

**Betony samozagęszczalne, określane w literaturze angielskiej mianem self compacting concrete – SCC, są obecnie jedną z najbardziej rozwijających się dziedzin technologii betonu. Często nazywa się je betonami nowej generacji. Wielu użytkowników materiałów budowlanych zadaje sobie zapewne pytanie, czy w technologii betonu, która od ponad stu lat wykorzystuje cement portlandzki, w której podstawowymi czynnościami jest mieszanie cementu z wodą i kruszywem, można w ogóle mówić o materiałach i technologiach zaawansowanych we współczesnym znaczeniu tego słowa. Odpowiedź na to pytanie brzmi – TAK.**

Charakterystyczną cechą betonów samozagęszczalnych jest wyeliminowanie procesów zagęszczania w trakcie układania mieszanki betonowej. Betony i zaprawy samozagęszczalne są mieszankami o bardzo dużym upłynnieniu i wysokiej urabialności, a więc o bardzo niewielkim tarcu wewnętrznym. Pozwala to na dokładne wypełnienie formy lub deskowania, niezależnie od tego jak wysoki jest współczynnik zbrojenia elementu. Mieszanka betonowa zagęszcza się i odpowietrza pod wpływem własnego ciężaru, bez konieczności stosowania dodatkowego zagęszczania mechanicznego. Pierwsze badania dotyczące SCC przeprowadzone zostały w Japonii już na początku lat 80. Rezultaty tych badań oraz pierwsze próby zastosowań praktycznych były na tyle obiecujące, że spowodowały zainteresowanie komercyjną tą technologią i wzmogły intensyfikację prac badawczych. Badania skupiły się nad poprawą właściwości mieszanki betonowej. Badano głównie funkcje techniczne (np. rozptył stożka), a nie fizyczne (np. lepkość mieszanki betonowej). Stąd też mechanizm samozagęszczania mieszanek betonowych jest stosunkowo słabo poznany i nie do końca zdefiniowany. Za twórcę koncepcji betonów samozagęszczalnych uważany jest H. Okamura, a rok 1988 przyjmuje się za pierwszą w pełni udaną próbę zastosowania SCC w budownictwie. Głównym czynnikiem napędzającym rozwój technologii betonów samozagęszczalnych

# SCC – beton samozagęszczalny

były udogodnienia, które niosła ze sobą nowa technologia:

- zwiększenie szybkości wykonywania konstrukcji
- możliwość obniżenia kosztów budowy (zmniejszenie ilości wykwalifikowanych robotników wykonujących betonowanie – koszty siły roboczej na budowie według niektórych źródeł wynoszą około 50% całych kosztów budowy)
- poprawę trwałości konstrukcji wynikającą z relatywnie niskiego w/c
- brak konieczności zagęszczania betonu nawet w miejscach o bardzo gęstym zbrojeniu
- redukcję defektów powstających w trakcie zagęszczania, np. segregacji
- łatwość wykonania konstrukcji o bardzo skomplikowanych kształtach (stosowanie form i deskowań, których tradycyjne zagęszczanie jest bardzo skomplikowane)
- bardzo wysoką jakość wykonania (brak raków, mniejszą ilość koniecznych szwów roboczych, gładkie powierzchnie, dużą jednorodność)
- obniżenie poziomu hałasu w trakcie układania betonu (ekologia)
- znakomite wypełnienie kawern i ubytków w starym betonie, przy bardzo dobrej przyczepności do starego betonu
- możliwość uzyskania betonu o bardzo dobrych właściwościach technicznych (wysokiej wytrzymałości wczesnej i końcowej, szczelnej strukturze)
- podwyższenie bezpieczeństwa na terenie budowy podczas wykonywania prac budowlanych.

## Technologia betonu samozagęszczalnego

Samopoziomująca i samozagęszczająca się mieszanka betonowa jest bardzo płynna, układa się i zagęszcza pod wpływem własnej masy. Jej podstawowymi cechami są duża płynność, odporność na segregację oraz zdolność przenikania między gęstym zbrojeniem. Ciekłość i odporność na segregację zależą od składników mieszanki i ich wzajemnych proporcji. Chodzi o wykonanie zawiesiny dostatecznie płynnej i lepkiej, aby uniknąć osiadania dużych ziaren kruszywa. Możliwie dużą płynność można zapewnić poprzez wysokie w/c lub/ oraz dodatek superplastyfikatora. Kiedy jednak zwiększymy w/c, żeby poprawić urabialność mieszanki, to jednocześnie doprowadzamy do zmniejszenia jej lepkości i możemy spowodować

