



Wpływ domieszki napowietrzającej na rozwój wytrzymałości kompozytów cementowych zawierających popiół lotny

MAŁGORZATA LELUSZ, WALERY JEZIEFSKI

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska,
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45E, m.lelusz@pb.edu.pl, v.ezerskiy@pb.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki eksperymentu laboratoryjnego wpływu ilości domieszki napowietrzającej d/C , współczynnika wodno-cementowego W/C oraz czasu dojrzewania τ na wytrzymałość na ściskanie f_c próbek zapraw cementowych. Na podstawie wyników badań eksperymentalnych opracowano model matematyczny zależności oraz przeanalizowano charakter i stopień wpływu poszczególnych czynników na wytrzymałość zapraw cementowych. Ustalono, że wraz ze wzrostem ilości domieszki napowietrzającej wytrzymałość na ściskanie maleje, natomiast istnieje graniczna ilość, powyżej której dodawanie domieszki nie powoduje już obniżenia wytrzymałości.

Słowa kluczowe: budownictwo, kompozyty cementowe, napowietrzanie, popiół lotny, model matematyczny

1. Wstęp

Trwałość materiałów budowlanych jest jedną z najważniejszych cech branych pod uwagę przy ich wyborze do realizacji konstrukcji. Uszkodzenia mrozowe kompozytów cementowych najczęściej spowodowane są ich nieodpowiednim składem z powodu nieuwzględnienia warunków eksploatacji lub współzależności komponentów. Napowietrzanie jest podstawowym zabiegiem technologicznym zabezpieczającym beton przed szkodliwym działaniem mrozu [1]. Polega ono na celowym wytworzeniu w zaczynie równomiernie rozproszonych, drobnych, kulistych pęcherzyków powietrza, które w czasie zamrażania betonu są w stanie przejąć nadmiar wody wypychanej ze strefy formowania lodu.

Na jakość napowietrzenia wpływają takie czynniki materiałowe jak: rodzaj i ilość środka napowietrzającego, konsystencja mieszanki, współczynnik W/C , ilość i rodzaj cementu, dodatki mineralne, kruszywo, woda zarobowa oraz inne domieszki chemiczne [1-3].

Powszechnie stosowanym dodatkiem do kompozytów cementowych jest popiół lotny, będący ubocznym efektem spalania węgla kamiennego [4, 5]. Osiągnięcie właściwego poziomu napowietrzenia betonów zawierających popioły lotne wymaga zwiększenia ilości domieszki napowietrzającej w mieszance betonowej [6, 7]. Jednak zbyt wysokie dozowanie domieszki napowietrzającej może doprowadzić do niekontrolowanego napowietrzenia i uzyskania nieodpowiedniej struktury porów i w konsekwencji do znacznego spadku wytrzymałości betonu.

W przypadku mieszanek betonów zwykłych bez stosowania superplastyfikatorów napowietrzanie powoduje obniżenie granicy płynięcia i lepkości plastycznej mieszanki, co oznacza upłynnienie mieszanki betonowej powodujące poprawę jej urabialności. Taki wpływ domieszek umożliwia obniżenie W/C i w konsekwencji częściową redukcję spadku wytrzymałości spowodowanego napowietrzaniem [8]. Istnieje zatem konieczność uściślenia danych o współzależności składników kompozytów cementowych, takich jak cement, popiół lotny, domieszka napowietrzająca i woda, na rozwój wytrzymałości w czasie. Autorzy artykułu podjęli próbę przedstawienia tego problemu w swoich publikacjach [9, 10] i zaprezentowali wyniki badań laboratoryjnych oraz ocenili istotę i stopień wpływu wybranych składników.

Celem prezentowanej pracy jest ocena charakteru i stopnia wpływu ilości domieszki napowietrzającej, współczynnika wodno-cementowego oraz czasu dojrzewania na wytrzymałość próbek zaprawy cementowej zawierającej popiół lotny.

2. Sformułowanie problemu i wybór planu eksperymentu badawczego

Zgodnie z przyjętym celem pracy wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych f_c , MPa (odpowiedź Y) postanowiono zbadać w zależności od: ilości domieszki napowietrzającej d/C (czynnik X_1), współczynnika wodno-cementowego W/C (czynnik X_2) oraz czasu dojrzewania próbek τ (czynnik X_3).

