



Jacek GOŁASZEWSKI, Grzegorz CYGAN, Michał DREWNIOK

WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE MIESZANKI BETONOWEJ W ASPEKCIE EFEKTU TIKSOTROPII – PROCEDURY BADAWCZE

Streszczenie

W artykule przedstawiono, opracowane na podstawie źródeł literaturowych reometryczne metody pomiaru efektu tiksotropowego żelowania zapraw i mieszanek betonowych. Zjawisko to, wchodzące w skład zmian struktury mieszanki w czasie a, więc jej właściwości reologicznych, nie jest jeszcze zbyt dobrze poznane. Wiedza na temat jego charakteru oraz natężenia umożliwi lepsze zrozumienie zjawisk zachodzących w procesach technologicznych wykonania betonu. Poznając niszczące strukturę mieszanki w spoczynku graniczne naprężenia ścinające (w zależności od jej składu) oraz wyznaczając tzw. statyczną granicę płynięcia sprzed początku wiązania cementu (zarówno laboratoryjne jak i testami technicznymi), umożliwi opisanie zaobserwowanego już wcześniej charakteru zmniejszania się parcia mieszanki samozagęszczalnej na deskowanie. Wiedza ta pozwoli na redukcję obliczeniowego parcia mieszanki na deskowanie co spowoduje znaczne usprawnienie wykonania konstrukcji monolitycznej poprzez nie przewymiarowywanie deskowań a co za tym idzie zmniejszenie jej kosztu.

WPROWADZENIE

Beton, a raczej mieszanka betonowa, stanowiąca mieszaninę zaczynu cementowego i kruszywa jest jednym z najczęściej stosowanych materiałów we współczesnym budownictwie. W związku z tym, iż zaczyn cementowy jest zawiesiną cząstek cementu w wodzie, stanowi doskonały przykład stężonej zawiesiny, której właściwości w większym lub mniejszym stopniu przenoszą się zarówno na zaczyn jak i na mieszankę betonową.

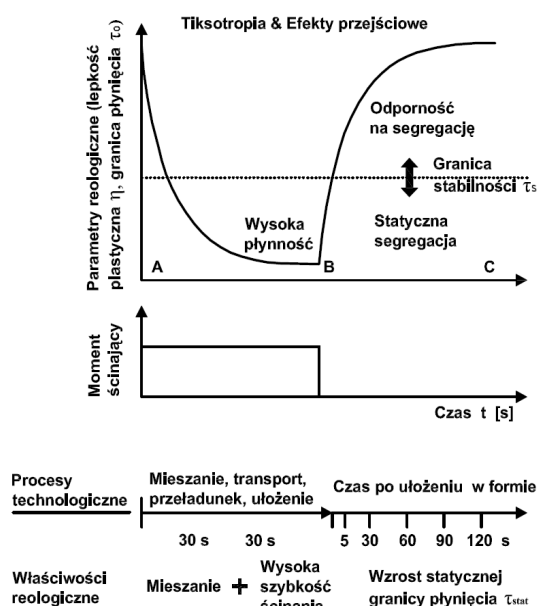
Jak powszechnie wiadomo o właściwościach betonu a co za tym idzie również mieszanki betonowej decyduje m.in. jakość każdego ze składników. Jednak nie tylko czynnikiem decydującym o jakości jest jego skład. W znacznym stopniu jakość konstrukcji zależy od zachodzących zmian stanu mieszanki. Takie zmiany, tj. zachowanie się jej pod obciążeniem, podczas mieszania, transportu, układania, zagęszczania czy wykańczania, mają charakter reologiczny [1-6,8-13]. Dokładne zapoznanie się z właściwościami reologicznymi mieszanki betonowej w połączeniu z jego zmianami struktury, w których skład wchodzi efekt żelowania tiksotropowego mieszanki w spoczynku oraz ewentualnego niszczenia powstałej struktury, mogą stanowić lepsze zrozumienie zjawisk zachodzących w procesach technologicznych wykonania betonu.

Doskonałym przykładem zastosowania tej wiedzy, poprzez poznanie dokładnego momentu zniszczenia struktury mieszanki (w zależności od składu) i wyznaczenie tzw. statycznej granicy płynięcia (zarówno laboratoryjne jak i techniczne), może być poznanie

zaobserwowanego już wcześniej charakteru zmniejszania się parcia mieszanki samozagęszczalnej na deskowanie [13]. Wiedza ta pozwoli to na redukcję obliczeniowego parcia mieszanki na deskowanie co spowoduje znaczne usprawnienie oraz zmniejszenie kosztu wykonania konstrukcji betonowej.

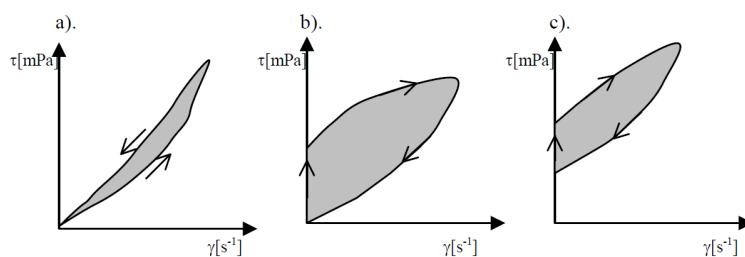
1. EFEKT TIKSOTROPII NA TLE WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH

Najbliższe właściwościom reologicznym mieszanki betonowej i najbardziej właściwym do opisanego zarówno zaprawy jak i mieszanki betonowej jako ciała lepkoplastycznego, cieczy nienewtonowskiej, wydaje się model reologiczny ciała Bingham. Zarówno sam model jak i charakter reologiczny mieszanek betonowych, wraz z późniejszymi modyfikacjami, szczegółowo przedstawiony jest w [1-6]. Zaczyny cementowe zawsze wykazują strukturę trójwymiarową i wykazują często właściwości tiksotropowe. Zależą one od stosunku szybkości niszczenia struktur zaczynu do szybkości ich odbudowy, związanej bezpośrednio z procesami hydratacji [4]. W przypadku zapraw i mieszanek betonowych, zmieniający się z upływem czasu charakter parametrów reologicznych stanowi utratę urabialności (Rys. 1).



Rys. 1. Parametry reologiczne w zależności od czasu [12]

Mieszanka, analogicznie do zaczynów, pozostawiona w spoczynku, wykazuje często efekt odwracalnego zeszywnienia, tzw. żelowania tiksotropowego [5,6,8-14]. Staje się sztywna (zwiększa swoją lepkość) i nie wykazuje zdolności do rozplywu samoczynnego aż do momentu ponownego zmieszania. Dostarczenie energii powoduje zmniejszenie lepkości pozornej poprzez zniszczenie jej struktury [8].



Rys. 2. Pętle histerezy krzywych płynięcia: a) ciecz antytiksotropowa, b) ciecz tiksotropowa, c) ciecz plastycznie tiksotropowa [7]

Szybkość rozpadania się wiązań zależy od ich ilości, które mogą ulec destrukcji. Po ustąpieniu ścinania, w miarę wzrostu potencjalnej ilości wiązań z czasem, szybkość odbudowy zaczyna rosnąć. Powoduje to, w odróżnieniu od cieczy newtonowskiej, że dla rosnącej i malejącej szybkości ścinania utworzyć można tzw. pętlę histerezy (Rys. 2). Różne podziały cieczy tiksotropowych wraz z ich szczegółową charakterystyką przedstawia [7].

W przypadku zapraw czy mieszanek betonowych wyznaczana powierzchnia pomiędzy dwiema krzywymi uważana jest za reprezentatywną dla pracy wykonanej podczas niszczenia struktury isotropowego żelowania w jednostce czasu i jednostce objętości [9].

2. SPOSOBY POMIARU REOMETRYCZNEGO EFEKTU TIKSOTROPOWEGO

Aby uchwycić efekt tiksotropowego żelowania mieszanki posłużyć się możemy procedurami reometrycznymi przedstawionymi graficznie w [3,6,9-14], a zgodnymi z charakterem tego zjawiska. Przykład procedur przedstawiono na Rys. 3. Billberg [10], opracował bardzo ciekawy sposób pomiaru wzrostu widocznej granicy płynięcia w stanie spoczynku. Pomiaru zostały wykonywane przy użyciu reometru przy małej prędkości obrotowej (Rys. 3 a,b). Statyczna i dynamiczna granica płynięcia, była mierzona w celu rozróżnienia odwracalnego efektu żelowania tiksotropowego od nieodwracalnych zmian wynikających z utraty urabialności (w tym początku hydratacji cementu). Billberg wykazał, że statyczna granica płynięcia w spoczynku rośnie sposób liniowy. Podobne rozważania, wykonując obliczenia na podstawie wyników doświadczalnych (m.in. parcie mieszanki na deskowanie), przeprowadzili Ovarlez i Roussel [14] oraz Assaad. Roussel [9] prostym modelem ciała tiksotropowego przedstawił przewidywalną lepkość samozagęszczalnej mieszanki betonowej w zależności od jej historii przepływu (Rys. 3 a) Zakłada on, że granica płynięcia zależna jest od liniowego czasu odpoczynku (1), (2).

$$\tau_0(t) = \tau_{00} + A_{thix}t \quad (1)$$

$$A_{thix} = \tau_0/T \quad (2)$$

gdzie:

τ_{00} – dynamiczna granica płynięcia (zaraz po poddaniu mieszanki silnemu ścinaniu),

