

Wpływ wielkości strat prażenia popiołu lotnego krzemionkowego na parametry reologiczne betonów samozagęszczalnych

Effect of the fly ash loss on ignition value on the rheological parameters of self-compacting concrete

1. Wstęp – popiół lotny na tle innych dodatków do betonu samozagęszczalnego

W Polsce są obecnie dostępne trzy rodzaje dodatków do betonu, które spełniają kryteria stosowalności w przypadku betonów samozagęszczalnych (BSZ), o normalnej wytrzymałości. Są one następujące: krzemionkowy popiół lotny (PL), granulowany żużel wielkopiecowy (GŻ) oraz mączki kamienne (MK), powstające na przykład jako odpad przy produkcji kruszyw łamanych. MK, poza wapienną, są dostępne jednak w zbyt małych ilościach aby można było je wykorzystywać na większą skalę. Mączka wapienna (MW), która jest bardzo chętnie stosowana jako dodatek w wielu krajach na świecie (2), jest w Polsce nieco łatwiej dostępna, ale wadą tego dodatku jest spora nasiąkliwość i niewielka tylko reaktywność chemiczna, co powoduje zmniejszenie wytrzymałości betonu przy większej zawartości tego składnika (18). Wadą MW i GŻ jest konieczność mielenia, co zwiększa znacznie ich koszt. Dodatkowo, według najnowszych danych (8), niemal cały dostępny w Polsce żużel jest już w tej chwili zagospodarowany w przemyśle budowlanym, a więc z odpadu przemysłowego stał się poszukiwanym materiałem uzupełniającym. Należy więc w niedalekiej przyszłości oczekiwać wzrostu cen tego materiału. Według tych samych danych spore rezerwy mamy w przypadku PL krzemionkowych: dostępnych jest około 6-7 mln t/rok, a w przemyśle budowlanym zużywa się obecnie około 1.5 mln t/rok. Co więcej, materiał ten jako dodatek do betonu może być zastosowany bez uszlachetniania (np. mielenia). Tak więc należy oczekiwać, że PL będzie stosowany w Polsce jeszcze powszechniej niż obecnie.

Na tym tle należy postawić pytanie w jakim stopniu można stosować krzemionkowy popiół lotny do produkcji BSZ. Betony te są bowiem wykorzystywane w budownictwie coraz chętniej, a ich specyfika wymaga stosowania do ich produkcji często znacznych ilości dodatków. Dość powiedzieć, że największe chyba obecnie zastosowanie tego betonu w praktyce (wewnętrzna obudowa tunelu Gothard Base Tunnel w Szwajcarii) będzie wymagało użycia na około 1,1 mln m³ BSZ w ciągu 8 lat (7), a spośród omówionych w pracy (2) sześćdziesięciu ośmiu zastosowań BSZ aż w 66 przy-

1. Introduction – fly ash vs. other additives to self-compacting concrete

Nowadays, there are three types of concrete additives used in Poland which meet the requirements of applicability for ordinary self-compacting concrete, namely pulverized fuel ash (PL=PFA), ground granulated blast furnace slag (GGBFS=GŻ) and stone meals (MK)– wastes from crushed mineral aggregate production. Stone meal, apart from the limestone one, is available only in negligible amount. Limestone meal (MW), readily used all over the world (2), occurs as an additive in Poland, however it exhibits fairly high absorbability and low chemical activity. This results in significant compressive strength lowering at higher percentage of limestone component (18). On the other side, the necessity of fine grinding is the serious disadvantage of both limestone and granulated blast furnace slag utilization. Thus, the cost of fine component increases significantly. Moreover, recently in Poland (8) almost all slag production is disposed in building as valuable accessory material. Therefore in the nearest future one should expect the increasing price of this material. The same source give the information about huge reserves of fly ash. In case of siliceous fly ash the annual output is about 6-7 millions t/year; annual consumption in building is around 1,5 million t. Moreover, this material can be introduced as an additive to concrete without additional processing (for example – grinding). Therefore one should expect the growing and growing implementation of fly ash.

Taking into account the remarks presented above one should consider the scale of the fly ash use in the self-compacting concrete production. The SCCs become more and more common in building technology; significant dosage of mineral additives is required in order to achieve their specific properties. One should mention that in one of the biggest constructions where SCC is used (inside lining of Gothard Base Tunnel, Switzerland) about 1,1 million m³ SCC mixture will be supplied within 8 years of works (7). Among the 68 application of SCC reported in (2), the concrete additives were used in 66 as the main stabilizers of rheological properties. In half of these cases the additives were supplied by use of viscosity

padkach wykorzystano dodatki mineralne jako główne stabilizatory właściwości reologicznych. W połowie spośród omawianych w tej pracy przypadków wpływ dodatków uzupełniono domieszkami zmieniającymi lepkość (Viscosity Modifying Agents - VMA). Tylko w dwóch przypadkach nie zastosowano dodatków mineralnych ograniczając się do cementu (CEM II) i domieszki VMA, a w ponad połowie przypadków ilość dodatków przekraczała 30% masy spoiwa. Wynika stąd, że rozwój BSZ będzie wiązał się ze znacznym wzrostem zużycia dodatków mineralnych do betonu. Dzieje się tak, gdyż wytwarzanie BSZ wymaga zastosowania znacznie większych ilości spoiwa niż w przypadku betonu o normalnej ciekłości (BNP). Na podstawie prac (2, 14) można stwierdzić, że zawartości spoiwa w BSZ zawierają się zwykle w przedziale 425-550 kg/m³ w przypadku kruszyw otoczkowych i 450-600 kg/m³ w przypadku łamanych, ze względu na konieczność zastosowania niskiego W/S (typowo: 0.27-0.43) i podniesiony punkt piaskowy (zawartość kruszywa grubego nie przekracza zwykle 350 dm/m³). W związku z tym, aby utrzymać ilość cementu na rozsądnym poziomie, niezbędnym jest zastosowanie znacznych ilości dodatków mineralnych. Zastosowanie dodatkowo VMA do stabilizacji lepkości według Domone'a (2) pociąga za sobą bowiem możliwość zmniejszenia zawartości spoiwa średnio tylko o 25 kg/m³. Domieszka ta jest więc w gruncie rzeczy stosowana w praktyce tylko pomocniczo w celu zapobiegania wydzielaniu mlecza na powierzchnię wykonanego elementu i zmniejszenia ryzyka sedymentacji kruszywa grubego.

