

dr inż. Justyna Sobczak-Piąstka*
prof. dr hab. inż. Adam Podhorecki*

Niektóre aspekty projektowania betonu wysokowytrzymałego o niskim skurczu

Beton wysokowytrzymały (beton wysokowartościowy, BWW) charakteryzuje wytrzymałość na ściskanie powyżej 60 MPa. Produkowany jest z cementu o wysokiej wytrzymałości (klasy 52,5) oraz kruszywa łamanego ze skał o dużej wytrzymałości (np. granit, bazalt, sjenit). BWW umożliwia wykonywanie trwałych elementów o wyjątkowo dużej nośności i stosunkowo niewielkiej masie. Początki stosowania betonu wysokowytrzymałego związane są przede wszystkim z konstrukcjami struno- i kablobetonowymi. Na początku lat 80. ubiegłego wieku pojawiła się nowa generacja betonów wysokowartościowych z dodatkiem pyłów krzemionkowych oraz superplastyfikatorów. Dzięki temu można było uzyskać tworzywa o bardzo dużej wytrzymałości, małej nasiąkliwości i wodoprzepuszczalności oraz dużej mrozoodporności, co w efekcie doprowadziło do znacznie większej trwałości tego materiału. Pojawiły się jednak pewne problemy, gdyż zwiększenie wytrzymałości materiału, jego trwałości i urabialności może pogorszyć inne właściwości mechaniczne i użytkowe, np. zwiększeniem wytrzymałości na ściskanie może łączyć się ze zwiększeniem kruchości materiału i zmniejszeniem krytycznych wartości mechaniki pękania, a lepsza urabialność może wiązać się z pogorszeniem trwałości betonu. Zwiększone zużycie cementu intensyfikuje zwykły skurcz. Problem skurczu poruszany jest w licznych publikacjach [1 ÷ 3]. Nadal jest to jednak problem dość często pomijany przy projektowaniu, np. masywnych elementów w konstrukcjach mostowych i przy zastosowaniu betonów wysokowytrzymałych. Cenne są więc publikacje, które opisują zjawisko skurczu oraz podają, jak projektować i wykonać mieszankę betonu o wysokiej wytrzymałości, aby ograniczyć niepożądane zjawisko skurczu.

Istota projektowania i wykonania BWW

Krajowe doświadczenia i osiągnięcia dotyczące zastosowania betonu o wysokiej wytrzymałości są nadal stosunkowo skromne. Klasyfikacja betonów jest najczęściej oparta na uzyskanej wytrzymałości na ściskanie, choć obecnie coraz częściej odchodzi się od tego typu klasyfikowania, uwzględniając inne cechy betonu (urabialność, szczelność oraz trwałość). Można wtedy powiedzieć, że BWW jest betonem, w którym jedna lub kilka cech charakterystycznych, w porównaniu z betonem zwykłym, uległa udoskonaleniu wskutek odpowiedniego doboru rodzaju oraz proporcji składników, tak aby dostosować wymagane właściwości do potrzeb przemysłowych i warunków eksploatacji konstrukcji.

W porównaniu ze zwykłym, beton wysokowartościowy ma większą wczesną i końcową wytrzymałość na ściskanie oraz

charakteryzuje się niższą ścieralnością (w niektórych wypadkach porównywalną ze ścieralnością granitu). Ta ostatnia cecha zdecydowała o zastosowaniu BWW, m.in. przy naprawie obiektów narażonych na ścieranie erozyjne i mechaniczne. Większa jest również ich szczelność oraz trwałość (odporność na działanie środowiska), dzięki szczelnej i jednorodnej strukturze BWW, bez otwartych porów kapilarnych. Skurcz w BWW jest niemal dwukrotnie mniejszy niż w betonie zwykłym, przy czym zachodzi on znacznie szybciej. W pierwszych 10 dniach osiąga ok. 70% wartości końcowej.

