

Właściwości zaczynu i stopień wypełnienia nim jam kruszywa jako czynniki kształtujące samozagęszczalność i wytrzymałość betonu

Cement paste properties and paste-aggregate void saturation ratio as the factors governing the selfcompactness and compressive strength of concrete

1. Wprowadzenie

W projektowaniu betonów samozagęszczalnych wygodnie posługiwać się kompozytowym modelem betonu, w którym matrycę stanowi zaczyn cementowy, natomiast wypełniaczem jest kruszywo. Model taki jest w praktyce wystarczająco dokładny do projektowania betonu samozagęszczalnego, zarówno ze względu na wymagane właściwości reologiczne mieszanki jak i wytrzymałość betonu na ściskanie. Równocześnie model ten pozwala na dobór składników zaczynu i betonu spełniających te wymagania jednocześnie, co ma duże znaczenie. Przyjmując ten model, można założyć, że zasadnicze czynniki wpływające na samozagęszczalność mieszanki oraz wytrzymałość betonu będą następujące:

- właściwości zaczynu cementowego, wynikające z odpowiedniego doboru rodzaju, klasy i wodożądności cementu, stosunku w/c oraz rodzaju i ilości domieszek chemicznych i dodatków mineralnych,
- właściwości kruszywa (rodzaj, klasa, gęstość, kształt ziaren) i jego uziarnienie (wielkość ziaren, gęstość nasypowa oraz jamistość i szczelność stosu okruszowego),
- stopień wypełnienia jam niezagęszczonego kruszywa zaczynem.

W związku z tym projektowanie betonu samozagęszczalnego można sprowadzić do następujących, kolejnych etapów:

- doboru składu zaczynu ze względu na jego właściwości reologiczne i wytrzymałość betonu,
- doboru kruszywa o odpowiednich ze względu na wytrzymałość właściwościach i założonym, zgodnym z ogólnymi zaleceniami uziarnieniu dla betonu samozagęszczalnego (1, 2),
- doboru stopnia wypełnienia jam niezagęszczonego kruszywa zaczynem stosownie do wymaganych właściwości reologicznych mieszanki samozagęszczalnej.

Właściwości reologiczne zaczynu cementowego można opisać jego rozplywem (średnica rozplywu D_z i czas rozplywu T_{z250}) lub

1. Introduction

For self compacting concrete (SCC) designing it is convenient to adopt the model in which this concrete is a composite with the matrix representing by cement paste whereas the aggregate is the filler. This model is sufficiently adequate in practice for SCC designing with required rheological properties of the mix as well as concrete compressive strength. It is important that it enables the selection of the paste and concrete components, fulfilling simultaneously these requirements. According to this model it can be assumed that the principal factors influencing self-compactness of the mixture and concrete strength will be the following:

- the cement paste properties resulting from adequate selection of type, class and water demand of cement, w/c ratio, type and amount of admixtures and mineral additions,
- aggregate properties (type, class, density, grains grading and form) and its void,
- the paste – aggregate void saturation ratio.

In this connection the designing of SCC will lead to the following consecutive stages:

- the choice of cement paste composition to fulfil its rheological properties and the strength of concrete,
- the selection of aggregate with suitable strength and assumed grading, consistent with requirement for SCC (1, 2),
- choice of the paste – aggregate void saturation ratio in accordance with the required rheological properties of the selfcompacting mix.

The rheological properties of cement paste can be determined by flow test (flow diameter D_z and flow time T_{z250}) or corresponding well with them rheological parameters of Bingham model i.e. yield stress τ_{oz} and plastic viscosity η_{plz} . It is convenient to represent the paste – aggregate void saturation ratio by the indicator ϕ_{kz} (3). This indicator is representing correctly the structure of concrete mix resulting from the ratio of cement paste volume to aggregate voids.

odpowiadającymi im parametrami reologicznymi zaczynu wynikającymi z modelu Bingham, czyli granicą płynięcia τ_{oz} i lepkością plastyczną η_{plz} . Stopień wypełnienia stosu okruszowego kruszywa zaczynem najlepiej przedstawiać w postaci znanego wskaźnika stopnia wypełnienia stosu okruszowego niezagęszczonego kruszywa zaczynem ϕ_{kz} (3). Właściwości reologiczne mieszanki samozagęszczalnej można charakteryzować wielkością jej rozplywu D_m i czasem rozplywu T_{m500} lub odpowiadającymi im parametrami reologicznymi mieszanki w modelu Bingham, czyli granicą płynięcia τ_{om} i lepkością plastyczną η_{plm} (2). Podstawy teoretyczne i zasady pomiarów reologicznych omówiono szeroko w opracowaniach monograficznych (2, 4, 5).

Stosowanie modelu kompozytowego w projektowaniu betonu samozagęszczalnego wymaga przeprowadzenia następujących doświadczeń:

- określenia zależności pomiędzy właściwościami reologicznymi zaczynu oraz wskaźnikiem wypełnienia stosu okruszowego kruszywa zaczynem a właściwościami reologicznymi mieszanki samozagęszczalnej,
- określenia zależności pomiędzy składem zaczynu a wytrzymałością betonu na ściskanie.

Duża liczba dostępnych wyników badań w literaturze pozwala na określenie jakościowego wpływu składu i ilości zaczynu oraz rodzaju, uziarnienia i jamistości kruszywa na właściwości reologiczne mieszanki i wytrzymałość betonu samozagęszczalnego (6-9). Dotychczasowe badania nie dostarczają jednak systematycznych danych doświadczalnych wiążących ilościowo skład zaczynu, jego parametry reologiczne i wskaźnik wypełnienia jam kruszywa zaczynem ϕ_{kz} z parametrami reologicznymi mieszanki samozagęszczalnej oraz z wytrzymałością betonu.

Celem badań było zweryfikowanie dwóch hipotez:

- czy samozagęszczalność mieszanki zależy od właściwości reologicznych zaczynu i wskaźnika wypełnienia stosu okruszowego kruszywa zaczynem ϕ_{kz} ,
- czy możliwe jest uzyskanie takich samych właściwości reologicznych zaczynów o różnym składzie.

Pozytywna weryfikacja obu hipotez pozwoli na wykorzystanie koncepcji projektowania mieszanki samozagęszczalnej, w oparciu o model dwuskładnikowego kompozytu.

2. Program badań

Weryfikacja obu hipotez, wynikających z pracy Czopowskiego (10), wymagała uwzględnienia w badaniach różnych cementów i różnych składów zaczynu spoiwowego oraz uziarnienia kruszywa. Zakres zmienności składów zaczynu wynikał z przyjętych na podstawie badań wstępnych zakresów parametrów reologicznych zaczynu, umożliwiających uzyskanie samozagęszczalnej mieszanki betonowej.

Program badań przedstawiono w tablicy 1. Badania obejmowały mieszanki betonowe o stosunku w/s w przedziale od 0,30 do 0,40.

Rheological properties of selfcompacting mixture can be characterised with flow diameter D_m and flow time T_{m500} or corresponding to them rheological parameters of Bingham model i.e. yield stress τ_{om} and plastic viscosity η_{plm} (2). The best method to determine the rheological parameters of cement paste and concrete mix are the measurements with special rheometers. The theoretical basis of these rheological measurements are discussed in details in technical literature (2, 4, 5).

For applying of chosen model for designing of selfcompacting mixture the following factors must be established experimentally :

- the influence of cement paste rheological properties and the paste – aggregate void saturation ratio on the rheological properties of selfcompacting mixture,
- correlation between the composition of cement paste and compressive strength of concrete.

The numerous available experimental data in technical literature allow to find the qualitative influence of cement paste composition and its content as well as the aggregate type, its grading and void on rheological behaviour of the mixture and strength of selfcompacting concrete (6 - 9). However, the published results do not provide systematic experimental data giving quantitative relations between the cement paste composition, its rheological parameters and paste – aggregate void saturation ratio, expressed as ϕ_{kz} , with the rheological behaviour of selfcompacting mix and with concrete strength.

The main goal of the presented experiments was to confirm two hypothesis:

- is the selfcompactness of the mix dependent of cement paste rheological properties and of paste – aggregate void saturation ratio (expressed as ϕ_{kz}),
- if it is possible to obtain the same rheological properties of cement pastes with different compositions.