Badanie przeprowadzono zgodnie z zasadami planowania eksperymentu. Według tych zasad został uzasadniony wybór zakresów zmienności oraz poziomów czynników, a także zastosowano ich unormowanie. Każdy z czynników rozpatrywano na trzech poziomach. Zakresy zmienności oraz poziomy czynników przedstawiono w tabeli 1. Przy wyborze zakresu zmienności czynnika X_1 jako wartość maksymalną (+1) przyjęto trzykrotną zalecaną przez producenta ilość domieszki z powodu zastosowania popiołu lotnego.

TABELA 1

Zakresy zmienności rozpatrywanych czynników X_1, X_2, X_3

Czynniki zmienne	Jednostka miary	Poziom zmienności		
		-1	0	+1
Ilość domieszki napowietrzającej (d/C), X_1	–	0	0,0015	0,0030
Współczynnik wodno-cementowy (W/C), X_2	–	0,50	0,55	0,60
Czas dojrzewania (τ), X_3	dni	28	90	180

Metody planowania eksperymentu zamiast naturalnych wartości czynników ilościowych stosują ich wartości unormowane. Przejście od wartości naturalnych $\tilde{X}_i$ do wartości unormowanych X_i wykonuje się według zależności (1):

$$X_i = \frac{\tilde{X}_i - \frac{\tilde{X}_{i \max} + \tilde{X}_{i \min}}{2}}{\frac{\tilde{X}_{i \max} - \tilde{X}_{i \min}}{2}}, \quad (1)$$

gdzie: $\tilde{X}_i, \tilde{X}_{i \max}, \tilde{X}_{i \min}$ — odpowiednio bieżące, maksymalne i minimalne wartości naturalne i -tego czynnika.

Przy unormowaniu wartości czynników uwzględniono, że jeden z nich, a mianowicie czynnik trzeci, zmieniał się nierównomiernie. W związku z tym unormowaną wartość tego czynnika (X_3) określono z zależności (2), która pozwoliła wykonać jego linearyzację:

$$X_3 = -0,000033(\tilde{X}_3)^2 + 0,02\tilde{X}_3 - 1,5348. \quad (2)$$

Zgodnie z (2) wartościom naturalnym czynnika $\tilde{X}_3 = 28, 90$ i 180 odpowiadały wartości unormowane $X_3 = -1, 0, +1$.

Przestrzeń czynnikową $Y_i = f(X_1, X_2, X_3)$ opisano za pomocą funkcji w postaci wielomianu drugiego stopnia (3), której współczynniki należało obliczyć za pomocą metody najmniejszych kwadratów.

$$\hat{Y} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2. \quad (3)$$

Wybór planu eksperymentu uwzględniał konieczność uzyskania adekwatnego opisu matematycznego rozpatrywanej funkcji celu i możliwość skrócenia liczby prób. Zastosowano plan kompozycyjny symetryczny trójpoziomowy dla trzech zmiennych zawierający $N = 14$ prób (tab. 2). W każdej próbie przyjęto powtarne

pomiary wytrzymałości na ściskanie wykonane na sześciu próbkach badawczych. Liczba powtórzeń została uzasadniona na podstawie badań wstępnych. Liczba pomiarów w eksperymencie przy sześciokrotnych powtórzeniach każdej próby wynosiła 84. Przy realizacji planu eksperymentu przestrzegano zasad randomizacji kolejności badania prób [11].

