mgr inż. Filip Grzymski[1)]
dr hab. inż. Tomasz Trapko, prof. PWr[1)*)]
dr inż. Michał Musiał[1)]

Badanie kompozytów PBO-FRCM z wykorzystaniem czujników światłowodowych

PBO-FRCM composites testing using fibre optic sensors

DOI: 10.15199/33.2019.03.07

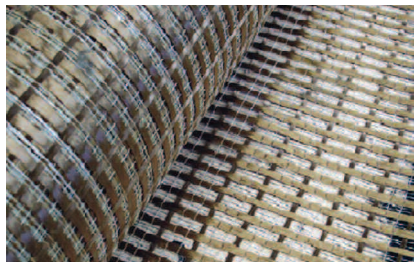
Streszczenie. W artykule przedstawiono badania kompozytu FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*) z włóknami PBO (*p-Phenylene Benzobis Oxazole*), w których zastosowano metodę pomiaru odkształceń z wykorzystaniem DFOS (*Distributed Fibre Optic Sensors*). Kompozyty FRCM za pomocą wysokowytrzymałych włókien PBO pozwalają na osiągnięcie dużego przyrostu nośności wzmacnianych konstrukcji żelbetowych bez szybkiej utraty efektywności w sytuacji pożarowej, co jest główną wadą kompozytów FRP (*Fibre Reinforced Polymers*). Zastosowana metoda badawcza, wykorzystująca czujniki światłowodowe, pozwala na geometrycznie ciągły pomiar odkształceń, który jest istotny przy ocenie efektywności pracy kompozytów FRCM. Umożliwia też wyznaczenie miejsca zarysowania elementu żelbetowego. W artykule przeprowadzono analizę przydatności tego typu pomiarów oraz przedstawiono perspektywy rozwoju badań kompozytów PBO-FRCM.
Słowa kluczowe: PBO; FRCM; kompozyt; DFOS; żelbet.

Abstract. This paper discusses the research on FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*) composite with PBO (*p-Phenylene Benzobis Oxazole*) fibres, in which the Distributed Fibre Optic Sensors (DFOS) were used for strain measurements. FRCM composites with high strength PBO fibres allow to gain high load bearing capacity increases of the strengthened RC structure without losing the effect in case of fire situation, as it happens with FRP composites (*Fibre Reinforced Polymers*). The used research method allows to obtain geometrically continuous strain measurement that is important in FRCM composite effectiveness evaluation. Additionally, it allows to find a place of RC element cracking. Suitability analysis of this kind of research method has been carried out and future perspectives on PBO-FRCM composites research are presented.

Keywords: PBO; FRCM; composite; DFOS; reinforced concrete.

Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych z wykorzystaniem materiałów kompozytowych jest w ostatnich latach coraz częściej stosowaną alternatywą dla tradycyjnych metod wzmacniania [2]. Najczęściej wybierane są kompozyty FRP (*Fibre Reinforced Polymers*), które składają się z włókien o dużej wytrzymałości (najczęściej węglowych, szklanych lub syntetycznych) zanurzonych w organicznej matrycy polimerowej, zazwyczaj żywicy epoksydowej [1, 2]. W przypadku tego typu kompozytów występują problemy dotyczące niekompatybilności ich matrycy z podłożem betonowym oraz aplikacji na wilgotną powierzchnię [1], ale ich **największą wadą jest mała odporność na podwyższoną temperaturę** [1, 9]. Żywice epoksydowe tracą swoje parametry wytrzymałościowe po przekroczeniu temperatury zeszklenia (T_g), która wynosi ok. +50°C [9, 10]. Zwiększenie odporności termicznej materiału może zostać uzyskane dzięki zamianie wrażliwej matrycy organicznej, co było jedną z przyczyn powstania kompozytów FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*). W badaniach udowodniono, że kompozyty FRCM znacznie lepiej zachowują się w warunkach podwyższonej temperatury niż kompozyty FRP [10], a ich matryca mineralna wykazuje lepszą kompatybilność z podłożem i nie jest wrażliwa na wilgoć [1]. W związku z innymi właściwościami fizycznymi matrycy mineralnej konieczne było przearanżowanie włókien kompozytu, które w przypadku kompozytów FRCM nie występują w postaci mat znanych z systemu FRP, tylko w postaci luźno splecionych dwukierunkowych siatek.

Spośród wielu rodzajów włókien wykorzystywanych w kompozytach FRCM szczególnej uwagi warte są włókna PBO (*p-Phenylene Benzobis Oxazole*), które charakteryzują się bardzo wysokimi parametrami mechanicznymi (fotografia 1). Ich wytrzymałość na rozciąganie wynosi 5800 MPa, a moduł Younga 270 GPa [12]. Tak duże naprężenia siatki wymagają odkształceń na poziomie 2,15%, co jest problematyczne ze względu na małą wytrzymałość matrycy mineralnej, która powoduje przedwczesne odspojenie lub poślizg siatki. Zwiększenie wykorzystania materiału jest możliwe przez jego odpowiednie zakotwienie [3, 6, 11].



