

Wykorzystanie koncepcji równoważnych właściwości użytkowych w klasach ekspozycji XC oraz XD

Streszczenie

W artykule przedstawiono przykład praktycznego zastosowania koncepcji równoważnych właściwości użytkowych w procesie akceptacji receptur betonu, w odniesieniu do oczekiwanej trwałości w warunkach agresywnego środowiska. Metoda dopuszczona jest normą, ale warunkiem jej użycia jest wykonanie trwałościowych badań porównawczych. W prezentowanym przykładzie są to badania karbonatyzacji (dotyczące klasy ekspozycji XC) oraz badania migracji jonów chlorkowych (dotyczące klasy ekspozycji XD). Ich wyniki pozwoliły potwierdzić możliwość zastosowania ocenianego cementu w warunkach ekspozycji XC3, XC4 i XD1, w których inne reguły normowe go wykluczały.

Słowa kluczowe:

trwałość, klasa ekspozycji, karbonatyzacja, migracja jonów, równoważne właściwości użytkowe

Abstract

The article presents an example of the practical application of the concept of equivalent performance properties in the process of accepting concrete recipes in relation to the expected durability in an aggressive environment. The method is admitted as a standard, but the condition for its use is performance of comparative durability tests. In the presented example, these are carbonation tests (related to exposure class XC) and chloride ion migration tests (related to exposure class XD). Their results allowed to confirm the possibility of using the assessed cement in XC3, XC4 and XD1 exposure conditions, in which other standard rules excluded it.

Keywords:

durability, exposure class, carbonation, ion migration, equivalent performance

1. Wprowadzenie

W obecnych czasach stale wzrastających kosztów produkcji cementu, związanych w dużej mierze z wykupem praw do emisji CO₂, coraz większy nacisk kładzie się na produkcję cementu z większą zawartością dodatków mineralnych. Wpływa to bezpośrednio na zmniejszenie ilości klinkieru w gotowym produkcie, czyli tego składnika, podczas produkcji którego emitowane są największe ilości dwutlenku węgla, głównie procesowego, niezależnego od producenta cementu. Jego zawartość przez niektórych producentów określana jest mianem wskaźnika klinkierowego, zdefiniowanego jako stosunek zawartości klinkieru do całkowitej masy cementu. Norma PN-B-06265:2018-10 [2] podaje ograniczenia w stosowaniu pewnych rodzajów cementu w wybranych klasach ekspozycji. Dlatego z punktu widzenia producenta betonu należy uwzględnić wpływ takich spoiw na jego trwałość. Może powodować to mniejszy zakres zastosowań. Wielu producentów betonu towarowego nie ma możliwości magazynowania kilku rodzajów spoiw, więc automatycznie decyduje się na produkcję betonu na cemencie „uniwersalnym”, spełniającym większość spotykanych w projektach klas ekspozycji. Przywołana norma PN-B-06265:2018-10 [2] oraz jej norma bazowa PN-EN 206+A1:2016-12 [1] dają jednak możliwość zastosowania tzw. koncepcji równoważnych właściwości użytkowych, która opiera się na trwałościowych badaniach porównawczych.

2. Obecny stan normalizacyjny oraz zapisy normy PN-EN 206 [1]

W punkcie 5.2.5.3 normy PN-EN 206 [1] podane są ogólne zasady stosowania koncepcji równoważ-

nych właściwości użytkowych. W skrócie polega ona na udowodnieniu nie gorszej trwałości betonu testowanego w porównaniu do betonu referencyjnego wykonanego zgodnie z wymaganiami składu podanymi w tablicy F1 i F2 normy PN-B-06265:2018-10 [2], przy czym skład betonu testowego może wykroczać poza te wymagania w zakresie zawartości cementu, wskaźnika w/c, zawartości powietrza.

Składniki użyte w badaniach muszą być ściśle zdefiniowane pod względem pochodzenia i charakterystyk. Koncepcję tę można stosować wyłącznie w przypadku użycia cementów zgodnych z PN-EN 197-1 [5].

