

Wpływ nanokryształów CSH na wytrzymałość betonów cementowych stosowanych w budownictwie komunikacyjnym

Mgr inż. Piotr Brzozowski, inż. Monika Szcotkowska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

1. Wprowadzenie

We współczesnym świecie beton jest jednym z najczęściej stosowanych materiałów budowlanych. Duże zapotrzebowanie na ten materiał oraz szybki rozwój technologii, który dokonał się w ciągu ostatnich lat sprawia, że stawiane są mu coraz wyższe wymagania dotyczące jakości i trwałości oraz technologii betonowania elementów i konstrukcji. W celu skrócenia procesów budowlanych coraz częściej stosuje się technikę prefabrykacji pozwalającą na złożenie całych konstrukcji z wcześniej wykonanych elementów oraz masową produkcję elementów małogabarytowych. Powszechnie stosowanymi prefabrykatami elementami infrastruktury drogowej są między innymi belki mostowe, elementy przepustów, panele, ekrany akustyczne oraz pale żelbetowe [2].

2. Beton w prefabrykacji

W celu skrócenia procesu produkcyjnego, a co za tym idzie zwiększenia produktywności zakładu istotne jest osiągnięcie wysokich wczesnych wytrzymałości betonu, pozwalających na szybkie rozszalowanie wykonywanych elementów. Najwyższe wymagania zarówno pod względem wytrzymałości, od C40/50 jak i prędkości narastania wytrzymałości stawiane są betonom używanym do produkcji prefabrykowanych belek sprężonych. Aby móc wprowadzić do elementu siłę sprężającą, a następnie zabudować go w konstrukcji wymagane jest osiągnięcie wytrzymałości betonu na poziomie 70–80% jego wytrzymałości 28-dniowej [2, 4].

Skrócenie czasu twardnienia betonu możliwe jest w wyniku [5]:

- zastosowania cementów szybko twardniejących – CEM I klasy 42,5 lub 52,5 o wysokiej wytrzymałości wczesnej;

- stosowania dodatków lub domieszek chemicznych przyspieszających dojrzewanie betonu;
- termicznej obróbki elementów;
- mechanicznego przyspieszenia dojrzewania.

Jeżeli chodzi o obróbkę termiczną, w zakładach prefabrykacji stosowane są obecnie głównie dwie metody [3]: autoklawizacja oraz niskoprężne naparzenie. Obie metody wymagają zazwyczaj specjalnych komór bądź tuneli dostosowanych do linii produkcyjnej zakładu. Konieczne jest także dostarczenie energii potrzebnej do osiągnięcia i utrzymywania zakładanej temperatury obróbki.

Alternatywą do obróbki termicznej jest zastosowanie domieszek przyspieszających dojrzewanie betonu, pozwalających na jej ograniczenie lub nawet całkowite wyeliminowanie. W większości przypadków samo zastosowanie odpowiednio dobranych plastyfikatorów lub superplastyfikatorów, skutkujące zmniejszeniem potrzebnej ilości wody zarobowej, prowadzi do przyspieszenia procesu twardnienia. Wraz z rozwojem technologii betonu opracowano szereg nowoczesnych domieszek chemicznych zwiększających wczesne wytrzymałości betonu np. domieszki na bazie eterów polikarboksylowych oraz zawierające azotan wapnia [3].

Nowe możliwości otwiera także nanotechnologia, czyli kształtowanie struktury stwardniałego betonu na poziomie pojedynczych atomów i cząstek. Do mieszanki betonowej możliwe jest wprowadzenie zarodników, którymi mogą być uwodniony i zmielony cement bądź wapno hydratyzowane [1]. Od niedawna produkowane są także cementy specjalne oraz zawiesiny zawierające sztuczne zarodki kryształów fazy CSH przyspieszające proces hydratacji cementu w jego początkowym okresie [6].

Istotnym zagadnieniem jest także konsystencja oraz urabialność betonów używanych do wytwarzania elementów prefabrykowanych. Ze względu na gęsto roz-

mieszczony zbrojenie pojawiają się problemy z zagęszczeniem mieszanki, dlatego wymagana jest duża jej płynność. Odpowiednie właściwości posiadają betony samozagęszczalne – SCC (Self Compacting Concrete) oraz prawie samozagęszczalne – ASCC (Almost Self Compacting Concrete), które w przeciwieństwie do betonów SCC, do odpowietrzenia i zagęszczenia wymagają wzbudzenia i wibracji tradycyjnymi technikami (wibrator wgłębny, przyczepny czy wibracja całym stołem formierskim). Jednakże czas wibracji jest zdecydowanie krótszy niż w betonach tradycyjnych, często na poziomie 5–7 sekund [7]. Betony te pozwalają na uzyskanie zakładanych parametrów wytrzymałościowych, a także odpowiedniej trwałości i odporności na działanie środowiska.