The positive confirmation of both hypothesis will be the basis to use the model of two components composite for designing of selfcompacting mixture.

2. Program of experiments

The confirmation of both hypothesis, resulting from Czopowski paper (10) enables to take into account in the experiments different cements and different compositions of binder paste, as well as aggregate grading. The changes range of paste compositions resulted of preliminary experiments concerning the range of paste rheological parameters, which assure the selfcompactness of concrete mix.

The experimental programme is presented in table 1. The experiments covered the concrete mixtures with w/b ratio in the range from 0.30 to 0.40. Because cement was partially replaced by ground limestone, thus w/c ratio of the mixtures was in the range from 0.30 to 0.57. The concrete mixtures were produced from

Tablica 1 / Table 1

PLAN BADAŃ

RESEARCH PROGRAM

Cement	ϕ_{kz}	Wskaźnik w/c w/c ratio
Kruszywo I (punkt piaskowy 50%) Aggregate I (sand point 50%)		
CEM I	1,25	0,38; 0,44; 0,57
	1,30	0,3; 0,38; 0,44; 0,50
	1,35	0,40; 0,44; 0,50;
CEM II/B-S	1,25	0,33; 0,44; 0,50; 0,57
	1,30	0,3; 0,33; 0,39; 0,50
	1,35	0,38; 0,40; 0,50; 0,57
CEM III/A	1,25	0,3; 0,33; 0,35; 0,38; 0,39; 0,40; 0,43; 0,44; 0,50; 0,57
	1,30	0,3; 0,33; 0,35; 0,38; 0,39; 0,40; 0,43; 0,44; 0,50; 0,57
	1,35	0,3; 0,33; 0,35; 0,38; 0,39; 0,40; 0,43; 0,44; 0,50; 0,57
Kruszywo II (punkt piaskowy 60%) Aggregate II (sand point 60%)		
CEM I	1,30	0,3; 0,50
	1,35	0,40; 0,50;
	1,45	0,39
	1,55	0,39
CEM II/B-S	1,25	0,44; 0,50; 0,57
	1,30	0,33; 0,39; 0,50
	1,35	0,38; 0,40; 0,50; 0,57
	1,45	0,50; 0,57
	1,55	0,33; 0,38
CEM III/A	1,25	0,39; 0,40; 0,43; 0,44; 0,50; 0,57
	1,30	0,35; 0,38; 0,39; 0,40; 0,57
	1,35	0,33; 0,35; 0,38; 0,44; 0,50; 0,57
	1,45	0,33; 0,38
	1,55	0,50; 0,57

W związku z zastępowaniem części cementu mączką wapienną stosunek w/c w tych mieszankach wynosił od 0,30 do 0,57. Mieszanki betonowe wykonywane były z różnych cementów i kruszywa otoczkowego.

W badaniach przyjęto następujące czynniki zmienne:

- właściwości reologiczne zaczynu, które określano za pomocą dwóch parametrów: średnicy rozplywu D_z oraz czasu rozplywu T_{z250} [s]; na podstawie badań Czopowskiego (10) przyjęto zakres zmienności D_z w przedziale od 300 do 400 mm, natomiast T_{z250} w przedziale od 1 do 5 s,
- rodzaj kruszywa: stosowano dwa kruszywa otoczkowe o maksymalnej średnicy ziarna 8 mm z kilkuprocentowym nadziarnem 8/16 mm i punktach piaskowych 50 i 60%; są to skrajne punkty piaskowe kruszywa zalecane przez EFNARC (1) do stosowania w samozagęszczalnych betonach zwykłych,
- wskaźnik wypełnienia stosu okruchowego kruszywa zaczynem ϕ_{kz} w przedziale od 1,25 do 1,55.

W badaniach wytrzymałości betonu przyjęto następujące czynniki zmienne:

cements with different granulated blastfurnace slag additions and from natural aggregate.

In experiments the following factors were changeable:

- cement paste rheological properties, tested as the flow diameter D_z and flow time T_{z250} , adopted after Czopowski (10) the changes range of D_z from 300 to 400 mm and T_{z250} from 1 to 5 sec,
- the kind of aggregate: two natural aggregates were used with maximum grain diameter of 8 mm with some % of oversize 8/16, but with two sand points 50 and 60%, which are the threshold sand points according to EFNARC (1) guidelines for selfcompacting normal concrete,
- the paste – aggregate void saturation ratio (presented as ϕ_{kz}) which was in the range 1.25 – 1.55.

In the experiments concerning the concrete strength the following variable factors were adopted:

- w/c ratio in the range from 0.30 to 0.57,
- kind of cement: CEM I, CEM II/B-S 32.5R and CEM III/A, the two remaining of class 32.5, which properties are depicted in table 2,
- different paste – aggregate void saturation ratio ϕ_{kz} , which was changed in the range 1.25 – 1.35.

The range of changes of above mentioned parameters was chosen on the basis of typical selfcompacting mixtures composition (2) and EFNARC guidelines (1).

The research program was divided in three parts. In the first part the mixtures of aggregate with sand point equal 50%, produced from cement CEM III/A 32.5 with the paste of different w/b (and w/c) ratio and different paste – aggregate void saturation ratio ϕ_{kz} . In the second part the mixtures chosen among the mixes tested in the first part, but produced of cements CEM II/B-S 32,5R and CEM I 32.5. In the third part the mixtures selected among the mixes tested in the first and second part of experiments, but with aggregate with sand point equal 60%. The experiments programme depicted in the table 1 and points of measurements were chosen in such a manner that their location in the experimental factors space enables the determination of regression model of influence of tested factors. Generally the experimental program embraces more than 90 mixtures of different compositions. The compressive strength measurements covered the selfcompacting mixtures from aggregate with sand point equal 50% [part 1 and 2 of rheological tests].

2.1. Compositions of concrete

The properties of cements used in the experiments are presented in Table 2. The industrial cements from one plant were used and the clinker composition was the same, but cements differed in

- stosunek w/c, w przedziale od 0,30 do 0,57,
- rodzaj cementu: CEM I, CEM II/B-S 32,5 R, CEM III/A, a dwa pozostałe klasy 32,5, o właściwościach podanych w tabelicy 2,
- wskaźnik wypełnienia stosu okruszowego kruszywa zaczynem ϕ_{kz} w przedziale od 1,25 do 1,35.

Zakres zmienności badanych czynników dobrano na podstawie typowych składów mieszanek samozagęszczalnych (2) oraz zaleceń EFNARC (1).

Badania reologiczne podzielono na trzy części. W części pierwszej badano mieszanki z kruszywem o punkcie piaskowym 50% wykonane z zaczynów z cementu CEM III/A 32,5, o różnym stosunku w/s (i stosunku w/c) oraz o różnym wskaźniku wypełnienia stosu okruszowego kruszywa zaczynem ϕ_{kz} . W drugiej części badano mieszanki wybrane spośród mieszanek badanych w części pierwszej, lecz z cementów CEM II/B-S 32,5R oraz CEM I 32,5. W trzeciej części badano wybrane mieszanki spośród mieszanek badanych w części pierwszej i drugiej lecz z kruszywem o punkcie piaskowym 60%. Przedstawiony w tabelicy 1 plan badań i punkty pomiarowe dobrano tak, aby ich położenie w szerokiej przestrzeni czynnikowej eksperymentu umożliwiało określenie regresyjnego modelu wpływu badanych czynników, a jednocześnie aby zminimalizować liczbę pomiarów. Ogółem plan badań obejmował ponad 90 mieszanek o różnym składzie. Badania wytrzymałości na ściskanie obejmowały mieszanki samozagęszczalne z kruszywa o punkcie piaskowym 50% (część 1 i 2 badań reologicznych).

