

# **Objętość zaprawy a właściwości reologiczne mieszanki betonowej i ich zmiany w czasie**

## **Volume of the mortar and rheological properties of the mix and its changes with time**

### **1. Wprowadzenie**

Właściwości reologiczne mieszanki betonowej stopniowo zmieniają się z upływem czasu. Zjawisko to, nazywane powszechnie utratą urabialności, stanowi poważny problem w technologii betonu, zwłaszcza przy wytwarzaniu betonów wysokowartościowych i samozagęszczalnych. Dotychczasowe badania wykazują, że zakres zmian właściwości reologicznych mieszanek betonowych w czasie zależy przede wszystkim od rodzaju i właściwości fizykochemicznych cementu i superplastyfikatora, ilości i czasu dodawania superplastyfikatora, rodzaju i ilości dodatków mineralnych, stosunku w/c oraz temperatury. Szczegółowe omówienie tych zagadnień przedstawiono m. in. w publikacjach (1-7). Jednocześnie analiza dotychczasowych badań wykazuje, że zakres zmian parametrów reologicznych w czasie jest związany ze stopniem wypełnienia stosu okruszowego kruszywa zaczynem (8). W projektowaniu betonów nowej generacji, a zwłaszcza betonów samozagęszczalnych, zalecane są metody iteracyjne, w których najpierw przyjmuje się skład zaprawy, a następnie dodaje kruszywo grube i ustala ostateczny skład betonu spełniający założone wymagania (11). W związku z tym konieczna jest znajomość wpływu objętości i właściwości reologicznych zaprawy wypełniającej stos okruszowy kruszywa w tej mieszance na właściwości reologiczne mieszanki betonowej i ich zmiany w czasie.

W referacie przedstawiono wyniki badań wpływu objętości zaprawy o różnym stosunku w/c i zawartości superplastyfikatora na właściwości reologiczne mieszanek betonowych i ich zmiany w czasie. Jednocześnie doświadczalnie sprawdzono możliwość przewidywania parametrów reologicznych mieszanki betonowej i ich zmian w czasie na podstawie badania zapraw.

### **2. Metody badań**

#### **2.1. Pomiary parametrów reologicznych mieszanki betonowej**

Dotychczasowe badania wykazują, że właściwości reologiczne mieszanek betonowych mogą być wystarczająco dokładnie opi-

### **1. Introduction**

Rheological properties of mix underwent gradual changes with time. This effect, commonly known as workability loss, causes a serious technological problems, especially when high performance and self-compacting concretes are produced. In recent years, a considerable number of studies concerning the rheological properties of cement based mixtures were done. It was stated that the rheological parameters of the mixture as well as nature and range of its changes with time depend mostly on cement and superplasticizer physicochemical properties, superplasticizer content, time of superplasticizer addition, w/c ratio and temperature. The detailed information of influence of these factors on rheological properties of mix is presented in the papers (1-7). Simultaneously, the analysis of the studies executed so far indicate that the nature and range of rheological properties change of the mix with time may also be related to the cement paste volume (or mortar volume) share in this material (8). However, in designing new generation concretes, especially self-compacting concrete, iteration methods are recommended, in which first the share of mortar is assumed, next the coarse aggregate is added, and at the end the final composition of concrete mixture is accepted (11). In connection with that, it is necessary to identify how the volume of mortar in concrete and mortar rheological properties influence rheological properties of the mix, whose aggregate has been filled with this mortar to various extents.

The investigation methods and results of the influence of mortar volume and different w/c ratio as well as superplasticizer content on the mix rheological parameters and its change with time are presented and discussed in this paper. Additionally, the prediction possibility of rheological properties change of the mix with time based on mortars properties was proved.

### **2. Experiments**

#### **2.1. Measurements of rheological parameters of mortar and mix**

The executed laboratory studies show that rheological behaviour of the mixtures may be sufficiently correctly described by Bingham's

sane za pomocą reologicznego równania stanu ciała Bingham'a o postaci:

$$\tau = \tau_o + \gamma \eta_{pl} \quad [1]$$

gdzie:  $\tau$  (Pa) jest naprężeniem stycznym przy prędkości ścinania  $\gamma$  (1/s), a  $\tau_o$  (Pa) i  $\eta_{pl}$  (Pas) oznaczają odpowiednio granicę płynięcia i lepkość plastyczną (6, 9, 10).

Granica płynięcia określa wielkość obciążenia koniecznego do wywołania płynięcia mieszanki. Z chwilą gdy naprężenia styczne przekroczą tę granicę następuje płynięcie mieszanki, a opór płynięcia zależy od lepkości plastycznej; im większa jest lepkość plastyczna mieszanki tym mniejsza będzie jej prędkość.

Parametry reologiczne można wyznaczyć poprzez pomiar momentów oporu ścinania  $M$  stawianych przez mieszankę betonową przy ustalonych, co najmniej dwóch znacznie różniących się prędkościach ścinania  $N$ . Parametry reologiczne wyznacza się metodą regresji liniowej z równania:

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

gdzie:  $g$  (Nm) i  $h$  (Nm s) są stałymi reologicznymi odpowiadającymi odpowiednio granicy płynięcia  $\tau_o$  i lepkości plastycznej  $\eta_{pl}$  mieszanki.

Po wyznaczeniu stałych pomiarowych reometru można, jeśli to konieczne, wyrazić wartości  $g$  i  $h$  w jednostkach fizycznych. Sposób wyznaczenia stałych pomiarowych reometru przedstawiono w pracy (9). Podstawy teoretyczne i zasady pomiarów reologicznych omówiono szeroko w opracowaniach monograficznych (6, 9, 10).

## 2.2. Plan badań

W badaniach określono wpływ objętości zapraw o różnym stosunku w/c i dodatku superplastyfikatora na parametry reologiczne mieszanek betonowych. Przyjęto trzy poziomy objętości zaprawy odpowiadające stosunkom objętościowym zaprawy do mieszanki betonowej  $Z_v = 0,68, 0,64, 0,58$  oraz dwa poziomy stosunku w/c = 0,30 i 0,35 (tablica 1). Dodatek superplastyfikatora zmieniano w przedziale od 1,5 do 3,5% masowych cementu (przy w/c = 0,30) lub 1,5 do 3% masowych cementu (przy w/c = 0,35). Dodatkowo określono wpływ dodatku superplastyfikatora na parametry reologiczne mieszanek o w/c = 0,40 i  $Z_v = 0,64$ . Poziomy poszczególnych czynników dobierano tak, aby były zgodne z zalecanym składem dla betonów wysokowartościowych i samozagęszczalnych (4, 5, 11).

## 2.3. Właściwości materiałów i składy mieszanek

Właściwości zastosowanego w badaniach cementu CEM II/B-S 32,5 R podano w tablicy 3, a superplastyfikatora w tablicy 4. Zaprawy miały stosunek piasku do cementu P/C = 1,5. W mie-

model according to the equation:

$$\tau = \tau_o + \gamma \eta_{pl} \quad [1]$$

where:  $\tau$  (Pa) is the shear stress at shear rate,  $\gamma$  (1/s) and  $\tau_o$  (Pa) and  $\eta_{pl}$  (Pas) are the yield value and plastic viscosity, respectively (6, 9, 10).

Yield value  $\tau_o$  determines the value of load necessary to produce the mixture flow. When the shear stress  $\tau$  surpasses yield value  $\tau_o$ , the flow of mixture occurs, and the resistance of this flow depends on plastic viscosity  $\eta_{pl}$ ; the higher the plastic viscosity  $\eta_{pl}$  of the mixture, the smaller the rate of its flow.

