

Zależność pomiędzy oporem elektrycznym a odkształceniem przy ściskaniu kompozytów cementowych zbrojonych włóknami stalowymi

Electrical resistance – compressive strain relationship of steel fiber reinforced cement composites

Słowa kluczowe: czujniki tensometryczne oparte na cemencie, inteligentne materiały, włókna, odkształcenie betonu

Keywords: cement based sensors, smart materials, fibres, strain

1. Wprowadzenie

W naszym wcześniejszym artykule (3) omówiono szczegółowo prace szeregu autorów (1, 2, 4-20) dotyczące metod stosowanych do oceny zmian właściwości betonu w trakcie jego eksploatacji za pomocą inteligentnych materiałów konstrukcyjnych. Zastosowanie tych inteligentnych betonów pozwala na zabezpieczenie przed awariami konstrukcji oraz zastosowanie lepiej dobranych metod do zachowania ich dobrych właściwości przez dłuższy okres. Natomiast w naszej poprzedniej pracy opracowano zastosowanie inteligentnych betonów zawierających włókna węglowe (3). Jednak włókna węglowe są droższe od włókien stalowych. W celu obniżenia kosztów inteligentnych materiałów stosowanych w budownictwie, niezbędne są badania, które pozwolą na rozwój takich materiałów opartych na cemencie z włóknami stalowymi. W niniejszej pracy zastosowano kompozyty cementowe zbrojone włóknami stalowymi przy czym objętościowy udział włókien był różny. Pomiar polaryzacji przeprowadzono po różnym czasie twardnienia betonu. Zbadano wpływ czasu twardnienia na oporność elektryczną kompozytów. Badania wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie przeprowadzono przy jednoczesnym pomiarze odkształcenia i oporu elektrycznego. Zbadano także zależność pomiędzy oporem elektrycznym a odkształceniem. Wskaźniki eksploatacyjne czujnika tensometrycznego, którymi są współczynnik czujnika [czułość], liniowość oraz granica odkształcenia zostały oznaczone dla wszystkich kompozytów.

2. Metody badań i materiały

W pracy przygotowano sześć różnych mieszanek betonowych. We wszystkich mieszankach stosowano cement CEM I 42,5R. W przypadku każdej mieszanki stosunek masowy piasek/cement

1. Introduction

In our previous paper the detailed discussion of several works (1, 2, 4-10), concerning the methods applied for structural health monitoring of concrete structures was presented. The development of self sensing smart concretes enable to protect these construction materials against destruction for the long time and organize their maintenance are of crucial importance (3).

In our previous work the carbon fibre concretes were studied (3). However, carbon fibres are more expensive with respect to steel fibres. In order to decrease the cost of the smart materials to be used in the construction industry, research is needed to develop smart cement based materials with steel fibers. In this study, steel fibre concretes were designed with different fibres volume fractions. Polarization measurements were conducted at different hardening ages. The effect of hardening age on the electrical resistivity of the concretes was determined. Uniaxial compression test were carried by simultaneous measurement of strain and electrical resistance of the samples. The correlations between the electrical resistance and strain were determined. The performance measures of a strain sensor which is gage factor, linearity and strain limits were evaluated for the composites.

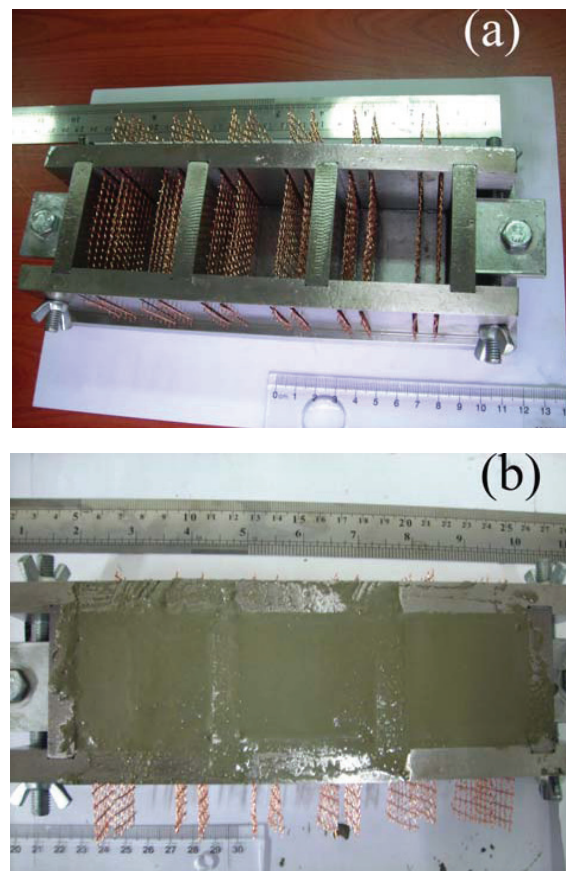
2. Experimental work

In this study six different mixtures were designed. Cement CEM I 42.5R was used in all mixes. For all mixes the ratio by mass of sand/cement is 1; silica fume /cement is 10%; water/cement is 0.4; superplasticizer Sika ViscoCrete High Tech 30/cement is 1%. Steel fibre having length of 6mm and diameter of 290 μm was used. The steel fibres were coated with brass for corrosion protection. In mix M1 the steel fibres were not used. The ratio of steel fibres volume

wynosił 1, udział pyłu krzemionkowego w cemencie wynosił 10%, natomiast stosunek woda/cement był równy 0,4, a dodatek superplastyfikatora Sika ViscoCrete High Tech 30 wynosił 1% masowo w stosunku do cementu. Stosowano włókna stalowe o długości 6 mm i średnicy 290 μm . Włókna te pokryte były mosiądzem w celu ochrony przed korozją. Mieszanka betonowa M1 nie zawierała włókien. Stosunek objętości włókien stalowych do całkowitej objętości mieszanek S1-S2-S3-S4 i S5 wynosił odpowiednio 0,2%, 0,5%, 0,8%, 1% oraz 1,5%. Z każdej mieszanki przygotowano po 3 kostki do badań, o boku 5 cm.

