

ie g o l o n o c h n o c h t e c h n o l o g i e Betony samozagęszczalne

Wprowadzenie

Jesteśmy obecnie świadkami zachodzącej, bardzo istotnej, a w perspektywie najprawdopodobniej rewolucyjnej, zmiany w budownictwie betonowym, spowodowanej wprowadzeniem technologii betonu samozagęszczalnego. Możliwości, jakie ta technologia stwarza i wynikające z nich korzyści w pełni uzasadniają to stwierdzenie. Dzięki specyficznym właściwościom mieszanki możliwe jest nie tylko wyeliminowanie jej mechanicznego zagęszczania w procesie formowania elementu lub konstrukcji betonowej. Łatwiejsze i szybsze staje się wypełnianie deskowania mieszanką bez konieczności układania warstwami, możliwe staje się lepsze wykończenie powierzchni betonu, szybszy zaś postęp betonowania, zmniejszają się nakłady robocizny, eliminuje się szkodliwy wpływ wibracji na robotników i deskowanie (formy), zmniejsza się poziom hałasu. Możliwe staje się także betonowanie cieńszych przekrojów lub trudno dostępnych fragmentów konstrukcji. Co jednak wydaje się generalnie najbardziej istotne, to fakt, iż wprowadzenie betonu samozagęszczalnego redukuje wpływ operacji prowadzonych na budowie na jakość betonu tylko do jego pielęgnacji. W rezultacie, o jakości betonu w konstrukcji rozstrzygać będzie w głównej mierze jakość dostarczanego na budowę betonu towarowego, co niewątpliwie powinno wpłynąć na znaczną poprawę jakości budownictwa betonowego. Aby to jednak osiągnąć, konieczne jest rozpowszechnienie i opanowanie technologii betonu samozagęszczalnego przez producentów betonu towarowego. Technologia ta stwarza także doskonałe możliwości w prefabrykacji betonu. Oprócz wymienionych wyżej efektów umożliwia ona obniżenie kosztów produkcji elementów i utrzymania linii produkcyjnych poprzez zmniejszenie energochłonności produkcji i nakładów robocizny oraz wyeliminowania hałasu generowanego przez stanowiska zagęszczania wibracyjnego. Liczne już zastosowania betonu samozagęszczalnego wydają się w pełni potwierdzać te efekty.

Istota betonów samozagęszczalnych

Nazwa beton samozagęszczalny (ang. self compacting concrete, fr. béton autoplaçant, niem. Selbstverdichtender Beton) w sposób skrótowy określa betony cementowe o specyficznych właściwościach mieszanki, zapewniających szczelne wypełnienie formy (deskowania) pod własnym ciężarem, nawet w obecności gęstego zbrojenia, bez potrzeby jakichkolwiek oddziaływań zewnętrznych (np. wibrowanie), z równoczesnym zachowaniem jednorodności. Określenie to zawiera w sobie

trzy podstawowe wymagania dotyczące urabialności mieszanki betonu samozagęszczalnego, tj. wysoką płynność, zdolność do przepływu w przestrzeniach między prętami zbrojenia, brak segregacji składników. Wysoka płynność, oprócz zapewnienia rozplywu mieszanki w promieniu około 10 m, umożliwia także usunięcie z mieszanki pęcherzyków powietrza schwytanym przypadkowo podczas mieszania. W swojej istocie, wymagania te dotyczą właściwości reologicznych mieszanki betonowej. Z powyższej charakterystyki betonu samozagęszczalnego wynika, że może nim być dowolny beton (np. zwykły, wysokowartościowy, fibrobeton), jeśli tylko jego mieszanka posiada wyżej opisane właściwości.

