

# WPŁYW DOMIESZEK REDUKUJĄCYCH WODĘ NA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE ZAPRAW CEMENTOWYCH

Dorota MAŁASZKIEWICZ\*

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45, 15-351 Białystok

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu wybranych domieszek redukujących wodę na właściwości reologiczne zapraw cementowych i zmiany tych właściwości z upływem czasu. Przyjęto, że parametry reologiczne mieszanek ze spoiw cementowych mogą być wystarczająco dokładnie opisane za pomocą modelu Bingham. Zastosowano kruszywo naturalne polodowcowe 0/4 mm oraz cement CEM I 42,5R. Zbadano wpływ domieszek na rozptył zapraw oraz zmiany rozptyłu w czasie. Przeprowadzono reometryczny test urabialności, w wyniku którego wyznaczono parametry reologiczne zapraw: parametr  $g$  (granica płynięcia) oraz parametr  $h$  (lepkość plastyczna). Zastosowane superplastyfikatory pomimo tej samej bazy chemicznej wymagają innego poziomu dozowania, aby osiągnąć taki sam rozptył zapraw. Różna jest również efektywność ich działania w czasie.

*Słowa kluczowe:* zaprawa cementowa, reologia, domieszki redukujące wodę, lepkość plastyczna.

## 1. Wprowadzenie

Odpowiednie właściwości reologiczne mieszanki betonowej są jednym z podstawowych wymogów technologicznych zapewniających uzyskanie wysokiej jakości konstrukcji żelbetonowych. Z upływem czasu, właściwości reologiczne mieszanek betonowych zmieniają się, co skutkuje pogorszeniem się jej urabialności, utrudniając prawidłowe wykonanie konstrukcji (Gołaszewski, 2008).

Badania reologiczne zawiesin są powszechnie stosowane do oceny właściwości materiałów. Zachowanie się stężonych zawiesin w warunkach przepływu zależy od powierzchni kontaktu między cząsteczkami ciała stałego (fazy rozproszonej) i sił oddziaływania międzycząsteczkowego, takich jak siły van Der Waalsa i siły steryczne (Mueller i in., 2010). Badania reologiczne zawiesin cementowych pozwalają ocenić ich zachowanie w stanie plastycznym oraz monitorować formowanie struktury, która świadczy o rozwoju właściwości mechanicznych (Sant i in., 2008).

Badania reologiczne są powszechnie prowadzone w reometrach rotacyjnych, w których dokonywany jest pomiar momentów oporu ścinania przy ustalonych prędkościach ścinania. Parametry badania reologicznego mają wpływ na wyznaczone z modelu Bingham wartości granicy ścinania i lepkości plastycznej zawiesin cementowych (Nehdi i Rahman, 2004; Bentz i in., 2012; Ferraris i in., 2001). Lepkość plastyczna jest miarą tempa przyrostu naprężeń ścinających wraz ze wzrostem odkształceń, a co za tym idzie – miarą płynności cieczy.

Na wielkość lepkości plastycznej zawiesin ma wpływ przede wszystkim tarcie międzycząsteczkowe oraz powierzchnia kontaktu (Banfill, 2006). Osłabienie oddziaływań międzycząsteczkowych poprzez zwiększenie odległości między poszczególnymi cząsteczkami zawiesiny (bądź przez zmniejszenie powierzchni kontaktu) powoduje spadek lepkości plastycznej i wzrost ciekłości.

Prezentowane badania zostały wykonane na zaprawach cementowych w celu określenia wpływu domieszek upłynniających na parametry reologiczne. Możliwe jest prognozowanie właściwości samozagęszczalnej mieszanki betonowej na podstawie właściwości zapraw (Gołaszewski i in., 2014). Dobrą korelację uzyskuje się szczególnie w zakresie wartości granicy płynięcia i tempa utraty urabialności przez mieszkankę betonową.