2.1. Charakterystyka składników i składów badanych betonów

Właściwości zastosowanych w badaniach cementów przedstawiono w tabelicy 2. Stosowano cementy przemysłowe z jednego zakładu, w związku z czym skład klinkieru był taki sam, a cementy różniły się tylko zawartością żużla granulowanego. Zwraca uwagę znacznie wyższa od normowej wytrzymałość na ściskanie wszystkich cementów. Odpowiada ona nie klasie 32,5 lecz klasie 42,5, a w przypadku CEM I wytrzymałość jest wyższa o blisko 20 MPa. Skład chemiczny mączki wapiennej podano w tabelicy 3. Stosowano ester eteru polikarboksylogowego jako superplastyfikator o gęstości 1,099 g/cm³ i stężeniu 34%. Do sporządzenia mieszanek zasto-

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI MACZKI WAPIENNEJ

THE PROPERTIES OF GROUND LIMESTONE

CaCO ₃	SiO ₂ + NR	MgCO ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	S	Straty prażenia Loss of ignition	Powierzchnia właściwa, Specific surface, m ² /kg
96,00	1,50	1,40	0,11	0,08	0,02	0,03	0,03	43,75	226

Tablica 2 / Table 2

WŁAŚCIWOŚCI CEMENTÓW ZASTOSOWANYCH W BADANIACH

THE PROPERTIES OF CEMENTS USED IN THE EXPERIMENTS

Cement	Składnik, % Component, %		Powierzchnia właściwa, Specific surface, m ² /kg	Wytrzymałość na ściskanie, po 28 dniach, Compressive strength, after 28 days, MPa
	Na ₂ Oe	SO ₃		
CEM I 32,5	0,4	3,1	383	51,8
CEM II/B-S 32,5	0,7	3,2	325	48,1
CEM III/A 32,5	0,83	3,3	376	45,2

granulated blastfurnace slag content. Much higher, from standard requirements, compressive strength of all cements is worth to be mention, which corresponds to the class 42.5 and in the case of CEM I the strength is higher of about 20 MPa. Chemical analysis of ground limestone is given in table 3. Superplasticizer was the ester of polycarbocyclic ether with density of 1.09 g/cm³ and concentration of 34%. The mixtures were prepared of natural aggregates with maximum grain size 8 mm (with small oversize as mentioned above) and sand points 50 or 60%. The grain-size distribution curves of these aggregates, chosen according to guidelines of EFNARC (1) and Schutter et al. (2), are shown on Fig. 1. The compositions of pastes and mixes covered a large range of variability, but all chosen according the recommendations given in the papers (1, 2). In dependence of w/c and ϕ_{kz} ratio, cement content in the concrete mixes changed in the range 340 – 520 kg/m³ and the share of the paste in the range from 330 to 380 dcm³/m³. The ground limestone was added replacing cement in the quantity 10, 20 and 30 mass %. The adoption of three levels of w/b ratio has given the possibility to produce the concrete with w/c ratio in the range from 0.30 to 0.57. The addition of superplasticizer was chosen to give the flow diameter of the paste in the range from 300 to 400 mm. This addition varied from 0.55 to 1.5% of cement mass. In the case of aggregate I (sand point 50%) the ϕ_{kz} ratio was changed in the range from 1.25 to 1.35, and in the case of aggregate II (sand point 60%) in the range from 1.25 to 1.55.

2.2. Methods

For paste rheological tests the flow method using specially adopted Southard method which originally is applied for measurement of gypsum paste consistency. The time of flow till diameter of 250 mm was measured as well as the flow diameter till the flow end. This method was presented in details by Czopowski (10). The pastes for measurement were prepared in the mixer for standard mortars according to PN-EN 196:1996. The mixing time was 3 min and the

sowano kruszywa naturalne o uziarnieniu 0-8 mm o punkcie piaskowym 50 lub 60% i jamistości odpowiednio $2,34 \cdot 10^{-4}$ i $2,33 \cdot 10^{-4}$ m³/kg. Krzywe przesiewu tych kruszyw o uziarnieniu dobranym zgodnie z zaleceniami (1, 2) przedstawiono na rysunku 1.

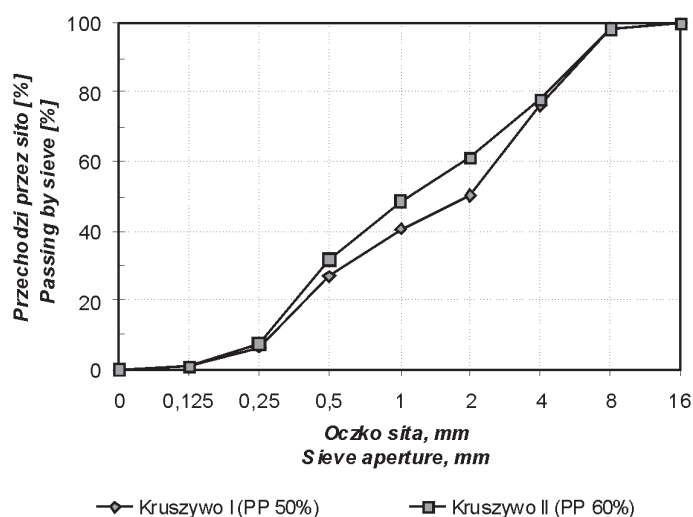
Składy zaczynów i mieszanek betonowych obejmowały szeroki zakres zmienności uwzględniający zalecenia zawarte w pracach (1, 2). W zależności od stosunku w/c oraz od wskaźnika ϕ_{kz} zawartość cementu w mieszankach betonowych zmieniała się w przedziale od 340 do 520 kg/m³, a ilość zaczynu w przedziale od 330 do 380 dm³/m³. Mączkę wapienną stosowano jako zamiennik cementu w zaczynie w ilości 10, 20 lub 30% masowo. Przyjęcie trzech poziomów stosunku w/s pozwoliło na uzyskanie zaczynów i betonów o stosunku w/c w przedziale od 0,30 do 0,57. Ilość superplastyfikatora dobierano tak, aby uzyskać rozplływ zaczynu w granicach od 300 do 400 mm. Ilość ta wahała się w przedziale od 0,55 do 1,5% masy cementu. W przypadku mieszanek z kruszywem I (punkt piaskowy 50%) wskaźnik ϕ_{kz} zmieniano w przedziale od 1,25 do 1,35, a mieszanek z kruszywem II (punkt piaskowy 60%) w przedziale od 1,25 do 1,55.

2.2. Metody badań

Do pomiaru parametrów reologicznych zaczynów zastosowano metodę rozplwy, używając adaptowanego pierścienia Southarda do oznaczania konsystencji zaczynów gipsowych. Mierzono czas rozplwy zaczynu do średnicy 250 mm oraz średnicę rozplwy po zakończeniu płynięcia. Szczegółowo metodę pomiaru właściwości reologicznych zaczynu opisał Czopowski (10). Zaczyny do badań przygotowywano w mieszalniku do zapraw normowych według PN EN 196:1996. Czas mieszania wynosił 3 min. przy prędkości obrotowej mieszadła 140 obr/min. Superplastyfikator dodawano razem z wodą zarobową. Pomiar parametrów reologicznych przeprowadzano po 20 min od zakończenia mieszania.

Natomiast parametry reologiczne mieszanek oznaczano w oparciu o pomiar rozplwy, zgodnie z metodą przedstawioną w zaleceniach europejskich (1, 2). Mieszanki betonowe przygotowano w mieszalniku o pojemności 50 dm³. Czas mieszania wynosił 5 min. Najpierw przez 1 min mieszano suche składniki, a następnie dodawano wodę wraz z superplastyfikatorem, dalej mieszając. Parametry reologiczne oznaczano po 20 i 60 min od zakończenia mieszania składników. Przed drugim pomiarem mieszankę mieszano przez 30 s. Do czasu wykonywania pomiarów mieszankę przechowywano w mieszalniku, pod przykryciem. Temperaturę w trakcie badań zaczynów i mieszanek utrzymywano na poziomie $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Wytrzymałość betonu na ściskanie oznaczano na próbkach sześciennych o boku 150 mm, formowanych po 60 min od zakończenia mieszania i pielęgnowanych zgodnie z PN-EN 12390-2. Próbki do badań wytrzymałości formowano tylko z tych mieszanek, które spełniały do tego czasu kryteria samozagęszczalności. Z każdego zarobu wykonywano 6 próbek. Badanie wytrzymałości na ściskanie wykonano po 28 dniach zgodnie z PN-EN 12390-3. Przed wykonaniem badania wytrzymałości na ściskanie dwie przeciwległe powierzchnie próbek były szlifowane w celu zapewnienia ich równomiernego docisku.



