

Kształtowanie samozagęszczalności mieszanek betonowych na bazie cementów z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego

The self – compacting properties of concrete mixture of cement with calcareous fly ash addition

1. Wprowadzenie

Technologia betonów samozagęszczających się jest obecnie przedmiotem bardzo dużego zainteresowania badawczego. Modyfikacja składu mieszanki betonowej w celu spełnienia warunków samozagęszczalności – duża ilość dodatków mineralnych, niski stosunek w/s oraz dodatek superplastyfikatora – jest taka sama jak metody stosowane w celu uzyskania szczelnej mikrostruktury zwykłego betonu.

Posiadane wiadomości nie są wystarczające do efektywnego kształtowania urabialności mieszanek samozagęszczających się z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego. Konieczne są dalsze badania, zwłaszcza uwzględniające wpływ zmiennych właściwości fizykochemicznych popiołu lotnego wapiennego i rodzaju cementu. Stwierdzono możliwość stosowania popiołu lotnego wapiennego, jako zamiennik części cementu w betonie i jako dodatek do cementu (1). Nowym zagadnieniem jest również kształtowanie urabialności fibrobetonów samozagęszczalnych z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego.

Dodatki mineralne odgrywają bardzo ważną rolę we współczesnej technologii betonu. Ich stosowanie pozwala bowiem na modyfikowanie właściwości betonu oraz uzyskiwanie znacznych korzyści ekonomicznych. Metoda ta jest również ważnym elementem w realizacji strategii zrównoważonego rozwoju. Dodatki mineralne są dobierane z uwzględnieniem wytrzymałości i trwałości betonu. Ich dodatek ma także duży wpływ na właściwości reologiczne mieszanki.

Jako dodatki mineralne najczęściej stosowane są popioły lotne, zmielony granulowany żużel wielkopiecowy oraz pył krzemionkowy. Podstawowe efekty stosowania tych dodatków mineralnych przedstawiono szeroko w licznych opracowaniach (2-4).

Podstawowym wymaganiem stawianym przy projektowaniu i wytwarzaniu betonów samozagęszczających się (BSZ), jest zapewnienie im dobrej urabialności w czasie całego procesu betonowania. Betony te mają dużą zawartość dodatków mineralnych,

1. Introduction

The technology of self – compacting concrete is currently a matter of great research interest. For the modifying of concrete mixture composition to assure the self-compacting properties the different mineral additions, low w/b ratio and superplasticizer are in common use, as in the case of normal concrete mixture to obtain a compact microstructure of hardened concrete.

The current state of information are not sufficient to effectively govern the workability of self – compacting mixtures with the addition of calcareous fly ash. Further research is needed, particularly embracing the influence of the physicochemical properties changes of calcareous fly ash and of the type of cement. It was established, that calcareous fly ash can be used as the partial replacement of cement in concrete, or as cement constituent (1, 2). Totally new issue is also the problem of workability of steel fibre reinforced self-compacting concrete with the addition of calcareous fly ash. Mineral additions is key part in the modern concrete technology and their use allows to modify the properties of the concrete and give the significant economic benefits, as well as is in accordance with the strategy for sustainable development.

Mineral additions are selected in regard of the strength and durability requirements of concrete. Their application, however, also significantly influences the rheological properties of the mixture. As the mineral additions siliceous fly ashes, ground granulated blastfurnace slag and silica fume are commonly used. The main effects of these mineral additions application are thoroughly presented in numerous papers (3-5).

The good workability of self-compacting concrete (SCC) mixture during the whole process of concrete placing is the basic requirement for this concrete designing and producing. The high content of mineral additions is typical for SCC which assures its chosen properties. Previous papers point out the problem of worsened workability of concrete mixture with calcareous fly ash. In connection with the fact, that workability is the key part for the self-

modyfikujących wybrane właściwości (np. mączka wapienna, popiół lotny krzemionkowy, zmielony granulowany żużel wielkopiecowy, pył krzemionkowy). Dotychczasowe publikacje wskazują na problem pogarszania się urabialności mieszanek betonowych zawierających popiół lotny wapienny.

W związku z tym, że urabialność stanowi czynnik warunkujący uzyskanie betonów samozagęszczających się, przeprowadzono serię badań mających na celu sprawdzenie możliwości uzyskania BSZ z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego. Wykonano badania samozagęszczających się betonów zwykłych oraz wysokowartościowych. W pracy omówiono efekty stosowania popiołów lotnych wapiennych do betonów nowej generacji, a szczególnie do BSZ.

2. Właściwości reologiczne mieszanek na spoiwie cementowym i ich pomiar

Z licznych badań rozpatrujących urabialność mieszanki betonowej wynika, że zachowuje się ona pod obciążeniem jak lepkoplastyczne ciało Bingham'a (6). Granica płynięcia g i lepkość plastyczna h , są stałymi materiałowymi, charakteryzującymi właściwości reologiczne mieszanki. Ze względu na urabialność mieszanki, parametrem o zasadniczym znaczeniu jest granica płynięcia. Znaczenie technologiczne lepkości plastycznej w przypadku mieszanek zagęszczanych wibracyjnie jest mniejsze, jednak w odniesieniu do mieszanek samozagęszczających się o ich urabialności decydują zarówno granica płynięcia, jak i lepkość plastyczna. Szczegółowo zagadnienia reologii omówiono w monografii Szwabowskiego (6). W pracach między innymi Banfilla (7) oraz Gołaszewskiego (8) wykazano, że ze względu na dobrą zgodność wpływu podstawowych składników o dużej miarkości na reologię zapraw i mieszanek betonowych, wyniki uzyskane na zaprawach mogą być wykorzystane do przewidywania kierunków i wielkości zmian właściwości reologicznych tych ostatnich. Dotyczy to szczególnie wpływu dodatków i domieszek.

3. Metody badań

Podstawowym problemem betonów samozagęszczających się, także tych zawierających popiół lotny wapienny (PLW), jest ich urabialność. W prezentowanym artykule parametry reologiczne wyznaczono reometrem BT2 oraz Viskomatem XL (rysunek 1) i opisywano modelem Bingham'a.

Przyjmuje się, że wartości granicy płynięcia g odpowiada średnica maksymalnego rozplywu SF , natomiast wartości lepkości plastycznej h odpowiada czas rozplywu do średnicy 500 mm T_{500} . Oba parametry są mierzone metodą rozplywu (klasa rozplywu KR) zgodnie z normą EN 12350-8:2009.

Badania parametrów reologicznych wykonano uwzględniając wpływ następujących czynników:

- rodzaj partii popiołu lotnego wapiennego; A i B (tablica 1)
- stopień rozdrobnienia popiołu lotnego wapiennego (tablica 2)

compacting concrete production, the goal of the series of tests was to verify the possibility of the SCC making with the addition of calcareous fly ash. The results of these studies, embracing the normal self-compacting concrete (SCC) and the High Performance Self-Compacting Concrete (HPSCC), are presented in this paper.

