WIESŁAW KURDOWSKI, *w.kurdowski@icimb.pl*
HENRYK SZELĄG, *sekretariat_krakow@icimb.pl*
ALEKSANDRA BOCHENEK, *o.bochenek@icimb.pl*
Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie

CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA ODPORNOŚĆ BETONU NA DZIAŁANIE MROZU

THE FACTORS AFFECTING THE CONCRETE RESISTANT TO FREETH THAW CYCLES

Streszczenie Jak wiadomo odporność betonu na mróz zależy przede wszystkim od jego porowatości kapilarnej, a więc od stosunku *w*/*c*. Trwały beton powinien mieć *w*/*c* ≤ 0,35 oraz zawierać odpowiednią ilość cementu [klasy ekspozycji XF2 do XF4] oraz stopień napowietrzenia większy od 3,5%. Należy kontrolować dodatki mineralne do betonu, szczególnie zawartość węgla w krzemionkowych popiołach lotnych.

Abstract It is well known that concrete resistant to freeth thaw cycles must have low capillary porosity, then the *w*/*c* ratio. Durable concrete should have *w*/*c* ≤ 0.35 and suitable cement content [exposition classes XF2 to XF4] and air entrainment higher than 3.5%. The quality of mineral addition should be controlled, especially the uncombusted coal in the case of siliceous fly ash.

1. Wprowadzenie

Odporność betonu na działanie mrozu zależy przede wszystkim od jego porowatości i nasiąkliwości. Będzie więc pośrednio związana z jego klasą wytrzymałości, wiadomo bowiem, że beton o małej wytrzymałości ma dużą nasiąkliwość. Doświadczenia przeprowadzone przez wielu autorów wykazały, że współczynnik odporności betonu na działanie mrozu spada gwałtownie do zera gdy stopień nasycenia wodą przekracza 85% [np. 1]. Trudno znaleźć prostą korelację między odpornością na zamarzanie a nasyceniem betonu wodą, odgrywa tu bowiem rolę wiele czynników wpływających na porowatość betonu. Mamy, upraszczając zagadnienie, porowatość kruszywa, strefę przejściową kruszywo – matryca cementowa, porowatość kapilarną zaczynu, zamknięte pęcherzyki powietrza. Największe znaczenie dla odporności betonu na mróz ma jednak mikrostruktura zaczynu i jego porowatość, a więc stosunek *w*/*c*. Przy małym stosunku *w*/*c* (0,35) nie tworzy się także porowata strefa przejściowa wokół kruszywa.

Trzeba przypomnieć, że Fagerlund [2] wprowadził pojęcie „krytycznego nasycenia betonu wodą", które pozwala na ocenę jego odporności na zamrażanie. RILEM zaleca na tej podstawie metodę badania odporności betonu na mróz [3].

W naszych rozważaniach pominiemy wpływ kruszywa, które powinno być odporne na zamrażanie, jeżeli projektujemy beton o takich właściwościach. Trzeba jednak przypomnieć, że jak to wykazał Pigeon [4], nie jest to warunek wystarczający. Kruszywo zawierające znaczny udział otwartego układu porów, wywołuje pod działaniem mrozu wypychanie do zaczynu znacznej ilości wody, co powoduje powstawanie znacznych naprężeń rozciągających w betonie.