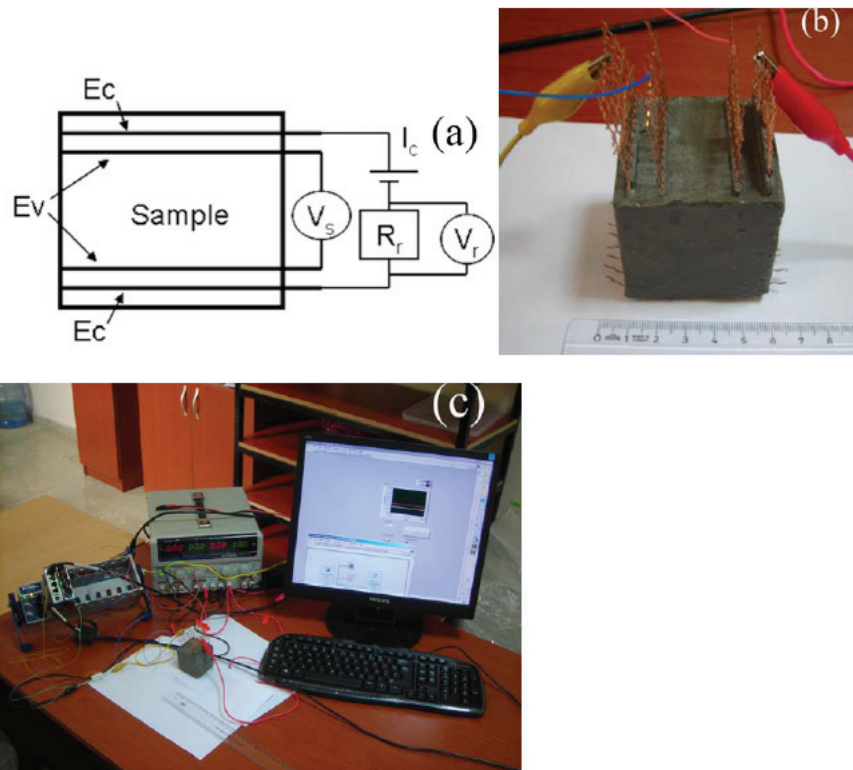
Podczas badań zastosowano układ czterelektrodowy. Stosowano elektrodę w postaci siatki z drutu miedzianego o oczku 5 mm i średnicy drutu wynoszącej 600 μm . Kostki formowano w specjalnie wykonanych formach sześciennych o boku 5 cm. Jak pokazano na rysunku 1a na przeciwległych bocznych ścianach formy znajdowały się cztery otwory o szerokości 2 mm i długości 46 mm, w których umieszczono siatkę miedzianą. Po umieszczeniu siatki w formie, przygotowywano mieszankę i wypełniano nią formę, jak na rysunku 1b. Próbkę rozformowywano po 24 h i przechowywano w wodzie przez 28 dni. Po 28 dniach próbki wyjmowano z wody i umieszczano w warunkach laboratoryjnych na 7 kolejnych dni, w celu wyrównania wilgotności.

W celu zbadania wpływu czasu twardnienia na oporność elektryczną, zmierzono opór elektryczny próbek po różnym czasie twardnienia. Stałe napięcie przykładano do elektrod prądowych [E_c] [rysunek 2 a-b]. Opór odniesienia $R_r = 150 \text{ Ohm}$ był szeregowo połączony z próbką. Różnicę potencjału pomiędzy dwoma



Rys. 1. a) Specjalna forma z elektrodami w postaci siatki z drutów miedzianych, b) Forma wypełniona mieszanką

Fig. 1. a) The special mold, used in the study, with the copper mesh electrodes, b) The mix placed in the mold



Rys. 2. Układ pomiarowy a) schemat obwodu pomiarowego; b) próbka w trakcie badania; c) rejestrator danych, generator prądu stałego oraz komputer
 Fig. 2. Polarization measurement set up a) the circuit diagram; b) the sample during the measurement; c) the data logger, DC power source and PC used

elektrodami napięciowymi [E_v] oznaczono jako V_s . Natomiast różnicę potencjału na oporze odniesienia [R_r] oznaczono jako V_r . Pomiarów te prowadzono przez 10 minut, zapisując 5 wyników na sekundę. Podczas pomiarów zastosowano rejestrator National Instruments, generator prądu stałego, oraz komputer do zapisu danych [rysunek 2c].

Natężenie prądu w obwodzie [I_c] [rysunek 3] obliczano z prawa Ohma jak w równaniu 1. Opór próbki [R_s] obliczono natomiast wprowadzając do równania 2 natężenie prądu w obwodzie [I_c] oraz różnicę potencjałów pomiędzy elektrodami napięciowymi [V_s]. Oporność elektryczną próbki oznaczono z oporu elektrycznego oraz wymiarów próbki jak w równaniu 3.

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

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

$$\rho = R_s \cdot \frac{A}{L} \quad [3]$$

W równaniu 3, ρ oznacza oporność elektryczną próbki, R_s opór elektryczny próbki, A przekrój poprzeczny próbki, do którego kierunku przepływu prądu elektrycznego jest prostopadły, L jest natomiast długością próbki, której opór jest mierzony.

Wytrzymałość na ściskanie mierzono przy szybkości przemieszczania głowicy prasy wynoszącej 0,5 mm/min. Podczas badania wytrzymałości mierzono różnicę potencjału pomiędzy elektrodami napięciowymi [E_v] jako V_s , natomiast przez V_r oznaczono mierzoną różnicę potencjału na oporze odniesienia [R_r] [rysunek 3 a-b]. Ten sam obwód elektryczny zastosowano podczas badań wytrzymałości, z wyjątkiem oporu odniesienia $R_r = 1000$ Ohm. Do ciągłego pomiaru odkształcenia próbki, w kierunku działania siły, zastosowano czujnik tensometryczny. W trakcie badania rejestrowano z częstotliwością 10 Hz [10 wyników na sekundę] obciążenie ściskające, przesuw głowicy, odkształcenie próbki oraz różnice potencjałów V_s i V_r .

Natężenie prądu w obwodzie [I_c] oraz opór próbki [R_s] obliczano z równań 1-2 dla każdego wyniku pomiarów. Z równania 3 wyli-

to total volume for mixes S1-S2-S3-S4 and S5 was 0.2%, 0.5%, 0.8%, 1% and 1.5%, respectively. For each mix, three cubes of 5 cm were prepared.