2. Rheological properties of concrete mixtures

From numerous research of the concrete mixture workability it is well known, that under stress this mixture behaves like Bingham body (6). The stress yield value g and plastic viscosity h are the matter constants characterising the rheological properties of the mixture. Regarding the workability, the stress yield value is a parameter of basic importance. The plastic viscosity is of lower importance for the concrete mixtures compacted by vibrating, however, in the case of self – compacting concrete mixtures the workability is governed by both: stress yield value and plastic viscosity. The concrete rheology was discussed in detail in the book of Szwabowski (6). Among others in the papers of Banfill (7) and Gołaszewski (8) it was shown that due to the similarnature of influence of basic constituents on fresh mortars and concrete mixtures rheology, the results for mortars could be applied to predict the changes of rheological properties of concrete mixtures. It applies mainly to influence of additions and admixtures.

3. Methods

The basic problem of self-compacting concrete, including those containing the calcareous fly ash, is its workability. In this paper, the rheological parameters of concrete mixtures were tested with rheometer BT2 and Viskomat XL (Fig. 1) and approximated with Bingham model.



Rys. 1. Viskomat XL o pojemności pomiarowej 3 dm³

Fig. 1. Viskomat XL of measurement capacity equal 3 dm³

Tablica 1 / Table 1. SKŁAD CHEMICZNY POPIOŁÓW LOTNYCH WAPIENNYCH / CHEMICAL COMPOSITION OF CALCAREOUS FLY ASH

	Zawartość składnika, Constituent, %								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO _w *
HCFA batch A	40,17	24,02	5,93	22,37	1,27	3,07	0,15	0,20	1,46
HCFA batch B	40,88	19,00	4,25	25,97	1,73	3,94	0,13	0,14	1,07

*metoda glikolowa

* glycol method

Tablica 2 / Table 2. WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE POPIOŁÓW / PHYSICAL PROPERTIES OF FLY ASHES

Popiół/Ash		Gęstość Density, g/cm ³	Pozostałość na sicie Residue on sieve 45µm, %	Powierzchnia właściwa wg Blaine'a, Blaine specific surface m ² /g	Gęstość nasypowa, Bulk density, kg/m ³
Partia/Batch A					
A0	Bez przemiału / Unground	2,64	55,6	190	1060
A1	Mielenie / Ground 20 min	2,71	20,0	410	nb/nd
Partia/Batch B					
B0	Bez przemiału / Unground	2,60	46,3	240	1030
B1	Mielenie / Ground 15 min	2,67	20,8	350	nb/nd

Tablica 3 / Table 3

SKŁADY MIESZANEK SAMOZAGĘSZCZAJĄCYCH SIĘ ZASTOSOWANYCH W POSZCZEGÓLNYCH SERIACH BADAŃ

COMPOSITIONS OF SELF – COMPACTING CONCRETE MIXTURES USED IN PARTICULAR RESEARCH SERIES

SKŁADNIK / OZNACZENIE CONSTITUENT/DESIGNATION	MIESZANKA BETONOWA CONCRETE MIXTURE		
	C1	C2	C3
	kg/m ³		
CEM I [C1]	490,0	-	490,0
CEM I, CEM II/B-M (LL-W), CEM II/B-W, CEM IV/B-W [CII]*	-	600,0	-
Piasek / Sand 0-2 mm [P]	800,0	800,0	756,0
Kruszywo otoczkowe / Natural aggregate 2-8 mm [Ko]	800,0	800,0	-
Kruszywo bazaltowe / Basalt aggregate 2-8 mm [Kb]	-	-	944,4
Mikrokrzemionka / Silica fume [Mk]	-	-	49,0
Popiół lotny wapienny / High – calcium fly ash (10-20-30% m.c.) [PLW]	49-98-147	-	49-98-147
Superplastyfikator / Superplasticizer Glenium ACE 48 (3.5 % m.c.) [SP A]	-	-	17,0
Superplastyfikator / Superplasticizer Glenium SKY 592 (1,1 - 2,5 % m.c.) [SP B]	16,2	6,8 – 15,0	-
Stabilizator / Stabilizer RheoMatrix (0.4 % m.c.) [ST]	1,6	2,73	1,6
W/C	0,42	0,31	0,42
Punkt piaskowy kruszywa / Sand equivalent, %	50,0	50,0	45,8
Klasa konsystencji betonu / Consistency class, SF	SF3	SF 1-2-3	SF3

* C2 series included 16 mixtures with cements according to second row in this table

– zawartość popiołu lotnego wapiennego, zastępującego cement CEM I: 10–20–30, % m.c.;

Badania obejmowały 3 serie doświadczeń:

C1 – badanie wpływu dodatku PLW do BSZ,

C2* – badanie zawartości PLW w cementach (CEM II/B-M (LL-W), CEM II/B-W, CEM IV/B-W),

C3 – badania efektu dozowania PLW do WWBSZ.

* Metody uzyskiwania tych cementów są szczegółowo omówione w pracy Giergiczny, Garbacik, Cement Wapno Beton, ten zeszyt, str.

It is assumed that the stress yield value **g** is correspondent with the maximal flow diameter SF, whereas plastic viscosity **h** is corresponding the flow time for 500mm diameter **T₅₀₀**, while both of these parameters are measured by slump-flow test according to standard EN 12350-8:2009.

In the research the influence of the following factors were taken into account:

- batch of calcareous fly ash (CFA): A and B (Table 1),
- fineness of calcareous fly ash (Table 2),

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI CEMENTÓW ZASTOSOWANYCH W SERII BADAŃ C2

CHARACTERISTICS OF CO-GROUND CEMENTS USED IN C2 RESEARCH SECTION

Cecha/Parameters		Rodzaj cementu/Cement type			
		CEM II/B-M (LL-W)	CEM II/ B-W	CEM IV/ B-W	CEM I
Składniki Constituents, %	Klinkier portlandzki Portland clinker	66	66,5	48	94,5
	Popiół / AshW	14	29	48	-
	Wapień / Calcium LL	14	-	-	-
	Gips / Gypsum	6	4,5	4	5,5
Czas wiązania Settingtime, min	Początek / Initial	201	198	280	129
	Koniec / Final	331	358	420	244
Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength, MPa	2	21,7	19,8	12,8	29,0
	7	37,3	36,4	24,0	47,2
	28	47,4	50,4	39,3	59,9
Wytrzymałość na zginanie Bending strength, MPa	2	4,4	4,3	3,2	5,4
	7	6,5	6,2	4,8	6,8
	28	8,1	8,2	6,9	7,8
Wodożądność, % Water demand, % of mass		29,4	33,0	34,6	26,4
Rozpływ zaczynu / Pasteflow cm		17,9	15,9	14,7	18,4

Składy badanych mieszanek samozagęszczalnych w poszczególnych seriach badań podano w tablicy 3. Właściwości cementów uzyskanych w wyniku wspólnego zmielenia klinkieru z dodatkami przedstawiono w tablicy 4.

