

Prof. Jan Olek

School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, USA

Dr Aiping Lu

Sika Corporation, Lyndhurst, NJ, USA

Optymalizacja składu betonów wysokowartościowych ze względu na trwałość i właściwości transportowe jonów chlorkowych

Optimization of composition of HPC concrete with respect to service life and chloride transport properties

1. Wstęp

Od wielu lat, betony wysokowartościowe (HPC) były cenione głównie z uwagi na wysoką wytrzymałość i były stosowane głównie do słupów w wysokich budynkach (1). Jednakże, ostatnio wzrasta coraz bardziej za-stosowanie betonów HPC w konstrukcjach mostowych (2-5), szczególnie w płytach mostowych, które są narażone na bezpośrednie oddziaływanie szkodliwych wpływów soli odladzających oraz uszkodzeń związanych z cyklicznym zamrażaniem i rozmrażaniem. Aby zminimalizować ryzyko przedwczesnego zużycia takich konstrukcji, powinny one być budowane przy zastosowaniu betonu z mieszanek zaprojektowanych dla osiągnięcia wysokiego poziomu trwałości.

Mieszanki HPC są zazwyczaj tak projektowane aby zapewniły materiał finalny o żądanej trwałości w konkretnym środowisku. Charakterystyczną cechą betonów HPC, która odróżnia je od konwencjonalnych betonów jest zastosowanie zarówno dodatków mineralnych jak i chemicznych domieszek dla poprawienia własności betonu zarówno świeżego jak i stwardniałego. Dodatki mineralne stosowane najczęściej w betonach HPC obejmują takie materiały jak popioły lotne, zmielony granulowany żużel wielkopieczowy, pył krzemionkowy oraz metakaolinit (6). Materiały te są najczęściej stosowane w betonach HPC dla zmniejszenia ich przepuszczalności w stosunku do wody i jonów chlorkowych i w ten sposób – przedłużenia żywotności konstrukcji.

Trwałość konstrukcji żelbetowych może być zwiększona poprzez opóźnienie inicjacji procesu korozyjnego prętów zbrojeniowych. Istnieje kilka metod, które można wykorzystać dla tego celu, łącznie ze zwiększeniem grubości otulenia, zastosowaniem domieszek hamujących korozję, zastosowaniem powlekanej stali zbrojeniowej lub nierdzewnego zbrojenia. Można to też uzyskać przez obniżenie prędkości dyfuzji jonów chlorkowych w wyniku zastosowania betonu o niskiej przepuszczalności. Obniżenie przepuszczalności betonu jest szczególnie skuteczne, gdyż zmniejsza ono prędkość dyfuzji dwutlenku węgla (CO_2) i jonów chlorkowych (Cl^-), zmniejszając w ten sposób ryzyko zniszczenia pasywacyjnej powłoki na powierzchni stali. Beton o niskiej przepuszczalności wolny od spękań

1. Introduction

For many years, high performances concrete (HPC) has been mainly associated with high strength and its applications have been primarily in columns of high-rise buildings (1). Lately, however, the use of HPC in bridge construction is also on the increase (2-5), especially in the deck slabs, which are directly exposed to harmful effects of deicing salts and freezing and thawing damage. In order to minimize the potential for premature deterioration of such structures, they need to be constructed using concrete mixtures designed to achieve high level of durability.

HPC mixtures are typically designed to provide structure with a desired service life in a specific environment. A characteristic feature of HPC that sets it apart from conventional concrete is the use of chemical and mineral admixtures to improve both fresh and hardened properties. The mineral admixtures most commonly used in HPC include such materials as fly ash, ground granulated blast furnace slag, silica fume, and metakaolin (6). These materials are mostly used in HPC to reduce its permeability with respect to water and chloride ions and thus extend the service life of the structure.

Service life of reinforced concrete structure can be extended by delaying the initiation of the corrosion process of the reinforcing bar. There are several methods that can be used for this purpose, including increasing the cover depth, using corrosion inhibiting admixtures, using coated reinforced steel or non-corroding reinforcement, or reducing the rate of chloride diffusion by using low permeable concrete. Lowering concrete permeability is especially effective as it slows down the rate of diffusion of carbon dioxide (CO_2) molecules and chloride (Cl^-) ions, and thus reduces the risk of destroying the passivating film on the steel surface. Crack-free concrete with low permeability will also reduce the rate of corrosion (once initiated) by limiting the diffusion of oxygen and water.

The research presented in this paper is the result of extensive laboratory study in which the influence of quality and composition of concrete on its chloride penetrability was evaluated using both long-term and accelerated techniques (7). The results of these

obniży również prędkość korozji (już rozpoczętej) poprzez ograniczenie dyfuzji tlenu i wody.

Wyniki przedstawione w niniejszym referacie opierają się na sześciu badaniach laboratoryjnych, w których wpływ jakości i składu betonu na penetrację chlorków został oceniony przy wykorzystaniu metod zarówno długoterminowych jak i przyspieszonych (7). Wyniki tych prób zostały wykorzystane dla obliczenia efektywnych współczynników dyfuzji jonów chlorkowych, które z kolei posłużyły do ustalenia wpływu przenikalności chlorku na oczekiwany czas inicjacji korozji (t_i). Czas inicjacji korozji został ustalony przy wykorzystaniu Modelu Przewidywanego Czasu Użytkowania 365™ (8, 9).

2. Materiały i metody badawcze

Przeprowadzono dwie serie doświadczeń. Seria I obejmowała przygotowanie 45 różnych mieszanek w oparciu o statystyczne metody planowania doświadczeń, w przypadku których zbadano wytrzymałość na ściskanie (po 28 i 56 dniach), migrację jonów chlorkowych ocenianą metodą przyspieszoną oraz przewodność chlorkową. Uzyskane wyniki zostały wykorzystane dla wybrania 10 mieszanek, których właściwości badano w serii II, szczególnie pod kątem transportu jonów chlorkowych oraz oceny przewidywanego okresu trwałości.

2.1. Zastosowanie metody planowania doświadczeń w odniesieniu do określania składu mieszanki betonowej

Tradycyjne podejście do doboru składu mieszanki betonowej jest procesem dwuetapowym. Pierwszy etap polegał na określeniu udziału poszczególnych składników. Drugi etap obejmował przygotowanie próbnego zarobku i wprowadzenie koniecznych korekt (zazwyczaj zmiana jednego składnika), aż do uzyskania poprawnej mieszanki, spełniającej wszystkie żądane kryteria. Ponieważ zmiany zawartości jednego ze składników mogą wywierać niepożądany wpływ na ogólną jakość mieszanki, wszystkie zmiany powinny być dokonywane w sposób ściśle kontrolowany i systematyczny. Może to spowodować nieproporcjonalnie dużą ilość próbnego zarobku i doprowadzić do nadmiernych kosztów etapu opracowania składu mieszanek betonowych.

Zaprojektowanie składu mieszanki betonu HPC może być znacznie udoskonalone poprzez zastosowanie metod pozwalających na optymalizację układów o wielu zmiennych, szczególnie wtedy, gdy poszukujemy kilku rozwiązań. Dwie podstawowe metody, które można wykorzystać do optymalizacji układu o wielu zmiennych obejmują tradycyjną metodę projektowania składu mieszanki oraz metodę wykorzystującą powierzchnię odpowiedzi (11). Zalety i wady obydwu tych metod zostały omówione przez Simona et al. (12).

W metodzie tradycyjnej, łączna masa (lub objętość) produktu jest określona a składniki są ustalane w proporcji do całkowitej ilości.

tests were used to calculate the chloride diffusion coefficients which were, in turn, used to determine the impact of concrete chloride penetrability on the expected time to corrosion initiation (t_i). The time to corrosion initiation was determined using the Life-365 Service Life Prediction Model™ (8, 9).

2. Materials and Test Procedures

This section provides information on mixture design methodology for concretes used in the course of this study and presents details of experiments performed. The experiments were performed in two parts. Part I involved statistical design of an experiment that resulted in preparation of a total of 45 different mixtures that were tested for compressive strength (at 298 and 56 days), rapid chloride ion penetration and chloride conductivity. The results of these tests were used to select a set of 10 mixtures that were evaluated in Part II of the study with respect to chloride transport properties and its implication on the service life prediction.

