

WPLYW RODZAJU MIKROWYPEŁNIACZA NA WŁAŚCIWOŚCI BETONU SAMOZAGĘSZCZALNEGO

Anna M. Grabiec, Tomasz Kosiński

Akademia Rolnicza w Poznaniu

Streszczenie. W pracy przedstawiono charakterystykę betonów samozagęszczalnych z uwzględnieniem projektowania, właściwości, metod badań, możliwości zastosowań i kierunków rozwoju. Omówiono wyniki doświadczeń, w których oceniono wpływ mikrowypełniacza popiołowego i w kompozycji z mikrokrzemionką na wybrane właściwości fizykomechaniczne betonów. Stwierdzono, że dodatek mikrokrzemionki poprawia te właściwości w porównaniu do charakterystyk kompozytu zawierającego tylko popiół lotny.

Słowa kluczowe: beton samozagęszczalny, superplastyfikator, popiół lotny, mikrokrzemionka

WSTĘP

Najmłodszym betonem specjalnym jest beton samozagęszczalny. W piśmiennictwie anglojęzycznym w Japonii, skąd wywodzi się jego technologia, i w Europie określane jest jako Self-Compacting Concrete [Okamura i Ouchi 1999], w USA jako Self-Consolidating Concrete [Kaszyńska 2004], w powszechnie stosowanym skrócie SCC. Jest on także popularny w Polsce, aczkolwiek niektórzy naukowcy [Grzeszczyk 2002, Jamroz 2005] używają skrótu BS, od terminu w wersji polskojęzycznej.

Beton samozagęszczalny powstał jako wynik poszukiwań przez badaczy japońskich betonu o zwiększonej trwałości. Za jego twórców uważa się Okamurę i Ozawę.

Największe osiągnięcia badawcze i praktyczne dotyczące betonów samozagęszczalnych posiadają bezsprzecznie Japończycy, ale w ostatnich latach wzrasta zainteresowanie technologią SCC naukowców i wykonawców w USA, Kanadzie i krajach europej-

Adres do korespondencji – Corresponding author: Anna M. Grabiec, Akademia Rolnicza w Poznaniu, Katedra Mechaniki Budowli i Budownictwa Rolniczego, ul. Piątkowska 94, 61-691 Poznań, e-mail: agra@owl.au.poznan.pl

Jarosław Lewandowski, Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy, Katedra Mechaniki Konstrukcji, al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

skich [Rajski i in. 2001, Grzeszczyk 2002, Kaszyńska 2004], w tym w Polsce [Czołgosz i Świerczyński 2000, Czołgosz i Grabarczyk 2001, Daszkiewicz 2002, Grzeszczyk 2002, Faleńska i Gajger 2002, Giergiczny i in. 2002, Stefańczyk i Rudnicki 2002, Kaszyńska 2004, Świerczyński 2005].

Szczególne walory betonu samozagęszczalnego, do których należy między innymi zdolność mieszanki do samopoziomowania bez zagęszczania mechanicznego, co pozwala uznać ten kompozyt za „ekologiczny”, oraz jego zwiększona trwałość, która we współczesnej technologii bardziej niż wytrzymałość wyznacza jakość betonu, sprawiają, że tworzywo to jest przyszłościowym materiałem konstrukcyjnym. Na obecnym poziomie wiedzy i praktyki budowlanej jest to jednak „trudny” kompozyt, bo bardzo wrażliwy na niewielkie zmiany proporcji składników, warunki otoczenia – zwłaszcza zmiany temperatury, oraz jakość wykonawstwa [Giergiczny i in. 2002, Grzeszczyk 2002, Okamura i Ouchi 2003, Kaszyńska 2004]. Jego właściwości zależą także od doboru jakościowego komponentów, między innymi rodzaju mikrowypełniacza [Bui i Montgomery 1999, Fang i in. 1999, Jiangxiong i in. 1999, Takada i in. 1999, Yahia i in. 1999, Giergiczny i in. 2002, Grzeszczyk 2002, Kaszyńska 2004].

W artykule omówiono cechy betonu samozagęszczalnego, metody projektowania i badań samozagęszczalności oraz tendencje rozwojowe technologii SCC. Przedstawiono wyniki badań własnych dotyczących wpływu rodzaju mikrowypełniacza na wybrane charakterystyki fizykomechaniczne betonów samozagęszczalnych w stanie świeżym i stwardniałym.

WŁAŚCIWOŚCI BETONÓW SAMOZAGĘSZCZALNYCH

Mieszanki samozagęszczalne charakteryzują się:

- zdolnością do rozplywu pod własnym ciężarem, bez segregacji składników,
- zdolnością do samoodpowietrzenia,
- zdolnością do przepływu między prętami zbrojenia bez blokowania się grubego kruszywa [Okamura i Ouchi 1999, 2003].

Wytrzymałość i inne cechy betonów stwardniałych traktowane są jako wtórne, wynikające z reologicznych właściwości mieszanek [Giergiczny i in. 2002, Grzeszczyk 2002, Szwabowski i Śliwiński 2003].

