

WPLYW RODZAJU CEMENTU NA TRWAŁOŚĆ KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH

Zofia SZWEDA

Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, Gliwice, Polska

Słowa kluczowe: *migracja, dyfuzja jonów chlorkowych, trwałość konstrukcji żelbetowych.*

1. Wstęp

Trwałość konstrukcji betonowych, w szczególności mostów, tuneli, wiaduktów, wielopoziomowych garaży i konstrukcji nadmorskich ma bezpośredni związek z korozyjnym działaniem jonów chlorkowych, które wnikając do betonu wywołują korozję prętów zbrojeniowych. Korozja zbrojenia rozpoczyna się, gdy stężenie jonów chlorkowych osiągnie krytyczną wartość w stosunku do masy cementu użytego do przygotowania mieszanki betonowej. Zwiększenie objętości produktów korozji stali zbrojeniowej początkowo może być przyczyną osłabienia więzi między powierzchnią prętów zbrojeniowych i betonem. Następnie otulina zbrojenia pęka i rozpoczyna się pełny proces pogorszenia stanu konstrukcji żelbetowej [1]. Korozja zbrojenia jest obecnie uznawana za główną przyczynę degradacji i rozpadu konstrukcji żelbetowych w wielu częściach świata [2]. Mając na uwadze wszystkie powyższe fakty, postanowiono przeanalizować wpływ rodzaju zastosowanego w betonie cementu (pochodzącego od jednego producenta) na szybkość wnikania jonów chlorkowych. Badania zaplanowano w taki sposób, by uzyskane wyniki pozwoliły na zastosowanie teoretycznego modelu dyfuzji proponowanego w pracy [4]. Model teoretyczny następnie weryfikowano przez porównanie z wynikami osiągniętymi w naturalnej dyfuzji. Ostatecznie została wyznaczona prognozowana trwałość konstrukcji żelbetowych wykonanych z testowanych betonów.

2. Zastosowane materiały i metoda badawcza

Zbadano trzy rodzaje mieszanki betonowej o recepturach, w których różnicowano jedynie rodzaj cementu. W betonie B1 wykorzystano cement CEM I 42,5 R, charakteryzujący się wysokim ciepłem hydratacji, szybkim przyrostem wytrzymałości oraz wysoką wytrzymałością wczesną. Jest on przeznaczony do przygotowywania betonów BWW, SCC i komórkowych, jak również do zastosowań w budownictwie drogowo-mostowym oraz inżynierii komunikacyjnej, nawet w warunkach obniżonych temperatur. Cement ten przy dozowaniu zgodnym z normą [7] może być stosowany w warunkach agresywnego oddziaływania środowiska na beton i zbrojenie z wyjątkiem klas XA2 oraz XA3, to jest agresji chemicznej wywołanej siarczanami. W betonie B2 zastosowano cement CEM II/B-V 32,5 R, charakteryzujący się wysoką wytrzymałością w długich okresach dojrzewania, niskim skurczem przygotowanego przy jego użyciu betonu i wydłużonym

czasem urabialności. Cement ten przeznaczony jest do wytwarzania betonu zwykłego w klasach wytrzymałości od C8/10 do C30/37, jastrychów i posadzek, towarowych zapraw murarskich (wykorzystywanych w ścianach nadziemnych oraz fundamentowych w gruntach suchych i nawodnionych), do stabilizacji gruntów i wytwarzania chudego betonu na podbudowy konstrukcji nośnych i drogowych. Cement CEM II/B-V 32,5 R przy dozowaniu zgodnym z normą [7] może być stosowany prawie we wszystkich klasach ekspozycji oddziaływania środowiska na beton z wyjątkiem klas XA2 oraz XA3, tj. w przypadku agresji chemicznej wywołanej siarczanami. Nie powinien być też stosowany w klasach ekspozycji XF2, XF3 oraz XF4, czyli w warunkach umiarkowanego i silnego nasycenia elementu betonowego wodą (również z solami odladzającymi) i poddawania go intensywnemu cyklicznemu zamrażaniu i rozmrażaniu. Z kolei w betonie B3 zastosowano cement CEM I 42,5 N/SR3/NA o wysokiej odporności chemicznej, w szczególności na korozję siarczanową, niskiej zawartości alkaliów Na_2O , glinianu trójwapniowego C_3A oraz tlenku glinu Al_2O_3 , charakteryzującego się normalną dynamiką narastania wytrzymałości w początkowym okresie oraz wysoką wytrzymałością w okresach późniejszych. Jest on przeznaczony do wykonywania konstrukcji mostowych, nawierzchni drogowych i lotnisk, obiektów hydrotechnicznych, przemysłowych oraz budownictwa ekologicznego (np. składowisk odpadów czy oczyszczalni ścieków), prefabrykatów żelbetowych i sprężonych, narażonych na działanie środowisk agresywnych, oraz wykonywania posadzek w budowlach inwentarskich bezpośrednio związanych z hodowlą zwierząt. Użycie tego cementu umożliwia wyprodukowanie betonu i elementów prefabrykowanych przeznaczonych do użytkowania w środowiskach agresywnych chemicznie. W tabelicy 1 przedstawiono skład chemiczny zastosowanych cementów.