2.1. Application of the Concept of Statistical Design of Experiments to Mixture Proportioning

The traditional approach to selecting mixture proportions is a two-step process. The first step is identification of the starting quantities of individual components. The second step involves production of a series of trial batches and performing necessary adjustments (typically changing one component at a time) until the mixture is optimized and all desired criteria are met. Since changing quantities of one of the components may have an undesirable influence on the overall quality of the mixture, all adjustments should be made in a well controlled and systematic way. This may result in a disproportionately high number of trial batches and make the mixture selection process too expensive.

The process of HPC mixture selection can be greatly improved by employing statistical techniques that can optimize multivariable systems, especially if more than one response is of importance. The two primary techniques that can be used for optimization of a multivariable system include the mixture method and response surface methodology (11). The advantages and disadvantages of both of these techniques have been discussed by Simon et al. (12).

In the mixture method, the total mass (or volume) of the product is fixed and the components are set as the proportions of the total amount. This results in the total volume fractions of the components equaling one, which means that the individual variables are not independent. Although the experimental region of interest is defined more naturally in the mixture method, the analysis is not very straightforward.

The response surface methodology (RSM) is a second group of statistical techniques for model building and analysis that can be applied to the problem of optimizing concrete mixture proportioning. By applying these techniques, one can relate the response

W rezultacie łączna objętość wszystkich składników mieszanki jest równa jeden, co oznacza, że poszczególne zmienne nie są niezależne. Chociaż obszar doświadczalny w tej metodzie jest zdefiniowany w sposób bardziej naturalny, analiza nie jest tak prosta.

Metoda powierzchni odpowiedzi (Response Surface Methodology) stanowi drugą grupę metod statystycznych służących do budowania modelu i analizy, która może być zastosowana do problemu optymalizacji projektowania składu mieszanki betonowej. Poprzez zastosowanie tych metod, można odnieść odpowiedź (zmienną wyjściową) do ilości danych wstępnych (zmienne wejściowe), które na nią wpływają. Powierzchnie odpowiedzi mogą być przedstawione graficznie, gdy zmienna wyjściowa jest wykreślona jako funkcja jednego lub więcej czynników ilościowych. Projektowanie według metody RSM jest bardziej korzystne, gdy wiadomo, że badane czynniki istotnie wpływają na odpowiedź i gdy celem jest zarówno identyfikacja zależności pomiędzy odpowiedzią i tymi czynnikami jak i optymalizacja czynników (13). Była ona stosowana wcześniej (14-16) w badaniach związanych z betonem i została pozytywnie zweryfikowana przy rozwiązywaniu tego rodzaju problemów statystycznych.

Metoda RSM stanowi również podstawę dla programu komputerowego służącego do optymalizacji składu betonu (Concrete Optimization Software Tool), interaktywnej, opartej na Internecie, metody optymalizacji składu zaczynu cementowego, zaprawy i mieszanki betonowej. COST stanowi wspólny produkt Federalnego Zarządu Autostrad (FHWA) oraz Krajowego Instytutu Normalizacji i Technologii (NIST) i pozwala na opracowanie programu doświadczalnego przygotowania i oceny mieszanek. Użytkownik może zmieniać wskaźnik wodno-cementowy oraz inne składniki, takie jak cement, dodatki mineralne i domieszki chemiczne oraz zawartość kruszywa. Gdy kończy się opracowywanie doświadczenia a plan doświadczeń jest wygenerowany przez oprogramowanie, użytkownik powinien przeprowadzić doświadczenia laboratoryjne i wprowadzić zmierzone wartości (wyniki testów) do programu COST. Program ten dokona analizy wyników i określi optymalne proporcje mieszanki w oparciu o kryteria przekazane przez użytkownika. Program COST jest programem bezpłatnym i dostępnym w Internecie pod następującym adresem: <http://ciks.cbt.nist.gov/cost>.

2.2. Szczegóły projektowania doświadczeń

W tym studium, zestaw badań został zaplanowany przy wykorzystaniu eksperymentalnej metody projektowania powierzchni odpowiedzi, zwanej centralnym planem kompozycyjnym (Central Composite Design). Jak to pokazano w tablicy 1, przygotowano trzy różne projekty doświadczalne, każdy z nich wykorzystujący 3 niezależne składniki (zmienne wejściowe). Dla każdego projektu, zmienne niezależne obejmowały dwa dodatki mineralne oraz stosunek wodno-cementowy. Każdej z tych zmiennych przypisano symbol (X_1 , X_2 lub X_3), który mógł być wykreślony na schemacie 3-D poszczególnego projektu, jak pokazano to na rysunku 1.

(output variable) to the number of predictors (input variables) that affect it. Response surfaces are the geometric representations obtained when an output variable is plotted as a function of one or more quantitative factors. RSM designs are most advantageous when the factors examined are known to significantly influence the response and when the interest centers on both identifying the relationship between the response and these factors and on optimizing the factors (13). It has been used before (14-16) in concrete-related research and worked well for this category of statistical problems.

The RSM technique also forms a basis for the Concrete Optimization Software Tool (COST), an internet-based interactive system for optimization of cement paste, mortar, and concrete mixtures. COST is a joint product of the Federal Highway Administration (FHWA) and the National Institute of Standards and Technology (NIST), and can design an experimental program for preparation and evaluation of mixtures. The user can vary water-to-cement ratio and other parameters such as cement, mineral and chemical admixtures and aggregate content. Once the design of the experiment is completed and the experimental plan is generated by the software, the user needs to perform the experiments in the laboratory and input the measured responses (test data) into the COST software. COST then performs an analysis of the results and determines the optimum mixture proportions based on the criteria supplied by the user. The COST program is free and can be accessed on the internet at the following address: <http://ciks.cbt.nist.gov/cost>.

2.2. Details of Experiment Design

In this study, the test matrix was designed using a specific type of response surface experimental design method called central composite design (CCD). As shown in Table 1, three different experimental designs were prepared, each utilizing 3 independent factors (variables). For each design, the independent variables included two mineral admixtures and water-binder ratio. Each of the variables was assigned a label (X_1 , X_2 or X_3) that could be plotted on a 3-D representation of the particular design as shown in Figure 1.

Each of the ranges presented in Figure 1 was divided into five levels (equally distributed within the range) and commercially available computer software was used to select the mixes to be used in the experiment. An example of the design matrix for Experimental Design 1 (PC/FA/SF system) is shown in Table 2.

Table 1

VARIABLES USED IN THE 3-FACTOR CENTRAL COMPOSITE DESIGN

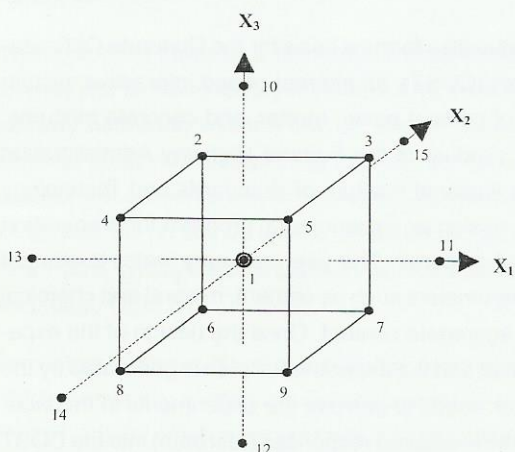
Experimental Design No.	Factor (Variable)		
	X_1	X_2	X_3
1	Fly ash	Silica fume	w/b ratio
2	Slag	Silica fume	w/b ratio
3	Fly Ash	slag	w/b ratio

Tablica 1

ZMIENNE WYSTĘPUJĄCE W TRÓJCZYNNIKOWYM CENTRALNYM PLANIE KOMPOZYCYJNYM

Zestaw doświadczalny	Czynnik (Zmienna wejściowa)		
	X ₁	X ₂	X ₃
1	Popiół lotny	Pył krzemionkowy	stosunek w/c
2	Żużel	Pył krzemionkowy	stosunek w/c
3	Popiół lotny	Żużel	stosunek w/c

Using a test matrix similar to that shown in Table 2 for each of the experimental designs, a total of 45 different mixtures were prepared and tested in the laboratory. The total binder content in the mixtures was kept constant at 390 kg/m³, and the coarse aggregate content was 1100 kg/m³. The amount of sand varied from 638 to 798 kg/m³ depending on the mix. All mixtures were produced using the ASTM Type I cement.



