

METODA DIC



Dorota Marcinczak
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechnika Wroclawska

Wzmacnianie konstrukcji betonowych za pomocą materiałów kompozytowych FRCM (*Fibre Reinforced Cementitious Matrix*) jest coraz częściej uwzględnianym sposobem naprawy istniejących konstrukcji. Jest to system, w którym stosuje się zaprawę cementową jako matrycę łączącą włókna z betonem.

Z względu na złożony charakter pracy tego kompozytu trudno jednoznacznie określić wytyczne do projektowania. W związku z tym wielu badaczy na świecie podejmuje temat wzmocnienia elementów konstrukcyjnych na zginanie, ścinanie i ściskanie, aby dokładnie zbadać mechanizmy zachodzące w tego typu wzmocnieniu [1–6]. Mechanizm zniszczenia oraz rozwój uszkodzenia ma charakter lokalny i występuje w miejscach osłabionych defektami materiału, np. słabszego pokrycia włókien zaprawą. Interesującą badaczy kwestią jest wartość odkształceń, jakie wystąpiły w momencie odspojenia czy poślizgu kompozytu, ponieważ ich znajomość jest niezbędna do określenia efektywności wzmocnienia. Pomiar odkształceń materiałów kompozytowych przy użyciu tensometrii są trudne do jednoznacznej analizy, ponieważ tensometr znajduje się w konkretnym miejscu na powierzchni kompozytu i pozwala na określenie odkształceń tylko na odcinku równym jego długości. Nie przekłada się to na pracę całego kompozytu, ponieważ zniszczenie może rozpoczynać się poza miejscem naklejenia tensometru. Co więcej, tensometr bardzo często ulega zerwaniu w miejscu przebiegu rysy, co uniemożliwia dalszy odczyt. W badaniach wzmocnionych elementów konstrukcyjnych tensometry można zastąpić metodą DIC (*Digital Image Correlation*), w literaturze polskojęzycznej określanej jako metoda cyfrowej korelacji obrazu [7], jaka pozwala na monitorowanie całego elementu i określenie miejsc, w których rozpoczyna się zniszczenie. W artykule przedstawiono opis metody DIC oraz jej wykorzystanie w badaniu belki żelbetowej wzmocnionej na ścinanie materiałami PBO-FRCM.

Cyfrowa korelacja obrazu (DIC)

Cyfrowa korelacja obrazu (ang. DIC – *Digital Image Correlation*) umożliwia bezkontaktowe pomiary zmian składowych stanu przemieszczenia zarówno w płaszczyźnie, jak i w trójmiarze. Pomiar polega na wykonaniu serii cyfrowych zdjęć badanego obiektu przed obciążeniem i w trakcie obciążenia. Powierzchnia badanego elementu musi być odpowiednio przygotowana poprzez naniesienie na nią losowej struktury plamkowej. Najczęściej w badaniach na obiektach żelbetowych strukturę plamkową wykonuje się przy użyciu farby w sprayu. Przed obciążeniem wykonuje się zdjęcie referencyjne, do którego porównywane są zdjęcia w trakcie obciążenia. Obraz referencyjny jest dzielony na małe prostokątne regiony (zwane subsetami) zawierające $n \times n$ pikseli. Wyniki pomiaru uzyskiwane są w pikse-

lach, następnie przeskalowywane są na milimetry z wykorzystaniem specjalnych tablic z naniesionym wzorcem, których obraz jest rejestrowany na zdjęciu referencyjnym (rys. 1.). Algorytm DIC śledzi pozycję każdego subsetu, co pozwala na mierzenie przemieszczeń powierzchni i budowę wektorowego pola przemieszczeń w 2D lub 3D, które następnie może być wykorzystane do obliczeń map odkształceń. Obrazy można uzyskać z wielu różnych źródeł, w tym z kamer CCD (*charge-coupled device*), cyfrowych aparatów fotograficznych, makroskopów i mikroskopów.