3. Metoda badań

Badania laboratoryjne zostały przeprowadzone na próbkach stwardniałych zapraw cementowych o składzie zgodnym z planem eksperymentu (tab. 2). Probki beleczki $40 \times 40 \times 160$ mm były przygotowane i badane zgodnie z PN-EN 196-1:2005. Do wykonania próbek stosowano cement portlandzki CEM I 42,5 N-HSR/NA. We wszystkich składach zapraw ilość cementu była stała i wynosiła 450 kg/m^3 . Jako domieszkę napowietrzającą zastosowano bezchlorkową domieszkę na bazie żywic naturalnych o gęstości $1,06 \text{ kg/dm}^3$ i odczynie pH 12. Do wykonania próbek zastosowano piasek płukany o uziarnieniu do 2 mm oraz popiół lotny uzyskany ze spalania węgla kamiennego w elektrociepłowni. Ilość popiołu była stała i wynosiła 33% masy cementu. Popiół lotny zawierał 0,25% wolnego CaO. Straty prażenia monitorowane przez 25 dni były mniejsze niż 4,8%. Gęstość właściwa popiołu wynosiła $2,23 \text{ kg/dm}^3$, natomiast miałkość — 23%.

4. Wyniki badań oraz ich analiza

Po przeprowadzeniu wstępnej analizy wyników badania (tab. 2) okazało się, że istnieje rozrzut wartości $\bar{Y}_i$ w poszczególnych próbkach oraz przy powtórnych pomiarach.

TABELA 2

Plan oraz wyniki eksperymentu do określenia wytrzymałości na ściskanie $\bar{Y}_i$ (f_c [MPa])
zapraw cementowych w zależności od czynników X_1, X_2, X_3

Nr serii	X_1	X_2	X_3	$\bar{Y}_i$	S_i^2
1.	-1	-1	-1	44,1	5,2
2.	+1	-1	-1	42,2	6,4
3.	-1	+1	-1	41,8	3,9
	...	...	...	...	...
12.	0	+1	0	43,7	4,7
13.	0	0	-1	47,2	6,8
14.	0	0	+1	56,6	7,1

Jednorodność rzędu wariancji poszczególnych prób $S_1^2, S_2^2, S_3^2, \dots, S_{14}^2$ sprawdzano za pomocą testu statystycznego Cochra, który przewiduje porównanie wartości obliczeniowej kryterium Cochra G_{obl} z wartością krytyczną G_{kr} . Wartość obliczeniową G_{obl} określa się według wzoru (4):

$$G_{obl} = \frac{\max \{S_i^2\}}{\sum_{i=1}^{14} S_i^2}. \quad (4)$$

Sprawdzenie jednorodności ocen wariancji powtórnych pomiarów wykazało, że przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ obliczeniowa wartość kryterium Cochra $G_{obl} = 0,194$ okazała się mniejsza od wartości krytycznej $G_{kr}^{0,05;5;14} = 0,232$ [11]. Można więc uważać, że wariancje prób są jednorodne. W takim przypadku wariancję generalną eksperymentu można obliczać jako średnią wartość z wariancji poszczególnych prób według wzoru (5):

$$S_0^2 = \left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum_{i=1}^{14} S_i^2. \quad (5)$$

Ustalono, że przy liczbie stopni swobody $\nu = 70$ wyniosła ona 5,23. Przyjęto jednakową wartość wariancji w całym obszarze przestrzeni czynnikowej analizowanej funkcji celu.

Na podstawie wyników eksperymentu przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów opracowano model matematyczny (6), który po usunięciu współczynników nieistotnych (a_{12} i a_{23}) otrzymał postać:

$$\hat{Y} = 52,31 - 3,07X_1 - 1,33X_2 + 5,13X_3 - 1,38X_1X_3 + 1,21X_1^2 - 6,39X_2^2 - 3,59X_3^2. \quad (6)$$

Do oceny istotności współczynników równania regresji użyto testu z wykorzystaniem kryterium t-Studenta [11]. Przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$. Wariancje współczynników regresji $S_{a_i}^2$ obliczono według wzoru (7):

$$S_{a_i}^2 = c_{ii} \cdot S_0^2, \quad (7)$$

gdzie: c_{ii} — diagonalny element macierzy kowariancyjnej.

Porównanie obliczeniowych wartości t_i z wartością tabelaryczną $t_{\alpha,f}$ umożliwiło sprawdzenie hipotezy o istotności statystycznej współczynników regresji a_i . Wartość obliczeniową kryterium t_i wyznaczano według wzoru (8):

$$t_i = \frac{|a_i|}{\sqrt{S_{a_i}^2}}. \quad (8)$$

Zgodnie z kryterium t-Studenta hipotezę o nieistotności współczynników a_i odrzuca się z prawdopodobieństwem $p = 1 - \alpha$, jeśli wartość obliczeniowa t_i jest większa od odpowiedniej wartości tabelarycznej $t_{\alpha, f}$.

