

Ekonomiczne aspekty stosowania betonów SCC

Dr hab. inż. Jacek Gołaszewski, mgr inż. Dawid Stolarczyk, Politechnika Śląska, Gliwice

1. Wprowadzenie

Artykuł przedstawia analizę ekonomiczną wykonania konstrukcji ścian przy zastosowaniu betonu zwykłego i samozagęszczalnego tych samych klas. Do analizy wybrano beton B45 (C35/45) oraz B45 (C35/45) SCC. Wybrany przykład obrazuje na ile samozagęszczalność podwyższa cenę betonu, a na ile obniża nakłady z tytułu zagęszczania.

1. Beton zwykły a samozagęszczalny

Betonem zwykłym według PN-EN 206-1 określa się beton o gęstości w stanie suchym większej niż 2000 kg/m^3 , ale nieprzekraczającej 2600 kg/m^3 . W świetle szerszej definicji pojęcia betonu, betonem można nazywać każdy materiał, co najmniej dwuskładnikowy, w którym jeden ze składników występuje w postaci ziarnistej, a drugi pełni rolę spoiwa łączącego wspomniane ziarna w jedną całość [1].

Przez wiele dziesięcioleci, od betonu jako materiału konstrukcyjnego żądano głównie jednej cechy, mianowicie odpowiedniej wytrzymałości na ściskanie, co jest też najważniejszym aspektem przy projektowaniu składu zwykłego betonu cementowego.

Betonem samozagęszczalnym natomiast może być każdy beton zwykły, którego mieszanka będzie spełniać następujące właściwości dotyczące:

- wysokiej płynności zapewniającej łatwe, szybkie i szczelne wypełnienie formy (deskowania), bez

względu na ilość i układ zbrojenia oraz wydalenie – na zasadzie wyporu hydrostatycznego – niepożądanych pęcherzyków powietrza, w krótkim czasie po ułożeniu mieszanki;

- zdolności do penetracji przez zbrojenie, czyli łatwości przepływu mieszanki pomiędzy prętami zbrojenia, bez utraty jednorodności zróżnicowania koncentracji dużych ziaren kruszywa po obu stronach warstwy prętów zbrojeniowych na kierunku przepływu mieszanki [2].

Typowym przykładem korzyści płynących z zastosowania betonu samozagęszczalnego jest budowa dwóch olbrzymich bloków kotwiących dla najdłuższego na świecie mostu wiszącego Akashi – Kaikyo w Japonii, otwartego dla ruchu w 1998 roku. Każdy z bloków wymagał ułożenia około 290 tys. m^3 betonu. Opracowano specjalny system układania mieszanki betonowej, wykorzystujący w pełni właściwości betonu SCC. System umożliwił układanie betonu przy wysokości spadania ponad 3 m, bez niebezpieczeństwa segregacji składników i bez konieczności zagęszczania. Zastosowanie betonu samozagęszczalnego pozwoliło na skrócenie czasu budowy bloków kotwiących o 20%, tj. z 2,5 do 2 lat [3].

Jest tym samym oczywiste, że podstawowa różnica pomiędzy betonem zwykłym a SCC to różnica w specyfikacji, gdzie w przypadku pierwszym podstawową sprawą jest wytrzymałość na ściskanie, a dopiero później właściwości mieszanki. Natomiast w betonach samozagęszczalnych głównie

nacisk kładzie się na właściwości świeżej mieszanki betonowej a następnie na wytrzymałość betonu.

W ciągu ostatnich lat rozwój nowej generacji domieszek upłynniających wykazujących tzw. efekt steryczny (długie łańcuchy polimerów uniemożliwiają zbliżenie się do siebie ziaren cementu), pozwolił na obniżenie kosztów mieszanki samozagęszczalnej tak, że jest ona niewiele droższa od mieszanki konwencjonalnej, a w specyficznych przypadkach cena wytworzenia może być nawet niższa.

