ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: BUDOWNICTWO z. 93 Nr kol. 1514

Tomasz PONIKIEWSKI *
Politechnika Śląska

WPŁYW DODATKU WŁÓKIEN POLIPROPYLENOWYCH NA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE MIESZANEK NA SPOIWACH CEMENTOWYCH

Streszczenie. W referacie prezentuje się badania urabialności mieszanek betonowych z dodatkiem włókien polipropylenowych. Badania zostały przeprowadzone metodą reometryczną, za pomocą viskomatu PC. Zaprawa była modyfikowana ze względu na zmienny w badaniach wskaźnik W/C, zawartość superplastyfikatora, a także długość i zawartość włókien. Analizowane są właściwości reologiczne modyfikowanych włóknami zapraw, a w szczególności sprawdzenia zgodności uzyskanych wyników z modelem reologicznym Binghama.

INFLUENCE OF POLYPROPYLENE FIBRES ON RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CONCRETE MIXTURE

Summary. The report presents study methods of workability concrete mixture with polypropylene types of fibres. Research became passed with rheometrical method at help Viskomat PC. Mortar was modified from regard on variable in researches coefficient W/C, content superplasticizer and also length and content of fibres. The rheological behaviour of modified mortars and in particular the agreement of obtained results with Bingham model are presented and discussed.

1. Wprowadzenie

Zastosowanie włókien do wzmocnienia betonów stwarza konieczność badania ich urabialności. Stosowane standardowe testy są fizycznie niejednoznaczne a ich nieadekwatność została wykazana w wielu przeprowadzonych badaniach fibromieszanek [1,2,3,4]. Ważne i celowe wydaje się podjęcie badań w kierunku rozpoznania rzeczywistej natury urabialności mieszanek kompozytów o matrycy cementowej zbrojonych włóknami, w ujęciu reologicznym. Zastosowanie testu reometrycznego wydaje się dobrym rozwiązaniem zaistniałych problemów z pomiarem urabialności, ale wymaga to przeprowadzenia badań uwzględniających różnorodność stosowanych włókien i ich odmienny udział objętościowy w mieszance [7,8,9,10].

---

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Janusz Szwabowski.

2. Metodyka badań

Celem przedstawionych badań była próba określenia zachowania się zapraw z dodatkiem włókien polipropylenowych w badaniu wiskozymetrem rotacyjnym Viskomat PC (rys.6) [7,9]. Badania przeprowadzono na zaprawach normowych wg PN EN 196-1:1996, ze względu na podobną naturę zjawisk zachodzących w świeżej zaprawie i mieszance betonowej, przy jednoczesnym mniejszym koszcie i pracochłonności. Zaprawa była modyfikowana ze względu na zmienny w badaniach wskaźnik W/C, zawartość superplastyfikatora Isola FM i włókien polipropylenowych o długości 3 – 38 mm. Zastosowano trzy rodzaje włókien polipropylenowych: elementarne FIBERMIX, głęboko fibrylowane Harbourite oraz FIBERMESH. Zestawienie badanych włókien przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Charakterystyka badanych włókien polipropylenowych

Lp	Typ włókien	Charakterystyka włókien	Długość włókien	Oznaczenie
1	FIBERMIX	Włókno elementarne, niewidoczne na powierzchni	3 [mm]	[Fib3]
2	FIBERMIX	j.w.	6 [mm]	[Fib6]
3	FIBERMIX	j.w.	12 [mm]	[Fib12]
4	HARBOURITE 324	Włókno fibrylowane, głęboko zbrojące	6 [mm]	[Har6]
5	HARBOURITE 300	j.w.	12 [mm]	[Har12]
6	HARBOURITE 320	j.w.	19 [mm]	[Har19]
7	HARBOURITE 330	j.w.	38 [mm]	[Har38]
8	FIBERMESH	Fibrylowane, wielowymiarowe, mocno zbrojone	19 [mm]	[Fib19M]

Zostały one dodane w ilości odpowiadającej zalecanej - dodawanej do mieszanki betonowej, czyli 0,9 kg/m^3 , co odpowiada 0,1% objętości (0.69 g/zarób]. Kilka zarobów wykonano z dwu- i trzykrotną wielokrotnością zalecanej ilości włókien. Kolejność czynności przy przygotowaniu zarobów i ich czas trwania podano w tablicy 2. Ilość dodawanego cementu i piasku była stała i wynosiła odpowiednio 450 g/zarób cementu oraz 1350 g/zarób piasku normowego. Temperatura zarobów w trakcie pomiarów wynosiła 20±2°C.

