

## Właściwości betonu nawierzchni odcinka autostrady niemieckiej zbudowanej w roku 1935 w okolicach Gliwic

## Properties of the concrete pavement of a section of German motorway built in 1935 in the vicinity of Gliwice

### 1. Wprowadzenie

W roku 2016 opublikowano pierwsze wyniki badań nawierzchni betonowej zbudowanej przez Niemców około roku 1935, po bez mała 80 latach eksploatacji (1). Została ona rozebrana w 2013 roku. Obecnie jest ona fragmentem autostrady A4, która przebiega teraz od południowej strony Gliwic, a poprzednio łączyła się z drogą do Zabrze. W czasopiśmie Cement, którego kontynuatorem jest Cement Wapno Beton, w roku 1938 pokazano mapę Niemiec ze zbudowanymi i budowanymi autostradami, a nawet z tymi, których budowa została zaplanowana i przygotowana [rysunek 1] (2). Na tym rysunku widać długi odcinek autostrady biegnący do Wrocławia oraz bardzo krótki w Gliwicach. To właśnie z tego odcinka pobrano duże fragmenty nawierzchni betonowej do badań.

Badania betonu z tych fragmentów nawierzchni wykazały, że kruszywo grube stanowi łamany bazalt, natomiast drobne stanowi piasek kwarcowy z dodatkiem kilkunastu procent żwiru z osadów rzecznych (1). Żwir ten składa się z okruchów skał, głównie drobnoziarnistych piaskowców kwarcowych oraz skaleni. Beton zawiera sporo niezhydratowanego cementu; są to głównie ziarna belitu, przy czym ich wielkość jest znaczna, leży w zakresie 60  $\mu\text{m}$  do 100  $\mu\text{m}$ . Drugą fazą jest brownmillerit, czego można było oczekiwać. Głównym hydratami w zaczynie jest faza C-S-H. Zwraca także uwagę ettringit, a sporadycznie występuje portlandyt. Stosowanie w zimie agresywnego w stosunku do betonu chlorku sodu spowodowało jedynie powstanie w zaczynie sporadycznie występującej soli Friedla. Matryca cementowa jest w bardzo dobrym stanie i wyróżnia się bardzo dobrym wiązaniem zaczynu cementowego z ziarnami kruszywa. Nie stwierdzono mikrospektań w strefach przejściowych kruszywa z matrycą cementową.

Duża odporność tych nawierzchni betonowych na ścieranie doprowadziła do „wyszlifowania” ich powierzchni w wyniku długotrwałej eksploatacji, także na odcinku do Szczecina. Powierzchnia ta przyjęła na niektórych fragmentach gładkość „szkła”. Beton tej nawierzchni był układany w postaci 20 cm warstwy z dylatacjami co 3 m. Te przerwy dylatacyjne nawierzchni stanowiły i nadal stanowią koło Szczecina duży dyskomfort dla użytkowników.

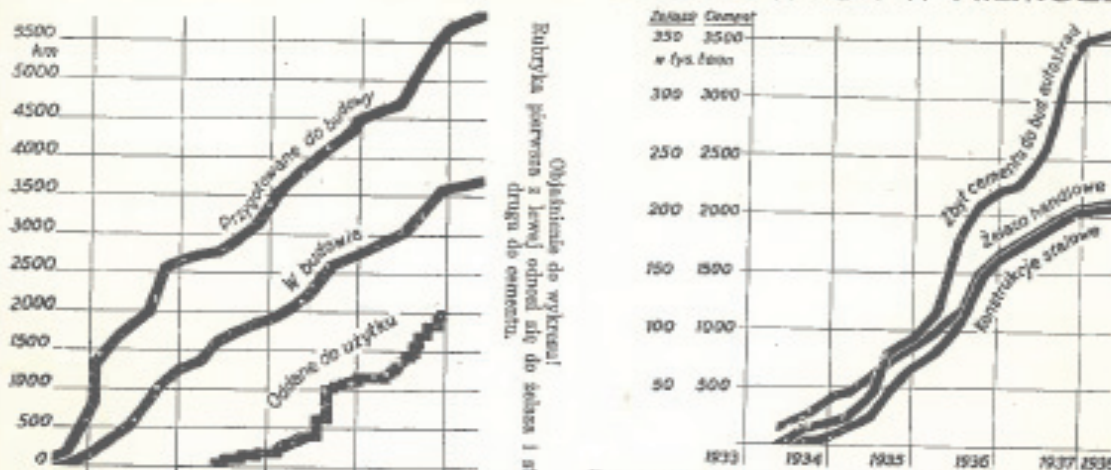
### 1. Introduction

In 2016, the first results of tests of the concrete highway pavement built by Germans around 1935 were published, after about 80 years of its use (1). The road was dismantled in 2013. It currently forms part of the A4 highway, which now runs to the south of Gliwice and was previously connected with the road to Zabrze. In 1938, the Cement journal, whose successor is Cement Wapno Beton, published a map of Germany with highways that had already been built and were under construction, including even those roads whose construction had been planned and prepared for [Fig. 1] (2). In the Fig. 1, a long section of highway leading to Wrocław and a very short one in Gliwice can be seen. It was from this latter section that large pieces of concrete pavement were sampled for testing.

The tests of these concrete samples have shown that coarse aggregate consisted of crushed basalt, while fine aggregate was quartz sand with the addition of around a dozen percent of gravel from alluvial sediments (1). This gravel consists of rock grains, mainly fine-grained quartz, sandstones and feldspars. The concrete contains a large amount of non-hydrated cement; these are mainly belite grains of considerable size ranging from 60  $\mu\text{m}$  to 100  $\mu\text{m}$ . The second phase is brownmillerite, which can be expected. The main hydrate in the paste is the C-S-H phase. Ettringite has also been noted, and portlandite is sporadically present. The use of sodium chloride as deicer in the winter caused only the sporadic formation of Friedel's salt within the paste. The cement matrix is in a very good condition and is distinguished by very good bond of cement paste and aggregate grains. No microcracks were found in the interfacial transition zones of aggregates with cement matrix.

Owing to the high resistance of this concrete pavement to wear, their surface became polished as a result of prolonged exploitation. In some sections, the surface of concrete pavement became as smooth as glass. These pavement had expansion joints which were causing considerable user discomfort, however at that time there was no method to fill them.

