

JACEK GOŁASZEWSKI¹⁾TOMASZ PONIKIEWSKI²⁾

THE EFFECT OF CALCAREOUS FLY ASH ON SELECTED PROPERTIES OF NEW GENERATION OF CONCRETE

WPŁYW POPIOŁU LOTNEGO WAPIENNEGO NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI BETONÓW NOWEJ GENERACJI

STRESZCZENIE. Analiza wpływu zawartości popiołu lotnego wapiennego na wybrane właściwości betonów samozagęszczalnych i wysokowartościowych betonów samozagęszczalnych jest przedmiotem niniejszego artykułu. Zakres badań obejmował zmienny stopień domielenia popiołu lotnego wapiennego oraz rodzaj cementu modyfikowanego popiołem lotnym wapiennym. Przedstawiono wyniki badań klasy rozptyłu *SF* oraz klasy lepkości T_{500} mieszanek betonowych oraz wytrzymałości na ściskanie ($f_{cm,28}$, $f_{cm,90}$), wytrzymałości na zginanie ($f_{cf,28}$, $f_{cf,90}$), nasiąkliwości betonu i głębokości penetracji wody. Popiół lotny wapienny stosowano w zmiennej ilości (10, 20 i 30%) jako dodatek typu I oraz dodatku typu II. Wyniki badań potwierdziły możliwość stosowania popiołu lotnego wapiennego w betonach samozagęszczalnych i wysokowartościowych betonach samozagęszczalnych przy zachowaniu zakładanej urabialności mieszanek.

SŁOWA KLUCZOWE: cementy portlandzkie popiołowe, cementy wieloskładnikowe, dodatek do betonu typu II, głębokość penetracji wody, nasiąkliwość, popiół lotny wapienny, wysokowartościowy beton samozagęszczalny.

ABSTRACT. The analysis of the effect of calcareous fly ash on selected properties of self-compacting and high performance self-compacting concretes is the subject of this paper. The investigation included the variable degree of grinding of calcareous fly ash and a different type of cement modified with calcareous fly ash. The results of tests on the *SF* class of flow and viscosity grade T_{500} of tested mixtures, as well as tests on concrete compressive strength ($f_{cm,28}$, $f_{cm,90}$), flexural strength ($f_{cf,28}$, $f_{cf,90}$), absorption tests and tests on water penetration depth are presented. Concrete mixture was modified using a variable volume fraction of calcareous fly ash as a type I and type II additive (10, 20 or 30%). The studies confirmed the possibility of using calcareous fly ash in self-compacting and high performance self-compacting concretes, while maintaining the assumed workability.

KEYWORDS: calcareous fly ash, high performance self-compacting concrete, multicomponent cements, Portland ash cements, type II additive to concrete, water absorption, water penetration depth.

DOI: 10.7409/rabdim.013.015

¹⁾ Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice; Jacek.Golaszewski@polsl.pl (✉)

²⁾ Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, Gliwice; Tomasz.Ponikiewski@polsl.pl

1. WPROWADZENIE

Jednym z aktualnych kierunków rozwoju technologii betonu jest stosowanie dodatków mineralnych w szerszym zakresie niż dotychczas. Umożliwiają one bowiem poprawę właściwości betonu stosowanego przy budowie, m.in. infrastruktury dróg i mostów (fundamenty przyczółków mostowych, konstrukcje pylonów i tuneli, elementy wyposażenia drogowych nawierzchni betonowych, itp.), zwłaszcza w aspekcie jego odporności na agresywne oddziaływanie środowiska oraz znaczących korzyści ekonomicznych. Stosowanie dodatków mineralnych pozwala na efektywne zagospodarowanie odpadów, zmniejszenie zużycia energii do produkcji cementu oraz zmniejszenia emisji CO_2 . Do betonu najczęściej stosuje się popioły lotne ze spalania węgla kamiennego, zmielony granulowany żużel wielkopiecowy oraz, gdy wymagane są bardzo duże wytrzymałości, pył krzemionkowy. W składzie betonów samozagęszczalnych (BSZ) stosuje się mączki kamienne (np. zmielony wapień, dolomit), które uważane są jednak za dodatki obojętne. Dodatki mineralne są dobierane ze względu na wymagania wytrzymałościowe i trwałościowe betonu, a ich obecność wpływa znacząco na właściwości reologiczne mieszanki. Podstawowe efekty stosowania dodatków mineralnych przedstawiono szeroko w licznych opracowaniach, m.in. [1, 2, 3]. Jako bezpośredni dodatek mineralny do betonu lub jako składnik główny cementu może być stosowany również popiół lotny wapienny (PLW) [1]. Popioły lotne wapienne powstają w wyniku spalania węgla brunatnego w kotłach konwencjonalnych. Można je traktować jako charakteryzujące się aktywnością pucolanowo - hydrauliczną [1]. Zawierają od 10% do 40 % masy CaO_{reak} , od 3% do 7% masy CaO_w , do 7% masy niespalonego węgla oraz mają powierzchnię właściwą według Blaine'a poniżej $2800 \text{ cm}^2/\text{g}$. Pomimo dużej dostępności – w Polsce powstaje rocznie około 5 mln ton popiołów lotnych wapiennych – nie są one stosowane w technologii betonu. Głównymi przyczynami takiej sytuacji są: duża zmienność składu i właściwości popiołu w czasie, duża wodożądność popiołu, duża zawartość CaO_w i związków siarki oraz niewielkie doświadczenie i mała liczba prac naukowo-badawczych związanych z jego wykorzystaniem [1, 2, 3].

Szereg badań wykazuje, że dodatek popiołu lotnego wapiennego powoduje wyraźne pogorszenie urabialności mieszanek, a ponadto na skutek większej ilości niespalonego węgla w swoim składzie może obniżać efektywność działania domieszek uplastyczniających i upłynniających [4 - 8]. Dodatkowe utrudnienie przy projektowaniu

1. INTRODUCTION

One of popular directions of concrete technology development is the use of mineral additives in wider range than so far. They enable the improvement of concrete properties, including infrastructure of roads and bridges (bridge abutments foundations, pylons structures and tunnels, parts of concrete pavements, etc.), especially in the aspect of its resistance to aggressive effect of the environment and significant economic benefits. The use of mineral additives allows efficient waste management, reduction of energy consumption for production of cement and reduction of CO_2 emission. The most commonly used mineral additives to concrete are: fly ash from the combustion of hard coal, ground granulated blast furnace slag and silica fume, if high strength concrete is required. In the composition of self-compacting concrete (SCC), crushed stone sand is used (i.e. ground limestone, dolomite), which are however considered as inert additives. Mineral additives are selected due to strength and durability requirements of concrete and their presence significantly affects rheological properties of the mixture. The main effects of mineral additives use are shown widely in numerous studies, including [1, 2, 3]. Calcareous fly ash can be also used as a direct mineral additive to concrete or as a main constituent of cement [1]. Calcareous fly ash originates from the process of brown coal combustion in conventional boilers and it is characterized by both hydraulic and pozzolanic activity [1]. It contains: 10-40% of reactive CaO , 3-7% of CaO_{free} and up to 7% of unburnt coal (in mass), and its specific surface is lower than $2800 \text{ cm}^2/\text{g}$ according to Blaine. Although it is highly available – around 5 million tons of calcareous fly ash is produced in Poland annually – it is not used in concrete technology. The main reasons of such a situation are: high variability of composition and properties, as well as high water demand of the ash, high CaO_{free} and sulphur compounds content, as well as little experience and small number of research papers connected with its use [1, 2, 3].

Many studies show that addition of calcareous fly ash causes clear deterioration of mixtures workability, and moreover, the presence of bigger amount of unburnt coal in its composition may lower the effectiveness of plasticizer and superplasticizer [4 - 8]. Additional difficulty in design of mix workability is a high variability of composition and properties of calcareous fly ash. Inadequate workability of mix is one of the main problems which limits the possibility of wider use of calcareous fly ash in concrete technology. A significant reduction of

urabialności mieszanek stanowi duża zmienność składu i właściwości popiołu lotnego wapiennego. Niewłaściwa urabialność mieszanek stanowi jeden z głównych problemów ograniczających możliwość szerszego wykorzystania popiołu lotnego wapiennego w technologii betonu. Znaczące zmniejszenie negatywnego wpływu popiołu lotnego wapiennego na urabialność można uzyskać dzięki uzdatnieniu przez przemiał lub stosowaniu go jako składnik cementu [5, 9 - 13]. Szczególnie dobre rezultaty uzyskuje się stosując popiół lotny wapienny jako składnik cementów wieloskładnikowych [5, 9].

