

dr inż. Adam Klak¹
mgr inż. Henryk Kowalczyk^{1*)}

Ocena wpływu środka hydrofobowego na mrozoodporność betonu

Evaluation of the effect of a hydrophobic agent on the frost resistance of concrete

DOI: 10.15199/33.2019.04.10

Streszczenie. W artykule opisano wpływ zastosowania ochrony powierzchniowej betonu środkiem hydrofobowym na odporność mrozową, określoną metodą powierzchniowego łuszczenia i metodą zwykłą. Próbkę betonową wykonaną z cementu portlandzkiego CEM I 42,5 HSR poddano badaniu nasiąkliwości, wytrzymałości na ściskanie, podciągania kapilarnego i mrozoodporności. Obserwując wyniki badań metodą CDF, zauważono, że ochrona powierzchniowa środkiem hydrofobowym wpływa na ograniczenie podciągania kapilarnego, co pozwala na poprawę mrozoodporności. Wszystkie próbki poddane zabiegowi hydrofobizacji spełniły warunek dotyczący masy materiału złuszczonego, nie przekraczając wartości 1,5 kg/m² zgodnie z normą PN-EN 12390-9. Próbkę betonową poddane badaniu mrozoodporności metodą zwykłą nie spełniły wymagań normy PN-B-06265. Na ich powierzchni wystąpiły spękania, a wytrzymałość na ściskanie była o ponad 20% mniejsza od wytrzymałości próbek referencyjnych.

Słowa kluczowe: beton; mrozoodporność; łuszczenie; środek hydrofobowy; podciąganie kapilarne.

Abstract. This paper investigates the effect of applying protection on concrete surface and influence of hydrophobic agent on concrete frost resistance. The investigation was conducted by a two of freeze-thaw methods: surface scaling and standard method. Concrete samples made of Portland cement CEM I 42.5 HSR were tested for water absorption, compressive strength, capillary suction and freeze-thaw resistance. It has been shown that the surface protection of the hydrophobic agent influences the capillary suction limit, which allows to improve the results during the frost resistance test. All samples subjected to the hydrophobic treatment fulfill the condition of total weight of the scaled material, not exceeding the value of 1.5 kg/m² in accordance to PN-EN 12390-9 standard. Test results of standard method didn't meet the requirement of PN-B-06265 standard. Cracks were visible on surface of specimen and also their compressive strength was more than 20% lower than the reference samples.

Keywords: concrete; freeze-thaw resistance; scaling; hydrophobic agents; capillary suction.

Uszkodzenia zamarzającego betonu można podzielić na wewnętrzne (pęknięcie) i zewnętrzne (łuszczenie) [7]. Norma PN-EN 206 [2] przedstawia 4 klasy ekspozycji ze względu na zamrażanie i rozmrażanie w obecności i bez obecności soli odładzających oraz zaleca użycie domieszek napowietrzających w celu uzyskania betonu odpornego na działanie mrozu. Dodatkowo określa minimalną ilość cementu i maksymalny stosunek wodno-cementowy. W przypadku braku napowietrzenia zaleca badanie mrozoodporności betonu, ale nie precyzuje, jaką metodą.

Stosowanie soli odładzających jest powszechnym w Polsce sposobem przeciwdziałania oblodzeniu elementów drogowych i mostowych. Wielokrotne zamrażanie i rozmrażanie, spowodowane częstymi zmianami temperatury, może prowadzić do powierzchniowego uszkodzenia elementów, natomiast

obecność środków odładzających, w tym najczęściej stosowanego roztworu NaCl – do odrywania niewielkich fragmentów betonu z jego powierzchni. Proces ten nazywany jest powierzchniowym łuszczeniem i charakteryzuje się odsłonięciem kruszywa grubego. Uszkodzenia tego typu nie prowadzą bezpośrednio do zniszczenia elementu betonowego, ale ułatwiają dostęp wody do wnętrza betonu. Z badań wynika, że największe uszkodzenia spowodowane są przez roztwór soli o stężeniu 3% [9].