Zestaw doświadczalny 1
 X₁ = zawartość PL: (0 - 40%)
 X₂ = zawartość PL: (0 - 10%)
 X₃ = w/c (0,30 - 0,50)

Experimental Design 1
 X₁ = FA content (0 - 40%)
 X₂ = SF content (0 - 10%)
 X₃ = w/b (0.30 - 0.50)

Zestaw doświadczalny 2
 X₁ = zawartość żużla (0 - 40%)
 X₂ = zawartość pyłu krzemionkowego (0 - 10%)
 X₃ = w/c (0,30 - 0,50)

Experimental Design 2
 X₁ = Slag content (0 - 40%)
 X₂ = SF content (0 - 10%)
 X₃ = w/b (0.30 - 0.50)

Zestaw doświadczalny 3
 X₁ = zawartość PL (0 - 40%)
 X₂ = Zawartość żużla (0 - 40%)
 X₃ = w/c (0,30 - 0,50)

Experimental Design 3
 X₁ = FA content (0 - 40%)
 X₂ = Slag content (0 - 40%)
 X₃ = w/b (0.30 - 0.50)

Rys. 1. Przedstawienie graficzne wykorzystanego w niniejszym opracowaniu trójczynnika centralnego planu kompozycyjnego
 Fig. 1. Graphical Representation of the 3-Factor Central Composite Design used in this Study

Każdy z zakresów przedstawionych na rysunku 1 został podzielony na pięć poziomów (równo rozdzielonych w każdym zakresie) i wykorzystano dostępne na rynku oprogramowanie komputerowe

The mixtures were wet-cured for a period of up to 56 days and tested for four types of selected responses (compressive strength at 28 days, compressive strength at 56 days, rapid chloride per-

Tablica 2 / Table 2

ZAKRESY ZMIAN SKŁADNIKÓW ORAZ W/S (WODA/SPOIWO) W ZESTAWIE DOŚWIADCZALNYM 1
 FACTOR LEVELS AND MATERIALS USED IN EXPERIMENTAL DESIGN 1

Nr mieszanki (PC/FA/SF) Mixture No. (PC/FA/SF)	ZAKRESY ZMIAN CZYNNIKÓW (zmiennych wejściowych) FACTOR LEVELS		
	X ₁ = ilość popiołu lotnego, (% w stos. do masy spoiwa) X ₁ = Fly ash dosage, (% by mass of binder)	X ₂ = Ilość pyłu krzemionk. (% masy spoiwa) X ₂ = Silica fume dosage (% by mass of binder)	woda/spoiwo water/binder
	1	20	5
2	10	7.5	0.45
3	30	7.5	0.45
4	10	2.5	0.45
5	30	2.5	0.45
6	10	7.5	0.35
7	30	7.5	0.35
8	10	2.5	0.35
9	30	2.5	0.35
10	20	5	0.50
11	40	5	0.40
12	20	5	0.30
13	0	5	0.40
14	20	0	0.40
15	20	10	0.40

we dla wyboru mieszanek stosowanych w tym doświadczeniu. Przykład matrycy dla zestawu doświadczalnego 1 (układ PC/FA/SF: cement portlandzki/popiół lotny/pył krzemionkowy) jest pokazany w tablicy 2.

Do zrealizowania zakresu badań podobnego do tego, który jest pokazany w tablicy 2 dla każdego z projektów doświadczalnych, przygotowano i zbadano laboratoryjnie łącznie 45 mieszanek o różnym składzie. Łączną ilość spoiwa w mieszankach utrzymywano na stałym poziomie 390 kg/m^3 , a zawartość kruszywa grubego wynosiła 1100 kg/m^3 . Ilość piasku wahała się od 638 do 798 kg/m^3 , w zależności od mieszanki. Wszystkie mieszanki przygotowano przy zastosowaniu cementu Typu I według ASTM.

Wykonane próbki dojrzewały w wodzie przez okres do 56 dni i były badane pod kątem uzyskania czterech wybranych odpowiedzi (oznaczono wytrzymałość na ściskanie po 28 i 56 dniach, migrację chlorków określaną metodą przyspieszoną oraz przewodność chlorkową). Wyniki tych badań wykorzystywano dla dokonania oceny odpowiedniego modelu statystycznego dla każdej odpowiedzi jako funkcji składu mieszanki. Chociaż centralny plan kompozycyjny (CCD) pozwala na estymację pełnej postaci modelu jako wielomianu drugiego stopnia, niektóre z występujących w nim czynników mogą nie mieć znaczenia.

Ponieważ w doświadczeniu tym wybrano trzy czynniki dla każdego składu spoiwa, ogólne równanie dla modeli regresji kwadratowej może być wyrażone w sposób następujący (17):

$$E\{Y\} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3$$

gdzie:

$E\{Y\}$ stanowi spodziewaną wartość charakterystyki parametru (na przykład wytrzymałość na ściskanie lub szybko przepuszczalność chlorków),

X_1, X_2, X_3 są czynnikami rozważanymi w tym studium (np. X_1 = zawartość popiołu lotnego, X_2 = zawartość pyłu krzemionkowego, a X_3 = stosunek wody do spoiwa),

β_0 jest wartością przecięcia osi, a

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{23}$ stanowią współczynniki regresji dla wyrażeń używanych w tym równaniu.

Uzyskano łącznie 27 różnych modeli w oparciu o dostępne wyniki badań. Aby uprościć interpretację funkcji odpowiedzi zawierającej 3 zmienne, jedna ze zmiennych może być utrzymywana jako stała. W takim przypadku, model będzie miał tylko dwie zmienne i będzie można go łatwo przedstawić w formie wykresu płaskiego. Takie podejście zostało zastosowane w niniejszym studium i każdy z 27 modeli został wykorzystany do symulowania odpowiedzi przy jednej z trzech wartości stosunku wody do spoiwa ($w/s = 0,35; 0,40$ i $0,45$), i zmieniającej się ilości dodatków mineralnych. Na tej podstawie, opracowano łącznie 81 wykresów warstwicznych, które odnoszą skład mieszanki do wybranych właściwości betonów badanych w prezentowanym studium.

meability, and chloride conductivity). The values obtained from these tests were used to estimate an appropriate statistical model for each of the responses as a function of mixture composition. Although CCD allows for the estimation of the full quadratic model, some of the terms may not be significant.

Since three factors were selected for each binder system in the study, the general equation for the quadratic regression models can be expressed as follows (17) as:

$$E\{Y\} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3$$

where:

$E\{Y\}$ is the expected value of performance characteristic (e.g. compressive strength or rapid chloride permeability),

X_1, X_2, X_3 are the factors considered in the study (e.g. X_1 = fly ash content, X_2 = silica fume content and X_3 = water-binder ratio),

β_0 is the intercept value, and

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{23}$ are regression coefficients for the terms used in the equation.

A total of 27 different models were generated based on the available test results. In order to simplify the interpretation of the response function containing 3 variables, one of the variables can be kept constant. In such case model will only have two variables and it can be portrayed easily in a form of a contour plot. This approach was utilized in the present study and each of the 27 models was used to simulate the response at one of the three water-binder ratios (0.35, 0.40 and 0.45) while varying the amount of mineral admixtures. As a result, a total of 81 contour maps that relate the mixture composition to selected concrete parameters tested in this study were generated.

An example of such plot is given in Figure 2 below. Also indicated on the plot is the recommended binder combination that will yield the desired performance characteristics.

Since the experiment involved multiple response function, the fitted response surface should, in theory, satisfy each response variable. However, finding a single factor that can simultaneously satisfy all response surfaces is typically not possible as no single binder combination can optimize all response variables. This problem can be solved by assigning threshold values to desired performance characteristics.

The threshold values used in this study are given in Table 3. These values were used to select the recommended ranges of binders as shown in Figure 2. These recommended ranges were located in the overlapping areas of superimposed contour plots for all performance characteristics considered and were used in preparing mixtures for Part II of the study.

The analysis of data from all 45 mixtures prepared in the Part I of this study resulted in the following recommendations for optimum binder combinations:

Przykład takiego wykresu jest pokazany na rysunku 2. Na wykresie jest również wskazana zalecana kombinacja spoiwa, która przyniesie pożądaną charakterystykę betonu stwardniałego.

Ponieważ doświadczenie to obejmowało różne funkcje odpowiedzi, odpowiednia powierzchnia odpowiedzi powinna – teoretycznie – obejmować wszystkie zmienne odpowiedzi. Jednakże, znalezienie jednego czynnika, który może jednocześnie spełnić wszystkie powierzchnie odpowiedzi jest zazwyczaj niemożliwe, gdyż żadna pojedyncza kombinacja spoiwa nie może spełnić warunku optymalizacji wszystkich zmiennych odpowiedzi (zmiennych wyjściowych). Problem ten może być rozwiązany poprzez przypisanie wartości progowych żądanym charakterystykom parametrów.

