

Wpływ szczelności matrycy cementowej na mrozoodporność

Mrozoodporność betonu jest efektem specyficznej równowagi pomiędzy porami kapilarnymi pochłaniającymi wodę zdolną do zamarzania w warunkach eksploatacyjnych a porami buforowymi, które nie wypełniają się wodą do pełna. Przy wartościach wskaźnika W/C powyżej około 0,37 (w przypadku

CEM I) właściwe proporcje porów umożliwiające skuteczną redukcję negatywnego wpływu porów kapilarnych można osiągnąć tylko poprzez zastosowanie techniki napowietrzania lub wprowadzenie do zaczynu cementowego odpowiedniej ilości tzw. mikrosfer – sferycznych, porowatych elementów o rozmiarach mikrometrycznych, wytwarzanych z ceramiki lub polimerów. Podstawowe wymagania materiałowe określa się w tych przypadkach poprzez wskaźnik przestrzennej dystrybucji porów \bar{L} oraz wartość wskaźnika W/C. Ogólny obraz tej zależności przedstawia rysunek 1.

Objętość porów kapilarnych maleje wraz ze spadkiem W/C i poniżej wartości 0,37 w roli bufora zabezpieczającego przed skutkami mrozu występują pory pozostałe w mieszance betonowej w wyniku ograniczonej skuteczności metod zagęszczania oraz samoosuszające się, wyizolowane większe pory kapilarne (ograniczona dyfuzja lub jej brak oraz zatrzymanie przepływów kapilarnych uniemożliwiają dostęp wody z zewnątrz) – lewa strona rysunku 1. Przykłady takich betonów niezwykle trwałych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych są powszechnie znane (torkret, ubijane lub wibrubijane mieszanki miały rzeczywiste W/C poniżej 0,37).

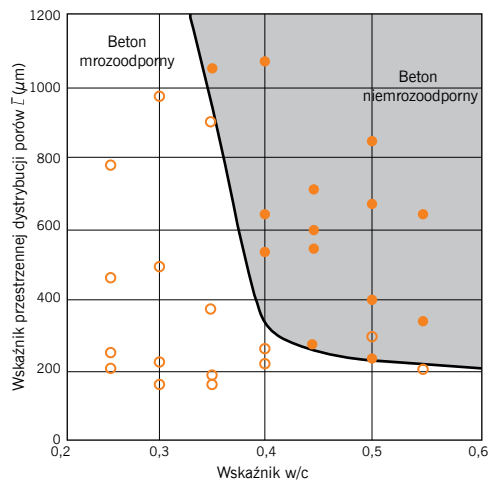
W przypadku stosowania w produkcji betonu (cementu) suplementów mineralnych (zamienników klinkieru) w postaci na przykład popiołów lotnych czy pyłów krzemionkowych sytuacja ulega zmianie. Przy porównywalnych wartościach W/C istotne cechy matrycy cementowej, jak porowatość, rozkład wielkości porów, nasiąkliwość czy stopień wypełnienia porów przez wodę, mogą się znacznie różnić. W efekcie mrozoodporność będąca pochodną tych cech również będzie się różnić. Tendencja przedstawiona na rysunku 1 będzie podobna, ale wykres oddzielający betony mrozoodporne od niemrozoodpornych ulegnie przesunięciu w lewo i w dół.

Na rysunkach 2-4 porównano podstawowe cechy fizyczne nienapowietrzanych zapraw wykonanych z cementem CEM I 32,5 R (czysty cement portlandzki) i CEM II/B-V 32,5 R (cement z dodatkiem krzemionkowego popiołu lotnego w ilości ok. 33%). Wprowadzenie do spoiwa zamiennika w postaci popiołu obniżyło znacznie całkowitą porowatość zaprawy w całym zakresie badanych W/C od 0,30 do 0,45. Popiół lotny umożliwia wytworzenie mikrostruktury szczelniej wypełnionej stałymi elementami szkieletu.

