

Wpływ ceramicznego dodatku na wielkość odkształceń reologicznych lotniskowego betonu nawierzchniowego

INFLUENCE OF CERAMIC ADDITIVE ON THE SIZE OF RHEOLOGICAL DEFORMATIONS OF AIRFIELD PAVEMENT CONCRETE

Streszczenie

W referacie przedstawiono wpływ ceramicznego dodatku na zmianę odkształceń reologicznych stwardniałego betonu. Uzyskane wyniki badań dla betonu nawierzchniowego stosowanego na lotniskach odniesiono do wyników betonu wykonanego z udziałem zaproponowanego modyfikatora. Modyfikacja składu mieszanki betonowej miała na celu podwyższenie odporności stwardniałego betonu na oddziaływanie zróżnicowanych warunków środowiskowych.

Abstract

The study focuses on the influence of ceramic additive on the change of rheological deformation of hardened concrete. Obtained test results regarding airfield pavement concrete were compared to the results of concrete composed of the suggested modifier. The aim of modification of concrete mixture composition was to increase resistance of hardened concrete to the influence of diversified environmental conditions.

1. Wprowadzenie

Konstrukcja nawierzchni lotniskowej to układ warstwowy, którego nadrzędnym celem jest przejmowanie i przenoszenie obciążeń generowanych ruchem statków powietrznych. Układ ten jednocześnie ma za zadanie zapewnić funkcjonalność użytkową w czasie założonego okresu eksploatacji. Najistotniejszą warstwą takiego układu, z punktu widzenia przenoszenia obciążenia, jest wierzchnia warstwa – tzw. warstwa jezdna. W przypadku nawierzchni lotniskowych najczęściej wykonywana jest jako jedno lub dwuwarstwowa w technologii betonu cementowego, przy założeniu pełnej współpracy pomiędzy warstwami. Parametry betonu wykorzystanego do budowy warstwy jezdnej mają więc nadrzędne znaczenie przy kształtowaniu trwałości całego układu konstrukcyjnego. Mieszankę betonową, składającą się z wielu komponentów (ziarna kruszyw, cement, woda, domieszki i dodatki), charakteryzują właściwości, które ulegają naturalnym wahaniom. Wahania te występują w trakcie produkcji oraz w czasie wbudowania mieszanki i mają podstawowe znaczenie przy kształtowaniu jej właściwości. Właściwości i zmiany mieszanki są wyznacznikiem żywotności nawierzchni. Beton cementowy stosowany na nawierzchnie lotniskowe powinien wg [16] charakteryzować się odpowiednią dla założonej klasy wytrzymałością na ściskanie, zginanie i rozciąganie przy rozłupywaniu oraz nasiąkliwością nieprzekraczającą granicznej wartości 4,8–5,0%, stopniem mrozoodporności F200 oraz odpornością na powierzchniowe złuszczenie. Istotnym czynnikiem wpływającym na uzyskiwane przez beton parametry są odkształcenia skurczowe w betonie. Beton przeznaczony do budowy nawierzchni lotniskowych, zgodny z wymaganiami [16], zawiera do 5,5% powietrza. W materiale tym w przypadku utraty wody powstają odkształcenia reologiczne, które zachodzą na skutek reakcji cementu z wodą i utożsamiane są ze skurczem. Skurcz stanowi pochodną zmian fizyko-chemicznych zachodzących w mikrostrukturze zaczynu cementowego [13]. Zjawisko skurczu w kontekście nawierzchni lotniskowych jest szczególnie niebezpieczne. Bowiem przy sprzyjających warunkach, szczególnie przy niezachowaniu reżimu technologicznego w czasie budowy obiektu, na skutek odkształceń tego typu mogą pojawiać się spękania w obrębie płyt betonowych warstwy jezdnej. Spękania takie przyczyniają się do osłabienia konstrukcji. Powstawanie naprężeń w betonie ściśle wiąże się z występowaniem samoistnego odkształcenia i zmianą wymiarów konstrukcji betonowej [12]. Na skutek skurczu ciągłe płyty betonowe pękają i tworzą układ pojedynczych fragmentów płyt pracujących, jako swobodnie podparte, na podłożu sprężystym. Spękania płyt, a szczególnie wykruszone fragmenty kompozytu betonowego mogą być również przyczyną bezpośredniego zagrożenia dla bezpieczeństwa ruchu lotniczego. Sposób napędzania statków powietrznych umożliwia bowiem zasysanie drobnych cząstek i w konsekwencji może przyczynić się do uszkodzenia lub unieruchomienia statków powietrznych.

2. Skurcz betonu w nawierzchniach lotniskowych

Zgodnie z [2, 6] powstawanie skurczu zaczynu jest potęgowane wzrostem stopnia rozdrobnienia cementu i zawartością rozpuszczalnych alkaliów.