Specyfika mieszanki betonowej oraz jej składu

Jest rzeczą oczywistą, że w celu uzyskania mieszanki betonowej posiadającej opisane wyżej właściwości niezbędny jest odpowiedni dobór jej jakościowego i ilościowego składu. W dotychczasowym podejściu do projektowania betonu, jego skład jest podporządkowany przede wszystkim uzyskaniu odpowiednich właściwości materiału w stanie stwardniałym. Konsystencja mieszanki oraz jej urabialność w danych warunkach układania są w tym przypadku cechami nie mniej ważnymi, lecz w pewnej mierze drugorzędnymi. Na przykład, przy wymaganej wysokiej wytrzymałości na ścislenie tradycyjna mieszanka betonowa posiadać musiała odpowiednio gęstą konsystencję, do której należało dobrać odpowiednio efektywną metodę zagęszczania. W przypadku betonów samozagęszczalnych dominującymi stają się właściwości mieszanki betonowej. Cechy betonu stwardniałego są natomiast, przynajmniej w jakiejś mierze, cechami drugorzędnymi. Należy tu natychmiast wyjaśnić, że z oczywistych względów cechy te nie są „pozostawione samym sobie”. Ich wspomniana drugorzędność może dotyczyć jedynie przypadków, gdy zapewnienie samozagęszczalności mieszanki betonowej powoduje uzyskanie przez beton stwardniały cech na wyższym poziomie niż wymagany.

Skład betonów samozagęszczalnych charakteryzuje się kilkoma specyficznymi cechami, z których wymienić należy:

- zwiększoną zawartość ziaren frakcji pyłowych $< 0,125$ mm, które stanowi spoiwo cementowe uzupełnione dodatkiem mikrowypełniacza mineralnego
- stosowanie efektywnych domieszek upłynniających oraz ewentualnie domieszek zwiększających lepkość zaczynu
- stosowanie wskaźnika wodno-cementowego na poziomie niższym od 0,50
- stosowanie wody zarobowej w ilości nie większej od około $175 \text{ dm}^3/\text{m}^3$.

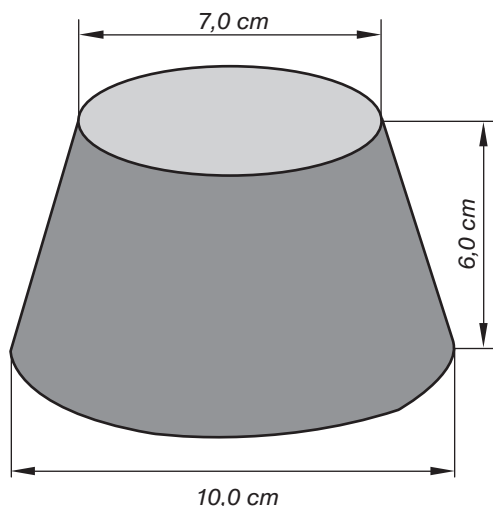
Stosowanie mikrowypełniacza, którym może być jeden z powszechnie stosowanych dodatków mineralnych (popiół lotny, granulowany żużel wielkopiecowy) lub mączka mineralna, powoduje zwiększenie gęstości zaczynu, co zapobiega segregacji ziaren kruszywa. Ponadto, dzięki dużej powierzchni właściwej więzi on wodę zapobiegając jej oddzieleniu podczas zagęszczania się mieszanki.

Ograniczenie wartości w/c oraz całkowitej zawartości wody wynika także ze wspomnianej konieczności zapobiegania oddzieleniu się wody.

Widać więc, że mieszanka samozagęszczalna jest układem znacznie bardziej skomplikowanym niż mieszanka tradycyjna.

Składniki betonu samozagęszczalnego i ich dobór

W skład betonu samozagęszczalnego wchodzi: cement, kruszywo, woda, dodatek mineralny (mikrowypełniacz) oraz domiesz-



Rys. 1. Stożek do pomiaru rozplywu zaczynu i zaprawy

ki chemiczne, takie jak domieszka upłynniająca (SP) i niekiedy, jeśli to jest pożądane lub konieczne – domieszka zwiększająca lepkość zaczynu (VEA) lub/i domieszka napowietrzająca (AEA). W przypadku fibrobetonów dodatkowym składnikiem jest zbrojenie rozproszone w postaci włókien.