Beton samozagęszczalny ma takie właściwości reologiczne, dzięki którym jest on zdolny do całkowitego i szczelnego wypełnienia grawitacyjnego formy lub deskowania o dowolnym kształcie, nawet w obecności gęstego zbrojenia, bez potrzeby stosowania mechanicznego zagęszczania i bez segregacji [14]. Impulsem do opracowania betonów samozagęszczalnych było dążenie do poprawy jakości betonu poprzez zminimalizowanie wpływu czynnika ludzkiego na proces zagęszczania, poprawy warunków pracy poprzez wyeliminowanie zagrożenia wibracją i hałasem oraz zmniejszenia pracochłonności i energochłonności robót betonowych. Zalety i możliwe do uzyskania korzyści ze stosowania betonu samozagęszczalnego potwierdza znacząca liczba jego zastosowań [14].

Skład betonu samozagęszczalnego projektuje się przede wszystkim ze względu na uzyskanie takiej urabialności mieszanki, która umożliwi jej swobodne płynięcie pod ciężarem własnym oraz szybkie odpowietrzenie [1, 12 - 14]. Mieszanka musi się przy tym charakteryzować odpornością na sedymentację ziaren kruszywa w mieszance, jak i na wydzielanie się z niej zaczynu. Równocześnie muszą być spełnione wymagania wytrzymałościowe i trwałościowe betonu. Traktowane są one jednak jako podrzędne w stosunku do warunku urabialności, zwłaszcza w przypadku projektowania betonów niższych wytrzymałości.

Konieczność spełnienia wymagań urabialności determinuje skład mieszanki samozagęszczalnej [1, 14]. Charakteryzuje się on małym stosunkiem w/c oraz dużą ilością dodatków mineralnych, co zapewnia odporność mieszanki na segregację i sedymentację. Wysoką płynność mieszanki uzyskuje się stosując w dużej ilości superplastyfikatory nowej generacji. Dodatki mineralne zwiększają ilość zaczynu bez potrzeby zwiększania ilości cementu ponad konieczne minimum. Odpowiednio dobierając rodzaj i ilość dodatków mineralnych można również kształtować właściwości techniczne betonu.

negative effect of calcareous fly ash on the workability can be obtained by its activation by grinding or by its use as a cement constituent [5, 9 - 13]. Particularly good results are obtained using calcareous fly ash as a constituent of multicomponent cement [5, 9].

Self-compacting concrete has such rheological properties that it is capable to entire and tight gravity filling of a form or framework of any shape, even with congested reinforcement, without any need for mechanical compaction and without segregation [14]. The incentive for developing self-compacting concrete was the effort to improve concrete quality by minimizing the influence of a human factor on a compaction process and to improve working conditions by eliminating the hazard of vibration and noise, as well as to minimize the labour and energy consumption of concrete works. The advantages and possible to achieve benefits of using self-compacting concrete are confirmed by a significant number of its applications [14].

The self-compacting concrete composition is designed mainly in order to receive such mixture workability which enables its free flow under its own weight and fast deaeration [1, 12 - 14]. The mixture should be also characterized by the resistance to sedimentation of aggregate in mixture and to cement paste precipitation. Obviously, the strength and durability requirements need to be met at the same time. However, they are treated as secondary to the workability condition, especially in case of designing the concretes of low durability.

The necessity of meeting the workability requirements determines the composition of self-compacting concrete mixture [1, 14]. It is characterized by low w/c ratio and high content of mineral additives, what ensures mixture resistance to segregation and sedimentation. High fluidity of the mixture is obtained by the use of big amount of a new generation of superplasticizers. Mineral additives increase the cement paste volume without the necessity of increasing the cement composition over the necessary minimum. By adjusting correctly the type and volume of mineral additives it is also possible to modify technical properties of concrete.

The objective of the investigation was to recognize the possibility of obtaining the selected properties of a new generation of concrete with calcareous fly ash addition. Self-compacting and high performance self-compacting concretes (HPSCC) were studied using calcareous fly ash as a cement additive (type I), especially in case of multicomponent cements, and as a concrete additive (type II).

Celem podjętych badań było sprawdzenie możliwości uzyskania wybranych właściwości betonów nowej generacji z dodatkiem PLW. Rozpatrywano betony samozagęszczalne i wysokowartościowe betony samozagęszczalne (WWBSZ) w przypadku stosowania PLW jako dodatku do cementów (typu I), w tym zwłaszcza do cementów wieloskładnikowych, oraz jako dodatku do betonu (typu II).

2. OPIS BADAŃ

2.1. PLAN BADAŃ

W badaniach uwzględniono wpływ następujących czynników zmiennych:

- ilość popiołu lotnego wapiennego (10%, 20%, 30% jako zamiennik części masy cementu),
- rozdrobnienie popiołu lotnego wapiennego (popiół w stanie nieuzdatnionym, popiół po dodatkowym rozdrobnieniu),
- rodzaj cementu CEM I 42,5; CEM II/B-W 42,5; CEM IV/B-W 42,5; CEM II/B-M (LL-W) 42,5 w przypadku mieszanek BSZ; CEM I 42,5; CEM II/A-W 52,5; CEM II A-M (V-W) 52,5; CEM V/A (S-W) 42,5 w przypadku mieszanek WWBSZ,
- ilość superplastyfikatora / klasa konsystencji mieszanki samozagęszczalnej.

Określano wpływ wyżej wymienionych czynników na urabialność mieszanki samozagęszczalnej, wytrzymałość na ściskanie i zginanie betonu, nasiąkliwość oraz głębokości penetracji wody. Skład stosowanych cementów i ich właściwości fizyczne oraz skład chemiczny popiołów lotnych wapiennych przedstawiono we wcześniejszych publikacjach autorów [15 - 17].

Badania wykonano w trzech blokach:

- badania wpływu popiołu lotnego wapiennego na właściwości mieszanki i betonu samozagęszczalnego,
- badania wpływu rodzaju cementu z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego na właściwości mieszanki i betonu samozagęszczalnego,
- badania wpływu rodzaju cementu z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego na właściwości mieszanki i betonu wysokowartościowego.

2.2. MATERIAŁY I SKŁAD MIESZANEK

Mieszanki samozagęszczalne zaprojektowano metodą KPB, szczegółowo opisaną w [14], opracowaną w rodzimej

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

2.1. RESEARCH PLAN

In the experimental research the following variable factors were taken into account:

- the amount of calcareous fly ash (10%, 20%, 30% as a substitute for a part of cement by mass),
- fragmentation of calcareous fly ash (unprocessed ash, ash after additional grinding),
- type of cement (CEM I 42.5, CEM II/B-W 42.5, CEM IV/B-W 42.5, CEM II/B-M (LL-W) 42.5 in case of SCC mixtures; CEM I 42.5, CEM II/A-W 52.5, CEM II A-M (V-W) 52.5, CEM V/A (S-W) 42.5 in case of HPSCC mixtures),
- the amount of superplasticizer / consistency class of self-compacting concrete mixture.

The effect of the mentioned factors on workability of self-compacting concrete mixture, on strength resistance and concrete flexing, as well as on absorption and water penetration depth was defined. Compositions of used cements and their physical properties and chemical composition of calcareous fly ash are shown in previous authors' publications [15 - 17].

The research was performed in three sections:

- the research on the effect of calcareous fly ash on properties of the mixture and self-compacting concrete,
- the research on the effect of a cement type with addition of calcareous fly ash on properties of the mixture and self-compacting concrete,
- the research on the effect of the cement type with addition of calcareous fly ash on properties of the mixture and high performance self-compacting concrete.

2.2. MATERIALS AND MIXTURE COMPOSITIONS

Self-compacting concrete mixtures were designed according to KPB method, presented in detail in [14], developed in a authors' laboratory. Various classes of self-compacting were obtained by changing the amount of superplasticizer without changing the proportions of other constituents. Compositions of tested self-compacting concrete mixtures were presented in Table 1 and they do not differ from typical compositions of self-compacting concrete mixtures

jednostce autorów. Różne klasy samozagęszczalności używano zmieniając ilość superplastyfikatora, utrzymując przy tym proporcje pozostałych składników. Składy badanych mieszanek samozagęszczalnych, przedstawionych w Tablicy 1, nie odbiegają od ich typowych składów [14]. Właściwości popiołu lotnego wapiennego oraz zastosowanych cementów opisano szczegółowo w [12, 13]. Do mieszanek samozagęszczalnych (BSZ) stosowano kruszywo otoczkowe 2-8 mm, a do mieszanek samozagęszczalnych betonów wysokowartościowych kruszywo łamane bazaltowe 2-8 mm. Zastosowane uziarnienie wynika z towarzyszących badań betonów ze zbrojeniem rozproszonym i zakładanej efektywności układu: frakcje kruszywa – długość włókien.

[14]. The properties of both calcareous fly ash and applied cements are described in detail in [12, 13]. Natural rounded 2-8 mm aggregate was used for self-compacting concrete mixtures (SCC), while 2-8 mm basalt aggregate – for HPSCC. Applied particle size distribution results from the accompanying research of concrete with distributed reinforcement and assumed effectiveness of the aggregate fractions set – fiber length.

