ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: BUDOWNICTWO z. 93 Nr kol. 1514

Daria JÓŹWIAK-NIEDŹWIEDZKA*
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie

WPŁYW SKŁADU BETONU NA USZKODZENIA POWIERZCHNI BETONOWYCH SPOWODOWANE CYKLICZNYM ZAMRAŻANIEM I ODMRAŻANIEM

Streszczenie. Tematem artykułu jest wpływ składu betonu na uszkodzenia powierzchni betonowych spowodowane cyklicznym zamrażaniem i odmrażaniem w obecności soli odladzających zgodnie ze Szwedzką Normą SS137244 (metoda Borås). Zawartość powietrza w stwardniałym betonie zmierzono wg Pr PN EN 480-11 w systemie do automatycznej analizy obrazu (program ImagePro Plus) na specjalnie przygotowanych szlifach betonowych. Wykonano i zbadano 6 mieszanek betonowych, o stałym wsppółczynniku w/c 0,4 i niezmiennej zawartości cementu 400 kg/m^3. Ilości domieszki napowietrzającej oraz superplastyfikatora były zmienne. Użyto zarówno frakcjonowanego (0,5÷2 mm), jak i typowego (0÷2 mm) piasku wiślanego.

Jedynie jeden z 6 betonów wykazał nieznaczny ubytek masy (BI – z napowietrzaczem, superplastyfikatorem oraz z piaskiem 0÷2 mm). Pozostałe betony wykonane z frakcjonowanego piasku, pomimo domieszki napowietrzającej (L=0,20 mm), nie spełniły wymagań normy. Dlatego też frakcja 0÷0,5 mm wydaje się mieć znaczącą rolę w trwałości mrozowej betonów.

INFLUENCE OF CONCRETE COMPOSITION ON DAMAGES OF CONCRETE'S SURFACES DUE TO CYCLIC FREEZING AND THAWING

Summary. The subject of the presented investigations was damage of the concrete surface due to cyclic freezing and thawing in the presence of de-icing salts tested according to the Swedish Standard SS 137244 (the Borås method). The air content in the hardened concrete specimens has been measured with ASTM C 457 method on the plane sections. The group of 6 concretes was made with constant water/cement ratio 0.4 and constant cement volume 400 kg/m^3. The contents of superplasticiser and air entertainer were different. The fractioned (0.5÷2.0 mm) and ordinary (0÷2.0 mm) sand was used. Only one concrete has shown frost resistance, that with admixtures and ordinary sand. The rest of concretes made of fractioned sand, in spite of dosage of air entertainer (L=0.20 mm), have failed the test. Therefore, the fraction 0÷0.5 seems to have a particular role in concrete durability against cyclic freezing.

1. Wstęp

W okresie zimowym warunki atmosferyczne, a co za tym idzie, i środowisko stają się bardziej agresywne dla konstrukcji z betonu cementowego. Kolejne cykle zamrażania i odmrażania powodują zarówno zewnętrzne, jak i wewnętrzne uszkodzenia w betonie. Sytu-

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Andrzej M. Brandt.

acja staje się dużo poważniejsza, jeżeli zostaną użyte sole odladzające. Mrozoodporność betonu zależy od struktury i składu, a skutki cykli zamrażania-odmrażania zależą także od intensywności działania zewnętrznych czynników: prędkości zmian temperatury oraz wypełniania porów wodą i ich wysychania. Powszechnie znany jest fakt stosowania środków napowietrzających w celu polepszenia trwałości mrozowej betonu. Rozmiary, ilość i rozmieszczenie porów są czynnikami mającymi największy wpływ na odporność betonu. A w jaki sposób wpływa skład betonu na jego uszkodzenie przy cyklicznym zamrażaniu i odmrażaniu? Próba odpowiedzi na te pytania jest treścią niniejszego referatu.

