

Reologia zapraw a reologia mieszanek betonowych Rheology of fresh mortars and rheology of concrete mixtures

1. Wprowadzenie

Zarówno mieszanka betonowa jak i świeża zaprawa są mieszaniną cementu, kruszywa i wody wraz z ewentualnymi dodatkami mineralnymi i domieszkami chemicznymi, przed rozpoczęciem wiązania cementu. Różnica pomiędzy zaprawą a mieszanką betonową sprowadza się do uziarnienia kruszywa ograniczonego w zaprawie do frakcji piaskowych.

Z fizycznego punktu widzenia nie ma jednak różnicy w budowie obu tych materiałów, a zjawiska w nich zachodzące są podobne (3, 33-35).

Dotychczasowe badania dowodzą, że właściwości reologiczne zapraw i mieszanek betonowych mogą być wystarczająco dokładnie opisane za pomocą reologicznego równania ciała Bingham, o postaci:

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

gdzie: τ (Pa) jest naprężeniem stycznym przy prędkości ścinania $\dot{\gamma}$ (1/s), a τ_o (Pa) i η_{pl} (Pa·s) oznaczają odpowiednio granicę płynięcia i lepkość plastyczną (1-5, 9, 11, 22, 25, 29, 31, 33-34). Granica płynięcia τ_o określa wielkość naprężenia koniecznego do wywołania płynięcia mieszanki. Z chwilą gdy naprężenie styczne τ przekroczy granicę płynięcia τ_o , następuje płynięcie mieszanki, a opór płynięcia zależy od lepkości plastycznej η_{pl} ; im większa jest lepkość plastyczna η_{pl} mieszanki tym mniejsza będzie prędkość jej płynięcia przy danym naprężeniu stycznym. Należy przy tym zaznaczyć, że parametry reologiczne zapraw i mieszanek betonowych różnią się znacznie od siebie wielkością. Jak wykazano w pracach (3, 33) jest to wynikiem różnej wielkości, kształtu i powierzchni właściwej kruszywa w zaprawie i mieszance betonowej. Szczegółowo zagadnienia reologii zapraw i mieszanek betonowych omówione zostały w publikacjach (33-34).

Zbadanie właściwości reologicznych zapraw i mieszanek betonowych ma duże znaczenie praktyczne określa bowiem urabialność każdego z tych materiałów. Reologiczne podobieństwo świeżej zaprawy i mieszanki betonowej otwiera jednak możliwość wykorzystania zapraw w badaniach poznawczych, jako modelu mieszanki betonowej (3, 21, 35). Czasochłonne badania reologiczne wpływu różnych czynników związanych ze składem mieszanek

1. Introduction

Both concrete mixture and fresh mortar are a mixture of cement, aggregate and water with or without mineral additives and chemical admixtures before the start of cement setting. The difference between the mortar and concrete consists in limiting the grading of aggregate in the mortar for sand fractions.

However, from the physical point of view, no difference exists between these materials and the changes of their behaviour under the influence of different factors are of a similar nature (3, 33-35).

So far laboratory studies have shown that rheological behaviour of mortars and concrete mixtures may be described sufficiently enough by the Bingham model according to the equation:

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

where: τ (Pa) is the shear stress at shear rate $\dot{\gamma}$ (1/s) and τ_o (Pa) and η_{pl} (Pa·s) are the yield value and plastic viscosity, respectively (1-5, 9, 11, 22, 25, 29, 31, 33-34). Yield value determines the value of stress necessary for the mixture flow to occur. When the shear stress τ surpasses yield value, the flow of mixture occurs, and the resistance τ_o the flow depends on plastic viscosity η_{pl} ; the larger the plastic viscosity η_{pl} of the mixture, the smaller the speed of its flow under the same stress. One should notice that rheological parameters of mortars and concrete mixtures differ between each other considerably in terms of quantity. As it is shown in (3, 33), this is the result of a different size, shape and specific surface of aggregate in mortar and concrete mixture. The issues of rheology of mortars and concrete mixtures are discussed in detail in (33-34).

The examination of rheological behaviour of mortars and concretes has essential significance from the point of view of workability control of these materials. Rheological similarity of fresh mortar and concrete mixture enables the use of mortars in practical studies as the model of fresh concrete (3, 21, 35). Time-consuming rheological studies of influence of different factors on fresh concrete could be replaced by mortar studies, significantly easier to perform.

A considerable number of so far executed studies enables the comparison of the influence of different factors on mortars and

Tablica 1 / Table 1

WPLYW SKŁADU ORAZ WŁAŚCIWOŚCI SKŁADNIKÓW NA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE ZAPRAW I MIESZANEK BETONOWYCH
EFFECTS OF MIX COMPOSITION AND MATERIAL PROPERTIES ON RHEOLOGY OF MORTAR AND CONCRETE

Czynnik ¹ Factor	Zaprawy Fresh mortars			Mieszanki betonowe Fresh concretes		
	Ref.	g	h	Ref.	g	h
Wzrost ilości wody Water content increased	[4], [22], [27]	↓	↓	[11], [19], [34]	↓	↓
Wzrost ilości zaczynu Cement paste increased	[21], [32], [26]	↓	↓	[21], [23], [29], [33]	↓	↓
Wzrost ilości cementu Cement content increased	[4], [22]	↑	↑	[34]	↑	↑
Drobniejsze uziarnienie piasku Finer sand	[22], [32]	↑	↑=	[10]	↑	↑=
Wzrost zawartości C ₃ A w cemencie C ₃ A content in cement increased	[14]	↑	↓	[34]	↑	↓
Zwiększenie dodatku plastyfikatora Plasticiser dosage increased	[4], [32]	↓	=↓	[8], [11], [34]	↓	=↓
Zwiększenie dodatku SP SMF, SNF; duże w/c ² SP SMF, SNF dosage increased; high w/c	[4], [6], [14], [18], [22], [26]	↓	=↓	[7], [8], [11], [30]	↓	=↓
Kierunek zmian parametrów reologicznych w czasie mieszanek z SP SMF, SNF; wysokie w/c Direction of changes with time of rheological parameters of mix containing SP SMF, SNF; high w/c	[14], [16], [18]	↑	↑=	[7], [8], [11], [24], [28], [30]	↑	↑=
Zwiększenie dodatku SP SMF, SNF; małe w/c SMF, SNF superplasticizer dosage increased; low w/c	[6], [14], [16], [18], [26]	↓	↑	[7], [11], [28], [30]	↓	↑
Kierunek zmian parametrów reologicznych w czasie mieszanek z SP SMF, SNF; małe w/c Direction of changes with time of rheological parameters of mix containing SP SMF, SNF; high w/c ratio	[13], [14], [16], [18]	↑	↓	[7], [8], [11], [28], [30]	↑	↓=
Zwiększenie dodatku SP PC, PE; małe w/c SP PC, PE dosage increased; low w/c	[13], [14], [16], [18], [27]	↓	↑	[10]	↓	↑
Kierunek zmian parametrów reologicznych w czasie mieszanek z SP PC, PE; małe w/c Direction of changes with time of rheological parameters of mix containing SP; low w/c	[13], [14], [16], [18], [27]	↑=	↓↑	[10]	↑	↓
Zwiększenie masy cząsteczkowej polimeru SP PE Molecular mass of SP PE polymer increase	[13], [14]	↓	↑	[10]	↓	↑
Opóźnienie momentu dodania SP SNF, SMF Delay addition of SP SNF, SMF increase	[13], [14], [18]	↓	↑=	[28]	↓	=↓
Zwiększenie dodatku domieszki napowietrzającej Air entraining agent dosage increase	[4], [12], [15], [22]	=↓	↓=	[33], [34]	=↓	↓
Zwiększenie dodatku popiołu lotnego Fly ash content increase	[4], [15]	↓	↓	[34]	↓	↓
Zwiększenie ilości żużla w cemencie Slag content in cement increase	[17]	↓	↑	[10], [11], [34]	↓	↑
Zwiększenie dodatku pyłu krzemionkowego Condensed silica fume content increase	[13], [14], [15]	↑=	↓	[10], [11], [30]	↑	↓

¹ Pozostałe parametry składu są stałe. Other parameters of mix proportion are constant

² Duże w/c – zaprawy o w/c ponad 0,50; mieszanki betonowe o w/c ponad 0,40. Małe w/c – zaprawy o w/c poniżej 0,50; mieszanki betonowe o w/c poniżej 0,40. High w/c – mortars of w/c above 0.50, fresh concrete of w/c above 0.40. Low w/c – mortars of w/c below 0.50, fresh concrete of w/c below 0.40.

betonowych wykonywanych na nich, mogłyby być zastąpione przez znacznie łatwiejsze do wykonania badania zapraw.

Znaczna liczba dostępnych badań pozwala na porównanie wpływu różnych czynników związanych ze składem zapraw i mieszanek betonowych na ich właściwości reologiczne. Wyniki badań, pokazujące kierunki wpływu różnych czynników na parametry reologiczne zapraw i mieszanek betonowych zestawiono w tablicy 1. Na tej podstawie można stwierdzić, że wpływ podstawowych czynników związanych ze składem na parametry reologiczne zapraw i mieszanek betonowych jest bardzo zbliżony, co wskazuje na możliwość przewidywania kierunków zmian parametrów reologicznych mieszanki betonowej, w oparciu o zależności uzyskane dla zapraw. Propozycje zależności liczbowo wiążących reologię

concrete mixtures rheological properties. The results of these studies, showing the main trends of influence of different factors on rheological parameters of mortars and concretes, are compiled in Table 1. On the ground of these data one may state that the influence of basic composition factors on rheological parameters of mortars and concrete mixtures is very similar which indicates that basing on relations obtained for mortars one may predict the effects of same factors on the rheological parameters of concrete mixtures. This statement especially concerns predicting the influence of admixtures and additives. The proposals of relations which connect numerically rheology of fresh mortars and concretes are given, for example in (6, 21, 25). Systematic research is still lacking which would confirm unequivocally the possibility of forecasting rheological parameters of concrete mixtures, basing on the

zapraw i mieszanek betonowych zostały podane m. in. w następujących pracach (6, 21, 25). Wciąż brakuje jednak systematycznych badań jednoznacznie potwierdzających możliwość przewidywania parametrów reologicznych mieszanki betonowej na podstawie właściwości reologicznych zaprawy.

