ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: BUDOWNICTWO z. 95 Nr kol. 1559

Daria JÓŹWIAK-NIEDŹWIEDZKA*
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

WPŁYW NASĄCZONEGO KRUSZYWA LEKKIEGO NA POWIERZCHNIOWE ŁUSZCZENIE BETONÓW WYSOKOWARTOŚCIOWYCH

Streszczenie. Tematem artykułu jest wpływ kruszywa lekkiego nasączonego wodą na łuszczenie powierzchni betonowych, poddanych cyklicznemu zamrażaniu i odmrażaniu w obecności soli odladzających, badane zgodnie ze Szwedzką Normą SS 13 72 44 zwaną metodą Borås. Wykonano i zbadano sześć serii betonów o takim samym stosunku wodno/cementowym 0,35; zawartości cementu 400 kg/m^3 i zawartości superplastyfikatora 8,8 kg/m^3. Frakcja piaskowa 0÷2 mm i frakcja bazaltu 2÷4 mm były zastępowane odpowiednimi ilościami nasączonego kruszywa lekkiego (keramzytu). Tylko jeden beton S3/2 zawierał domieszkę napowietrzającą. Wszystkich sześć serii betonowych wykazało odporność na powierzchniowe łuszczenie, ale jedynie betony S3/5 i S3/6 zawierające całkowicie lub połowicznie zastąpioną frakcję 2÷4 mm nasączonym keramzytem wykazały bardzo dobrą odporność w rozumieniu normy SS 13 72 44, wyraźnie lepszą niż beton napowietrzony S3/2.

INFLUENCE OF WETTED LIGHT WEIGHT AGGREGATE ON SURFACE SCALING OF HIGH PERFORMANCE CONCRETES

Summary. The subject of the presented investigations was influence of wetted lightweight aggregate on 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 13 72 44 (the Borås method). The groups of six series of concrete specimens were made with the same water/cement ratio 0.35, the same cement volume 400 kg/m^3 and the same content of superplasticiser 8.8 kg/m^3. The fraction sand 0÷2 mm and basalt 2÷4 mm were replaced by different contents of wetted lightweight aggregate. One of concretes, S3/2, contained air-entrainer. The air content in the hardened concrete specimens has been measured with ASTM C 457 method on the plane sections. All six concretes have shown adequate scaling resistance but concretes S3/5 and S3/6, with fraction 2÷4 mm replaced completely or by half have proven adequate scaling durability in the meaning of SS 13 72 44, much better than air-entrained concrete S3/2.

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

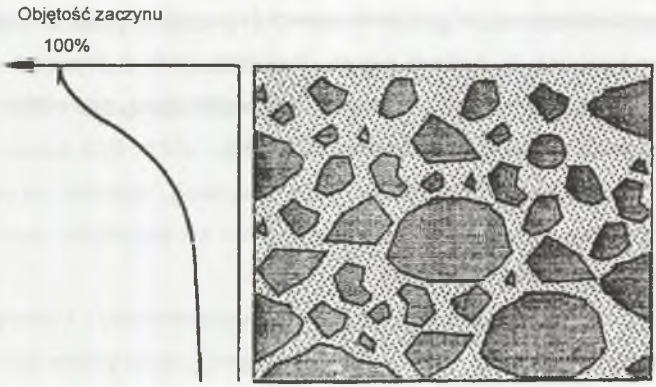
1. Wstęp

Dzięki coraz to nowszym technologiom beton udowadnia swoje rosnące możliwości, a przez obniżenie stosunku wodno-cementowego w betonach wysokowartościowych nie tylko znacznie wzrasta wytrzymałość, ale także poprawie ulega trwałość. Betony te coraz częściej są stosowane w ekstremalnych warunkach, do jakich z całą pewnością można zaliczyć silne nasycenie wodą ze środkami odladzającymi – klasa ekspozycji XF4 na nawierzchniach dróg, autostrad i na mostach. Jednakże samo zmniejszenie w/c nie gwarantuje zapewnienia trwałości, która w tym przypadku rozumiana jest jako odporność betonu na powierzchniowe łuszczenie.

Tematem referatu jest wpływ nasączonego kruszywa lekkiego (keramzytu) frakcji 0÷2 mm i 2÷4 mm na odporność powierzchni betonowych, poddanych cyklicznemu zamrażaniu i odmrażaniu w obecności soli odladzajacych.

