

dr Egemen Teomete

Civil Engineering Department, Dokuz Eylul University, Kaynaklar, Buca, Izmir, Turkey

Zależność oporności elektrycznej od długości rysy w zaprawie cementowej

Relations of crack length and electrical resistance for smart cement based composites

1. Wstęp

Właściwości konstrukcji betonowych ulegają pogorszeniu w wyniku trzęsienia ziemi, zniszczeniu materiału lub oddziaływań środowiska. W USA stwierdzono, że 30% mostów ma niepewną konstrukcję, a infrastruktura z betonu ulega zniszczeniu przed wyznaczonym projektowo czasem eksploatacji (1). Z tego względu śledzenie stanu konstrukcji jest bardzo ważne i pozwala na określenie zagrożenia katastrofą. Jest także ważne w celu utrzymania w dobrym stanie infrastruktury. Typowe czujniki stosowane do oceny stanu konstrukcji mają swoje ograniczenia w związku z czym trzeba znacznie zwiększyć ich ilość, a to pociąga za sobą znaczny wzrost kosztów. Ponadto klasyczne sensory mają stosunkowo małą trwałość co stanowi problem w przypadku długich okresów pomiarowych (2).

Kompozyty z matrycą cementową zbrojoną włóknami węglowymi mają mniejszy opór elektryczny, natomiast pod obciążeniem oporność elektryczna ulega zmianom (3-5). Ta zmiana oporności elektrycznej kompozytów cementowych zbrojonych włóknami węglowymi jest skorelowana z odkształceniem (6).

W celu śledzenia właściwości elektrycznych materiałów cementowych stosowano metodę wykorzystującą dwie lub cztery elektrody (7, 8). W przypadku dwóch elektrod zasilanie prądem i napięcie jest mierzone na tych samych elektrodach podczas

1. Introduction

The performances of the structures are degraded by earthquakes, material degradations and other environmental effects. In the USA, 30% of bridges were determined to be structurally insecure and concrete infrastructures have material deterioration before the design life finishes (1). Structural health monitoring is crucial to track the conditions of structures and to determine potential catastrophes. It is also important for asset management of infrastructures. The classical sensors used in structural health monitoring have their limitations. In order to track the condition of a structure, the number of sensors needed to be used has to be larger which increases costs significantly. The classical sensors have low durability which is an obstacle for long term measurements (2).

Carbon fiber reinforced cement matrix composites have lower electrical resistance while under load, electrical resistance changes (3-5). The electrical resistance change of carbon fiber reinforced cement based composites was found to be correlated with strain (6).

In order to monitor the electrical properties of cement based materials, the two and four electrode methods were applied (7, 8). In the two electrode method, the current is supplied and voltage is measured from the same two electrodes while in the four electrode method, the current is supplied from the outer two electrodes while

gdy w metodzie czterech elektrod zasilanie prądem następuje poprzez dwie elektrody zewnętrzne, a napięcie jest mierzone na dwóch wewnętrznych elektrodach. Odległość pomiędzy elektrodami i przekrój poprzeczny próbki wpływają na wyniki w metodzie dwóch elektrod, natomiast nie mają wpływu w przypadku metody czterech elektrod (7, 8). Układ elektrod na obwodzie i osadzonych w materiale stosowano w przypadku kompozytów cementowych. Przewodzącą taśmę lub farbę stosowano na obwodzie próbki w przypadku elektrod obwodowych (1, 9, 10). Płytkę lub siatkę metalową wprowadzano do betonu w przypadku osadzonych elektrod (11, 12).

Uszkodzenie uzbrojenia z włókien węglowych zmieniło oporność elektryczną kompozytów betonowych (13). Włókna węglowe są drogie i z tego powodu potrzebne są badania aby uzyskać odpowiednie kompozyty cementowe z dodatkiem włókien stalowych lub w ogóle pozbawione włókien.

W pracy zbadano wpływ długości nacięcia karbu na oporność elektryczną dwóch kompozytów cementowych. Jeden z kompozytów nie zawierał włókien, a drugi był z ich dodatkiem. Przygotowano po trzy próbki z obu zapraw i zastosowano trzy-punktowe badania zginania. Równoległe z tymi badaniami mierzono długość nacięcia oraz różnice potencjału elektrycznego. Wyniki wykazały, że zmiany oporności elektrycznej są skorelowane z długością pęknięcia w przypadku obu zapraw.