Norma PN-EN 12390-9 [3] opisuje trzy metody badania odporności mrozowej elementów betonowych uszkodzonych przez powierzchniowe łuszczenie: referencyjną – płytkową i dwie metody alternatywne – kostkową i CF/CDF. Każda polega na cyklicznym zamrażaniu i rozmrażaniu próbek betonowych w obecności roztworu NaCl o stężeniu 3%, ale w przypadku metody kostkowej, płytkowej i CF próbki poddawane są 56 cyklom, a metody CDF tylko 28 cyklom. Metody różnią się także sposobem przygotowania próbek.

Sposób klasyfikacji mrozoodporności betonu bez obecności środków odładzających określa PN-B-06265 [4] na podstawie liczby cykli zamrażania i rozmrażania oraz biorąc pod uwagę planowane lata użytkowania konstrukcji betonowej. Kryterium jest wizualna ocena pęknięć, a także porównanie masy ubytków i zmniejszenia wytrzymałości na ściskanie w porównaniu z próbkami niepoddanymi zamrażaniu. Cykliczne zamrażanie i rozmrażanie może prowadzić do powstawania mikrospekkań, w które dostaje się woda, powodując przyrost masy betonu.

W celu redukcji absorpcji kapilarnej betonu stosuje się ochronę powierzchniową środkiem hydrofobowym. Pomimo że impregnacja betonu nie może zastąpić domieszek napowietrzających do produkcji betonów mrozoodpornych, to badania [1, 8, 9] wykazały, że zapewnienie dodatkowej ochrony. Zaobserwowano, że ilość materiału złuszczonego podczas badania próbek poddanych impregnacji metodą CDF jest nawet do 90% mniejsza w porównaniu z próbkami re-

¹⁾ Politechnika Świętokrzyska; Wydział Budownictwa i Architektury

^{*)} Adres do korespondencji: hkowalczyk@tu.kielce.pl

ferencyjnymi o powierzchni naturalnej. Badacze z Hunan University w Chinach [8] zauważyli, że wpływ środków hydrofobowych na odporność na powierzchniowe łuszczenie jest korzystny tylko w przypadku betonów wysuszonych przed rozpoczęciem badania. W betonach o dużej wilgotności początkowej występują wewnętrzne uszkodzenia spowodowane zamrażaniem i rozmrażaniem. Wynika z tego, że środki hydrofobowe zabezpieczają beton przed absorpcją wody z zewnątrz, ale nie wpływają na wewnętrzne uszkodzenia betonu zawilgoconego. Przeprowadzone długotrwałe badania odporności na cykliczne rozmrażanie i zamrażanie [1, 9] pokazały, że wraz z upływem czasu skuteczność impregnacji maleje, aż do całkowitej utraty właściwości ochronnych.

W artykule przeanalizowano wyniki badań przeprowadzonych metodą zwykłą i powierzchniowego łuszczenia na betonach z powierzchnią pokrytą środkiem hydrofobowym i z powierzchnią naturalną. Określono ubytek masy i spadek średniej wytrzymałości na ściskanie betonu, w porównaniu z betonem referencyjnym. W przypadku obu metod oceniono wizualnie stan powierzchni betonu poddanego badaniom.

Badania

Wykonano mieszankę betonową na bazie cementu portlandzkiego CEM I 42,5 HSR o stosunku wodno-cementowym 0,45 i konsystencji półciekłej S4. Stos okruszowy składał się z piasku frakcji 0 – 2 mm i kruszywa wapiennego frakcji 4 – 8 i 8 – 16 mm w proporcji P : W1 : W2 = 32 : 33 : 35. Do badania mrozoodporności metodą CDF przygotowano 10 jednakowych próbek o wymiarach 15 x 15 x 5,5 cm, w tym 5 o powierzchni naturalnej (Z) i 5 o powierzchni pokrytej środkiem hydrofobowym (H), natomiast metodą zwykłą 18 próbek o wymiarach 10 x 10 x 10 cm, w tym 6 próbek porównawczych (Ś), 6 próbek o powierzchni naturalnej (Z) i 6 próbek o powierzchni pokrytej środkiem hydrofobowym (H). Dodatkowo wykonano po 3 próbki o wymiarach 10 x 10 x 10 cm do badania wytrzymałości na ściskanie i nasiąkliwości wg wytycznych norm [5, 6]. Jako środek hydrofobowy zastosowano preparat

używany do impregnacji powierzchni chłonnych, takich jak beton narażony na wpływ cykli zamrażania i rozmrażania. Chroni on przed wnikaniem wody wraz ze szkodliwymi substancjami, np. solami. Skład mieszanki betonowej podano w tabeli 1.