BWW projektuje się analogicznie jak beton zwykły. Podstawowym celem jest osiągnięcie kompozytu o małej porowatości i porach możliwie najmniejszej wielkości oraz dążenie do całkowitego równomiernego przestrzennego rozkładu ziaren kruszywa, dodatków mineralnych, cementu i jego hydratów oraz porów. Aby uzyskać taki kompozyt, należy wykonać beton o minimalnej zawartości wody i doskonale zagęścić mieszankę. Obniżenie w/c (możliwe nawet do 0,20) daje większy wpływ na wzrost wytrzymałości niż osiągnięcie całkowitej hydratacji cementu. Z faktu, że mała ilość wody wraz z niskim w/c są przeciwnie do urabialności, wynika konieczność dodania superplastyfikatorów i wybranie nie tylko chemicznie aktywnych dodatków, ale również uplastyczniających mieszankę, np. pył krzemionkowy, który ma za zadanie równomiernie rozmieścić ziarna cementu w zaczynie otaczającym ziarna kruszywa i wypełniającym jamy w stosie okruszowym. Pył wiąże się z wodotlenkiem wapniowym aż do powstania żelu CSH oraz wypełnia mikropory. Do projektowania BWW stosuje się cementy (400 – 500 kg/m³) portlandzkie marki 45 i wyższe lub z dodatkami pucolanowymi. Mikrokrzemionki dodaje się 10 – 25% w stosunku do ilości cementu. Oprócz urabialności mieszanki, kryterium wykonania BWW jest przyczepność ziarna kruszywa do zaczynu cementowego. Zależy ona od właściwego doboru kruszywa pod względem mineralogicznym, dającym możliwość łączenia chemicznego z zaczynem i właściwości fizycznych, takich jak moduł sprężystości i współczynnik rozszerzalności termicznej.

Zaczyn i kruszywo są materiałami kruchymi. Beton złożony z tych składników wykazuje nieliniową odkształcalność, która wynika ze zjawiska mikrorys. Różnice modułów sprężystości matrycy i kruszywa są przyczyną koncentracji naprężeń w warstwie kontaktowej i powstawania siatki mikrorys już pod niewielkimi obciążeniami, powoduje to odkształcenia quasi-plastyczne. W BWW mniejsza różnica między sztywnością matrycy i kruszywa w porównaniu z betonem zwykłym poprawia jednorodność rozkładu naprężeń, redukuje więc ich koncentrację i w efekcie tworzy się mniej mikrorys.

Wśród kruszyw używanych do betonu wyróżnia się zbite skały węglanowe i bazalty. Przy ich doborze należy dążyć do jak

* Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

największej powierzchni właściwej ziaren. Ich wielkość powinna wynosić maks. 16 mm (zaleca się 12 mm). Piasek do betonu musi być gruby – do 4 mm (powyżej 30% frakcji 2 – 4 mm), płukany i bez pyłu, a więc wykluczone są ziarna poniżej 0,5 mm. Grube kruszywa najlepiej zastąpić piaskiem łamanym. W zależności od wodozjadności i jamistości kruszywa ilość grubego piasku w stosie okruczowym wynosi 20 – 35%. W przypadku zastosowania superplastyfikatorów najwyższej jakości można stosować piasek w ilości 40%. Stosunek wody do cementu powinien wynosić 0,20 – 0,35, przy dążeniu do jego minimalnej wartości z równoczesnym zachowaniem dobrej urabialności mieszanki. Warto podkreślić, że o wodozjadności kruszywa decyduje zadana konsystencja, dlatego ze względu na stosowanie pyłu krzemionkowego zwiększającego kleistość i sztywność mieszanki konieczne jest używanie równocześnie superplastyfikatora wysokiej klasy (5 – 25 dm³/m³) mającego zdolność do jej upłynnienia bez zwiększenia ilości wody. Pod koniec mieszania otrzymuje się konsystencję ciekłą lub półciekłą bez zmiany pierwotnie założonego stosunku wodno-cementowego [4].

Właściwość BWW

Wytrzymałość. Beton wysokowartościowy, w odróżnieniu od zwykłego, wykazuje znacznie szybszy przyrost wytrzymałości w czasie, szczególnie w początkowej fazie. Jego wytrzymałość na rozciąganie wzrasta wraz ze wzrostem wytrzymałości na ściskanie, jednak nie jest on wprost proporcjonalny do wytrzymałości na ściskanie.

Skurcz. Ma on inny przebieg niż w betonie zwykłym. Skurcz hydratacyjny (chemiczny, autogeniczny) jest szybszy i w przypadku ograniczenia możliwości odkształceń może spowodować dodatkowe naprężenia we wczesnym okresie dojrzewania. Skurcz całkowity jest mniejszy, ponieważ skurcz spowodowany wysychaniem jest ograniczony przez mniejszą ilość wody zarobowej i szczelność zaprawy. BWW wykazuje niemal dwukrotnie mniejszy skurcz niż beton zwykły, przy czym zachodzi on znacznie szybciej, osiągając w pierwszych 10 dniach ok. 70% wartości końcowej.