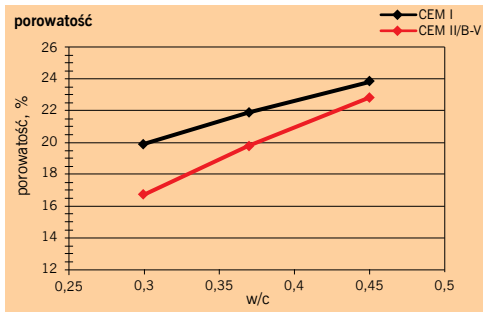
Paradoksalnie ilość wody pochłoniętej przez zaprawę o wyższej porowatości, wykonaną z czystym cementem, była mniejsza. W wyniku tych zjawisk stopień wypełnienia porów przez wodę zdecydowanie się różni i stawia zaprawę z CEM II/B-V w mniej korzystnej sytuacji przed testem mrozoodporności.

Doszczelnianie związane jest również ze zmniejszeniem wymiarów porów. Stwardniały zaczyn

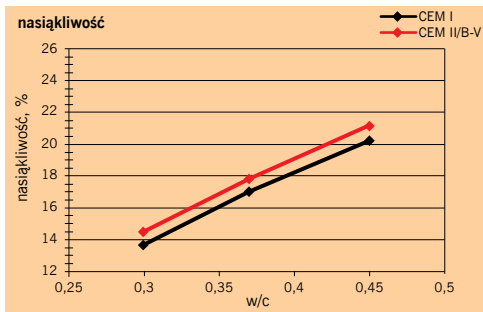
Rys. 1. Zależność ogólnej mrozoodporności objętościowej betonu (ASTM C 666) od wskaźnika przestrzennej dystrybucji porów powietrznych \bar{L} i W/C (Okada i inni, 1981)[1]



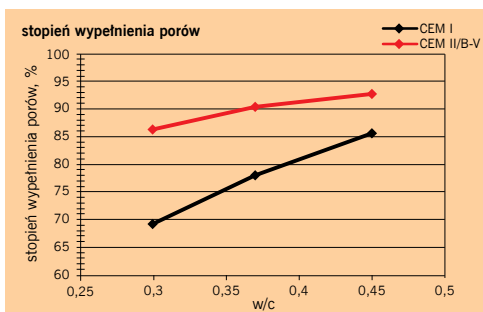
Rys. 2. Porowatość całkowita badanych zapraw [2]

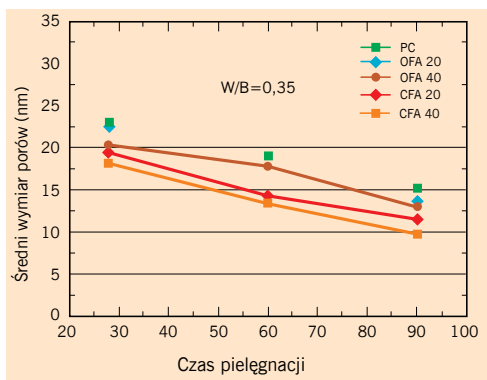


Rys. 3. Nasiąkliwość objętościowa badanych zapraw [2]



Rys. 4. Stopień wypełnienia porów przez wodę [2]



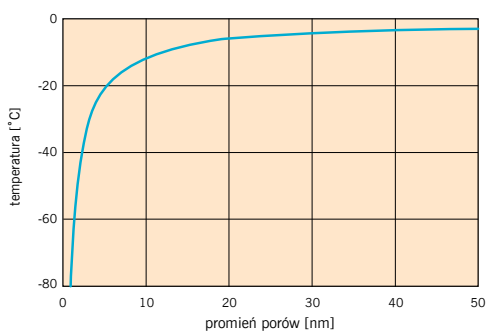


Rys. 5. Średni wymiar porów (średnica) w zaczynach dojrzewających 28, 60 i 90 dni (PC – cement portlandzki, OFA - grubszy popiół lotny w ilości 20% lub 40%, CFA – drobniejszy popiół lotny w ilości 20% lub 40%) [3]