Stosowanie PL jako dodatku do BSZ wiąże się jednak z kilkoma niedogodnościami. Między innymi we wcześniejszych badaniach (17) okazało się, że maksymalna możliwa zawartość krzemionkowego popiołu w BSZ bywa zbyt mała (lepkość mieszanek wzrastała powyżej dopuszczalnej granicy). W innym przypadku (16) na skutek interakcji PL z superplastifikatorem (SP), przy zawartości tego pierwszego na poziomie około 35% masy spoiwa, doszło do spienienia mieszanki. W celu zbadania jakie czynniki mają wpływ na parametry reologiczne mieszanek BSZ z PL i jaka jest maksymalna dopuszczalna zawartość popiołu zdecydowano się na przeprowadzenie serii doświadczeń.

2. Modele reologiczne opisujące zachowanie się mieszanek BSZ

Parametry reologiczne mieszanki betonowej samozagęszczalnej można opisywać przy użyciu dwóch modeli: Bingham'a i Herschela-Bulkley'a (9, 13). Model Bingham'a przedstawia się następująco:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \text{ lub w jednostkach aparatury } M = g_0 + h \omega$$

zaś model Herschela-Bulkley'a:

$$\tau = \tau_0 + (\eta \dot{\gamma})^{1/m} \text{ lub w jednostkach aparatury } M = g_{HB} + h_{HB} \omega^n$$

We wzorach tych: $\dot{\gamma}$, ω – prędkość ścinania, τ , g – naprężenie styczne (ścinające), η , h – lepkość plastyczna. Graficzne przedstawienie tych modeli pokazano na rys. 1.

enhancing admixtures (Viscosity Modifying Agents - VMA). Only in 2 cases the cement with no additive but with VMA was used. In half of the cases the dosage of additive did not exceed 30% by mass of binder. This leads to the conclusion that the further SCC development is strongly related with the increasing use of mineral additions. Obviously, it happens because significantly higher volume of binder is required in SCC production than for concrete of normal fluidity. According to (2, 14) the amount of binder in SCC is usually in the range of 425-550 kg/m³ for river aggregate and 450-600 kg/m³ for crushed aggregate, because of low W/S ratio necessary (0,27 – 0, 43) and higher sand point (coarse aggregate not exceeding usually 350 dm/m³). Therefore for rational cement content, a substantial amount of mineral addition is needed; application of VMA as viscosity co-stabilizer brings about the reduction of binder dosage ranging hardly 25 kg/m³. In practice the use of chemical admixture is of the auxiliary character; it prevents bleeding and risk of segregation of coarse aggregate grains.

However, the application of fly ash in SCC production is connected with some inconveniences. As it has been shown in earlier studies (17) the maximum applicable dosage appears too low (the viscosity of fresh mixture overpass the upper limit). In the other case (16) the interaction between PFA and superplasticizer (SP) at PFA dosage about 53% by mass of binder led to foam formation. In order to investigate the relationship between the rheological properties and other parameters of SCC mixtures with PFA and furthermore, to find the upper limit of PFA dosage, the research project reported hereby was proposed.

2. Models for SCC mixture rheology

The rheological parameters of SCC mixture can be found with help of the two models: Bingham model and Herschel – Bulkley one (9, 13). The Bingham model can be presented as follows:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \text{ or in the units attributed to measuring device: } M = g_0 + h \omega$$

The Herschel-Bulkley model is given by the function:

$$\tau = \tau_0 + (\eta \dot{\gamma})^{1/m} \text{ or in the units attributed to measuring device: } M = g_{HB} + h_{HB} \omega^n$$

Where: $\dot{\gamma}$, ω – shear rate, τ , g – shear stress, η , h – plastic viscosity. These models are shown in Figure 1.

Bingham model is determined by the two parameters: yield shear stress (denoted as τ_0 or g) and plastic viscosity (η or h); Herschel-Bulkley model – by three parameters: yield shear stress, nonlinear viscosity and exponent (n). Bingham model is simple – there is no parameter (n) which cannot be transformed directly to physical units. That is why the results are usually plotted in binary variable system (15). In some cases, particularly as the SCC is concerned, the model concept brings about the interpretational difficulties. Then the Herschel-Bulkley model can be taken into account (9, 15).

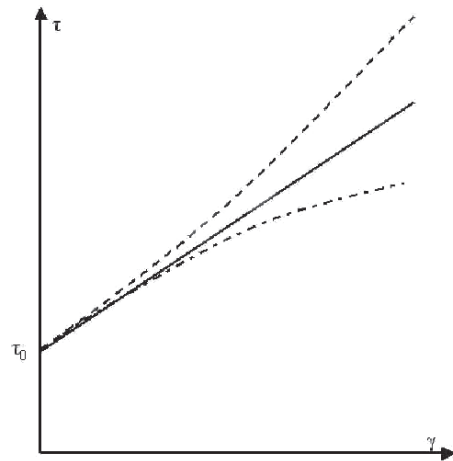
Model Bingham opisywany jest przez dwa parametry: granicę płynięcia (oznaczane jako τ_0 lub g) oraz lepkość plastyczną (η lub h), a model Herschela-Bulkley'a – przez trzy: granicę płynięcia, lepkość nieliniową oraz wykładnik potęgowy m . Model Bingham jest prostszy i nie zawiera trudnego do bezpośredniej interpretacji w jednostkach fizycznych parametru n , stąd też powszechnie wyniki przedstawia się w układzie dwóch zmiennych z tego modelu (15). Niekiedy, a w szczególności w przypadku BSZ, podejście takie stwarza kłopoty interpretacyjne. Można więc w takim przypadku wybrać do interpretacji również model Herschela-Bulkley'a (9, 15).