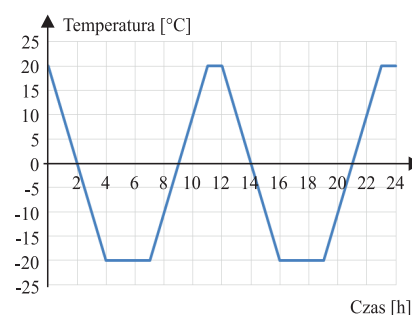
Próbki zagęszczano na stole wibracyjnym. Po 24 h rozformowano je i umieszczono na 7 dni w wodzie o temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$, a następnie dojrzały przez 21 dni w środowisku powietrzno-suchym o wilgotności RH = $65 \pm 5\%$ i temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Tabela 1. Skład mieszanki betonowej

Table 1. Composition of concrete mix

Składnik	Ilość [kg/m ³]
Cement	377
Woda	169
Piasek	587
Kruszywo wapienne 4 – 8	625
Kruszywo wapienne 8 – 16	655
Plastyfikator	1,25

Badanie mrozoodporności metodą CDF przeprowadzono wg normy PN-EN 12390-9 [3]. Po 21 dniach dojrzenia powierzchnię boczną próbek pokryto żywicą epoksydową, a po kolejnych 7 dniach – badaną powierzchnię środkiem hydrofobowym, nakładając go w środowisku powietrzno-suchym o wilgotności RH = $65 \pm 5\%$ i temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Po 24 h próbki ustawiono na podkładkach dystansowych o grubości 5 mm wewnątrz zamykanych pojemników ze stali nierdzewnej, a następnie do pojemników wiano roztwór soli o stężeniu 3% tak, aby zanurzone zostały na głębokość 5 mm. Podczas badania podciągania kapilarnego oznaczono zmianę masy próbek w ciągu 7 dni, wg normy [3], a następnie próbki w pojemnikach umieszczono w komorze CDF. Zgodnie z normą założono 28 cykli zamrażania i rozmrażania. Przebieg zmiany temperatury przedstawiono na rysunku 1. Po 4, 6, 14 i 28 cyklach próbki wyjmowano z komory w celu pomiaru masy zruszczonego materiału. Umieszczano je w wannie wypełnionej wodą i przeprowadzano kąpiel ultradźwiękową, aby oczyścić beton z materiału zruszczonego. Następnie wodę przelewano przez papierowy filtr o znanej masie. Po suszeniu filtrów w suszarce w temperaturze 110°C przez 24 h pomie-



Rys. 1. Przebieg zmiany temperatury podczas badania CDF

Fig. 1. Range of temperature during CDF test

rzo mase zruszczonego materiału. Zgodnie z normą PN-EN 12390-9 **beton jest odporny na działanie mrozu, gdy masa materiału zruszczonego po 28 cyklach jest nie większa niż 1500 g/m².**

