

Egemen Teomete

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

Badania oporności elektrycznej zaprawy cementowej zbrojonej włóknami węglowymi spowodowanej długością spękań i odkształceń w trakcie pomiarów naprężeń rozciągających przy zginaniu trójpunktowym i przy rozłupywaniu

Crack length and tensile strain correlation with electrical resistance of carbon fiber reinforced cement matrix composites measured by three-point bending test and splitting tensile test

Słowa kluczowe: materiały inteligentne, włókno węglowe, odkształcenia, spękania, oporność elektryczna, sensory

Keywords: smart materials, cement composite, carbon fiber, strain, crack, electrical resistance, self-sensing

1. Wprowadzenie

Trzęsienia ziemi, degradacja materiału i inne czynniki zmniejszają trwałość konstrukcji betonowych. Zanim upłynie zakładany czas życia konstrukcji, infrastruktura betonowa wykazuje znaczne uszkodzenia; na przykład w przypadku 30% mostów ma miejsce utrata niezawodności (1). Niezbędne jest więc monitorowanie stanu konstrukcji, aby była bezpieczna i mogła wypełniać założone w projekcie funkcje. Klasyczne sensory do oceny odkształceń mogą dostarczyć wyników w pomiarach punktowych. Natomiast monitorowanie konstrukcji betonowej wymaga zainstalowania dużej liczby takich sensorów, co jest kosztowne. Czas pracy sensorów jest ograniczony z uwagi na małą trwałość stosowanych do ich wykonania folii metalowych (2).

Prezentowane badania stanowią przyczynek do rozwoju inteligentnych materiałów i konstrukcji, w których sensory stanowią ich element składowy.

1. Introduction

Earthquakes, material degradations and other factors decrease the performance of the structures. Before the design life finishes, concrete infrastructures have material deteriorations while 30% of the bridges were found to be structurally not reliable (1). In order to protect the lives and to conduct asset management, structural health monitoring of concrete is inevitable. Classical sensors such as strain gages can acquire point wise measurement. A vast number of strain gages are needed to monitor a structure which increases costs. The life time of the metal foil strain gages is limited due to low durability (2). This study is a contribution of self-sensing smart materials and structures in the construction industry.

The electrical resistance of the cement composite decreases by carbon fibers addition. Electrical resistance is changing by application of load (3-5). It was reported that the electrical resistance was correlated with compressive strain (6). In this study, the

Oporność elektryczna betonu zmniejsza się po wprowadzeniu włókien węglowych. Stwierdzono, że oporność zmniejsza się też pod działaniem obciążeń (3-5), jak również, że oporność elektryczna jest skorelowana z wielkością odkształcenia pod działaniem naprężenia rozciągającego (6).

W prezentowanej pracy zbadano związek pomiędzy naprężeniem rozciągającym, a opornością elektryczną matrycy cementowej zbrojonej włóknami węglowymi, podczas pomiarów odkształceń próbek betonowych pod działaniem naprężenia rozciągającego przy rozłupywaniu.

W celu monitorowania oporności elektrycznej kompozytów cementowych posłużono się metodą polegającą na zastosowaniu dwu lub czterech elektrod. W metodzie z dwiema elektrodami dopływ prądu i pomiar napięcia jest przeprowadzany za pomocą tych samych elektrod. W metodzie z czterema elektrodami jedna para elektrod stanowi źródło prądu, a druga mierzy napięcie. O ile w pierwszej metodzie wynik pomiaru zależy od pola przekroju próbki i odległości pomiędzy elektrodami, to w drugiej metodzie takiej zależności nie ma (7, 8). Zastosowano więc metodę z czterema elektrodami w powiązaniu z pomiarem odkształcenia betonowej beleczki pod działaniem naprężenia rozciągającego przy rozłupywaniu, lub pomiarem naprężenia rozciągającego przy zginaniu trójpunktowym.

Badając materiały inteligentne umieszczano elektrody na obwodzie (metoda perymetryczna) lub wewnątrz próbek. W metodzie z elektrodami wewnątrz próbek płytkę lub siatkę przewodzącą wprowadzano do materiału, a w metodzie perymetrycznej przewod lub pastę przewodzącą nakładano na obwodzie próbek (1, 9-12). W pracy zastosowano jako elektrodę siatkę z drutu miedzianego umieszczoną w matrycy cementowej.

Jak podawano wcześniej, uszkodzenia wpływają na oporność elektryczną betonu zbrojonego włóknami węglowymi, jednakże dotychczas nie badano jednocześnie zmiany długości spękań w powiązaniu ze zmianą oporności (13). Takie badania przeprowadzono w prezentowanej pracy, określając związki pomiędzy przewodnością i wielkością generowanych spękań.

Były też prowadzone inne badania dotyczące stosowania składników betonu jako sensorów. Badano betony cementowe zawierające ziarna niklu do badania ruchu pojazdów (14). Nieliniowe zachowanie kompozytów cementowych zbrojonych włóknami węglowymi rozważano w oparciu o teorię dotyczącą efektu tunelowego w powiązaniu z prawem Ohma (15). Badano też efekt piezoelektryczny wynikający z wprowadzenia nanorurek węglowych do matrycy cementowej (16), jak również właściwości dielektryczne, ferroelektryczne i piezoelektryczne kompozytu cementowego z dodatkiem tytanianu baru (17). Badanie wytrzymałości za pomocą trójpunktowego zginania i pomiar wytrzymałości na ściskanie zastosowano do oceny możliwości zastosowania geopolimeru zbrojonego włóknami węglowymi jako czujnika (18). W badaniach kompozytów o właściwościach piezoelektrycznych poddawanych działaniu zmiennych obciążeń mechanicznych o niskiej częstotliwości stwierdzono liniową zależność wielkości

relationship between the tensile strain and electrical resistance change was investigated by use of splitting tensile test for carbon fiber reinforced cement matrix composites.

Two and four electrode methods were used to monitor the electrical resistance of the cement composites. Current is supplied and voltage is measured from the same two electrodes in two electrode method. In four electrode method, different electrode pairs are utilized for current supply and voltage measurements. The sample cross section and the distance between electrodes affect the measurements in two electrode method while these are not affected by four electrode method (7, 8). Four electrode method was used in the splitting tensile test and notched bending test in this study.

While testing smart materials, perimetral and embedded electrode configurations were used. In embedded electrode method, a conductive plate or mesh is inserted in the material while in perimetral electrode method, a conductive wire or paint was stick to the perimeter (1, 9-12). Copper wire mesh was embedded in the cement matrix composites as electrode in this study.

It was reported that damage affects the electrical resistance of carbon fiber reinforced concrete, while simultaneous measurement of crack length with electrical resistance has not been conducted (13). In this study, simultaneous measurement of crack length and electrical resistance had been conducted and relations between them were investigated.

There have been studies on self-sensing cement based materials. Cement matrix composites with nickel particle inclusions were tested for vehicle detection performance (14). Tunneling effect theory and Ohm's law were used to investigate the nonlinear current - voltage behavior of carbon fiber reinforced cement composites (15). The performance of carbon nano-tube as an inclusion in cement matrix for piezo-electric properties was studied (16). 0-3 barium titanate containing Portland cement composite was investigated for its dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties (17). Compression and three point bending tests were used for strain sensing of carbon fiber reinforced geopolymer concrete (18). Cement matrix 2-2 piezoelectric composite was investigated under low frequency mechanical load. It was reported that there is a linear relation between the piezoelectric coefficients and frequency, while there is no relation between the magnitude of the applied load and piezoelectric coefficients (19).

Electrical impedance spectra of short conductive fiber-reinforced composites were analyzed and related numerical simulations were verified by experimental results (20). DC conductivity and impedance spectroscopy measurements were conducted to determine the intrinsic conductivities of short conductive fibers in cement matrix composites. It was reported that conductivity versus aspect ratio relation can be used to determine the fiber aspect ratio in randomly distributed fiber composites (21). DC and AC electrical properties were correlated with mechanical properties obtained from direct notched tension test. The effects of crack bridging, fiber volume fraction and crack propagation on the electrical properties were

efektu piezoelektrycznego od częstotliwości zmian obciążenia, ale nie stwierdzono związku pomiędzy wielkością przyłożonego obciążenia a efektem piezoelektrycznym (19).

Analizowano impedancję elektryczną betonu zbrojonego krótkimi przewodzącymi włóknami węglowymi i weryfikowano wyniki metodami symulacji numerycznej (20). Pomiar przewodnictwa i pomiary spektroskopowe impedancji prowadzono w celu określenia przewodnictwa włókien w matrycy. Stwierdzono, że ustalona w tych badaniach zależność zmierzonych wartości przewodnictwa od postaci włókien może być pomocna w ocenie wpływu kształtu włókien rozproszonych w sposób przypadkowy w fibrobetonach (21). Właściwości elektryczne pozostają w ścisłym związku z właściwościami mechanicznymi zmierzonymi bezpośrednio podczas pomiaru naprężenia rozciągającego przy zginaniu trójpunktowym beleczek z karbem [metoda RILEM TC 187]. Opisano wpływ przecinania się spękań, ich propagacji i udziału objętościowego włókien na właściwości elektryczne matrycy cementowej (22). Odszczepianie i wrywanie pojedynczych włókien stalowych z matrycy cementowej badano przez pomiar impedancji. (22). Stwierdzono, że wyniki pomiarów impedancji są powiązane z powstawaniem spękań (23). Przedmiotem badań był także wpływ morfologii włókien, udziału objętościowego, ich orientacji oraz kształtu na wielkość impedancji. Opisano związek pomiędzy mikrostrukturą i widmami impedancji (24). Ważne z punktu widzenia rozmieszczenia włókien w betonie zagadnienia orientacji, segregacji i tworzenia skupień w świeżej mieszance betonowej oceniali Woo i in. (25) z punktu widzenia zmian impedancji. Badano efekt strefy przejściowej zaczyn - kruszywo na przewodnictwo zaprawy cementowej. Strefa przejściowa nie wpływała na ogólne przewodnictwo elektryczne betonu, jednak występują różnice w przewodnictwie stref przejściowych i matrycy cementowej. Proces hydratacji ma znaczny wpływ na te różnice, które wynoszą od 0,5 do 0,8 (26). Transport wody w funkcji oporności elektrycznej modelowano metodą elementów skończonych. Opracowano nową metodę określania położenia frontu wnikania wody opierając się na pomiarach właściwości elektrycznych betonu o różnym stopniu nasycenia wodą (27). Beaudoin (28) pracował nad zagadnieniem prądów powierzchniowych w płytach z betonu przewodzącego, stosowanych jako nawierzchnia odladzająca i zaproponował równanie, które potwierdził doświadczalnie.

Han i in. (29) opisywali liniowy wzrost oporności kompozytów cementowych zawierających nanorurki węglowe ze zmianą natężenia prądu z uwagi na efekt pojemnościowy; oporność ulegała zmianie również pod wpływem przyłożonego naprężenia. Wymienieni autorzy stwierdzili, że reaktancja pojemnościowa nie jest zależna od obciążenia. Właściwości piezoelektryczne kompozytów cementowych zawierających wielościennie nanorurki węglowe były badane przy zmiennej zawartości tego dodatku i zmiennym w/c (30). Badano też zaczyny cementowe z włóknem węglowym i sadzą, które poddawano pojedynczym i cyklicznym naciskom w celu znalezienia odpowiedzi na powstające w materiale naprężenia (31). Bezprzewodową metodę monitorowania odkształceń pod działaniem naprężeń ściskających przeprowadzono po wprowadzeniu do zaczynu

report (22). Bond disruption and pullout of single steel fiber from cement matrix were investigated by electrical impedance measurements. Electrical impedance measurements were found to be sensitive to cracking (23). The effects of fibers aspect ratio, fiber volume fraction, fibers orientation and fiber shape on electrical impedance spectra were studied. Microstructure property – impedance spectra relations were reported (24). Important fibers dispersion issues of orientation, segregation and clumping in fresh cement matrix composites were evaluated by AC impedance spectra (25). The effect of interfacial transition zone on conductivity of cement mortars was investigated. The transition zone did not affect the global electrical conductivity while there were differences between the conductivities of transition zone and cement matrix. Hydration had a considerable effect on these differences when it was between 0.5 and 0.8 (26). The propagation of moisture coupled with electrical resistance of concrete was modeled by finite element method. A new method to detect the position of moisture front was developed basing on one electrical measurement and properties of moisture saturated and unsaturated concrete (27). Beaudoin (28) worked on overlay current in a conductive concrete snow melting system. An equation for overlay current was proposed and calibrated with experimental results.