Cement

Dotychczas najczęściej stosowanym w betonach samozagęszczalnych rodzajem cementu był cement portlandzki CEM I. Inne rodzaje cementów w zasadzie nie były stosowane, z wyjątkiem Japonii, gdzie przepisy dopuszczają stosowanie cementów CEM II/A-S i CEM II/A-V. Przeprowadzone przez autorów badania wykazują, że do betonów samozagęszczalnych mogą z powodzeniem być stosowane również cementy CEM II/B-V, CEM II/B-S i CEM III/A. Wybór rodzaju cementu zależy od warunków środowiska, na które beton będzie ekspozycyjny oraz warunków atmosferycznych i wymagań technologii robót betonowych. Ilość cementu w betonie wynosi zwykle 350-450 kg/m³. W przypadku stosowania aktywnych dodatków mineralnych do mieszanki (np. granulowany żużel wielkopiecowy lub popiół lotny) ilość cementu może być mniejsza od 350 kg/m³. Klasa stosowanego cementu zależy od wymaganej klasy betonu, aczkolwiek praktycznie trudno jest, ze względu na wymagania dotyczące składu betonu samozagęszczalnego oraz klasy produkowanych cementów, uzyskać beton samozagęszczalny klas niższych od B35.

Kruszywo

Kruszywo stosowane do betonów samozagęszczalnych, podobnie jak do betonów zwykłych, musi spełniać warunek szczelności stosu okruszowego. Maksymalna wielkość ziaren nie powinna być większa niż 1/3 najmniejszego odstępu pomiędzy prętami zbrojenia i zwykle nie większa niż 20 mm. Można stosować zarówno kruszywo łamane, jak i otoczkowe. Pierwsze z nich jest korzystniejsze ze względu na wytrzymałość betonu, zaś drugie – ze względu na płynność mieszanki. Punkt piaskowy powinien być nie mniejszy niż 40%, ale zaleca się by, był on większy niż 50%.

Woda

Z oczywistych względów woda zarobowa musi spełniać te same wymagania, jak dla betonu zwykłego. Określając ilość wody w mieszance należy uwzględnić wilgotność drobnego kruszywa, która powinna być określana z dużą dokładnością.

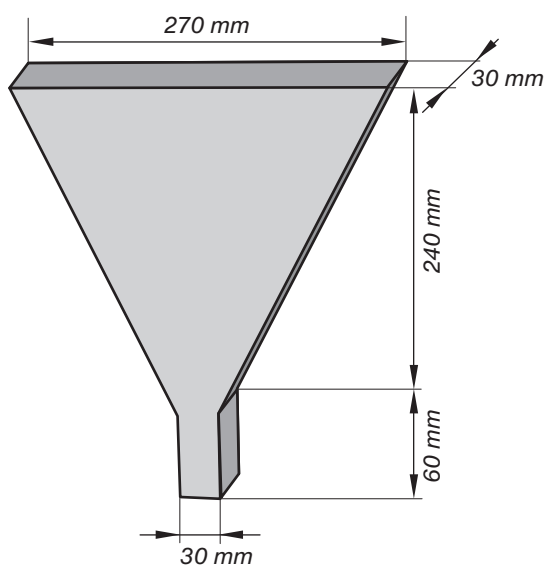
Mikrowypełniacz mineralny

Mikrowypełniacz jest istotnym składnikiem betonu samozagęszczalnego, koniecznym ze względu na uzyskanie wymaganej płynności mieszanki betonowej i jej odporności na segregację. W zasadzie głównie stosuje się dodatki nie posiadające właściwości wiążących, takie jak mączka wapienna lub dolomitowa. W charakterze mikrowypełniacza można także stosować dodatki aktywne, takie jak wspomniany wcześniej popiół lotny, mielony żużel wielkopiecowy lub pył krzemionkowy. Stosowanie ich jest szczególnie uzasadnione w przypadkach, kiedy chcemy uzyskać wyższe klasy betonu lub wysokowartościowy beton samozagęszczalny. Dodawane w znacznej ilości (nawet do 50% masy cementu), bardzo istotnie wpływają na urabialność mie-