The rheological parameters of the mix or mortar can be measured by applying no less than two considerably different shear rates  $N$  and measuring the resulting shear stresses  $M$ . The rheological parameters are determined by the regression analysis according to the relation:

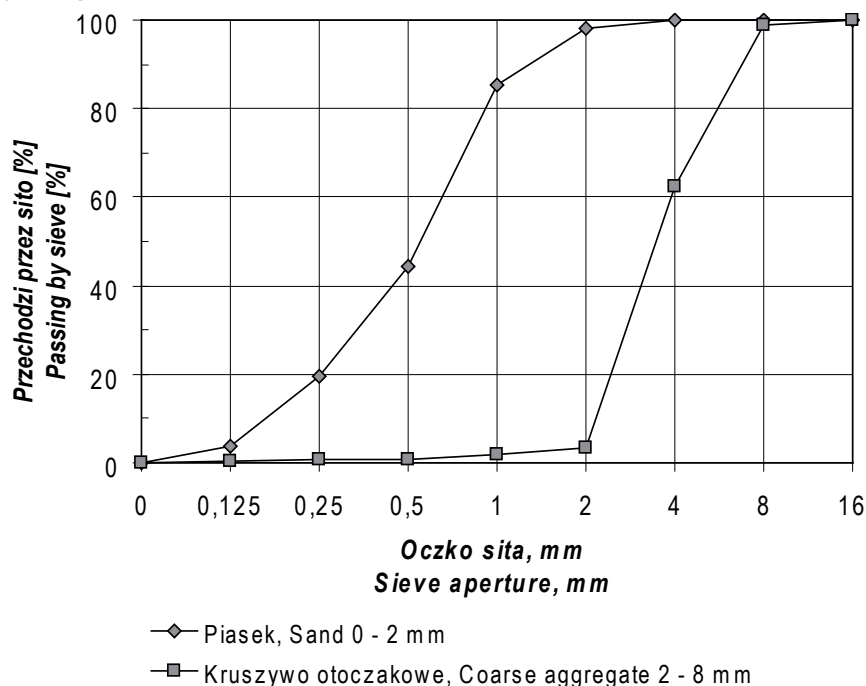
$$M = g + h N \quad [2]$$

where:  $g$  (N.m) and  $h$  (N.m.s) are rheological constants corresponding to yield value  $\tau_o$  and plastic viscosity  $\eta_{pl}$ , respectively.

After determining measurement constants of the rheometer it is possible, if necessary, to express the values  $g$  and  $h$  in physical units. The method of determining measurement constants of the rheometer are presented in (9). Theoretical basis and rules for rheological measurements are discussed widely in the monographic studies (6, 9, 10).

## 2.2. Testing program

The influence of mortar volume in concrete, different in w/c ratio and superplasticizer content on rheological parameters of the mix was investigated. Three degrees of filling voids in coarse aggregate



Rys. 1. Uziarnienie kruszywa

Fig. 1. Aggregate grading

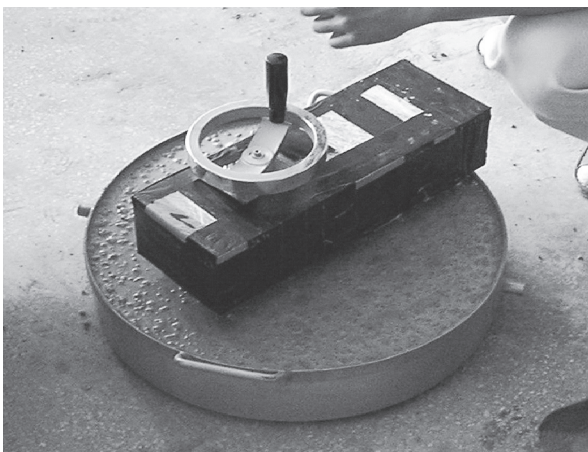
Tablica 1 / Table 1  
PLAN BADANIA  
RESEARCH PROGRAM

$Z_v$	w/c	Ilość superplastyfikatora Superplasticizer content
0,68	0,30	1,5; 2,0; 2,5; 3,0
	0,35	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
0,64	0,30	1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5
	0,35	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
	0,40	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5
0,58	0,30	2,0; 2,5; 3,0; 3,5
	0,35	1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0

szankach zastosowano piasek 0÷2 mm oraz żwir otoczkowy 2÷8 mm o krzywych przesiewu przedstawionych na rysunku 1. Składy mieszanek betonowych podano w tablicy 2.

## 2.4. Metody badań

Mieszanki przygotowano w mieszalniku o pojemności 50 dm<sup>3</sup>. Pomiar parametrów reologicznych wykonano za pomocą reometru BT2 dostosowanego do mieszanek o dużym stopniu upłynnienia (o opadzie stożka co najmniej 200 mm) po 5 i 60 min od zmieszania składników. Pomiedzy pomiarami mieszanek przechowywano w mieszalniku pod przykryciem. Przed drugim pomiarem mieszanek mieszano przez 30 s. Reometr BT pokazano na rysunku 2. W trakcie pomiaru reometr BT2 umieszczony w środku pojemnika pomiarowego wypełnionego mieszaną, powinien wykonać jeden pełny obrót. Pomiar polega na zmierzeniu momentu obrotowego za pomocą dwóch sond oraz prędkości kątovej. Na tej podstawie wyliczane są wielkości parametrów reologicznych mieszanek. Zasady i sposób pomiaru parametrów reologicznych za pomocą reometru BT2 zostały omówione w pracy (12). W badaniach przyjęto stały czas pomiaru (pełnego obrotu) wynoszący 15±2 s. Ponieważ reometr BT2 nie ma określonych stałych pomiarowych, zmierzone parametry reologiczne przedstawiono w jednostkach umownych. Dla każdego badanego składu betonu wykonano cztery pomiary parametrów reologicznych.



Rys. 2. Reometr BT2

Fig. 2. BT 2 rheometer

gate with mortar were adopted, corresponding with mortar to the concrete volume proportion:  $Z_v = 0.66, 0.61, 0.56$  and two levels of w/c ratio; namely 0.30, 0.35 (Table 1). The superplasticizer content was changed in the range from 1 to 3 mass % of cement (w/c = 0.30) or in range from 1.5% to 3% by mass (w/c = 0.35). The factors taken into consideration and their levels are shown in Table 1. Additionally, the influence of superplasticizer content on rheological parameters of the mix of w/c = 0.40 and  $Z_v = 0.64$  was investigated. The level of these factors was chosen according to the composition recommended for high performance and self-compacting concretes (4, 5, 11).

## 2.3. Materials properties and composition of mixtures

The properties of cement CEM II/B-S 32.5 R and superplasticizer used in tests are given in Table 3 and 4, respectively. The mortars have been designed with sand to cement ratio s/c = 1.5. Sieve grading for sand 0÷2 mm and coarse aggregate 2÷8 mm used in tests are given in Figure 1. The compositions of mixtures are presented in Table 2.

## 2.4. Testing method

The mixtures have been prepared in a pan mixer of 50 dm<sup>3</sup> volume. The measurement of rheological parameters has been performed with BT2 rheometer for mix with (slump not less than 200 mm).

Tablica 2 / Table 2

SKŁADY ZAPRAW I MIESZANEK BETONOWYCH  
COMPOSITION OF MORTARS AND CONCRETES

Stosunek objętości zaprawy do mieszanek betonowej $Z_v$ Mortar to concrete volume proportion $Z_v$	Składniki Components, kg/m <sup>3</sup>	Stosunek w/c w/c ratio		
		0,30	0,35	0,40
Zaprawy / ortars				
$Z_v = 1$	C	841	807	776
	S	1262	1211	1164
	W	252	282	310
Mieszanka betonowa / Mix				
$Z_v = 0,68$	C	570	554	
	S	855	831	
	K	855	831	
	W	171	194	
$Z_v = 0,64$	C	532	518	505
	S	797	777	757
	K	975	949	926
	W	159	181	202
$Z_v = 0,58$	C	491	479	
	S	736	718	
	K	1104	1077	
	W	147	168	