Table 1. Composition of self-compacting concrete mixtures
Tablica 1. Skład mieszanek samozagęszczalnych

Component / Składnik	Content / Zawartość [kg/m ³]	
	SCC / BSZ	HPSCC / WWBSZ ^{*)}
Cement	490	490
Sand / Piasek 0-2 mm	800	756
Natural aggregate / Kruszywo otoczkowe 2-8 mm	800	
Basalt aggregate / Kruszywo bazaltowe 2-8 mm	–	944,4
Silica fume / Pył krzemionkowy	–	49
Calcareous fly ash / Popiół lotny wapienny (10%, 20%, 30% m.c.)	variable / zmienna 49, 98, 147	variable / zmienna 49, 98, 147
Water / Woda	200,9	204,8
Superplasticizer / Superplastyfikator PC	variable / zmienna 7.4, 12.3, 17.2 (1.5%, 2.5%, 3.5% m.c.)	variable / zmienna 11.3, 13.7, 16.2 (2.3%, 2.8%, 3.3% m.c.)
Stabiliser / Stabilizator (0.4% m.c.)	1.9	1.9
Concrete mix parameters / Parametry składu mieszanki		
Sand equivalent / Punkt piaskowy [%]	50.0	45.8
W/(C+PLW+CSF) ^{**)}	0.41	0.38
Remarks / Uwagi		
^{*)} HPSCC – high performance self-compacting concrete / WWBSZ – wysokowartościowy beton samozagęszczalny		
^{**)} W, C, PLW, CSF – mass of water, cement, calareous fly ash and silica fume respectively / odpowiednio masa wody, cementu, popiołu lotnego wapiennego oraz pyłu krzemionkowego		

2.3. PROCEDURA PRZYGOTOWANIA MIESZANEK I WYKONANIA BADANIA

Procedurę przygotowania mieszanki samozagęszczalnych przedstawiono szczegółowo w [12, 13]. Badania właściwości reologicznych mieszanek wykonywano za pomocą testu rozplywu mieszanki (PN-EN 12350-8) po 5 i 60 min od zakończenia mieszania. Pomiedzy pomiarami

2.3. PROCEDURE OF PREPARING THE MIXTURE AND CONDUCTING THE TEST

The procedure of preparing self-compacting mixture is shown in detail in [12, 13]. The rheological properties were tested with slump-flow test (EN 12350-8) after 5 and 60 minutes, from the end of mixing. Between measurements, the mixture was kept covered in a mixer. Tests

mieszankę przechowywano w mieszalniku pod przykryciem. Badania wykonano w temperaturze 20°C. Próbkę do badania wytrzymałości na ściskanie formowano po 60 min. Badania wytrzymałości na ściskanie wykonywano według normy PN-EN 12350-1, a badania wytrzymałości na zginanie według normy PN-EN 12390-5.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Wyniki badań wpływu ilości i uzdatnienia popiołu lotnego wapiennego na właściwości mieszanki samozagęszczalnej betonu zwykłego i wysokowartościowego przedstawiono odpowiednio na Rys. 1 i 2. Na ich podstawie można stwierdzić, że dodatek popiołu lotnego wapiennego zmniejsza średnicę rozptywu mieszanki oraz wydłuża jego czas. W efekcie urabialność (samozagęszczalność) mieszanki tym bardziej ulega pogorszeniu, im więcej popiołu zostało dodane. Popiół lotny wapienny przyczynia się również do przyspieszenia utraty urabialności mieszanki w czasie. Należy jednocześnie podkreślić, że pomimo pogorszenia urabialności wszystkie badane mieszanki z dodatkiem popiołu pozostają samozagęszczalne nawet po 60 minutach od zakończenia mieszania. Wyniki badań potwierdzają, że negatywny wpływ popiołu lotnego wapiennego na urabialność jest mniejszy, jeśli został on uzdatniony przez przemiał (zwiększenie powierzchni właściwej popiołu). W obecności dużej ilości superplastyfikatora wpływ uzdatnienia nie jest jednak tak silny, jak w przypadku mieszanek bez lub z małym jego dodatkiem [5, 10 - 13]. Jednocześnie zwiększona w wyniku dodania popiołu lepkość mieszanki (dłuższy czas rozptywu, wypływu i przepływu) sprzyja uzyskaniu mieszanki stabilnej, bez oznak segregacji.

W badaniach uzyskano wytrzymałości $f_{cm,28}$ w przedziale 57 - 67 MPa dla betonów projektowanych jako samozagęszczalne oraz 80 - 95 MPa dla betonów projektowanych jako samozagęszczalne wysokowartościowe. W obecności popiołu lotnego wapiennego można więc bez istotnych problemów uzyskać beton samozagęszczalny o wytrzymałości przekraczającej 60 MPa (minimalną wartość graniczną dla betonów WWBSZ).

Zmniejszenie płynności mieszanki (zmniejszenie średnicy rozptywu i/lub wydłużenie czasu rozptywu) powoduje mniejszą zdolność mieszanki do samoczynnego odpowietrzenia. Popiół lotny wapienny przyczyniając się do pogorszenia samozagęszczalności mieszanki (zwłaszcza w aspekcie jej zmian w czasie), pośrednio przyczynia się do zwiększenia ilości powietrza w mieszance, co zostało wykazane w badaniach nieprezentowanych w tym artykule.

were conducted in a temperature of 20°C. The samples used for durability test were formed after 60 minutes. The compressive strength tests were conducted according to PN-EN 12350-1, and flexural strength tests – according to PN-EN 12390-5.

3. TEST RESULTS AND DISCUSSION

The test results on the effect of the amount and particle size distribution of calcareous fly ash on properties of both self-compacting concrete mixture and high performance self-compacting concrete mixture are shown in Fig. 1 and 2, respectively. On this basis it can be stated that the addition of calcareous fly ash reduces the diameter of mixture flow and prolongs the time of flow. As a result, the workability (self-compacting) of the mixture all the more deteriorates, the more ash is added. Calcareous fly ash precipitates the workability loss of mixture in time. It should be noted that despite workability loss, all of the tested mixtures with addition of ash remained self-compacting even after 60 minutes from the end of mixing. The test results confirm that the negative effect of calcareous fly ash on workability is smaller, if it has been activated by grinding (increase of the specific surface area of ash). In the presence of vast amount of superplasticizer, the effect of activation is not as strong as in case of mixtures without or with its small addition [5, 10 - 13]. At the same time, the viscosity enhanced by adding the fly ash (longer time of flow, outflow and passing ability) helps to obtain stable mixture without any signs of segregation.

The compressive strength $f_{cm,28}$ was obtained in the range of 57-67 MPa for concrete designed as self-compacting and 80-95 MPa for concrete designed as high performance self-compacting concrete. In the presence of calcareous fly ash, self-compacting concrete of strength over 60 MPa (minimum value for HPSCC) can be obtained without any relevant problems.

A decrease in mixture fluidity (reduction of the flow diameter and/or prolongation of the flow-time) results in smaller ability of the mixture to self-deaeration. Calcareous fly ash, by contributing to deterioration of the mixture self-compacting abilities (especially in the aspect of its changes in time), indirectly contributes to the increase in amount of the air in mixture, what was shown in the research not presented in this paper.

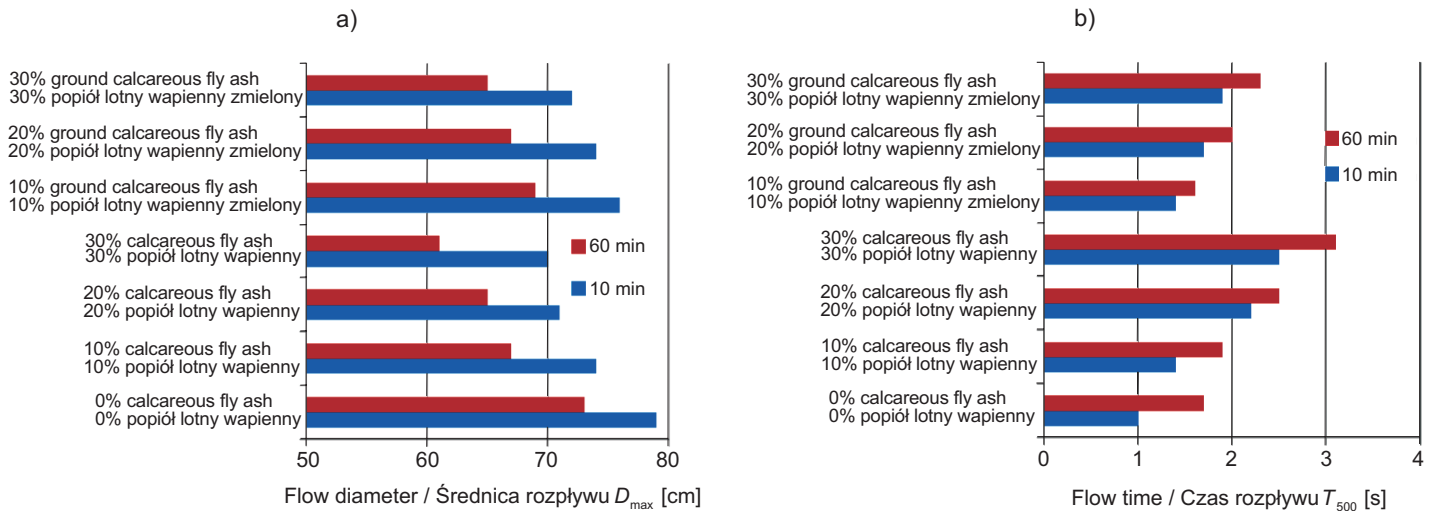


Fig. 1. The influence of calcareous fly ash content and its additional grinding on a flow diameter D_{max} and flow time T_{500} of SCC mixtures (superplasticizer content 3.5%)

