

Reologiczne podstawy uzyskiwania betonów samozagęszczalnych o wysokiej wytrzymałości

Rheological factors of high-strength & self-compacting concrete production

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się w Polsce znaczący wzrost kosztów materiałów budowlanych i robocizny, który na pewno będzie prowadzić, wzorem państw bogatszych, do coraz szerszego wykorzystania w praktyce budowlanej dwóch rodzajów betonów: betonów wysokiej wytrzymałości (BWW) oraz betonów samozagęszczalnych (BSZ) (33).

W przypadku BWW zyskuje się znaczne obniżenie ciężaru własnego konstrukcji oraz zmniejszenie ilości zastosowanej stali zbrojeniowej. Przykładem korzyści płynących z zastosowania betonu tej klasy może być One Shell Plaza w Houston. Obiekt ten miał mieć początkowo 35 kondygnacji, lecz dzięki zastosowaniu lekkiego betonu o wysokiej wytrzymałości udało się bez zwiększenia kosztów inwestycji uzyskać obiekt o 52 kondygnacjach (1). Niedostatkami BWW jest jego słaba urabialność wynikła z koniecznego do zastosowania w przypadku tych betonów zestawu materiałowego. BWW wymaga bowiem, przy danej wartości opadu stożka, dłuższego czasu wibracji niż mieszanki betonu zwykłego.

Natomiast zastosowanie BSZ pozwala na szczelne wypełnienie deskowania bez stosowania w tym celu wibratorów nawet przy bardzo gęstym zbrojeniu, co z kolei prowadzi do zmniejszenia kosztów robocizny na placu budowy. Przykłady całkowitych oszczędności wynikających ze zmniejszenia kosztów gotowego obiektu w porównaniu do technologii tradycyjnej można znaleźć na przykład w (2).

W świetle powyższych uwag najbardziej obiecującą metodą wydaje się połączenie zalet obu omawianych materiałów, czyli stosowanie BWW posiadającego równocześnie właściwości betonu samozagęszczanego. Przykłady takiego podejścia można znaleźć na przykład w (3, 23, 26). Z tego względu niniejszy artykuł został poświęcony analizie metod uzyskiwania samozagęszczalnych betonów o wysokiej wytrzymałości. Jako podstawę do analizy tego problemu przyjęto właściwości reologiczne mieszanki betonowej, gdyż metody reologiczne są dużo dokładniejsze niż standardowe pomiary konsystencji (4, 5, 6).

1. Introduction

During last few years, high rise of both building materials and labour costs are observed. These factors lead, as show the examples of better developed countries, to much wider application in engineering practice of two types of high-performance concrete (HPC): high-strength (HSC) and self-compacting (SCC) ones.

The HSC enables the production of lighter structures using much lower both concrete and steel amount. The example of such benefit is One Shell Plaza building in Houston. Initially this building has been designed for 35 tiers, but owing to the use of lightweight high-strength concrete, a 52-tiers building has been erected without the total cost rising (1). The disadvantage of HSC is its lower workability due to its specific material composition. HSC, comparing to traditional concrete, almost always need to be much longer vibrated than traditional concrete having the same consistency level (i.e. the same slump value).

In turn, the self-compacting concrete can fill formworks without the use of any method of compaction, even if very dense reinforcement is used. Such feature allows the labour cost lowering. The examples of total savings due to the use of SCC instead traditional concrete are shown for instance in papers (2, 32).

Considering all shown here advantages, the most reasonable way of these two materials application is to produce HSC with self-compactibility. Examples of such solutions are shown in several papers (3, 23, 26). That is why the aim of this paper is the analysis of the methods of producing high-strength & self-compacting concrete. For the analysis of these methods rheology of the mixture is used which has much higher accuracy than traditional consistency tests (4, 5, 6).

2. Rheological parameters of concrete mix

The rheology of concrete mix is most frequently described using two-parameters Bingham model (6):

2. Parametry reologiczne mieszanki betonowej

Właściwości mieszanki betonowej charakteryzuje się najczęściej za pomocą dwuparametrycznego modelu Bingham'a (6):

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad [1]$$

gdzie: τ – naprężenie ścinające [Pa], τ_0 – granica płynięcia [Pa], η – lepkość plastyczna [Pas], $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania [1/s]

Bardzo często stosuje się umowną formę tego wzoru wprowadzoną przez Banfilla i Tattersalla (6), w postaci:

$$M = g + h \omega \quad [2]$$

gdzie: M – moment skręcający oś sondy [Nm], g – granica płynięcia [Nm], h – lepkość plastyczna [Nms], ω – prędkość obrotowa mieszalnika [1/s].

Oprócz tego w literaturze spotkać można pojedyncze doniesienia (na przykład (11, 32)) o nieliniowym zachowaniu się samozagęszczalnej mieszanki betonowej w trakcie ścinania. Przypadki takie opisuje się najczęściej równaniem Herschela-Bulkley'a (32)

$$\tau = \tau_0 + (\eta_n \dot{\gamma})^{1/m} \quad [3]$$

gdzie: τ – naprężenie ścinające [Pa], τ_0 – granica płynięcia [Pa], η_n – nieliniowa lepkość plastyczna [Pas^{1/m}], $\dot{\gamma}$ – szybkość ścinania [1/s^{1/m}], m – parametr nieliniowy [-]

Krzywe płynięcia opisane zależnościami [1] i [3] pokazano na rys 1.

W niniejszej pracy posłużono się modelem Bingham'a, który jest prostszy i dzięki temu powszechniej wykorzystywany do aproksymacji wyników badań (4,5,6).

Na rys. 2 pokazano obszary ilustrujące poglądowo charakterystyczne zakresy granicy płynięcia τ_0 i lepkości plastycznej η mieszanek z betonu zwykłego (BZ), betonu samozagęszczalnego (BSZ) oraz betonu o wysokiej wytrzymałości (BWW).

Jak widać, mieszanki BWW charakteryzują się znacznie wyższą lepkością od mieszanek z betonu zwykłego (BZ). W konsekwencji, przy podobnej granicy płynięcia jak w przypadku mieszanki BZ (tj. podobnym opadzie stożka), w celu uzyskania właściwego zagęszczenia wymagają one zastosowania znacznie dłuższego czasu wibracji, a więc ich urabialność jest znacznie gorsza.

3. Model reologicznego zachowania się mieszanki betonowej

W celu prześledzenia wpływu zmian składu mieszanki betonowej na wielkość charakteryzujących ją parametrów reologicznych należy stwierdzić jakie czynniki fizyczne są odpowiedzialne za zmianę wielkości parametrów reologicznych w modelu Bingham'a. W niniejszym opracowaniu posłużono się w tym celu modelem CPM (Compressive Packing Model) de Larrarda i Sedrana (8), oraz prawami zaczerpniętymi z mechaniki płynów (9).

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad [1]$$

where: τ – shearing stress [Pa], τ_0 – yield value [Pa], η – plastic viscosity [Pa s], $\dot{\gamma}$ - shear rate. [1/s].

Very often conventional form of this formula is used, which was developed by Banfill and Tattersall:

$$M = g + h \omega \quad [2]$$

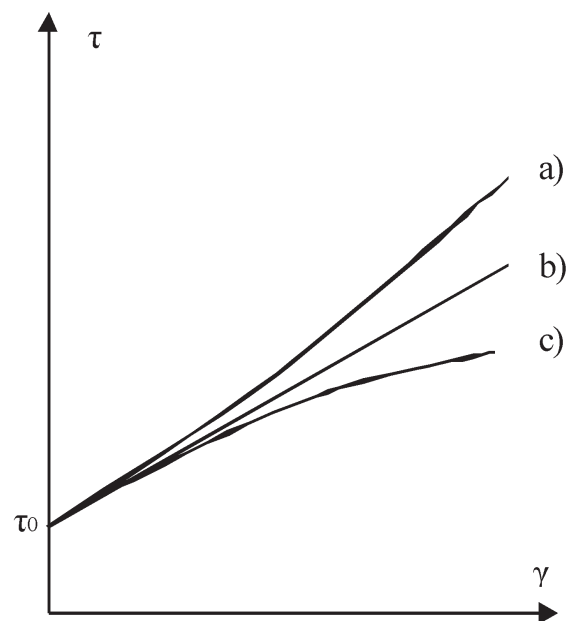
where: M – shearing stress [Nm], g – yield value [Nm], h – plastic viscosity [Nms], ω –speed of rotation [rev/min].

In the literature are presented separate cases, for example in the papers (11, 33), of SCC non linear rheological behaviour. In order to characterize such a concrete mix usually Herschel-Bulkley model is applied:

$$\tau = \tau_0 + (\eta_n \dot{\gamma})^{1/m} \quad [3]$$

in this formula η_n – non-linear viscosity [Pas^{1/m}], $1/m$ – exponent [-].

Flow curves representing the formula 1 and 3 are shown in Fig. 1.