3. Wpływ krzemionkowego popiołu lotnego na parametry reologiczne mieszanki betonowej

Literatura dotycząca omawianego zagadnienia jest dość obszerna (na przykład zestawienie zawarte w (6)), lecz większość dotychczas przeprowadzonych badań dotyczyła zaczynów i betonów normalnej ciekłości, a BSZ pod względem reologicznym różnią się od nich znacznie (większa lepkość plastyczna i niższa granica płynięcia - na przykład (20)), więc przewidywanie właściwości BSZ przez analogię do betonów zwykłych nie zawsze daje zadowalające wyniki. Dzieje się tak ze względu na podane wcześniej różnice w składzie mieszanek obydwu typów: BSZ ma znacznie niższe W/S oraz na ogół więcej wody i SP, a mniej kruszywa, szczególnie grubego (21). SP stosowany w BSZ najczęściej ma przy tym inną bazę chemiczną niż upłyniacze dodawane do betonów zwykłych (2).

Spośród dostępnych w Polsce do użycia w betonie rodzajów PL (krzemionkowy, wapienny, fluidalny), do BSZ nadaje się właściwie tylko krzemionkowy, ze względu na kulisty kształt ziaren (4). W przypadku tych mieszanek jest to ważne, gdyż ich lepkość jest na ogół duża, a taki kształt ziaren może ją nieco zmniejszyć. Dodatkowo krzemionkowy PL, w przeciwieństwie do wapiennego, powoduje najczęściej zmniejszenie wodożądności spoiwa, to jest wzrost ciekłości mieszanki przy stałej zawartości wody i superplastyfikatora (SP) (1), co z oczywistych względów predestynuje ten rodzaj popiołu do stosowania w BSZ. Z tego względu w programie badań założono stosowanie tego popiołu.

Do pozostałych ważnych właściwości PL należą: skład chemiczny, powierzchnia właściwa i straty prażenia. Jeżeli chodzi o skład chemiczny, to jego wpływ na parametry reologiczne zaczynów może być bardzo różnorodny (6). W przypadku mieszanki betonowej wpływ zaczynu jest jednak dość ograniczony (5), więc czynnik ten uznano za stosunkowo mniej ważny. Zwiększenie powierzchni właściwej i strat prażenia z kolei powoduje na ogół zmniejszenie ciekłości mieszanek betonowych (1, 5, 17). Spośród tych czynników za ważniejszy uznano straty prażenia, zwłaszcza że planowano stosowanie typowych, łatwo dostępnych w regionie małopolskim popiołów. Po zbadaniu rynku okazało się, że można otrzymać popioły – o znacznie różniących się stratach prażenia (różnica 9 krotna) niż powierzchni właściwej (różnica około 1,5 krotna) (11). Z tego względu należało oczekiwać znacznie więk-



Rys. 1. Modele reologiczne BSZ. Linia ciągła – model Bingham, linia przerywana – model Herschela-Bulkley'a (dolna krzywa $n < 1$)

Fig. 1. Rheological models for SCC. Continuous line – Bingham model, dashed line – Heschel-Bulkley model (lower curve $n < 1$)

3. Effect of siliceous fly ash on the rheological parameters of concrete mixture

The reports concerning this topic are numerous (see the references given in (6)). However, most of research works deals with the pastes and concretes of normal consistency. SCCs significantly differ from the ordinary concretes, as the rheological properties are concerned (higher plastic viscosity, lower yield shear stress value, for example (20)). Therefore the prediction of concrete behavior analogously as for the ordinary concrete is not possible. It can be derived from different composition. SCC has W/S significantly lower and usually more water and superplasticizer at lower aggregate (particularly coarse fraction) content (21). Superplasticizers used for SCC are of the other chemical character than the water reducers used for ordinary concrete (2).

Among the fly ash available in Poland (siliceous, lime, fluidal) only the siliceous can be used in SCC production, because of the spherical shape of grains (4). This is of importance in case of SCC mixture, because its viscosity is high and spherical grains could reduce it in some extent. Moreover, the siliceous fly ash, unlike the lime one, often brings about the lowering of water demand, that is the rise of mix fluidity at constant water and superplasticizer content (1). Obviously, such fly ash can be predestinated as a SCC component. For this reason this type of fly ash was taken into account in research work presented hereby.

Chemical composition of fly ash, specific surface and loss on ignition are the other significant parameters. The effect of chemical composition on rheology of cement – fly ash paste can be different (see (6)). However, in case of concrete mixture the effect of paste can be substantially limited (5), so this is not specially valid. The specific surface and l.o.i. increase brings about generally the reduction of fluidity of mix (1, 5, 17). Among these two factors the loss on ignition value has been found as more important. This is related with problem of disposal of the typical fly ash from different sources in Małopolska. From the analysis of the fly ash offered it

szych zmian właściwości reologicznych wywołanych różnicą strat prażenia. Co więcej, dostawcy popiołu podają uśrednione wartości zarówno składu chemicznego jak i powierzchni właściwej, a w przypadku strat prażenia podawany jest najczęściej zakres zmian, w którym dolna granica od górnej różni się około dwukrotnie. Oznacza to, że wielkość ta może zmieniać się w szerokim zakresie w różnych dostarczanych partiach. W opisywanym w pracy (10) przypadku zmiana dotyczyła przede wszystkim zawartości SO_3 (3,5-krotnie), strat prażenia (ok. 100%), gęstości (25%) oraz fazy szklistej (5%).

4. Program i wyniki badań oraz identyfikacja modelu reologicznego wykonanych BSZ

Głównym celem badań było sprawdzenie jak zmieniają się parametry reologiczne BSZ wraz ze zwiększeniem dodatku popiołu wykazującego różne straty prażenia (tablica 1). W celu ograniczenia wpływu pozostałych czynników wybrano popioły o możliwie zbliżonym składzie chemicznym i powierzchni właściwej. Wybrane popioły miały niemal identyczną zawartość Al_2O_3 i CaO , a zawartość SiO_2 i Fe_2O_3 różniła się w granicach 10% wartości względnych. Różnice w powierzchni właściwej popiołów nie przekraczały 15% (11) i były średnio o około 40% niższe niż powierzchnia właściwa zastosowanego cementu CEM I 32.5R. Krzywe przesiewu badanych PL pokazano na rysunku 2, a ich pozostałość na sicie 0,045 mm – w tablicy 1.