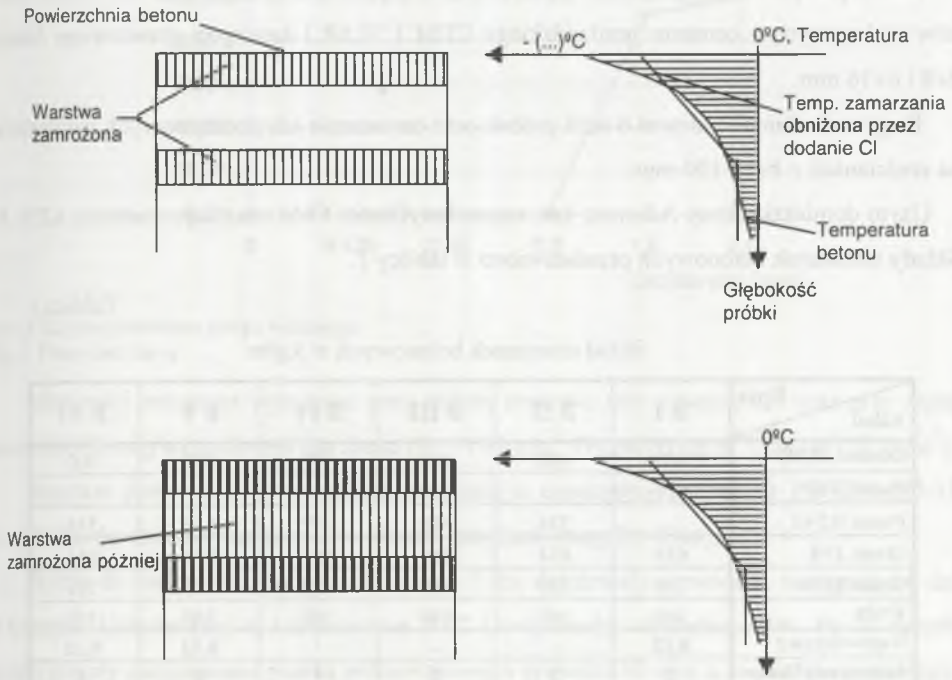
Tematem badań przedstawionych w referacie jest uszkodzenie powierzchni betonu w warunkach stosowania soli odladzających pod wpływem cykli zamrażania i odmrażania. Badania przeprowadzono wg szwedzkiej normy SS 137244 – metoda Borås.

2. Stan wiedzy

Gdy temperatura stwardniałego, nasyconego wodą betonu ulega obniżeniu, zamarzająca woda w porach kapilarnych zwiększa swoją objętość o ok. 9%. W następstwie tego zwiększania objętości „nadmiar wody" jest wypierany z porów, w których tworzy się lód, do sąsiednich porów wypełnionych powietrzem i w ten sposób następuje wyrównanie ciśnienia wewnątrz betonu. Jeśli w betonie nie ma porów wypełnionych powietrzem, to powstają duże naprężenia lokalne w momencie tworzenia się lodu i beton może ulegać spękaniu. Beton, który został uszkodzony w ten sposób, wykazuje objawy wewnętrznej ekspansji; występują w nim rozległe, głębokie rysy. Powierzchnie natomiast często nie ulegają uszkodzeniu, ponieważ są zazwyczaj bardziej suche niż partie wewnętrzne [1]. Dzieje się tak, gdy beton jest poddawany cyklom zamrażania-odmrażania w obecności wody nie zawierającej roztworów soli, jeżeli jednak mamy doczynienia ze związkami soli, to wtedy występuje zjawisko powierzchniowego łuszczenia i progresywnie postępujące pogorszenie się jakości powierzchni betonu. Następuje powolne „wyżeranie" cienkich warstwa zaczynu i następnie betonu. Po pewnej liczbie cykli zamrażania-odmrażania pierwsza warstwa jest całkowicie zniszczona i potem jest atakowana kolejna warstwa. Powtarzające się cykle zamrażania i odmrażania dają efekt kumulacyjny, powodujący uszkodzenia zapoczątkowujące niszczenie konstrukcji. Zamrażanie jest procesem powolnym, częściowo z powodu ograniczonej szybkości przenikania ciepła przez beton, częściowo w wyniku stopniowego wzrostu stężenia soli rozpuszczonych w

nie zamarzniętym jeszcze roztworze wodnym w porach. Także dlatego, że temperatura zamarzania roztworu wypełniającego pory zmienia sie w zależności od wielkości porów [3]. Przyjmuje się, że koncentracja soli w betonie maleje od powierzchni w głąb. Beton zamarza na samej powierzchni, a następnie na skutek spadku koncentracji soli przy odpowiednim spadku temperatury zamarza najpierw dolna część warstwy podpowierzchniowej. Przy dalszym ochładzaniu warstwy leżącej pomiędzy obu poprzednimi, tzn. powierzchnią a warstwą wgłębną, woda znajduje coraz mniej wolnych miejsc umożliwiających jej przepływ, co powoduje powstanie ciśnienia hydrostatycznego. Przebieg tego procesu został przedstawiony graficznie na rys. 1 [3].