ROZWÓJ BUDOWY AUTOSTRAD BETONOWYCH W NIEMCZECH



Rys. 1. Statystyka poszczególnych faz budowy autostrad niemieckich.

Rys. 2. Statystyka zużycia poszczególnych głównych materiałów do budowy autostrad. Charakterystyczny stosunkowy wzrost spożycia cementu począwszy od końca roku 1935 — pierwszych rozporządzeń o oszczędności ślaza w budownictwie (mosty!).



Rys. 3. Autostrady „Wielkich Niemiec” w okresie „Anschlusu”.

Rys. 1. Autostrady w Niemczech w roku 1938, po przyłączeniu Austrii (2)

Fig. 1. Motorways in Germany in 1938, after the connection of Austria (2)

2. Materiały i metody

2.1. Zakres badań

Badania omawiane w tym opracowaniu stanowią rozszerzenie i uzupełnienie pomiarów, o których wspomniano krótko we wprowadzeniu, a opisanych wcześniej skrótowo w artykule w Cement

2. Methods and materials

2.1. Methods

The tests discussed in this paper are an extension and supplementation of the measurements mentioned in the introduction and previously described briefly in the paper in Cement Wapno

Wapno Beton w roku 2016 (1). W tej pierwszej części najwięcej uwagi poświęcono badaniom petrograficznym, które pozwoliły na ustalenie rodzaju kruszywa i cementu oraz mikrostruktury matrycy cementowej i jej wiązania z kruszywem.

Przedmiotem niniejszego artykułu są wyniki badań betonu nawierzchni dotyczące:

- migracji jonów chlorkowych,
- gęstości pozornej, nasiąkliwości i porowatości otwartej,
- wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu i przy rozłupywaniu,
- wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości,
- odporności na ścieranie.

Ponadto, przeprowadzono także badania strefy przejściowej stalowego pręta zbrojeniowego z matrycą cementową. To zbrojenie w postaci siatki z prętów o średnicy 6 mm zastosowano w dolnej części nawierzchni betonowej, przypuszczalnie w celu zapobiegania jej klawiszowaniu.

## 2.2. Pobieranie i przygotowanie próbek

Próbki do badań pobierano z dużych fragmentów nawierzchni betonowej [rysunek 2] techniką wiercenia koronowym wiertłem o średnicy około 100 i 150 mm, lub poprzez wycinanie tarczowymi piłami diamentowymi. Kształt i wymiary próbek były zgodne z wymaganiami dalej cytowanych norm.

Wymiary dużych fragmentów nawierzchni oraz zastosowana technika pozwalały na pozyskanie odpowiednich, zgodnych z zaleceniami normowymi próbek walcowych, pryzmatycznych lub kostkowych. Przed badaniem, próbki były odpowiednio kondycjonowane, a w przypadku pomiaru cech mechanicznych ich powierzchnie były szlifowane.

## 2.3. Wyniki badań

### 2.3.1. Współczynnik migracji jonów chlorkowych

Badania współczynnika migracji jonów chlorkowych przeprowadzono na 6 próbkach walcowych o średnicy 100 mm i wysokości 50 mm. Napięcie pomiędzy elektrodami oraz czas trwania wymuszonego transportu jonów chlorkowych przez próbkę betonową ustalano doświadczalnie na podstawie wytycznych zawartych w normie NT Build 492: *Nordtest metod. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*, Espoo, Finland, 1999. Podczas badania rejestrowano zmianę temperatury roztworu zasadowego i notowano jej wartości na początku oraz pod koniec wykonywanego pomiaru. Stanowisko badawcze przedstawiono na rysunku 3, a przykładowy profil migracji jonów chlorkowych w próbce betonu na rysunku 4.

Beton in 2016 (1). In the first section, most attention was paid to the petrographic examination, which made possible to determine the type of aggregate and cement and also the microstructure of the cement matrix and its bond with aggregate.

This paper is including the results of the following concrete pavement testing:

- the migration of chloride ions;
- apparent density, water absorption and open porosity;
- flexural and splitting tensile strength;
- compressive strength and modulus of elasticity;
- wear resistance.

In addition, the interfacial transition zone of the reinforcing steel mesh and the cement matrix was examined. This reinforcement in the form of mesh from bars of 6 mm diameter was located in the bottom part of the pavement, probably for prevent of its curling.

## 2.2. Specimens preparation

The samples for testing were obtained from large fragments of the concrete pavements [Fig. 2] using core drill bits with diameters of around 100 and 150 mm or by cutting them with diamond saw. The shapes and dimensions of specimens were in accordance with the requirements of the standards cited below.

The dimensions of large pavement fragments and the technique used made it possible to obtain suitable cylindrical, prismatic or cubic samples that were in line with the recommendations stipulated in standards. Prior to testing, the specimens were properly conditioned and in the case of measurements concerning their mechanical characteristics, their surfaces were polished.

## 2.3. Test results

### 2.3.1. Chloride ions migration coefficient

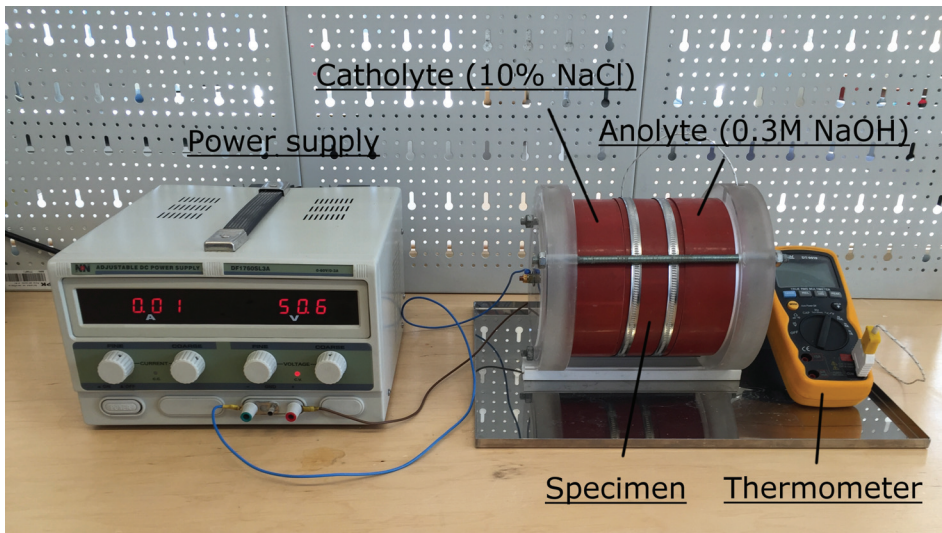
Chloride ions migration coefficient were measured on six cylindrical specimens with a diameter of 100 mm and a height of 50 mm. The



