

Śledzenie stanu betonu za pomocą pomiarów przewodnictwa elektrycznego *in situ*

Material health monitoring of concrete by means of *in situ* electrical conductivity measurements

1. Wstęp

Inżynierowie budownictwa mogą korzystać z doświadczeń medycznych jeżeli chcą ocenić „stan zdrowotny” infrastruktury betonowej. Tradycyjnie śledzenie stanu zdrowia w medycynie jest procesem ukierunkowanym na poprawę zdrowia fizycznego i zwiększenie średniej długości życia pacjentów. Śledzenie zdrowia zawiera cztery niezbędne składniki. Zaczyna się ono od „zbadania” pacjenta, które prowadzi do „diagnozy” możliwych problemów zdrowotnych. W oparciu o tę „diagnozę” doktor „przepisuje” działania, które powinny być podjęte aby poprawić fizyczną kondycję pacjenta. W końcu doktor dokonuje „prognozy” zdrowia pacjenta w przyszłości.

Podobnie śledzenie stanu konstrukcji inżynierskich obejmuje te cztery główne składniki. Inżynierskie śledzenie stanu rozpoczyna się od ciągłych i regularnych badań kondycji konstrukcji stosując *in situ* nieniszczące sensory (1). W oparciu o wyniki tych „badań” (to jest wielkości odkształceń, deformacji i resztkowej wytrzymałości), inżynier może postawić „diagnozę” potencjalnych problemów konstrukcji, decyduje czy zabezpieczające środki są potrzebne w celu zminimalizowania przyszłych zagrożeń, utrzymania dobrego stanu (to jest „przepisanie”) i przewiduje pozostały okres eksploatacji i przyszłe zachowanie za pomocą modeli przewidujących cykl życia (to jest „prognoza”) (2-4).

W zastosowaniu do inżynierii budowlanej śledzenie „zdrowia” zmierza do osiągnięcia jednego (lub więcej) z trzech głównych celów:

- Zapewnić szybką i ciągłą ocenę warunków: Szybka ocena warunków konstrukcji po przypadkach ciężkiego obciążenia (to jest eksplozji, trzęsienia ziemi, huraganie) jest najważniejsza (5). Ciągła i nieinwazyjna ocena stanu starzejącego się betonu jest pożądaną alternatywą w stosunku do tradycyjnych pomiarów parametrów trwałości materiału, gdyż te tradycyjne metody są często niedokładne, niszczące i pracochłonne (6).
- Przewidzieć i zapobiec uszkodzeniom: Przez połączenie oceny warunków z modelami przewidującymi cykl życia, śledzenie stanu pozwala na przewidywania przyszłego zachowania

1. Introduction

Civil engineers can draw on the experiences of the medical profession when it comes to evaluating the “health” of concrete infrastructure. Traditionally, medical health monitoring is a process aimed at enhancing the physical health and increasing the life expectancy of patients. Health monitoring includes four essential components. It starts with “examination” of the patient which leads to a “diagnosis” of potential health problems. Based on this “diagnosis”, the doctor provides a “prescription” for actions that need to be taken to enhance the patient’s physical conditions. Finally, the doctor makes a “prognosis” of the patient’s future health.

Similarly, health monitoring of engineering structures incorporates these four major components. Engineering health monitoring starts with the continuous or regular examination of the condition of a structure using *in situ* and non-destructive sensors (1). Based on the results of these “examinations” (e.g., the magnitude of strains, deformations, and residual strength), the engineer can “diagnose” the structure’s potential problems, decide whether preventative measures are required to minimize future maintenance (i.e., “prescription”), and predict the remaining life and future performance with the aid of life cycle prediction models (i.e., “prognosis”) (2-4).

In civil engineering applications, health monitoring is desired to achieve one (or more) of the three main objectives:

- To provide rapid and continuous condition assessment: Rapid condition assessment of structures after severe cases of loading (e.g., explosion, earthquake, hurricane) is vital (5). Continuous and non-invasive assessment of the health of aging concrete is a desirable alternative to traditional measurements of material durability parameters as these traditional methods are often inaccurate, destructive, and labor intensive (6).
- To predict and prevent failure: By coupling condition assessments with life-cycle simulation models, health monitoring enables prediction of the future performance and the remaining life of structures and materials. Also, health monitoring helps engineers in determining if preventative measures are needed to reduce future maintenance costs (5-9).

i pozostały okres eksploatacji konstrukcji i materiałów. Także śledzenie stanu pomaga inżynierom w określeniu czy trzeba zastosować środki zapobiegawcze w celu zmniejszenia przyszłych kosztów utrzymania dobrego stanu (5-9).

- W celu zapewnienia jakości i kontroli jakości konstrukcji: śledzenie stanu może dać ocenę jakości zrealizowanej konstrukcji lub materiału oraz zapewnić zgodność z wymaganiami projektowymi i opisem technicznym. Daje to znaczną korzyść, szczególnie w przypadku kontraktów opartych na gwarancji wyników, w których warunki płatności są określone w oparciu o jakość rozwiązań budowlanych (6).

Przez ostatnie dwie dekady opracowano dużo technologii stosujących sensory w celu oceny mechanicznych właściwości i resztkowej zdolności do przenoszenia obciążeń starzejącej się struktury. Różnorodne metody (obejmujące techniki oparte na wibracji, akustyczne, optyczne i elektryczne) mogą być obecnie stosowane w celu śledzenia wielkości naprężeń, odkształceń, deformacji i uszkodzeń elementów konstrukcyjnych (9). Z drugiej strony śledzenie stanu materiału jest nowopowstałym polem, które zapewnia ocenę parametrów i właściwości materiału, w pierwszym rzędzie wpływających na trwałość materiału. Przykłady dla betonu obejmują pomiary gęstości, przepuszczalności, porów powietrznych oraz stopnia korozji stali (8). Ponieważ przedwczesne uszkodzenia materiału są główną przyczyną zniszczenia i kosztów utrzymywania infrastruktury betonowej, rozwój metod stosowania sensorów in situ w celu śledzenia trwałości materiałów stał się niezbędny.

W celu oceny jakości i śledzenia stanu betonu można stosować cały szereg sensorów in situ (8). Dostępna nie niszcząca technologia oparta na sensorach pozwala inżynierom na śledzenie szeregu właściwości materiałowych i parametrów stanu betonu włączając wewnętrzne odkształcenia (10), wytrzymałość (11), sztywność (12), gęstość (12), właściwości transportowe (13, 14), wewnętrzną wilgotność (15, 16), temperaturę i wydzielanie ciepła (17), wewnętrzne spękania (18) i korozję (19). Aczkolwiek technologie te mogą być użyteczne w pomiarach w warunkach kontrolowanego otoczenia laboratoryjnego, ocena ich przydatności w warunkach polowych wymaga dodatkowych badań. W celu rozwoju sensorów in situ konieczne są badania zmierzające do optymalizacji, dokładności, trwałości, odchyłki, zakresu pomiarów, czasu do osiągnięcia równowagi, wymiarów i zakłóceń, automatyzacji i zdolności do pomiarów na odległość oraz kosztów zastosowania sensorów w warunkach polowych.

W celu umożliwienia oceny trwałości betonu nowe sensory muszą dawać informacje dotyczące mikrostruktury, wewnętrznych oznaczeń chemicznych i ruchów wilgoci wewnątrz materiału. Szczególnie pomiary właściwości transportowych (to jest przepuszczalności i dyfuzyjności jonów) i parametrów stanu (to jest wewnętrznej zawartości wilgoci i wewnętrznych stężeń jonów) byłyby pożądane. Właściwości transportowe rządzą szybkością penetracji czynników agresywnych, a mianowicie chlorków i siarczanów do wnętrza betonu podczas gdy zawartość jonów jest ważna dla oceny trwałości na zamrażanie i rozmrażanie, skurcz i korozję stali.

- For quality assurance and quality control of construction: Health monitoring can be effective in evaluating the quality of the built structure/material and assuring conformance with design requirements and specifications. This offers a significant advantage especially for performance-based contracts in which pay adjustments are determined based on the quality of the built product (6).

Over the last two decades, many sensing technologies have been developed for assessment of the mechanical performance and residual load carrying capacity of an aging structure. A variety of methods (including vibration-based, acoustic, optical, and electrical techniques) are currently available to monitor the magnitude of stresses, strains, deformations, and damage in structural elements (9). Material health monitoring, on the other hand, is an emerging field that offers assessment of parameters and material properties that primarily influence the durability of the material. Examples for concrete include the measurement of density, permeability, air voids, and state of steel corrosion (8). Since premature material failure is a primary cause of deterioration and maintenance costs in the concrete infrastructure, development of insitu sensing methods to monitor material durability has become essential.

For quality assessment and material health monitoring of concrete, a range of insitu sensors can be useful (8). The available non-destructive sensing technology enables engineers to monitor a variety of material properties and state parameters of concrete including internal strains (10), strength (11), stiffness (12), density (12), transport properties (13, 14), internal humidity (15, 16), temperature and heat development (17), internal cracking (18), and corrosion (19). Although these technologies can provide useful measurements in a controlled environment of a laboratory, assessment of their performance in field environments requires additional investigations. For development of insitu sensors, research is needed to assess and optimize the accuracy, durability, drift, range of measurement, time to equilibrium, size and disturbance, automation and remote sensing ability, and application costs of sensors in field conditions.

To enable assessment of concrete durability, new sensors must provide information about the microstructure, internal chemistry, and moisture movement inside the material. Specifically, the measurement of transport properties (e.g., permeability, and ion diffusivity) and state parameters (e.g., internal moisture content and internal ion concentrations) would be valuable. Transport properties govern the penetration rate of aggressive agents such as chlorides and sulfates into concrete while moisture and ion contents are significant in determining the freeze thaw durability, shrinkage, and the corrosion of steel.

2. Material health monitoring by electrical measurements

Electrical measurements have been shown to be valuable non-invasive methods for evaluating the material properties of concrete.

2. Śledzenie stanu tworzywa za pomocą pomiarów elektrycznych

Pomiary elektryczne okazały się wartościową nieniszczącą metodą oceny właściwości materiałowych betonu. Obok pomiaru parametrów mikrostrukturalnych (to jest porowatości, zawartości porów ciągłych) (13, 14), metody elektryczne zastosowano w celu śledzenia sorpcji wody (20, 21) wnikania jonów (20, 22) i rozwoju uszkodzeń (23, 24) w betonie. Jednak występują trudności w stosowaniu pomiarów elektrycznych w celu śledzenia in situ betonu w warunkach polowych ponieważ na właściwości elektryczne betonu wpływają równocześnie cztery główne przyczyny:

- (1) hydratacja i zmiany mikrostrukturalne (14),
- (2) zmiany składu roztworu w porach (14, 22),
- (3) wahania wilgotności (15, 20, 25) i
- (4) wahania temperatury (26).

W związku z równoczesnym wpływem tych czynników na beton w warunkach polowych pojedynczy pomiar przewodnictwa elektrycznego nie może podać rzeczywistych właściwości materiału lub zachowania jego jakości. W celu rozwiązania tych ograniczeń to badanie proponuje rozwinięcie nowego układu sensorów, który składa się z trzech sensorów mierzących przewodnictwo elektryczne i jednego mierzącego temperaturę. Elektryczne sensory obejmują jednego mierzącego przewodnictwo betonu (δ_i), drugiego mierzącego przewodnictwo w roztworze w porach (δ_o) i trzeciego mierzącego wilgotność w oparciu o przewodnictwo (RH).

Na rysunku 1 pokazano schemat tego układu sensorów. Wspólne zastosowanie tych czterech sensorów umożliwia pomiary i śledzenie (1) wiązania i twardnienia młodego betonu (2); mikrostruktury i właściwości transportowych, a mianowicie porowatości, ciągłości porów, przepuszczalności wody (3); zmian wewnętrznego chemizmu układu (spowodowanego reakcjami hydratacji, wnikaniu agresywnych jonów, lub karbonatyzacji betonu) i (4) wewnętrznej wilgotności betonu co może być wykorzystane do śledzenia ruchów wilgoci, skurczu i potencjalnych reakcji zależnych od wilgotności jak RKA, zamrażanie i rozmrażanie i korozja stali. Sensor mierzący temperaturę (T) dostarcza informacji pozwalającej na temperaturową kalibrację sensorów elektrycznych oraz może być również zastosowany do pomiaru szybkości hydratacji i przyrostu wytrzymałości (wykorzystując metodę dojrzalności). Ten artykuł pokaże, że równoczesna analiza tych czterech pomiarów jest niezbędna dla uzyskania dostatecznych informacji do kalibracji w celu rozwiązania przeciwstawnych wpływów roztworu w porach, zawartości wilgoci i zmian temperatury.