Han et al. (29), reported that the multi walled carbon nanotube MWNT/cement composites had a linear increase of resistance by changing DC current due to capacitance effect, while application of strain also changed the resistance. Capacitance was found to be insensitive to loading. The piezo-resistive sensitivities of MWCNT/cement composites were investigated for different nanotubes contents and w/c ratio (30). Carbon fiber and carbon black filled cement based mixes were tested under single and cyclic compressive loads and strain sensitivity was determined (31). Nickel powder filled cement based mix was used for developing wireless monitoring of compressive strain (32). The sensitivity of nickel powder reinforced cement based mixes was reported for compressive strain (33). Piezoresistivity of carbon black reinforced cement based materials was modeled using tunneling effect theory (34).

Le et al. (35) worked on the resistivity change with crack length in cementitious smart composite using experimental and analytical methods. Tensile strain sensitivity of steel fiber concretes was determined using splitting tensile test (36). Transverse strain sensitivity of steel fiber concrete was determined by applying the strain perpendicular to electron flow in the material (37). The relation between crack length and electrical resistance was determined for steel fiber reinforced cement composite (38). Correlation between compressive strain and electrical resistance for carbon fiber concrete was investigated (39). Chung (40) presented the strain – electrical resistance relationship for tensile test of carbon fiber cement concretes. Han et al. (41) presented the strength development and test of self-sensing concrete for smart structures. Cement based strain sensors were tested at various stress states in a bending concrete beam (42). Han et al. (43) developed a wireless stress – strain measurement system with pressure – sensitive nickel powder – filled cement- based sensors. Carbon

proszku metalicznego Ni (32). Podobne badania prowadzono także w innej pracy (33). Piezorezystywność kompozytu cementowego zawierającego sadzę modelowano w oparciu o teorię odnoszącą się do efektu tunelowego (34). Le i in. (35) oceniali zmiany oporności w funkcji długości spękań w inteligentnych kompozytach betonowych stosując metody eksperymentalnie i analityczne. Zmiany odkształcenia pod działaniem naprężenia rozciągającego w kompozytach cementowych zbrojonych włóknami stalowymi określono w badaniach wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu (36). Naprężenia poprzeczne w betonach zbrojonych włóknami stalowymi określano przez przyłożenie obciążeń w kierunku prostopadłym do przepływu elektronów w materiale (37). Związek pomiędzy długością spękań i opornością elektryczną w kompozytach cementowych zbrojonych włóknami stalowymi badał także Teomete (38), a korelację pomiędzy naprężeniem ściskającym a opornością w betonach zbrojonych włóknami węglowymi w pracy (39). Chung (40) przedstawił związek odkształcenia z opornością elektryczną w przypadku badań wytrzymałości na rozciąganie betonów zbrojonych włóknami węglowymi. Z kolei Han i in. (41) opisali konstrukcję z inteligentnego betonu zawierającego składnik będący sensorem naprężeń. Sensory cementowe badano przy zmiennym stanie obciążeń beleczek betonowych poddawanych zginaniu (42). W innej pracy Han i in. (43) zastosowali bezprzewodowe układy pomiarowe z sensorami cementowymi zawierającymi metaliczny proszek Ni. Betony zawierające sadzę i włókna węglowe poddawano pojedynczemu i cyklicznemu obciążaniu; stwierdzono odwracalną piezorezystywność w stanie elastycznym (44). Układ elektrod, metoda pomiaru i rejestracji danych w przypadku sensorów cementowych z włóknami węglowymi zostały podane w pracy (45). Prefabrykowane i osadzone „in situ” sensory betonowe zawierające nanorurki węglowe zastosowano w celu analizy ruchu pojazdów; osiągnięto dobrą jakość detekcji i niski poziom fałszywych sygnałów (46).

McCarter i in. (47) badali oporność elektryczną masy betonowej za pomocą spektrometru impedancyjnego. Przedstawili wpływ medium pomiarowego i częstotliwości rezonansowej (47). Fursa i in. (48) badali głębokość spękań w betonie w oparciu o elektro-mechaniczną odpowiedź na wzbudzenie pulsacyjne. Teomete (49) opracował metody pomiaru długości spękań i odkształceń w kompozytach cementowych zbrojonych włóknami węglowymi, o długości 13 mm. Teomete i Kocyigit (50) stwierdzili liniową zależność oporności elektrycznej i naprężenia ściskającego w betonach zbrojonych włóknami stalowymi. Teomete (51) badał także wpływ temperatury i wilgotności na oporność elektryczną oraz działanie czujnika naprężenia i spękań w inteligentnych kompozytach cementowych zbrojonych włóknami stalowymi; stwierdził maksymalną wielkość naprężenia ściskającego w warunkach wilgotności odpowiadającej minimum oporności elektrycznej.

W prezentowanej pracy przeprowadzono badania pięciu betonów zbrojonych włóknami węglowymi o długości 3 mm. Sporządzono kostki o boku 5 cm i beleczki 4x4x16 cm. Badano wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu w celu określenia zależności pomiędzy naprężeniem rozciągającym i opornością elektryczną

black and carbon fiber reinforced cement based composites were tested under single and cyclic compressive loads; piezoresistivity was found to be reversible and stable in the elastic regime (44). Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors were investigated; recommendations for electrode design and measurement were reported (45). Pre-cast and cast-in-place self-sensing CNT concrete sensors were tested for traffic detection; a high detection rate and a low false-alarm rate were achieved (46).

McCarter et al. (47) evaluated the bulk electrical resistivity of concrete using 2 probe and 4 probe AC impedance spectroscopy. Effects of contact medium and AC frequency on impedance spectroscopy were presented (47). Fursa et al. (48) worked on crack depth estimation of concrete by electromechanical response due to pulse excitation. Teomete (49) worked on measurement of crack length sensitivity and strain gage factor of carbon fiber reinforced cement matrix composites which had 13 mm carbon fibers. Teomete and Kocyigit (50) studied electrical resistance - compressive strain relationship of steel fiber reinforced cement composites; strong linear relationship was reported between electrical resistance change and strain. Teomete (51) investigated the effect of temperature and moisture on electrical resistance, strain sensitivity and crack sensitivity of steel fiber reinforced smart cement composite; it was found that the maximum gage factor for compressive strain was obtained at a moisture content which leads the minimum electrical resistance.

In this study, five different carbon fiber reinforced cement matrix mortars were designed with fibers having length of 3 mm. Three samples of 5 cm cube and three samples of 4x4x16 cm rectangular prisms were casted and cured. Splitting tensile test was conducted to determine the relation between the tensile strain and electrical resistance change for carbon fiber- cement matrix composites. Flexural tensile strength test [Standad EN 14651] was applied to investigate the relation between the crack length and electrical resistance change. Simultaneous direct measurement of crack length has been conducted for self-sensing carbon fiber mortar. Novel performance measures for crack sensitivity were defined. Relations between the crack length – electrical resistance change and tensile strain – electrical resistance change were presented. The variation of crack sensitivity, gage factor and electrical resistance with fiber volume percent was discussed.

2. Materials and methods

Five different carbon fiber reinforced cement matrix composites were designed and tested in this study. CEM I 42,5 R cement was used in the mixes. For all mixes, the mass ratio of sand/cement is 1; silica fume /cement is 10%; water/cement ratio is 0.4; superplasticizer Sika Visco Crete High Tech 30/cement is 2%. The mixes C02, C05, C08, C1 and C15 have 0.2, 0.5, 0.8, 1, 1.5 volume percent of 3 mm carbon fibers, respectively. From each mix, three samples of 5 cm cube and three samples of 4x4x16 cm rectangular prisms were cast. A total of 30 samples were cast.

kompozytów cementowych zbrojonych włóknem węglowym. Badania metodą trójpunktowego zginania beleczek z karbem przeprowadzono w celu zbadania związku pomiędzy przyrostem długości spękań i zmianami oporności elektrycznej. Równocześnie mierzono bezpośrednio długość spękań w celu określenia właściwości materiału zbrojonego włóknami węglowymi, jako sensora. Jest to nowa metoda wskazująca na możliwości stosowania takich czujników w pomiarach uszkodzeń elementów betonowych. Przedstawiono związki pomiędzy długością spękań i opornością elektryczną, jak również pomiędzy odkształceniem pod działaniem naprężenia rozciągającego i opornością elektryczną. Przedyskutowano zmiany czułości sensora, wpływ czynników aparaturowych i zmiany oporności w funkcji udziału objętościowego włókien.

2. Materiały i metody badań

Badania przeprowadzono na pięciu zaprawach zbrojonych włóknami węglowymi, do sporządzenia których zastosowano przemysłowy

Tablica 1 / Table 1

Właściwości włókien węglowych zastosowanych w pracy na podstawie informacji producenta DowAKSA Akrilik Co

The properties of carbon fibers used in the experiments (data supplied by carbon fiber manufacturer DowAKSA Akrilik Co.)

Średnica Diameter μm	Gęstość Density g/cm ³	Wytrzymałość na rozciąganie Tensile strength MPa	Moduł sprężystości Modulus of Elasticity GPa	Odkształcenie przy zrywaniu Strain at rupture %
7	1.75	3500	235	1.5

The XRD analysis of the quartz sand showed that it has calcite admixture. The maximum particles size of the sand used was 2 mm.

The average particle size of the silica fume was 100 nm. Silica fume is mainly composed of silicon-dioxide.

The Sika ViscoCrete High Tech 30 which is modified polycarboxylate based polymer was used as a high range superplasticizer.

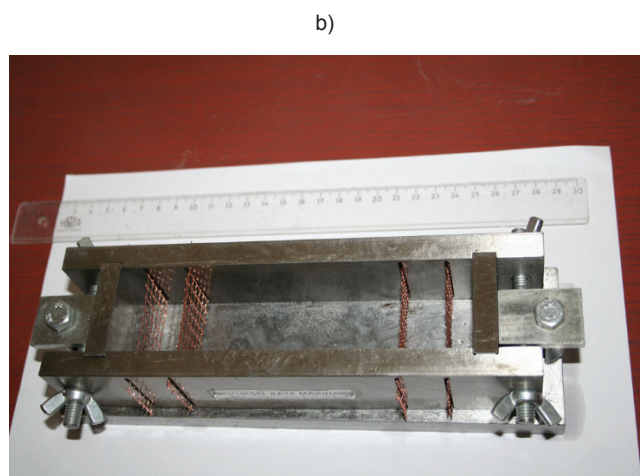
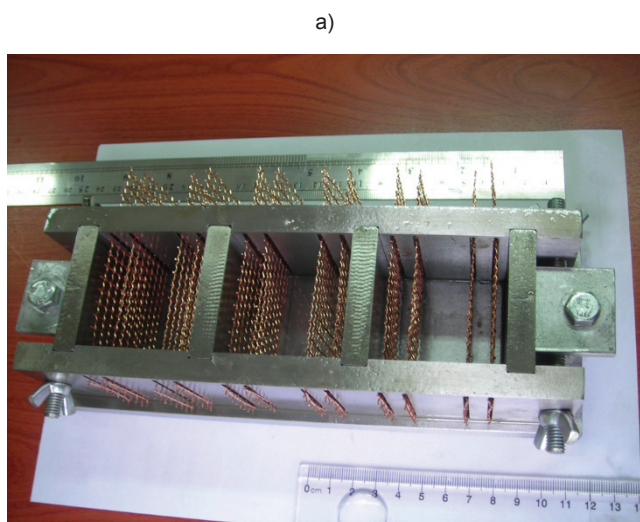
Polyacrylonitrile (PAN) based carbon fiber of 3 mm in length was used (product of DowAKSA Akrilik Co.). The diameter of the carbon fiber is 7 μm. The properties of the carbon fiber are presented in Table 1.