W badaniach zastosowano superplastyfikatory oparte na eterze polikarboksylianowym. Opracowano i zastosowano metodę przygotowania mieszanek betonowych, pozwalająca na powtarzalność wyników. Kolejność postępowania w procesie przygotowania mieszanek betonowych we wszystkich seriach pokazano na rysunku 2.

4. Wyniki badań i ich omówienie

4.1. Badania wpływu ilości dodanego PLW do BSZ na jego właściwości reologiczne

Na rysunku 3 przedstawiono wpływ zawartości popiołu lotnego wapiennego (partia A) i jego rozdrobnienie średnicę rozplywu KR i czas rozplywu T_{500} , mieszanek samozagęszczających się. Uzyskane wyniki wykazują, że wzrost zawartości popiołu lotnego wapiennego w mieszance powoduje zmniejszenie średnicy rozplywu KR oraz wydłużenie czasu rozplywu T_{500} . Zakres zmian jest tym większy, im większa jest zawartość PLW w mieszance. Jednak w przypadku gdy popiół został dodatkowo zmielony do powierzchni 410 m²/kg (PLW A1), zmiany właściwości reologicznych są mniejsze. Stwierdzono również pogorszenie urabialności wraz z upływem czasu. Należy jednak podkreślić, że utrata urabialności zachodzi w stopniu pozwalającym zachować samozagęszczalność. Potwierdziły to badania reologiczne, pokazane na rysunku 4, przeprowadzone reometrem BT2. Tak więc dodatek popiołu lotnego

– content of calcareous fly ash replacing cement: 10-20-30% of mass.

The research was conducted in 3 sections:

C1 – study of the effect of CFA content in SCC,

C2* – study of the effect of CFA content in cements (CEM II/B-M (LL-W), CEM II/B-W, CEM IV/B-W),

C3 – study of the addition of CFA in HPSCC.

The compositions of tested self – compacting concrete mixtures for particular series are presented in Table 3. The properties of cements co-ground of clinker with additions are presented in Table 4.

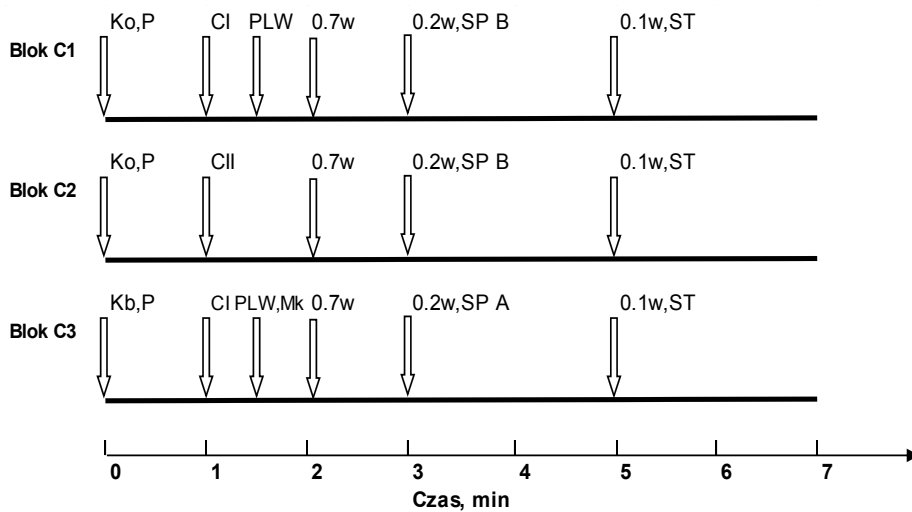
The superplasticizers used in these tests had polycarboxylate ether base. The procedure of concrete mixtures preparation, which assured the repeatability of results has been introduced. The order of the concrete mixture producing in all series are shown in Fig. 2.

4. Research results and discussion

4.1. The effect of CFA quantity addition to SCC on its rheological properties

In Fig. 3. is shown the influence of calcareous fly ash content (batch A) and its fineness on the flow diameter SF and flow time T_{500} of self – compacting concrete mixtures. The research results have shown that the increase of CFA content in the mixture causes the decrease

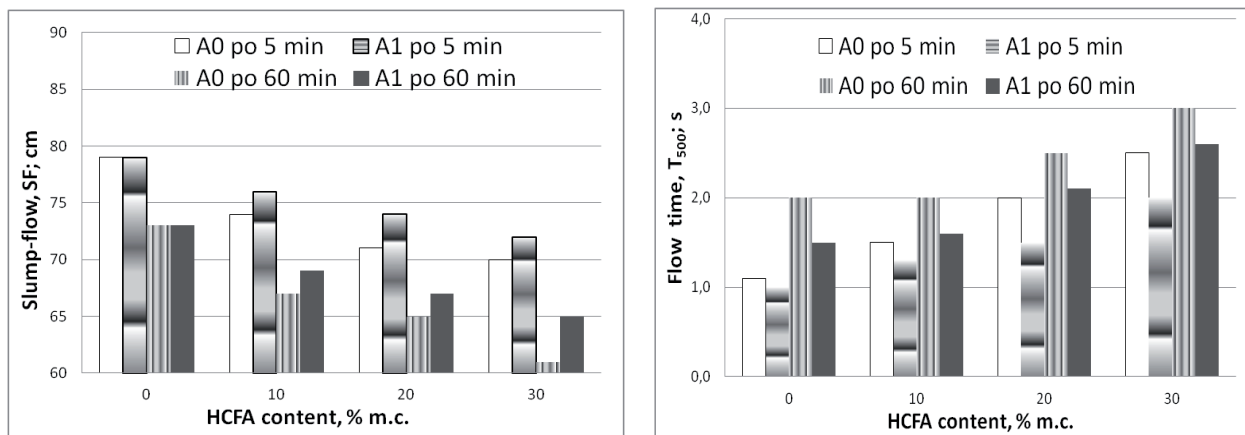
*Remark: the methods of cement production are presented in the paper of Giergiczny and Garbacik in this Cement Wapno Beton issue, page



Rys. 2. Kolejność dodawania składników trakcie wykonywania mieszanek betonowych, oznaczenia według tablicy 3