Wartości progowe stosowane w tym studium są podane w tablicy 3. Wartości te były wykorzystywane dla wybrania zalecanego zakresu składu spoiwa, jak pokazano to na rysunku 2. Te zalecane zakresy leżały na zachodzących na siebie polach nałożonych wykresów warstwicowych dla wszystkich charakterystyk rozważanych parametrów i były wykorzystywane do sporządzania mieszanek dla Części II badań przeprowadzonych w ramach niniejszego studium.

Analiza danych uzyskanych dla wszystkich 45 mieszanek opracowanych w Części I tego studium przyniosła w wyniku następujące zalecenia dla optymalnych składów spoiwa:

Skład spoiwa:

cement portl. PC/popiół lotny FA/pył krzemionkowy SF:

25–30% popiołów lotnych w połączeniu z 5–7% pyłu krzemionkowego;

Skład spoiwa:

cement portl. PC/żużel/pył krzemionkowy SF:

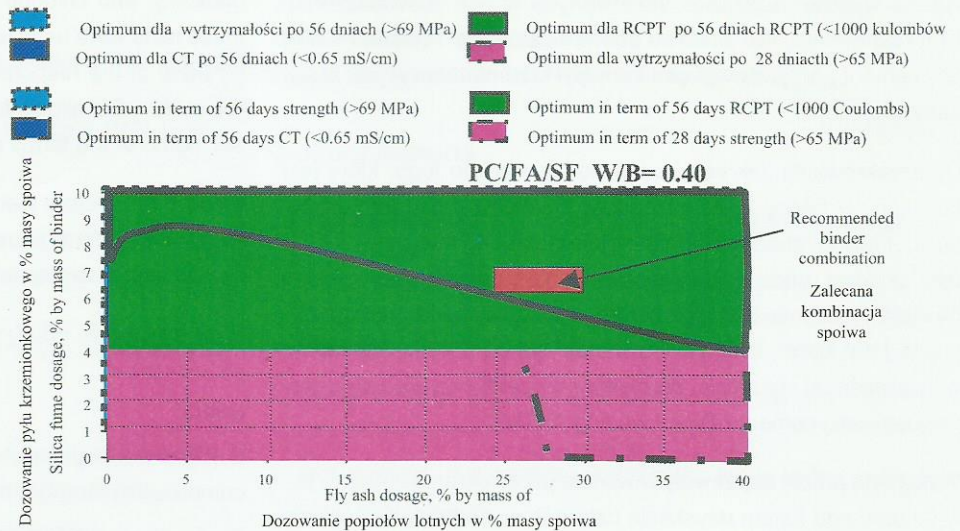
25–30% żużla w połączeniu z 5–7% pyłu krzemionkowego;

Skład spoiwa:

cement portl. PC/popiół lotny FA/żużel:

20–30% popiołów lotnych w połączeniu z 20–30% żużla

Skład 10 mieszanek stosowanych w Części II niniejszego studium jest podany w tablicy 4. Zastosowano domieszki superplastyfikatora i środka napowietrzającego, potrzebne dla uzyskania pożądanego opadu stożka wynoszącego 140 mm (5.5 cala) oraz zawartości powietrza w świeżym betonie na poziomie 6,5%. Dwie z tych mieszanek (nr 7 i 8) stanowiły zwykłe mieszanki betonowe, podczas gdy pozostałe zawierały różne proporcje jednego albo dwóch materiałów pucolanowych. Zastosowane dodatki pucolanowe to popiół lotny (FA) klasy C, granulowany pył krzemionkowy



Rys. 2. Wykres warstwicowy funkcji odpowiedzi dla mieszanek PC/FA/SF o stałej wartości w/s = 0,4; CT – przewodność chlorkowa, RCPT – przepuszczalność jonów chlorkowych określona metodą przyspieszoną

Fig. 2. Contour Plots of Response Functions for PC/FA/SF mixture prepared at a fixed w/b = 0.4.

PC/FA/SF binder system: 25-30% FA combined with 5-7% SF;
 PC/Slag/SF binder system: 25-30% Slag combined with 5-7% SF;
 PC/FA/Slag binder system: 20-30% FA combined with 20-30% Slag

The composition of 10 mixtures used in Part II of the study is given in Table 4. High range water reducing and air entraining admixtures were used as needed to provide a target slump of 140 mm (5.5 in.) and fresh concrete air content of 6.5%. Two of the mixtures (No. 7 and No. 8) were plain concrete mixtures whereas the rest contained various percentages of either one or two pozzolanic materials. The pozzolanic materials used were class C fly ash (FA), densified silica fume (SF) and ground granulated blast furnace slag (Slag). The total binder content for all mixtures was kept constant at 390 kg/m³ (656 lb/yd³), and two levels (0.35 and 0.40) of the water-binder ratio were used. The cement used in all mixtures was ordinary Type I Portland cement. Crushed limestone with maximum particle size of 19 mm (3/4 in.) was used as coarse aggregate. The fine aggregate used was siliceous natural river sand.

2.3. The Rapid Chloride Permeability Test (RCP)

Rapid chloride ion permeability (RCP) test was conducted in accordance with ASTM C 1202 (18). The schematic of the test apparatus is shown in Figure 3.

The test uses 50 mm thick concrete disk with a diameter of 95 mm. The disk is vacuum saturated for 18 hours and is clamped between two cells, one containing the solution of 3% of NaCl and the other filled with 0.3N solution of NaOH. The total amount of electrical charge (coulombs) passing through the specimens under 60 volts DC during 6 hours' test period is used as an indicator of resistance of concrete to chloride ion penetration.

Tablica 3 / Table 3

WARTOŚCI PROGOWE DLA PARAMETRÓW STOSOWANE W CZĘŚCI I BADAŃ NINIEJSZEGO STUDIUM
 THRESHOLD VALUES FOR PERFORMANCE CHARACTERISTICS USED IN PART ONE OF THIS STUDY

w/s w/b	Charakterystyka parametrów – część I mieszanki			
	Performance Characteristics – PART ONE Mixtures			
	Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach, MPa Compressive Strength @28 days, MPa	Wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach, MPa Compressive Strength @56 days, MPa	Przepuszczalność jonów chlorków po 56 dniach, (met. przyspieszona) kulomby Rapid chloride ion permeability @ 56 days, Coulombs	Przewodność po 56 dniach, ms/cm Conductivity @ 56 days, ms/cm
0,45	>58	>62	<1,000-2,000	<0,65-0,85
0,40	>58-65	>62-69	<1,000-1,500	<0,55-0,65
0,35	>76	>76-79	<1,000	<0,45-0,50

Tabela 4 / Table 4

SKŁAD MIESZANEK STOSOWANYCH W CZĘŚCI II BADAŃ NINIEJSZEGO STUDIUM
 COMPOSITION OF MIXTURES USED IN PART II OF THE STUDY

Numer mieszanki Mix No.	w/s w/b	Spoiwo Binder					Kruszywo Aggregate		Woda (kg/m ³) Water (kg/m ³)
		Popiół lotny (kg/m ³) FA (kg/m ³)	Pył krzemionkowy (kg/m ³) SF (kg/m ³)	Żużel (kg/m ³) Slag (kg/m ³)	Cement portlandzki (kg/m ³) Portland Cement (kg/m ³)	Łącznie spoiwo (kg/m ³) Total Binder (kg/m ³)	Grube (kg/m ³) Coarse (kg/m ³)	Drobne (kg/m ³) Fine (kg/m ³)	
1	0,40	0	23,4	0	366,6	390	1049	683	156
2	0,40	97,5	23,4	0	269,1	390	1049	669	156
3	0,40	156	23,4	0	210,6	390	1049	661	156
4	0,40	97,5	0	0	292,5	390	1049	678	156
5	0,35	156	0	0	234	390	1049	721	137
6	0,40	0	23,4	97,5	269,1	390	1049	677	156
7	0,35	0	0	0	390	390	1049	743	137
8	0,40	0	0	0	390	390	1049	692	156
9	0,35	0	0	97,5	292,5	390	1049	737	137
10	0,35	97,5	0	97,5	195	390	1049	723	137

(SF) oraz zmielony granulowany żużel wielkopiecowy. Całkowitą zawartość spoiwa we wszystkich mieszankach utrzymywano na poziomie 390 kg/m³ (656 funtów/yd³) i stosowano dwie wielkości stosunku wodno-cementowego (0,35 i 0,40). We wszystkich mieszankach stosowano zwykły cement portlandzki Typu I. Kruszywo grube stanowił łamany wapień o maksymalnej wielkości ziaren 19 mm (3/4 cala). Kruszywem drobnym był naturalny rzeczny piasek krzemionkowy.