Tablica 1 / Table 1

STRATY PRAŻENIA I ZAWARTOŚĆ FRAKCJI WIĘKSZEJ OD 45 μm BADANYCH POPIOŁÓW

L.O.I. AND FINENESS OF FLY ASH SAMPLES

Oznaczenie popiołu PFA sample code	Straty prażenia, % L.o.i., %	Miałość, % Fineness %
A	1,9	36
B	5,1	39
C	9,0	27

W badaniach wykorzystano mieszankę 3 kruszyw – dwóch piasków oraz kruszywa otczakowego, o frakcjach 2/8 i 8/16 mm. Punkt piaskowy tej mieszanki wynosił 39,5% (rysunek 3). Do betonu dodano także SP na bazie eterów polikarboksyloowych w ilości 1,5% masy spoiwa. Mieszanki charakteryzowały się również stałym W/S = 0,35 oraz stałą objętością spoiwa ($V_z = 380 \text{ dm}^3/\text{m}^3$).

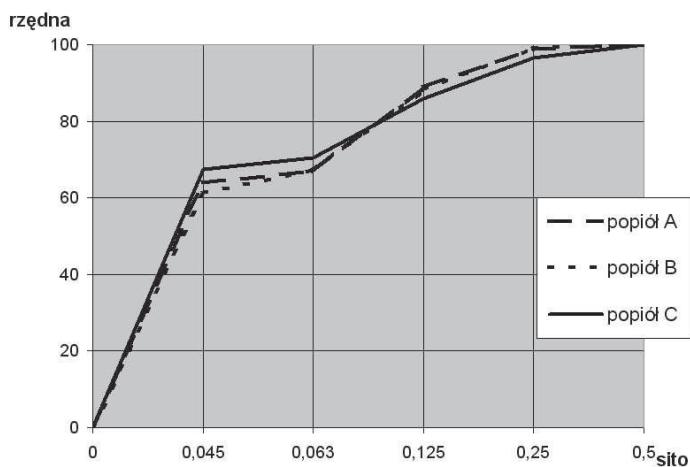
W trakcie badań wykonano 3 serie mieszanek, o stopniowo zwiększającym się dodatku PL. Przygotowano także mieszankę porównawczą bez popiołu. Maksymalny zastosowany dodatek popiołu pozwalał na uzyskanie mieszanki spełniającej jeszcze wszystkie kryteria samozagęszczalności.

Do badania konsystencji zastosowano metodę pomiaru średnicy rozplywu stożka (D_0) oraz parametru t_{50} . Wyniki pomiarów konsystencji przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Zawartość PL podawano w postaci ilorazu masowego popiół do cementu – D/C.

appears that these materials reveal significant differences as the l.o.i. parameters are concerned (by 9 times); the specific surfaces are rather similar (by factor 1.5) (11). Therefore the changes of rheological properties were expected to be consequence of different l.o.i. rather than the result of varying specific surface. Moreover, the producers of fly ash give the mean values for the contents of particular components; l.o.i. values are given as the range within the limits differing about two times. It means that the real values can be variable from one delivery to another. In the case reported in (10) the differences are as follows: SO_3 (by 3.5-times), loss on ignition (about 100%), density (25%) glassy phase (5%).

4. Program and results; identification of data with rheological model for SCCs

The determination of variable rheological parameters for SCCs with growing PFA content of different l.o.i. was the main target of this research project. The l.o.i. values for particular PFA samples are given in Table 1. In order to minimize the effect of the other factors, only the fly ash samples with similar chemical composition and specific surface were taken into account. The materials thus selected were almost identical as the Al_2O_3 and CaO contents were concerned. SiO_2 and Fe_2O_3 differed about 10% (relatively). The differences of specific surface values did not exceed ca. 15% (11), that is they were about 40% lower than the surface of cement



Rys. 2. Krzywe przesiewu popiołów

Fig 2. Grain size distribution of fly ash samples

CEM I 32,5R. The grain size distribution is given in Figure 2 and in Table 1 (fineness - residue on the 0.045 mm sieve).

The mixture of three aggregates was produced by mixing two sands and one river aggregate of fractions 2/8 and 8/16 mm. The sand point was 39.5% (Figure 3). The constant 1.5% dosage of carboxylic type superplasticizer was added. The mixtures were produced at constant W/S = 0.35 and at constant paste volume ($V_z = 380 \text{ dm}^3/\text{m}^3$).

The three series of samples with fly ash dosage growing steadily were produced. The control sample with no fly ash was also prepared. Subsequently, some amount of cement was replaced