W niniejszej pracy przedstawiono i przeanalizowano wyniki badań zależności pomiędzy parametrami reologicznymi zaprawy i mieszanki betonowej, w których stos okruszowy jest wypełniony analogiczną zaprawą. Celem przeprowadzonych badań było uchwycenie wpływu zmian różnych czynników na właściwości reologiczne zaprawy i mieszanki betonowej, potwierdzenie związków między tymi zmianami i wyprowadzenie łączących je zależności empirycznych.

2. Metody badań

2.1. Pomiar parametrów reologicznych zaprawy i mieszanki betonowej

Parametry reologiczne zapraw i mieszanek betonowych można wyznaczyć w oparciu o pomiar stawianych przez nich momentów oporu ścinania M 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 to i lepkości plastycznej η_{pl} mieszanki. Po wyznaczeniu stałych pomiarowych reometru można, jeśli to konieczne, przedstawić wartości g i h w jednostkach fizycznych. Sposób wyznaczenia stałych pomiarowych reometru przedstawiono w pracy (34). Podstawy teoretyczne i zasady pomiarów reologicznych omówiono wyczerpująco w opracowaniach monograficznych (33-34).

2.2. Program badań

Zaprawy sporządzono zachowując stosunek piasku do cementu $P/C = 1,5$ i stosując piasek P o wskaźniku uziarnienia $U_k = 3,43$. Natomiast mieszanki betonowe wykonano ze żwiru otoczkowego o uziarnieniu mieszczącym się w przedziale $2 \div 8$ mm (K) i o wskaźniku uziarnienia $U_k = 6,40$. Sporządzono serię zapraw o stosunku w/c wynoszącym: 0,30, 0,35, 0,40, oraz stosując następujące cementy: CEM I 32,5 R, CEM II/B-S 32,5, CEM II/B-V 32,5, CEM II/B-M (V-LL) 32,5, CEM III/A 32,5. Cementy te wytworzono z jednego klinkieru przemysłowego. Zbadano cztery superplastyfikatory oparte na eterach karboksylowych, oznaczone kolejno SP1-SP4, których dodatek był zawarty w granicach od 1 do 2%. Zbadano również wpływ pyłu krzemionkowego, zastępującego 10% cementu oraz wpływ domieszki napowietrzającej.

Przyjęto 4 stopnie wypełnienia stosu okruszowego kruszywa zaprawą o $w/c = 0,35$, odpowiadające stosunkom masowym zaprawy do mieszanki betonowej $Z = \frac{C+W+P}{C+W+P+K}$: 0,66, 0,61, 0,56 i 0,51 (tablica 2). Punktem odniesienia w badaniach wpływu tych

testów reologicznego zachowania zapraw.

In this study the results of tests of relations between rheological parameters of mortars and concrete mixtures are presented and analysed. The objective of this investigation was to find the influence of different factors on rheological behaviour of mortars and concrete mixtures confirmation of relations between them and elaboration of empirical formula joining these changes.

2. Experimental

2.1. Measurements of rheological parameters of fresh mortar and concrete mixture

The rheological parameters of concrete mixture 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 (Nm) and h (Nm·s) are rheological constants corresponding to yield value to and plastic viscosity η_{pl} , respectively. After determining measurement constants of the rheometer one may, if necessary, represent the values g and h in physical units. The method of determining measurement constants of rheometer are presented in (34). Theoretical basis and rules for rheological measurements are widely discussed in monographic papers (33-34).

2.2. Test program

The mortars have been designed with sand to cement ratio $P/C = 1.5$, and they have been prepared from the sand of grading index $U_k = 3.43$. The coarse aggregates 2–8 mm (K) of grading index of $U_k = 6.40$ were used in concrete. In the mortars the w/c ratio was changed in the range: 0.30, 0.35, 0.40, as well as type of cement CEM I 32,5 R, CEM II/B-S 32,5, CEM II/B-V 32,5, CEM II/B-M (V-LL) 32,5, CEM III/A 32,5, type and content of superplasticizer (four carboxyl ethers in admixture of 1+2%). The influence of replacement of 10% of cement with condensed silica fume CSF has been checked, as well as the influence of air-entraining admixture AE.

Four contents of mortar with $w/c = 0,35$ were adopted, corresponding to the mortar-to-concrete ratio $Z = \frac{C+W+P}{C+W+P+K}$ equal: 0,66, 0,61, 0,56 and 0,51 (Table 2). As the reference point in tests of influence of above mentioned factors the author applied the mortar with $w/c = 0.35$, with cement CEM I, and 1% SP1, enabling obtaining by concrete mixture of $Z = 0.56$ ($\varphi_{210} = 0,90$), with a slump of 200 mm. Consistency of mortars and concrete mixtures with other cements and superplasticizers has not been assumed preliminarily.

2.3. Materials and compositions of mixtures

The compositions of the clinker used for cements preparation are given in Table 3. The properties of superplasticizers are given in

czynników była zaprawa o $w/c = 0,35$ z cementu CEM I i 1% SP1 pozwalająca na uzyskanie przez mieszankę betonową o $Z = 0,56$ ($\varphi_{z/g} = 0,90$) opadu stożka 200 mm. Konsystencja zapraw oraz mieszanek betonowych z innymi cementami i superplastyfikatorami nie była z góry założona.

2.3. Właściwości materiałów i składy mieszanek

Skład klinkieru, z którego przygotowano cementy podano w tablicy 3, a właściwości superplastyfikatorów przedstawiono w tablicy 4. Właściwości dodatku napowietrzającego i pyłu krzemionkowego podano kolejno w tablicach 5 i 6. Krzywe przesiewu kruszywa pokazano na rysunku 1, a składy mieszanek betonowych w tablicy 2.

2.4. Metody badań

Mieszanki przygotowano w mieszalniku o pojemności 50 dm³. Pomiary parametrów reologicznych przeprowadzono za pomocą reometru BT2 przeznaczonego do badania mieszanek o ciekłej konsystencji (o opadzie stożka większym od 200 mm). Reometr BT pokazany na rysunku 2 pozwala na pomiar momentu obrotowego za pomocą dwóch lub trzech sond oraz prędkości kątovej. Na tej podstawie wyliczane są parametry reologiczne mieszanek. Zasady i sposób pomiaru parametrów reologicznych za pomocą BT2 zostały omówione w pracy (20). W badaniach przyjęto stały czas pomiaru, wynoszący 15±2 s. Średni współczynnik korelacji pomiędzy prędkością ścinania N a momentem oporu ścinania M dla wykonanych pomiarów sprawdzających wynosił 0,931, co wskazuje na zgodność uzyskanych wyników z przyjętym do opisu właściwości reologicznych zapraw i mieszanek betonowych modelem reologicznym Binghama. Ponieważ dla reometru BT2 nie zostały jeszcze wyznaczone stałe pomiarowe, zmierzone parametry reologiczne przedstawiono w jednostkach umownych. Dla każdego badanego składu zapraw i mieszanek betonowych wykonano co najmniej cztery pomiary parametrów reologicznych.

Tablica 2 / Table 2

SKŁADY ZAPRAW I MIESZANEK BETONOWYCH PROPORTIONING OF MORTARS AND CONCRETES

Stosunek wagowy zaprawy do mieszanki betonowej Z, Mortar to concrete weight proportion Z $Z = (C+W+P)/(C+W+P+K)$	Składniki, Ingredients, kg/m ³	Stosunek w/c w/c ratio		
		0,30	0,35	0,40
Zaprawa, Mortar				
Z = 1	C	841	807	776
	P	1262	1211	1164
	W	252	282	310
Mieszanka betonowa, Fresh concrete				
Z = 0,66	C	570	554	539
	P	855	831	809
	K	855	831	809
	W	171	194	216
	$\varphi_{z/g}$	1,06	1,10	1,15
Z = 0,61	C	532	518	505
	P	797	777	757
	K	975	949	926
	W	159	181	202
	$\varphi_{z/g}$	0,86	0,90	0,94
Z = 0,56	C	491	479	468
	P	736	718	702
	K	1104	1077	1052
	W	147	168	187
	$\varphi_{z/g}$	0,70	0,73	0,76
Z = 0,51	C	446	437	427
	P	670	655	641
	K	1243	1216	1190
	W	134	153	171
	$\varphi_{z/g}$	0,57	0,59	0,62

C - cement, cement; W - woda, water; P - piasek 0 - 2 mm, sand 0 - 2 mm; K - kruszywo 2 - 8 mm, coarse aggregate 2 - 8 mm; $\varphi_{z/g}$ - stopień wypełnienia kruszywa zaprawą, degree of filling the aggregate with mortar

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD KLINKIERU CLINKER COMPOSITION

Skład klinkieru [%] Clinker composition [%]										
SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O _e	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
19.5	62.2	6.3	2.5	1.9	0.83	2.7	57	11	10	9

Tablica 4 / Table 4

WŁAŚCIWOŚCI SUPERPLASTYFIKATORÓW PROPERTIES OF SUPERPLASTICIZERS

SP	Składnik bazowy Major constituent	Gęstość, Density, [g/cm ³]	Stężenie, Concentration, [%]
SP1	polieter (duża masa cząsteczkowa, długie łańcuchy boczne) polyeter (high molecular mass, long side chains)	1,05	36
SP2	polieter (mała masa cząsteczkowa, krótkie łańcuchy boczne) polyeter (low molecular mass, short side chains)	1,09	17
SP3	polieter polyeter	1,09	34
SP4	polieter polyeter	1,11	32