Rys. 2. Przykładowe fragmenty nawierzchni, z których pobierano próbki do badań

Fig. 2. Examples of fragments of the concrete pavement from which test specimens were collected





Rys. 3. Stanowisko do pomiaru współczynnika migracji jonów chlorkowych

Fig. 3. Test stand for chloride ions migration coefficient measurements

Uzyskane wyniki badań głębokości migracji jonów chlorkowych w ustalonych warunkach wymuszonego ich transportu pozwolily na obliczenie współczynników migracji z zależności:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right)$$

gdzie:

$D_{nssm}$  – współczynnik migracji w stanie nieustalonym [ $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s],

$U$  – napięcie prądu stałego pomiędzy elektrodami [V],

$T$  – średnia arytmetyczna temperatury na początku i na końcu pomiaru w roztworze NaOH [°C],

$L$  – grubość próbki [mm],

$x_d$  – średnia głębokość penetracji jonów chlorkowych do próbki [mm],

$t$  – czas trwania badania [h].

### 2.3.2. Porowatość otwarta

Pomiary porowatości otwartej wykonywano na trzech próbkach walcowych o średnicy 100 mm i wysokości 50 mm. Prowadzono je metodami opisanymi w normach PN-EN 12390-7:2011 *Badania betonu. Część 7: Gęstość betonu oraz PN-EN 1936:2010 Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości*. Badanie to polega na nasycaniu próbek wodą (podobnie jak w badaniach nasiąkliwości), jednak w warunkach zmniejszonego ciśnienia. Przed badaniem próbki suszono do stałej masy w temperaturze 105°C, a następnie umieszczano w komorze próżniowej. Prób-

ki były poddawane pod ciśnienie, które było równe różnicy ciśnień między elektrodami. Po zakończeniu badania próbki były suszone do stałej masy w temperaturze 105°C. Zmiany w temperaturze roztworu alkalicznego były rejestrowane i temperaturę rejestrowano na początku i na końcu pomiaru. Test stand jest pokazany na rys. 3 i przykład profilu migracji jonów chlorkowych w próbce betonowej jest pokazany na rys. 4.

z wyjątkiem pomiaru głębokości migracji jonów chlorkowych pod napięciem różnicy potencjałów prądu stałego współczynnik migracji można obliczyć za pomocą następującego wzoru:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right)$$

where:

$D_{nssm}$  – non-steady state migration coefficient [ $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s];

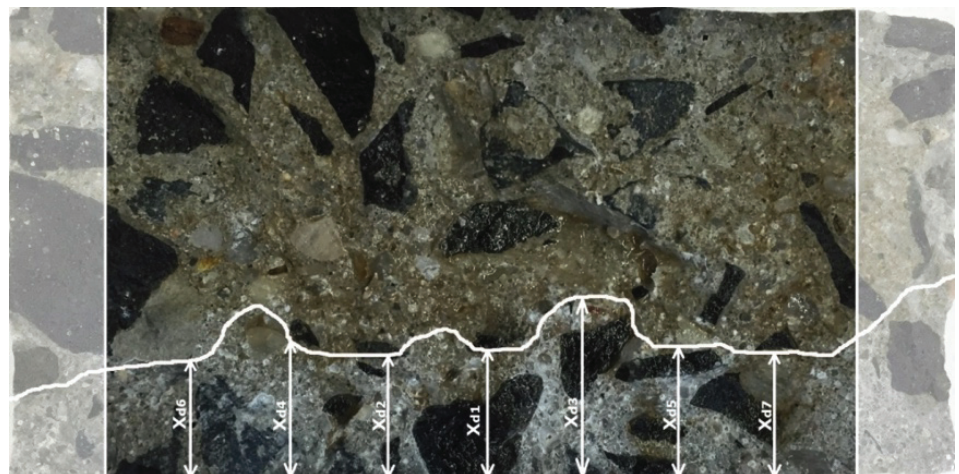
$U$  – DC voltage between electrodes [V];

$T$  – arithmetic mean of temperature at the beginning and at the end of the measurement in NaOH solution [°C];

$L$  – specimen thickness [mm];

$x_d$  – average depth of chloride ions penetration into the sample [mm];

$t$  – test duration [h].



Rys. 4. Przykładowy przełam próbki po badaniu migracji jonów chlorkowych, strefa zwiększonej ich zawartości

Fig. 4. Example of specimen fracture after chloride ions migration testing, zone with increased chloride ions content

ki przetrzymywano pod obniżonym ciśnieniem około 20 mbar w czasie 24 godzin, a następnie w tych warunkach powoli zalewano je wodą. Po kolejnych 24 godzinach nasycania próbek wodą wyrównywano w komorze ciśnienie do atmosferycznego i pozostawiano próbki zanurzone w wodzie przez kolejne 24 godziny. Po tym okresie nasycania oznaczano masę próbek, a z różnicy mas w stanie suchym i nasyconym wodą obliczano nasiąkliwość. Nasiąkliwość objętościową obliczano na podstawie wyznaczonej nasiąkliwości masowej oraz gęstości objętościowej. Tak wyznaczona nasiąkliwość objętościowa może być w przypadku betonu interpretowana jako przybliżona całkowita porowatość otwarta, dostępna dla wody. Wyniki badań podano w tabelicy 2.

