ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2000
Seria: BUDOWNICTWO z.89 Nr kol. 1482

Tomasz PONIKIEWSKI

BADANIA URABIALNOŚCI MIESZANEK KOMPOZYTÓW O MATRYCY CEMENTOWEJ ZBROJONYCH WŁÓKNAMI

Streszczenie. W referacie prezentuje się metody badań urabialności mieszanek betonowych z dodatkiem włókien różnego rodzaju. Stosowanie dotychczasowych testów mieszanek fibrobetonowych wskazuje na konieczność modyfikacji lub wprowadzenia odmiennych metod pomiarów ich własności reologicznych. Zalecane są do badań metody reometryczne, umożliwiające określenie zachowania się materiału pod obciążeniem w pełnym zakresie odkształceń postaciowych.

THE RESEARCH WORKABILITY OF CONCRETE MIXTURE WITH FIBRES

Summary. The report presents study methods of workability concrete mixture with different types of fibres. By applying the fibre and concrete mixtures tests, that have been used so far, it shows modification necessity or introduction to different testing methods of its rheological properties. The rheometrical methods are recommended, which allows to define the action of the materials under the pressure in the full bend of molecules.

1. Wprowadzenie

Pojawienie się na rynku budowlanym alternatywy włókien dodawanych do betonu opiera się na założeniu, że ograniczają one skurcz otaczającego je zaczynu i zapobiegają rozprzestrzenianiu się mikrospękań. Zastosowanie włókien poprawia właściwości użytkowe betonów (nazywanych fibrobetonami), niekiedy również ich właściwości mechaniczne, ale jednocześnie sprawiło m.in. większe trudności z określaniem ich urabialności. Można także stwierdzić, że dodawanie włókien do betonu uwydatniło jeszcze bardziej niedoskonałość stosowanych testów technologicznych w ogóle. Pewnym rozwiązaniem zaistniałej sytuacji może być poszukiwanie nowych metod testowania mieszanek fibrobetonowych lub modyfikacja dotychczasowych.

Właściwości mieszanki fibrobetonowej definiuje się także poprzez jej cechy reologiczne, jako samoistny czynnik urabialności. Reologia zajmuje się analizą i opisem zachowania się

materiałów pod obciążeniem, z uwzględnieniem czynnika czasu [8]. Oznacza to, że zachowanie się materiału traktowane jest jako proces powstawania i rozwoju w czasie jego odkształceń, zależy ono nie tylko od wielkości obciążeń, ale także od ich prędkości, czasu trwania i ich historii. Cechy te określone są parametrami równania reologicznego, np. granicą płynięcia i lepkości plastycznej, które stanowią o podatności mieszanki na odkształcenie i płynięcie. Decydują one o urabialności w danych warunkach, która w kategoriach technologicznych wyrażana jest poprzez np. układalność, pompowalność, zagęszczalność, mieszalność, stabilność mieszanki.

Fibrobetony stosowane są głównie do wykonywania: posadzek przemysłowych, płyt nośnych, nawierzchni drogowych i lotniskowych, elementów narażonych na oddziaływania dynamiczne, elementów obiektów hydrotechnicznych narażonych na silne oddziaływanie wody, w betonie natryskowym.

Do fibrobetonów możliwe jest stosowanie włókien wykonanych z bardzo różnorodnych materiałów. Wymienić można włókna stalowe, włókna szklane, włókna roślinne (sizalowe, kokosowe, celulozowe), włókna z tworzyw sztucznych (głównie polipropylenowe i polietylenowe). Najszersze pole zastosowań znalazły betony wzmacniane włóknem stalowym i polipropylenowym [9]. W tablicy 1 podano kierunki zmian, jakie może powodować dodatek tych rodzajów włókien oraz ich granice.