szanki i na właściwości stwardniałego betonu. Po pierwsze, są mikrowypełniaczem pyłowym zwiększającym objętość zaczynu bez zwiększania ilości cementu ponad konieczne minimum. Po drugie, uszczelniają strukturę stwardniałego zaczynu, ponieważ ich rozdrobnienie jest co najmniej takie, jak użytego cementu. Po trzecie wreszcie, dzięki dużej powierzchni właściwej posiadają one zdolność wiązania części wody zarobowej, zwiększając w ten sposób lepkość zaczynu, co działa stabilizująco na mieszankę. Dodatki te łącznie z cementem wchodzi w skład zaczynu, w którym frakcji pyłowych drobniejszych niż 80 μm jest zwykle od 500 do 650 kg/m³ betonu. Możliwemu pogorszeniu urabialności, związanemu z obecnością omawianych dodatków, zapobiega stosowanie odpowiedniej dawki i rodzaju superplastyfikatora.

Superplastyfikator

Superplastyfikator jest niezbędnym składnikiem betonów samozagęszczalnych, bowiem przy niskim stosunku wodno-pyłowym (W/P), w którym (P) to łączna zawartość części pylistych w mieszance, czyli suma cementu (C) i mikrowypełniacza (M). W takich warunkach tylko stosowanie superplastyfikatorów pozwala uzyskać wymaganą płynność mieszanki. Ze względu na wysoką efektywność działania, stosowane są głównie superplastyfikatory najnowszej generacji, wytwarzane najczęściej na bazie polikarboksylanów. Bardzo ważny jest dobór superplastyfikatora kompatybilnego z cementem, to jest takiego, który w porównaniu z innymi, zapewnia mieszance z danym cementem wymagane upłynnienie najmniejszą dawką przy najmniejszej utracie płynności w czasie od zmieszania składników betonu do ułożenia mieszanki w deskowaniu. Jak wynika z przeprowadzonych ostatnio badań, ocenę



Rys. 2. Stożek V-funnel do pomiaru czasu wypływu zaprawy

kompatybilności należy przeprowadzać na zaprawach normowych lub mieszankach (wg PN-EN 480-1 i PN-EN 934-2), bowiem badania na zaczynach nie dają miarodajnych informacji. Należy tutaj zwrócić uwagę na jeszcze dwie istotne kwestie. Pierwsza z nich to zależność efektu upłynnienia superplastyfikatorem od temperatury mieszanki. Druga, to zmiany czasów wiązania wywołane obecnością superplastyfikatora. Mogą one być bardzo znaczne i zróżnicowane w zależności od użytego cementu, rodzaju mikrowypełniacza oraz od rodzaju i dawki superplastyfikatora.

Domieszki zwiększające lepkość mieszanki

Są to domieszki stabilizujące mieszankę betonową, czyli zwiększające jej odporność na segregację. Stosowanie takiej domieszki w betonie samozagęszczalnym bywa bardzo pomocne, gdy zaprojektowana mieszanka ma tendencję do segregacji. O ich ewentualnym współdziałaniu z superplastyfikatorem niewiele dotychczas wiadomo. Dlatego zastosowanie takiej domieszki łącznie z superplastyfikatorem, powinno być zweryfikowane doświadczalną weryfikacją uzyskania wymaganych właściwości mieszanki.

Domieszki napowietrzające

Jeśli beton samozagęszczalny ma być dodatkowo napowietrzony (np. ze względu na wymaganą mrozoodporność), dobór dawki domieszki napowietrzającej i superplastyfikatora staje się dość

złożonym zadaniem, ze względu na ich współdziałanie. Musi on być przeprowadzony z uwzględnieniem równoczesnego wpływu obu domieszek na urabialność mieszanki, stopień jej napowietrzenia oraz wytrzymałość betonu stwardniałego. Należy też podkreślić, że zawartość powietrza w mieszance wprowadzanego domieszka napowietrzającą zależy także istotnie od temperatury mieszanki.