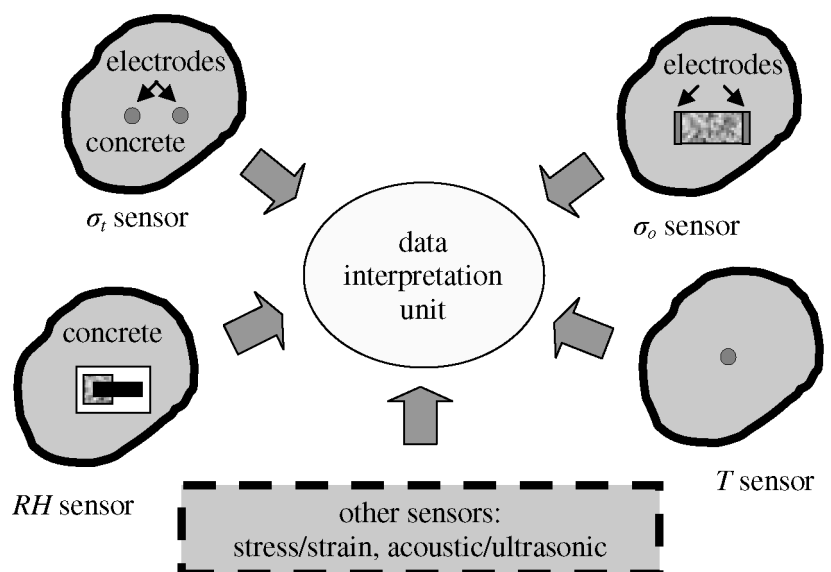
W tym artykule opisano reguły posiadające zasadniczy wpływ oraz zastosowane metody postępowania w celu opracowania trzech prototypowych sensorów opartych na pomiarach przewodnictwa elektrycznego. W celu sprawdzenia koncepcji prześledzono właściwości i parametry stanu serii hydratyzujących zaczynów

In addition to the measurement of microstructural parameters (e.g., porosity and connectivity of the pores) (13, 14), electrical methods have been used to monitor water sorption (20, 21), ionic penetration (20, 22), and damage development (23, 24) in concrete. However, problems exist in using electrical measurements for insitu monitoring of field concrete since the electrical properties of concrete are simultaneously influenced by four major sources:

- (1) hydration and microstructural variation (14),
- (2) changes in pore solution composition (14, 22),
- (3) moisture variation (15, 20, 25), and
- (4) temperature variation (26).

Due to the simultaneous influence of these factors in field concrete, a single measurement of electrical conductivity is unable to provide a reliable description of material properties or performance. To overcome these limitations, this research proposes the development of a new material sensing system that consists of three electrical conductivity-based sensors and a temperature sensor. The electrical sensors include a concrete conductivity (σ_c) sensor, a pore solution conductivity (σ_o) sensor, and a conductivity-based humidity (RH) sensor.

Figure 1 provides a schematic representation of this sensing system. A combined application of these four sensors enables the measurement and monitoring of (1) setting and hardening in fresh concrete; (2) microstructural and transport properties such as porosity, pore connectivity, water permeability, and ion diffusivity; (3) changes in the internal chemistry of the system (due to the hydration reactions, penetration of aggressive ions, or carbonation of concrete); and (4) the internal humidity of concrete that can be used to monitor moisture movement, shrinkage, and the potential of moisture sensitive reactions such as ASR, freezing and thawing and corrosion of steel. The temperature (T) sensor provides information for temperature calibration of the electrical sensors while it can also be used to compute the rate of hydration and strength



Rys. 1. Schemat nowego układu sensorów

Fig. 1. Schematic illustration of the new material sensing system

cementowych przy zastosowaniu opracowanych sensorów elektrycznych. Dalsze pomiary i próby rozwinięcia metody są w toku mające na celu ocenę zastosowań polowych do nawierzchni betonowych i mostów.

3. Podstawy pomiarów elektrycznego przewodnictwa cementu i betonu

Elektryczne przewodnictwo betonu jest właściwością materiału wyznaczaną na podstawie oporności elektrycznej mierzonej pomiędzy dwoma punktami (elektrodami) umieszczonymi w materiale. Zmierzona oporność jest znormalizowana w zależności od wpływu próbki i geometrii elektrody:

$$\sigma_t = k/R_b \quad [1]$$

gdzie: σ_t (S/m) jest przewodnictwem betonu, $R_b(\Omega)$ jest mierzonym oporem, $k(1/m)$ jest współczynnikiem geometrycznym obliczonym lub wyznaczonym doświadczalnie (22).

Oporność elektryczna betonu może być otrzymana na podstawie pomiarów prądu stałego (DC) lub prądu zmiennego (AC). Stosowanie pomiaru AC jest często preferowane w związku z trudnościami związanymi z polaryzacją i ciągłymi zmianami mikrostruktury wywołanymi pomiarami DC (27). Impedancyjna spektroskopia elektryczna (EIS) jest metodą, w której napięcie prądu zmiennego (AC) jest przyłożone do próbki o częstotliwościach w szerokim zakresie a mierzony prąd i opóźnienie fazowe są związane z rzeczywistą i urojoną impedancją (14, 28-30). Ta odpowiedź impedancyjna jest wykorzystywana do ustalenia szeregu właściwości elektrycznych próbki z jej rezystancją objętościową włącznie (R_b).

Przewodnictwo betonu jest związane z właściwościami i rozmieszczeniem faz tworzących to tworzywo (27). Beton można traktować jako złożony materiał zawierający fazy stałe (to jest niezhydratyzowany cement, produkty hydratacji, kruszywo), ciekłe (to jest roztwór w porach) i gazowe (to jest pory powietrzne, suche kapilary i pory żelowe) (27). Faza ciekła jest elektrolitem (zawierającym jony Na^+ , K^+ , OH^- , SO_4^{2-} i czasem Cl^-) i jako taka wykazuje przewodnictwo elektryczne. Przewodnictwo fazy ciekłej zmienia się przeciętnie w zakresie od $\sigma_o = 1$ S/m do $\sigma_o = 20$ S/m, w zależności od stężenia jonów (14, 22). Fazy stała i para są zasadniczo nieprzewodzące i przewodnictwo fazy stałej można w przybliżeniu szacować jako równe $\sigma_s \approx 10^{-9}$ S/m podczas gdy powietrze ma w przewodnictwo w przybliżeniu wynoszące 10^{-15} S/m (27). W związku z tym przepływ elektryczności wewnątrz betonu jest w zasadzie jonowy i uczestniczy w nim faza ciekła (to jest roztwór w porach).

Często stosuje się model przewodnictwa elektrycznego stwardniałego zaczynu i betonu w postaci zmodyfikowanego równania liniowego (13, 14, 27):

$$\sigma_t = \sigma_o \emptyset \beta \quad [2]$$

gdzie: σ_t (S/m) jest przewodnictwem zaczynu cementowego lub betonu, σ_o , (S/m) jest przewodnictwem roztworu w porach, \emptyset i β (obie bezwymiarowe) są odpowiednio udziałem objętościowym i ciągłością fazy ciekłej w tworzywie (27). Ciągłość (β) jest paramem-

development (i.e., using the maturity method). This paper will show that a simultaneous analysis of these four measurements is needed to provide sufficient calibration information for resolving the concurrent influences of pore solution, moisture content, and temperature variation.

In this paper, the governing principles and the process used for the development of the three prototype electrical-conductivity based sensors are described. To provide a proof of concept, properties and state parameters of a series of hydrating cement pastes were monitored using the developed electrical sensors. Further research and development is in progress to evaluate the field application of these sensors in concrete pavements and bridges.

3. Background on electrical conductivity measurements of cement and concrete

Electrical conductivity of concrete is a material property obtained from the electrical resistance measured between two points (i.e., electrodes) inside the material. The measured resistance is normalized to account for the effects of specimen and electrode geometry:

$$\sigma_t = k/R_b \quad [1]$$

where σ_t (S/m) is the conductivity of concrete, $R_b(\Omega)$ is the measured resistance, and $k(1/m)$ is a geometry factor that is calculated or measured experimentally (22). The electrical resistance of concrete can be obtained from direct current (DC) or alternating current (AC) measurements. The use of AC measurements is frequently preferred due to difficulties associated with polarization effect and permanent microstructural changes induced by DC measurements (27). Electrical impedance spectroscopy (EIS) is a method in which an alternating (AC) voltage is applied to a specimen over a wide range of frequencies and the measured current and phase lag are related to the specimen's real and imaginary impedances (14, 28-30). This impedance response is used to obtain several electrical properties of the specimen including its bulk resistance (R_b).

The conductivity of concrete is related to the properties and distribution of the material's constituent phases (27). Concrete can be considered as a composite material containing solid (e.g., unhydrated cement, hydration products, aggregates), liquid (i.e., pore solution), and vapor (e.g., air voids, dried capillary and gel pores) phases (27). The liquid phase is an ionic electrolyte (containing Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , OH^- , SO_4^{2-} , and often Cl^- ions) and as such, it is electrically conductive. The conductivity of the liquid phase typically varies in the range of $\sigma_o = 1$ S/m to $\sigma_o = 20$ S/m depending on the concentration of ions (14, 22). The solid and vapor phases are essentially non-conductive as the conductivity of the solid phase can be approximated as $\sigma_s \approx 10^{-9}$ S/m while air has a conductivity of approximately 10^{-15} S/m (27). As a result, the flow of electricity inside concrete is essentially ionic and through the material's liquid phase (i.e., pore solution).

A modified parallel law is frequently used to model the electrical conductivity of hardened cement paste and concrete (13, 14, 27):

trem uwzględniającym efektywną długość i zmiany wymiarowe połączeń przewodzących (to jest porów wypełnionych cieczą) (27, 31). Dodatkowo, stwierdzono, że (pory nie zawierające cieczy) udział powierzchni w przewodnictwie jest pomijalny w przypadku zaczynu cementowego i betonu, co potwierdza przydatność równania [2] dla tych materiałów (25).

Równanie [2] pokazuje w sposób oczywisty zależność przewodnictwa elektrycznego od struktury porowatości w betonie, od składu fazy ciekłej i zawartości wilgoci. Podczas gdy mikrostruktura betonu będzie określała udział objętościowy (\emptyset) i ciągłość (β) cieczy w nasyconym betonie, suszenie powoduje znaczne zmniejszenie wielkości \emptyset i β i z tego powodu zmienia przewodnictwo betonu o kilka rzędów wielkości (25). Zależność przewodnictwa elektrycznego od temperatury wynika głównie z wpływu temperatury materiału na ruchliwość jonów (26, 32, 33). Równocześnie zmiany temperatury mogą oddziaływać na rozpuszczalność jonów i mogą także powodować zmiany mikrostruktury betonu, szczególnie w jego wczesnym okresie.

Można postawić pytanie związane z korelacją przewodnictwa elektrycznego zaczynu cementowego z przewodnictwem elektrycznym betonu, w którym zaczyn ma ten sam skład. Ogólnie w porównaniu z zaczynem cementowym kruszywo ma mniejszą porowatość i niższe przewodnictwo elektryczne (26). W związku z tym obecność kruszywa będzie zmniejszało przewodnictwo betonu proporcjonalnie do porowatości i udziału objętościowego kruszywa (26, 33). Jednak, podobnie do zaczynu cementowego, przewodnictwo elektryczne wewnątrz kruszyw jest określone przez jonowy przepływ prądu poprzez pory wypełnione cieczą (27). Stosując zmodyfikowane prawo proporcjonalności (równanie 2) można połączyć przewodność elektryczną przez wypełnione cieczą pory w zaczynie cementowym i w kruszywie i zapisać przewodnictwo betonu jako funkcję udziału całej objętości i ciągłości fazy ciekłej wewnątrz materiału.

W dalszej części referatu wykazemy, że metoda ta może być wykorzystana do oszacowania mikrostruktury i właściwości transportowych betonu. W tym celu trzeba zastosować równoczesne pomiary przewodnictwa betonu, przewodnictwa roztworu w porach, wilgotności względnej (lub zawartości wilgoci) i temperatury.

4. Opracowanie trzech sensorów opartych na przewodnictwie

W rozdziale tym przedstawiono opracowanie sensorów opartych na przewodnictwie (σ_i , σ_o , RH). Sensory te skonstruowano w wyniku serii badań teoretycznych i doświadczalnych przewodnictwa elektrycznego zaczynu cementowego, betonu i innych materiałów porowatych (27).

4.1. Sensor mierzący przewodnictwo betonu (σ_i)

Sensor związany z przewodnictwem betonu (σ_i) wykorzystano do dwóch głównych zastosowań: (1) śledzenie czasu wiązania, (2) oszacowanie mikrostruktury i właściwości transportowych materiału. Pierwsze zastosowanie jest przedstawione w innej publikacji (34). W tym artykule przewodnictwo elektryczne (σ_i) jest wykorzy-

$$\sigma_i = \sigma_o \emptyset \beta \quad [2]$$

where σ_i (S/m) is the conductivity of cement paste or concrete, σ_o (S/m) is the conductivity of pore solution, and \emptyset and β (both unitless) are respectively, the volume fraction and connectivity of the material's liquid phase (27). Connectivity (β) is a parameter that accounts for the effective length and size variation of the conduction paths (i.e., liquid filled pores) (27, 31). In addition, surface (solid-pore) conduction effects were found to be negligible for cement paste and concrete which confirms the applicability of equation [2] for these materials (25).