Adekwatność uzyskanego modelu matematycznego sprawdzono, stosując test wykorzystujący kryterium Fishera F [11]. Obliczeniową wartość tego kryterium określono za pomocą wzoru (9):

$$F_{\text{obl}} = \frac{m \cdot \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2}{S_0^2 \cdot (N - (k + 1))}, \quad (9)$$

gdzie: $\sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - \bar{Y}_i)^2$ — suma kwadratów odchyłeń wartości $(\hat{Y}_i)$ obliczonych z modelu (6) oraz uzyskanych jako średnie $(\bar{Y}_i)$ z pomiarów w eksperymencie;
 m — liczba powtórnych pomiarów w każdej próbie;
 N — liczba prób w eksperymencie;
 $k + 1$ — liczba istotnych współczynników w modelu (6).

Obliczeniową wartość F_{obl} uzyskanego modelu porównano z tabelaryczną wartością krytyczną F_{α, f_1, f_2} , dla której stopnie swobody wynosiły:

$$f_1 = N - (k + 1) = 14 - 8 = 4; \quad f_2 = N (m - 1) = 14 (6 - 1) = 70.$$

Sprawdzenie wykazało, że $F_{\text{obl}} = 1,6035$ oraz przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wartość obliczeniowa kryterium F jest mniejsza od wartości krytycznej $F_{0,05; 4; 70} = 2,51$. Potwierdza to adekwatność i efektywność otrzymanego równania regresji oraz jego przydatność dla dalszej analizy wpływu czynników.

5. Interpretacja wyników badania

Wpływ rozpatrywanych czynników analizowano na podstawie równania regresji (6). Największy wpływ na wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej wykazał czynnik X_3 — czas dojrzewania. Określono dodatni liniowy i ujemny kwadratowy efekt tego czynnika. Oznacza to, że ze wzrostem wartości czynnika X_3 rośnie wartość Y , jednakże wpływ ten nie jest równomierny w całym badanym zakresie zmiany tego czynnika. Ustalono, że przy zmianie X_3 od -1 do 0 wytrzymałość Y wzrasta o 20%. Natomiast przy zmianie X_3 od 0 do $+1$ Y wzrasta już tylko nieznacznie, tzn. o około 3,5%. Stwierdzono również ujemny efekt wspólnego oddziaływania czynników $X_1 X_3$. Wynika z tego, że stopień wpływu czasu

dojrzwiania próbek na ich wytrzymałość zmniejsza się przy zastosowaniu większej ilości domieszki napowietrzającej, ponieważ wpływ ilości domieszki wydaje się być co raz bardziej znaczący.