Copper wire mesh was used as electrode with wire diameter of 600 μm.

Special molds were designed and manufactured for this study. The 5 cm cube molds have 4 of 46 mm long, 2 mm wide slots on either side to pass the copper wire mesh as electrode (Fig. 1a). The 4x4x16cm rectangular prism molds have the same slots on either side (Fig. 1b). The copper wire mesh was placed in the molds as is shown in Fig. 1a-b. The mix was prepared with a flat beater and cast at two levels in the molds.

The sand, cement, silica fume were added to the mixer bowl each in four parts and mixed respectively. Water and superplasticizer was mixed separately, and then added to the dry mixture in 4 parts; each addition was mixed separately. The cement mortar was mixed until homogeneous mixture was assured. The carbon fibers were added in 5 to 8 parts, each part having small quantities in order to prevent fibers accumulation and to achieve homogeneous fibers dispersion. After each fibers part addition, the mixture was homogenized. After all fibers were added, the mixture was mixed with 140 rpm for 30 seconds; it was mixed with 280 rpm for 90 seconds. Then it was mixed with hand for 15 seconds to remove the material stuck to the bowl and this material was added into the mix. At the end it was mixed with 280 rpm for 60 seconds.

Each part of mortar was beat by hand with a rod and the mold was vibrated to minimize the air content in the mix. 24 hours after casting, the samples were demolded and cured in the air of 100% relative humidity for 28 days. After 28 days the samples were cured in laboratory environment for 7 days. The 5 mm deep notches, at the middle of the rectangular prisms, were cut by a high speed



Rys. 1. a) Forma na kostki o krawędzi 5 cm z elektrodami z siatki miedzianej, b) forma na beleczki z elektrodami z siatki miedzianej

Fig. 1. a) 5 cm cube mold with copper wire mesh electrodes; b) rectangular prism mold with copper wire mesh electrodes

cement CEM I 42,5R. We wszystkich mieszankach zawartość piasku była równa ilości cementu, dodatek pyłu krzemionkowego stanowił 10% masy cementu, stosunek w/c wynosił 0,4 i domieszka superplastyfikatora Sika ViscoCrete High Tech 30 stanowiła 2% masy cementu. Mieszanki oznaczone C02, C05, C08, C1 i C15 zawierały odpowiednio 0,2; 0,5; 0,8; 1 i 1,5% udziału objętościowego włókien węglowych, o długości 3 mm. Z każdej mieszanki uformowano po trzy kostki o krawędzi 5 cm i po trzy beleczki 4x4x16 cm. Badaniami objęto więc 30 próbek.

Analiza rentgenograficzna piasku kwarcowego, o maksymalnej średnicy ziaren 2 mm, wykazała że zawiera on domieszkę kalcytu.

Średnia wielkość ziaren pyłu krzemionkowego wynosi 100 nm. Zastosowana domieszka znacznie zmniejszająca zawartość wody - superplastyfikator Sika ViscoCrete High Tech 30 jest polimerem polikarboksyłanowym.

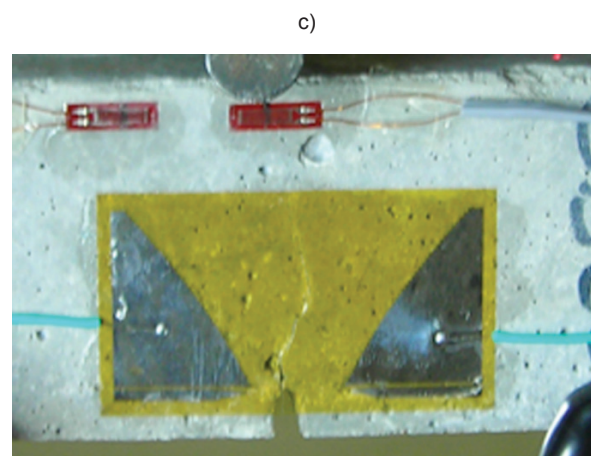
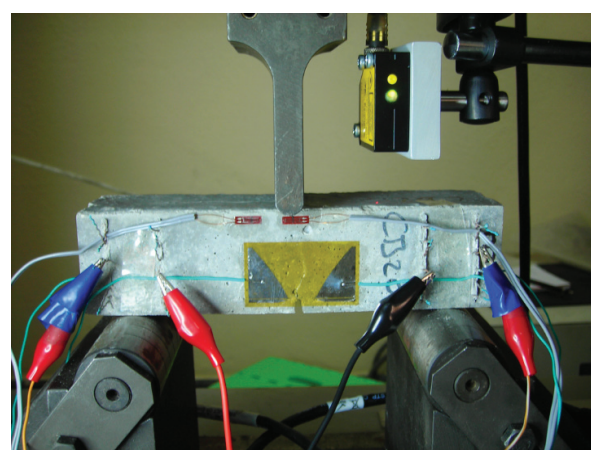
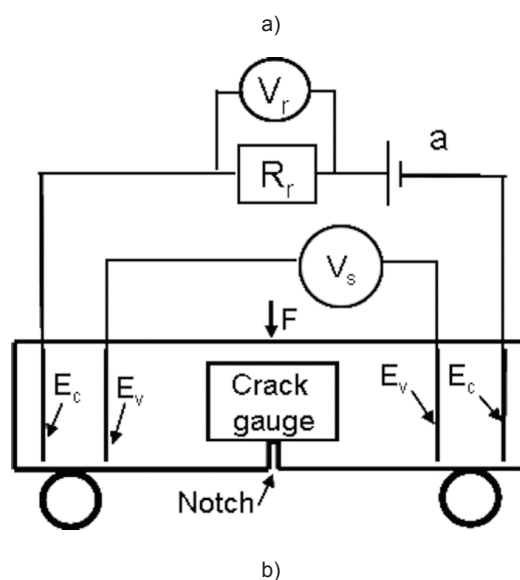
Włókna węglowe o długości 3 mm i średnicy 7 μm zostały wyprodukowane z poliakrylonitrylu (PAN) i dostarczone przez DowAKSA Akrylik Co. Właściwości włókien podano w tabelicy 1. W pracy zastosowano elektrody pomiarowe w postaci siatek z drutu miedzianego o średnicy 600 μm .

Próbki formowano w specjalnie zaprojektowanych i wykonanych formach. Kostki o krawędzi 5 cm miały z każdej strony po 4 szczeliny o długości 46 mm i szerokości 2 mm w celu zainstalowania elektrod (rysunek 1a). Podobne szczeliny miały formy na beleczki 4x4x16 mm (rysunek 1b). Rozmieszczenie elektrod w postaci siatki miedzianej pokazano również na rysunkach 1 a i b. Mieszankę układano w formach w dwóch warstwach.

Składniki stałe: cement, piasek i pył krzemionkowy wprowadzono do mieszarki partiami, wodę i domieszkę mieszano oddzielnie, a następnie dodawano do mieszaniny składników stałych, po czym uśredniano zaprawę w mieszarce. Włókna węglowe wprowadzono partiami aby uniknąć powstawania skupień i aby osiągnąć równomierne rozproszczenie; operacja wprowadzenia włókien i mieszanina odbywała się w 5 – 8 etapach. Zaprawę z włóknami mieszano przez 30 sekund, przy czym obroty mieszarki wynosiły 140 na minutę oraz przez 90 sekund przy 280 obrotach na minutę. Mieszankę zgarniano ze ścianek w ciągu 15 sekund i znów mieszano przez 60 sekund przy 280 obrotach na minutę. Każdą warstwę zaprawy ubijano ręcznie w formie, a następnie formy z zaprawą poddawano wibracji, w celu odpowietrzenia. Po 24 godzinach próbki rozformowano i przechowywano przez 28 dni w powietrzu o wilgotności względnej 100%. Po 28 dniach kondycjonowania próbki przetrzymywano przez 7 dni w warunkach laboratoryjnych. W środku beleczek z zaprawy nacinano karby o głębokości 5 mm za pomocą piły elektrycznej. Szerokość nacięcia wynosiła 3 mm. Karby pozwalały na pomiar zwiększania się długości rys.

2.1. Pomiary naprężeń rozciągających przy zginaniu trójpunktowym

Pomiary naprężeń rozciągających przy zginaniu trójpunktowym z równoczesną kontrolą przemieszczenia prowadzono w urzą-



Rys. 2. a) Schemat obwodu elektrycznego w próbie zginania, b) próbka poddana naprężeniu rozciągającemu przy zginaniu trójpunktowym c) rysa tworząca się podczas próby zginania

Fig. 2. a) The circuit diagram of the bend test. b) the flexural tensile strength test c) the crack formed at the test

electric saw. The width of the notch was 3 mm. The notch of bars was used to control the location of crack growth.

2.1. Three points bending test

During the three points bending test the load rate was maintained at such level to assure the controlled displacement of 0.2 mm/

dzeniu wytrzymałościowym firmy Shimadzu, przy szybkości przemieszczania elementu zginającego 0,2 mm/min. W próbkach zainstalowano cztery elektrody. Źródłem prądu (I_c) były 2 elektrody (E_c), a napięcie (V_s) mierzono za pomocą elektrod (E_s) umieszczonych w próbkach, jak to przedstawiono na rysunkach 2a-b. Opór odniesienia wynosił $R_r=1000 \Omega$, a mierzone napięcie odniesienia V_r (rysunek 2a). Z każdej strony belki, tuż ponad karbem, przymocowane były czujniki mierzące zmiany długości rysy; po zakończeniu próby zginania pokazano ją na rysunku 2c.

Zmiany obciążenia, przesuw głowicy wywierającej nacisk, wielkości napięcia V_s i V_r i dane zbierane przez czujniki, rejestrowane były z częstotliwością 0,1 sekundy (rejestrator firmy National Instruments, rysunek 2d).

2.2. Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

Badanie wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu z rejestracją odkształcenia przeprowadzono przy szybkości przemieszczania elementu niszczącego wynoszącej 2.5 mm/min. Badanie przeprowadzono zgodnie z normą EN 12390-6 "Badania betonu – część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań" (52). Podobnie jak w przypadku pomiarów naprężenia rozciągającego przy zginaniu trójpunktowym, stosowano cztery elektrody [rysunki 3a-b]. Mierzone napięcie przy oporze odniesienia wynoszącym $R_r=1000 \Omega$ oznaczono jako V_r .

Odkształcenie próbki przy rozciąganiu mierzono za pomocą czujników w płaszczyźnie poziomej, jak to pokazano na rysunku 3a-b. Próbka uległa uszkodzeniu podczas rozciągania w płaszczyźnie poziomej, czego wynikiem jest pionowa rysa widoczna na rysunku 3d. Zniszczenie następuje w wyniku kruchego pęknięcia albo poprzez propagację spękania pokazaną na rysunkach 3c-d, co jest wynikiem zbrojenia włóknami. Wszystkie próbki wykazują podobny układ spękań, jak to pokazano na rysunkach 3c-d.

2.3. Analiza wyników badań

W przypadku prób zginania i rozciągania przy rozłupywaniu natężenie prądu I_c i oporność elektryczną próbki R_s obliczano na podstawie prawa Ohma stosując równania [1 i 2].

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

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

Dla każdego punktu pomiarowego obliczano % zmiany oporności próbki (%R) na podstawie równania [3]. R_{so} jest to oporność elektryczna próbki nie poddanej obciążeniu.