Tablica 1. Skład chemiczny zastosowanych cementów [% mas.]

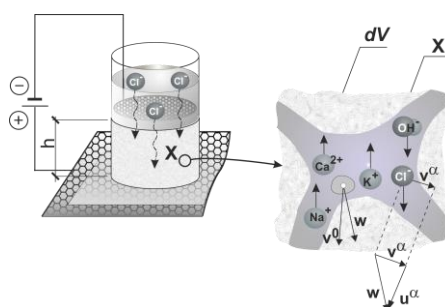
Beton	Cement	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO
B1	CEM I 42,5 R	63,78	19,38	4,57	3,59	3,26	0,58	0,21	1,38
B2	CEM II/B-V 32,5 R	45,91	26,77	10,82	3,97	2,77	1,42	1,3	1,62
B3	CEM I 42,5 N/SR3/NA	63,34	21,15	3,93	5,14	2,61	0,39	0,21	1,28

Z każdego rodzaju mieszanki betonowej wykonano i zbadano po 12 elementów w kształcie walców o wymiarach 100 mm x 50 mm. Zastosowano metodę badawczą opisaną w pracach [3,4,6]. Skład zastosowanych mieszanek betonowych oraz średnią wytrzymałość na ściskanie f_{cm} po 28 dniach dojrzewania przedstawiono w tabelicy 2.

Tablica 2. Skład oraz wytrzymałość na ściskanie betonów

Skład betonu	B1	B2	B3
	kg/m ³		
Cement	324,1		
Kruszywo	1931		
Woda	166,7		
w/c	0,5		
Wytrzymałość na ściskanie f_{cm} MPa	54,2	45,8	58,4
Ciężar objętościowy, γ_b kg/m ³	2271	2241	2258