### 2.3.3. Wytrzymałość na ściskanie i moduł sprężystości

Wytrzymałość na ściskanie i moduł sprężystości przy ścisnieniu badano na seriach liczących po trzy próbki walcowe o średnicy 100 mm i wysokości 200 mm. Postępowano zgodnie z zaleceniami następujących norm: *PN-EN 13791:2008 Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych*; *PN-EN 12504-1:2011 Badania betonu w konstrukcjach. Część 1: Odwierty rdzeniowe. Wycinanie, ocena i badanie wytrzymałości na ściskanie*; *PN-EN 12390-3:2011 Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania oraz PN-EN 12390-13:2014 Badania betonu. Wyznaczanie siecznego statycznego modułu sprężystości przy ścisnieniu*.

Odształcenia badanego betonu rejestrowano stosując ekstensometry elektrooporowe typu ZWICK clip-on o bazie pomiarowej równej 100 mm. Próbkę obciążano i odciążano w trzech cyklach ze stałą prędkością  $0,6 \pm 0,2$  MPa/s. Początkowo próbkę obciążano do poziomu naprężenia  $\sigma_p = 0,5$  MPa i rejestrowano odkształcenie początkowe  $\epsilon_p$ . Następnie obciążenie zwiększano do naprężenia  $\sigma_a = 1/3 f_c$  i rejestrowano odkształcenia  $\epsilon_a$ . Wyniki badania wytrzymałości na ściskanie i modułu sprężystości podano w tabelicy 3.

Tablica 2 / Table2

WYNIKI BADANIA POROWATOŚCI OTWARTEJ

THE OPEN POROSITY MEASUREMENTS

Próbka Specimen	Gęstość w stanie suchym Dry density D [g/cm <sup>3</sup> ]	Nasiąkliwość masowa Water absorption by mass N <sub>m</sub> [% m.]	Nasiąkliwość objętościowa (porowatość otwarta) Water absorption by volume (open porosity) N <sub>obj</sub> =P <sub>o</sub> [% vol.]
1	2,54	3,85	9,78
2	2,48	4,55	11,28
3	2,49	4,11	10,23
średnia mean	2,50	4,17	10,43

Tablica 1 / Table 1

WYNIKI BADANIA MIGRACJI JONÓW CHLORKOWYCH

THE CHLORIDE IONS MIGRATION COEFFICIENT

Próbka Specimen	U [V]	T [°C]	L [mm]	x <sub>d</sub> [mm]	t [h]	D <sub>nssm</sub> [×10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]
1	50	20,7	50	6,2	6	6,3
2		23,3		8,0		8,4
3		23,3		9,0		9,5
4		23,4		6,6		6,8
5		23,4		6,8		7,1
6		20,7		6,0		6,1
średnia mean	-	-	-	7,1	-	7,4

### 2.3.2. Open porosity

For the open porosity measurements three cylindrical specimens with a diameter of 100 mm and a height of 50 mm were used. They were tested according to the following standards: *EN 12390-7: 2011 Testing hardened concrete – Part 7: Density of hardened concrete* and *EN 1936:2010 Natural stone test methods – Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity*. This test consists in saturating specimens with water – similarly as in water absorption test, but under reduced pressure conditions. Before testing, specimens were dried to constant mass at 105°C and subsequently placed in a vacuum chamber. The samples were cured under a reduced pressure of around 20 mbar for 24 hours, and subsequently were slowly poured with water under these conditions. After another 24 hours of specimens saturation, the pressure in the chamber was increased to atmospheric conditions and the samples remained immersed in water for another 24 hours. After this saturation period, specimen mass was determined and water absorption was calculated as the difference between dry and water-saturated masses. Water absorption by volume resulted from the calculated water absorption by mass and bulk density. The water absorption by volume determined for concrete in this manner may be interpreted as approximate total porosity open to water. Test results are presented in Table 2.

### 2.3.4. Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu i przy rozłupywaniu

Do pomiaru wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu stosowano beleczki o wymiarach 100×100×350 mm<sup>3</sup> oraz czteropunktowy układ obciążenia. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu badano na próbkach walcowych o średnicy 100 i wysokości 200 mm. Każdą z cech określano na trzech próbkach stosując zalecenia norm *PN-EN 12390-5:2011 Badania betonu. Część 5: Wytrzymałość na zginanie próbek do badań* oraz *PN-EN 12390-6:2011 Badania betonu. Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań*. Wyniki badań przedstawiono w tablicach 4 i 5.

### 2.3.5. Odporność na ścieranie

Badanie ścieralności wykonano według normy *PN-EN 13892-3:2005 Metody badania materiałów na podkłady podłogowe. Część 3: Oznaczanie odporności na ścieranie według Böhme*. Próbkę kostkową posiadały wymiary 71×71×71 mm<sup>3</sup>. Liczebność próbek w serii wynosiła 3 sztuki. Próbkę wycięto z fragmentów nawierzchni tak, aby powierzchnią ścieraną była górna (eksploatowana) powierzchnia nawierzchni. Badane próbki były w stanie powietrzno-suchym. Wyniki badań zawiera tablica 6.

## 3. Badania strefy przejściowej zbrojenia siatką stalową z matrycą cementową

W dolnej strefie nawierzchnia betonowa autostrady była zbrojona siatką z prętów stalowych o średnicy 6 mm. W celu pełniejszego opisanie budowy tej nawierzchni oraz uzupełnienia wyników podanych w poprzednim artykule (1), przeprowadzono badania samej stali z pobranych prętów oraz obserwacje i badania strefy przejściowej stalowej siatki z matrycą cementową.

Obserwacje mikroskopowe trawionych zglądów stali wykazały, że materiał badanego pręta ma ferrytyczno-perlityczną pasmową

Tablica 3 / Table 3

WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE ORAZ MODUŁ SPRĘŻYSTOŚCI PRÓBEK BETONU

COMPRESSIVE STRENGTH AND MODULUS OF ELASTICITY OF CONCRETE SPECIMENS

Próbka Specimen	Powierzchnia przekroju próbki Specimen cross section area $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Siła niszcząca Destructive force F [kN]	Wytrzymałość na ściskanie Compressive strength $f_{is}$ [MPa]	Moduł sprężystości Modulus of elasticity $E_s$ [GPa]
1	7854	855,3	108,9	-
2		870,2	110,8	-
3		960,5	122,3	-
4		-	-	51,9
5		-	-	52,4
6		-	-	52,7
średnia mean	-	895,3	114,0	52,3

### 2.3.3. Compressive strength and modulus of elasticity

Compressive strength and the modulus of elasticity in compression were measured on series of three cylindrical specimens each with a diameter of 100 mm and a height of 200 mm. The recommendations defined in the following standards were followed: *EN 13791:2008. Assessment of in-situ compressive strength in structures and pre-cast concrete components*; *EN 12504-1:2011 Testing concrete in structures – Part 1: Cored specimens – Taking, examining and testing in compression*; *EN 12390-3:2011 Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens* and *EN 12390-13:2014 Testing hardened concrete. Determination of secant modulus of elasticity in compression*.