Rys. 1. Wpływ ilości popiołu lotnego wapiennego i jego dodatkowego rozdrobnienia na średnicę rozplywu D_{max} i czas rozplywu T_{500} mieszanek BSZ (ilość superplastyfikatora 3,5%)

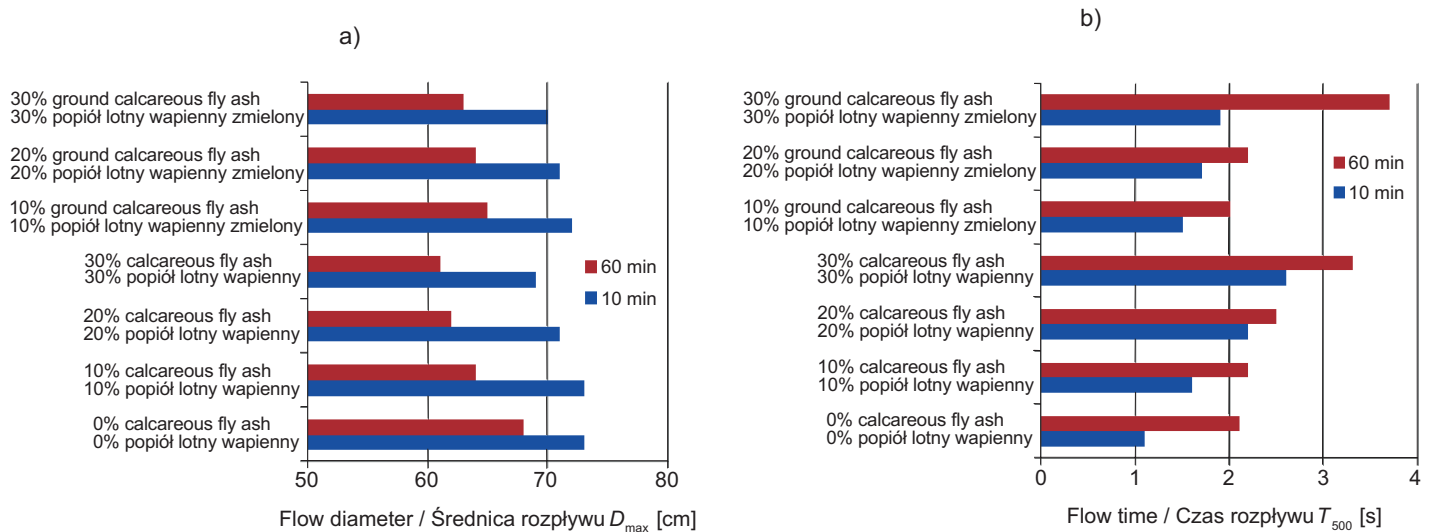


Fig. 2. The influence of calcareous fly ash content and its additional grinding on a flow diameter D_{max} and flow time T_{500} of HPSCC mixtures (superplasticizer content 3.5%)

Rys. 2. Wpływ ilości popiołu lotnego wapiennego i jego dodatkowego rozdrobnienia na średnicę rozplywu D_{max} i czas rozplywu T_{500} mieszanek WWBSZ (ilość superplastyfikatora 3,5%)

Wyniki badań wpływu cementów z popiołem lotnym wapiennym, tj. CEM II/B-W, CEM IV/B-W oraz CEM II/B-M (LL,W) na właściwości mieszanek samozagęszczalnych przedstawiono na Rys. 3. Wykazują one, że obecność popiołu lotnego wapiennego w cemencie wpływa negatywnie na urabialność mieszanki samozagęszczalnej, jednak wyraźnie w mniejszym stopniu, niż gdy

The test results on the effect of cements with calcareous fly ash – CEM II/B-W, CEM-IV/B-W and CEM II/B-M (LL,W) on properties of self-compacting concrete mixtures are shown in Fig. 3. They show that the presence of calcareous fly ash in cement affects negatively the workability of self-compacting concrete mixture, however its influence is smaller than in case when the ash is

popiół stosowany był jako dodatek do mieszanki. Wpływ ten dotyczy przede wszystkim utraty samozagęszczalności w czasie, która jest szybsza w mieszankach z cementów z popiołem niż w analogicznych mieszankach z cementu CEM I. Wpływ ilości popiołu w cemencie na płynność mieszanki jest niewielki i ujawnia się przede wszystkim, gdy do mieszanki dodana jest mała ilość superplastyfikatora. Stosując zwiększony dodatek superplastyfikatora można uzyskać mieszanki z cementów CEM II/B-W i CEM IV/B-W nieróżniące się rozplywem ani od siebie, ani od mieszanki z cementu CEM I. Mieszanki z cementu wieloskładnikowego CEM II/B-M (LL-W) charakteryzują się nieznacznie mniejszą płynnością od mieszanek z cementów zawierających tylko popiół. Należy jednak podkreślić, że mieszanki z tego cementu nie zmieniają istotnie zdolności do samozagęszczenia w czasie, nawet jeśli superplastyfikator stosowany jest w stosunkowo małej ilości.

used as the additive to the mixture. This negative effect concerns mainly the loss of self-compacting in time, which occurs faster in mixtures from cements with this ash than in analogous mixtures from cement CEM I. The influence of the amount of ash in cement on mixture fluidity is small and it is revealed only when a small amount of superplasticizer is added to a mixture. Using increased superplasticizer additive, the mixtures which not differ in the flow neither from each other nor from the mixture of CEM I cement, can be obtained from cements CEM II/B-W and CEM IV/B-W. Mixtures from multicomponent cement CEM II/B-M (LL-W) are characterized by slightly smaller fluidity than the mixtures from cements containing only ash. However, it should be stressed that mixtures from this cement do not essentially change the ability to self-compacting in time, even if the superplasticizer is used in relatively small amount.

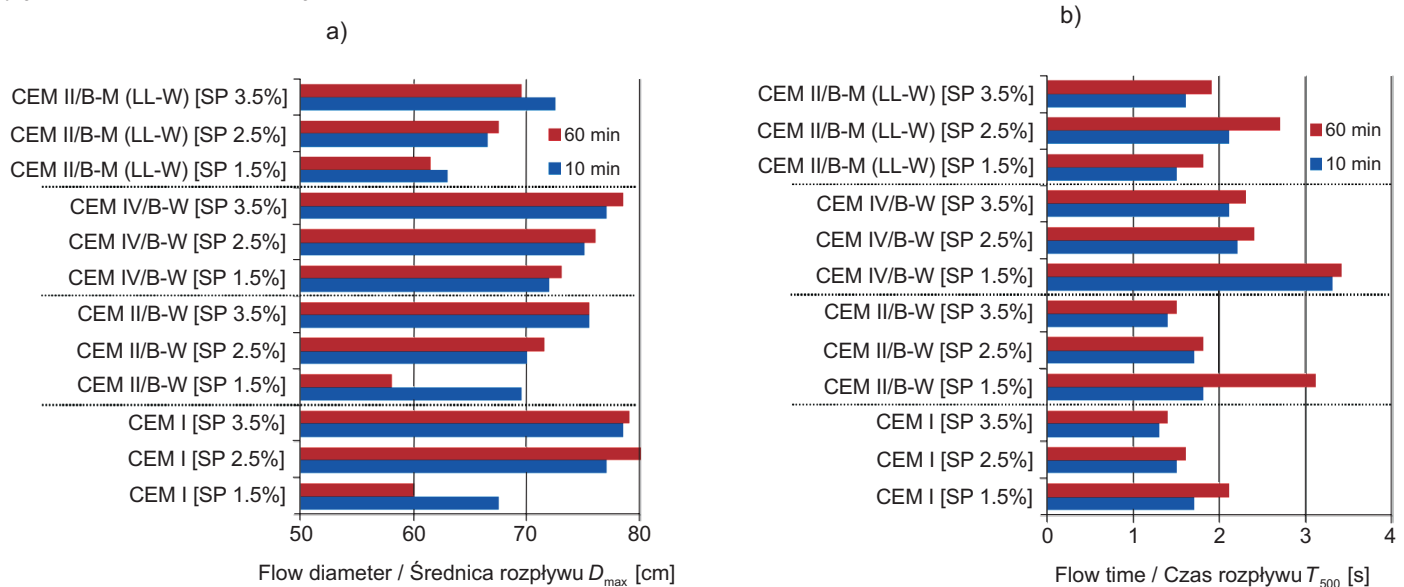


Fig. 3. The influence of cement and superplasticizer type on a flow diameter D_{max} and flow time T_{500} of SCC mixtures