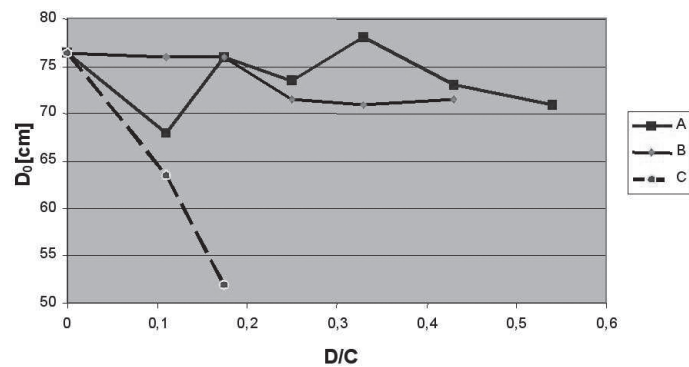
Tablica 2 / Table 2

ZAWARTOŚĆ PL W POSZCZEGÓLNYCH MIESZANKACH

PFA CONTENT IN THE MIXTURES

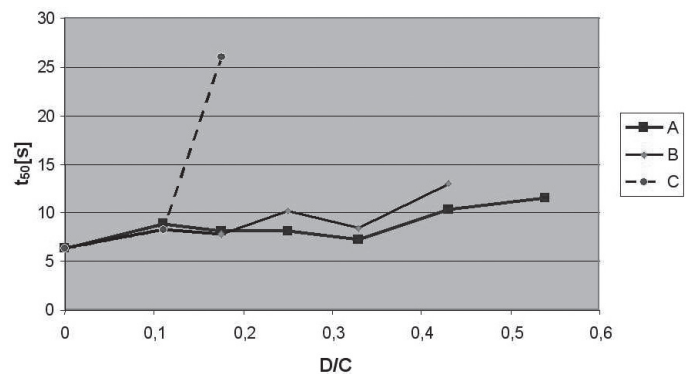
Oznaczenie PL, straty prażenia w % PFA code, l.o.i. %	udział PL w spoiwie, % PFA percentage, %					
	10	15	20	25	30	35
A (1.9 %)	+	+	+	+	+	+
B (5.1%)	+	+	+	+	+	-
C (9.0%)	+	+	-	-	-	-

Zbadano także właściwości reologiczne mieszanek za pomocą reometru rotacyjnego RMB-2a. Szczegółowy opis urządzenia oraz sposobu prowadzenia badań podano w pracy (19). Punkty wyznaczające krzywą płynięcia były średnią z dwóch prób. Różnica pomiędzy uśrednianymi wartościami nie przekroczyła nigdy 12%. Wartość współczynnika dopasowania R^2 wyznaczonej w ten sposób krzywej mieściła się w granicach od 0,97 do 0,9982 (średnia 0,989). Krzywe składowe miały R^2 na poziomie od 0,9691 do 0,9987 (średnia 0,9908). Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Pokazane na rysunku 6 granice płynięcia wyznaczono na podstawie dwóch modeli. Krzywe oznaczone „A-Bing”, „B-Bing” oraz „C-Bing” otrzymano przy wykorzystaniu modelu Bingham’a w oparciu o wszystkie punkty pomiarowe, to jest dla przedziału prędkości obrotowych mieszadła od 1,8 do 60 obr/min. Granica



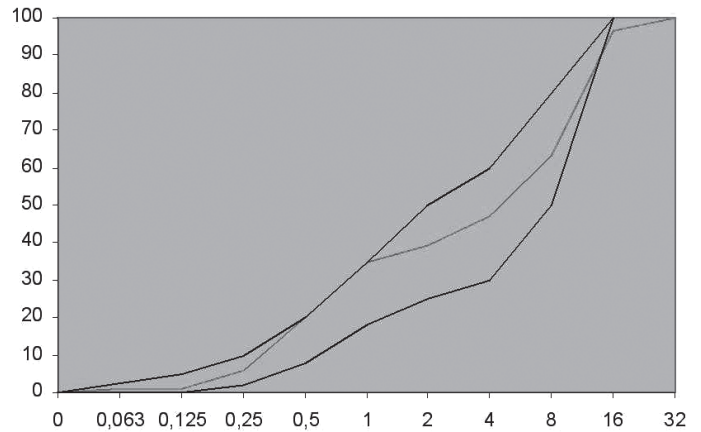
Rys. 4. Wyniki pomiarów konsystencji mierzonej średnicą rozplywu stożka

Fig. 4. Consistency as measured by slump flow test



Rys. 5. Wyniki pomiarów konsystencji mierzonej czasem t_{50}

Fig. 5. Consistency as measured by t_{50}



Rys. 3. Krzywa uziarnienia kruszywa

Fig. 3. Grain size distribution of aggregate

by fly ash; the dosage of PFA is shown in Table 2. The highest PFA dosage used has produced the mixture which still meet the self-compacting concrete criteria.

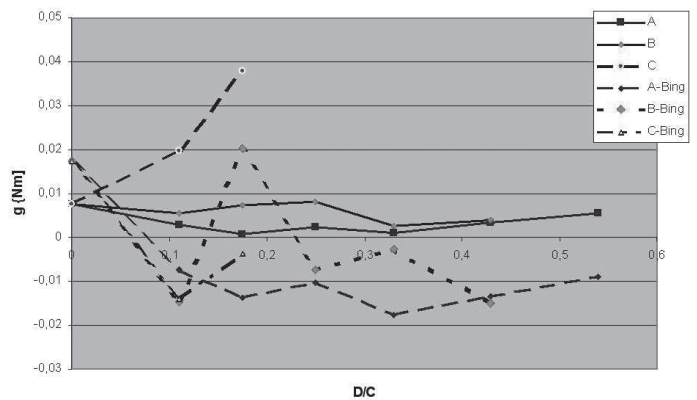
The flow diameter (D_0) by slump flow test and t_{50} parameter were measured as consistency examination. The results are shown in Figures 4 and 5. The PFA content was presented as PFA/C ratio by mass – D/C.

The rheological properties of mixtures were examined in rotating rheometer RMB-2a (see (19)). The results were transformed following the procedure given in (19). The points defining flow curve were the average of two measurements and the difference between them did not exceed 12%. The fitting coefficient value R^2 for the curve thus calculated was in the range from 0.97 to 0.9982 (average 0.989). The R^2 for the component curves was in the range from 0.9691 to 0.9987 (average 0.9908). The results are shown in Figures 6 and 7. Shown in Figure 6 yield values were obtained by two models. The series denoted as „A-Bing”, „B-Bing” and „C-Bing” were calculated using the Bingham model, taking into account all obtained experimentally points i.e. for the rotator speed from 1.8 to 60 r.p.m. The yield values calculated on the basis of this model give the negative values. It means that the model is not adequate in this case. Therefore, as a second step, the yield values were approximated according to the Herschel-Bulkley model, limiting it to the linear approximation and taking into account only the experimental points for 6 r.p.m. All the yield values thus obtained were positive. They are shown in Figure 6 as the curves „A”, „B” and „C”. The examples of flow curves and their approximation with Bingham model for both methods (Bingham and simplified Herschel-Bulkley models) of g value determination are shown in Figure 8. The results are, opposite to those produced in “classic” procedure, in a very good agreement with consistency measurements (see Figures 4 and 6). Because the plastic viscosity determined basing on the classic Bingham model (Figure 7) is very well compatible with the t_{50} data (Figure 5), it has been accepted for further analysis as an reliable value.