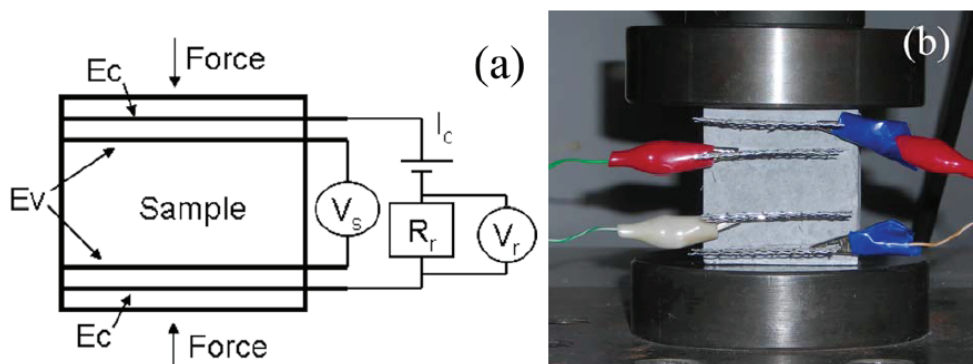
A four electrode configuration was used during the tests and the details of the configuration are presented in this section. Pure copper wire mesh was used as electrode which has a mesh opening of 5mm and wire diameter of 600 μ m. Special 5 cm cube sample molds were designed and manufactured for this study. The 5 cm cube mold has four, 2 mm wide, 46 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. After the copper wire meshes were placed in the mold, the mix was prepared and placed in the mold, as in Fig. 1b. The samples were demolded after 24 hours and cured in water for 28 days. After 28 days, the samples were taken out of water and cured in laboratory for 7 days to reach steady state moisture content.

The electrical resistance of the samples was measured after different curing period which makes possible to verify the effect of curing time on electrical resistivity. A DC current was supplied to current electrode (E_c) of the sample, as shown in Fig. 2a-b. There is a reference resistance of $R_r = 150$ Ohm in series with the sample. The potential difference between two voltage electrodes (E_v) was measured as V_s . The potential difference V_r across reference resistance R_r was measured each 10 minutes, recording 5 results every second. A National Instruments data logger, DC power source, and a PC to record the results were used during the measurements (Fig. 2c).

The current in the circuit (I_c) was determined using Ohm's law shown in Eq. 1. The resistance of the sample (R_s) was evaluated by Eq. 2, using the current (I_c) and the potential difference between voltage electrodes of the sample (V_s). The electrical resistivity of the sample was determined using the electrical resistance and sample dimensions as in Eq. 3.

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

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



Rys. 3 a) Schemat obwodu pomiarowego podczas badania próbek poddanych ścisnaniu, b) próbka w trakcie ściskania

Fig. 3 a) The circuit diagram during compression test, b) the sample at test

czano natomiast procentową zmianę oporu próbki [%R] w trakcie jej obciążania.

$$\%R = \left(\frac{R_s}{R_{s0}} - 1 \right) \cdot 100 \quad [4]$$

Wskaźnikami eksploatacyjnymi czujnika tensometrycznego są dwa parametry; współczynnik czujnika [K] oraz liniowość [LE]. Współczynnik czujnika [K] jest zdefiniowany jako cząstkowa zmiana oporu elektrycznego na jednostkę odkształcenia i może być wyliczony z równania 5. Współczynnik czujnika jest miarą czułości czujników tensometrycznych na odkształcenia. Współczynnik czujnika jest nachyleniem krzywej procentowej zmiany oporu [%R] w funkcji odkształcenia, podzielonym przez 100. Im wyższy współczynnik K, tym większa jest czułość czujnika. Współczynnik komercyjnych metalowych czujników tensometrycznych wynosi około 2. Liniowość [LE] jest procentową maksymalną różnicą pomiędzy krzywą wejście-wyjście [krzywa %R w funkcji odkształcenia], a dopasowaną prostą regresji liniowej dla całego zakresu wyjścia [R_{fs}], jak to wynika z równania 6. Błąd pomiaru odkształcenia zmniejsza się z malejącą liniowością.

$$K = \frac{(R - R_{s0}) / R_{s0}}{\Delta \varepsilon} \quad [5]$$

$$\%LE = \left(\frac{\Delta_{\max} R_s}{\%R_{fs}} - 1 \right) \cdot 100 \quad [6]$$

Granica odkształcenia [SL] czujnika tensometrycznego jest maksymalnym odkształceniem, które można oznaczyć, z małym błędem. Granica odkształcenia [SL] typowego komercyjnego metalowego czujnika tensometrycznego wynosi 0,5% - 3,0%.

3. Wyniki pomiarów

Wpływ wieku próbki na oporność elektryczną przedstawiono na rysunku 4. Każdy wynik jest średnią z wyników zebranych podczas 10 minut, a rejestrowanych z częstotliwością 5 Hz [5 wyników na sekundę]. Wynik podawano jako średnią uzyskaną z pomiarów plus-minus jedno odchylenie standardowe, które traktowano jako zakres błędu. Jeśli odchylenia standardowe są zbyt małe, błędy mogą być niewidoczne. Oporność elektryczna rośnie wraz z wiekiem próbki, jak to pokazano na rysunku 4. Zwłaszcza w przypadku próbek dojrzewających dłużej niż 20 dni, występuje tendencja do wzrostu oporności wraz ze wzrostem udziału objętościowego włókien. Istnieje także prawdopodobieństwo występowania porów w strefie przejściowej włókna-matryca cementowa. Wzrost takich pustek powoduje także zwiększenie oporności elektrycznej. Tak więc, wzrost udziału objętościowego włókien powoduje wzrost oporności elektrycznej.

Mieszanka M1, która nie zawiera włókien, ma współczynnik czujnika K = 30. Jej czułość jest 15 razy większa od czułości komercyjnych metalowych czujników tensometrycznych [rysunek

$$\rho = R_s \cdot \frac{A}{L} \quad [3]$$

where ρ is the electrical resistivity of the sample, R_s is the electrical resistance of the sample, A is the cross section of the sample perpendicular to the electrical current, L is the length of the sample whose resistance is measured.

For compression tests the load rate of 0.5 mm/min was used. During these tests, the potential difference between voltage electrodes of the sample (E_v) was measured (V_s) as well as the potential difference across the reference resistance (R_r) was measured (V_r) as seen in Fig. 3a-b. The same electrical circuit of polarization measurement was used during the compression tests, except R_r was equal 1000 Ohm. A strain gage was used to monitor the strain of the sample in force direction. The load, the stroke of the loading head, strain gage data, potential differences V_s and V_r were recorded at a rate of 10 Hz (10 data in a second) during the compression test.