Equation [2] clearly shows the dependence of electrical conductivity on concrete pore structure, pore solution composition, and moisture content. While the microstructure of concrete would control the volume fraction (\emptyset) and connectivity (β) of moisture in saturated concrete, drying causes a significant reduction in the values of \emptyset and β and as such, influences the conductivity of concrete by several orders of magnitude (25). The temperature dependence of electrical conductivity is mainly due to the dependence of the mobility of ions on the temperature of the material (26, 32, 33). Meanwhile, temperature changes can influence the solubility of ions and may also cause microstructural changes in concrete especially at early ages.

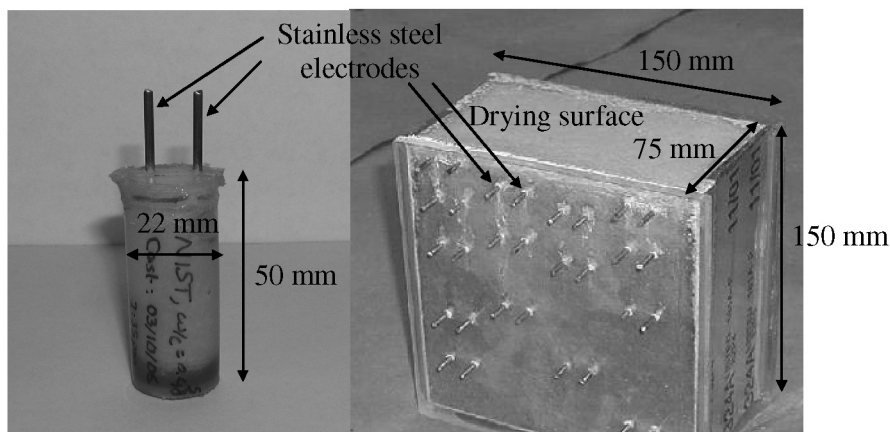
A question might be raised about the correlation between the electrical conductivity of cement paste and the electrical conductivity of concrete having the same paste composition. Generally, in comparison to cement paste, aggregates have lower porosity and lower electrical conductivity (26). As such, the presence of aggregates would decrease the conductivity of concrete proportional to the porosity and volume fraction of aggregates (26, 33). However, similar to cement paste, the electrical conduction inside aggregates is dominated by the ionic current flow through the liquid filled pores (27). By employing the modified parallel law (equation [2]), one combines the electrical conduction through the liquid-filled pores of the cement paste and the aggregates and describes the conductivity of concrete as a function of the total volume fraction and connectivity of the liquid phase inside the material. It will be discussed in the next section that this method can be used to estimate the microstructural and transport properties of concrete. For this purpose, a simultaneous measurement of concrete conductivity, pore solution conductivity, relative humidity (or moisture content), and temperature is required.

4. Development of the three conductivity-based sensors

In this section, the development of the conductivity-based sensors (σ_i , σ_o , RH) is discussed. These sensors were constructed based on the results of a series of theoretical and experimental studies on the electrical conductivity of cement paste, concrete, and other porous materials (27).

4.1. Concrete Conductivity (σ_i) Sensor

The concrete conductivity (σ_i) sensor is used for two main applications: (1) monitoring the time of setting, (2) estimation of



Rys. 2. Zastosowanie sensora (σ_t) mierzącego przewodność: a) w szczelnie zamkniętej próbce zaczynu cementowego, b) schnącej płyty z zaprawy

Fig. 2. Application of the conductivity (σ_t) sensor to (a) a sealed cement paste specimen, (b) a drying mortar slab specimen

stane dla opisu czynnika związanego z formowaniem materiału, dyfuzyjności jonów i przepuszczalności wody. Oszacowanie tych parametrów jest ważne dla modelowania trwałości i stanu materiałów opartych na cemencie.

Sensor mierzący przewodność betonu (σ_t) składa się z dwóch równoległych elektrod, które są zanurzone w betonie, w dobranej odległości jedna od drugiej. W tych badaniach stosowano elektrody ze stali nierdzewnej w formie prętów o średnicy 2,5 mm, w odległości pomiędzy rdzeniami wynoszącej 10 mm. Odległość pomiędzy elektrodami określa strefę materiału, którą obejmuje badanie sensorami (35) i z tego względu układ elektrod powinien być zaplanowany w zależności od tego, czy chodzi o pomiar lokalny czy obejmujący cały materiał. Na rysunku 2 pokazano zastosowania tego sensora do pomiaru właściwości próbek zaczynu i zaprawy cementowej. Oporność elektryczną mierzy się pomiędzy tymi elektrodami, a przewodność elektryczną (σ_t) wylicza się z równania [1].

Porowatość i morfologia mikrostrukturalna betonu (to jest wymiary i pokrój porów oraz ciągłość porów) decydują o wielu właściwościach materiału, w tym o wytrzymałości, module sprężystości i właściwościach transportowych. Przyjmijmy, że przewodność roztworu w porach (σ_o) mierzymy oddzielnie, to przewodność betonu (σ_t) można wykorzystać do wyznaczenia iloczynu $\emptyset\beta$ (to jest iloczynu udziału objętościowego i ciągłości fazy ciekłej). W nasyconym wodą betonie parametry \emptyset i β są synonimami całkowitej porowatości i ciągłości porów. Aczkolwiek porowatość sama przez się nie może opisać morfologii i mikrostruktury lub szybkości transportu materii (to jest cieczy, gazów, jonów) wewnątrz faz materiału, to iloczyn $\emptyset\beta$ jest ilościową miarą „otwartości” mikrostruktury i może być wykorzystany do obliczania właściwości transportowych materiału (36, 37). W przypadku nienasyconego betonu kalibracja przewodnictwa (σ_t) w funkcji wilgotności jest niezbędna w celu wyznaczenia całkowitej porowatości i ciągłości porów w materiale (27).

Dyfuzja jonów (np. chlorkowych) jest mechanizmem transportowym, któremu towarzyszy przypadkowy ruch naładowanych atomów pod wpływem potencjału chemicznego (to znaczy gradientu stężenia).

the material's microstructural and transport properties. The first application is discussed in details elsewhere (34). In this paper, electrical conductivity (σ_t) is used to describe the material's formation factor, ion diffusivity, and water permeability. Estimation of these parameters is significant in modeling the durability and health of cement-based materials.

The concrete conductivity (σ_t) sensor is comprised of two parallel electrodes that are embedded inside concrete at a specific distance from one another. In this study, 2.5 mm diameter stainless steel rods were used at a 10 mm center to center spacing. The distance between electrodes determines the zone of material that is probed by the sensor (35) and as such, the electrode configuration should be designed based on whether a local or global measurement is desired. Figure

2 shows applications of this sensor for the measurement of the properties of cement paste and mortar specimens. The electrical resistance is measured between these electrodes and the electrical conductivity σ_t is computed using equation [1].

Porosity and microstructural morphology of concrete (i.e., pore sizes and shapes, and connectedness of the pores) govern many of the material's properties including strength, elastic modulus, and transport properties. Provided that the pore solution conductivity (σ_o) is separately measured, conductivity of concrete (σ_t) can be used to determine the product $\emptyset\beta$ (i.e., the product of volume fraction and connectivity of the liquid phase). In water saturated concrete, the parameters \emptyset and β are synonymous with the total porosity and pore connectivity. Although porosity by itself cannot describe the morphology of the microstructure or the rate of mass (i.e., liquid, gas, ion) transport inside the material, the product $\emptyset\beta$ provides a quantitative measure of the “openness” of the microstructure and can be used to calculate the material's transport properties (36, 37). For unsaturated concrete, a moisture calibration of conductivity (σ_t) is needed to obtain the total porosity and pore connectivity of the material (27).

Ionic (e.g., chloride) diffusion is a transport mechanism associated with the random walk (i.e., movement) of charged species under a chemical potential (i.e., concentration gradient). Similar to equation [2] which describes ionic conduction (i.e., the random walk of charged species under an electrical potential), the following formula was proposed by Atkinson and Nickerson (36) to describe ionic diffusion inside concrete:

$$D = D_o(\sigma_t/\sigma_o) = D_o \left(\frac{1}{F} \right) \quad [4]$$

where D (m^2/s) is the effective diffusion coefficient of a specific substance (e.g., sodium chloride) inside the material, D_o (m^2/s) is the diffusion coefficient of that substance through pore fluid, and F (unitless) is the material's formation factor ($F = \sigma_o/\sigma_t = 1/\emptyset\beta$). Equation [4] is also known as the Nernst-Einstein equation for ionic diffusivity (D).

Analogicznie do równania (2), które opisuje przewodzenie jonowe (to jest przypadkowy ruch naładowanych atomów pod wpływem potencjału elektrycznego) Atkinson i Nickerson zaproponowali następujący wzór do opisu dyfuzji jonów w betonie:

$$D = D_o(\sigma_t/\sigma_o) = D_o \left(\frac{1}{F}\right) \quad [4]$$

gdzie: D – (m^2/s) jest efektywnym współczynnikiem dyfuzji pewnej substancji (na przykład chlorku sodowego) wewnątrz materiału, D_o – (m^2/s) jest współczynnikiem dyfuzji tej substancji w cieczy w porach, F – (bezwymiarowy) jest współczynnikiem związanym z materiałem ($F = \sigma_o/\sigma_t = 1/\emptyset\beta$).

Równanie [4] jest także znane jako równanie Nersta – Eisteina do wyznaczania dyfuzyjności jonów (D).

Katz i Thompson (37) pokazali, że hydrauliczną przepuszczalność porowatych materiałów można opisać jako funkcję współczynnika materiałowego (F) przy założeniu, że charakterystyczna skala długości struktury porów jest także znana:

$$k = \frac{1}{226} dc^2(\sigma_t/\sigma_o) = \frac{1}{226} dc^2 \left(\frac{1}{F}\right) \quad [5]$$

gdzie: k (m^2) jest efektywną przepuszczalnością, dc (m) jest charakterystycznym wymiarem porów (to jest średnicą porów, która decyduje o transporcie cieczy).

Zastosowanie równań (4) i (5) daje dobrą zgodność z konwencjonalnymi pomiarami dyfuzyjności i przepuszczalności betonu (14, 36-39). Równocześnie wyznaczenie właściwości transportowych w oparciu o przewodnictwo elektryczne (σ_t) stwarza znaczne korzyści w stosunku do tradycyjnych pomiarów właściwości transportowych jest bowiem prostsze, zajmuje mniej czasu i opiera się na nieniszczących pomiarach elektrycznych, a także daje możliwość badania betonu we wczesnym okresie.

4.2. Sensor do pomiaru przewodnictwa roztworu w porach (σ_o)

Elektryczne przewodnictwo roztworu w porach (σ_o) jest funkcją jego składu jonowego. W związku z tym pomiary przewodnictwa roztworu w porach mogą stanowić podstawę do śledzenia zmian stężenia jonów. Może to mieć duże znaczenie szczególnie w stosunku do jonów Cl^- , OH^- i SO_4^{2-} w przypadku śledzenia korozji, karbonatyzacji i agresji siarczanowej. Dodatkowo znajomość przewodnictwa roztworu w porach (σ_o) jest potrzebna dla oceny mikrostrukturalnych i transportowych właściwości betonu (rozdział 4. 1).

Przewodnictwo roztworu w porach (σ_o) betonu można mierzyć za pomocą zanurzonego w nim sensora jak to pokazano na rysunku 3(a). Sensor składa się z rdzenia zrobionego z naturalnego, porowatego drobnoziarnistego piaskowca o szczególnych właściwościach mikrostrukturalnych (27), a także z elektrod stalowych i łączących przewodów celu ułatwienia pomiarów przewodnictwa elektrycznego. Przed zanurzeniem w betonie porowaty piaskowiec nasycy się pod próżnią syntetycznym roztworem (0,40 molarny KOH). Natychmiast po zanurzeniu sensor ma bezpośredni kontakt z otaczającym betonem i w związku z tym roztwór wewnętrzny w sensorze osiąga chemiczną równowagę (to jest stężenie jonowe)

Katz and Thompson (37) showed that the hydraulic permeability of porous materials can be described as a function of the material's formation factor (F) provided that a characteristic length scale of the pore structure is also known:

$$k = \frac{1}{226} dc^2(\sigma_t/\sigma_o) = \frac{1}{226} dc^2 \left(\frac{1}{F}\right) \quad [5]$$

where k (m^2) is the effective permeability, and dc (m) is the characteristic pore size (i.e., the pore diameter that dominates fluid transport).