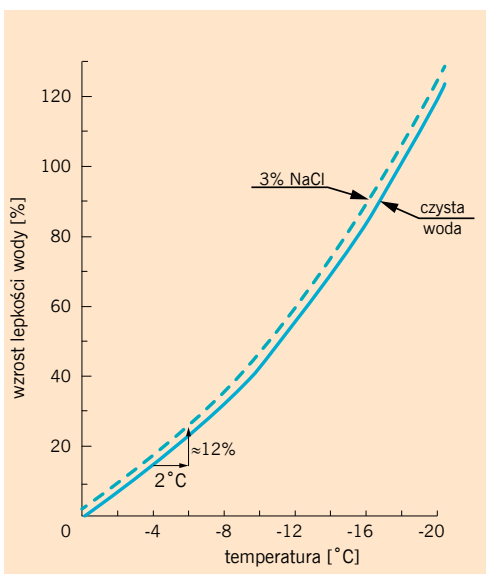
z cementów zawierających dodatek popiołu krzemionkowego (CEM II/A-V lub CEM II/B-V) ma pory charakteryzujące się mniejszymi wymiarami. Dobrze to ilustruje rysunek 5.

Zmniejszenie wymiarów porów przekłada się na konkretne efekty fizyczne. Pomijając obniżenie wodo- i gazoprzepuszczalności, istotniejsze w kategoriach trwałości są efekty związane z obniżeniem temperatury zamrażania wody (rys. 6), i jako konsekwencja tego faktu podwyższenie lepkości wody w porach (rys. 7).

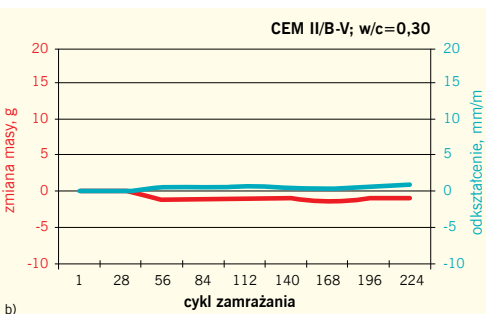
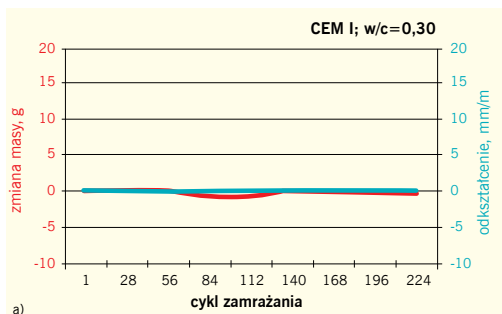
Zgodnie z formułą Gibbsa-Thomsona (rys.6) obniżenie wymiarów porów powoduje spadek temperatury równowagi fazowej woda – lód. Dla przypadku z rys. 5 jest to różnica wynosząca od kilku do kil-