Tablica 5 / Table 5

WŁAŚCIWOŚCI DOMIESZKI NAPOWIETRZAJĄCEJ AE
 PROPERTIES OF AIR-ENTRAINING ADMIXTURE AE

AE	Składnik bazowy Major constituent	Gęstość, Density, [g/cm ³]	Stężenie, Concentration, [%]
AE	sole alkaliczne żywic drzewnych alkaline salts of wood resins	1,01	1,73

Tablica 6 / Table 6

WŁAŚCIWOŚCI PYŁU KRZEMIONKOWEGO CSF
 PROPERTIES OF CONDENSED SILICA FUME CSF

Skład CSF [%] CSF ingredients [%]									Powierzchnia właściwa, Specific surface [m ² /kg]
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	
92,8	0,60	0,30	0,70	1,32	0,76	0,30	0,50	1,90	18 000

3. Wyniki badań i ich dyskusja

Uzyskane zależności wpływu badanych czynników na właściwości reologiczne zapraw i mieszanek betonowych przedstawiono na rysunkach 3-8. Jak wynika z przebiegu krzywych na tych rysunkach, właściwości reologiczne mieszanek betonowych wykazują dobrą korelację z właściwościami reologicznymi zapraw oraz ze stopniem wypełnienia zaprawą stosu okruszowego kruszywa. Kierunek zmian obu parametrów reologicznych mieszanek betonowych pod wpływem badanych czynników jest analogiczny do kierunku zmian parametrów reologicznych zapraw. Wielkość i zakres zmian parametrów reologicznych mieszanek betonowych jest przy tym jednak wyraźnie większa niż w przypadku zapraw. Dotyczy to szczególnie zmian parametru *g*. Wielkość obu parametrów reologicznych mieszanek betonowych rośnie nieliniowo wraz ze zmniejszaniem stopnia wypełnienia stosu okruszowego kruszywa zaprawą, a więc ze spadkiem stosunku *Z*, co jest zgodne z wynikami innych prac (32-33). Należy jednak podkreślić, że związek pomiędzy właściwościami reologicznymi zaprawy a parametrami reologicznymi mieszanki betonowej nie wykazuje zależności od jej składu.

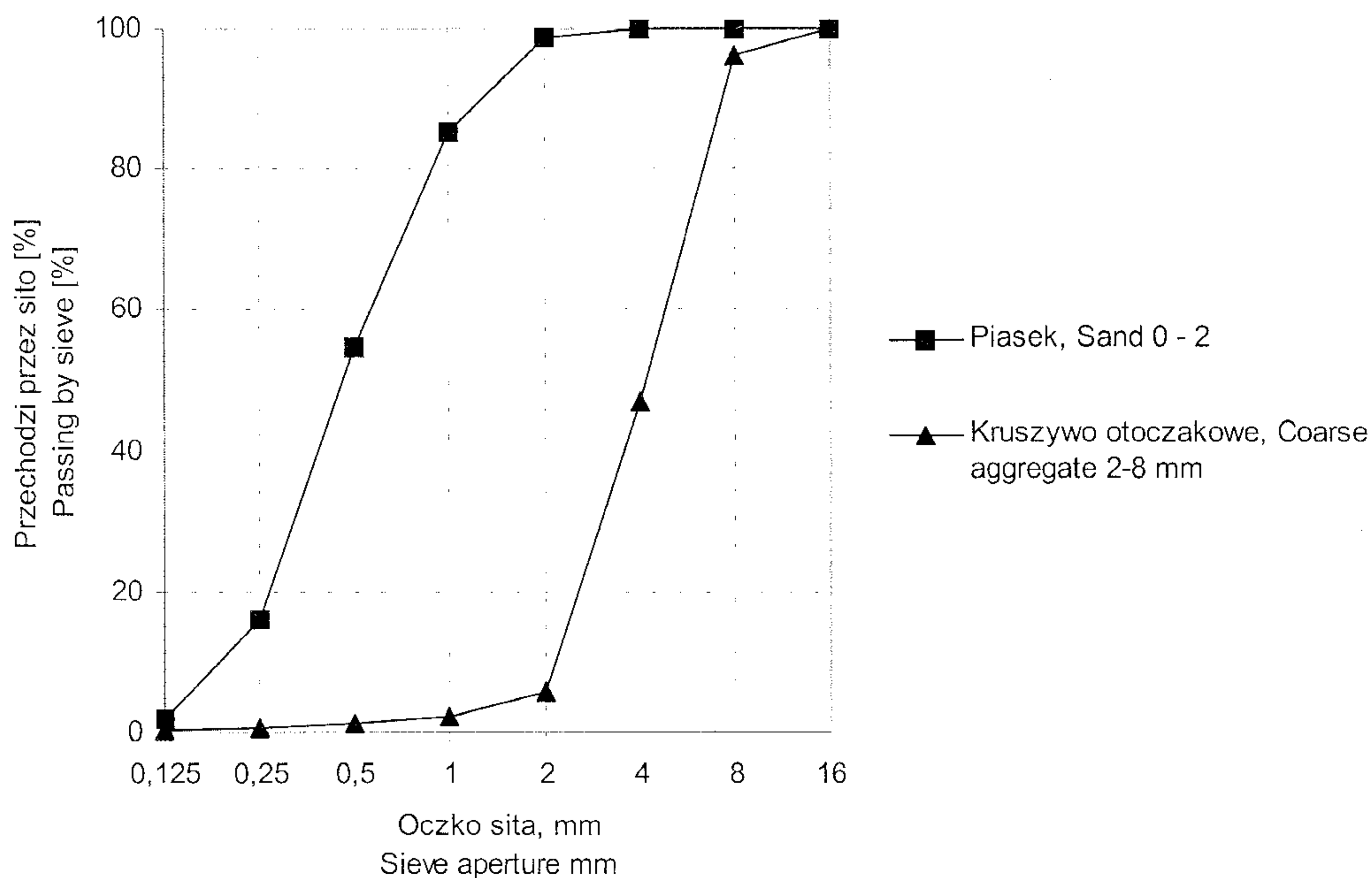
Analiza danych doświadczalnych pozwala na sformułowanie analogicznych dla obu parametrów reologicznych empirycznych zależności łączących wartości parametrów mieszanki betonowej z parametrami reologicznymi zaprawy, a także z zawartością za-

Table 4. The properties of air - entraining agent and condensed silica fume are presented in Tables 5 and 6. Sieve grading for sand and aggregate are given in Fig. 1. The compositions of mixes are presented in Table 2.

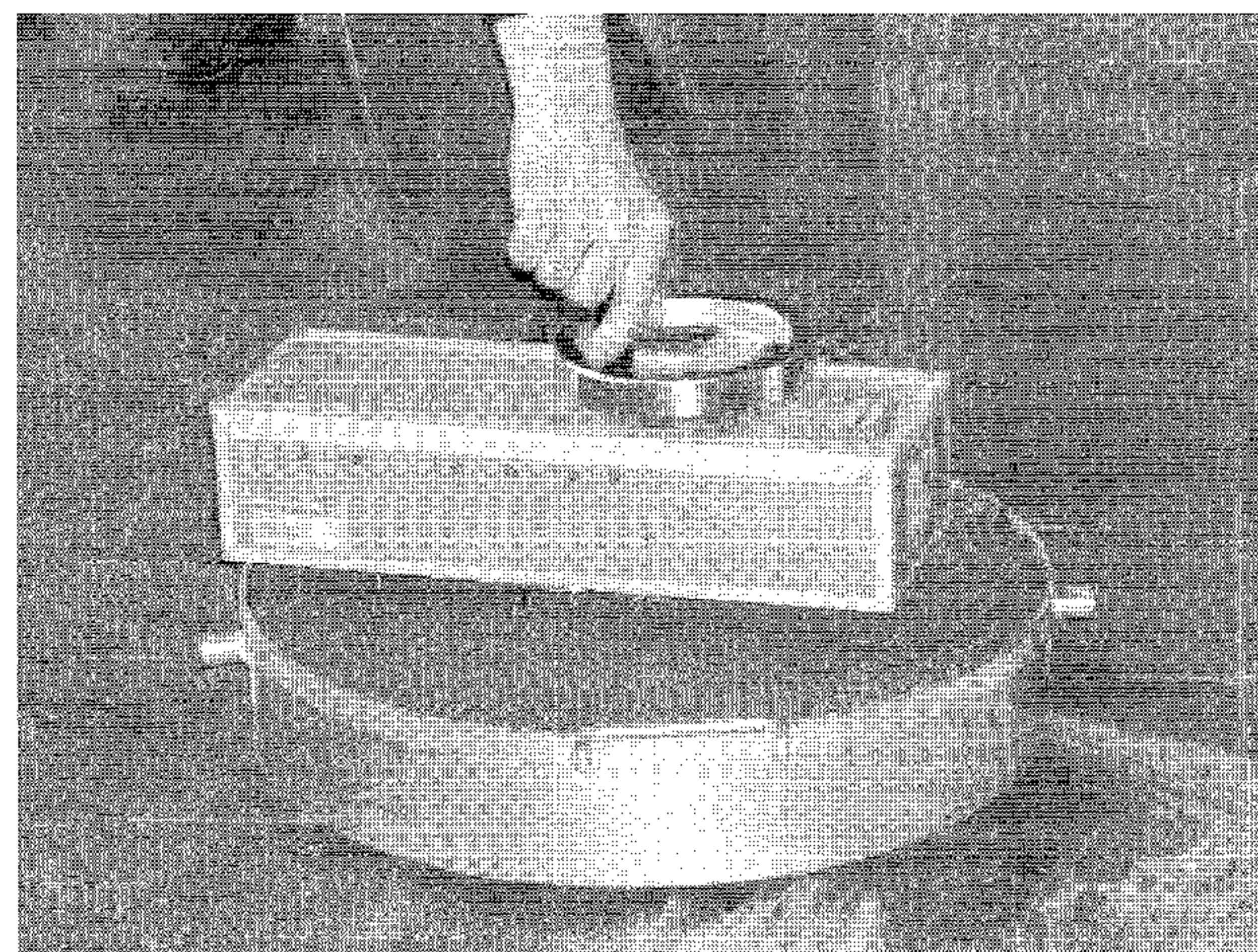
2.4. Testing method

The mixtures were prepared in the concrete mixer of 50 dm³ of volume. For the measurements of rheological parameters BT2 rheometer was used, designed for the concrete mixtures of the slump of 200 mm or more. The BT rheometer shown in

Fig. 2 can measure the turning moment with two or three probes, as well as angular velocity. These measurements permit calculation of rheological parameters of the mixtures. The method of rheological parameters measuring with BT2 are



Rys. 1. Uziarnienie kruszywa
 Fig. 1. Aggregate grading



Rys. 2. Reometr BT2
 Fig. 2. BT 2 rheometer

prawy w mieszance. Mają one postać:

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

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

gdzie: g_m i g_z – graniczny opór ścinania odpowiednio mieszanki betonowej i zaprawy, h_m i h_z – opór płynięcia lepkiego odpowiednio mieszanki betonowej i zaprawy, Z – stosunek masowy zaprawy do mieszanki betonowej, a , b – stałe materiałowe zależne od właściwości składników mieszanki betonowej, prawdopodobnie głównie od rodzaju i uziarnienia kruszywa.