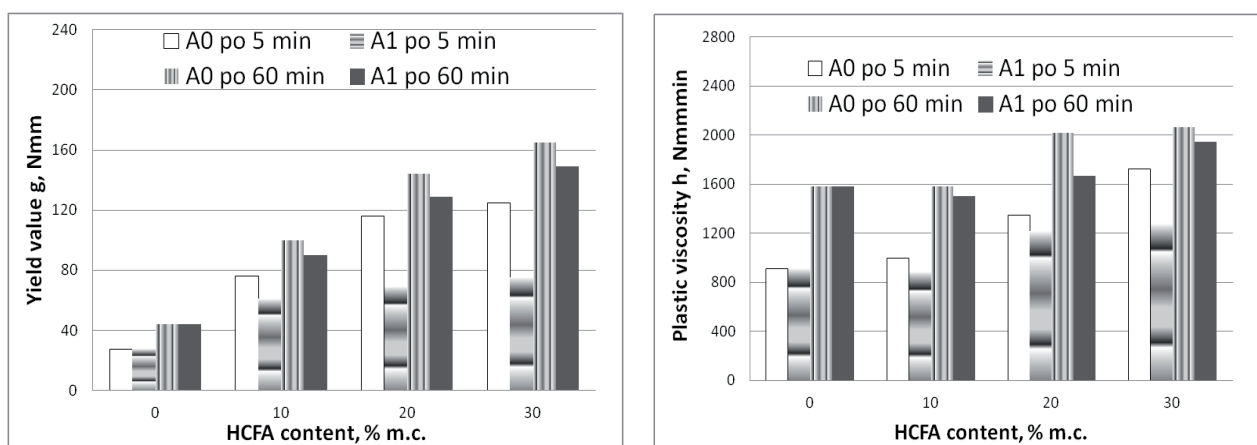
Fig. 2. The order of the constituents adding in the procedure of concrete mixtures production in three series

of flow diameter SF and increase of the flow time T_{500} . The range of changes is rising with the increase of CFA content in the mixture. However, in the case when the fly ash was ground additionally (CFA A1), the effect of changes was lower. Also, the workability loss in time has been observed. However, it should be noted, that irrespectively of the workability loss the self – compacting properties of the mixture was maintained. It was confirmed by rheological tests, with BT2 rheometer which results are shown in Fig. 4. Thus the addition of CFA causes the deterioration of the rheological parameters. The stress yield value g and plastic viscosity h are increasing with the rise of calcareous fly ash content in the mixture and with time. Additional grinding of fly ash causes the improvement of rheological properties of the mixtures and improvement of SF i T_{500} parameters.



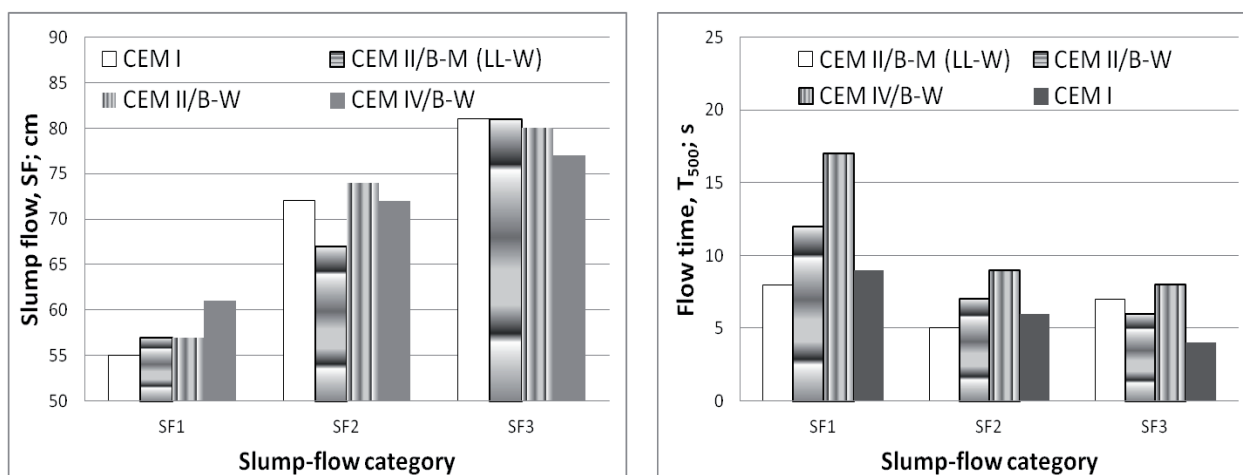
Rys. 3. Wpływ zawartości popiołu lotnego wapiennego i jego rozdrobnienia na średnicę rozptywu SF i czas rozptywu T_{500} mieszanek BSZ z uwzględnieniem efektu czasu

Fig. 3. The influence of calcareous fly ash content and its fineness on flow diameter SF and flow time T_{500} of SCC mixtures, including the effect of time



Rys. 4. Wpływ zawartości popiołu lotnego wapiennego i jego stopnia przemiatu na wartość granicy płynięcia g i lepkość plastyczną h mieszanek BSZ z uwzględnieniem efektu czasu

Fig. 4. The influence of calcareous fly ash content and its fineness on stress yield value g and plastic viscosity h of SCC mixtures, including the effect of time



Rys. 5. Wpływ rodzaju cementu z dodatkiem PLW na średnicę rozplywu KR i czas rozplywu T_{500} mieszanek BSZ (C2) dla różnych klas samozagęszczalności

Fig. 5. The influence of cement type with CFA addition on flow diameter SF and flow time T_{500} of SCC mixtures (C2) for different self – compacting classes

go wapiennego powoduje pogorszenie parametrów reologicznych. Wartości g i h ulegają zwiększeniu wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego wapiennego w mieszance oraz z upływem czasu.

Zmilenie dodatkowe popiołu powoduje poprawę właściwości reologicznych mieszanek z jego dodatkiem oraz polepszenie parametrów KR i T_{500} .

4.2. Badania wpływu zawartości popiołu lotnego wapiennego w cementach na właściwości mieszanki BSZ

Na rysunku 5 przedstawiono wpływ rodzaju cementu z dodatkiem PLW na średnicę rozplywu SF i czas rozplywu T_{500} mieszanek BSZ dla różnych klas samozagęszczalności. Na wyniki pomiarów pozwalają stwierdzić, że wzrost zawartości popiołu lotnego wapiennego w cemencie nie powoduje znacznego zmniejszenia średnicy rozplywu KR mieszanek BSZ. Obserwowano zbliżone klasy rozplywu w przypadku wszystkich badanych cementów w poszczególnych klasach samozagęszczalności mieszanek BSZ. Jednakże, wzrost zawartości popiołu lotnego wapiennego w cemencie wpłynął na wzrost czasu rozplywu T_{500} mieszanek BSZ. Lepkość plastyczna mieszanek BSZ wzrastała tym bardziej, im niższa była klasa konsystencji badanych mieszanek. Zawartość popiołu lotnego wapiennego w cemencie nie wpłynęła na spadek granicy płynięcia g mieszanek BSZ we wszystkich klasach samozagęszczalności (rysunek 6).

4.3. Badania wpływu ilości dodanego popiołu lotnego wapiennego na urabialność mieszanki WWBSZ*

Na rysunku 7 przedstawiono wpływ dodatku PLW (partia A) i jego rozdrobnienia na średnicę rozplywu KR i czas rozplywu T_{500} mieszanek WWBSZ. Wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego wapiennego w mieszance następował niewielki spadek średnicy rozplywu. Dodatkowe mielenie popiołu lotnego nie powo-

4.2. The effect of CFA content in cements on the SCC mixture properties.

In Fig. 5. the influence of the type of cement with CFA addition on flow diameter SF and flow time T_{500} of SCC mixtures for various self-compacting classes is shown. The results of these testes have shon that the increase of CFA content in cement does not cause a significant decrease in flow diameter SF of SCC mixtures. However, the increase of CFA in cement composition caused the increase of flow time T_{500} of SCC mixtures The plastic viscosity of SCC mixtures was higher when the consistency class of tested SCC mixture was decreasing. The calcareous fly ash content in cement did not cause the decrease of the stress yield value g of SCC mixture for al self – compacting class (Fig. 6).