Rys. 1. Wykresy modeli Bingham'a (b) i Herschela-Bulkley'a (a: $1/m > 1$, c: $1/m < 1$)

Fig. 1. Bingham (b) and Herschel-Bulkley models (a: $1/m > 1$, c: $1/m < 1$)

In this paper only Bingham model is applied, as it is more simple and much wider used to approximate the research results (4, 5, 6).

On Fig. 2 characteristic ranges of yield value τ_0 and plastic viscosity η for the mixes of ordinary concrete (BZ), self-compacting (BSZ) and high-strength (BWW) ones are depicted.

As can be seen for HSC the high viscosity level is typical which means that its workability is much lower than that of ordinary

W modelu CPM granica płynięcia (τ_0) wzrasta na skutek zwiększenia się liczby i częstotliwości kontaktów międzyziarnowych, które występują w trakcie przepływu. Innymi słowy, wzrost tej granicy odbywa się poprzez zwiększenie się efektywnej powierzchni tarcia oraz liczby cząstek, które muszą zostać przemieszczone w kierunku poprzecznym do kierunku działania siły wymuszającej ruch. Oznacza to, że granica płynięcia występuje w przypadku znacznej koncentracji fazy stałej w zawieszynie, która w stanie spoczynku tworzy przestrzenny szkielet. Oczywiście wartość τ_0 jest również proporcjonalna do wielkości tarcia statycznego cząstek. W dalszych rozważaniach przyjęto właśnie takie założenie.

Natomiast lepkość plastyczna (η) jest wypadkową trzech oddziaływań, z których jedno opisane jest w pracy (8), a dwa pozostałe wynikają z praw mechaniki płynów (9).

Pierwsze z tych oddziaływań wynika z wymuszenia przepływu cieczy pomiędzy równocześnie przemieszczającym się szkieletem złożonym z cząstek fazy stałej. Nawet przy niewielkiej koncentracji tej fazy (to jest w przypadku, gdy cząstki stałe nie stykają się ze sobą w czasie ruchu) z prawa zachowania objętości wynika, że w przypadku wystąpienia różnicy prędkości pomiędzy sąsiednimi cząstkami (przepływ makroskopowo laminarny) ciecz pomiędzy ziarnami musi zostać wypchnięta w kierunku przeciwnym do kierunku ich ruchu. W przypadku ziaren o nieregularnej powierzchni bardzo prawdopodobne jest przy tym wystąpienie przepływu turbulentnego. Zjawiska te wywołują naturalnie wzrost mierzonych oporów ruchu (wzrost lepkości).

Oddziaływanie drugie jest związane ze zmieniającą się cyklicznie grubością szczeliny pomiędzy przemieszczającymi się ziarnami fazy stałej w cieczy. W taki sam sposób zmienia się równocześnie ciśnienie i prędkość przepływu cieczy pomiędzy ziarnami. Prowadzi to do powstania turbulentnego przepływu cieczy w szerszych przestrzeniach międzyziarnowych, gdyż w praktyce ciecz ta dopływa do i wypływa z takiej nieregularnej przestrzeni w kilku różnych kierunkach równocześnie. Zjawisko to powoduje dodatkowe zwiększenie obserwowanego oporu ruchu przy danej prędkości przepływu.

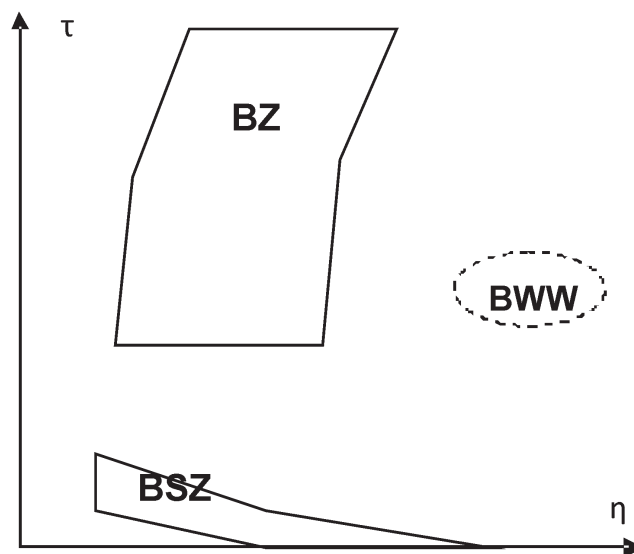
Trzecie oddziaływanie jest związane z dodatkowym tarciem dynamicznym cząstek fazy stałej w trakcie przepływu. Występuje ono zawsze w zawieszinach o dużej koncentracji fazy stałej, to znaczy posiadających pewną, różną od zera wartość τ .

Opisywane oddziaływania wymagają założenia, że cała objętość mieszanki podlega ścinaniu, to jest że granica płynięcia fazy ciekłej jest bardzo niska. Warunek ten jest spełniony dla cieczy porowej, to jest w przypadku gdy przyjmujemy, że ziarna cementu i pyłów mineralnych zaliczają się do fazy stałej.

4. Wpływ poszczególnych parametrów składu BWW na parametry reologiczne mieszanki betonowej

Z kolei trzeba poddać analizie wpływ typowego składu BWW na reologiczne parametry mieszanki betonowej, a mianowicie:

concrete. When similar yield values of both types of concrete are considered (i.e. the same slump levels), the time of vibration, to assure proper compaction, has to be much longer for HSC.



Rys. 2. Zakresy granicy płynięcia i lepkości plastycznej kilku betonów: zwykłego (BZ), samozagęszczalnego (BSZ) i wysokiej wytrzymałości (BWW), [według (5)]

Fig. 2. Yield value and plastic viscosity ranges for ordinary concrete, SCC and HSC (5). Designations: BSZ = SCC, BZ = ordinary concrete, BWW = HSC

3. Factors governing the rheology of concrete mix

The investigations of the influence of concrete mix composition change on rheological parameters one has to consider which physical factors are important in this case. These factors can be represented by Bingham model in case of rheology (eq. 1) and Compressive Packing Model (CPM) developed by de Larrard and Sedran (8) and additionally the rules of fluid mechanics (9) can be taken into consideration.

According to CPM model, yield value (τ_0) rises up due to increase of number and frequency of interparticle contacts during beginning of the flow. In other words increases due to effective friction surface growth and the rise of particles number, which has to be put in motion perpendicularly to main force direction applied to move the whole mix. It means, that the yield value is the effect of high concentration of solid particles in suspension. This concentration has to be high enough to form a three-dimensional skeleton during rest. Of course τ_0 [equation 2] is also proportional to static friction coefficient of particles forming this skeleton. In the paper these assumptions are adopted without any modifications.

Plastic viscosity (η) is considered in this paper as a result of three phenomena: one described in paper (8) and two others result from fluid mechanics laws (9).

- niski poziom wskaźnika w/s
- zwiększona zawartość cementu o wyższej niż przeciętna klasie i dużej powierzchni właściwej,
- podwyższona zawartość superplastyfikatora,
- obecność dodatku mineralnego w postaci pyłu krzemionkowego,
- stosowanie kruszywa łamanego o możliwie niskim punkcie piaskowym.

4.1. Niski poziom wskaźnika w/s

Zmniejszenie wskaźnika wodno – spoiwowego w/s powoduje generalnie zmniejszenie odległości pomiędzy cząstkami fazy stałej w zaczynie i w efekcie znaczący wzrost obydwu parametrów reologicznych (patrz część „a” rys. 3). Dzieje się tak na skutek zwiększenia liczby i częstotliwości kontaktów pomiędzy ziarnami w trakcie przepływu – poprzez zwiększenie się efektywnej powierzchni tarcia i ilości zderzeń cząstek w jednostce czasu. Oprócz tego dochodzi oczywiście do zwiększenia ciśnienia w przepychanej pomiędzy ziarnami cieczy, co powoduje wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia turbulencji. Dowód na to dają autorzy modelu CPM (8) pokazując, iż lepkość mieszanki betonowej zmienia się wykładniczo ze wzrostem koncentracji fazy stałej w zawiesinie. Gdyby działały tylko siły wynikające z kontaktów międzyziarnowych należałoby raczej oczekiwać zależności bliskiej liniowej. W efekcie przy wysokim i średnim w/s, typowym dla betonu zwykłego, do opisu mieszanki można na ogół stosować model Bingham’a, natomiast przy niskim w/s (tak jak w przypadku BWW i BSZ) często nie zdaje to egzaminu (10,11). Do ich opisu najczęściej wykorzystuje się model Herschela-Bulkley’a.