płynięcia wyznaczona na podstawie tego modelu przyjmuje wartości ujemne. Oznacza to, że w opisywanym przypadku model ten nie może być stosowany. Z tego powodu do wyznaczenia przybliżonej granicy płynięcia zastosowano model Herschela-Bulkley'a, ograniczając się do przybliżenia liniowego i uwzględniając tylko punkty pomiarowe uzyskane dla prędkości mniejszej od 6 obr/min. Wszystkie wyznaczone w ten sposób dane dotyczące granicy płynięcia miały wartości dodatnie. Zostały one zaznaczone na rysunku 6 jako serie „A”, „B” i „C”. Przykładowe krzywe płynięcia i aproksymacje za pomocą modelu Binghama dla obydwu metod (Bingham i uproszczony Herschel-Bulkley) wyznaczenia wartości g pokazano na rysunku 8. Uzyskane w ten sposób wyniki, w przeciwieństwie do wyznaczonych klasycznie, bardzo dobrze korelują z pomiarami konsystencji (porównaj rysunki 4 i 6). Ponieważ lepkość plastyczna mieszanek wyznaczona z klasycznego modelu Binghama (rysunek 7) bardzo dobrze koreluje z wynikami pomiarów czasu t_{50} (rysunek 5), przyjęto ją do dalszych analiz jako miarodajną.

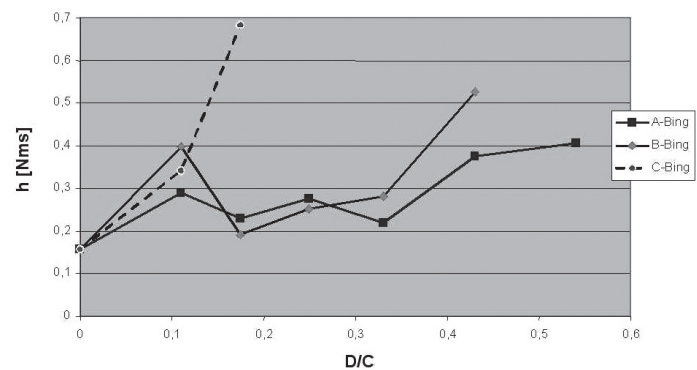
5. Analiza wyników – wpływ strat prażenia popiołu lotnego na parametry reologiczne BSZ

Uzyskane wyniki wskazują na duży wpływ strat prażenia krzemionkowych popiołów lotnych na reologię mieszanek betonowych. Popiół o bardzo małej (2%) zawartości węgla daje BSZ o zadowalających właściwościach reologicznych, nawet w przypadku jego zawartości wynoszącej 35%. Jednak ta mieszanka w wyniku interakcji z SP wykazała efekt spienienia (gęstość tego betonu była niższa o około 200 kg/m³ od pozostałych), co z kolei spowodowało zmniejszenie obydwu mierzonych parametrów reologicznych, analogicznie jak we wcześniejszej pracy (16). Spowoduje to niewątpliwie pogorszenie właściwości fizycznych stwardniałego betonu. Natomiast mieszanki z większym dodatkiem popiołów o wyższych stratach prażenia (B i C) utraciły samozagęszczalność na skutek wzrostu lepkości plastycznej (h), co pokazano na rysunkach 5 i 7. W przypadku popiołu B (~5% strat prażenia) dopuszczalna zawartość w mieszance wynosi 25%, natomiast popiołu C (~9% strat prażenia) tylko 10%. Granica płynięcia (g) mieszanek z popiołami A i B pozostała niemal nie zmieniona w całym badanym zakresie. Jedynie w przypadku mieszanek z popiołem C nastąpił bardzo wyraźny wzrost tego parametru. Jest to najprawdopodobniej spowodowane adsorpcją SP przez porowaty koksik (niespalony węgiel), który wyznacza straty prażenia w krzemionkowych popiołach (3). Jednakże same straty prażenia w popiele nie tłumaczą tego zjawiska, gdyż w mieszankach C-10 i C-15 uzyskano zbliżone ilości bezwzględne strat prażenia do mieszanek B-15 i B-25 (rys. 9), a w tych ostatnich zjawisko to nie wystąpiło. Na rysunku 2 pokazano, że popioły A i B mają bardzo zbliżone uziarnienie, a popiół C ma około dwukrotnie większą zawartość frakcji najgrubszych. Dodatkowo w trakcie wykonywania przesiewu tego popiołu stwierdzono, że pozostałości na sitach o największych oczkach były zdecydowanie najciemniejsze. W przypadkach popiołów A i B wystąpienia tego zjawiska nie zaobserwowano. Oznacza to, że czynnikiem decydującym była wielkość ziaren składających się



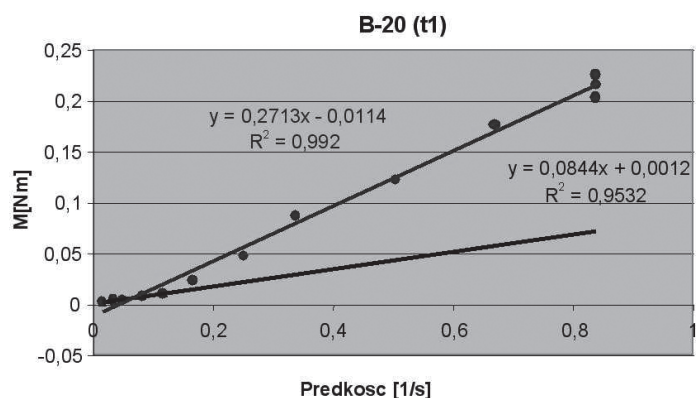
Rys. 6. Wyniki pomiarów granicy płynięcia – modele Binghama i uproszczony Herschela-Bulkley'a