Tablica 1

Kierunki zmian właściwości betonu wywołane dodatkiem włókien [9]

Właściwość	Rodzaj włókien	
	Stalowe	Polipropylenowe
Udział objętościowy [8]	0.25 - 2.0 %	0.1 - 0.5 %
Skurcz	redukcja o ok. 30 do 50 %	redukcja o ok. 30 do 50% (zwłaszcza skurczu plastycznego)
Wytrzymałość na ściskanie	wzrost o 10 do 30%	niewielki wzrost
Wytrzymałość na rozciąganie	wzrost o 20 do 40%	niewielki wzrost
Wytrzymałość na zginanie	wzrost o 30 do 70%	niewielki wzrost
Wytrz. na miejscowy docisk	wzrost o 15 do 30%	niewielki wzrost
Udarność	wzrost do 6 razy	wzrost do 3 razy
Moduł sprężystości	praktycznie bez zmian	praktycznie bez zmian
Nasiąkliwość	bez zmian lub niewielki wzrost	bez zmian lub niewielkie obniżenie
Mrozoodporność	wzrost o 30 do 60%	wzrost o ok. 30%
Ścieralność	redukcja do 50%	praktycznie bez zmian
Wodoszczelność	praktycznie bez zmian lub niewielkie polepszenie	polepszenie o ok. 20%
Urabialność	pogorszenie o 30 do 40% [4]	pogorszenie w zależności od zawartości oraz smukłości włókien [11]

2. Analiza testów urabialności mieszanek fibrobetonowych

Wraz z zastosowaniem włókien pojawiły się dodatkowe problemy z urabialnością mieszanek fibrobetonowych. W raporcie Komitetu ACI (American Concrete Institute) nr 544 [1] poświęconym badaniom właściwości świeżych mieszanek fibrobetonowych nie zalecano stosowania testu opadu stożka do pomiaru urabialności tych mieszanek. Zaproponowano test odwróconego stożka opadowego. Kolejne publikacje wskazywały na ułomności testów jednopunktowych. G.H. Tattersall i P.F.G. Banfill [2] uważali jedynie test odwróconego stożka za odpowiedni do badania urabialności, chociaż zalecali oni poszukiwanie nowych metod. Kolejny raport Komitetu ACI 544 [6], pomimo stwierdzenia, że pomiar urabialności metodą stożka opadowego w odniesieniu do kompozytów z włóknami jest czymś innym niż w przypadku zwykłej mieszanki betonowej, nadal zalecał stosowanie tego testu oraz testu odwróconego stożka. Test stożka opadowego można uznać za nieprzydatny w badaniach fibrobetonów ze względu na jego charakter statyczny - bez użycia wibracji. Została również przedstawiona próba określenia przydatności testów urabialności [11] pod względem składowych urabialności oraz charakteru pomiaru (tabl.2).

Tablica 2

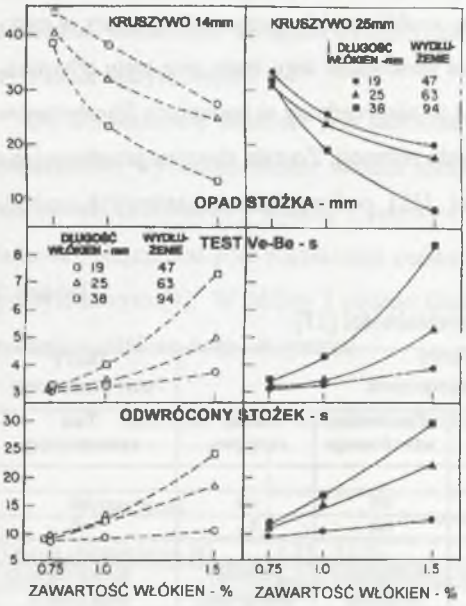
Przydatność testów urabialności [11]

