określić wpływ żużla na właściwości stwardniałego BSZ. Z uzyskanych wyników badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- Wszystkie mieszanki, w których 50% cementu zastąpiono żużlem spełniały wymagania zawarte w wytycznych EF-NARC. Zastosowano różne proporcje składników BSZ, a wyniki urabialności uzyskane za pomocą badań konsystencji były zadowalające i zapewniały dobrą ciekłość mieszanki bez segregacji składników betonu.
- Oprócz superplastyfikatora oraz większego stosunku kruszywa drobnego do grubego, dodatek żużla również poprawił urabialność mieszanek betonowych, prawdopodobnie z uwagi na jego dużą powierzchnię właściwą [425 m²/kg], w porównaniu do mniejszej powierzchni właściwej cementu [325 m²/kg].
- Jak można się było spodziewać, utrata urabialności świeżego betonu zależy od dodatku superplastyfikatora oraz stosunku kruszywa drobnego do grubego.



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie BSZ w funkcji czasu twardnienia

Fig. 4. Relation of SCC compressive strength viz. hardening time



Rys. 5. Mikrostruktura próbek BSZ z dodatkiem żużla

Fig. 5. Microstructure of SCC samples with slag addition

- Poza wytrzymałością na ściskanie po 7 dniach, wytrzymałość BSZ z dodatkiem żużla była większa niż w przypadku próbek kontrolnych, bez jego dodatku. Twarde ziarna żużla zmniejszają porowatość matrycy cementowej, a reakcja pucolanowa przyczynia się do wzrostu zawartości fazy C-S-H, która jak wiadomo ma decydujący wpływ na wytrzymałość.

microscopic observations it is evident that the microstructure is uniform and it is confirming that SCC mixtures were not segregated.

In addition to visual observation during experiments (i.e. properties of mixtures), it can be also clearly seen from Fig. 5, reduction of compressive strength was not observed for SCC mixtures. This result also supports that matrices of slag incorporated specimens did not exhibit any segregation.

References / Literatura

1. C. Shi, Z. Wu, KuiXi Lv, L. Wu, A review on the mixture design methods for self compacting concrete, *Constr. Build. Mat.*, **84**, 387-398 (2015).
2. H. Okamura, M. Ouchi, Self-compacting Concrete: Development, Present, and Future, pp. 3-14, *Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Self-compacting Concrete 1999*.

4. Conclusions

The primary purpose of this study was the understanding of mechanical and workability properties of slag addition to concrete. The addition of slag replacing cement exhibited high beneficial results

3. H. Okamura, Self-compacting high-performance concrete, *Concr. Int. Design. Constr.*, **19**, 7, 50–54 (1997).
4. E. K. Attiogbe, H. T. See, J. A. Daczko, Engineering properties of self-consolidating concrete, in *Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of Self-consolidating Concrete*, November 2002.
5. P. Billberg, Development of SCC static yield stress at rest and its effect on the lateral form pressure, pp. 583 – 589, In: *SCC 2005, combining the second North American conference on the design and use of self-consolidating concrete and the fourth international RILEM symposium on self-compacting concrete 2005*.
6. N. Martys, C. F. Ferraris, Simulation of SCC flow, In: *Proc. 1st North American Conf. on the design and use of Self-Consolidating Concrete*, IL, pp. 27–30, Chicago 2002.
7. O. H. Wallevik, S. Kubens, F. Müller, Influence of cement-admixture interaction on the stability of production properties of SCC. In: G. De Schutter, V. Boel, editors. *5th International RILEM symposium on self-compacting concrete*, p. 211–216, RILEM Publications SARL 2007.
8. C. Shi, Z. H. Ou, K. H. Khayat, PRO 93: 3st international symposium on design performance and use of self-Consolidating concrete, RILEM Publications 2014.
9. M. Uysal, K. Yılmaz, Effects of mineral admixtures on the properties of self compacting concrete, *Cem. Concr. Comp.*, **33**, 771-776 (2011).
10. K. P. Sathy, D. Pasla, U. C. Sahoo, Utilization of high volume of industrial slag in self compacting concrete, *J. Cleaner Prod.*, **112**, Part 1, 581-587 (2016).
11. M. S. Ashtiani, A. N. Scott, R. P. Dhakal, Mechanical and fresh properties of high-strength self-compacting concrete containing class C fly ash, *Constr. Build. Mat.*, **47**, 1217-1224 (2013).
12. M. Şahmaran, İ. Ö. Yaman, M. Tokyay, Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash, *Cem. Concr. Comp.*, **31**, 99-106 (2009).
13. M. Şahmaran, İ. Ö. Yaman, Hybrid fiber reinforced self-compacting concrete with a high-volume coarse fly ash, *Constr. Build. Mat.*, **21**, 150-156 (2005).
14. H. Okamura, K. Ozawa, Mix design for self-compacting concrete, *Concr. Lib. JSCE*, **25**, 25, 107-120 (1995).
15. Factorial design of cement slurries containing limestone powder for self-consolidating slurry-infiltrated fiber concrete, *J. ACI Mater.*, **101**, 2, 136-45 (2004).
16. R. Siddique, P. Aggarwal, Y. Aggarwal, Mechanical and durability properties of self-compacting concrete containing fly ash and bottom ash, *J. Sustain. Cem. Based. Mater.*, **1**, 3, 67–82 (2012).
17. *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*, February 2002.
18. BS EN 12620:2013, "Aggregates for concrete".
19. Standard Method of Test for Slump of Hydraulic Cement Concrete AASHTO Designation: T 119M/T 119-07 ASTM Designation: C 143/C 143M-05a, 2007.
20. K. E. Alyamac, E. Ghafari, R. Ince, Effect of waste marble dust content as filler on properties of self-compacting concrete, *Constr. Build. Mater.*, **23**, 5, 1947-1953 (2009).
21. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete, *Build. Environ.*, **42**, 4, 1795-805 (2007).
22. TS EN 206:2014: "Concrete - Properties, Performance, Production and Conformity Standard".
23. Brite-EuRam programme: BE96-3801/BRPR-CT96-0366, 'Rational production and improved working environment through using self-compacting concrete'.
24. TS EN 12390-3: 2003 Determination of Compressive Strength of Concrete Specimens.

on the self-compacting properties of fresh concrete. Effects of slag on the hardened properties of SCC was also determined in terms of strength properties. From experimental results the following conclusions can be drawn:

- All the mixtures that contain slag replacing 50% of cement have met the requirements of the EFNARC regulations. Different mix proportions were developed for SCC and their workability i.e. slump results were satisfying and assuring good flowability without any segregation phenomena.
- Along with the HRWR and higher fine/coarse aggregate ratio, slag usage have improved the workability of fresh concrete owing to large specific surface area of slag equal 425 m²/kg compared to that of cement particles – 325 m²/kg.
- As it should be expected the retention of workability properties of fresh concrete specimens depends on the HRWR addition and fine/coarse aggregate ratio.
- The results of mechanical properties of the SCC measurement were shown that, except compressive strength at 7 days, compressive strength of slag containing SCC was higher than the control specimens. It can be derived that hard particles of slag have acted as hard filler particles, simultaneously decreasing the porosity of cement matrix. This dense microstructure played a significant role on assuring the higher compressive strength and the pozzolanic reaction – increasing the C-S-H content has also the positive effect on the strength of slag containing specimens at 28 days.