2. Materiały i metody

W badaniach zastosowano dwie różne mieszanki; w obu użyto cement CEM I 42,5R (14). Stosunek piasek/cement wynosił 1, a udział pyłu krzemionkowego wynosił 10% masy cementu i stosunek w/c wynosił 0,4. Dodatek plastyfikatora Sika ViscoCrete High Tech 30 wynosił 1% masy cementu. Stosowano włókna stalowe o długości 6 mm i średnicy 290 μm . W celu zabezpieczenia przed korozją włókna stalowe pokryto mosiądzem. Jedna mieszanka nie zawierała włókien, a do drugiej dodano 1% objętościowy włókien stalowych. Z każdej mieszanki zaformowano po 3 beleczki o wymiarach 4 x 4 x 16 cm. Próbkę przechowywano w wodzie przez 28 dni. Po tym dwie próbki dojrzewały przez 7 dni w laboratorium w celu osiągnięcia przez nie stałej wilgotności, a następnie rozpoczęto badania.

Przeprowadzono próby trzy-punktowe zginania przy wzroście obciążenia wynoszącego 0,2 mm/min. Równocześnie do tych prób prowadzono pomiary potencjału elektrycznego stosując elektrody zanurzone w materiale próbki. Jako te elektrody używano siatkę z czystej miedzi o rozwarości oczka 5 mm i średnicy drutu 600 μm . Zastosowano specjalne formy na próbki w kształcie beleczek, które wyposażono w cztery szczeliny o szerokości 2 mm i długości 36 mm w każdej z bocznych ścian w celu przeprowadzenia przez formę siatkowej elektrody, tak jak to pokazano na rysunku 1a. W celu kontroli powstawania i propagacji rysy w trakcie próby zginania zastosowano małe płytki o wysokości 10 mm, które zamocowano na dnie formy wykorzystując krystaliczne wiązanie; formę

the voltage is measured from the inner two electrodes. The distance between electrodes and sample cross section affect the results in the two electrode method while they do not affect the results in the four electrode method (7, 8).

Perimetral and embedded electrode configurations were used for cement based composites. A conductive tape or paint was applied to the perimeter of the sample as a perimetral electrode configuration (1, 9, 10). A metal plate or wire mesh is inserted into the cement composite in the embedded electrode configuration (11, 12).

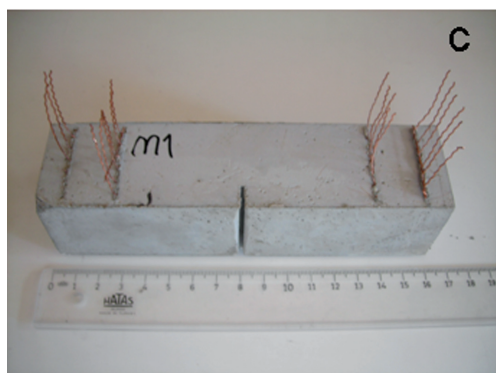
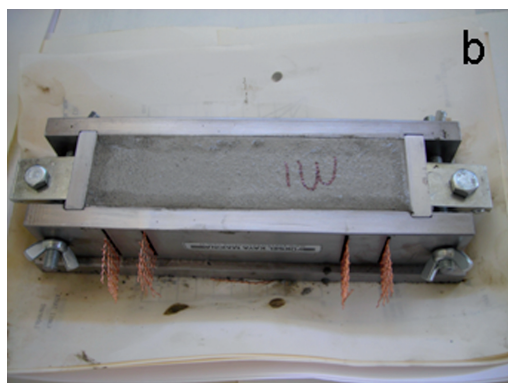
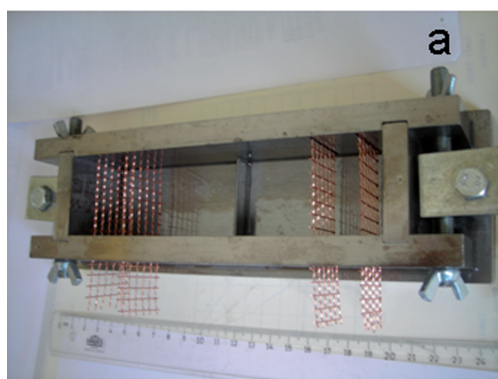
The damage in the carbon fiber reinforced cement based composite changes the electrical resistance (13). Carbon fiber is expensive, thus, the research is needed to develop smart cement based composites with steel fibers or without any fiber.

