

mgr inż. Krzysztof Falkowski¹⁾

Kompozyty cementowe modyfikowane emulsją bitumiczną

*Cement composites modified by asphalt emulsion – applied research*DOI: dx.doi.org/10.15199/33.2014.12...

Streszczenie. Trwałość konstrukcji z betonów cementowych w określonych warunkach użytkowania (klasach ekspozycji) zależy głównie od odporności zastosowanego betonu na agresywne oddziaływania środowiskowe. Porowata struktura betonu sprzyja penetracji wody oraz szkodliwych substancji i sprawia, że w miarę upływu czasu pozostawiają one coraz wyraźniejsze oznaki postępującej destrukcji. Przeprowadzone przez autora badania potwierdzają, iż modyfikacja mikrostruktury betonu asfaltem w postaci anionowej emulsji bitumicznej stanowi skuteczną ochronę materiałowo-strukturalną betonów cementowych. Użyty w wyniku zastosowanej domieszki układ struktury porowatości pozwala osiągnąć znacznie mniejszą nasiąkliwość z zachowaniem dużej mrozoodporności i sprawia, że beton staje się praktycznie nieprzepuszczalny dla wody pod ciśnieniem.

Słowa kluczowe: beton, emulsja bitumiczna, odporność korozyjna betonu, porowatość, nasiąkliwość, wytrzymałość na ścislenie, trwałość, mrozoodporność.

Abstract. The sustainability of the construction made of high-strength cement concrete in specific operating conditions (display classes) mainly depends on concrete resistance on aggressive environmental effects. The porosity structure system allows the penetration of water and harmful substances causing destruction of concrete. The research carried out by the author of the paper confirms that modification of concrete microstructure by applying admixture of asphalt provides efficient protection. The porosity structure system that was obtained in examined concrete allows receive lower impregnability and higher frost resistance and makes concrete virtually impervious to liquid under pressure.

Keywords: concrete, asphalt emulsion, corrosive resistance of concrete, porosity, water permeation, compressive strength, sustainability, frost resistance.

Najczęstszym mechanizmem destrukcji betonu w krajowych warunkach klimatycznych jest korozja mrozowa spowodowana cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem wody w porach betonu w połączeniu z oddziaływaniem środków odładzających. Efektem korozji mrozowej są spękania betonu powstałe w wyniku zwiększenia objętości wody (o 9%) podczas jej zamrażania, a w rezultacie ubytek masy i spadek wytrzymałości. Beton całkowicie szczelny byłby całkowicie mrozoodporny, ale każdy beton jest materiałem porowatym [1].

Zgodnie z normą PN-EN 206-1 [2], w warunkach korozji mrozowej, szczególnie zalecane jest m.in. zmniejszenie w/c i napowietrzenie betonu. W czasie mieszania składników betonu wprowadzona domieszka tworzy zamknięte i równomiernie rozłożone pęcherzyki powietrzne w kształcie kulistym wielkości 0,01 – 0,3 mm [1]. Zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 934-2 [3] wskaźnik rozmieszczenia powinien być nie większy niż 0,2 mm, stąd minimalna ilość powietrza wg zaleceń

PN-EN 206-1 [2] wynosi 4%. W stwardniałym betonie pęcherzyki przerywają ciągłość kapilar i pełnią rolę komór kompensacyjnych, dzięki czemu zwiększają odporność materiału na działanie mrozu. Właściwe napowietrzenie betonu powoduje poprawę mrozoodporności, ale odbywa się to kosztem zmniejszenia szczelności i znacznego spadku wytrzymałości (20 – 30%) [1]. W praktyce jednak uzyskanie zalecanego napowietrzenia betonu przysparza wielu problemów i nie przesądza o jego mrozoodporności [4, 5]. Z badań obiektów mostowych realizowanych w latach 2004 – 2005 [6] wynika, że nie wszystkie betony napowietrzone spełniają wymagania mrozoodporności F150, co zgodnie z PN-88/B-06250 odpowiada przewidywanej użytkowości konstrukcji zaledwie przez okres 25 ÷ 50 lat (w strefie zmieniającego się poziomu wody lub narażonych na działanie środków rozmrażających).