2.3. Przyspieszone badanie dyfuzji jonów chlorkowych (RCP)

Przyspieszone badanie dyfuzji jonów chlorkowych (Rapid Chloride Ion Permeability) przeprowadzono zgodnie z ASTM C 1202 (18). Schemat aparatu pomiarowego pokazano na rysunku 3.

2.4. Diffusion Coefficient from the Rapid Migration (CTH) Test

The electrochemical method, often referred to as a Rapid Migration or CTH test (19-21) was applied in this study to determine chloride diffusion coefficient. The schematic of the test set-up is shown in Figure 4.

Two inch-thick concrete discs were cut from 4 in. x 12 in. cylinders and subjected to about 30V of voltage through external electrodes (stainless steel plates) located on the top and bottom of the specimen. At the end of the tests (typically after about 24 hours) the concrete disks were split-opened and the newly-exposed surface was sprayed with silver nitrate solution to reveal the depth of chloride penetration. The depth of chloride penetration was measured at 7 points along the surface and the data was used to calculate

W metodzie tej stosuje się próbkę betonową o grubości 50 mm i średnicy 95 mm. Próbkę jest nasycana wodą w próżni przez 18 godzin, a następnie zostaje zaciśnięta między dwoma komorami, jedną zawierającą 3% roztwór NaCl i drugą wypełnioną 0,3 N roztworem NaOH. Całkowita wielkość ładunku elektrycznego (w kulombach) przechodzącego przez próbkę pod napięciem 60 V prądu stałego w ciągu 6 godzin badania stanowi wskaźnik oporu, jaki stawia beton penetracji jonów chlorkowych.

2.4. Efektywny współczynnik dyfuzji badany metodą przyspieszoną (CTH)

Metoda elektrochemiczna, którą często określa się jako test szybkiej migracji lub test CTH (19-21) była zastosowana w tym studium dla określenia efektywnego współczynnika dyfuzji chlorków. Schemat tej metody jest przedstawiony na rysunku 4.

Płytki betonowe o grubości dwóch cali (około 50mm) zostały wycięte z cylindrów o wymiarze 4" x 12" (około 100 x 290 mm) i poddane przepływowi prądu o napięciu około 30V poprzez zewnętrzne elektrody (płytki ze stali nierdzewnej) umieszczone na górze i dole próbki. Pod koniec pomiarów (zazwyczaj po około 24 godzinach), płytki betonowe przecięto i powierzchnie powstałe w wyniku przecięcia spryskiwano roztworem azotanu srebra w celu stwierdzenia głębokości wnikania jonów chlorkowych. Głębokość migracji jonów chlorkowych mierzono w 7 punktach na powierzchni, a wyniki wykorzystano do obliczenia współczynnika nieustalonego stanu dyfuzji chlorków przy wykorzystaniu równania [1]:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} (x_d - 0.0238\sqrt{\frac{(273+T)x_d}{U-2}}) \quad [1]$$

gdzie:

T – średnia wartość początkowej i końcowej temperatury cieczy anodowej, °C,

L – grubość próbki betonowej, m,

U – wartość absolutna zastosowanego potencjału, V,

the non-steady state chloride diffusion coefficient using equation [1] below:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L}{(U-2)t} (x_d - 0.0238\sqrt{\frac{(273+T)x_d}{U-2}}) \quad [1]$$

where:

T – average value of the initial and final temperature in the anolyte solution, °C,

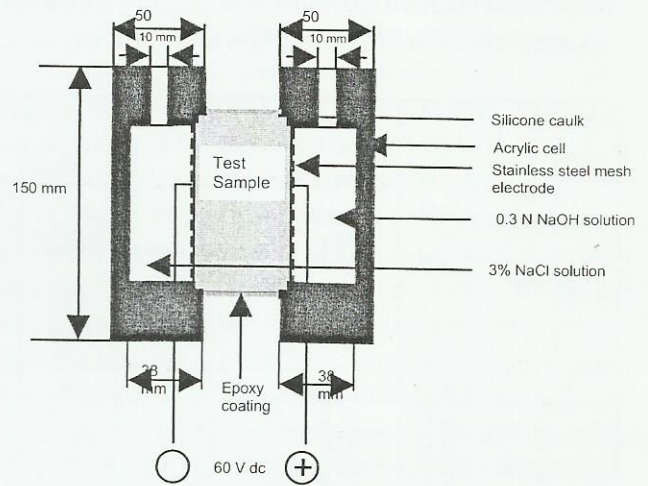
L – thickness of concrete specimen, m,

U – absolute value of the applied potential, V,

D_{nssm} – non-steady state diffusion coefficient, m²/s,

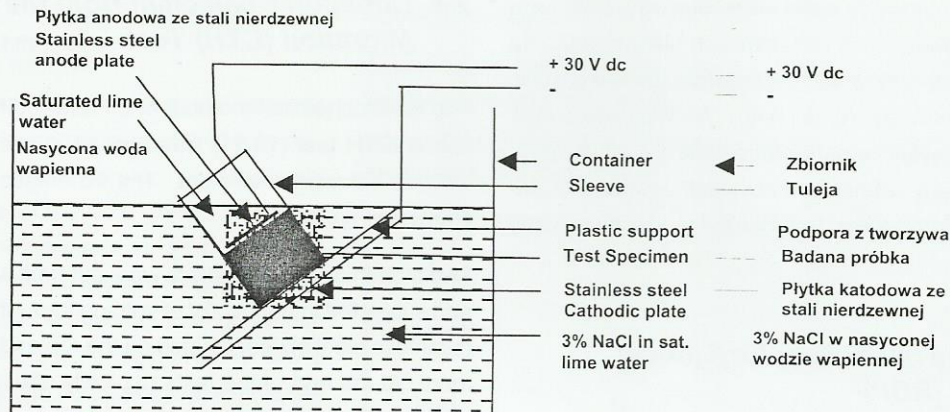
x_d – average value of penetration depth, m, and

t – test durations, hour.



Rys. 3. Schemat urządzenia do przyspieszonego badania dyfuzji jonów chlorkowych

Fig. 3. Schematic of the Rapid Chloride Permeability Test



Rys. 4. Schemat urządzenia do badania migracji jonów chlorkowych metodą przyspieszoną (CTH)

Fig. 4. CTH migration Cell

D_{nssm} – współczynnik nieustalonej dyfuzji, m^2/s ,

x_d – średnia głębokość wnikania, m,

t – czas trwania pomiaru, godziny.

2.5. Efektywne współczynniki dyfuzji i okres do rozpoczęcia korozji określone za pomocą programu Life-365™

Program komputerowy Life-365™ (8) został wykorzystany do obliczenia efektywnych współczynników dyfuzji, dla opracowania profili wniknięcia chlorku oraz oceny czasu do rozpoczęcia korozji dla różnych betonów badanych w ramach niniejszego studium. Program ten zawiera różne algorytmy, które pozwalają na ocenę każdej z tych własności poprzez stosowanie albo wartości domyślnych albo zdefiniowanych przez użytkownika parametrów. Bardziej szczegółowy opis możliwości i ograniczeń tego programu można znaleźć w pracy (9).

3. Wyniki doświadczeń

W punkcie tym omówione są wybrane wyniki badań mieszanek betonowych przygotowanych w Części II niniejszego studium.

3.1. Przyrost wytrzymałości na ściskanie

Chociaż niektóre własności mechaniczne i trwałość betonów zostały ocenione w studium oryginalnym (22), nie będą one opisywane w niniejszej pracy. Tutaj podano przede wszystkim dane związane z migracją jonów chlorkowych. W celach informacyjnych, w tabelicy 5 podano wyniki badań wytrzymałości na ściskanie próbek cylindrycznych o wymiarach 102 x 204 mm (4 x 8 cali), które

2.5. Diffusion Coefficients and Time to Corrosion from Life-365™

The Life-365™ computer program (8) has been used to calculate the diffusion coefficients, to develop chloride profiles, and to estimate time to corrosion for various concretes examined in this study. This computer program contains various algorithms that allow for estimation of each of these properties by either using default values or user defined parameters. More detailed description of the capacities and limitations of this program can be found in reference (9).

3. Experimental Results

This section provides selected results for the concrete mixtures produced and tested during Part II of the study.