Deformations of the tested concrete samples were recorded using ZWICK clip-on extensometers with a gauge of 100 mm. The specimens were loaded and unloaded in three cycles at a constant rate of 0.6±0.2 MPa/s. Firstly, the specimens were loaded to stress level of  $\sigma_p = 0.5$  MPa and initial deformation  $\epsilon_p$  was recorded. Subsequently, the load was increased to  $\sigma_a = 1/3 f_c$  and once more the deformation  $\epsilon_a$  was recorded. Results of compressive strength and modulus of elasticity measurements are presented in Table 3.

### 2.3.4. Flexural and splitting tensile strength

Prisms with dimensions of 100×100×350 mm<sup>3</sup> were used in flexural tensile strength measurements. A four-points load system was used. Splitting tensile strength was measured for cylindrical samples with a diameter of 100 mm and a height of 200 mm. Each property was determined on three specimens, following the recommendations of the standards: *EN 12390-5: 2011 Testing hardened concrete – Part 5: Flexural strength of test specimens* and *EN 12390-6:2011 Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens*. Test results are presented in Tables 4 and 5.



Tablica 4 / Table 4

WYNIKI BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE PRZY ZGINANIU

FLEXURAL TENSILE STRENGTH TEST RESULTS

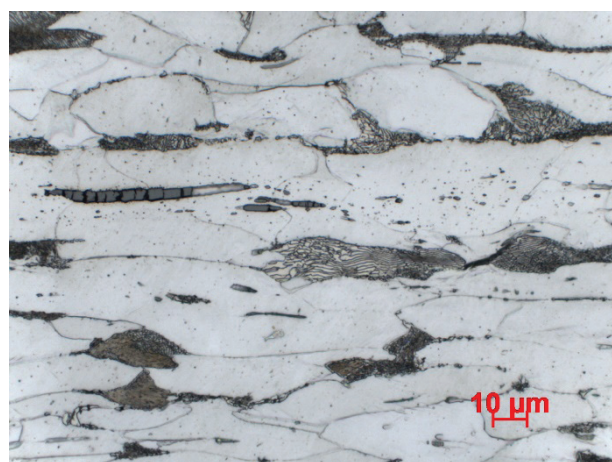
Próbka Specimen	Wymiary przekroju próbki Specimen cross section dimensions $d_1/d_2$ [mm]	Rozstaw podpór Support spacing l [mm]	Siła niszcząca Destructive force F [N]	Wytrzymałość na zginanie Flexural strength $f_{cf}$ [MPa]
1	100/100	300	22200	6,7
2			26000	7,8
3			25100	7,5
średnia mean	-	-	-	7,3

Tablica 5 / Table 5

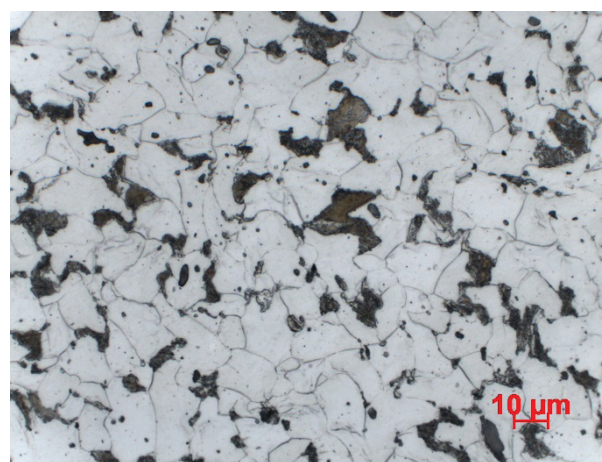
WYNIKI BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE PRZY ROZŁUPYWANIU

SPLITTING TENSILE STRENGTH TEST RESULTS

Próbka Specimen	Średnica próbki Specimen diameter d [mm]	Długość próbki Specimen length L [mm]	Siła niszcząca Destructive force F [N]	Wytrzymałość na rozłupywanie Splitting tensile strength $f_{ct}$ [MPa]
1	100	200	208000	6,6
2			162000	5,3
3			205000	6,5
średnia mean	-	-	-	6,1



a)



b)

Rys. 5. Mikrostruktura pręta stalowego równoległe (a) i prostopadłe (b) do kierunku obróbki plastycznej; powiększenie 1000×

Fig. 5. Steel bar microstructure in the direction parallel (a) and perpendicular (b) to plastic work direction; 1000× magnification

strukturę [rysunek 5], o znacznym stopniu odkształcenia plastycznego. Ziarna ferrytu oraz perlitu są zdeformowane wzdłuż kierunku ciągnięcia pręta. W stali tej występują liczne wtrącenia oraz mikropory, które umożliwiają dyfuzję jonów wapniowych do tych pustek. Tym można wyjaśnić znalezione wtrącenia wapnia w stali, pokazane na rysunku 6a.

Na rysunku 6a pokazano zgląd pręta zbrojeniowego wraz z otaczającą go matrycą cementową. Na tym zglądzie wyraźnie widoczna

### 2.3.5. Wear resistance

Wear resistance was tested according to the standard: *EN 13892-3:2005 Methods of test for screed materials – Part 3: Determination of wear resistance – Böhme*. Cubic specimens had dimensions of  $71 \times 71 \times 71$  mm<sup>3</sup>. There were 3 specimens in each series. The specimens were cut from road pavement fragment in such a manner that the surface subject to wear was the upper one, i.e. the one subject to wear during exploitation. The specimens tested were in an air-dry state. The results are presented in Table 6.