4.2. Zwiększona zawartość cementu o wyższej niż przeciętna klasie i wysokiej powierzchni właściwej

Ponieważ ziarna cementu są ostrokrawędziste, więc zwiększenie ilości tego materiału w mieszance betonowej powoduje na ogół zwiększenie granicy płynięcia. Dzieje się tak na skutek zwiększenia liczby kontaktów trących o siebie ziaren. Wpływ tego składnika na zmianę lepkości jest na ogół niewielki, gdyż pomimo zwiększenia udziału masowego udział objętościowy cementu w mieszance betonowej nie zwiększa się w sposób znaczący. Ze względu na to, że wzrostowi ilości cementu towarzyszy niemal zawsze zmniejszenie wskaźnika w/c, bardzo trudno jest rozdzielić wpływ obydwu tych czynników. Znacznie ważniejsze wydaje się zwiększenie powierzchni właściwej cementu w stosunku do stosunkowo grubiej mielonych cementów niższych klas, stosowanych w betonach zwykłych. W takiej sytuacji przy tym samym w/c zwiększa się wodożądność spoiwa co powoduje, iż średnia odległość cząstek w zawiesinie maleje, dzięki czemu rosną wartości obydwu parametrów reologicznych. Jest to więc efekt zbliżony do dodatkowego zmniejszenia w/s (rys. 3, część b).

The first phenomenon is the result of liquid flow forcing between simultaneously moving skeleton composed of solid particles. Even in case of low concentration of solids (i.e. in case when particles have no contact during flow), due to the law of volume conservation results that in case of differences of speed between solid particles (i.e. macroscopically laminar flow) liquid phase is forced to move in opposite direction to the direction of external force action. Additionally, in case of irregular shape of particles appearance of turbulent flow is very probable. This phenomena cause of course a rise of measured resistance to motion (i.e. higher viscosity).

The second phenomenon results of the fact that the interparticle distance changes periodically during the motion of the solid particles in the liquid. In the same manner changes also the liquid phase pressure and speed of flow between solid particles. The interparticle space shape is always irregular and the liquid phase moves between them in several directions with different pressures and this means that turbulent flow inside such spaces is very probable. This phenomenon causes additional growth of measured resistance for motion (i.e. measured viscosity level).

The third phenomenon is an additional effect caused by dynamic friction force during flow, which always appears in concentrated suspensions (i.e. having some different from zero yield value).

4. The influence of quality and quantity of constituents of HSC on rheological parameters of concrete mix

In this point the influence of high-strength concrete constituents on the rheology of themix are analysed. The factors taken into consideration are the following:

- low water-to-binder (w/b) ratio,
- great content of high-class cement, with specific surface higher than typical,
- higher superplasticizer addition, comparing to traditional concrete,
- application of special mineral admixture, for example silica fume,
- high amounts of coarse aggregate and low sand content.

4.1. Low w/b ratio

Low w/b ratio causes the diminishment of interparticle distance and results in significant growth in both rheological parameters (see arrow a in Fig. 3). It is caused by the increase in number and frequency of interparticle contacts during flow, i.e. by the effective friction surface area and number of particle collisions increase. Additionally there is a rise of pressure in liquid phase passing through narrow spaces in between solid grains enhancing the risk of local turbulence flow appearance. The proof of this phenomenon is shown by the authors of original CPM formulation (8). In this experiment the viscosity of concrete mix is growing exponentially with the rise of solid particles concentration. If only forces caused

4.3. Zwiększony dodatek superplastyfikatora

Domieszki te dodaje się do mieszanki betonowej przede wszystkim w celu obniżenia granicy płynięcia. Najczęściej uważa się, że w typowych warunkach superplastyfikatory nie mają większego wpływu na lepkość mieszanki betonowej (5, 17). Stwierdzenie to dotyczy jednak głównie domieszek starszej generacji, to jest przede wszystkim sulfonowanych żywic naftalenowych i melaminowych oraz lignosulfonianów. Okazuje się jednak, że w betonach zwykłych o średniej wartości w/s i stosunkowo małej zawartości spoiwa, domieszki te często powodują niewielkie obniżenie lepkości (4), co pokazano schematycznie na rys. 3 (górna sekcja części c z dwiema strzałkami). Przyczyn tego stanu rzeczy według opisanego w rozdz. 3. modelu upatrywać można w wywołanej obecnością superplastyfikatora lepszej dyspersji ziaren cementu, co powoduje zmniejszenie zaburzeń przepływu cieczy pomiędzy ziarnami oraz zmniejszenie tarcia dynamicznego ziaren cementu (efekt smarny). Nowoczesne domieszki (tak zwane steryczne) w związku z występowaniem w strukturze ich cząsteczek długich łańcuchów bocznych (4), powodują najczęściej zwiększenie lepkości mieszanki zwłaszcza w przypadku ich większego dodatku (4, 20). Na rys. 3 zjawisko to jest pokazane w części c za pomocą najdłuższej strzałki.

Skuteczność działania superplastyfikatora zależy także w dużym stopniu od charakterystyki cementu, a przede wszystkim od zawartości C_3A , gipsu, Na_2O_{eq} (przy czym ten ostatni czynnik decyduje o pH roztworu), a także od powierzchni właściwej cementu (11, 12, 15, 19, 21). Od tych czynników zależec będzie właściwy dodatek domieszki oraz jaki uzyska się efekt końcowy jeżeli chodzi o wielkości bezwzględne i wzajemne proporcje parametrów reologicznych.

4.4. Zawartość pyłu krzemionkowego

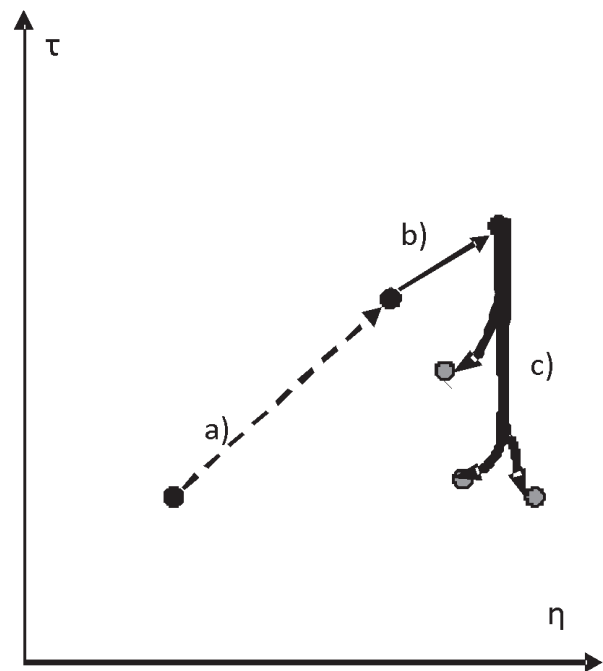
Wpływ obecności tego składnika na parametry reologiczne mieszanki betonowej zostanie tutaj potraktowany nieco szerzej, jako że jest on powszechnie uznawany jako najważniejszy czynnik w kształtowaniu właściwości BWW. Jest to tym bardziej ważne, że w świetle danych literaturowych jego wpływ na wartości parametrów reologicznych w modelu Bingham nie jest jednoznaczny. Według niektórych doniesień umiarkowany dodatek pyłu krzemionkowego może powodować zmniejszenie lepkości mieszanki betonowej (12), według innych – jej zwiększenie (13), a jeszcze według innych (14) wpływ ten jest niejednoznaczny. W przytoczonych artykułach różnice w poglądach na zmianę granicy płynięcia są podobnie duże. Tak duże zróżnicowanie poglądów, które można znaleźć w materiałach źródłowych wynika najprawdopodobniej z faktu, iż poszczególni autorzy swoje wnioski sformułowali na podstawie badań przeprowadzonych na bardzo różniących się od siebie materiałach (zaczyn, zaprawa, mieszanka betonowa). Stosowany przez nich dodatek pyłu krzemionkowego i stosunek w/s były także różne, podobnie jak rodzaj domieszki upłynniającej.

Z przyjętego modelu wynika jasno, że dodanie do układu bardzo drobnoziarnistego materiału, o powierzch

by interparticle contacts will be considered, rather close to linear dependence should appeared. In effect concrete mixes with high and medium w/b ratios are treated as Binghamian fluid, but when mixes with low w/b ratio (like HSC and SCC) are considered such simplification often fails (10,11). In such cases Herschel-Bulkey model should be used.

4.2. High amount of high-strength cement with great specific surface

As cement grains have as a rule irregular shape, rising their amount in concrete mix results almost always in yield value increase. It is connected with the rise in number of interparticle contacts, i.e. friction increase. The influence of this factor on plastic viscosity is typically insignificant, because the volume share of cement does not increased significantly. Taking into consideration the fact that the rise in cement amount is almost always followed by lowering of water to cement (w/c) ratio, the separation of these two effects is almost impossible. Much more important seems to be the influence of higher cement specific surface in comparison with typical CEM I 32.5 used in typical, medium strength concrete. In such case, assuming constant w/c value, water demand of binder rises which causes the lowering of mean value of interparticle distance in cement slurry, and at the end the rise in both rheological parameters. Then, this effect is similar to additional lowering of w/b ratio (Fig 3, arrow b).