Dodatkowe problemy wynikają z konieczności spełnienia obostrzonych wymagań dotyczących obniżenia nasiąkliwości ($n_w \leq 4\%$), jakie są stawiane w budownictwie komunikacyjnym. Zarówno z wyliczeń teoretycznych [7], jak również z obszernych badań na

próbkach pobranych z obiektów mostowych realizowanych w latach 2004 i 2005 na odcinku autostrady A2 [6] oraz nawierzchni drogowych wykonanych w latach 2001 – 2004 [8] wynika jednoznacznie, iż **uzyskanie $n_w \leq 4\%$ w betonach o zawartości cementu poniżej 375 kg/m³ jest praktycznie niemożliwe**. Z tego powodu zrodziła się potrzeba poszukiwania alternatywnych rozwiązań, które pozwolą sprostać stawianym wymaganiom dotyczącym mrozoodporności, nasiąkliwości i wodoszczelności betonu z zachowaniem wysokich parametrów wytrzymałościowych.

Przeprowadzone dotychczas badania wykazały, że wyraźną poprawę mrozoodporności można uzyskać w wyniku modyfikacji mikrostruktury betonu przez wprowadzenie do mieszanki betonowej dodatku asfaltu w postaci roztworu w wysokowrzącym rozpuszczalniku organicznym (pasty asfaltowej wg patentu RP nr 136449) [9]. Ponadto stwierdzono, że wibroprasowanie betonów cementowych z pastą ($p/c = 0,07$) umożliwia otrzymanie tworzywa o korzystnej strukturze porowatości i podwyższonej odporności na działanie czynników atmosferycznych

* Doktorant Politechniki Białostockiej, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska; e-mail: krzysztoffalkowski@wp.pl

[10]. Wprowadzając do mieszanki betonowej pastę bitumiczną, dochodzi do blokady połączeń między kapilarami w betonie oraz pokrycia ich powierzchni hydrofobowym materiałem organicznym, co znacznie utrudnia wnikanie w strukturę porów agresywnych jonów, takich jak NH_4^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} oraz innych substancji destrukcyjnych w stosunku do stwardniałego zaczynu cementowego [11]. Betony z pastą bitumiczną ($p/c = 0,02$), formowane przez wibrowanie z wibroprasowaniem, po 112 dniach dojrzewania stały się praktycznie nieprzepuszczalne dla jonów chlorkowych [12]. Korzystny wpływ domieszki bitumicznej, w postaci emulsji, na kształtowanie mrozo odpornej struktury betonu potwierdzają również badania strukturalne opisane w Construction and Building Materials [13].

Przebieg eksperymentu

W realizowanej pracy postawiono za cel główny wykazanie, że dzięki zastosowaniu domieszki bitumicznej w postaci anionowej emulsji oraz superplastyfikatora na bazie eterów polikarboksyłanowych można uzyskać betony o korzystnej strukturze porowatości i podwyższonej odporności na oddziaływania środowiskowe przy ograniczeniu zawartości cementu do 360 kg i jednoczesnym zmniejszeniu ilości domieszki bitumicznej do 2% w stosunku do masy cementu. Do realizacji założonego celu zaplanowano doświadczenie trójczynnikiowe i dokonano statystycznej oceny wpływu badanych czynników na właściwości fizyko mechaniczne mieszanki oraz stwardniałego (dojrzałego) betonu. Czynniki zmiennymi w badaniach były: czynnik X_1 – zawartość anionowej emulsji bitumicznej $0 \div 4$ [%]; czynnik X_2 – zawartość upłynniacza na bazie eterów polikarboksyłanowych $0 \div 1,1$ [%] oraz czynnik X_3 – stosunek w/c $0,3 \div 0,44$ [?]. Do oceny wpływu badanych czynników X_1 , X_2 , X_3 na właściwości mieszanki i betonu przyjęto funkcję obiektu badania w postaci wielomianu drugiego stopnia, co pozwoliło na określenie związków między wszystkimi wielkościami wejściowymi a wielkością wyjściową.