Badanie mrozoodporności metodą zwykłą rozpoczęto po 28 dniach dojrzenia, kiedy próbki o boku 10 x 10 x 10 cm pokryto środkiem hydrofobowym. Po 24 h wszystkie próbki umieszczono w wodzie o temperaturze $18 \pm 2^\circ\text{C}$ na okres 7 dni. Następnie próbki o powierzchni naturalnej (Z) i o powierzchni pokrytej środkiem hydrofobowym (H) przeniesiono do zautomatyzowanej komory chłodniczej, gdzie wg przyjętego stopnia mrozoodporności F100 poddano je 100 cyklom zamrażania i rozmrażania. W każdym cyklu próbki zamrażano przez 4 h w powietrzu o temperaturze $-18 \pm 2^\circ\text{C}$, a następnie przez 4 h rozmrażano w wodzie o temperaturze $18 \pm 2^\circ\text{C}$. Oględziny powierzchni i pomiary zmiany masy prowadzono po 21, 71 i 100 cyklach. Zgodnie z normą PN-B-06265 **beton spełnia zakładany stopień mrozoodporności F100, gdy po 100 cyklach powierzchnia nie wykazuje pęknięć, całkowita masa ubytków jest mniejsza niż 5%, a spadek wytrzymałości w porównaniu z próbkami niezamrażanymi jest nie większy niż 20%.**

Nasiąkliwość określono wg normy PN-B-06250 [6] na 3 kostkach betonowych o boku 10 cm. Próbki nasączano w wodzie, aż do otrzymania dwóch pomiarów o różnicy nie większej niż 0,1%. Następnie suszono je do stałej masy w suszarce w temperaturze 110°C .

Badanie wytrzymałości na ściskanie betonu przeprowadzono na kostkach o boku 10 cm, wg PN-EN 12390-3 [5].

Analiza wyników badań

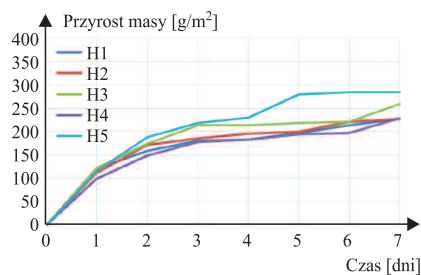
Wyniki badania nasiąkliwości i wytrzymałości na ściskanie przedstawiono w tabeli 2, a wyniki podciągania kapilarnego metodą CDF na rysunkach 2 i 3. Próbki o powierzchni naturalnej (Z) charakteryzują się większą ilością wchłoniętej wody. Zaobserwowano małe różnice pomiędzy przyrostem masy poszczególnych próbek serii pokrytej środkiem hydrofobowym (H). Największa różnica występowała między próbkami H1 i H5 i wynosiła 57 g/m². W przypadku serii Z różnice są bardziej wyraźne, a największa z nich wynosi aż 364 g/m² (Z1-Z5).

Z rysunku 4 wynika, że średni przyrost masy próbek serii Z po 7 dniach wynosił 404 g/m² i był o 158 g/m² większy niż średni przyrost masy próbek serii H (245 g/m²). Duży wpływ na wysoką średnią absorpcję miała próbka Z1 o wyraźnie większym przyroście masy

Tabela 2. Wyniki oznaczania nasiąkliwości i wytrzymałości na ściskanie

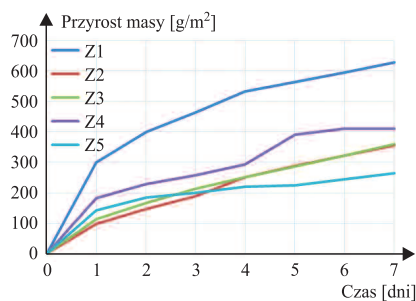
Table 2. Test results of water absorption and compressive strength

Numer	Nasiąkliwość [%]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
1	5,2	65,2
2	5,1	66,2
3	5,3	63,5
Średnia	5,2	65,0



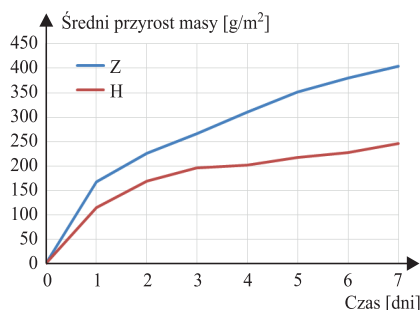
Rys. 2. Podciąganie kapilarne próbek – seria H