W zależności od środowiskowych oddziaływań na beton, wyspecyfikowanie których leży po stronie projektanta konstrukcji, stosujemy odpowiednie metody badawcze celem porównania rozpatrywanych właściwości betonu.

W przypadku korozji związanej z klasami XC stosujemy badanie karbonatyzacji betonu. Obecnie do dyspozycji mamy dwie znormalizowane metody. Pierwsza polega na przeprowadzeniu badania w środowisku atmosferycznego stężenia dwutlenku węgla, druga, przyspieszona, w środowisku 3% stężenia CO₂.

W przypadku oddziaływania jonów chlorkowych nie pochodzących z wody morskiej (klasa XD) znaleźć można metody oparte na wyznaczeniu współczynnika dyfuzji jonów chlorkowych, współczynnika migracji jonów chlorkowych oraz całkowitego ładunku elektrycznego przeniesionego przez badany beton. Wszystkie te metody na obecną chwilę posiadają status normy, czy to europejskiej czy amerykańskiej ASTM.

3. Przykład zastosowania koncepcji równoważnych właściwości użytkowych

W analizowanym projekcie badawczym zastosowano cement CEM II/B-V 42,5 R HSR jako wzorzec oraz CEM IV/B(V) 42,5 N LH/NA jako cement testowany.

Jak wynika z tablicy F.2 załącznika informacyjnego uzupełnienia krajowego PN-B-06265 [2] cement CEM IV nie jest dopuszczony do stosowania w klasach ekspozycji XC3, XC4 oraz w całym zakresie klasy XD. Dlatego celem przeprowadzonych badań było określenie minimalnych wymagań składu betonu, przy spełnieniu których uzyskane zostaną równoważne właściwości użytkowe w porównaniu do betonu wykonanego na cemencie CEM II/B-V 42,5 R HSR.

W obydwu przypadkach wykonano betony spełniające wymagania składu dla klas ekspozycji XC3 oraz kombinacji ekspozycji XC4 XD1. We wszystkich mieszankach wykorzystano surowce pochodzące z tej samej partii, krzywe uziarnienia stosu okruszowego pozostawały niezmiennie.

Tabela 1. Receptury oraz wyniki badań

Surowce	Mieszanki referencyjne		Mieszanki testowe					
Rodzaj cementu	CEM II/B-V 42,5 R HSR		CEM IV/B(V) 42,5 N LH/NA					
Klasa ekspozycji	R1 - XC3	R2 - XC4, XD1	TC1 - XC3	TC2 - XC3	TC3 - XC3	TD1 - XC4, XD1	TD2 - XC4, XD1	TD3 - XC4, XD1
Wymagana minimalna klasa wytrzymałości na ściskanie	C20/25	C30/37	C20/25	C20/25	C20/25	C30/37	C30/37	C30/37
Woda efektywna [kg/m ³]	162	159	162	140	151	159	147	135
Cement [kg/m ³]	280	300	280	280	280	300	300	300
w/c [-]	0,58	0,53	0,58	0,50	0,54	0,53	0,49	0,45
Plastyfikator [kg/m ³]	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24	2,24
Superplastyfikator [kg/m ³]	1,43	1,88	0,95	4,62	3,33	1,41	2,41	3,19
Kruszywo D _{max} 16 mm – łącznie [kg/m ³]	1936	1925	1929	1980	1951	1910	1943	1975
Konsystencja – opad stożka [mm]	170	175	170	180	180	180	180	180
Zawartość powietrza [%]	2,2	1,9	2,0	2,8	2,2	1,9	2,7	2,7
Średnia wytrzymałość na ściskanie – 28 dni [MPa]	39,2	43,7	34,9	48,6	38,0	41,7	49,6	58,1

Do oceny odporności betonu w klasie ekspozycji XC wykorzystano badanie karbonatyzacji betonu metodą przyspieszoną zgodnie z PN-EN 12390-12 [3], natomiast dla klasy ekspozycji XD zastosowano badanie migracji jonów chlorkowych wg ASTM C1202 [4].