W większości przypadków system DIC jest wyposażony w układ dwóch kamer cyfrowych. Kamery mocowane są na statywie z poprzeczną belką, na której można regulować ich rozstaw, jaki jest uzależniony od wielkości badanego obszaru. W pobliżu kamer powinno znajdować się także źródło światła, które należy tak dopasować, aby ograniczyć odbłaski na badanym elemencie. Elementy stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 2.

Elementy badawcze

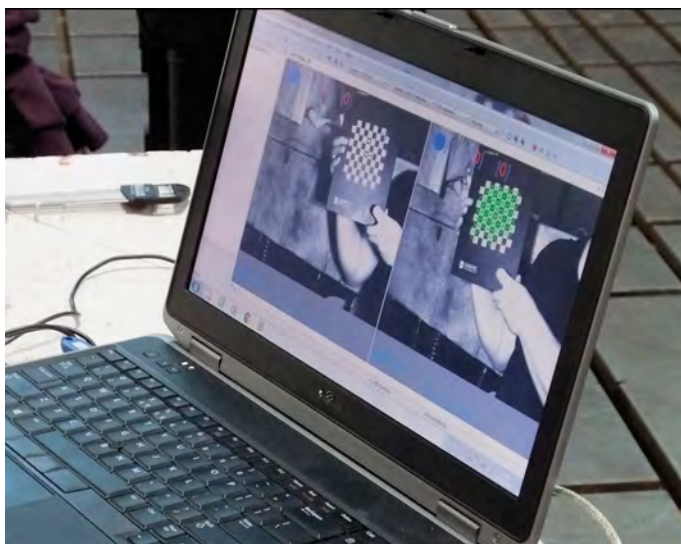
Badania przeprowadzono na belce teowej o wymiarach przekroju poprzecznego 350 x 400 mm, szerokości średnika 150 mm i długości 2300 mm. Jako zbrojenie na zginanie zastosowano 5 prętów o średnicy $\varnothing 20$, a jako zbrojenie na ścinanie – strzemiona o średnicy $\varnothing 8$ w rozstawie 250 mm.

Na potrzeby badań w zakładzie prefabrykacji wykonano 2 identyczne belki: jedną referencyjną, a drugą do wzmocnienia. Belki wykonano z tego samego zarobu. Przed przystąpieniem do badań określono cechy betonu i stali zbrojeniowej: średnia wytrzymałość betonu na ściskanie określona na próbkach walcowych – 44,75 MPa, średni moduł sprężystości betonu – 33,19 GPa, średnia granica plastyczności prętów zbrojeniowych – 526,2 MPa, średni moduł sprężystości stali – 206,7 GPa.

Belki wzmocniono na ścinanie kompozytami PBO-FRCM (*Fibre Reinforced Cementitious Matrix*), w skład których wchodzi siatka z włókna PBO (*p-Phenylene Benzobis Oxazole*) oraz zaprawa mineralna.

Elementy badawcze i metodyka pomiarów

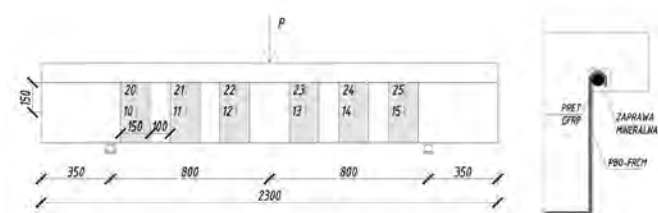
W zakładzie prefabrykacji wykonano pod półką belki podłużne rowki o wymiarach 20 x 20 mm. Belka została wzmocniona paskami siatki PBO o szerokości 150 mm, w rozstawie w świe-



Rys. 1. Kalibracja przy użyciu tablicy wzorcowej



Rys. 2. Elementy systemu DIC firmy DANTEC, źródło: <https://www.ita-polska.com.pl>



Rys. 3. Schemat wzmocnienia elementu badawczego



Rys. 4. Struktura plamkowa na powierzchni badanego elementu

tle co 100 mm. Każdy pasek posiadał wolny koniec o długości 10 cm, który po wykonaniu wzmocnienia był nawijany na pręt GFRP i wklejany w rowek pod półką za pomocą zaprawy cementowej (rys. 3).