C - cement; W - woda, S - piasek 0 - 2 mm; K - kruszywo otoczkowe 2 - 8 mm

C - cement; W - water, S - sand 0 - 2 mm; K - aggregate 2 - 8 mm

Tablica 3 / Table 3

WŁAŚCIWOŚCI CEMENTU CEM II/B-S 32,5 R  
 PROPERTIES OF CEMENT CEM II/B-S 32,5 R

Składniki / omponents, %							Powierzchnia właściwa Specific surface, m <sup>2</sup> /kg
SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> Oe	SO <sub>3</sub>	
24,7	56,7	6,3	2,3	2,9	0,70	3,2	325

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI SUPERPLASTYFIKATORA  
 PROPERTIES OF SUPERPLASTICIZERS

Składnik bazowy Major constituent	Gęstość Density, g/cm <sup>3</sup>	Koncentracja Concentration, %
polyeter	1,09	34

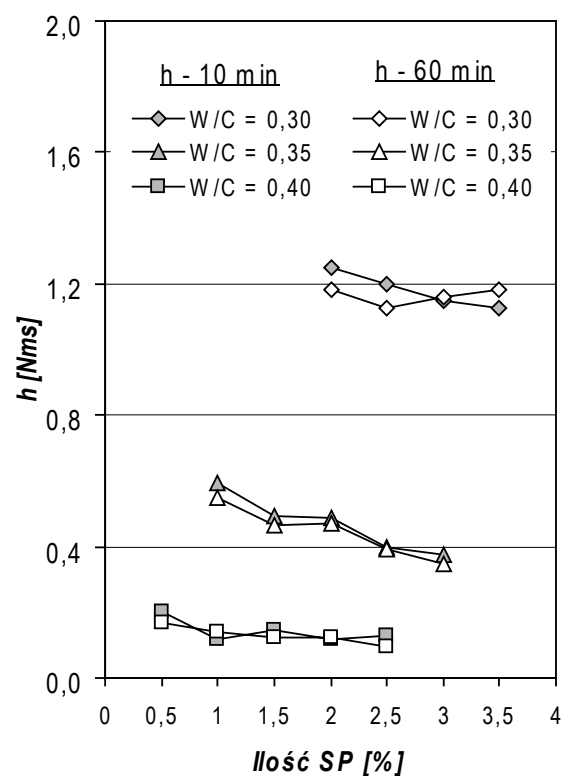
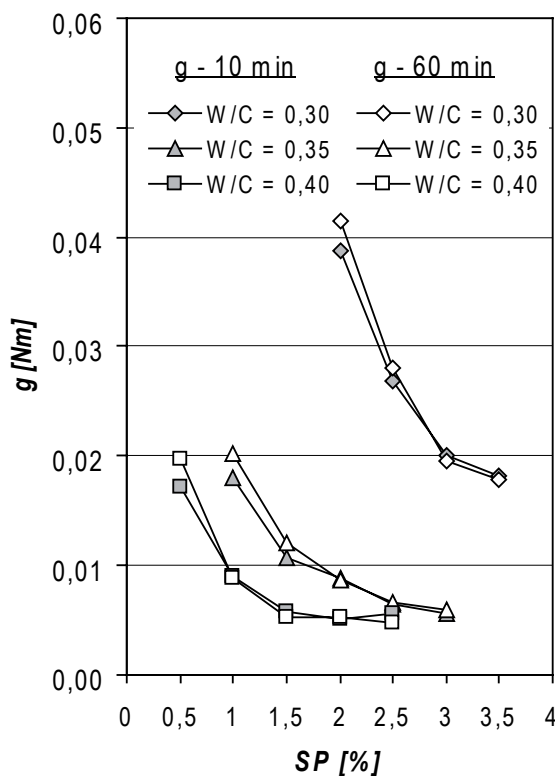
### 3. Wyniki badań i ich omówienie

Parametry  $g$  i  $h$  zapraw analogicznych do zapraw wypełniających stos okruczowy w badanych mieszankach betonowych zmniejszają się wraz ze wzrostem ilości superplastyfikatora oraz zwiększają się wraz ze zmniejszaniem stosunku w/c (rysunek 3). Parametr  $g$  zapraw wykazuje wzrost, natomiast parametr  $h$  spadek z upływem czasu. Zmiany te są znacznie większe w przypadku zapraw o mniejszym stosunku w/c i małym dodatku superplastyfikatora. Ogólnie jednak, zakres zmian właściwości reologicznych zapraw w czasie można uznać za niewielki.

BT rheometer is presented in Figure 2. To execute the measurement, a sample of the mix is placed in a container, the BT2 rheometer is placed in the middle of measurement container, and subsequently one full turn is performed. During the test the turn moment is measured with two probes, as well as its angular velocity. On this basis, the values of rheological parameters of the mix are calculated. The methods of rheological parameters measuring with the BT2 rheometer are discussed in detail in paper (12). During the tests a fixed time of measurement (of one full turn) was adopted, equal to  $15 \pm 2$  s. As the measurement constants have not been yet determined for the BT2 rheometer, thus the measured rheological parameters are presented in conventional units. For each tested mixture at least four measurements of rheological parameters were executed after the 5 and 60 min after end of mixing.

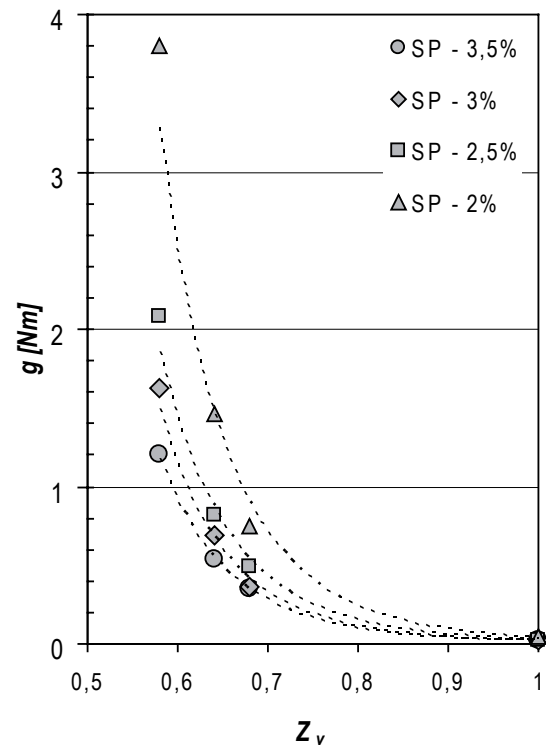
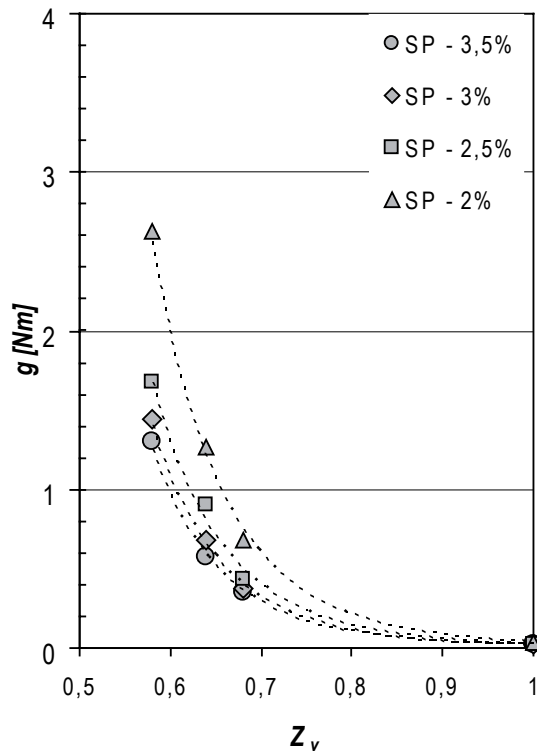
### 3. Results and discussion

Rheological parameters  $g$  and  $h$  of mortars analogical to the mortars filling the voids of aggregate of tested mixes decrease with increasing quantity of added superplasticizer and increase with decreasing w/c ratio (Fig. 3). Parameter  $g$  of mortars is increasing, while parameter  $h$  is decreasing with time. Such changes are more significant for mortars of lower w/c ratio and lower superplasticizer content. However, the range of rheological properties changes of mortars are so small that they may be regarded as insignificant.