Można wyróżnić trzy poziomy naprężeń własnych, a mianowicie makro (naprężenia termiczne i skurczowe w przekroju elementu powstają na skutek pól temperatury i wilgotności), mikro (powstają w strefach stykowych kruszywa i twardniejącego zaczynu) i submikro (powstają w strukturze tężejącej matrycy w wyniku procesów hydrolizy i hydratacji

oraz krystalizacji spoiwa cementowego) [7]. Wyróżnia się [12] dwie grupy odkształceń skurczowych, te które są wywołane nieodwracalnym zmniejszeniem objętości mieszanki (skurcz chemiczny) i te wywołane wysychaniem, czyli częściowo nieodwracalną zmianą objętości mieszanki (skurcz samoczynny, plastyczny i zewnętrzny). Zagadnienie trwałości betonu w nawierzchniach lotniskowych narażonych na zróżnicowane oddziaływania klimatyczne jest główną przyczyną przyspieszonej degradacji betonu. W konsekwencji wpływa na skrócenie czasu przydatności funkcjonalnej elementów nawierzchni przez okres projektowanego użytkowania. W odniesieniu do nawierzchni lotniskowych pojęcie trwałości odnosi się do trwałości zmęczeniowej nawierzchni wyrażonej liczbą obciążeń przejazdami statków powietrznych, które może przenieść nawierzchnia aż do momentu wyzerpania jej nośności. Czynnikiem potęgującym proces degradacji są odkształcenia skurczowe, które potęgują zakres naprężeń. W przypadku betonu w nawierzchni lotniskowej ilość wody w betonie może się zmniejszać w wyniku parowania z powierzchni betonu albo na skutek zasysania wody przez położony niżej suchy beton lub grunt. Wówczas wielkość skurczu plastycznego jest uzależniona od sztywności mieszanki, temperatury, wilgotności otoczenia i szybkości wiatru. Z uwagi na to dobór innowacyjnego składu betonu, charakteryzującego się obniżonym skurczem może przyczynić się do wydłużenia bezpiecznej pracy konstrukcji – zwiększenia jej trwałości.

3. Cel i zakres badań

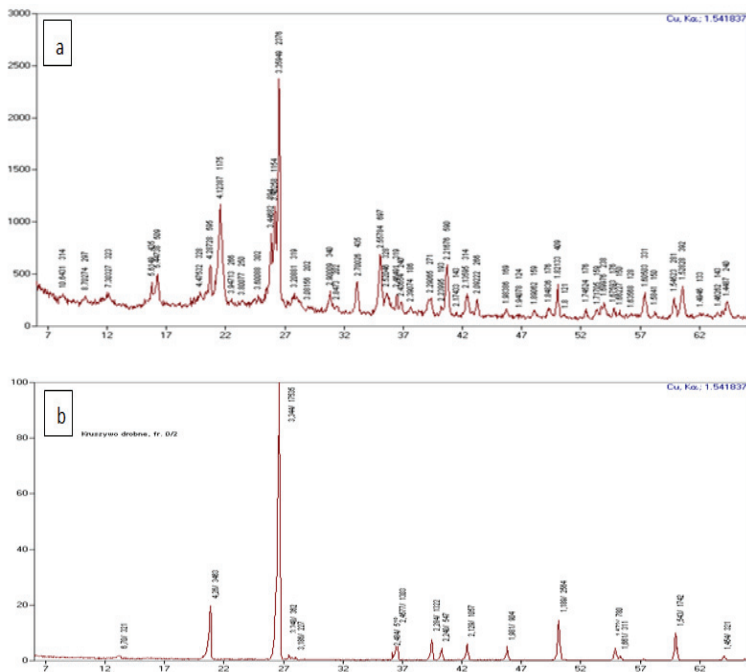
Celem badań była porównawcza ocena zmiany wielkości odkształceń reologicznych stwardniałego betonu cementowego przeznaczonego na nawierzchnie lotniskowe i zaproponowanego – modyfikowanego składu betonu nawierzchniowego. W składzie jednej z mieszanek betonowych zastosowano zamiennik części kruszywa drobnego, który wpływa na zmniejszenie podatności stwardniałego betonu na oddziaływanie podstawowych czynników eksploatacyjnych. Modyfikator ten cechuje wysoka wytrzymałość i odporność na działanie zmiennych warunków temperatury. Z uwagi na jego korzystny wpływ na podstawowe parametry stwardniałego betonu [10] oraz oddziaływanie zróżnicowanych, w tym obniżonych [9] i podwyższonych [11] temperatur spodziewano się, że zastosowany modyfikator wpłynie na wielkość rejestrowanych odkształceń skurczowych. Analizy obejmowały ocenę wpływu warunków atmosferycznych w okresie pierwszych 28 dni pielęgnacji na wartość odkształceń skurczowych.