Applications of equations [4] and [5] provide good agreement with the conventional measurements of diffusivity and permeability of concrete (14, 36-39). Meanwhile, estimation of transport properties from electrical conductivity (σ_t) offers significant advantages over the traditional measurements of transport properties including the simplicity, time efficiency, and non-destructive nature of electrical measurements, as well as the possibility of testing concrete at early-ages.

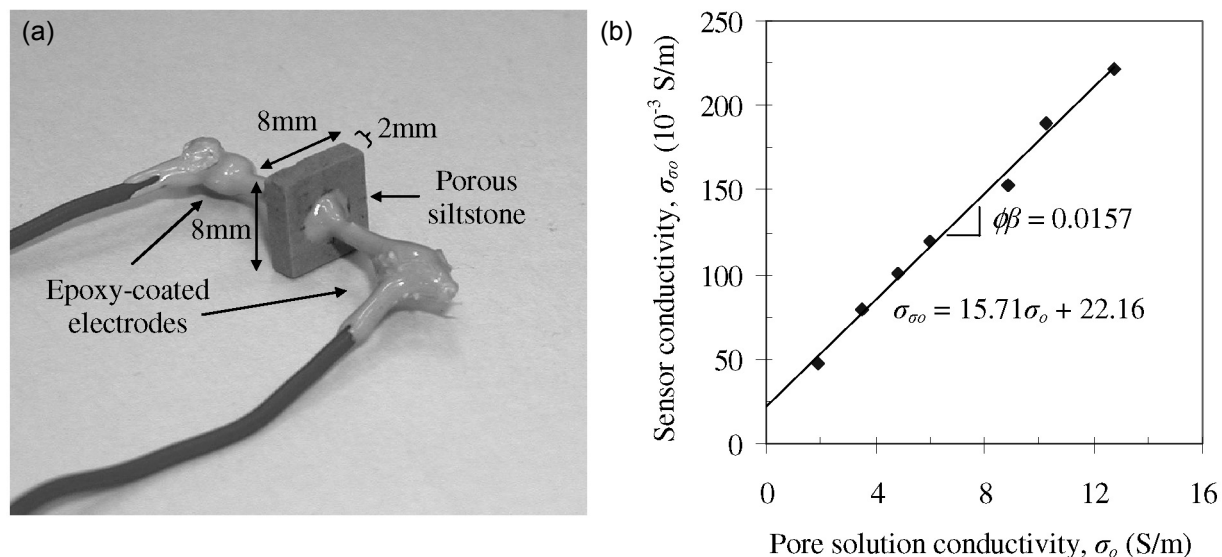
4.2 Pore solution conductivity (σ_o) sensor

The electrical conductivity of pore solution (σ_o) is a function of its ionic composition. As such, measurement of the pore solution conductivity can provide a means to monitor changes in the ion concentrations. This can be significant especially with regards to Cl^- , OH^- , and SO_4^{2-} ions for monitoring corrosion, carbonation, and sulfate attack. In addition, knowledge of the pore solution conductivity (σ_o) is needed for assessing the microstructural and transport properties of concrete (section 4.1).

Pore solution conductivity (σ_o) of concrete can be measured with the aid of an embedded sensor illustrated in Figure 3(a). The sensor is composed of a core made of a natural porous siltstone with specific microstructural properties (27), as well as steel electrodes and connection wires to facilitate the measurement of electrical conductivity. Prior to embedding inside concrete, the porous siltstone is vacuum saturated with a synthetic pore solution (0.40 molar KOH). Once embedded, the sensor is in direct contact with the surrounding concrete and as such, the sensor's internal pore fluid comes to chemical equilibrium (i.e., ion concentrations) with the pore solution of concrete.

The electrical conductivity of the porous siltstone can be described by the use of the modified parallel law (equation [2]). Since the siltstone has stable and time independent microstructural properties (\emptyset and β), the conductivity of siltstone can be related to the conductivity of pore solution. Figure 3 (b) illustrates the linear correlation between the siltstone conductivity (on the vertical axis) and the pore solution conductivity (on the horizontal axis). This correlation forms a principal relationship for measurement of the pore solution conductivity of concrete using the embedded sensor. As with the concrete conductivity sensor (σ_t), moisture and temperature corrections are needed (25, 27).

To obtain the correlation presented in Figure 3 (b), prism siltstone specimens were vacuum saturated with seven different synthetic pore solutions and the conductivity of the saturated surface dried



Rys. 3. (a) Sensor do pomiaru przewodnictwa roztworu w porach (σ_o) i (b) korelacja pomiędzy przewodnictwem mierzonym sensorem a przewodnictwem roztworu w porach

Fig. 3. (a) Pore solution conductivity (σ_o) sensor, and (b) correlation between sensor conductivity and pore solution conductivity

z roztworem w porach betonu.

Przewodnictwo elektryczne porowatego piaskowca można opisać wykorzystując zmodyfikowane równanie liniowe (równanie 2). Ponieważ piaskowiec ma stałe i niezależne od czasu właściwości mikrostrukturalne (ϕ i β) przewodnictwo piaskowca może być powiązane z przewodnictwem roztworu w porach. Na rysunku 3(b) pokazano liniową korelację pomiędzy przewodnictwem piaskowca (na osi pionowej) a przewodnictwem roztworu w porach (na osi poziomej). Ta korelacja stanowi główną zależność w pomiarach przewodnictwa roztworu w porach betonu za pomocą zanurzonego sensora. Podobnie jak w przypadku sensora przewodnictwa betonu (σ_i) trzeba znać wilgotność i temperaturę w celach korekcji (25, 27).

W celu otrzymania korelacji pokazanej na rysunku 3(b) graniastopowate próbki piaskowca zostały nasycone pod próżnią siedmioma różnymi syntetycznymi roztworami i zmierzono przewodnictwo nasyconych powierzchni wysuszonych kształtek metodą opisaną w (25). Otrzymana zależność liniowa wykazuje dobrą zgodność z równaniem (2), z wyjątkiem pionowego przesunięcia na osi obrazującej przewodnictwo sensora. To pionowe przesunięcie jest spowodowane znaczną nadmiarową przewodnością powierzchniową piaskowca (25) czego nie należy pomijać w trakcie obliczeń.

W celu zapewnienia pożądaných właściwości zanurzonego sensora rdzeń z piaskowca musi spełniać szereg warunków. Porowaty rdzeń powinien mieć nie przewodzący elektryczności stały szkielet i więźbę dostępnych porów, w które może wnikać roztwór z porów betonu. Materiał musi być trwały w środowisku betonu o dużej zasadowości ($\text{pH} \approx 13$) i musi posiadać założony rozkład wymiarowy porów (to jest promień porów w zakresie $1 \text{ nm} < r_p < 100 \text{ nm}$) w celu zapewnienia pomiarów w zakresie wilgotności względnych $50\% < \text{RH}$ bez wykazywania znacznej histerezy adsorpcja – desorpcja (25). Inne kryteria takie jak właściwości mechaniczne umożliwiające dobre cięcie, nadanie kształtu i umocowanie rdzenia także

specimens were obtained according to the procedure described in (25). The linear relationship obtained shows a good agreement with equation (2), with the exception of a vertical intercept exhibited by the line (on the sensor conductivity axis). This vertical intercept is caused by a considerable surface excess conduction in the siltstone (25) which must not be neglected during calculations.

To ensure desirable performance as an embedded sensor, the siltstone core must satisfy a set of criteria. The porous core should have an electrically non-conductive solid skeleton and a network of accessible pores that can be infiltrated by the pore solution. The material must be stable in the high alkaline environment of concrete ($\text{pH} \approx 13$) and must have a desired pore size distribution (that is, pore radius in the range $1 \text{ nm} < r_p < 100 \text{ nm}$) to permit sensitivity in a range of relative humidities ($50\% < \text{RH} < 100\%$) without exhibiting a significant desorption-absorption hysteresis (25). Other criteria such as machinability to allow proper cutting, shaping, and placement of the core is desired. The sensor must be durable and show negligible drift as it ages. In this study, fifteen different porous materials (including several types of natural rocks, alumina ceramics, and porous glasses) were examined to evaluate their performance as embedded sensors (27). Among these materials, the natural siltstone was found to perform well.

4.3. Relative Humidity (RH) Sensor

The relative humidity (RH) sensor is included to enable monitoring of the moisture movement inside concrete. Knowledge of the internal relative humidity is vital in determining the potential for shrinkage cracking and other moisture sensitive deterioration processes inside concrete. In addition, this sensor enables moisture calibration of the other conductivity-based sensors.

Rajabipour and Weiss (25) studied the electrical conductivity of drying cement paste and other porous materials containing a conductive aqueous phase. It was shown that electrical conductivity

są pożądane. Sensor powinien być trwały i wykazywać pomijalne zużycie z czasem. W tej pracy zbadano piętnaście różnych materiałów porowatych (obejmujących różne rodzaje naturalnych skał, aluminium, ceramikę i szkła porowate) w celu oceny ich zachowania jako zanurzonych sensorów (27). Pośród tych materiałów naturalny piaskowiec okazał dobre właściwości.

4.3. Sensor do pomiaru względnej wilgotności (RH)

Sensor do pomiaru względnej wilgotności (RH) jest stosowany do śledzenia zmian we wnętrzu betonu. Znajomość wewnętrznej wilgotności względnej jest ważna dla oceny możliwości powstawania rys skurczowych i innych procesów zniszczenia betonu zależnych od wilgotności. Dodatkowo ten sensor pozwala na kalibrację wilgotnościową innych sensorów opartych na przewodnictwie.

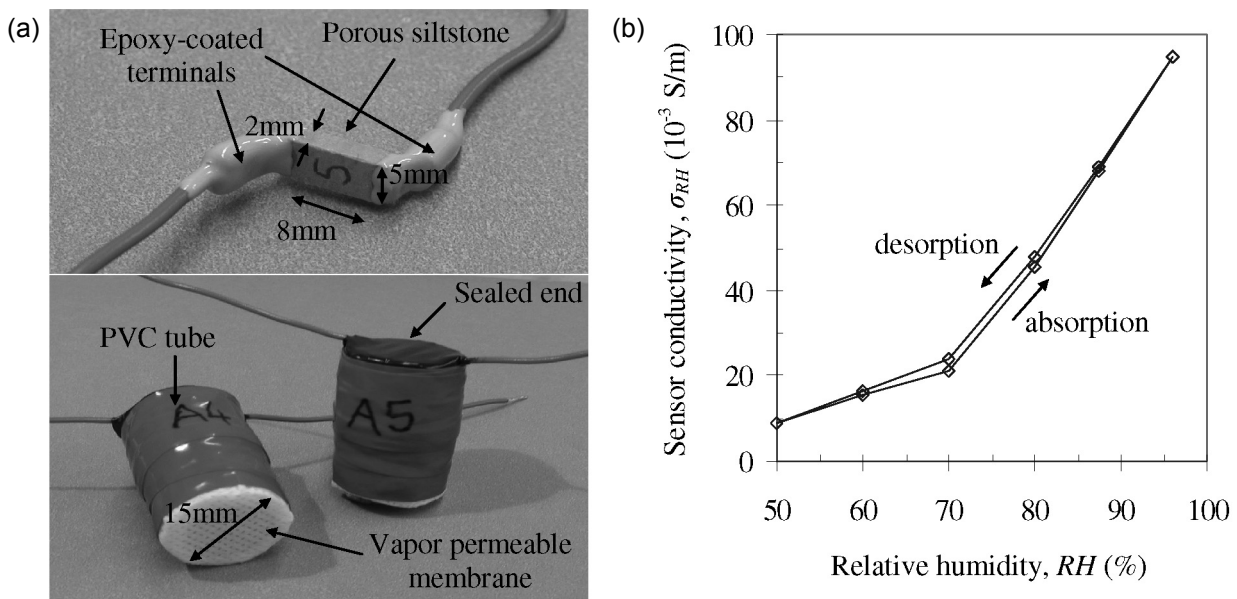
Rajabipour i Weiss (25) badali przewodnictwo elektryczne wysychającego zaczynu cementowego i innych porowatych materiałów zawierających przewodzącą fazę ciekłą. Było wiadomo, że przewodnictwo elektryczne ma wprost proporcjonalną zależność z zawartością wilgoci w materiale. Korelacja przewodnictwa z wewnętrzną wilgotnością może jednak nie być powtarzalna ze względu na znaczną histerezę adsorpcja – desorpcja, która może występować w niektórych materiałach porowatych (w tym w zaczynie cementowym). Z drugiej strony materiały porowate ze stosunkowo wąskim rozkładem wymiarów porów zwykle wykazują małą histerezę w zakresie korelacji przewodnictwo – wilgotność (27). Ta korelacja, którą pokazano na rysunku 4(b) dla porowatego piaskowca stanowi podstawową zależność służącą do pomiaru wewnętrznej wilgotności względnej betonu za pomocą zanurzonego sensora RH.