2. Stan wiedzy

Beton jest wieloskładnikowym materiałem, w którym większość projektowanych właściwości może być uważana za proporcjonalną do wytrzymałości na ściskanie. Istnienie słabej strefy przejściowej na granicy zaczyn – kruszywo grube w betonie zwykłym jest powszechnie znane. Jednakże dopiero niedawno położono nacisk na znaczenie warstwy powierzchniowej betonu odnośnie do trwałości konstrukcji betonowych [1]. Wiadomo od dawna, że warstwa powierzchniowa ma inny skład niż warstwy położone głębiej (rys. 1), m.in. składa się przeważnie z zaczynu cementowego. Jest ona wystawiona na duże i szybkie wahania wilgoci i temperatur, a przez to na mikrospękania, co wpływa bezpośrednio na proces łuszczenia. Jak podaje Pigeon [2], wysychanie modyfikuje strukturę porów i powoduje wzrost zawartości wody zdolnej do zamarzania. Aby uniknąć odparowywania wody z powierzchni podczas dojrzewania betonu, stosuje się maty pielęgnujące lub polewa się beton wodą. W przypadku betonów wysokowartościowych opinie dotyczące pielęgnacji są jednoznaczne. Mimo zwartej struktury betonu proces odparowywania wody z warstw zewnętrznych jest szybki, a woda z otoczenia może penetrować wolno w głąb. Wobec braku „bleedingu" pielęgnacja natychmiastowa okazuje się konieczna.



Rys. 1. Schematyczny obraz zmienności zawartości zaczynu w zależności od głębokości, [2]
Fig. 1. Schematic image of the variation of paste content with the distance beneath the concrete surface, [2]

Gdy beton jest wystawiony na działanie czynników atmosferycznych – szczególnie powietrza – to występuje zjawisko parowania doprowadzające do znacznej straty wytrzymałości na ściskanie, do występowania mikrorys, do zwiększenia całkowitej porowatości oraz do pojawiania się stref porowatych dookoła kruszywa.

Aby zapewnić niezbędną ilość wody potrzebną do prawidłowego przebiegu procesu hydratacji, w badaniach [3, 4] zastosowano nasączone kruszywo lekkie, co może wyrównać skutki niezbyt starannego lub zbyt późnego nawilżania betonu na budowie. Transport wody w betonie jest zależny od jego mikrostruktury i od istniejącej różnicy wilgotności. Po rozpoczęciu procesu hydratacji w zaczynie cementowym kształtuje się system porów. Powstałe pory są znacznie mniejsze od tych znajdujących się w kruszywie lekkim. Siły kapilarne występujące w porach zaczynu cementowego są na tyle duże (siły ssące są odwrotnie proporcjonalne do promieni porów), że absorbują wodę z kruszywa lekkiego i transportują ją do „suchszych" części zaczynu, gdzie następuje reakcja z niezhydratyzowanym cementem. Powstający $Ca(OH)_2$ reaguje z pyłami krzemionkowymi, tworząc nowe produkty w postaci żelu C-S-H, które rosnąc w porach kapilarnych lub w innych dostępnych przestrzeniach, np. w mikrorysach, powodują wzrost gęstości struktury zaczynu cementowego.

Powierzchnia betonu wysokowartościowego z lekkim kruszywem jest bardziej szczelna niż powierzchnia tradycyjnego betonu wysokowartościowego [3, 4]. Im niższa jest wilgotność względna otoczenia, tym większa jest różnica pomiędzy warstwą powierzchniową i warstwami położonymi głębiej. Z powodu odparowywania wody różnica ta wzrasta

i w warstwie powierzchniowej wilgoć dostarczana z kruszywa lekkiego jest transportowana do zaczynu szybciej niż do wnętrza betonu. Ponieważ woda z kruszywa lekkiego jest chemicznie związana, struktura na powierzchni jest szczelniejsza, powodując zmniejszenie odparowywania wody i procesy dyfuzji następują wolniej.

3. Opis przeprowadzonych badań

3.1. Próbki i warunki badania

Celem przeprowadzonych badań było porównanie odporności mrozowej na łuszczenie betonów nienapowietrzonych wykonanych z kruszywem lekkim frakcji 0÷2 mm i 2÷4 mm z betonem zwykłym i napowietrzonym. Program badań obejmował wykonanie 6 serii próbek sześciennych o boku 100 mm oraz oznaczenie ich podstawowych parametrów.