Rys. 3. Schemat obrazujący wpływ poszczególnych czynników materiałowych na parametry reologiczne mieszanki betonowej. a) zmniejszenie w/s, b) zwiększanie ilości i powierzchni właściwej cementu, c) zwiększanie dodatku superplastyfikatora

Fig. 3. The schematic image of some material factors influence on concrete mix rheological parameters a) lowering of w/b ratio, b) increase of cement share and change of its specific surface area, c) increase of superplasticizer addition

ni właściwej przeciętnie około 6-8 razy większej niż cement, powinno spowodować duży wzrost granicy płynięcia mieszanki ze względu na zwiększenie wodożądności spoiwa. Nie należy jednak oczekiwać wzrostu granicy płynięcia proporcjonalnego do zwiększenia powierzchni właściwej spoiwa, gdyż ziarna cementu są ostrokrawędziste, a kształt cząstek pyłu jest na ogół zbliżony do kuli (17). Jeżeli zaś chodzi o lepkość, to wpływ pyłu krzemionkowego może być różny, zależny od wielu czynników. Zdaniem autora wyróżnić tutaj można kilka możliwych mechanizmów, z których najbardziej prawdopodobne są następujące.

Mechanizm 1

Cząstki pyłu działają jak smar ułatwiający wzajemne przemieszczanie się względem siebie ziaren kruszywa i cementu. W efekcie przy małym dodatku pyłu (w granicach 2-4%) obserwuje się nieznaczne zmniejszenie wartości obydwu parametrów reologicznych. Wysoka wartość w/s może wzmocnić ten efekt.

Mechanizm 2

Gdy ziarna pyłu krzemionkowego uszczelniają przestrzeń pomiędzy ziarnami kruszywa i cementu w takim stopniu, że powstanie w spoiwie dodatkowy mikroskielet, możliwe wydaje się zmniejszenie turbulencji w przepływie cieczy porowej. W efekcie obserwuje się zmniejszenie lepkości i wzrost granicy płynięcia. Przy dalszym zwiększaniu dodatku pyłu w układzie zaczynają przeważać efekty tarcia dynamicznego i wzrostu ciśnienia w przepychanej w kierunku przeciwnym do ruchu ziaren kruszywa cieczy zawartej pomiędzy ziarnami, co prowadzi do zwiększenia lepkości.

Mechanizm 3

Ponieważ najdrobniejsze cząstki pyłu posiadają wymiary koloidalne, bez wątplenia zwiększają one lepkość cieczy w porach. Wielkość tego efektu jest więc oczywiście zależna od składu ziarnowego pyłu krzemionkowego. Czynnikiem ten ma także duży wpływ na możliwy do uzyskania stopień zmniejszenia lepkości w wyniku poprzednich dwu oddziaływań.

Na rysunku 4 pokazano schemat zmian parametrów reologicznych w przypadku zwiększania dodatku pyłu krzemionkowego według Wallevika (5). Podaje on, że przy małych dodatkach pyłu najczęściej dochodzi do niewielkiego zmniejszenia obydwu parametrów reologicznych (w większym stopniu η), a następnie, wraz ze wzrostem jego zawartości, zaczyna najpierw szybko rosnąć granica płynięcia, a następnie także lepkość plastyczna. Jest to więc potwierdzenie proponowanych mechanizmów, jednak przy założeniu, iż efekt koloidalnego wzrostu lepkości (mechanizm 3) nie ma w tym przypadku znaczącego wpływu.

Ponieważ w praktyce pył krzemionkowy dodaje się tylko do mieszanek o niskim wskaźniku w/s, więc nie da się go zastosować bez równoczesnego zwiększenia dodatku superplastyfikatora. W efekcie w pracy Ivanova i Rozshavelova (14) pokazano, że przy określaniu wpływu pyłu krzemionkowego na parametry reologiczne mieszanki betonowej trzeba wziąć pod uwagę te same

4.3. The influence of high superplasticizer addition

Superplasticizer is added principally to lower yield value of concrete mix. Typically it is assumed, that it has no significant influence on plastic viscosity (5,17). This is true only if older generation admixtures (e.g. sulfonate naphthalene and melamine resins and lignosulphonates) are considered. Nevertheless in ordinary concrete with medium w/c ratio and apparently lower paste volume such admixtures often cause slight decrease of plastic viscosity (4). It has been shown in Fig. 3, by two short arrows in part c. According to discussed in part 3 model, the cause of this phenomenon can be explained by better dispersion of cement grains, what lowers disturbances in interparticle fluid flow and lowers dynamic friction between cement grains. Steric hindrance of long-chain in new polymer admixtures, especially in case of high addition, can often cause some growth of plastic viscosity (4,20). This phenomenon is shown in Fig. 3, by the longest c arrow.

The superplasticizer efficiency, in particular cases, very important are also several parameters of cement composition, especially C_3A , gypsum and Na_2O_{eq} content, the last one significantly influencing pH of solution in concrete, as well as cement specific surface (11,12,15,19,21). These factors influence drastically the optimum addition of admixture and the final rheological properties i.e. τ_0 and η .

4.4. Silica fume amount

The influence of silica fume addition on rheological parameters of concrete mix will be treated more widely than previous factors, as it is considered as the most important one in HSC design. The second reason is that in literature can be found different comments of silica fume influence on rheological properties of the mix. Some authors, for example Gołaszewski and Szwabowski (12) show, that moderate addition of silica fume can result in plastic viscosity lowering, some other authors (13) present opposite results, and in some other cases (14) the influence of this addition is ambiguous. In reported papers the discrepancies in the opinion on yield values change are also great. These large differences of these works results are probably caused by the fact, that the authors used different materials (cement paste, mortar, concrete) and had very changeable other parameters i.e. w/c ratio, silica fume addition, superplasticizer type and addition.

Taking into account the described model it is obvious, that addition to the mix so fine-grained material as silica fume, with specific surface typically 6-8 times higher than cement, should increase significantly the yield value of the mix, due to much higher water demand of active powders in concrete. This rise can be not so pronounced as the difference in specific surface because silica fume, contrary to cement, is composed of spherical grains (17). Whereas η value is considered, the silica fume influence would be different due to big amount of parameters governing this phenomenon. In author's opinion several mechanisms can be ascribed here, as follows:

czynniki, od których zależy kompatybilność superplastyfikatora z cementem. Podobnie rzecz ma się z ilością superplastyfikatora. W pracy Takady i innych (16) uzyskano co prawda zmniejszenie lepkości mieszanki samozagęszczalnej z pyłem krzemionkowym, lecz zostało to spowodowane znacznie większym dodatkiem superplastyfikatora (priorytetem w tym przypadku było spełnienie warunku samozagęszczalności). Ostateczny efekt reologiczny wynikający z równoczesnego zastosowania tych dwóch materiałów jest zazwyczaj taki, jak to pokazano w części c schematu przedstawionego na rys. 4 (linie najgrubsze): granica płynięcia jest mniej więcej zachowana, a lepkość plastyczna oscyluje wokół wartości typowej dla mieszanki o tym samym w/s, lecz nie zawierającej pyłu krzemionkowego.

Nie bez znaczenia pozostaje także jeszcze jeden czynnik: wielkość strat prażenia, zarówno popiołu lotnego jak i pyłu krzemionkowego. W żadnej z cytowanych wyżej prac, jak również w pracach autora (3, 18) nie został on uwzględniony, natomiast badania popiołów lotnych (11, 19) wykazały, że przy ich zbliżonym uziarnieniu i składzie chemicznym wpływ tego czynnika na właściwości reologiczne mieszanki okazał się dominujący. Z tego względu czynnik ten zostanie szerzej omówiony w dalszej części artykułu, w punkcie dotyczącym popiołu lotnego (p. 5.3.2.).

4.5. Stosowanie kruszywa łamanego o niskim punkcie piaskowym

Zwiększona zawartość najgrubszych frakcji kruszywa podyktowana jest dążeniem do podniesienia modułu sprężystości i wytrzymałości betonu (17). Takie podejście prowadzi jednak do zwiększenia wartości obydwu parametrów reologicznych mieszanki betonowej. W oparciu o model przedstawiony w rozdziale 3 można to zjawisko wytłumaczyć w sposób następujący: większa ilość kruszywa powoduje usztywnienie szkieletu złożonego z najgrubszych ziaren, co pociąga za sobą zwiększenie granicy płynięcia, ale nie tylko. Zwiększeniu w takiej sytuacji ulegnie również lepkość, gdyż grube ziarna zaburzają laminarny przepływ ziaren drobniejszych, co powoduje zwiększenie zapotrzebowania na energię w celu podtrzymania prędkości przepływu. Zjawisko to jest tym silniejsze im grubsze kruszywo zastosujemy (10). Z doświadczeń autora wynika, że sama zmiana punktu piaskowego w mieszance z 26 do 36% (kruszywo do 16 mm) może zaowocować nawet dwukrotnym wzrostem wartości τ_0 (22). Kierunek zmian obydwu parametrów reologicznych pod wpływem tego czynnika pokazano w części b schematu na rys. 5.

Uzyskanie bardzo wysokich wytrzymałości (około 150 MPa) wymaga często zastosowania kruszywa grubego o maksymalnej wielkości ziarna zmniejszonej do 8 mm (23), co łagodzi nieco ten niekorzystny efekt. Na przedstawionym na rysunku 5 schemacie wpływ ten pokazuje strzałka c.