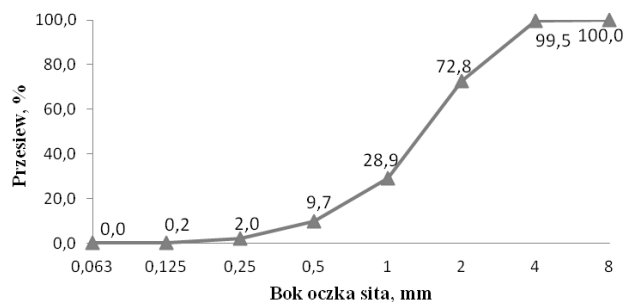
## 2. Materiały i procedura badawcza

### 2.1. Materiały zastosowane do badań

Badania zostały przeprowadzone na zaprawach cementowych wykonanych z cementu CEM I 42,5R oraz kruszywa naturalnego polodowcowego 0/4. Uziarnienie kruszywa zostało przedstawione na rysunku 1. Zastosowano stały współczynnik  $w/c = 0,34$  do badania konsystencji zapraw modyfikowanych domieszkami oraz  $w/c = 0,40$  do reologicznego testu urabialności. Zastosowanie wyższego współczynnika  $w/c$  w drugim

\* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: d.malasziewicz@pb.edu.pl

przypadku było podyktowane tym, że zaprawa kontrolna o  $w/c = 0,34$  sprawiała trudności przy pomiarze w reometrze – sonda nie była w stanie wykonać obrotu.



Rys. 1. Uziarnienie kruszywa 0/4

Zastosowano 4 superplastyfikatory pochodzące od różnych producentów:

- SP1 – domieszka znacznie redukująca ilość wody na bazie modyfikowanych polikarboksylianów,
- SP2 – stabilizowany superplastyfikator polikarboksylianowy,
- SP3 – domieszka uplastyczniająco-upłynniająca na bazie zmodyfikowanych polimerów syntetycznych z rodziny polinaftalenów,
- SP4 – uniwersalny superplastyfikator (FM).

Dozowanie domieszek przyjęto w ilości zapewniającej uzyskanie rozptywu zaprawy w przedziale 240-280 mm. W przypadku SP1 nie udało się uzyskać rozptywu w pożądanym zakresie. Przy dozowaniu w ilości 0,4% masy cementu rozptyw wyniósł 300 mm, a przy dozowaniu 0,35% masy cementu – odpowiednio 220 mm. Przyjęto ostatecznie dozowanie na poziomie 0,4% masy cementu.

Przyjęto następujące dozowanie domieszek: SP1 – 0,4% masy cementu, SP2 – 1,6% masy cementu, SP3 – 1,9% masy cementu oraz SP4 – 3,0% masy cementu.

W tabeli 1 przedstawiono skład zaprawy cementowej o  $w/c = 0,40$  zastosowanej do reometrycznego testu urabialności. W składzie tym nie uwzględniono poszczególnych superplastyfikatorów. Woda zawarta w SP była uwzględniana i odpowiednio zmniejszono dozowanie wody zarobowej.

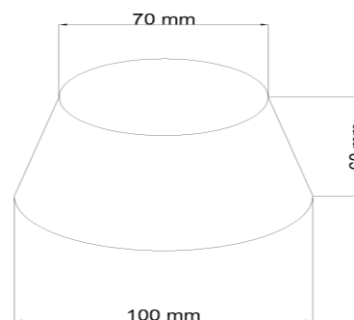
Tab. 1. Skład zaprawy zastosowanej do badań na  $1\text{ m}^3$

Składnik	Masa [kg]
cement CEM I 42,5 R	693
kruszywo 0/4 mm	1322
woda	275

## 2.2. Pomiar parametrów reologicznych

Zaprawę przygotowano w mieszarce do zapraw. Wodę wraz z dodatkiem superplastyfikatora wlewano do miski, następnie dodawano spoiwo i kruszywo. Łączny czas mieszania wynosił 180 s. W celu zbadania konsystencji, w ten sposób przygotowaną zaprawę wlewano do stożka (rys. 2) umieszczonego na stoliku rozptywowym

i mierzono średnicę rozptywu w dwóch kierunkach. W związku z tym, że zaprawy wykazywały znaczą ciekłość, mierzono rozptyw bezpośrednio po podniesieniu stożka, bez zastosowania wstrząsów. Badanie rozptywu przeprowadzono do momentu utraty przez zaprawę zdolności do rozptywu.