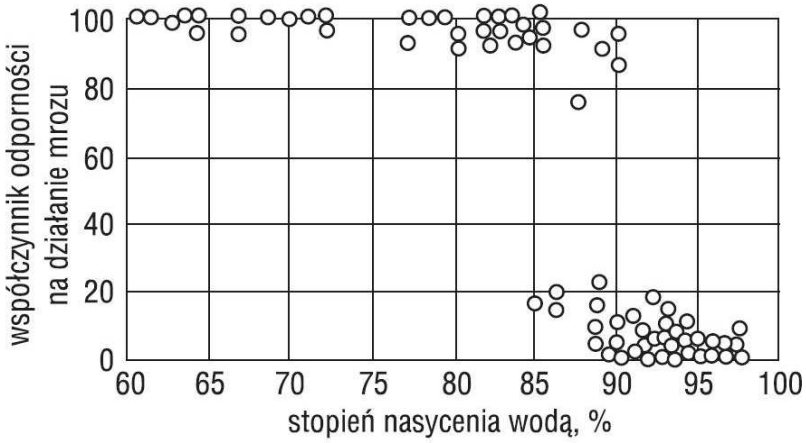
Specjalistom nie trzeba także przypominać, że beton powinien być poprawnie układany i zagęszczony, a także odpowiednio pielęgnowany. Właściwa pielęgnacja betonu może zmniejszyć dziesięć razy jego nasiąkliwość [5]. Było to w ostatnim okresie wielokrotnie powtarzane w związku z wydaniem przez Polski Cement tłumaczenia książki Neville'a „Właściwości betonu" [1]. W przedmowie do tej najlepiej znanej na świecie książki o betonie jej autor podkreśla, że zły beton może być wykonany z tych samych materiałów co dobry. Ma to szczególne znaczenie przy rozpatrywaniu odporności betonu na mróz, w przypadku której powstawanie rys, a nawet tylko mikrospękań, przekreśla znaczenie dyskutowanych w tym krótkim przeglądzie zagadnień. Beton nie będzie bowiem wówczas szczelny.

Problemy te zostały szczegółowo i wyczerpująco omówione w godnej przypomnienia monografii Rusina „Technologia betonów mrozoodpornych" [6], wydanej także przez Polski Cement w roku 2002.

Dlaczego powracamy więc do tego problemu? Niestety przypadki braku odporności betonu na mróz zdarzają się stosunkowo często, a dotyczą one także konstrukcji mostowych. Z tego względu trzeba omówić kilka zasad i zależności, które mają decydujący wpływ na odporność betonu na zamarzanie i rozmarzanie.

2. Znaczenie nasycenia betonu wodą i napowietrzenia

Beton odporny na mróz powinien mieć dobrą wytrzymałość i być napowietrzony. Okazuje się, że powtarzanie tego sloganu ma ciągle duże znaczenie. Jak wiadomo wytrzymałość betonu jest ściśle związana z jego porowatością kapilarną, która powstaje w zaczynie przy stosunku *w*/*c* większym od 0,4 i rośnie wraz z przekroczeniem tej wartości. Wzrasta również zawartość otwartych porów kapilarnych, a z nią nasiąkliwość betonu, a więc łatwość z jaką wnika woda do tego kompozytu. Z tego względu autorzy tych rozważań wyrażają pogląd, że w odpowiedzialnych konstrukcjach betonowych stosunek *w*/*c* nie powinien przekraczać wartości 0,35.

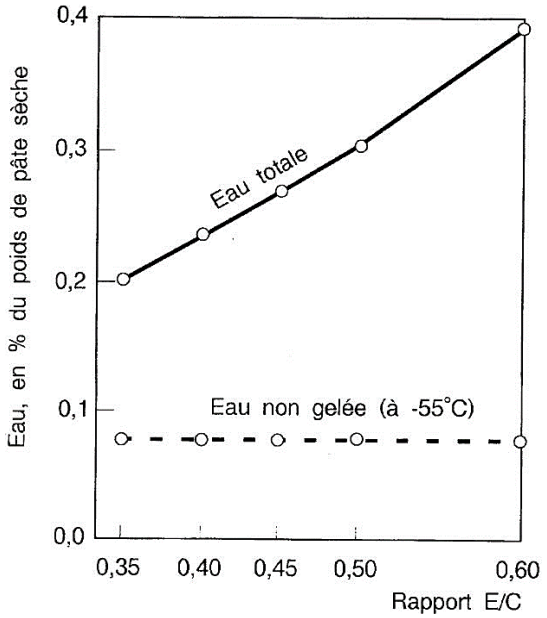


Rys. 1. Wpływ stopnia nasycenia betonu wodą na jego odporność na mróz [1]

