



Fundacja Polskiego Związku Inżynierów i Techników Budownictwa
Czasopismo „Inżynieria i Budownictwo”

DYPLOM

w konkursie autorskim artykułów wyróżniających się
ujęciem tematyki i przydatnością praktyczną, opublikowanych
na łamach miesięcznika „Inżynieria i Budownictwo” w roku 2023

Rada Programowa Czasopism i Wydawnictw PZITB

przyznała

III NAGRODĘ

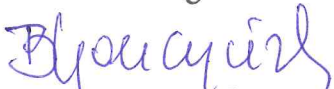
za artykuł pt. „Cyfrowa technika korelacji obrazu a tradycyjne metody pomiarowe
na przykładzie testów fibrobetonów” (nr 9-10/2023).

Laureatami zostali

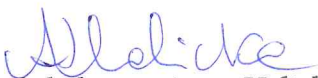
mgr inż. JULIA BLAZY
prof. dr hab. inż. ŁUKASZ DROBIEC

SERDECZNIE GRÁTULUJEMY

W imieniu Kolegium Redakcyjnego


Prof. dr hab. inż. Barbara Goszczyńska
Redaktor naczelna

W imieniu Rady Programowej


Prof. dr hab. inż. Anna Halicka
Przewodnicząca Rady

Mgr inż. JULIA BLAZY (ORCID: 0000-0001-9525-8650),
 Prof. dr hab. inż. ŁUKASZ DROBIEC (ORCID: 0000-0001-9825-6343)
 Politechnika Śląska
 Wydział Budownictwa

Cyfrowa technika korelacji obrazu a tradycyjne metody pomiarowe na przykładzie testów fibrobetonów

Digital image correlation technique versus traditional measurement methods on the example of fiber reinforced concrete tests

STRESZCZENIE: Fibrobeton charakteryzuje się zdolnością przenoszenia obciążeń przy zwiększającej się szerokości rozwarcia rysy nawet po osiągnięciu maksymalnej nośności. W związku z tym konieczna jest obserwacja oraz analiza propagacji i zwiększania się tego zarysowania. W tym celu można użyć tradycyjnych metod pomiarowych: mierników zaciskowych bądź czujników przemieszczeń. Coraz częściej jednak stosuje się technikę cyfrowej korelacji obrazu jako alternatywną, uzupełniającą lub sprawdzającą metodę pomiarową. W artykule skupiono się na analizie porównawczej wyników z bezpośrednich urządzeń pomiarowych z wynikami z czujników wirtualnych uzyskanych w testach trzypunktowego zginania oraz rozłupywania Montevideo. Badane były próbki fibrobetonowe z trzema różnymi rodzajami włókien polimerowych, różniące się również zawartością tych włókien w mieszance betonowej.

Słowa kluczowe: fibrobeton, włókna polimerowe, cyfrowa technika korelacji obrazu, czujniki LVDT, mierniki zaciskowe.

ABSTRACT: Fiber reinforced concrete is characterized by the ability to transfer loads with increasing crack width, even after reaching the maximum load capacity. Therefore, it is necessary to observe and analyse the propagation and increase of the crack. For this purpose, the traditional measurement methods like clip gauges or linear variable displacement transducers can be used. However, the digital image correlation technique is increasingly gaining popularity as an alternative, supplementary or verifying measurement method. The article focuses on the comparative analysis of the results from direct measuring devices with the results from virtual sensors obtained in the three-point bending test and Montevideo splitting tensile test. Fiber reinforced concrete samples with three different types of polymer fibers and their different content in the concrete mix were tested.

Keywords: fiber reinforced concrete, polymer fibers, digital image correlation technique, LVDT, clip gauges.

W artykule¹⁾ przedstawiono analizę porównawczą wyników otrzymanych dzięki bezpośrednim urządzeniom pomiarowym, takim jak mierniki zaciskowe oraz czujniki przemieszczeń (LVDT – ang. linear variable displacement transducer), z wynikami uzyskanymi dzięki cyfrowej technice korelacji obrazu (DIC – ang. digital image correlation). Technika ta jest coraz częściej stosowana jako alternatywna, uzupełniająca oraz sprawdzająca metoda pomiarowa betonu. Badane były próbki fibrobetonowe z dodatkiem 2 i 3 kg/m³ włókien polimerowych (PFRC – ang. polymer fiber reinforced concrete) o trzech różnych charakterystykach. Program badawczy obejmował dwa testy: test trzypunktowego zginania (3PBT – ang. three-point bending test) oraz test rozłupywania Montevideo (MVDT – ang. Montevideo test).