Proces destrukcji mrozowej odbywa się niejako na dwóch poziomach: zewnętrznym (powierzchniowe łuszczenie) i wewnętrznym (wewnętrzne niszczenie). Niniejsza praca poświęcona jest pierwszemu z nich – powierzchniowemu niszczeniu konstrukcji betonowych.



Rys. 1. Zamarzanie warstwowe w zależności od koncentracji soli wskutek oziębienia postępującego od zewnątrz do wewnątrz [3]

Fig. 1. Layered freezing resulting from different salt concentrations with cooling proceeding from the outside inwards [3]

Porównując wybrane metody badań mrozoodporności betonu (ASTM C666, RILEM CDF, SS 137244, zmodyfikowana SNV 640 461, PN-88/B-06250) do przeprowadzenia własnych badań wybrano zalecenia szwedzkiej normy SS 137244 – metodę Borås (zakres temperatur od +20°C do –18°C, 3% roztwór NaCl, powierzchniowe zamrażanie). Badanie to jest najbardziej surową metodą określania mrozoodporności betonu. Ponadto metoda ta symuluje działanie często występujące w rzeczywistości, rodzaj zniszczenia odpowiada prawdziwym uszkodzeniom w konstrukcji, próbki pobrane do badania są duże, oszacowanie wyników jest ilościowe, pręty zbrojeniowe nie wpływają na metodę. Sprzęt potrzebny do przeprowadzenia badania i system kontrolujący są dostępne w typowym laboratorium badawczym.

3. Opis przeprowadzonych badań

3.1. Próbki i warunki badania

Celem przeprowadzonych badań było zbadanie odporności mrozowej na łuszczenie betonów wykonanych z cementu portlandzkiego CEM I 32,5R i kruszywa granitowego frakcji 2÷8 i 8÷16 mm.

Program badań obejmował 6 serii próbek oraz oznaczenie ich podstawowych parametrów na sześcianach o boku 100 mm.

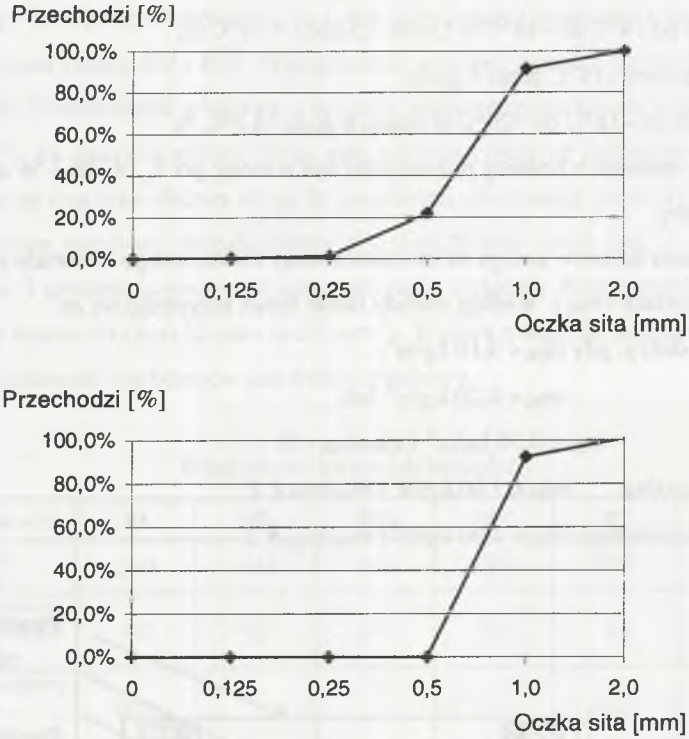
Użyto domieszki firmy Adiment, tzn. superplastyfikator FM6 oraz napowietrzacz LPS- A. Składy mieszanek betonowych przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Skład mieszanek betonowych w kg/m^3

Seria / Skład	B I	B II	B III	B IV	B V	B VI
Cement 32,5R	400	400	400	400	400	400
Piasek 0÷2	516					
Piasek 0,5÷2		516	516	516	516	516
Granit 2÷8	654	654	654	654	654	654
Granit 8÷16	739	739	739	739	739	739
Woda	160	160	160	160	160	160
Napowietrzacz	**0,12**	-	-	-	**0,12**	**0,12**
Superplastyfikator	**2**	**2**	**2**	**4**	**4**	**4**
W/C	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Do wykonania próbek betonowych BI użyto piasku wiślanego frakcji 0÷2 mm, natomiast do pozostałych (BII÷BVI) piasku frakcjonowego 0,5÷2 mm. Krzywą przesiewu piasku pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Krzywe przesiewu piasku wiślanego
Fig. 2. Fines sand curve

Mieszanki betonowe wykonano przy stałym stosunku w/c równym 0,4 oraz przy stałej zawartości kruszywa drobnego i grubego (P= 516 kg/m^3, $G_{2\div8}$=654 kg/m^3 i $G_{8\div16}$=739 kg/m^3).