3.1. Compressive Strength Development

Although several mechanical and durability properties of these concretes were evaluated in the original (22) study, these will not be reported here as this paper is mostly concerned with data related to chloride penetrability. However, for informative purposes, Table 5 contains results of the compressive strength tests that were performed at various ages on 102 x 204 (4 x 8 in.) cylinders that were moist cured until tested. It can be seen that the 28-day compressive strength varied from about 48 to 62 MPa. Interestingly, at 180 days all but one (No.8, plain concrete) mixtures prepared with w/b of 0.40 develop almost identical strength of about 62 MPa. At the same age, mixtures prepared with w/b of 0.35 developed the strength in the range of 67 to 74 MPa.

Tablica 5 / Table 5

Przyrost wytrzymałości na ściskanie próbek betonów sporządzonych w Części II
Compressive Strength Development for Part II Mixtures

Nr mieszanki Mix No.	w/s w/b	Spoiwo			Wytrzymałość na ściskanie (MPa)					
		Binder			Compressive Strength (MPa)					
		Popiół lotny (%) FA (%)	Pył krzem. (%) SF (%)	Żużel (%) Slag (%)	1 dzień 1 day	3 dni 3 days	7 dni 7 days	28 dni 28 days	56 dni 56 days	180 dni 180 days
1	0,40	0	6	0	16,1	34,2	42,5	56,2	60,1	62,7
2	0,40	25	6	0	8,8	26,6	37,3	51,0	61,2	62,5
3	0,40	40	6	0	----	21,3	30,3	47,0	54,2	63,4
4	0,40	25	0	0	11,4	27,1	37,1	48,7	54,7	63,5
5	0,35	40	0	0	----	26,4	36,0	51,9	57,6	67,0
6	0,40	0	6	25	15,2	29,4	39,5	56,7	58,6	62,5
7	0,35	0	0	0	20,7	39,8	47,4	60,4	61,0	69,9
8	0,40	0	0	0	17,3	31,3	33,6	48,2	50,6	57,7
9	0,35	0	0	25	22,5	40,2	49,4	61,8	69,2	74,0
10	0,35	25	0	25	----	28,1	38,9	57,5	67,6	73,6

przed badaniem dojrzewały w warunkach wilgotnych przez różny okres. Można zauważyć, że wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach zmieniła się od około 48 do 62 MPa. Co jest interesujące, po 180 dniach wszystkie próbki betonu z wyjątkiem jednej (nr 8 – zwykły beton) o stosunku w/s równym 0,40 miały prawie taką samą wytrzymałość około 62 MPa. Po tym samym okresie, próbki betonu o wodno-spoiwowym w/s równym 0,35 osiągnęły wytrzymałość od 67 do 74 MPa.

3.2. Wyniki pomiarów przyspieszonej dyfuzji jonów chlorkowych (RCP)

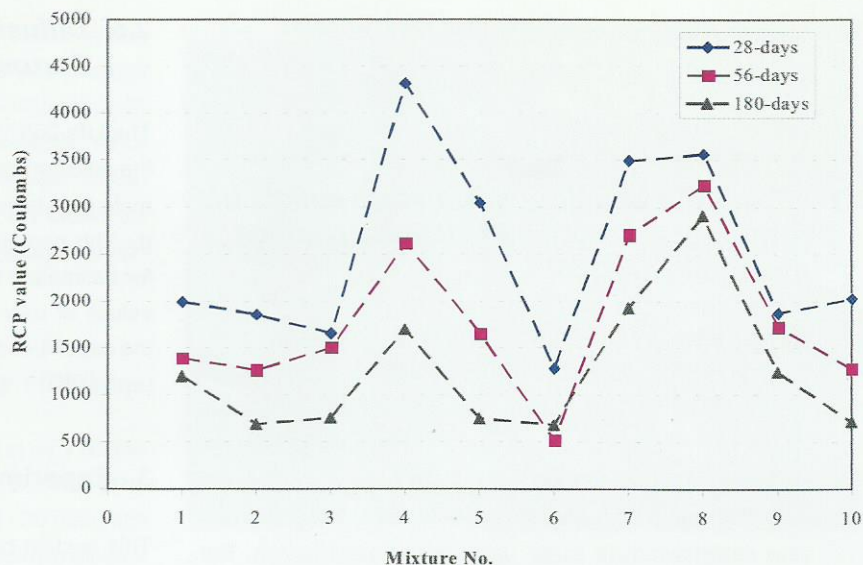
Wyniki pomiarów przyspieszonej dyfuzji jonów chlorkowych próbek betonów przygotowanych w Części II po 28, 56 i 180 dniach twardnienia są pokazane na rysunku 5. Ogólnie, wartości te (RCP) zmniejszały się z długością czasu dojrzewania lub z wiekiem betonu. Stopień redukcji był wyższy dla próbek zawierających dodatki mineralne. Zmniejszenie się dyfuzji po 56 dniach wahało się od 8% do 60%, w porównaniu do wyników po 28 dniach, a zmniejszenie się migracji po 180 dniach wynosiło od 18,3% do 75,5%, w porównaniu z wartościami po 28 dniach.

3.3. Efektywne współczynniki dyfuzji i czas do rozpoczęcia korozji

Wartości efektywnych współczynników dyfuzji dla wszystkich 10 mieszanek zmierzone w Części II niniejszego studium są pokazane na rysunku 6. Próbka betonowa nr 6 (z dodatkiem 25% żużla i 6% pyłu krzemionkowego) miała najmniejszy efektywny współczynnik dyfuzji po 28 dniach, podczas gdy beton nr 4 (z dodatkiem 25% popiołów lotnych) miał najwyższą wartość efektywnego współczynnika dyfuzji po 28 dniach. Najmniejszą wartość efektywnego współczynnika dyfuzji po 180 dniach miała próbka betonowa nr 10 (z dodatkiem 25% popiołów lotnych oraz 25% żużla), a beton nr 8 wykazał wartość najwyższą.

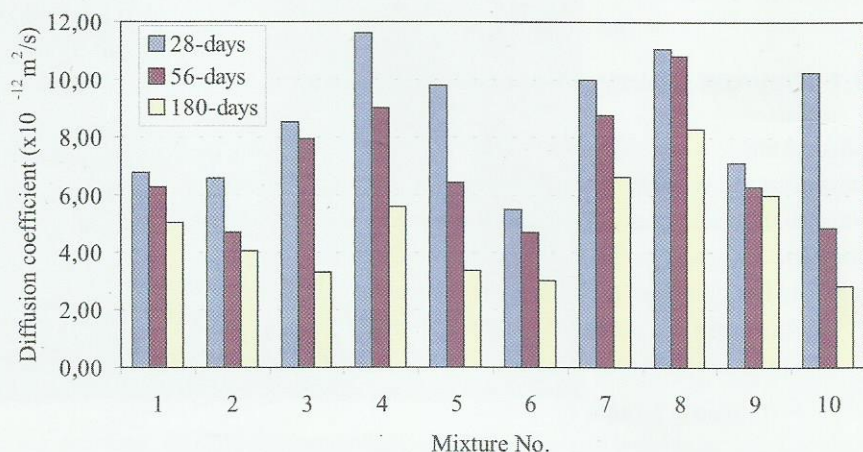
Związek między wartościami efektywnego współczynnika dyfuzji określonymi metodą przyspieszoną (CTH) oraz odpowiednimi wartościami obliczonymi dla tych samych mieszanek przy stosowaniu modelu Life-365 zarówno dla 28- jak i 180 dniowego okresu dojrzewania jest pokazany na rysunku 7.