Charakterystyka testów		TESTY JEDNOPUNKTOWE				TESTY DWUPUNKTOWE
		Test opadu stożka	Test Ve-Be	Test stożka odwróconego	Test rozpływu	Test reometryczny
Rodzaj mieszanki						
Betonowa		tak	tak	nie	tak	tak
Fibrobetonowa		nieprzydatny	tak	tak	b.i.	tak
Składowe urabialności						
Stabilność		przydatny	nieprzydatny	nieprzydatny	przydatny	nieprzydatny
Ciekłość		nieprzydatny	przydatny	przydatny	nieprzydatny	nieprzydatny
Zagęszczalność		nieprzydatny	przydatny	nieprzydatny	nieprzydatny	nieprzydatny
Charakter pomiaru						
Warunki badania		statyczne	dynamiczne	dynamiczne	dynamiczne	dynamiczne
Płynięcie grawitacyjne		przydatny	nieprzydatny	nieprzydatny	przydatny	nieprzydatny
Płynięcie w warunkach wibracji		nieprzydatny	przydatny	przydatny	przydatny	nieprzydatny
Krzywa płynięcia postaciowego	Granica płynięcia	przydatny	nieprzydatny	nieprzydatny	przydatny	przydatny
	Lepkość plastyczna	nieprzydatny	nieprzydatny	nieprzydatny	przydatny	przydatny
Oznaczenia: b.i. – brak informacji						

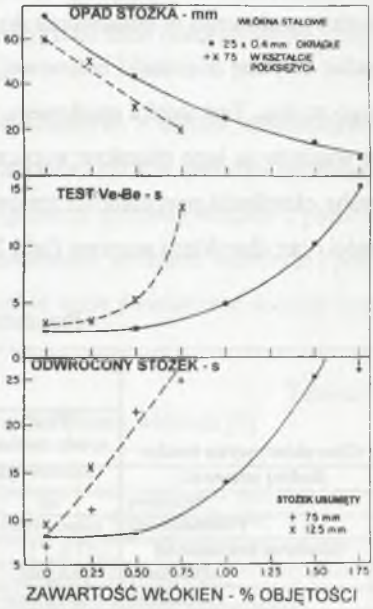
Zauważono m.in., że podczas mieszania i betonowania redukcja płynności i ruchliwości mieszanki z włóknami nie jest aż tak duża, jak wykazała to redukcja w badaniu stożkiem opadowym. W przypadku testów dynamicznych pojawiają się inne problemy, m.in. możliwość zbrylania się włókien podczas zagęszczania, owijanie się długich włókien wokół wewnętrz-

nego wibratora dla testu odwróconego stożka, niepoprawne różnice w wynikach testów dla różnego rodzaju włókien. Wszystkie te zjawiska zostały szeroko omówione we wcześniejszych publikacjach [10,11]

Parametry włókien, takie jak: kształt i typ włókien, ich długość i smukłość oraz zawartość objętościowa w mieszance betonowej, mają duży wpływ na pomiar urabialności niezależnie od metody pomiaru [2,3,11]. Proporcje mieszanki mogą wywierać wpływ na wartość urabialności określoną przez dowolny z testów jednopunktowych. Johnston wykazał [5], że testy Ve-Be i czas przepływu przez odwrócony stożek są efektywne w wyróżniających się wpływach zawartości włókien i ich wydłużenia na urabialność (rys.1. i rys.2.).



Rys.1. Wpływ wydłużenia włókien na urabialność dla włókien stalowych o średnicy 0.4 mm [5]
Fig.1. Effect of fibre aspect ratio on workability for 0.4 mm diameter steel fibres [5]

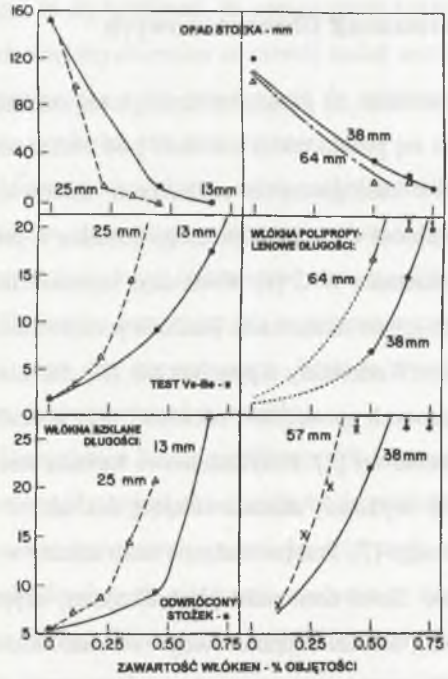


Rys.2. Wpływ długości włókien na urabialność dla dwóch rodzajów włókien stalowych [5]
Fig.2. Effect of fibre lenght on workability for Two types of steel fibre [5]