4.3. The effect of CFA addition on HPSCC mixture workability

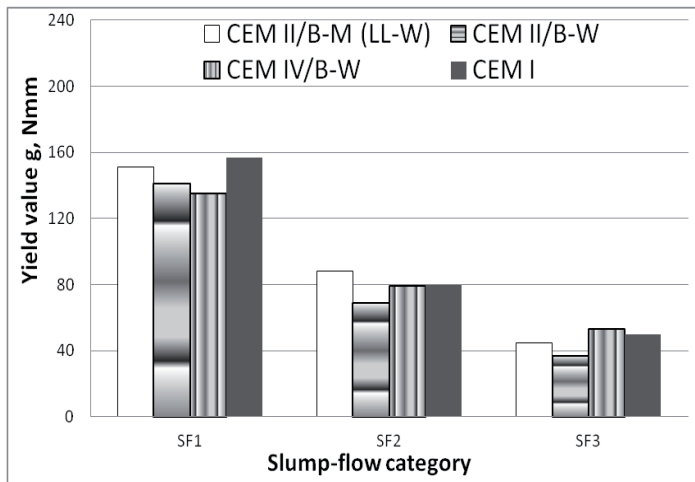
In Fig. 7. the influence of CFA (batch A) and its fineness on flow diameter SF and flow time T_{500} of HPSCC mixtures is shown. Together with the increase of CFA content in the mix, a small decrease of flow diameter SF was found. Additional grinding of calcareous fly ash did not cause a workability loss of HPSCC mixture. The increase of calcareous fly ash content in the mixture had caused the increase of the flow time T_{500} of the SCC mixture, however, only on a small degree. Moreover, the decrease in workability in time has been observed, but on a degree allowing to preserve self-compacting properties of the mixture.

Similar effect has been observed in the case of CFA (batch B) addition to HPSCC mixtures, which are presented in Fig. 8.

4.4. The effect of calcareous fly ash addition on rheological properties of HPSCC mixtures

In Fig. 9. the influence of calcareous fly ash content and its fineness on the rheological parameters g and h of the HPSCC mixtures, tested with BT2 rheometer is shown. It was found that the stress

* wysokowartościowy beton samozagęszczający się



Rys. 6. Wpływ rodzaju cementu z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego na wartość granicy płynięcia g mieszanek BSZ (C2)

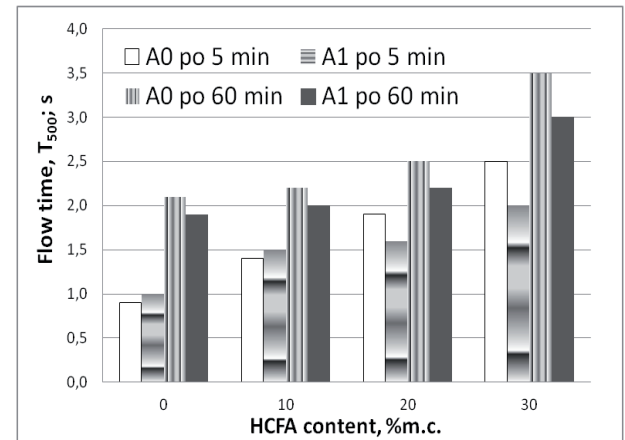
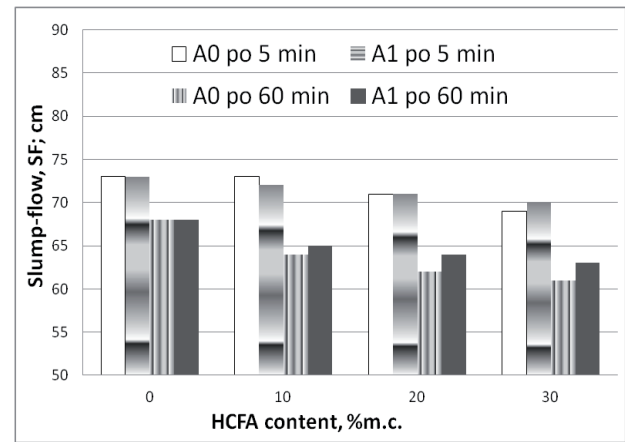
Fig.6. The influence of cement type with CFA addition on stress yield value g of SCC mixtures (C2)

wało pogorszenia urabialności mieszanek WWBSZ z jego dodatkiem. Wzrost zawartości popiołu lotnego wapiennego w mieszance wpłynął na wzrost czasu rozplywu T_{500} mieszanek BSZ lecz tylko w niewielkim stopniu. Stwierdzono również pogorszenie urabialności wraz z upływem czasu, jednak w stopniu pozwalającym na zachowanie samozagęszczalności.

Podobne zmiany wystąpiły w przypadku dodatku PLW (partia B) do mieszanek WWBSZ, przedstawione na rysunku 8.

4.4. Badania wpływu ilości dodanego popiołu lotnego wapiennego na właściwości reologiczne mieszanek WWBSZ

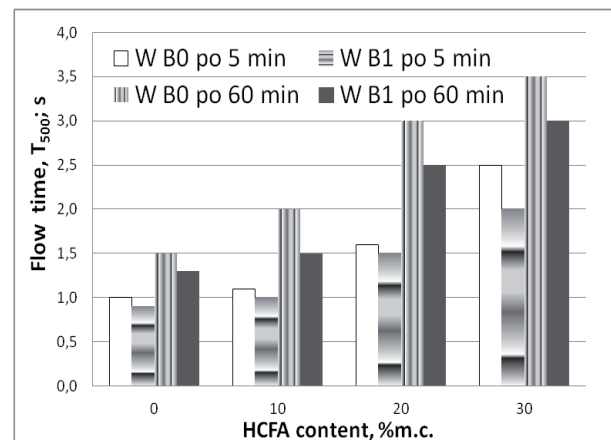
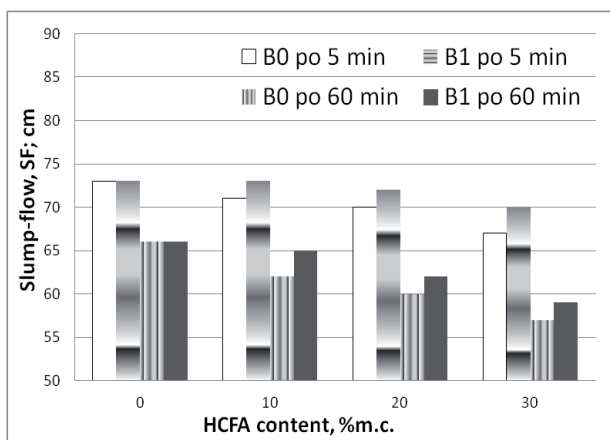
Na rysunku 9 pokazano wyniki pomiarów wpływu dodatku popiołu lotnego wapiennego i jego rozdrobnienia na parametry reologiczne g i h mieszanek WWBSZ, wyznaczone reometrem BT2. Stwierdzono wzrost granicy płynięcia g wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego wapiennego w mieszance C3. W przypadku dodatku popiołu zmielonego, dodatkowo wartość g malała wraz ze wzrostem jego zawartości. Lepkość plastyczna h wzrastała