Można stwierdzić, że występuje stosunkowo silna korelacja pomiędzy tymi dwoma wartościami współczynnika dyfuzji, nawet jeżeli badane betony obejmowały szeroki zakres proporcji składni-



Legenda do rysunku:
RCP value – wartość RCP: przepuszczalność jonów chlorkowych
Mixture No. – beton wykonany z mieszanki nr days - dni

Rys. 5. Przepuszczalność jonów chlorkowych betonów badanych w Części II
Fig. 5. Summary of RCP values for Part II mixtures



Legenda do rysunku:
Diffusion coefficient – współczynnik dyfuzji
Mixture - beton z mieszanki
days – dni

Rys. 6. Zmiany efektywnego współczynnika dyfuzji w zależności od wieku betonów badanych w Części II studium

Fig. 6. Summary of changes of diffusion coefficient with age for Part II mixtures

3.2. Rapid Chloride Permeability Results

Experimental results of rapid chloride permeability for PART TWO concrete mixtures after 28, 56 and 180 days of curing are shown in Figure 5. In general, RCP values decreased with an increase in the curing age. The degree of reduction was higher for the mixtures containing mineral admixtures than for plain mixtures. The decrease in 56-day RCP values varied from 8% to 60% when compared with 28-days results, and the decrease in 180-days RCP values was in the range of 18.3% to 75.5% when compa-

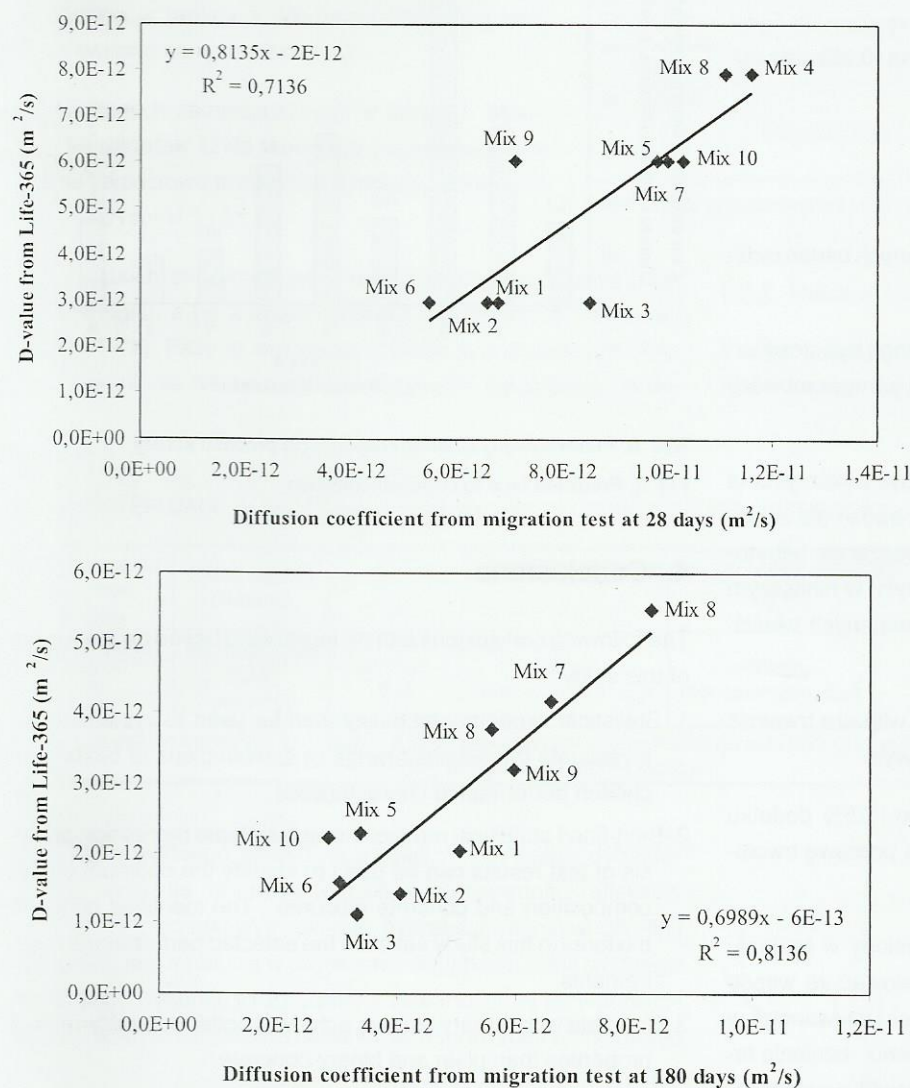
ków i stosunku wody do spoiwa. Stopień korelacji wzrasta z wiekiem betonu, odzwierciedlając opóźniony wpływ dodatków mineralnych na zmniejszenie wnikania jonów chlorków chlorków. Potwierdza to, że punkty odpowiadające betonom nr 3 i 9 (dodatek 40% popiołów lotnych i 25% żużla) są znacznie bliższe linii „najlepszego dopasowania” po 180 dniach niż po 28 dniach. Istnienie tej stosunkowo silnej zależności pomiędzy wartościami określonymi doświadczalnie (CTH) i tymi oszacowanymi za pomocą programu Life-365 wskazuje, że możliwym jest wykorzystanie testu szybkiej migracji dla uzyskania wskaźnika wartości współczynnika dyfuzji stosowanego w modelach Life-Cycle Cost (LCC). Ponadto, wyniki przedstawione na rysunku 7 potwierdzają silną zależność wartości współczynnika dyfuzji od składu spoiwa zastosowanego w mieszance. W szczególności, potwierdzają one korzystny wpływ materiałów pucolanowych na redukcję wartości

red to 28-days data.

3.3. Diffusion Coefficients and Time-to-Corrosion Results

The values of diffusion coefficients for all 10 mixtures evaluated in Phase II of the study are shown in Figure 6. Concrete mixture No. 6 (25% slag and 6% silica fume) had the lowest value of diffusion coefficient at 28 days whereas mixture No. 4 (25% fly ash) had the highest value of diffusion coefficient at 28 days. As to 180-day value of diffusion coefficient, concrete mixture No. 10 (25% fly ash and 25% slag) had the lowest value and plain concrete No. 8 had the highest value.

The relationship between values of diffusion coefficient determined from the rapid migration (CTH) test and the corresponding values calculated for the same mixtures using Life-365 model for both 28 and 180 days of curing is shown in Figure 7.



Legenda do rysunku:

D – value from Life 365 – wartość D określona za pomocą programu Life 365

Diffusion coefficient from migration test at 28 days (at 180 days) – Współczynnik dyfuzji określony po 28 dniach lub po 180 dniach dojrzewania

Rys. 7. Związek pomiędzy efektywnymi współczynnikami dyfuzji wyznaczonymi metodą przyspieszoną i obliczonymi za pomocą programu Life-365

Fig. 7. Relationship between diffusion coefficient from migration test and Life-365 model

It could be seen that there exists relatively strong correlation between these two values of diffusion coefficient even though the mixtures examined covered broad range of compositions and water:cementitious materials ratios. The strength of correlation increases with age, reflecting the delayed contribution of supplementary cementitious materials to reduction in chloride penetrability. This behavior is well illustrated by the fact that points representing mixtures # 3 and # 9 (40% of fly ash and 25% of slag, respectively) are much closer to the “best-fitting” line at 180 days than they were at 28 days. The existence of this relatively strong relationship between the CTH and Life-365 values also indicates that it should be possible to utilize rapid migration test to obtain a good indication of the value of diffusion coefficient for use in the Life-Cycle Cost (LCC) models. In addition, results presented in Figure 7 confirm the strong dependency of the value of diffusion coefficient on the composition of the cementitious material used in the mixture. In particular, they confirm beneficial effect of pozzolanic materials in reducing the value of diffusion coefficient, and thus (based on previously discussed sensitivity analysis) delaying initiation of corrosion. These findings are consistent with the trends observed in the previous study involving concrete exposed under field con-

współczynnika dyfuzji i w ten sposób – w oparciu o poprzednio omówioną analizę wrażliwości – opóźniając inicjację korozji. Stwierdzenia te są spójne z trendami zaobserwowanymi w poprzednim studium, dotyczącym zachowania się betonu w warunkach rzeczywistych (23).

Korzystny wpływ pucolanowego dodatku mineralnego na beton w zakresie jego przewidywanej trwałości jest dalej potwierdzony przez dane dotyczące czasu upływającego do początku procesu korozji, przedstawione na rysunku 8.

Dane te powstały w ramach programu Life-365 przy zastosowaniu składów mieszanek podanych w tablicy 1. Jak widać, we wszystkich przypadkach z wyjątkiem jednego (beton z mieszanki nr 5 z 40% popiołów lotnych), najdłuższe czasy do inicjacji korozji zaobserwowano dla betonów z mieszanek, w których zastosowano dwa dodatki pucolanowe. Stosunkowo długi czas do inicjacji korozji zaobserwowany w przypadku betonu z mieszanki nr 5 jest związany z niskim stosunkiem wodno-spoiwowym (0,35) oraz dużym udziałem popiołu lotnego (40%).

4. Wnioski

W oparciu o przedstawione wyniki przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

Statystyczne metody planowania doświadczeń mogą być stosowane dla systematycznych badań wpływu wybranej gamy kombinacji spoiw na wybrane właściwości betonu.