Tablica 2

Procedura mieszania zaprawy

Nazwa czynności	Prędkość obrotowa mieszadła	Czas trwania [s]
Dozowanie piasku, cementu i włókien	-	-
Mieszanie piasku, cementu i włókien	Mała	30±2
Dozowanie wody	Mała	30±2
Mieszanie zaprawy	Duża	30±2
Zebranie zaprawy przylepionej do ścianek miski za pomocą skrobaka do środka miski	bez mieszania	60±5
Mieszanie zaprawy	Duża	60±5

Badane włókna mają Aprobatę Techniczną ITB AT-15-3570/99 oraz Aprobatę Techniczną IBDiM Nr AT/97-03-0272. W badaniach zastosowano cement portlandzki żużlowy CEM II 32,5R z cementowni Opole. Jako kruszywo zastosowano piasek do zapraw normowych zgodny z PN EN 196-1. Sposób mieszania składników zaprawy odpowiada PN EN 480-1 z wyjątkiem włókien, których dodawanie do suchych składników jest zalecane [1,5]. Składy zapraw przygotowanych do badań przedstawiono w tablicy 3.

Tablica 3

Skład badanych zapraw oraz współczynnik korelacji r dopasowania do równania modelu Binghama

Zarób Ozn.	Wskaź. W/C	Ilość składników [g/zarób]		Zawartość [%]		Współczynnik korelacji r, pomiar po czasie [min]:		
		Woda	Włókna	Włókna	SP	5	15	25
1	0.60	270	0.0	0.0	0	0,976	0,971	0,930
2	0.60	270	0.69 [Fib3]	0.1	0	0,980	0,975	0,893
3	0.60	270	0.69 [Fib6]	0.1	0	0,915	0,955	0,929
4	0.60	270	0.69 [Fib12]	0.1	0	0,966	0,947	0,954
5	0.60	270	0.69 [Har6]	0.1	0	0,966	0,959	0,973
6	0.60	270	0.69 [Har12]	0.1	0	0,967	0,941	0,967
7	0.60	270	0.69 [Har19]	0.1	0	0,975	0,968	0,946
8	0.60	270	0.69 [Fib19M]	0.1	0	0,960	0,957	0,965
9	0.60	270	0.69 [Har38]	0.1	0	0,955	0,967	0,956
10	0.55	247.5	0.0	0.0	0	0,714	0,871	0,854
11	0.55	247.5	0.69 [Fib3]	0.1	0	0,887	0,906	0,906
12	0.55	247.5	0.69 [Fib6]	0.1	0	0,967	0,958	0,930
13	0.55	247.5	0.69 [Har38]	0.1	0	0,819	0,805	0,862
14	0.55	247.5	0.69 [Har38]	0.1	1	0,922	0,938	0,938
15	0.55	247.5	1.38 [Har38]	0.2	0	0,514	0,763	0,829
16	0.55	247.5	1.38 [Har38]	0.2	1	0,981	0,973	-
17	0.50	225	0.69 [Har38]	0.1	1	0,961	0,923	0,901
18	0.50	247.5	0.0	0.0	0	0,884	0,890	-
19	0.55	225	0.69 [Har38]	0.1	1	0,953	0,937	0,945
20	0.50	225	0.0	0.0	1	0,860	0,923	0,903
21	0.50	225	1.38 [Har38]	0.2	1	0,866	0,850	0,890
22	0.50	225	2.07 [Har38]	0.3	1	0,523	0,802	0,883
23	0.50	225	2.07 [Har38]	0.3	2	0,970	0,911	0,968
24	0.50	225	0.69 [Har12]	0.1	0	0,869	0,811	0,892
25	0.50	225	0.69 [Har12]	0.1	1	0,927	0,946	0,956
26	0.50	225	1.38 [Har12]	0.2	1	0,960	0,954	0,920
27	0.50	225	2.07 [Har12]	0.3	1	0,920	0,885	0,872
28	0.50	225	2.07 [Har12]	0.3	2	0,978	0,983	0,982