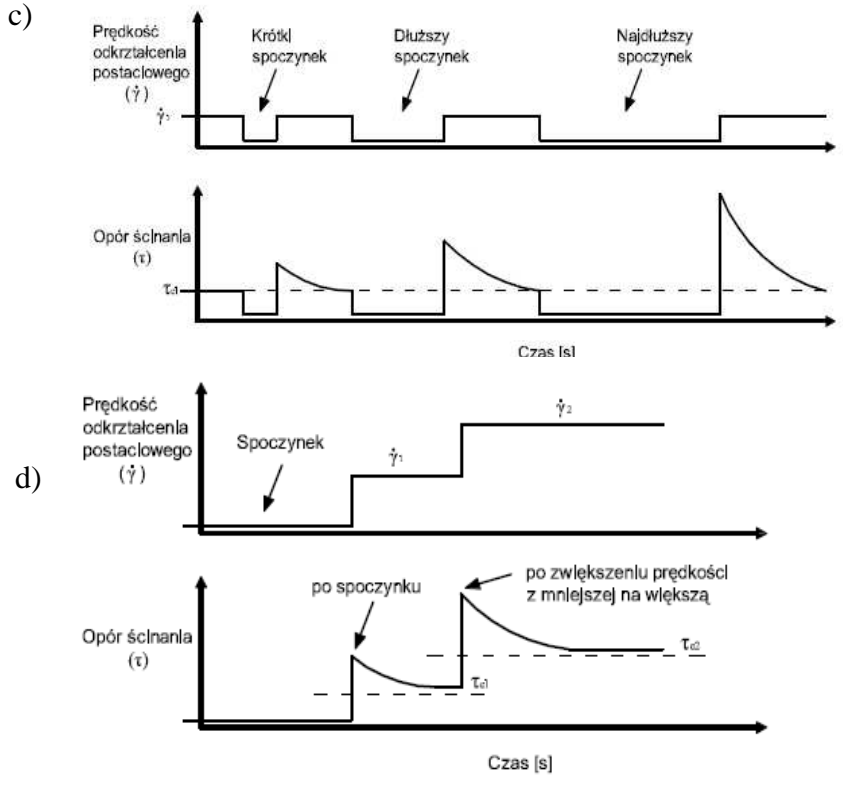
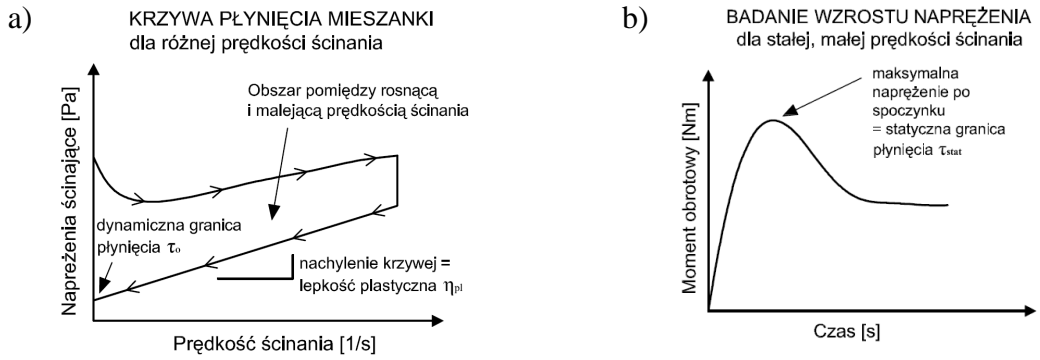
A_{thix} – współczynnik tiksotropii mieszanki betonowej (Pa/s),

$$0,1 \text{ Pa/s} < A_{thix} < 1,7 \text{ Pa/s}$$

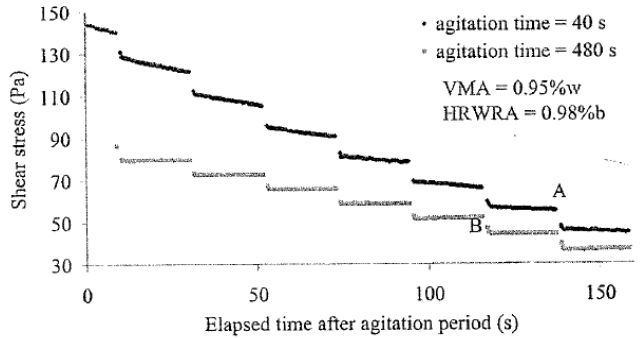
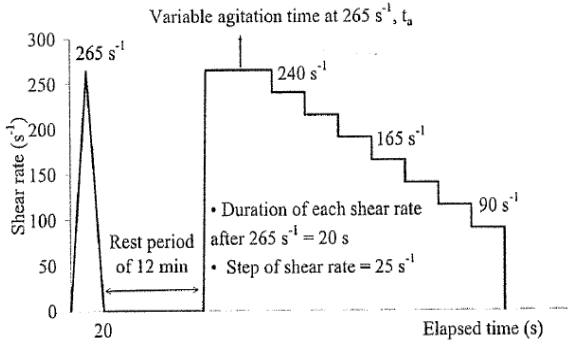
t – czas spoczynku (po silnym ścinaniu),

T – moment w czasie t .

Niestety, Banfill już w 1981 r. dostrzegł, że metoda wyznaczenia pętli histerezy (Rys. 3a) jest w znacznym stopniu uzależniona od dokładności aparatury do badań oraz jest bardzo podatna na zmiany procedury. Nie daje również rzeczywistych wartości parametrów fizycznych. Nie ma zatem możliwości, oprócz empirycznych korelacji, określenia skutków właściwości tiksotropowych mieszanki betonowej (np. parcie na deskowanie czy segregację) [9]. Może dojść również do sytuacji, w której powierzchnia pomiędzy krzywymi, dla różnych mieszanek może być taka sama lub zbliżona pomimo różnych zachowań mieszanki pod względem szybkości zachodzących zmian żelowania tiksotropowego. Bardzo podobna sytuacja ma miejsce w przypadku metodzie przedstawionej na Rys. 3b. Nawet drobne zachwianie struktury tiksotropowej spowoduje błędny pomiar i błędne wyznaczenie statycznej granicy płynięcia. Wydaje się jednak wygodniejsza i prostsza stosując rygory badawcze. Procedury przedstawione na Rys. 3c, 3d, 4, 5 mogą stanowić jedynie sposób określenia właściwości żelowania tiksotropowego mieszanki. Jednoznaczne określenie parametrów tiksotropowych, bez znacznego przybliżenia okazać się może niemożliwe.