segregację. Nadmiar superplastyfikatora również pociąga za sobą możliwość segregacji składników mieszanki betonowej. Można ją ograniczyć przez stosowanie środków zwiększających lepkość mieszanki i/lub dużej ilości drobnych frakcji pylistych. Jednak zwiększona odporność na segregację powoduje straty w ciekłości. Tak więc dobieranie składu mieszanki betonowej jest optymalizowaniem ciekłości i odporności na segregację. Optymalna kombinacja w/c oraz superplastyfikatora dla osiągnięcia betonu samozagęszczalnego zależy także od zawartości stałych składników (cement, kruszywo) zawartych w betonie, ponieważ ziarna cementu i kruszywa tworzą przestrzenną strukturę wpływającą na lepkość mieszanki betonowej. Blokowanie się mieszanki, np. między prętami gęstego zbrojenia, jest proporcjonalne do ilości kontaktów między ziarnami kruszywa grubego. Jeżeli limit zawartości kruszywa grubego zostanie przekroczony, blokowanie następuje pomimo wystarczającej lepkości i płynności mieszanki. Wielkością limitującą zawartość frakcji powyżej 2 mm jest 50% objętości kruszywa. Jeżeli natomiast grube kruszywo zawiera się w odpowiednich proporcjach, to kontakt na styku ziaren piasku decyduje o spadku plastyczności mieszanki, również przez zmniejszenie lepkości. Limit zawartości piasku w mieszance wynosi około 40% objętości zaprawy. W oparciu o przeprowadzone doświadczenia powstało szereg wytycznych dla określenia zawartości składników mieszanki betonowej SCC:

- objętość grubego kruszywa – około 50% objętości całego kruszywa
- objętość piasku – około 40% objętości zaprawy
- stosunek objętościowy piasek/żwir – około  $0,9 \div 1,0$  w zależności od zawartości cementu
- stosunek objętościowy dodatek mineralny/cement –  $0,6 \div 1,0$
- stosunek objętościowy woda/części pylaste poniżej  $0,125 \text{ mm} - 0,9 \div 1,1$
- ilość wprowadzonego superplastyfikatora oraz wartość docelowa w/c w zależności od potrzeby zapewnienia samozagęszczalności.

## Materiały do produkcji SCC

W skład betonu samozagęszczalnego wchodzi wszystkie podstawowe surowce, które stanowią również skład betonów zwykłych, a więc: cement, woda,

kruszywo, domieszki chemiczne oraz dodatki mineralne. Na podstawie danych literaturowych, jak również doświadczeń własnych autora, przedstawiono poniżej cechy i wytyczne, jakie powinny być spełnione przy doborze składników do produkcji SCC.

Kruszywo do SCC powinno spełniać takie same warunki jak kruszywo do betonów zwykłych, z jednym ograniczeniem, aby  $d_{max} < 20$  mm. Należy zwrócić uwagę na fakt, że w przypadku SCC dobór maksymalnego wymiaru ziarna kruszywa jest również uzależniony od zabudowywanego elementu, podobnie jak ma to miejsce w betonach konwencjonalnych. Wykonanie mieszanki SCC w sposób zadowalający spełniającej wymagania stawiane tym betonom na kruszywie do 20 mm, przy bardzo gęstym zbrojeniu, mimo wszystko może powodować klinowanie się kruszywa grubego. Dlatego maksymalny wymiar ziarna kruszywa grubego musi być w każdym przypadku uzależniony od szerokości elementu, który będzie zabudowywany oraz gęstości zbrojenia.

Rodzaj zastosowanego cementu w mieszance SCC zależy od takich czynników, jak przeznaczenie betonu, rodzaj betonowanego elementu, wymagany przyrost wytrzymałości wczesnych, czas, w którym mieszanka musi być dobrze urabialna oraz ilość wprowadzonego dodatku mineralnego.