Badania migracji i dyfuzji chlorków rozpoczęto po 3 miesiącach od wykonania próbek. Sześć elementów wykonanych z każdego rodzaju mieszanki betonowej poddano działaniu jonów chlorkowych przyspieszonych polem elektrycznym. Pozostałe sześć próbek badano w warunkach dyfuzji naturalnej. W obu badaniach źródłem jonów chlorkowych był 3% roztwór NaCl znajdujący się w zbiornikach przymocowanych do górnej powierzchni próbek. Przed badaniem migracyjnym próbki umieszczono na 72 godziny w zbiorniku z wodą destylowaną w celu zwiększenia konduktywności badanego betonu. Następnie próbki umieszczono w układzie elektrycznym podłączonym do źródła prądu stałego (18 V) – rys. 1. Badania migracyjne prowadzono w dwóch odstępach czasu: $t_1 = 24$ h i $t_2 = 48$ h, a co 24 godziny wymieniano zawartość roztworu źródłowego. Temperatura badanych roztworów wynosiła $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$. Badaniom dyfuzyjnym poddano próbki także w dwóch odstępach czasu: $t_3 = 90$ i $t_4 = 180$ dni. Po zakończeniu badań próbki pozostawiono w warunkach laboratoryjnych przez 72 godziny. Następnie pobierano warstwami rozdrobniony materiał betonowy, łącząc odpowiednie warstwy z trzech badanych próbek. Dodano wodę destylowaną w proporcji wagowej 1:1 i, mieszając co jakiś czas, otrzymano gęsty roztwór, który po 24 godzinach przesączono przez sączonego średni wspomagając się kolbą ciśnieniową. Czynność powtórzono trzykrotnie. Otrzymany roztwór poddano analizie chemicznej na podstawie normy [8] i określono stężenie jonów chlorkowych c^1 . Uwzględniając ciężar objętościowy każdego betonu określono gęstość masy ρ^1 jonów chlorkowych. Po badaniach migracyjnych i dyfuzyjnych wyznaczono gęstość masy w dziesięciu warstwach o grubości 2 mm pobieranych z próbek badanych w czterech odstępach czasu: $t_1 = 24$ h, $t_2 = 48$ h, $t_3 = 90$ dni i $t_4 = 180$ dni. Następnie, na podstawie badań migracyjnych, wyznaczono teoretyczną wartość współczynnika dyfuzji oraz wykorzystując badania dyfuzyjne kalibrowano miarodajną wartość tego współczynnika [3-6]. Podczas badań określano wyłącznie zawartość wolnych chlorków (rozpuszczalnych w wodzie) uwzględnionych w termodynamicznym modelu teoretycznym i przedstawionym w pracy [4]. W modelu tym wyodrębniono reprezentatywny element betonu zawierający szkielet betonowy oraz roztwór zawarty w porach betonu. Ponadto, przyjęto w nim szkielet betonu oraz wodę, jako składnik inertny $\alpha = 0$ – nie wpływający bezpośrednio na proces. Z kolei, następujące aniony oznaczono jako składniki o numerach: $\text{Cl}^- - \alpha = 1$, $\text{OH}^- - \alpha = 2$ oraz kationy jako: $\text{Na}^+ - \alpha = 3$, $\text{K}^+ - \alpha = 4$ and $\text{Ca}^{2+} - \alpha = 5$. Uwzględniono je w rozważanym procesie dyfuzyjnym wg modelu przedstawionego schematycznie na rys.1.

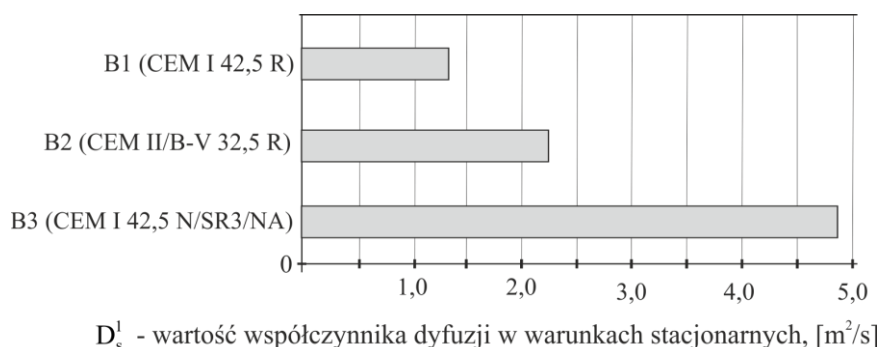


Rys. 1. Schemat badań wnikań jonów chlorkowych do betonu i wyróżnione składniki procesu zawarte w reprezentatywnym elemencie objętości betonu

Fig. 1. Scheme of the investigations of chloride ion penetration into concrete and the distinguished constituents of the process in the representative concrete volume element