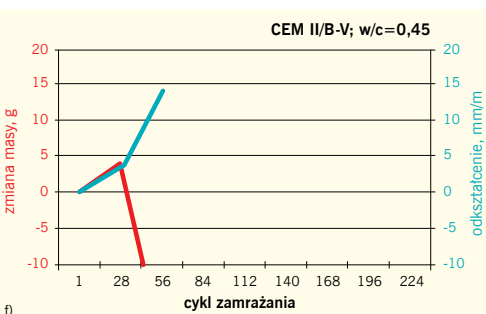
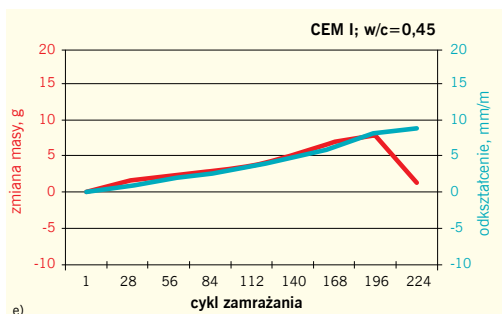
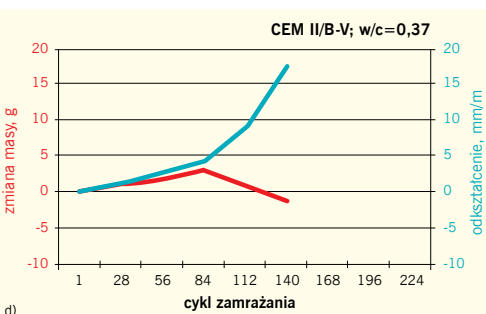
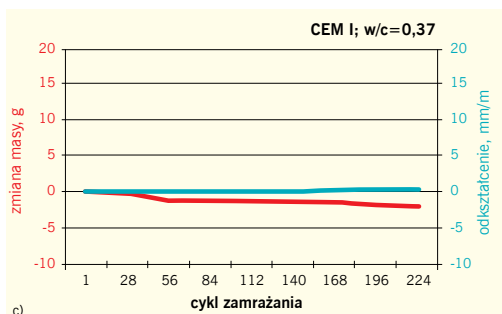
Rys. 6. Zależność temperatury zamrażania wody od promienia porów (formuła Gibbsa-Thomsona)

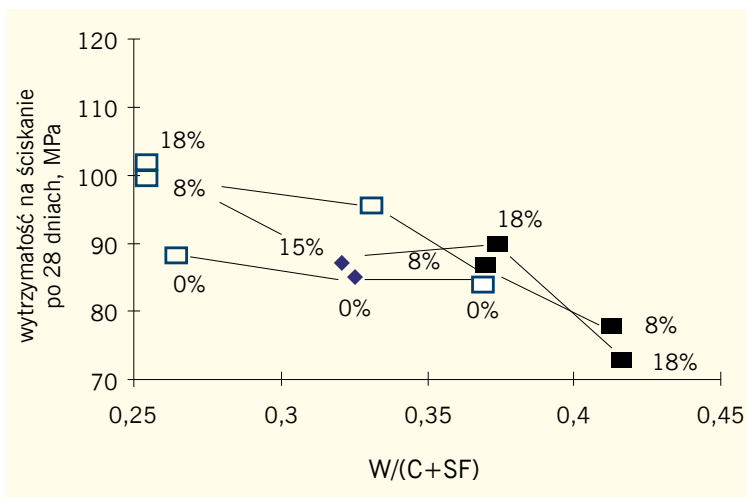


Rys. 7. Zależność lepkości wody od jej temperatury



Rys. 8. Wyniki badań mrozoodporności bezpośredniej zapraw z cementami: CEM I 32,5 R oraz CEM III/B-V 32,5 R (zaprawy odpowiedziane) [2]





Rys. 9. Mrozoodporność nienapowietrzanych betonów zawierających pyły krzemionkowe (czarne prostokąty oznaczają betony, które nie spełniły kryteriów normy ASTM C 666) [4]

kunastu stopni w zależności od czasu dojrzewania zaczynu i zawartości popiołu lotnego. W konsekwencji spadku temperatury wody następuje wzrost jej lepkości (rys.7) o wartość nawet kilkudziesięciu procent. Dodatkowym czynnikiem istotnie wpływającym na możliwość dystrybucji wody wewnątrz materiału jest także fakt, że ze spadkiem wielkości porów wzrastają opory hydrauliczne w porach kapilarnych. Wzrost ten jest proporcjonalny do czwartej potęgi odwrotności wymiarów przekroju poru. Zatem doszczelnienie mikrostruktury betonu nie tylko przesunęła krystalizację wody w obszary o niższej porowatości, ale kreuje znacznie trudniejsze warunki dla hydraulicznych przepływów niezamarzniętej wody z miejsc o ciśnieniu wyższym do miejsc o ciśnieniu niższym (na przykład pustek powietrznych). Związane jest to z generowaniem istotnie wyższych ciśnień wewnątrz materiału i tym samym obniżeniem jego mrozoodporności.