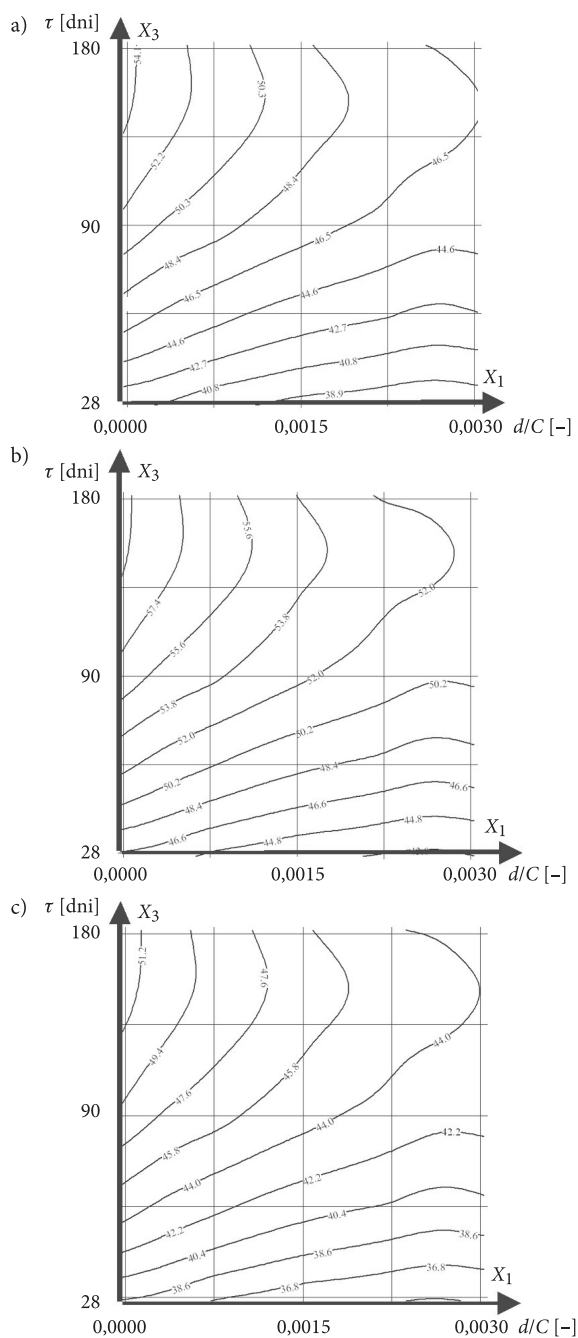
Na drugim miejscu pod względem stopnia wpływu na wartość Y znalazł się czynnik X_1 — ilość domieszki napowietrzającej d/C . Stwierdzono ujemny liniowy i niewielki dodatni kwadratowy efekt tego czynnika. Wynika z tego, że ze wzrostem ilości domieszki X_1 od -1 do 0 wytrzymałość Y próbek maleje o około 7,6%, natomiast przy zwiększeniu od 0 do $+1$ maleje o 3,3%. Wykryty wyżej efekt wspólnego oddziaływania czynników X_1X_3 w stosunku do czynnika X_1 świadczy o tym, że stopień wpływu ilości domieszki napowietrzającej na uzyskiwaną wytrzymałość badanych próbek wzmacnia się wraz z ich wiekiem.

Najmniejszy stopień wpływu, z uwzględnieniem przyjętego w badaniu zakresu jego zmiany (od 0,5 do 0,6), wykazał czynnik X_2 — współczynnik wodno-cementowy W/C . Zidentyfikowano ujemny efekt liniowy i ujemny efekt kwadratowy czynnika X_2 , które oznaczają, że ze wzrostem wartości W/C wytrzymałość Y zmienia się bardzo nierównomiernie. Przy zmianie W/C od 0,5 do 0,54 Y wzrasta o 10,9%, natomiast przy dalszej zmianie W/C do 0,60 Y spada o 16,5%. Stopień wpływu tego czynnika jest bezpośrednio związany z zakresem jego zmienności.

Przestrzeń czynnikową zbadano na występowanie ekstremum. Okazało się, że wytrzymałość na ściskanie osiąga maksymalną wartość 59,61 MPa przy następujących warunkach: $X_1 = -1$; $X_2 = -0,1$; $X_3 = +0,90$; w odniesieniu do wartości naturalnych to znaczy: próbki bez domieszki napowietrzającej przy $W/C = 0,54$ oraz po 170 dniach dojrzwiania. Minimalną wartość wytrzymałości na ściskanie 35,28 MPa uzyskano przy $X_1 = +0,7$; $X_2 = +1$; $X_3 = -1$; tj. przy zawartości domieszki 0,0026 w stosunku do masy cementu oraz przy $W/C = 0,60$ i po 28 dniach dojrzwiania próbek.

Graficzną interpretację wyników eksperymentu pokazano na rysunku 1. Analizowano zależność wytrzymałości na ściskanie (Y) od ilości domieszki napowietrzającej (X_1) i czasu dojrzwiania (X_3) dla różnych (X_2) tzn. $W/C = 0,50$ (rys. 1a), $W/C = 0,55$ (rys. 1b) i $W/C = 0,60$ (rys. 1c).