Na rysunku 1 najdłuższe włókna stalowe miały 38 mm długości, co jest wielkością stosunkowo małą w porównaniu ze 100 mm średnicą otworu w odwróconym stożku. Jednakże, kiedy długość włókien bez względu na ich smukłość staje się stosunkowo duża względem średnicy otworu stożka, to koliduje z płynięciem mieszanki przez stożek. Możemy je porównać do włókien stalowych w kształcie półksiężyca o długości 75 mm i włókien okrągłych 25 x 0.4 mm (rys. 2.), dla których otrzymujemy podobne wnioski. W przypadku testu opadu stożka nie

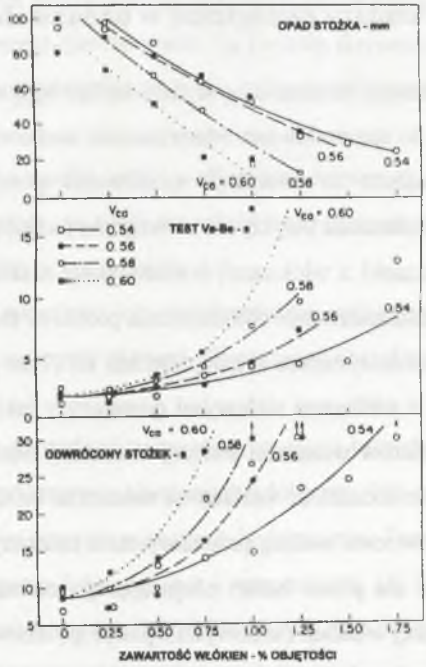
ma tak zasadniczych różnic w cechach zachowania się mieszanki przy zmianie długości włókien jak dla testów Ve-Be i odwróconego stożka.

W przypadku włókien szklanych i polipropylenowych długość włókien jest, obok zawartości objętościowej, łatwo wyznaczalną cechą charakterystyczną i jej wpływ na urabialność mieszanki jest przedstawiona na rys. 3. Jest ona głównym czynnikiem określającym związek pomiędzy zawartością włókien i testami: stożka opadowego, aparatu Ve-Be lub odwróconego stożka. Jednakże dla włókien o długości 57 i 64 mm wiele testów odwróconego stożka na wysoką zawartość włókien było oceniane niepoprawnie, ponieważ występowało zjawisko owijania się włókien wokół wewnętrznego wibratora i zbyt wysoki stopień spójności mieszanki. Takie trudności nie były spotykane w przypadku testu Ve-Be. Ponownie stożek opadowy nie był zbyt skuteczny w określaniu wpływu długości włókien na urabialność [5]. Wskutek dodania włókien ulega obniżeniu ciekłość mieszanki przy równoczesnym polepszeniu jej urabialności jedynie przy zawartości włókien do 0.3% objętości. Natomiast przy zawartości powyżej 0.5 % obj. następuje obniżenie stopnia ciekłości i urabialności i wzrasta zawartość powietrza w mieszance [10].