Mechanism 1

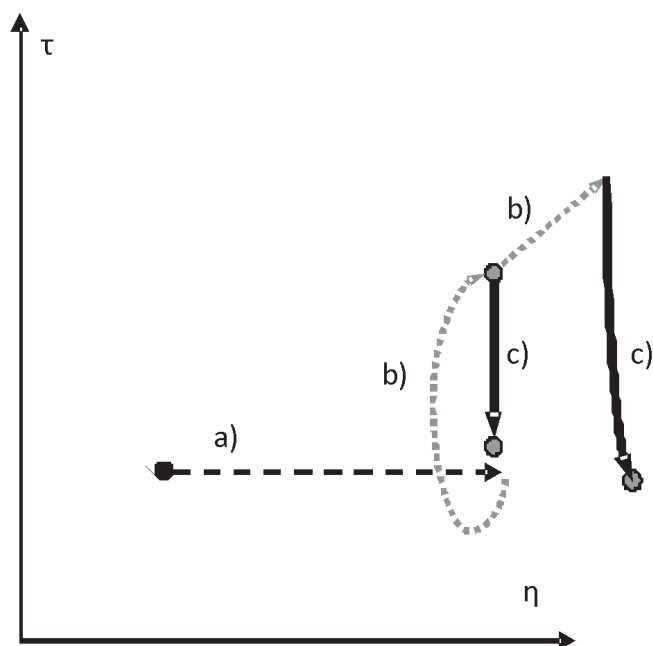
In case of low addition (2-4% of cement mass) silica fume can act as lubricant resulting in easier aggregate grains displacement. In effect a slight lowering of both rheological parameters is observed. Higher w/b ratio level can increase this influence.

Mechanism 2

Higher addition of silica fume densifies inter-grain spaces so effectively, that micro-skeleton in paste can be formed. In this case limitation of turbulence flow is very probable, which can be found as rise in yield value and decrease of plastic viscosity. High silica fume addition increases dynamic friction stress and pressure rising in interparticle liquid, forced to move in the opposite direction to big particles. As the result viscosity returns to the starting or even higher level.

Mechanism 3

Small silica fume grains are of colloidal size. It means, that they undoubtedly rise viscosity of intergranular fluid. This effect has also the influence on the maximum level of viscosity lowering according to the first mechanism and on the level of addition when h value (equation 2) returns to the starting level (2nd mechanism). Of course it is influenced by silica fume specific surface and grain size distribution.



Rys. 4. Schemat obrazujący wpływ poszczególnych czynników materiałowych na parametry reologiczne mieszanki betonowej. a) sumaryczny wpływ czynników z rys. 3, b) wpływ pyłu krzemionkowego, c) zwiększenie dodatku superplastyfikatora kompensujące utratę urobialności spowodowanej działaniem pyłu

Fig. 4. The schematic presentation of some material factors influence on the mix rheological parameters a) summarized influence of factors taken into consideration in Fig. 3, b) the influence of silica fume rising addition, c) increase of superplasticizer addition used for compensation of workability loss caused by silica fume addition

5. Metoda uzyskiwania samozagęszczalnej mieszanki betonowej o wysokiej wytrzymałości

Jak wiadomo kompozycja materiałowa ma kluczowe znaczenie dla właściwości reologicznych mieszanki (6), w tym także oczywiście samozagęszczalnego betonu o wysokiej wytrzymałości. Z tego względu w tej części pracy zostanie omówiony szereg modyfikacji prowadzących do uzyskania samozagęszczalnego betonu o wysokiej wytrzymałości z mieszanki BWW o typowym składzie.

5.1. Kryteria samozagęszczalności

Ogólnie rzecz ujmując sukces przy projektowaniu BSZ zależy przede wszystkim od tego, czy uda się dobrać odpowiednie proporcje parametrów τ_0 i η mieszanki. Pokazany na rys. 2, charakterystyczny przedział tych parametrów w przypadku mieszanek samozagęszczalnych nie oznacza bynajmniej, że dobra będzie każda mieszanka o granicy płynięcia i lepkości mieszczących się w tym przedziale. Wymagania dotyczące urabialności zależą bowiem na przykład od rodzaju wykonywanego elementu (7). Zbyt duża wartość któregokolwiek z parametrów reologicznych prowadzi do braku spełnienia podstawowego kryterium samozagęszczalności, czyli samoczynnego usuwania dużych pęcherzyków powietrza z mieszanki na skutek działania na nie jedynie siły wyporu. Najczęściej im mieszanka ma krótszy czas rozplywu t_{50} lub czas wypływu z lejka aparatu „V-funnel” (t_v), co odpowiada mniej więcej niższej lepkości plastycznej, tym węższy jest dopuszczalny przedział zmian średnicy rozplywu stożka (czyli w przybliżeniu granicy płynięcia) i tym mniejsza jest maksymalna dopuszczalna wartość tego rozplywu (24). Ten przedział dopuszczalnych zmian zależy od wielu czynników, a w szczególności od różnicy gęstości zaczynu i kruszywa (przeciwdziałanie sedymentacji) oraz wybranej ilości i maksymalnej wielkości ziarna kruszywa grubego w mieszance (przeciwdziałanie segregacji poziomej - blokowanie przepływu na przeszkodzie z prętów zbrojeniowych).

5.2. Metody zapewniające samozagęszczalność tradycyjnym betonom o wysokiej wytrzymałości

Mieszanka betonowa w przypadku betonu o wysokiej wytrzymałości może wykazywać dodatkowo cechę samozagęszczalności dzięki zastosowaniu trzech opisanych niżej metod postępowania.

1) Zwiększenie ciekłości (obniżenie granicy płynięcia τ_0).

Spełnienie tego warunku stwarza problemy ze stabilnością mieszanki. Podstawowy problem stanowi różnica gęstości kruszywa grubego i zaczynu. Kruszywo grube używane do betonów o dużej wytrzymałości ma zazwyczaj znacznie wyższą gęstość niż typowe około 2650 kg/m^3 , gdyż w tym przypadku stosuje się najczęściej kruszywo łamane ze zbitych wapieni lub z bazaltów (3, 24, 25). Natomiast stosunkowo rzadko używany jest w tym celu granit (25), który ma typową, podaną wyżej gęstość. Dodatek pyłu krzemionkowego z kolei powoduje niewielkie zmniejszenie gęstości zaczynu (jego gęstość wynosi przeciętnie około 2200 kg/m^3). W efekcie mieszanki tego rodzaju wykazują tendencję do

In fig. 4 the influence of the changes of silica fume addition on rheological parameters of the mix are shown after Wallevik (5)). This plot of curves shows, that in case of small silica fume content most often both Bingham parameters (more η than τ_0) are decreasing. Next, if fume addition increases, at first fast increase of yield value begins, and after that also plastic viscosity begins to increase. It is a very good schematic presentation of the first two mechanisms, but the contribution that third mechanism is not significant.

In practice silica fume is added only to the concrete mixes having low w/b ratio, which is impossible without the increase of superplasticizer share. As a result, in (14) is shown, that during attempting to qualify the influence of silica fume on rheological parameters of concrete mix, the same factors has to be considered like the ones governing superplasticizer-cement compatibility. The same situation appears when superplasticizer addition is considered. Takada et al. (16) have shown that silica fume addition lowers viscosity, but in case of much higher superplasticizer share than in comparable mix without silica fume, because the mentioned research had been focused on fulfilling self-compactibility properties first. It is the proof that in case of the simultaneous application of these two materials the final rheological effect is usually as shown by part “c” in Fig. 4: yield value is more or less the same, and plastic viscosity oscillates somehow around the basic value.

Undoubtedly loss of ignition is another valid from rheological point of view silica fume parameter, which is important also for siliceous fly ash. Unfortunately, it has been omitted in all cited papers, as well as in previous author's works (3,18). Nevertheless, during author's investigations on siliceous fly ash rheological properties (11,19) it became obvious, that l.o.i. has been the main factor influencing rheological parameters of SCC (chemical composition and size distribution of fly ash had been kept more or less constant). That is why the influence of this factor is described in point 5.3.2, concerning fly ash properties.

4.5. The use of crushed coarse aggregate with low sand ratio

The higher than typical content in HSC of coarse aggregate is caused by the need of keeping modulus of elasticity and strength of concrete on as high as possible level (17). Unfortunately, this method leads to both η and τ_0 value rise. According to the model given in point 3, this phenomenon can be described as follow. Higher amount of aggregate leads to the stiffening of skeleton composed of coarse grains which in turn increase the yield value, but not only. In this situation also plastic viscosity became increased, because the coarse grains introduces disturbances the flow of small particles, which causes energy demand in order to maintain the flow rate. The described phenomenon has the higher influence the coarser grains are applied (10). From the author's experience arises, that the only change in sand ratio from 26 to 36% (aggregate up to 16 mm) can result even in two-times rise of yield value (22). The schematic interpretation of this phenomenon is shown in Fig. 5, part “b”. Sand ratio is defined here as a sand mass to total aggregate mass ratio.

sedymencji przy mniejszych wartościach rozplywu stożka niż mieszanki samozagęszczalne o tym samym w/s, ale o niższym poziomie wytrzymałości (tj. na kruszywie otoczkowym i bez pyłu krzemionkowego) (3).