Analizując rysunek 1a), można stwierdzić, że wraz ze wzrostem ilości domieszki napowietrzającej obniża się wytrzymałość zapraw cementowych zawierających popiół lotny. Zmiana ilości środka napowietrzającego z $d/C = 0$ na $d/C = 0,003$ spowodowała średnie obniżenie wytrzymałości o około 12%. Wpływ domieszki zaznacza się wyraźniej przy dłuższym czasie dojrzwiania. Przy zawartości domieszki $d/C = 0,0015$ wytrzymałość na ściskanie próbek zaprawy o $W/C = 0,5$ wzrasta wraz z wydłużaniem czasu dojrzwiania o ponad 27%. Po 150 dniach osiąga maksimum i dalsze wydłużanie czasu twardnienia praktycznie nie ma wpływu na wzrost wytrzymałości badanych zapraw.



Rys. 1. Zależność wytrzymałości na ściskanie Y (f_c , MPa) próbek zaprawy cementowej od ilości domieszki napowietrzającej X_1 i czasu dojrzewania X_3 o współczynniku wodno-cementowym: (a) $W/C = 0,50$; (b) $W/C = 0,55$ i (c) $W/C = 0,60$

Największe obniżenie wytrzymałości spowodowane obecnością środka napowietrzającego zaobserwowano przy zawartości domieszki $d/C = 0,0026$, natomiast dalsze zwiększanie jego ilości nie miało już w zasadzie wpływu na wytrzymałość próbek zaprawy. Wytrzymałość prawdopodobnie dalej się zwiększa, jednak wzrost jest nieznaczny i w rozpatrywanym zakresie zmiany tego czynnika mieścił się w granicach błędu pomiaru.

Analizując rysunek 1b), można zauważyć, że wytrzymałość na ściskanie próbek zaprawy o $W/C = 0,55$ zmienia się podobnie jak w przypadku próbek o $W/C = 0,50$. Oznacza to, że w zakresie zmiany ilości domieszki d/C od 0 do 0,003 oraz przy $\tau = 90$ dni wytrzymałość maleje o prawie 11%. Jednak próbki zaprawy zawierającej popiół lotny o $W/C = 0,55$ osiągały wytrzymałości średnio o 10,7% wyższe niż próbki o $W/C = 0,50$. Również w tym wypadku największy spadek wytrzymałości spowodowany obecnością środka napowietrzającego zaobserwowano przy zawartości domieszki $d/C = 0,0026$. Wraz z wydłużaniem czasu dojrzewania z 28 do 150 dni średnia wytrzymałość próbek z domieszką w ilości $d/C = 0,0015$ wzrosła o 24%.

Z rysunku 1c) wynika, że wytrzymałość na ściskanie próbek zaprawy o $W/C = 0,60$ zmienia się podobnie jak w przypadku próbek o $W/C = 0,50$ i $W/C = 0,55$. Jednak średnie wytrzymałości okazały się mniejsze odpowiednio o 5,6% i o 14,8% i jest to potwierdzenie wpływu W/C na wytrzymałość kompozytów cementowych. W tym wypadku również wraz z wydłużaniem czasu dojrzewania z 28 do 150 dni średnia wytrzymałość próbek z domieszką w ilości $d/C = 0,0015$ wzrastała. Wzrost ten był największy i sięgał 29,4%. Natomiast w zakresie zmiany ilości domieszki d/C od 0 do 0,003 oraz przy $\tau = 90$ dni wytrzymałość zmalała o 12,6%.

Wymagania aktualnej normy PN-EN 934-2 dotyczące wytrzymałości na ściskanie przy stosowaniu domieszek napowietrzających ograniczają się do sprawdzenia, czy zastosowanie domieszki nie spowoduje zmniejszenia wytrzymałości betonu po 28 dniach dojrzewania o więcej niż 25% w stosunku do betonu kontrolnego. Z przedstawionych w artykule badań wynika, że zmniejszenie wytrzymałości zaprawy z powodu zastosowania domieszki napowietrzającej było bardziej znaczące w późniejszym niż 28 dni wieku próbek i ustabilizowało się po około 150 dniach dojrzewania.