3. Analiza uzyskanych wyników badań i wnioski

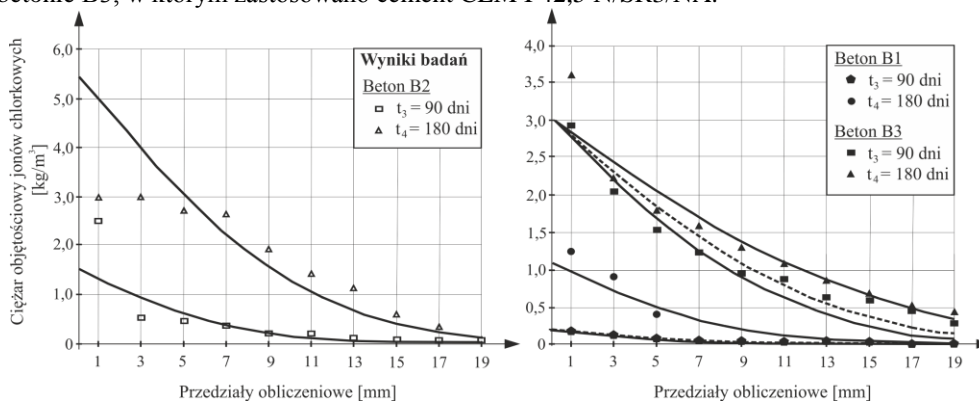
Na rys. 2 przedstawiono obliczone na podstawie modelu teoretycznego wartości współczynnika dyfuzji ustalone w warunkach stacjonarnych na podstawie badań migracji chlorków [4,5]. Wartości te wynoszą odpowiednio $1,36 \cdot 10^{-12}$, $2,25 \cdot 10^{-12}$ i $4,75 \cdot 10^{-12}$ m²/s w betonach B1, B2 i B3.



Rys. 2. Wartości współczynnika dyfuzji wyznaczone z wykorzystaniem teoretycznego modelu (na podstawie badań migracyjnych)

Fig. 2. Values of diffusion coefficient determined using the theoretical model (based on the migration results)

Najmniejszą wartość współczynnika dyfuzji, stanowiącą 29% wartości współczynnika w betonie B3, uzyskano w betonie B1, w którym zastosowano cement portlandzki CEM I 42,5 R. Pośrednią wartość współczynnika otrzymano w betonie B2, w którym zastosowano popiołowy cement portlandzki CEM II/B-V 32,5 R. Stanowi ona 48% wartości współczynnika w betonie B3. Największą wartość współczynnika dyfuzji otrzymano w betonie B3, w którym zastosowano cement CEM I 42,5 N/SR3/NA.



Rys. 3. Eksperymentalny i obliczeniowy rozkład gęstości masy chlorków: beton B1, B2, B3

Fig. 3. Experimental and calculated distributions of mass densities of chlorides: concrete B1, B2, B3

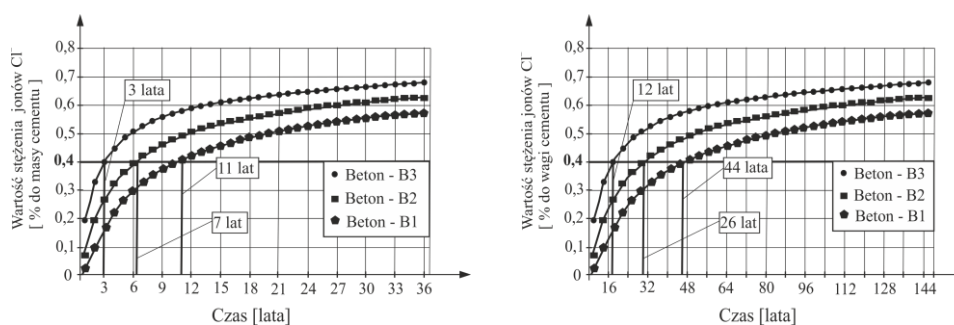
Na rys. 3 przedstawiono wartości rozkładów gęstości masy chlorków ρ^1 otrzymane po badaniach dyfuzyjnych (po czasie $t_3 = 90$ dni i $t_4 = 180$ dni) oraz wyliczone z wykorzystaniem modelu teoretycznego, z zastosowaniem współczynnika dyfuzji wyznaczonego w warunkach ustalonych (linia ciągła) oraz współczynnika miarodajnego (linia przerywana). W przypadku betonu B2 wartość miarodajna współczynnika dyfuzji pokrywa się z wartością wyznaczoną w warunkach ustalonych po obu czasach badania, natomiast w betonach B1 i B3 wartość miarodajna pokrywa się z wyznaczoną w warunkach ustalonych po dłuższym czasie badania (180 dni). Z kolei, w betonie B1, miarodajną wartość współczynnika po czasie badania wynoszącym 90 dni otrzymano z uwzględnieniem 10% wpływu niestacjonarności, a w betonie B3 z uwzględnieniem 20% wpływu niestacjonarności procesu.