Mieszanki SCC wykonane w oparciu o cement portlandzki CEM I mogą mieć wszechstronne zastosowanie, zarówno w produkcji betonu towarowego, jak i w prefabrykacji. Cechą charakterystyczną SCC wykonanych na cementach portlandzkich CEM I jest dosyć szybki spadek urabialności w czasie. Jest on tym większy, im większa jest zawartość  $C_3A$  w cemencie. Wynika to z bardzo małego stosunku  $w/c$  (niska zawartość wody) w betonach samozagęszczalnych, a co za tym idzie ograniczonej ilości jonów siarczanowych pochodzących od gipsu, które razem z cząsteczkami superplastyfikatora są odpowiedzialne za deflokulację ziaren cementu. Ograniczona ilość jonów siarczanowych w roztworze powoduje również zmniejszenie ilości powstającego ettringitu na korzyść uwodnionych glinianów wapniowych, które powodują gwałtowne sztywnienie mieszanki. Z tego powodu betony samozagęszczalne z cementem portlandzkim CEM I nadają się głównie do ułożenia w formie lub deskowaniu tuż po wymieszaniu (np. w zakładach prefabrykacji). Aby zwiększyć czas dobrej urabialności mieszanki SCC w przypadku wykonania jej na cemencie portlandzkim CEM I można zastąpić część cementu

dodatkiem mineralnym, takim jak popiół lotny, mączka wapienna, zmielony granulowany żużel wielkopiecowy. Ilość wprowadzonego dodatku może wynosić nawet do 50% spoiwa w zależności od żądanych wytrzymałości wczesnych. Wprowadzoną ilość dodatku należy zweryfikować w trakcie prób laboratoryjnych.

Cementy portlandzkie z grup CEM II i CEM III, zawierające dodatki mineralne, doskonale nadają się do produkcji betonu towarowego, ze względu na zachowanie długiego czasu płynności mieszanki. Dzieje się tak na skutek „rozrzedzenia” faz glinianowych wprowadzonym do cementu dodatkiem mineralnym. Należy jednak pamiętać, że cementy takie charakteryzują się również wolniejszą dynamiką narastania wytrzymałości, co nie zawsze jest wskazane na budowie ze względu na pożądaną szybką rotację szalunków.

Ze względu na bardzo niski stosunek wodno-cementowy betonów samozagęszczalnych, a tym samym uzyskiwanie przez te materiały bardzo wysokich wytrzymałości 28-dniowych nie ma konieczności stosowania cementów wyższej klasy niż 32,5. Cementy klas 42,5 oraz 52,5 można stosować w przypadkach zastosowania do betonów dużych ilości dodatków mineralnych. Zastosowanie cementów wyższych klas spowoduje szybszy przyrost wytrzymałości wczesnych.

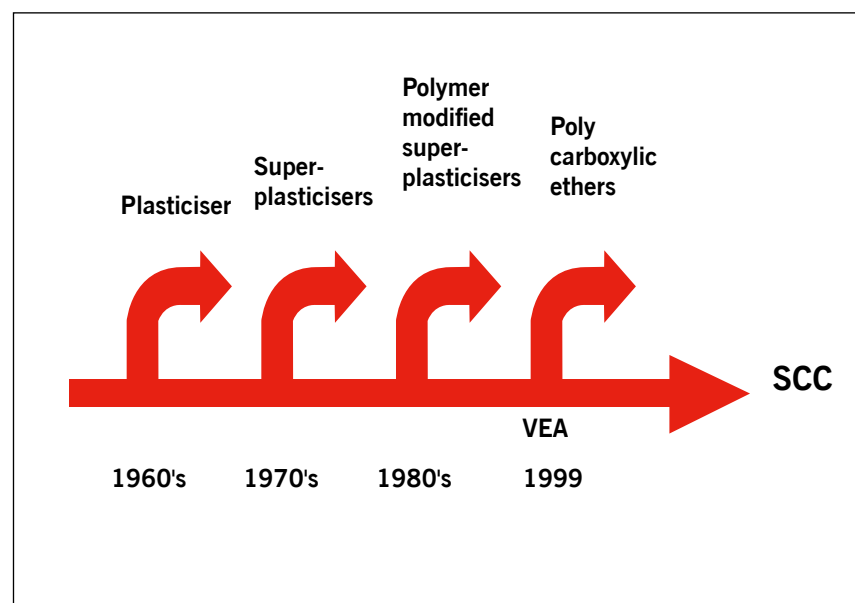
Dodatki mineralne stosowane w technologii SCC spełniają przede wszystkim rolę lepkociotwórczą i doszczelniającą. Beton samozagęszczalny ma dużo wyższy punkt piaskowy niż betony zwykłe i z tego względu konieczne jest dodatkowe uszczelnienie zaprawy.