6. Wnioski

Uzyskane wyniki badań oraz ich analiza pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- wytrzymałość na ściskanie próbek zaprawy cementowej zawierającej popiół lotny w ilości 33% masy cementu przy dodawaniu domieszki napowietrzającej w ilości od 0 do 0,0026 w stosunku do masy cementu zmalała o około 12%, zaś przy zawartości domieszki od 0,0026 do 0,0030 wytrzymałość

- praktycznie się nie zmieniała; wpływ tego czynnika rósł wraz z wydłużaniem czasu dojrzewania próbek;
- wydłużenie czasu dojrzewania z 28 do 150 dni spowodowało istotny wzrost wytrzymałości próbek z zaprawy o $W/C = 0,6$ — o 29,4%; dalsze wydłużanie czasu dojrzewania nie skutkowało już podwyższeniem wytrzymałości na ściskanie;
 - zwiększenie wartości W/C z 0,5 do 0,54 doprowadziło do wzrostu średnio-nej wytrzymałości próbek zaprawy o 10,9%, natomiast dalsze podwyższanie współczynnika W/C od 0,54 do 0,60 powodowało obniżenie wytrzymałości aż o 16,5%;
 - w rozpatrywanym obszarze przestrzeni czynnikowej wytrzymałość na ściskanie próbek zaprawy cementowej zawierającej 33% m.c. popiołu lotnego uzyskuje maksymalną wartość 59,6 MPa dla próbek o $W/C = 0,54$ bez domieszki napowietrzającej oraz po 170 dniach dojrzewania.

Praca naukowa finansowana ze środków MNiSzW na naukę w latach 2010-2011.

LITERATURA

- [1] Z. RUSIN, *Technologia betonów mrozoodpornych*, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków, 2002.
- [2] A.M. GLINICKI, *Właściwe i patologiczne napowietrzanie betonu*, Budownictwo-Technologie-Architektura, 2, 2004, 37-40.
- [3] M. LELUSZ, V. EZERSKIY, *Kinetyka narastania wytrzymałości napowietrzonych zapraw cementowych z dodatkiem popiołu lotnego*, Materiały konferencyjne — Dni Betonu'2010, 243-251.
- [4] A.M. NEVILLE, *Właściwości betonu*, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków, 2000.
- [5] Z. GIERGICZNY, *Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2006.
- [6] S. BASTIAN, *Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym*, Arkady, Warszawa, 1980.
- [7] P. ŁUKOWSKI, *Domieszki do zapraw i betonów*, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków, 2003.
- [8] J. GOŁASZEWSKI, J. SZWABOWSKI, *Korygowanie wpływu domieszek napowietrzających na urabialność i wytrzymałość na ściskanie betonów wysokowartościowych*, Materiały konferencyjne — Dni Betonu'2004.
- [9] M. LELUSZ, V. EZERSKIY, *Ocena wpływu zawartości popiołu lotnego na wytrzymałość zapraw cementowych*, Przegląd Budowlany, 11, 2010, 35-38.
- [10] M. LELUSZ, V. EZERSKIY, *Zapewnienie mrozoodporności a wytrzymałość kompozytów cementowych zawierających popiół lotny*, Materiały konferencyjne — XXVI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna EKOMILITARIS 2012 nt. Inżynieria bezpieczeństwa — ochrona przed skutkami nadzwyczajnych zagrożeń, Wojskowa Akademia Techniczna, 378-385.
- [11] M. KORZYŃSKI, *Metodyka eksperymentu. Planowanie, realizacja i statystyczne opracowanie wyników eksperymentów technologicznych*, WNT, Warszawa, 2006.

M. LELUSZ, W. JEZIERSKI

Influence of air-entraining admixture on strength development of cement composites containing fly ash addition

Abstract. The results of laboratory investigation concerning the influence of the air-entraining admixture content d/C , the W/C ratio, and the time of curing τ on the compressive strength f_c of cement mortars samples are presented in the paper. On the basis of the results, a mathematical model was elaborated. The character and the influence grade of each factor were analyzed. It was determined that with increase in the content of air-entraining admixture, the compressive strength of cement mortars containing fly ash decreases. However, there is a limiting dosage of the admixture above which the increase in its content does not cause the decrease in the strength.

Keywords: civil engineering, cement composites, air-entraining admixture, fly ash, mathematical model