Z uwagi na brak informacji i publikacji na temat badań reologicznych zapraw z dodatkiem włókien polipropylenowych, zachodziła konieczność:

- sprawdzenia zjawisk zachodzących podczas mieszania składników, a w szczególności w momencie dodawania włókien,

- sprawdzenia zachowania się wiskozymetru rotacyjnego Viskomat PC, na którym były prowadzone badania zapraw z włóknami,
- przeanalizowania właściwości reologicznych modyfikowanych włóknami zapraw - sprawdzenia zgodności uzyskanych wyników z modelem reologicznym Binghama.

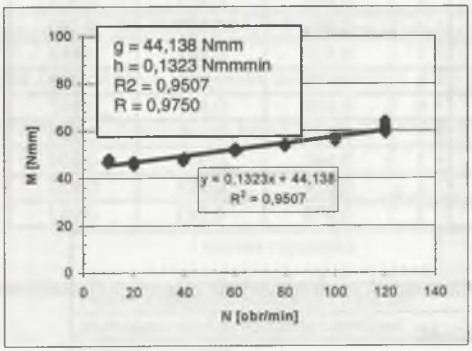
3. Reometryczny test urabialności – istota metody

Właściwości reologiczne zapraw z dodatkiem włókien określono stosując reometryczny test urabialności (RTU), który polega na [6,8,9]:

- doświadczalnym wyznaczeniu momentów M oporu ścinania, stawianych przez próbkę mieszanki betonowej odkształceniu wywołanemu ustalonymi, co najmniej dwoma różnymi prędkościami obrotowymi N sondy lub naczynia pomiarowego reometru,
- wyznaczeniu metodą najmniejszych kwadratów równania binghamowskiej krzywej płynięcia badanej mieszanki betonowej i wartości jej parametrów reologicznych, równanie (1). Ze względu na techniczne zróżnicowanie sposobów pomiaru i działania reometrów stosowanych w RTU równanie modelu Binghama stosuje się w postaci:

$$M = g + h \times N \tag{1}$$

gdzie: M - moment oporu ścinania wywołany płynięciem mieszanki betonowej, [Nm];
g - graniczny opór ścinania odpowiadający binghamowskiej granicy płynięcia, [Nm];
h - opór płynięcia lepkiego odpowiadający binghamowskiej lepkości plastycznej, [Nms];
N - prędkość obrotowa sondy (lub naczynia pomiarowego), [1/s].



Rys. 1. Interpretacja geometryczna sposobu wyznaczania wartości g i h z równania (1) – pomiar za pomocą reometru Viskomat PC (z prawej)

Fig. 1. Geometrical`s interpretation manner of marking values g and h from equalizations (1) – measurement by means rheometer Viskomat PC (on the right)