In this study, the correlations between the crack length and change of electrical resistance for two cement based composite mixes were determined. One of the mix does not have any fiber while the other has steel fibers. Three samples from each mix were cast and cured. The three point bending test was applied. Crack length and electrical potential difference measurements were conducted simultaneously to the tests. The results showed that the crack length is correlated with the change of electrical resistance for both mixes.

2. Experimental method

In this study two different mixes were designed and tested. In both mixes, the cement CEM I 42.5R (14) was used. The ratio of sand/cement is 1; silica fume /cement is 10%; water/cement is 0.4; superplasticizer Sika ViscoCrete High Tech 30/cement is 1%. The length of the steel fiber is 6 mm and diameter is 290 μm . For corrosion protection the steel fibers were coated with brass. The first mix does not have any steel fiber while the second mix has 1 % volume of steel fiber. For each mix, 3 of 4 cm x 4 cm x 16 cm prismatic samples were cast. The samples were cured in water for 28 days. After 28 days, the samples were left in laboratory environment for 7 days to attain a the steady state the moisture content and then were tested.

The three point bending tests were conducted at a load rate of 0.2 mm/min. Simultaneously to the bending test, electrical measurements were performed using the electrodes in the sample. As an electrode, pure copper wire mesh which has a mesh opening of 5 mm and wire diameter of 600 μm was used. Special molds were designed and manufactured for this study. The prismatic molds have four 2 mm wide, 36 mm long slots on either of the side walls to allow for passing the copper wire mesh electrodes through the mold, as seen in Fig. 1a. In order to control the formation and propagation of a crack during the bending test, a small plate 10 mm high was stuck to the bottom of the mold using a crystal bond as it can be seen in Fig. 1a. The mix was cast in the molds after the copper wire mesh electrodes were inserted in the molds as in Fig. 1b. The sample was taken out of the mold 24 hours after casting (Fig. 1c).



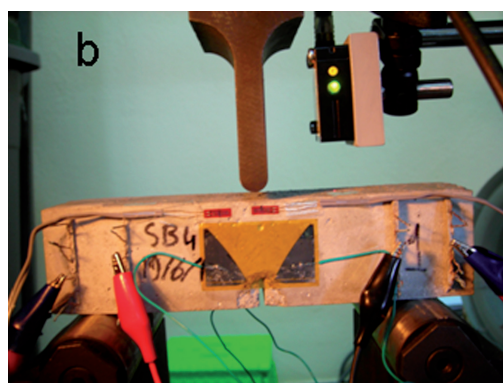
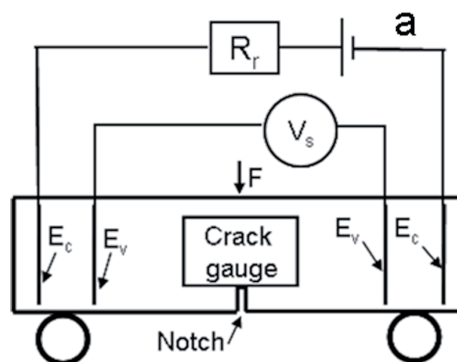
Rys. 1. a) Forma z elektrodą z siatki miedzianej i z płytką w środku do wykonania karbu b) po zaformowaniu mieszanki c) beleczka o wymiarach 4 x 4 x 16 cm z nacięciem w środku

Fig. 1. a) The mold with copper mesh electrode and notch plate in the middle of the mold b) After the mix was cast c) The 4 cm x 4 cm x 16 cm prismatic sample with notch at the middle

pokazano na rysunku 1a. Mieszankę formowano po wprowadzeniu do form siatkowych elektrod, tak jak to pokazano na rysunku 1b. Próbkę wyjmowano z form 24 h po zaformowaniu (rysunek 1c).

Podczas badań zasilano próbkę prądem stałym wykorzystując dwie zewnętrzne elektrody $[E_c]$, natomiast różnicę potencjałów pomiędzy dwoma elektrodami napięciowymi $[E_v]$ mierzono jako napięcie $[V_s]$. W serii pomiarowej stosowano opór odniesienia $R_r = 1000 \text{ Ohm}$. Zmierzono różnicę potencjałów $[V_r]$ po obu stronach opornika R_r (rysunek 2a).