$$z = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3$$

Biorąc pod uwagę, że celem badania jest wyznaczenie funkcji pozwalającej

na uzyskanie pełnej informacji o obiekcie badania w przyjętych zakresach wielkości wejściowych X_k (X_k min, X_k max) oraz postać funkcji (dziesięcioelementowy wielomian drugiego stopnia) wybrano plan Hartleya PS/DS-P:Ha₃ z obszarem zmienności na hiperkuli (hK). Jest to 11-elementowy plan dla trzech wielkości wejściowych z pięcioma poziomami zmienności $0 \pm 1, \pm \alpha$, gdzie $\alpha = \pm 1,73$. Zakresy zmienności X_1 , X_2 , X_3 przyjęto na podstawie badań wstępnych, wymagań normowych i przewidywań. Wstępne badania przeprowadzono wg dziesięcioelementowego układu kwadratów łacińskich dla trzech czynników na trzech poziomach zmienności każdy.

Plany Hartleya są szczególnie efektywne, gdyż wymagają mało pomiarów. Liczba układów nieznacznie przewyższa liczbę współczynników wielomianu aproksymującego, ale to z kolei powoduje negatywne skutki w odniesieniu do niedokładności wyznaczonej funkcji obiektu badań. W związku z tym analizy przeprowadzono na wszystkich układach opisanych w tabeli 1. Łącznie uzyskano 17 układów, ponieważ 3 układy planu Ha₃ pokrywały się z 3 układami badań wstępnych. Optymalizowanymi cechami (wielkościami wyjściowymi) w eksperymencie były: konsystencja Ve-Be [s]; zawartość powietrza pp [%] i gęstość mieszanki betonowej ρ [kg/dm³] oraz wytrzymałość na ściskanie $f_{cm, 28}$ [MPa]; gęstość pozorną ρ_c [kg/dm³]; mrozo odporność

Tabela 1. Układy zastosowanego planu eksperymentu dla trzech czynników na pięciu poziomach zmienności

Układy planu		Wartości normowane			Wartości rzeczywiste		
1	1'	-1	-1	1	0,845	0,232	0,41
2	2'	1	-1	-1	3,155	0,232	0,33
3	3'	-1	1	-1	0,845	0,868	0,33
4	4'	1	1	1	3,155	0,868	0,41
5	5'=2	-1,732	0	0	0	0,55	0,37
6	6'	1,732	0	0	4	0,55	0,37
7	7'=4	0	-1,732	0	2	0	0,37
8	8'	0	1,732	0	2	1,1	0,37
9	9'	0	0	-1,732	2	0,55	0,3
10	10'=5	0	0	1,732	2	0,55	0,44
11	11'	0	0	0	2	0,55	0,37
12	1	-1,732	-1,732	-1,732	0	0	0,3
13	3	-1,732	1,732	1,732	0	1,1	0,44
14	6	0	1,732	-1,732	2	1,1	0,3
15	7	1,732	-1,732	1,732	4	0	0,44
16	8	1,732	0	-1,732	4	0,55	0,3
17	9	1,732	1,732	0	4	1,1	0,37

$\Delta f_{cm, F200}$ [%] oraz nasiąkliwość masowa n_w [%] betonu po 28 dniach twardnienia (dojrzwiania) w warunkach laboratoryjnych.