Przedmiotem badań przedstawionych w artykule było określenie wpływu dodatku domieszki chemicznej zawierającej nanokryształ CSH na kształtowanie się wczesnych wytrzymałości betonów na ściskanie i rozciąganie oraz ich rozwój w czasie. Określono również wpływ domieszki na wartości gęstości i nasiąkliwości badanych betonów, a także na wielkości modułów sprężystości.

3. Program i zakres badań

W celu określenia wpływu domieszki chemicznej zawierającej nanokryształ CSH na właściwości reologiczne mieszanki betonowej oraz właściwości stwardniałego betonu przeprowadzono badania porównawcze z użyciem trzech mieszanek, których składy podano w tabeli 1. Symbolem M2 oznaczono mieszankę zawierającą domieszkę przyspieszającą proces hydratacji, natomiast jako M1 oznaczono mieszankę referencyjną, nie zawierającą domieszki. Dodatkowo wykonano badania mieszanki betonowej z 5% zawartością mikrokrzemionki – M3.

Tabela 1. Składy mieszanek betonowych

Składnik [kg/m ³]	Mieszanka		
	M1	M2	M3
CEM I 42,5R	360	360	327
Woda	162	162	162
Piasek 0/2 mm	595	595	595
Żwir 2/16 mm	1264	1264	1264
Superplastyfikator	8,1	8,1	8,1
Nanodomieszka	0	8,2	0
Mikrokrzemionka	0	0	16,35

Do wykonania mieszanek zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5R powszechnie stosowany w przypadku produkcji elementów prefabrykowanych. Zastosowano kruszywo naturalne o uziarnieniu do 16 mm. We wszystkich mieszanekach zachowano stałą wartość wskaźnika w/s=0,45. Założono docelową klasę wytrzymałości betonu C40/50 oraz nasiąkliwość wagową po

niżej 5%. Zastosowano superplastyfikator na bazie sulfonianów naftalenowych w ilości 2% masy cementu. W mieszance M2 jako domieszkę przyspieszającą proces hydratacji cementu zastosowano nanodomieszkę będącą zawiesiną zawierającą zarodniki krystalizacji – fazę CSH w postaci nanocząsteczek. Dozowano ją w ilości 2% masy cementu. Zhydratyzowane krzemiany wapnia, nazywane w skrócie CSH, mają budowę bezpostaciową. Jest to żel, zbudowany z silnie przyciągających się nanocząstek, którego zadaniem jest wypełnienie wszystkich miejsc między ziarnami cementu. Jest on najważniejszym składnikiem końcowego produktu, czyli kamienia cementowego i w silny sposób decyduje o właściwościach zaczynu i dojrzałego betonu. W normalnym przypadku powstawanie fazy CSH zachodzi w pobliżu ziaren cementu lub na ich powierzchni tworząc warstwę, która spowalnia późniejsze przemieszczanie się reagentów i produktów reakcji, przez co cały proces hydratacji jest utrudniony i zachodzi w znacznie dłuższym czasie. Wprowadzenie do zaczynu betonowego domieszki zawierającej nanokryształ powoduje, że wytwarzanie się żelu CSH następuje w pewnej odległości od powierzchni ziaren cementu. Dzięki temu w mniejszych ilościach wydziela się wodorotlenek wapnia, a co za tym idzie dalsza hydratacja nie jest utrudniona i może przebiegać w komfortowych warunkach. Powoduje to powstawanie zwiększonych ilości żelu CSH, który znacząco wpływa na wytrzymałości betonu.

Badania mieszanek obejmowały określenie konsystencji metodą rozptywu stożka, zgodnie z PN-EN 12350-8, bez zagęszczania mieszanki, tak jak ma to miejsce w przypadku betonów SCC. Badania wytrzymałościowe oraz oznaczenie innych cech fizycznych badanych betonów wykonano na próbkach sześciennych o boku 150 mm. Program badań obejmował:

- rozwój wytrzymałości na ściskanie po: 4, 6, 8, 10, 12 i 24 godzinach oraz 3, 7 i 28 dniach dojrzewania;
- rozwój wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu po: 6, 8, 10, 12 i 24 godzinach oraz 3, 7 i 28 dniach dojrzewania;
- gęstość w stanie suchym po 28 dniach dojrzewania;
- nasiąkliwość wagowa po 28 dniach dojrzewania.