W celu otrzymania podstawowej korelacji pomiędzy przewodnictwem elektrycznym a wilgotnością atmosferyczną (rysunek 4(b)), próbka w kształcie graniastostłupa została pod próżnią nasycona 0,5 normalnym roztworem NaCl ($\sigma_o = 4,40$ S/m). Próbki wysuszone

has a one-to-one relationship with the moisture content inside the material. Correlation between conductivity and internal humidity might not be unique, however, due to the significant desorption-absorption hysteresis that may be observed in some porous materials (including cement paste). On the other hand, porous materials with a relatively narrow pore size distribution typically show only a small hysteresis in the conductivity-humidity correlation (27). This correlation, which is shown in Figure 4 (b) for the porous siltstone, forms a principal relationship for measurement of the internal relative humidity of concrete using the embedded RH sensor.

To obtain the principal correlation between electrical conductivity and ambient humidity (Figure 4 (b)), prism siltstone specimens were vacuum saturated with a 0.5 molar NaCl solution ($\sigma_o = 4.40$ S/m). The specimens were dried to equilibrium inside environmental chambers set at the following relative humidities: 96%, 87.5%, 80%, 70%, 60%, and 50%. After reaching equilibrium, the electrical conductivity of the siltstone was measured and plotted against the ambient humidity. A complete desorption-absorption loop was obtained by gradually drying specimens from 96%RH to 50%RH and then permitting moisture absorption by gradually increasing humidity back to 96%RH. Figure 4 (b) shows the average of measurements obtained from three siltstone specimens.

The relative humidity (RH) sensor is shown in Figure 4 (a) and includes a siltstone core connected to a pair of stainless steel electrodes (terminals). The sensor is vacuum saturated with the 0.5 molar NaCl solution prior to placement inside concrete. The sensor is enclosed inside a PVC tube for protection against damage and to limit the sensor's contact with its ambient environment to vapor transport. One end of the tube is covered using a vapor permeable membrane that allows the transport of water vapor between the sensor and the surrounding concrete but blocks the penetration of solids and liquids. The other end of the tube is sealed and prevents



Rys. 4. (a) Sensor mierzący wilgotność względną (RH) zamknięty wewnątrz przepuszczającego parę pojemnika i (b) korelacja pomiędzy przewodnictwem mierzonym sensorem a wilgotnością względną wykazującą małą histerezę

Fig. 4. (a) Relative humidity (RH) sensor enclosed inside a vapor permeable case, and (b) correlation between sensor conductivity and relative humidity exhibiting low hysteresis

do stanu równowagi wewnątrz komory klimatyzacyjnej, utrzymującej następujące wilgotności względne: 96%, 87,5%, 80%, 70%, 60% i 50%. Po osiągnięciu równowagi dokonano pomiaru przewodnictwa elektrycznego piaskowca i wyznaczono jej zależność w stosunku do wilgotności otoczenia. Pełną pętlę adsorpcji – desorpcji otrzymano przez stopniowe suszenie kształtki od 96% RH do 50% RH, a następnie pozwalając na adsorpcję wilgoci poprzez stopniowe zwiększanie wilgotności z powrotem do 96% RH. Rysunek 4(b) pokazuje średnią z pomiarów przeprowadzonych dla trzech próbek piaskowca.

Sensor (RH) do pomiaru względnej wilgotności pokazano na rysunku 4 (a). Składa się on z jądra z piaskowca połączonego do pary elektrod ze stali nierdzewnej (końcówki). Sensor nasycono pod próżnią 0,5 normalnym roztworem NaCl przed umieszczeniem wewnątrz betonu. Sensor jest umieszczony wewnątrz rurki z PCV w celu zabezpieczenia przed uszkodzeniem i ograniczenia kontaktu sensora z atmosferą przenoszącą parę. Koniec rurki jest pokryty przepuszczającą parę membraną co pozwala na transport pary wodnej pomiędzy sensorem i otaczającym betonem, lecz blokuje wnikanie faz stałych i cieczy. Drugi koniec rurki jest zatopiony i nie dopuszcza jakichkolwiek form transportu. Rurka z PCV (z sensorem we wnętrzu) jest częściowo zanurzona w betonie od strony, w której jest membrana (w przyszłych praktycznych zastosowaniach polowych rurka z PV będzie pokryta membraną na obu końcach i będzie całkowicie zanurzona w betonie). Względna wilgotność wewnątrz rurki wynika z równowagi z wilgotnością otaczającego betonu. Pomiar przewodnictwa sensora (σ_{RH}) jest stosowany w celu określenia wilgotności wewnątrz betonu (rysunek 4 (b)).

Dalsze doświadczenia miały na celu określenie dokładności i czasu osiągnięcia równowagi sensorów w zakresie wilgotności względnej (27). Określono, że dokładność sensora wynosi $\pm 1,4\%$ RH natomiast czas do osiągnięcia równowagi jest krótszy od 3 godzin. Obecnie sensor jest kalibrowany w zakresie wilgotności 50% do 96%. Wykazano, że sensor może być stosowany w celu śledzenia niskiej wilgotności, aż do 10% (25). Prowadzone są badania w celu oceny i poprawy dokładności sensora w przypadku wilgotności większej od 96% RH.

4.4. Sensor (T), mierzący temperaturę

Sensor do pomiaru temperatury stosowany w tych badaniach jest dostępną handlowo termoparą T (miedź – konstantan). Pomiaru sensorów przewodnictwa są kalibrowane w funkcji temperatury z wykorzystaniem zależności Arrheniusa:

$$\frac{\sigma(T)}{\sigma(T_{odn})} = a \quad [6]$$

gdzie: $\sigma(T)$ (S/m) jest przewodnictwem zmierzonym w temperaturze otoczenia, T (°K), $\sigma(T_{odn})$ (S/m) jest przewodnictwem w temperaturze odniesienia: $T_{odn} = 296^\circ\text{K}$ ($= 23^\circ\text{C}$) i a (°K) jest współczynnikiem obliczonym w oparciu o energię aktywacji procesu przewodzenia.

Wartość $a = 2500^\circ\text{K}$ jest stosowana do kalibracji sensora (σ), mierzącego przewodnictwo betonu podczas gdy $a = 1930^\circ\text{K}$ jest

all forms of transport. The PVC tube (with the sensor inside it) is partially embedded inside concrete from the side covered by the membrane (in the future field practice, the PVC tube will be covered with the membrane at both ends and will be fully embedded inside concrete). The relative humidity inside the tube comes to equilibrium with the humidity of the surrounding concrete. A measurement of the sensor's conductivity (σ_{RH}) is used to determine the humidity inside concrete (Figure 4 (b)).

Further experiments were performed to determine the accuracy and time to equilibrium of the relative humidity sensors (27). The accuracy of the sensor was evaluated to be $\pm 1.4\%$ RH while its time to equilibrium was measured to be less than 3 hours. The sensor is currently calibrated for the humidity range 50% to 96%. It was shown that the sensor can be used to monitor humidity as low as 10% (25). Research is in progress to evaluate and improve the sensor's accuracy above 96% RH.

4.4. Temperature (T) sensor

The temperature sensor used in this project is a commercially available type T (copperconstantan) thermocouple. The measurements of the conductivity-based sensors are temperature calibrated according to an Arrhenius approach as described by:

$$\frac{\sigma(T)}{\sigma(T_{odn})} = a \quad [6]$$

where $\sigma(T)$ (S/m) is the measured conductivity at the ambient temperature, T (°K), $\sigma(T_{ref})$ (S/m) is the conductivity at a reference temperature, $T_{ref} = 296^\circ\text{K}$ ($= 23^\circ\text{C}$), and a (°K) is a coefficient calculated based on the activation energy of the conduction process. A value of $a = 2500^\circ\text{K}$ is used for the calibration of the concrete conductivity (σ) sensor while $a = 1930^\circ\text{K}$ is used for the pore solution conductivity (σ_o) and the relative humidity (RH) sensors (27).

5. Application of the sensing system in measuring the properties of cement paste

To obtain a preliminary evaluation of the performance of the electrical conductivity-based sensors, a set of cement paste specimens were prepared and monitored using the developed sensors. The cement paste conductivity (σ) and the pore solution conductivity (σ_o) were measured with the aid of embedded sensors and the results were used to monitor development in the material properties (namely, formation factor and ion diffusivity) of the hydrating paste. Also, the relative humidity (RH) sensor was used to monitor changes in the internal humidity of the cement paste during a drying and rewetting period. Sample preparation, curing, and measurements were performed at isothermal ($23 \pm 1^\circ\text{C}$) conditions; as such, temperature correction was not necessary. The results of this preliminary evaluation are used to determine modifications that might be necessary to improve the field performance of the sensors.

stosowany w przypadku sensorów mierzących przewodnictwo roztworu w porach (σ_p) i wilgotności względnej (RH) (27).

5. Zastosowanie układu sensorów do pomiarów właściwości zaczynu cementowego

W celu wstępnego sprawdzenia zachowania się sensorów opartych na przewodnictwie elektrycznym sporządzono serię próbek z zaczynów cementowych i przeprowadzono pomiary stosując opracowane sensory. Zmierzono przewodnictwa zaczynu cementowego (σ_t i roztworu w porach (σ_p) za pomocą zanurzonych sensorów, a wyniki wykorzystano do śledzenia przemian właściwości materiału (mianowicie czynnika formowania się materiału i dyfuzyjności jonów) w hydratyzującym zaczynie. Zastosowano także sensor (RH) wilgotności względnej do śledzenia zmian wilgotności wewnętrznej zaczynu cementowego podczas suszenia i powtórnego nawilżania. Przygotowanie próbek, ich dojrzewanie i prowadzenie pomiarów odbywało się w warunkach izotermicznych ($23 \pm 1^\circ\text{C}$), w związku z tym korelacja temperaturowa nie była konieczna. Wyniki tej wstępnej oceny wykorzystano w celu stwierdzenia jakie zmiany mogą być konieczne w celu udoskonalenia pracy sensorów w warunkach polowych.

5.1. Materiały, próbki i metody badawcze

Przygotowano zaczyn cementowy o stosunku w/c = 0,30. Stosowano cement portlandzki typu I o rozdrobnieniu $360 \text{ m}^2/\text{kg}$ według Blaine'a i o wyliczonym wzorami Bogue'a następującym składzie fazowym: 60% C_3S , 12% C_2S , 12% C_3A , 7% C_4AF oraz $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,72$. Stosowano wysokiej klasy upłynniacz (Glenium 3000 NS) w ilości 0,5% masy cementu. Stosowano mieszarkę Hobart NSO, zgodnie z normą ASTM C 305-99.

Do pomiaru przewodnictwa zaczynu (σ_t) sporządzono próbki walcowe (o średnicy 22 mm i wysokości 50 mm) (rysunek 2 (a)). Elektrody ze stali nierdzewnej umieszczono wzdłużnie wewnątrz

5.1. Materials, specimens, and testing procedures

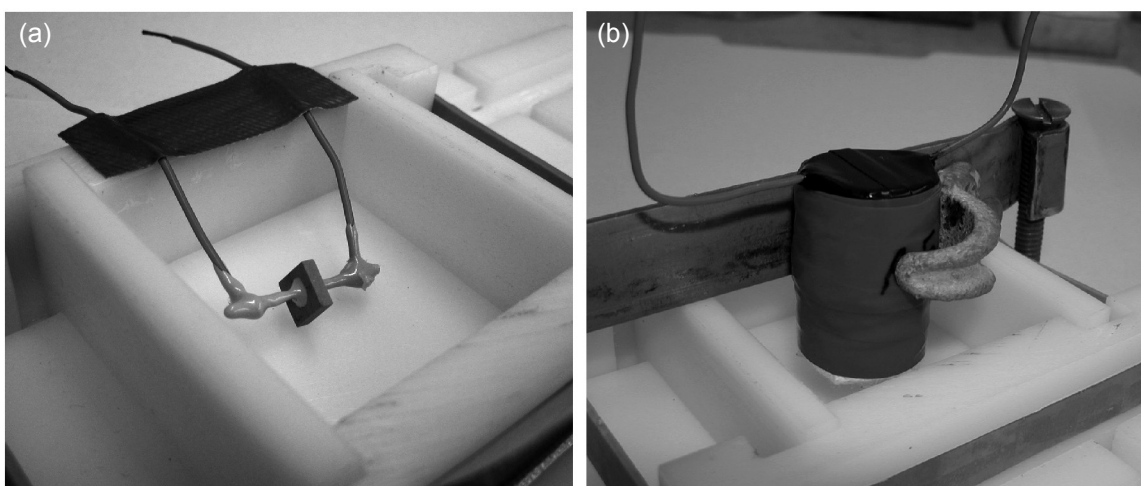
Plain (neat) cement paste with a water to cement ratio of 0.30 was prepared. Type I ordinary Portland cement with a Blaine fineness of $360 \text{ m}^2/\text{kg}$ and a Bogue phase composition of 60% C_3S , 12% C_2S , 12% C_3A , 7% C_4AF and a Na_2O equivalent of 0.72% was used. A high range water reducer (Glenium 3000NS) was used at a rate of 0.5% by weight of cement. Mixing was performed using a Hobart N50 Mixer in accordance with ASTM C305-99.