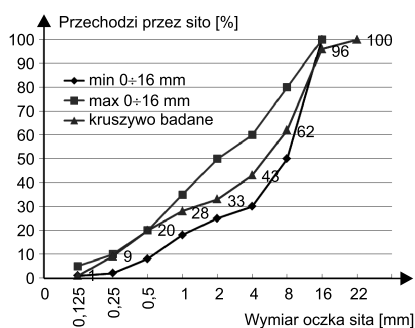
Zastosowane materiały

Uwzględniając zastosowanie badanych betonów w środowiskach silnie agresywnych XF4, XD3, XA3 przyjęto do sporządzania mieszanek cement portlandzki specjalny o wysokiej odporności na siarczany i niskiej zawartości alkaliów oraz umiarkowanym przyroście wytrzymałości. Analizę chemiczną i właściwości użytego cementu zamieszczono w tabeli 2. Cement ten spełnia

Tabela 2. Właściwości i analiza chemiczna cementu portlandzkiego specjalnego o wysokiej odporności na siarczany i niskiej zawartości alkaliów

Właściwości	Wymagania	Wyniki oznaczeń
Powierzchnia właściwa [cm ² /g]	–	3820
Początek wiązania [min]	≥60	150
Koniec wiązania [min]	–	215
Wodozadržność [%]	–	29,2
Zawartość SO ₃ [%]	≤3,5	3,12
Zawartość Cl [%]	≤0,1	0,078
Zmiana objętości [mm]	≤10	1,1
Pozostałości nierozpuszczalne [%]	≤ 5,0	0,49
Straty prażenia [%]	≤5,0	2,36
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]		
– po 2 dniach	≥ 10	23,0
– po 28 dniach	42,5 + 62,5	52,2
Zawartość Na ₂ O _{eq} [%]	≤0,6	0,46
Zawartość Al ₂ O ₃ [%]	≤5,0	3,48
Wartość ekspansji w roztworze Na ₂ SO ₄ po upływie 52 tygodni [%]	≤0,5	0,206
Zawartość C ₃ A [%]	≤3,0	1,78
Zawartość C ₄ AF + 2*C ₃ A [%]	≤20	16,94
Zawartość C ₃ S [%]	≤60	58,48

kryteria stawiane w Szczegółowych Specyfikacjach Technicznych (SST) przy realizacji obiektów drogowo-mostowych oraz wymagania aktualnie stosowanych przepisów [14, 15, 16]. Jako kruszywo zastosowano piasek płukany frakcji 0 – 2 mm oraz kruszywo łamane granitowe o uziarnieniu 2 – 16 mm. Punkt piaskowy mieszanki kruszyw wynosił 34%. Krzywą uziarnienia zastosowanego w badaniach kruszywa przedstawiono na rysunku 1. Spełniało ono



Rys. 1. Krzywa uziarnienia kruszywa 0 ÷ 16 mm zastosowanego w badaniach na tle krzywych granicznych

wymagania mrozoodporności określone w PN-EN 12620+A1:2010 [18].

Zastosowana domieszka bitumiczna w postaci anionowej emulsji asfaltowej jest produktem czystym ekologicznie, gdyż nie zawiera rozpuszczalnika, charakteryzuje się dużą zawartością bitumu (ok. 60%) i łatwością rozprowadzania w zaprawach cementowych i cementowo-wapiennych. Emulsję bitumiczną wprowadzano jako domieszkę do wody zarobowej. Dane techniczne zastosowanej emulsji zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3. Dane techniczne domieszki bitumicznej w postaci anionowej emulsji asfaltowej

Dane techniczne	
Baza	asfalt podestylacyjny o temp. mięknięcia 50 – 60 °C
Stopień rozdrobnienia	< 1 µm
Rozpuszczalnik	nie występuje
Barwa	czarna, brunatna
Konsystencja	ciekła
Gęstość	ok. 1,0 kg/dm ³
Sucha pozostałość	ok. 60%
Zakres temperatur podczas stosowania	od +4 °C
Współczynnik oporu dyfuzyjnego dla pary wodnej µ:	ok. 800
pH (w 20°C)	ok. 10

Jako domieszkę upłynniającą zastosowano superplastyfikator nowej generacji do betonów wymagających długiego czasu utrzymania konsystencji, co umożliwia produkcję trwałego betonu o dużej wytrzymałości przy bardzo niskiej wartości współczynnika wodno-cementowego. Domieszka użyta już w niewielkiej ilości powoduje znacznie lepsze zdyspersowanie cząstek cementu w porównaniu z dotychczas produkowanymi wysokowydajnymi uplyn-

niaczami. Dzięki temu powstaje jednorodny zaczyn cementowy, charakteryzujący się niewielkimi siłami tarcia wewnętrznego. Dane techniczne zastosowanej domieszki upłynniającej zamieszczono w tabeli 4.