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

W pracy przyjęto, że odpowiedź kompozytu cementowego jako sensora [SC] na powstawanie rys w próbkach, jest definiowana

min and a Shimadzu press testing machine was used. Embedded four electrode method was applied. During the test, DC current (I_c) was supplied from outer two electrodes (E_c) while voltage of the sample (V_s) was measured using inner two electrodes (E_s), as shown in Figs. 2a-b. There was a reference resistance, $R_r=1000 \text{ Ohm}$, in electric circuit with the sample. The voltage of the reference resistance V_r was also measured (Fig. 2a). Two TML brand crack gages were attached on either sides of the rectangular prism samples, just above the notch to monitor the real-time crack length. The crack formed at the end of the test is presented in Fig. 2c.

The load, the stroke of the loading head, the voltages V_s and V_r , the crack gages data were recorded by a PC at a rate of 10 Hz (10 data at every second) by using a National Instruments data logger (Fig. 2d).

2.2. Splitting tensile test

Displacement controlled splitting tensile test was conducted at a load rate of 2.5 mm/min. Spherical loading heads conforming to EN 12390-6 "Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens" (52) were used as the test. Similarly to three points bending test, embedded four electrode method was used. DC current (I_c) was supplied by using the outer two electrodes while the voltage of the sample was measured using the inner two electrodes (Fig. 3a-b). The voltage of the reference resistance $R_r=1000 \text{ Ohm}$ was measured as V_r .

The tensile strain was measured during the test by the strain gages in horizontal direction as seen in Fig. 3a-b. The sample fails due the tensile strain in the horizontal direction which causes the vertical crack seen in Fig. 3c-d. The samples fail either by brittle fracture or in a ductile way by progressive crack propagation as presented in Figs. 3c-d respectively, due to their fiber content.

All samples have similar crack patterns as in Fig. 3c-d.

2.3. Evaluation of the test results

For the bending test and split tensile test; the current on the circuit I_c and the electrical resistance of the sample R_s were determined by using Ohm's law using Eqs. 1-2, respectively.

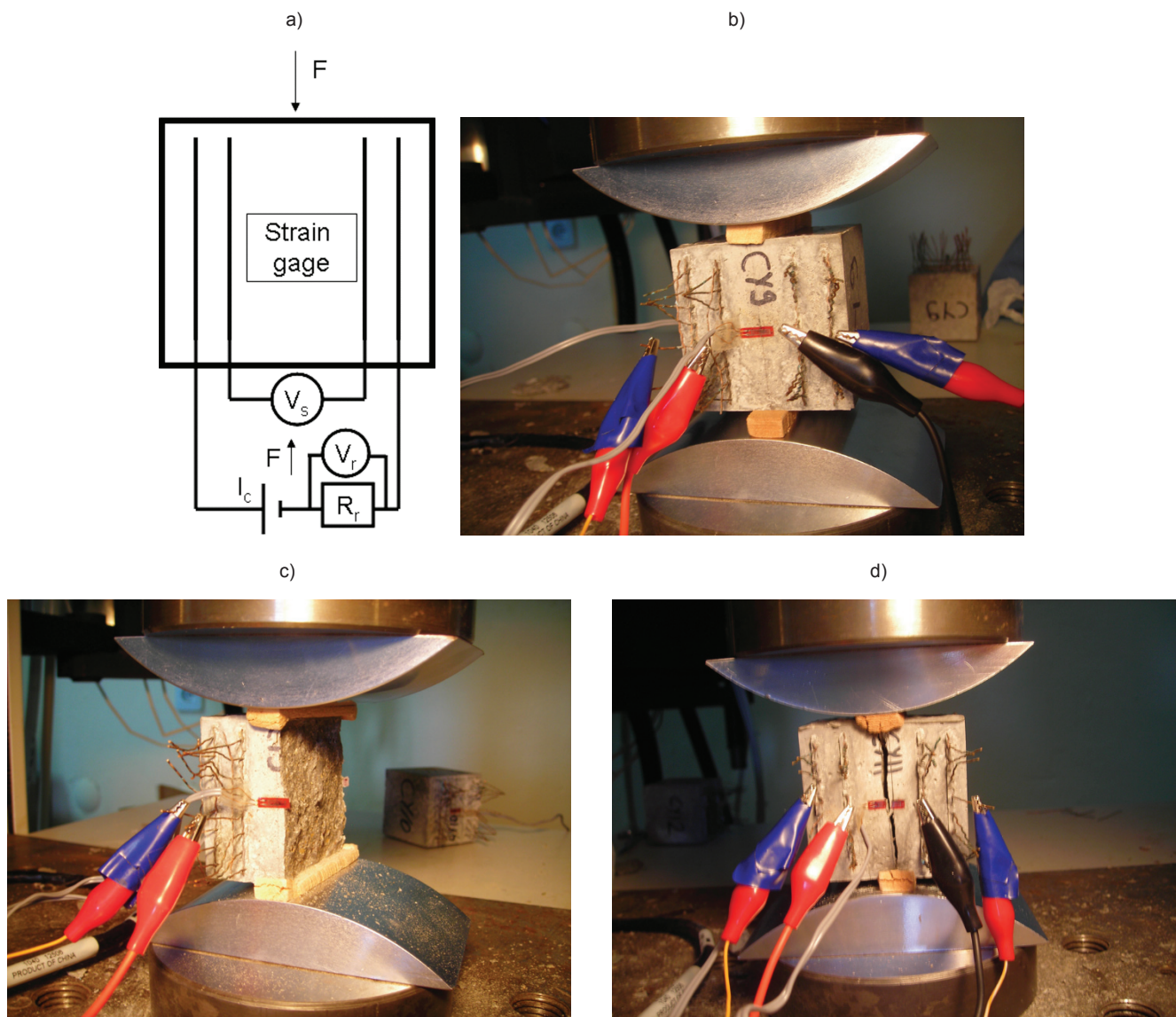
$$I_c = \frac{V_r}{R_r} \quad [1]$$

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

At any time of the test, the percent % change in the electrical resistance of the sample (%R) was determined by Eq. 3. R_{so} is the electrical resistance of the sample without any load.

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

Performance measures of the cement composites for crack detection have been first defined in this work. Crack sensitivity (SC)



Rys. 3. a) Schemat obwodu elektrycznego dla próby rozciągania przy rozłupywaniu. b) Badanie metodą rozciągania przy rozłupywaniu. c) Próbką uszkodzona w wyniku kruchego pęknięcia. d) Próbką uszkodzona w wyniku odkształcenia plastycznego

Fig. 3. a) The circuit diagram of the splitting tensile test b) The tensile splitting test c) Sample with brittle failure d) Sample with ductile failure

jako stosunek zmiany oporności elektrycznej w procentach (% R) do długości spękań. Jest to zatem procentowa zmiana oporności elektrycznej przypadająca na jednostkę przyrostu długości spękania w mm. Na podstawie analizy literatury autor może stwierdzić, że tak zdefiniowana odpowiedź kompozytu cementowego jako sensora, na wzrost długości rysy (SC), została zastosowana dla tego typu materiałów po raz pierwszy, w prezentowanej pracy.

Liniowa korelacja odpowiedzi sensora jako kompozytu cementowego (LEC) wyraża procent maksymalnej różnicy pomiędzy krzywą na wejściu i na wyjściu [% R w funkcji krzywej długości rysy] i w całym zakresie pomiarowym spełnia warunki regresji liniowej. W miarę jak liniowość odpowiedzi kompozytu cementowego jako sensora (LEC) ulega zmniejszeniu, błąd pomiaru długości rysy zmniejsza się również. Liniowość odpowiedzi sensora w postaci kompozytu cementowego została również stwierdzona po raz pierwszy w tej pracy.

of cement composite is defined as the ratio of % change in the electrical resistance (% R) to crack length. Thus, it is the % change of electrical resistance per unit crack length advancement in mm. To the best knowledge of the author, the crack sensitivity (SC) has been first defined in this work for cement based composites.

Linearity for crack sensitivity (LEC) is the percent of maximum difference between input-output curve (% R versus crack length curve) and fitted linear regression line, to full scale output. As the linearity for crack sensitivity (LEC) decreases, the error in measurement of crack length decreases. Linearity for crack sensitivity has also been defined for the first time in this study, to the best knowledge of the author.

The performance measures of a strain gage are gage factor (K) and linearity (LE). For the measure of strain sensitivity of the cement composites, gage factor is defined as fractional change in electrical resistance per unit strain as in Eq. 4. The sensor is more sensitive to strain as the gage factor is higher. The gage factor of

Jako metodę przedstawiania wyników pomiarów odkształceń próbek autor proponuje współczynnik pomiarowy K i czynnik określający liniowość zależności LE . W celu wyznaczenia odpowiedzi sensora, którym jest kompozyt cementowy, przyjmuje się ułamek zmiany oporności elektrycznej na jednostkę odkształcenia, co opisuje równanie [4]. Sensor jest tym bardziej czuły na zmianę odkształcenia im ten czynnik jest większy. Współczynnik pomiarowy metalowych czujników tensometrycznych wynosi około 2. Liniowość LE jest procentową maksymalną różnicą pomiędzy krzywą wejście - wyjście [krzywa $\%R$ w funkcji odkształcenia] dopasowaną metodą regresji liniowej, dla całego zakresu wartości na wyjściu (R_{fs}), jak to podaje równanie [5]. Błąd pomiaru odkształcenia maleje z odstępstwem od liniowości omawianej zależności.

$$K = \frac{(R - R_{so}) / R_{so}}{\Delta \varepsilon} \quad [4]$$

$$\%LE = \left(\frac{\Delta_{max}}{\%R_{fs}} \right) \times 100 \quad [5]$$

3. Omówienie wyników

Badania przeprowadzono na pięciu zaprawach zbrojonych włóknami węglowymi. Z każdej mieszanki sporządzono po trzy próbki w kształcie kostek o krawędzi 5 cm, które poddano badaniom wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu i po trzy próbki w kształcie belek 4x4x16 cm, które poddano trójpunktowemu zginaniu. Wyznaczono zależności pomiędzy odkształceniem podczas próby rozciągania przy rozłupywaniu i zmianą oporności elektrycznej próbek, jak również zależność pomiędzy długością rysy i zmianą oporności elektrycznej przy zginaniu trójpunktowym. Wyniki podano w punktach 3.1. i 3.2.

3.1. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu trójpunktowym

Krzywe zmian długości rysy i siły zginającej w funkcji czasu dla próbki C02 przedstawiono na rysunkach 4a-b. Długość rysy była początkowo zerowa, a jej utworzenie zostało zapoczątkowane na wierzchołku karbu, przy maksymalnej wielkości siły zginającej, która następnie ulegała zmniejszeniu, jak to pokazano na rys. 4a-b. Czas, po którym długość rysy zaczęła się zwiększać (214 s) pokrywał się z czasem, w którym siła zginająca osiągnęła wartość maksymalną; siła ta następnie zaczęła maleć [rysunki 4a-b]. Powstanie rysy oznaczało zmniejszenie sztywności beleczki, co spowodowało zmniejszenie siły działającej na belkę przy stałej szybkości przemieszczania środka belki z szybkością 0,2 mm/min.

Zmianę procentową oporności elektrycznej w funkcji długości rysy dla próbki C02 przedstawiono na rysunku 5a. Oporność ulegała zmianom z długością rysy; jak to zaznaczono na rysunku literami A, B, C.

