ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: BUDOWNICTWO z.104 Nr kol. 1695

Przemysław ŚWIERCZ*
Grzegorz STELMASZCZYK
Politechnika Świętokrzyska

ZWIĄZEK STOPNIA KRYSTALIZACJI WODY W PORACH Z MROZOODPORNOŚCIĄ ZAPRAW CEMENTOWYCH

Streszczenie. W przedstawionym referacie autorzy podejmują próbę powiązania wyników badań mrozoodporności według normy ASTM C 666 ze stopniem krystalizacji wody w porach zapraw ocenianym metodą Różnicowej Analizy Odkształceń (RAO).

RELATIONS BETWEEN DEGREE OF CRISTALISATION OF WATER IN MORTAR PORES AND FROST RESISANCE OF MORTARS

Summary. The paper presents the analysis of relations which exist between frost resistance tested according to ASTAM C 666 and ice nucleation tested with the RAO techniqe.

1. Wstęp

O trwałości mrozowej zapraw i betonów cementowych decydują zróżnicowane czynniki materiałowe, technologiczne oraz warunki eksploatacyjne. Jednoznaczna ocena mrozoodporności metodami laboratoryjnymi jest trudna, tak jak trudne jest odwzorowanie rzeczywistych warunków eksploatacyjnych. Z ekonomicznego punktu widzenia pożądane jest, by laboratoryjne diagnozowanie było nie tylko precyzyjne, ale możliwie jak najkrótsze. Powszechnie stosowane na świecie oceny mrozoodporności są na ogół długotrwałe. Dlatego właśnie nie ustają poszukiwania względnie szybkiej i wiarygodnej metody, pozwalającej oceniać trwałość mrozową.

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Zbigniew Rusin, prof. Politechniki Świętokrzyskiej

2. Charakterystyka badanych zapraw

Przedmiotem badań były zaprawy cementowe o zróżnicowanym współczynniku w/c wynoszącym odpowiednio 0,35; 0,45; 0,55. W tablicy 1 przedstawiono oznaczenia i receptury badanych zapraw (litera „p" oznacza, że zastosowano domieszkę napowietrzającą). Do wykonania próbek użyto piasku o uziarnieniu zgodnym z normą PN EN 196-1, cementu CEM I 32,5R oraz wody wodociągowej. Składniki dozowane były wagowo w stanie powietrzno suchym. Próbki do badań wykonano zgodnie z normą PN-85/B-04500.

Tablica 1

Skład i właściwości badanych zapraw

Właściwości		Z1	Z1p	Z2	Z2p	Z3	Z3p
Skład zaprawy, kg/m^3	C	686,6	620,6	590,5	509,0	458,2	429,0
	W	240,3	222,7	265,7	236,8	252,0	238,9
	P	1373,1	1241,2	1423,8	1226,4	1579,7	1479,1
	Środek napow.		5,5		7,9		3,0
W/C		0,35	0,36	0,45	0,47	0,55	0,56
ρ_r, kg/m^3		2190	1990	2150	1870	2160	2020
R_{c28}, MPa		46,2	39,6	43,2	17,4	32,5	20,0

3. Metodyka badań i analiza uzyskanych wyników

3.1. Badanie mrozoodporności

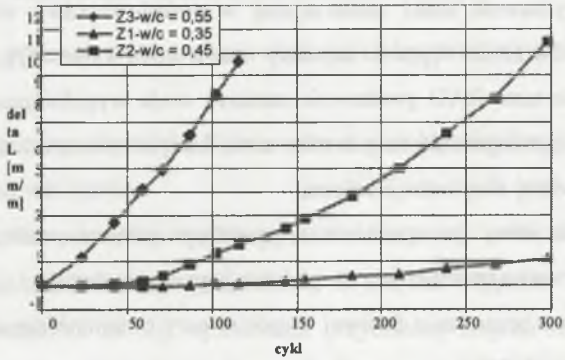
Badania mrozoodporności zapraw prowadzono na beleczkach o wymiarach 4 x 4 x 16 cm. Próbki poddano 300 cyklom zamrażania zgodnie z normą ASTM C 666 procedura B (zamrażanie w powietrzu). Badania wykonano w automatycznej komorze zamrażalniczej [5]; 1 cykl trwał 6 godzin, przy czym próbki zamrażano przez 4 godziny do temperatury –20°C i rozmrażano przez 2 godziny do temp. +20°C. Badane próbki umieszczono na stalowym ruszcie, tak by przez cały czas zamrażania były całkowicie otoczone powietrzem i zalane wodą w trakcie odmrażania. Próbki regularnie poddawano pomiarom masy z dokładnością do 0,1 g oraz pomiarom odkształceń liniowych w aparacie Graf-Kaufmana z dokładnością do 0,01 mm.