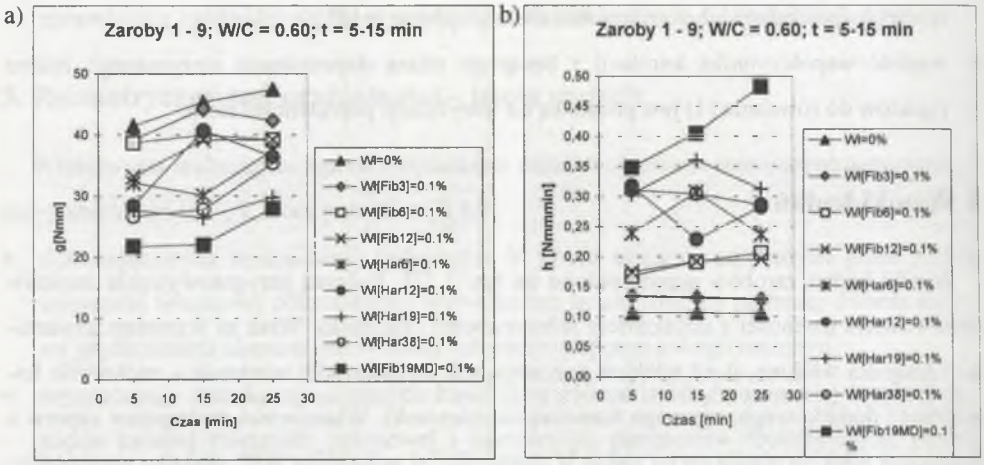
Wynikiem pojedynczego reometrycznego testu urabialności jest zbiór danych obejmujący:

- wyznaczone za pomocą regresji liniowej parametry g i h krzywej płynięcia; mogą być wyrażone w jednostkach fizycznych, po uwzględnieniu stałych pomiarowych dla użytego reometru (procedury ich wyznaczania zostały opisane w [6]);
- wartość współczynnika korelacji r będącego miarą dopasowania otrzymanego zbioru punktów do równania (1) jest podstawą do weryfikacji poprawności testu.

4. Wyniki badań

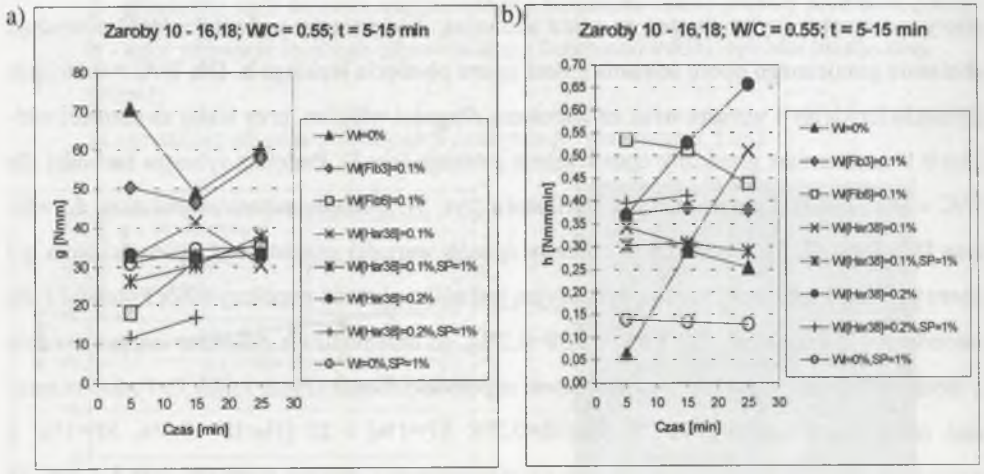
Wyniki badań zarobów przedstawiono na rys. 2 [7]. Podczas przygotowywania zarobów obserwowano trudności z uzyskaniem jednorodności mieszanki. Wraz ze wzrostem zawartości i długości włókien, ilość włókien pozostających na mieszadle wzrastała – zachodziła konieczność dodatkowego, ręcznego formowania mieszanki. Właściwości reologiczne zapraw z dodatkiem włókien różnią się od siebie w zależności od wskaźnika W/C, dodatku superplastyfikatora oraz samej zawartości włókien w zaprawie. W przypadku zarobów o wskaźnikach W/C = 0.50-0.55 zawierających włókna w zaprawie, obserwujemy niską wartość współczynnika korelacji r i wysoki opór płynięcia lepkiego. Wraz ze wzrostem zawartości wody w mieszance, obserwujemy wzrost współczynnika korelacji r nawet przy dodaniu włókien do zaprawy, co można chyba uważać za rzecz naturalną. Zwiększenie wskaźnika W/C powoduje obniżenie granicznego oporu ścinania g oraz oporu płynięcia lepkiego h. Dla W/C = 0.60 opór płynięcia lepkiego h wzrasta wraz ze wzrostem długości włókien, przy stałej zawartości włókien 0.1%, natomiast graniczny opór ścinania g maleje (rys.2). Podobna sytuacja zachodzi dla W/C = 0.55 i przy dodaniu superplastyfikatora (rys. 3). Dodanie superplastyfikatora do włókien [Har38=0.1%] nie zmienia w znaczny sposób wartości granicznego oporu ścinania g i oporu płynięcia lepkiego. Sprawą dyskusyjną jest niska wartość współczynnika korelacji r dla zarobów nr 13 [Har38=0.1%] i 15 [Har38=0.2%], co uniemożliwia dokładne ich porównanie z identycznymi mieszankami zawierającymi superplastyfikator (rys.3 - tabl.3). Podobna sytuacja zaistniała z zarobami nr 21 [Har38=0.2%, SP=1%] i 22 [Har38= 0.3%, SP=1%] o wskaźniku W/C=0.50, co uniemożliwia ich porównanie z innymi zarobami (rys.4 – tabl.3). Badając włókna [Har12] dla W/C=0.5 (rys.5) obserwujemy, że graniczny opór ścinania g maleje wraz ze wzrostem zawartości włókien oraz przy dodaniu superplastyfikatora. Opór