Rozstaw porów L i powierzchnię właściwą α oznaczono według Pr PN EN 480-11 w systemie do automatycznej analizy obrazu (program ImagePro Plus).

Próbki do badań mrozoodporności przez 7 dni dojrzewały w wodzie, następnie 14 dni w komorze klimatycznej w temperaturze 20°C i wilgotności względnej 65%. Po 21 dniach próbki zostały zaizolowane pianką poliuretanową o grubości 30 mm, a krawędzie powierzchni przeznaczonej do badania zostały dodatkowo uszczelnione siliconem. Przez kolejne 3 dni badana powierzchnia była przykryta 3 mm warstwą wody i folią, która zapobiegała parowaniu

cieczy (rys. 3), [4]. Następnie, wodę zastąpiono 3% roztworem NaCl i próbki umieszczono w komorze zamrażalniczej.

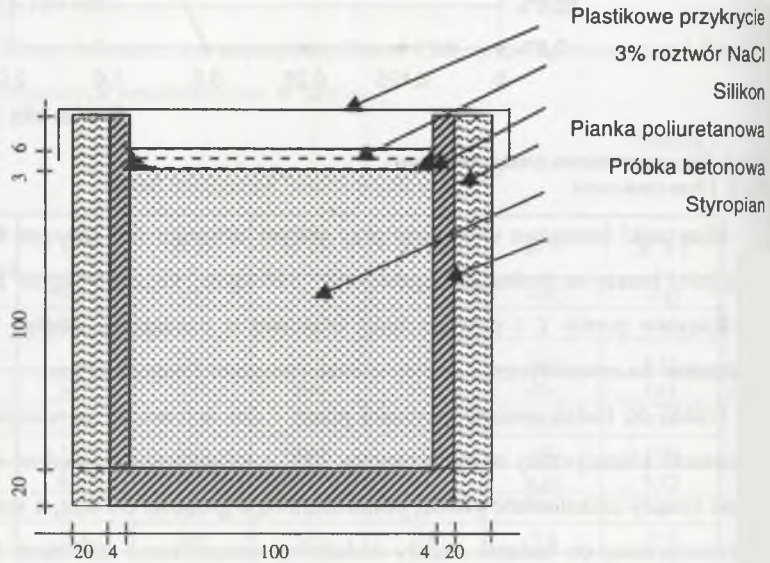
Cykle temperaturowe przedstawiały się następująco:

- zamrażanie od +20°C do –4°C w czasie 4,5 godziny=5,3°C /h,
- zamrażanie od –4°C do –18°C w czasie 7,5 godz.=1,9°C /h,
- stała temperatura –18°C przez 4 godz.,
- rozmrażanie od –18°C do +20°C w czasie 8 godz.=4,8°C /h.

Złuszczony materiał z badanej powierzchni był ważony po 7, 14, 28 i 56 cyklach. Jeden cykl trwał 1 dobę.

Wynik badania betonów polega na określeniu masy złuszczonego materiału po 28 cyklach (m_{28}) i po 56 cyklach (m_{56}). Według metody Borás beton przyjmuje się za:

- bardzo dobry: gdy $m_{56} < 0{,}10$ kg/m^2,
- dobry: $m_{56} < 0{,}20$ kg/m^2 lub
  $m_{56} < 0{,}50$ kg/m^2 i $m_{56}/m_{28} < 2$
- dopuszczalny: $m_{56} < 1{,}00$ kg/m^2 i $m_{56}/m_{28} < 2$
- niedopuszczalny: $m_{56} > 1{,}00$ kg/m^2 i $m_{56}/m_{28} > 2$



Rys. 3. Przygotowanie próbki do badania wg SS 137244 [4]
Fig. 3. Preparation of sample according SS 137244 [4]