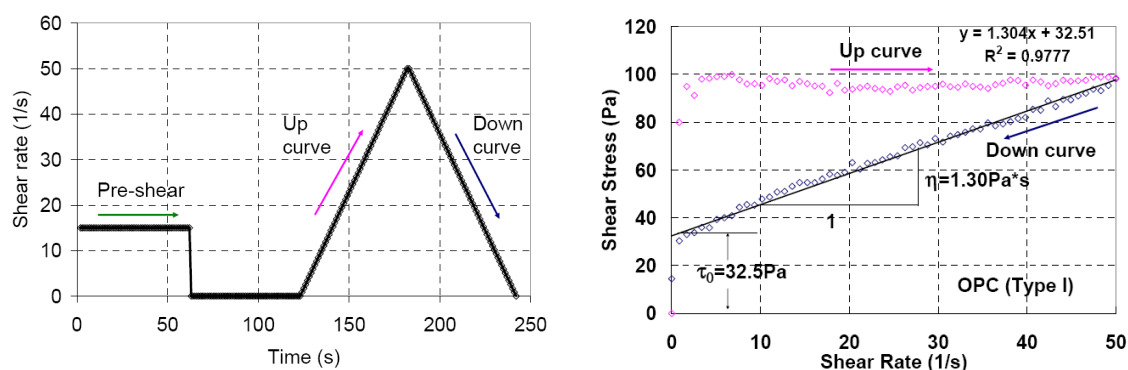


Rys. 3. a) Schemat badania krzywej przepływu, w tym efektu tiksotropii (pętla histerezy), b) wyznaczenie statycznej granicy płynięcia [3], c) stała prędkość odkształcenia postaciowego, d) skokowa prędkość odkształcenia postaciowego [c i d wg. Cheng]



Rys. 4 a) Przykładowa reometryczna procedura badawcza, b) przykład pomiaru w czasie [15]

W związku z tym, że zjawiska zachodzące z mieszankami betonowymi i zaprawami cementowymi na tendencje zmian ich właściwości reologicznych pod wpływem domieszek i dodatków są analogiczne [5], poniżej przedstawiono część badań wstępnych zapraw cementowych, charakteryzujących się z widocznym efektem tiksotropowego żelowania.

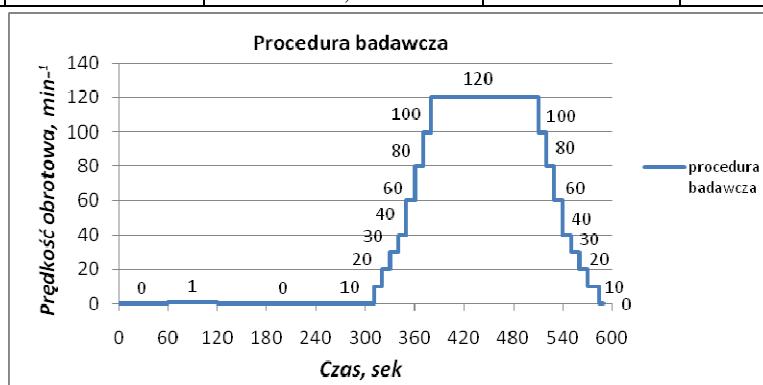


Rys. 5 a) Przykładowa reometryczna procedura badawcza, b) wynik typowego pomiaru w czasie [16]

Celem uchwycenia efektu tiksotropii w zaprawach cementowych, a raczej próby oceny jej wielkości i charakteru, zastosowano wspomniane powyżej literaturowe procedury badawcze korzystając z reometru Viskomat NT.

Tab. 1.

Procedura	Pomiar 1		Spoczynek	Powtórzenia	Analogia
	czas [min]	obroty/min	[min]		
P 1	3	3	15	2	Rys. 3b
P 2	1;1; 1,5; 2	60	0,5; 1; 1,5	1	Rys. 3c
P 3	2	0-80-0	15	2	Rys. 3a
P 4	po 0,5	10, 30 , 60, 80	15	2	Rys. 3d
P 5	10	0, 1, 0, 10, 20, 30, 40, 60 , 80, 100, 120, 120, 100, 80, 60, 40, 30, 20, 10, 0	10	5 po różnym czasie (opis w tekście)	Modyfikacja Rys. 4, 5



Rys. 6. Zmodyfikowana wg [15] i [16] procedura badawcza P5

Porównywano różnymi procedurami badawczymi zaprawy cementowe o składzie zamieszczonym w Tabl. 2. Zaprawę 3 poddano zmodyfikowanej przez autora procedurze badawczej „5” [15] (Rys. 4) i [16] (Rys. 5) przedstawionej na Rys. 6. Dzięki niej możliwy był pomiar 3 właściwości zaprawy: charakteru statycznej granicy płynięcia zaprawy po spoczynku, pętłę histerezy wraz pomiarem granicy płynięcia g i lepkości plastycznej h zaprawy. W przypadku P 5 pomiary odbywały się po 1 min od zmieszania składników, po 10, 20 minutach w spoczynku, po 10 minutowym spoczynku w 30 min od końca zmieszania składników oraz 40 minucie po intensywnym zmieszaniu.