Badaniami laboratoryjnymi objęte zostały betony klasy C40/50, przeznaczone na nawierzchnie lotniskowe. Pierwszą serię badawczą, stanowił tzw. beton referencyjny, którego skład był zgodny z wymaganiami normy [16, 17]. Beton ten oznaczono jako CC-1, a wyniki uzyskane dla tego betonu traktowane były jako wartości odniesienia. Drugą serię stanowił beton o składzie modyfikowanym, w którym część kruszywa drobnego (10,8%) zastąpiona została modyfikatorem w postaci mączki. Beton ten oznaczono jako CC-2.

Analizy wstępne wykonane na serii pierwszej i drugiej obejmowały: oznaczenie gęstości objętościowej, nasiąkliwości, wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie i wytrzymałości na rozłupywanie wg wytycznych norm [19, 20, 21, 22, 23, 24]. W badaniach zasadniczych określono wartość skurczu betonów dojrzewających przez okres 28 dni. W kolejnym etapie badawczym wyznaczono przewidywane wartości odkształceń zgodnie z wytycznymi normy [18] i porównano je z wartościami odkształceń rzeczywistych.

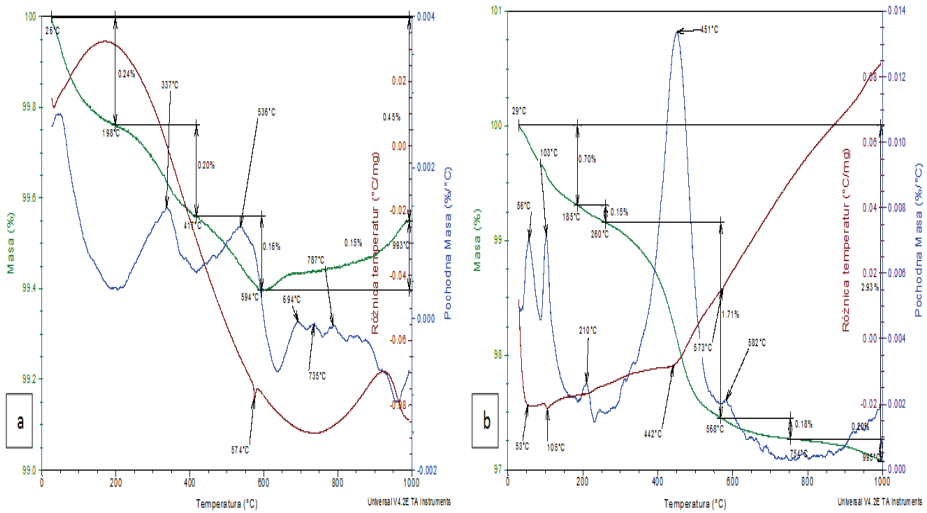
4. Materiały badawcze

Z uwagi na fakt, że dobór komponentów mieszanki betonowej ma istotny wpływ na wielkość odkształceń skurczowych przyjęto zbieżne założenia wstępne do projektowania mieszanek CC-1 i CC-2. Decydujące znaczenie na wielkość skurczu przypisuje się charakterystyce stosu okruszowego. Reaktywność zastosowanego kruszywa w stosunku do zaczynu cementowego wpływa bowiem na powstawanie defektów warstw kontaktu pomiędzy kruszywem, a matrycą cementową [7]. W analizowanych mieszankach przyjęto grys granitowy (zgodny z wymaganiami [16]) frakcji 2/8 mm, 8/16 mm i 16/32 mm w łącznej ilości 1400 kg/m³, przy udziale odpowiednio 37%, 9% i 32%. Zastosowany grys charakteryzował skurcz przy wysychaniu poniżej 0,075%. Zastosowane w mieszankach kruszywo drobne było zgodne z wymaganiami [16] i dozowane w ilości 415 kg/m³ (22%) do mieszanki CC-1 oraz 370 kg/m³ do mieszanki CC-2. W mieszance CC-2 uwzględniono modyfikator w ilości 45 kg/m³, którego skład fazowy w porównaniu do składu zastąpionego kruszywa przedstawiono na rysunku 1 i 2. W mieszankach CC-1 i CC-2 wykorzystano cement CEM I 42,5N w ilość 377 kg/m³, środek napowietrzający – 1,7 kg/m³ i domieszkę plastyfikującą w ilości 0,7 kg/m³.



Rys. 1. Skład fazowy wybranych materiałów: a) kruszywo drobne, b) modyfikator

Na podstawie analizy składu fazowego w odniesieniu do kruszywa frakcji 0/2 mm stwierdzono występowanie składników krystalicznych w postaci kwarcu i śladowych ilości skaleni. Natomiast w zastosowanym modyfikatorze występowały następujące fazy krystaliczne: kwarc, mullit, krystalalit, korund oraz śladowe ilości minerałów ilastych.