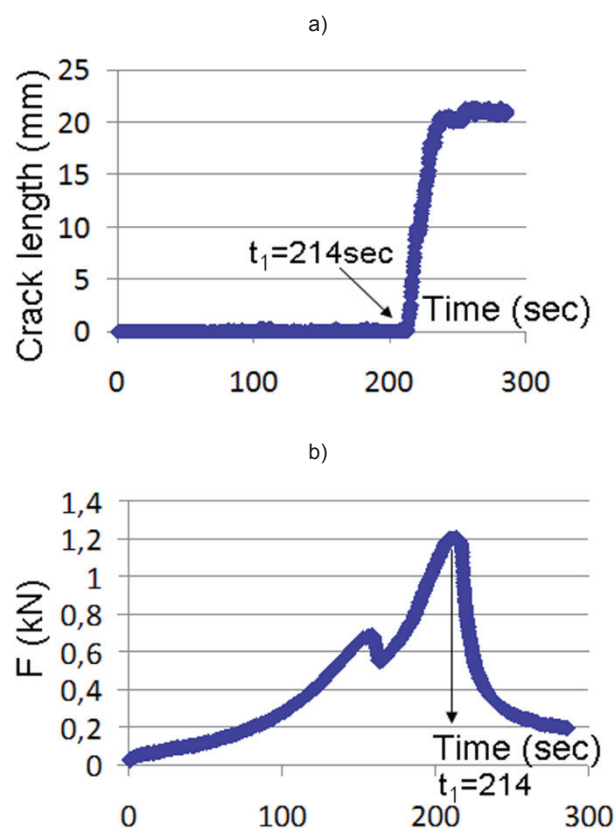
commercial metal strain gages is around 2. Linearity (LE) is the percent of maximum difference between input-output curve ($\%R$ versus strain curve) and fitted linear regression line, to full scale output (R_{fs}), as given in Eq. (5). As the linearity decreases, the error in measurement of strain decreases.

$$K = \frac{(R - R_{so}) / R_{so}}{\Delta \varepsilon} \quad [4]$$

$$\%LE = \left(\frac{\Delta_{max}}{\%R_{fs}} \right) \times 100 \quad [5]$$

3. Results and discussions

Five different cement matrix composite mixtures were designed. From each mix, three 5 cm cube samples were tested with split tensile test and three 4x4x16 cm prisms were tested with 3 points bending test. The relations between the tensile strain – electrical resistance change at split tensile test and crack length -electrical resistance change at three point bending test were determined. The results are presented in this section.



Rys. 4. Próbką C02 zbrojona włóknami węglowymi o długości 3 mm, dodatek 0.2 % objętościowych; próba zginania. a) Zmiany długości rysy w funkcji czasu. b) Zmiany siły nacisku w funkcji czasu

Fig. 4. Mix C02 having 3 mm carbon fibers 0.2 % volume fraction, three points bending test a) Crack length –time graph b) Force –time graph

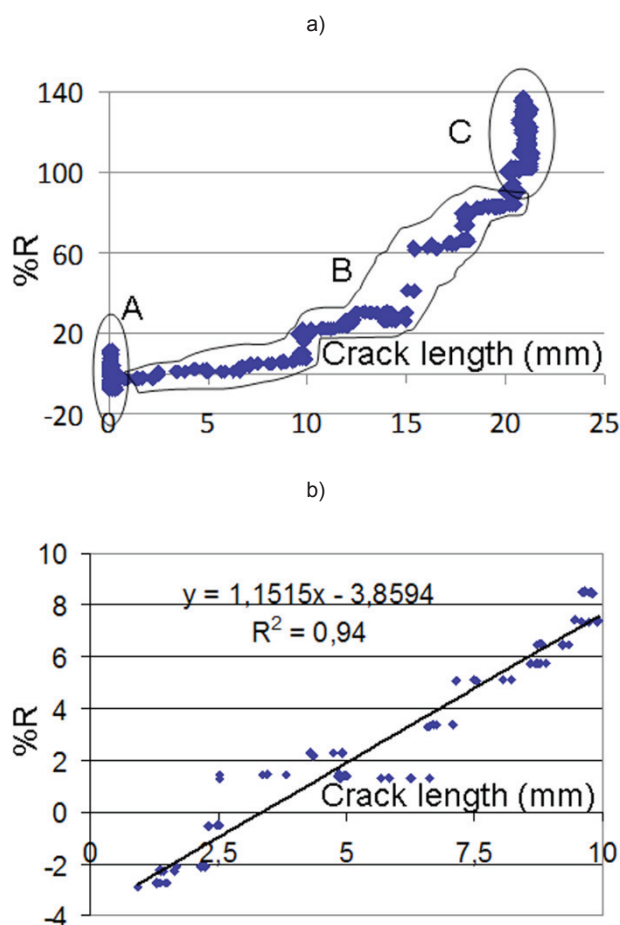


Fig. 5. Próbką C02 zbrojona włóknami węglowymi o długości 3 mm wprowadzonymi w ilości 0,2 % objętościowych; próba zginania. a) zmiana oporności %R w funkcji długości rysy w trakcie eksperymentu. b) zmiana oporności %R w funkcji długości rysy przedstawiona jako zależność liniowa, czułość próbki C02 jako sensora SC=1,1; liniowość zależności LEC=24%

Fig. 5. Mix C02 with addition of 0.2 volume %, of 3mm carbon fibers bending test a) %R- crack length during whole experiment b) %R- crack length, linear relationship, crack sensitivity SC=1.1; linearity for crack sensitivity LEC=24%

Zakres A wyznacza początkowy okres próby do powstania rysy, wynoszący 214 s [rysunek 5a]. Zmiana oporności elektrycznej jest w tym zakresie niewielka, ponieważ w górnej części beleczki działają siły ściskające, powodujące zmniejszenie oporności. Było to także wynikiem skrócenia włókien, zamknięcia mikrospęknięć i mikroporów, jak również zmniejszenia odległości pomiędzy elektrodami w górnej części belki. Zmniejszenie oporności elektrycznej spowodowało ujemną zmianę %R. Dodatnia zmiana %R nastąpiła ze wzrostem oporności elektrycznej próbki. Oporność elektryczna próbki wzrastała gdy poniżej neutralnej osi belki powstało odkształcenie związane z rozciąganiem, w wyniku którego włókna ulegały wydłużeniu, tworzyły się mikrospęknięcia, a także mikropory, co z kolei powodowało zmniejszenie powierzchni przekroju dla przepływu elektronów. W zakresie A, do 214 s, wzajemnie przeciwstawne działanie opisanych efektów (ściskanie powyżej osi i rozciąganie poniżej) spowodowało zmiany oporności elektrycznej.

Po 214s utworzyła się rysa na wierzchołku karbu, co odpowiada zakresowi B na rysunku 5a. Wraz z propagacją tej rysy

3.1. The results of three points bending test

The crack length time and force time graphs of the mix C02 are presented in Fig. 4a-b. At the beginning of the test, the crack length was zero. When the crack started to initiate at the tip of the notch, the force was at its maximum and started to decrease, as seen in Fig. 4a-b. The time the crack started to increase (214th sec) was the same as the time the force was maximum and started to decrease (Fig. 4a-b). The initiation of the crack decreased the stiffness of the beam which yielded a decrease of the force applied to the beam at constant mid-span displacement rate of 0,2 mm/min.

The percent change of electrical resistivity versus crack length for C02 mix is presented at Fig. 5a. The percent change of electrical resistivity was changing with the crack length. The graph is subdivided into regions A-B-C.

The region A stands for the time the test was started and continued until crack initiation which was at 214th sec (Fig. 5a). There was little change in the electrical resistance due to the compression region at the top of the neutral axis of the beam which caused a decrease in the electric resistance. The decrease of the electrical resistance was due to the shortening of the fibers, the closure of micro-cracks and micro voids and also due to the shortening of the distance between the electrodes at the top portion of the beam. The decrease of the electrical resistance caused negative %R. The positive %R was obtained when the electrical resistance of the sample increased. The electrical resistance of the sample increased due to the tensile strain below the neutral axis of the beam which caused elongation of the fibers, opening of the micro cracks and micro voids which decreased the cross section area that the electrons can pass. During region A, until 214th second, the competition of these two events (compression above neutral axis and tension below neutral axis) resulted in the oscillation of electrical resistance from negative to positive values.

At 214th second, the crack started to initiate at the tip of the notch. This was the beginning of the region B. As crack propagated, the cross section that the electrons could pass decreased and the electrical resistance increased as seen in Fig. 5a. The effect of compressive strain above the neutral axis was vanished by the dominant effect of the decrease in cross section by crack propagation. The crack gage used had a maximum capacity of 21 mm. Thus, when crack length was over 21mm, the crack gage was totally divided into two pieces and does not send signal. The region C stands for the part where the crack length was over 21mm, the crack gage could not send signal because it was divided into two parts. However, the crack further propagated and reached the top of the sample, which increased the electrical resistance as seen in Fig. 5a.

The promising observation is that in region B where the crack propagates; there is a net trend of increase in the electrical resistance (Fig. 5a). There is a piecewise linear relationship between the crack length and %R in region B. The slope of the region B increases at crack lengths 10 mm and 15 mm, but the relation-

powierzchnia przekroju przepływu elektronów zmniejszyła się i oporność elektryczna wzrosła, jak to wynika z rysunku 5a. Wpływ odkształcenia związanego z naprężeniem ściskającym powyżej osi próbki uległ zmniejszeniu w związku z dominującym efektem zmniejszenia powierzchni przekroju, wskutek propagacji rysy. Ponieważ graniczna mierzalna wielkość długości rysy wynosiła 21 mm, to po przekroczeniu tej wartości nastąpił zanik sygnału związanego z tą deformacją. Tak więc od tego momentu proces ten został zarejestrowany w zakresie C. Jednak propagacja rysy postępowała dalej osiągając górną powierzchnię próbki, co spowodowało zwiększenie oporności elektrycznej, jak to można wyczytać z rysunku 5a.

Ważnym spostrzeżeniem jest, że w zakresie B, w którym postępuje propagacja rysy zaznacza się wzrost oporności elektrycznej (rysunek 5a). W zakresie tym związek pomiędzy długością rysy i %R jest częściowo liniowy. Nachylenie prostej wzrasta przy długości rysy 10 mm i 15 mm, ale zależność ta jest liniowa również przy zmianach długości w przedziale 1-10 mm; 10-15 mm i 15-21 mm; liniowość tej korelacji zmienia się w zależności od sensora; na rysunku 5b pokazano zależność pomiędzy długością spękania i %R, na początku próby. Współczynnik korelacji 0.94 wskazuje na silną zależność liniową, co świadczy o możliwości zastosowania zapraw cementowych zbrojonych włóknami węglowymi jako sensorów uszkodzeń. Czułość próbki C02 jako sensora pomiarowego uszkodzeń w kompozytach cementowych zbrojonych włóknami węglowymi wynosi 1,1, a liniowość opisywanych zależności (LEC) 24,1%. Dla większych długości rysy, gdy współczynnik korelacji liniowej ulega zmniejszeniu, kompozyty cementowe mogą być również zastosowane do wykrywania i oceny zakresu uszkodzeń.

W pomiarach sygnałów napięciowych, długości rysy czy działających sił nie stosowano żadnych zabiegów filtracyjnych, chociaż w przypadku zastosowania filtrów eliminujących zakłócenia wyniki może byłyby o wiele lepsze niż zaprezentowane w pracy. Wyniki przedstawione na przykładzie próbki C02 odnoszą się generalnie również do innych badanych próbek, w przypadku których tych wyników nie pokazano.

Próbka C08 wykazuje wyraźnie liniową zależność długości rysy i %R (rysunek 6), opisaną współczynnikiem korelacji 0,98. Jej czułość jako sensora pomiarowego uszkodzeń wynosi 1,5, a liniowość opisywanych zależności (LEC) 10%.

Kompozyty cementowe zbrojone włóknami węglowymi wykazały zdolność do wykrywania rysy, chociaż podczas badania wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu trójpunktowym zależność pomiędzy przyłożonym naprężeniem a propagacją rysy jest złożona. Związek pomiędzy opornością elektryczną i długością rysy jest liniowa. Kompozyty cementowe mogą więc być stosowane do wykrywania uszkodzeń w konstrukcjach betonowych.