The current in the circuit (I_c) and the resistance of the sample (R_s) were calculated using Eqs. 1 and 2 for every record of the test. The % change of the sample resistance (%R) during the compression test was calculated from Eq. 4.

$$\%R = \left(\frac{R_s}{R_{s0}} - 1 \right) \cdot 100 \quad [4]$$

The performance of a strain gage was evaluated by two parameters; gage factor (K) and linearity (LE). Gage factor (K) is the fractional change in electrical resistance per unit strain, and can be determined using Eq. 5. It is a measure of strain sensitivity for strain gages. It is the slope of percent change in resistance (%R) versus strain graph divided by 100. The higher the K, the more sensitive the sensor is. The gage factor of commercial metal strain gages is around 2. Linearity (LE) is the percent of maximum difference between input-output curve (%R versus strain curve) and fitted linear regression line, to full scale output (R_{fs}), as given in Eq. (6). The error in measurement of strain decreases by decreasing linearity.

$$K = \frac{(R - R_{s0}) / R_{s0}}{\Delta \varepsilon} \quad [5]$$

$$\%LE = \left(\frac{\Delta_{\max} R_s}{\%R_{fs}} - 1 \right) \cdot 100 \quad [6]$$

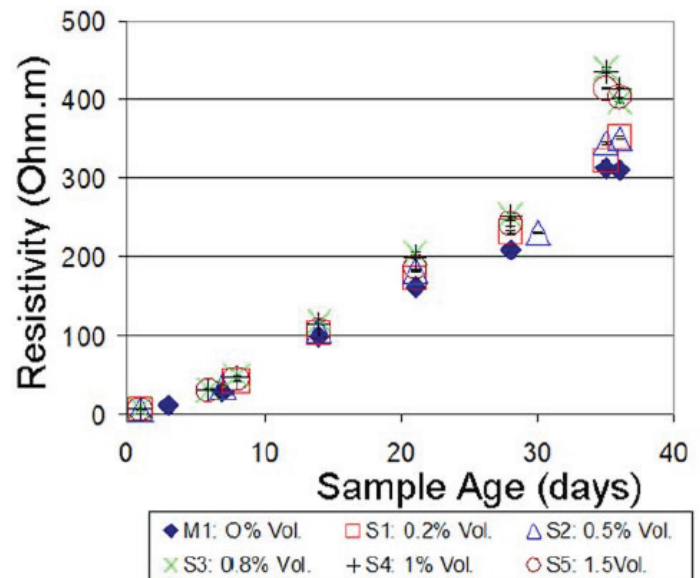
The Strain Limit (SL) of a strain gage is the maximum strain that can be measured with a small error. The strain limit (SL) of typical commercial metal strain gage is between 0.5%-3%.

3. Results and discussion

The effect of sample hardening period on the electrical resistivity is presented in Fig. 4. Each point is an average of the results

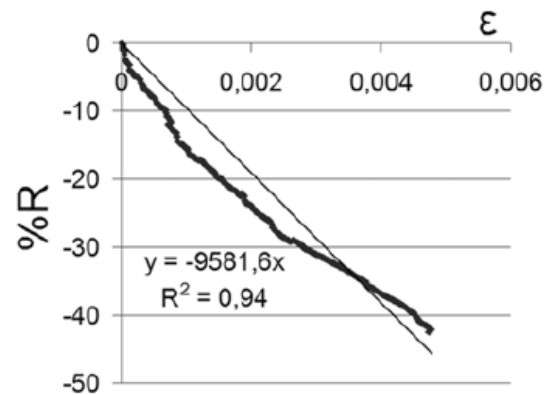
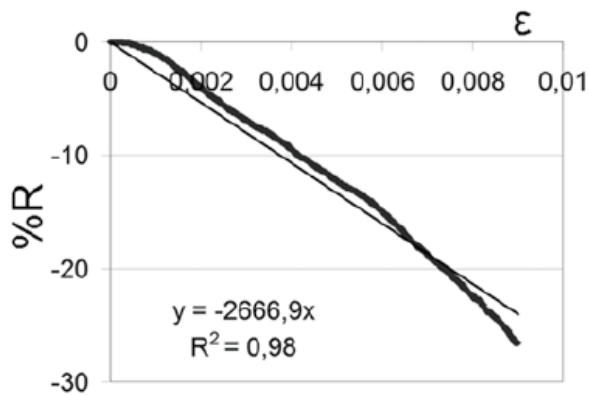
5a]. Jej liniowość wynosi 10%, a granica odkształcenia SL wynosi 0,9%. Współczynnik korelacji najlepszego dopasowania prostej do wyników wynosi 0,98 [rysunek 5a].

Krzywą zmiany procentowej oporu elektrycznego R% do odkształcenia mieszanki S1, o udziale objętościowym włókien 0,2%, pokazano na rysunku 5b. Współczynnik czujnika tej mieszanki wynosi $K = 90$ co oznacza czterdziestopięciokrotnie większą czułość w porównaniu do komercyjnych czujników tensometrycznych. Liniowość wynosi 15%, natomiast granica odkształcenia $SL = 0,47\%$. Współczynnik korelacji linii najlepszego dopasowania do krzywej wynosi 0,94. Próbkę obciążono do odkształcenia 0,0047 siłą 235 kN [naprężenie 94 MPa] po czym odciążono. Tę samą próbkę obciążono ponownie, a krzywą zmiany procentowej oporu elektrycznego R% do odkształcenia po przyłożeniu ponownego obciążenia ściskającego pokazano na rysunku 6a. Pomimo, że na próbki przyłożono wcześniej ekstremalne obciążenie, współczynnik czujnika wynosił $K = 26$, co jest większe 13 razy niż w przypadku komercyjnych metalowych czujników tensometrycznych. Liniowość w tym przypadku wynosiła $LE = 10\%$, czyli bardzo mało, natomiast granica odkształcenia $SL = 2,2$, co oznacza górną granicę w przy-