Spełnienie warunku samozagęszczalności przy zastosowaniu efektywnych superplastyfikatorów, mikrowypełniaczy i zwiększeniu ilości cementu, co stanowi o szczelności struktury, powoduje znaczące zwiększenie wytrzymałości na ściskanie. Dotyczy to wczesnych i późniejszych okresów twardnienia. Klasa wytrzymałości przekracza na ogół C 30/35, a przy mniejszym wskaźniku wodno-spoiwowym beton często zaliczyć można do grupy wysokowytrzymałościowych [Giergiczny i in. 2002, Grzeszczyk 2002, Szwabowski i Śliwiński 2003]. Mała porowatość stwardniałego zaczynu w betonach ogranicza wodoprzepuszczalność, dyfuzję chlorków i dwutlenku węgla [Trägårdh 1999, Giergiczny i in. 2002, Grzeszczyk 2002, Persson 2003, Nehdi i in. 2004]. Porównywalna lub większa jest mrozoodporność betonu samozagęszczalnego w odniesieniu do mrozoodporności betonu zwykłego [Giergiczny i in. 2002, Grzeszczyk 2002, Persson 2003].

Nie zawsze jednak właściwości betonów samozagęszczalnych są zadowalające. Pogorszenie odporności siarczanowej betonów samozagęszczalnych z mączką wapienną jako mikrowypełniaczem odnotowuje Persson [2003]. Skurcz betonów samozagęszczalnych ze względu na większy udział spoiwa jest zwiększony szczególnie na etapie wiązania [Bui i Montgomery 1999, Gram i Piiparinen 1999, Wombacher 1999, Grzeszczyk 2002, Termkhajornkit i in. 2005]. Nie wszystkie dane są jednoznaczne, co wynika z dużej liczby czynników determinujących skurcz jako zjawisko fizyczne, do których w technologii SCC dołącza się rodzaj mikrowypełniacza.

DOBÓR SKŁADNIKÓW

Cement

W technologii SCC poza najlepiej rozpoznany cement portlandzkim CEM I można stosować inne rodzaje cementów, co potwierdzają konkretnymi wdrożeniami Japończycy, dopuszczając przepisami cementy portlandzkie – żuźlowy i popiołowy w odmianie A [Szwabowski i Śliwiński 2003], i kompleksowymi badaniami polscy autorzy [Giergiczny i in. 2002], wskazując na zadowalające wyniki także przy użyciu cementów: CEM II/B-S, CEM II/B-V i hutniczego CEM III/A. Dobór cementu zależy od warunków eksploatacji konstrukcji z SCC, a także od reologicznej kompatybilności z superplastyfikatorem w obecności danego mikrowypełniacza.

Kruszywo

Do produkcji betonów samozagęszczalnych można stosować zarówno kruszywa otoczkowe, jak i łamane, aczkolwiek pierwsze z wymienionych zapewniają lepszą płynność mieszanki. Stos okruczowy kruszywa musi być szczelny, maksymalna wielkość ziaren nie powinna być większa niż 1/3 najmniejszego odstępu pomiędzy prętami zbrojenia i nie większa niż 20 mm. Punkt piaskowy powinien być nie mniejszy niż 40% [Szwabowski i Śliwiński 2003].

Mikrowypełniacz

Mikrowypełniacz w betonach samozagęszczalnych zwiększa lepkość zaczynu, stabilizując dzięki temu mieszankę betonową. Zwiększa objętość zaczynu bez zwiększania ilości cementu ponad wymagane minimum i skutecznie uszczelnia strukturę stwardniałego zaczynu [Giergiczny i in. 2002, Grzeszczyk 2002, Szwabowski i Śliwiński 2003].

Stosuje się dodatki chemicznie obojętne, na przykład mączkę wapienną, albo dodatki aktywne: popiół lotny, rozdrobniony żużel wielkopiecowy, a w szczególnych przypadkach (betony wysokowartościowe) mikrokrzemionkę. Mikrowypełniacz dodawany jest nawet w ilości dochodzącej do 50% masy cementu [Giergiczny i in. 2002, Szwabowski i Śliwiński 2003].

Według najnowszych danych [Zhu i Gibbs 2005] rodzaj mikrowypełniacza w większym stopniu niż stopień jego rozdrobnienia wpływa na ilość superplastyfikatora, niezbędną do spełnienia warunku samozagęszczalności. Więcej, na przykład, należy go dodać przy mikrowypełniaczu kredowym niż wapiennym [Zhu i Gibbs 2005].

Superplastyfikator

Superplastyfikator jest niezbędnym komponentem betonów samozagęszczalnych, aby przy małej wartości wskaźnika wodno-spoiwowego uzyskać i zachować wymagany stopień upłynnienia mieszanki. W technologii SCC stosuje się wysokoefektywne superplastyfikatory nowej generacji, głównie polikarboksyłanowe. Pierwsze tego typu domieszki opracowano w Japonii i wprowadzono na tamtejszy rynek w 1987 roku [Tanaka i in. 1996]. Wyższość superplastyfikatorów nowej generacji nad konwencjonalnymi domieszkami upłynniającymi, polegająca między innymi na większym upłynnieniu mieszanki i większej retencji tego upłynnienia w czasie [Tseng i in. 2000], wynika z różnej, w porównaniu z tradycyjnymi, budowy chemicznej, co powoduje różnice w mechanizmie działania [Hamada i in. 2000, Kinoshita i in. 2000]. Superplastyfikatory nowej generacji działają poprzez efekt steryczny – długie łańcuchy polimeru uniemożliwiają zbliżanie się ziaren cementu do siebie i powstają dzięki temu siły odpychania [Kinoshita i in. 2000]. Superplastyfikatory nowej generacji obniżają znacznie granicę płynięcia mieszanki betonowej z równoczesnym zwiększeniem jej lepkości plastycznej. Mieszanka betonowa w większym stopniu się upłynnia i bardziej stabilizuje, co przeciwdziała segregacji składników [Giergiczny i in. 2002].