płynięcia lepkiego h wzrasta wraz ze wzrostem zawartości włókien oraz spada przy dodaniu superplastyfikatora.



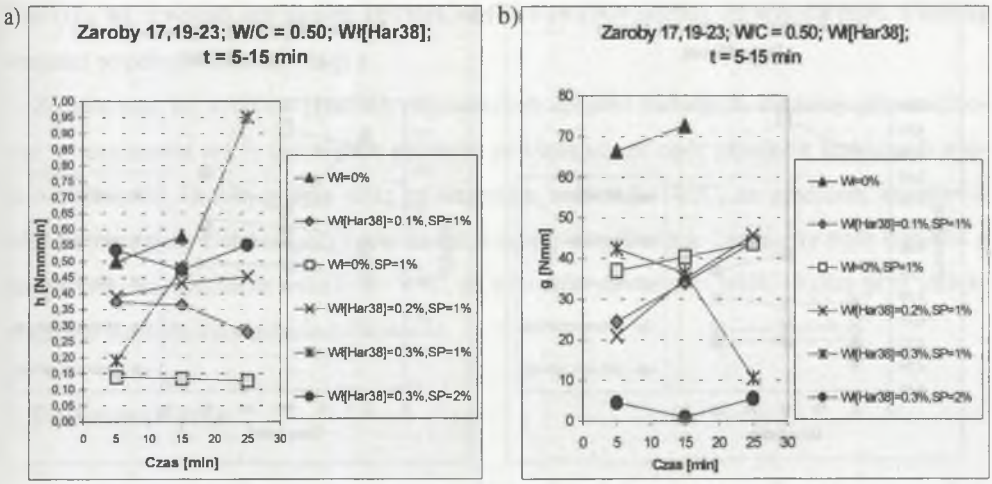
Rys. 2. Wpływ długości włókien na parametry reologiczne zaprawy przy W/C=0.60; a – graniczny opór ścinania g; b – opór płynięcia lepkiego h

Fig. 2. Influence lengths of fibres on rheological's parameters of mortar at W/C = 0. 60; a – liquid limit g; b – plastic viscosity h