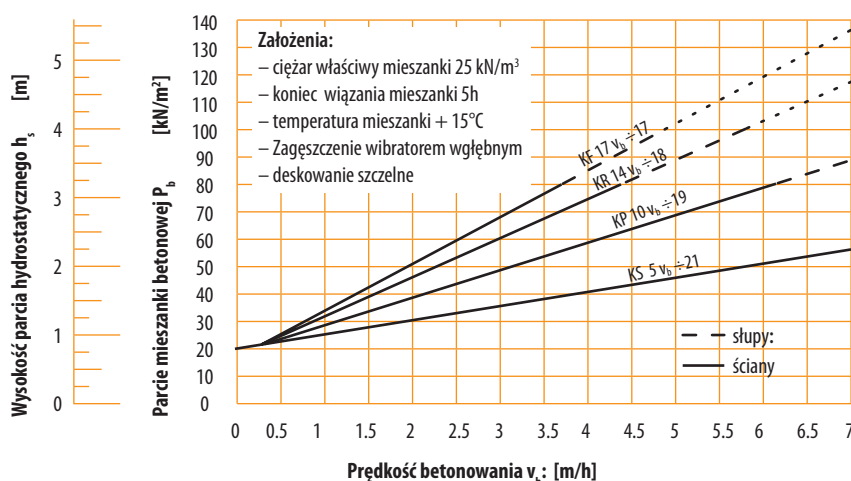
2. Analiza porównawcza nakładów wykonania

Od wejścia Polski do Unii Europejskiej w kraju obserwujemy duży wzrost gospodarczy. Dzieje się tak z powodu otrzymania unijnych funduszy strukturalnych i pomocowych związanych z dotacjami na przemysł, infrastrukturę drogową, dopłaty dla rolników i inne. Szybki wzrost gospodarczy generują również banki udzielając kredytów mieszkaniowych znacznej liczbie obywateli. To w wielkiej mierze za ich sprawą sporo osób zaciąga kredyt w instytucjach bankowych na zakup nieruchomości. Według wyliczeń rządowych, w Polsce brakuje 3 milionów mieszkań, co powoduje ogromny popyt, a zarazem podaż na tego rodzaju inwestycje. Niemniej jednak wraz z wejściem Polski do Unii Europejskiej i otwarciem rynków pracy, wzrosła też liczba osób emigrujących za lepszą sytuacją finansową do krajów sąsiednich. Powoduje to ogromne

zapotrzebowanie na wykwalifikowanych fachowców branży budowlanej, a co za tym idzie obserwowany jest duży wzrost płac pracowników. Mając na uwadze powyższe informacje, warto zastanowić się czy nie lepiej kosztem zwiększenia ceny betonu, obniżyć nakłady z tytułu robocizny, a przede wszystkim czasu, jaki jest potrzebny na ułożenie i odpowiednie zagęszczenie mieszanki betonowej [4].

Przystępując do analizy, już na początku musimy się liczyć z pewnymi ograniczeniami stawianymi przez beton samozagęszczalny mianowicie odpowiednim deskowaniem, które powinno być zarówno wyjątkowo wytrzymałe, jak i szczelne. Jest to spowodowane dużym ciśnieniem hydrostatycznym wywieranym na ścianki deskowania takiej mieszanki spowodowane dużą płynnością, które jest zdecydowanie większe w porównaniu z mieszanką betonu zwykłego. Wysokie ciśnienie musi być uwzględnione i przewidziane zarówno w projekcie, jak i dokumentacji uwzględniającej aktualną temperaturę, partię mieszanki i tempo układania. Można również monitorować aktualne ciśnienie podczas układania mieszanki betonowej za pomocą specjalnej aparatury pomiarowej. Proces ten jest szczególnie ważny przy betonowaniu wysokich ścian czy słupów. Nadzór mierzony za pomocą aparatury sprawdza odskok i deformacje na klamrach oraz zaciskach deskowania i kiedy występują oznaki wysokiego ciśnienia hydrostatycznego, konieczna jest przerwa w układaniu mieszanki [5].