Jako kruszywo lekkie zastosowano keramzyt o gęstości nasypowej 750 kg/m^3, powstały przez wypalenie łatwo pęczniejących glin w piecach obrotowych. Użyto domieszki firmy Addiment, tzn. superplastyfikator FM6 w ilości 2% oraz napowietrzacz LPS-A – 0,03% w stosunku do łącznej masy cementu i pyłów krzemionkowych. Składy mieszanek betonowych przedstawiono w tab. 1.

Tabela 1

Skład mieszanek betonowych w kg/m^3

Seria / Skład	S3/1	S3/2	S3/3	S3/4	S3/5	S3/6
Cement 42,5R	400	400	400	400	400	400
Piasek 0-2	700	700	350	466,7	700	700
Bazalt 2-4	267	267	267	267	0	133,5
Granit 4-8	267	267	267	267	267	267
Bazalt 8-16	608	608	608	608	608	608
Keramzyt 0-2	-	-	99	66	-	-
Keramzyt 2-4	-	-	-	-	67,8	33,9
Pyły krzemionkowe PK	40	40	40	40	40	40
Woda	140	140	96,8	111,2	110,4	125,2
Superplastyfikator	8,8	8,8	8,8	8,8	8.8	8,8
Napowietrzacz	0	0,13	0	0	0	0

Mieszanki betonowe wykonano przy stałym W/C=0,35 i W/(C+PK)=0,32 oraz przy stałej zawartości granitu frakcji 4÷8 mm równej 267 kg/m^3 i bazaltu frakcji 8÷16 mm równej 608 kg/m^3. Wykonano mieszanki podstawowe S3/1 – bez napowietrzacza i S3/2 z domieszką

napowietrzającą. Frakcję piaskową 0÷2 mm i frakcję bazaltową 2÷4 mm zastąpiono objętościowo keramzytem o uziarnieniu według odpowiadającej im krzywej przesiewu. W serii S3/3 i S3/4 zastąpiono odpowiednio 1/2 i 1/3 części objętości piasku keramzytem 0÷2 mm, a w seriach S3/5 i S3/6 – całą i połowę objętości bazaltu 2÷4 mm odpowiadającą mu frakcją kruszywa lekkiego. Zawartość wody dodana do mieszanki była pomniejszona o zawartość wody znajdującej się w nasączonym kruszywie lekkim przy zachowaniu stałej wartości w/c.

Rozstaw porów L i powierzchnię właściwą α oznaczono według ASTM C 457 w systemie do automatycznej analizy obrazu (program ImagePro Plus).

Próbki do badań mrozoodporności wg SS 13 72 44 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 silikonem. Przez kolejne 3 dni badana powierzchnia była przykryta 3 mm warstwą wody i folią, która zapobiegała parowaniu cieczy. Następnie, wodę zastąpiono 3% roztworem NaCl i próbki umieszczono w komorze zamrażarki. Schematyczny rysunek przedstawiający próbkę przygotowaną do badania zgodnego z wymaganiami metody Borås znajduje się w pracy [5].

Złuszczony materiał z badanej powierzchni był ważony po kolejnych siedmiu cyklach. Jeden cykl trwał jedną dobę.

W przypadku badania betonów zawierających pyły krzemionkowe procedurę kończy się po 112 cyklach. Wynik badania betonów polega na określeniu masy złuszczonego materiału po 28 cyklach (m_{28}), 56 cyklach (m_{56}) i po 112 cyklach (m_{112}). Według metody Borås beton przyjmuje się za:

- <u>bardzo dobry</u>: gdy $m_{56} < 0{,}10$ kg/m^2,
- <u>dobry</u>: $m_{56} < 0{,}20$ kg/m^2
  lub $m_{56} < 0{,}50$ kg/m^2 i $m_{56}/m_{28} < 2$
  lub $m_{112} < 0{,}50$ kg/m^2
- <u>dopuszczalny</u>: $m_{56} < 1{,}00$ kg/m^2 i $m_{56}/m_{28} < 2$
  lub $m_{112} < 1{,}00$ kg/m^2
- <u>niedopuszczalny</u>: gdy wyniki nie są zgodne z powyższymi granicami.