Fig. 6. Yield values according to the Bingham and simplified Herschel-Bulkley models



Rys. 7. Wyniki pomiarów lepkości plastycznej

Rys. 7. Results of plastic viscosity data



Rys. 8. Przykładowe wyniki pomiaru płynięcia mieszanki i ich aproksymacja za pomocą obu modeli

Fig. 8. Examples of flow curve results and their approximation by both models

5. Discussion – effect of the fly ash loss on ignition value on the rheological parameters of SCC

The results of experiments have shown a significant influence of loss of ignition of siliceous fly ash on the rheology of concrete mixes. Fly ash of very small coal content (2%) gives SCC with satisfactory rheological properties, even in case of its content in

z niespalonego węgla. Podobne wyniki uzyskane w przypadku innego popiołu opisano w pracy (10).

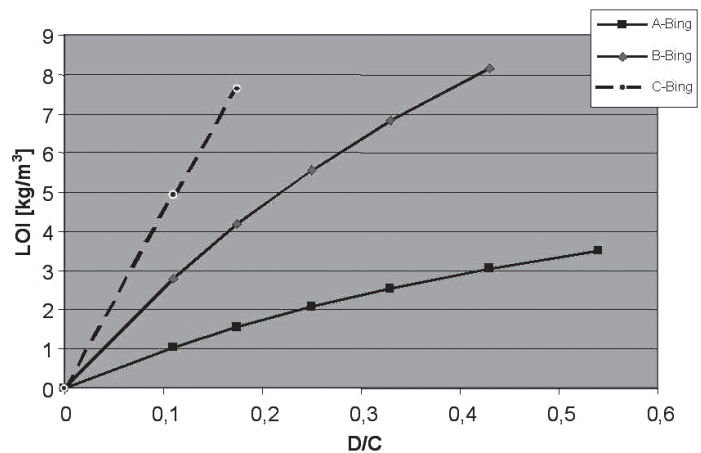
Oprócz tego zgodnie z doniesieniami literaturowymi (1, 6) dodatek PL do mieszanki powoduje zmniejszenie granicy płynięcia. W badanym przypadku (rysunki 6 i 7) uzyskano ten efekt tylko w przypadku dodatku popiołu A o najmniejszych stratach prażenia. W przypadku popiołu B wyniki oscylują wokół wartości uzyskanej dla mieszanki porównawczej. Wobec zbliżonych powierzchni właściwych popiołów A i B, także przyczyn tego zjawiska upatrywać należy w wielkości strat prażenia. Na uwagę zasługuje również niewielki wzrost lepkości mieszanek zawierających popioły niezależnie od ich składu chemicznego i miąższości. Jest to bardzo korzystne dla stabilności właściwości BSZ, ograniczają one bowiem sedymentację kruszywa grubego.

6. Wnioski

- 1) Wszystkie wykonane mieszanki spełniły kryterium średnicy rozplywu stożka (granicy płynięcia). Warunkiem krytycznym dla samozagęszczalności badanych mieszanek okazał się znaczny wzrost lepkości plastycznej występujący po przekroczeniu charakterystycznej dla danego popiołu zawartości.
- 2) Wielkość maksymalnego możliwego dodatku do BSZ zależała od strat prażenia popiołu oraz wielkości ziaren, w których koncentrował się węgiel. Możliwy dodatek PL malał ze wzrostem tych dwóch wartości.
- 3) Mierzony średnicą rozplywu stożka wzrost ciekłości mieszanki BSZ po dodaniu PL zachodzi tylko wtedy, gdy straty prażenia tego popiołu są na poziomie około 2%. Natomiast w przypadku strat prażenia na poziomie około 5% ciekłość mieszanki zmienia się w granicach błędów pomiarowych, a w przypadku strat prażenia na poziomie 9% - rozplyw stożka maleje w całym zakresie zastosowanego dodatku popiołu. Z tego wynika, iż do BSZ nadają się tylko popioły o małych stratach prażenia. Małe straty prażenia popiołu (poniżej 2%) pozwalają na wykonywanie mieszanek BSZ z nieco mniejszą ilością superplastyfikatora.
- 4) Wszystkie wykonane mieszanki BSZ z dodatkiem krzemionkowych popiołów lotnych miały nieco wyższą lepkość plastyczną niż mieszanka na samym cemencie. Wartość tego parametru może być uznana jako stała w szerokim zakresie zawartości popiołów o wielkości strat prażenia nie większych od 5%. Jest to bardzo korzystne dla odporności na segregację takich mieszanek.

Literatura / References

1. W. Aitcin, Z. Chengzhi, S. Wei. *Cem. Concr. Res.*, 33, s. 2023 (2003).
2. P. L. Domone, *Cem. Concr. Comp.*, 28 s.197 (2006).
3. Z. Giergiczny: Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. Politechnika Krakowska, Seria Monografie, Zeszyt 325, Kraków 2006.



Rys. 9. Zawartość strat prażenia w popiołach przeliczona na kg/m³

Fig. 9. Loss on ignition of fly ash samples, calculation in kg/m³

the mix equal 35%. However, this mix as a consequence of interaction between PFA and superplasticizer, revealed the foaming behaviour (density of this concrete was lower by about 200 kg/m³ as compared with the other samples). This, in turn, resulted in the reduction of the both measured rheological parameters, analogously as it has been reported in earlier paper (16). It will cause undoubtedly the decrease of physical properties of hardened concrete. On the contrary, the mixtures with higher PFA addition – 30% and 15%, respectively for B and C – thus with greater l.o.i. revealed the loss of self-compaction because of plastic viscosity (h) increase, as it has been shown in Figures 4 and 5. The yield shear stress (g) of the mixtures denoted as series A and B was almost constant throughout all the tested range. Only in series C this parameter was clearly higher. This was presumably the consequence of superplasticizer adsorption by an unburned porous coal-main element bound with the loss on ignition value in siliceous PFA (3). However, the l.o.i. value itself was not only one factor responsible for this, because in the mixtures C-10 and C-15 the absolute l.o.i. were close to the values for the mixtures B-15 and B-25 (Figure 9) in which this effect was not observed. As it is shown in Figure 2, fly ashes A and B are very similar as the fineness data are concerned, while fly ash C reveals about two times higher content of very coarse grains. Additionally, as observed on sieving, the residue on the coarse sieve was clearly dark. This dark fraction (unburned coal presumably) was not present in A and B fly ash samples. It means that the grain size of unburned coal residue is the dominating factor in this case. The similar results have been reported earlier for another fly ash (10).