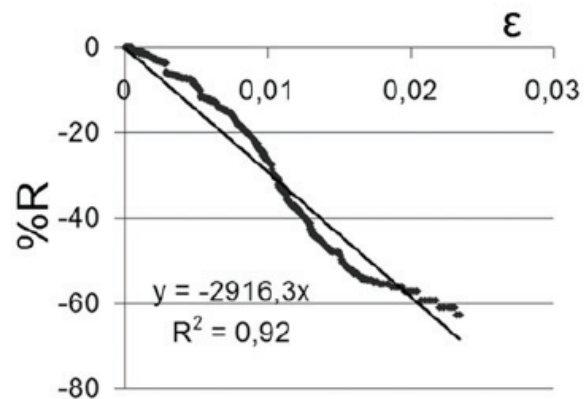
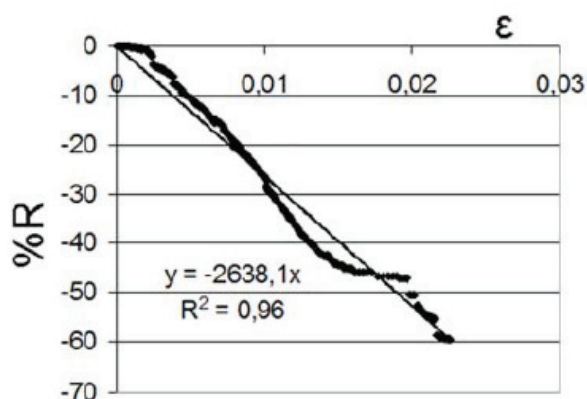
Rys. 4. Wpływ okresu dojrzewania próbek na oporność elektryczną

Fig. 4. The effect of the sample curing time on the electrical resistivity



Rys 5. Krzywa zmiany procentowej oporu elektrycznego w funkcji odkształcenia a) mieszanka M1 bez włókien, [$K = 30$; $LE = 10\%$; $SL = 0.9\%$] b) mieszanka S1 z włóknami stalowymi, objętościowy udział włókien 0,2% [$K = 90$; $LE = 15\%$; $SL = 0.47\%$]

Fig. 5. The change of electrical resistance - strain graph a) M1 mixture without fibre, [$K = 30$; $LE = 10\%$; $SL = 0.9\%$] b) S1 mixture with 0.2% of fibres volume fraction [$K = 90$; $LE = 15\%$; $SL = 0.47\%$]



Rys. 6. Krzywa zmiany procentowej oporu elektrycznego w funkcji odkształcenia a) mieszanka S1 obciążona drugi raz, objętościowy udział włókien 0,2%, [$K = 26$; $LE = 10\%$; $SL = 2,2\%$] b) mieszanka S2, objętościowy udział włókien 0,5% [$K = 27$; $LE = 10\%$; $SL = 2,3\%$]

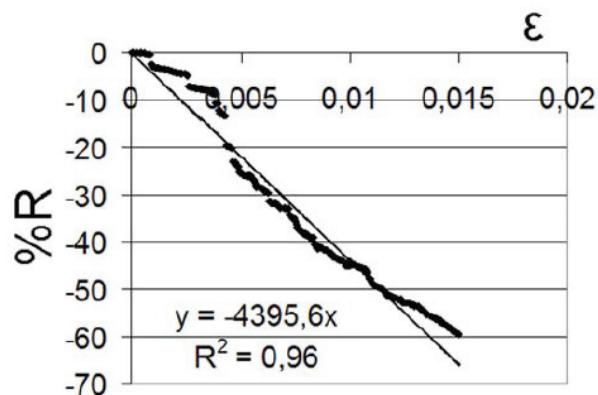
Fig. 6. The change of electrical resistance- strain graph a) S1 mixture loaded 2nd time with 0.2% of fibres volume fraction, [$K = 26$; $LE = 10\%$; $SL = 2.2\%$] b) S2 mixture with 0.5% of fibres volume fraction [$K = 27$; $LE = 10\%$; $SL = 2.3\%$]

padku komercyjnych metalowych czujników tensometrycznych. Wyniki te pokazały, że kompozyt cementowy zbrojony włóknami stalowymi może być stosowany do wykrywania odkształcenia przy zastosowaniu cykli obciążanie-odciążanie, zwłaszcza jeśli przyłożone obciążenia są niewielkie.

Mieszanka S2 o udziale objętościowym włókien wynoszącym 0,5% ma współczynnik $K = 27$, co oznacza, że jest ona 13 razy bardziej czuła na odkształcenie niż komercyjne metalowe czujniki tensometryczne [rysunek 6b]. Jej liniowość wynosiła $LE = 10\%$, a granica odkształcenia $SL = 2,3\%$. Taka granica odkształcenia jest zbliżona do górnej wartości wynoszącej 3% w przypadku komercyjnych metalowych czujników tensometrycznych. Współczynnik korelacji najlepszego dopasowania prostej wynosi 0,92.

Mieszanka S3 o udziale objętościowym włókien wynoszącym 0,8% ma współczynnik $K = 40$, liniowość $LE = 13\%$, a granicę odkształcenia $SL = 1,5\%$, [rysunek 7]. Jest zatem dwadzieścia razy bardziej czuła niż w przypadku komercyjnych metalowych czujników tensometrycznych, podczas gdy jej granica odkształcenia [SL] jest przeciętna. Współczynnik korelacji najlepszego dopasowania prostej wynosi 0,96.

Mieszanka S4 o udziale objętościowym włókien wynoszącym 1,0% ma współczynnik $K = 39$, liniowość $LE = 10\%$, a granicę odkształcenia $SL = 1,66\%$. Jest zatem osiemnaście razy bardziej czuła niż komercyjne metalowe czujniki tensometryczne, podczas gdy jej współczynnik korelacji najlepszego dopasowania prostej wynosi 0,97. Próbkę obciążono siłą 235kN [naprężenie 94 MPa], odkształcenie 0,0166. Po odciążeniu, tę samą próbkę obciążono ponownie. Pomimo wcześniejszego jej obciążenia na umiarkowanym poziomie, reakcja na drugie obciążenie jest dość interesująca. W przypadku drugiego obciążenia współczynnik czujnika wynosi $K = 105$, co oznacza, że mieszanka ta jest pięćdziesiąt dwa razy bardziej czuła niż w przypadku komercyjnych metalowych czujników tensometrycznych, jak to pokazano na rysunku 8b. Liniowość jest nadal mała i wynosi $LE = 13\%$. Współczynnik korelacji najlepszego dopasowania prostej wynosi 0,97.