PROJEKTOWANIE I METODY OCENY SAMOZAGĘSZCZALNOŚCI

Skład betonu samozagęszczalnego dobiera się, aby uzyskać przede wszystkim wymagane właściwości mieszanki. Obecność superplastyfikatora o dużej efektywności, mikrowypełniacza, zwiększona ilość cementu i frakcji kruszywa mniejszych od 0,125 mm powoduje, że projektowanie odbywa się najczęściej według wprowadzonej przez Japończyków trójstopniowej procedury optymalizacyjnej, z wyznaczeniem optymalnego składu zaczynu, zaprawy i w ostatnim etapie – mieszanki betonowej [Okamura i Ouchi 2003].

Autorzy polskich publikacji na temat SCC powołują się i korzystają najczęściej z metody japońskiej [Giergiczny i in. 2002, Grzeszczyk 2002, Szwabowski i Śliwiński 2003, Kaszyńska 2004]. Akcentowana jest przy tym przydatność, podczas ustalania składu, wcześniejszych doświadczeń projektowych mieszanek samozagęszczalnych z podobnych komponentów (cement, dodatek mineralny, superplastyfikator) z koniecznością stosownych korekt [Szwabowski i Śliwiński 2003].

Właściwości reologiczne kompozytów samozagęszczalnych, tak istotne przy dobie-raniu ich składu, najdokładniej bada się w reometrach [Billberg 1999, Emborg 1999, Szwabowski i Gołaszewski 2000]. Nie są to jednak ogólnodostępne przyrządy. Pomiar za ich pomocą jest także trudny do przeprowadzenia na budowie i w wytwórniach pre-

fabrykatów. W praktyce laboratoryjnej i budowlanej do oceny samozagęszczalności używa się wprowadzone głównie przez Japończyków [Noor i Uomoto 1999, Okamura i Ouchi 1999] prostsze, choć mniej doskonałe przyrządy. Są to między innymi: stożki i lejki wypływowe (V-funnels), w których bada się średnicę i czas wypływu zaczynów, zapraw i mieszanek betonowych [Noor i Uomoto 1999], skrzynki wypływowe w kształcie liter „U” [Okamura i Ouchi 1999] i „L” [Sonobi i Bartos 1999], a także pierścieni z prętów zbrojeniowych, tak zwany J-ring [Groth i Nemegeer 1999, Sonobi i Bartos 1999]. Trzy ostatnie spośród wymienionych przyrządów służą do oceny samozagęszczalności w warunkach rozstawu prętów zbrojeniowych.

Odporność mieszanki betonowej na segregację oszacowuje się na podstawie pomiarów głębokości penetracji w nią specjalnych elementów wzorcowych [Kaszyńska 2004].

ZASTOSOWANIE I KIERUNKI ROZWOJU

Do spektakularnych realizacji z zastosowaniem technologii SCC w praktyce inżynierskiej należą między innymi: most Akashi-Kaikyo [Okamura i Ouchi 2003], zbiornik na gaz w Osace [Nishizaki i in. 1999], oczyszczalnia ścieków w Hirakata [Chikamatsu i in. 1999], podwodny tunel w zatoce Kobe [Mizobuchi i in. 1999].

Udane doświadczenia aplikacyjne betonów samozagęszczalnych odnotowuje się również w krajach europejskich: w Szwecji – tunel kolejowy w Kalhäll koło Sztokholmu [Emborg i Hedin 1999], konstrukcje mostowe [Billberg i in. 1999], kompleks biurowy w Norrköping [Söderlind 1999]), w Austrii – Wieża Millennium w Wiedniu [Pichler 1999]), w Szwajcarii – tunel i szyb hydroelektrowni w Cleuson Dixence, tunel Loetschberg [Botte i in. 1999], tunel drogowy Św. Gotharda, rozbudowa hotelu Crowne-Plaza w Genewie, naprawa tunelu Schneich [Schlumf 2004]), w Niemczech i Holandii [Bennenk 1999, Grzeszczyk 2002].

W Polsce w technologii SCC wykonano między innymi: ściany i słupy nośne City Forum w Gdańsku [Daszkiewicz 2001], most Zamkowy przez rzekę Wisłok w Rzeszowie, elementy konstrukcyjne Sanktuarium Matki Bożej w Licheniu, ścianę boczną w tunelu drogowym Wisłostrady w Warszawie [Falańska i Gajger 2002], elementy prefabrykowane dla budownictwa rolniczego (ściany zbiorników na gnojowicę, ruszty do hodowli bydła i trzody chlewnej) [Świerczyński 2005].

Na obecnym poziomie wiedzy wśród przewidywanych kierunków rozwoju betonów samozagęszczalnych należy wymienić: spopularyzowanie przy ich produkcji domieszek zwiększających lepkość mieszanek betonowych, zweryfikowanie jakościowe mikrowypełniaczy, zastosowanie w SCC w większym zakresie domieszek napowietrzających, a także włókien, zarówno stalowych, jak i polipropylenowych oraz wzrost udziału SCC przy wytwarzaniu betonu towarowego.

CEL, ZAŁOŻENIA I METODYKA BADAŃ

Celem badań było określenie, jak rodzaj mikrowypełniacza wpływa na właściwości betonu samozagęszczalnego.