4. Wyniki badań

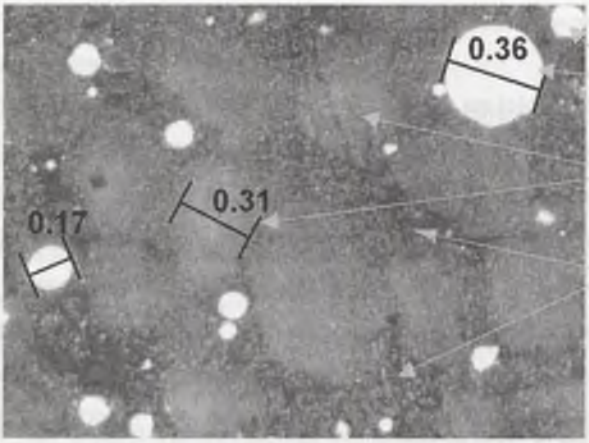
Betonami o niedostatecznej odporności na powierzchniowe łuszczenie w obecności roztworu soli okazały się wszystkie te, które były wykonane z frakcjonowanego piasku (0,5÷2 mm). Tak więc nieodpornymi betonami na cykle zamrażania i odmrażania okazały się również napowietrzone betony BV i BVI. Współczynnik rozstawu porów L wynosił odpowiednio 0,20 i 0,21 mm. Powierzchnia właściwa α betonów napowietrzonych była zróżnicowana (od 28 do 44 mm^{-1}). Im mniejsza powierzchnia, tym większa odległość pomiędzy pęcherzykami powietrza, a co za tym idzie dłuższa droga do przestrzeni zajmowanej przez wypieraną ciecz i szybsze niszczenie mrozowe. Jednak betony BV (L=0,20 mm; α=44 mm^{-1}) i BVI (L=0,21 mm; α=30 mm^{-1}) pomimo poprawnego napowietrzenia wykazały dużą i szybką utratę masy w stosunku do betonu BI (L=0,22 mm; α=28 mm^{-1}). Wynika z tego, że jedyną różnicą powodującą takie zachowanie się betonów jest frakcja piaskowa.

Tablica 2

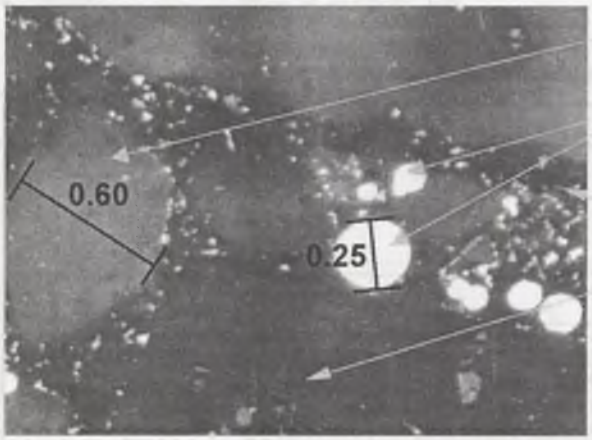
Właściwości badanych betonów

Oznaczenie serii	BI	BII	BIII	BIV	BV	BVI
Gęstość [kg/m^3]	2333	2348	2369	2351	2359	2324
Zawartość powietrza w mieszance bet. [%]	4,8	4,2	5,6	5,6	4,4	4,4
Współcz. rozstawu porów L [mm]	0,22	-	-	-	0,20	0,21
Powierzchnia właściwa α [mm^{-1}]	28	-	-	-	44	30
f_{c28} [MPa]	49,3	50,0	52,7	57,2	53,1	55,7

Na rys. 4 i 5 widać obrazy struktury wybranych dwóch napowietrzonych betonów BI i BV, uzyskane w świetle odbitym po odpowiednim przygotowaniu powierzchni i na tych obrazach wyznaczono L i α. Elementami struktury są ziarna kruszywa i piasku oraz wprowadzone przez napowietrzenie regularne pęcherzyki powietrza. Przestrzeń między tymi elementami jest wypełniona stwardniałym zaczynem cementowym. Widać różnicę struktur tych betonów, wynikającą z braku frakcji piaskowej (0÷0,5 mm) w betonie BV. Ilościowe różnice podano w tablicy 2.