Próbki o wysokim wskaźniku w/c (0,45; 0,55) oraz próbki nienapowietrzone uległy zniszczeniu, któremu towarzyszył wzrost masy oraz wymiarów liniowych próbek.

Zniszczenia objawiły się siatką drobnych spękań widocznych nie uzbrojonym okiem na wszystkich powierzchniach próbki.

Rys. 1. Uszkodzenia powierzchni zamrażanych próbek
Fig. 1. Surface defects of the frozen samples

Na rysunku 2 pokazano odkształcenia liniowe zapraw nienapowietrzonych, poddanych 300 cyklom zamrażania.



Rys. 2. Odkształcenia liniowe zamrażanych próbek
Fig. 2. Linear deformations of the frozen samples

Próbka Z3 (w/c=0,55) uległa zniszczeniu po 110 cyklach zamrażania, zmianę wymiaru liniowego obserwowano już podczas pierwszych pomiarów, odnotowano również wzrost masy próbki. W przypadku zapraw Z2 (w/c=0,45) zmianę wymiaru liniowego zaobserwowano po 45 cyklach. Odkształcenie osiągnęło wartość 10 mm/m i wzrost masy ok. 5 g. Próbka nie uległa całkowitej dezintegracji, jednak odnotowane odkształcenia i spękania widoczne na rysunku 1 świadczą o braku odporności na działanie mrozu.

W przypadku zapraw Z1 (w/c=0,35) stwierdzono nieznaczne odkształcenia liniowe (wydłużenie 1 mm/m); zaprawa ta pomyślnie przeszła testy mrozoodporności.

Wszystkie zaprawy napowietrzone okazały się być mrozoodporne, niezależnie od wskaźnika w/c. Nie odnotowano odkształceń liniowych, natomiast dla wszystkich zapraw zaobserwowano nieznaczny wzrost masy (ok. 2÷3 g) przy pierwszym pomiarze.

Uzyskane wyniki potwierdziły podawane w literaturze [1][3] wytyczne dla uzyskania mrozoodporności betonów (zapraw), takie jak: obniżanie wskaźnika w/c < 0,38 i napowietrzanie.

3.2. Badanie przemiany fazowej metodą RAO

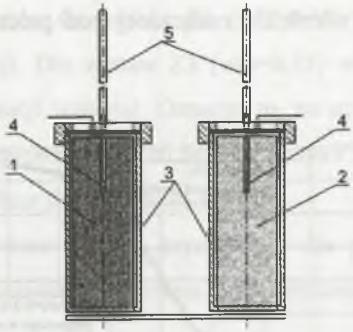
Do oceny przemiany fazowej wody w porach zapraw wykorzystano metodę Różnicowej Analizy Odkształceń (RAO) [3][4]. Metoda ta pozwala rejestrować zmiany objętości nasączonych próbek poddanych zamrażaniu w zależności od temperatury i oparta jest na założeniach, że:

- możliwe jest wyliczenie ilości zamarzającej w porach zaprawy wody na podstawie wyników pomiarów zmian objętości zaprawy wraz z wodą wypełniającą pory,
- w pierwszej fazie testu RAO gwałtownie zamarza woda wypełniająca największe pory, wypełnione wodą pod próżnią na potrzeby testu, których znaczna część pozostaje pusta w czasie rzeczywistej eksploatacji betonu,
- w kolejnej fazie wraz ze spadkiem temperatury zamarza woda, której obecność negatywnie wpływa na trwałość betonu podczas jego eksploatacji,
- woda nie ulegająca przemianie fazowej wypełnia pory o najmniejszych wymiarach i nie bierze bezpośrednio udziału w procesie niszczenia.