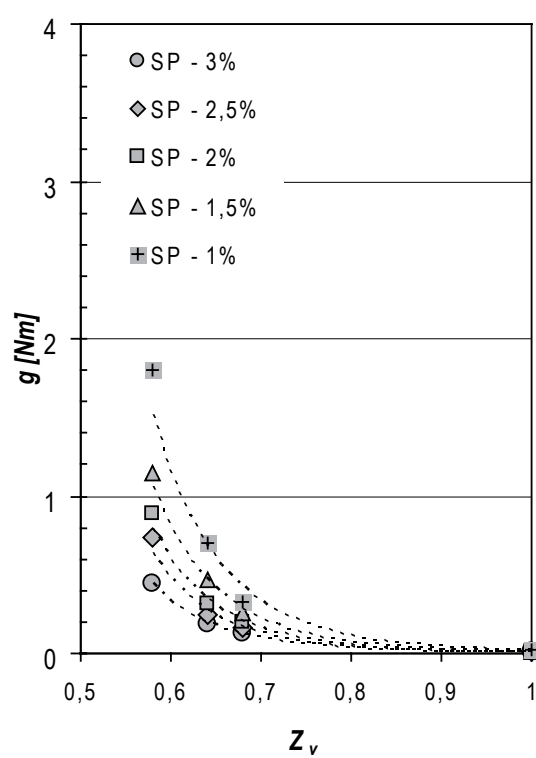
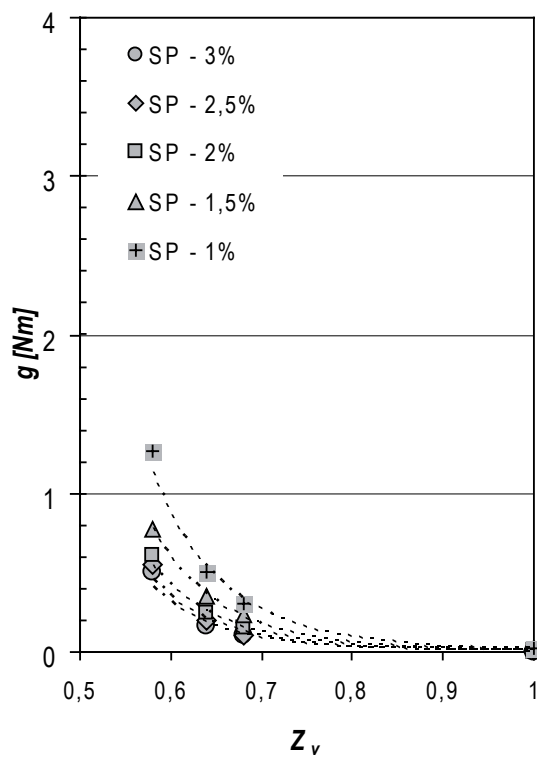
Rys. 3. Wpływ stosunku w/c i ilości superplastyfikatora na granicę płynięcia  $g$  i lepkość plastyczną  $h$  zapraw analogicznych do zapraw wypełniających stos okruczowy kruszywa mieszanek betonowych

Fig. 3. Influence of w/c ratio and superplasticizer content on yield value  $g$  and plastic viscosity  $h$  of fresh mortars analogical to mortars that filling voids in coarse aggregate in concretes



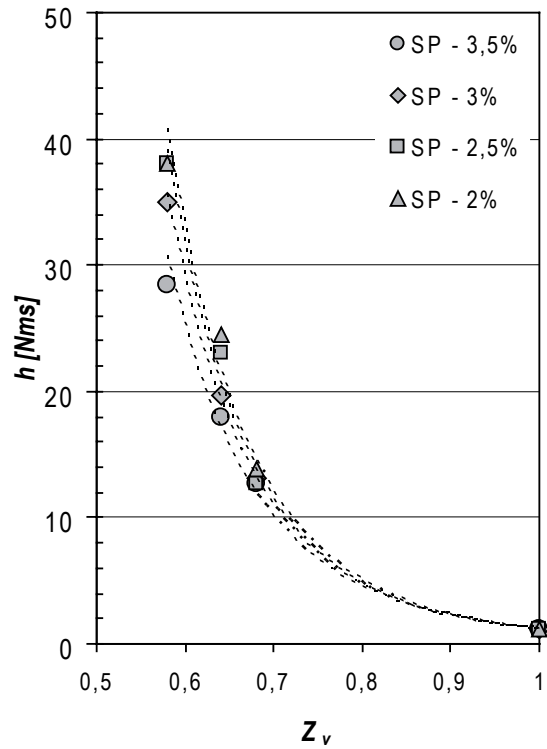
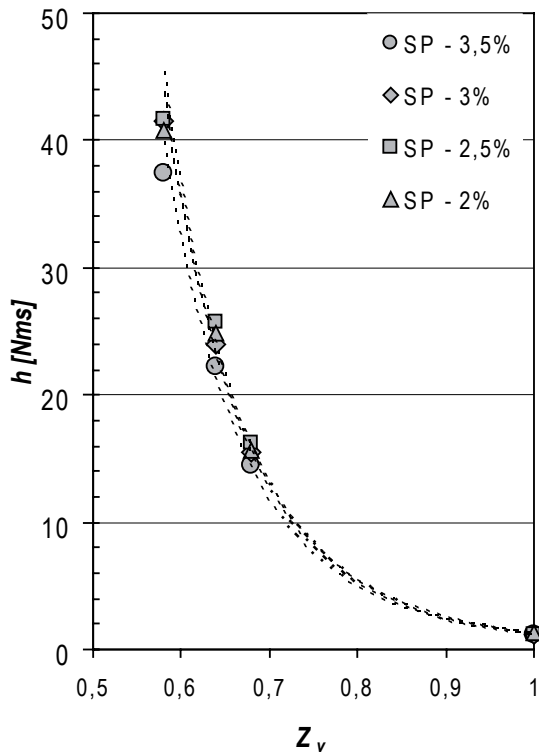
Rys. 4. Wpływ objętości zaprawy o  $w/c = 0,30$  i różnego dodatku superplastyfikatora na granicę płynięcia  $g$  mieszanki betonowej w różnym stopniu wypełnionych tą zaprawą. a - po 5 min, b - po 60 min

Fig. 4. Influence of volume of  $w/c = 0.30$  mortar with different content of superplasticizer on yield value  $g$  of mix with different mortar volume share. a - after 5 min, b - after 10 min



Rys. 5. Wpływ objętości zaprawy o  $w/c = 0,35$  i różnego dodatku superplastyfikatora na granicę płynięcia  $g$  mieszanki betonowej w różnym stopniu wypełnionych tą zaprawą. a - po 5 min, b - po 60 min

Fig. 5. Influence of mortar volume with  $w/c = 0.35$  and with different superplasticizer content on yield value  $g$  of the mix with different mortar volume share. a - after 5 min, b - after 10 min