Najbardziej zgodne modele statystyczne mogą być wykorzystane na drodze analizy regresji wielokrotnej wyników badań dla zidentyfikowania optymalnego składu spoiwa do mieszanek betonowych. Mieszanki betonowe o składach określonych w niniejszym studium zapewniały uzyskanie wybranych wymaganych właściwości betonu stwardniałego.

Beton ze spoiwem trójskładnikowym uzyskiwał większą trwałość niż beton zwykły lub ze spoiwem dwuskładnikowym.

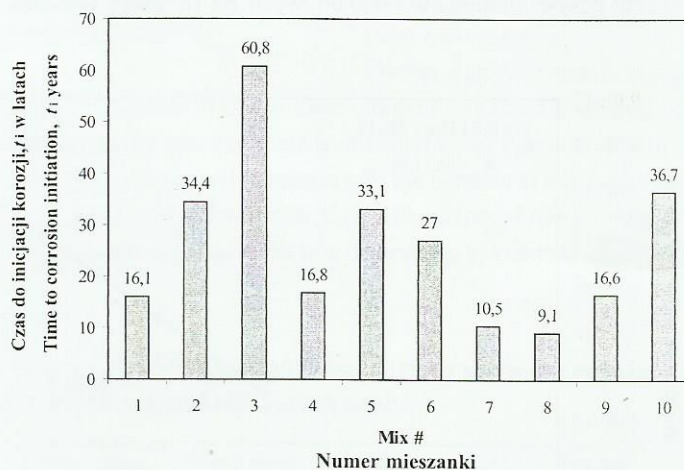
Kombinacja 6% dodatku pyłu krzemionkowego i 25% dodatku popiołów lotnych (lub żużla) przyniosła znaczną poprawę trwałości betonu.

Efektywny współczynnik dyfuzji chlorków określony w badaniu metodą przyspieszoną wydaje się dobrze korelować ze współczynnikiem dyfuzji obliczonym za pomocą modelu używanego w programie Life-365 uwzględniającego skład betonu. Istnienie takiej korelacji pozwala na bardziej precyzyjne przewidywanie trwałości, a więc i czasu użytkowania. Moc tej korelacji wzrasta z wiekiem betonów, szczególnie tych, powstałych z mieszanek wykonanych ze spoiwa zawierającego oprócz cementu portlandzkiego także i pucolanowe dodatki mineralne.

ditions (23).

The beneficial effects of the addition of pozzolanic material to concrete on its predicted service life are further confirmed by the data of time to corrosion initiation presented in Figure 8.

These data was generated by Life-365 program using mixture composition given in Table 1. It can be seen that in all but one case (mixture #5 with 40% of FA) the longest times to corrosion initiation were observed for mixtures where two pozzolanic materials were used. The relative long time to corrosion initiation observed in mixture #5 is related to low water-cementitious material ratio (0.35) and to high percentage of fly ash used (40%).



Rys. 8. Przewidywany czas do rozpoczęcia procesu korozji

Fig. 8. Predicted time to corrosion initiation

4. Conclusions

The following conclusions can be formulated based on the results of this study:

1. Statistical experimental design can be used to systematically investigate the selected range of combinations of binders on chosen performance characteristics.
2. Best-fitted statistical models through multiple regression analysis of test results can be used to identify the optimum binder composition and concrete mixtures. The identified concrete mixtures in this study satisfied the selected performance requirements.
3. Concrete with ternary binders achieved better durability-related properties than plain and binary concrete.
4. A combination of 6% SF and 25% FA (or slag) provided a significant improvement in the durability related properties of concrete.
5. The chloride diffusion coefficient determined from rapid migration test appears to be well correlated to the diffusion coefficient calculated by the Life-365 model on the basis of mixture composition. The existence of such correlation will allow taking into account unique properties of a particular concrete

Podziękowania

Autor z wdzięcznością odnotowuje pomoc uzyskaną ze strony Departamentu Transportu (INDOT) Stanu Indiana poprzez Wspólny Transportowy Program Badawczy (JTRP).

Literatura / References

1. H. G. Russell, "High-performance Concrete - From Buildings to Bridges", *Concrete International*, Vol. 19, No. 8, Aug., 1997, pp. 62 - 63.
2. C. Ozyildirim, "High-performance Concrete for Transportation Structures", *Concrete International: Design & Construction*, Vol. 15, No. 1, Jan., 1993, pp. 33 - 38.
3. S. A. Reddi, "Use of HSC/HPC for Road Bridges in India", *Indian Concrete Journal*, Vol. 70, No. 12, Dec., 1996, pp. 661 - 673
4. C. Ozyildirim, J. Gomez, "High-performance Concrete in Bridge Structures in Virginia", *Materials for the New Millennium Proceedings of the Materials Engineering Conference*, Vol.2, ASCE, New York, NY, U. S. A., 1996, pp. 1357 - 1366.
5. D. A. Streeter, "Developing High-performance Concrete Mix for New York State Bridge Decks", *Transportation Research Record*, No. 1532, Sep., 1996, pp. 60 - 65.
6. J. Olek, "Betony wysokowartosciowe - Przegląd technologicznych doświadczeń w USA" *Materiały konferencji Dni Betonu, Szczyrk, 8-10 października 2002*, Polski Cement, pp. 91 - 112.
7. J. Olek, A. Lu, X. Feng, B. Magee, *Performance Related Specifications for Concrete Bridge Superstructures, Volume 2: High Performance Concrete, FHWA/IN/JTRP-2001/8 Report*, (October 2002), 192 pp.
8. E. C. Bentz, M. D. A. Thomas, *Life-365*, Version 1.1.0, CD ROM, (2001).
9. E. C. Bentz, M. D. A. Thomas, *Life-365 Service Life Prediction Model™*, Program Manual, CD ROM Version 1.1.0 (December 2001), 57 pp
10. J. Olek, A. Lu, X. Feng, B. Magee, *Performance Related Specifications for Concrete Bridge Superstructures, Volume 2: High Performance Concrete, FHWA/IN/JTRP-2001/8 Report*, (October 2002), 192 pp.
11. R. H. Meyers, D. C. Montgomery, (1995) *Response Surface Methodology*, John Wiley & Sons, Inc.
12. M. J. Simon, E. S. Lagergren, L. G. Wathne, (1999) "Optimizing High-Performance Concrete Mixtures Using Statistical Response Surface Methods", *Proceedings of the 5th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, 20 - 24 June 1999, Sandefjord, Norway, 1311 - 1321.
13. L. M. Mason, R. F. Gunst, J. L. Hess, (1989), *Statistical Design and Analysis of Experiments with Applications to Engineering and Science*, John Wiley & Sons, Inc.
14. P. Bajorski, D. A. Streeter, R. J. Perry, (1997), "Applying Statistical Methods for Further Improvement of High-Performance Concrete for New York State Bridge Decks", *Transportation Research Record 1574*, Washington D.C., 71 - 79.
15. NCHRP Report 410, "Silica Fume Concrete for Bridge Decks", (1998), *Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.*
16. M. J. Simon, E. S. Lagergren, K. A. Snyder, (1997), "Concrete Mixture Optimization Using Statistical Mixture Design Methods", *Proceedings of the PCI/FHWA International Symposium on High Performance Concrete*, October 20 - 22, New Orleans, Louisiana, 1997, *Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL*, 230 - 244.
17. J. Neter, M. H. Kutner, C. J. Nachtsheim, W. Wasserman, *Applied Linear Statistical Models*, 4th Edition, ISBN 0-256-11736-5, 1996
18. ASTM C1202, *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, 1997.
19. L. Tang, L. O. Nilsson, *Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field*, *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 1 (Jan-Feb. 1992), pp. 49-53.
20. L. Tang, *Electrically Accelerated Methods for Determining Chloride Diffusivity in Concrete-Current Development*, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 48, No. 176 (Sep., 1996), pp. 173 - 179.
21. L. Tang, and Gjørsv., *Chloride diffusivity based on migration testing, Cement and Concrete Research* 31 (2001) pp. 973-982.
22. A. Lu, *Durability design of high performance concrete and its application in bridge decks*, Ph.D thesis, Purdue University (May 2002), 286 pp.
23. M. D. A. Thomas, M.D.A., and Bamforth, P.B., *Modelling chloride diffusion in concrete. Effect of fly ash and slag*, *Cement and Concrete Research* 29 (2001) pp. 487-495.

and thus resulting in more precise service life predictions. The strength of this correlation increases with time, particularly for mixtures with supplementary cementitious materials.

Acknowledgements

The author gratefully acknowledges the support received from the Indiana Department of Transportation (INDOT) through the Joint Transportation Research Program (JTRP).