Właściwości ochronne betonu otuliny prętów zbrojeniowych określono obliczając przyrost stężenia jonów chlorkowych w strefie styku zbrojenia z warstwą betonu. Założono, że rozważany element wykonany jest w postaci płyty z otuleniem z betonu $x_1 = 20$ mm i $x_2 = 40$ mm. Przyjęto krytyczną wartość powodującą inicjację korozji zbrojenia wynoszącą 0,4% stężenia jonów chlorkowych (w odniesieniu do masy cementu). Obliczenia przyrostu gęstości masy jonów chlorkowych przeprowadzono zgodnie z dobrze znanym rozwiązaniem równania dyfuzji:

$$\rho^1(x, t) = \rho_{0, \text{cal}}^1 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D^1 t}} \right) \quad (1)$$

Następnie, w celu ustalenia stężenia jonów chlorkowych c^1 , ich gęstość ρ^1 odniesiono do gęstości masy cementu ρ_{cem} w badanej próbce:

$$c^1(t) = \frac{\rho^1(x_i, t)}{\rho_{\text{cem}}} 100\% \quad (2)$$

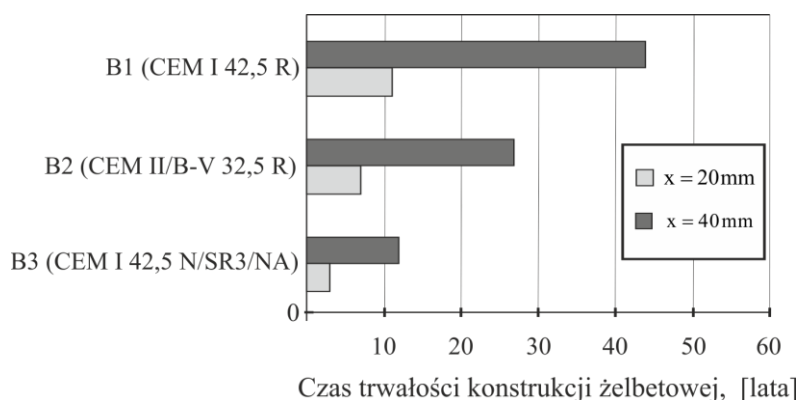


Rys. 4. Zmiana w czasie koncentracji chlorków w strefie kontaktowej stal zbrojeniowa/ beton w przypadku dwóch grubości otuliny betonowej ($c_{\text{nom}} = 20$ mm; $c_{\text{nom}} = 40$ mm)

Fig. 4. Time dependent changes of chloride concentration in concrete/steel contact zone for two thicknesses ($c_{\text{nom}} = 20$ mm; $c_{\text{nom}} = 40$ mm)

Po przyjęciu na krawędzi elementu betonowego stężenia chlorków $c^1 = 0,8\%$ (w odniesieniu do masy cementu) wyznaczono zmianę stężenia jonów chlorkowych w czasie, w strefie kontaktowej stal/beton, w wypadku otulenia o grubości $c_{nom} = 20$ mm i 40 mm.

Na rys. 5 przedstawiono prognozowany czas trwałości konstrukcji żelbetowej. Trwałość konstrukcji jest zdefiniowana jako czas, po którym stężenie jonów chlorkowych przy powierzchni stali zbrojeniowej osiągnie wartość krytyczną $c_{kr} = 0,4\%$ (w odniesieniu do masy cementu). Należy zauważyć, że struktura betonu B3 wykonanego z cementu CEM I 42,5 N/SR3/NA (charakteryzująca się współczynnikiem dyfuzji $D^1 = 4,73 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) jest najbardziej podatna na zagrożenie pojawienia się korozji, bo już po 3 latach w wypadku otuliny o grubości 20 mm i po 12 latach w przypadku otuliny o grubości 40 mm. Struktura betonu B1 wykonanego z cementu CEM I 42,5R (charakteryzująca się współczynnikiem dyfuzji $D^1 = 1,36 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) jest najbardziej odporna na przenikanie jonów chlorkowych. W wypadku tego betonu korozja może wystąpić po 11 i 44 latach pracy konstrukcji przy grubościach otuliny równych odpowiednio 20 mm i 40 mm.