Rys. 3. Wpływ rodzaju cementu i dodatku superplastyfikatora na średnicę rozplywu D_{max} i czas rozplywu T_{500} mieszanek BSZ

Wyniki badań wpływu cementów z popiołem lotnym wapiennym, tj. CEM II/A-W, CEM II/B-M (V-W) oraz CEM V/A (S-W) na właściwości samozagęszczalnych mieszanek betonu wysokowartościowego (WWBSZ) przedstawiono na Rys. 4. Wykazują one, że cementy w których popiół lotny wapienny jest stosowany w małej ilości CEM II/A-W i/lub razem z popiołem lotnym krzemionkowym CEM II/B-M (V-W) lub ze zmielonym żużlem (cement X – CEM V/A (S-W)) nie wywierają niekorzystnego wpływu na samozagęszczalność mieszanki i jej zmiany w czasie.

The test results of the effect of cements with calcareous fly ash – CEM II/A-W, CEM II/B-M (V-W) and CEM V/A (S-W) – on properties of high performance self-compacting concrete mixtures are shown in Fig. 4. They show that cements in which calcareous fly ash is used in small amount CEM II/A-W and/or with siliceous fly ash CEM II/B-M (V-W), or with ground slag (Cement X – CEM V/A (S-W)) do not exert negative effect on self-compacting concrete mixture and its changes in time. On the contrary, mixtures from such cements show better

Wręcz przeciwnie, mieszanki z tych cementów wykazują lepszą zdolność do płynięcia i odpowietrzenia od mieszanek z cementem CEM I.

ability to flow and deaeration than mixtures from cement CEM I.

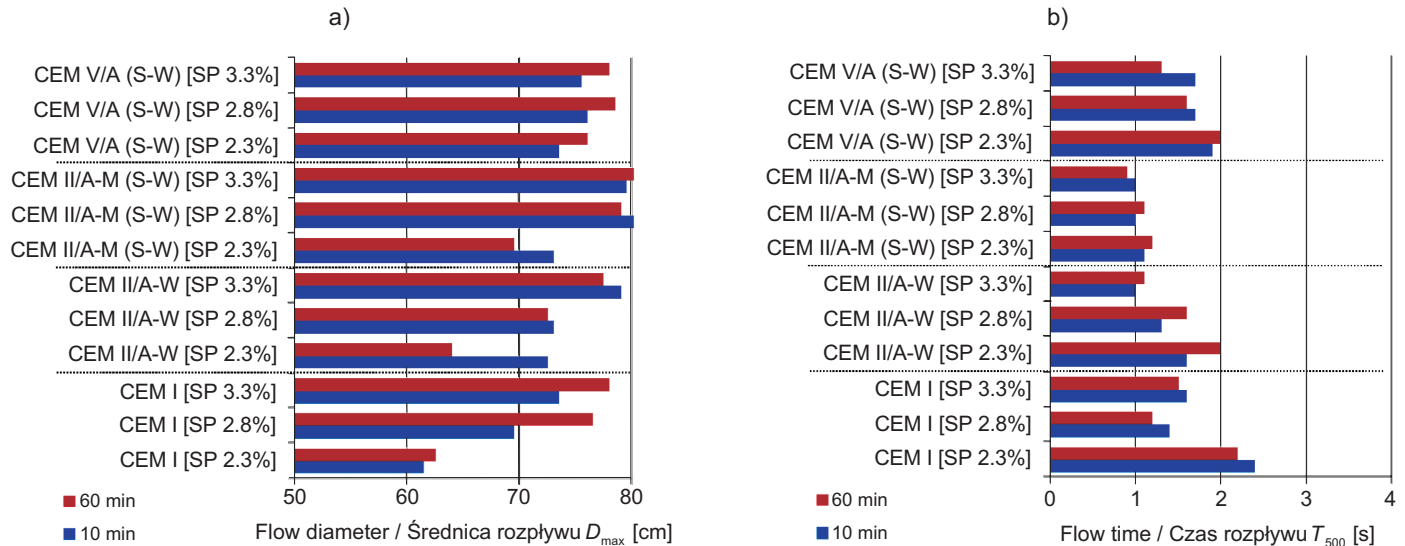


Fig. 4. The influence of cement and superplasticizer type on a flow diameter D_{max} and flow time T_{500} of HPSCC mixtures
Rys. 4. Wpływ rodzaju cementu i dodatku superplastyfikatora na średnicę rozplywu D_{max} i czas rozplywu T_{500} mieszanek WWBSZ

Wpływ zmiennej ilości dodatku popiołu lotnego wapiennego na parametry mechaniczne betonów samozagęszczalnych przedstawiono na Rys. 5. Dodatek popiołu lotnego tym bardziej zmniejsza wytrzymałość betonu na ściskanie i zginanie, im więcej popiołu wprowadzono. Efekt jest większy w przypadku betonów z popiołem nieuzdatnionym i nie jest on obserwowany w betonach zagęszczanych w sposób tradycyjny. Efekt ten jest najprawdopodobniej wynikiem gorszej samozagęszczalności mieszanek (zwiększeniem się ilości powietrza w mieszance) z większym dodatkiem popiołu, co skutkuje większą porowatością i wytrzymałością stwardniałego betonu.

Wytrzymałość na ściskanie i zginanie betonów samozagęszczalnych i jej rozwój w czasie zależy od rodzaju zastosowanego cementu, a charakter wpływu rodzaju cementu z dodatkiem PLW na wytrzymałości betonów przedstawiono na Rys. 6. Przy małej ilości superplastyfikatora wytrzymałość betonów z cementów z popiołem może być zmniejszona ze względu na słabszą zdolność ich mieszanek do samoodpowietrzenia. Należy podkreślić, że jedynie w przypadku betonów z cementu CEM IV/B-W nie uzyskano wytrzymałości na ściskanie większej niż 60 MPa.

The influence of changeable amount of calcareous fly ash additive on mechanic parameters of self-compacting concrete was show in Fig. 5. The addition of calcareous fly ash the more reduces the compressive and flexural strength of concrete, the more ash is introduced. The effect is easily noticed in case of concretes with unprocessed fly ash, however it is not observed in concretes compacted in a traditional way. This effect is probably a result of lower self-compacting of mixtures (i.e. increasing the amount of the air in mixture) with higher addition of ash, which results in higher porosity and strength of hardened concrete.

The compressive and flexural strength of self-compacting concrete and its development in time depends on the type of used cement. The kind of influence of cement type with addition of calcareous fly ash on concrete strength is shown in Fig. 6. With a small amount of superplasticizer, concrete strength of cement with ash may be reduced due to the weaker ability of its mixtures to self-deaeration. It should be noted that only in case of concrete from cement CEM IV/B-W, the compressive strength higher than 60 MPa was not obtained.