Badaniu poddano odwiercane walcowe próbki o średnicy 50 mm i wysokości 150 mm, o charakterystyce podanej w punkcie 2.

Próbki umieszczono w stalowych dylatometrach pomiarowych pokazanych na rysunku 3. W pierwszym dylatometrze umieszczono badaną próbkę nasączoną wodą (pod próżnią lub w warunkach normalnego ciśnienia atmosferycznego), w drugim próbkę wzorcową nie zawierającą wody. Dylatometry wypełniono naftą do umownego poziomu „0", a następnie poddawano równoczesnemu ochładzaniu. Dylatometry wyposażone są w wyskalowane rurki pomiarowe oraz czujniki temperatury umieszczane wewnątrz próbek i na zewnątrz dylatometrów. Zmianę objętości próbek podczas ochładzania rejestruje się automatycznie co 60 sekund aparatem cyfrowym, a następnie odczytuje na zdjęciach poziom nafty z dokładnością do 0,01 ml. Temperaturę wewnątrz próbek rejestruje się co 60 sekund przy

użyciu czujników PT100, przetwornika analogowo-cyfrowego i wyposażonego w kartę pomiarową komputera PC.



Rys. 3. Układ dylatometrów pomiarowych: 1-próbka badana, 2-próbka wzorcowa, 3-dylatometry pomiarowe, 4-czujniki temperatury, 5-rurki pomiarowe [4]
Fig. 3. Unit of measurement dylatometers: 1-investigated sample, 2-master sample, 3-measurement dylatometers, 4-temperature detectors, 5-measurement pipes [4]

Zarejestrowane podczas testu zmiany objętości i temperatury służą do wyznaczenia wskaźników RAO:

ΔV - różnica pomiędzy objętością dylatometru z próbką nasączoną wodą a objętością dylatometru z próbką wzorcową.

ΔT - różnica temperatur pomiędzy wnętrzem próbki nasączonej i próbki wzorcowej.

Na podstawie wskaźnika ΔV, przy założeniu że przyrost objętości lodu w stosunku do objętości wody wynosi 9,1 % [2], wyznaczono przybliżony stopień krystalizacji. Przyjęto przy tym, że odkształcenie równe 0,091 ml/g odpowiada 100% krystalizacji.

Stopień krystalizacji wyznaczono ze wzoru (1):

$$STKR = \frac{\Delta V}{m_w \times 0{,}091} \times 100\% \tag{1}$$

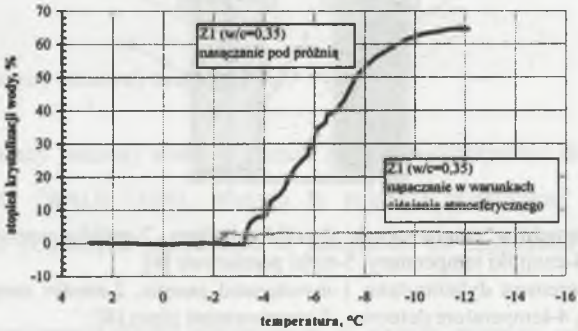
gdzie:

STKR – stopień krystalizacji wody, %,
m_w – masa wody wypełniającej pory zaprawy, g,
ΔV – różnica objętości dylatometrów, ml;

Testy prowadzono na próbkach nasączonych pod próżnią i w warunkach ciśnienia atmosferycznego. Przyjęto założenie, że dla próbek nasączonych próżniowo rejestrowany przyrost objętości odpowiada przyrostowi objętości formującego się lodu. W przypadku próbek nasączonych w warunkach normalnego ciśnienia atmosferycznego część przyrostu objętości, związanego z przemianą fazową wody w porach, jest kompensowany przez

przemieszczanie się wody, która jeszcze nie zamarzła, do pustych porów (powietrznych) wewnątrz próbki.