W celu wyznaczenia zależności pomiędzy długością rysy a opornością elektryczną próbki przyklepiono czujnik pomiarowy na końcu nacięcia (karbu). Gdy zachodzi propagacja rysy na wierzchołku karbu, siatka czujnika pomiarowego pęka i oporność elektryczna



Rys. 2. a) Schemat obwodu w próbce do badań; b) Próbką w badaniu

Fig. 2. a) The circuit diagram of the sample at test; b) The sample at test

During the tests, the DC (direct current) current was supplied to the sample using the outer two current electrodes (E_c) while the potential difference between two voltage electrodes (E_v) was measured as V_s . In the series with the sample, reference resistance $R_r = 1000 \text{ Ohm}$ was used. The potential difference (V_r) across reference resistance R_r was measured (Fig. 2a).

In order to determine the relation between the crack length and electrical resistance of the sample, a TML (the crack gauge manufacturer) crack gauge was stuck to the end of the notch. As the crack propagates from the tip of the notch, the grids on the crack gauge break and electrical resistance of the crack gauge changes which makes it possible to measure the crack advancement. Two strain gauges were used to monitor the strain of the sample while a laser displacement sensor was used to monitor the displacement of the sample during the test as seen in Fig. 2b. The load, the displacement of the top cylinder, the crack length, strain gauges data, voltages V_s and V_r were measured at a rate of 10 Hz (10 times a second) and recorded. A National Instruments data logger, a DC (direct current) power supply and a PC (personal computer) were used during the measurements.

For any time during the test, the current passing from the circuit (I_c) was determined by Ohm's law as in equation 1. The sample's electrical resistance (R_s) was evaluated using the current (I_c) and the potential difference between voltage electrodes of the sample (V_s) as in equation 2. During the test, the % change in the resistance of the sample (%R) was determined by equation 3. The R_{s0} is the electrical resistance of the sample without any load applied.

tej siatki ulega zmianie co umożliwia pomiar postępu tej propagacji. Zastosowano dwa czujniki tensometryczne w celu śledzenia zmian rysy, podczas gdy laserowy czujnik przemieszczenia użyto do śledzenia przemieszczenia próbki podczas badania, co pokazano na rysunku 2b. Obciążenie, przemieszczanie górnego walca, długość rysy, wskazania czujników odkształcenia napięcia V_s i V_r były mierzone z szybkością 10 Hz (10 razy na sekundę) i zapisywane. W czasie pomiarów stosowano rejestrator danych produkcji National Instruments, zasilanie prądem płynącym w jednym kierunku (direct current) oraz komputerowy licznik rozkazów.

Cały czas w czasie pomiarów natężenie prądu w obwodzie (I_c) wyznaczano z prawa Ohma (równanie 1). Oporność elektryczną próbki (R_s) szacowano na podstawie natężenia prądu (I_c) i różnicy potencjałów z wartości napięcia na elektrodach (V_s), wykorzystując zależność opartą także na prawie Ohma (równanie 2). W trakcie pomiarów procent zmian oporności próbki (%R) obliczono z równania 3. R_{s0} jest opornością elektryczną próbki nie poddanej obciążeniu.

$$I_c = \frac{V_r}{R_r} \quad [1]$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_c} \quad [2]$$

$$\%R = \left(\frac{R_s}{R_{s0}} - 1 \right) \times 100 \quad [3]$$

3. Wyniki doświadczeń i ich omówienie

Zależność zmiany oporności elektrycznej próbki zaprawy cementowej, bez włókien, od długości rysy pokazano na rysunku 3. W miarę jak rozpoczyna się propagacja karbu wzrastają zmiany oporności elektrycznej próbki. Współczynnik liniowej korelacji o najlepszym dopasowaniu do wyników przedstawiających te zmiany $R^2 = 0,96$ (rysunek 3). Ten duży współczynnik korelacji, w przypadku zaprawy bez włókien, utrzymuje się nawet dla dużej długości rysy w porównaniu z wysokością próbki (rysa 20 mm, wysokość próbki 40 mm, co pokazano na rysunku 3).

Druga próbka zaprawy bez włókien ma także dobrą korelację liniową ($R^2 = 0,92$), którą pokazano na rysunku 4.

Próbka zaprawy z dodatkiem 1% objętościowych włókien o długości 6 mm wykazuje silną korelację procentowych zmian oporności elektrycznej z długością rysy, co pokazano na rysunku 5. Potwierdza to współczynnik korelacji liniowej, który wynosi $R^2 = 0,97$. Ta dobra korelacja liniowa utrzymuje się dla małej i dużej długości rysy. Jest ona słuszna nawet w przypadku dużej długości rysy wynoszącej 20 mm, co jest na granicy czujnika pomiarowego, przy czym próbka ma poprzeczny przekrój o wymiarach 40 mm x 40 mm.