Czułość sensora pomiarowego do wykrywania uszkodzeń w kompozytach cementowych zbrojonych włóknami węglowymi wykazuje ogólnie tendencję malejącą ze wzrostem udziału objętościowego włókien jak to pokazano na rysunku 7, za wyjątkiem udziału 0,8%

ship is still linear in these sub-regions of crack lengths 1-10 mm; 10-15 mm; 15-21 mm while the power of the linear relationship changes as in every sensor. For the initial part, the linear relationship between the crack length and %R is presented in Fig. 5b. The correlation coefficient is 0.94 which testifies the strong linear relationship. This linear relationship testifies the capability of carbon fiber reinforced cement mortars ability to be used as a damage sensor. The crack sensitivity (SC) of the C02 is 1.1 and its linearity for crack sensitivity (LEC) is 24.1%. At the higher crack lengths where the power of the linear correlation decreases, the cement based composite can still be used to monitor the existence and severity of damage.

Any kind of voltages signals filtering of crack gage and forces measurements were not applied. In case of application of filters to eliminate the noise, the results would have been much better than the ones presented here in. In general, the results and trends presented for mix C02 are valid for the other mixes so most of the similar graphs are not presented for the other mixes.

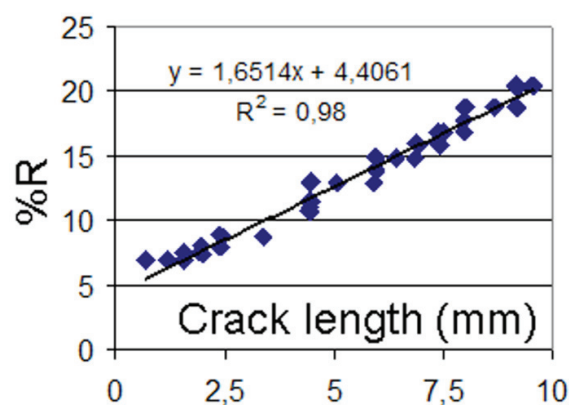
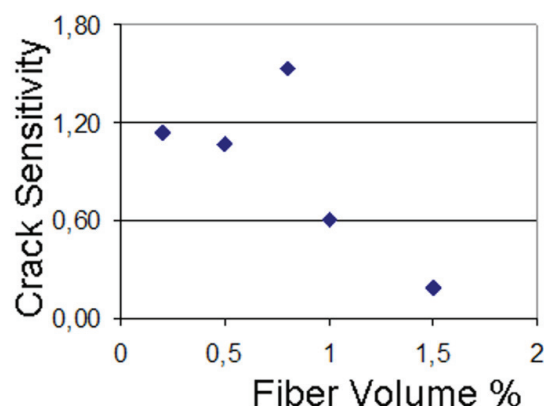


Fig. 6. Próbka C08 zbrojona włóknami węglowymi o długości 3 mm, dodatek 0,8 % objętościowych; próba zginania. Korelacja liniowa zmian oporności %R w funkcji długości rysy, czułość próbki C08 jako sensora SC=1,5; liniowość zależności LEC=10%

Fig. 6. %R - crack length for Mix C08 having 3 mm carbon fibers 0.8 % volume fraction, crack sensitivity SC=1.5; linearity for crack sensitivity LEC=10%



Rys. 7. Zmiany czułości sensora spękań w funkcji udziału objętościowego włókien węglowych w zaprawie

Fig. 7. The variation of crack sensitivity with respect to volume percent of carbon fibers

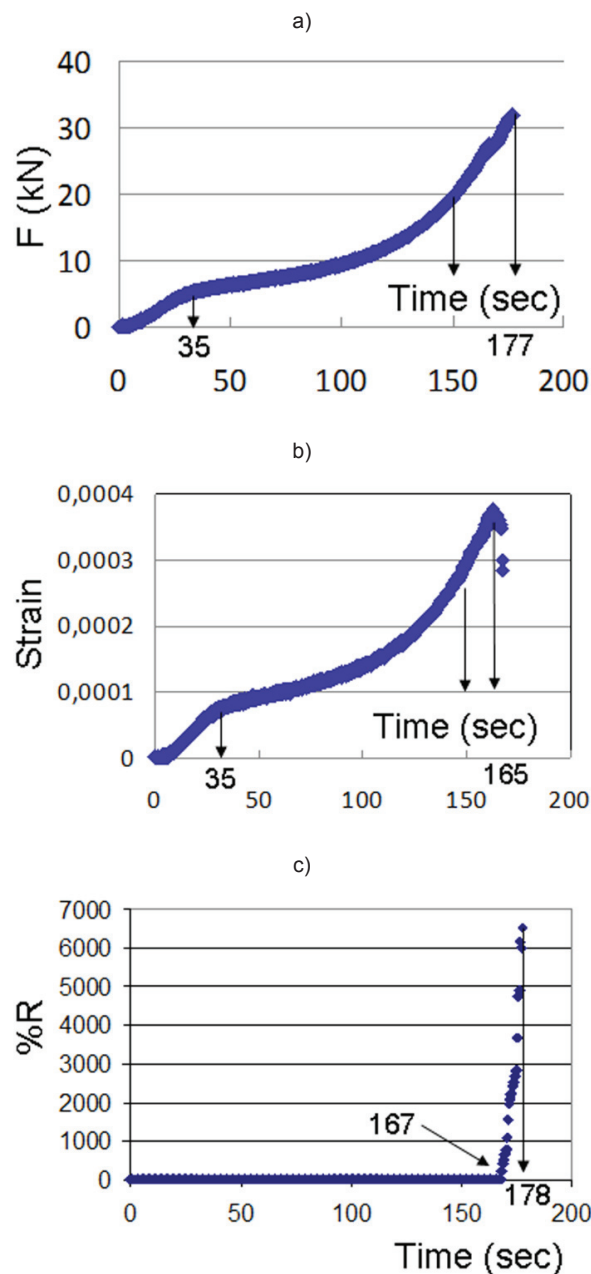
odpowiadającego progowi perkolacji. Gdy zwiększa się udział objętościowy włókien powyżej progu perkolacji propagację spękania może zahamować względne zmniejszenie liczby kontaktów włókno – włókno i włókno – matryca; a ponieważ nie ma wtedy znaczącej zmiany oporności elektrycznej to czułość tego układu zmniejsza się. W ten sposób czułość sensora pomiarowego uszkodzeń zmniejsza się ze wzrostem udziału włókien w kompozycie. Przy zawartości włókien odpowiadającej progowi perkolacji, to znaczy 0.8% objętości kompozytu, powstaje zbyt wiele dróg dla transportu elektronów. Gdy spękania zniszczą te drogi wtedy oporność zwiększa się znacznie, a układ przechodzi ze stanu po – perkolacyjnego do przed – perkolacyjnego, czego następstwem jest największa czułość tego materiału jako sensora uszkodzeń.

3.2. Wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu

Badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu prowadzono z kontrolą przemieszczenia próbki, przy szybkości przesuwu głowicy wywierającej nacisk wynoszącej 2,5 mm/min. Krzywe zmian siły nacisku w funkcji czasu i zmiany odkształcenia w funkcji czasu pokazano na rysunkach 8a-b. Na początku próby większa część siły nacisku ulegała absorpcji przez podkładki drewniane, jak można to zobaczyć na rysunkach 3b-c-d. Następnie w wyniku deformacji i zniszczenia tych podkładek na wykresie zmiany siły nacisku w funkcji czasu (rysunek 8a) po 35 sekundach pojawiło się plateau. Tuż przed rozpoczęciem zniszczenia podkładek drewnianych opór próbki zwiększył się, co spowodowało zwiększenie kąta nachylenia krzywej na krzywej zmiany siły nacisku w funkcji czasu (rysunek 8a). Po 150 s, gdy podkładki drewniane zostały zniszczone, ruch głowicy powodował deformację badanej zaprawy, co obrazuje krzywa na rysunku 8b pokazująca zmiany odkształcenia. Czujnik odkształceń uległ podziałowi na dwie części co nastąpiło po 165 s. Zmiana oporności %R w funkcji czasu jest pokazana na rysunku 8c. Zmiany %R z propagacją rysy po 167 s są tak duże, że wielkości %R do tego okresu stają się pomijalnie małe (rysunek 8c), chociaż zależą także od odkształcenia. Propagacja rysy powoduje wzrost %R do wielkości 6500%. Ze względu na działanie mostkujące włókien nie zaznacza się zmniejszenie obciążenia, gdy próba dobiega końca, co pokazano na rysunku 8a. Podobne zależności dotyczyły pozostałych próbek badanej serii, dlatego nie pokazano tych wyników.

Pomiędzy odkształceniem pod działaniem naprężenia rozciągającego i %R występuje korelacja liniowa, opisana współczynnikiem korelacji 0.96 dla próbki C02, co pokazano na rysunku 9. Zaprawa cementowa, podobnie jak to ma miejsce w przypadku każdego sensora, wykazuje pewien przedział liniowości, w obszarze którego zależność pomiędzy odkształceniem i %R jest liniowa. Wskaźnik odkształcenia dla próbki C02 wynosi 324, co oznacza, że sensor ten jest 164 razy bardziej czuły niż czujniki z folią metalową, dostępne w handlu.

Związek pomiarowego wskaźnika odkształcenia z udziałem objętościowym włókien jest podobny jak w przypadku czułości sensora z zaprawy. Występuje generalnie tendencja malejąca, z wyjątkiem



Rys. 8. Próbką C02 zbrojona włóknami węglowymi o długości 3 mm, przy dodatku 0,2 % objętościowych; próba rozciągania przy rozłupywaniu. a) zmiany siły nacisku w funkcji czasu, b) zmiany odkształcenia w funkcji czasu, c) zmiana oporności %R w funkcji czasu

Fig. 8. Mix C02 with 3 mm carbon fibers 0.2 % volume fraction, =tensile splitting test; a) Force –time curve, b) Strain –time curve, c) %R –time relation

The mix C08 has a strong linear relation between %R and crack length (Fig.6). The correlation coefficient is 0.98; the crack sensitivity is 1.5 and the LEC is 10%.

Although the three points bending of notched bars test has complicated strain and crack behavior, the carbon fiber reinforced cement based composites were able to detect the crack growth. There is a strong linear relationship between the electrical resistance change and crack length. The cement based composites can be used to detect the damage for a concrete structure.

The crack sensitivity had a general trend of decrease by fibers volume percent as seen in Fig. 7 except at 0.8 % volume fraction

zawartości 0.8% objętościowych, odpowiadającej progowi perkolacji (rysunek 10). W miarę jak zawartość włókien rośnie, pod działaniem naprężenia rozciągającego zniszczeniu ulega coraz mniejsza liczba kontaktów włókno – włókno i włókno – matryca; oporność elektryczna nie ulega więc znacznym zmianom, a czułość wskaźnika odkształceń maleje [rysunek 10].

Oporność elektryczna kompozytów cementowych zbrojonych włóknami węglowymi maleje ze wzrostem udziału objętościowego włókien, jak to pokazano na rysunku 11. Wzrost udziału fazy przewodzącej w kompozycie zwiększa całkowitą przewodność kompozytu. Oporność elektryczna próbek kształtowała się na poziomie od 408 Ω -cm do 1520 Ω -cm.

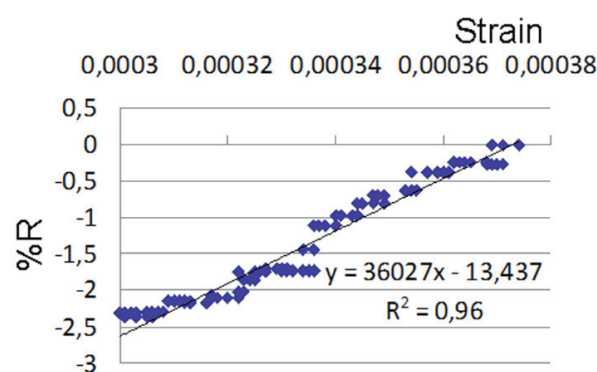
Silna korelacja pomiędzy opornością elektryczną i długością rysy oraz pomiędzy opornością elektryczną i odkształceniem stwarza obiecujące perspektywy dla kompozytów cementowych jako sensorów do wykrywania uszkodzeń i monitorowania odkształceń betonu.