Fig. 2. Capillary suction of specimen – H series



Rys. 3. Podciąganie kapilarne próbek – seria Z

Fig. 3. Capillary suction of specimen – Z series

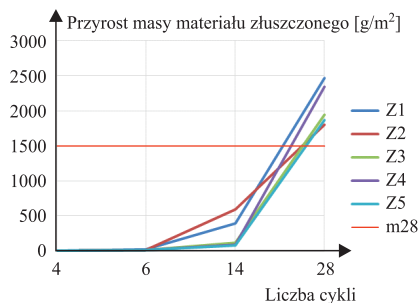


Rys. 4. Porównanie średnich wyników podciągania kapilarnego

Fig. 4. Comparison of the average results of the capillary suction

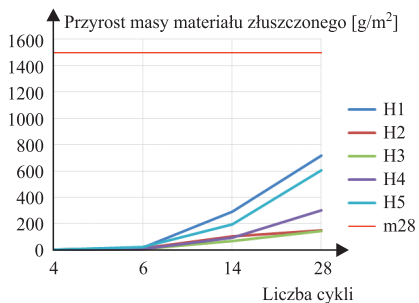
od pozostałych próbek serii Z. Na skutek zastosowania środka hydrofobowego średni przyrost masy zmniejszył się o 39%.

Wpływ hydrofobizacji widać również na mniejszym przyroście masy materiału złuszczonego H (rysunki 5 i 6). Po 4 cyklach nie zaobserwowano złuszczenia, ale już po 14 cyklach widać znaczny wzrost masy złuszczonego materiału. Po 28 cyklach wszystkie próbki serii H, w przeciwieństwie do serii Z, charakteryzowały się mniejszą niż 1500 g/m² masą materiału złuszczonego, a więc spełniały warunek odporności mrozo-



Rys. 5. Zależność masy materiału złuszczonego od liczby cykli zamrażania i rozmrażania – seria Z

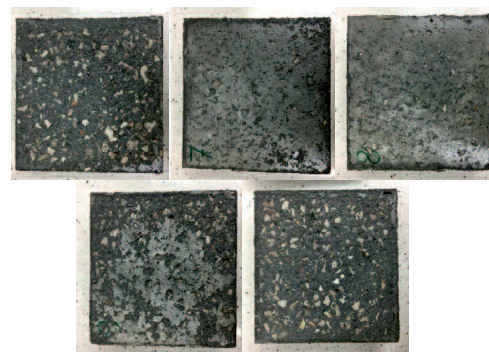
Fig. 5. Relation between scaled material and number of freeze-thaw cycles – Z series



Rys. 6. Zależność masy materiału złuszczonego od liczby cykli zamrażania i rozmrażania – seria H

Fig. 6. Relation between scaled material and number of freeze-thaw cycles – H series

wej normy PN-EN 12390-9. Wpływ impregnacji hydrofobowej widać również podczas wizualnej oceny stanu próbek betonowych po 28 cyklach zamrażania i rozmrażania (fotografia 1). Na próbkach o powierzchni niechronionej środkiem hydrofobowym bardzo wyraźny jest niszczący wpływ cyklicznego zamrażania i rozmrażania w przypadku obecności roztworu NaCl o stężeniu 3%. Odsłonięcie kruszywa zaobserwowane na całej powierzchni może prowadzić do dalszych uszkodzeń powierzchniowych i wewnętrznych.

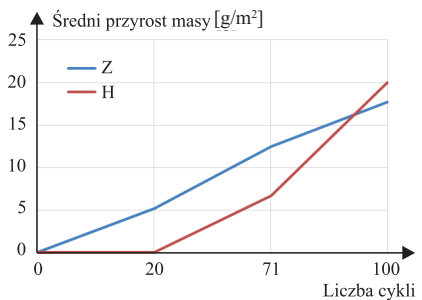


Fot. 1. Powierzchnia próbek po 28 cyklach zamrażania i rozmrażania – seria H

Photo 1. Surface of specimen after 28 freeze-thaw cycles – H series

W przypadku próbek poddanych zabiegowi impregnacji stwierdzono miejscowe odkrycie kruszywa. Widać korzystny wpływ środków hydrofobowych na odporność na powierzchniowe łuszczenie, szczególnie w przypadku próbek serii H i Z.