Dlatego też bardzo ważnym elementem jest prawidłowe określenie parcia mieszanki betonowej w zależności od prędkości betonowania i od klasy konsystencji mieszanki betonowej, które można określić z wykresu na rysunku 1. Ustalono z wykresu parcie mieszanki betonowej obowiązujące dla głębokości zanurzenia wibratora h_r nieprzekraczającej wysokości parcia hydrostatycznego h_s [6]. Przy



Rys. 1. Wykres parcia bocznej mieszanki betonowej wg DIN 18218

umyślnym zwiększaniu głębokości zanurzenia h_r powyżej h_s i zachowaniu pozostałych założeń wykresu, do ustalenia parcia mieszanki betonowej należy przyjąć wzór:

$$p_b = 25 \cdot h_r$$

2.1. Analiza porównawcza nakładów wykonania betonu

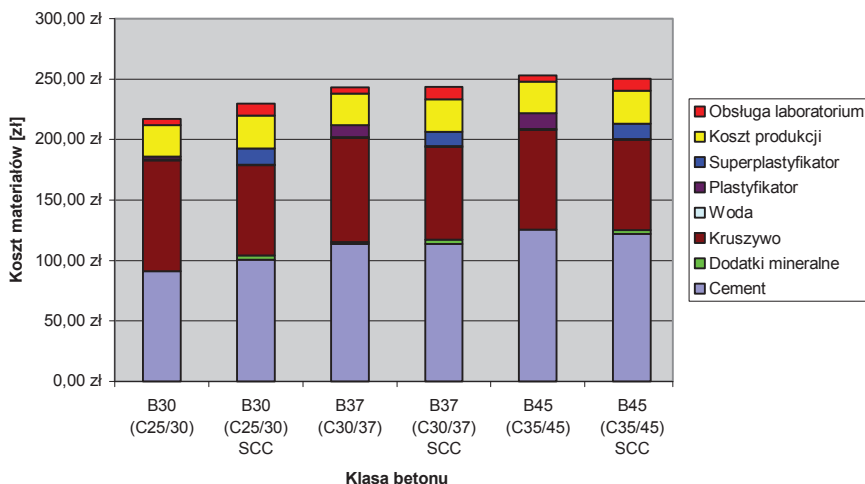
Podstawowymi składnikami betonu zwykłego jak i samozagęszczalnego są cement, kruszywo, woda oraz ewentualne domieszki poprawiające pewne właściwości. W betonach SCC stosuje się także wypełniacz mineralny oraz – w przypadku fibrobetonów – dodatkowym składnikiem jest zbrojenie rozproszone. Różnica w składzie pomiędzy betonem zwykłym a samozagęszczalnym to przede wszystkim zwiększona zawartość frakcji pylastych $<0,125$ mm, gdzie w betonach zwykłych jest to ilość rzędu 300–370 kg/m^3 natomiast w mieszankach SCC 500–600 kg/m^3 niemniej jednak wielkość ta jest różnie podawana przez różne kraje. Według wytycznych niemieckich udział frakcji $<0,125$ mm powinien wynosić 550–650 kg/m^3 , zaś według wytycznych skandynawskich jedynie 330–400 kg/m^3 , przy stosunkowo niskim punkcie piaskowym 35–40% i zawartości frakcji 8/16, w stosie okruszowym,

nawet powyżej 40% [7]. W przypadku mieszanek zwykłych, mikrowypełniacz jest jedynie dodatkiem do cementu i nie stanowi o jej specyficznych właściwościach, natomiast jest istotnym składnikiem mieszanek SCC, gdyż pozwala na uzyskanie następujących właściwości:

- zwiększenie objętości zaczynu i nadanie wymaganej płynności mieszance betonowej,
- stabilizacji mieszanki dzięki zatrzymaniu wody zarobowej w objętości mieszanki,
- zwiększenie parametrów stwardniałego betonu (w przypadku do datków aktywnych).

Spośród najczęściej stosowanych dodatków można wymienić te, które nie posiadają właściwości wiążących (mączka dolomitowa lub wapienna) oraz dodatki aktywne (popiół lotny, mielony żużel wielkopieczowy, pył krzemionkowy). Stosowanie mikrokrzemionki jest uzasadnione w przypadkach, kiedy chcemy uzyskać wyższe klasy betonu lub wysokowartościowy beton SCC (SBWW).

Z analizy danych zawartych w tabeli 1 dotyczących kosztów otrzymania mieszanki betonu zwykłego i samozagęszczalnego wynika, że największa różnica w cenie m^3 występuje przy najniższej klasie z prezentowanych mieszanek.