Przed wykonaniem mieszanek betonowych określono kryteria ich akceptacji na podstawie badań konsystencji i zawartości powietrza.

W przypadku betonu z cementem CEM IV, dla każ-

dej klasy ekspozycji wykonano trzy warianty receptur o różnym wskaźniku w/c.

W tabeli 1 przedstawiono składy mieszanek, wyniki badań konsystencji, zawartości powietrza oraz wytrzymałości na ściskanie po 28 dniach dojrzewania.

Wszystkie wyniki badań konsystencji oraz zawartości powietrza spełniły założone kryteria zgodności. Badane mieszanki mieściły się w klasie konsystencji S4, a zawartości powietrza były mniejsze niż 3,5%.



**CENTRUM TECHNOLOGICZNE
BUDOWNICTWA
INSTYTUT BADAŃ I CERTYFIKACJI**
Sp. z o.o.



AB 535



AC 205

LABORATORIUM BUDOWLANE

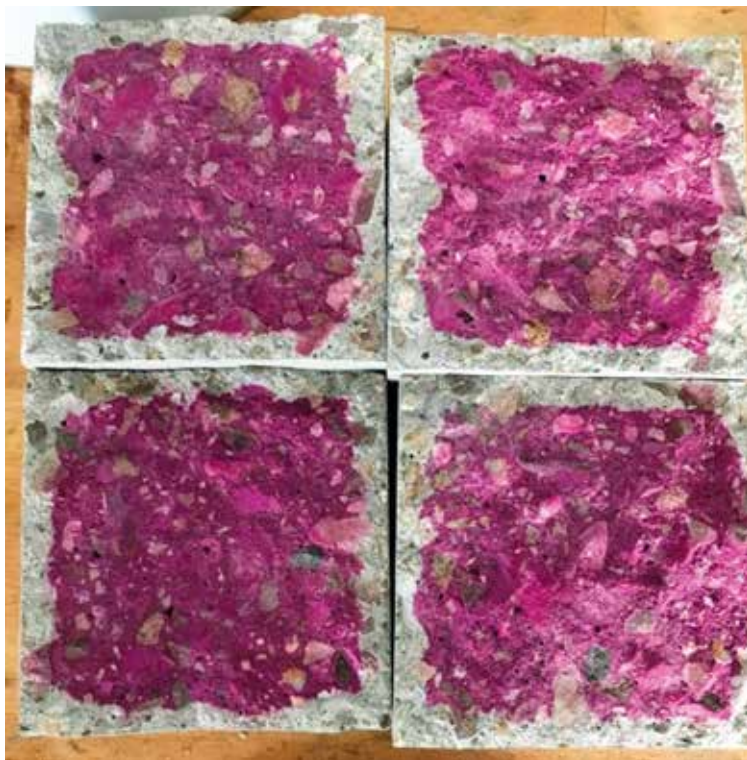
- ▶ laboratorium akredytowane AB 535
- ▶ laboratorium notyfikowane NB 2039
- ▶ wieloletnie doświadczenie
- ▶ ekspertyzy, opinie budowlane
- ▶ ocena betonu w konstrukcji
- ▶ ponad 200 badań w ofercie, w tym ponad 80 metod akredytowanych

JEDNOSTKA CERTYFIKUJĄCA WYROBY

- ▶ akredytowana i notyfikowana jednostka certyfikująca wyroby AC 205, NB 2039
- ▶ certyfikacja zakładowej kontroli produkcji wyrobów budowlanych
- ▶ szkolenia otwarte

- ▶ Centrum Technologiczne Budownictwa Instytut Badań i Certyfikacji Sp. z o.o.
ul. Przemysłowa 23, 35-105 Rzeszów
tel. +48 17 864 04 50, e-mail: ctb@ctb-ibc.pl
www.ctb-ibc.pl