Rys. 1. Krzywe przesiewu kruszywa

Fig. 1. Aggregate grading

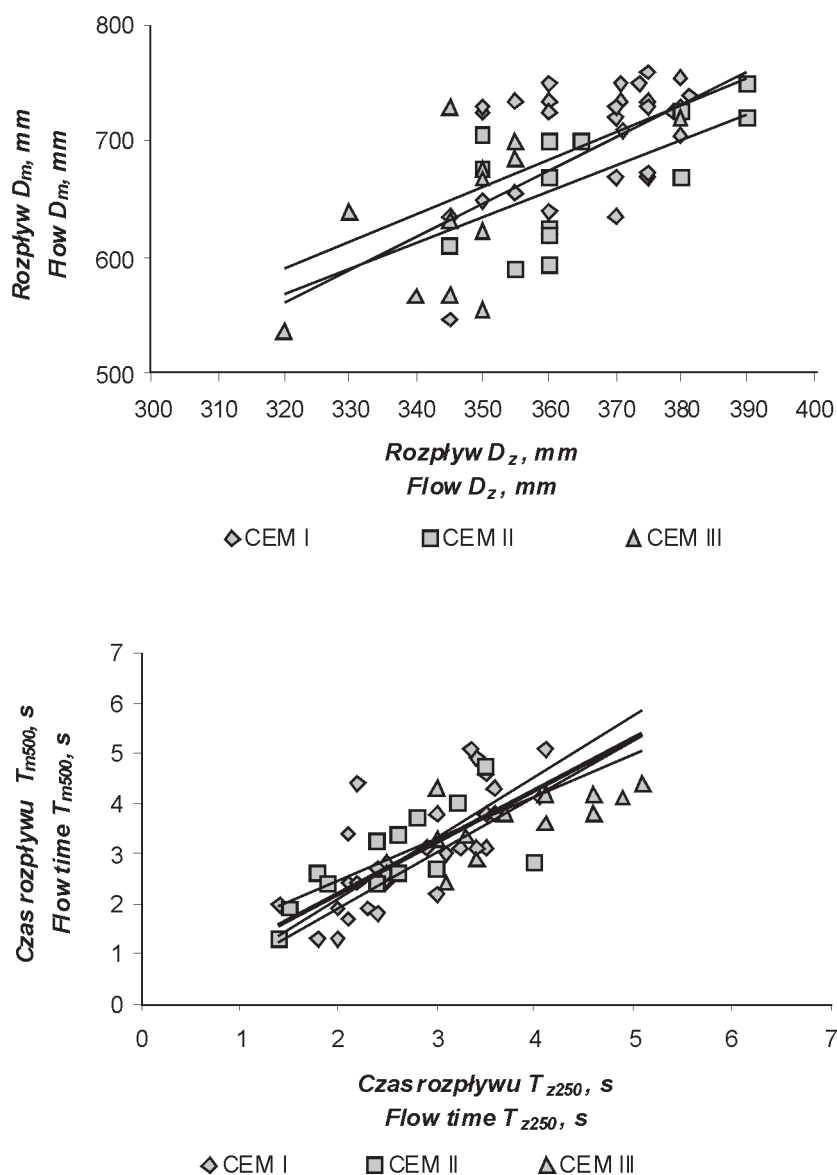
speed of the rotar was 140 rotation per minute. The superplasticizer was added together with mixing water. The rheological parameters were measured after 20 minutes of mixing finishing.

The rheological parameters of mixtures was determined by flow test, according to European guideline (1, 2). The concrete mixes were produced in the mixes of 50 dcm³ volume. Mixing time was 5 minutes. Firstly during 1 minute the dry components were mixed and then the water with superplasticizer was added, during further mixing. The rheological parameters were measured after 20 and 60 minutes from the end of mixing. Before the second measurement the mixture was mixed during 30 sec. Till the end of these tests the mixture was cured in the mixer, under cover. The temperature during the rheological tests of the pastes and mixtures was at constant level of $20^\circ \pm 2^\circ\text{C}$.

The compressive strength of concrete was measured on cubes of the dimension of 150 mm, moulded after 60 minutes of the end of mixing and cured according to PN-EN 12390-2. The samples for strength measurements were moulded only from these mixtures which fulfilled the selfcompactness criterion. From each mixture 6 samples were prepared. The compressive strength were measured after 28 days according to PN-EN 12390-3. Before the compressive strength measurement both opposite sides of he samples were polished in order to assure their uniform compression.

3. The discussion of rheological tests results

Found in experiments the influence of concrete mix composition (w/b ratio, superplasticizer addition, paste content, sand point of aggregate) on its rheological properties was consistent with the data of literature. The increase of paste and/or superplasticizer addition and/or w/b ratio causes the increase of mixture flow (decrease of yield value) as well as the decrease of its flow time (decrease of plastic viscosity). The addition of ground limestone, as cement replacement, in the quantity of 15%, causes the decrease



Rys. 2. Wpływ zawartości żużla w cemencie na zależność parametrów reologicznych zaczynu i mieszanki betonowej

Fig. 2. The influence of slag content in cement on the relationship between cement paste and concrete mixture rheological parameters

3. Wyniki badań reologicznych i ich dyskusja

Stwierdzony w badaniach wpływ składu mieszanki betonowej (stosunek w/s, ilość superplastyfikatora, ilość zaczynu, punkt piaskowy kruszywa) na jej właściwości reologiczne pozostaje w zgodności z danymi literaturowymi. Zwiększenie ilości zaczynu i/lub ilości superplastyfikatora i/lub stosunku w/s powoduje zwiększenie średnicy rozplywu mieszanki (zmniejszenie granicy płynięcia) oraz zmniejszenie czasu jej rozplywu (zmniejszenie lepkości plastycznej). Dodanie mączki wapiennej, jako zamiennika części cementu w ilości przekraczającej 15%, powoduje zmniejszenie średnicy rozplywu mieszanki i wiąże się z koniecznością stosowania większej ilości superplastyfikatora i/lub zaczynu w celu uzyskania mieszanki o założonym rozplywie. W przypadku mieszanek z kruszywem II (punkt piaskowy 60%) uzyskanie podobnej średnicy rozplywu jak

of mixture flow diameter and is linked with the necessity of superplasticizer addition increase and/or of the paste in order to obtain the mix of suitable flow. In the case of mixture with aggregate II (sand point 60%) the assuring of similar flow diameter as for mixes with aggregate I (sand point 50%) needs the high increase of paste content and/or higher superplasticizer addition. Simultaneously the mixtures with aggregate II (sand point 60%) show longer flow time.

The results of measurements depicted on Fig. 2 show that the dependence of the rheological properties of concrete mixture of the rheological properties of slag content in cement has no larger influence. It confirms the validity of assumption that the rheological properties of the paste are resulting from slag content in cement, however, the rheological properties of the concrete mix depends chiefly of the rheological properties of the paste.

Additionally the quick change of rheological properties with time of the examined mixtures has been found. Over 30% of the mixtures with aggregate I and more than 50% of the mixtures with aggregate II after 60 minutes lost the property of selfcompactness and typical was the change of flow class. This effect was depending mainly of the slag content in cement and of the paste-aggregate void saturation ratio (ϕ_{kz}), and also of the w/b ratio as well as of the superplasticizer addition. With the increase of blast-furnace slag content in cement and with increase of ϕ_{kz} by constant addition of superplasticizer and also with the rise of w/b ratio the change of mixture flow diameter D_m was lower.