Rys. 2. Schemat stożka do badania rozptywu

Właściwości reologiczne mieszanek betonowych mogą być wystarczająco dokładnie opisane za pomocą reologicznego równania stanu ciała Bingham'a w postaci:

$$\tau = \tau_o + \gamma \cdot \eta_{pl} \quad (1)$$

gdzie:  $\tau$  jest naprężeniem stycznym w Pa przy prędkości ścinania  $\gamma$  wyrażonej w  $1/s$ ,  $\tau_o$  oznacza granicę płynięcia w Pa i  $\eta_{pl}$  lepkość plastyczną w  $Pa \cdot s$  (Szwabowski, 1999; Gołaszewski, 2008; Wallevik i in., 2015). Granica płynięcia określa wielkość obciążenia koniecznego do wywołania płynięcia mieszanki. Płynięcie mieszanki wystąpi, gdy naprężenia styczne przekroczą tę granicę, a opór płynięcia zależy od lepkości plastycznej. Parametry reologiczne wyznacza się metodą regresji liniowej z równania:

$$M = g + h \cdot N \quad (1)$$

gdzie:  $g$  (w  $N \cdot m$ ) i  $h$  (w  $N \cdot m \cdot s$ ) są stałymi reologicznymi odpowiadającymi odpowiednio granicy płynięcia  $\tau_o$  i lepkości plastycznej  $\eta_{pl}$  zaprawy.

Zasady reologicznego testu urabialności i właściwości reologiczne świeżych zapraw cementowych i mieszanek betonowych przedstawiono w literaturze (Szwabowski, 1999; Billberg, 2006; Schmidt, 2014).

Badanie parametrów reologicznych zostało przeprowadzone w urządzeniu do badania parametrów reologicznych mieszanek betonowych i zapraw cementowych Viskomat XL (rys. 3) w stałej temperaturze  $20^\circ C$ . Cylinder pomiarowy o wewnętrznej średnicy 165 mm i wysokości 175 mm pozwala na pomiar mieszanki o objętości  $3\text{ dm}^3$ . Prędkość obrotowa może być regulowana w zakresie  $0,001-80\text{ min}^{-1}$ . W trakcie badania cylinder pomiarowy znajduje się w zewnętrznym cylindrze wypełnionym wodą przepływającą przez termostat, co pozwala na utrzymanie stałej temperatury w trakcie badania.

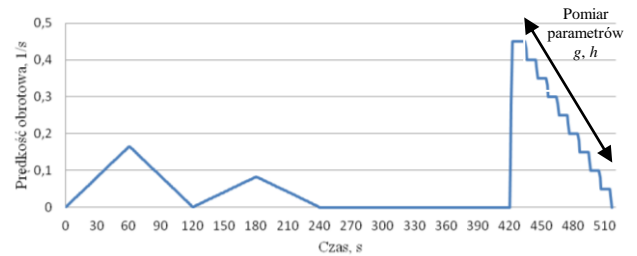


Rys. 3. Maszyna pomiarowa Viskomat NT - XL oraz mieszadło

Program badawczy składał się z dwustopniowego wstępnego mieszania oraz mieszania zasadniczego ze zmniejszającą się skokowo prędkością obrotową. Właściwe mieszanie polegało na mieszaniu zaprawy przez 1 min, zmniejszając prędkość skokowo od  $27 \text{ min}^{-1}$  ( $0,45 \text{ s}^{-1}$ ) ze skokiem  $3 \text{ min}^{-1}$  ( $0,05 \text{ s}^{-1}$ ) do zatrzymania (rys. 4). Duża liczba punktów pomiarowych połączona z odpowiednią ilością odczytów na każdym z tych punktów (poziomów prędkości) zapewnia wysoką wiarygodność wyników. Dlatego też, podczas badania zastosowano pomiar parametrów mieszanki na dziewięciu poziomach prędkości, co zapewniło odpowiednio dużą liczbę punktów pomiarowych. Obydwa procesy były powtarzane 3-krotnie: po 10, 40 i 80 minutach od zamieszania składników. W tych samych okresach badano również rozptyw zapraw.