Wprowadzenie

Fibrobeton to kompozyt betonu z włóknami metalicznymi bądź niemetalicznymi, takimi jak włókna polimerowe (PF – ang. polymer fibers) [1]. Poprzez dodanie ich do mieszanki betonowej możliwe jest zwiększenie trwałości, wytrzymałości, udarności oraz ciągliwości betonu [2÷5]. Próbki fibrobetonowe zachowują swoją integralność po osiągnięciu maksymalnej nośności i są zdolne do przeniesienia dalszych obciążeń pomimo wzrastającej szerokości rozwarcia rysy. Dodatkowy wzrost wytrzymałości betonu, wynikający z włączenia do pracy włókien, można uwzględnić przy projektowaniu posadzek przemysłowych, o czym mowa w Model Code 2010 [6] i Technical Report 34 [7]. Wymagane jest jednak wykonanie testu 3PBT opisanego w normie EN 14651 [8] oraz obliczenie wytrzymałości resztkowych na zginanie. Konieczne jest więc zbadanie

¹⁾ Wszystkie rysunki i tablice opracowali i wykonali autorzy.

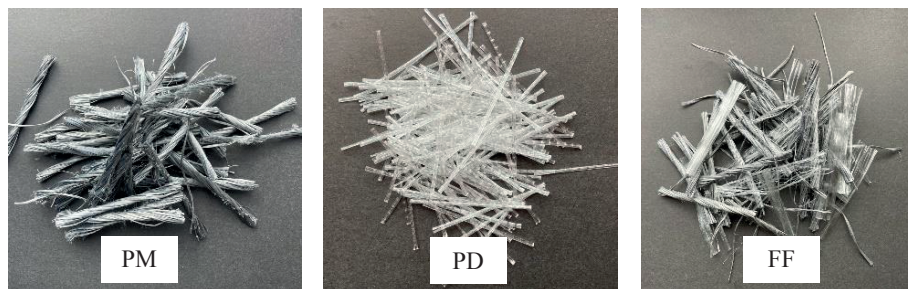
zachowania się PFRC po osiągnięciu maksymalnej wytrzymałości, scharakteryzowanie propagacji zarysowania i kontrola zwiększania się szerokości rozwarcia rysy. Poza testem 3PBT istnieją również inne metody badawcze pozwalające na badanie fibrobetonów po osiągnięciu maksymalnej wytrzymałości. Wiele tych metod jest prostszych i bardziej kompaktowych niż test 3PBT, jednak nie są one standaryzowane i w jakiś sposób uregulowane. Przykładem jest test rozłupywania klinem (WST – ang. wedge splitting test), pierwotnie przedstawiony przez Linsbauera i Tschegga [9]. Test ten był z powodzeniem stosowany w wielu pracach badawczych, a później opisany w artykułach [10÷13]. Swoją popularność zawdzięcza m.in. małym, sześciennym próbkom wykorzystywanym podczas badania, gdyż są one lżejsze i łatwiejsze do przenoszenia, a gromadzona w nich energia sprężysta jest znacznie mniejsza od tej w belkach podczas testu 3PBT [14]. Inną zaletą testu WST jest możliwość wykorzystania próbek wierconych rdzeniowo, a więc test ten może służyć do diagnozowania i oceny stanu technicznego istniejących konstrukcji. Segura-Castillo i in. [15, 16] zaproponowali zmodyfikowaną wersję testu WST, zwaną testem rozłupywania Montevideo, w celu jeszcze większego uproszczenia metody badawczej. Mianowicie w teście MVDT zminimalizowano liczbę nacięć do jednego oraz zoptymalizowano geometrię klina rozłupującego. Dodatkowo test MVDT można przeprowadzić w standardowej maszynie wytrzymałościowej, pozyskując próbki z wcześniej wykonanych badań, takich jak test 3PBT. Belki można bowiem poddać odpowiedniej obróbce, a uzyskane kostki łatwo dostosować do wymagań testu MVDT.

W teście 3PBT, jak również w teście MVDT są używane mierniki zaciskowe i czujniki przemieszczeń do pomiaru szerokości rozwarcia rysy (CMOD – ang. crack mouth opening displacement) oraz szerokości rozwarcia wierzchołka rysy (CTOD – ang. crack tip opening displacement). Coraz częściej jednak jest stosowana technika cyfrowej korelacji obrazu jako alternatywna, uzupełniająca bądź sprawdzająca metoda pomiarowa betonu [17÷19]. Dzięki temu systemowi możliwe jest rejestrowanie propagacji rysy w czasie rzeczywistym, w sposób ciągły. Dodatkową zaletą jest również bezkontaktowy i nieniszczący charakter systemu DIC. Technika ta polega na porównaniu losowego wzoru czarno-białych plamek, namalowanych na badanej powierzchni, z obrazem referencyjnym. Analiza zapisanych obrazów cyfrowych w oprogramowaniu GOM Correlate pozwala zmierzyć i zwizualizować przemieszczenia, zmiany szerokości rozwarcia rysy i stworzyć mapy odkształceń i naprężeń.