Fot. 1. Siatka z włókien PBO [7]
Photo 1. PBO mesh [7]

Światłowodowe pomiary odkształceń

Kompozyty wzmacniające doznają największych odkształceń w miejscach zarysowania powierzchni elementu, do którego zostały przyklejone. Przewidzenie dokładnego miejsca zarysowania przed obciążeniem elementu, a tym

[1)] Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
[*)] Adres do korespondencji: tomasz.trapko@pwr.edu.pl

samym umieszczenie tam tensometru elektrooporowego, nie jest możliwe. Pomocne w tym przypadku są geometrycznie ciągłe pomiary odkształceń, np. z wykorzystaniem ciągłych czujników światłowodowych DFOS (*Distributed Fibre Optic Sensors*). Do pomiaru wykorzystuje się zaawansowane urządzenia optyczne nazywane reflektometrami, które na podstawie analizy fali świetlnej odbitej od mikrodefektów światłowodu są w stanie określić zmianę jego odkształceń [8]. Jako główne zalety pomiarów światłowodowych wymienia się niewielki rozmiar, masę i koszt czujników oraz geometryczną ciągłość pomiaru. Metoda ta jest szczególnie przydatna do monitorowania stanu konstrukcji istniejących [5]. Światłowody są również z powodzeniem wykorzystywane w badaniach laboratoryjnych [4], dlatego zdecydowaliśmy się sprawdzić ich przydatność przy badaniu kompozytów FRCM.

Elementy badawcze

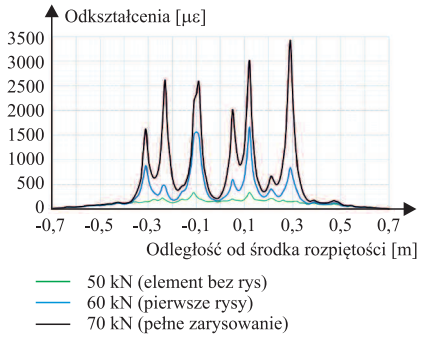
W badaniach wykorzystano płyty żelbetowe o rozpiętości 1700 mm, szerokości 1000 mm i grubości 150 mm, wzmocnione kompozytem PBO-FRCM z prętowym zakotwieniem końców siatki. Elementy zniszczono w próbie czteropunktowego zginania, a pomiarów odkształceń powierzchni betonu i kompozytu dokonano z wykorzystaniem czujników światłowodowych oraz tensometrów elektrooporowych (fotografia 2).

Czujniki światłowodowe ułożono na powierzchni betonu oraz kompozytu w sześciu równoległych rzędach w kierunku podłużnym elementu oraz w dwóch rzędach w kierunku poprzecznym. Montaż światłowodów rozpoczęto od dokładnego wyrównania i oczyszczenia powierzchni. Światłowód przyklejono tymczasowo taśmami, aby ustabilizować jego trasę i zapewnić odpowiednie napięcie włókna. Ostatecznego montażu dokonano z wykorzystaniem kleju epoksydowego, który rozprowadzono równomiernie na całej długości światłowodu, aby zapewnić dobre przenoszenie odkształceń w każdym punkcie pomiarowym.

Fot. 2. Rozeta tensometryczna oraz czujniki światłowodowe przed aplikacją kleju
Photo 2. Tensometric rosette and fibre optic sensors before glue application [Fot. F. Grzymski]