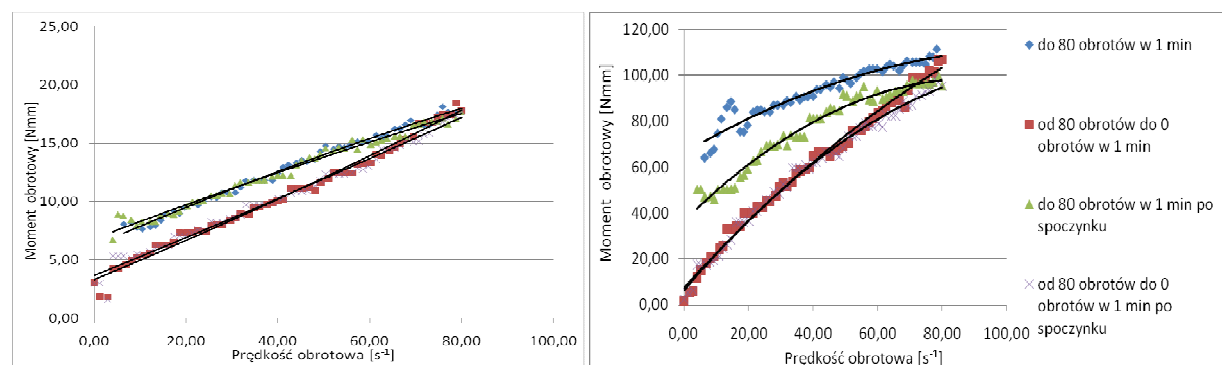
Zarówno Zaprawa 2 jak i 3 wykazywała wizualnie właściwości tiksotropowe, tj. dla coraz dłuższego spoczynku zauważalne było tworzenie się struktur tiksotropowych. Ich charakter przedstawiono na rysunkach poniżej.

Tab. 2.

Składniki	Zaprawa 1 (Z 1)	Zaprawa 2 (Z 2)	Zaprawa 3 (Z 3)
w/c	0,55	0,40	0,40
Cement	CEM I 42,5 R	CEM V/A (S-W)	CEM V/A (S-W)
Woda	247,5 g	180,0 g	180,0 g
domieszka (SP na bazie eteru polikarboksylianowego) il. % m.c.	1,50% m.c.	0,25% m.c	1,5% m.c
piasek normowy wg. PN-EN 196-1:2006	1350 g	1350 g	1350 g

W przypadku wyznaczonej pętli histerezy (Rys. 7) Zaprawa 2 wykazywała widoczną różnicę w wykresie dla prędkości wzrastającej po zmieszaniu w odróżnieniu do Zaprawy 1.

Moment obrotowy przy wzrastającej prędkości ścinania po spoczynku jest wyraźnie mniejszy. Spowodowane jest to działaniem SP w czasie (pomiar wykonano zaraz po zakończeniu procedury mieszania składników) oraz niedostatecznym utworzeniem się wiązań tiksotropowych.

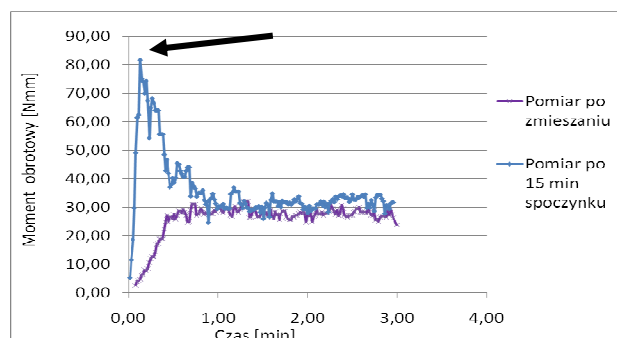


Rys. 7. Wyznaczenie pętli histerezy, P 3 a) Z 1 (brak pętli), b) Z 2;

Całkiem inną sytuację przedstawia Rys.7, na którym widoczna jest chwila zerwania wiązań tiksotropowych Z 2 w początkowej fazie zwiększania momentu obrotowego próbki po 15 minutowym spoczynku (tzw. statyczna granica płynięcia).

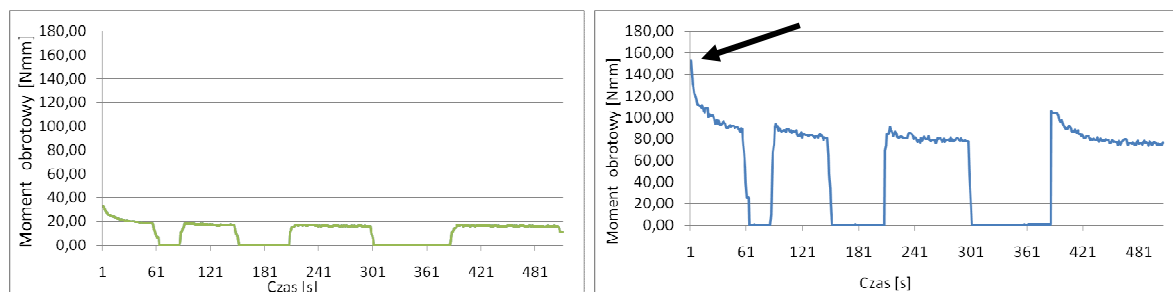
Rys. 8 i 9 przedstawiają charakter cementowej zaprawy tiksotropowej w czasie przy stałej oraz zwiększającej prędkości ścinania. Tworzenie się wiązań sprzed początku wiązania cementu widoczne jest w przypadku Z 2. Strzałką zaznaczono prawdopodobna wartość statycznej granicy płynięcia. W przypadku P 1 brak jest widocznego żelowania.