Wyniki pomiaru przyrostu masy w badaniu mrozoodporności metodą zwykłą pokazano na rysunku 7. Próbki pokryte środkiem hydrofobowym wykazały zerowy przyrost masy po pierwszych 20 cyklach zamrażania i rozmra-



Rys. 7. Średni przyrost masy – badanie mrozoodporności metodą zwykłą

Fig. 7. Average gain of weight – the freeze resistant test – standard method

żania w odróżnieniu od próbek serii Z, w przypadku których średni przyrost masy wynosił 5 g. Po 100 cyklach próbki serii H wykazały większy przyrost masy od próbek serii Z, co może wiązać się z ubytkiem masy spowodowanym uszkodzeniem naroży, a także z osłabieniem działania środka hydrofobowego wraz z upływem czasu.

Po zakończeniu badania mrozoodporności metodą zwykłą przeprowadzono badanie wytrzymałości na ściskanie (tabela 3). Seria próbek niepoddanych cyklicznemu zamrażaniu i rozmrażaniu osiągnęła średnią wytrzymałość na ściskanie na poziomie 69,1 MPa. Obie serie poddane badaniu mrozoodporności wykazały mniejszą wytrzymałość: 53,0 MPa (seria H) i 42,2 MPa (seria Z).

Tabela 3. Wyniki oznaczenia wytrzymałości na ściskanie po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania

Table 3. Test results of compressive strength after 100 of freeze-thawing cycles

Numer badania	Wytrzymałość na ściskanie serii:		
	R	H	Z
1	68,6	42,3	35,8
2	69,6	46,8	49,1
3	69,0	54,3	44,5
4	69,0	58,4	32,4
5	70,1	62,6	46,3
6	68,1	53,5	44,9
Średnia	69,1	53,0	42,2

Na podstawie pomiarów przyrostu masy i badania wytrzymałości na ściskanie obliczono:

• średni ubytek masy próbek serii H i Z:

$$\Delta G_H = ((2403 - 2423) / 2403) \cdot 100\% = -0,8\%$$

$$\Delta G_Z = ((2434 - 2432) / 2434) \cdot 100\% = -0,7\%$$

Obie serie betonów spełniły wymagania PN-B-06265 dotyczące maksymalnego ubytku masy na poziomie 5%;

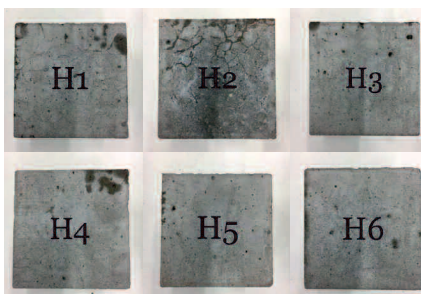
• średni spadek wytrzymałości próbek serii H i Z:

$$\Delta R_H = ((69,1 - 53,0) / 69,1) \cdot 100\% = 23,3\%$$

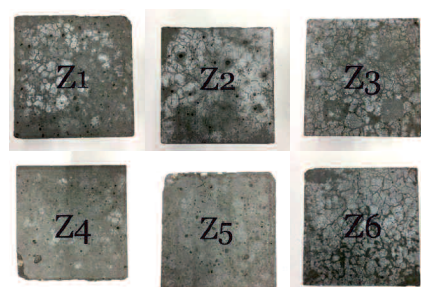
$$\Delta R_Z = ((69,1 - 42,4) / 69,1) \cdot 100\% = 39\%$$

Żadna seria nie spełniła wymagania normy PN-B-06265 dotyczącego maksymalnego spadku wytrzymałości na poziomie 20%. Badane próbki betonowe były niemrozoodporne. W przypadku próbek serii H nie zaobserwowano uszkodzeń naroży, a spękania widoczne były tylko na próbkach H1 i H2

(fotografia 2). Powierzchnia kostek betonowych niechronionych środkiem hydrofobowym wykazała większe uszkodzenia. Na próbkach o numerze 1, 2, 3 i 6 zaobserwowano znaczne spękania, a na próbkach 4 i 5 ubytki naroży (fotografia 3). Seria betonów (Z) pomimo mniejszego średniego przyrostu masy po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania wykazała większe uszkodzenia powierzchni.