Rys. 2. Termogramy wybranych materiałów: a) kruszywo drobne, b) modyfikator

5. Metody badań

Na potrzeby opracowania odkształcenie zdefiniowano, jako różnicę długości próbki. Pomiar bazowy stanowił wymiar próbki zmierzony bezpośrednio po jej rozformowaniu. Długość ta była odnoszona do długości próbki w trakcie jej wysychania. Z uwagi na ścisłą zależność wielkości skurczu od warunków klimatycznych założono zróżnicowane warunki ciepłno-wilgotnościowe w czasie pielęgnacji betonu. Próbki przechowywane w warunkach normowych pielęgnowano od momentu rozformowania do 28 dnia w pełni zanurzone w wodzie o temperaturze 20°C. Po tym okresie próbki przechowywano w warunkach laboratoryjnych w temperaturze 20°C±2°C i wilgotności 46–64%. Analizie każdorazowo poddano odpowiednio po 6 próbek betonu serii CC-1 i CC-2 przechowywanych w takich samych warunkach środowiskowych. Założenia te na tym etapie badawczym umożliwiły pominięcie wpływu zmiennej wilgotności na wielkość odkształceń skurczowych i jednocześnie umożliwiły ocenę wpływu zastosowanego modyfikatora w składzie mieszanki CC-2 na wielkość odkształceń skurczowych. Do oznaczenia pojedynczego skurczu betonu CC-1 i CC-2 stosowano po 6 próbek zgodnych z zaleceniami normy [19], w kształcie belek o przekroju 150x150x600 mm. Zmiany długości próbek w trakcie wysychania mierzono przyrządem pomiarowym o zdolności odczytu większej niż 0,005 mm. Bezpośrednio po wyjęciu z formy, dla każdej próbki określono odległość bazową l_0 . W tym celu wykorzystano ekstensometr nasadowy i repery zlokalizowane na powierzchniach próbek. Przyrost odkształceń oznaczono w okresie od 1 do 88 dnia. Przyjęta częstotliwość wykonywania pomiarów obejmowała oznaczenia co 2 dni dla okresu z przedziału od 1 do 10 dnia (I okres badawczy), co 4 dni dla okresu od 10 do 28 dnia (II okres) oraz co 10 dni dla pozostałych dni (trzeci okres). Przyjęta procedura badawcza jest zgodna z zaleceniami instrukcji [25]. Dla każdej z analizowanych próbek po określonym czasie wyznaczono odkształcenia skurczowe ϵ_s , zgodnie ze wzorem (1), w którym l_0 oznacza początkową-bazową odległość pomiędzy punktami pomiarowymi, a l_t odległość po założonym czasie wysychania:

$$\varepsilon_s = \frac{l_o - l_t}{l_o} \quad (1) \quad [25]$$

Wybrane próbki betonu CC-1 i betonu CC-2 przeznaczono do obserwacji mikroskopowych w skaningowym mikroskopie elektronowym. Preparatyka próbek oraz interpretacja uzyskanych wyników były zgodne z opisanymi w literaturze [8, 14]. Z betonu CC-1 i CC-2 przygotowano świeże przełamy, które pokryto warstwą węgla o grubości około 10nm. Powierzchnia preparatów poddana obserwacjom w SEM wynosiła nie mniej niż 1,0 cm², a zakres stosowanych powiększeń przyjęto od 200x do 100000x[10].

Alternatywny sposób określania odkształceń skurczowych betonu CC-1 i CC-2 obejmował wyznaczenie przewidywanych wartości odkształceń zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 1992-1.

Jako wartość całkowitego odkształcenia skurczowego (ε_{cs}) przyjęto wg [18] łączną wielkość skurczu autogenicznego (ε_{cd}) i skurczu spowodowanego wysychaniem (ε_{ca}), zgodnie ze wzorem (2).

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (2) \quad [18]$$

Wartość przewidywanego skurczu od wysychania wyznaczono wg zależności (3) i (4), zgodnie z założeniami normy [18].