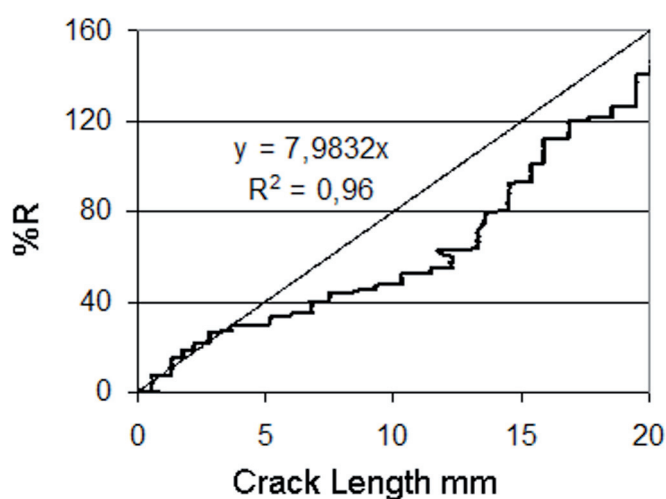
$$I_c = \frac{V_r}{R_r} \quad [1]$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_c} \quad [2]$$

$$\%R = \left(\frac{R_s}{R_{s0}} - 1 \right) \times 100 \quad [3]$$

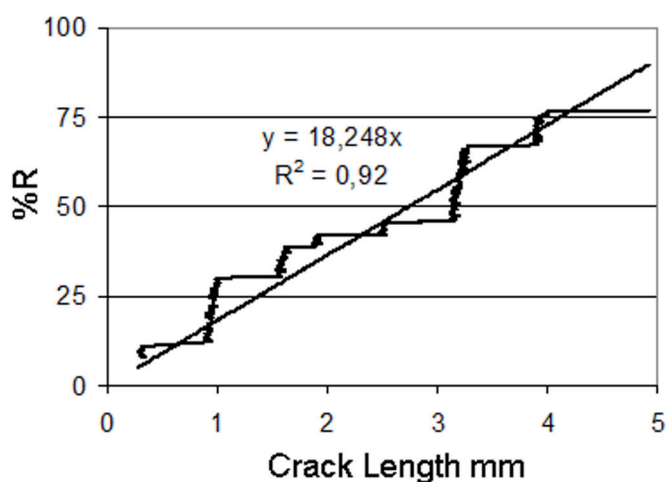
3. Results and discussions

The relations between the crack length and percent change of electrical resistance of cement based composites are presented in this section. The crack length and percent change of electrical



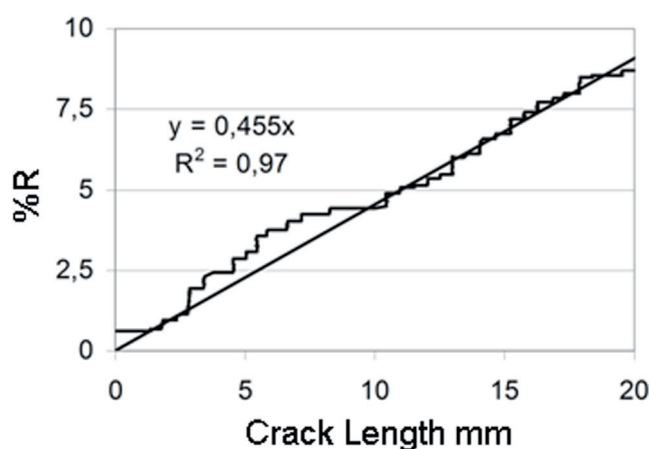
Rys. 3. Długość rysy i zmiana procentowa oporności elektrycznej próbki bez włókien

Fig. 3. The crack length versus percent change of electrical resistance for a sample with no fibers



Rys. 4. Długość rysy i zmiana procentowa oporności elektrycznej innej próbki bez włókien

Fig. 4. The crack length versus percent change of electrical resistance for another sample with no fibers



Rys. 5. Długość rysy i zmiana procentowa oporności elektrycznej próbek z włóknami stalowymi o długości 6 mm, w ilości 1% objętościowy

Fig. 5. The crack length versus percent change of electrical resistance for the sample with steel fibers length 6 mm, 1% volume fraction

Dobra korelacja zmian procentowych oporności elektrycznej od długości rysy wykazuje, że zaprawy cementowe mogą stanowić inteligentne materiały, wyczuwające własne uszkodzenia. Takie inteligentne kompozyty cementowe wykazując zdolność do wyczuwania odkształceń lub uszkodzeń będą stanowiły przyszłość przemysłu budowlanego.