Przyczepność do zbrojenia. Przyczepność BWW do zbrojenia jest co najmniej o 40% większa niż betonu zwykłego, a to pozwala na zredukowanie długości zakotwienia.

Pełzanie. BWW charakteryzuje się większym przyrostem w fazie początkowej, niż to zachodzi w betonie zwykłym, np. po 7 dniach obciążenia pełzanie BWW wynosi ok. 67% rocznego odkształcenia reologicznego, a w betonie zwykłym pełzanie nie przekracza 40%. Sumaryczne pełzanie BWW jest mniejsze niż pełzanie betonu zwykłego.

Trwałość. O trwałości betonu decyduje jego szczelność, brak mikropęknięć i rys. BWW charakteryzuje się dużą szczelnością, jednorodnością struktury, amorfizacją hydratów, małą ilością porów kapilarnych. Dodanie drobnej krzemionki prowadzi do uszczelnienia zaczynu cementowego i w efekcie do zmniejszenia wielkości porów oraz likwidacji sieci połączeń między porami kapilarnymi. Dzięki temu BWW jest zdecydowanie bardziej trwały i odporny na wpływy środowiskowe niż beton zwykły.

Odporność na agresję chemiczną. Odporność na agresję chemiczną BWW jest większa niż betonu zwykłego, przede wszystkim dzięki zastosowaniu pyłu krzemionkowego, który uszczelnia go, a to powoduje zmniejszenie przenikalności chlorków, zwiększa odporność na działanie kwaśnych wód wysokosiarczanych oraz pęcznienie wywołane korozją alkaliczną.

Mrozoodporność. BWW o niskim wskaźniku w/c, ze względu na brak wody zdolnej do zamarzania, jest mrozoodporny. Za destrukcję struktury betonu odpowiada zamarzanie wody w porach kapilarnych. Nie zamarza ona w porach żelowych, zbyt małych, aby mogły w nich powstawać zarodki lodu. Największe znaczenie dla mrozoodporności betonu ma jego mikrostruktura i porowatość. Stosując pyły krzemionkowe do produkcji BWW, można osiągnąć nawet kilkukrotny wzrost odporności betonu na działanie mrozu.

Wodoszczelność. Zastosowanie pyłów krzemionkowych w ilości 10% podwyższa stopień wodoszczelności betonu z W4 do co najmniej W8. Wzrasta on wraz ze stopniem redukcji ilości wody zarobowej (sprzyja temu udział superplastyfikatora).

Korozja zbrojenia. Może się ona rozpocząć, gdy pH betonu spadnie poniżej 9. Rozwój korozji zbrojenia zależy od wilgotności betonu, dostępu tlenu i oporności elektrycznej. Szczelność struktury BWW utrudnia wnikanie CO₂, co istotnie wpływa na, potwierdzony licznymi badaniami, niemal całkowity brak objawów karbonatyzacji w tego typu betonie. Stosowanie pyłów krzemionkowych prowadzi do zmniejszenia pH świeżego betonu z 13 do 11, przez co zbrojenie może być bardziej podatne na korozję, ale jednocześnie zwiększa się oporność elektryczna betonu, a to oznacza mniejszą podatność zbrojenia na korozję.

Ścieralność BWW jest znacznie mniejsza niż betonu zwykłego i dorównuje ścieralności granitu.

Ognioodporność i ogniotrwałość. BWW charakteryzuje się większą utratą wytrzymałości w temp. 100 – 350 °C niż beton zwykły.