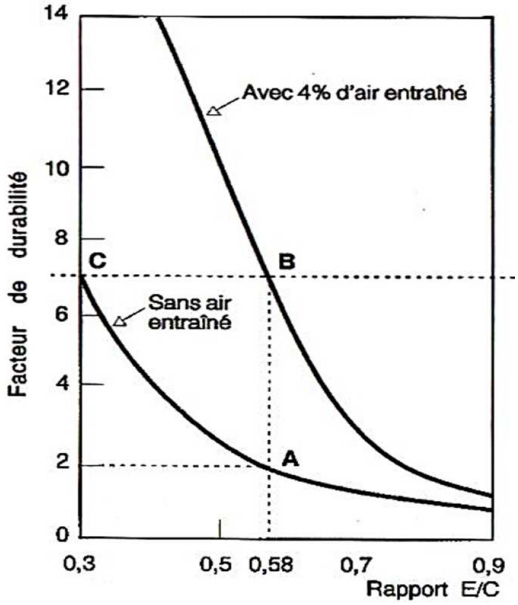
Mały stosunek *w*/*c* jest także bardzo korzystny z punktu widzenia odporności betonu na agresję chemiczną, bowiem powstałe uszkodzenia ulegają wypełnieniu [„samoleczenie"] w wyniku hydratacji pozostających w betonie niezhydratyzowanych faz cementowych. A jak wiadomo środki odladzające, pomimo tak „niewinnej" nazwy zawierają przeważnie agresywne w stosunku do betonu sole. Są to najczęściej chlorki i stosowanie cementu odpornego na siarczany [mała zawartość glinianu trójwapniowego] nie ma w związku z tym uzasadnienia.

Woda zamarzalna w betonie występuje w porach kapilarnych, a więc jej zawartość rośnie także ze stosunkiem *w*/*c* [7] (rys. 2). To właśnie wzrost zawartości tej części wody jest groźny

dla betonu poddanego działaniu niskich temperatur. Jak duże znaczenie ma ten czynnik to pokazuje przebieg krzywych obrazujących zależność odporności na mróz betonu od stosunku *w/c*, pokazanych na rys. 3 [7].



Rys. 2. Całkowita zawartość wody i wody zamarzanej [górna krzywa] w betonie w funkcji *w/c* [7]



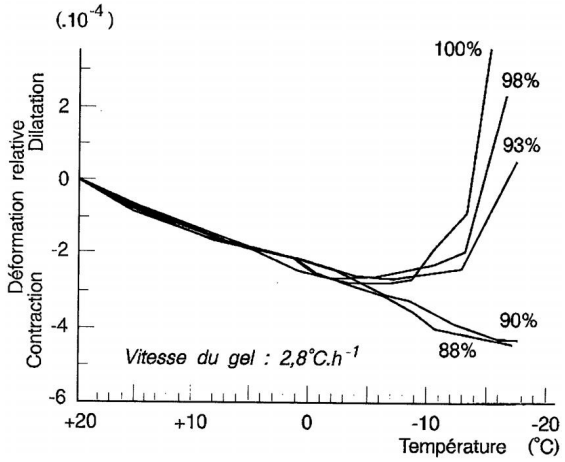
Rys. 3. Wpływ stosunku *w/c* na odporność betonu nienapowietrzonego A i napowietrzonego B [7]

Woda w porach żelowych praktycznie nie zamarza, chyba że temperatura spadnie poniżej -55°C. Natomiast w porach o średnicy 0,05 μm zamarza już w temperaturze -10°C, a zawartość takich porów wynosi, w zaczynie cementowym o *w/c* 0,5 i po 28 dniach twardnienia, około 15% obj. [7, 8].