Furthermore, the decrease of yield value of the mixture in the presence of PFA was frequently reported (1, 6). This effect was observed only in the case of fly ash A having the lowest l.o.i. (see Figures 6 and 7). In the case of fly ash B the results are close to the value for control sample. It seems that also in this case this is the consequence of the high loss on ignition (at similar fineness of fly ash A and B). One should notice a relatively low viscosity increase in case of mixtures with PFA, irrespectively of their chemical composition and fineness. This is very important feature for SCC stability as the sedimentation of coarse aggregate is limited.

4. Z. Giergiczny, T. Pużak: Wpływ rodzaju popiołu lotnego na właściwości mieszanki betonowej. IX Symp. N–T. „Reologia w Technologii Betonu”, wyd. Górażdże Cement, s. 5, Gliwice, czerwiec 2007.
5. J. Gołaszewski: Wpływ superplastyfikatorów na właściwości reologiczne mieszanek na spoiwach cementowych w układzie zmiennych czynników technologicznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
6. S. Grzeszczyk, G. Lipowski: Popioły lotne i ich wpływ na reologię i hydratację cementów. Zeszyty naukowe Politechniki Opolskiej 2002.
7. M. Karpała, Geoinżynieria 03/2005.
8. W. Kurdowski, G. Bundyra: Perspektywy rozwoju produkcji cementów z dodatkami mineralnymi i znaczenie krzemionkowych popiołów lotnych we współczesnej technologii betonu. V KN-T MATBUD'2007, wyd. Politechniki Krakowskiej, s. 19, Kraków 20-22.06.2007.
9. F. de Larrard, C.F. Ferrais, T. Serdan. Mat. Struct. 31, s. 494 (1998).
10. J. Małolepszy, W. Wons: Wpływ właściwości fizykochemicznych popiołów lotnych z węgla kamiennego na spiekalność wyrobów z ceramiki budowlanej. V KN-T MATBUD 2007, wyd. Politechniki Krakowskiej, s. 340, Kraków 20-22.06.2007.
11. A. Nowak-Michta: Praca doktorska, Struktura porowatości betonów napowietrzonych z dodatkiem popiołu lotnego krzemionkowego, złożona w bibliotece Politechniki Krakowskiej.
12. S.G. Oh, T. Noguchi, F. Tomosawa: Toward mix design for rheology of SCC. 1st Int. RILEM Symp. on SCC, Stockholm, ed. RILEM Publ. S.A.R.L., p. 361, Sep. 13-14 1999.
13. M. Urban: Zagadnienie nieliniowości w plastycznym – lepkiem modelu reologicznym mieszanki betonowej. II Symp. N–T. „Reologia w Technologii Betonu”, wyd. Górażdże Cement, s. 67, Gliwice, maj 2000.
14. M. Urban: Metody projektowania betonów samozagęszczalnych. III Symp. Nauk. – Techn. „Reologia w Technologii Betonu”, wyd. Górażdże Cement, s. 61, Gliwice czerwiec 2001.
15. M. Urban: Wpływ składu mieszanki betonowej na jej właściwości reologiczne. Praca doktorska. Politechnika Krakowska, 2002.
16. M. Urban: Remarks on designing of self-compacting concrete and on placing of structural units using SCC. II Int. Sci. Conf. “Quality and Reliability in Building Industry”, s. 521, Levoca 24-26.10.2001.
17. M. Urban: Wpływ niektórych czynników materiałowych na parametry reologiczne mieszanek betonowych z popiołem lotnym. IV KN-T MATBUD'2003, wyd. Politechniki Krakowskiej, s. 385. Kraków 25-27.06.2003.
18. M. Urban: Modele wytrzymałości betonu samozagęszczalnego z mączką wapienną oraz jego wodoszczelność. Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej, seria „Budownictwo” z. 14-B/2004, s.189.
19. M. Urban: Miary konsystencji betonów samozagęszczalnych a ich parametry reologiczne. KN-T „Dni Betonu” Wisła 9-11.10 2006. Wyd. Polski Cement, s. 453, Kraków 2006.
20. O. H. Wallevik: Rheology – A New Dimension in Concrete Technology. 16ibusil, s. 2-1417, Weimar, 20-23.09.2006.
21. The European Guidelines for Self Compacting Concrete, EFNARC 2005.

6. Conclusions

- 1) All the mixtures produced for his work met the requirements given by the criterion of slump test (yield shear stress). However, the increase of plastic viscosity with growing PFA content appeared to be the critical condition of self-compacting properties.
- 2) The maximum PFA dosage for SCC production is related to the PFA loss on ignition value as well as to the grain size of unburned coal. As higher I.o.i., as lower PFA content should be.
- 3) The SCC mixture fluidity increase was observed only for PFA additive with I.o.i. less than 2%, as measured by slump test. At 5% - the fluidity changed within the range attributed to the measurement error. At I.o.i. 9% the fluidity decreased with PFA dosage in whole range. It means that only PFA with low I.o.i. can be used as a component of SCC. At low I.o.i. of PFA (less than 2%) the dosage of superplasticizer in SCC can be limited.
- 4) All the SCC mixtures produced with PFA additive revealed slightly higher plastic viscosity than the reference sample. This parameter can be found as stable in a wide range of PFA dosage, when the I.o.i. is smaller than 5%. The resistance to segregation is achieved due to this advantageous effect.