Tabela 4. Dane techniczne superplastyfikatora na bazie eteru polikarboksyłanowego

Superplastyfikator	
Surowiec podstawowy	eter polikarboksyłanowy
Zakres stosowania	0,1 – 1,1% masy cementu
Kolor	żółtawy
Forma	ciecz
Gęstość	1,07 ± 0,02 g/cm ³
Zawartość chlorków	≤ 0,1% masy
Zawartość alkaliów	≤ 1,7% masy (Na ₂ O _{equiv})
pH (w 20°C)	6,5 ± 1,0

Badania

Receptury mieszanek zostały sporządzone przy stałej zawartości cementu – 360 kg/m³, stałych proporcjach kruszywa: piasek – 34%; grysy 2 – 8 – 28% i grysy 8 – 16 – 38% ze zmiennymi ilościami domieszki bitumicznej (0 ÷ 4%), domieszki upłynniającej (0 ÷ 1,1%) oraz wody (w/c = 0,3 ÷ 0,44). Składy 17 mieszanek na 1 m³ zestawiono w tabeli 5. Przygotowanie i badanie próbek betonowych wykonano w sposób całkowicie losowy, aby wykluczyć błąd systematyczny. Formowanie i zagęszczanie próbek o wymiarach 100 x 100 x 100 mm odbywało się

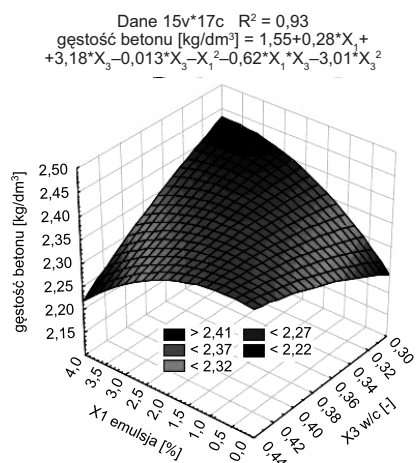
w laboratorium na stanowisku ze stółkiem wibracyjnym. W trakcie przygotowywania próbek sprawdzono konsystencję, zawartość powietrza i gęstość mieszanki betonowej. Po 28 dniach dojrzewania w warunkach laboratoryjnych zbadano gęstość, nasiąkliwość masową i wytrzymałość na ściskanie, a następnie rozpoczęto badania mrozoodporności. Po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania sprawdzono, czy próbki nie wykazują pęknięć i ubytków oraz zbadano wytrzymałość na ściskanie i porównano z próbkami świadkami niepoddawanyymi zamrażaniu. Na podstawie otrzymanych wyników dokonano analizy statystycznej i opracowano opisy matematyczne poszczególnych właściwości w zależności od wybranych czynników.

Wyniki badań i ich analiza

Z analizy wyników badań gęstości i wytrzymałości na ściskanie wynika, iż przy w/c ≤ 0,37 domieszka bitumiczna zwiększa ciężar właściwy betonu oraz jego wytrzymałość. Jest to wywołane bardziej efektywnym zagęszczeniem mieszanki na skutek uplastyczniających właściwości domieszki. Natomiast przy w/c = 0,44 odwrotnie, gęstość betonu i wytrzymałość się zmniejszała w wyniku napowietrzającego charakteru domieszki. Zależność gęstości objętościowej od zawartości domieszki bitumicznej i w/c przedstawiono na rysunku 2. Natomiast wpływ emulsji i stosunku w/c na wytrzymałość na