Wykonano betony samozagęszczalne z cementu portlandzkiego CEM I 32,5 R, modyfikowane superplastyfikatorem polikarboksylationym, zróżnicowane rodzajem mikrowypełniacza, stosując popiół lotny w ilości 45% masy cementu i w drugim wariancie popiół lotny (25% masy cementu) w kompozycji z mikrokrzemionką (5% masy cementu). Zachowano stały wskaźnik wodno-spoiwowy równy 0,31. Kruszywo stanowiła mieszanka żwirowo-piaskowa, której skład skomponowano na potrzeby doświadczeń (łącznie frakcje piasku i żwiru 2–8 mm oraz 8–16 mm). Skład mieszanek ustalono tak, aby spełniony został przez nie warunek samozagęszczalności wyrażony przez czas osiągnięcia przez mieszankę rozplywu o średnicy 50 cm i maksymalną średnicę rozplywu. W tabeli 1 zestawiono receptury mieszanek betonowych zastosowanych w badaniach. Mieszankę betonową i beton zawierający popiół lotny oznaczono symbolem „P”. Symbol „P+M” zastosowano dla kompozytu z popiołem i mikrokrzemionką.

Tabela 1. Receptury betonów samozagęszczalnych
Table 1. Mixture proportions for self-compacting concretes

	Ilość składników [kg·m ⁻³]								Woda [dm ³ ·m ⁻³]	Superplastyfikator [%] ^b
	Content of components [kg·m ⁻³]									
Mieszanka betonowa Concrete mix	Cement Cement	Popiół lotny Fly ash	Mikrokrzemionka Silica fume	Piasek drobny Fine sand	Piasek grubszy Coarser sand	Żwir 2–8 mm Gravel 1 2–8 mm	Żwir 8–16 mm Gravel 8–16 mm			
P	350	157 (45) ^a	–	244	366	569	569	156	0,8	
P+M	350	87,5 (25) ^a	17,5(5) ^a	254	381	593	593	141	2	

^aW nawiasach podano ilość popiołu i mikrokrzemionki w % masy cementu.

^bIlość superplastyfikatora wyrażono w % masy cementu.

Określono następujące charakterystyki fizykomechaniczne mieszanek betonowych i betonów samozagęszczalnych: zmiany zdolności do płynięcia mieszanek betonowych w czasie, wyrażone zmianami czasu osiągnięcia przez nie rozplywu o średnicy 50 cm i zmianami czasu rozplywu swobodnego (maksymalnego), zawartość powietrza w mieszanekach betonowych, nasiąkliwość, wodoszczelność i skurcz betonu oraz wytrzymałość betonu na ściskanie.

Stopień samozagęszczalności betonów określono za pomocą stożka Abramsa i stołka rozplywowego [Szwabowski i Śliwiński 2003].

Zawartość powietrza w mieszanekach betonowych oznaczono zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 12350-7:2001 „Badania mieszanki betonowej. Część 7. Badania zawartości powietrza. Metody ciśnieniowe”. Posłużono się aparatem typu 8L B 2020.

Nasiąkliwość betonu oznaczano jako masową, po 28 dniach twardnienia, na próbkach betonowych 10 × 10 × 10 cm, w liczbie 5 dla każdej badanej serii, stosując meto-

dykę z normy PN-88/B-06250 „Beton zwykły”. Norma ta obowiązywała do końca 2003 roku. Po wygaśnięciu jej ważności nie wprowadzono alternatywnego wymogu opisującego sposób oznaczania nasiąkliwości betonu. Sprawdzoną i stosowaną przez wiele lat metodykę potraktowano jako klasyczną i zastosowano w badaniach.

Badanie głębokości penetracji wody pod ciśnieniem przeprowadzono na próbkach betonowych o wymiarach $15 \times 15 \times 15$ cm, w liczbie 6 dla każdej serii. Oznaczenie przeprowadzono zgodnie z zaleceniami normy PN-EN 12390-8:2001 „Badania betonu. Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem”. Po umieszczeniu próbek w aparacie FROM TEST Prufsysteme typu WE 6 OM, poddano je obciążeniu wodą pod stałym ciśnieniem 500 ± 50 kPa przez 72 ± 2 godziny. Po tym czasie próbki wyjęto z przyrządu, rozłupano na pół w kierunku prostopadłym do powierzchni, na którą przekazywane było ciśnienie wody, i określono głębokość penetracji wody w betonie.

Skurcz betonu oznaczono według zaleceń Instrukcji ITB 194/98 „Badania cech mechanicznych betonu na próbkach w formach”. Badanie wykonano na próbkach o wymiarach $10 \times 10 \times 50$ cm w liczbie 3 dla każdej serii. Po rozformowaniu za pomocą kleju szybkoschnącego przyklejono na nie repery, a wartość skurczu betonu odczytywano z zamontowanych nad próbkami czujników zegarowych o dokładności 1/100 mm. Pomiary wykonano po: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 17, 19, 21, 23, 25, 28, 31, 34, 39, 44, 49, 56, 62, 68, 73, 81, 86, 90, 104, 132 i 150 dniach. Zakończono ich prowadzenie po ustabilizowaniu się skurczu.

Badanie wytrzymałości przeprowadzono po: 2, 7, 28, 90, 180 i 360 dniach twardnienia. Do badań użyto próbek o wymiarach $15 \times 15 \times 15$ cm, w liczbie 6 dla każdej serii. Próbki do badań przygotowano i badania wykonano zgodnie z zaleceniami norm: PN-EN 12390-2:2001. „Badania betonu. Część 2. Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych” oraz PN-EN 12390-3: 2001 „Badania betonu. Część 3. Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania”. Zastosowano maszynę wytrzymałościową typu 107/3000A.DIG 2000-P.C.

WYNIKI I DYSKUSJA

Dane dotyczące zmian zdolności do płynięcia mieszanek betonowych w czasie przedstawiono na rysunkach 1 i 2.

W tabeli 2 podano wyniki badań zawartości powietrza w mieszankach betonowych, nasiąkliwości i wodoszczelności betonów. Przełamy próbek SCC po badaniu wodoszczelności pokazuje rysunek 3.