4. Wyniki badań

Wytrzymałość na ściskanie $f_{cm,28}$, wytrzymałość na zginanie $f_{zg,28}$, moduł sprężystości E_{dyn}, porowatość, powierzchnię właściwą α i współczynnik rozstawu porów L oznaczono po 28 dniach. Badanie odporności na powierzchniowe łuszczenie przeprowadzono zgodnie z SS 13 72 44. Wyniki są podane w tab. 2.

Tabela 2

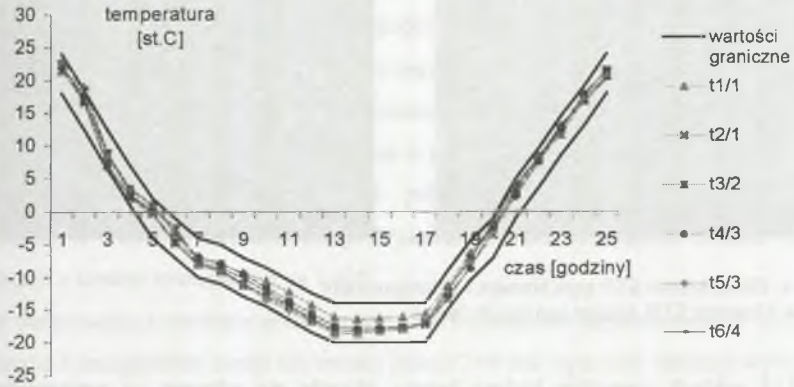
Właściwości badanych betonów

Właściwości / Oznaczenie serii	S3/1	S3/2	S3/3	S3/4	S3/5	S3/6
Gęstość [kg/m^3]	2475	2498	1959	2391	2379	2453
Nasiąkliwość [%]	2,81	3,24	4,13	3,90	4,00	2,97
Zawartość powietrza w mieszance bet. [%]	4,6	5,0	4,2	4,8	4,8	4,2
Porowatość stwardniałego betonu [%]	2,21	4,05	4,00	3,00	4,08	5,11
Współczynnik rozstawu porów L [mm]	0,30	0,37	0,24	0,33	0,29	0,28
Powierzchnia właściwa α [mm^{-1}]	22,96	13,01	20,63	17,24	17,17	16,47
$f_{cm,28}$ [MPa]	84,6	91,7	79,3	74,1	88,3	76,7
E_{dyn} [GPa]	53,6	53,2	45,9	47,1	52,9	51,9
$f_{zg,28}$ [MPa]	10	9,2	9,8	11,2	10	10,9

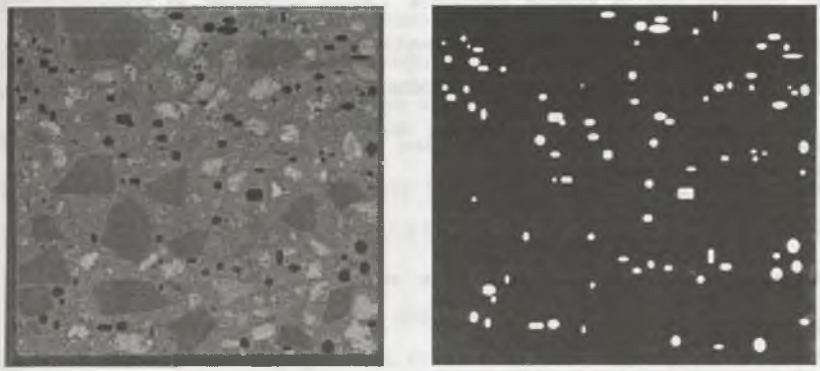
Kolejne cykle temperaturowe były mierzone i rejestrowane za pomocą zestawu LB-711 pracującego z sześcioma termoparami. Temperatury na powierzchni próbek w 3% roztworze NaCl były mierzone co godzinę. Przykład jednego z cykli temperaturowych jest przedstawiony na rysunku 2. Krzywe określone jako t1, t2, t3, t4, t5 i t6 są wynikami z kolejnych sześciu termopar umieszczonych na czterech półkach /1, /2, /3 i /4 w komorze zamrażalniczej. Widoczna jest mała różnica pomiędzy wynikami z termopar jak również pomiędzy czterema półkami w zamrażarce, a zmienność temperatury odpowiada wymaganiom metody Borås.