Tabela 5. Składy badanych mieszanek betonowych

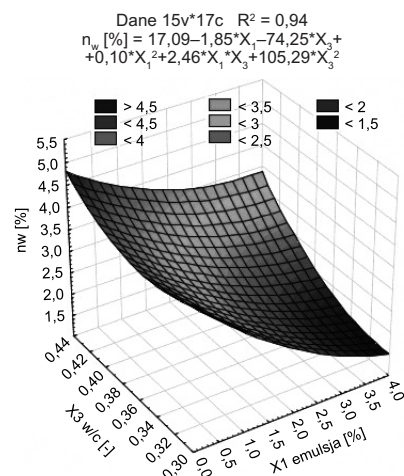
Układy planu		Ilość składników [kg/m ³]							
nr	symbol	cement	woda	emulsja	upłynniacz	piasek	grysy 2 – 8	grysy 8 – 16	kruszywo razem
1	1'	360	147,6	3,04	0,84	660	543	738	1941
2	2'	360	118,8	11,36	0,84	678	559	758	1995
3	3'	360	118,8	3,04	3,12	684	563	764	2012
4	4'	360	147,6	11,36	3,12	651	536	727	1913
5	5'=2	360	133,2	0,00	1,98	675	556	754	1984
6	6'	360	133,2	14,40	1,98	662	545	740	1946
7	7'=4	360	133,2	7,20	0,00	670	552	749	1970
8	8'	360	133,2	7,20	3,96	667	549	745	1960
9	9'	360	108	7,20	1,98	691	569	772	2032
10	10'=5	360	158,4	7,20	1,98	645	532	721	1899
11	11'	360	133,2	7,20	1,98	668	550	747	1965
12	1	360	108	0,00	0,00	699	576	781	2056
13	3	360	158,4	0,00	3,96	650	536	727	1913
14	6	360	108	7,20	3,96	689	568	770	2027
15	7	360	158,4	14,40	0,00	641	528	716	1884
16	8	360	108	14,40	1,98	684	564	765	2013
17	9	360	133,2	14,40	3,96	660	544	738	1941



Rys. 2. Gęstość betonu w zależności od zawartości emulsji (X1) i w/c (X3)

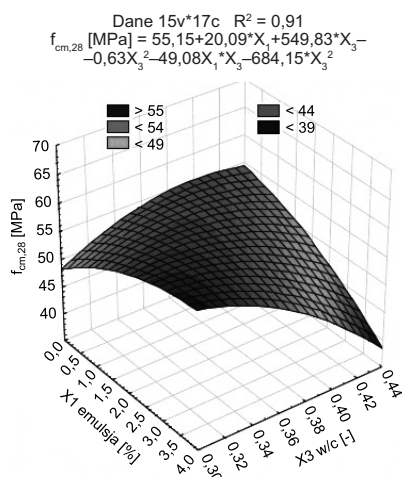
ściskanie po 28 i 120 dniach obrazowano na rysunkach 4 i 5. Wszystkie badane betony uzyskały wytrzymałość $f_{cm, 28}$ wymaganą dla betonów klasy min. C35/45.

Najbardziej wyraźny wpływ domieszki bitumicznej zaobserwowano przy badaniach nasiąkliwości. Zawartość domieszki 2% w stosunku do masy cementu spowodowała spadek nasiąkliwości do poziomu 2,53% (w/c = 0,37), zaś zawartość 4% przyczyniła się do obniżenia nasiąkliwości do 1,39% (w/c = 0,37). Uzyskanie tak niskiej nasiąkliwości wynika z hydrofobizujących właściwości domieszki bitumicznej. Zależność nasiąkliwości masowej od zawartości domieszki bitumicznej i stosunku w/c przedstawiono na rysunku 3.