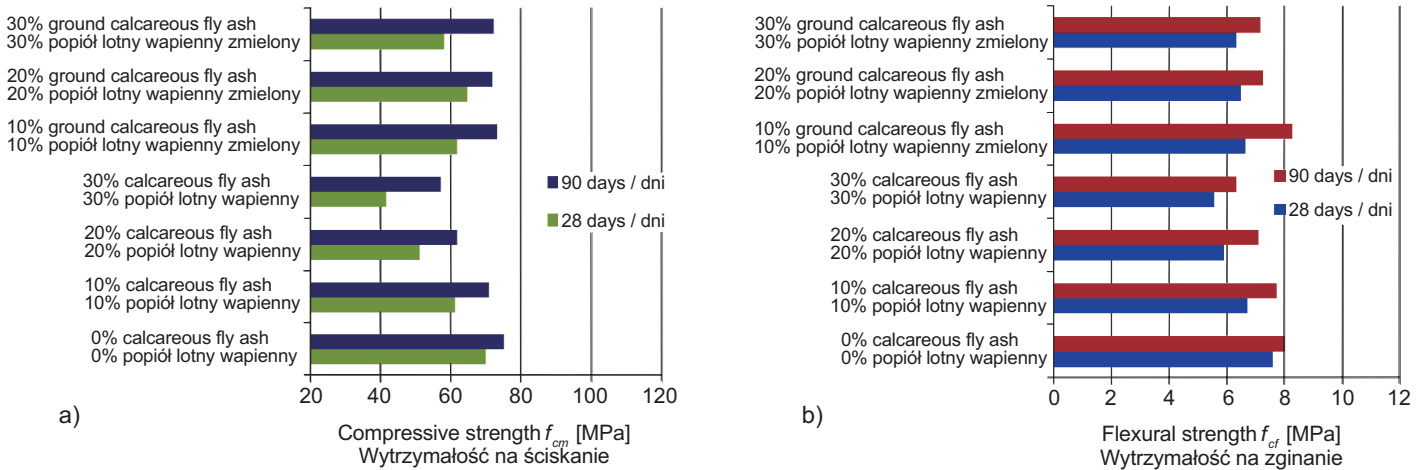


Fig. 5. The influence of dosed calcareous fly ash content in self-compacting concretes on: a) compressive strength after 28 and 90 days, b) flexural strength after 28 and 90 days

Rys. 5. Wpływ ilości dozowanego popiołu lotnego wapiennego w betonach samozagęszczalnych na: a) wytrzymałość na ściskanie po 28 i 90 dniach, b) wytrzymałość na zginanie po 28 i 90 dniach

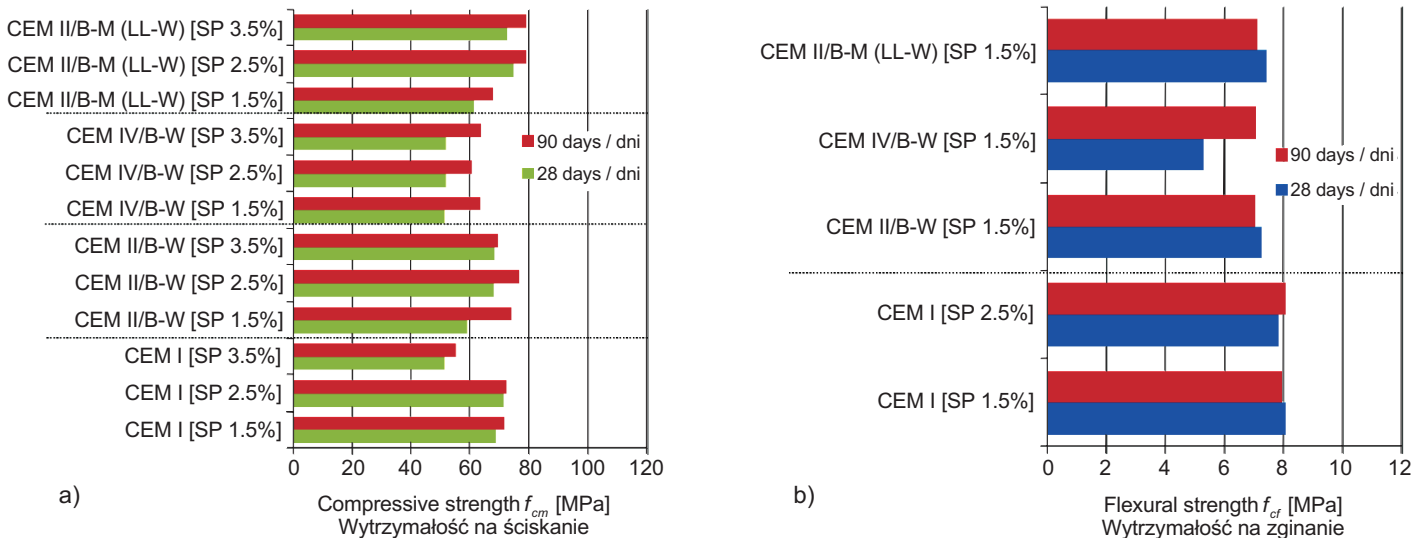


Fig. 6. The influence of cement type with dosed calcareous fly ash content in self-compacting concretes on: a) compressive strength after 28 and 90 days, b) flexural strength after 28 and 90 days

Rys. 6. Wpływ rodzaju cementu z dozowanym PLW w betonach samozagęszczalnych na: a) wytrzymałość na ściskanie po 28 i 90 dniach, b) wytrzymałość na zginanie po 28 i 90 dniach

Wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,28}$ uzyskanych w badaniach betonów mieści się w przedziale 80 - 95 MPa i spełnia wymagania wytrzymałości stawiane betonom wysokowartościowym (Rys. 7). Wytrzymałość betonów z cementów popiołowych nie odbiega od wytrzymałości betonu z CEM I, a wytrzymałość betonu z cementu CEM V/A (S-W) jest o około 10% mniejsza. Badania nasiąkliwości betonu wykonano według normy PN-88/06250.

Compressive strength $f_{cm,28}$ obtained in tests on concrete is in the range of 80-95 MPa and fulfils the strength requirements for high performance concrete (Fig. 7). The strength of concrete from ash cement does not differ from strength of concrete from CEM I and the strength of concrete from cement CEM V/A (S-W) is about 10% smaller. Absorption tests of concrete were conducted according to PN-88/06250. Cubic samples with dimensions of

Próbki sześciennie o wymiarach $150 \times 150 \times 150$ mm przygotowano jak do badań wytrzymałościowych, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12390-2. Wpływ ilości dozowanego popiołu lotnego wapiennego oraz rodzaju cementu z dozowanym popiołem lotnym wapiennym w betonach samozagęszczalnych przedstawiono na Rys. 8.

$150 \times 150 \times 150$ mm were as prepared for strength test according to PN-EN 12390-201. The effect of the amount of used calcareous fly ash and a type of cement with dosed calcareous fly ash in self-compacting concrete was shown in Fig. 8.

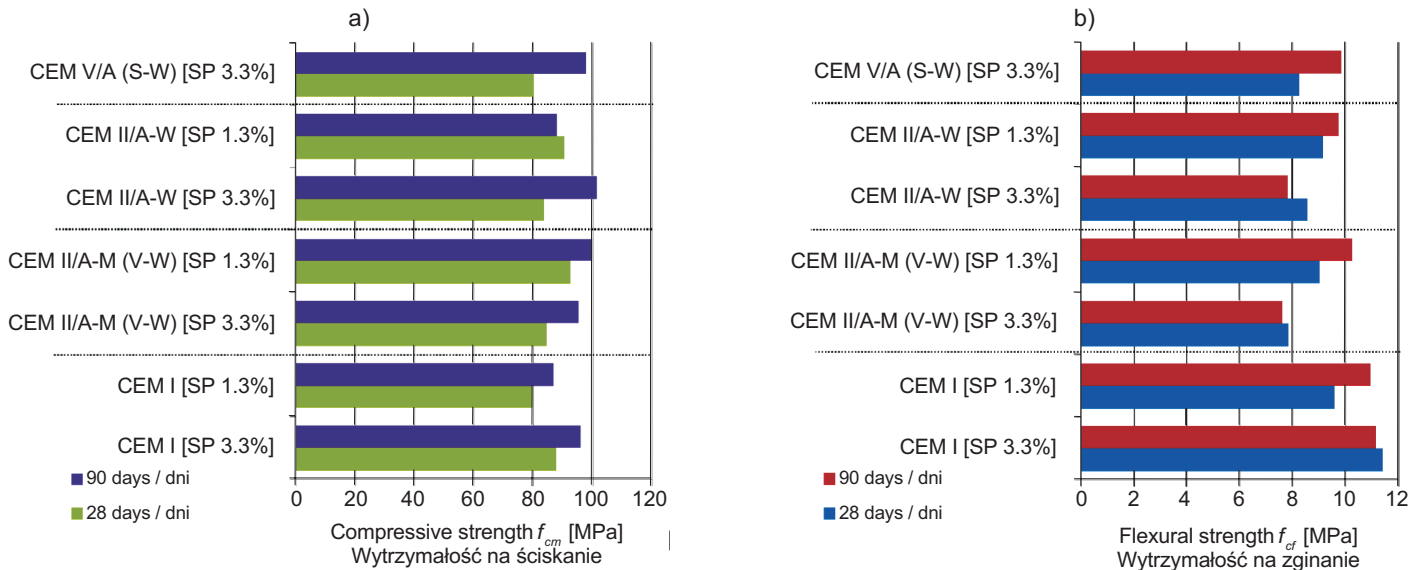


Fig. 7. The influence of cement type with dosed calcareous fly ash content in HPSCC on: a) compressive strength after 28 and 90 days, b) flexural strength after 28 and 90 days

Rys. 7. Wpływ rodzaju cementu z dozowanym PLW w WWBSZ na: a) wytrzymałość na ściskanie po 28 i 90 dniach, b) wytrzymałość na zginanie po 28 i 90 dniach