Elementy były obciążane w sposób ciągły do zniszczenia, w schemacie trójpunktowego zginania (rys. 3.). Odształcenia betonu, stali oraz kompozytów mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych. Na strzemiączach z siatki PBO naklejono tensometry w połowie wysokości belek, zgodnie z kierunkiem włókien (rys. 3. – numeracja 10–15). Tensometry naklejono również w miejscu zakotwienia siatek, po obu stronach belki (rys. 3. – numeracja 20–25). Połowa przęsła belki była także przedmiotem analizy metodą DIC. Ze względu na budowę maszyny wytrzymałościowej, która posiada filar na środku rozpiętości przęsła, nie można było użyć metody DIC do analizy całej belki, ponieważ obraz z obu kamer nie przedstawiałby tej samej powierzchni. Prawa połowa belki została przygotowana do pomiarów DIC poprzez pobielenie powierzchni betonu wapnem oraz spryskanie jej czarną farbą, aby nadać strukturę plamkową. Powstałe plamki na powierzchni betonu przedstawiono na rys. 4., a stanowisko badawcze na rys. 5.

Mechanizm zniszczenia

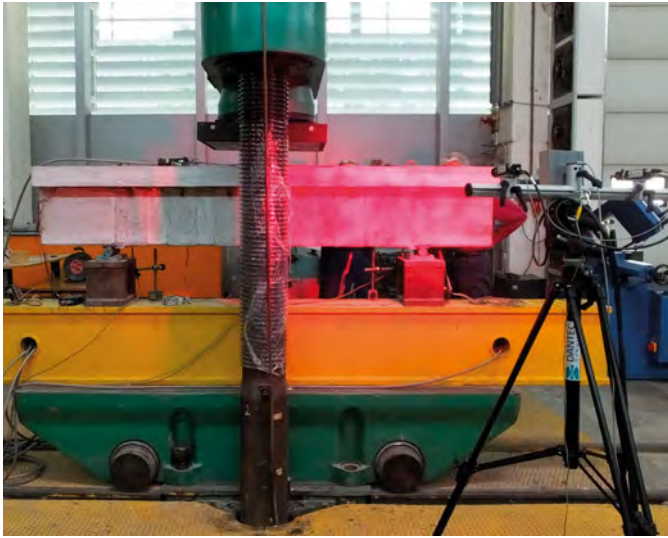
Belka zniszczyła się na ścinanie w wyniku powstania ukośnej rysy niszczącej. Rysa ta rozwinęła się na połowie przęsła, która nie była objęta zasięgiem kamer DIC. Nośność belki na ścinanie, otrzymana w badaniu, wyniosła 527,4 kN. Porównując nośność belki wzmocnionej do nośności belki kontrolnej, otrzymano przyrost nośności rzędu 16%.

Mechanizm zniszczenia polegał na odpajaniu się siatki PBO, któremu towarzyszył rozwój rysy ukośnych. W żadnym pasku PBO-FRCM nie doszło do zerwania włókien. Odspojenie miało charakter lokalny i rozpoczęło się w miejscu przebiegu rysy ukośnej. Przed samym zniszczeniem dochodziło również do nagłego rozwijania się rysy ukośnej w półce, która nie była wzmocniona. W miarę przyrostu obciążenia rysa ta dochodziła do zakotwienia, a następnie biegła wzdłuż pręta GFRP. Na paskach siatki PBO zarysowaniu ulegała także zewnętrzna warstwa zaprawy cementowej w wyniku poślizgu między włóknami siatki a matrycą.