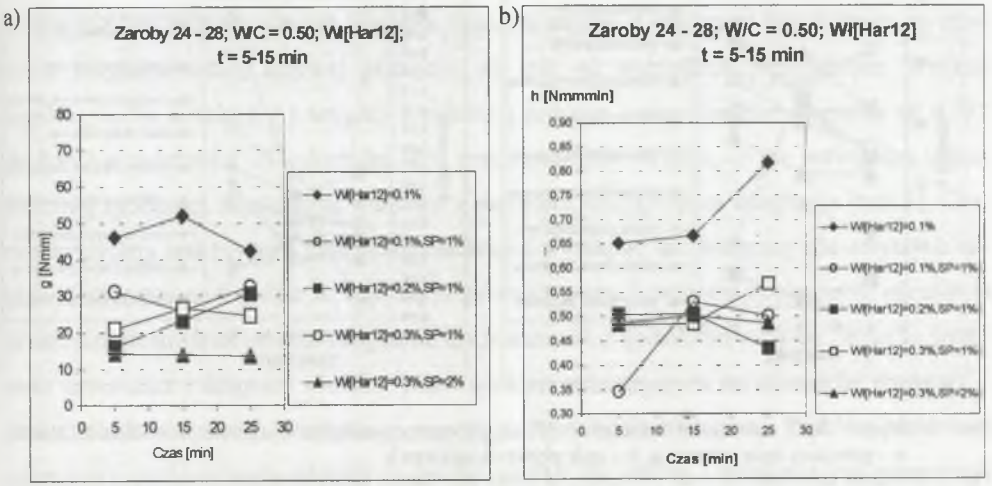
Rys. 3. Wpływ długości włókien, stopnia zawartości włókien oraz superplastyfikatora na parametry reologiczne zapraw przy W/C=0.55; a – graniczny opór ścinania g; b – opór płynięcia lepkiego h

Fig. 3. Influence lengths of fibres, contents of fibres and content superplasticizer on rheological's parameters of mortar at W/C = 0.55; a – liquid limit g; b – plastic viscosity h



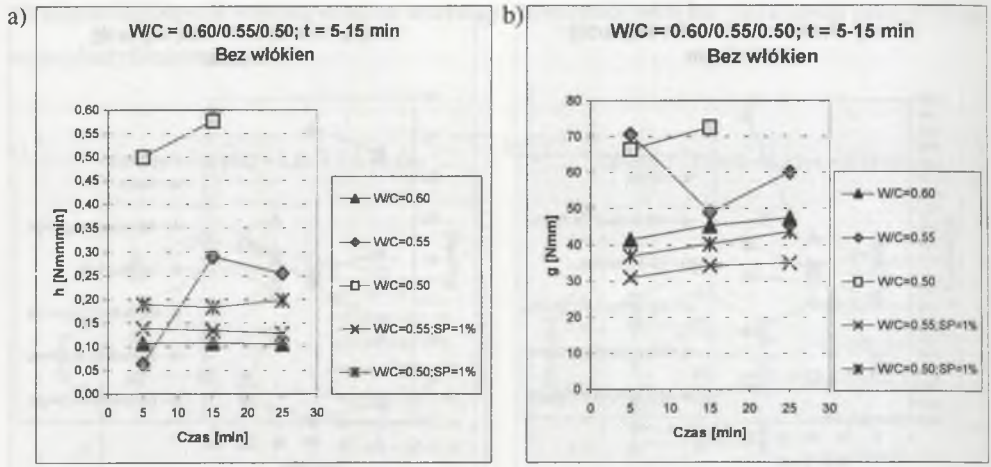
Rys. 4. Wpływ stopnia zawartości włókien oraz superplastyfikatora na parametry reologiczne zapraw przy W/C=0.50, włókna [Har38]; a – graniczny opór ścinania g; b – opór płynięcia lepkiego h

Fig. 4. Influence percentage of fibres and content superplasticizer on rheological`s parameters of mortar at W/C = 0.55 with fibers [Har38]; a – liquid limit g; b – plastic viscosity h