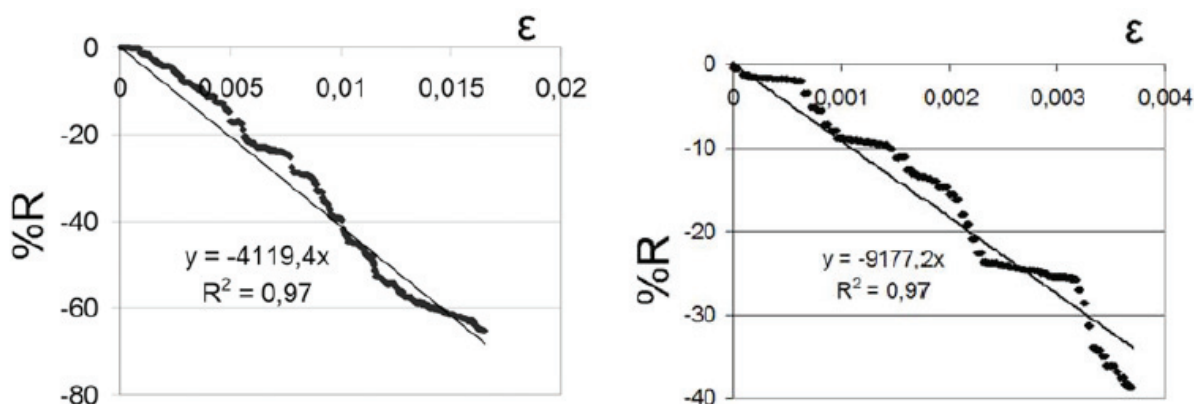
Rys. 7. Krzywa zmiany procentowej oporu elektrycznego – odkształcenie dla mieszanki S3, objętościowy udział włókien 0,8%, [$K=40$; $LE=13\%$; $SL=1,5\%$]

Fig. 7. The percent change of electrical resistance- strain graph S3 mixture 0.8% fiber volume fraction, [$K=40$; $LE=13\%$; $SL=1.5\%$]

collected during 10 minutes at a rate of 5Hz (5 data in a second). The result is given as the average of measurements and the last is the error bar plus-minus one standard deviation. In the case of low standard deviations, the error bars may not be visible. The electrical resistivity rises with the sample age increase, as is seen in Fig. 4. Especially for the samples cured longer than 20 days, there is a trend of increase of resistivity with increase of fibres volume rate. In the fibres cement matrix interfacial zone is a probability of pores formation. The increase of these voids is causing the increase of electrical resistivity. Thus, the rise of 6 mm fibres volume causes the increase of electrical resistivity.

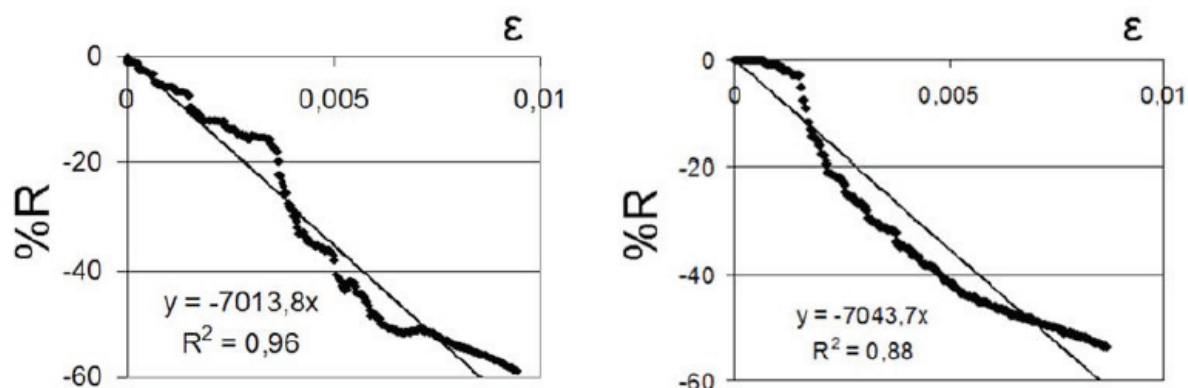
The mix M1, without fibres addition has a gage factor of $K = 30$. Thus is 15 times more sensitive than the commercial metal strain gages (Fig.5a). Its linearity is 10% and strain limit (SL) 0.9% . The correlation coefficient of best curve fitting line is 0.98 (Fig. 5a).

The change of electrical resistance strain graph of mixture S1 having 0.2% volume of fibres is presented in Fig. 5b. The gage factor of the mix is $K = 90$ and it is 45 times more sensitive than



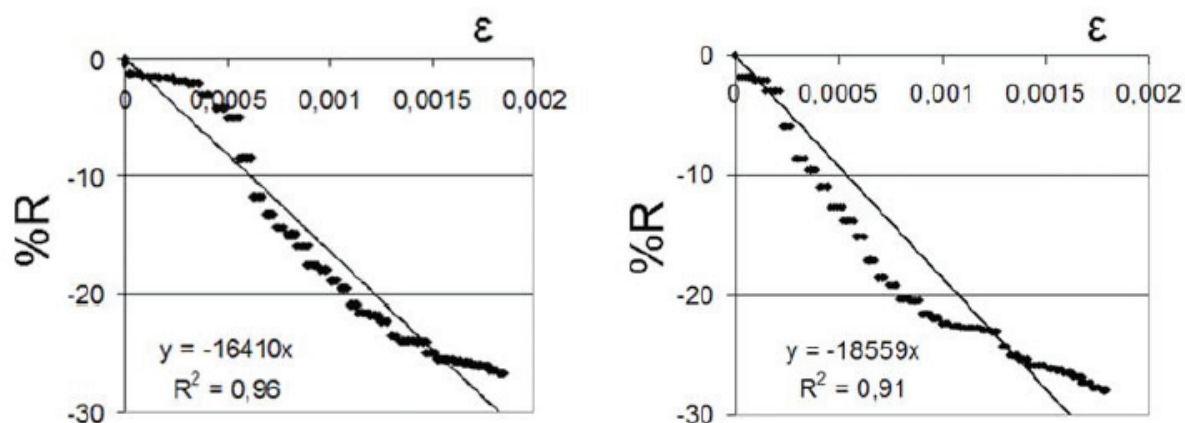
Rys. 8. Krzywa zmiany procentowej oporu elektrycznego w funkcji odkształcenia a) mieszanka S4, objętościowy udział włókien 1,0%, [$K = 39$; $LE = 10\%$; $SL = 1,66\%$] b) mieszanka S4, obciążona drugi raz, objętościowy udział włókien 1,0% [$K=105$; $LE = 13\%$; $SL = 0,37\%$]

Fig. 8. The change of electrical resistance- strain graph a) S4 mixture 1% of fibres volume fraction, [$K = 39$; $LE = 10\%$; $SL = 1.66\%$] b) S4 mixture loaded 2nd time, 1% of fibres volume fraction, [$K = 105$; $LE = 13\%$; $SL = 0.37\%$]