Tab. 2. Wielkości rozptywu zapraw

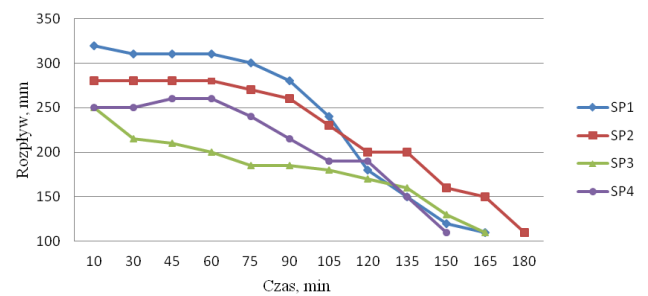
Czas [min]	Rozptyw [mm]											
	10	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
SP1	320	310	310	310	300	280	240	180	150	120	110	–
SP2	280	280	280	280	270	260	230	200	200	160	150	110
SP3	250	215	210	200	185	185	180	170	160	130	110	–
SP4	250	250	260	260	240	215	190	190	150	110	–	–



Rys. 4. Procedura reologicznego testu urabialności dla Viskomatu XL

### 3. Wyniki badań i dyskusja

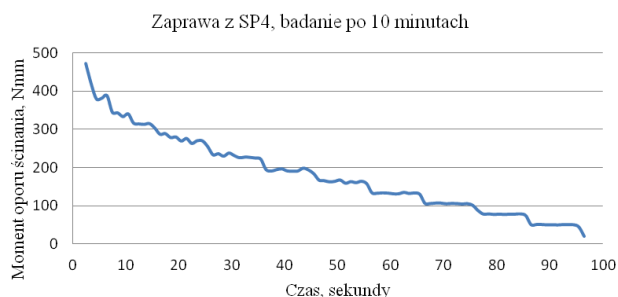
Zmiany rozptywu wraz z upływem czasu dla zapraw modyfikowanych poszczególnymi domieszkami zostały przedstawione w tabeli 2 oraz na rysunku 5.



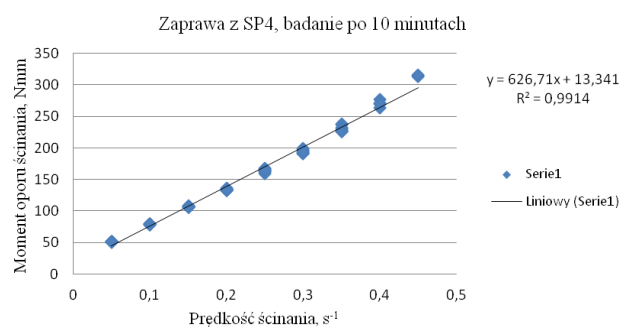
Rys. 5. Spadek rozptywu zapraw modyfikowanych poszczególnymi domieszkami wraz z upływem czasu

Wyniki badań zaprezentowane na rysunku 5 świadczą o tym, że domieszki SP1 oraz SP2 pozwoliły najdłużej utrzymać wysoką płynność zapraw cementowych – do 90 minut. Najmniej efektywny okazał się SP3, który co prawda przy pierwszym pomiarze spowodował rozptyw identyczny do rozptywu przy zastosowaniu SP4, jednak dalsze pomiary wskazały tendencję do szybkiej utraty urabialności. Domieszka SP4 ma zdolność nawet do nieznacznego zwiększania ciekłości zaprawy do około 60 minut, jednak po tym czasie nastąpiło dość szybkie zmniejszenie rozptywu.