Istota i rodzaje skurczu

Skurcz definiuje się jako zmniejszenie objętości betonu wynikające z utraty wody przy wysychaniu. Wyróżniamy skurcz autogeniczny i skurcz spowodowany wysychaniem. Najważniejsze czynniki wpływające na wielkość skurczu betonu to klasa betonu, wilgotność środowiska, rodzaj cementu i kruszywa, rodzaj domieszek i stosunek c/w. Skurcz autogeniczny, zwany też skurczem chemicznym, jest samoczynnym, wewnętrznym, strukturalnym procesem wynikającym z hydratacji cementu, stąd też inna jego nazwa to skurcz hydratacyjny. Skurcz spowodowany wysychaniem, zwany skurczem zewnętrznym, jest procesem fizycznym związanym z odparowaniem wody z betonu. W odróżnieniu od skurczu autogenicznego w dużej części jest procesem odwracalnym, w przypadku dostarczenia wody zewnętrznej do betonu. Ta minimalizacja skurczu jest jednak ograniczona ze względu na ciągły proces hydratacji, co zmniejsza zdolność tworzącej się struktury cementowej do absorpcji wody. Dlatego też istotna jest pielęgnacja wilgotna betonu we wczesnym okresie dojrzewania. Wzrost zawartości cementu, jak to następuje w przypadku BWW, oraz różnego rodzaju dodatków i domieszek przyczynia się do wzrostu skurczu autogenicznego. Ogólnie można jednak stwierdzić, że beton o wysokim wskaźniku W/S (wodno-spoiwowym) ze względu na dominujący wpływ wysychania charakteryzuje wyższe odkształcenie skurczowe. BWW ma mniejszy niż beton zwykły skurcz całkowity, ponieważ skurcz spowodowany wysychaniem jest zredukowany mniejszą ilością wody zarobowej i szczelnością zaprawy. Wraz z wysychaniem betonu podczas hydratacji wewnątrz betonu powstają niestacjonarne i nieliniowe pola wilgotności i temperatury, które wywołują naprężenia wewnętrzne. W początko-

wym okresie hydratacji pola wilgotności i temperatury na powierzchni zewnętrznej elementu wywołują ponadto odkształcenia ujemne.

Najistotniejszym wewnętrznym czynnikiem wpływającym na wielkość skurczu jest stosunek w/c, który kształtuje strukturę porów, rozkład wielkości porów oraz porowatość zaczynu cementowego i warstwy kontaktowej kruszywo-zaczynu. Wzrost wartości stosunku w/c zwiększa porowatość i udział dużych porów kapilarnych w mikrostrukturze betonu, a w konsekwencji ułatwia w niej ruch wody, który jest bezpośrednią przyczyną coraz większych odkształceń skurczowych. Drugim istotnym czynnikiem jest zawartość kruszywa, w szczególności grubego. Zależność ta pośrednio jest związana z zawartością cementu. Wzrost zawartości kruszywa zmniejsza odkształcenia własne betonu.

Szkodliwość skurczu jest związana z wywoływaniem przez niego tzw. naprężenia skurczowego prawie zawsze rozciągającego, którego wartość może przekraczać wytrzymałość betonu na rozciąganie. Należy podkreślić, że w okresie gdy przyrost odkształcenia skurczowego jest największy, beton jest w stadium wstępnego twardnienia, czyli ma bardzo małą wytrzymałość.

Beton niskoskurczowy

Składniki betonu projektowanego lub recepturowego należy tak dobrać, aby zostały spełnione określone wymagania dotyczące mieszanki betonowej i betonu, łącznie z konsystencją, gęstością, wytrzymałością, trwałością, ochroną przed korozją stali w betonie, przy uwzględnieniu procesu produkcyjnego oraz planowanej metody realizacji prac betonowych.

Przed przystąpieniem do projektowania mieszanki betonowej należy określić:

- przeznaczenie mieszanki betonowej i betonu stwardniałego;
- warunki pielęgnacji;
- wymiary konstrukcji (chodzi o ilość wydzielanego ciepła podczas hydratacji);
- negatywne oddziaływanie środowiska;
- wymagania dotyczące otuliny;
- wszelkie ograniczenia dotyczące stosowania określonych składników mieszanki betonowej.

Trwałość konstrukcji i elementów betonowych, oprócz odpowiedniego doboru surowców i składu mieszanki betonowej oraz produkcji i sposobu jej ułożenia, w dużej mierze zależy od pielęgnacji świeżego betonu. Czynności technologiczne związane z pielęgnacją mają na celu:

- zapewnienie optymalnych warunków ciepło-wilgotnościowych w dojrzewającym betonie;
- ochronę świeżo wykonanego betonu przed szkodliwym wpływem promieni słonecznych, wiatru, opadów atmosferycznych;
- przeciwdziałanie skurczowi spowodowanemu wysychaniem betonu;
- redukcję różnicy temperatury między powierzchnią betonu a jego wnętrzem;
- zapobieganie zamarzaniu wody zarobowej i prawidłowy rozwój wytrzymałości betonu w obniżonej temperaturze otoczenia.