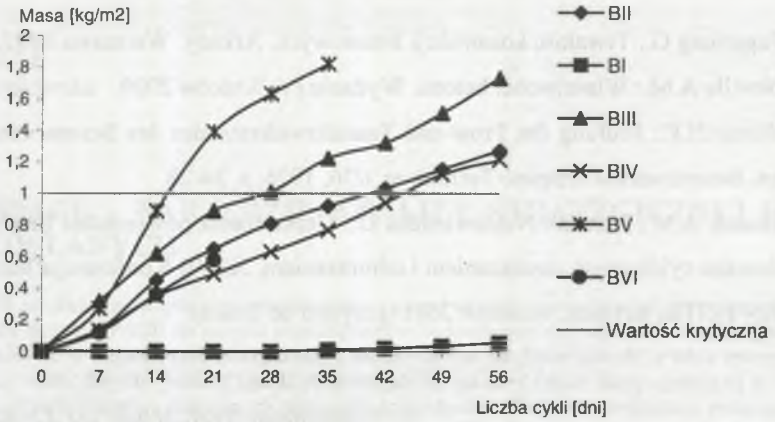


Rys. 4. Obraz struktury betonu BI przed badaniem mrozoodporności (pole widzenia 1,5 x 2,0 mm)
Fig. 4. Image of concrete structure (BI) before testing of frostresistance (field of view 1.5 x 2.0 mm)



Rys. 5. Obraz struktury betonu BV przed badaniem mrozoodporności (pole widzenia 1,5 x 2,0 mm)
Fig. 5. Image of concrete structure (BV) before testing of frostresistance (field of view 1.5 x 2.0 mm)

Już po 21 cyklach beton BV okazał się niemrozoodporny, a ubytek jego masy wyniósł 1,39 kg/m^2. Po 35 cyklach wymagań nie spełnił też beton B (1,22 kg/m^2), a po 49 cyklach betony BII (1,15 kg/m^2) i BIV (1,12 kg/m^2). Jedynie napowietrzony beton BI z frakcją piaskową 0÷2 mm wykazał tylko niewielki ubytek masy po 56 cyklach (0,06 kg/m^2). Zależność masy złuszczonego materiału od liczby przeprowadzonych cykli pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Wyniki badania mrozoodporności betonów metodą Borås
Fig. 6. Results of testing frost resistance according to the Borås method

5. Uwagi końcowe i wnioski

Wyniki badań pozwoliły na uzyskanie wskazówek dotyczących projektowania mrozoodpornego betonu. Potwierdził się pogląd, że mrozoodporność betonu w surowych warunkach, które mogą występować w klimacie Polski, określa przede wszystkim zespół czynników wewnętrznych związanych z fizyczną strukturą porowatości materiału (porowatość całkowita, średnia odległość do najbliższej pustki powietrznej *L*). Metoda Borås okazała się metodą bardzo surową, jednak beton właściwie zaprojektowany i wykonany spełnił oczekiwania i okazał się mrozoodporny.

Łuszczenie powierzchni betonu jest złożonym zjawiskiem ze względu na znaczną liczbę niezależnych czynników. Badania będą dalej prowadzone w celu lepszego zrozumienia zjawiska powierzchniowego łuszczenia powierzchni betonowych, zwłaszcza w przypadku betonów wysokowartościowych i fibrobetonów w konstrukcjach narażonych na działania klimatu Polski.

LITERATURA

1. Fagerlung G.: Trwałość konstrukcji betonowych, Arkady, Warszawa 1997.
2. Neville A.M.: Właściwości betonu, Wydanie IV, Kraków 2000.
3. Werse H.P.: Prüfung des Frost-und Tausaltzwiderstandes des Betons von Brückenkappen, Betonüwerk+Fertigteil-Technik nr 1/76, 1976, s. 24-28.
4. Brandt A.M., Jóźwiak-Niedźwiedzka D.: Uszkodzenia powierzchni betonowych spowodowane cyklicznym zamrażaniem i odmrażaniem, XLVII Konferencja Naukowa KILiW i KN PZITB, Krynica, wrzesień 2001 (przyjęto do druku).

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Leokadia Kucharska

Abstract

The subject of the presented investigations was damage of the concrete surface due to cyclic freezing and thawing in the presence of de-icing salts tested according to the Swedish Standard SS 137244 (the Borås method). The air content in the hardened concrete specimens has been measured with ASTM C 457 method on the plane sections. The group of 6 concretes was made with constant water/cement ratio 0.4 and constant cement volume 400 kg/m^3. The contents of superplasticiser and air entertainer were different. The fractioned (0.5÷2.0 mm) and ordinary (0÷2.0 mm) sand was used. Only one concrete has shown frost resistance, that with admixtures and ordinary sand. The rest of concretes made of fractioned sand, in spite of dosage of air entertainer (L=0.20 mm), have failed the test. Therefore, the fraction 0÷0.5 seems to have a particular role in concrete durability against cyclic freezing.

Pracę wykonano w ramach realizacji Programu SfP NATO 97.1888 Concrete Diagnosis.