Na podstawie analizy statystycznej wyników badań wyznaczono stałe materiałowe a i b , które dobrze opisują wyniki doświadczalne. Wynoszą one odpowiednio $a = -7,51$ oraz $b = -3,28$. Wykresy funkcji [3] i [4] dla poszczególnych serii badań podano na rysunkach 3–8. Współczynniki R^2 określające stopień dopasowania wyników pomiarów do funkcji [3] i [4] zawierają się w przedziale od 0,943 do 0,985. Maksymalne odchylenie obliczonych wielkości g i h badanych mieszanek od wielkości zmierzonych wynosi odpowiednio 28,7% i 19,7%. Średnie odchylenie zmierzonych i obliczonych wielkości parametrów g i h wynosi natomiast odpowiednio 12,5 i 8,4%. Uzyskane wysokie współczynniki korelacji oraz stosunkowo małe różnice parametrów reologicznych wyliczonych według modelu od zmierzonych w badaniach kontrolnych świadczą o tym, że funkcje [3] i [4] dobrze opisują zależność parametrów reologicznych mieszanki betonowej od parametrów reologicznych zaprawy, analogicznej do wypełniającej stos okruszowy kruszywa w mieszance. Na podstawie pomiarów parametrów reologicznych zaprawy, przy uwzględnieniu wielkości i rodzaju kruszywa oraz wskaźnika wypełnienia stosu okruszowego kruszywa analogiczną zaprawą można przewidywać wartości parametrów reologicznych mieszanki betonowej.

Na rysunkach 9 i 10 pokazano zależności liniowe pozwalające na obliczenie na podstawie zmierzonych wartości parametrów zapraw o stosunku $P/C = 1,5$ z dodatkiem superplastyfikatora właściwości reologicznych mieszanek betonowych z kruszywem o maksymalnym wymiarze ziaren 8 mm, którego stos okruszowy kruszywa jest w różnym stopniu wypełniony analogiczną zaprawą. Średnie odchylenie obliczonych ze wzorów podanych obok rysunków 9 i 10 parametrów g i h mieszanek od wartości zmierzonych (rys. 9 i 10) wynosi odpowiednio 19,5% i 10,4%. Zależności te mogą więc stanowić podstawę do doboru składu mieszanki w celu optymalizacji jej właściwości reologicznych. Należy przy tym jednak zwrócić uwagę na pewną niedogodność – niewielkim zmianom wielkości parametru g zapraw mogą odpowiadać duże zmiany parametru g mieszanek betonowych. Powoduje to konieczność dokładnego pomiaru parametru g zaprawy. W tym celu można wykorzystać reometry do zapraw, zwykle zapewniające większą dokładność pomiarów niż reometry do mieszanek betonowych.

4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań stanowią doświadczalne potwierdzenie podobieństwa wpływu podstawowych czynników związanych

discussed in detail by Greim (20). In the tests a fixed time of measurement was adopted, equal 15 ± 2 s. An average coefficient of correlation between shear rate N and shear stress M established in the pretesting program was 0.931 which confirms the conformity of obtained results with Bingham's rheological model, adopted for describing rheological features of mortars and concrete mixtures. As the measurement constants have not yet been determined for the BT2 rheometer, the measured rheological parameters are presented in conventional units. For each tested mix at least four measurements of rheological parameters were carried out.

3. Test results and their discussion

The obtained relations of influence of tested factors on rheological parameters of fresh mortars and concrete mixtures are presented in Figures 3–8. As it can be seen from curves in these figures, rheological parameters of concrete mixtures remain in a direct correlation with rheological parameters of mortars and with the content of mortar in concrete. The character of changes of two rheological parameters of concrete mixtures under the influence of tested factors is similar to the direction of change of rheological parameters of mortars analogous to the mortars, in concrete mixtures. However, the quantity and the range of changes of rheological parameters are considerably smaller in the case of concrete mixtures than in the case of mortars. This statement regards especially changes in g parameter. The value of both rheological parameters of concrete mixture increases nonlinearly with the decrease of mortar content (when Z ratio decreases), which, in general, confirms the results presented in papers (32-33). It should be noted that the relation of the changes of rheological properties of mortars with the rheological parameters of concrete mixture is independent of its composition.

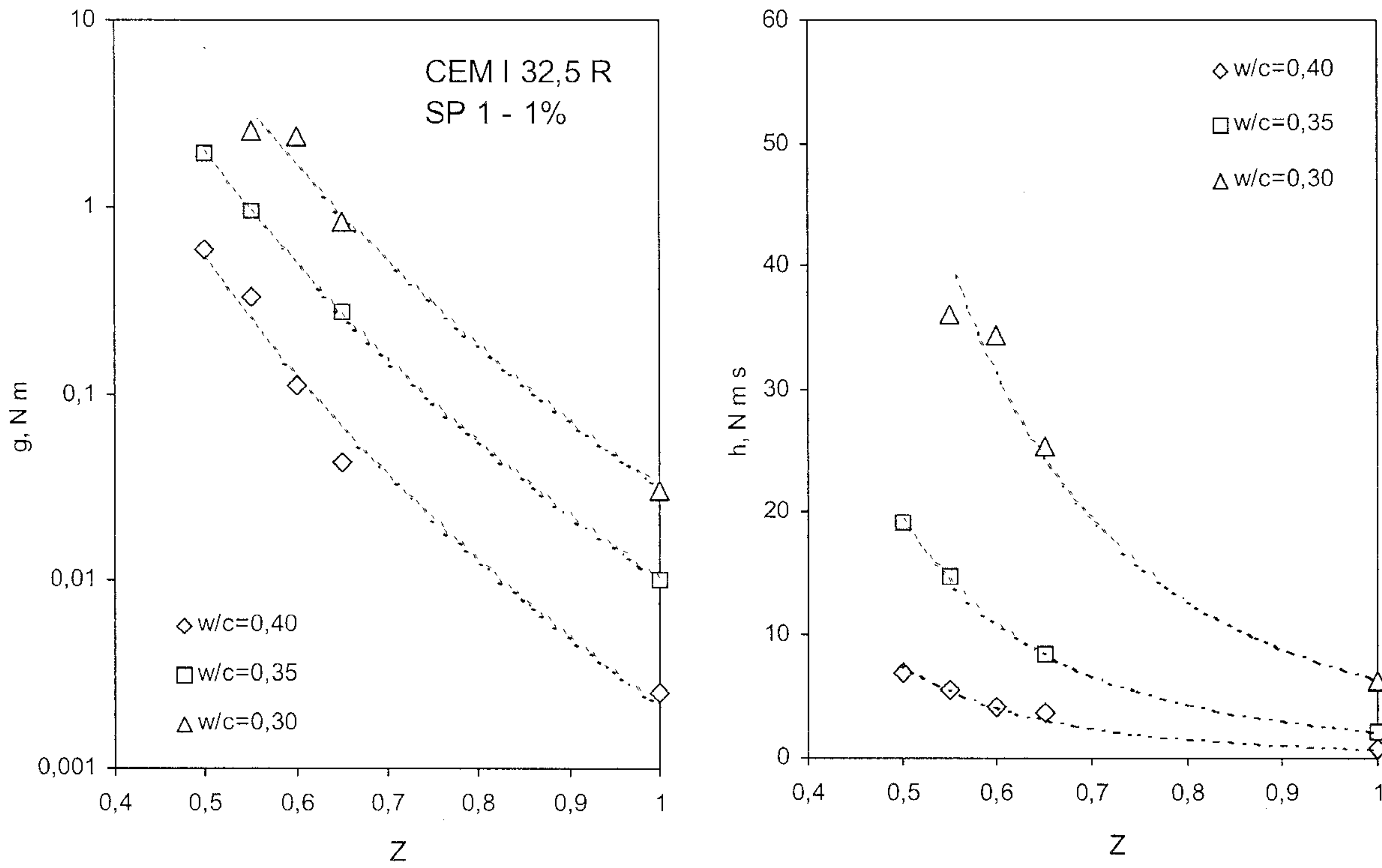
The analysis of experimental data enables the empirical relations joining the rheological parameters of mortar with rheological parameters of concrete mixture and its mortar content to be established, analogical to both rheological parameters. They are as follows:

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

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

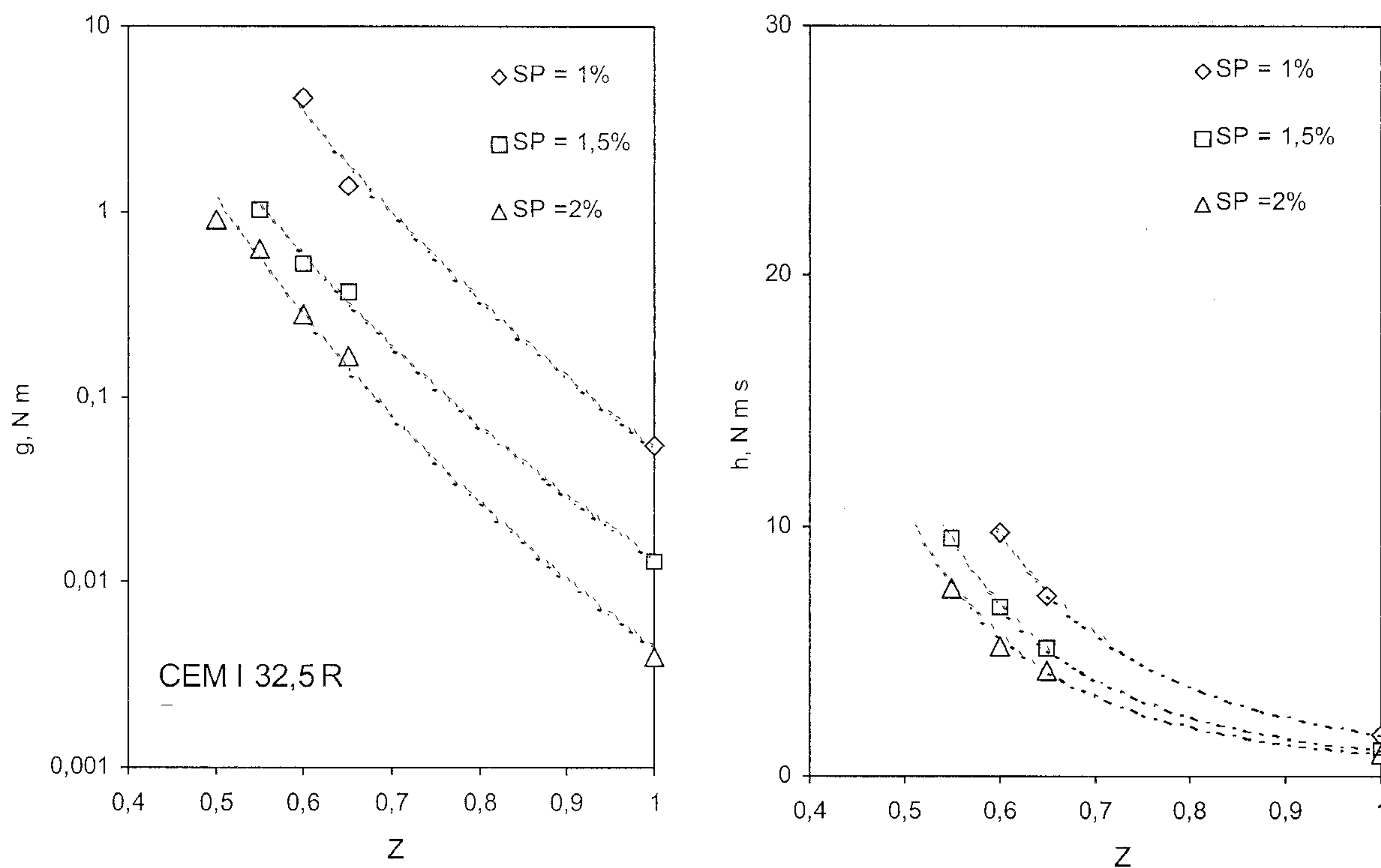
where: g_m and g_z – shear resistance of, respectively, concrete mixture and mortar, h_m and h_z – flow resistance, respectively for concrete mix and mortar, Z – mortar to concrete ratio, a , b – material constants depending on concrete constituents properties, mainly and probably on aggregate type and grading.

The statistical analysis of the obtained experimental data enables the determination of material constants a and b for the tested mixtures in formulas [3] and [4]. They are as follows: $a = -7,51 \pm 0,27$ and $b = -3,28 \pm 0,19$. The diagrams of functions [3] and [4] for individual series of tests are given in figures 3–8. Coefficient R^2 , representing the degree of matching the results of calculation using functions [3] and [4] with the measured results is in the range from 0.943 to 0.985. The maximum deviation of the calculated values from the measured values g and h of the tested mixtures



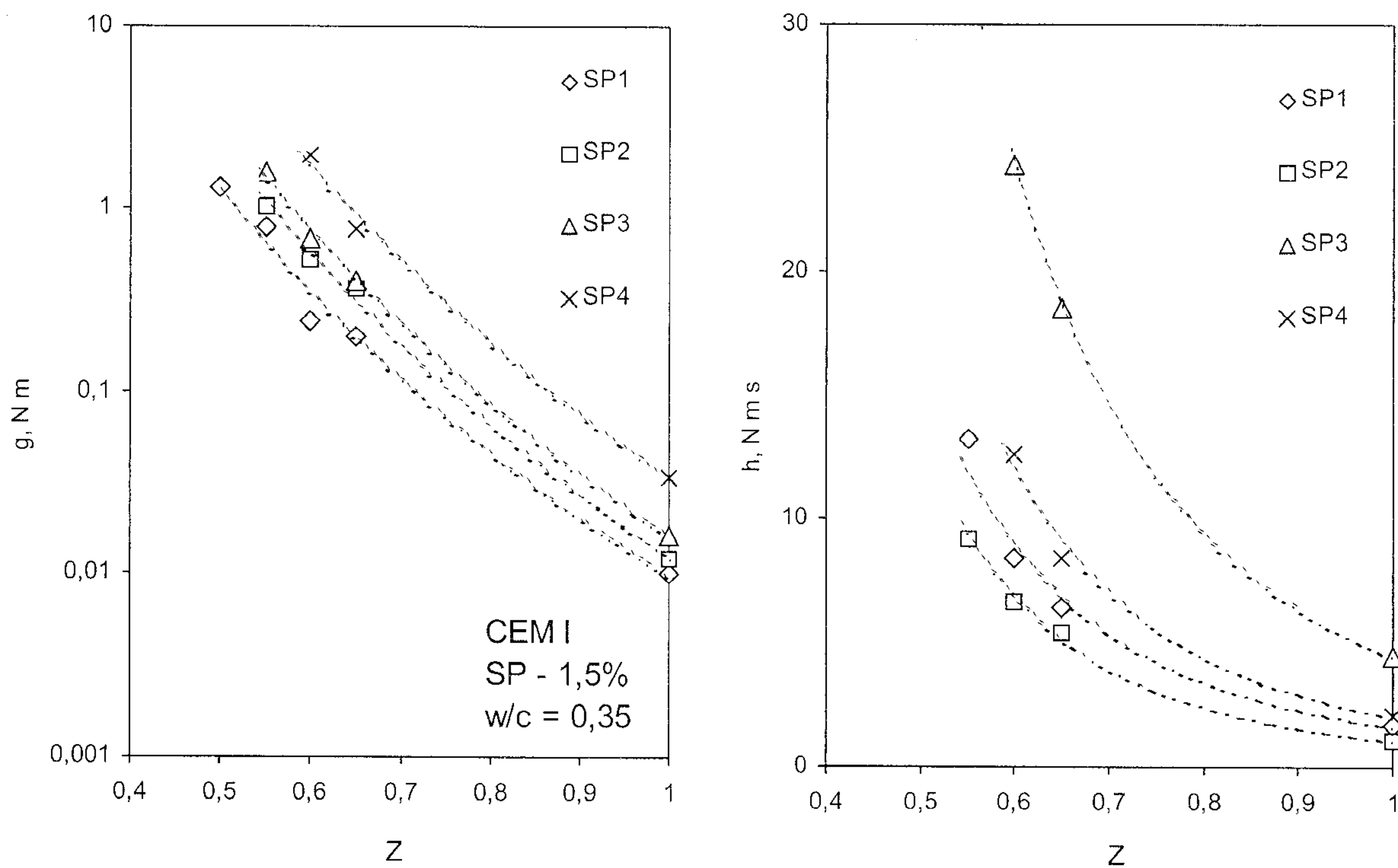
Rys. 3. Wpływ stosunku w/c na parametry reologiczne zaprawy i mieszanek betonowych o różnej zawartości analogicznej zaprawy

Fig. 3. Influence of w/c ratio on rheological parameters of mortar and fresh concretes with different content of analogous mortar