Na rys. 3 i 4 widać obrazy struktury wybranych dwóch betonów S3/5 i S3/3, uzyskane poprzez skanowanie po odpowiednim przygotowaniu powierzchni, a następnie zbinaryzowanie obrazu. Na obrazach typu bitmapa elementami struktury są ziarna kruszywa i piasku, a także kruszywo lekkie. Przestrzeń między tymi elementami jest wypełniona

stwardniałym zaczynem cementowym. Natomiast na zbinaryzowanych obrazach widoczne jest jedynie kruszywo lekkie, na rys. 3 keramzyt frakcji 2÷4 mm a na rys.4 frakcji 0÷2 mm.

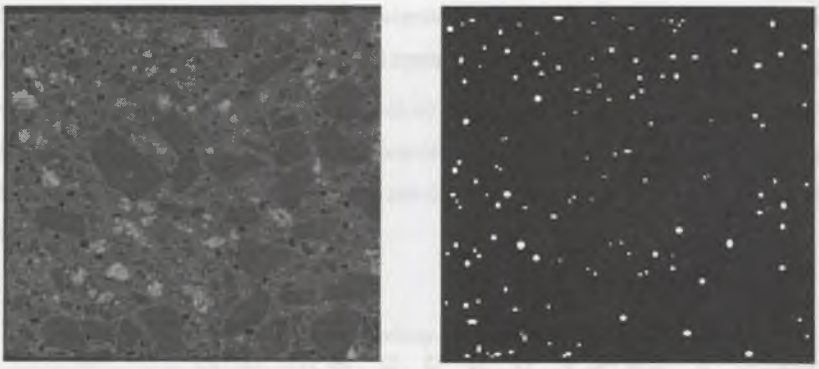


Rys. 2. Przykład pomiaru temperatury – wyniki otrzymane podczas trwania 21 cyklu
Fig. 2. Example of temperature measurements – results obtained during 21st cycle



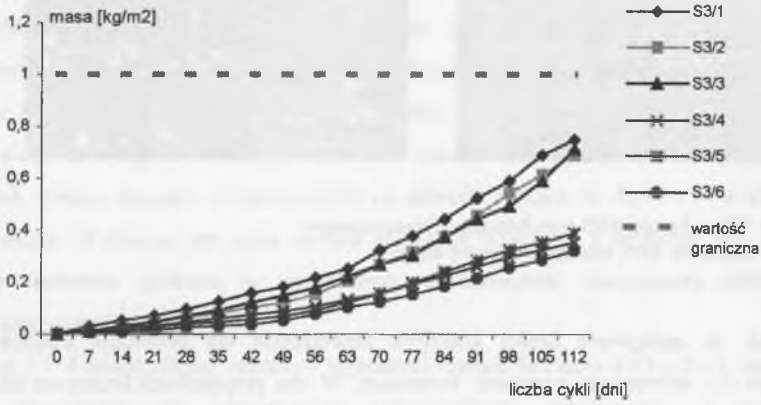
Rys.3. Obraz betonu S3/5 typu bitmapa i zbinaryzowany
Fig. 3. Concrete S3/5, bitmap and binary image

Widać, że zastąpienie części kruszywa keramzytem nie powoduje trudności przy mieszaniu czy wibrowaniu mieszanki betonowej. W obu przypadkach kruszywo lekkie jest równomiernie rozłożone w całej próbce i, co szczególnie istotne ze względu na powierzchniowe łuszczenie, znajduje się również w warstwie przypowierzchniowej.



Rys. 4. Obraz betonu S3/3 typu bitmapa i zbinaryzowany
Fig. 4. Concrete S3/3, bitmap and binary image

Po 112 cyklach wszystkie badane betony okazały się odporne na powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających. Wprawdzie betony te były wykonane w laboratorium, to jednak beton S3/2 nie został dobrze napowietrzony. Powierzchnia właściwa i współczynnik rozstawu porów wskazują, że pęcherzyki powietrzne nie zostały prawidłowo rozmieszczone w świeżej mieszance. Lepszą odporność na powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających wykazały betony z kruszywem lekkim, a szczególnie S3/5 i S3/6. Według kryterium zgodnego z SS 13 72 44 betony te uznaje się za bardzo dobre (m_{56}<0,10 kg/m^2). Zależność masy złuszczonego materiału od liczby przeprowadzonych cykli pokazano na rys. 5.