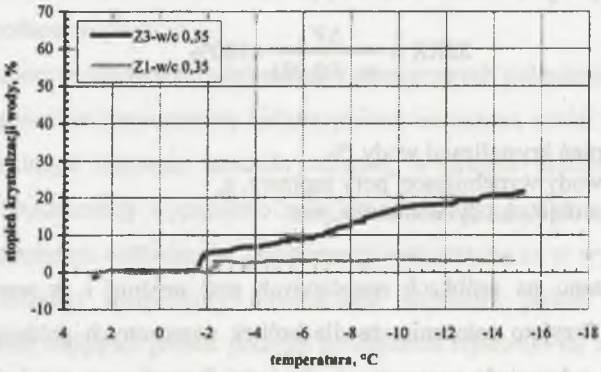
Na rysunku 4 przedstawiono ilość zamarzającej w porach próbki wody [%], czyli stopień krystalizacji, dla próbki Z1 (w/c=0,35) nasączonej pod próżnią i warunkach normalnego ciśnienia atmosferycznego.



Rys. 4. Wpływ sposobu nasączania na stopień krystalizacji
Fig. 4. Impact of the means of saturation on the degree of cristalisation

Wszystkie próbki nasączone próżniowo, niezależnie od ich nasiąkliwości, w/c, i wytrzymałości, uległy zniszczeniu podczas trwania testów. Przyczyną zniszczeń były naprężenia rozciągające wywołane ciśnieniem hydraulicznym wody, które znacznie wzrosło w momencie rozpoczęcia krystalizacji wody w porach, i przyrostem objętości lodu.

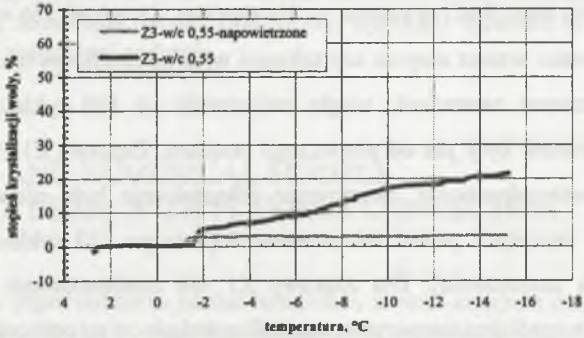
Na rysunku 5 przedstawiono stopień krystalizacji dla próbek w/c = 0,35 i w/c = 0,55 nasączonych w warunkach normalnego ciśnienia atmosferycznego.



Rys. 5. Wpływ wskaźnika w/c na stopień krystalizacji
Fig. 5. Impact of the w/c ratio on the degree of cristalisation

Próbki nasączone w warunkach ciśnienia atmosferycznego nie uległy zniszczeniu podczas testu. Część przyrostu objętości związanego z przemianą fazową wody została skompensowana przez pory nie wypełnione wodą. Widoczny na rysunku 5 obraz przebiegu zamarzania wody pokazuje, że dla próbki Z1 (w/c=0,35) nie odnotowano widocznego przyrostu stopnia krystalizacji. Dla zapraw Z3 (w/c=0,55) widzimy, że wraz ze spadkiem temperatury stopień krystalizacji wzrastał. Oznacza to, że struktura wewnętrzna porów dla zaprawy Z3 (w/c=0,55) nie zapewnia „buforu bezpieczeństwa", który mógłby skompensować ciśnienie hydrauliczne wywołane formowaniem się lodu.

Na rysunku 6 przedstawiono stopień krystalizacji dla próbek Z3 i Z3p (w/c=0,55) nasączonych w warunkach normalnego ciśnienia atmosferycznego.