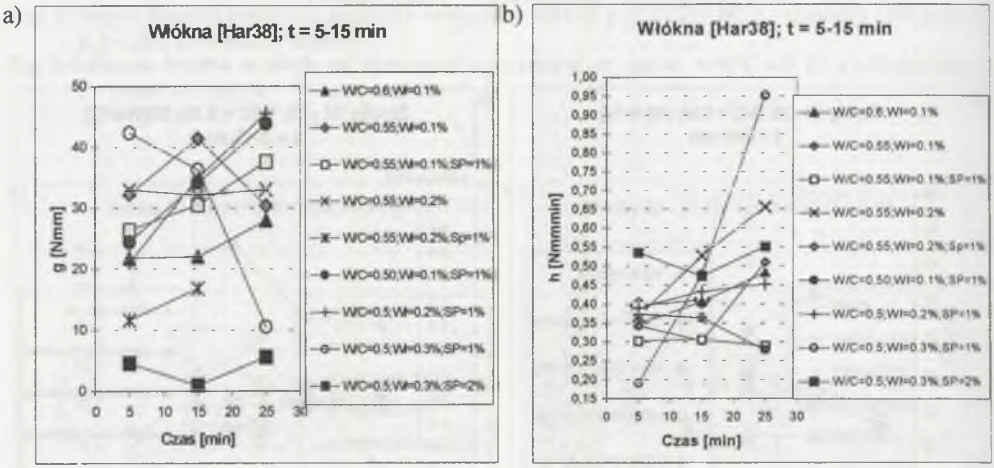
Rys. 5. Wpływ stopnia zawartości włókien oraz superplastyfikatora na parametry reologiczne zapraw przy W/C=0.50, Włókna [Har12];]; a – graniczny opór ścinania g; b – opór płynięcia lepkiego h

Fig. 5. Influence percentage of fibres and content superplasticizer on rheological`s parameters of mortar at W/C = 0.50 with fibers [Har12]; a – liquid limit g; b – plastic viscosity h



Rys. 6. Wpływ wskaźnika W/C na parametry reologiczne zapraw; a – graniczny opór ścinania g; b – opór płynięcia lepkiego h

Fig. 6. Influence water/cement ratio on rheological`s parameters of mortar; a – liquid limit g; b – plastic viscosity h



Rys. 7. Wpływ W/C, zawartości włókien i SP na parametry reologiczne zapraw z włóknami Har38; a – graniczny opór ścinania g; b – opór płynięcia lepkiego h

Fig. 7. Influence water/cement ratio, percentage of fibres and content superplasticizer on rheological`s parameters of mortar with fibers [Har38]; a – liquid limit g; b – plastic viscosity h

Na podstawie rys. 4 i 5 można również zaobserwować wzrost granicznego oporu ścinania g oraz spadek oporu płynięcia h wraz ze wzrostem długości włókien, co jednak nie wynika w sposób jednoznaczny dla wszystkich mieszanek. Braku takiej jednoznaczności nie obserwujemy w przypadku badanych mieszanek o różnych wskaźnikach W/C i bez dodatku włó-

kien (rys. 6), z wyjątkiem zarobu 10 (W/C=0.55) i 18 (W/C=0.50), co wynika m.in. z niskiej wartości współczynnika korelacji r.

Zachowanie się włókien [Har38], najdłuższych spośród badanych, możemy przeanalizować na podstawie rys.7. Generalnie możemy powiedzieć, że opór płynięcia lepkiego h włókien o długości 38 mm maleje wraz ze wzrostem wskaźnika W/C, ze spadkiem zawartości włókien oraz przy zwiększającym się dodatku superplastyfikatora. Graniczny opór ścinania g maleje wraz ze wzrostem wskaźnika W/C, ze wzrostem zawartości włókien oraz przy zwiększającym się dodatku superplastyfikatora.