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85(220 + 110\alpha_{ds1}) \exp(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}}) \beta_{RH} \cdot 10^{-6} \quad (3) \quad [18]$$

Symbole we wzorze (3) są zbieżne z oznaczeniami [18], gdzie:

- f_{cm} oznacza średnią wytrzymałość betonu na ściskanie (przyjęto 59,4 MPa dla betonu CC-1 oraz 63,7MPa dla betonu CC-2)
- $f_{cm0} = 10\text{MPa}$
- a_{ds1} i a_{ds2} – współczynniki zależne od rodzaju cementu (przyjęto dla cementu klasy N współczynnik $a_{ds1} = 4$ i $a_{ds2} = 0,12$)
- RH – wilgotność względna otoczenia,
- $RH_0 = 100\%$

$$\varepsilon_{cd(t)} = \beta_{ds(t,ts)} k_h \varepsilon_{cd,0} \quad (4) \quad [18]$$

Symbole we wzorze (4) są zbieżne z oznaczeniami [18], gdzie:

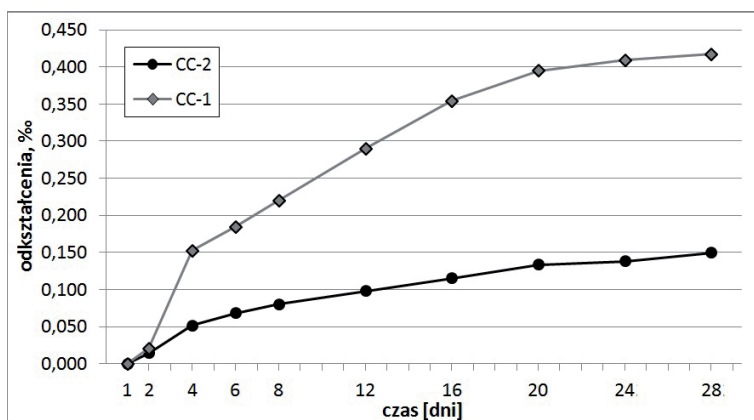
- t oznacza wiek betonu w rozważanej chwili,
- ts oznacza wiek betonu na początku procesu wysychania/pęcznienia,
- β_{ds} wyznaczono wg wzoru 3.10 normy [18]
- h_0 miarodajny wymiar przekroju (przyjęto $h_0 = 75$)
- A_c oznacza pole przekroju betonu
- u jest obwodem części przekroju wystawionej na wysychanie
- k_h jest współczynnikiem odczytanym z tab. 3.3. normy [18]

Wartość skurczu autogenicznego wyznaczono z zależności (5) wg [18]

$$\varepsilon_{ca(t)} = \beta_{as}(t)\varepsilon_{ca}(\infty) \quad (5) [18]$$

6. Wyniki badań

Na podstawie wykonanych badań odkształceń stwierdzono, że beton CC-1 pielęgnowany w temperaturze 20°C charakteryzuje odkształcenie po 28 dniach na poziomie 0,042%, podczas, gdy dla betonu CC-2 wartość ta nie przekracza 0,015% (rys. 3). Stwierdzono zróżnicowanie w przyroście odkształceń w przypadku betonu CC-1 i CC-2. Odkształcenia skurczowe w betonie CC-1 przebiegają w sposób bardziej skokowy (pierwsze 4 doby) i charakteryzują je zwiększone wahania wartości. W przypadku betonu CC-2 odkształcenia zwiększają się w bardziej stabilny sposób i w mniejszym stopniu są uzależnione od wahań wilgotności.



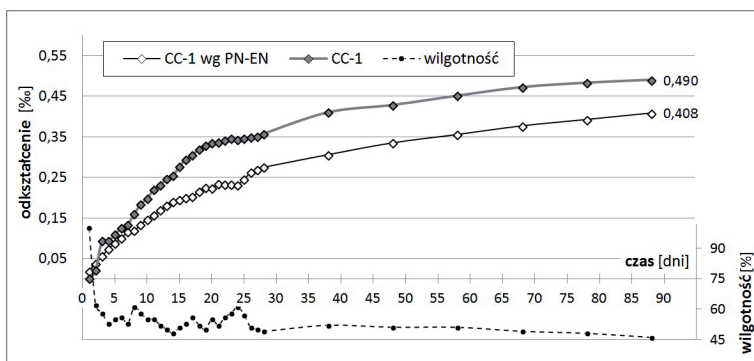
Rys. 3. Odkształcenie próbek betonu CC-1 i CC-2 pielęgnowanych w temperaturze 20°C

Rozwój odkształceń w betonie CC-1 i CC-2 (tabela 1) wykazał wyraźne zróżnicowanie. W przypadku betonu modyfikowanego we wszystkich trzech przyjętych okresach badawczych odkształcenia osiągały zdecydowanie mniejsze wartości.

Dla analizowanych betonów CC-1 i CC-2 wyznaczono zgodnie z wytycznymi normy [18] wartości przewidywanych odkształceń skurczowych. W celu porównawczej analizy uzyskanych z pomiarów odkształceń oraz wartości wyznaczonych teoretycznie zestawiono dla betonu CC-1 i betonu CC-2 odpowiednio na rysunkach 4 i 5 wartości pomierzonych oraz przewidywanych odkształceń.