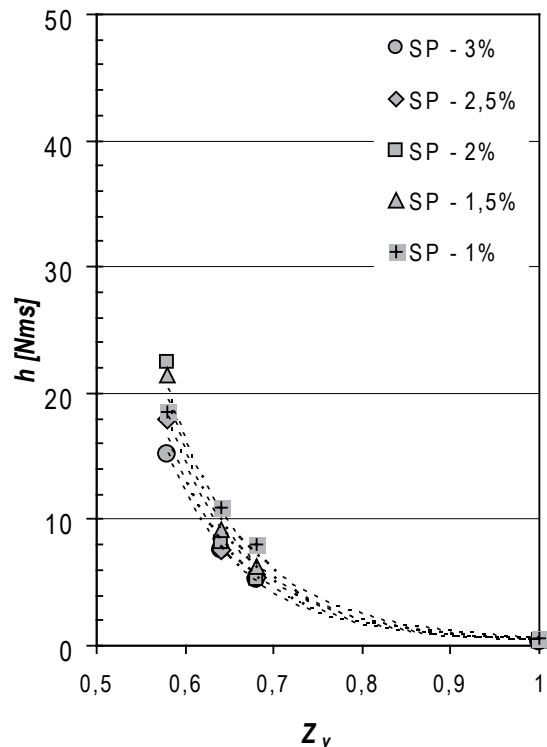
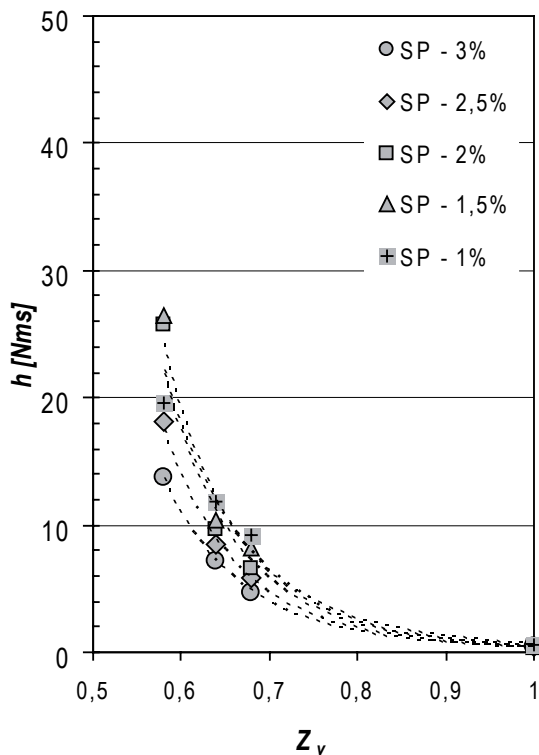


a

b

Rys. 6. Wpływ objętości zaprawy o  $w/c = 0,30$  i różnego dodatku superplastyfikatora na lepkość plastyczną  $h$  mieszanki betonowej w różnym stopniu wypełnionych tą zaprawą. a - po 5 min, b - po 60 min

Fig. 6. Influence of mortar volume with  $w/c = 0.30$  and with different content of superplasticizer on plastic viscosity  $h$  of mix with different mortar volume share. a - after 5 min, b - after 10 min

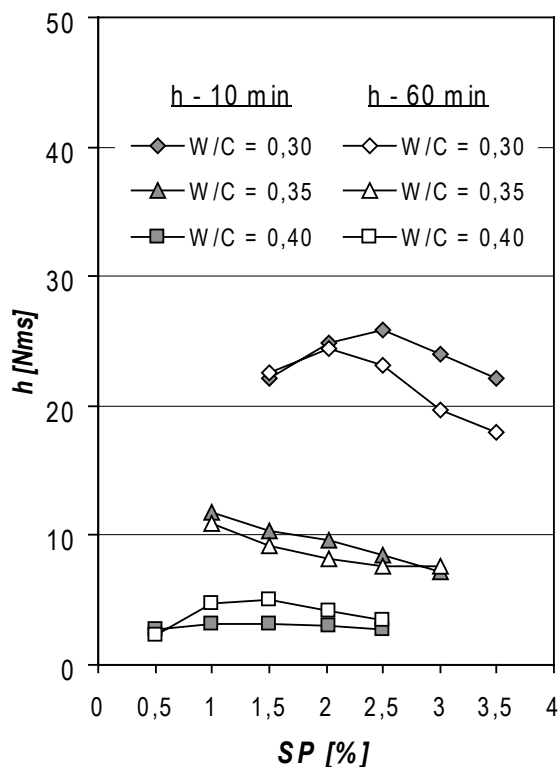
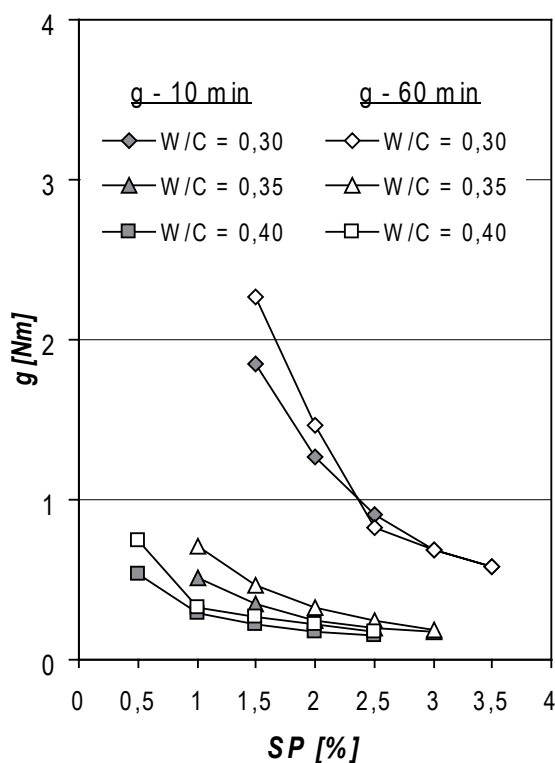


a

b

Rys. 7. Wpływ objętości zaprawy o  $w/c = 0,35$  i różnego dodatku superplastyfikatora na lepkość plastyczną  $h$  mieszanki betonowej w różnym stopniu wypełnionych tą zaprawą. a - po 5 min, b - po 60 min

Fig. 7. Influence of volume of  $w/c = 0.35$  mortar with different content of superplasticizer on plastic viscosity  $h$  of the mix with different mortar volume share. a - after 5 min, b - after 10 min



Rys. 8. Wpływ stosunku w/c i ilości superplastyfikatora na granicę płynięcia  $g$  i lepkość plastyczną  $h$  mieszanki betonowej o  $Z_v = 0,64$   
 Fig. 8. Influence of w/c ratio and superplasticizer content on yield value  $g$  and plastic viscosity  $h$  of the mix with  $Z_v = 0.64$

Uzyskane zależności wpływu objętości zaprawy (współczynnika  $Z_v$ ) i ilości superplastyfikatora na parametry reologiczne mieszanek betonowych przedstawiono na rysunkach 4-8. Analizę wariancji wpływu czasu, stosunku w/c, ilości zaprawy i ilości superplastyfikatora na reologiczne mieszanek betonowych przedstawiono w tabelicy 5.

Zwiększanie objętości zaprawy w mieszance betonowej powoduje zmniejszenie parametru  $g$  tej mieszanki. Efekt ten jest tym większy, im mniejszy jest stosunek w/c i/lub mniejsza jest zawartość

The obtained relations of mortar volume influence in concrete ( $Z_v$  ratio) and superplasticizer content on rheological parameters of the mix are presented in Figures 4 - 8. The analysis of variance ANOVA of time influence, w/c ratio, mortar volume share in concrete and superplasticizer content on rheological parameters of mix are presented in Table 5.

Increasing the volume share of mortar filling the voids in aggregate in the mix causes a decrease of parameter  $g$  of this concrete. This effect is increasing with decreasing w/c ratio and superplasticizer

Tablica 5 / Table 5

ANALIZA WARIANCJI WPŁYWU CZASU, STOSUNKU W/C, ILOŚCI ZAPRAWY I ILOŚCI SUPERPLASTYFIKATORA NA GRANICĘ PŁYNIĘCIA  $G$  I LEPKOŚĆ PLASTYCZNĄ  $H$  MIESZANKI BETONOWEJ.

ANALYSIS OF VARIANCE ANOVA OF INFLUENCE OF TIME W/C RATIO, MORTAR VOLUME AND SUPERPLASTICIZER CONTENT ON YIELD VALUE  $G$  AND PLASTIC VISCOSITY  $H$  OF THE MIX.