Włókna

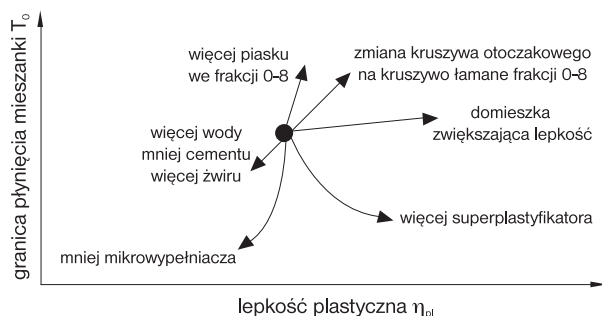
Rodzaj i udział objętościowy włókien w fibrobetonie samozagęszczalnym zależy od wymaganych właściwości betonu stwardniałego. Najczęściej stosowanymi są włókna stalowe i polipropylenowe. Wpływ włókien na właściwości reologiczne mieszanki jest różny i zależy od ich charakterystyki geometrycznej, udziału objętościowego w mieszance i materiału, z którego je wykonano. Ich dodatek z reguły pogarsza właściwości reologiczne mieszanki.

Specyfika i podstawy projektowania składu

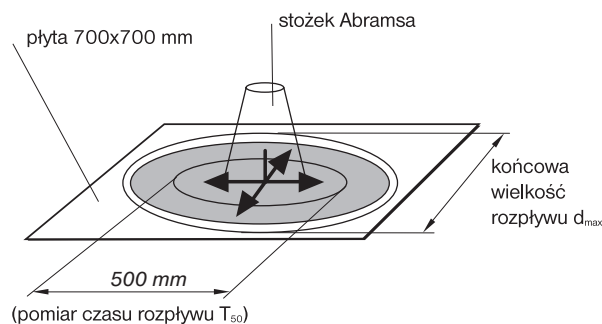
Z punktu widzenia projektowania składu betonu samozagęszczalnego stawiają przed projektantem znacznie większe wymagania i stwarzają znacznie więcej problemów praktycznych niż betony tradycyjne. Wynika to z co najmniej trzech przedstawionych dalej powodów:

- Projektowana samozagęszczalna mieszanka betonowa musi być traktowana jako materiał składający się ze znacznie większej liczby komponentów niż trzy, jak może to mieć miejsce w najprostszym przypadku mieszanki betonu zwykłego. Jak podają źródła literaturowe, w niektórych przypadkach celowe jest traktowanie mieszanki jako materiału składającego się z dziesięciu komponentów: trzech grup frakcji kruszywa, cementu, dodatków mineralnych w postaci pyłu lotnego i mielonego żużla wielkopiecowego, domieszek superplastifikatora, środka napowietrzającego i środka zwiększającego lepkość oraz wody.
- Pod względem właściwości mieszanka samozagęszczalna musi równocześnie spełniać znacznie większą ilość wymagań ustalanych według innych, bardziej ostrych kryteriów niż mieszanka zwykła.
- Na ilościowy i jakościowy efekt końcowy w postaci wynikowych właściwości mieszanki betonowej bardzo istotny wpływ ma nawet niewielka zmienność jakości i ilości któregokolwiek z komponentów. Najwyraźniej jest to widoczne na przykładzie bardzo różnej efektywności domieszek upłynniających w zależności od rodzaju (składu mineralogicznego) i stopnia zmielenia spoiwa cementowego oraz rodzaju stosowanego dodatku mineralnego (mikrowypełniacza).

Poniżej schematycznie przedstawiono, jak różne kierunki modyfikacji składu mieszanki wpływają na jej właściwości reologiczne. Informacja ta jest bardzo przydatna do korygowania składu w przypadku, gdy właściwości mieszanki różnią się od wymaganych.