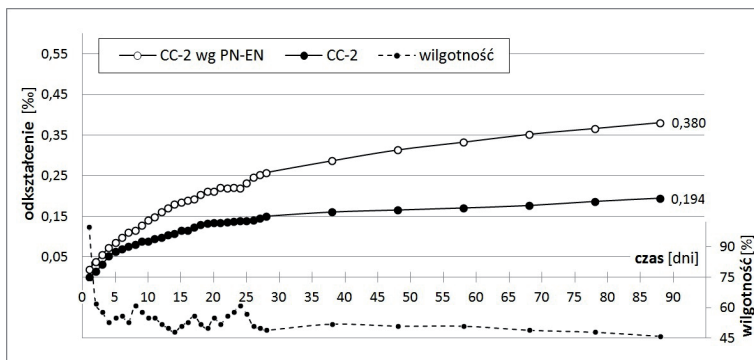
Tabela 1. Przyrost odkształceń skurczowych betonu CC-1 i CC-2 w różnych okresach badawczych

Okres	Pielęgnacja [dni]	Ilość dni [t]	CC-1			CC-2		
			$\varepsilon_p \div \varepsilon_k$ [%o]	$\varepsilon_k - \varepsilon_p$ [%o]	$\frac{\varepsilon_k - \varepsilon_p}{t}$ [%o]	$\varepsilon_p \div \varepsilon_k$ [%o]	$\varepsilon_k - \varepsilon_p$ [%o]	$\frac{\varepsilon_k - \varepsilon_p}{t}$ [%o]
I	0-10	10	0,0012 ÷ 0,0268	0,0256	0,0025	0,0004÷ 0,0088	0,0084	0,0008
II	10-28	18	0,0268÷ 0,0417	0,0149	$8,28 \times 10^{-4}$	0,0088÷ 0,0150	0,0062	$3,44 \times 10^{-4}$
III	28-88	60	0,0417÷ 0,0490	0,0073	$1,22 \times 10^{-4}$	0,0150÷ 0,0194	0,0044	$7,33 \times 10^{-5}$



Rys. 4. Odkształcenia pomierzone oraz przewidywane dla betonu CC-1

Wyznaczone odkształcenia betonu CC-1 w kontekście wartości pomierzonych wykazały najwyższe zróżnicowanie w II okresie pomiarowym. Stwierdzono, że wpływ wilgotności jest istotny i w znacznym stopniu wpływa na zwiększenie teoretycznych odkształceń względem wartości pomierzonych. Wartości przewidywanych odkształceń były zdecydowanie niższe niż wartości pomierzone doświadczalnie.

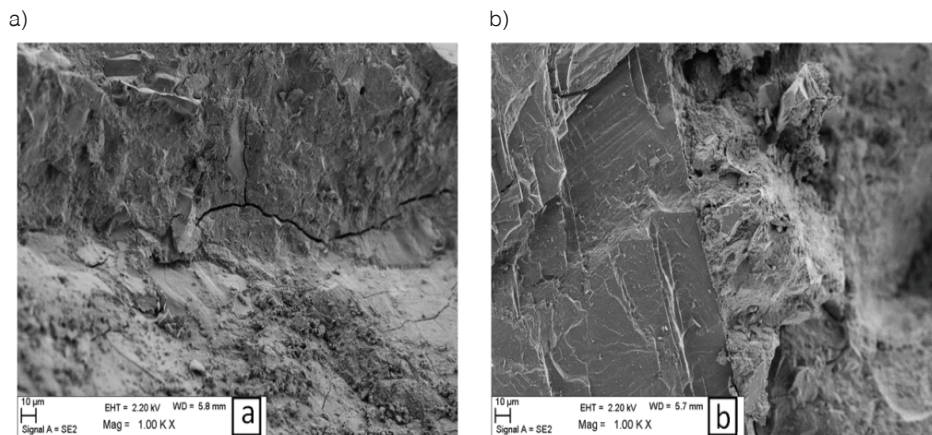


Rys. 5. Odkształcenia pomierzone oraz przewidywane dla betonu CC-2

Wartości odkształceń wyznaczone wg normy [18], we wszystkich analizowanych okresach, były wyższe niż odkształcenia uzyskane z badań laboratoryjnych. Największe zróżnicowanie wartości zarejestrowano w trzecim okresie pomiarowym. Ustabilizowanie się odkształceń w próbkach betonu CC-2 już po 28 dniach było konsekwencją korzystnego wpływu zastosowanego modyfikatora.

Z obserwacji w SEM wynika, że beton CC-1 (charakteryzujący się zdecydowanie większymi odkształceniami) ulega mikrospełniam, szczególnie intensywnie w strefie kontaktu pomiędzy ziarnem kruszywa a matrycą cementową. Na styku z kruszywem występują tabliczkowate kryształy portlandytu i drobno-ziarniste kryształy fazy C-S-H, fot. 1a.