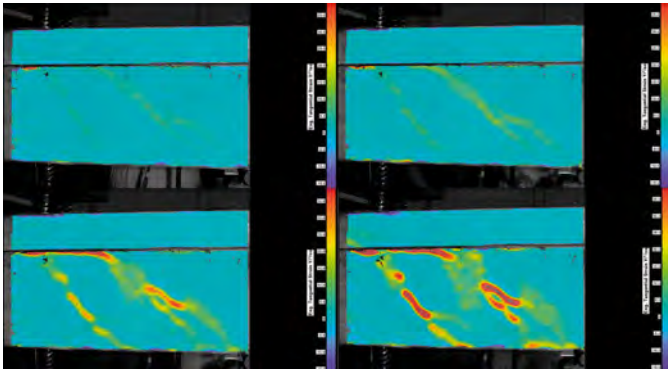
Analiza odształceń kompozytu

Maksymalne odształcenia kompozytu mierzone przy użyciu tensometrów elektrooporowych naklejonych w połowie wysokości paska PBO wyniosły 3,5‰, a w miejscu zakotwienia odształcenia zmierzone przy użyciu tensometrów miały maksymalną wartość 12‰. Są to wartości odpowiadające części przęsła, w której doszło do zniszczenia. W drugiej części przęsła maksymalne odształcenia na środku kompozytu wyniosły 0,43‰ dla paska PBO z nr 15 (rys. 3.), a w zakotwieniu 5,97‰ dla paska z nr 14.

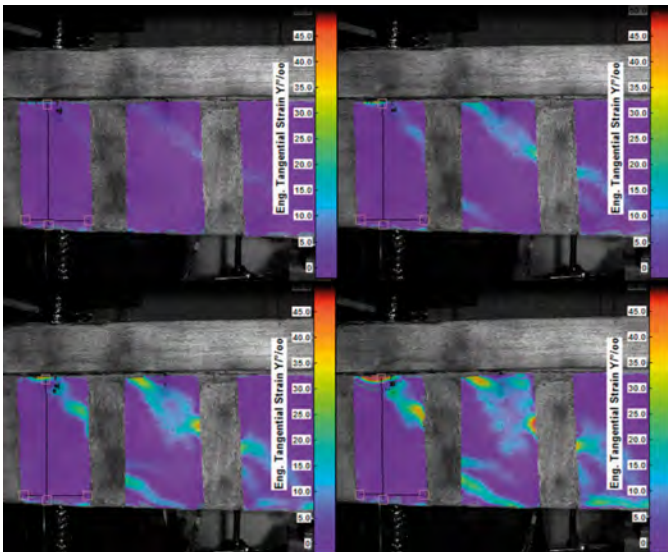
Zaletą metody DIC jest możliwość analizy odształceń na całej powierzchni elementu. Dzięki temu można zaobserwować rozwój rysy oraz rozkład odształceń na wysokości kompozytów. Podczas badania wykazano, że rysy ukośne przechodzą pod paskami PBO i rozwijają się między nimi (rys. 6.). Na paskach PBO pierwsze odształcenia powstają w miejscu rysy ukośnej, następnie dochodzi do ich redystrybucji po wysokości paska. Maksymalne odształcenia mierzone przy użyciu metody DIC osiągnęły wartość ponad 5‰ zarówno w miejscu zakotwienia dla paska nr 13, jak i na środkowym pasku nr 14 (rys. 7.). Na podstawie obrazów z kamer DIC można stwierdzić, że maksymalne odształcenia kompozytu wystąpiły w innych miejscach niż były naklejone tensometry, np. na krawędzi środkowego paska w miejscu ry-



Rys. 5. Stanowisko badawcze



Rys. 6. Obraz z kamer DIC przedstawiający rozwój rys ukośnych w badanej belce



Rys. 7. Obraz z kamer DIC przedstawiający odkształcenia pasków kompozytowych PBO-FRCM wraz ze wzrostem obciążenia

sy ukośnej oraz po lewej stronie zakotwienia na pasku nr 13. W miejscach naklejenia tensometrów, czyli w połowie wysokości i szerokości każdego paska PBO, zarejestrowano bardzo małe odkształcenia, co pokrywa się z odczytami z tensometrów. W przypadku badań belek wzmocnionych na ścinanie metoda DIC pozwala na lepszą i dokładniejszą analizę pracy kompozytu, jego wyężenia i lokalizacji miejsc najbardziej wyężonych.