Rys. 7. Wpływ zawartości PLW (partia A) i jego rozdrobnienia na średnicę rozplywu KR i czas rozplywu T_{500} mieszanek WWBSZ

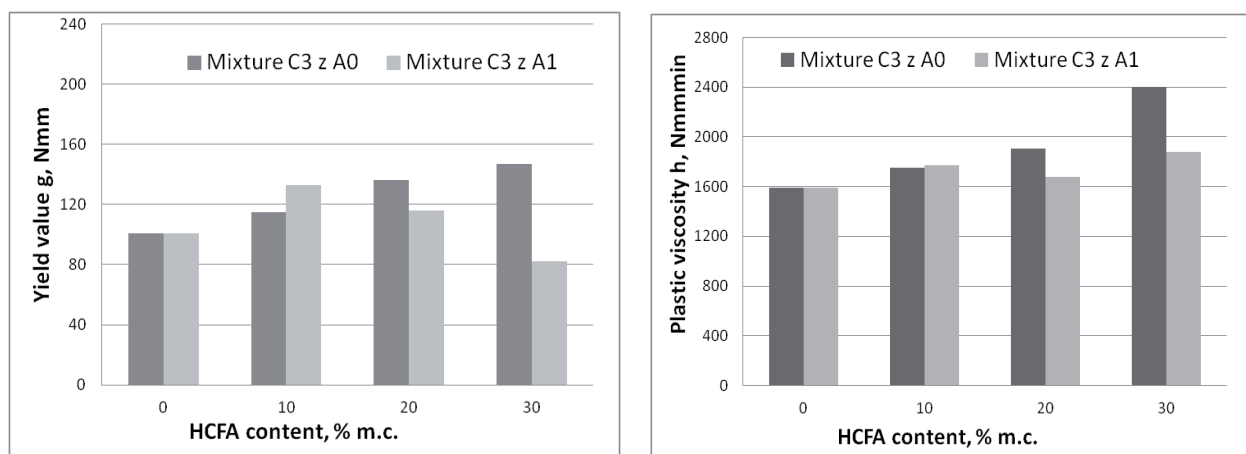
Fig.7. Influence of CFA content (batch A) and its fineness on flow diameter SF and flow time T_{500} of HPSCC mixtures

yield value g is rising with the increase of calcareous fly ash content in C3 mixture. In the case of additionally grinding of fly ash, the stress yield value g decreased simultaneously with the increase of calcareous fly ash content. Plastic viscosity h has increased if the addition of fly ash was rising. Similar relationships were found in the study of the influence of the calcareous fly ash (batch B) content and its fineness on the stress yield value g and plastic viscosity h of the SCC (C1) and HPSCC (C2) mixtures (Fig. 10.).



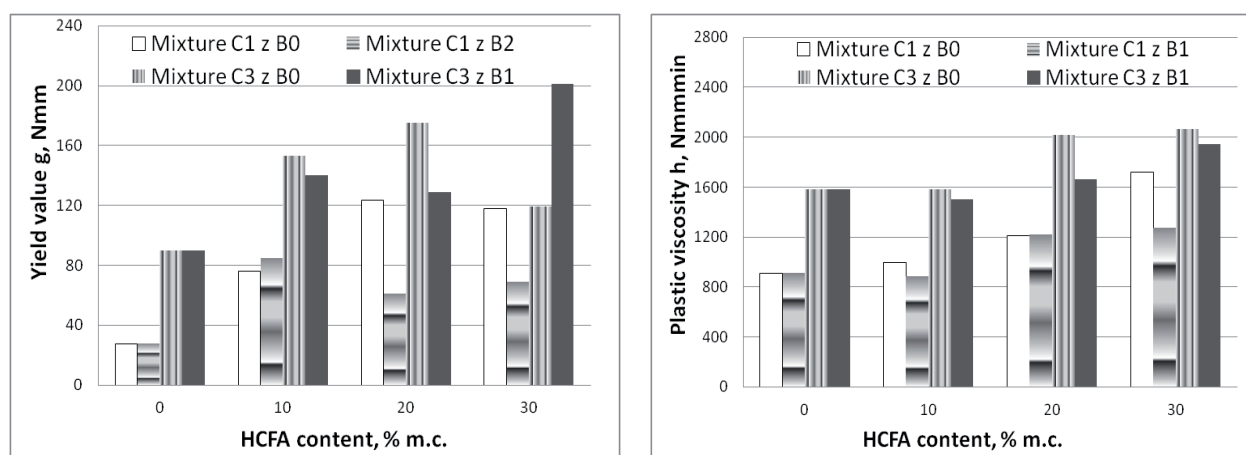
Rys. 8. Wpływ zawartości PLW (partia B) i jego rozdrobnienia na średnicę rozplywu KR i czas rozplywu T_{500} mieszanek WWBSZ

Fig. 8. Influence of HCFA content (batch B) and its degree of grinding on flow diameter SF and flow time T_{500} of HPSCC mixtures



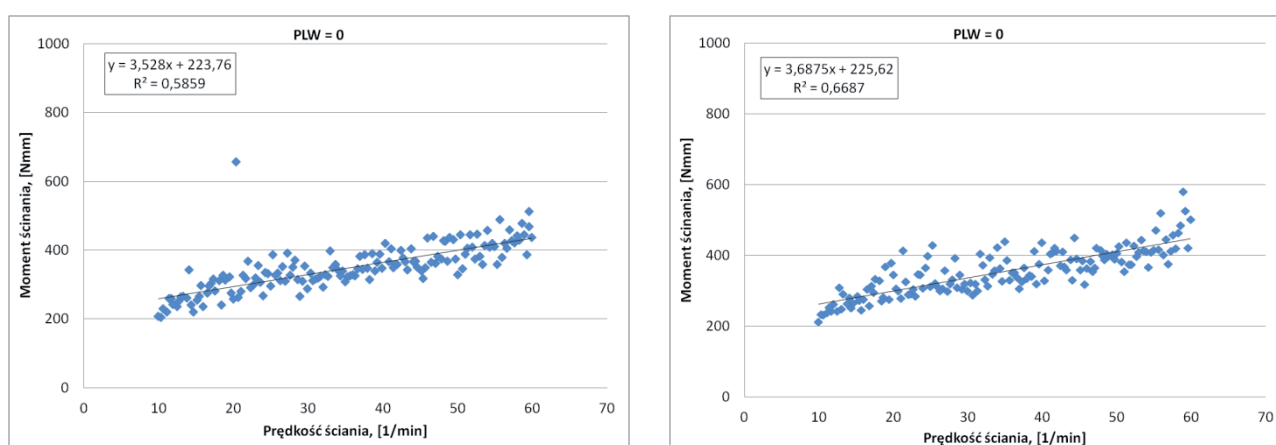
Rys. 9. Wpływ zawartości PLW (partia A) i jego stopnia przemiału na wartość granicy płynięcia g i lepkość plastyczną h mieszanek WWBSZ (C3)