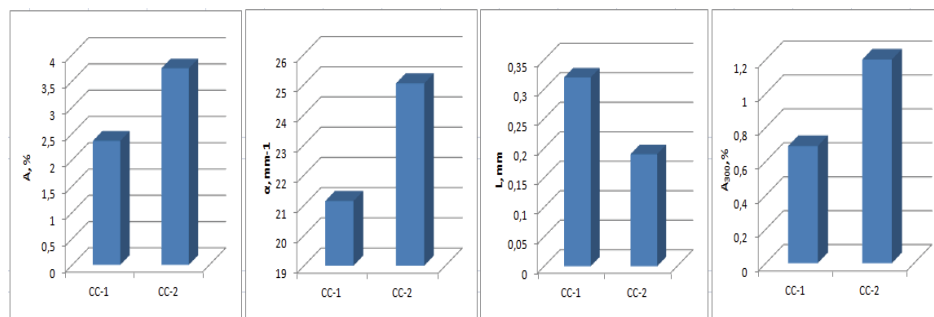
W preparatach z betonów CC-2 nie wykazano występowania mikro spleciań na styku kruszywo-matryca cementowa (fot. 1b). W budowie warstwy kontaktowej występują głównie drobno-włókniste uwodnione krzemiany wapnia o długości pojedynczego kryształu do 100 nm. W matrycy cementowej preparatów z betonów CC-2 obserwowano zdecydowanie mniej kryształów ettringitu niż w matrycy betonu CC-1.



Fot. 1. Zróżnicowanie mikrostruktury a) beton CC-1, b) beton CC-2.

Na wielkość odkształceń skurczowych istotny wpływ ma system porowatości wytworzony w strukturze wewnętrznej stwardniałego betonu. Charakterystyka porowatości, zgodnie z PN-EN 480-11:2008 – cz.11, w betonie CC-1 wykazała obecność porów o większych średnicach i zlokalizowanych w większych odległościach, względem betonu CC-2 – rys. 6. Co miało bezpośrednie przełożenie na wielkość rejestrowanych odkształceń skurczowych, bowiem duże pory powietrzne przyczyniają się do zwiększenia rejestrowanych odkształceń w przypadku betonu CC-1.

Potwierdzeniem zmian zachodzących w mikrostrukturze stwardniałego betonu są wyniki badań stwardniałego betonu. W przypadku wytrzymałości na ściskanie badane betony serii CC-1 i CC-2 wykazały zróżnicowanie. Beton CC-1 charakteryzowała średnia wytrzymałość na poziomie 59,4MPa, natomiast średnia wytrzymałość betonu CC-2 była wyższa o ponad 4MPa (średnia: 63,7MPa). Beton CC-2 charakteryzuje się równocześnie mniejszą nasiąkliwością, w porównaniu do betonu CC-1 – tabela 2. Cechy te mają istotne znaczenie przy kształtowaniu trwałości betonu cementowego w nawierzchni lotniskowej.



Rys. 6. Charakterystyka porów powietrznych w próbkach betonu CC-1 i CC-2 (oznaczenia: A – całkowita zawartość powietrza w stwardniałym betonie, α – powierzchnia właściwa systemu porów powietrznych, L – wskaźnik rozmieszczenia porów, A_{300} – zawartość mikroporów o średnicy poniżej 300 μm)

Tabela 2. Zestawienie wyników badań nasiąkliwości i wytrzymałości na ściskanie betonów CC-1 i CC-2[11]

Oznaczenie próbki	Średnia nasiąkliwość masowa, %	Średnia wytrzymałość na ściskanie, MPa
CC-1	3,98	59,4
CC-2	3,19	63,7

Wykorzystanie zaproponowanego dodatku w składzie mieszanki betonowej skutkuje poprawą uzyskiwanych przez beton parametrów mechanicznych i fizycznych. Korzystne zmiany w mikrostrukturze stwardniałego betonu mają bezpośredni wpływ na wielkość rejestrowanych odkształceń.

7. Wnioski

Wykorzystanie zaproponowanego modyfikatora w składzie mieszanki przyczynia się do:

- korzystnych zmian w mikrostrukturze stwardniałego betonu,
- poprawy parametrów mechanicznych, fizycznych i użytkowych stwardniałego betonu,
- redukcji wielkości odkształceń skurczowych w zróżnicowanych warunkach eksploatacji,
- wydłużenia okresu trwałości konstrukcji wykonanych z zaproponowanym dodatkiem.