W betonie samozagęszczalnym według różnych źródeł, powinno znajdować się 400÷600 kg części pylastych w 1 m<sup>3</sup> betonu. Do części pylastych należy zaliczyć obok cementu również ewentualne dodatki mineralne oraz drobne frakcje ziarnowe do 0,125 mm pochodzące z kruszywa, szczególnie z piasku. Zastąpienie pewnej części cementu dodatkiem mineralnym np. w postaci popiołu lotnego prowadzi, obok znacznego zredukowania kosztów wsadu materiałowego, do następujących pozytywnych zmian w betonie:

- poprawa urabialności mieszanki betonowej – szczególnie z „szorstkimi” piaskami
- zmniejszenie możliwości wystąpienia segregacji mieszanki
- poprawa szczelności struktury betonu
- zwiększenie odporności betonu na korozję
- modelowanie estetycznego wyglądu konstrukcji betonowych (popiół – kolor ciemnoszary, mączka wapienna, żużel – kolor jasnoszary).

Do betonu samozagęszczalnego mogą być stosowane wszystkie dostępne na rynku i spełniające obowiązujące normy dodatki mineralne (popiół lotny, zmielony granulowany żużel wielkopiecowy, mączka wapienna, mikrokrzemionka, zmielony piasek).

Z przeglądu danych literaturowych wynika, że wprowadzenie dodatków mineralnych do betonu wpływa znacząco na podwyższenie właściwości płynięcia SCC, a w szczególności na utrzymanie ich w czasie. Następuje przy tym zmniejszenie szybkości wzrostu wytrzymałości wczesnych. Końcowe wytrzymałości mogą być natomiast wyższe niż dla betonu wykonanego z cementu, bez dodatków.



Domieszki chemiczne



Rozptyw stożka Abramsa

Jest to zależne od rodzaju dodatku oraz jego ilości.

Wymagana wysoka płynność betonów samozagęszczalnych oraz duża lepkość mieszanki (niskie w/c, dużo frakcji pylistych) powoduje, że konieczne jest zastosowanie superplastyfikatora. Zastosowanie superplastyfikatorów tradycyjnych, których bazę stanowią żywice melaminowe lub naftalenowe jest niewystarczające. Działanie tych upłynniaczy nie jest na tyle efektywne, aby zapewnić żądaną urabialność oraz stabilizację efektu upłynnienia mieszanki betonowej SCC. Technologia betonu samozagęszczalnego mogła rozwinąć się dopiero po wprowadzeniu domieszek nowej generacji (polikarboksylianów i eterów polikarboksylowych). Duża efektywność upłynnienia masy betonowej przez te domieszki związana jest z tym, że obok tradycyjnego oddziaływania elektrostatycznego na cząstki cementu zjonizowanych grup  $SO_3^-$ , mamy jeszcze do czynienia z tak zwanym efektem sterycznym długich łańcuchów polimerowych tworzących barierę fizyczną uniemożliwiającą aglomerację ziaren cementu. Rozwój domieszek chemicznych na tle technologii SCC pokazuje rysunek.

Superplastyfikatory nowej generacji mają jeszcze jedną przewagę nad superplastyfikatorami tradycyjnymi. Charakteryzują się one mniejszą zależnością upłynnienia i jego zmian w czasie od zawartości  $C_3A$  w cemencie. Jest to bardzo duża zaleta w przypadku betonów towarowych. Chodzi tu również o uniknięcie konieczności redozowania superplastyfikatora na budowie, gdyż właściwości SCC są bardzo „podatne” na przedozowanie superplastyfikatora.

Uruchomienie produkcji superciężkich, samopoziomujących (SLC) i samozagęszczających się (SCC) mieszanek betonowych nabrało tempa po opracowaniu nowego typu domieszek – NAVEA (non-adsorbent viscosity enhancing admixtures), zwiększających lepkość i odpowiednio kohezję mieszanek. Wprowadzenie takiej domieszki do mieszanki betonowej zwiększa lepkość plastyczną i współczynnik lepkości niezależnie od szybkości ścinania, w/c i ilości dodanego superplastyfikatora. Pozwala to na

łatwe kontrolowanie lepkości, która liniowo zwiększa się ze wzrostem ilości domieszki.

### Metody badania cech świeżej mieszanki SCC

Jest sprawą oczywistą, że do najważniejszych właściwości betonów samozagęszczalnych należą właściwości świeżej mieszanki, które świadczą o jej samozagęszczalności. W przypadku betonów tradycyjnych cechą świadczącą o stopniu płynności mieszanki betonowej jest konsystencja. Pomiar konsystencji betonów samozagęszczalnych daje tylko fragmentaryczną informację na ten temat. W związku z powyższym powstało kilka metod alternatywnych oceny cech świeżej mieszanki SCC, które w mniejszym bądź większym stopniu mają na celu określenie niemierzalnego parametru betonu, jakim jest jego urabialność oraz samozagęszczalność.