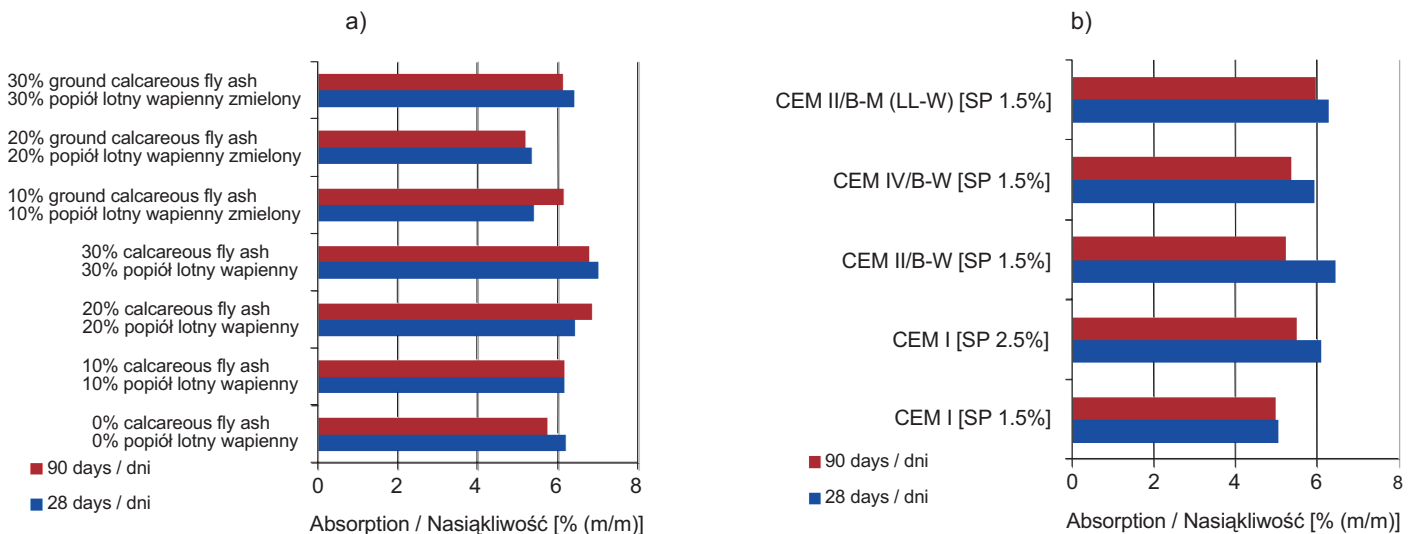
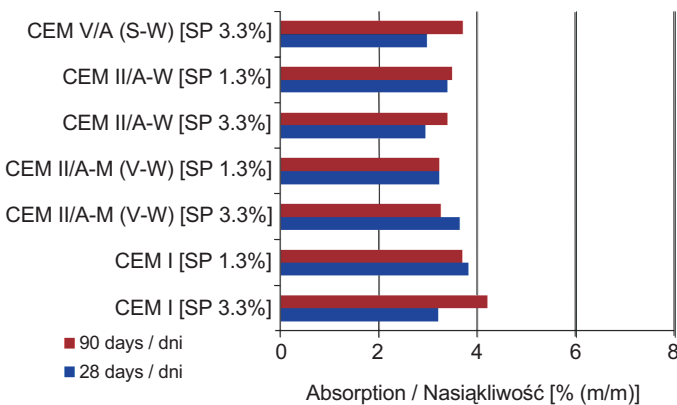


Fig. 8. The influence of dosed calcareous fly ash content (a) and cement type with dosed calcareous fly ash (b) in SCC on absorption after 28 and 90 days

Rys. 8. Wpływ ilości dozowanego PLW (a) oraz rodzaju cementu z dozowanym PLW (b) w BSZ na nasiąkliwość po 28 i 90 dniach

Nasiąkliwość betonów wzrasta wraz ze wzrostem zawartości niemielonego PLW jako dodatku typu II w betonie samozagęszczalnym. W przypadku dozowania zmielonego PLW, nasiąkliwość spadła w porównaniu do betonu niezawierającego PLW, ale utrzymywała się powyżej 5%. Podobna sytuacja zaszła w przypadku betonów z cementów z dodatkiem PLW typu I. Należy zaznaczyć, że betony wzorcowe charakteryzowały się zbliżoną wartością nasiąkliwości, nie mniejszą niż 5%.

Lepszy wynik otrzymuje się w przypadku nasiąkliwości wysokowartościowych betonów samozagęszczalnych z cementów z popiołem lotnym wapiennym jako dodatkiem typu I, co przedstawiono na Rys. 9. Nasiąkliwość betonów z cementem wzorcowym oraz cementami modyfikowanymi popiołem lotnym wapiennym była w przedziale 3% - 4%, co jest wynikiem bardzo dobrym.



Badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem w stwardniałym betonie wykonano według normy PN-EN 12390-8. Próbkę sześcienną o wymiarach 150 × 150 × 150 mm przygotowano jak do badań wytrzymałościowych, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 12390-2. Wpływ rodzaju cementu z dozowanym popiołem lotnym wapiennym typu I w zwykłych i wysokowartościowych betonach samozagęszczalnych na głębokość penetracji wody po 28 dniach dojrzewania przedstawiono na Rys. 10.

Wartości głębokości penetracji wody badanych betonów samozagęszczalnych jest niższa w przypadku zastosowania analizowanych cementów z dodatkiem PLW. Podobna sytuacja wystąpiła w przypadku dozowania cementów z PLW do wysokowartościowych betonów samozagęszczalnych. Modyfikowane popiołem lotnym wapiennym cementy w wysokowartościowych betonach samozagęszczalnych charakteryzują się mniejszą głębokością penetracji, za wyjątkiem betonu z cementu CEM V/A (S-W).

Absorption of concrete increases with bigger amount of unground calcareous fly ash as a type II additive in self-compacting concrete. In case of applying ground calcareous fly ash, the absorption decreased compared with concrete without this type of ash, but was maintained above 5%. A similar situation occurred in case of concrete from cement with addition of a calcareous fly ash type I. It should be noted that reference concrete was characterized by similar value of absorption, not less than 5%.

A better result is obtained in case of absorption of high performance self-compacting concrete from cement with calcareous fly ash type I, which is shown in Fig. 9. The absorption of concrete with reference cement and cement modified with calcareous fly ash was in the range of 3% - 4%, which is a very good result.

Tests on water penetration depth under pressure in hardened concrete were conducted according to PN-EN 12390-8. Cubic samples with dimensions of 150 × 150 × 150 mm were prepared as for strength tests according to PN-EN 12390-2. The effect of a cement type with dosed calcareous fly ash type I in regular and high performance self-compacting concrete on water penetration depth after 28 days of curing is shown in Fig. 10.

Fig. 9. The influence of cement type with dosed calcareous fly ash on absorption of HPSCC after 28 and 90 days

Rys. 9. Wpływ rodzaju cementu z dozowanym popiołem lotnym wapiennym na nasiąkliwość WWBSZ po 28 i 90 dniach

The values of water penetration depth of tested self-compacting concretes are lower in case of analyzed cements with calcareous fly ash. A similar situation occurred in case of adapting cements with calcareous fly ash to high performance self-compacting concrete. Cements modified with calcareous fly ash in order to obtain high performance self-compacting concrete are characterized by smaller penetration depth, with the exception of concrete from cement CEM V/A (S-W).

4. CONCLUSIONS

The presented research shows the possibility of using calcareous fly ash in self-compacting and high performance self-compacting concrete, both as a type I and type II additive. The presence of calcareous fly ash can deteriorate self-compacting of a mixture, especially if superplasticizer up to 1.5% was used. Such an effect is smaller if ash is activated by grinding which increases its specific surface area or if it is used as a cement constituent. Moreover, the presence of ash increases stability (resistance to segregation) of self-compacting mixture.