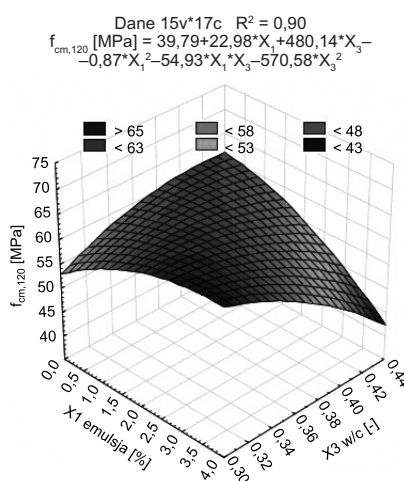


Rys. 3. Nasiąkliwość betonu w zależności od zawartości emulsji (X1) i w/c (X3)

Badania wytrzymałości po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania w temperaturze $\pm 18^\circ\text{C}$ (3 cykle na dobę) uwiarydliły korzystny wpływ domieszki bi-



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach dojrzewania w zależności od zawartości emulsji (X1) i w/c (X3)

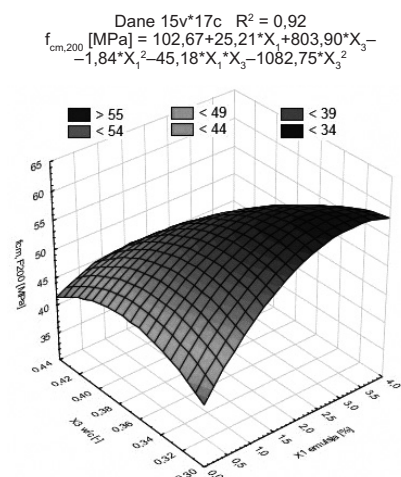


Rys. 5. Wytrzymałość na ściskanie po 120 dniach dojrzewania w zależności od zawartości emulsji (X1) i w/c (X3)

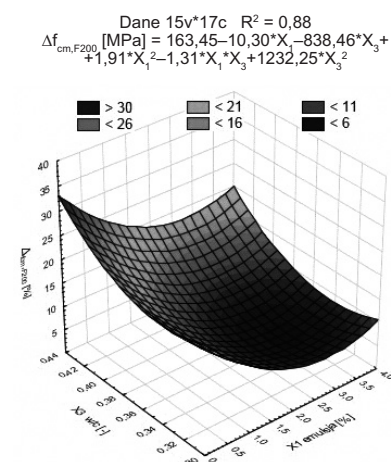
tumicznej oraz obniżenia w/c $\leq 0,37$ (rysunek 6). Podobny wniosek nasuwa się w wyniku analizy mrozoodporności F200 mierzonej spadkiem wytrzymałości próbek poddawanych zamrażaniu i świadców niezamrażanych (rysunek 7). Na szczególną uwagę zasługują składy oznaczone nr 6, 8, 9, które charakteryzowały się nieznacznym spadkiem wytrzymałości oraz nie wykazywały żadnych, nawet najdrobniejszych, rys po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania.

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych uzyskano innowacyjny materiał konstrukcyjny o zwiększonej odporności na agresywne oddziaływania środowiskowe w klasach ekspozycji XF4, XD3 i XA3 ze szcze-



Rys. 6. Wytrzymałość na ściskanie po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania w zależności od zawartości emulsji (X1) i w/c (X3)



Rys. 7. Spadek wytrzymałości po 200 cyklach zamrażania i rozmrażania w zależności od zawartości emulsji (X1) i w/c (X3)

gólnym przeznaczeniem do budownictwa komunikacyjnego, rolniczego i hydrotechnicznego. Uzyskany kompozyt cementowy odpowiada klasie betonu C35/45 i charakteryzuje się wysoką mrozoodpornością F200, małą nasiąkliwością $n_w \leq 3,0\%$, przy jednoczesnym ograniczeniu zawartości cementu do 360 kg/m³. Pozwoli to na prognozowanie co najmniej 50-letniej trwałości, definiowanej wg Eurokodu 2 [18] jako zapewnienie stanu użyteczności konstrukcji w określonych warunkach, bez istotnego obniżenia przydatności lub ponoszenia nadmiernych i nieprzewidywanych kosztów utrzymania.