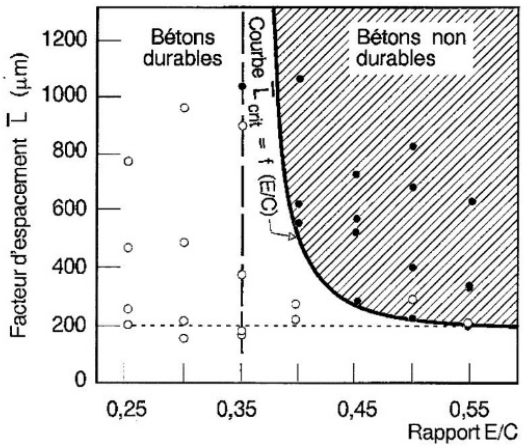
Ze stopniem nasycenia betonu wodą wiążą się ściśle zmiany objętości betonu poddanego działaniu mrozu (rys. 4) [9]. Beton, w którym stopień nasycenia wodą nie przekroczył wartości krytycznej kurczy się w trakcie zamrażania, a po przekroczeniu tej wartości rozszerza się. Z tym wiąże się trwałość betonu nie w pełni nasyconego wodą.

Beton odporny na mróz powinien być napowietrzony. Zalecana zawartość powietrza przez różne normy światowe waha się od 3,5÷5%, dla klas ekspozycji od XF2÷XF4. PN-EN 206-1 podaje tylko zawartość powietrza w mieszance, wynoszącą 4%, a to nie jest to samo. W zależności od stosowanej metody zagęszczania betonu wartość ta może być mniejsza nawet o 50%.

Z napowietrzeniem łączy się bardzo ściśle odległość między pęcherzykami wprowadzonego powietrza. I w tym przypadku normy światowe podają różne wartości od 200 μm nawet do 400 μm [7]. Podaje się także wpływ szybkości zamarzania na odległość porów powietrznych, przy czym rośnie ona ze zmniejszeniem tej szybkości [10]. W przypadku małych szybkości wielkości krytyczne są duże i dla spadku temperatury wynoszącej 4°/h sięgają 600 μm. Te duże wartość należy jednak odrzucić, o czym przesądza zależność odległości pęcherzyków powietrza od stosunku *w/c* [11]. Z zależności tej wynika jednoznacznie, że stosunek *w/c* wynoszący 0,35 jest wartością krytyczną (rys. 5). Jego przekroczenie powoduje, że bezpieczna odległość wynosi 200 μm. Opierając się na dużym doświadczeniu specjalistów kanadyjskich można jeszcze rozważać przyjęcie jako maksymalną wartość podaną w normach kanadyjskich, a wynoszącą 260 μm. Jednak Pigeon [7], który przecież wywodzi się z Kanady, stanowczo zaleca wartość 200 μm.