4. Wnioski

W tej pracy badano zależność pomiędzy opornością elektryczną i długością rysy w kompozytach z matrycą cementową. Wykonano dwie zaprawy bez włókien stalowych i z ich dodatkiem, w ilości 1% objętościowych. Z każdej zaprawy przygotowano po trzy próbki, które miały w środku długości karby, co pozwalało na śledzenie propagacji rysy. Każdą próbkę wyposażono w 4 siatki miedziane jako elektrody, które stanowiły źródło prądu i umożliwiały pomiary elektryczne. Zastosowano trzy-punktowe zginanie z równoczesnym pomiarem długości rysy oraz różnic w potencjale elektrycznym, odkształceniach, obciążeniu i przemieszczeniu górnego walca.

Zaprawa bez włókien wykazała dobrą korelację zmian oporności elektrycznej z długością rysy. Ta dobra korelacja utrzymała się nawet w przypadku dużej długości rysy wynoszącej połowę poprzecznych wymiarów próbki.

Zaprawa zbrojona włóknami stalowymi o długości 6 mm w ilości 1% objętościowego, także wykazała dobrą korelację zmian procentowych oporności elektrycznej od długości rysy, nawet sięgającej 20 mm w przypadku próbki o przekroju poprzecznym wynoszącym 40 mm x 40 mm. Liniowy współczynnik korelacji wynosi 0,97 i wyznacza prostą dobrze dopasowaną do wyników doświadczalnych.

Korelację procentowej zmiany oporności elektrycznej od odkształcenia próbki wykazali Teomete i Erdem (6). Natomiast w tej pracy stwierdzono dobrą korelację oporności elektrycznej od długości rysy. Otrzymane wyniki zachęcają do rozwijania inteligentnego betonu, który śledzi swoje odkształcenie i uszkodzenia. Rozwój

resistance of a sample without fibers is presented in Fig. 3. During the test, when the crack length is zero, the percent change of electrical resistance is also zero. As the crack starts to propagate from the tip of the notch, the percent change of electrical resistance starts to increase. The correlation coefficient of the best fit line to the crack length versus the percent change of electrical resistance data is 0.96. This high correlation shows that the cement based composite, even without fibers, is sensitive to crack propagation. Even at high values of crack length (20 mm for a sample of 40 mm high), the linear correlation is strong as seen in Fig. 3.

The crack length versus the percent change of electrical resistance data for another sample which has no fiber is presented in Fig. 4. It is observed that there is a strong linear correlation between the crack length and the percent change of electrical resistance. The correlation coefficient is 0.92.

The sample with 6 mm steel fibers, 1% volume fraction, has a strong correlation between the crack length and the percent change of electrical resistance as seen in Fig. 5. The correlation coefficient of the best fit line to the data is 0.97, which is a measure of the strong linear relation between the crack length and the percent change of electrical resistance. The strong linear relation is valid at low and high values of crack length. Even at the crack gauge limit of 20 mm crack length, the strong correlation is achieved for the sample having a cross section of 40 mm x 40 mm.

The strong correlations obtained between crack length and percent change of electrical resistance reveals that the cement based composites have the potential to be used as smart materials which can sense their own damage. With their ability to sense strain and damage, smart cement based composites will be the future of construction industry.

4. Conclusions

In this study, the relation between electrical resistance and crack length of cement matrix composite is investigated. Two mixes were designed, one without any steel fiber and the other with 6 mm long 1% volume fraction steel fibers. Three samples from each mix were cast with a notch at the middle of the samples to control crack advancement. Each sample had 4 pure copper wire mesh electrodes from which current was supplied and electrical measurements were conducted. The three point bending test was applied with a simultaneous measurement of crack length, electrical potential differences, strains, load, and displacement of the upper cylinder.

The mix without any fiber had strong correlation between crack length and percent change in electrical resistance. The strong correlation is valid even at large crack lengths; at crack lengths half of sample's cross section dimensions.