Fig. 9. The influence of CFA content (batch A) and its fineness on the stress yield value g and plastic viscosity h of HPSCC mixtures (C3)



Rys. 10. Wpływ zawartości PLW (partia B) i jego stopnia przemiału na wartość granicy płynięcia g i lepkość plastyczną h mieszanek BSZ (C1) i WWBSZ (C3)

Fig. 10. The influence of CFA content (batch B) and its fineness on flow diameter SF and flow time T_{500} of SCC (C1) and HPSCC (C3) mixtures

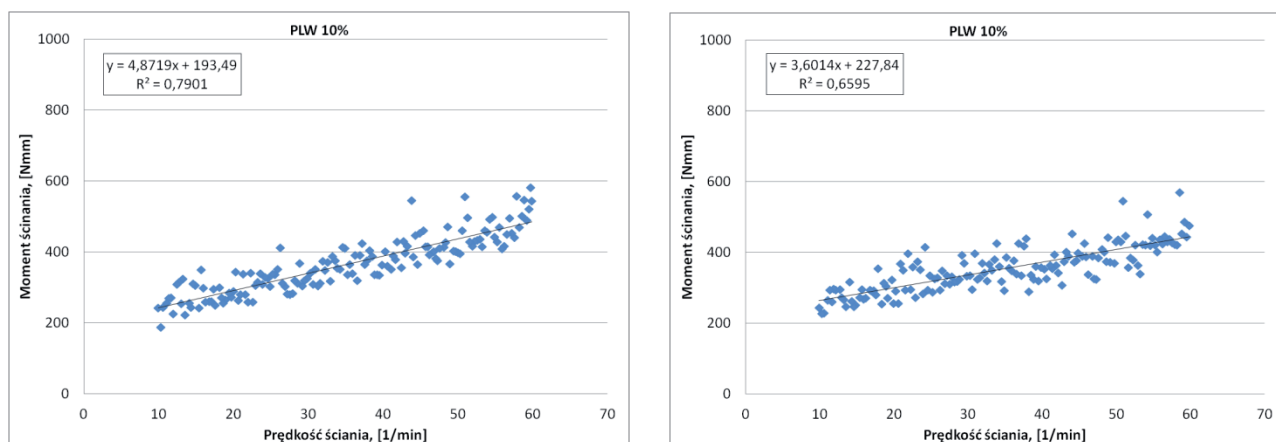


Rys. 11. Krzywa płynięcia wyznaczona w oparciu o pomiary reometrem Viskomat XL dla mieszanek WWBSZ (C3) bez popiołu lotnego wapiennego

Fig. 11. The flow curves found with Viskomat XL rheometer for HPSCC mixtures (C3) without fly ash

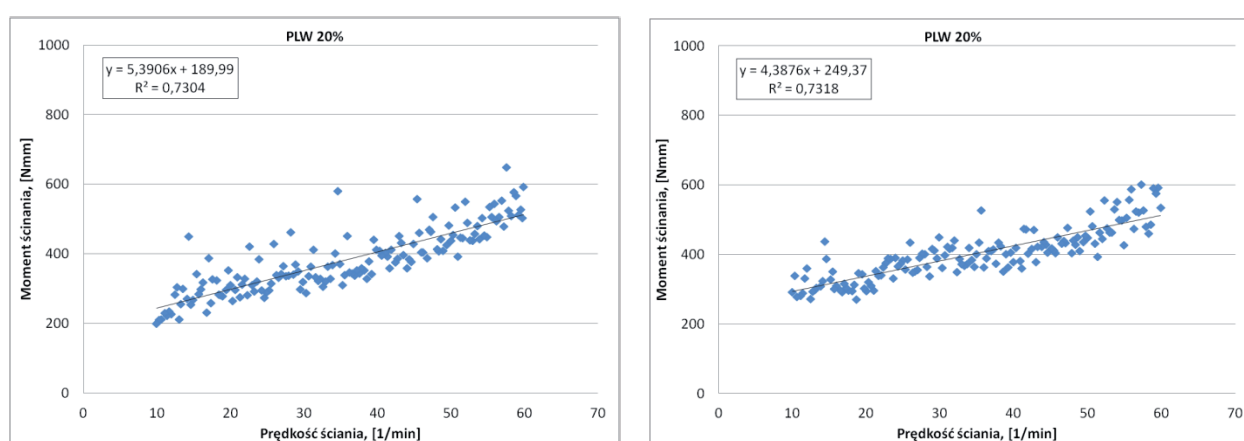
w przypadku zwiększania dodatku popiołu zmielnego dodatko-
wo. Podobne wyniki uzyskano w przypadku badania wpływu za-
wartości popiołu lotnego wapiennego (partia B) i jego rozdrobnie-
nia na granicę płynięcia g i lepkość plastyczną h mieszanek BSZ
(C1) i WWBSZ (C3) (rysunek 10).

In Fig. 11 – 14 the influence of calcareous fly ash content on
rheological parameters g and h of HPSCC mixtures, tested with
XL rheometer with two repetitions, and approximated with Bing-
ham modelis presented. In the case of the mixtures HPSCC (C3)
without fly ash the following value was found: $g = 223.8$ and 225.6
and $h = 3.5$ and 3.7 (Fig. 11). However, the same mixtures (C3)



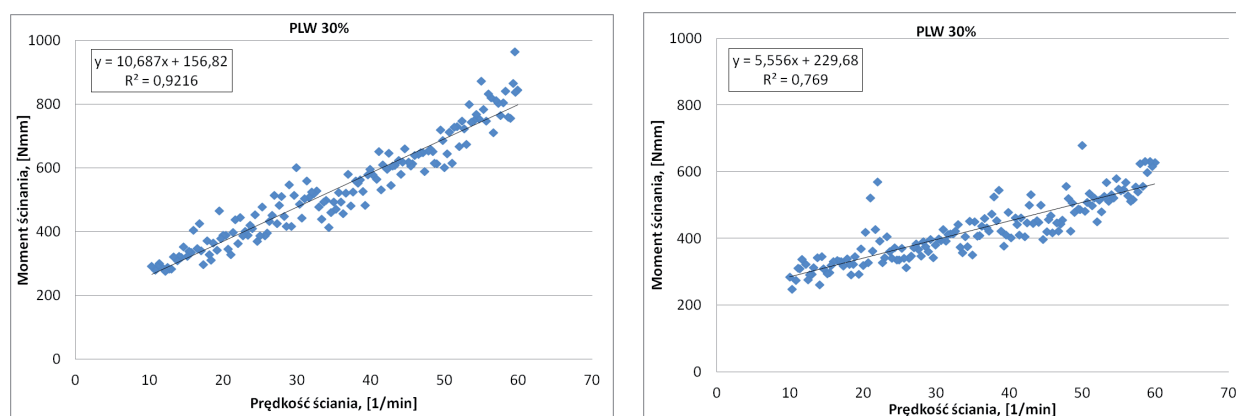
Rys. 12. Krzywe płynięcia wyznaczone w oparciu o pomiary reometrem Viskomat XL dla mieszanek WWBSZ (C3) z 10% dodatkiem popiołu lotnego wapiennego