Rys. 9. Krzywa zmiany procentowej oporu elektrycznego w funkcji odkształcenia a) mieszanka S5, objętościowy udział włókien 1,5%, [$K = 62$; $LE = 15\%$; $SL = 0,94\%$] b) mieszanka S5, obciążona drugi raz, objętościowy udział włókien 1,5% [$K = 62$; $LE = 15\%$; $SL = 0,868\%$]

Fig. 9. The change of electrical resistance- strain graph a) S5 mixture with 1.5% of fibres volume fraction, [$K = 62$; $LE = 15\%$; $SL = 0.94\%$] b) S5 mixture 2nd loading, with 1.5% of fibres volume fraction, [$K = 62$; $LE = 15\%$; $SL = 0.868\%$]



Rys. 10. Krzywa zmiany procentowej oporu elektrycznego w funkcji odkształcenia a) mieszanka S5, obciążona trzeci raz, objętościowy udział włókien 1,5%, [$K = 144$; $LE = 16\%$; $SL = 0,185\%$] b) mieszanka S5, obciążona czwarty raz, objętościowy udział włókien 1,5% [$K = 156$; $LE = 21\%$; $SL = 0,179\%$]

Fig. 10. The change of electrical resistance- strain graph a) S5 mixture, 3rd loading, with 1.5% of fibres volume fraction, [$K = 144$; $LE = 16\%$; $SL = 0.185\%$] b) S5 mixture, 4th loading, with 1.5% of fibres volume fraction, [$K = 156$; $LE = 21\%$; $SL = 0.179\%$]

Mieszanka S5 o udziale objętościowym włókien wynoszącym 1,5% ma współczynnik $K = 62$. Oznacza to, że jest ona trzydzieści razy bardziej czuła na odkształcenie niż komercyjne metalowe czujniki tensometryczne. Jej liniowość wynosi $LE = 15\%$. Granica odkształcenia wynosi natomiast $SL = 0,94\%$. Współczynnik korelacji najlepszego dopasowania prostej wynosi 0,96 [rysunek 9a]. Do próbki przyłożono siłę 235 kN [naprężenie 94 MPa], przy czym odkształcenie osiągnęło 0,0094, po czym odciążono. Tę samą próbkę obciążono ponownie tą samą siłą 235kN [naprężenie 94 Pa]. Po drugim obciążeniu współczynnik czujnika wynosił $K = 62$, a liniowość $LE = 15\%$ i była taka sama jak w przypadku pierwszego obciążenia. Granica odkształcenia wynosiła $SL = 0,868\%$, a współczynnik korelacji najlepszego dopasowania prostej 0,88 [rysunek 9b]. Tę samą próbkę obciążono trzeci raz siłą na poziomie 235 kN. Współczynnik czujnika wyniósł $K = 144$, co oznacza, że po tych dużych obciążeniach, próbka była nadal znacznie bardziej czuła od komercyjnych metalowych czujników tensometrycznych [rysunek 10a]. Liniowość wyniosła po trzecim obciążeniu $LE = 16\%$, a granica odkształcenia $SL = 0,185$. Współczynnik korelacji

the commercial gages. The linearity is 15% and the strain limit SL is 0.47%. The correlation coefficient of the best curve fitting line is 0.94. The sample was loaded to a strain of 0.0047 with a force of 235kN (stress of 94 MPa) and unloaded. The same sample was loaded the second time and the curve of the resistance change (%R)-strain graph for the second loading is shown in Fig. 6a. Although the sample was previously loaded with an extreme load, the gage factor is $K = 26$ which is 13 times higher than the gage factor of commercial gages. The linearity is $LE = 10\%$ which is considerably low, and the strain limit $SL = 2.2$ which is in the upper limit of commercial strain gages. This shows that, the steel fibres concrete can be used for strain sensing under repeated loading –unloading cycles, especially if the applied loads are low.

The S2 mixture with fibres volume content of 0.5% has a gage factor of $K = 27$ which is 13 times more sensitive than the commercial gages (Fig. 6b). The linearity LE is 10%, the strain limit $SL = 2.3\%$. The strain limit is close to the upper limit of 3% of commercial metal

najlepszego dopasowania prostej miał wartość 0,96. Po obciążeniu do odkształcenia 0,00775, próbkę odciążono i obciążono po raz czwarty przykładając siłę 235 kN. Po trzecim obciążeniu współczynnik czujnika wynosił $K = 156$ czyli był prawie osiemdziesiąt razy większy niż w przypadku komercyjnych metalowych czujników tensometrycznych [rysunek 10b]. Liniowość jest na poziomie $LE = 21\%$, a granica odkształcenia wynosi $SL = 0,179$. Współczynnik korelacji najlepszego dopasowania prostej wyniósł 0,91. Warto podkreślić, że po przyłożeniu znacznego obciążenia, próbka była nadal bardzo czuła na odkształcenie. Można stąd wyciągnąć wniosek, że celowym będzie zastosowanie układu pomiarowego do rozwijania inteligentnych materiałów konstrukcyjnych dla budownictwa.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów zależności oporu elektrycznego od odkształcenia w przypadku kompozytów cementowych zbrojonych włóknami stalowymi, w funkcji czasu ich twardnienia wysunięto następujące wnioski:

1. Wraz z wiekiem dojrzewania próbek wzrasta ich oporność elektryczna.
2. Zazwyczaj wzrost udziału objętościowego włókien stalowych w próbkach betonowych powoduje zwiększenie oporności elektrycznej, co prawdopodobnie wiąże się ze zwiększeniem zawartości porów w tych próbkach.
3. Opór elektryczny maleje podczas odkształcenia przy ściskaniu, prawdopodobnie z powodu zamykania się mikrorys i poprawy kontaktu matryca cementowa włókna.
4. W przypadku kompozytów cementowych zbrojonych włóknami stalowymi wartość współczynnika czujnika wynosi nawet $K = 156$, co jest znacznie większe od komercyjnych czujników, których $K = 2$.
5. Komercyjne metalowe czujniki tensometryczne mają granicę odkształcenia na poziomie 0,5-3,0%. Granica odkształcenia kompozytów cementowych zbrojonych włóknami stalowymi jest prawie taka sama.
6. Liniowość kompozytów cementowych zbrojonych włóknami stalowymi jest mała.
7. Kompozyty cementowe zbrojone włóknami stalowymi zachowują zdolność wykrywania odkształceń nawet po kilkukrotnym obciążeniu wywołanym przyłożeniem znacznych naprężeń. Jest to doskonałą motywacją do dalszej pracy nad rozwojem inteligentnych materiałów dla budownictwa.