Zmiany właściwości reologicznych mieszanki w wyniku modyfikacji jej składu; im mniejsza lepkość, tym większa prędkość rozptywu i mniejsza podatność na segregację; im mniejsza granica płynięcia, tym większy rozptyw



Rys. 3. Stożek Abramsa i stolik do pomiaru wielkości i czasu rozptywu mieszanki betonowej

Najczęściej stosowaną metodą projektowania składu betonu samozagęszczalnego jest doświadczalna metoda kolejnych przybliżeń. Znana jest ona w literaturze jako metoda japońska. Należy tu jednak wspomnieć, że metod opracowanych przez autorów japońskich jest co najmniej kilka. Podczas doświadczalnego projektowania składu mieszanki niezbędne są urządzenia pokazane na rys. 1 do 4.

Projektowanie składu się w ogólności z następujących etapów:

- określenie z warunku wytrzymałości wartości wskaźnika w/c w oparciu o znaną rzeczywistą wytrzymałość przyjętego do stosowania cementu, mikrowypełniacza oraz znany rodzaj przyjętego kruszywa
- ustalenie proporcji składników zaczynu (w tym także mikrowypełniacza oraz domieszki upłynniającej), przy których spełnione są wymagania dotyczące rozptywu mierzonego za pomocą stożka (rys. 2), który powinien wynosić od 14 do 25 cm
- ustalenie składu zaprawy (ilości piasku dodanego do zaczynu o wcześniej ustalonym składzie), przy którym jej rozptyw mieści się w granicach od 200 do 300 mm, a czas wypływu ze stożka V-funnel (rys. 3) od 5 do 10 sekund
- ustalenie składu mieszanki betonowej (ilości kruszywa grubego do zaprawy o wcześniej ustalonym składzie), przy którym jej końcowy rozptyw (rys. 4) wynosi od 55 do 74 cm (wg ostatnich zaleceń EFNARC [1] od 65 do 80 cm), czas osiągnięcia rozptywu równego 50 cm maksymalnie 7 s (wg EFNARC [1] 2-5 s), zaś zawartość powietrza po samozagęszczeniu nie przekracza 6% objętości.

Pożądane jest także sprawdzenie poprawności przepływu za pomocą aparatu L-box (rys. 5), który symuluje realne warunki przepływu mieszanki w deskowaniu w obecności prętów zbrojeniowych.

Należy podkreślić, że mieszanki o tak złożonym składzie są z natury bardzo wrażliwe na rodzaj i ilość dozowanej domieszki upłynniającej. Wrażliwość ta, polegająca na istnieniu dla danego jakościowego i ilościowego składu mieszanki tylko jednej, optymalnej zawartości domieszki, stanowi spory problem podczas doświadczalnego projektowania składu betonu. Problem ten sprowadza się do tego, że podanie domieszki w ilości nieco mniejszej niż wspomniane optimum powoduje uzyskanie mieszanki zbyt sztywnej, zaś niewielki jej nadmiar niemal natychmiastową segregacją składników oraz brak zdolności mieszanki do utrzymywania wody. Przy niższych wartościach w/c przedozowanie domieszki powoduje ponadto bardzo wyraźny i dosyć gwałtowny wzrost lepkości. Powoduje to, że zazwyczaj projektant jest zmuszony do przeprowadzenia wielokrotnych prób w ramach każdego z podanych wyżej etapów. Potrzeba taka zachodzi przede wszystkim, gdy po raz pierwszy stosuje on dany zestaw składników.

Kilka praktycznych uwag dotyczących projektowania

Bardzo przydatne podczas ustalania składu są wcześniejsze doświadczenia projektanta dotyczące zachowania się mieszanek samozagęszczalnych wykonanych z podobnego rodzaju ce-