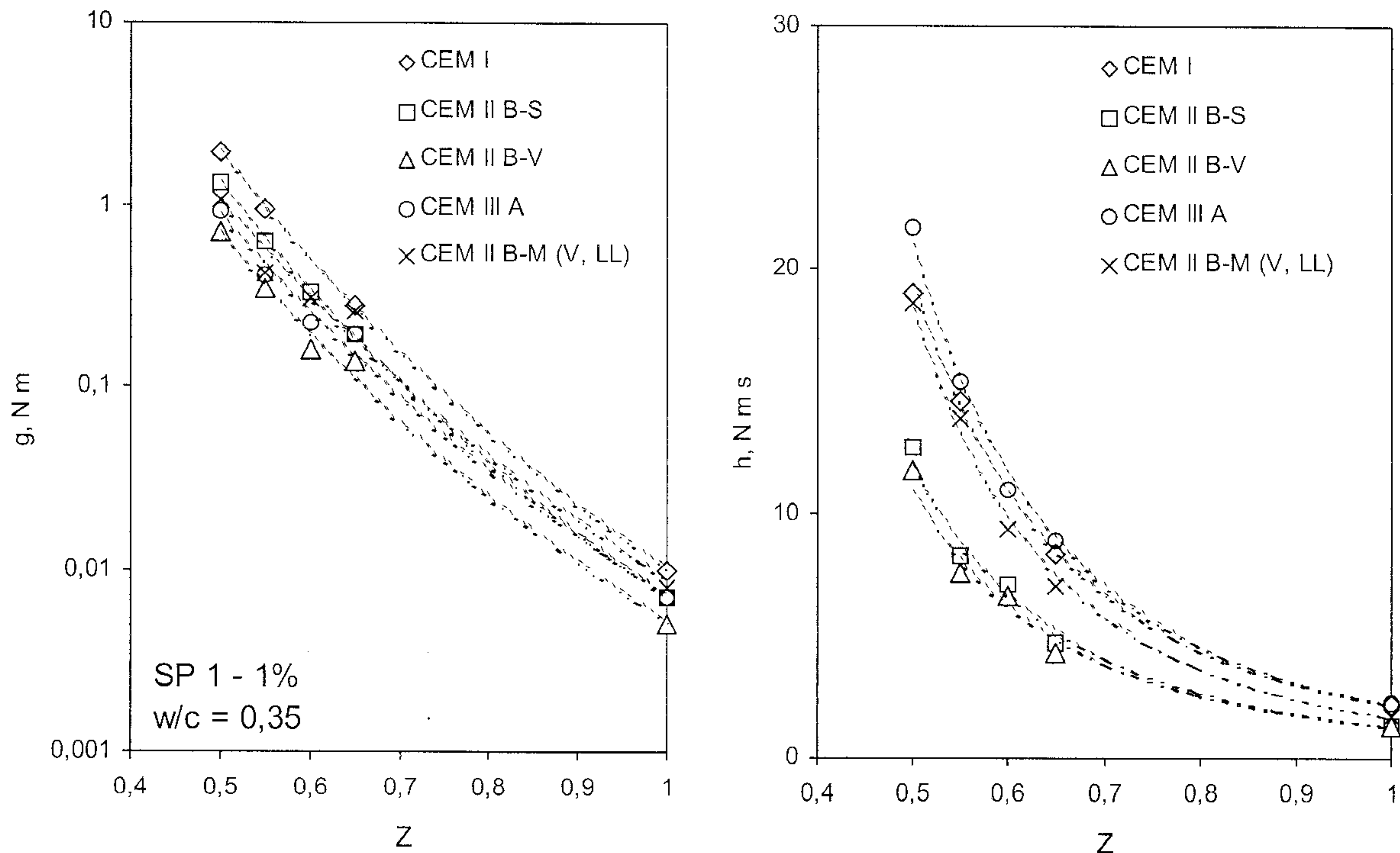
Rys. 4. Wpływ ilości superplastyfikatora SP1 na parametry reologiczne zaprawy i mieszanek betonowych o różnej zawartości analogicznej zaprawy

Fig. 4. Influence of superplasticizer content on rheological parameters of mortar and fresh concretes with different content of analogous mortar



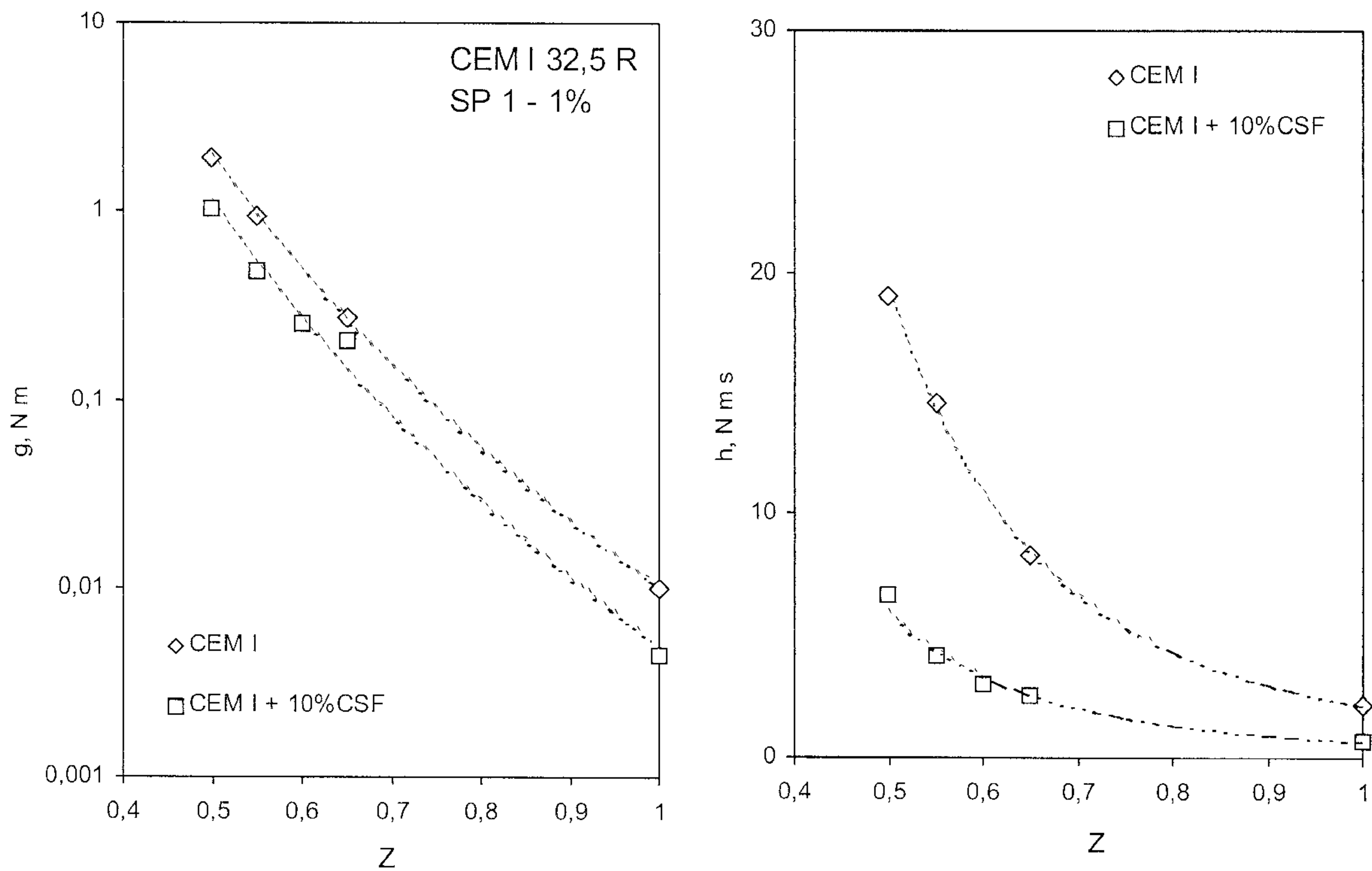
Rys. 5. Wpływ rodzaju superplastyfikatora parametry reologiczne zaprawy i mieszanek betonowych o różnej zawartości analogicznej zaprawy

Fig. 5. Influence of superplasticizer type on rheological parameters of mortar and fresh concretes with different content of analogous mortar



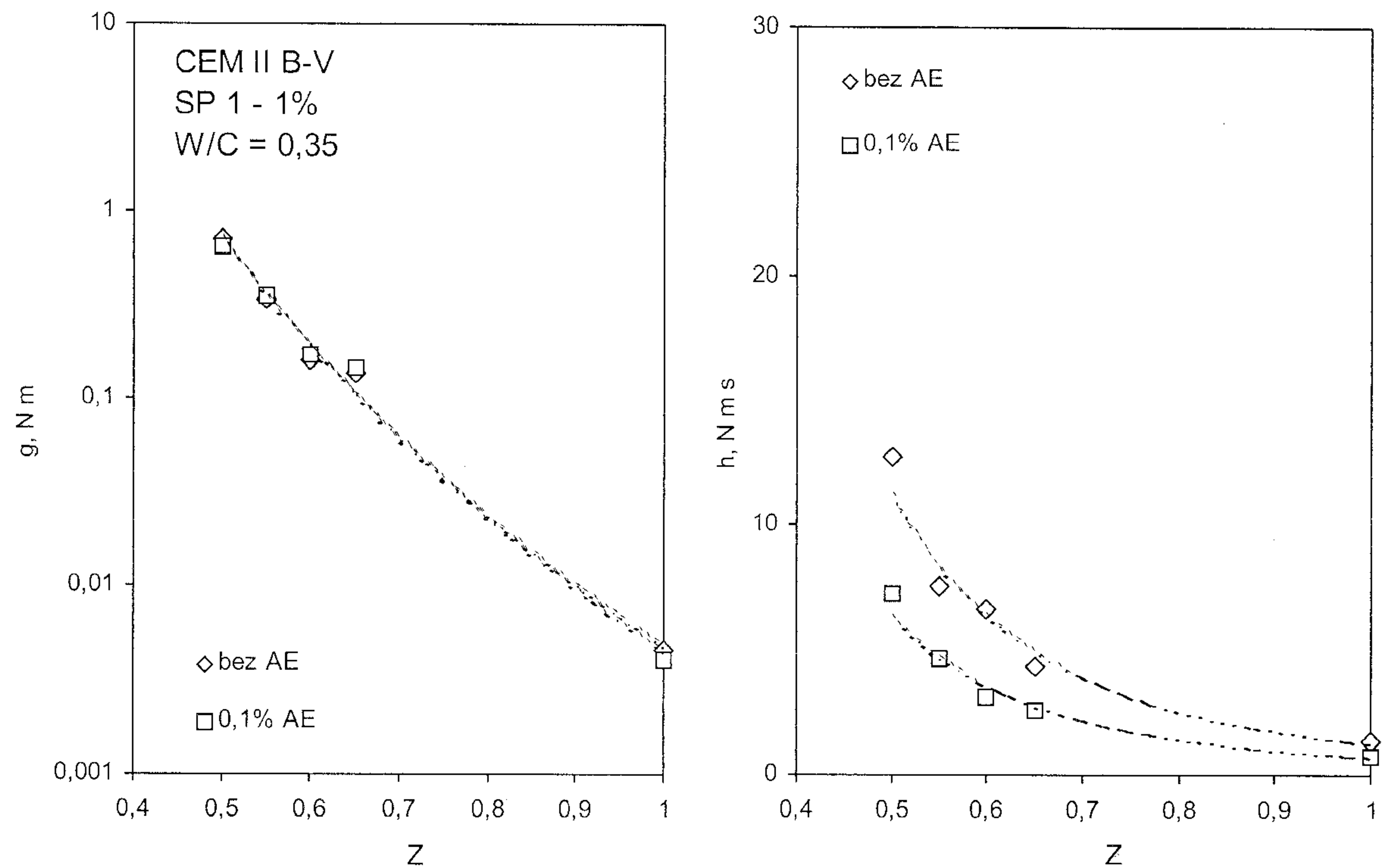
Rys. 6. Wpływ rodzaju cementu parametry reologiczne zaprawy i mieszanek betonowych o różnej zawartości analogicznej zaprawy