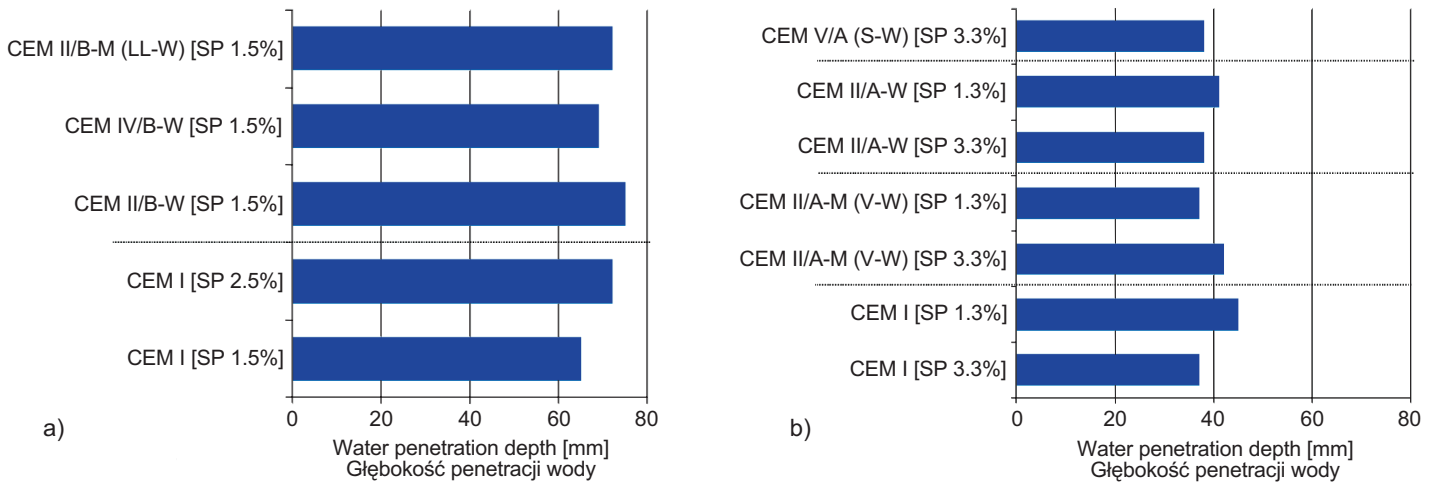


Fig. 10. The influence of cement type with dosed calcareous fly ash type I on water penetration depth after 28 days of curing of: a) SCC, b) HPSCC

Rys. 10. Wpływ rodzaju cementu z dozowanym PLW typu I na głębokość penetracji wody po 28 dniach dojrzewania: a) BSZ, b) WWBSZ

4. WNIOSKI

Zaprezentowane badania wykazują możliwość stosowania popiołu lotnego wapiennego do betonów samozagęszczalnych i wysokowartościowych betonów samozagęszczalnych, zarówno jako dodatek typu I oraz jako dodatek typu II. Obecność popiołu lotnego wapiennego może pogarszać samozagęszczalność mieszanki, zwłaszcza gdy do jej uzyskania stosowano dozowanie superplastyfikatora do 1,5%. Efekt ten jest mniejszy, gdy popiół zostaje uzdatniony przez przemiał, co zwiększa jego powierzchnię właściwą lub gdy jest stosowany jako składnik cementu. Ponadto obecność popiołu poprawia stabilność (odporność na segregację) mieszanki samozagęszczalnej.

Przy dodatku popiołu do betonu większym niż 20% problemem może być zwiększona utrata urabialności mieszanki w czasie. Dzięki odpowiednio dobranej, dużej ilości superplastyfikatora, w badaniach uzyskano mieszanki z 30% dodatkiem popiołu, spełniające warunki samozagęszczalności po 60 min. W przypadku stosowania cementów z popiołem lotnym wapiennym problemy z samozagęszczalnością są mniejsze i mogą wystąpić, gdy ilość popiołu w cemencie jest większa niż 30% (CEM IV/B-W).

Wytrzymałość na ściskanie i zginanie betonów z dodatkiem popiołów lotnych wapiennych typu I oraz typu II nie odbiega istotnie od wytrzymałości analogicznych betonów z cementu CEM I, jeśli klasa tych cementów jest zbliżona. W początkowym okresie dojrzewania obecność popiołu lotnego wapiennego spowalnia rozwój wytrzymałości na

If the ash additive to concrete is higher than 20%, the increased loss of mixture workability in time could be a problem. Due to appropriately selected, big amount of superplasticizer, mixtures with 30% of ash additive were obtained and they met the self-compacting requirements after 60 minutes. In case of cements with calcareous fly ash, the problems with self-compacting are lower and may occur if the amount of ash in cement is higher than 30% (CEM IV/B-W).

The compressive and flexural strength of concrete with addition of calcareous fly ash type I and type II does not differ significantly from strength of analogous concretes from cement CEM I, if the class of cements is similar. In the initial stage of curing the presence of calcareous fly ash slows down a development of compressive strength. Tests on absorption and water penetration depth showed similar properties of concrete modified with cements with addition of calcareous fly ash in the group of self-compacting concretes and separately in the group of high performance self-compacting concretes. The investigation confirms the possibility of using high fly ash multicomponent cements X, containing calcareous fly ash, for new generation of concrete.

ACKNOWLEDGEMENT

This paper was co-financed by the European Union from the European Regional Development Fund No. POIG 01.01.02-24-005/09.

ściskanie. Badania nasiąkliwości i głębokości penetracji wody wykazały zbliżone właściwości betonów modyfikowanych cementami z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego w grupie betonów samozagęszczalnych i osobno w grupie wysokowartościowych betonów samozagęszczalnych. Badania potwierdzają możliwość stosowania wysokopopiołowych, wieloskładnikowych cementów X, zawierających popiół lotny wapienny, do betonów nowej generacji.

INFORMACJE DODATKOWE

Praca była współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, nr. projektu POIG .01.01.02-24-005/09.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Giergiczyński Z.*: Rola popiołów lotnych wapiennych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2006
- [2] *Garbacik A., Giergiczyński Z., Glinicki M.A., Gołaszewski J.*: Założenia Projektu Strukturalnego Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka „Innowacyjne spoiwa cementowe i betony z wykorzystaniem popiołu lotnego wapiennego”, V Konferencja „Energia i Środowisko w technologiach materiałów budowlanych, ceramicznych, szklarskich i ogniotrwałych, Warszawa – Opole, 2010, 173 - 185
- [3] *Grzeszczyk S., Lipowski G.*: Popioły lotne i ich wpływ na reologię i hydratację cementów. Oficyna Wydawnicza, Opole, 2002
- [4] *Yamei Z., Wei S., Li S.*: Mechanical properties of high performance concrete made with high calcium high sulfate fly ash. *Cement and Concrete Research*, **27**, 7, 1997, 1093 - 1098
- [5] *Wei S., Handong Y., Binggen Z.*: Analysis of mechanism on water-reducing effect of fine ground slag, high-calcium fly ash, and low-calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*, **33**, 8, 2003, 1119 - 1125
- [6] *Tsimas S., Moutsatsou-Tsima A.*: High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives. *Cement and Concrete Composites*, **27**, 2, 2005, 231 - 237
- [7] *Yazici H.*: The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, **22**, 4, 2008, 456 - 462
- [8] *Namagga C., Atadero R.A.*: Optimization of fly ash in concrete: High lime fly ash as a replacement for cement and filler material. *World of Coal Ash Conference (WOCA)*, Lexington, KY, USA, 2009, www.flyash.info
- [9] *Gołaszewski J., Giergiczyński Z., Cygan G., Dziuk D.*: The effect of high calcium fly ash on the formation of cement properties with its participation. 13th International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, 2011
- [10] *Gołaszewski J., Ponikiewski T., Kostrzanowska A.*: Wpływ popiołu lotnego wapiennego na właściwości reologiczne mieszanek na spoiwach cementowych. XVII Międzynarodowa Konferencja „Popioły z energetyki”, Uzdatnianie popiołów z energetyki, Warszawa, 2010, 177 - 200
- [11] *Gołaszewski J., Ponikiewski T., Kostrzanowska A.*: The influence of high calcium fly ash on rheological properties of cement mixtures. *Non-Traditional Cement & Concrete IV. Proceedings of the International Conference*, Brno University of Technology, 2011, 410 - 419
- [12] *Ponikiewski T., Gołaszewski J.*: Kształtowanie samozagęszczalności mieszanek betonowych na bazie cementów z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego. *Cement Wapno Beton*, **79**, 4, 2012, 233 - 242
- [13] *Ponikiewski T., Gołaszewski J.*: Popiół lotny wapienny składnikiem betonów nowej generacji. XVIII Konferencja Popioły z Energetyki, Zakopane, Ekotech, Szczecin, 2011, 89 - 106
- [14] *Szwabowski J., Gołaszewski J.*: Technologia betonu samozagęszczalnego. *Polski Cement*, Kraków, 2010
- [15] *Gołaszewski J., Kostrzanowska A., Ponikiewski T.*: Właściwości reologiczne cementów portlandzkich wieloskładnikowych z dodatkiem popiołów lotnych wapiennych, *Materiały Budowlane*, **5**, 2012, 40 - 43
- [16] *Gołaszewski J., Kostrzanowska A., Ponikiewski T., Antonowicz G.*: Wpływ popiołu lotnego wapiennego na właściwości reologiczne zaczynów i zapraw cementowych. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **12**, 1, 2013, 99 - 112
- [17] *Czopowski E., Łażniewska-Piekarczyk B., Rubińska-Jończy B., Szwabowski J.*: Właściwości betonów na cementach zawierających popiół lotny wapienny. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **12**, 1, 2013, 31 - 40