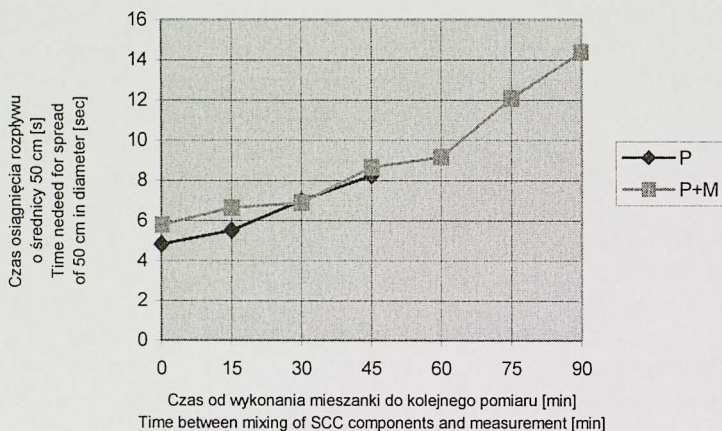
Zmiany skurczu betonów pokazano na rysunku 4.

Wyniki badań wytrzymałości betonów na ściskanie po różnych okresach twardnienia zestawiono w tabeli 3 i na rysunku 5.

Otrzymane wyniki badań mieszanki betonowej należy traktować jako nadrzędne, bo to one świadczą o spełnieniu warunku samozagęszczalności. Właściwości betonu stwardniałego są jego konsekwencją.

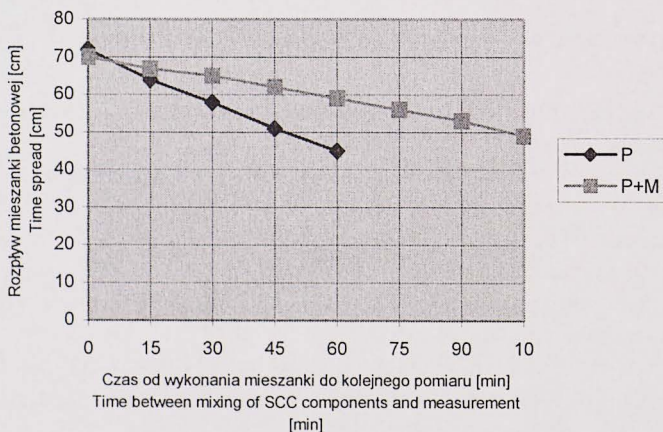
Czas rozplywu do średnicy 50 cm mieszanki z popiołem lotnym wyniósł 6 sekund, a kompozycji z dodatkiem popiołu i mikrokrzemionki 5 sekund (rys. 1), nie przekra-

czając dopuszczalnej wartości 7 sekund [Szwabowski i Śliwiński 2003]. Mieszanka zawierająca popiół lotny osiągnęła maksymalny rozptyw 72 cm, a modyfikowana popiołem i mikrokrzemionką 70 cm (rys. 2), mieszcząc się w dopuszczalnych granicach 65–80 cm [Szwabowski i Śliwiński 2003]. Czas stabilności właściwości reologicznych był korzystniejszy dla mieszanki, w której oprócz popiołu zastosowano mikrokrzemionkę. Mieszanka ta dwukrotnie dłużej rozptywała się do średnicy 50 cm i większy był jej rozptyw swobodny (rys. 1 i 2).



Rys. 1. Zmiany zdolności do płynięcia mieszanek betonowych w czasie – czas osiągnięcia rozptywu o średnicy 50 cm

Fig. 1. Flow ability changes of concrete mixes versus time (time needed for spread of 50 cm in diameter)



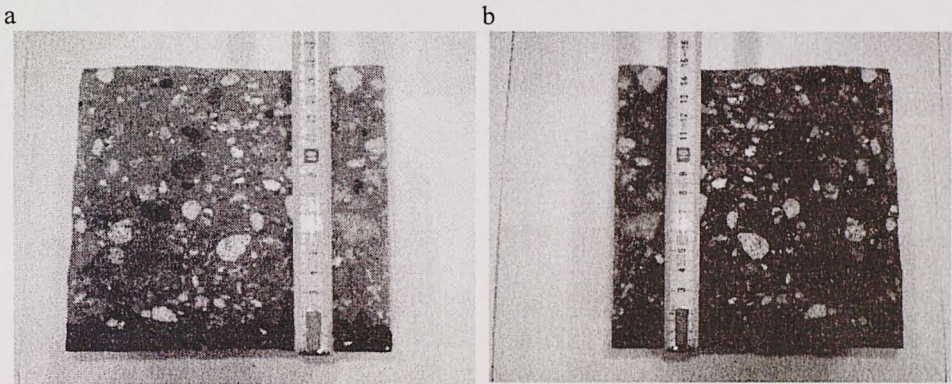
Rys. 2. Zmiany zdolności do płynięcia mieszanek betonowych w czasie – rozptyw swobodny

Fig. 2. Flow ability changes of concrete mixes versus time – free spread

Tabela 2. Zawartość powietrza w mieszankach betonowych, nasiąkliwość i wodoszczelność betonów