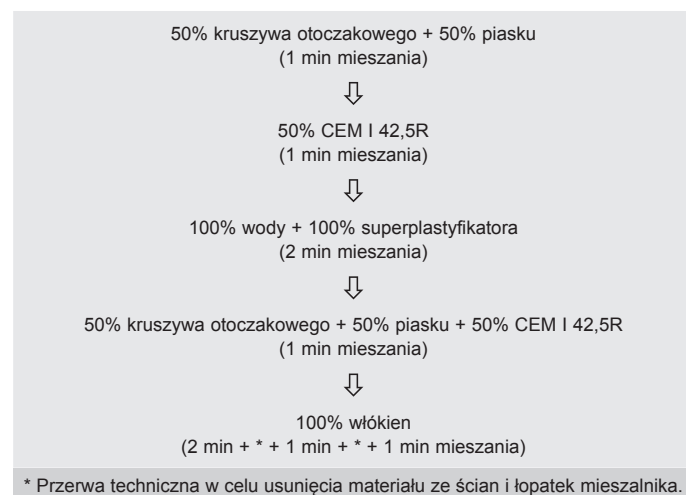
Program badawczy

Program badawczy obejmował pięć mieszanek z włóknami polimerowymi. Każda mieszanka składała się z 400 kg cementu portlandzkiego typu I o dużej wytrzy-

małości wczesnej klasy 42,5 (CEM I 42,5R). Dodatkowo jako kruszywo gruboziarniste i drobnoziarniste dodano do mieszanki 1052 kg kruszywa otoczkowego o średnicy do 8 mm i 673 kg piasku. Ilość zużytej wody wyniosła 200 kg, zatem współczynnik wody do cementu (w/c) wyniósł 0,50. W celu zapewnienia odpowiedniej urabialności mieszanki betonowej dodano 1,43 kg superplastyfikatora. Włókna użyte do badań to włókna polimerowe o gęstości równej 0,91 g/cm³ i temperaturze topnienia od 160 do 170°C. Włókna kopolimerowe oznaczone jako PM miały długość (l_f) i średnicę (d_f) odpowiednio 54 i 0,45 mm. Wytrzymałość na rozciąganie (f_{ft}) włókien PM wynosiła 550–650 MPa. Włókna PM miały szary kolor i postać skręconych multifilamentów. Drugi rodzaj włókien to włókna polimerowe oznaczone jako PD, gdzie $l_f = 48$ mm, $d_f = 0,60$ mm, a $f_{ft} = 500$ –580 MPa. Były one białe i monofilamentowe. Ostatnie włókna oznaczone jako FF miały charakter hybrydowy, gdyż składały się w 95% z włókien kopolimerowych: szarych, skręconych, multifilamentowych oraz w 5% z włókien polipropylenowych: przezroczystych, fibrylowanych. Ich l_f wynosiła 54 mm, d_f multifilamentowych włókien FF była równa 0,45 mm, a f_{ft} podane przez producenta mieściło się w przedziale od 620 do 758 MPa. Użyte włókna przedstawiono na rys. 1. Każdą z pięciu mieszanek betonowych przygotowano osobno, wykorzystując do tego mieszalnik planetarny Zyklos, który podczas dodawania składników nie był zatrzymywany. Procedurę mieszania przedstawiono na rys. 2.