Zdjęcie 1. Widok próbek po badaniu karbonatyzacji

Do oceny wytrzymałości betonu wykorzystano zapisy załącznika A normy PN-EN 206 [1], dotyczącego m.in. kryteriów akceptacji badań wstępnych. Przyjęto kryterium akceptacji średniej wytrzymałości na ściskanie na poziomie co najmniej $f_{ck} + 6$ MPa. Stosując tak określone kryteria, stwierdzono, że betony referencyjne osiągnęły zakładaną klasę wytrzymałości, natomiast spośród betonów testowych

rozwiązanie z użyciem cementu CEM IV oznaczone jako TD1 nie spełniło zakładanej klasy wytrzymałości C30/37.

Z wykonanych mieszanek zaformowano próbki sześciennie o boku 100 mm przeznaczone do badania karbonatyzacji oraz próbki sześciennie o boku 150 mm przeznaczone do wykonania odwiertów o średnicy 100 mm i wysokości 50 mm użytych w badaniu migracji jonów chlorkowych.

Wyniki badań karbonatyzacji

Badanie rozpoczęto po 28 dniach dojrzewania betonu w wodzie w temperaturze 20°C. Podczas oceny porównawczej trwałości betonów wzięto pod uwagę średnią głębokość czoła karbonatyzacji uzyskaną po 70 dniach badania.

W tabelach 2 i 3 przedstawiono głębokości karbonatyzacji dla badanych betonów. Na wykresach 1 i 2 przedstawiono te wyniki w formie graficznej.

Wszystkie badane serie betonów testowych, zarówno dla klasy ekspozycji XC3, jak również XC4, wykazały mniejszą głębokość karbonatyzacji w porównaniu do betonów referencyjnych. Widać znaczący korzystny wpływ zastosowanego cementu na odporność betonu w warunkach karbonatyzacji. Zastąpienie cementu CEM II/B-V tą samą ilością cementu CEM IV i przy zastosowaniu tego samego wskaźnika w/c daje redukcję głębokości karbonatyzacji odpowiednio o 19% dla klasy XC3 i 34% dla klasy XC4. Dodatkowo potwierdza się wyraźny wpływ wskaźnika w/c na szczelność matrycy cementowej, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie trwałości.

Wyniki badań migracji jonów chlorkowych

Badanie rozpoczęto po 90 dniach dojrzewania betonu, przy czym próbki po 28 dniach zostały wyjęte z wody i umieszczone w komorze klimatycznej (wilgotność 65%, temperatura 20°C). Do badania wykorzystano po 3 próbki walcowe uzyskane z każdej receptury.

W tabeli 4 zestawiono wartości średniej ilości przeniesionego ładunku elektrycznego przez badany beton. Na wykresie 3 przedstawiono te wyniki w formie graficznej.

Aby ocenić betony w zakresie ich odporności na migrację jonów chlorkowych posłużono się klasyfikacją przepuszczalności zaproponowaną w załączniku X1 wykorzystanej normy badawczej [4].

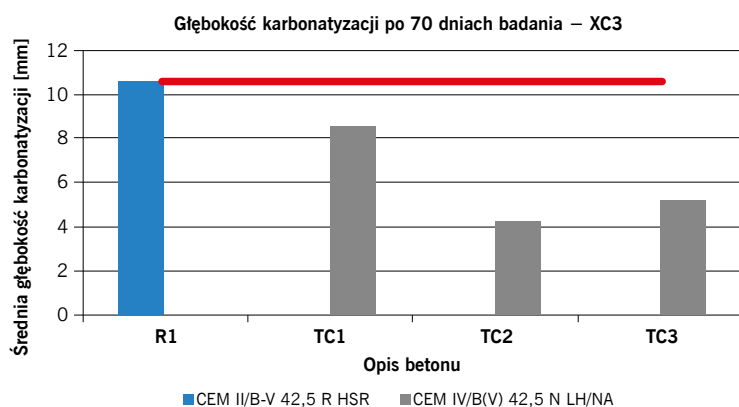
W tabeli 5 przedstawiono klasyfikację w zależności od uzyskanego wyniku badania. Porównanie w ten sposób uzyskanych wyników dla receptur testowych z rezultatami dla betonu pokazuje, że wszystkie badane betony zawierają się w tej samej, bardzo niskiej klasie przepuszczalności wg ASTM C1202 (wykres 3). Redukcja wskaźnika w/c dodatkowo wpływa na zmniejszenie ilości przeniesionego ładunku elektrycznego dla receptur TD2 i TD3.