Fig. 12. The flow curves determined with Viskomat XL rheometer for HPSCC mixtures (C3) with 10% of calcareous fly ash addition



Rys. 13. Krzywe płynięcia wyznaczone w oparciu o pomiary reometrem Viskomat XL dla mieszanek WWBSZ (C3) z 20% dodatkiem popiołu lotnego wapiennego

Fig. 13. The flow curve found with Viskomat XL rheometer for HPSCC mixtures (C3) with 20% of calcareous fly ash addition



Rys. 14. Krzywe płynięcia wyznaczone w oparciu o pomiary reometrem Viskomat XL dla mieszanek WWBSZ (C3) z 30% dodatkiem popiołu lotnego wapiennego

Fig. 14. The flow curves according to Viskomat XL rheometer tests for HPSCC mixtures (C3) with 30% of calcareous fly ash addition

Na rysunkach 11 - 14 przedstawiono wyniki pomiarów wpływu zawartości popiołu lotnego wapiennego na parametry reologiczne g i h mieszanek WWBSZ, przeprowadzone za pomocą reometru XL, aproksymowane modelem Binghama. W przypadku mieszanek WWBSZ (C3) uzyskano następujące wartości: $g = 223,8$ i $225,6$

with 10% addition of calcareous fly ash gave the following results: $g = 193$ and 227.8 and $h = 4.9$ and 3.6 (Fig. 12). For the same mixture with the 20% addition of calcareous fly ash the following results were found: $g = 190$ and 249.4 and $h = 5.4$ and 4.4 (Fig. 13). Finally the same mixture, but with 30% addition of calcareous

oraz $h = 3,5$ i $3,7$. Natomiast mieszanki WWBSZ (C3) z 10% dodatkiem popiołu lotnego wapiennego dały następujące wyniki: $g = 193,5$ i $227,8$ oraz $h = 4,9$ i $3,6$. W przypadku mieszanek WWBSZ (C3) z 20% dodatkiem popiołu lotnego wapiennego uzyskane wartości $g = 190$ i $249,4$ oraz $h = 5,4$ i $4,4$. W przypadku mieszanek WWBSZ (C3) z 30% dodatkiem popiołu lotnego wapiennego; uzyskane wartości $g = 156,8$ i $229,7$ oraz $h = 10,7$ i $5,6$.

Wyniki badań reologicznych przeprowadzonych Viskomatem XL nie wykazały zwiększenia granicy płynięcia g wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego wapiennego w mieszance WWBSZ. Stwierdzono natomiast niewielki wzrost lepkości plastycznej h wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego wapiennego w tej mieszance.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość stosowania popiołów lotnych wapiennych w betonach samozagęszczających się. Wykazano możliwość uzyskania zakładanych właściwości technologicznych badanych mieszanek betonowych.

Natomiast stwierdzono pogorszenie urabialności wraz ze wzrostem zawartości popiołu lotnego wapiennego zarówno w betonach BSZ i WWBSZ. Następuje utrata urabialności mieszanek betonowych, jednak w stopniu pozwalającym na zachowanie samozagęszczalności. Badania nie wykazały dużego wpływu zwiększenia rozdrobnienia popiołów lotnych wapiennych na poprawę urabialności obu rodzajów betonów samozagęszczających się z ich dodatkiem. Dodatkowo mielenie popiołów lotnych wapiennych na pewno poprawia ich właściwości, jednak badania wykazały podobny wpływ tych popiołów o różnym stopniu rozdrobnienia na badane właściwości mieszanek BSZ i WWBSZ.

Stosowanie wybranych cementów zawierających popiół lotny wapienny, wykazało gorszą, ale wystarczającą urabialność wytwarzanych z nich BSZ. Samozagęszczalność betonów z cementów zawierających popiół lotny wapienny była zadawalająca i spełniała warunki zawarte w normach.

Badania są współfinansowane przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

fly ash gave the following results: $g = 156.8$ and 229.7 and $h = 10.7$ and 5.6 (Fig. 14).

In rheological tests with Viskomat XL the rise of yield value g with the increase of calcareous fly ash content in HPSCC mixture, was not observed. However, the small increase of plastic viscosity h simultaneously with the rise of the calcareous fly ash content in HPSCC mixture, was found.

5. Summary

The presented research confirmed the possibility of calcareous fly ash application in self-compacting concrete. The possibility of preserving the assumed rheological parameters in tested concrete mixtures was proved.

The loss of workability with the increase of the calcareous fly ash content in SCC and HPSCC was observed, but to the degree allowing to preserve the self-compacting properties of the mixtures. In the research no significant influence of fly ash grinding on the workability of SCC and HPSCC mixtures improvement was found. The additional grinding of fly ashes certainly has the advantageous influence on their properties, however, there is no effect of this change of fly ash fineness on properties of SCC and HPSCC mixtures.

The use of the selected cements with the addition of calcareous fly ash has shown the worse, but sufficient, workability of SCC mixture. The self-compacting properties of concrete mixtures with the calcareous fly ash were satisfactory and fulfilled the standard requirements.

Literatura / References

1. ACI Committee 236-237: SP-233CD: Workability of SCC: Roles of Its Constituents and Measurement Techniques, ACI, 2006.
2. J. Gołaszewski, Z. Giergiczny, Kształtowanie właściwości reologicznych mieszanek na spoiwach cementowych z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego, *Konferencja Energia i Środowisko w Technologii materiałów budowlanych, ceramicznych, szklarskich i ogniotrwałych*, Opole 2010.
3. P.-C. Aitc'in, High Performance Concrete, E&FN Spon, London 1998.
4. A. M. Neville, Właściwości betonu, Polski Cement, Kraków 2000.
5. Z. Giergiczny, Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych, Politechnika Krakowska, Kraków 2006.
6. J. Szwabowski, Reologia mieszanek na spoiwach cementowych, Politechnika Śląska, Gliwice 1999.
7. J. Szwabowski, J. Gołaszewski, Technologia betonu samozagęszczalnego, Polski Cement, Kraków 2010.
8. G. H. Tattersall, P. F. Banfill, The Rheology of Fresh Concrete, Pitman, London 1983.
9. J. Gołaszewski, Reologia zapraw a reologia mieszanek betonowych, *Cement Wapno Beton*, **73**, 17 (2006).