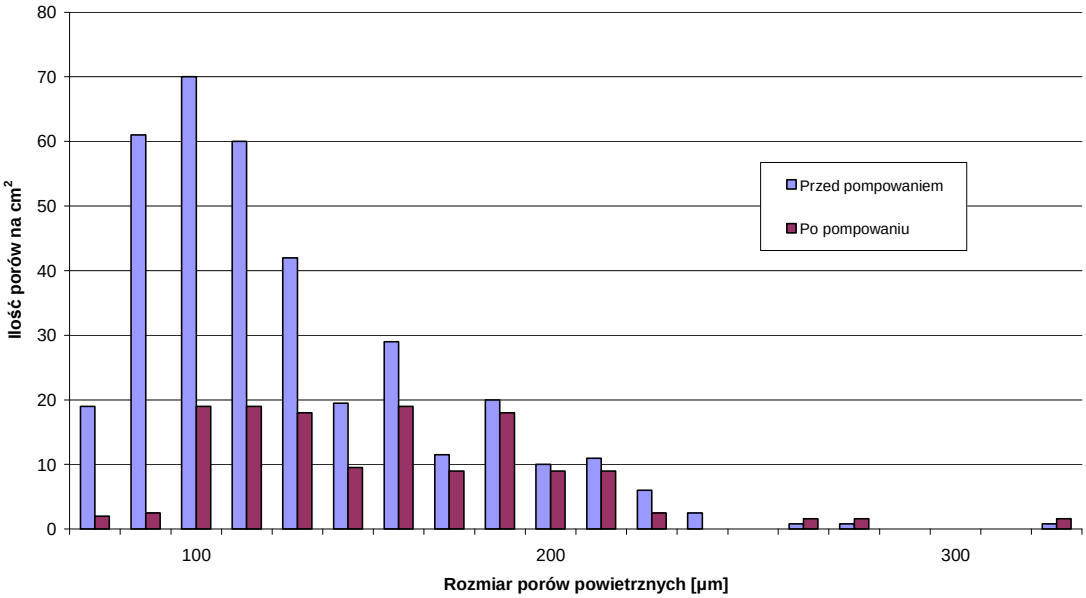


Rys. 4. Wpływ stopnia nasycenia zaprawy wodą (*w/c* = 0,6, szybkość spadku temp. 2,8°/h) na zmiany jej wymiarów w procesie zamarzania



Rys. 5. Wpływ stosunku *w/c* na korzystną odległość porów powietrznych [11], pole zakreskowane beton nietrwały

Osobny problem dotyczy pionowego pompowania betonu, które radykalnie zmienia napowietrzenie mieszanki (rys. 6) [12]. Generalnie zmniejsza się zawartość porów powietrznych, a szczególnie w korzystnym zakresie porów o mniejszych średnicach. W związku z tym w Kanadzie stosowanie tej technologii jest zabronione w przypadku napowietrzonych BWW stosowanych w konstrukcjach mostowych.



Rys. 6. Wpływ pompowania pionowego na zmianę napowietrzenia mieszanki betonowej

3. Rola dodatków mineralnych do betonu

Porównując stal z betonem we wstępie do swojej książki Neville [1] pisze: „stal jest produkowana w ściśle kontrolowanych warunkach”, natomiast „na budowie obiektu betonowego sytuacja jest całkowicie odmienna”. „Prawdą jest, że jakość cementu jest gwarantowana przez producenta w sposób podobny jak w przypadku stali i jeżeli zostały wybrane odpowiednie materiały wiążące, trudno jest spowodować błędy w konstrukcji betonowej. Ale to nie cement, a beton jest materiałem budowlanym”.

Żeby dalej nie przepisywać wstępu do ostatniego wydania cennej książki Neville'a, który każdy może sobie przeczytać w oryginale, trzeba zwrócić uwagę, że autor pominął zagadnienie dodatków mineralnych do betonu. Według normy PN-EN 206-1 może to być krzemionkowy popiół lotny, mielony granulowany żużel wielkopiecowy, mielony wapień oraz inne dodatki mineralne. Nie wymieniając wszystkich tych dodatków mineralnych wypada podkreślić, że najczęściej stosowanym dodatkiem mineralnym jest krzemionkowy popiół lotny. Równocześnie norma PN-EN 196-2 zwiększa w popiele lotnym do produkcji betonów dopuszczalną zawartość niespalonego węgla, wyrażoną jako straty prażenia, do 9% w „kategorii" C i odpowiednio do 7% i 5% dla B i A. Pozostawiając na boku zagadnienie kontroli jakości popiołu stosowanego do produkcji betonów, trzeba przypomnieć powszechnie znany problem wpływu węgla, a właściwie porowatego koksiku, na odporność betonu na działanie mrozu. Zbyt duża zawartość węgla w popiele obniża odporność betonu na działanie mrozu, przede wszystkim w wyniku zwiększenia wodożądności zaczynu, a więc wpływu na stosunek *w*/*c*. Ponadto utrudnia ona stosowanie domieszek chemicznych, w tym szczególnie domieszek napowietrzających, zwiększając znacznie ich adsorpcję na porowatych cząstkach węgla [12]. Mówi się nawet o destabilizacji banieczek powietrza [7].

Natomiast wracając do zagadnienia cementu należy stwierdzić, że niektóre elementy mostów trzeba zaliczyć do konstrukcji masywnych. W związku z tym stosowanie cementów wysokich klas może spowodować niekorzystne gradienty temperatury, prowadzące do powstawania rys. Jest to ściśle związane z pielęgnacją betonu wspomnianą na początku tego artykułu. Zagadnienia te omawia szczegółowo Kiernożycki [13] w swojej monografii.