4. Wnioski

Przedstawione badania potwierdzają przede wszystkim przydatność metody koncepcji równoważnych właściwości użytkowych do potwierdzania możliwości zastosowania receptur odbiegających od zdefiniowanych w normie PN-B-06265 [2] wymagań odnośnie doboru rodzaju cementu.

Tabela 2. Wyniki badania karbonatyzacji betonów w klasie XC3

	Głębokość karbonatyzacji [mm] po 70 dniach badania dla klasy XC3			
	R1	TC1	TC2	TC3
CEM II/B-V 42,5 R HSR	10,6	-	-	-
CEM IV/B(V) 42,5 N LH/NA	-	8,6	4,2	5,2



Wykres 1. Wyniki badania karbonatyzacji – klasa XC3

Tabela 3. Wyniki badania karbonatyzacji betonów w klasie XC4

	Głębokość karbonatyzacji [mm] po 70 dniach badania dla klasy XC4			
	R2	TD1	TD2	TD3
CEM II/B-V 42,5 R HSR	8,0	-	-	-
CEM IV/B(V) 42,5 N LH/NA	-	5,3	1,9	1,4

Pozwalają na to szczegółowe wnioski z tych badań, które dowodzą, że zmiana cementu nie powoduje pogorszenia właściwości i trwałości betonu, a to:

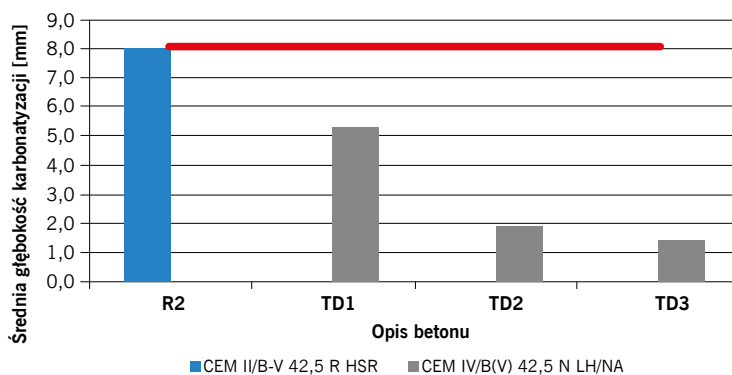
- badania karbonatyzacji wykazały, że jest możliwe zastosowanie cementu CEM IV/B(V) 42,5 N LH/NA pochodzącego z rozpatrywanego źródła w klasie ekspozycji XC3 oraz XC4 przy zachowaniu wymagań składu zgodnego z tabelą F1 normy PN-B-06265 [2], czyli w/c poniżej 0,60 dla klasy XC3 i 0,55 dla klasy XC4, oraz minimalna ilość cementu odpowiednio 280 oraz 300 kg/m³
- analizując wyniki badań migracji jonów chlorkowych, można stwierdzić, iż wszystkie badane receptury z użyciem cementu CEM IV/B(V) 42,5 N LH/NA pochodzącego z rozpatrywanego źródła kwalifikują się do tej samej, bardzo niskiej klasy przepuszczalności jak beton referencyjny. Istotnym czynnikiem kształtującym tak niską przepuszczalność jest rodzaj cementu i wskaźnik w/c, ale również dojrzałość betonu, wynosząca w tym przypadku 90 dni. W świetle powyższego, wszystkie receptury testowe charakteryzują się równoważną trwałością w porównaniu do betonu referencyjnego, którego skład był zgodny z tabelami F1 i F2 normy PN-B-06265:2018-10 [2]. Beton wg receptury TD1, pomimo niespełnienia klasy wytrzymałości, wykazał podobną trwałość jak materiał referencyjny, jednak wymaga korekty składu, w celu zwiększenia wytrzymałości na ściskanie. Większa ilość cementu oraz obniżony wskaźnik w/c zwiększy dodatkowo jego trwałość
- w przypadku zastosowania cementu CEM IV/B(V) 42,5 N LH/NA w klasach ekspozycji XC3, XC4 oraz XD1 należy pamiętać o zastosowaniu w kontroli produkcji odpowiednich procedur zapewniających uzyskanie wymaganego składu betonu w odniesieniu do ilości i jakości cementu, wskaźnika w/c oraz zawartości powietrza
- badania potwierdzają także wyraźny pozytywny wpływ redukcji wskaźnika w/c na trwałość betonów w warunkach karbonatyzacji oraz migracji jonów chlorkowych.