4. Wnioski

W pracy zbadano pięć zapraw cementowych zbrojonych włóknami węglowymi o długości 3 mm, z różnym udziałem objętościowym włókien. Wyniki badań pozwalają na wyciągnięcie szeregu wniosków.

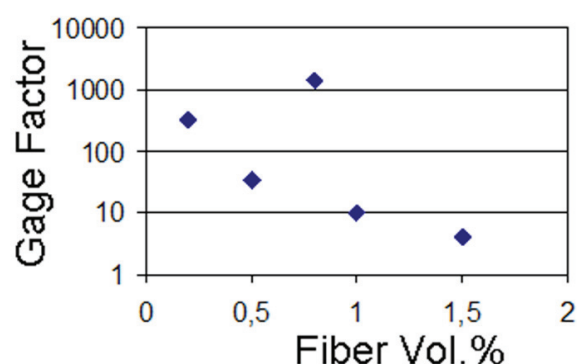
Wyniki otrzymane przy zginaniu trójpunktowym beleczek z karbem podsumować można w następująco:

1. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów długości rysy, przeprowadzonych równocześnie z pomiarami zmian oporności elektrycznej i ustalono zależności pomiędzy nimi.
2. W pracy przedstawiono nowatorską koncepcję dotyczącą czułości zaprawy cementowej zbrojonej włóknami węglowymi jako sensora i ustalono jej liniową korelację.
3. Oporność elektryczna zmienia się wskutek odkształceń wywołanych działaniem sił ściskających i rozciągających, zanim nastąpi propagacja rysy podczas próby zginania. Odkształcenie spowodowane naciskiem powoduje reorientację włókien, zamknięcie mikropęknięć i mikroporów, jak również skrócenie odległości pomiędzy elektrodami w części górnej beleczki, powyżej jej osi. Zmiany te zmniejszają oporność elektryczną. Naprężenia rozciągające występujące poniżej osi beleczki powodują także reorientację włókien oraz utworzenie mikropęknięć i mikroporów, a więc zmniejszenie powierzchni przekroju dla przepływu elektronów, czego wynikiem jest wzrost oporności elektrycznej. Opisane zmiany są przyczyną fluktuacji oporności elektrycznej, zanim utworzy się rysa.
4. Po powstaniu rysy jej propagacja jest spowodowana naprężeniami ściskającymi i rozciągającymi. Propagacja rysy powoduje zmniejszenie powierzchni przekroju, przez który przepływają elektrony, co pociąga za sobą znaczny wzrost oporności elektrycznej.



Rys. 9. Próba rozciągania przy rozłupywaniu. Zmiana oporności %R w funkcji odkształcenia dla próbki C02 zbrojonej włóknami węglowymi o długości 3 mm wprowadzonym w ilości 0,2 % objętościowych; $K=324$, $LE=17\%$

Fig. 9. Tensile splitting test %R – strain correlation for Mix C02 with 3 mm carbon fibers 0.2 % volume fraction; $K=324$, $LE=17\%$



Rys. 10. Współczynnik pomiarowy dla próby rozciągania przy rozłupywaniu w funkcji udziału objętościowego porów

Fig. 10. Tensile splitting test; gage factor – fiber volume % relation

which was the percolation threshold. As the fiber volume percent increased, the propagation of the crack could break only a smaller portion of the fiber – fiber and fiber-matrix contacts, electrical resistance did not significantly alter, leading a reduction in the sensitivity of the system. Thus crack sensitivity decreased by increasing fibers volume fraction. At percolation threshold of 0.8 % volume fraction, few of direct electron conduction paths formed. When the crack broke these few paths, the electrical resistance changed dramatically, system shifted from post-percolation to pre-percolation state, resulting in the highest sensitivity, thus highest crack sensitivity was obtained.

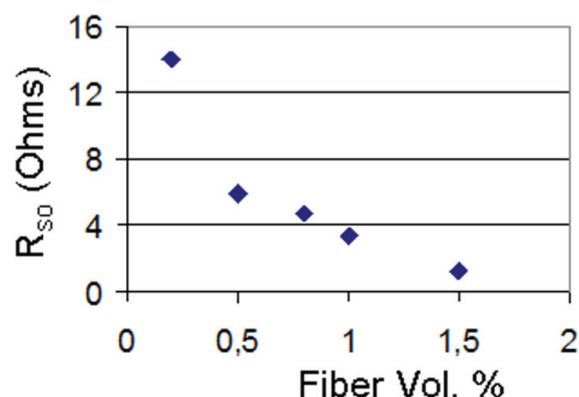
3.2. The results of tensile splitting tests

The tensile splitting test was conducted at a rate of 2.5 mm/min with displacement control. The force – time and strain – time graphs for C02 under tensile splitting test are presented in Figs. 8a-b. At the beginning of the test, most of the total displacement applied was shared by the wooden bars as deformation seen in Figs. 3b-c-d. Due to the deformation and crushing of wooden bars, there was a plateau in force – time graph in Fig. 8a, at 35th second. By the

5. Stwierdzono bardzo silną zależność liniową pomiędzy długością rysy oraz zmianą oporności elektrycznej dla zaczynów cementowych zbrojonych włóknami węglowymi, badanych w pracy. Współczynnik korelacji wynosi od 0,93 do 0,98; średnio 0,95.
6. Przy zawartości włókien odpowiadającej progowi perkolacji ograniczeniu ulega transport elektronów. Oporność kompozytu zwiększa się znacznie wraz z propagacją rysy i układ przechodzi ze stanu po – perkolacyjnego do przed – perkolacyjnego, czego następstwem jest największa czułość zaprawy cementowej jako sensora uszkodzeń tego materiału.
7. Udział włókien poniżej progów perkolacji nie wpływa w znaczącym stopniu na czułość sensora z zaprawy, w której postępuje propagacja rysy. Powyżej progów perkolacji propagacja spękania w niewielkim stopniu przyczynia się do ograniczenia przepływu elektronów, nie wpływa więc na oporność elektryczną. Tak więc zwiększenie udziału objętościowego włókien powyżej progów perkolacji zmniejsza czułość zaprawy jako sensora. Maksymalna czułość odpowiada progowi perkolacji.

Wyniki otrzymane metodą badania wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu podsumować można w następująco:

1. Badanie metodą rozciągania przy rozłupywaniu zostało po raz pierwszy zastosowane w celu określenia zależności pomiędzy zmianami oporności elektrycznej i odkształcenia dla kompozytów cementowych zbrojonych włóknami węglowymi.
2. Zwiększenie udziału objętościowego włókien zmniejsza wartość zdefiniowanego w pracy wskaźnika odkształcenia K. Przy małej zawartości włókien (to znaczy 0,2% objętościowo) przyłożenie naprężenia rozciągającego może prowadzić do znacznej separacji włókien, co doprowadzi do zmiany oporności, a zatem do zwiększenia wskaźnika odkształcenia. Przy dużej zawartości włókien działanie naprężenia rozciągającego nie doprowadzi do rozdzielenia włókien, oporność nie zmieni się, a wskaźnik sensora określający zmianę oporności względem długości spękania pozostanie niewielki.
3. Przy zawartości włókien odpowiadającej progowi perkolacji przyłożenie naprężenia rozciągającego układ przechodzi ze stanu po – perkolacyjnego do przed – perkolacyjnego z ograniczeniem przepływu elektronów i zwiększeniem wskaźnika sensora określającego zmianę oporności, czego następstwem jest największa czułość zaprawy cementowej jako sensora uszkodzeń.
4. Wskaźnik sensora określający zmianę oporności elektrycznej w stosunku do długości rysy wynoszący 1435 jest największy spośród podawanych w literaturze dla kompozytów cementowych.
5. Zaprojektowane mieszanki wykazują liniową zależność naprężenia rozciągającego z opornością elektryczną. Współczynnik korelacji wynosi od 0,9 do 0,97; średnio 0,95. Liniowość wyników próby rozciągania przy rozłupywaniu wynosi od 11% do 18%, średnio 15%.



Rys. 11. Zmiany oporności elektrycznej w funkcji udziału objętościowego porów

Fig. 11. Variation of electrical resistance with fiber volume %

beginning of crushing of the wooden bars, their stiffness increased and the slope of the force – time graph increased as seen in Fig. 8a. At 150th second, wooden bars were totally crushed and most of the displacement applied was shared by deformation of the cement mortar sample. These observations can be traced at the strain-time graph in Fig. 8b. The strain gage was cut into two by a localized crack just after 165th second. The variation of %R with time is presented in Fig. 8c. The variation of %R with crack propagation after 167th second is so large that the variation of %R with strain until 167th second is not legible at the Fig. 8c although there is a variation of %R by strain. Due to the crack propagation %R got values higher than 6500%. Due to the crack bridging effect of the carbon fibers, there was not a significant decrease in the load until the end of the test, as seen in Fig. 8a. Similar observations were obtained for the other samples so the same graphs are not presented for the other tests.

The tensile strain and %R have a strong linear relationship with a correlation coefficient of 0.96 for C02 as seen in Fig. 9. As for every sensor, the cement composite has a “linear portion” in which strain and %R have a linear relationship. The gage factor of C02 is 324, which is 160 times more sensitive than commercial metal foil strain gages.

The relation of gage factor to the fibers volume fraction is analogous to the relation of crack sensitivity. Gage factor had a general decreasing trend except at the 0.8 % volume fraction which was the percolation threshold (Fig. 10). As the fibers volume percent increases, tensile strain could disrupt only a smaller percent of fiber- matrix and fiber – fiber contacts, electrical resistance was not affected considerably, sensitivity and thus gage factor decreased (Fig. 10). At percolation threshold of 0.8 % volume fraction, tensile strain disrupted the major amount of few direct electron conduction paths, changing the electrical resistance drastically. The system shifts from post –percolation to the pre-percolation situation, leading to the highest gage factor (Fig. 10).

The electrical resistance of the carbon fiber reinforced cement composites decreased by the increasing fibers volume percent as

Oporność elektryczna kompozytów cementowych zbrojonych włóknami węglowymi maleje ze wzrostem udziału objętościowego włókien. Zwiększenie zawartości fazy przewodzącej w kompozycie przynosi zwiększenie przewodnictwa elektrycznego.

Zaprawy cementowe zbrojone włóknami węglowymi zaprojektowane w pracy mogą znaleźć zastosowanie jako sensory do monitorowania odkształceń, jak również do wykrywania i oceny uszkodzeń w konstrukcjach betonowych.

Acknowledgements - podziękowania

Badanie zostały sfinansowane przez The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK Grant no: 110M221). Autor dziękuje firmie Sika Construction Chemicals Co. za dostarczenie pyłu krzemionkowego i superplastyfikatora, jak również firmie DowAKSA Co. za dostarczenie włókien węglowych. Autor kieruje też podziękowania do Dokuz Eylul University, Metallurgical and Materials Engineering Department za udostępnienie urządzenia do przeprowadzenia prób zginania. Autor jest wdzięczny Assoc. Prof. Dr. Tahir Kemal Erdem za współpracę w przygotowaniu tego artykułu.

Autor deklaruje, że prezentowana praca nie stanie się źródłem konfliktu interesów.

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. D. D. L. Chung, Self-monitoring structural materials, *Mater. Sci. Eng.*, **22**, 2, 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*, **77**, 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. 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).

seen in Fig. 11. The increase of conductive phase in the composite increases the overall conductivity of the composite. The resistivity of the samples were between 408 Ohm·cm - 1520 Ohm·cm.

The strong correlations between the crack length – electrical resistance change and strain -electrical resistance change is promising for development of smart cement based sensors for damage and strain monitoring.

4. Conclusions

Five different carbon fiber reinforced cement mortars with carbon fiber length of 3mm and different volume fractions were designed. For each mix, three of 5cm cube samples and three rectangular prism samples were casted. In order to investigate the relation between the crack length and electrical resistance change, three points bending of notched bars test was conducted. Also tensile splitting test was conducted to investigate the relation of tensile strain and electrical resistance change.