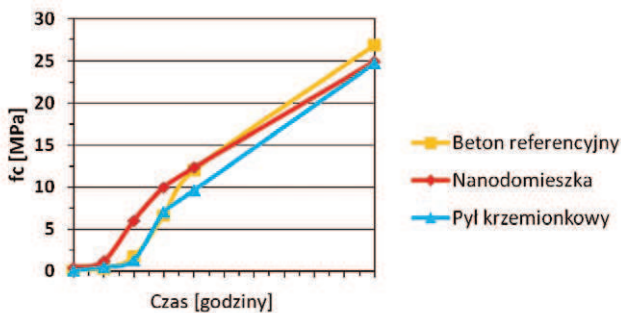
Dodatkowo wykonano próbki walcowe o średnicy 150 mm i wysokości 300 mm w celu oznaczenia 28-dniowego modułu sprężystości betonu. Próbki sześciennie formowano w dwóch warstwach, zagęszczając każdą z nich na stole wibracyjnym przez czas 2 s. Zagęszczanie przez tak krótki czas pozwoliło na odpowietrzenie się mieszanek oraz nie spowodowało segregacji ich składników. Po zaformowaniu, próbki przechowywane były w komorze, w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 95%. Rozformowywanie następowało tuż przed badaniem odpowiednio po 4, 6, 8, 10, 12 i 24 godzinach. Pozostałe próbki rozformowano po 24 godzinach i przechowywano do czasu badania w komorze w stałych warunkach.

4. Wyniki badań i ich analiza

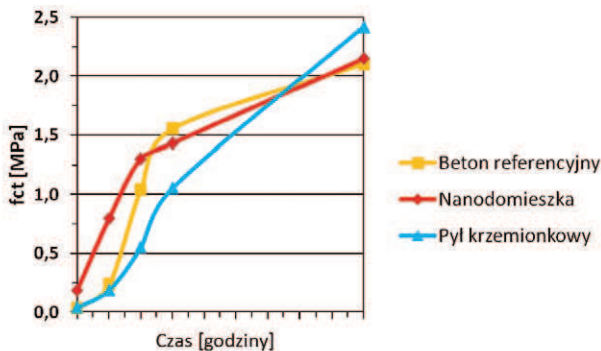
Wyniki badań konsystencji mieszanek przedstawiono w tabeli 2. Wszystkie mieszanki można zakwalifikować jako prawie samozagęszczalne – ASCC. Zaobserwowano wyraźny spadek konsystencji w przypadku mieszanki z dodatkiem nanodomieszki. W przypadku dodania mikrokrzemionki spadek konsystencji w stosunku do mieszanki referencyjnej był nieznaczny.

Tabela 2. Właściwości reologiczne mieszanek betonowych

Mieszanka	M1	M2	M3
Średnica rozplywu [cm]	51	36	50
Opad stożka [cm]	26	21	25



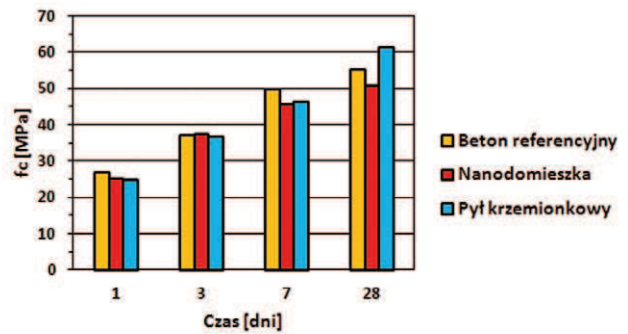
Rys. 1. Rozwój wytrzymałości na ściskanie we wczesnym okresie dojrzewania



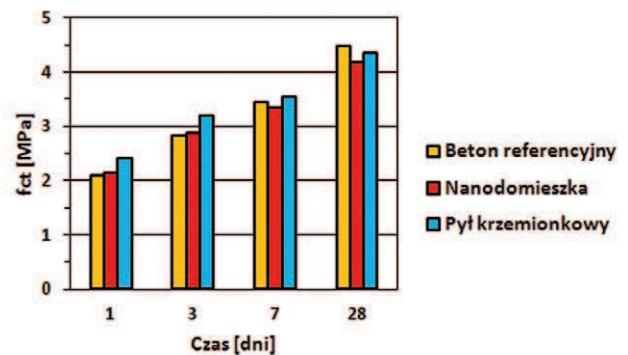
Rys. 2. Rozwój wytrzymałości na rozciąganie we wczesnym okresie dojrzewania