Wnioski

Mechanizm zniszczenia i rozwój uszkodzenia belek wzmocnionych na ścinanie materiałami PBO-FRCM ma charakter lokalny w miejscach osłabionych defektami materiału oraz w miejscu przebiegu rys ukośnych. Z tego powodu analiza odkształceń wzmoczonego elementu jest niejednokrotnie trudna przy użyciu tensometrii elektrooporowej. Dobrą alternatywą dla tensometrów jest metoda *Digital Image Correlation* (DIC), która umożliwia skuteczne pomiary deformacji wzmocnionych stref przypodporowych belki. Pozwala ona na określenie charakteru pracy całej powierzchni badanego elementu, dając możliwość wyznaczenia miejsc najbardziej wyężonych, a także odkształceń kompozytu oraz betonu. Przy użyciu metody DIC można jeszcze przed powstaniem rysy ukośnej określić, jaki będzie jej przebieg i ją monitorować. Rejestrując zmiany zachodzące we wzmocnionym elemencie podczas całego przebiegu obciążenia, można lepiej zrozumieć mechanizm pracy kompozytów FRCM.

Analizując odkształcenia kompozytu otrzymane w badaniach, można zauważyć, że przy użyciu tensometrów nie udało się określić maksymalnych odkształceń, ponieważ tensometry znajdowały się w miejscach, gdzie odkształcenia były mniejsze. Dzięki metodzie DIC można było określić maksymalne wyężenie siatek PBO oraz wykazać, że w każdym pasku w miarę wzrostu obciążenia występuje redystrybucja odkształceń po jego wysokości, a koncentracja naprężeń występuje na krawędziach pasków w miejscu przecięcia z rysą ukośną. ■

Bibliografia

- [1] Loreto G., Babaeidaarabad S., Leardini L., Nanni A., RC beams shear-strengthened with fabric-reinforced-cementitious-matrix (FRCM) composite, "International Journal of Advanced Structural Engineering", 7(4), 2015, p. 341-352.
- [2] Tetta Z.C., Koutas L.N., Bournas D.A., Shear strengthening of full-scale RC T-beams using textile-reinforced mortar and textile-based anchors, *Composites: Part B*, 95, 2016, p. 225-239.
- [3] Trapko T., Urbańska D., Kamiński M., Shear strengthening of reinforced concrete beams with PBO-FRCM composites, *Composites: Part B*, 80, 2015, p. 63-72.
- [4] Trapko T., Musiał M., PBO mesh mobilization via different ways of anchoring PBO-FRCM reinforcements, *Composites: Part B*, 118, 2017, p. 67-74.
- [5] Ombers L., Concrete confinement with a cement based high strength composite material, "Compos Struct" 2014;109:294-304.
- [6] Trapko T., Fibre Reinforced Cementitious Matrix confined concrete elements, "Mater Design", 2013;44:382-391.
- [7] Szymczak T., Grzywna P., Kowalewski Z., Nowoczesne metody określania wytrzymałościowych właściwości materiałów konstrukcyjnych, "Transport samochodowy", nr 1, 2013.

Abstract: DIC (DIGITAL IMAGE CORRELATION) METHOD IN THE RESEARCH OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH PBO-FRCM MATERIALS The article presents tests of a reinforced concrete beam strengthened in a shear with PBO-FRCM composite materials. Measurement of the deformation of the composite was carried out using two methods - with strain gauges and the optical DIC method (Digital Image Correlation). The DIC method consists in taking a series of photographs of the tested object before and during loading. The surface of the tested element must have randomly spaced spots that are applied to the object before measurement. During the study, the cameras monitor the shifting of spots against each other, which in comparison to the reference image before loading gives information about strains and stresses of the tested element. Measurements of deformation of composite materials using strain gauges are difficult to clearly analyze, because the strain gauge is in a specific, limited place, which does not correspond to the work of the entire composite. In addition, the strain gauge tends to break at the place of crack. The article discusses this problem by presenting the results of deformation of PBO-FRCM composite meshes measured in two mentioned ways, their comparison and discussion of results.

Keywords: PBO-FRCM, beams, shear, deformations, DIC