Próbka Specimen	Gęstość pozorna betonu Apparent concrete density D [g/cm <sup>3</sup> ]	Ubytek masy próbki Loss in specimen mass Δm [g]	Odporność na ścieranie Wear resistance	
			ΔV[cm <sup>3</sup> ]	Δh [mm]
1	2,60	18,5	7,12	1,42
2	2,58	19,2	7,44	1,49
3	2,55	17,9	7,02	1,40
średnia mean	-	-	7,19	1,44

jest strefa przejściowa stali z matrycą cementową. Można ją dostrzec także i przy znacznie mniejszym powiększeniu [rysunek 7].

Na rysunku 6a widać jasnoszare pole stanowiące wycinek pręta z ciemnoszarymi wtrąceniami wapnia. Duże wtrącenia wapnia w stali, nieco powyżej punktu 2 oraz w tym punkcie, mają identyczny skład jak pokazana mikroanaliza rentgenowska dla punktu 3 w tej warstwie, na rysunku 6b. Natomiast nieco ciemniejsze pasmo, oznaczone punktem 4, wykazujące bardzo mocne wiązanie z warstwą stali z wtrąceniami wapnia, jest już uwodnionym żelazianem wapnia, stanowiącym nanometryczną mieszaninę z fazą AFm, ze stosunkowo dużą zawartością jonów krzemu [rysunek 6c]. Jest to dotychczas nigdzie nie opisana faza w badaniach żelbetu, która prawdopodobnie mogła powstać w wyniku niedoskonałej budowy zastosowanej stali oraz osiemdziesięcioletniego oddziaływania roztworu nasyconego jonami wapnia. Bardzo mocno związana z uwodnionym żelazianem wapnia jest strefa 5, którą stanowi faza C-S-H o typowym składzie (mikroanaliza na rysunku 6d). Zawiera ona bardzo mało żelaza, bowiem te jony gromadzą się w uwodnionym żelazianie wapnia.

Zwracają także uwagę bardzo małe okruchy stali – na przykład punkt 8 na rysunku 6a – występujące głównie w małym obszarze utworzonym przez stal z dużymi wtrąceniami wapnia [punkt 7], o składzie analogicznym do warstwy 2. Można przypuszczać, że zachodzi następujący mechanizm ich powstawania: migracja jonów wapnia do mikroporów w stali powoduje powstawanie wtrąceń uwodnionego żelazianu wapnia, który stopniowo rozrastając się w pustkach powoduje ich rozsadzenie. Powstają więc odłamki stali, której okruchy nie zawierają pustek tylko zewnętrznie, a więc bardzo powoli, reagują z jonami wapnia co powoduje, że długo pozostają w strefie przejściowej. Przyczynia się do tego zbita faza C-S-H, którą są otoczone, a w której dyfuzja jonów wapnia jest utrudniona.

Na rysunku 7 pokazano zgląd stali i strefy przejściowej na jej powierzchni przy małym powiększeniu. Można zorientować się jak małą grubość ma warstwa przejściowa, a równocześnie jak skomplikowany ma skład, który przeanalizowano na podstawie zglądu pokazanego na rysunku 6a i wykonanych mikroanaliz [rysunki 6b, 6c i 6d].

### 3. Examination of the interfacial transition zone of the reinforcing steel mesh and cement matrix

In its lower part, highway pavement was reinforced with a steel mesh with the diameter of bars equal 6 mm. In order to provide full properties description of the highway pavement, also to complete the content of the first paper (1), the steel bars were tested as well as of the interfacial transition zone of the mesh wires with cement matrix were also examined.

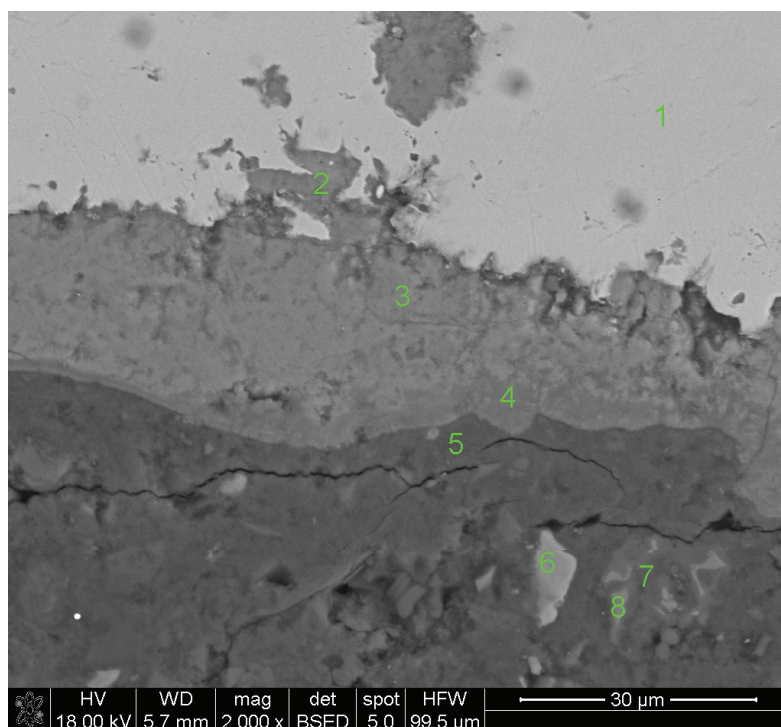
Microscopic observations of etched polished sections have shown that the steel bars of the mesh have a ferrite/pearlite band structure [Fig. 5] with considerable plastic deformations. Ferrite and pearlite grains are deformed along the direction in which the bar was drawn. In the steel examined, there are numerous inclusions and micropores that allow the diffusion of calcium ions into these voids. This explains the presence of calcium inclusions in steel, which examples are shown in Fig. 6a.

Fig. 6a shows the polished section of the reinforcing bar together with the surrounding cement matrix. In this section, the interfacial transition zone of the steel and cement matrix is clearly visible. It is also shown at a much lower magnification [Fig. 7].