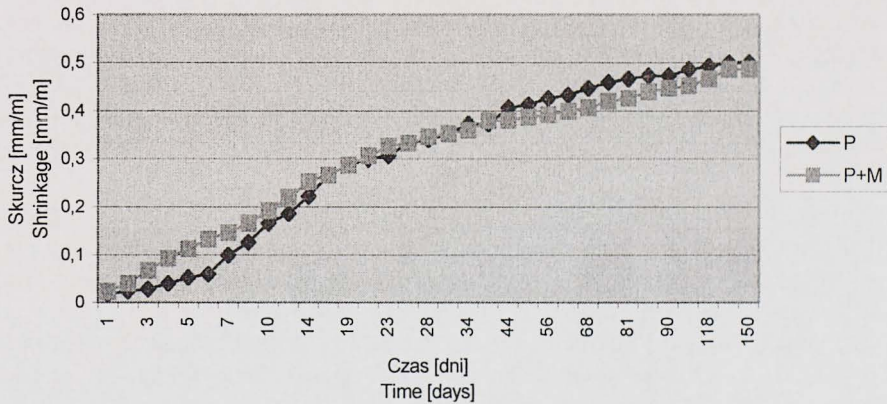
Table 2. Air content in concrete mixes, water absorbability and watertightness of concretes

Oznaczenie mieszanki betonowej / betonu Designation of concrete mix / concrete	Zawartość powietrza [%] Air content	Nasiąkliwość [%] Water absorbability	Głębokość przesiąkania wody pod ciśnieniem 500 kPa [mm] Depth of water penetration at pressure of 500 kPa
P	3,3	4,45	16,33
P+M	2,4	4,22	13,50



Rys. 3. Fotografie przełamów próbek SCC po badaniu wodoszczelności: a – próbka z popiołem lotnym, b – próbka z popiołem lotnym i mikrokrzemionką

Fig. 3. Photos of self-compacting concrete fractures after measurement of watertightness: a – sample with fly ash, b – sample with fly ash and silica fume

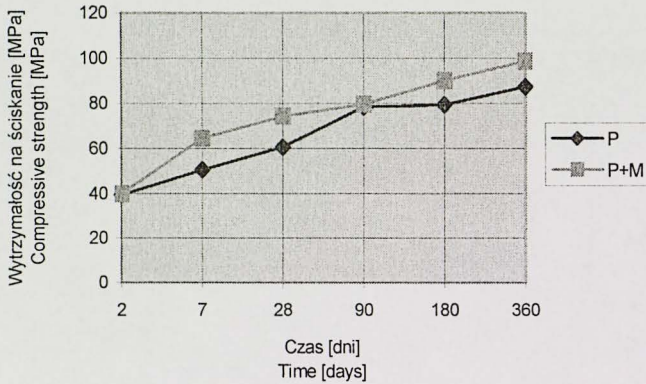


Rys. 4. Skurcz betonów samozagęszczalnych

Fig. 4. Shrinkage of SCC samples

Tabela. 3. Wytrzymałość betonów na ściskanie
Table 3. Compressive strength of SCC

Oznaczenie betonu Designation of concrete	Wytrzymałość na ściskanie [MPa] po dniach: Compressive strength [MPa] after days:					
	2	7	28	90	180	360
P	39,5	50,6	60,7	78,5	79,5	87,4
P+M	40,0	64,6	74,4	79,7	90,1	98,7



Rys. 5. Dynamika przyrostu wytrzymałości betonów
Fig. 5. Compressive strength growth rate

Zawartość powietrza w mieszankach betonowych nie przekroczyła dopuszczalnej dla kompozycji samozagęszczalnych wartości 6% [Szwabowski i Śliwiński 2003]. W obu rozważanych przypadkach była od tej wartości znacznie mniejsza, wynosząc 3,3% dla mieszanki z popiołem lotnym i 2,4% dla mieszanki z popiołem i mikrokrzemionką (tab. 2).

Nasiąkliwość obu betonów po 28 dniach dojrzewania była zbliżona, wynosząc 4% przy zastosowaniu popiołu lotnego i 4,2% przy użyciu popiołu wraz z mikrokrzemionką (tab. 2).

Norma PN-EN 12390-8:2001 „Badania betonu. Część 8: Głębokość penetracji wody pod ciśnieniem”, zgodnie z którą przeprowadzono badanie wodoszczelności, nie precyzuje wymagań w zakresie tej właściwości betonu. Głębokość przeniknięcia wody po 28 dniach dojrzewania wyniosła 16,3 mm w betonie z popiołem lotnym i 13,5 mm w betonie z popiołem lotnym i mikrokrzemionką (tab. 2). Te satysfakcjonujące wyniki pozostają w relacji ze szczelną strukturą betonów, którą potwierdzają fotografie przełamów próbek (rys. 3).

Skurcz do 30 dnia był większy dla betonu z mikrowypełniaczem mieszanym (popiół lotny + mikrokrzemionka). Po upływie tego czasu do końca badań betonu był on mniejszy w porównaniu do skurczu z dodatkiem tylko popiołu, osiągając podczas pomiarów maksymalną wartość 0,5 mm/m (rys. 4).

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie wykazały, że próbki betonowe z dodatkiem popiołu i mikrokrzemionki po 7 i 28 dniach osiągnęły wytrzymałość mniej więcej o 14 MPa, a po 180 i 360 dniach mniej więcej o 11 MPa większą w porównaniu do wytrzymałości próbek wykonanych z dodatkiem samego popiołu lotnego. Wartości wytrzymałości po 2 i 90 dniach w przypadku obu receptur były zbliżone i wyniosły odpowiednio około 40 MPa i 80 MPa. Dla betonu z dodatkiem popiołu i mikrokrzemionki stwierdzono narastanie wytrzymałości do 360 dni, przy jej zachowaniu na poziomie około 80 MPa po 90 i 180 dniach oraz około 87 MPa po 360 dniach w przypadku betonu tylko z popiołem lotnym (tab. 3).