W reometrycznym teście urabialności uzyskuje się odczyty momentów oporu ścinania w zależności od prędkości ścinania oraz czasu badania. Przykładowe wykresy zależności momentu oporu ścinania, badanego przy skokowej zmianie prędkości ścinania dla zaprawy z SP4 po 10 minutach od jej wykonania, w zależności od czasu i prędkości ścinania przedstawiono odpowiednio na rysunku 6 i 7.

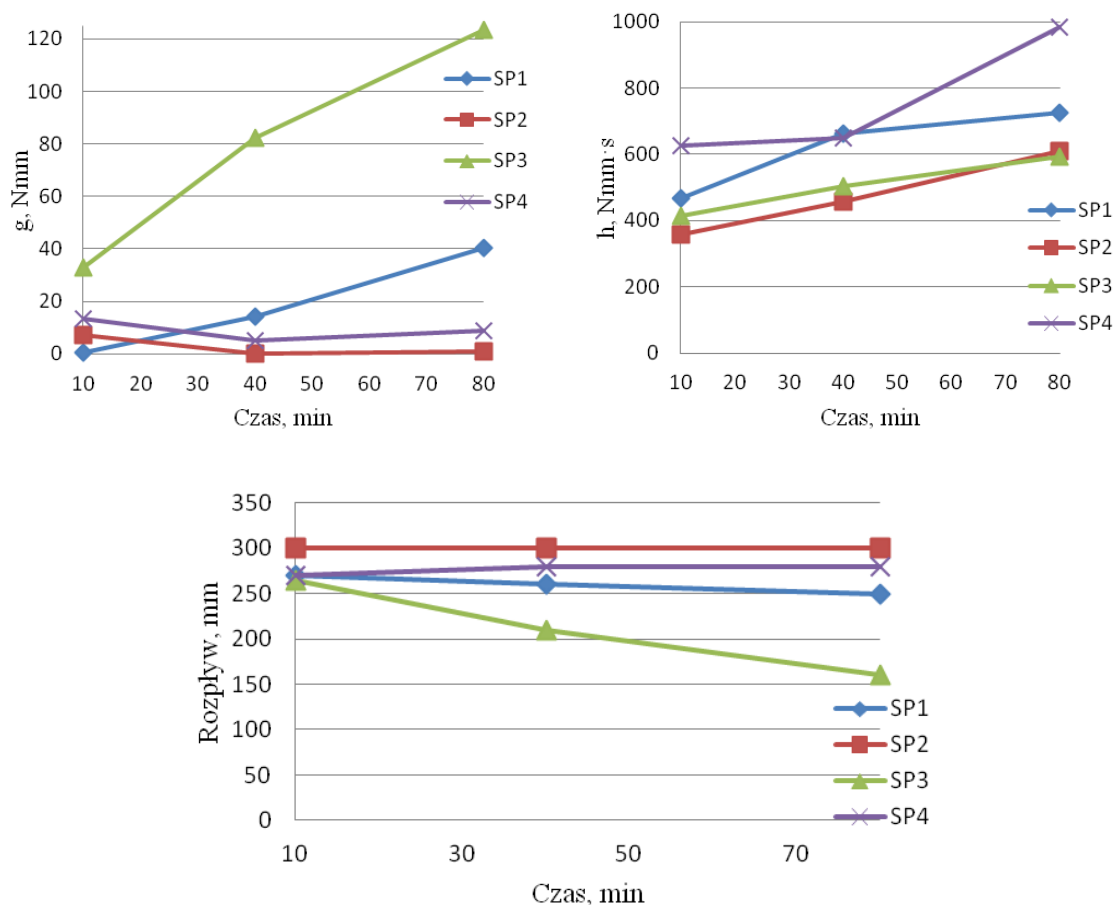


Rys. 6. Momenty oporu ścinania dla zaprawy z SP4 po 10 minutach od jej wykonania



Rys. 7. Zależność momentu oporu ścinania od prędkości ścinania po 10 minutach od jej wykonania