Fig. 6. Influence of cement type on rheological parameters of mortar and fresh concretes with different content of analogous mortar



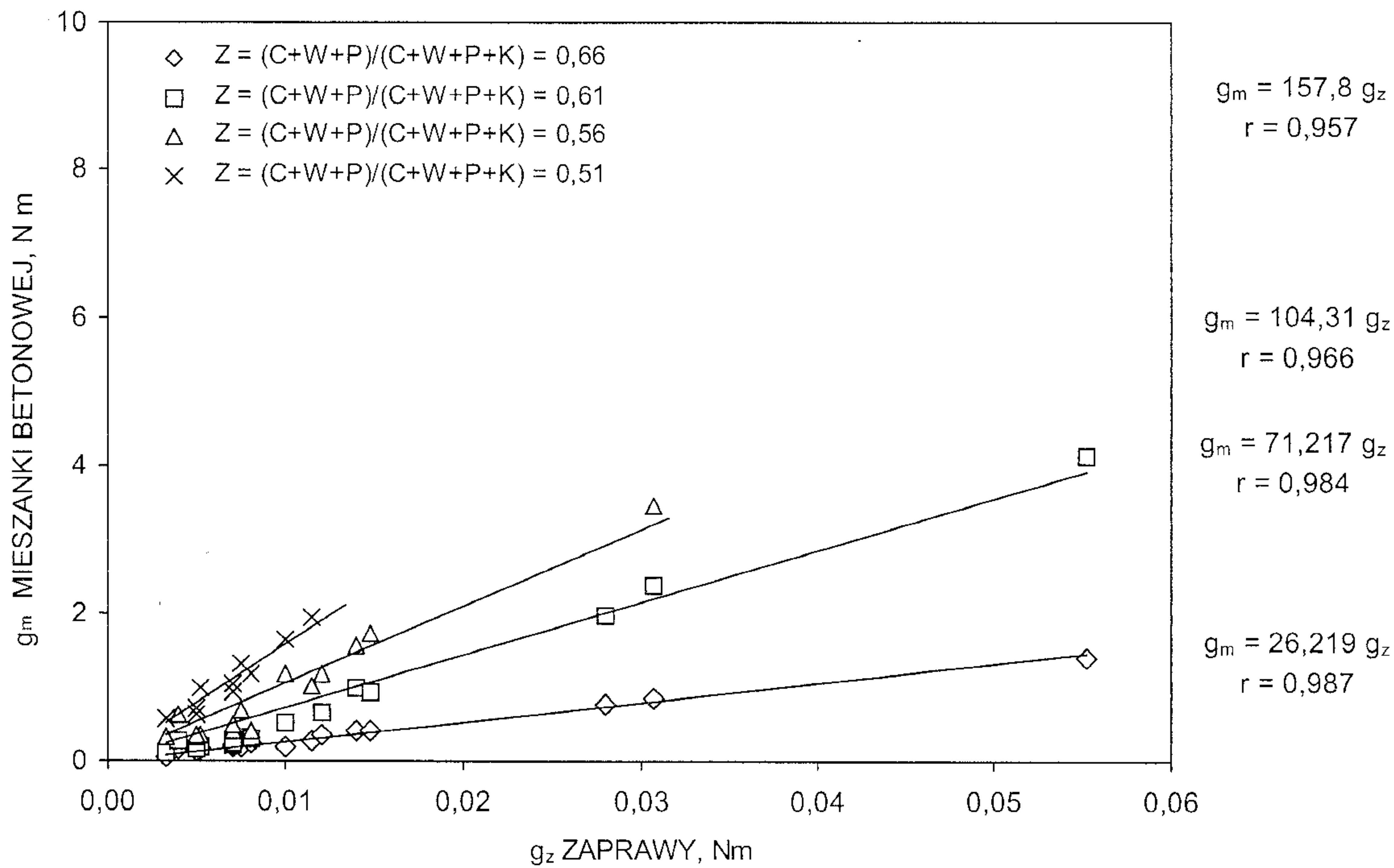
Rys. 7. Wpływ pyłu krzemionkowego parametry reologiczne zaprawy i mieszanek betonowych o różnej zawartości analogicznej zaprawy

Fig. 7. Influence of condensed silica fume on rheological parameters of superplasticized mortar and fresh concretes with different content of analogous mortar



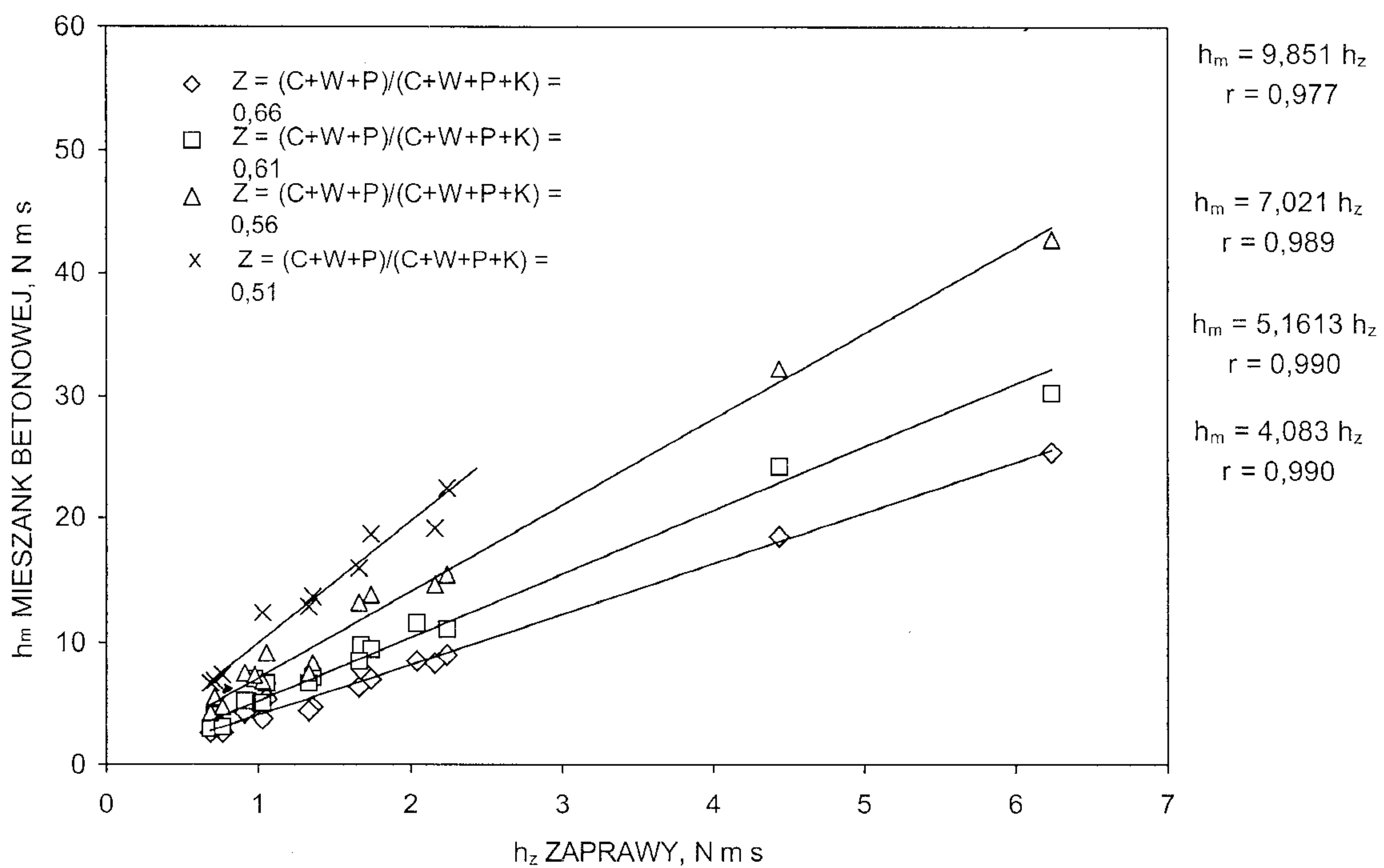
Rys. 8. Wpływ domieszki napowietrzającej parametry reologiczne zaprawy i mieszanek betonowych o różnej zawartości analogicznej zaprawy

Fig. 8. Influence of air entraining agent on rheological parameters of superplasticized mortar and fresh concretes with different content of analogous mortar



Rys. 9. Graniczny opór ścinania g_z zaprawy o P/C = 1,5, a graniczny opór ścinania g_m mieszanki betonowej z kruszywem otoczkowym 2–8 mm, r – współczynnik korelacji

Fig. 9. Yield stress g_z of P/C = 1,5 mortar versus yield stress g_m of fresh concrete with coarse aggregate 2–8 mm, r – correlation coefficient



Rys. 10. Opór płynięcia lepkiego h_z zaprawy o P/C = 1,5, a opór płynięcia lepkiego h_m mieszanki betonowej z kruszywem otoczkowym 2–8 mm, r – współczynnik korelacji

Fig. 10. Plastic viscosity h_z of P/C = 1,5 mortar versus plastic viscosity h_m of fresh concrete with coarse aggregate 2–8 mm, r – correlation coefficient

ze składem zapraw i mieszanek betonowych na ich parametry reologiczne i dowodzą, że przedstawione w tabelicy 1 zależności nie są przypadkowe. Ze względu na podobieństwo wpływu czynników związanych ze składem na parametry reologiczne zapraw i mieszanek, badania zapraw mogą być wykorzystane do przewidywania zmian właściwości reologicznych mieszanek betonowych.

amounts to 28.7% and 19.7%, respectively. The average deviation of parameters g and h calculated values amounts from 12.5 to 8.4% respectively of the measured values. The obtained high correlation coefficients and relatively small deviation of rheological parameters calculated according to the model from those measured in control tests prove that functions [3] and [4] describe rela-

Stwierdzenie to jest szczególnie ważne w badaniach wpływu domieszek chemicznych i dodatków mineralnych na właściwości reologiczne mieszanek oraz kompatybilności cementu i superplastifikatora.