Źródło wariancji Source of variation	Granica płynięcia $g$ Yield value $g$		Lepkość plastyczna $h$ Plastic viscosity $h$	
	F	$\alpha$	F	$\alpha$
A: Czas, time	24,208	0,000	15,898	0,000
B: Stosunek w/c, w/c ratio	558,767	0,000	1780,920	0,000
C: Objętość zaprawy, mortar volume	356,452	0,000	1175,613	0,000
D: Ilość SP, SP content	92,139	0,000	11,918	0,000
AB	8,406	0,004	7,472	0,007
AC	12,453	0,000	2,065	0,131
BC	143,799	0,000	61,491	0,000
AD	4,841	0,003	0,092	0,964
BD	55,685	0,000	11,622	0,000
CD	21,119	0,000	3,155	0,007

It is also worth noticing, that if w/c ratio and/or superplasticizer content are smaller, the higher volume share of mortar is necessary to obtain the chosen value of  $g$  parameter of the mix. Simultaneously, if the mortar volume share in mixture is small, to obtain the mix of a similar yield value  $g$  as for the mix with the high volume of mortar is difficult, even if the quantity of added superplasticizer is very large.

Parameter  $g$  of all tested mixes, independently of mortar volume, w/c ratio and superplasticizer content, increases with time. The range of increase of parameter  $g$  with time depends gradually of w/c ratio, mortar volume share in concrete and

superplastyfikatora w zaprawie (i w mieszance betonowej). Warto przy tym zauważyć, że im mniejszy jest stosunek w/c i/lub ilość superplastyfikatora, tym potrzebna jest większa objętość zaprawy w celu uzyskania zadanej wartości parametru  $g$  mieszanki betonowej. Jednocześnie przy małej objętości zaprawy i/lub małym stosunku w/c nawet duży dodatek superplastyfikatora nie zapewnia małych wartości parametru  $g$ .

Parametr  $g$  mieszanek betonowych zawsze, niezależnie od objętości zaprawy oraz stosunku w/c i zawartości superplastyfikatora, zwiększa się z upływem czasu. Zakres tego wzrostu zależy kolejno od stosunku w/c, objętości zaprawy w mieszance oraz ilości superplastyfikatora. Zwiększenie objętości zaczynu powoduje zmniejszenie zakresu wzrostu parametru  $g$  w czasie, przy czym efekt ten słabnie wraz ze wzrostem stosunku w/c. Jednocześnie zwiększenie stosunku w/c i/lub zwiększenie dodatku superplastyfikatora zawsze zmniejsza wzrost parametru  $g$  w czasie. Warto przy tym zauważyć, że uzyskanie mieszanki charakteryzującej się brakiem zmian parametru  $g$  w czasie wymaga dodania superplastyfikatora w ilości znacznie przekraczającej dodatek wystarczający do uzyskania minimalnej wartości parametru  $g$  bezpośrednio po zakończeniu mieszania.

Parametr  $h$  mieszanek betonowych maleje wraz ze wzrostem objętości zaprawy, przy czym wpływ objętości zaprawy jest tym większy im większy jest stosunek w/c. Wpływ ilości superplastyfikatora na parametr  $h$  mieszanek zależy od objętości zaprawy i stosunku w/c. W przypadku mieszanek o małym stosunku w/c i małej ilości zaprawy zwiększanie dodatku superplastyfikatora początkowo powoduje wzrost parametru  $h$ , a następnie, po osiągnięciu pewnego maksimum, jego zmniejszenie. W przypadku mieszanek o dużym stosunku w/c i/lub dużej objętości zaprawy zwiększenie dodatku superplastyfikatora powoduje zwykle zmniejszenie parametru  $h$ .

Rodzaj zmian parametru  $h$  mieszanek betonowych w czasie zależy od stosunku w/c. W przypadku mieszanek o w/c = 0,30 parametr  $h$  maleje z upływem czasu. Zakres tych zmian jest tym większy im mniejsza jest objętość zaprawy oraz im większy jest dodatek superplastyfikatora. Przy większej objętości zaprawy i małym dodatku superplastyfikatora zmiany parametru  $h$  w czasie są tak małe, że można ich nie uwzględniać. W przypadku mieszanek o w/c = 0,35 kierunek zmian parametru  $h$  w czasie zależy od objętości zaprawy w mieszance. W przypadku mieszanek o  $Z_v = 0,58$  i  $0,64$  parametr  $h$  maleje, a w mieszankach o  $Z_v = 0,68$  wzrasta z upływem czasu. Zakres tych zmian, niezależnie od ilości zaprawy w mieszance maleje wraz ze wzrostem zawartości superplastyfikatora. W przypadku mieszanek o w/c = 0,40 parametr  $h$  rośnie z upływem czasu, a zakres tego wzrostu nie zależy od dodatku superplastyfikatora.

Porównanie wpływu stosunku w/c i ilości superplastyfikatora na właściwości reologiczne zapraw i mieszanek betonowych wykazuje, że charakter zmian parametrów  $g$  i  $h$  mieszanek betonowych generalnie pokrywa się z kierunkiem zmian parametrów reologicznych wypełniających te mieszanki zapraw. Wyniki badań pozostają w zgodności z pracami (7, 13) wykazującymi, że zależności łączące wartości parametrów reologicznych mieszanki betonowej z para-

superplasticizer content. Increasing the mortar volume in concrete causes a decrease range of parameter  $g$  increase with time; this effect is weakening with increasing w/c ratio. Simultaneously, increasing w/c ratio and/or increasing superplasticizer content always decreases the range of parameter  $g$  increase with time. It is worth mentioning, that assuring the insignificant changes of yield value  $g$  of the mix with time demands a considerably higher quantity of superplasticizer addition than assuring the minimum yield value  $g$  directly after the end of mixing.

Parameter  $h$  of the mix is decreasing with increasing the volume share of mortar in concrete; this effect is decreasing with increasing w/c ratio. It should be noted that the nature of influence of superplasticizer content on parameter  $h$  of the mix depends on the mortar volume share in concrete and w/c ratio. In the case of mixtures with low w/c ratio, the increase of superplasticizer content initially increases parameter  $h$  and then, after reaching some maximum value, plastic viscosity  $h$  is decreasing. In the case of mortars with high w/c ratio and/or high mortar volume the increase of superplasticizer content usually causes a decrease of parameter  $h$ .

The character of parameter  $h$  change with time of the mix depends mainly on w/c ratio. In case of concrete mixtures with w/c = 0.30, parameter  $h$  decreases with time. The range of these changes is the higher the lower mortar volume in concrete is, and the higher superplasticizer content is. When the mortar volume is high and superplasticizer addition is low, the changes of parameter  $h$  with time may be insignificant. In the case of the mixtures with w/c = 0.35, the character of plastic viscosity changes with time and depends on mortar volume share in concrete. For mixtures with  $Z_v = 0.58$  and  $0.64$  plastic viscosity  $h$  decreases with time, and for mixtures with  $Z_v = 0.68$  is increasing with time. The range of these changes decreases with the increased superplasticizer content. In the case of mixtures with w/c = 0.40, plastic viscosity  $h$  is increasing with time.

As it can be clearly seen from diagrams in Figures 4 - 8, rheological parameters of mixtures are in direct correlation with rheological parameters of mortars and with the coarse aggregate voids filling with analogous mortar. The direction of change of two rheological parameters of mixtures resulting from w/c ratio and superplasticizer content change and resulting from time passing in general are of a similar character that the change of mortars rheological parameters of mortars analogous to mortars in these mixtures. The obtained results confirm the relationships defined in (7, 13), showing that mathematical relations describing mix rheological parameters on the basis of mortar rheological parameters analogous to mortar that fills voids in coarse aggregate of that mixture are as follows:

$$g_m = g_z \cdot Z_v^a \quad [3]$$

$$h_m = h_z \cdot Z_v^b \quad [4]$$

where:  $g_m$  and  $g_z$  – shear resistance of mixture and mortar, respectively,



metrami reologicznymi zaprawy wypełniającej stos okruskowy tej mieszanki i ilością tej zaprawy mają postać:

$$g_m = g_z \cdot Z_v^a \quad [3]$$

$$h_m = h_z \cdot Z_v^b \quad [4]$$

gdzie:  $g_m$  i  $g_z$  - graniczny opór ścinania odpowiednio mieszanki betonowej i zaprawy,

$h_m$  i  $h_z$  - opór płynięcia lepkiego odpowiednio dla mieszanki betonowej i zaprawy,

$Z_v$  - stosunek objętościowy zaprawy do mieszanki betonowej,

$a$ ,  $b$  - stałe materiałowe zależne od właściwości składników mieszanki betonowej, prawdopodobnie głównie od rodzaju i uziarnienia kruszywa.