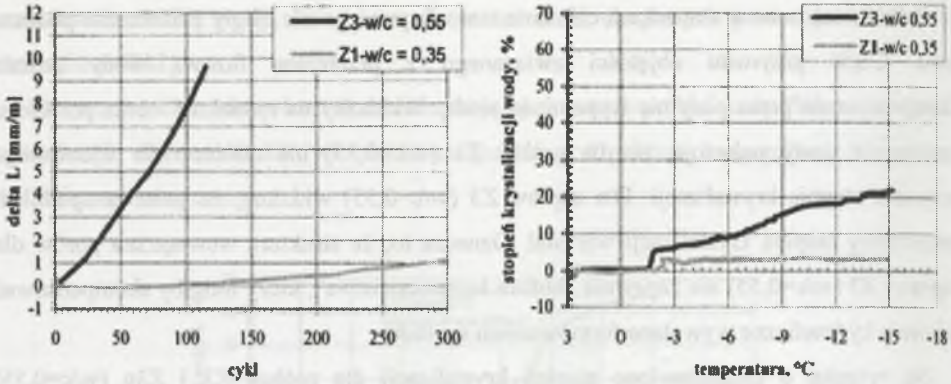


Rys. 6. Wpływ napowietrzenia na stopień krystalizacji
Fig. 6. Impact of the aeration on the degree of cristalisation

Jak podaje literatura [1][3], napowietrzenie mieszanki betonowej powoduje poprawę mrozoodporności. W przeprowadzonym teście RAO wpływ napowietrzenia był wyraźnie zauważalny. Celowo wprowadzone drobne pęcherzyki powietrza zredukowały ciśnienie hydrauliczne powstałe na skutek wzrostu objętości formującego się lodu. Obrazy przebiegu przemiany fazowej zaprawy Z3p (w/c=0,55) i zaprawy Z1 (w/c=0,35) są zbliżone.

4. Wnioski końcowe

Porównując wyniki testów RAO i badań mrozoodporności, autor zauważył pewne prawidłowości. Rysunek 7 przedstawia zestawienie testów RAO i badań mrozoodporności według normy ASTAM C 666 procedura B, dla zapraw Z1 i Z3 nienapowietrzonych.



Rys. 7. Zestawienie wyników testu RAO i badań mrozoodporności
Fig. 7. Comparison of the results of the RAO test and frost resistance

Przebieg wykresu testu RAO pokazuje, że dla zaprawy Z3(w/c=0,55) w badanym zakresie temperatur odnotowano wzrost stopnia krystalizacji wraz ze spadkiem temperatury. Zaprawa ta poddana cyklicznemu zamrażaniu uległa zniszczeniu po 110 cyklach, a odkształcenia liniowe próbki notowane były już od pierwszego pomiaru. Zaprawa Z1 (w/c=0,35) przeszła pomyślnie testy mrozoodporności; zanotowane odkształcenie było niewielkie, a pierwsze zmiany wymiarów liniowych próbki odnotowano dopiero po 110 cyklach (w czasie kiedy zaprawa Z3 uległa zniszczeniu). Dla zaprawy Z1 nie zarejestrowano przyrostu stopnia krystalizacji wraz ze spadkiem temperatury, ustabilizował się on na poziomie 3÷4%.

Tradycyjne badania mrozoodporności polegające na cyklicznym zamrażaniu próbek są czasochłonne i kosztowne, co z punktu widzenia technologii i ekonomiki jest bardzo niekorzystne. Autorzy wierzą, że wciąż rozwijana i doskonalona metoda RAO stanie się w przyszłości wartościowym narzędziem do szybkiej oceny trwałości mrozowej.

LITERATURA

1. Fagerlund G.: Trwałość konstrukcji betonowych, Arkady, Warszawa 1997.
2. Fletcher N.M.: The Chemical Phisics of Ice. Cambridge at the University press,1970.
3. Rusin Z.: Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement, 2002.
4. Rusin Z., Stelmaszczyk G.: Ocena wpływu NaCl na krystalizację wody w porach kruszywa, XLII Konferencja Naukowa PAN i PZITB, Krynica 1996, Tom VI, s. 87-94.
5. Wawrzeńczyk J.: Wpływ czynników technologicznych na strukturę i mrozoodporność betonu z kruszywem wapiennym. Rozprawa doktorska, Gliwice 1989.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jacek Śliwiński