With higher content of slag in cement, in the sequence CEM I, CEM II/B-S, CEM III/A, change of the flow diameter D_m was lower. However, the change of D_m with time was the more increasing the lower

Tablica 4 / Table 4

ANALIZA WARIANCJI WPŁYWU STOSUNKU W/C, WSKAŹNIKA ϕ_{kz} ORAZ CEMENTU NA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BETONU SAMOZAGĘSZCZALNEGO

THE ANALYSIS OF THE VARIATION OF INFLUENCE OF W/C RATIO, ϕ_{kz} RATIO AND CEMENT ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF SELF-COMPACTING CONCRETE

Źródło wariacji Source of variation	F	Poziom istotności hipotezy o braku wpływu Level of significance
Stosunek w/c w/c ratio	260,5305	0,000
Wskaźnik ϕ_{kz} ϕ_{kz} ratio	3,7986	0,055
Cement	44,2352	0,000

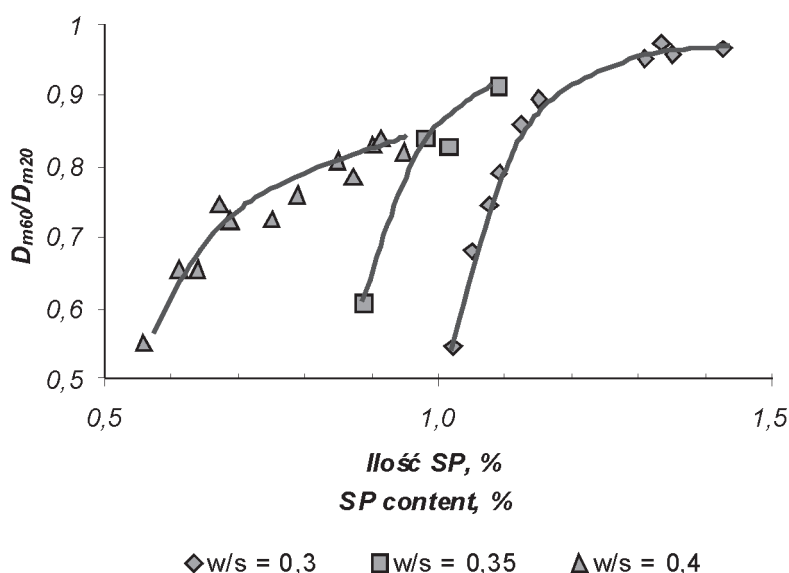
mieszanek z kruszywem I (punkt piaskowy 50%) wymaga znacznego zwiększenia zawartości zączynu i/lub większego dodatku superplastyfikatora. Jednocześnie mieszanki z kruszywem II (punkt piaskowy 60%) wykazują dłuższy czas rozplwyu.

Wyniki pomiarów przedstawione na rysunku 2 pokazują, że na zależność właściwości reologicznych mieszanki betonowej od właściwości reologicznych zączynu zawartość żuźla w cemencie nie ma większego wpływu. Potwierdza to słuszność założenia, że właściwości reologiczne zączynu wynikają z zawartości żuźla w cemencie, natomiast właściwości reologiczne mieszanki betonowej zależą głównie od właściwości reologicznych zączynu.

Badane mieszanki wykazywały ponadto szybką zmianę właściwości reologicznych z upływem czasu. Ponad 30% mieszanek z kruszywem I oraz więcej niż 50% mieszanek z kruszywem II po 60 minutach traciło właściwości mieszanek samozagęszczalnych, a do typowych zmian naleźła klasa rozplwyu. Efekt ten zależał głównie od zawartości żuźla w cemencie i od wskaźnika wypełnienia stosu okruchowego kruszywa zączynem (ϕ_{kz}), a także od stosunku w/s oraz od ilości dodawanego superplastyfikatora. Ze wzrostem zawartości żuźla w cemencie oraz ze zwiększeniem ϕ_{kz} przy stałym dodatku superplastyfikatora, a także ze zwiększeniem stosunku w/s malała zmiana średnicy rozplwyu D_m mieszanki. Im większa była zawartość żuźla w cemencie (CEM I, CEM II/B-S i CEM III/A), tym zmiana średnicy rozplwyu D_m była mniejsza. Natomiast zmiana D_m w czasie była tym większa, im mniejszy dodatek superplastyfikatora zastosowano do upłynnienia mieszanki. Wskazuje to na potrzebę stosowania mieszanek z możliwie dużym dodatkiem superplastyfikatora przy jednocześnie odpowiednio zmniejszonym stosunku w/s. Tak więc, do pewnego stopnia paradoksalnie, mieszanki o małym stosunku w/s dzięki konieczności (i możliwości) stosowania dużego dodatku superplastyfikatora wykazują mniejsze zmiany właściwości reologicznych z upływem czasu.

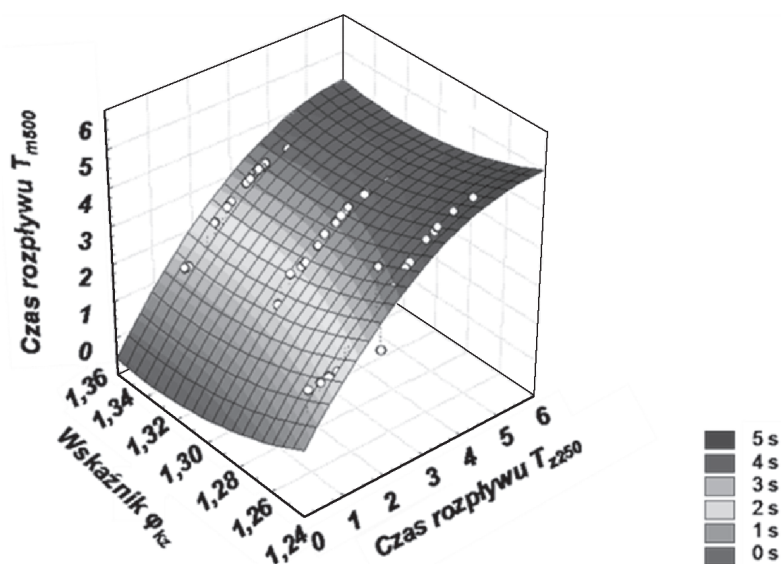
Analiza wyników badań wykazuje, że regresyjną zależność parametrów reologicznych samozagęszczalnej mieszanki od parametrów reologicznych zączynu i wskaźnika wypełnienia jamistości kruszywa zączynem ϕ_{kz} można wyrazić w postaci wielomianu drugiego stopnia. Wyniki badań mieszanek z kruszywem I pozwoliły na znalezienie zależności regresyjnych czasu rozplwyu mieszanki T_{m500} od czasu rozplwyu zączynu T_{z250} i wskaźnika wypełnienia jam kruszywa zączynem ϕ_{kz} oraz średnicy rozplwyu mieszanki D_m od średnicy rozplwyu zączynu D_z i wskaźnika wypełnienia jam kruszywa zączynem ϕ_{kz} . Zależności te są następujące:

$$T_{m500} = 227,36 + 0,463 \phi_{kz} + 339,199 T_{z250} - 0,1276 \phi_{kz}^2 - 0,81 \phi_{kz} T_{z250} - 126,1783 T_{z250}^2 \quad [1]$$



Rys. 3. Wpływ ilości superplastyfikatora na zmiany rozplwyu D_m mieszanki betonowej z cementu CEM III/A w czasie

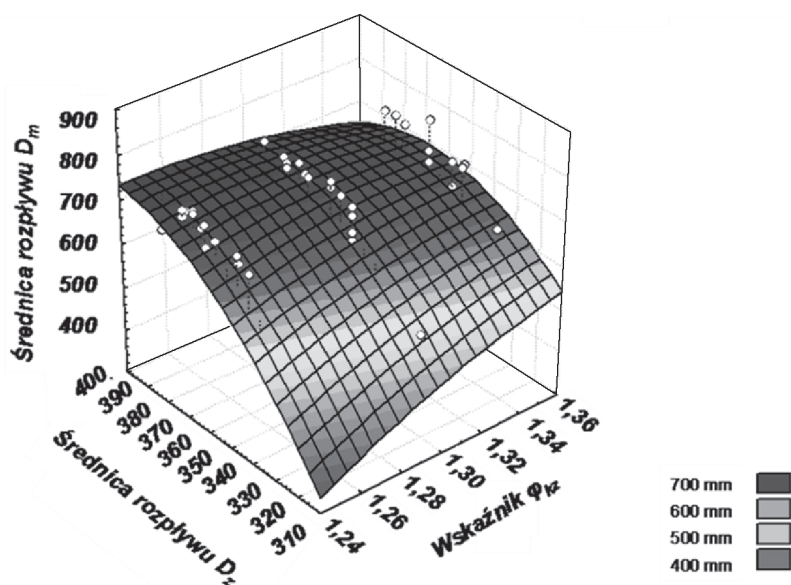
Fig. 3. The influence of superplasticizer amount on the changes of concrete mixture with cement CEM III/A flow diameter D_m in time



Rys. 4. Zależność czasu rozplwyu mieszanki T_{m500} od czasu rozplwyu zączynu T_{z250} i wskaźnika wypełnienia jam kruszywa zączynem ϕ_{kz} (mieszanka z kruszywem I).