The results obtained from three points bending of notched bars tests are :

1. Direct and simultaneous measurement of crack length with electrical resistance change and their relationship have been presented in this work.
2. Novel concepts of crack sensitivity (SC) and linearity for crack sensitivity (LEC) have been introduced in this work in the literature, for carbon fiber cement composites.
3. There is a competition of compressive strain and tensile strain on the electrical resistance change prior to crack propagation at bending test. The compressive strain at the top of the neutral axis cause shortening of fibers, closure of micro cracks and micro voids and shortening of the distance between the electrodes at the top of the neutral axis. These effects decrease the electrical resistance. The tensile strain below the neutral axis cause elongation of the fibers, opening of micro cracks and micro voids which decrease the cross section area that the electrons can pass; ending in an increase in electrical resistance. This competition results in a fluctuation of the electrical resistance change from positive to negative values before crack initiation.
4. As the crack initiates, the crack propagation enters the competition of compressive strain and tensile strain. Crack propagation decreases the cross sectional area that the electrons can pass and increases the electrical resistance by its dominant effect.
5. There is a strong linear relationship between the crack length and electrical resistance change for the carbon fiber reinforced cement composites tested in this study. The minimum correlation coefficient is 0.93, maximum is 0.98 with average of 0.95 for the correlation of electrical resistance change with crack length.

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, *Comp. 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. J. Xu, W. Yao, R. Wang, Nonlinear conduction in carbon fiber reinforced cement mortar, *Cem. Concr. Comp.*, **33**, 444-448 (2011).
 16. H. Gong, Y. Zhang, J. Quan, C. Songwei, Preparation and properties of cement based piezoelectric composites modified by CNTs. *Current Applied Physics*, **11** 653-656 (2011).
 17. R. Rianyo, R. Potong, N. Jaitonong, R. Yimnirun, A. Chaipanich, Dielectric, ferroelectric and piezo electric properties of 0-3 barium titanate - Portland cement composite, *Applied Physics A*, **104**, 661- 666 (2011).
 18. S. Vaidya, E. N. Allouche, Strain sensing of carbon fiber reinforced geopolymer concrete, *Mater. and Struct.*, **44**, 1467–1475 (2011).
 19. Z. J. Li, D. Zhang, K. R. Wu, Cement matrix 2-2 piezoelectric composite Part 1. Sensory effect, *Mater. and Struct.*, **34**, 506-512 (2001).
 20. J. M. Torrents, T. O. Mason, A. Peled, S. P. Shah, E. J. Garboczi, Analysis of the impedance spectra of short conductive fiber-reinforced composites, *J. of Materials Science*, **36**, 4003-4012 (2001).
 21. A. D. Hixson, L. Y. Woo, M. A. Campo, T. O. Mason, E. J. Garboczi, Intrinsic conductivity of short conductive fibers in composites by impedance spectroscopy, *J. of Electroceramics*, **7**, 189–195 (2001).
 22. A. Peled, J. M. Torrents, T. O. Mason, S. P. Shah, E. J. Garboczi, Electrical impedance spectra to monitor damage during tensile loading of cement composites, *ACI Materials Journal*, **98**, 4, 313-322 (2001).
 23. J. M. Torrents, T. C. Easley, K. T. Faber, T. O. Mason, Evolution of impedance spectra during debonding and pullout of single steel fibers from cement, *J. Am. Ceram. Soc.*, **84**, 4, 740–746 (2001).
 24. T. O. Mason, M. A. Campo, A. D. Hixson, L. Y. Woo, Impedance spectroscopy of fiber-reinforced cement composites, *Cem. Concr. Comp.*, **24**, 457–465 (2002).
 25. L. Y. Woo, N. J. Kidner, S. Wansom, T. O. Mason, Combined time domain reflectometry and AC-impedance spectroscopy of fiber-reinforced fresh-cement composites, *Cem. Concr. Res.*, **37**, 89–95 (2007).
 26. J. D. Shane, T. O. Mason, H. M. Jennings, Effect of the interfacial transition zone on the conductivity of portland cement mortars, *J. Am. Ceram. Soc.*, **83**, 5, 1137–44 (2000).
 27. F. Rajabipour, J. Weiss, J. D. Shane, T. O. Mason, P. S. Surendra, Procedure to interpret electrical conductivity measurements in cover concrete during rewetting, *J. of Mat. in Civil Engineering*, **17**, 5, 586-594 (2005).
 28. P. J. Tumidajski, P. Xie, M. Arnott, J. J. Beaudoin, Overlay current in a conductive concrete snow melting system, *Cem. Concr. Res.*, **33**, 1807–1809 (2003).
 29. B. Han, K. Zhang, X. Yu, E. Kwon, J. Ou, Electrical characteristics and pressure-sensitive response measurements of carboxyl MWNT/cement composites, *Cem. Concr. Comp.*, **34**, 6, 794-800 (2012).
 30. B. Han, X. Yu, E. Kwon, J. Ou, Effects of CNT concentration level and water/cement ratio on the piezoresistivity of CNT/cement composites, *J. of Comp. Mater.*, **46**, 1, 19-25 (2012).
 31. B. Han, J. Ou, Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor, *Sens. Actuators A- Phys.*, **138**, 2, 294-298 (2007).
 32. B. G. Han, Y. Yu, B. Z. Han, J. P. Ou, Development of a wireless stress/strain measurement system integrated with pressure-sensitive nickel powder-filled cement-based sensors, *Sens. Actuators A- Phys.*, **147**, 2, 536-543 (2008).
 6. At the percolation threshold few direct electron conduction paths form. These few paths are broken by crack propagation shifting the system from post – percolation to pre-percolation situation yielding highest crack sensitivity at percolation threshold.
 7. Below percolation threshold, the fibers volume percent does not affect crack sensitivity much. Above percolation threshold, crack propagation breaks few of the many direct electron conduction paths; electrical resistance is not affected. Thus, increase of fibers volume percent above the percolation threshold results in a decrease in crack sensitivity. The maximum crack sensitivity is obtained at percolation threshold.
- The results obtained from tensile splitting strength tests are:
1. Tensile splitting test has been used for the first time to investigate the relation between the electrical resistance change and strain for carbon fiber- cement composites.
 2. The increase of fibers volume percent decreases the gage factor. When fibers volume percent is low (i.e. 0.2 %), application of tensile strain can separate more amounts of fibers by percent in the system which changes electrical resistance drastically yielding a higher gage factor. At higher fibers volume percent, the tensile strain can separate only a small percent of total amount of fibers; electrical resistance is not affected; gage factor is lower.
 3. At percolation threshold, tensile strain transfers the system from post-percolation to pre-percolation by breaking few direct electron conduction paths, resulting in the highest gage factor. At percolation threshold, the cement composite has the highest gage factor.
 4. Gage factors as high as 1435 were obtained. This is the highest gage factor reported in the literature for cement based composites.
 5. There is a strong linear relationship between the tensile strain and electrical resistance change for the mixes designed. The correlation coefficients vary between 0.9-0.97, having an average of 0.95. The linearity for the split tensile test is between 11% -18% with an average of 15%.
- The electrical resistance of the carbon fiber reinforced cement based composites decreased as the fibers volume percent increased. The increase of conductive phase in the composite resulted in an increase in the electrical conductivity.
- The carbon fiber reinforced cement matrix composites designed in this study can be used for strain sensing, crack detection and damage assessment in concrete structures.

Acknowledgements

This study was funded by The Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK Grant no: 110M221). The author would like to thank to Sika Construction Chemicals Co. for

33. B.G. Han, B.Z. Han, J.P. Ou, Experimental study on use of nickel powder-filled Portland cement-based composite for fabrication of piezoresistive sensors with high sensitivity, *Sens. Actuators A- Phys.*, **149**, 1, 51-55 (2009).

34. H. Xiao, H. Li, J. Ou, Modeling of piezoresistivity of carbon black filled cement-based composites under multi-axial strain, *Sens. Actuators A- Phys.*, **160**, 1-2, 87-93 (2010.)

35. J. L. Le, H. Du, S. D. Pang, Use of 2D Graphene Nanoplatelets (GNP) in cement composites for structural health evaluation, *Composites: Part B*, **67**, 555-563 (2014).

36. E. Teomete, O. I. Kocyigit, Tensile strain sensitivity of steel fiber reinforced cement matrix composites tested by split tensile test, *Constr. Build. Mat.*, **47**, 962-968 (2013).

37. E. Teomete, Transverse strain sensitivity of steel fiber reinforced cement composite tested by compression and split tensile tests, *Constr. Build. Mat.*, **55**, 136-145 (2014).

38. E. Teomete, Relations of crack length and electrical resistance for smart cement based composites, *Cement Wapno Beton*, **80**, 6, 329-334 (2013).

39. E. Teomete, O. I. Kocyigit, Correlation between compressive strain and electrical resistance in carbon fiber reinforced cement composites, *Cement Wapno Beton*, **82**, 1, 1-10 (2015).

40. D. D. L. Chung, *Multifunctional cement-based materials*, M. Dekker, New York 2003.

41. B. Han, X. Yu, J. Ou, *Self-Sensing Concrete in Smart Structures*. Butterworth-Heinemann, Boston 2014.

42. H. Xiao, H. Li, J.P. Ou, Strain sensing properties of cement-based sensors embedded at various stress zones in a bending concrete beam. *Sensors and Actuators A Physical*, **167**, 2, 581-587 (2011).

43. B. G. Han, Y. Yu, B. Z. Han, J. P. Ou, Development of a wireless stress/strain measurement system integrated with pressure-sensitive nickel powder-filled cement-based sensors, *Sensors and Actuators A- Physical*, **147**, 2, 536-543 (2008).

44. B. Han, J. Ou, Embedded piezoresistive cement-based stress/strain sensor, *Sensors and Actuators A-Physical* **138**, 2, 294-298 (2007).

45. B. Han, X. Guan, J. Ou, Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fibercement paste piezoresistive sensors, *Sensors and Actuators A-Physical*, **135**, 2, 360-369 (2007).

46. B. Han, K. Zhang, T. Burnham, E. Kwon, X. Yu, Integration and road tests of a self-sensing CNT concrete pavement system for traffic detection, *Smart Materials and Structures*, **22**, 1, 1-8 (2013).

47. W. J. McCarter, H.M. Taha, B. Suryanto, G. Starrs, Two-point concrete resistivity measurements: interfacial phenomena at the electrode-concrete contact zone, *Meas. Sci. And Tech.*, **26**, 8, 085007 1-13 (2015).

48. T. V. Fursa, K. Y. Osipov, B. A. Lukshin, G. E. Utsyn, The development of a method for crack-depth estimation in concrete by the electric response parameters to pulse mechanical excitation, *Meas. Sci. and Tech.*, **25** (5), 055605 1-10 (2014).

49. E. Teomete, Measurement of crack length sensitivity and strain gage factor of carbon fiber reinforced cement matrix composites, *Measurement*, **74**, 21-30 (2015).

50. E. Teomete, O. I. Kocyigit, Electrical resistance - compressive strain relationship of steel fiber reinforced cement composites, *Cement Wapno Beton*, **82**, 4, 244-253 (2015).

51. E. Teomete, The effect of temperature and moisture on electrical resistance, strain sensitivity and crack sensitivity of steel fiber reinforced smart cement composite, *Smart Mater. Struct.*, **25**, 075024 (2016).

52. European Committee for Standardization, EN 12390-6: Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens (2009).

providing the silica fume and super-plasticizer and to DowAKSA Co. for carbon fibers used in this study. The author would like to thank to the Dokuz Eylul University, Metallurgical and Materials Engineering Department for providing the mechanical testing system for bending tests. The author is thankful to Assoc. Prof. Dr. Tahir Kemal Erdem for his contributions to the work. The author declares that he has no conflict of interest.