Występowanie korelacji między parametrami reologicznymi zaprawy i mieszanki betonowej, która może być wyrażona w formie przedstawionych w pracy prostych zależności empirycznych dowodzi, że projektowanie, optymalizacja, kontrola i korygowanie urabialności mieszanek betonowych mogą być prowadzone w oparciu o pomiary właściwości reologicznych zapraw. Przedstawione badania obejmują jednak stosunkowo wąski zakres składu mieszanek. Konieczne są dalsze badania, obejmujące zaprawy i mieszanki o różnych proporcjach składników, różnych właściwościach reologicznych oraz z różnymi rodzajami kruszyw.

Literatura/References

1. P. F. G. Banfill, A coaxial cylinders viscometer for mortar: design and experimental validation. *Rheology of Fresh Cement and Concrete*. (ed. P. F. G. Banfill) Spon, London 1991, 217-226.
2. P. F. G. Banfill, D. Beaupré, F. Chapdelaine, F. de Larrard, P. Domone, L. Nachbaur, T. Sedran, O. Wallevik, J. E. Wallevik, Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC (Nantes, France, in October 2001). Report NISTIR 6819, National Institute of Standards and Technology, USA 2001.
3. P. F. G. Banfill, The rheology of fresh cement and concrete - a review. *Proceeding of 11th International Cement Chemistry Congress, Durban, South Africa 2003*, 50-63.
4. P. F. G. Banfill, The rheology of fresh mortar. *Magazine of concrete research*, Vol. 43, No 154, 13 - 21, 1991.
5. D. Beaupré, F. Chapdelaine, P. Domone, E. Koehler, L. Shen, M. Sonebi, L. Struble, D. Tepke, O. Wallevik, J. E. Wallevik, Comparison of concrete rheometers: International tests at MB (Cleveland OH, USA) in May 2003. Report NISTIR 7154, National Institute of Standards and Technology, USA 2003.
6. P. Billberg, The effect of Mineral and Chemical Admixtures on Fine Mortar Rheology. 5th CANMET/ACI International Conference "Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete", Rome, Italy 1997, 301-320.
7. P. L. J. Domone, X. Yongomo, P. F. G. Banfill, Developments of the two-point workability test for high-performance concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 51, No. 3, 1999, 171-179.
8. F. Faroug, J. Szwabowski, S. Wild, Influence of Superplasticizers on Workability of Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 151-157, 1999.
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, 1999, 461-478.
10. 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.
11. O. E. Gjorv, Workability: A New Way of Testing. *Concrete International*, 57-60, 1998.
12. J. Gołaszewski, J. Szwabowski, Influence of Air Entraining Agents on Workability of Fresh High Performance Concrete. *International Conferen-*

tively well the relation of rheological parameters of fresh mortar with rheological parameters of concrete mixtures. Thus, basing on the measurements of rheological parameters of mortar one may anticipate accurately enough the rheological parameters of concrete mixture containing an analogical mortar. However, the size and the type of aggregate and content of mortar must be taken into consideration.

In figures 9 and 10 the linear relations are presented, enabling the conversion of the values for mortar parameters, obtained during measurements (of proportion P/C = 1.5 with addition of superplasticizer) into rheological data for concrete mixtures with coarse aggregate of the maximum size of 8 mm and of different content of analogous mortar. The average deviation of measured values of parameters g and h of mixtures from the values of these parameters calculated with the relations showed in figures 9 and 10 amounts to 19.5% and 10.4% respectively. Thus, they may constitute a basis for choosing the composition of concrete mixtures of similar rheological behaviour. One should pay attention to a certain difficulty. A small range of changes in g parameter for mortars, corresponds to a very large range of changes of this parameter in concrete mixtures. This makes the necessity of the most precise determination of g parameter for mortar. For this purpose one may also use rheometers for mortars, assuring higher precision of rheological parameters measurements than in the case of rheometers for concrete mixtures.

4. Summary

The test results presented in the paper present experimental evidence of similarities presented in Table 1 of the influence of basic factors of composition on rheological parameters of fresh mortars and concrete mixtures. Thus the results obtained with mortars can be used for predicting trends of changes in rheological behaviour of concrete mixtures. This applies especially to testing the influence of mineral additions and chemical admixtures upon rheological behaviour of concrete mixtures and compatibility of cement and superplasticizer.

The correlation between rheological parameters of fresh mortar and concrete mixture which can be expressed in a form of empirical relations as it is presented in this paper, proves that designing and correcting of workability of concrete mixture may be executed basing on measurements of rheological parameters of the mortar. However, the presented research covered a relatively narrow range of concrete composition. Thus, further tests are necessary, comprising mortars and mixtures of different proportions of constituents and of different rheological characteristics, as well as of different aggregates.

ce on Durability of High Performance Concrete and Final Workshop of CON - life, Essen, Germany 2004, 119-132.

13. J. Gołaszewski, J. Szwabowski, Influence of superplasticizers on rheological properties of fresh cement mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2003, 235-248.

14. J. Gołaszewski, J. Szwabowski, Rheological behaviour of fresh cement mortars containing superplasticizers of new generation. *Kurdowski Symposium "Science of cement and concrete"*, Kraków, 2001, 111-135.

15. J. Gołaszewski, J. Szwabowski, Wpływ domieszek chemicznych i dodatków mineralnych na właściwości reologiczne mieszanek betonów nowej generacji. *Materiały Budowlane*, 7/2003, 14-19.

16. J. Gołaszewski, Wpływ wybranych domieszek upłynniających na właściwości reologiczne zapraw.

II Sympozjum Naukowo - Techniczne "Reologia w technologii betonu", Politechnika Śląska, Gliwice 2000, 43-56.

17. J. Gołaszewski, Wpływ temperatury na urabialność mieszanek betonowych z dodatkiem superplastyfikatora. III Sympozjum Naukowo - Techniczne "Reologia w technologii betonu", Politechnika Śląska, Gliwice 2001, 49-60.

18. J. Gołaszewski, J. Szwabowski, Influence of superplasticizers on rheological properties of fresh cement mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2003, 235-248.

19. F. de Larrard, *Concrete Mixture Proportioning. A scientific approach*. E&FN SPON, London and New York 1999.

20. M. Greim, *Rheological Measurement on Building Materials, a Comprehensive Research Program*. Annual Transactions of the Nordic Rheology Society, Vol. 5, 1997, 13.

21. M. Helm, F. Hornung, *Rheological Test Procedure in the Ready-Mixed Concrete Bath Plant*. Annual Transactions Of The Nordic Rheology Society, Vol. 5, 1997, 106-108.

22. F. Hornung, Use of the Brabender ViscoCorder to study the flow properties of mortars by two point tests. *Proceeding of International Conference on Rheology of fresh cement and concrete*, E&FN Spon, London, UK 1990, 227-237.

23. K. I. Johansen, J. Lindgard, *Improving the Workability of High Strength Concrete*. Third International Symposium Utilization of High Strength Concrete, Lillehammer, Norway 1993.

24. H. Kikukawa, *Rheological studies on fresh concrete using admixtures*. Proceedings of the International Symposium RILEM Admixtures for Concrete. Improvement of Properties. Barcelona, Spain 1990, 34-50.

25. J. Mierzwa, M. Urban, *Reologia kompozytów zwykłych i z domieszkami*. *Cement Wapno Beton*, nr 6, 217-222, 1999.

26. J. Norberg, O. Peterson, P. Billberg, *Effects of a New Generation of Superplasticizers on the Properties of Fresh Concrete*. 5th CANMET/ACI International Conference "Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete", Rome, Italy 1997, 583-598.

27. M. H. Özkul, A. Dogan, Z. Cavdar, A. R. Saglam, N. Parlak, *Properties of Fresh and Hardened Concretes Prepared by New Generation Superplasticizers*. Proc. Int. Congress "Creating with Concrete", University of Dundee, Dundee, September 1999, 468-474.

28. J. Punkki, J. Gołaszewski, O. E. Gjørv, *Workability loss of High-Strength Concrete*. *ACI Materials Journal*, V.93, No. 5, September-October 1996.

29. S. Smeplass, *Applicability of the Bingham model to High Strength Concrete*. Proc. of Inter. RILEM Workshop "Special Concretes: Workability and Mixing". Paisley 1993. E&FN Spon., London 1994.

30. J. Szwabowski, J. Gołaszewski, Wpływ superplastyfikatora i pyłu krzemionkowego na urabialność betonu wysokowartościowego. *Cement Wapno Beton* 6/1996, 212-215.

31. J. Szwabowski, J. Gołaszewski, S. Suchoń, *Przydatność reometru Viskomat PC do pomiaru efektywności superplastyfikatorów*. II Konferencja Naukowo-Techniczna "Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej MAT-BUD'98", Pol. Krakowska, Kraków -Mogilany 1998, 392-399.

32. S. Suchoń, J. Szwabowski, *Prediction model for rheological properties of fresh cement concrete*. Proceedings of the 2nd ESAFORM Conference "Material forming", Guimaraes, Portugal, 1999, 451-454.

33. J. Szwabowski, *Reologia mieszanek na spoiwach cementowych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.

34. G. H. Tattersall, P. F. G. Banfill, *The rheology of Fresh Concrete*. Pitman Books Limited, Boston 1983.

35. J. Teubert, *Measuring the consistency of concrete mortar and its importance to the workability of fresh concrete*. *Betonwerk + Fertigeil Technik*, Heft 4/81, 1-6.

36. H. Wolter, *Measuring flow properties of new concrete mixes*. "Holderbank" News 1-2/95.