Fig. 4. The response surface for dependencies of mixture time flow T_{m500} and cement paste time flow T_{z250} and of paste-aggregate void saturation ratio ϕ_{kz} (mixture with aggregate I)

was the superplasticizer addition to the mixture. It shows the need of applying the mixtures with as high as possible superplasticizer addition by simultaneously adequately lower w/b ratio. Thus, paradoxically to some degree the mixtures having a low w/b ratio thanks to necessity (to possibility) of high superplasticizer addition show the lower changes of rheological properties with time.



Rys. 5. Zależność średnicy rozptywu mieszanki D_m od średnicy rozptywu zaczynu D_z i wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem φ_{kz} (mieszanka z kruszywem I)

Fig. 5. The dependence of mixture flow diameter D_m and cement paste flow diameter D_z and of paste-aggregate void saturation ratio φ_{kz} (mixture with aggregate I)

$$D_m = -296995,26 + 26815,48 \varphi_{kz} + 68,23 D_z - 6519,38 \varphi_{kz}^2 - 26,42 \varphi_{kz} D_z - 0,04 D_z^2 \quad [2]$$

Wykresy zależności parametrów reologicznych mieszanki od parametrów reologicznych zaczynu i wskaźnika wypełnienia kruszywa przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Średni kwadratowy błąd przybliżenia dla równań regresji [1] i [2] wynosi odpowiednio 0,5 s i 29 mm. Wartości tych błędów w stosunku do dokładności pomiaru rozptywu mieszanki [1] potwierdzają, że przedstawione równania regresji wyznaczają kierunek zmian tych zależności z dobrym dopasowaniem wyników.

Następnie, oszacowano wpływ zastąpienia kruszywa I kruszywem II (zmiana punktu piaskowego) w badanych mieszankach na uzyskane wyniki. Wpływ ten oszacowano poprzez gradienty przesunięcia powierzchni odpowiedzi uzyskanych wyników zgrupowanych osobno dla każdego rodzaju kruszywa. Jako metodę określenia tych gradientów przyjęto porównanie ze sobą średnich wartości średnicy rozptywu i czasu rozptywu otrzymanych zarówno w przypadku tak zgrupowanych wyników empirycznych, jaki i z uzyskanych na ich podstawie powierzchni odpowiedzi. W oparciu o wyznaczone tą metodą gradienty stwierdzono, że średni gradient przesunięcia powierzchni odpowiedzi dla mieszanek z kruszywem II w stosunku do powierzchni odpowiedzi dla mieszanek z kruszywem I wynosi w przypadku średnicy rozptywu - 92 mm natomiast w przypadku czasu rozptywu 0,8 s.

4. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i ich dyskusja

Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Analizę wariancji istotności wpływu badanych czynników na wytrzymałość na ściskanie betonu przedstawiono w tabelicy 5. Pokazują one, że

The analysis of experimental results shows that the regression of rheological parameters of selfcompacting mixture with rheological parameters of the paste and the paste-aggregate void saturation ratio (φ_{kz}) can be expressed as a multinomial curve of second degree. The results of mixtures with aggregate II examination enable to found of regression dependence of the mixture timeflow T_{m500} of the paste timeflow T_{z250} and the paste-aggregate void saturation ratio (φ_{kz}). This relations are the following:

$$T_{m500} = 227,36 + 0,463 \varphi_{kz} + 339,199 T_{z250} - 0,1276 \varphi_{kz}^2 - 0,81 \varphi_{kz} T_{z250} - 126,1783 T_{z250}^2 \quad [1]$$

$$D_m = -296995,26 + 26815,48 \varphi_{kz} + 68,23 D_z - 6519,38 \varphi_{kz}^2 - 26,42 \varphi_{kz} D_z - 0,04 D_z^2 \quad [2]$$

The diagrams of the relation of mixture rheological parameters from paste rheological parameters and the paste-aggregate void saturation ratio (φ_{kz}) are presented on Fig. 5 and 6. The mean square error of approximation for the regression equations (1) and (2) is 0.5 s and 29 mm respectively. The error values in comparison with mixture flow measurements accuracy (1) confirm that the presented regression equations set the tends of the changes of these relation with good adjustment.

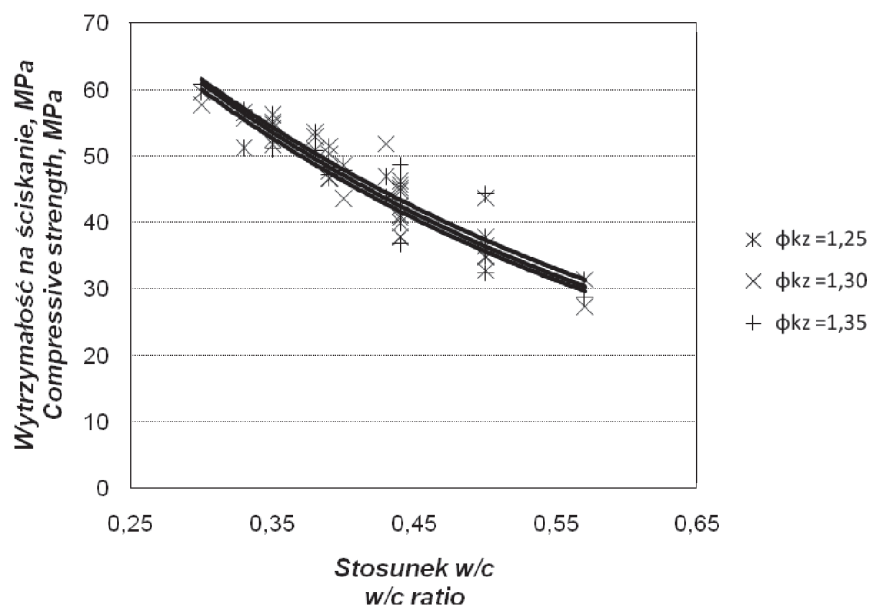
Then the influence of aggregate I replacement with aggregate II (the change of sand point) of the mixtures was estimated onto the measured results. This influence was estimated by the gradient of displacement of response surface of the obtained results, grouped separately for each kind of aggregate. As a method of these gradients determination the comparison of the mean flow diameter and flow time obtained from such grouped results and received on their basis the response surface. On the basis of the gradients determined with this method it was established that the gradient of response surface displacement of the mixture with aggregate II in relation to the response surface of the mixture with aggregate I in the case of flow diameter is equal 92 mm, but in the case flow time 0.8 sec.

4. The results of compressive strength measurements and their discussion

The results of measurements are presented on Fig. 6 and 7. The variance analysis of the effect of examined factors on the concrete compressive strength is presented in Table 5. From the result it is evident that the strength of selfcompacting concrete is defined by the w/c ratio and the compressive strength of cement. Simultaneously it can be stated that the paste-aggregate void saturation ratio φ_{kz} in the chosen changes range influence the compressive strength of concrete in the minor degree (Fig. 6). It has a very great importance in the respect of selfcompacting concrete designing. It gives possibility to influence onto rheological properties of the selfcompacting mixture by changing the paste content without simultaneous larger influence on the concrete strength. The compressive strength, according to expectation is

wytrzymałości betonu samozagęszczalnego zdeterminowana jest przez stosunek w/c oraz wytrzymałość na ściskanie cementu. Jednocześnie na tej podstawie można stwierdzić, że wskaźnik wypełnienia stosu okruszowego kruszywa zaczynem ϕ_{kz} w przyjętym zakresie zmienności w mniejszym stopniu wpływa na wytrzymałość na ściskanie betonu (rys. 6). Fakt ten ma bardzo duże znaczenie ze względu na projektowanie betonu samozagęszczalnego. Możliwe jest dzięki temu kształtowanie właściwości reologicznych mieszanki samozagęszczalnej poprzez zmiany ilości zaczynu bez równoczesnego większego wpływu na wytrzymałość betonu. Wytrzymałość na ściskanie, zgodnie z oczekiwaniem nieliniowo maleje wraz ze wzrostem stosunku w/c (rys. 7). W badanym zakresie zmienności stosunku w/c od 0,30 do 0,57 wytrzymałość na ściskanie zmieniła się odpowiednio od 67 do 28 MPa. Zwraca przy tym uwagę znaczny wpływ zawartości żużla w cemencie na uzyskane wytrzymałości. Wskazuje to na podkreślaną często w publikacjach, konieczność oznaczania przy projektowaniu betonu rzeczywistej wytrzymałości cementu, jeżeli chce się uzyskać klasę betonu bliskiej założonej i uniknięcia zbyt wysokiego zużycia cementu.