The mix with 6 mm steel fiber, 1% volume fraction, had a strong correlation between crack length and percent change in electrical resistance at a crack length of 20 mm for a sample having a cross

inteligentnych materiałów umożliwi uzyskanie wyników z wielu konstrukcji, a nie punktowe pomiary. Z porównywalnymi początkowymi kosztami produkcji będzie możliwe śledzenie stanu konstrukcji przez cały okres eksploatacji.

Podziękowania

Praca ta była sponsorowana przez Turecką Radę Naukowych i Technologicznych Badań jako Projekt o nr 110M221. Autor pragnie podziękować firmie Sika za udostępnienie pyłu krzemionkowego i superplastyfikatora, a firmie Bekaert Izmit Steel Cord Co. za dostarczenie włókien stalowych do tych badań. Autor jest wdzięczny profesorowi Tahir Kemal Erdem za jego pomoc. Autor wyraża podziękowania Wydziałowi Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu Dokuz Eylul za udostępnienie prasy do badania wytrzymałości.

Literatura / References

1. F. Reza, G. B. Batson, J. A. Yamamuro, J. S. Lee, Resistance changes during compression of carbon fiber cement composites. *J. Mater. Civil. Eng.*, **15**, 5, 476-483 (2003).
2. D. D. L. Chung, Review functional properties of cement –matrix composites. *J. Mater. Sci.*, **36**, 1315-1324 (2001).
3. D. D. L. Chung, Self-monitoring structural materials, *Mater. Sci. Eng.*, 57-78 (1998).
4. X. Fu, E. Ma, D. D. L. Chung, W. A. Anderson, Self-monitoring in carbon fiber reinforced mortar by reactance measurement, *Cem. Concr. Res.*, **27**, 6, 845-852 (1997).
5. X. Fu, D. D. L. Chung, Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar. *Cem. Concr. Res.*, **27**, 9, 1313-1318 (1997).
6. E. Teomete, T. K. Erdem, Cement Based Strain Sensor: A Step to Smart Concrete. *Cement Wapno Beton*, **78**, 2, 78-91 (2011).
7. M. Chiarello, R. Zinno, Electrical conductivity of self-monitoring CFRC. *Cem. Concr. Comp.*, **27**, 463-469 (2005).
8. B. Han, X. Guan, J. Ou, Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors. *Sens. and Actuators A* **135**, 360-369 (2007).
9. F. Reza, J. A. Yamamuro, G. B. Batson, Electrical resistance change in compact tension specimens of carbon fiber cement composites. *Cem. Concr. Comp.*, **26**, 873-881 (2004).
10. B. Chen, J. Liu, Damage in carbon fiber –reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis. *Constr. and Build. Mater.*, **22**, 2196-2201 (2008).
11. H. Li, H. Xiao, J. Ou, Effect of compressive strain on electrical resistivity of carbon black-filled cement –based composites. *Cem. Concr. Comp.*, **28**, 824-828 (2006).
12. H. Li, H. Xiao, J. Ou, Electrical property of cement-based composites filled with carbon black under long-term wet and loading condition. *Comp. Sci. and Tech.*, **68**, 2114-2119 (2008).
13. D. D. L. Chung, Cement reinforced with short carbon fibers: a multi-functional material, *Composites Part B: Engineering*, **31**, 511-526 (2000).
14. European Committee for Standardization, Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, EN 197-1, Brussels 2000.

section of 40 mm x 40 mm. The correlation coefficient of linear fit line to crack length and percent change in electrical resistance is 0.97 which verifies the strong correlation.

The correlation between strain and percent change in electrical resistance was reported by Teomete and Erdem (6). In this work, the strong correlation between crack length and electrical resistance is presented. The results obtained are rewarding for the development of smart concrete which can sense its strain and damage. The development of smart structural materials will make it possible to get measurements from the “mass” of the structure rather than pointwise. With a comparable initial construction cost, a life time structural health monitoring covering the “mass” of the structure will be possible.

Acknowledgements

This work is supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) through Grant no 110M221. The author would like thank to Sika Construction Chemicals Co for providing the silica fume and superplasticizer and to Bekaert Izmit Steel Cord Co for providing the steel fibres used in this study. The author is thankful to Asst. Prof. Dr. Tahir Kemal Erdem for his contributions to the work. The author thanks the Metallurgical and Materials Engineering Department of Dokuz Eylul University for providing the Schimadzu mechanical test machine.