5. Podsumowanie

Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań poznawczych można stwierdzić, że właściwości reologiczne zaprawy z dodatkiem włókien zależą przede wszystkim od parametrów włókien, wskaźnika W/C oraz dodatku superplastyfikatora. Wraz ze wzrostem długości włókien, właściwości reologiczne mieszanek ulegają pogorszeniu. Udział objętościowy włókien ma mniejszy wpływ na mieszankę, w szczególności przy krótkich długościach samych włókien. Kształt krzywej płynięcia zapraw z włóknami był zbliżony do równania binghamowskiej krzywej płynięcia, ale nie we wszystkich przypadkach. Wartość współczynnika korelacji r pomiędzy prędkością ścinania a naprężeniami wynosiła od 0,797 do 0,983 w zależności od wskaźnika W/C oraz zawartości włókien, co nie potwierdza jednoznacznej zgodności uzyskanych wyników z modelem reologicznym Binghama [tabl.3]. Charakterystyczny jest również brak jednoznaczności wyników, tak widoczny dla zwykłych zapraw. Parametry reologiczne wydają się nieprzewidywalne i zachodzi konieczność określenia przedziału stosowania modelu Binghama dla mieszanek z dodatkiem włókien. Wraz ze wzrostem zawartości i długości włókien, ilości włókien pozostających na mieszadle wzrastała – zachodziła konieczność dodatkowego, ręcznego formowania mieszanki. Problem nierównomiernego rozprowadzania włókien w zarobie wydaje się istotny i wskazane jest przeprowadzenie badań dodatkowych, obrazujących rzeczywistą jednorodność mieszanek z włóknami. Zaobserwowano również zbieranie się włókien na mieszadle podczas przygotowywania zarobów oraz na sondzie wiskozymetru rotacyjnego Viskomat PC, na którym były prowadzone badania zapraw z włóknami. Dostosowanie zasad testu reometrycznego do badań mieszanek fibrobetonowych i ich identyfikacja reologiczna są przedmiotem badań prowadzonych aktualnie przez autora w Politechnice Śląskiej.

LITERATURA

1. ACI Committee 544: Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete, Journal of American Concrete Institute: July / 1978, Vol. 75, s. 283-289.
2. Nanni A., Meamarian N.: Distribution and Opening of Fibrillated Polypropylene Fibers in Concrete, Cement & Conrete Composites 3, 1991, s. 107-114.
3. McWhannell G.: The effects of polypropylene fibres in fresh concrete, Special Conretes: Workability and Mixing, Edited by J.M.Bartos, E & FN Spon., 1993.
4. Bayasi Z., Zeng J.: Properties of polypropylene fiber reinforced concrete, ACI Material Journal/November - December 1993, s. 605-610.
5. Śliwiński J., Zych T.: Fibrobeton z włóknem polipropylenowym: technologia, właściwości i zastosowanie, Czas. Tech. - Budownictwo / PK.-Z.6, 1995, s. 32-42.
6. Szwabowski J.: Reologia mieszanek na spoiwach cementowych, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
7. Ponikiewski T.: Badania urabialności mieszanek betonowych z dodatkiem włókien, 21 MSN, Politechnika Zielonogórska, 8-9 maja 2000, s. 197 – 208.
8. Szwabowski J., Ponikiewski T.: Analiza testów i czynników urabialności fibrobetonów, III K.N.T., MATBUD`2000, Kraków – Mogilany, 28-30 czerwca 2000, s. 331 – 338.
9. Szwabowski J., Ponikiewski T.: O badaniu urabialności mieszanek fibrobetonowych, K.N.T. Procesy Budowlane`2000, Gliwice – Kokotek, 28.09-01.10.2000, s. 245 – 252.
10. Ponikiewski T.: Badania urabialności mieszanek kompozytów o matrycy cementowej zbrojonych włóknami, I Seminarium Doktorantów Wydz. Budownictwa, Gliwice 2000.

Recenzent: Dr hab. inż. Jacek Śliwiński, prof. PK

Abstract

The rheological behaviour of polypropylene modified mortars and in particular the agreement of obtained results with Bingham model are presented and discussed. Mortar was modified from regard on variable in researches coefficient W/C, content superplasticizer and also length and content of fibres. Together with height of length of fibres, rheological proprieties of mixtures surrender to making worse. Participation of voluminal fibres has smaller influence on mixture in peculiarities at short lengths oneself fibres.