Mniej korzystna budowa struktury wewnętrznej betonu CC-1 (liczne mikrospeknięcia w matrycy cementowej i strefach kontaktowych, rozbudowana krystalizacja ettryngitu) i niekorzystna charakterystyka porów powietrznych (duże pory zlokalizowane w znacznych odległościach od siebie) tłumaczy obniżenie parametrów mechanicznych i fizycznych tego betonu i jednocześnie wpływa na zwiększenie jego podatności na działanie odkształceń skurczowych. Odmianą strukturę wewnętrzną betonu CC-2 charakteryzują niewielkie pory powietrzne zlokalizowane w średniej odległości rzędu 18–19 nm, całkowita zawartość porowatości na poziomie 3,7% i zawartość porów o średnicach mniejszych od 300 μm rzędu 1,1%. Struktura wewnętrzna tego betonu jest ciągła, bez widocznych spękań w matrycy cementowej oraz w strefie kontaktu pomiędzy matrycą, a ziarnami kruszyw

i ziarnami modyfikatora. Stwierdzono również mniej rozbudowaną krystalizację ettryngitu (długość pojedynczych kryształów nie przekracza...) oraz odmienną budowę fazy C-S-H, wyraźnie drobnoziarnistą. Wykształcona na skutek modyfikacji zaproponowaną mączką mikrostruktura gwarantuje uzyskanie betonu charakteryzującego się niższymi odkształceniami. W przypadku betonu pielęgnowanego w temperaturze 20°C odkształcenia betonu CC-2 są blisko trzykrotnie mniejsze niż w betonie CC-1. Redukcja odkształceń, przy jednoczesnej poprawie parametrów mechanicznych i fizycznych stwardniałego betonu CC-2 oraz korzystniejszej wykształconej mikrostrukturze wskazuje na możliwość uzyskania betonów lotniskowych o zdecydowanie wyższej trwałości.

Literatura

- [1] A. Ajdukiewicz, Concrete formwork in a selectively permeable (in Polish), Polski Cement, p. 38–39, Kraków, 2001.
- [2] J. P. Bombled, 7-th ICCI Paris, t. IV, p. 756, Paryż, 1980.
- [3] H. Dondelewski, M. Januszewski, Betony cementowe, WNT, p.74, Warszawa, 2008.
- [4] Z. Jamroży, Beton i jego technologie, PWN, p. 246, Warszawa, 2009.
- [5] W. Kiernożycki, J. Borucka-Lipska, Zmiany objętości twardniejącego betonu i ich konsekwencje, Cement Wapno Beton, vol. 2, str. 19–25, Kraków, 2004.
- [6] W. Kurdowski, Chemia cementu i betonu, Polski Cement, Warszawa, 2010.
- [7] K. Flaga, Wpływ naprężeń własnych na destrukcję naprężeniową i parametry wytrzymałościowe betonu, Inżynieria i Budownictwo, nr 6, str. 315–322, 1995.
- [8] M. A. Glinicki, Trwałość betonu w nawierzchniach drogowych. Wpływ mikrostruktury, projektowanie materiałowe, diagnostyka, IBDiM, Warszawa, 2011.
- [9] M. Linek, Beton cementowy o podwyższonej trwałości na oddziaływanie obniżonych temperatur, Logistyka, 2015.
- [10] M. Linek, P. Nita, Odporność termiczna i trwałość betonowych nawierzchni lotniskowych, Logistyka, nr 6, 2014
- [11] M. Linek, P. Nita, Wpływ ceramicznego modyfikatora na wybrane charakterystyki fizyko-mechaniczne lotniskowego betonu nawierzchniowego, VII Konferencja Dni Betonu, Wisła, str. 83–92, 2012.
- [12] A. M. Neville, Właściwości betonu, Stowarzyszenie Producentów Cementu, Kraków, 2012.
- [13] W. Piasta, H. Sikora, Nasiąkliwość, wodoprzepuszczalność, wytrzymałość i odkształcenia długotrwałe betonów napowietrzonych, VII Konferencja Dni Betonu, Wisła, str. 939–948, 2012.
- [14] Praca zbiorowa: Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa, 2003.
- [15] J. J. Thomas, H. M. Jennings, A colloidal interpretation of chemical aging on the C-S-H gel and its effects on the properties of cement paste, Cement and Concrete Research, vol. 3, str. 30–38, 2006.
- [16] NO 17-A204:2015 Nawierzchnie lotniskowe. Nawierzchnie z betonu cementowego. Wymagania i metody badań.
- [17] PN-EN 206-1:2013 Beton - Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.
- [18] PN-EN 1992-1-1:2008
- [19] PN-EN 12390-1:2013 Badania betonu – Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badań i form
- [20] PN-EN 12390-2:2011 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
- [21] PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [22] PN-EN 12390-5:2011 Badania betonu – Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań.
- [23] PN-EN 12390-6:2011 Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozluźnianiu próbek do badań.
- [24] PN-EN 12390-7:2011 Badania betonu - Część 7: Gęstość betonu.
- [25] Instrukcja ITB Nr 194/98: Badania cech mechanicznych betonu na próbkach wykonanych w formach, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 1998.