Podobny charakter wykazywała zaprawa Z 3 procedurą badawczą przedstawioną na Rys. 6. Poniższe rysunki obrazują pomiary zaprawy, której charakter zbliżony jest do właściwości ciała tiksotropowego.

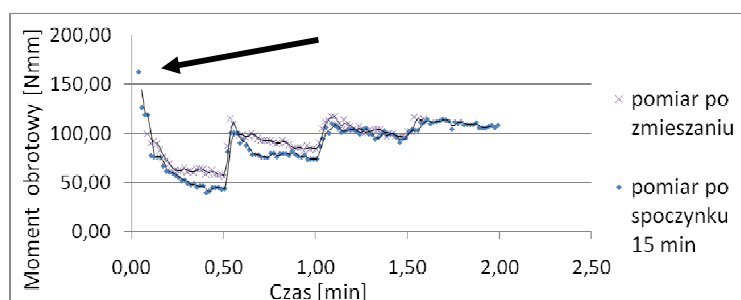


Rys. 7. Zerwanie wiązań tiksotropowych w zaprawie Z 2 (wskazane strzałką), statyczna granica płynięcia – P 1;

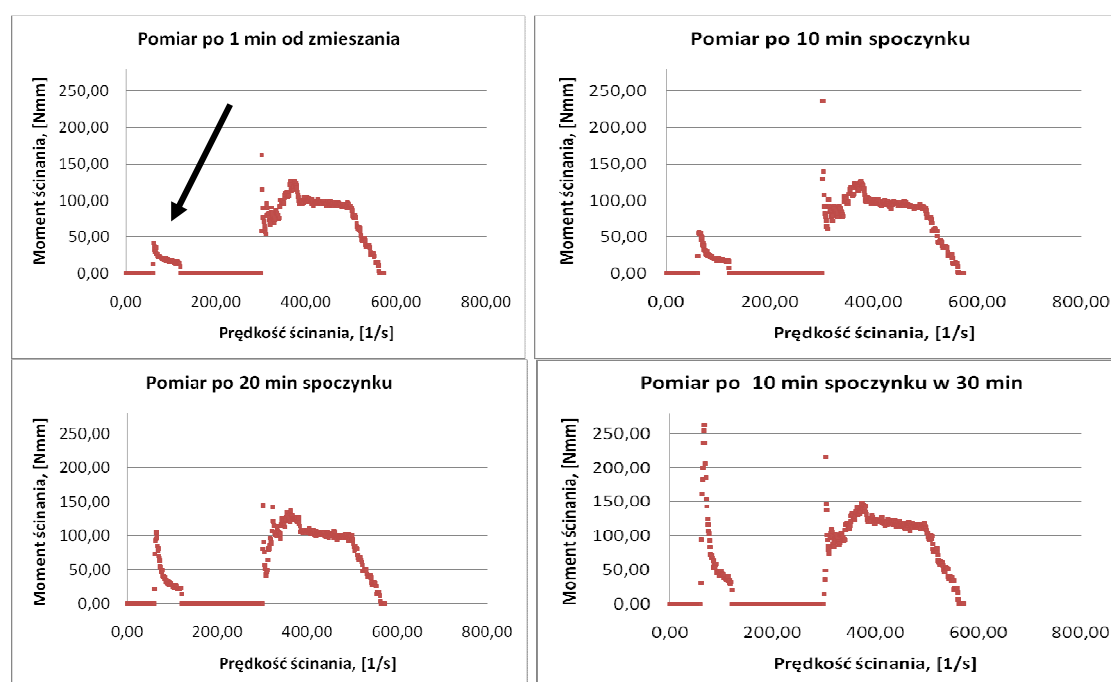
Statyczna granica płynięcia wzrasta wraz ze spoczynkiem zaprawy. Interesującym jest fakt, iż w 30 minucie od zmieszania składników, a po 10 min spoczynku po intensywnym mieszanki statyczna granica płynięcia znacząco wzrosła. Prawdopodobnie spowodowane jest to charakterem działania domieszki chemicznej, która swoje właściwości ujawnia w czasie. Zniszczenie zżelowanej struktury zauważyć możemy w 40 min po zmieszaniu składników oraz po intensywnym przemieszaniu zaprawy. Statyczna granica płynięcia w tym przypadku wykazuje najmniejszą wartość.

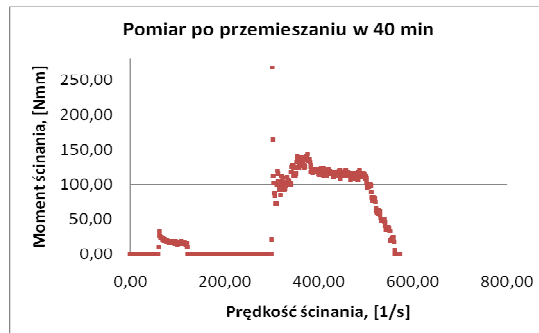


Rys.8. Zerwanie wiązań tiksotropowych oraz niszczenie powstałych po spoczynku – P 2 a) Z 1 (niewidoczne budowanie się wiązań) , b) Z 2



Rys. 9. Zerwanie wiązań tiksotropowych (wskazane strzałką) oraz ich niszczenie przy zwiększającej się prędkości ścinania dla Z 2 – P 4