Najtańszą i często stosowaną metodą pozwalającą na sprawdzenie, czy zaprojektowana mieszanka spełnia kryteria dla betonów samozagęszczalnych jest rozptyw przy pomocy stożka Abramsa. W związku ze specyfiką betonów samozagęszczalnych do pomiaru wprowadzone zostały pewne zmiany. Stolik do rozptywu powinien mieć większe wymiary, ze względu na to, że SCC może wypłynąć poza stolik (zalecana sztywna płyta o wymiarach minimum 80 x 80 cm). Mieszanka SCC powinna być wlewana do stożka bez zagęszczania ubijakiem. Kryteria, które powinien spełniać beton samozagęszczalny badany metodą rozptywu stożka Abramsa są następujące:

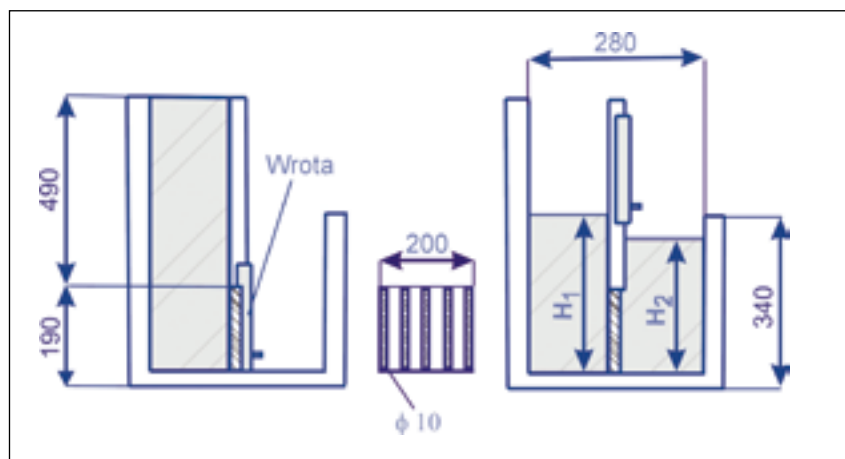
- średnica rozptywu (tzw. rozptyw swobodny) 64 ÷ 74 cm
- dynamika rozptywu: beton powinien osiągnąć średnicę rozptywu 50 cm w czasie od 2 do 6 sekund od momentu uniesienia stożka ( $T_{50}$ )
- krawędź „placka” powinna być jednorodna i zaokrąglona

- nie powinny wystąpić objawy „bleedingu” i segregacji
- pojawienie się uchodzących z betonu pęcherzyków powietrza świadczy o zdolności mieszanki do zagęszczania pod własnym ciężarem
- często podaje się też czas  $T_{stop}$ , czyli czas do zakończenia płynięcia (max 1 minuta).

Rozptyw stożka jest skorelowany z granicą płynięcia Bingham'a  $\tau_0$ , a osiągnięcie rozptywu 50 cm pozwala na oszacowanie lepkości mieszanki. Metoda ta jest mało dokładna, ale jej zaletą jest łatwość przeprowadzenia i dostępność. Niektóre firmy produkujące domieszki chemiczne zalecają badanie konsystencji mieszanki metodą rozptywu przy pomocy odwróconego stożka Abramsa. Ma to na celu łatwiejsze napełnianie stożka, (gdy nie posiadamy lejka) oraz brak konieczności jego przytrzymywania w trakcie napełniania. Jest to modyfikacja nie wpływająca na ostateczny wynik pomiaru.

Bardziej precyzyjną metodą pomiaru właściwości świeżych betonów SCC jest pomiar metodą skrzynki L-Box lub U-Box. Przy pomocy tych prób można szacować takie parametry SCC jak: ruchliwość, szybkość płynięcia, zdolność do przechodzenia przez zbrojenie i blokowanie mieszanki. Skrzynka L-Box jest tzw. typem europejskim natomiast U-Box pochodzi z Japonii. Spotkać można także badanie przy pomocy lejka V-funnel oraz metode J-Ring lub Kajima Test. Szczegółowy opis tych metod można znaleźć w literaturze przedmiotu. Istotnym faktem jest jednak to, że istnieje stosunkowo dobra korelacja pomiędzy kryteriami podawanymi we wszystkich omówionych metodach.

mgr inż. Rafał Gajewski



U-Box