Rys.3. Wpływ rodzaju i długość włókien na urabialność dla włókien szklanych i polipropylenowych [5]

Fig.3. Effects of fibre type and length on workability for glass and polypropylene fibres [5]



Rys.4. Wpływ udziału obj. zaczynu cementowego i zawartości wody na urabialność dla włókien stalowych 25 x 0,4 mm [5]

Fig.4. Effect of cement paste volume fraction and water content on workability for 25 x 0,4 mm steel fibres [5]

Zależność pomiędzy udziałem objętościowym zaczynu cementowego, zawartością włókien a urabialnością została przedstawiona na rys. 4. Może to być także interpretowane jako zależność od zawartości wody. Wyniki takie są spodziewane dla mieszanki z włóknami i bez nich, tak więc znaczenie zawartości objętościowej zaczynu jest bliżej nieokreślone. Z wyników badań urabialności kompozytów zbrojonych włóknami wynika, że wzrost zawartości włókien zmniejsza płynność. Ponadto mieszanka z włóknami wykazuje szybszy spadek urabialności w czasie w porównaniu ze zwykłym betonem. W przypadku włókien polipropylenowych zaobserwowano, że wraz ze wzrostem W/C w matrycy zwiększała się różnica w wartości opadu stożka pomiędzy zwykłym betonem a zbrojonym włóknami, przy czym dla materiału kompozytowego opad był mniejszy, a tak duża różnica w opadzie stożka nie jest odpowiednia w stosunku do rzeczywistej różnicy w ciekłości mieszanek z włóknami i bez nich. Tak więc w badaniach zostało wykazane, że jednopunktowe metody pomiaru konsystencji mieszanek nie są w pełni przydatne w odniesieniu do kompozytów zbrojonych włóknami, a wyniki mogą być nawet sprzeczne [11].

3. Pomiary reologiczne w badaniach mieszanek fibrobetonowych

Bardzo nieliczne są wyniki badań wpływu włókien na parametry reologiczne mieszanki. Jest to spowodowane odmiennością zachowania się próbki takiej mieszaki pod obciążeniem. Ogranicza to poważnie możliwości pomiarów reologicznych reometrami stosowanymi do mieszanek zwykłych, ze względu na dużą trudność wywołania prostego ścinania w próbce mieszanki z włóknami, o stosunkowo niskim stosunku W/C [8]. Konieczne są modyfikacje układu zadawania odkształcenia próbki w stosowanych reometrach. Badania przeprowadzone na wiskozymetrze rotacyjnym Mk III (Two-point Workability Apparatus Mk III) dla mieszanek z włóknami stalowymi dostarczyły jakościowych spostrzeżeń zdolności tego aparatu do pomiarów własności świeżej mieszanki fibrobetonowej [2]. Dotychczasowe badania mieszanek z dodatkiem włókien na reometrze ROD-1E wykazały niezadowalającą dokładność wyników testu według procedury testu reometrycznego [7]. Przeprowadzone testy zostały wykonane dla planu badań obejmującego zmienność: ilości domieszki plastyfikującej, objętości łącznej włókien (stalowych i polipropylenowych), udziału objętościowego włókien stalowych do całkowitej objętości włókien. Wyniki badań wykazały znaczny wpływ włókien na urabialność mieszanki oraz odmienność jej zachowania w stosunku do wzorcowej wartości granicy płynięcia są znacznie większe.

Badania wskazują na konieczność modyfikacji lub wprowadzenia odmiennych metod pomiaru własności reologicznych mieszanek fibrobetonowych. Weryfikacja powinna obejmować model reologiczny, który może być odmienny od przewidywanego przez standardową procedurę testu reometrycznego.

Obecność włókien zbrojeniowych jest dodatkowym czynnikiem komplikującym i tak już złożony układ w mieszance. Dodatkowym ciekawym czynnikiem są odmienne właściwości dodawanych włókien, mniej lub bardziej podatnych na urabialność. Właściwości fibrobetonów wykonywanych z udziałem włókien o różnym kształcie i z różnych materiałów są oczywiście istotnie zróżnicowane.