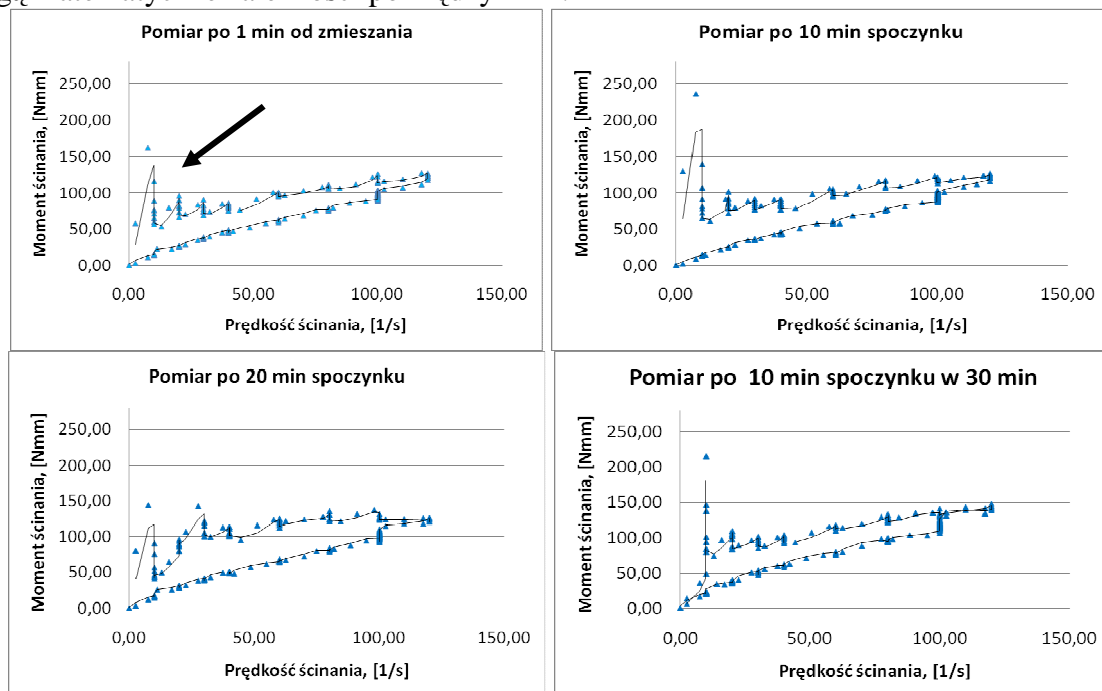
Rys. 10. Pomiary zaprawy quasi tiksotropowej (przypuszczalna statyczna granica płynięcia wskazana strzałką)

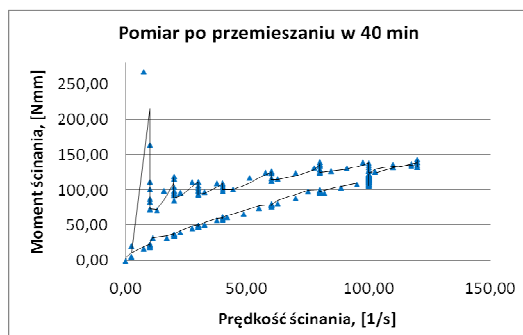
Zniszczenie żelowanej struktury dostrzec możemy również na kolejnych rysunkach. Spoczynek zaprawy powoduje zwiększenie się obszaru pomiędzy krzywą z rosnącą i malejącą prędkością ścinania. W 30 min od zmieszania składników, intensywnym przemieszaniu oraz 10 min spoczynku, pole pomiędzy krzywymi zbliżone jest do pierwszego pomiaru. W 40 min, po intensywnym przemieszaniu, charakter pomiaru jest zbliżony do pomiaru 2-go. Tak jak w poprzednim przypadku spowodowane jest to prawdopodobnie działaniem domieszki chemicznej.

W związku z tym, iż granica płynięcia i lepkość plastyczna wyznaczana jest podczas malejącej prędkości ścinania, zmiany ich charakteru są typowe (Rys. 12). Dla Z 3, zmiana wartości parametrów jest na tyle mała, że charakter właściwości reologicznych w czasie może być praktycznie pomijalny. Zgodne jest to z definicją ciała tiksotropowego, w którym podczas intensywnego przemieszania, ulegają zniszczeniu wiązania, powodując jego upłynnienie.

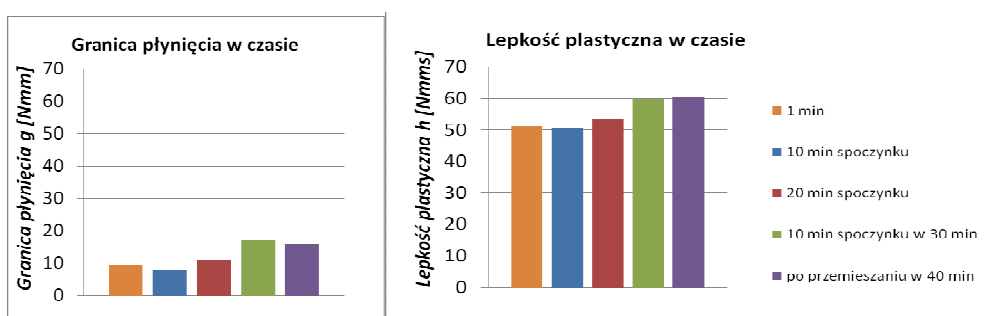
Ze względu na różną jakość reologicznych procedur badawczych najbardziej obiecującą wydaje się ostatnia, P 5. Dzięki możliwości uzyskania 3 charakterystyk mieszanki tj. charakteru statycznej granicy płynięcia zaprawy po spoczynku, pętłę histerezy wraz pomiarem granicy płynięcia g i lepkości plastycznej h zaprawy.