Analizując rozwój wytrzymałości na ściskanie (rys. 1) oraz rozciąganie przy rozłupywaniu (rys. 2) we wczesnym okresie dojrzewania betonów stwierdzono wyraźny wzrost obu wytrzymałości w przypadku dodania do betonu nanodomieszki. Różnice w wytrzymałościach zanikają po około 12 godzinach kiedy wartości dla betonu referencyjnego oraz z domieszką są do siebie zbliżone. W przypadku betonu z mikrokrzemionką w ciągu pierwszego dnia dojrzewania zaobserwowano najniższe wartości wytrzymałości zarówno na ściskanie jak i rozciąganie. Wyjątkiem była tu 24-godzinna wytrzymałość na rozciąganie, która była najwyższa spośród wszystkich trzech betonów.

W późniejszym etapie dojrzewania, po 3, 7 i 28 dniach od zaformowania, nie stwierdzono pozytywnego wpły-

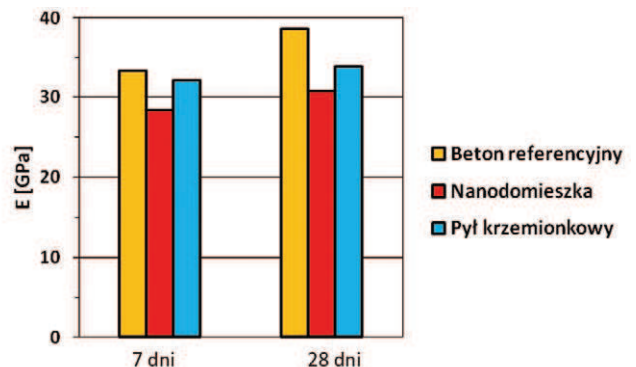


Rys. 3. Wytrzymałości na ściskanie w późniejszym okresie dojrzewania

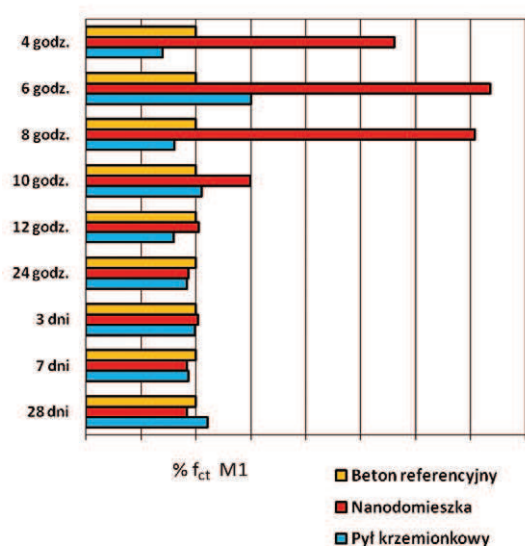


Rys. 4. Wytrzymałości na rozciąganie w późniejszym okresie dojrzewania

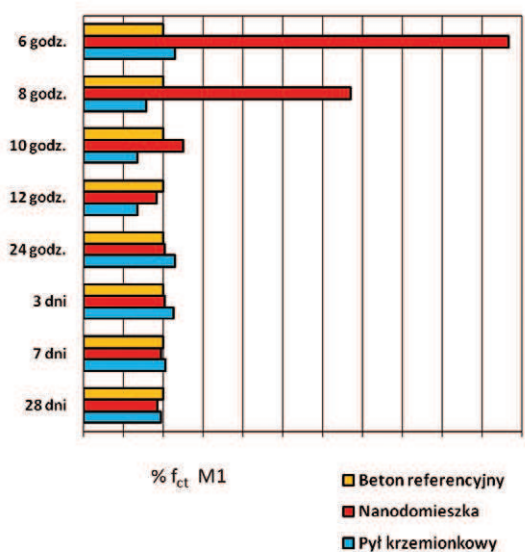
wu nanodomieszki na wytrzymałości badanych betonów (rys. 3 i 4). Dla zawierającego ją betonu uzyskano najniższe wartości, zarówno jeżeli chodzi o ściskanie jak i rozciąganie. Uzyskane wyniki pozwoliły na przypisanie go do klasy C35/45 co oznacza niespełnienie pierwotnych założeń uzyskania klasy wytrzymałości C40/50, którą uzyskano dla betonu referencyjnego. Najwyższe wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania uzyskano dla betonu z dodatkiem mikrokrzemionki, co pozwoliło zaklasyfikować go do klasy C45/55, wyższej niż pierwotnie zakładana.