Zamykając zagadnienie cementu można wspomnieć, że Oddział Krakowski Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych prowadzi certyfikację cementów produkowanych w Polsce. W ostatnich trzech latach skontrolowano około 1200 próbek cementów wszystkich rodzajów stwierdzając jeden przypadek cementu nie spełniającego wymagań normowych w zakresie wytrzymałości; pomiar wykazał 17 MPa po dwóch dniach twardnienia zamiast dopuszczalnych 18 MPa.

4. Podsumowanie

Autorzy zastanawiając się nad sformułowaniem wniosków mieli cały czas przekonanie, że zasady, które wynikają z ich rozważań są powszechnie znane. Jednak przypadki braku odporności betonu na działanie mrozu, i to w ważnych konstrukcjach mostowych, zmuszają do ich ciągłego powtarzania. Co także może wprawiać w zdumienie to poszukiwanie w konstrukcjach betonowych, wykazujących brak odporności na mróz, jako ich przyczyn korozję chemiczną. Wskazówki są pozornie liczne, np. białe wykwity. Zapomina się, że z powstałych rys zawsze będzie migrował roztwór zawarty w porach betonu, a jego wysychanie będzie powodowało strącanie białego wodorotlenku wapnia, przechodzącego następnie, pod wpływem CO_2 z powietrza, także w biały węglan wapnia.

A oto znane czynniki decydujące o odporności betonu na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie:

a) dostateczna ilość cementu w betonie oraz kontrola jakości stosowanych dodatków mineralnych!,
b) mały stosunek *w*/*c*,
c) prawidłowe napowietrzenie betonu,
d) dobre zagęszczenie betonu,
e) staranna pielęgnacja; zapobieganie skurczom wysychania i gradientom temperatury.

Literatura

1. A.M. Neville, „Właściwości betonu”, Polski Cement, Wyd. piąte, Kraków 2012.
2. G. Fagerlund, Mater. Contr. RILEM, 1977, 10,58, 231
3. RILEM, Mater. Contr. 1977, 10, 58,, 217.
4. M. Pigeon, „Het Frost Durability of Concrete” w Cement and Concrete Science & Technology” (red. S>N> Gosh), t. 1, s. 417, ABI Books, New Delhi 1992.
5. E. Senbetta and G. Malchow, « Studies on control durability of concrete through proper curing », in « Concrete durability, K. and B. Mather intern. Conf. (red. J.M. Scanlon) 1987, ACI, SP-100, 1, 73-87.
6. Z. Rusin, « Technologia betonów mrozoodpornych «, Polski Cement, Kraków 2002.

A. Carles – Gibergues et M. Pigeon, « La durabilite des betons en ambiance hivernale rigoureuse », w « La Durabilite Des Betons » (red J. Baron et J.P. Ollivier), Presses Ponts et Chaussees, Paris 1992.

7. P.K. Mehta, D. Manmohan, 7th ICCC, Paris, t. III, s. VII-101, Paris 1980.
8. V.S. Ramachandran, R.F. Feldman and J.I. Beaudoin, Concrete Science, Treatise on current research, Heyden and Son Ltd, London 1981.
9. M. Pigeon, J. Prevost and J. M. Simard, J. Amer. Concr. Inst., 1985, 82, 5, 684-692.
10. E. Okada, M. Hisaka, Y. Kazama and K. Hattori, ”Freeze-thaw durability and deiser salt scaling resistance of a 0.25 water-cement ratio concrete” (red. V.M. Malhotra), 1981, ACI, SP-68, 215-231.
11. M.A. Glinicki, ”Metody ilościowej i jakościowej oceny napowietrzenia betonu”, s. 141, II Sympozjum Naukowo-techniczne Trwałość Betonu, Pol. Krakowska, Górażdże Cement S A, Kraków 2008
12. W. W. Kiernożycki, „Betonowe konstrukcje masywne”, Polski Cement, Kraków 2003.