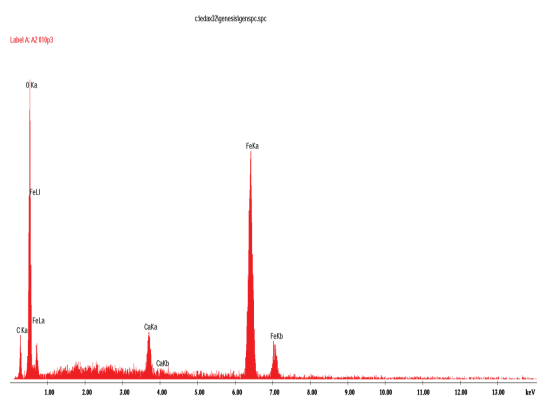
Fig. 6a shows a light grey layer which is a bar segment with dark grey calcium inclusions. The large calcium inclusions in steel, within and slightly above point 2, have the same composition as the X-ray microanalysis shown for point 3 in Fig. 6b. However, the slightly darker band marked as point 4, which shows a very strong bond with the steel layer with calcium inclusions, is already hydrated calcium ferrite, which is presenting a nanometric mixture with the AFm phase, with a relatively high silica ions content [Fig. 6c]. This phase has not yet been described in any reinforced concrete studies, and its formation was probably due to the imperfect structure of the steel used in bars and 80 years of exposure to a solution saturated with calcium ions. Zone 5, which is a typical C-S-H phase (see microanalysis in Fig. 6d), is showing a very strong bond with the hydrated calcium ferrite. It contains very low iron content as the Fe(III) ions are accumulated in the hydrated calcium ferrite.

Of note are also the very small steel chips, e.g. point 8 in Fig. 6a, which are present mainly in the micro area formed by the steel with

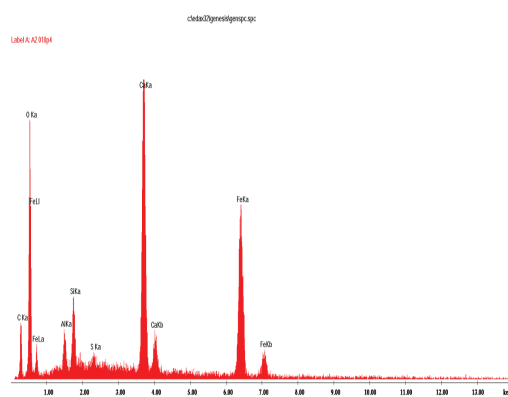




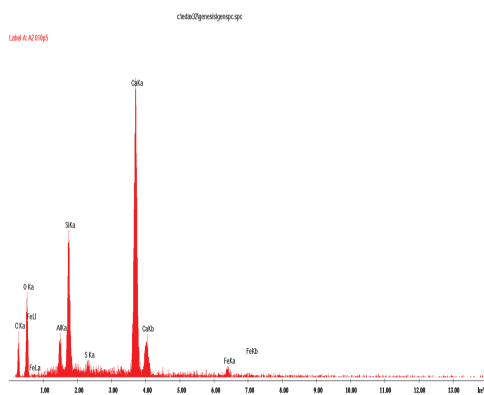
a)



b)



c)



d)

Rys. 6. (a) Zgląd pręta stalowego w strefie przejściowej z matrycą cementową; punkt 6 - odłamek stali, punkt 7 –mikroobszar stali z dużymi wtrąceniami wapnia o składzie analogicznym do warstwy 3, punkt 8 - małe okruchy stali, (b) mikroanalizy rentgenowskie: w punkcie 3, (c) w punkcie 4, (d) w punkcie 5  
 Fig. 6. (a) Steel bar polished section in the interfacial transition zone with cement matrix; point 6 - steel chip, point 7 - steel with large calcium inclusions of the composition analogous to layer 3, point 8 - small steel chips; (b) X-ray microanalyses: in point 3; (c) in point 4; (d) in point 5

#### 4. Podsumowanie i wnioski

W tabelicy 7 przedstawiono zbiorczo wyniki badań właściwości betonu wyciętych z dużych fragmentów betonowej nawierzchni drogowej.

Bardzo dobre właściwości mechaniczne, a przede wszystkim wytrzymałość na ściskanie, zginanie, rozłupywanie oraz moduł sprężystości pozwalają beton z nawierzchni autostrady zakwalifikować do grupy betonów wysokowartościowych. Beton ten ma małą przepuszczalność dla wody, co potwierdzają wyniki badania nasiąkliwości i porowatości otwartej. Odporność na ścieranie jest również duża i w odniesieniu do klasyfikacji stosowanych w przypadku betonowych płyt brukowych, kostki brukowej lub krawężników betonowych (*PN-EN 1339:2005 Betonowe płyty brukowe. Wymagania i metody badań*), beton ten spełnia wymagania najwyższej klasy 4.

Współczynnik migracji jonów chlorkowych w zakresie od  $6,1$  do  $9,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  klasyfikuje badany beton jako posiadający dobrą odporność na wnikanie chlorków. Przyporządkowania dokonano na podstawie ogólnie przyjętej metody klasyfikacji, w której poziom dobrej odporności na wnikanie chlorków odpowiada współczynnikowi migracji w zakresie od  $2$  do  $8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  (3-9).

Tablica 7 / Table 7

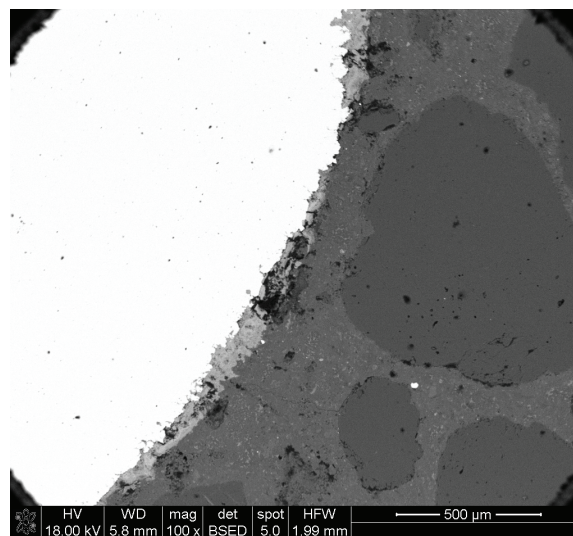
ZBIORCZE WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI BETONU