Rys. 2. Wpływ kosztu materiałów na koszt mieszanki betonowej betonu zwykłego i SCC

Wraz ze wzrostem klasy betonu maleje skok cenowy, gdzie zarówno dla mieszanki betonowej B37 (C30/37) SCC oraz B45 (C35/45) SCC koszt produkcji jest niższy niż w przypadku mieszanki zwykłej. Natomiast przy klasie B45 (C40/45) SCC koszt 1 m³ jest niższy niż dla mieszanki tradycyjnej. Fakt ten wynika z opracowania odpowiedniej receptury począwszy od redukcji ilości cementu na rzecz tańszego materiału, jakim jest popiół lotny oraz zastosowanie odpowiednich domieszek chemicznych w postaci plastyfikatorów oraz superplastyfikatorów, które różnie będą kształtować cenę wyjściową 1 m³ betonu.

Warto również zwrócić uwagę na to, iż zarówno koszt produkcji, jak i obsługa laboratoryjna przedstawiona na rysunku 2 jest wyższa w przypadku betonu SCC, co wraz ze wzrostem ilości zamawianego betonu będzie generować dodatkowe koszty. Niemniej jednak, to głównie cena deskowania znacząco wpłynie na efekt końcowy.

2.2. Analiza porównawcza nakładów wykonania ściany żelbetonowej grubości 21 cm w deskowaniu prostym o wysokości 4 m

Przykładem wybranym do analizy jest ściana żelbetonowa grubości 21 cm w deskowaniu prostym o wysokości 4 m przy zastosowaniu betonu zwykłego oraz SCC tych

samych klas. Nakłady dla danego elementu obejmują zarówno prace montażowe związane z ustawieniem deskowania, jak również wykonanie procesu betonowania, co nie było objęte w pracy [8]. Należy jednak podkreślić, że w przypadku betonu samozagęszczalnego, będzie występować znacznie większe ciśnienie hydrostatyczne wywierane na ścianki deskowania, co wiąże się ze zwiększonymi nakładami z tytułu zarówno samego deskowania, jak i odpowiedniego przygotowania formy.

Analizując powyższe dane można zauważyć, że zarówno eliminacja procesu zagęszczania, jak i niższa cena betonu samozagęszczalnego nie powodują, że zmniejsza się całkowity koszt konstrukcji. Jest to spowodowane koniecznością zastosowania droższego deskowania. Ogólnie stosowane w budownictwie formy ścienne projektowane są na parcie boczne mieszanki betonowej wynoszące od 40 do 80 kN/m², co wynika z powszechnie stosowanej technologii betonowania za pomocą pojemników bądź też pompy do betonu. Jest to również dostosowane do tempa betonowania tego rodzaju ścian (1–4 m/h) oraz dopuszczalnego dla danego deskowania parcia mieszanki betonowej oraz jej klasy konsystencji.

Przy betonach samozagęszczalnych parcie boczne mieszanki może

osiągać wartość ponad 150 kN/m², co tym samym wiąże się ze zwiększonymi nakładami na deskowanie. Dla prezentowanego przykładu nakład ten jest ponad dwukrotnie wyższy.

Warto również podkreślić fakt, iż w przypadku stosowania betonu SCC zwiększa się nakład robocizny (około 5%) z tytułu odpowiedniego przygotowania deskowania poprzez ustawienie dodatkowych podpór, zacisków oraz uszczelnienie styków i otworów, przez które może wyciekać mieszanka betonowa. Zwiększone nakłady robocizny z tytułu przygotowania formy generują dodatkowe koszty związane z materiałami uszczelniającymi (około 1%), które mogą występować w postaci specjalnych taśm PCV, silikonów, korków na otwory po śrubach bądź innych materiałów uszczelniających, które uniemożliwią swobodne wyciekanie mieszanki betonowej przez wszelkiego rodzaju otwory i styki. Jest tym samym oczywiste, że wszelkiego rodzaju zabiegi związane z odpowiednim przygotowaniem formy, jak i konieczności zastosowania dodatkowych materiałów uszczelniających powoduje, iż redukcja robocizny z tytułu eliminacji procesu zagęszczania zostanie zniwelowana przez wspomniane procesy, co obrazuje rysunek 3.