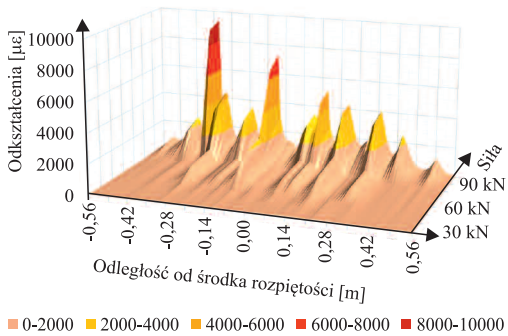
Wybrane wyniki pomiarów

Element kontrolny bez wzmocnienia kompozytowego uległ zniszczeniu przy sile ok. 171 kN, natomiast element wzmocniony kompozytem PBO-FRCM z zakotwieniem prętowym końców siatki pozwolił na przeniesienie siły 222 kN, co przekłada się na ok. 30% przyrost nośności. Zmierzono również charakterystyczne wartości odkształceń wzmacnianego elementu i kompozytu. Zastosowanie rozłożonych czujników światłowodowych pozwoliło na uzyskanie wyników, które wykraczają poza możliwości tensometrów elektrooporowych. Szczególnie użyteczne do analizy pracy elementu okazały się wskazania miejsca zarysowania, które na wykresach objawiają się w formie pików odkształceń. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy rozwój zarysowania płyty przy jej krawędzi. Stwierdzono 7 głównych zarysowań elementu, co pokrywa się z oceną wizualną zarysowania przeprowadzoną na bocznej krawędzi elementu. W przypadku elementu niewzmocnionego rysy pojawiały się w większych odstępach, co nie jest korzystne z punktu widzenia ich rozwartości. Analiza rozkładu odkształceń uzyskanego bezpośrednio przed momentem zarysowania pokazała, że miejsce wystąpienia rysy ujawnia się, zanim zacznie ona być widoczna, co można wykorzystać przy analizie stanu istniejącej konstrukcji. Dodatkowo, przy odpowiednio gęstym ułożeniu światłowodów na powierzchni elementu płytowego, możliwe jest wyznaczenie morfologii powstających w nim zarysowań. Taką analizę, podobnie jak w zaprezentowanym przypadku, można wykonać pod warstwą kompozytu, bez jego usuwania, co nie jest możliwe w przypadku innych metod pomiarowych. Wadą pomiarów światłowodowych jest ich nieciągłość w czasie i potrzeba zatrzymania procesu obciążania w celu akwizycji danych. W przypadku małych kroków obciążenia znacznie wydłuża to czas pomiaru.



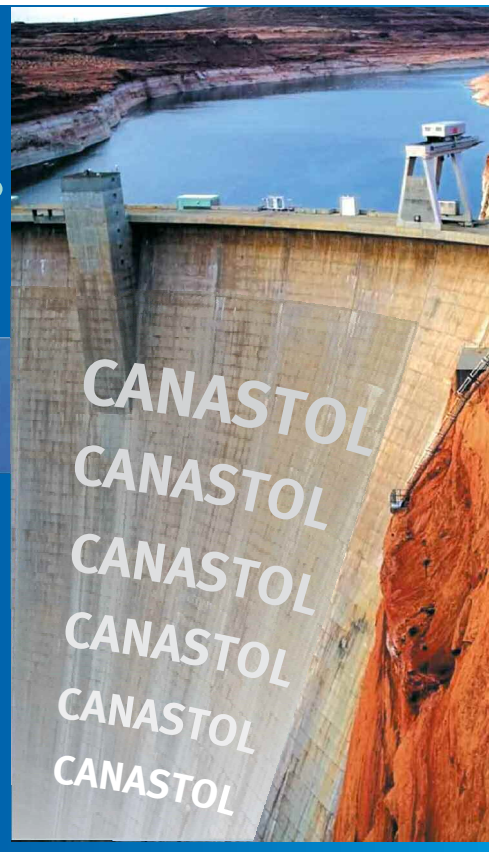
Rys. 1. Rozkład odkształceń podłużnych betonu pod kompozytem PBO-FRCM – widoczne zarysowanie
Fig. 1. Longitudinal strains of concrete under PBO-FRCM composite – visible cracking

Geometryczna ciągłość pomiaru pozwala na osiągnięcie dużej rozdzielczości pomiaru odkształceń, przez co są one bardziej miarodajne. Unika się możliwości pomiaru w punkcie, w którym wartość odkształceń jest niereprezentatywna. Dzięki temu możliwe jest opracowanie dokładnych wykresów przedstawiających rozwój odkształceń elementu w czasie badania. Na rysunku 2 przedstawiono odkształcenia kompozytu w początkowej fazie obciążenia. Kompozyt PBO-FRCM zaczyna się zauważalnie odkształcać dopiero po zarysowaniu powierzchni betonu, do której przymocowano wzmocnienie. Kolejny skokowy przyrost odkształceń widoczny jest po przekroczeniu obciążenia 80 kN, kiedy powstają duże zarysowania matrycy kompozytu PBO-FRCM. W przypadku wyższych wartości obciążeń uwidacznia się znaczny wpływ wyciągania włókna światłowodowego z kleju w obrębie zarysowania, co powoduje, że wyniki są nieczytelne.