W omawianych badaniach stałe materiałowe wynoszą  $a = -7,93 \pm 0,25$  oraz  $b = -6,67 \pm 0,29$ . Wykresy funkcji [3] i [4] dla poszczególnych serii badań podano na rysunkach 4 - 7. Współczynniki  $R^2$  określające stopień dopasowania wyników pomiarów do obliczonych ze wzorów [3] i [4] mieszczą się w przedziale od 0,982 do 0,995. Uzyskane wysokie współczynniki korelacji oraz relatywnie małe wielkości odchylenia parametrów reologicznych wyliczonych z modelu od zmierzonych w badaniach kontrolnych świadczą o tym, że wzory [3] i [4] dobrze opisują zależność parametrów reologicznych mieszanki betonowej od parametrów reologicznych zaprawy wypełniającej stos okruskowy w tej mieszance.

Na rysunkach 9 i 10 pokazano zależności liniowe pozwalające na przeliczenie uzyskanych w pomiarach wartości parametrów

$h_m$  and  $h_z$  – flow resistance, respectively for concrete mix and mortar,

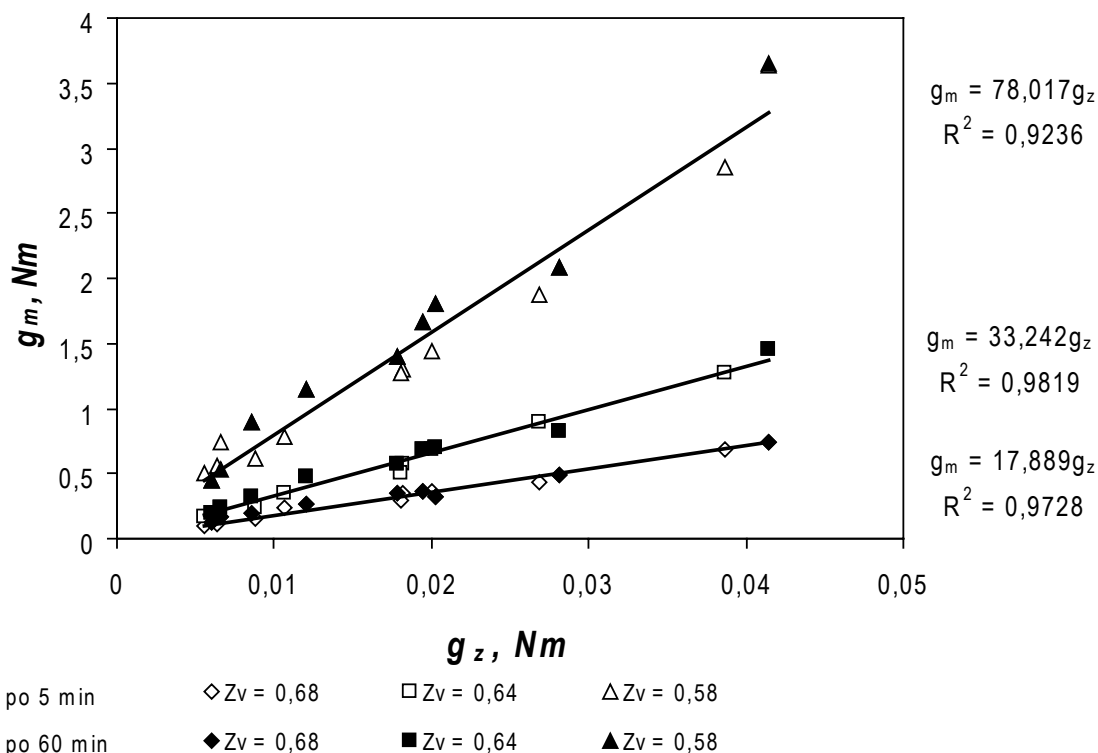
$Z_v$  - mortar to concrete mass proportion,

$a$ ,  $b$  – material constants depending on concrete constituents properties, probably mainly on aggregate type and grading.

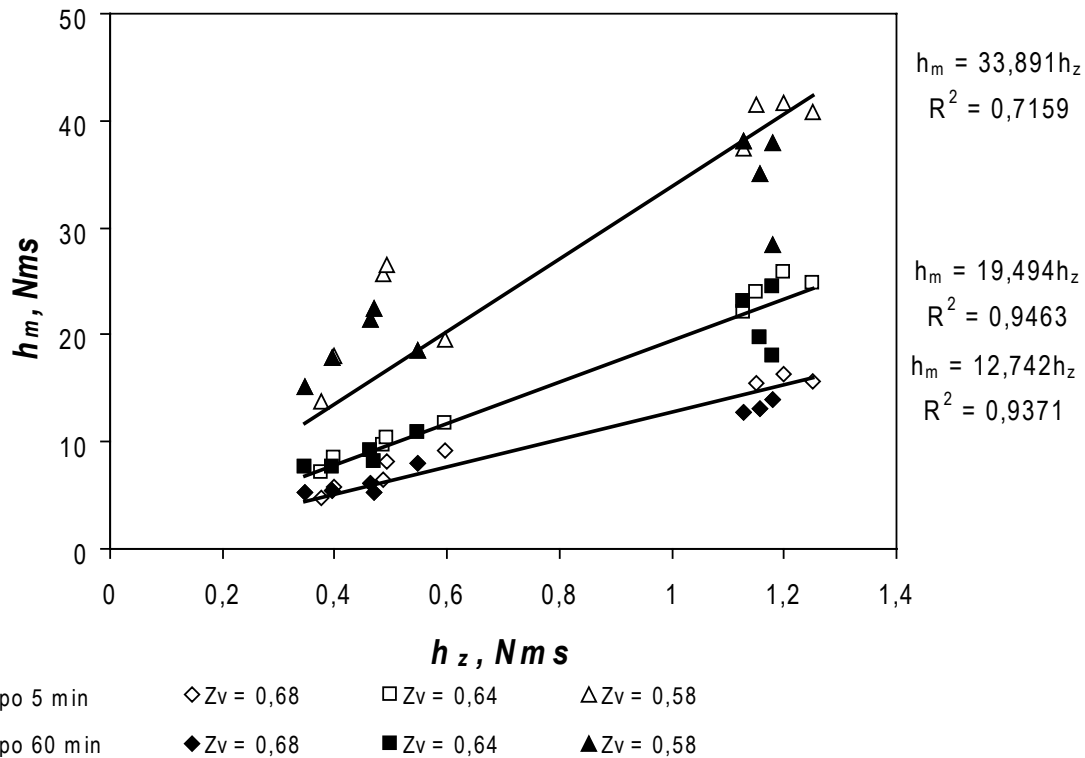
In case of the presented results material constants are:  $a = -7.93 \pm 0.25$  and  $b = -6.67 \pm 0.29$ .

The diagrams of functions [3] and [4] for respective series of tests are given in Figures 4 - 7. Coefficients  $R^2$ , determining the degree of matching the results of measurements with functions [3] and [4] are included in the range between 0.982 0.943 and 0.995. High correlation coefficients value confirm that functions [3] and [4] describe well the relation of rheological parameters of the mix with rheological parameters of mortar, analogous to mortar filling voids in coarse aggregate. In Figures 9 and 10 linear relations are given, enabling the values of mortar parameters obtained during measurements (of proportion P/C = 1.5 with addition of superplasticizer) can be converted into rheological properties of mixture with coarse aggregate of maximum size of 8 mm and of volume mortar share. Average deviation of measured parameters  $g$  and  $h$  of mixtures from the values of these parameters calculated from the relations presented on figures 9 and 10 amounts to, respectively, 12.4% and 10.8%.