W zależności od panujących warunków atmosferycznych stosuje się następujące metody pielęgnacji: mokra; stosowanie osłon zewnętrznych; stosowanie preparatów do pielęgnacji betonu. Poza opisanymi działaniami związanymi z wykona-

niem i pielęgnacją mieszanki betonowej, ograniczenie skurczu wynikającego z wysychania można eliminować przez wykonanie dodatkowego zbrojenia przeciwskurczowego. Jednak wiąże się to ze znacznym wzrostem kosztu wykonania elementu, zmniejszeniem rozstawów prętów zbrojeniowych, co często prowadzi do konieczności stosowania kruszyw o drobniejszym uziarnieniu. Natomiast w przypadku stosowania rozproszonych włókna polipropylenowego konieczne jest większe dozowanie upłynniaczy ze względu na postępujący proces wiązania transportowanego betonu. Zmniejszenie oczek w zbrojeniu stoi w sprzeczności z zaleceniami stosowania kruszyw o grubym uziarnieniu. Kompromis w tym przypadku nie jest rozwiązaniem optymalnym i nie zawsze przynosi dobre efekty. Dość skutecznym sposobem ograniczenia skurczu betonu związanego z wysychaniem jest zastosowanie domieszek do betonu ograniczających skurcz przez znaczne zwiększenie efektywności wiązania wody w betonie i przesunięcie procesu wysychania betonu w czasie. W przypadku betonu o bardzo niskim wskaźniku w/c ma to znaczenie bardzo istotne dla prawidłowego przebiegu procesu hydratacji cementu. Dzięki zastosowaniu odpowiedniej domieszki można uzyskać:

- znaczną redukcję skurczu wysychania;
- niezmienione właściwości świeżej mieszanki;
- polepszenie szczelności betonu stwardniałego;
- zmniejszenie ilości zbrojenia przeciwskurczowego.

Dodatkową zaletą stosowania domieszki ograniczającej skurcz wraz z domieszką napowietrzającą może być uzyskanie betonu mrozoodpornego i odpornego na sole odladzające.

Wnioski

Beton o wysokiej wytrzymałości (BWW) najczęściej jest wykorzystywany do realizacji konstrukcji obiektów wysokich, mostów, tuneli, budowli energetycznych. Wobec wykonywania z BWW elementów wielkowymiarowych należy eliminować przede wszystkim zjawisko skurczu już na etapie projektowania składu mieszanki betonowej.

Przeprowadzone analizy pozwalają stwierdzić, że niskie ciepło hydratacji w czasie wiązania eliminujące powstawanie rys skurczowych i termicznych zachodzi w przypadku użycia cementów hutniczych. Podobne efekty osiąga się, gdy mieszanka betonowa zawiera odpowiednie dodatki mineralne. Należy zwrócić uwagę, że dobrze dobrane kruszywo pozwala na znaczne wyeliminowanie skurczu betonu. Ograniczenie skurczu wysychania betonu można eliminować przez dodatkowe zbrojenie przeciwskurczowe. Analizując skurcz autogeniczny i skurcz spowodowany wysychaniem, trzeba pamiętać, że w istocie dominuje ten drugi. Skurcz zależy od klasy betonu, wilgotności środowiska, temperatury i rodzaju użytego cementu, wskaźnika w/c i rodzaju użytego kruszywa.

Literatura

- [1] Flaga K., Naprężenia skurczowe i zbrojenie przypowierzchniowe w konstrukcjach betonowych, seria Inżynieria Lądowa, Politechnika Krakowska 2011.
- [2] Flaga K., Klemczak B., Knoppik-Wróbel A., Wczesne rysy termiczno-skurczowe w ścianach przyczółków, Inżynieria i Budownictwo, 4/2013.
- [3] Jasiczak J., Szymański P., Wczesny skurcz betonów modyfikowanych domieszkami, VI Sympozjum Naukowo-Techniczne „Reologia w technologii betonu”, Gliwice, 2004.
- [4] Praca zbiorowa pod redakcją Lecha Czarnieckiego, Beton według normy PN-EN 206-1 – komentarz, Polski Cement 2004.