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki badań mrozoodporności prezentowanych zapraw. Łatwo zauważyć, że zaprawa z CEM I zachowuje się lepiej przy porównywalnych wartościach wskaźnika W/C od zaprawy z CEM II/B-V. Zachowuje trwałość przy W/C = 0,37 porównywalną do trwałości zaprawy z CEM II/B-V o W/C = 0,30. W obu przypadkach

W/C na poziomie 0,45 nie zabezpiecza przed mrozem, lecz i tak zaprawa z czystym cementem portlandzkim prezentuje się lepiej.

Na rys. 9 przedstawiono wyniki badań mrozoodporności betonów zawierających pyły krzemionkowe, które przy niższych W/C jeszcze bardziej pozwalają doszczelnić matrycę cementową. Warto zwrócić uwagę na betony o wartościach wskaźnika W/(C+SF) na poziomie 0,37 (nasiąkliwości od 3,3 do 3,6 %). Zamiana części cementu przez dodatek pyłu krzemionkowego w ilości odpowiednio 8% i 18% umożliwiła wzrost wytrzymałości betonu, lecz obniżyła istotnie odporność na mroz. Przykład wskazujący na brak istotnego związku pomiędzy wytrzymałością a mrozoodpornością.

Podsumowanie

W podsumowaniu można stwierdzić, że pomimo ewidentnych korzyści z zastosowania dodatków popiołów lotnych i pyłów krzemionkowych, niezbędnych w niektórych technologiach (mieszanki samozagęszczalne, betony podwyższonej wytrzymałości i odporności na agresję siarczanową, cementy o obniżonym cieple hydratacji), w przypadku podwyższonych wymagań mrozoodpornościowych dodatki te wymagają szczególnej uwagi. Głównym problemem jest tendencja do wytwarzania matrycy cementowej mniej odpornej na mroz i konieczność precyzyjnego napowietrzania mieszanki betonowej, nawet o niskich wartościach W/C (poniżej 0,37). Rysunek 1 wymaga w tym kontekście korekty polegającej na przesunięciu krzywej granicznej oddzielającej betony trwałe od nietrwałych w kierunku niższych wartości wskaźnika L oraz niższych wartości W/C.

Konieczność napowietrzania na wysokim poziomie jakościowym zderza się jednak w omawianych przypadkach z powszechnie znanymi trudnościami technologicznymi. Suplementy spoiw cementowych cechują się właściwościami ograniczającymi skuteczność oddziaływania popularnych środków napowietrzających i plastyfikujących (np. niespalony węgiel w popiołach lotnych). Wymagane są na ogół zwiększone dawki tych środków lub preparaty specjalnie dedykowane do określonych technologii. Ogólnie można stwierdzić, że w omawianych przypadkach ryzyko błędu jest większe, a tolerancja na zdarzające się często niekontrolowane odstępstwa od przyjętych założeń technologicznych jest mniejsza.

Zbigniew Rusin
Przemysław Świercz
Politechnika Świętokrzyska

Literatura

- 1 M. Pigeon, R. Pleau, *Durability of Concrete in Cold Climates. Modern Concrete Technology Series, E & FN SPON, 1995*
- 2 Z. Rusin, G. Stelmaszczyk, P. Świercz, Ł. Nowak, *Prognozowanie mrozoodporności betonów o współczynnikach w/c < 0,45, Projekt badawczy nr 5 TO7E01625, Politechnika Świętokrzyska, 2007*
- 3 Prinya Chindaprasirt, Chai Jaturapitakkul, Theerawat Sinsiri, *Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste, Cement and Concrete Composites 27, 2005, p.425-428*
- 4 Z. Rusin, I. Rusin, L. Faryniak, *Mrozoodporność betonu typu BWW, MATBUD 1998*



foto: Michał Braszczyński