Tempo narastania wytrzymałości w czasie było większe dla betonu, w którym zastosowano mikrowypełniacz mieszany (rys. 5). Świadczy to o większej intensywności reakcji pucolanowej dzięki zastosowaniu mikrokrzemionki. Oba betony osiągnęły poziom wytrzymałości pozwalający zakwalifikować je do grupy wysokowartościowych.

Niewielki, bo wynoszący tylko 5% dodatek mikrokrzemionki sprawił, że większość właściwości betonu samozagęszczalnego w stanie świeżym i stwardniałym była lepsza niż przy użyciu jako mikrowypełniacza tylko popiołu lotnego.

Mikrokrzemionka to odpad deficytowy i dlatego używana jest w technologii przede wszystkim do produkcji betonów wysokowartościowych. Technologia SCC jest stosunkowo młoda. Są w niej stosowane najłatwiej dostępne w poszczególnych krajach dodatki mineralne, z przewagą żużli i popiołów lotnych w Japonii i USA oraz mączki wapiennej, żużli i popiołów w Europie [Kaszyńska 2004]. Znajduje to wyraz w badaniach, których niewiele dotyczy wpływu pyłów krzemionkowych na właściwości kompozytów samozagęszczalnych. Według Takady i in. [1999], przy zastosowaniu mikrokrzemionki trzeba zwiększać ilość superplastyfikatora z powodu dużego stopnia rozdrobnienia i jej małej gęstości.

Według Fanga i in. [1999], trudniej dobrać kompatybilne zestawy: cement – superplastyfikator – mikrowypełniacz przy zastosowaniu mikrokrzemionki, a łatwiej przy użyciu żużla wielkopieczowego lub popiołu lotnego.

Rozpoznanie naukowe wymaga także kompatybilność mikrokrzemionki z superplastyfikatorami i różnymi rodzajami cementu.

Uzyskane wyniki badań przedstawione w artykule sugerują, że warto zastosować mikrokrzemionkę w niewielkiej ilości, w połączeniu z mikrowypełniaczem popiołowym, dostępniejszym, tańszym i lepiej rozpoznanym w kompozytach samozagęszczalnych pod względem technologicznym. Oddziaływanie mikrokrzemionki zaznaczy się w wystarczający i zadowalający sposób.

PODSUMOWANIE

Technologia SCC to obiecujący kierunek rozwoju ze względu na korzyści podczas wykonywania tych betonów (wyeliminowanie drgań, hałasu od wibrowania, zmniejszenie pracochłonności podczas układania mieszanki, łatwe wypełnianie deskowań przy bardzo gęstym zbrojeniu) i eksploatacji (zwiększona ich trwałość). Większa jednak niż w betonach zwykłych liczba komponentów wpływających na właściwości reologiczne

mieszanek betonowych utrudnia projektowanie i stwarza między nimi różnego rodzaju, nie zawsze zgodne współdziałania. Większa podatność mieszanek samozagęszczalnych na zmiany środowiska, zwłaszcza temperatury, utrudnia transport i układanie na miejscu budowy.

Wzrastająca liczba badań SCC, traktowanych kompleksowo i coraz częściej z „przełożeniem” na praktykę, z pewnością jednak przyczyni się w przyszłości do zmiany „statusu” tych betonów ze specjalnych na zwykłe.

Opisane badania stanowią przyczynek do poszerzenia danych o wpływie mikrowypełniacza na właściwości betonu samozagęszczalnego w stanie świeżym i stwardniałym ze wskazaniem celowości rozważenia stosowania mikrowypełniaczy mieszanych.

PIŚMIENNICTWO

- Bennenk H.W., 1999. SCC and the new era for precast concrete industry. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Billberg P., 1999. Fine mortar rheology in mix design of SCC. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Billberg P., Petersson O., Österberg T., 1999. Full scale casting of bridges with self-compacting concrete. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Botte J., Burdin J., Zermatten M., 1999. SCC tunnel applications: Cleuson Dixence project and Loetschberg basis tunnel, Switzerland. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Bui V.K., Montgomery D., 1999. Drying shrinkage of self-compacting concrete containing milled limestone. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Chikamatsu R., Shinkai C., Kushigemachi H., 1999. Application of low shrinkage type self-compacting concrete to an advanced large water purification plant. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Czołgosz R., Świerczyński W., 2000. Domieszki nowej generacji dla prefabrykacji betonowej. Sympozjum Naukowo-Techniczne „Beton i prefabrykacja”, Jadwisin, kwiecień.
- Czołgosz R., Grabarczyk P., 2001. Beton w prefabrykacji – od domieszek tradycyjnych do betonów samozagęszczalnych. Przegląd Budowlany 11, 34–36.
- Daszkiewicz M., 2002. Beton samozagęszczalny na budowie City Forum II w Gdańsku. Polski Cement 2.
- Emborg M., 1999. Rheology tests for self-compacting concrete – how useful are they for the design of concrete mix for full scale production. Proc. Symposium on Self-Compacting Concrete Stockholm, September 13–14.
- Emborg M., Hedin C., 1999. Production of self-compacting concrete for civil engineering – case studies. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Faleńska M., Gajger W., 2002. Beton samozagęszczalny (SCC) na budowie. Polski Cement, lipiec-wrzesień, 40–41.
- Fang W., Jianxing C., Changhui Y., 1999. Studies on self-compacting high performance concrete with high volume mineral additives. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., 2002. Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji. Wydawnictwo Górażdże Cement, Opole.