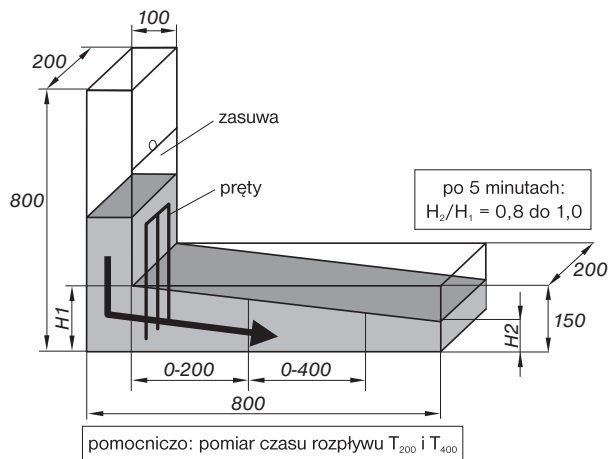
mentu, podobnego dodatku mineralnego oraz przy stosowaniu podobnej domieszki chemicznej. Takie doświadczenie znacznie ułatwia proces projektowania. W niektórych przypadkach można je ograniczyć jedynie do badań właściwości samej mieszanki betonowej o przyjętym orientacyjnie składzie, spełniającym warunek szczelności oraz znane z literatury przedmiotu ogólne wymagania dotyczące wskaźnika w/c, uziarnienia kruszywa, proporcji dodatku mineralnego do cementu oraz zawartości wody. Projektowanie sprowadza się w takim przypadku do ustalenia optymalnej zawartości domieszki superplastyfikatora i dokonania ewentualnych, zazwyczaj drobnych korekt zawartości innych składników.

Jak już wspomniano, w ogólnych zaleceniach dotyczących ilościowego składu mieszanek samozagęszczalnych podaje się zazwyczaj, aby wielkość wskaźnika wodno-cementowego nie przekraczała wartości 0,50. Zalecenie to wynika z dwóch powodów. Pierwszym z nich jest niezbędna dla uzyskania wymaganych właściwości mieszanki betonowej podwyższona zawartość części pylistych <0,125 mm, czyli cementu, stosowanego dodatku mineralnego oraz najdrobniejszych frakcji kruszywa. Podkreślić należy, że dodatek ten posiada zazwyczaj właściwości wiążące, a więc stanowi dodatkową ilość spoiwa i wpływa na uzyskiwany poziom wytrzymałości. Drugim powodem jest zalecane ograniczenie ilości wody w mieszance betonowej do ok. 175 dm³/m³. Górne ograniczenie w/c, wymuszona zawartość cementu (zazwyczaj powyżej 300 kg/m³) oraz jego rzeczywista wytrzymałość, wynosząca dla krajowych cementów klasy 32,5 przeciętnie około 40 do 45 MPa, powodują praktyczną niemożność uzyskania betonu samozagęszczalnego o klasie niższej niż około B35. Jak wskazują własne doświadczenia, w przypadku betonów samozagęszczalnych klasy B20, konieczność zapewnienia odpowiednich cech mieszanki powoduje, iż uzyskany beton stwardniały posiada po 28 dniach dojrzewania o około 60 do 80% wyższą wytrzymałość niż zakładana. Przewyższenie to maleje wraz ze wzrostem zakładanej klasy i zanika przy klasie około B40. Powyższe potwierdza pogląd, iż skład mieszanek SCC, od których w stanie stwardniałym wymagamy wytrzymałości na poziomie niższych i średnich klas (do około B35) jest zdeterminowany przede wszystkim żądanymi właściwościami mieszanki. Wytrzymałość betonu musi być w związku z tym traktowana jako cecha wtórna. W efekcie, w licznych przypadkach betonów samozagęszczalnych należy się spodziewać występowania sporego nadmiaru wytrzymałości rzeczywistej w stosunku do zakładanej. Wyciągnąć stąd można dosyć paradoksalny wniosek, że łatwiejszym zadaniem może się okazać projektowanie składu betonu samozagęszczalnego, który równocześnie ma być betonem wysokowartościowym BWW.

Zastosowania betonów samozagęszczalnych

W ciągu ostatnich kilku lat liczba zastosowań betonu samozagęszczalnego w praktyce inżynierskiej szybko rośnie. Wachlarz tych zastosowań jest bardzo szeroki. Tytułem przykładu wymieńmy skrótowo kilka z nich, głównie w celu wskazania zróżnicowania obiektów i właściwości stosowanego betonu.