2) Uzyskanie odpowiedniej lepkości.

Lepkość mieszanki samozagęszczalnej na ogół może być zbliżona do tej, jaką mają przeciętne betony BWW, (rys. 2), gdyż poziom ten jest najczęściej zadowalający z punktu widzenia skutecznego ograniczenia sedymencji ziaren kruszywa grubego. Lepkość nie może być jednak zbyt wysoka, gdyż uniemożliwi to usuwanie pęcherzyków powietrza z mieszanki pod wpływem działania jedynie siły wyporu. Należy jednak zwracać uwagę na dodatek superplastyfikatora, gdyż w przypadku BSZ stosuje się zazwyczaj roztwory rozpuszczalnych w wodzie żywic, zbudowanych z cząsteczek o długich łańcuchach, które, jak to wspomniano wyżej, przy dużym dodatku mogą wywołać znaczne zwiększenie lepkości mieszanki.

3) Zapewnienie spełnienia kryterium nie blokowania się kruszywa na przeszkodzie z prętów zbrojeniowych.

W celu uzyskania samozagęszczalności betonu o wysokiej wytrzymałości konieczne jest niestety zmniejszenie ilości kruszywa w stosunku do typowych wartości w przypadku BWW. Wiąże się to równocześnie ze zwiększeniem punktu piaskowego i ilości spoiwa. Powoduje to w prawdzie pewne, na ogół niewielkie, zmniejszenie wytrzymałości i modułu sprężystości betonu samozagęszczalnego w stosunku do jego odmiany tradycyjnej (26, 27) ale poprawia się płynność i ciekłość mieszanki oraz zmniejsza tendencję do sedymencji kruszywa (wpływ ten pokazano rys. 5).

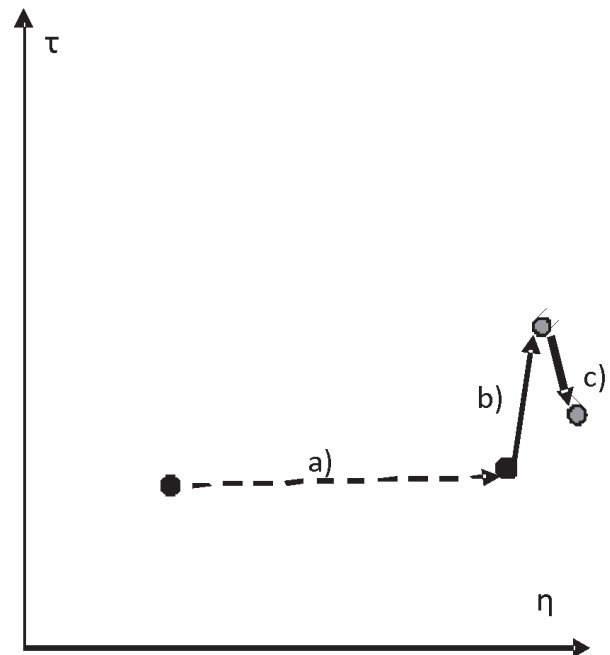
Konieczność spełnienia wymienionych wyżej trzech wymagań prowadzi do powstania poważnych, nie zawsze łatwych do usunięcia trudności. Pierwszym problemem jest sposób uzyskania samozagęszczalności. Betony samozagęszczalne można bowiem podzielić na trzy rodzaje różniące się metodą uzyskania dużej lepkości mieszanki (25):

- zastosowanie specjalnej domieszki – stabilizatora lepkości (*ang.*: *Viscosity Modifying Agent, VMA*),
- zastosowanie jako stabilizatora lepkości dodatku mineralnego,
- zastosowanie obu tych materiałów równocześnie.

W przypadku samozagęszczalnych betonów o wysokiej wytrzymałości jedynym możliwym rozwiązaniem jest wykorzystanie odpowiednich dodatków mineralnych, gdyż najczęściej występujące problemy dotyczą zbyt dużej, a nie zbyt małej lepkości (3), patrz także rys. 2.

Drugim problemem jest różnica gęstości kruszywa grubego i otaczającego go zaczynu. Stosuje się także trzy rozwiązania tego problemu:

1. Uzyskanie mieszanki o stosunkowo dużej lepkości, w pobliżu górnej granicy stosowania według EFNARC (7), to jest wykazującej



Rys. 5. Schemat obrazujący wpływ poszczególnych czynników materiałowych na parametry reologiczne mieszanki betonowej. a) sumaryczny wpływ czynników z rys. 4, b) wpływ ilości kruszywa grubego (zmniejszenia punktu piaskowego), c) wpływ obniżania maksymalnej wielkości ziarna kruszywa grubego

Fig. 5. The schematic presentation of the influence of some material factors on mix rheological parameters. a) general influence of all factors presented in Fig. 4, b) the influence of decreasing sand content in aggregate, c) the influence of lowering of maximum aggregate grain size

The aim of very high compressive strength about 150 MPa, often forces maximum aggregate grain size lowering down to 8 mm (23), what diminishes slightly this undesirable effect (Fig. 5, arrow c).

5. Methods of self-compacting & high-strength concrete mix production

It is well known that material composition is a key factor for rheological properties of the mix (6), including also selfcompacting & high strength concrete. In this point several factors which lead to obtain self-compacting and high-strength concrete.

5.1. Self-compactibility criteria

Generally, successful SCC design depends on proper τ_0 and η values establishing and obtaining. The shown in fig. 2 range of these parameters for self-compactibility feature do not means, that each mix having rheological parameters inside this range can be self-compacting. As usual, demanded workability depends also for instance on the type of designed element (7). Too high value of every single rheological parameter results in not fulfilling fundamental for self-compactness criterion, i.e. successful self-deaerating process due to too low buoyant force. Commonly, if self-compacting mixture has shorter slump flow time t_{50} or V-funnel time t_v , what means that plastic viscosity is lower, a target range for slump and

czas t_{50} w granicach 8-10 s i stosunkowo wysoką wartość granicy płynięcia (dolnej granicy rozplywu stożka według (7), to jest około 55 - 60 cm). Modyfikacja składu tradycyjnego betonu wysokiej wytrzymałości polega w takiej sytuacji na zwiększeniu ilości zaczynu oraz zawartości piasku oraz dodatku superplastyfikatora. W razie konieczności można w niewielkim zakresie skorygować w/s i ilość pyłu krzemionkowego. W ten sposób w przypadku kruszywa o wymiarach $D=16$ mm można uzyskać betony o wytrzymałości około 100 - 110 MPa. Niedostatkami takich betonów jest znaczna ilość cementu i dosyć wąski przedział dopuszczalnych konsystencji. Natomiast ich zaletą jest stosunkowo niski koszt (3).

2. Ta sama metoda opisana w punkcie poprzednim uzupełniona o zmniejszenie maksymalnego wymiaru ziaren kruszywa grubego. Powoduje to zmniejszenie tendencji kruszywa do sedymentacji, bez pogorszenia zdolności mieszanki do samoistnego odpowietrzania (28). W efekcie można otrzymać mieszanki o nieco większej zawartości piasku i porównywalnej ilości cementu jak mieszanki zaprojektowane według metody 1. Dodatkową korzyścią ze stosowania opisywanej metody jest możliwość zmniejszenia koniecznego dodatku superplastyfikatora do osiągnięcia granicy samozagęszczalności. Mniejsze maksymalne ziarno kruszywa pozwala także na zwiększenie ciekłości mieszanki przy tej samej jej lepkości lub uzyskanie mieszanki o mniejszej lepkości w wyniku niewielkiego obniżenia ilości pyłu krzemionkowego (patrz rys. 4). Metoda ta przy zapewnieniu optymalnej szczelności stosu może spowodować także zwiększenie wytrzymałości betonu (23). Jej zaletą jest szerszy zakres dopuszczalnej konsystencji niż w metodzie 1.