Rys. 2. Przyrost odkształceń podłużnych kompozytu PBO-FRCM w czasie badania
Fig. 2. Increase of longitudinal strains of PBO-FRCM composite during testing

CANASTOL
Woda pod kontrolą



• środki hydrofobizujące do układów cementowych (tynki, zaprawy klejowe, szpachle)
• redukcja wykwitów (tynki, fugi)
• optymalizacja kosztów związanych z hydrofobizacją układu
RETTENMAIER Polska Sp. z o.o. JRS Włókna prosto z natury
www.jrs.pl

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały skuteczność pomiarów światłowodowych przy wyznaczaniu odkształceń kompozytów wzmacniających PBO-FRCM. Zastosowanie metody DFOS pozwala na uzyskanie istotnych informacji, które zostałyby pominięte przy zastosowaniu tensometrii elektrooporowej. Szczególnie istotna jest możliwość wyznaczenia dokładnego miejsca zarysowania, nawet na powierzchni betonu przykrytej kompozytem. Dodatkowo geometrycznie ciągły pomiar redukuje ryzyko pominięcia punktu pomiarowego, w którym występują ekstremalne wartości odkształceń. Przy dużej wartości odkształceń i dużej szerokości rozwarcia rys wyniki stają się nieczytelne, ale należy pamiętać, że w tym przypadku zawodzi również tensometria elektrooporowa – tensometry ulegają rozerwaniu. Dodatkową wadą pomiaru światłowodowego jest czas trwania odczytu przemieszczeń, który uniemożliwia pomiar ciągły w czasie badania.

Uzyskane w badaniach odkształcenia siatki PBO w kompozycie FRCM nie zbliżają się do opisywanej przez producenta wartości 2,15%, co świadczy o niewystarczającym jej wykorzystaniu. Zniszczeniu uległa mineralna matryca kompozytu FRCM, a nie włókna PBO. Istotnym kierunkiem dalszych badań z wykorzystaniem kompozytów PBO-FRCM jest rozwój systemów zakotwień, pozwalających zwiększyć ich efektywność, co uzupełni znane i opisane zalety kompozytów FRCM. W przypadku badań światłowodowych pomocne byłoby opracowanie metody dokładnego wyznaczenia szerokości rozwarcia rys, nad czym aktualnie trwają prace [4].

Literatura

[1] Awani Oluwafunmilayo, Tamer El-Maaddawy, Najif Ismail. 2017. „Fabric-reinforced cementitious matrix: A promising strengthening technique for concrete structures". *Construction and Building Materials* 132: 94 – 111.

[2] Bencardino Francesco, Christian Carloni, Antonio Condello, Francesco Focacci, Annalisa Napoli, Roberto Realfonzo. 2018. „Flexural behaviour of RC members strengthened with FRCM: State-of-the-art and predictive formulas". *Composites Part B: Engineering* 148: 132 – 148.

[3] Grzymski Filip, Dorota Marcinczak, Tomasz Trapko, Michał Musiał. 2018. „FRCM composites mesh anchorage – a way to increase strengthening effectiveness". *MATEC Web of Conferences* 251: 02044.

[4] Howiacki Tomasz, Rafał Sieńko. 2017. „Światłowody w pomiarach inżynierskich". *Builder* 238: 70 – 73.

[5] López-Higuera José Miguel, Luis Rodriguez Cobo, Antonio Quintela Incera, Adolfo Cobo. 2011. „Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring". *Journal of Lightwave Technology* 29: 587 – 607.

[6] Marcinczak Dorota, Tomasz Trapko, Michał Musiał. 2019. „Shear strengthening of reinforced concrete beams with PBO-FRCM composites with anchorage". *Composites Part B: Engineering* 158: 149 – 161.

[7] Ombres Luciano, Salvatore Verre. 2015. „Structural behaviour of fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) strengthened concrete columns under eccentric loading". *Composites Part B: Engineering* 75: 235 – 249.

[8] Sieńko Rafał, Łukasz Bednarski. 2018. *Systemy monitorowania konstrukcji żelbetowych i sprężonych*. Materiały XXXIII Ogólnopolskiej Konferencji „Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji", Szczyrk: 1 – 74.

[9] Trapko Tomasz. 2010. „Wpływ temperatury na trwałość i skuteczność wzmocnienia betonu kompozytami CFRP". *Inżynieria i Budownictwo* R. 66, (10): 561 – 564.

[10] Trapko Tomasz. 2013. „The effect of high temperature on the performance of CFRP and FRCM confined concrete elements". *Composites Part B: Engineering* 54: 138 – 145.

[11] Trapko Tomasz, Michał Musiał. 2017. „PBO mesh mobilization via different ways of anchoring PBO-FRCM reinforcements". *Composites Part B* 118: 67 – 74.

[12] Ruredil, X Mesh Gold Data Sheet, Ruredil SPA, Milan, Italy, 2009.

Badania prowadzone są w ramach projektu PWr-RUDN 2017 realizowanego przez Politechnikę Wrocławską wspólnie z Rosyjskim Uniwersytetem Przyjaźni Narodów w Moskwie, w ramach „Industrialized construction process (Construction 4.0). Technologiczne i metodologiczne warunki zastosowania wybranych elementów kompozytowych w budownictwie".

Przyjęto do druku: 07.02.2019 r.