Zwraca uwagę znaczny rozrzut uzyskiwanych wytrzymałości w przypadku betonów z jednego cementu i o jednym stosunku w/c (rys. 7). Przedstawiona na rysunku 8 zależność wytrzymałości na ściskanie od średnicy rozplywu mieszanek wykonanych z cementu CEM III/A wskazuje, że efekt ten prawdopodobnie związany jest z właściwościami reologicznymi mieszanki, a dokładniej ze zdolnością mieszanki do samoodpowietrzenia. Jak wykazano w pracy (11) zdolność do samoodpowietrzenia mieszanki zależy przede wszystkim od jej właściwości reologicznych. Im większa jest granica płynięcia (a więc mniejsza średnica rozplywu) mieszanki tym mniejsza jest jej zdolność do samoodpowietrzenia. Wraz ze zmniejszaniem się średnicy rozplywu większa będzie ilość powietrza pozostającego w mieszance, a w konsekwencji mniejsza będzie wytrzymałość betonu. Taki też efekt obserwuje się na rysunku 8. Należy przy tym zauważyć, że problem ilości powietrza pozostającego w mieszance samozagęszczalnej nie jest uwzględniany w kryteriach samozagęszczalności. Również w projektach norm EN dotyczących badania mieszanki samozagęszczalnej nie ma metody takiego badania. Zagadnienie to jest przedmiotem obecnie prowadzonych w Politechnice Śląskiej badań.

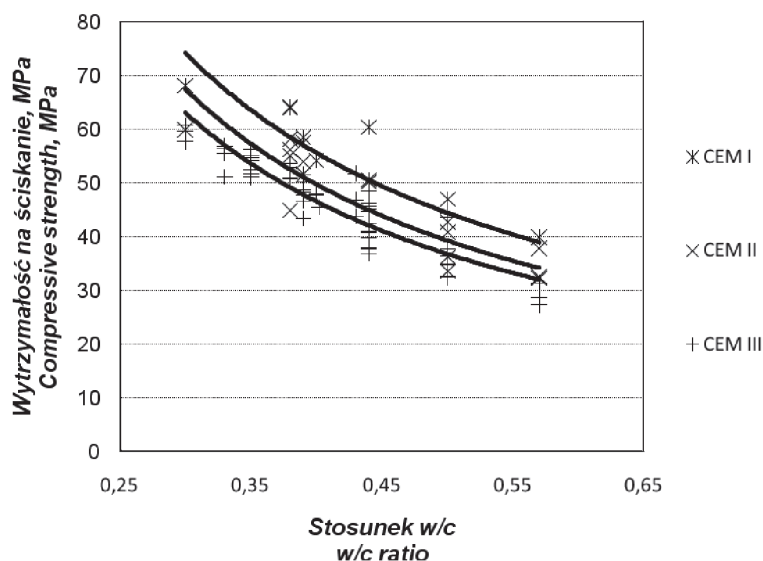


Rys. 6. Wpływ stosunku w/c i wskaźnika wypełnienia stosu okruszowego kruszywa zaczynem ϕ_{kz} na wytrzymałość na ściskanie betonu samozagęszczalnego. Betony z cementu CEM III/A

Fig. 6. The influence of w/c ratio and of paste-aggregate void saturation ratio ϕ_{kz} on compressive strength of self-compacting concrete. Concretes made of CEM III/A cement

nonlinearly decreasing with the increase of w/c ratio (Fig. 7). In the examined range of w/c ratio variations from 0.30 to 0.57 the compressive strength changes from 67 to 28 MPa respectively. On these results high influence has the slag content in cement. It confirms the necessity of examination of real cement strength for concrete designing to obtain assumed concrete class and avoid to high cement consumption which is underlined frequently in literature.

It is worth to mention that the significant dispersion of the strength in the case of one cement and one w/c ratio was found (Fig. 7).



Rys. 7. Wpływ stosunku w/c i rodzaju cementu na wytrzymałość na ściskanie betonu samozagęszczalnego

Fig. 7. The influence of w/c ratio and cement on compressive strength of self-compacting concrete

5. Podsumowanie

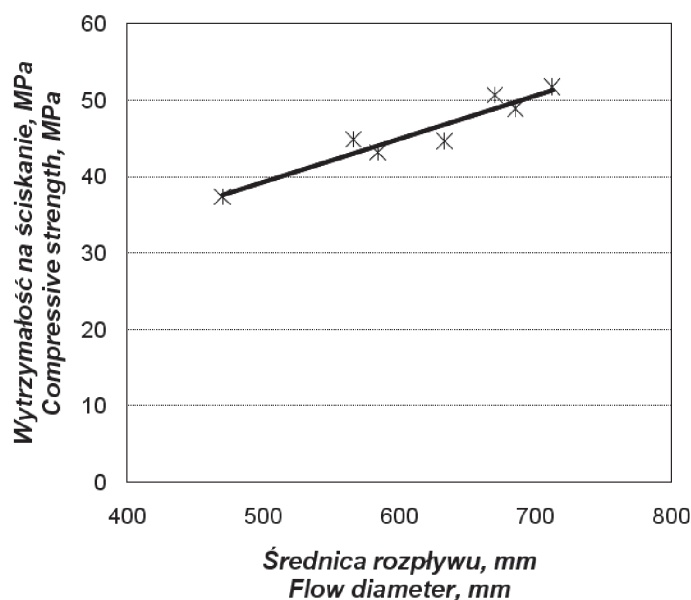
Na podstawie uzyskanych wyników badań można stwierdzić, że na właściwości reologiczne mieszanki samozagęszczalnej można wpływać stosując zaczyn o odpowiednich właściwościach reologicznych oraz poprzez dobór stopnia wypełnienia jam w stosie okruchowym kruszywa zaczynem ϕ_{kz} . Zależność parametrów reologicznych samozagęszczalnych mieszanek betonowych od parametrów reologicznych zaczynu i wskaźnika wypełnienia jamistości kruszywa zaczynem ϕ_{kz} można opisać równaniami regresji, które pokazują charakter zmian jakościowych tych zależności. Mogą one stanowić podstawę do wstępnego wyboru korzystnego zakresu właściwości reologicznych zaczynu i wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem w projektowaniu samozagęszczalności betonu.

Zaczyny do betonów samozagęszczalnych zwykłych powinny się charakteryzować średnicą rozplywu wynoszącą co najmniej 300 mm, jeżeli pomiar jest wykonywany za pomocą pierścienia Southarda do oznaczania konsystencji zaczynów gipsowych (10). Im mniejsza jest średnica rozplywu zaczynu, tym większa jego zawartość jest konieczna w betonie w celu uzyskania wymaganego rozplywu mieszanki. Czasy rozplywu zaczynu (lepkość plastyczna) w granicach od 1 do 5 s [pomiar jak w pracy (10)] umożliwiają, zależnie od wskaźnika wypełnienia jam kruszywa zaczynem ϕ_{kz} , uzyskanie mieszanek betonowych wykazujących czas rozplywu od 1 do 10 s.

Stosowanie mieszanek o wskaźniku wypełnienia jam kruszywa zaczynem ϕ_{kz} w przedziale od 1,25 do 1,35 pozwala na kształtowanie ich właściwości w pełnym zakresie klas rozplywu i czasu rozplywu.