Analogicznie wykonano wykresy i aproksymacje liniowe dla wszystkich badanych próbek zapraw, a wyniki zamieszczono w tabeli 3. Jako BD oznaczono zaprawę kontrolną – bez domieszki. Współczynniki korelacji aproksymacji liniowych, które zostały zastosowane do ustalenia parametrów reologicznych zapraw, mieszczą się w przedziale 0,953-0,997. Świadczy to o dobrym dopasowaniu modelu Binghama do opisu tych właściwości. Zaprawa kontrolna po 80 minutach była na tyle mało urabialna, że nie udało się wykonać badania przy zadanych prędkościach ścinania. Na rysunku 8 przedstawiono parametry reologiczne zapraw modyfikowanych poszczególnymi domieszkami.



Rys. 8. Wpływ czasu i rodzaju superplastyfikatora na właściwości reologiczne zapraw cementowych

Tab. 3. Właściwości reologiczne zapraw

Parametr	Czas [min]	BD	SP1	SP2	SP3	SP4
$g$ [Nmm]	10	504,8	0,66	7,35	32,97	13,34
	40	569,9	14,09	0,28	82,31	5,05
	80	–	40,23	0,78	123,35	8,94
$h$ [Nmm·s]	10	3861	469	359	413	627
	40	4409	662	458	504	648
	80	–	725	609	592	984
$R^2$ [-]	10	0,956	0,992	0,990	0,993	0,9914
	40	0,953	0,990	0,984	0,991	0,9955
	80	–	0,991	0,991	0,990	0,997
rozpływ stożka [mm]	10	Brak rozpływu	270	300	265	270
	40	Brak rozpływu	260	300	210	280
	80	Brak rozpływu	250	300	160	280

Zaprawy ze wszystkimi badanymi domieszkami osiągnęły znacząco niższe wartości parametrów  $g$  (odpowiada granicy płynięcia) oraz  $h$  (odpowiada lepkości plastycznej) w porównaniu do zaprawy kontrolnej. W przypadku SP2 (stabilizowany superplastyfikator polikarboksyłanowy) oraz SP4 (uniwersalny superplastyfikator FM) granica płynięcia nieznacznie obniża się po 40 minutach i utrzymuje się na niskim poziomie przez 80 minut. W przypadku SP1 (superplastyfikator na bazie modyfikowanych polikarboksyłanów) granica płynięcia stale wzrasta wraz z upływem czasu i po 80 minutach jest o 65% wyższa niż po 40 minutach, ale nadal pozostała znacząco niższa w porównaniu do zaprawy kontrolnej. Domieszki SP1 i SP2, pomimo podobnej bazy chemicznej, wywarły inny wpływ na granicę płynięcia zapraw wykonanych z CEM I 42,5. Najszybciej granica płynięcia wzrasta w przypadku zaprawy z SP3 (domieszka na bazie zmodyfikowanych polimerów syntetycznych z rodziny polinaftalenów). Pozostaje to w korelacji z szybkim zmniejszeniem rozpływu zaprawy (widoczne również na rysunku 5). Domieszka na bazie polinaftalenów, ze względu na elektrostatyczny mechanizm działania, spowodowała że urabialność zaprawy pogarszała się w sposób stopniowy już po kilkunastu minutach od wymieszania składników.

Lepkość plastyczna w przypadku zapraw modyfikowanych domieszkami rośnie wraz z upływem czasu. Jedynie w przypadku SP4 lepkość zaprawy jest początkowo wyższa niż w przypadku pozostałych próbek, ale nie wzrasta znacząco w czasie pierwszych 40 minut. Większy wzrost lepkości zanotowano po 80 minutach. Zaprawy modyfikowane superplastyfikatorami SP2 i SP3 charakteryzowały się zbliżonymi lepkościami we wszystkich okresach badawczych, pomimo różnej bazy chemicznej domieszek.