For measurement of paste conductivity (σ_t), a cylindrical specimen (22 mm diameter and 50 mm height) was prepared (Figure 2 (a)). Stainless steel electrodes were placed longitudinally inside a cylindrical plastic vial (i.e., mold) before casting the cement paste. Conductivity of the cement paste (σ_t) was measured at 20 minute intervals from 35 minutes after cement came in contact with water and up to the age of 48 hours. During the measurements, the specimen remained sealed inside the plastic vial to prevent moisture loss. The sealed plastic vial was partially immersed in a water container at $23 \pm 1^\circ\text{C}$ to maintain an isothermal condition.

Measurements of the pore solution conductivity (σ_p) were performed using the siltstone sensor embedded inside prism paste specimens ($50 \times 50 \times 20 \text{ mm}$); Figure 5 (a). The sensor was positioned inside the plastic mold approximately at the center of the specimen before casting the paste mixture. Cement paste was placed around the sensor and the specimen was sealed immediately after casting to prevent drying during the initial 48 hours of hydration. Measurements were performed at the room temperature, $23 \pm 1^\circ\text{C}$.

Pore solution conductivity measurements obtained by the siltstone sensor were compared with the conductivity measured from extracted pore solutions. Pore solution was extracted from companion paste specimens (cylinders with 22 mm diameter and 50 mm height). Preparation and curing of these specimens were similar to the cylindrical specimen used for the measurement of paste conductivity (σ_t).

Pore solution was extracted using pressure filtration (prior to setting) or a high pressure steel die (after setting) according to the procedure of Barneyback (40). After extraction, pore solution was stored in small (2.5 cc) plastic containers and sealed immediately to prevent carbonation. Pore solution conductivity (σ_p) was measured



Rys. 5. Ustawianie sensorów wewnątrz form plastikowych przed wypełnieniem ich zaczynem cementowym: a) sensor (σ_p) do pomiaru przewodnictwa roztworu w porach, b) sensor (RH) do pomiaru względnej wilgotności

Fig. 5. Positioning of sensors inside plastic molds prior to the placement of cement paste; (a) Pore solution conductivity (σ_p) sensor, (b) Relative humidity (RH) sensor

walcowych form plastikowych, przed wypełnieniem ich zaczynem cementowym. Przewodnictwo zaczynu cementowego (σ_1) mierzono co 20 minut poczynając od 35 minuty po zadaniu cementu wodą aż do 48 godziny. Podczas pomiarów próbka pozostawała w szczelnej formie plastikowej aby zapobiec utracie wilgotności. Szczelna forma plastikowa była częściowo zanurzona w pojemniku z wodą w temperaturze $23 \pm 1^\circ\text{C}$ w celu zachowania warunków izotermicznych.

Pomiary przewodnictwa roztworu w porach (σ_p) prowadzono za pomocą sensora z piaskowca umieszczonego wewnątrz formy plastikowej w przybliżeniu w jej środku, przed wypełnieniem zaczynem. Zaczyn otaczał sensor wokół, a formę uszczelniono bezpośrednio po wypełnieniu zaczynem aby zapobiec wysychaniu podczas początkowych 48 godzin hydratacji. Pomiary prowadzono w temperaturze pokojowej, $23 \pm 1^\circ$.

Pomiary przewodnictwa roztworu w porach przeprowadzone za pomocą sensora z piaskowca porównano z przewodnictwem wyekstrahowanych roztworów z porów. Roztwory z porów wyekstrahowano z dodatkowych próbek zaczynów (walce o średnicy 22 mm i wysokości 50 mm). Przygotowanie i warunki dojrzewania tych próbek były takie same jak próbek, które służyły do pomiarów przewodnictwa zaczynu (σ_1). Roztwór w porach wyekstrahowano za pomocą prasy filtracyjnej (przed związaniem) lub wysokociśnieniowym stalowym tłoczniakiem (po związaniu), stosując metodę Barneybacka (40). Po wyekstrahowaniu roztwór ten przechowywano w małych ($2,5 \text{ cm}^3$) plastikowych pojemnikach zamkniętych szczelnie bardzo szybko w celu uniknięcia karbonatyzacji. Przewodnictwo roztworu z porów (σ_p) zmierzono za pomocą miernika przewodnictwa połączonego z elektrycznym analizatorem impedancji (27).

Sensor do pomiaru wilgotności względnej (RH) był umieszczony w przybliżeniu w środku formy plastikowej o wymiarach $50 \times 50 \times 20 \text{ mm}$ przed wypełnieniem jej zaczynem cementowym (rysunek 5 (b)). Bezpośrednio po zaformowaniu zaczynu cementowego wokół sensora próbkę uszczelniono w celu uniknięcia suszenia podczas początkowych 48 godzin hydratacji. Próbkę rozformowano po 48 godzinach i umieszczono w komorze klimatyzacyjnej (50% WW i w $23 \pm 0,5^\circ\text{C}$) w celu wysuszenia. Śledzono wewnętrzną wilgotność względną zaczynu cementowego w trakcie poddawania próbki nawilżaniu i suszeniu. Po początkowych 48 godzinach hydratacji próbkę poddawano suszeniu na wszystkich powierzchniach w komorze klimatyzacyjnej. Po 7 dniach próbkę zanurzono w 1,0 molarnym roztworze chlorku sodu na 7 dni. Po tym okresie nawilżania następowało suszenie przez 16 dni w komorze klimatyzacyjnej (50% WW i $23 \pm 0,5^\circ\text{C}$).

Pomiary przewodnictwa wszystkich trzech sensorów prowadzono za pomocą analizatora Solartron 1260: analizator impedancji/wzmocnienia – fazy. Zastosowano 100 mV prądu zmiennego do każdego sensora w zakresie częstotliwości od 10 MHz do 1 MHz (10 stopniowa skala częstości). Na podstawie pracy (14) przeprowadzono zerowanie w celu uwzględnienia zjawiska indukcji ołowianych przewodów.

using a conductivity meter connected to the electrical impedance analyzer (27).

The relative humidity (RH) sensor was positioned approximately at the center of a $50 \times 50 \times 20 \text{ mm}$ plastic mold before placing the cement paste (Figure 5 (b)). Immediately after casting the cement paste around the sensor, the specimen was sealed to prevent drying during the initial 48 hours of hydration. The specimen was demolded after 48 hours and transferred to an environmental chamber (50% RH and $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$) for drying. The internal relative humidity of the cement paste was monitored as the specimen experienced periods of wetting and drying. After the initial 48 hours of hydration, the specimen was exposed to drying from all surfaces inside the environmental chamber. After 7 days of drying, the specimen was submerged inside a 1.0 molar sodium chloride (NaCl) solution for 7 days. This wetting period was followed by 16 days of drying inside the environmental chamber (50% RH and $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$).

Conductivity measurements from all three sensors were performed using a Solartron 1260 Impedance Gain-Phase analyzer. A 100 mV AC stimulus was applied to each sensor over the frequency range 10 MHz to 1 Hz (10 steps/frequency decade). Nulling was performed according to (14) to account for the induction effect of the lead wires.

5.2. Results and analysis

5.2.1. Pore solution conductivity

The conductivity of pore solution was measured using two separate techniques; a) by pressure extraction of pore solution and b) by employing the embedded σ_0 sensor. A comparison between the results of the two methods is provided in Figure 6(a). The σ_0 sensor is initially saturated with a 0.40 molar KOH solution ($\sigma_0 = 7.82 \text{ S/m}$). After embedding inside cement paste, the sensor's internal solution starts to adjust towards equilibrium with the pore solution of the surrounding cement paste. The results provided in Figure 6 (a) show similar trends between the two measurements of solution conductivity; however, a delay in the measurements of the embedded sensor is noticeable. Time to equilibrium measurements detailed in (27) indicate a 12 hour period required for the embedded sensor to reach equilibrium. This is acceptable for long-term health monitoring of concrete, although a sensor with faster time to equilibrium may be desired for monitoring of concrete at early ages. A thinner sensor can potentially reduce the time to equilibrium. Further research is needed to improve the sensor's performance in this area.

Changes in the pore solution conductivity reflect changes in the internal chemistry of the paste. At early ages, due to hydration reactions, a rapid increase in the ion concentrations of the pore fluid occurs (the reader is referred to the study by Penko (41) for a detailed discussion on changes in the pore solution chemistry at early ages). The σ_0 sensor can quantify this change in the ion concentrations through measurement of the pore solution conductivity as shown in Figure 6(a). Similarly, the σ_0 sensor is capable of

5.2. Wyniki i analiza

5.2.1. Przewodnictwo roztworu w porach

Pomiary przewodnictwa roztworu w porach przeprowadzono za pomocą dwóch różnych technik: a) przez wyciskanie roztworu z porów pod ciśnieniem, i b) przez wykorzystanie zanurzonego sensora σ_o . Porównanie wyników uzyskanych dwoma metodami pokazano na rysunku 6 (a). Sensor σ_o początkowo nasycono 0,40 molarnym roztworem KOH ($\sigma_o = 7,82$ S/m). Po zanurzeniu wewnątrz zaczynu cementowego wewnętrzny roztwór w sensorze rozpoczął przemianę w kierunku równowagi z roztworem w porach, w otaczającym zaczynie cementowym. Wyniki pokazane na rysunku 6 (a) wykazują podobną tendencję pomiędzy dwoma pomiarami przewodnictwa roztworu; jednak opóźnienie występujące w pomiarach za pomocą zanurzonego sensora jest znaczne. Czas do osiągnięcia pomiarów równowagowych stwierdzony w (27) wynosił 12 godzin, w ciągu których zanurzony sensor osiągał równowagę. Jest to do zaakceptowania w celu długotrwałego śledzenia stanu betonu we wczesnym okresie. W przypadku cieńszego sensora przypuszczalnie byłby krótszy czas osiągnięcia równowagi. Niezbędne są dalsze badania w celu poprawy zachowania sensora w tym zakresie.

Zmiany przewodnictwa roztworu w porach odzwierciedlają wewnętrzne przemiany chemiczne w zaczynie. W początkowym okresie w wyniku reakcji hydratacji zachodzi szybki wzrost stężenia jonów w fazie ciekłej w porach (odsyłamy czytelnika do pracy Penki (41) obejmującej szczegółową dyskusję zmian składu chemicznego roztworu w porach w początkowym okresie). Sensor σ_o może ująć ilościowo tę zmianę stężenia jonów poprzez pomiar przewodnictwa roztworu w porach, jak to pokazano na rysunku 6 (a). Podobnie sensor σ_o może wyrazić ilościowo wewnętrzne zmiany chemiczne w późniejszych okresach związane z penetracją

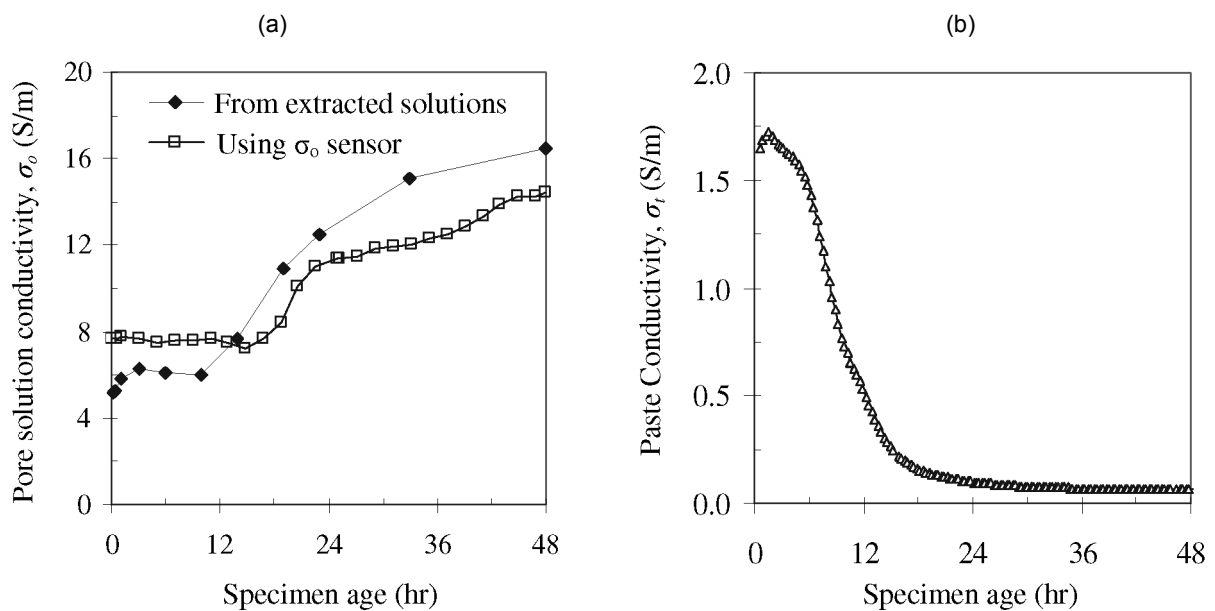
quantifying changes in the internal chemistry of the material at later ages due to ion penetration and/or carbonation. The measured pore solution conductivity may enable calculation of the concentration of specific ions of interest (e.g., chlorides).