Rys. 5. Prognozowany czas trwałości badanych betonów
Fig. 5. Foreseen technical life-span of the tested concretes

Przeprowadzone badania wskazują, że korzystając z modelu zaproponowanego w pracy [4] można porównać wpływ zastosowanego rodzaju cementu na odporność betonu na wnikanie jonów chlorkowych. Natomiast rodzaj zastosowanego cementu ma bezpośredni wpływ na trwałość konstrukcji żelbetowych eksploatowanych w środowisku zagrożonym działaniem jonów chlorkowych, będących przyczyną pojawienia się korozji stali zbrojeniowej. Ponadto, co istotne, nie wszystkie cementy zalecane do stosowania w środowiskach agresywnych odznaczają się wysoką odpornością na wnikanie jonów chlorkowych.

Oznaczenia symboli

$\rho^1(x,t)$ - gęstość masy jonów chlorkowych wyznaczona w badaniach dyfuzyjnych,
mass density of chloride ions determined during the diffusion tests, $[\text{kg}/\text{m}^3]$,

- $\rho_{0,cal}^1$ - obliczeniowa gęstość masy jonów chlorkowych przy powierzchni elementu,
 computational mass density of chlorides ions at the edge of the element, [kg/m³],
erf - funkcja błędu Gaussa, Gauss error function,
t - czas, time, [s],
 D^1 - współczynnik dyfuzji jonów chlorkowych,
 diffusion coefficient of chloride ions, [m²/s],
 c^1 - stężenie jonów chlorkowych odniesione do masy cementu w betonie,
 concentration of chloride ions by weight of cement in concrete, [%],

Literatura

- [1] Andrade C. et al., Electrochemical behavior of steel rebars in concrete: Influence of environmental factors and cement chemistry, *Electrochimica Acta*, 46, 3905-3912, 2001
 [2] Hansson C. M., Poursaeed A., Jaffer S. J., Corrosion of reinforcing bars in concrete, *The Master builder*, 106-124, December 2012
 [3] Szweda Z., Badania oporu wnikania chlorków do betonu na cementach portlandzkim zwykłym i niskoalkalicznym. Resistance of concrete with ordinary and low-alkali Portland cement to chloride ingress. *Ochrona przed korozją*, 5, 148-153, 2016
 [4] Szweda Z., Zybura A., Theoretical model and experimental tests on chloride diffusion and migration processes in concrete, *The 11th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques" Vilnius Gediminas Technical University, Procedia Engineering, Modern Building Materials, Structures and Techniques*, 57, 1121-1130, 2013
 [5] Szweda Z., Zybura A., Wyznaczanie współczynnika dyfuzji chlorków w betonie na podstawie badań w polu elektrycznym, *Roczniki Inżynierii Budowlanej, KIB PAN O/Katowice*, 13, 51-56, 2013
 [6] Szweda Z., Zybura A., Wyznaczanie współczynnika dyfuzji chlorków w betonie na podstawie badań migracji jonów w polu elektrycznym, *Przegląd Budowlany*, 6, 60-62, 2012
 [7] PN-EN 206-1: 2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości produkcyjna i zgodność
 [8] PN-ISO 9297. Determination of chlorides. Titration method with silver nitrate in the presence of chromate as indicator (Mohr Methode).

THE EFFECT OF CEMENT TYPE ON DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Summary

Three types of concrete were investigated during the research programme. Especially, the conducted laboratory tests were focused on chloride ions infiltration into concrete samples whose compositions differed in type of cement. The tests were planned in such a way that the achieved results allowed using a theoretical diffusion model proposed in work [4]. Then, the model was verified by a comparison with the results obtained from the diffusion experiments. Finally, the forecast durability of concrete structures made out of the tested concrete was calculated. The foreseen life-span of the structures was differentiated due to thickness of concrete coating of rebars. The proposed approach enables reliable

prediction of durability for the tested types of concrete over time and precise technical life-span of the structure made out of them.