4. Podsumowanie

Nieadekwatność standardowych testów urabialności została wykazana przez wielu badaczy. Zostało to wyeksponowane we wnioskach z raportu ACI przez postulowanie poszukiwania nowych bardziej efektywnych metod badania właściwości mieszanek betonowych. Prowadzi to do konkluzji, że opracowanie kolejnych testów jednopunktowych nie wniesie żadnych większych zmian w rozwój badań urabialności fibrobetonów. Są to testy fizycznie niejednoznaczne a ich przydatność do opisu zachowania mieszanek nie tylko z włóknami, ale także zwykłych jest dość ograniczona.

Można postawić tezę, że stosunkowo nieliczne wyniki badań urabialności mieszanek kompozytów zbrojonych włóknami wskazują wyraźnie na niedoskonałość tradycyjnych metod oceny konsystencji traktowanej równocześnie jako miara urabialności.

Do testów pozostających w jednoznacznym związku z ich właściwościami reologicznymi zaliczamy test reometryczny, którego wyniki są rzeczywistymi, fizycznymi charakterystykami materiałowymi mieszanki.

Stosunkowo liczne publikacje odnoszące się do reologii zaczynów, zapraw i betonów cementowych prawie nie uwzględniają problematyki matryc zbrojonych włóknami. Informacje na temat konsystencji, urabialności i cech reologicznych mieszanek kompozytów cementowych zbrojonych włóknami zarówno w literaturze krajowej, jak i zagranicznej są bardzo ograniczone. W kraju nie były do tej pory prowadzone pomiary cech reologicznych mieszanek kompozytów o matrycy cementowej zbrojonych włóknami, z wyjątkiem prac na Politechnice Śląskiej [7]. Dostosowanie zasad testu reometrycznego do mieszanek fibrobetonowych i ich identyfikacja reologiczna jest przedmiotem badań prowadzonych aktualnie przez autora na Politechnice Śląskiej.

LITERATURA

1. ACI Committee 544: Measurements of Properties of Fiber Reinforced Concrete, Journal of American Concrete Institute: July / 1978, Vol. 75, pp. 283-289.
2. Tattersall G.H., Banfill P.F.G.: The Rheology of Fresh Concrete, Pitman Advanced Publishing Program, London 1983, 237 – 242.
3. Johnston C.D.: Measures of the Workability of Steel Fiber Reinforced Concrete and Their Precision, Cement, Concrete, and Aggregates 1984, pp. 74-83.
4. Jamroży Z.: Drutobeton, Pol. Krakowska, 1985, s. 24.
5. Johnston C.D.: Comparative measurements of workability of fibre-reinforced concrete usin slump, Ve-Be and inverted cone tests, Special Conretes: Workability and Mixing, Edited by J.M.Bartos, E & FN Spon., 1993, pp. 107 – 118.
6. ACI Committee 544: Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal. Jan.-Feb.1993, 94 – 101.
7. Szwabowski J., Suchoń S.: Temat badawczy: Reologia mieszanki betonowej z włóknami stalowymi, Politechnika Śląska w Gliwicach, 1998.
8. Szwabowski J.: Reologia mieszanek na spoiwach cementowych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
9. Śliwiński J.: Beton zwykły – projektowanie i podstawowe właściwości, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 1999, s. 161.
10. Ponikiewski T.: Badania urabialności mieszanek betonowych z dodatkiem włókien, 21 Międzynarodowe Sympozjum Naukowe Studentów i Młodych Pracowników Nauki, Politechnika Zielonogórska, 8-9 maja 2000 r., s. 197 – 208.
11. Szwabowski J., Ponikiewski T.: Analiza testów i czynników urabialności fibrobetonów, III Konferencja Naukowo-Techniczna, MATBUD`2000, Politechnika Krakowska, Kraków – Mogilany, 28-30 czerwca 2000 r., s. 331 – 338.

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Stefania Grzeszczyk

Abstract

The report presents study methods of workability concrete mixture with different types of fibres. By applying the fibre and concrete mixtures tests, that have been used so far, it shows modification necessity or introduction to different testing methods of its rheological properties. The rheometrical methods are recommended, which allows to define the action of the materials under the pressure in the full bend of molecules.