THE CUMULATIVE RESULTS OF CONCRETE PROPERTIES EXAMINATION

Właściwość / Property	Wartość średnia Mean value
Współczynnik migracji jonów chlorkowych / Chloride ions migration coefficient, $D_{\text{nsms}}$ [ $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ]	8,50
Gęstość objętościowa w stanie suchym / Apparent density in dry state, $D$ [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	2,50
Nasiąkliwość masowa / Water absorption by mass, $N_m$ [% by mass]	4,17
Nasiąkliwość objętościowa (porowatość otwarta) / Water absorption by volume (open porosity), $N_{\text{obj}} = P_o$ [% by vol.]	10,43
Wytrzymałość na ściskanie / Compressive strength, $f_{\text{is}}$ [MPa]	114
Moduł sprężystości / Modulus of elasticity, $E_s$ [GPa]	52,3
Wytrzymałość na zginanie / Flexural strength, $f_{\text{ct}}$ [MPa]	7,33
Wytrzymałość na rozłupywanie: / Splitting tensile strength, $f_{\text{ct}}$ [MPa]	6,16
Odporność na ścieranie / Wear resistance, $\Delta V$ [ $\text{cm}^3$ ]	7,19
$\Delta h$ [mm]	1,44

Bardzo ciekawe wyniki dały badania strefy przejściowej stali zbrojeniowej z matrycą cementową, które można podsumować następująco:

- wiązanie stali z matrycą cementową jest bardzo zwarte i nie występuje porowatość w warstwie przejściowej,
- jony wapnia dyfundują do mikroporów w stali,
- na powierzchni stali powstaje warstwa uwodnionego żelazianu wapnia,
- warstwa ta tworzy mocne wiązanie z fazą C-S-H.



Rys. 7. Strefa przejściowa stal [białe pole] z matrycą cementową i dwa białe punkciki stanowiące okruchy stali w matrycy cementowej, jasno szara warstwa opisana w przypadku rysunku 6, ciemno-szara warstwa matrycy z jasnymi punktami belitu i najciemniejsze ziarna piasku w matrycy cementowej.

Fig. 7. The interfacial transition zone steel [white field] cement matrix and two white points which are steel chips within the cement matrix, the light grey layer described in Figure 6, dark grey matrix layer with bright belite dots and the darkest grains of sand within the cement matrix.

high calcium inclusions [point 7] with the composition analogous to the layer 2. It may be assumed that the following mechanism is responsible for their formation: the migration of calcium ions to steel micropores causes the hydrated calcium ferrite inclusions formation, which gradually grow in these voids, causing their bursting. As a result, steel chips are formed; such chips, since they do not contain voids, react with calcium ions only externally, and thus very slowly, which is causing that they are remaining in the interfacial zone for a long time. It is also caused by the compacted C-S-H phase which is surrounding them making difficult the calcium ions diffusion.

## Literatura / References

1. Kurdowski W., Witek A., Śliwiński J., „Nawierzchnia betonowa autostrady po 70 latach eksploatacji, próba wyjaśnienia niezwyklej trwałości”, *Cement Wapno Beton*, **83**, 27 – 35 (2016).
2. *Cement*, **8**, 73 (1938).
3. Glinicki, M., Józwiak-Niedźwiedzka, D., Gibas, K., Dąbrowski, M., „Influence of Blended Cements with Calcareous Fly Ash on Chloride Ion Migration and Carbonation Resistance of Concrete for Durable Structures”, *Materials* **9**, 18 (2016).
4. Jepsen, M.T., Mathiesen, D., Munch-Petersen, C., Bager, D., „Durability of Resource Saving “Green” Types of Concrete. FIB-Symposium “Concrete and Environment” in Berlin, 257–265 (2001).
5. Józwiak-Niedźwiedzka, D., Gibas, K., Glinicki, M.A., Nowowiejski, G., „Wpływ dodatku popiołu lotnego wapiennego na przepuszczalność betonów w odniesieniu do mediów agresywnych”. *Drogi i Mosty*, **3**, 39–62 (2011).
6. Józwiak-Niedźwiedzka, D., „Estimation of Chloride Migration Coefficient in Air-Entrained Concretes Containing Fluidized Bed Combustion Fly Ash”, *Archives of Civil Engineering* **58**, 25 – 38 (2012).
7. Litorowicz, A., „Identyfikacja mezostruktury rys i ich związki z przepuszczalnością betonu, rozprawa doktorska, IPPT PAN, Warszawa (2005).
8. Tang, L., „Chloride transport in concrete – Measurement and prediction”, Publication P-96:6, Chalmers University of Technology, Department of Building Materials(1996).
9. Wu, J., Li, H., Wang, Z., Liu, J., „Transport model of chloride ions in concrete under loads and drying-wetting cycles”, *Constr. Build. Mat.*, **112**, 733–738 (2016).

In Fig. 7, the polished section of steel and the interfacial transition zone on its surface with cement matrix are shown at low magnification. The small thickness of the interfacial transition zone and its complex composition are evident; this composition was analyzed on the polished section shown in Fig. 6a and the microanalyses of its different layers are shown in Figs. 6b, 6c and 6d.

## 4. Summary and conclusions

In Table 7 the properties of concrete samples cut from large fragments of highway concrete pavement are presented.

Very good mechanical properties, including primarily compressive strength, flexural strength, tensile splitting strength and modulus of elasticity, allow the concrete used in the highway pavement to be classified as High Performance Concrete. This concrete has low water permeability, which is confirmed by the results of water absorption and open porosity tests. Its wear resistance is also high; in the classification used for concrete slabs, paving flags and concrete curbs [*EN 1339:2005 Concrete paving flags – requirements and test methods*], this concrete meets the requirements of the highest class 4.

The chloride ions migration rate, which is in the range from 6.1 to  $9.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ , means that the concrete tested can be classified as one with good chloride penetration resistance. This assessment was based on the classification generally accepted for the method used, in which a good chloride penetration resistance level corresponds to a migration coefficient within the range from 2 to  $8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  (3-9).

Examination of the interfacial transition zone of reinforcing steel bars and the cement matrix yielded very interesting results, which can be summarized as follows:

- a) the bond between steel bar and the cement matrix is very compact and there is no porosity in the interfacial transition zone;
- b) calcium ions are diffusing into steel micropores;
- c) a layer of hydrated calcium ferrite is formed on the steel surface;
- d) this layer has a good bond with the C-S-H phase.