5.2.2. Microstructural and transport properties

The results of the cement paste conductivity measurements (σ_t) are provided in Figure 6 (b). Initially (up to 1.5 hours), conductivity is increasing mainly due to the dissolution of ions into the pore solution that causes an increase in the solution conductivity (Figure 6 (a)). At 1.5 hours, the paste conductivity begins to decrease. The rate of reduction in the paste conductivity is proposed as a method for monitoring the setting and hardening process of the material (34).

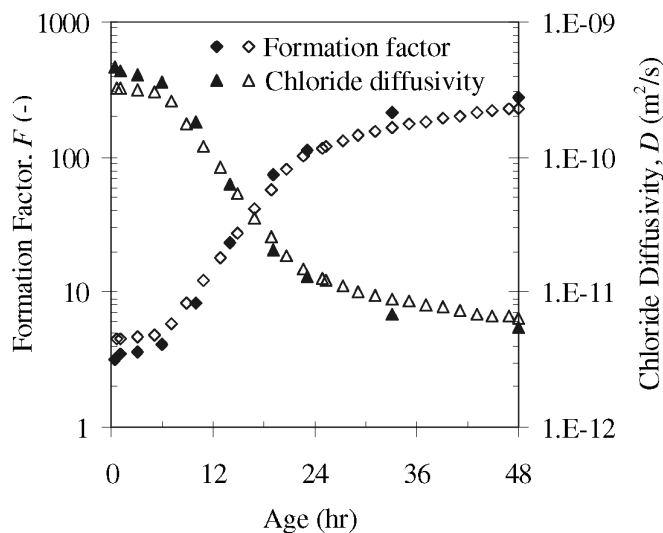
Using the measured values of paste conductivity (σ_t) and pore solution conductivity (σ_o), the microstructure's formation factor ($F = \sigma_o / \sigma_t = 1 / \Phi\beta$) is calculated. The chloride diffusion coefficient is estimated via the Nernst-Einstein equation (4) using a value of $D_o = 1.484 \times 10^{-9}$ m²/s for the diffusion coefficient of sodium chloride inside pore solution (42). Figure 7 shows the changes in the formation factor (F) and the chloride diffusivity (D) of the material as a function of age. The formation factor increases and chloride diffusivity decreases as the paste ages due to reduction in the porosity and connectivity of the pores as hydration progresses. Figure 7 also shows that the use of the embedded σ_o sensor can be an effective alternative to pore solution extractions for calculation of the microstructural and transport properties of the material.

Similarly, hydraulic permeability can be determined using the Katz – Thompson equation [5] when the threshold pore diameter (d_c) is known or estimated. Applications of the developed health monitoring system offers significant advantages in providing rapid,



Rys. 6. (a) porównanie przewodnictwa roztworu w porach mierzonego za pomocą sensora σ_o i w wyekstrahowanym roztworze, (b) przewodnictwo zaczynu cementowego mierzonego za pomocą sensora σ_t

Fig. 6. (a) Comparison of pore solution conductivity measured using σ_o sensor and from extracted solutions; (b) Conductivity of cement paste measured using σ_t sensor



Rys. 7. Oszacowanie właściwości mikrostrukturalnych i transportowych zaczynu cementowego; przewodnictwo roztworu w porach zmierzono albo w roztworze wyekstrahowanym (punkty czarne) albo za pomocą sensora σ_o (punkty puste)

Fig. 7. Estimation of microstructural and transport properties of the cement paste; Pore solution conductivity was obtained by either solution extraction (solid points) or the σ_o sensor (hollow points)

jonów i/lub karbonatyzacją. Zmierzone przewodnictwo roztworu w porach pozwala na obliczenie stężenia interesujących nas jonów (na przykład chlorków).

5.2.2. Właściwości mikrostrukturalne i transportowe

Wyniki pomiarów przewodnictwa zaczynu cementowego (σ_i) pokazano na rysunku 6 (b). Początkowo (do 1,5 godziny) przewodnictwo wzrasta głównie dzięki rozpuszczaniu się jonów w roztworze w porach co powoduje wzrost przewodnictwa roztworu (rysunek 6 (a)). Po 1,5 godziny przewodnictwo zaczynu zaczyna maleć. Zaproponowano szybkość zmniejszenia przewodnictwa zaczynu jako metodę w celu śledzenia procesów wiązania i twardnienia materiału (34).

Stosując zmierzone wartości przewodnictwa zaczynu (σ_i) i roztworu w porach (σ_o) można obliczyć czynnik ($F = \sigma_o/\sigma_i = 1/\phi\beta$) formowania się mikrostruktury. Współczynnik dyfuzji chlorków szacuje się na podstawie równania Nernsta–Einsteina (4) stosując wartość $D_o = 1,484 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ jako współczynnik dyfuzji chlorku sodowego w roztworze w porach (42). Na rysunku 7 pokazano zmiany czynnika formowania się mikrostruktury (F) i dyfuzyjności chlorków (D) w materiale w funkcji wieku. Czynnik formowania się wzrasta i dyfuzyjność chlorków maleje w miarę jak zaczyn dojrzewa w wyniku zmniejszenia porowatości i ciągłości porów z postępowaniem hydratacji. Na rysunku 7 widać także, że zastosowanie zanurzonego sensora σ_o może być skuteczną alternatywą dla ekstrakcji roztworu w porach w celu wyliczenia właściwości mikrostrukturalnych i transportowych materiału.

Podobnie można oznaczyć przepuszczalność hydrauliczną wykorzystując równanie Katza-Thompsona [5] gdy jest znana lub oszacowana graniczna średnica (d_c) porów. Wykorzystanie opracowanej metody śledzenia stanu betonu stwarza znaczną przewagę w uzyskiwaniu szybkiej, niezawodnej i nieniszczącej metody okre-

reliable, and nondestructive estimations of the transport properties of cement paste and concrete. These transport properties can further be used as input parameters of life-cycle simulation models (2-4) to evaluate the long-term durability performance of the materials.

5.2.3. Monitoring of moisture movement

The internal relative humidity of the cement paste was monitored using the RH sensor during the early hydration phase and further during periods of drying and moisture absorption. The results are illustrated in Figure 8. The internal humidity during the sealed curing period (48 hours) was measured constant in the range of 97.5% to 98%. Due to the low w/c used, it was expected to observe a slight decrease in the relative humidity caused by the self-desiccation of cement paste (43). However, the RH sensor did not record such a decrease in the relative humidity. This problem is potentially caused by the formation of a moisture gradient inside the paste in the vicinity of the sensor (27). Further experiments are needed to examine if reducing the size of the sensor's core can improve its performance at very high humidities.

The relative humidity sensor was further used to monitor changes in the internal humidity of the paste specimen exposed to drying and moisture absorption. During the first drying period, the internal humidity at the center of the paste specimen decreased to 69.9% after 7 days of drying. Subsequent wetting caused a rapid increase in the internal humidity which was recorded as 84.4% RH after 7 days. It should be noted that the low w/c used in this paste leads to creation of a paste microstructure with low permeability. As such, it is anticipated that after 7 days of drying or wetting, the center of the specimen has not reached equilibrium with the specimen's ambient environment. After 7 days of wetting, the specimen was exposed to drying for a second time. During this period, internal humidity was observed to decrease and a value of 61.6% RH was recorded after 16 days of drying. Simultaneous mass measurements indicated that the specimen had not reached equilibrium after 16 days. This monitoring regime can be used in field structures to measure the internal humidity of concrete.

5.3. Future developments

Although work is in progress to improve the performance and accuracy of the conductivity-based sensors, experimental results presented in this paper clearly describe the benefits of employing these sensors. The sensing system provides a rapid, reliable, and non-destructive measurement of the transport properties of the material that can be used for prediction of the durability performance. The σ_o sensor is the first non-destructive instrument for insitu measurement of concrete's pore solution conductivity. This sensor provides a means for tracking the changes in the ion composition of the pore solution and can be used for monitoring the penetration of aggressive ions inside concrete. Comparing to the traditional methods of monitoring ions transport which are destructive and time and labor intensive, applications of the σ_o sensor can be significantly advantageous.

ślenia właściwości transportowych zaczynu cementowego i betonu. Te właściwości transportowe można następnie wykorzystywać jako parametr wejściowy w modelach symulujących cykl życia (2-4) w celu oceny trwałości materiałów w długim okresie.

5.2.3. Śledzenie zmian wilgotności

Wewnętrzną wilgotność względną zaczynu cementowego śledzono za pomocą sensora RH we wczesnym okresie hydratacji i później podczas okresów suszenia i adsorpcji wilgoci. Wyniki pokazano na rysunku 8. Wewnętrzna wilgotność podczas dojrzewania w szczelnych pojemnikach (48 godzin) była stała w zakresie od 97,5% do 98%. W związku z zastosowanym małym w/c oczekiwano małego spadku wilgotności względnej spowodowanej samowysuszeniem zaczynu cementowego (43). Jednak sensor RH nie odnotował tego spadku względnej wilgotności. Przyczyną tego może być powstawanie gradientu wilgotności wewnątrz zaczynu w sąsiedztwie sensora (27). Niezbędne są dalsze doświadczenia w celu wyjaśnienia czy zmniejszenie wymiarów jądra sensora może poprawić jego właściwości w przypadku dużych wilgotności.

Sensor mierzący względną wilgotność stosowano dalej w celu śledzenia zmian wewnętrznej wilgotności próbki zaczynu poddanego suszeniu i adsorpcji wilgoci. Podczas pierwszego okresu suszenia, wewnętrzna wilgotność w środku próbki zaczynu spadła do 69,9% po 7 dniach suszenia. Trzeba zaznaczyć, że zastosowanie małego w/c w tym zaczynie prowadziło do utworzenia mikrostruktury o małej przepuszczalności. W związku z tym, jak założono po 7 dniach suszenia i nawilżania, środek próbki nie osiągnął równowagi z otaczającą atmosferą. Po 7 dniach nawilżania próbka została poddana suszeniu po raz drugi. Podczas tego okresu wewnętrzna wilgotność zmalała i osiągnęła 61,6% WW po 16 dniach suszenia. Równoczesne pomiary masy wykazały, że próbka nie osiągnęła równowagi po 16 dniach. Te warunki pomiarowe można stosować do pomiarów połowych obejmujących wewnętrzną wilgotność betonu.

5.3. Dalsze rozwinięcie metody

Aczkolwiek prace są prowadzone w celu udoskonalenia działania i dokładności sensorów opartych na pomiarach przewodnictwa, wyniki doświadczeń przedstawione w tym artykule pokazują wyraźnie korzyści z zastosowania tych sensorów. Ten system daje szybką, dokładną i nieniszczącą ocenę właściwości transportowych materiału i może być wykorzystany do przewidywania trwałości. Sensor σ_o jest pierwszym nieniszczącym czujnikiem do pomiarów in situ przewodnictwa roztworu w porach betonu. Ten sensor stwarza możliwości śledzenia zmian składu jonowego roztworu w porach i może być stosowany do śledzenia wnikania agresywnych jonów do wnętrza betonu. W porównaniu do tradycyjnych metod śledzenia transportu jonów korozyjnych, które są niszczące i pracochłonne, zastosowanie sensora σ_o stanowi znaczny postęp.

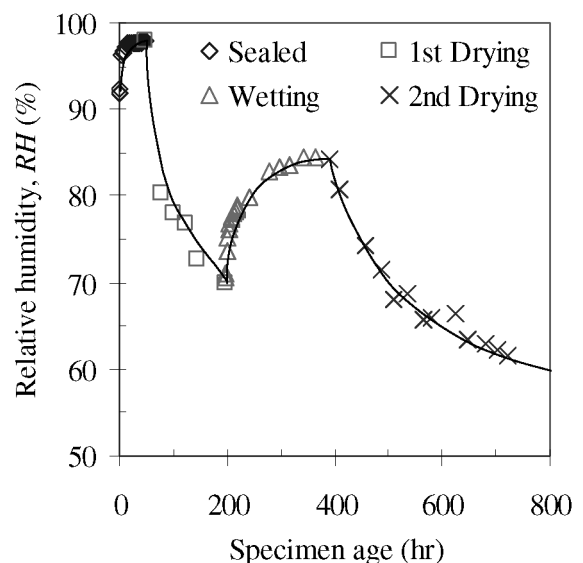
Dalsze prace będą skoncentrowane na ocenie zachowania układu do śledzenia w warunkach połowych stanu betonu w nawierzchniach drogowych i mostach. Są konieczne zmiany w celu poprawy

Future work will be concentrated on evaluating the performance of the health monitoring system in the field environments of concrete pavements and bridges. Modifications are needed to improve the accuracy and time to equilibrium of the pore solution conductivity sensor. In addition, improvements are needed to enhance the performance of the RH sensor at very high relative humidities (>96%).