3. Zastosowanie drugiego dodatku mineralnego stabilizującego mieszankę, w połączeniu z rozwiązaniem z punktu pierwszego lub drugiego. Obniża on ilość niezbędnego cementu oraz często zmniejsza konieczny dodatek superplastyfikatora (obniża granicę płynięcia). Jeżeli dodatek ten składa się przy tym z ziaren kulistych lub jego powierzchnia właściwa jest mniejsza od powierzchni właściwej zastosowanego cementu, można uzyskać także niewielkie obniżenie lepkości. Stosowanie dodatku o uziarnieniu zbliżonym do cementu jest niecelowe gdyż ma on wówczas nieznaczny wpływ na wielkość parametrów reologicznych (29), a przy zachowaniu pierwotnego w/s może doprowadzić do zmniejszenia wytrzymałości betonu. Do sporządzenia samozagęszczalnych mieszanek o wysokiej wytrzymałości przydatne są dwa rodzaje takich dodatków mineralnych. Pierwszym z nich jest mączka kamienna uzyskana albo przez domielenie pyłu powstałego podczas produkcji kruszywa grubego (30), albo jako oddzielny produkt, na przykład mączka kwarcowa (23). Drugą możliwością jest zastosowanie krzemionkowego popiołu lotnego (3) lub tego popiołu po domieleniu (26). Wpływ tych dodatków na parametry reologiczne mieszanki opisano w punkcie 5.3.

flow diameter is narrower, and the maximum slump is lower (24). How wide is this range depends of many factors, especially of density difference of aggregate and paste (sedimentation counteracting) and of amount and maximum grain size of aggregate (counteracting, of flow blocking on reinforcement).

5.2. Methods of obtaining self-compactibility for traditional HSC

In case of high strength concrete the mix can have additionally self-compacting property if the following three conditions will be fulfilled:

1) Enhancing fluidity (lowering yield value).

Fulfilling of this condition rises problems with mix stability. The main factor here it is the difference in density between coarse aggregate and paste. Coarse aggregate for HSC usually has higher density than typical 2650 kg/m^3 , as the most common are crushed limestone and basalt (3,24,25). Only crushed granite has close to typical density (25). Silica fume addition in contrary lowers slightly paste density (as its density is typically around 2200 kg/m^3). As the result the self-compacting mixes containing both these constituents begin to sediment with lower slump than mixes having the same w/b ratio, but with lower compressive strength (i.e. made with rounded aggregate and without silica fume) (3).

2) Proper viscosity (high enough viscosity).

Viscosity of selfcompacting mix usually is similar to typical for HSC of normal fluidity (Fig. 2) and this level is sufficient to prevent coarse aggregate sedimentation. However, it cannot be too high, as in such case air bubbles will be stable and will be not removed from the mix by buoyance force. However, special attention has to be paid to superplasticizer addition, as superplasticizers for SCC are usually water soluble polymers with long chains, and in high content they have quite strong tendency to rise viscosity of the mix.

3) Blocking criterion; coarse aggregate cannot be blocked on reinforcement.

In order to obtain selfcompacting concrete with high strength it is necessary to lower the content of coarse aggregate in comparison to typical HSC. It means, that such concrete has to have higher sand ratio and paste content. As a result, slightly lower compressive strength and modulus of elasticity are obtained in self-compacting version of HSC (26,27), but there are also benefits: better fluidity and better sedimentation resistance (this phenomenon is shown in Fig. 5).

The need of fulfilling all this three demands arising sometimes serious, not always easy to obey, problems. The first one is the way of obtaining self-compactibility feature, as it can be obtained in three different ways (25):

- by the use of stabilising mineral additions,
- by the use of viscosity modifying agent (VMA),
- by the use of both additions simultaneously.

5.3. Dodatki mineralne umożliwiające poprawę parametrów reologicznych samozagęszczalnych betonów o wysokiej wytrzymałości

5.3.1. Mączki kamienne

Dodatek ten pozwala na zwiększenie gęstości zaczynu, a co za tym idzie przeciwdziała sedymentacji kruszywa, bez wyraźnego zwiększenia lepkości mieszanki, przy założeniu że powierzchnia właściwa mączki nie jest znacznie wyższa od powierzchni właściwej cementu. Ważne jest również aby powierzchnia właściwa mączki różniła się od powierzchni właściwej cementu. Ten ostatni warunek wynika z potrzeby dodatkowego uszczelnienia struktury betonu oraz pozwala na uzyskanie bardzo niskiego stosunku wody do frakcji pylastych (= cement + pył krzemionkowy + mączka kamienna) przy zadowalającym poziomie ilości wody i wartości wskaźnika $w/(c+pk)$, co prowadzi do uzyskania betonów o znacznie wyższej wytrzymałości od tradycyjnych, wymagających zagęszczenia BWW. Ma i Dietz (23) prezentują wyniki badań uzyskanych tą metodą betonów samozagęszczalnych o wytrzymałości na ściskanie w granicach 150-160 MPa. Należy podkreślić, że stosowana mączka nie powinna posiadać zbyt dużej nasiąkliwości, gdyż może to znacznie zmniejszyć tempo przyrostu wytrzymałości betonu i pogorszyć także niektóre inne właściwości po jego stwardnieniu (31).

5.3.2. Krzemionkowy popiół lotny

Stosowanie tego dodatku pozwala na zmniejszenie ilości cementu w mieszance samozagęszczalnej, jednak na ogół bez znaczącego zwiększenia wytrzymałości betonu (3). W przypadku nie mielonego popiołu można uzyskać dodatkowo obniżenie granicy płynięcia mieszanki bez zwiększania dodatku SP (11) dzięki sferyczności ziaren popiołu. W świetle tych wyników badań kluczowe znaczenie dla reologii BSZ z takim dodatkiem mają straty prażenia, a więc zawartość węgla w popiele. W badaniach tych okazało się bowiem, że nawet niewielkie straty prażenia w popiele na poziomie 2% powodują zwiększenie lepkości w porównaniu z mieszanką bez tego dodatku. Natomiast dodatek popiołu ze stratami prażenia na poziomie 2% powoduje niewielkie zmniejszenie granicy płynięcia, a przy ich wzroście do 5% zmiany τ_0 oscylowały wokół zera, zaś popiół o stratach prażenia wynoszących 9% powoduje tak duży wzrost obydwu parametrów reologicznych, że mieszanki te nie były właściwie samozagęszczalne.

6. Podsumowanie

W przedstawionej pracy zaprezentowano trzy metody uzyskiwania betonów samozagęszczalnych o wysokiej wytrzymałości (BSZWW). W związku z tym, że metody te opierają się na właściwościach reologicznych mieszanki betonowej, omówiono wyczerpująco wpływ jakości i ilości każdego z najważniejszych składników tych mieszanek na parametry reologiczne modelu Bingham. Zrozumienie zachodzących w tych układach zjawisk jest konieczne do prawidłowego zaprojektowania tego rodzaju mie-

In case of self-compacting high-strength concrete there is only one solution is the use of proper mineral additions, as problems with viscosity are almost always restricted to high η level [see (3) and Fig. 2].

The second shortcoming is difference in coarse aggregate and paste densities. Solving this problem is possible in again three ways:

1. Obtaining the mix with high viscosity level i.e. near the upper EFNARC limit (7) it is having $t_{50} = 8 - 10$ s and high yield value [i.e. near low limit of slump (7) equal 55 - 60 cm]. In this case HSC modification is achieved by the higher paste, sand and superplasticizer contents. If necessary, in some extent w/b ratio and silica fume addition can be modified. In this way, using aggregate having $D = 16$ mm concrete with compressive strength up to 100 - 110 MPa can be obtained. This method disadvantage is apparently high cement share and rather narrow possible consistency range, but advantage is low cost (3).

2. The same method, but improved by lowering maximum grain size of aggregate. Such modification allows to lower the tendency to segregation of aggregate without diminishing paste ability to self-deaerating (28). In effect, mixes having slightly higher sand and the same cement contents are obtained, comparing to mixes designed according to the first method. Additional benefit of this method is the possibility of slight lowering of superplasticizer content. Lower the maximum aggregate grains enables also to obtain higher fluidity of the mix with the same viscosity or producing the mix having lower viscosity by lowering slightly silica fume content [see Fig. 4]. This method can also cause the rise of concrete compressive strength, if only condition of minimum void fraction of aggregate stack is fulfilled (23). Their advantage is the possibility to obtain wider consistency range than in method 1.

3. The use of second mineral addition for mix stability enhancing together with one of previously discussed methods. Generally, such addition is used for lowering cement content, but often it enables also slight lowering of superplasticizer content by diminishing yield value. If addition used has additionally rounded particle shape and/or its specific surface is lower than that of cement, it is possible also to obtain a slight decrease in viscosity. The use of addition having grain size distribution similar to cement is futile, as it does not change rheological parameters significantly (29) with high probability of lowering compressive strength of concrete. Generally, to self-compacting & high-strength concrete two types of mineral additions are fitted the best. First one is a stone meal obtained either as additionally ground by-product during crushed aggregate production (30), or as special product, for example quartz meal (23). The second possibility is to use siliceous fly ash without mechanical treatment (3), or ground (26). The influence of both of these additions on rheological properties is described below.

szanek, gdyż uzyskanie samozagęszczalności wymaga spełnienia aż czterech różnych kryteriów szczegółowych (granica płynięcia, lepkość plastyczna, sedimentacja oraz kryterium blokowania) zamiast tradycyjnego jednego, czyli konsystencji.