Fot. 2. Powierzchnia próbek po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania – seria H
Photo 2. Surface of specimen after 100 freeze-thaw cycles – H series



Fot. 3. Powierzchnia próbek po 100 cyklach zamrażania i rozmrażania – seria Z
Photo 4. Surface of specimen after 100 freeze-thaw cycles – Z series

Biorąc pod uwagę wszystkie trzy kryteria normy PN-B-06265, oceniono średni ubytek masy, średni spadek wytrzymałości na ściskanie i uszkodzenie powierzchni próbek. Obie serie betonów wykazały ujemny ubytek, a więc przyrost masy. Średnia wytrzymałość na ściskanie po zakończeniu badania mrozoodporności w przypadku serii H jest mniejsza od próbek świadków o 23,3%, a serii Z o 39%. Ponadto powierzchnia próbek obu serii wykazała spękania i uszkodzenia naroży. Uznano więc, że **wszystkie badane kostki betonowe są niemrozoodporne**. Środek hydrofobowy wpłynął na opóźnienie procesu wchłaniania wody, ale nie ochronił betonu przed negatywnym wpływem ujemnej temperatury.

Podsumowanie

Wyniki badania mrozoodporności metodą powierzchniowego łuszczenia pokazały, że beton o powierzchni naturalnej nie spełnił warunku mrozoodporności (masa materiału złuszczonego większa niż 1500 g/m²). **Zastosowanie środka hydrofobowego skutkowało zmniejszeniem absorpcji kapilarnej betonu, co przełożyło się na poprawę odporności betonu na łuszczenie powierzchniowe.** Masa materiału złuszczonego próbek impregnowanych była o 85% mniejsza w porównaniu z próbkami o powierzchni naturalnej. Podobną poprawę odporności na powierzchniowe łuszczenie (90%) uzyskano w badaniach przedstawionych w artykule [9]. **Stosowanie środków hydrofobowych na bazie silanów skutkuje uszczelnieniem struktury betonu. Transport wody w porach kapilarnych i żelowych jest znacznie ograniczony, co prowadzi do zwiększenia mrozoodporności.** W porównaniu z próbkami o powierzchni naturalnej powierzchnia próbek chronionych środkiem hydrofobowym wykazała mniejszą liczbę spękań i brak uszkodzenia naroży, ale wszystkie próbki okazały się niemrozoodporne. Zaleca się przeprowadzić dodatkowe badania z wykorzystaniem innych środków dostępnych na rynku.

Literatura

- [1] Basheer Lulu, David James Cleland. 2011. „Durability and water absorption properties of surface treated concrete”. *Materials and Structures* 44: 957 – 967.
- [2] PN-EN 206:2014 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [3] PN-EN 12390-9: 2017 Badania betonu – Część 9: Oznaczanie odporności na zamrażanie i rozmrażanie w obecności soli odładzających – Złuszczenie.
- [4] PN-B-06265:2004 Krajowe uzupełnienia PN-EN 206-1:2003.
- [5] PN-EN 12390-3:2011. Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [6] PN-B-06250:1988 Beton zwykły.
- [7] Warzeńczyk Jerzy. 2017. *Metody badania i prognozowania mrozoodporności betonu*. Kielce. Politechnika Świętokrzyska.
- [8] Xiaoying Pan, Shi Zhenguo, Shi Caijun, Ling Tung-Chai, Li Ning. „A review on Surface treatment for concrete – Part 2: Performance”. *Construction and Building Materials* tom 133: 81 – 90.
- [9] Zhichao Liu, Will Hansen. 2016. „Effect on hydrophobic surface treatment on freeze-thaw durability of concrete”. *Cement and Concrete Composites* tom 69: 49 – 60.

Przyjęto do druku: 04.02.2019 r.