6. Conclusions

Based on the discussions and observations presented in this paper, the following conclusions can be drawn:

1. Electrical conductivity of concrete is influenced by the microstructural properties of concrete, its pore solution composition, internal moisture, and temperature. Since these parameters can change simultaneously in a field concrete, only an independent measurement of all four parameters can provide reliable estimations of material properties and performance.
2. Transport properties of concrete including the hydraulic permeability and ionic diffusivity can be estimated using simultaneous measurements of concrete conductivity (σ) and pore solution conductivity (σ_o). This method provides significant advantages over the traditional measurements of transport properties including the simplicity, time efficiency, and nondestructive nature of the measurements, as well as the possibility of testing concrete at early ages.
3. A porous material (e.g., siltstone) with specific microstructural properties can be used as an embedded sensor for the measurement of pore solution conductivity (σ_o) and internal relative humidity (RH) of concrete. Provided that the porous material satisfies a set of requirements, principal correlations can be established between the sensor's conductivity and its pore



Rys. 8. Wewnętrzna wilgotność względna próbki zaczynu oznaczona w oparciu o pomiary sensorem RH

Fig. 8 Internal relative humidity of the paste specimen monitored using the RH sensor

dokładności i czasu koniecznego do osiągnięcia równowagi sensora mierzącego przewodnictwo z roztworem w porach. Dodatkowo są konieczne udoskonalenia w celu poprawy pracy sensora RH przy bardzo dużych wilgotnościach (> 96%).

6. Wnioski

W oparciu o dyskusję i obserwacje przedstawione w tym artykule można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Na przewodnictwo elektryczne betonu wpływają właściwości mikrostrukturalne, skład jego roztworu w porach, wewnętrzna wilgotność i temperatura. Ponieważ te parametry mogą zmieniać się równocześnie w betonie w warunkach polowych tylko niezależny pomiar tych wszystkich parametrów może dać dokładne oszacowanie właściwości i zachowania materiału.
2. Właściwości transportowe betonu obejmujące przepuszczalność hydrauliczną i dyfuzyjność jonową mogą być oszacowane za pomocą równoczesnych pomiarów przewodnictwa betonu (σ_t) i roztworu w porach (σ_o). Ta metoda ma znaczną przewagę nad tradycyjnymi pomiarami właściwości transportowych, jest prostsza, mniej czasochłonna, nieniszcząca i stwarza możliwość badania betonu we wczesnym okresie.
3. Porowaty materiał (na przykład piaskowiec) o szczególnych właściwościach mikrostrukturalnych może być stosowany jako zanurzony sensor do pomiaru przewodnictwa roztworu w porach (σ_o) i wewnętrznej wilgotności względnej (RH) betonu. Zakładając, że porowaty materiał spełnia szereg wymagań, można ustalić główne korelacje pomiędzy przewodnictwem sensora i przewodnictwem roztworu w porach lub wilgotności otoczenia. Takie, ważne znaczenia ma zaprojektowanie granicy pomiędzy sensorem i otaczającym go betonem w celu zapewnienia pełnego kontaktu (w przypadku sensora σ_o lub tylko transportu pary (w przypadku sensora RH).

solution conductivity or ambient humidity. Also, it is important to design the boundary between the sensor and its surrounding concrete to allow either a full contact (for the σ_o sensor) or a vapor-transport-only contact (for the RH sensor).

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge support received from the National Science Foundation (NSF) under Grant No. 0134272: a CAREER AWARD granted to the second author. Any opinions, findings and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the authors and do not necessarily reflect the views of the National Science Foundation. This work was conducted in the Materials Characterization and Simulation Laboratory at Purdue University; as such the authors acknowledge the support that has made this laboratory and its operation possible.

Literatura / References

1. F.-K. Chang, W. H. Prosser, and M. J. Schulz, Letter of Introduction from the Editors, *Structural Health Monitoring*, 1(1): 3-6 (2002).
2. T. E. Hoerner, and M. I. Darter, Improved Prediction Models for PCC Pavement Performance-related Specifications; Volume II: PaveSpec 3.0 User's Guide, Publication FHWARD- 00-131, Federal Highway Administration, Washington, DC 2000.
3. J. Marchand, Modeling the Behavior of Unsaturated Cement Systems Exposed to Aggressive Chemical Environments, *Materials and Structures*, 34(238): 195-200 (2001).
4. M. D. A. Thomas, and E. C. Bentz, LIFE-365 Service Life Prediction Model; Users Manual, Silica Fume Association, Lovettsville, Virginia 2001.
5. F.-K. Chang, *Structural Health Monitoring: A Summary Report*, Proceedings of the Second International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, California, pp. xix-xxix (1999).
6. T. R. Ferragut, R. Rasmussen, M. I. Darter, D. Harrington, and M. Anderson-Wilk, Long-term Plan for Concrete Pavement Research and Technology – The Concrete Pavement Roadmap; Volume II: Tracks, Publication HRT-05-053, Federal Highway Administration, Washington, DC 2005.
7. D. E. Adams, (2005). Prognosis Applications and Examples, in: *Damage Prognosis for Aerospace, Civil, and Mechanical Systems*, Wiley, West Sussex, England, pp. 365-384
8. W. J. Weiss, Linking Insitu Monitoring with Damage Modeling for Life-Cycle Performance Simulations of the Concrete Infrastructure, NSF Career Development Plan, National Science Foundation, Arlington, Virginia 2001.
9. D. Balageas, C.-P. Fritzen, and A. Güemes, *Structural Health Monitoring*, ISTE Ltd, London 2006.
10. F. Ansari, Fiber Optic Health Monitoring of Civil Structures, Proceedings of the First International Conference on Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, Vol. 1, Tokyo, Japan 2003.
11. N. J. Carino, The Maturity Method, *Handbook on Non-destructive Testing of Concrete*, 2nd Ed., CRC Press LLC, Boca Raton, Florida 2004.
12. J. S. Popovics, Ultrasonic Testing of Concrete Structures, *Materials Evaluation*, 63(1): 50-55 (2005).
13. E. J. Garboczi, Permeability, Diffusivity, and Microstructural Parameters: A Critical Review, *Cement and Concrete Research*, 20(4): 591-601 (1990).

14. B. J. Christensen, R.T. Coverdale, R. A. Olson, S. J. Ford, E. J. Garboczi, H. M. Jennings, and T. O. Mason, Impedance Spectroscopy of Hydrating Cement-based Materials: Measurement, Interpretation, and Application, *Journal of the American Ceramic Society*, 77(11): 2789-2802 (1994).
15. A. Schießl, W. J. Weiss, J. D. Shane, N. S. Berke, T. O. Mason, S. P. and Shah, Assessing the Moisture Profile of Drying Concrete Using Impedance Spectroscopy, *Concrete Science and Engineering*, 2(2): 106-116 (2000).
16. Z. C. Grasley, and D. A. Lange, Modeling Drying Shrinkage Stress Gradients in Concrete, *Cement, Concrete and Aggregates*, 26(2): 115-122 (2004).
17. F. F. Radjy, and D. W. Vunic, Heat Signature Testing of Concrete, Proceedings of the Structural Materials Technology – An NDT Conference, Atlantic City, New Jersey 1994.
18. B. Kim, and W. J. Weiss, Using Acoustic Emission to Quantify Damage in Restrained Fiber Reinforced Cement Mortars, *Cement and Concrete Research*, 33(2): 207-214 (2003).
19. A. Bentur, S. Diamond, and N. S. Berke, *Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice*, E & FN Spon, Chapman & Hall, London 1997.
20. W. J. McCarter, H. Ezirim, and M. Emerson, Properties of Concrete in the Cover Zone: Water Penetration, Sorptivity, and Ionic Ingress, *Magazine of Concrete Research*, 48(176): 149-156 (1996).
21. F. Rajabipour, W. J. Weiss, J. D. Shane, T. O. Mason, and S. P. Shah, Procedure to Interpret Electrical Conductivity Measurements in Cover Concrete during Rewetting, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5): 377-389 (2005).
22. F. Rajabipour, W. J. Weiss, and D. Abraham, Insitu Electrical Conductivity Measurements to Assess Moisture and Ionic Transport in Concrete, *Advances in Concrete through Science and Engineering; Proceedings of the International RILEM Symposium*, Evanston, Illinois 2004.
23. P. Gu, P. Xie, and J. J. Beaudoin, Impedance Characterization of Microcracking Behavior in Fiber-reinforced Cement Composites, *Cement and Concrete Composites*, 15(3): 173- 180 (1993).
24. D. D. L. Chung, and S. Wen, Effect of Strain and Damage on Strain-Sensing Ability of Carbon Fiber Cement, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(3): 586-594 (2006).
25. F. Rajabipour, and W. J. Weiss, Electrical Conductivity of Drying Cement Paste, *Materials and Structures*, in press (available online) (2006).
26. H. W. Whittington, W. J. McCarter, and M. C. Forde, The Conduction of Electricity through Concrete, *Magazine of Concrete Research*, 33(114): 48-60 (1981).
27. F. Rajabipour, *Insitu Electrical Sensing and Material Health Monitoring in Concrete Structures*, Ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana 2006.
28. J. R. Macdonald, and W. B. Johnson, *Fundamentals of Impedance Spectroscopy*, *Impedance Spectroscopy; Emphasizing Solid Materials and Systems*, Wiley, New York, pp. 1-26 (1987).
29. W. J. McCarter, S. Garvin, and N. Bouzid, Impedance Measurements on Cement Paste, *Journal of Materials Science Letters*, 7(10): 1056-1057 (1988).
30. P. Gu, P. Xie, J.J. Beaudoin, and R. Brousseau, A.C. Impedance Spectroscopy (I): A New Equivalent Circuit Model for Hydrated Portland Cement Paste, *Cement and Concrete Research*, 22(5): 833-840 (1992).
31. F. A. L. Dullien, *Porous Media; Fluid Transport and Pore Structure*, Academic Press, New York 1979.
32. E. Hammond, and T. D. Robson, Comparison of Electrical Properties of Various Cements and Concretes, *The Engineer*, 199(Jan. 21st): 78-80 (1955).
33. W. J. McCarter, G. Starrs, and T. M. Chrisp, Electrical Conductivity, Diffusion, and Permeability of Portland Cement-based Mortars, *Cement and Concrete Research*, 30(9): 1395-1400 (2000).
34. F. Rajabipour, G. Sant, and W. J. Weiss, Development of Electrical Conductivity- Based Sensors for Health Monitoring of Concrete Materials, *TRB Annual Conference, CDROM Paper# 07-1765*, Transportation Research Board, Washington, DC 2007.
35. T. Schmit, F. Rajabipour, and W. J. Weiss, Investigating the Use of a Diffuse Measurement Interpretation for Analyzing Insitu Electrical Measurements, *Proceedings of the International ConMat Conference*, Vancouver, Canada 2005.
36. A. Atkinson, and A. K. Nickerson, The Diffusion of Ions through Water-Saturated Cement, *Journal of Materials Science*, 19(9): 3068-3078 (1984).
37. A. J. Katz, and A. H. Thompson, Quantitative Prediction of Permeability in Porous Rock, *Physical Review B*, 34(11): 8179-8181 (1986).
38. B. J. Christensen, T. O. Mason, and H. M. Jennings, Comparison of Measured and Calculated Permeabilities for Hardened Cement Pastes, *Cement and Concrete Research*, 26(9): 1325-1334 (1996).
39. M. R. Nokken, and R. D. Hooton, Using Pore Parameters to Estimate Permeability or Conductivity of Concrete, *Materials and Structures*, in press (available online) (2007).
40. R. S. Barneyback, *Alkali-silica Reactions in Portland Cement Concrete*, Ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana 1983.
41. M. Penko, *Some Early Hydration Processes in Cement Pastes as Monitored by Liquid Phase Composition Measurements*, Ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana 1983.
42. R. C. Weast, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 54th Ed., CRC Press, Cleveland, Ohio, pp. F-60 (1974).
43. G. Sant, F. Rajabipour, P. Lura, and W. J. Weiss, Examining Time-zero and Early-age Expansion in Pastes Containing Shrinkage Reducing Admixtures, *Advances in Concrete through Science and Engineering, Proceedings of the International RILEM Symposium*, Quebec, Canada 2006.