Podczas badań reometrycznych również opracowywano odpowiednie testy techniczne. Korelacja tych testów z testami reometrycznymi wymaga jeszcze wielu badań, które wyłonić mogą matematyczne zależności pomiędzy nimi.





Rys. 11. Pętla histerezy zaprawy quasi tiksotropowej (przyuszczalna statyczna granica płynięcia wskazana strzałką)



Rys. 12. Granica płynięcia i lepkość plastyczna w czasie

PODSUMOWANIE

Przedstawiony w niniejszym referacie przegląd literaturowy wraz z zaproponowaną reometryczną procedurą badawczą stanowi drobny wycinek badań, których istotą jest pozyskanie wiedzy umożliwiającej prognozowanie parcia samozagęszczalnej mieszanki betonowej na deskowanie w zależności od jej parametrów reologicznych oraz efektu tiksotropowego żelowania. Oprócz zastosowanych procedur oraz na podstawie wykonanych badań można stwierdzić, iż wyraźne właściwości tiksotropowego żelowania charakteryzują zaprawy cementowe z zastosowaniem cementów wieloskładnikowych lub zapraw z dodatkami (np. pyłem krzemionkowym), o niskim współczynniku w/c (w/s) a co za tym idzie również stosunkowo dużą dawką SP. Dotychczasowy zakres badań nie pozwala jednak na jednoznaczny, ilościowy opis efektu tiksotropii. Laboratoryjny oraz techniczny pomiar efektu tiksotropii, którego znajomość może znacznie usprawnić procesy technologiczne betonowania, wymaga jeszcze dogłębnego poznania.

Badania finansowane z projektu nr 0842/B/T02/2011/40 ze środków Narodowego Centrum Nauki.

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SELF COMPACTING CONCRETE AND ITS THIXOTROPY EFFECT – TESTING PROCEDURE

Abstract

This paper presents a rheological tests of evaluating the thixotropic behavior of self-compacting concrete. Knowledge about a nature of the rheological properties will enable to better understand the

phenomena occurring in the processes related to casting a self-compacting concrete. Understanding of the SCC thixotropic behaviour and the factors influencing that effect, will enable to practical use of this phenomenon to decrease concrete formwork pressure due to the aforementioned mechanism. This will allow to optimum use of the formwork, by its proper design, particularly in terms of technology SCC.

BIBLIOGRAFIA

1. Szwabowski J.: Reologia mieszanek na spoiwach cementowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
2. Szwabowski J. red. Reologia w Technologii Betonu, Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
3. Koehler Eric P.: Use Rheology to Specify, Design and Manage Self-Consolidating Concrete. 9th ACI International Conference on Superplasticizers & 10th International Conference on Recent, Seville, Spain, October 2009, p. 609-623
4. Kurdowski W.: Chemia Cementu i Betonu. Wydawnictwo Polski Cement Wydawnictwo Naukowe PWN, Kraków, Warszawa 2010.
5. Gołaszewski J.: Wpływ superplastyfikatorów na właściwości reologiczne mieszanek na spoiwach cementowych w układzie zmiennych czynników technologicznych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice 2006.
6. Billberg P.: Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete – Influence of Thixotropy and Structural Behaviour at Rest. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2006
7. Migas A.: Reologia ceramicznych zawieszin tiksotropowych. Rozprawa Doktorska. Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki, Katedra Technologii Ceramiki i Materiałów Ogniotrwałych. Kraków 2008
8. Gołaszewski J.: Technologia betonu samozagęszczalnego a betonu zagęszczonego w sposób tradycyjny. Przegląd Budowlany, 6/2009, s. 28-36
9. Roussel N.: A thixotropy model for fresh fluid concretes: theory, validation and applications, Cement and Concrete Research 36 (10) (2006) 1797–1806
10. Billberg P.: Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete – Influence of Thixotropy and Structural Behaviour at Rest. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2006
11. Walraven J.: Taylor made concrete: a new approach in materials design. Delft University of Technology, Holland
12. Lowke D.: Superplastycyzers and Thixotropy of Fresh Concrete. 9th ACI International Conference on Superplasticizers & 10th International Conference on Recent, Seville, Spain, October 2009, p. 11-37
13. Wallevik E. J.: Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown. Cement and Concrete Research 39, 2009, pp.14-29
14. Ovarlez G., Roussel N.: A physical model for the prediction of lateral stress exerted by self-compacting concrete on formwork, RILEM Mater. Struct. 37 (2) (2006) pp. 239–248
15. Petit J.Y., Vanhove Y., Wirquin E. Helnan-Moussa B.: Evaluation of the cement paste thixotrophy. Second International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, SCC'2009, China, Beijing, China, June 5-7 2009, pp. 526-533.
16. Self-Consolidating Concrete Applications for Sli-Form Paving: Phace I (Feasibility Study), Final Report, Center for Portland Cement Concrete Pavement Technology Iowa State University, November 2005

Autorzy: Dr hab. inż. Jacek GOŁASZEWSKI, Prof. nzw. w Pol. Śl., Mgr inż. Grzegorz Cygan, Mgr inż. Michał Drewniak