Rys.5. Wyniki badania mrozoodporności betonów metodą Borås
Fig. 5. Results of the frost resistance tested according to the Borås method

5. Uwagi końcowe i wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że wprowadzenie nasączonego wodą kruszywa lekkiego frakcji 0÷2 mm i 2÷4 mm podczas mieszania składników nie jest trudne do wykonania w przeciwieństwie do poprawnego wprowadzenia domieszki napowietrzającej. Kruszywo lekkie, keramzyt zostały rozmieszczone w całej objętości betonu i, co ważne z uwagi na powierzchniowe łuszczenie, także w górnej jego warstwie.

Pomiar temperatury na powierzchni próbek potwierdził poprawność założonych temperatur w komorze zamrażalniczej. Wykazał również nieznaczne różnice pomiędzy odczytami z sześciu termopar – max 1,6°C.

W porównaniu z betonem podstawowym S3/1 i betonem napowietrzonym S3/2 betony wykonane z zastąpieniem części lub całości frakcji 2÷4 mm wykazały zbliżoną wytrzymałość na zginanie (S3/5) lub nawet jej wzrost (S3/6). Moduł sprężystości w wyżej wymienionych betonach kształtował się podobnie. Wytrzymałość na ściskanie była wyższa od betonu podstawowego w przypadku betonu S3/5 o 4,3%, natomiast spadła o 9,3% w przypadku betonu S3/6. Najlepsze wyniki dotyczące odporności na powierzchniowe łuszczenie w obecności soli odladzających otrzymano dla betonów S3/5 i S3/6, w których zastąpiono całą lub połowę frakcji 2÷4 mm nasączonym kruszywem lekkim o takim samym uziarnieniu.

Ponieważ domieszki napowietrzające są znacznie droższe od kruszywa lekkiego, a ich stosowanie w warunkach budowy nie jest łatwe, wydaje się celowe zastępowanie części kruszywa drobnych frakcji nasączonym kruszywem lekkim w celu zapewnienia dobrej odporności na powierzchniowe łuszczenie betonu przy cyklicznym zamrażaniu i odmrażaniu w środowisku soli odladzających.

Dalsze badania tych zagadnień powinny dotyczyć innych właściwości betonów z kruszywem lekkim nasączonym wodą, m.in. ścieralności, mrozoodporności według normy PN-EN lub ASTM C 666.

Podziękowania:
Autorka dziękuje prof. Leokadii Kucharskiej za zwrócenie uwagi na stosowanie dodatku kruszywa lekkiego nasączonego wodą

LITERATURA

1. Aïtcin P-C.:Durable concrete – current practice and future trends, Concrete technology. Past, present, and future. Proeedings of V. Mohan Malhotra Symposium, ACI, Detroit 1994, SP-144, 85-99.
2. Pigeon M.: Frost resistance, a critical look, Concrete technology. Past, present, and future. Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium, ACI, Detroit 1994, SP-144, 141- 158.
3. Weber S., Reinhardt H.W.: Manipulating the water content and microstructure of HPC using autogenous curing, Modern Concrete Materials: Binders, Additions, Admixtures. Eds. R.K.Dhir, T.D.Dyer, London 1999, 567-577.
4. Weber S., Reinhardt H.W.: A new generation of high performance concrete: concrete with autogenous curing, Advanced Cement Based Materials, 1997, 6, 59-68.
5. Brandt A.M., Jóźwiak-Niedźwiedzka D.: Uszkodzenia powierzchni betonowych spowodowane cyklicznym zamrażaniem i odmrażaniem, XLVII Konferencja Naukowa KILiW i KN PZITB, Krynica, wrzesień 2001, 276-284.

Recenzent: Dr hab. inż. Wojciech Piasta

Abstract

The subject of the presented investigations was influence of wetted lightweight aggregate on 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 groups of six series of concrete specimens were made with the same water/cement ratio 0.35, the same cement volume 400 kg/m^3 and the same content of superplasticiser 8.8 kg/m^3. The fraction sand 0-2 mm and basalt 2-4 mm were replaced by different contents of wetted lightweight aggregate. One of concretes, S3/2, contained air-entrainer. The air content in the hardened concrete specimens has been measured with ASTM C 457 method on the plane sections. All six concretes have shown adequate scaling resistance but concretes S3/5 and S3/6, with fraction 2-4 mm replaced completely or by half have adequate scaling durability in the meaning of SS 13 72 44, much better than air-entrained concrete S3/2.

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