The presented relationships prove that basing on rheological parameters of mortar it is possible to anticipate accurately enough the rheological parameters and their changes with time of the mixture having the same mortar, taking into consideration the size and the



Rys. 9. Granica płynięcia  $g_z$  zaprawy o P/C = 1,5, a granica płynięcia  $g_m$  mieszanki betonowej z kruszywem otoczkowym 2 - 8 mm  
 Fig. 9. Yield value  $g_z$  of mortar with P/C = 1.5 versus yield value  $g_m$  of mixture with coarse aggregate 2 - 8 mm



Rys. 10. Lepkość plastyczna  $h_z$  zaprawy o P/C = 1,5, a lepkość plastyczna  $h_m$  mieszanki betonowej z kruszywem otoczkowym 2 - 8 mm  
 Fig. 10. Plastic viscosity  $h_z$  of mortar with P/C = 1.5 mortar versus plastic viscosity  $h_m$  of the mixture with coarse aggregate 2 - 8 mm

zaprawy na właściwości reologiczne mieszanki betonowej, której stos okruszowy w różnym stopniu wypełniony jest analogiczną zaprawą. Średnie odchylenie zmierzonych parametrów  $g$  i  $h$  mieszanek od wielkości tych parametrów obliczonych na podstawie zależności podanych na rysunkach 9 i 10 wynosi odpowiednio 12,4% i 10,8%. Generalnie potwierdzają więc one możliwość przewidywania parametrów reologicznych mieszanek betonowych i ich zmian w czasie w oparciu o badania zapraw. Należy jednak zwrócić uwagę, że w przypadku mieszanek o małej objętości zaprawy oraz małym stosunku w/c przewidywanie zmian parametru  $h$  mieszanki w czasie na podstawie jego zmierzonych wartości w przypadku zapraw, może być obciążone dużym błędem. Ponadto parametry  $g$  i  $h$  mieszanek betonowych są od 10 do 40 razy większe od parametrów  $g$  i  $h$  zapraw wypełniających stos okruszowych w tych betonach. Stanowi to niedogodność utrudniającą przewidywanie zmian właściwości reologicznych mieszanek w oparciu o wyniki badań zapraw, ponieważ małym, trudnym do uchwycenia doświadczalnego, zmianom parametrów  $g$  i  $h$  zapraw mogą odpowiadać duże zmiany tych parametrów w przypadku mieszanek betonowych.

#### 4. Podsumowanie

Zwiększanie objętości zaprawy w mieszance betonowej powoduje zmniejszenie granicy płynięcia  $g$  oraz lepkości plastycznej  $h$ . Efekt ten jest tym większy, im mniejszy jest stosunek w/c i dodatek superplastyfikatora. Wzrost granicy płynięcia  $g$  w czasie jest tym większy im mniejszą objętość zaprawy zawiera mieszanka oraz im mniejszy jest stosunek w/c i dodatek superplastyfikatora. Kierunek

type of aggregate and the share of mortar volume. However, it is worth mentioning that in case of mixes with low mortar volume share and/or low w/c ratio prediction of parameter  $h$  change with time may be erroneous. There is also another difficulty. Parameters  $g$  and  $h$  of fresh concrete are up to 40 times higher than that of mortars. Thus, a small range of changes in  $g$  and  $h$  parameters for mortar may be accompanied by a very high range of these parameters change in the case of mixtures. This shows the necessity of very precise determination of mortar rheological parameters.

#### 4. Conclusions

The increasing mortar volume share in the mix causes a decrease of yield value  $g$  and plastic viscosity  $h$ . This effect is the higher the lower w/c ratio and superplasticizer content are. The increase in yield value  $g$  of mixtures is the highest the lower mortar volume in concrete is, and the lower w/c ratio and superplasticizer content are. The character of change with time of mix plastic viscosity  $h$  depends mostly of w/c ratio. When w/c ratio is high (w/c = 0.40) plastic viscosity  $h$  increases with time. Together with decreasing w/c ratio plastic viscosity  $h$  shows a tendency to decrease with time. The range of these changes is the lower the higher mortar volume share in concrete is.

The range of change of mix rheological parameters with time decreases when w/c ratio and superplasticizer content increase. Assuring the insignificant changes of yield value  $g$  with time of mix demands a considerably higher quantity of superplasticizer addition than for having the minimum yield value  $g$ , directly after the end of mixing.

zmian w czasie lepkości plastycznej  $h$  mieszanek betonowych zależy przede wszystkim od stosunku  $w/c$ . Gdy stosunek  $w/c$  jest duży ( $w/c = 0,40$ ) lepkość plastyczna  $h$  wzrasta w czasie. Przy mniejszym stosunku  $w/c$  lepkość plastyczna  $h$  maleje w czasie. Zakres tych zmian jest tym mniejszy im większa jest objętość zaprawy w mieszance betonowej.

Zakres zmian właściwości reologicznych mieszanek betonowych w czasie maleje ze wzrostem stosunku  $w/c$  i ilości superplastyfikatora. Uzyskanie mieszanki charakteryzującej się minimalnymi zmianami granicy płynięcia  $g$  w czasie wymaga wprowadzenia superplastyfikatora w ilości znacznie przekraczającej dodatek wystarczający do uzyskania minimalnej wartości parametru  $g$ , bezpośrednio po zakończeniu mieszania.

Przedstawione wyniki badań generalnie potwierdzają, że badania zapraw mogą być wykorzystane do przewidywania zmian właściwości reologicznych mieszanek betonowych w czasie. Projektowanie, optymalizacja, kontrola i korygowanie urabialności mieszanek betonowych mogą więc być prowadzone w oparciu o pomiary właściwości reologicznych zapraw. Konieczne są jednak dalsze badania, zwłaszcza obejmujące zaprawy i mieszanki o różnych proporcjach składników oraz z różnymi rodzajami kruszyw.

The presented research results confirm that the rheological properties of mortars can be used for predicting the characters of change in rheological behaviour of mix with time. Thus, designing, optimizing, controlling and correcting workability of fresh concrete may be performed on the basis of measurements of the mortar's rheological parameters. However, further tests are necessary, comprising mortars and mixtures of different proportions of constituents as well as aggregates of different type and grading.

## Literatura / References

1. J. Punkki, J. Gołaszewski, O. E. Gjřrv, Workability loss of High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 5, September-October 1996.
2. P.-C. Aitcin, *High Performance Concrete*, EF&N SPON, London 1998.
3. A. M. Neville, *Właściwości betonu*, Polski Cement, Kraków 2000.
4. Z. Giergiczny, J. Małolepszy, J. Szwabowski, J. Śliwiński, *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*. Wydawnictwo Instytut Śląski sp. z o.o. w Opolu, Opole 2002.
5. M. A. Collepardi, *The New Concrete*, Treviso: Grafiche Tintoretto, 2006.
6. J. Szwabowski, *Reologia mieszanek na spoiwach cementowych*, s. 239, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
7. J. Gołaszewski, *Wpływ superplastyfikatorów na właściwości reologiczne mieszanek na spoiwach cementowych w układzie zmiennych czynników technologicznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Budownictwo z. 106, s. 157, Gliwice 2006.
8. J. Gołaszewski, *The influence of cement paste volume in mortar on the rheological effects of the addition of superplasticizer*, *Proceeding of 8th International Conference Brittle Matrix Composites*, s. 441, Ed. A. M. Brandt, Warszawa 2006.
9. Ch. F. Ferraris, *Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: State of Art Report*. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 104, No. 5, p. 461, 1999.
10. G. H. Tattarsall, P. F. G. Banfill, *The Rheology of Fresh Concrete*, Pitman Books Limited, Boston 1983.
11. *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use* EFNARC Report, 2005.
12. M. Greim, *Rheological Measurement on Building Materials, a Comprehensive Research Program*. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, Vol. 5, p. 13, 1997.
13. J. Gołaszewski, *Reologia zapraw a reologia mieszanek betonowych*, *Cement Wapno Beton*, Nr 1, s. 17, 2006.