- Prefabrykacja skrzyniowych elementów tunelu kolejowego (Szwecja) [2]
Elementy o wymiarach przekroju ścian 6,85 m x 0,55 m i stropu 12,5 m x 0,55 m zostały uformowane z napowietrzonego betonu samozagęszczalnego o zawartości powietrza 7,7%. Właściwości mieszanki mierzono na placu budowy rozplywem stożka, który wynosił średnio 670 mm, zmieniając się w przedziale od 600 do 750 mm.
- Monolityczne płyty nawierzchni parkingu (Szwecja) [3]
Płyty o grubości 15 cm z żebrzem obwodowym i wymiarach rzutu 20 m x 10 m wykonano z samozagęszczalnego fibrobetonu, zbrojonego włóknem stalowym i napowietrzonego średnio w ilości 7%. Rozplyw stożka mieszanki mierzony na placu budowy zawierał się w przedziale od 580 do 720 mm.



Rys. 4. Aparat L-box do kontroli zdolności mieszanki do przepływu w obecności prętów zbrojeniowych

- Sprężony cylindryczny zbiornik na ciekły gaz (Japonia) [4]
Zbiornik średnicy 84,2 m o ścianach grubości 0,8 m i wysokości 38,4 m wykonano z wysokowartościowego betonu samozagęszczalnego o $f_{ck} = 60$ MPa. Całkowita objętość ułożonego betonu wynosiła 12.000 m³. Rozplyw stożka mieszanki mierzony na placu budowy wynosił średnio 650 mm.
- Tunel i szyb hydroelektrowni Cleuson Dixens (Szwajcaria) [5]
Tunel kanału dopływowego wody, o długości 15.850 m i średnicy 5,60 m, wykonano z różnych betonów samozagęszczalnych w łącznej ilości 73.000 m³. Na długości 850 m przestrzeń pomiędzy zewnętrzną powłoką stalową tunelu a skałą (od 40 do 80 mm) wypełniono za pomocą pompy betonem samozagęszczalnym o maksymalnej wielkości ziaren 8 mm i płynności mieszanki 30 s, mierzonej specjalnym stożkiem Marsha. W części tunelu, na długości 2930 m, beton samozagęszczalny zastosowano do wypełnienia pompą pierścieniowej pustki pomiędzy betonowymi tubingami i stalową rurą $\varnothing 4,10$ m wewnętrznej obudowy. W pozostałej części tunelu tenże beton, silnie zbrojony, stanowił zasadniczą obudowę. Mieszanka na kruszywie do 16 mm charakteryzowała się rozplywem stożka ≥ 550 mm. W przypadku szybu doprowadzającego wodę do turbin, o spadku 68% i długości 3920 m, beton samozagęszczalny o rozplywie stożka 580 mm, zastosowano do wypełnienia pierścieniowej przestrzeni (od 5 do 12 cm) pomiędzy skałą i stalowymi tubingami, o średnicy $\varnothing 4,45$ m. Transport mieszanki z położonej w tunelu wytwórni betonu odbywał się grawitacyjnie rynną z PVC o średnicy 300 mm.

prof. Janusz Szwabowski
Politechnika Śląska
prof. Jacek Śliwiński
Politechnika Krakowska

Literatura

- 1 Specification and guidelines for self-compacting concrete, EFNARC, February 2002
- 2 Emborg M., Hedin C.: Production of Self Compacting Concrete for Civil Engineering – Case Studies. Proc. RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, 1999
- 3 Gustafsson J.: Experience from Full Scale Production of Steel Fibre Reinforced Self Compacting Concrete. Proc. RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, 1999
- 4 Nishizaki T., Kamada F., Chikamatsu R., Kawashima H.: Application of High Strength Self Compacting Concrete to Prestressed Concrete Outer Tank for LNG Storage. Proc. RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, 1999
- 5 Botte J., Burdin J., Zermatten M.: SCC Tunnel Applications: Cleuson Dixens Project And Loetschberg Basis Tunnel., Switzerland. Proc. RILEM Symposium on Self Compacting Concrete, Stockholm, 1999