Rys. 5. Moduły sprężystości betonów po 7 i 28 dniach dojrzewania



Rys. 6. Procentowy udział wytrzymałości na ściskanie betonów M2 oraz M3 w porównaniu do betonu referencyjnego M1



Rys. 7. Procentowy udział wytrzymałości na rozciąganie betonów M2 oraz M3 w porównaniu do betonu referencyjnego M1

Również w przypadku oznaczenia modułu sprężystości betonu po 7 i 28 dniach najniższe wartości uzyskano dla betonu z dodatkiem nanocząstek (rys. 5). Także dodanie do mieszanki mikrokrzemionki wpłynęło negatywnie na sprężystość betonu.

Dla wszystkich trzech badanych betonów udało się spełnić założenie dotyczące ich maksymalnej nasiąkliwości, uzyskane wartości nie przekroczyły 5%. Zaobserwowano wzrost nasiąkliwości w przypadku dodania do betonu mikrodmieszki oraz jej zmniejszenie dla betonu z mikrokrzemionką. Odnotowano również

różnicę w gęstości pomiędzy betonami M1 i M3, dla których kształtowała się ona na poziomie 2350 kg/m³, a betonem z nanodmieszka – M2 dla którego osiągnęła wartość około 2300 kg/m³, pomimo tego, że do sporządzenia tej mieszanki użyto największej ilości materiału (tab. 1).

5. Podsumowanie

Wszystkie wykonane mieszanki charakteryzowały się konsystencją pozwalającą na zaklasyfikowanie ich jako betony prawie samozagęszczalne – ASCC, oraz mogły być ułożone z ograniczonym do minimum procesem zagęszczania.

Zastosowanie nanotechnologii w produkcji betonu w zakładach prefabrykacji może stanowić alternatywę dla typowych domieszek przyspieszających twardnienie betonu lub obróbki cieplnej elementów prefabrykowanych. Zaobserwowano pozytywny wpływ domieszki zawierającej nanocząsteczki fazy CSH na wczesne wytrzymałości betonu, zarówno na ściskanie jak i rozciąganie. Wpływ ten najwyraźniej widać w pierwszych 10 godzinach dojrzewania betonu (rys. 6 i 7). W późniejszym okresie nastąpił jednak spadek wytrzymałości oraz modułu sprężystości w stosunku do betonu referencyjnego, przez co nie udało się uzyskać betonu o zakładanej klasie wytrzymałości. Zwiększeniu uległa także nasiąkliwość betonu, jednak w tym przypadku nie przekroczono wartości dopuszczalnej. Analizując właściwości reologiczne zaobserwowano wyraźny spadek konsystencji mieszanki M2 w porównaniu do dwóch pozostałych, co należy mieć na uwadze przy projektowaniu składu mieszanki.

Dodatek mikrokrzemionki spowodował nieznaczne zmniejszenie tempa narastania wytrzymałości, pozwolił jednak na osiągnięcie wyższych wytrzymałości po 28 dniach dojrzewania oraz spowodował obniżenie nasiąkliwości betonu. Nie zauważono także znacznego spadku konsystencji w porównaniu z mieszanką referencyjną.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Botryk M., Lelusz M., Technologia konstrukcji prefabrykowanych, Politechnika Białostocka, Białystok 2004
- [2] Chęcińska K., Prefabrykaty żelbetowe w budownictwie drogowo-mostowym 2010–2012 – przykłady i zastosowanie, Dni Betonu 2012, Wisła 8–10.10.2012, s. 695–704
- [3] Golda A., Kaszuba S., Wpływ zabiegów technologicznych na tempo narastania wytrzymałości na ściskanie betonu, Reologia w technologii betonu, Gliwice 2008, s. 25–32
- [4] Kloś M., Pauch C., Stosowanie betonu samozagęszczalnego w produkcji elementów prefabrykowanych, Reologia w technologii betonu, Gliwice 2005, s. 113–120
- [5] Paprocki A., Szewczyk S., Prefabrykacja budowlana cz. I, WSiP, Warszawa 1976
- [6] Pużak T., Skalec H., Grzesiak K., Nanotechnologia w prefabrykacji betonowej, Reologia w technologii betonu, Gliwice 2010, s. 45–56
- [7] Świerczyński W., Produkcja prefabrykatów betonowych w technologii ASCC i SCC, Reologia w technologii betonu, Gliwice 2002, s. 31–42