Niemniej jednak, wibrowanie mieszanki betonowej w zbrojonej ścianie grubości 21 cm i wysokości 4 m może być czynnością bardzo czasochłonną, z uwagi zarówno na występujące zbrojenie, jak i na konieczność zagęszczania warstwami, szczególnie w dolnych partiach, kiedy długość wałka giętkiego wraz z buławą wibratora ma długość 4 m. Natomiast w przypadku betonów SCC, proces betonowania odbywa się w sposób ciągły, ponieważ beton ten zagęszcza się pod wpływem własnego ciężaru tak że, nie ponosimy już z tego tytułu żadnych kosztów oszczędzając przy tym czas. Należy również dodać, że zabudowanie 9 m³ (jednego betonowozu) mieszanką

Tabela 1. Zestawienie kosztów 1 m³ betonu zwykłego i samozagęszczalnego

Materiały	Koszt jedn.	J.m.	Cena 1 m ³ betonu zwykłego i SCC													
			B30 (C25/30)		B30 (C25/30) SCC		B37 (C30/37)		B37 (C30/37) SCC		B45 (C35/45)		B45 (C35/45) SCC			
			ilość	koszt	ilość	koszt	ilość	koszt	ilość	koszt	ilość	koszt	ilość	koszt		
Cement CEM I 42,5 R	330,00	zł/t	-	-	-	-	0,345	113,85	-	-	0,345	113,85	0,380	125,40	0,370	122,10
Cement CEM II/B-S 32,5 R	280,00	zł/t	0,325	91,00	0,360	100,80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Popiół lotny	27,00	zł/t	-	-	0,130	3,51	0,055	1,49	0,120	3,24	-	-	-	-	0,110	2,97
Kruszywo – Piasek 0-2 mm	29,00	zł/t	0,630	18,27	0,704	20,42	0,688	19,95	0,717	20,79	0,659	19,11	0,659	19,11	0,677	19,63
Kruszywo – Żwir 2-8 mm	57,00	zł/t	-	-	0,433	24,68	-	-	0,464	26,45	0,485	27,65	0,485	27,65	0,448	25,54
Kruszywo – Żwir 2-16 mm	60,00	zł/t	1,226	73,56	-	-	1,102	66,12	-	-	-	-	-	-	-	-
Kruszywo – Żwir 8-16 mm	54,00	zł/t	-	-	0,541	29,21	-	-	0,549	29,65	0,665	35,91	0,665	35,91	0,548	29,59
Woda	4,13	zł/m ³	0,167	0,69	0,160	0,66	0,158	0,65	0,151	0,62	0,163	0,67	0,163	0,67	0,166	0,69
Plastyfikator 1	1,35	zł/kg	0,55%	2,41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Plastyfikator 2	3,00	zł/kg	-	-	-	-	0,95%	9,83	-	-	-	1,15%	13,11	-	-	-
Superplastyfikator	3,40	zł/kg	-	-	1,10%	13,46	-	-	1,0%	11,73	-	-	-	1,0%	12,58	-
Suma materiałów	-	-	-	185,93	-	192,75	-	211,89	-	206,33	-	221,85	-	221,85	-	213,10
Koszty produkcji	-	zł	-	26,10	-	27,10	-	26,10	-	27,10	-	26,10	-	26,10	-	27,10
Obsługa laboratorium	10	zł/m ³	-	5,00	-	10,00	-	5,00	-	10,00	-	5,00	-	5,00	-	10,00
Koszty ogółem	-	zł/m ³	-	217,03	-	229,85	-	242,99	-	243,43	-	252,95	-	252,95	-	250,20
Zysk	-	%	-	10%	-	10%	-	10%	-	10%	-	10%	-	10%	-	10%
Kalkulowana cena	-	zł/m ³	-	238,74	-	252,83	-	267,29	-	267,77	-	278,24	-	278,24	-	275,22
Cena po zaokrągleniu	-	zł/m ³	-	239,00	-	253,00	-	268,00	-	269,00	-	279,00	-	279,00	-	276,00