Podziękowania

Praca wspierana jest przez Scientific and Technological Research Council of Turkey [TUBITAK] w ramach Grantu nr: 110M221. Autor pragnie podziękować Sika Construction Chemicals Co. za zapewnienie pyłu krzemionkowego i superplastyfikatora oraz Bekaert Izmit Steel Cord Co. za włókna stalowe zastosowane w pracy.

strain gages. The correlation coefficient of the line the best fitting the measured points is 0.92.

The mixture S3 has 0.8% fibres volume share and a gage factor of $K = 40$, linearity $LE = 13\%$, and strain limit $SL = 1.5\%$, (Fig. 7). The gage factor is 20 times higher than the gage factor of commercial gages while it has an average strain limit (SL). The correlation coefficient of the line the best fitting the experimental points is 0.96.

The S4 mixture which has 1% of fibres volume, has a gage factor of $K = 39$, linearity $LE = 10\%$, and strain limit $SL = 1.66\%$. The gage factor is 18 times higher than the gage factor of commercial gages while the correlation coefficient of best fitting the experimental points is 0.97. The sample was loaded up to 235 kN (stress of 94 MPa) and a strain of 0.0166. After unloading, it was loaded second time. In spite of its being loaded to a moderate strain level before, the response in second loading is quite promising. In the second load, the gage factor is $K = 105$, which is 52 times higher than the commercial gages, as shown in Fig. 8b. The linearity is still low, $LE = 13\%$. The correlation coefficient of the line the best fitting the experimental points is 0.97.

The mixture S5 having 1.5% of fibres volume share has a gage factor of $K = 62$. It is 30 times more sensitive to strain than the commercial gages. It has a linearity of $LE = 15\%$. The strain limit is $SL = 0.94\%$. The correlation coefficient is 0.96, (Fig. 9a). The sample was loaded up to 235kN (94MPa stress), a strain of 0.0094 and unloaded. The sample was loaded second time up to 235 kN (94MPa). During the second loading, the gage factor was $K = 62$ and linearity $LE = 15\%$ which was the same as for the first loading. The strain limit is $SL = 0.868\%$ and the correlation coefficient of the line fitting the best is 0.88 (Fig. 9b). The same sample was loaded the third time to a force of 235 kN (94 MPa stress). The gage factor is $K = 144$ which shows that, after excessive load, the sample is still much more sensitive than commercial metal strain gages (Fig. 10a). The linearity is $LE = 16\%$, and the strain limit is $SL = 1.85$ for the third loading. The correlation coefficient is 0.96. After loading up to a strain of 0.00775, the sample was unloaded and loaded again for a fourth time with a force of 235 kN (94 MPa stress). In the fourth loading, the gage factor is $K = 156$, which is almost 80 times higher than the gage factor of commercial gages (Fig. 10b). The linearity is $LE = 21\%$ and the strain limit is $SL = 0.179$. The correlation coefficient of the line is 0.91. It is very promising to observe that after loading up to a high stress level, the sample is still very sensitive to strain. This fact is a motivation for developing smart structural materials for construction industry.

4. Conclusions

The results of the electrical resistance- strain relationship studies of steel fibre concretes vis hardening period, the following conclusions can be drawn:

1. With the samples hardening period the electrical resistivity is increasing.

Autor jest wdzięczny Wydziałowi Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu Dokuz Eylül za umożliwienie wykonania badań na urządzeniu Shimadzu.

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**, 476-483 (2003).
2. D. D. L. Chung, Review functional properties of cement –matrix composites. *J. Mater. Sci.*, **36**, 1315-1324 (2001).
3. E. Teomete, T. K. Erdem, Cement Based Strain Sensor: A Step to Smart Concrete. *Cement Wapno Beton*, **78**, 78-92 (2011).
4. D. D. L. Chung, Self-monitoring structural materials. *Mater. Sci. Eng.*, **22**, 57-78 (1998).
5. 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**, 845-852 (1997).
6. X. Fu, D. D. L. Chung, Effect of curing age on the self-monitoring behavior of carbon fiber reinforced mortar. *Cem. Concr. Res.*, **27**, 1313-1318 (1997).
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, Y. A. Yamamuro, G. B. Baston, 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 blackfilled 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. B. Han, K. Zhang, X. Yu, E. Kwon, J. Ou, Nickel particle-based self-sensing pavement for vehicle detection. *Measurement*, **44**, 1645–1650 (2011).
15. R. Rianyo, R. Potong, N. Jaitanong, R. Yimnirun, A. Chaipanich, Dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties of 0-3 barium titanate–Portland cement composites. *Appl. Phys. A*, **104**, 661–666 (2011).
16. H. Gong, Y. Zhang, J. Quan, S. Che, Preparation and properties of cement based piezoelectric composites modified by CNTs. *Current Applied Physics*, **11**, 653-656 (2011).
17. H. Xiao, H. Li, J. Ou, Modeling of piezoresistivity of carbon black filled cement-based composites under multi-axial strain. *Sensors and Actuators A*, **160**, 87–93 (2010).
18. J. Xu, W. Yao, R. Wang, Nonlinear conduction in carbon fiber reinforced cement mortar. *Cem. Concr. Comp.*, **33**, 444-448 (2011).
19. B. Chen, K. Wu, W. Yao, Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites. *Cem. Concr. Comp.*, **26**, 291–297 (2004).
20. S. Vaidya, E. N. Allouche, Strain sensing of carbon fiber reinforced geopolymer concrete, *Mat. Struct.*, **44**, 1467–1475 (2011).
2. The rise of fibres volume share in the concrete samples is causing the increase of the electrical resistivity which probably is linked with higher pores content.
3. The electrical resistance is decreasing during the compressive strain probably due to the microcracks closing and the cement matrix, fibres contact increasing.
4. In the case of the steel fibre concrete the factor gage can be even as high as $K = 156$, much higher than the commercial strain gages which $K = 2$.
5. The commercial metal strain gages have strain limits between 0.5%-3%. The strain limits of steel fibre concretes are almost the same.
6. The linearity of the steel fibre reinforced cement composites are low.
7. The steel fibre concretes maintain the strain sensing ability even after loading to the considerable stress values several times. This is a great motivation for working on developing smart materials for construction industry.

Acknowledgements

This work is supported by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) through Grant no: 110M221. The author would like to 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 grateful to Assoc. Prof. Dr. Tahir Kemal Erdem for his contributions to the work. The author thanks to the Metallurgical and Materials Engineering Department of Dokuz Eylül University for providing the Shimadzu mechanical test machine.