Badania wykazują, że punkt piaskowy kruszywa nie powinien znacznie przekraczać 50%. Zwiększenie punktu piaskowego kruszywa z 50 do 60% powoduje zmniejszenie średnicy rozplywu mieszanki o około 10 cm, to jest o jedną klasę rozplywu i zwiększenie czasu rozplywu o około 1 s. Powoduje to konieczność stosowania większej ilości zaczynu, co w pewnych przypadkach, zwłaszcza w przypadku mieszanek o zwiększonych wymaganiach w stosunku do wytrzymałości, a więc także małym stosunku w/s, może pociągać za sobą konieczność stosowania dużej ilości cementu. W przypadku betonów samozagęszczalnych, zwykłych pod względem wytrzymałości, część cementu może być jednak z korzystnym efektem zastąpiona zmielonym kamieniem wapiennym.

Właściwości reologiczne mieszanek samozagęszczalnych zmieniają się z upływem czasu. Ogólnie obserwuje się wzrost granicy płynięcia i lepkości plastycznej, to jest zmniejszenie średnicy rozplywu D_m i zwiększenie czasu rozplywu T_{m500} . Dla badanych mieszanek zakres tych zmian zależał od zawartości żuźla w cemencie, stosunku w/c (w/s), zawartości zaczynu oraz ilości dodanego superplastyfikatora. Ze względu na zmiany właściwości reologicznych mieszanek samozagęszczalnych w czasie, ważnym czynnikiem jest ilość dodanego superplastyfikatora. Powinna być ona możliwie duża, co jednak łączy się z koniecznością projektowania mieszanek o małym stosunku w/s. Zakres zmian średnicy rozplywu w czasie zależy również od stosunku w/s oraz ilości



Rys. 8. Wpływ średnicy rozplywu mieszanki samozagęszczalnej z CEM III/A o stosunku w/c 0,44 i $\phi_{kz} = 1,25$ na wytrzymałość betonu na ściskanie

Fig. 8. The flow diameter of self-compacting mixture with w/c = 0,44, $\phi_{kz} = 1,25$ made of CEM III/A on concrete compressive strength of concrete

Presented relation of compressive strength from the flow diameter of the mixtures produced of CEM III/A cement shows that this effect is probably linked with rheological properties of the mixture and precisely with the ability of the mixture to self deaeration. As one of the authors has shown (11) the ability to self deaeration of the mixture is depended primarily from its rheological properties. As the yield value is higher (thus lower the flow diameter) as the ability to self deaeration is lower. With the decrease of flow diameter the air content in the mixture will remain higher and consequently the concrete strength will be lower. This effect is seen on the Fig. 8. It must be mention that the problem of air content in the mixture is not taken into account in the criteria of selfcompactness. Also the European pre-standards for examination of selfcompacting mixture there is no such test. This problem is now under study in Silesian Technical University.

5. Final comments

On the basis of experimental results it can be concluded that the rheological properties of selfcompacting mixture can be influenced by applying the paste of suitable rheological properties and by choosing the paste-aggregate void saturation ratio ϕ_{kz} . The dependence of selfcompacting concrete mixture rheological parameters from the paste rheological parameter and from the paste-aggregate void saturation ratio ϕ_{kz} can be expressed with regression equations which show the trend of the quality changes of these relations. They can be the basis for preliminary selection of advantageous range of the paste rheological parameters and of the paste-aggregate void saturation ratio in concrete selfcompactness designing.

zaczynu w mieszance i, przy zbliżonej ilości superplastyfikatora, ogólnie zmniejsza się wraz z ich wzrostem.

Badania potwierdzają, że mieszanki o stosunku w/s w przedziale od 0,30 do 0,40 ($w/c = 0,30$ do $0,60$) wykazują dobrą płynność i brak wyraźnej utraty samozagęszczalności w czasie oraz nie wykazują skłonności do segregacji.

Zmiany wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem ϕ_{kz} w zakresie od 1,25 do 1,35, odpowiadające typowym betonom samozagęszczalnym, nie wpływają znacząco na wytrzymałość na ściskanie betonu. Dzięki temu możliwe jest kształtowanie w szerokim zakresie właściwości reologicznych mieszanki samozagęszczalnej poprzez zmiany zawartości zaczynu bez wyraźniejszego wpływu na wytrzymałość betonu.

Literatura / References

1. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use. EFNARC Report, 2005.
2. G. De Schutter, P. J. M. Bartos, P. Domone, J. Gibbs, Self compacting concrete. Whittles Publishing, Dunbeath 2008.
3. J. Szwabowski, Urabialność mieszanki betonowej w ujęciu reologicznym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 1987.
4. G. H. Tattarsall, P. F. G. Banfill, The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Books Limited, Boston 1983.
5. J. Szwabowski, Reologia mieszanek na spoiwach cementowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
6. Proceedings of 1st International Symposium "Self - Compacting Concrete", RILEM pro007, Ed. by Å. Skarendahl and Ö. Petersson, Stockholm, Sweden 1999.
7. Proceedings of 3rd International Symposium "Self - Compacting Concrete", RILEM pro033, Ed. by O. Wallevik and I. Nielsson, Reykjavik, Iceland 2003.
8. Proceedings of 1st International Symposium "Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC'2005-China)", RILEM pro042, Ed. by Z. Yu, C. Shi, K. H. Khayat and Y. Xie, China 2005.
9. Proceedings of 3rd North American Conference " Design and Use of Self - Consolidating Concrete", Chicago, USA 2008.
10. E. Czopowski: Formuła kompozytowa betonu podstawą koncepcji projektowania betonów samozagęszczalnych, Dni Betonu, Wisła 2006.
11. J. Gołaszewski, A. Kostrzanowska: Właściwości reologiczne a ilość powietrza w mieszance samozagęszczalnej. 55 Konferencja Naukowa KILiWP i Komitetu Nauki PZITB Krynica 2009 Problemy Naukowo – Badawcze Budownictwa, str. 407 – 414, Kielce – Krynica 2009.

Badania przeprowadzono w ramach Projektu Badawczego Własnego nr N5060873/3661 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

The paste for classic selfcompacting concretes should have the flow diameter not lower than 300 mm, if the measurement is done with Southard ring for controlling the gypsum paste consistency (10). The lower is the paste flow diameter the higher should be its content in concrete in order to assure the demanded mixture flow. The paste times of flow (plastic viscosity) in the paste range of 1 to 5 sec [test as described in (10)] enable, dependently from the paste-aggregate void saturation ratio ϕ_{kz} , the production of concrete mixture having the flow time in the range of 1 to 10 sec.

The application of the mixtures with the paste-aggregate void saturation ratio ϕ_{kz} in the range from 1.25 to 1.35 make possible to change their properties in the whole range of flow class and times of flow.

The experiments have shown that the sand point of aggregate should be significantly greater than 50%. The increasing of aggregate sand point from 50 to 60% causes the decrease of the mixture flow diameter of about 10 cm, i.e. of one flow class and the increasing of flow time of about 1 sec. It causes the necessity to increase the paste content which in some cases, especially in mixtures of higher strength demand thus also with lower w/b ratio, can provoke the need to use high cement quality. In the case of selfcompacting concretes of normal strength, cement can be partially replaced by ground limestone with advantageous effect.

The rheological behaviour of selfcompacting mixtures is changed with time. Generally the increase of yield stress and plastic viscosity is observed, i.e. the decrease of flow diameter D_m and increase of flow time T_{m500} . For examined mixtures the range of these changes depended from the slag content in cement, w/c (w/b) ratio, paste content and quantity of superplasticizer added. In respect of the change of selfcompacting mixtures rheological properties with time the important factor is the quantity of superplasticizer addition. It should be high which is, however, linked with the necessity of mixture designing with low w/b ratio. The range of flow diameter changes with time depends also from the w/b ratio and the paste content in the mixture and in the case of similar superplasticizer addition is decreasing with their increase.

The experience show that the mixtures with w/b ratio in the range from 0.30 to 0.40 (w/c equal 0.30 to 0.60) have the good flowability and do not change their selfcompactness with time and do not exhibit the tendency for segregation.

The changes of the paste-aggregate void saturation ratio ϕ_{kz} in the range from 1.25 to 1.35, used for typical selfcompacting concretes, do not influence significantly on the compressive strength of concrete. Thanks to this it is possible to change in the wide range the rheological behaviour for selfcompacting mixture through the changes of paste content without significant influence onto the concrete strength.