#### 4. Podsumowanie

Wykonano badania właściwości reologicznych oraz urabialności metodą rozpływu zapraw cementowych modyfikowanych czterema różnymi superplastyfikatorami. Na podstawie wyników badań eksperymentalnych można stwierdzić, że domieszki redukujące wodę pomimo tej samej bazy chemicznej wymagają innego poziomu dozowania w celu osiągnięcia takiego samego rozpływu zapraw wykonanych z danym cementem. Różna jest również efektywność ich działania w czasie. Ocena parametrów reologicznych kompozytów cementowych w reologicznym teście urabialności pozwala najwłaściwiej dobrać domieszkę do danego cementu, aby wykonać mieszanki o jak najniższej granicy płynięcia utrzymującej się w jak najdłuższym czasie.

#### Literatura

- Banfill P.F.G. (2006). Rheology of fresh cement and concrete. *Rheology Reviews*, 61-130.
- Bentz D.P., Ferraris C.F., Galler M.A., Hansen A.S., Guynn J.M. (2012). Influence of particle size distributions on yield stress and viscosity of cement-fly ash pastes. *Cement & Concrete Research*, Vol. 42, 404-409.
- Billberg P. (2006). Form pressure generated by Self-Compacting Concrete - Influence of thixotropy and structural behavior at rest. *Doctoral Thesis, Trita-BKN*, Bulletin 85.
- Ferraris C.F., Obla K.H., Hill R. (2001). The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement & Concrete Research*, Vol. 31, 245-255.
- Gołaszewski J. (2008). Zmiany urabialności w czasie mieszanek betonów wysokowartościowych i samozagęszczalnych. W: *Dni Betonu*, Wisła.
- Gołaszewski J., Cygan G., Drewniok M. (2014). Designing the composition of concrete mixtures based on properties of mortar. *Technical Transactions. Civil Engineering*, Vol. 1-B, 29-37.
- Mueller S., Llewellyn E.W., Mader H.M. (2010). The rheology of suspensions of solid particles. W: *Proceedings of the*

- Royal Society A: Mathematical Physical Engineering Sciences*, s. 28.
- Nehdi M., Rahman M-A. (2004). Estimating rheological properties of cement pastes using various rheological models for different test geometry, gap and surface friction. *Cement & Concrete Research*, Vol. 34, 1993-2007.
- Sant G., Ferraris C.F., Weiss J. (2008). Rheological properties of cement pastes: a discussion of structure formation and mechanical property development. *Cement & Concrete Research*, Vol. 38, 1286-1296.
- Schmidt W. (2014). Design concepts for the robustness improvement of Self-Compacting Concrete. *PhD Thesis, Eindhoven University*, the Netherlands.
- Szwabowski J. (1999). Reologia mieszanek na spowach cementowych. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice.
- Wallevik O.H., Feys D., Wallevik J.E., Khayat K.H. (2015). Avoiding inaccurate interpretations of rheological measurements for cement-based materials. *Cement & Concrete Research*, Vol. 78, 100-109.

### **INFLUENCE OF HIGH RANGE WATER REDUCING ADMIXTURES ON RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CEMENT MORTARS**

**Abstract:** The influence high range water reducing admixtures (HRWRA) on the rheological properties of cement mortars and changes of these properties with time were investigated. Natural postglacial sand 0/4 mm was used as a fine aggregate and cement CEM I 42.5 R was used as a binder. Four commercial superplasticizers were selected for these examinations: two modified polycarboxylates, one modified polynaphthalene polymer and one universal superplasticizer based on naphthalenes (FM). The flow of mortars and the change of flow with time was measured. Rheological properties were expressed in terms of Bingham model parameters  $g$  (yield value) and  $h$  (plastic viscosity) and measured using rheometrical test. Based on test results it was found out that admixture dosage in order to achieve the same flow differs despite the same chemical base of superplasticizer. Also efficiency in time is different for tested admixtures. Evaluation of yield value  $g$  and the range of changes of this parameter with time allows to select most adequately superplasticizer for the given cement.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy S/WBiŚ/1/2015 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.