- Gram H.E., Piiparinen P., 1999. Properties of SCC especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance. Proc. RILEM Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Groth P., Nemegeer D., 1999. The use of steel fibres in self-compacting concrete. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Grzeszczyk S., 2002. Beton samozagęszczalny – projektowanie, właściwości, kierunki rozwoju. *Inżynieria i Budownictwo* 9, 465–468.
- Hamada D., Saito T., Yamoto F., Mizumuna T., 2000. Development of New Superplasticizer and Its Application to Self-Compacting Concrete. Proc. of the Sixth CANMET/ACI Int. Conference on Superplasticizer and Other Chemical Admixtures in Concrete. Nice, October.
- Jamróży Z., 2005. Beton i jego technologie. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Kraków.
- Jiangxiong C., Xincheng P., Yubin H., 1999. A study of self-compacting HPC with superfine sand and pozzolanic additives. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Kaszyńska M., 2004. Beton samozagęszczalny – rozwój technologii i wyniki badań. Konferencja „Dni betonu. Tradycja i nowoczesność”. Wisła, 11–13 października.
- Kinoshita T., Nawa T., Yida M., Ichiboji H., 2000. Effect of Chemical Structure on Fluidizing Mechanism of Concrete Superplasticizer Containing Polyethylene Oxide Graft Chains. Proc. of the Sixth CANMET/ACI Int. Conference on Superplasticizer and Other Chemical Admixtures in Concrete. Nice, October.
- Mizobuchi T., Yanai S., Takada K., Sakada N., Nobut Y., 1999. Field applications of self-compacting concrete with advantageous performances. Proc. Symposium on Self-Compacting Concrete Stockholm. September 13–14.
- Nehdi M., Pardhan M., Koshowski S., 2004. Durability of self-consolidating concrete incorporating high-value replacement composite cements. *Cement and Concrete Research* 34, 2103–2112.
- Nishizaki T., Kamada F., Chikamatsu R., Kawashima H., 1999. Application on high-strength compacting concrete to prestressed concrete outer tank for LNG storage. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Noor M.A., Uomoto T., 1999. Three dimensional discrete cement simulation of rheology test of self-compacting concrete. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Okamura H., Ouchi M., 1999. Self compacting concrete development. Present use and future. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Okamura H., Ouchi M., 2003. Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology* 1, April 5–14.
- Persson B., 2003. Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* 33, 373–379.
- Pichler R., 1999. The use of SCC for building the Millennium Tower in Vienna. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Rajski O., Rowińska W., Wysokowski A., 2001. O rozwoju i właściwościach betonu samozagęszczalnego. *Inżynieria i Budownictwo* 4, 218–221.
- Schlumpf J., 2004. Self-compacting concrete structure in Switzerland. *Tunneling and Underground Space Technology* 19, 480.
- Sonobi M., Bartos P.J.M., 1999. Hardened SCC and its bond with reinforcement. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Söderlind L., 1999. Full scale tests for housing. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Stefańczyk B., Rudnicki T., 2002. Nowe tendencje w projektowaniu i ocenie reologicznej samozagęszczalnego betonu cementowego. XLVIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Badań Nauki PZITB, T. 4, Krynica, wrzesień.

- Szwabowski J., Gołaszewski J., 2000. Metodyka badania efektywności działania domieszek uplastyczniających i upłynniających. III Konferencja Naukowo-Techniczna „Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej”. Kraków-Mogilany, czerwiec.
- Szwabowski J., Śliwiński J., 2003. Betony samozagęszczalne. Polski Cement, kwiecień-czerwiec, 42–45.
- Świerczyński W., 2005. Nowoczesne domieszki chemiczne w betonie stosowanym w budownictwie rolniczym. Sympozjum Naukowo-Techniczne „Beton w infrastrukturze wsi i miast”. Poznań, marzec.
- Takada K., Pelova G.J., Walraven J.C., 1999. Influence of microfillers on proportioning of mortar in self-compacting concrete. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Tanaka Y.-O., Matsuo S., Ohta A., Ueda M., 1996. A new admixture for high performance concrete. Proc. Int. Conference on Radical Concrete Technology, Dundee, June 27–28.
- Termkhajornkit P., Nawa T., Nakai M., Saito T., 2005. Effect of fly ash on autogeneous shrinkage. Cement and Concrete Research 35, 473–482.
- Trägårdh J., 1999. Microstructural features and related properties of self-compacting concrete. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Tseng Y.C., Wu W.L., Huang H.L., Wang K.C., Hsu K.C., 2000. New Carboxylic Acid Based Superplasticizer for High Performance Concrete. Proc. of the Sixth CANMET/ACI Int. Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. Nice, October.
- Yahia A., Tanimura M., Shimabukuro A., Shinoyama Y., 1999. Effect of rheological parameters on self-compatibility of concrete containing various mineral admixtures. Proc. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Wombacher F.J., 1999. Shrinkage and shrinkage reduction of self-compacting concrete. Proc. Symposium on Self-Compacting Concrete. Stockholm, September 13–14.
- Zhu W., Gibbs J.C., 2005. Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. Cement and Concrete Research 35, 1457–1462.

EFFECT OF MICROFILLER TYPE ON PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE

Abstract. The paper presents, based on the available literature, characteristics of self-compacting concretes (SCC), including their design, properties, test methods, possibilities of application and prospects of development. Presented investigations deal with the influence of fly ash as a microfiller used separately and with silica fume on some physico-mechanical properties of the concretes. Better properties were observed when fly ash was used in composition with silica fume.

Key words: self-compacting concrete, superplasticiser, fly ash, silica fume

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.11.2005