dr inż. Grzegorz Bajorek, prof. PRZ
Politechnika Rzeszowska
Centrum Technologiczne Budownictwa
Instytut Badań i Certyfikacji
mgr inż. Michał Drabczyk
mgr inż. Bogusław Lasek
inż. Marcin Zakrzewski
Lafarge Cement SA, Dział Jakości i Rozwoju

Literatura

1. PN-EN 206+A1:2016-12: Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność
2. PN-B-06265:2018-10 Beton – Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność, Krajowe uzupełnienie PN-EN 206+A1:2016-12
3. PN-EN 12390-12: Badania betonu. Część 12: Oznaczenie odporności betonu na karbonatyzację. Przyspieszona metoda karbonatyzacji.
4. ASTM C1202 -19: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.
5. PN-EN 197-1:2012: Cement - Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku

Głębokość karbonatyzacji po 70 dniach badania – XC4

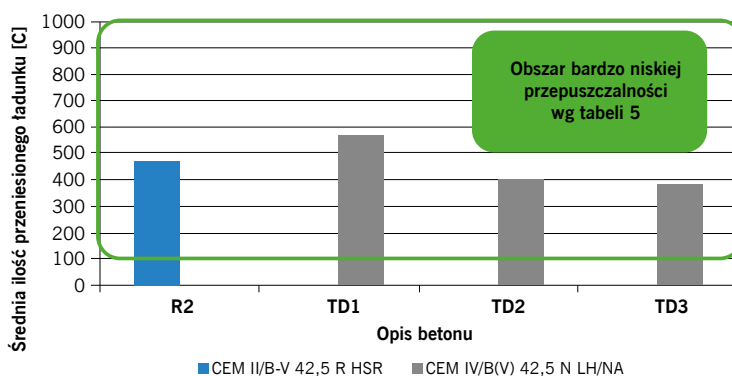


Wykres 2. Wyniki badania karbonatyzacji – klasa XC4

Tabela 4. Ilość przeniesionego ładunku elektrycznego w badaniu migracji jonów chlorkowych

	Średnia ilość przeniesionego ładunku [C]			
	R2	TD1	TD2	TD3
CEM II/B-V 42,5 R HSR	476	-	-	-
CEM IV/B(V) 42,5 N LH/NA	-	570	404	387

Ilość przeniesionego ładunku elektrycznego – XC4



Wykres 3. Migracja jonów chlorkowych – ilość przeniesionego ładunku elektrycznego betonu w klasie XD1

Tabela 5. Klasy przepuszczalności betonu wg ASTM C1202 [4]

	Klasa przepuszczalności betonu wg ASTM C1202				
	Znikoma	Bardzo niska	Niska	Umiarkowana	Wysoka
Ilość przeniesionego ładunku elektrycznego [C]	< 100	100 – 1000	1000 – 2000	2000 – 4000	> 4000