Betony te stanowią cenną alternatywę dla tradycyjnych betonów o wysokiej wytrzymałości. Dzięki opisanym metodom, opierającym się między innymi na doświadczeniach autora tej pracy, w niektórych przypadkach obejmujących na przykład równoczesny dodatek pyłu krzemionkowego i krzemionkowego popiołu lotnego, przy maksymalnym ziarnie kruszywa nie przekraczającym 16 mm, można uzyskać betony samozagęszczalne o wytrzymałości w granicach 90-110 MPa. Jak wykazują cytowane wyniki badań różnych autorów, w przypadku prawidłowego stosowania przedstawionych zaleceń dotyczących projektowania składu mieszanki w oparciu o równoczesny dodatek pyłu krzemionkowego i mączki skalnej oraz ograniczenie maksymalnego ziarna kruszywa do 10 mm, istnieje możliwość wywarzania betonów samozagęszczalnych o wytrzymałości przekraczającej 150 MPa. Jest to wytrzymałość zbliżona już do właściwości betonów z proszkami reaktywnymi (RPC).

5.3. Additions enabling improving of rheological parameters of high-strength self-compacting concrete

5.3.1. Stone meals

Stone meal enables enhancing paste density, what stabilises mix as counteracts coarse aggregate sedimentation without significant viscosity rise, if only specific surface of the meal is not significantly higher than that of cement. It is also important, that the meal has to have different grain size distribution than cement, as it enables additional densifying of hardened concrete and obtaining extreme low w/b ratios with satisfying level of water content and water to cement + silica fume ratio. All of these factors together can allow to obtain concrete having much higher compressive strength than traditional, which need vibration HSC. Ma and Dietz (23) obtained concrete with 150-160 MPa compressive strength. It is also important if applied stone meal has low absorbability, unless it could lower the rate of concrete strength development and worsen some of other hardened concrete features (31).

5.3.2. Siliceous fly Ash

It is a solution of lowering the cement content in self-compacting mix, usually without evident concrete strength rising (3). When raw fly ash is used it is possible to reduce yield value of mix without adding more superplasticizer (11), as fly ash particles are spherical. In the light of these results, the key factor in rheology of SCC containing fly ash is lost of ignition (l.o.i.) level. According to these results, even if the l.o.i. level is low (2%), obtaining lower viscosity than in mix without fly ash has failed. In case of yield value, if l.o.i level was equal 2%, τ_0 value has been slightly lowered, if it was equal 5% - yield value changes had been oscillating around zero, and if l.o.i level was as high as 9% the rise of both rheological parameters had been so high, that these mixes had not been self-compacting.

6. Conclusions

In presented study three ways of high-strength & self-compacting concrete (HSSCC) are presented. These methods are based on the understanding of rheology of concrete. Starting from this point of view, the influence of all-important material factors on rheology of HSC has been shown. Understanding these phenomena is the key factor for correct design of such concrete, as SCC and HSC design as many as four different criterions has to be fulfilled: yield value (τ_0), viscosity (η), sedimentation, and blocking criterion instead of one traditional, i.e. consistency.

These SCC was preciously an alternative for traditional (e.g. vibrated) high-strength one. Owing to described in the paper operations, according to the cited author's experience, embracing in some cases, simultaneous addition of two additives, namely siliceous fly ash and silica fume; and maintaining maximum aggregate size 16mm, it is possible to produce SCC with compressive strength of about 90-110 MPa. According to cited in the article works done

Literatura / References

1. J. Jasiczak, P. Mikołajczak: Materiały Budowlane II Skrypt Politechniki Poznańskiej, 2003.
2. H. Okamura, M. Ouchi: Self-Compacting Concrete. Journ. of Adv. Concr. Techn. JCI, v.I (2003) No. 1 pp. 5-15.
3. M. Urban: Samozagęszczalne betony wysokiej wytrzymałości. Przegląd Budowlany 12/2006 s. 20-28.
4. J. Gołaszewski: Wpływ superplastyfikatorów na właściwości reologiczne mieszanek na spoiwach cementowych w układzie zmiennych czynników technologicznych. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej, seria „Budownictwo”, z. 106. Gliwice 2006.
5. O.H. Wallevik: Rheology - A New Dimension in Concrete Technology. 16ibausil, Weimar, 2006, p. 2-1417 - 2-1430.
6. G.H. Tattersall, P.F.G Banfill: The Rheology of Fresh Concrete. Pittmann, London 1983.
7. Specification and guidelines for SCC, EFNARC 2002 and 2005
8. F. de Larrard, T. Sedran: Mixture Proportioning of HPC. Cem. & Concr. Res. V.32. (2002) p.1699-1704.
9. R. Gryboś: Podstawy mechaniki płynów, t. 2. PWN, Warszawa 1998.
10. P.F.G. Banfill: The rheology of fresh cement and concrete - a review. Ith Int. Cem. Chem. Congr. Dublin 2003.
11. M. Urban. Wpływ wielkości strat prażenia popiołu lotnego krzemionkowego na parametry reologiczne betonów samozagęszczalnych. Cement-Wapno-Beton 4/2007 s. 193-200.
12. J. Gołaszewski, J. Szwabowski: Wpływ wybranych dodatków mineralnych na właściwości reologiczne mieszanek betonów nowej generacji. IV KN-T MATBUD 2003, 5. 160-169.
13. A.W. Saak, H.M. Jennings, S.P. Shah: Characterization of the rheological properties of cement paste for use in SCC. Ist Int. RILEM Symp. on SCC, Stockholm 1999, ed. RILEM Publ. S.A.R.L., p. 83-93.
14. Y.P. Ivanov, T.T. Roshavelov, The effect of condensed silica fume on rheological behavior of cement pastes. Int. Conf. „Rheology of Fresh Cement and Concrete” Liverpool 1990. E&F.N.Spon, 1990, p. 23-26.
15. K. Yoshioka, E. Tazawa, K. Kawai, T. Enohata: Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals. Cem. & Concr. Res. V.32 (2002) p. 1507-1513.
16. K. Takada, G.L. Pelova, J.C. Walraven: Influence of microfillers on proportioning of mortar in SCC. Ist Int. RILEM Symp. on SCC, Stockholm 1999, ed. RILEM Publ. S.A.R.L., p.537-548.
17. A.M. Neville: Właściwości betonu. Polski Cement, Kraków 2000
18. 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”. Levoca 24-26.10.2001, p. 521-526.
19. A. Nowak-Michta, M. Urban: Wpływ własności popiołu lotnego na parametry reologiczne mieszanek betonowej. V KN-T MATBUD 2007, s. 406-414.
20. M. Urban: Wpływ niektórych czynników materiałowych na parametry reologiczne mieszanek betonowych z popiołem lotnym. IV KN-T MAT-BUD’2003, Kraków 2003, s. 385-392.
21. J. Gołaszewski, J. Szwabowski: Wpływ powierzchni właściwej cementu na właściwości reologiczne zapraw z dodatkiem superplastyfikatorów. XX KN-T „Jadwisin’06”, Serock 17-19.05.06, s. 133-140.
22. M. Urban: Wpływ składu mieszanki betonowej na jej właściwości reologiczne. Dysertacja doktorska. Kraków, 2002.
23. J. Ma, J. Dietz: Ultra High Performance Self-Compacting Concrete. Lacer 7/2002, p.33-42.
24. A. Yahia, M. Tanimura, A. Shimambukuro, Y. Shimoyama: Effect of rheological parameters on self-compactability of concrete containing various mineral admixtures. Ist Int. RILEM Symp. on SCC, Stockholm 1999, ed. RILEM Publ. S.A.R.L., pp.523-535.
25. P.L. Domone: Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. Cem. & Concr. Comp. V.28 (2006) p.197-208.
26. Y. Xie, B. Liu, J. Yin, S. Zhou: Optimum mix parameters of HSSCC with ultrapulverized fly ash. Cem. & Concr. Res. V.32 (2002) p. 477-480.
27. K. Holschemacher, Y. Klug: A database for the Evaluation of Hardened Properties of SCC. Lacer 7/2002, p. 123-134.
28. M. F. Petrou, B. Wan, F. Gadala-Maria, V.G. Koili, K. A. Harris: Influence of mortar rheology on aggregate settlement. ACI Mat. Journ. v. 97 (2000), p.479-485.
29. P. Bi1lberg: Fine mortar rheology in mix design of SCC. Ist Int. RILEM Symp. on SCC, Stockholm 1999, ed. RILEM Publ. S.A.R.L., p.47-58.
30. D.W.S. Ho, A.M.M. Sheinn, C.C. Ng, C.T. Tamm: The use of quarry dust for SCC applications. Cem. & Concr. Res. Y.32 (2002) p. 505-511.
31. M. Urban: Modele wytrzymałości betonu samozagęszczalnego z mączką wapienną oraz jego wodoszczelność. Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej, seria „Budownictwo” z. 14-B/2004, s.189-202
32. F. de Larrard, C.F. Ferrais, T. Sedran: Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material. Materials & Structures, V.31 (1998), p. 494-498.
33. Materiały z Międzynarodowego Seminarium “Prefabrication in Europe”, Kraków 18.10.2007, wyd. IMiKB PK, Kraków 2007.