Na podstawie badań kompleksowych zrealizowanych w ramach eksperymentu, ustalono optymalne receptury betonów i technologię ich wykonywania w warunkach przemysłowych,

a następnie dokonano wdrożenia podczas realizacji nawierzchni betonowej w Innowacyjnym Multimodalnym Terminalu Kontenerowo-Przeładunkowym w Wolnym Obszarze Celnym k. Tere-spola [20].

Literatura

- [1] Czarniecki L. i in.: Beton według normy PN-EN 206-1, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2004.
- [2] PN-EN 206-1:2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [3] PN-EN 934-2 Domieszki do betonu.
- [4] Jasiczak J., Ślosarczyk A., Wołowicki W.: Przypadki braku mrozoodporności betonu w nowych wiaduktach drogowych wykonanych w latach 2002 – 2012. Konferencja Dni Betonu, Wisła 2014, 871 – 880.
- [5] Jawański W.: Struktura napowietrzenia mieszanki betonowej i betonu stwardniałego a jego rzeczywista mrozoodporność. Konferencja Dni Betonu, Wisła 2014, 881 – 893.
- [6] Flaga K., Bogacka M., Maliszewicz P.: Cechy trwałościowe betonów mostowych na przykładzie obiektów mostowych autostrady A2 na odcinku Konin-Koło-Dębnie. Inżynieria i Budownictwo, nr 9/2007.
- [7] Flaga K.: O mrozoodporności betonów mostowych. Trwałość obiektów mostowych. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2012.
- [8] Analiza wybranych właściwości mieszanki betonowej i betonu stosowanego do budowy betonowych nawierzchni drogowych wykonywanych w kraju w latach 2001 – 2004. IBDiM, Warszawa 2004.
- [9] Wieczorek G. (2006). Ochrona materiałowo-strukturalna betonu przez jego modyfikację asfaltem. Konferencja Naukowo-Techniczna KONTRA 2006 „Ochrona przed korozją” nr 5, 2006, 185 – 192.
- [10] Bołtryk M., Wieczorek G., Wiszniewski J., Rutkowska W. (2010). Kształtowanie właściwości betonu modyfikowanego asfaltem na agresję chemiczną. Konferencja Naukowo-Techniczna KONTRA 2010, „Przegląd Budowlany”, nr 6/2010.
- [11] Bołtryk M., Pawluczuk E.: Properties of recycled aggregate concretes modified by asphalt paste. Modern Building Materials, Structures and Techniques. Vilnius Gediminas Technical University, 2010.
- [12] Falkowski K.: Technologia ochrony materiałowo-strukturalnej betonów cementowych w środowisku agresywnym, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2012, Vol. 3 No. 1.
- [13] Bołtryk M., Małaszkiwicz D.: Applikation of anionic asphalt emulsion as an admixture for concrete. Constuction and Building Materials 40, 2013, 556 – 565.
- [14] PN-EN 197-1:2012 Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- [15] PN-EN 19707:2013 Cement, Cement specjalny – Skład, wymagania i kryteria zgodności.
- [16] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 30 maja 2000 r. w sprawie warunków, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich użytkowanie, Dz.U. nr 151, poz. 735.
- [17] PN-EN 12620+A1:2010 Kruszywa do betonu.
- [18] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [19] Falkowski K.: Nawierzchnie betonowe silnie obciążone na przykładzie terminala kontenerowego. Konferencja Dni Betonu, Wisła 2014, 1085 – 1094.

Otrzymano 01.12.2014 r.

Autor publikacji Krzysztof Falkowski jest uczestnikiem projektu „Stypendia dla doktorantów województwa podlaskiego”, współfinansowanego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Działanie 8.2 Transfer wiedzy, Poddziałanie 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji, ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego, budżetu państwa oraz środków budżetu województwa podlaskiego.