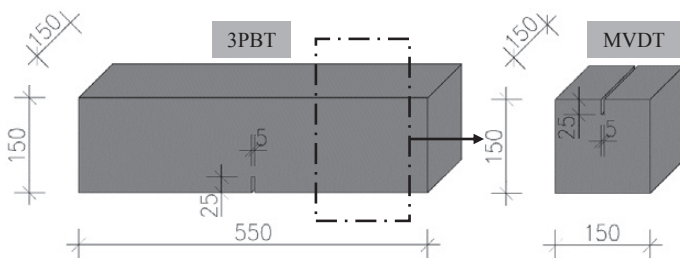


Rys. 1. Włókna polimerowe dodane do mieszanek betonowych



Rys. 2. Procedura przygotowania mieszanek betonowych

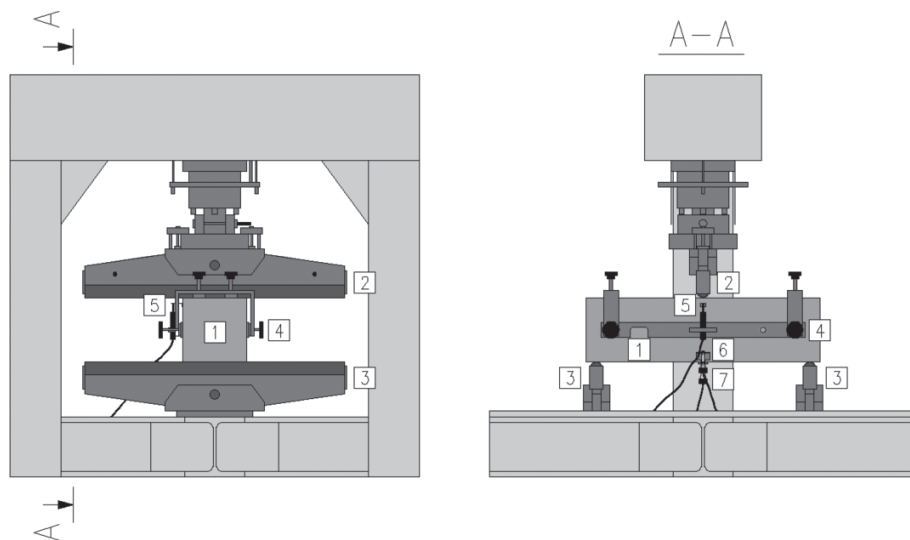
W celu przeprowadzenia testu 3PBT przygotowano 15 belek (po 3 dla każdego typu mieszanki betonowej) o wymiarach $150 \times 150 \times 550$ mm wg wymagań EN 14651 [8] (rys. 3). Wszystkie próbki przykryto folią plastikową i regularnie pielęgnowano wodą, aby uniknąć zarysowań skurczowych. W dniu 17. próbki rozformowano i odtąd przechowywano w warunkach laboratoryjnych, w temperaturze $20 \pm 2^\circ\text{C}$ i wilgotności względnej powietrza $\geq 95\%$. W dniu 18. po zabetonowaniu, na jednej ze ścian każdej belki, pośrodku jej rozpiętości, wykonano nacięcie o szerokości 5 mm i głębokości 25 mm, zgodnie z normą [8]. Test 3PBT przeprowadzono na próbce z 3 kg/m^3 włókien PM (PM_3), z 2 kg/m^3 włókien PM (PM_2) oraz z 3 kg/m^3 włókien PD (PD_3) w dniu 37. po zabetonowaniu, na próbce z 2 kg/m^3 włókien PD (PD_2) oraz 2 kg/m^3 włókien FF (FF_2) w dniu 38. po zabetonowaniu. Próbki do testu MVDT uzyskano z przetestowanych wcześniej belek. Mianowicie z każdej belki odcięto jeden sześciąt o wymiarach $150 \times 150 \times 150$ mm w pewnej odległości od końca i od płaszczyzny zniszczenia (rys. 3). Na kostkach do testu MVDT wykonano identyczne nacięcie jak na belkach na tej samej powierzchni. Do testu MVDT przygotowano 15 próbek (po 3 dla każdej serii badawczej).



Rys. 3. Wymiary próbek do testu 3PBT i MVDT

Metodyka badań

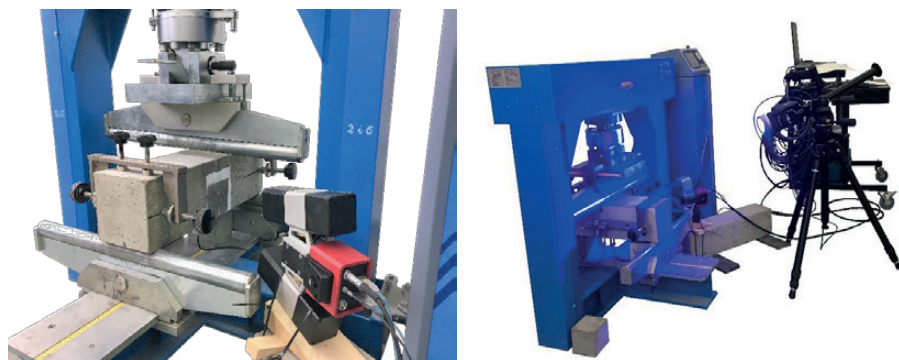
Test 3PBT przeprowadzono zgodnie z normą EN 14651 [8]. Na rysunku 4 pokazano stanowisko badawcze dla testu 3PBT. Próbka została umieszczona pomiędzy dwoma podporami odległymi od siebie o 500 mm. Następnie umocowano na belce sztywną ramę do zainstalowania czujnika LVDT do pomiaru ugięcia δ . Na koniec, w odpowiednich miejscach pomiarowych, umieszczono mierniki zaciskowe do pomiaru CMOD i CTOD. Siła (F) przykładana była w środku rozpiętości próbki za pomocą podpory górnej. Wzrost F był regulowany stałym przyrostem δ równym $0,2 \text{ mm/min}$. Test trwał do momentu osiągnięcia δ



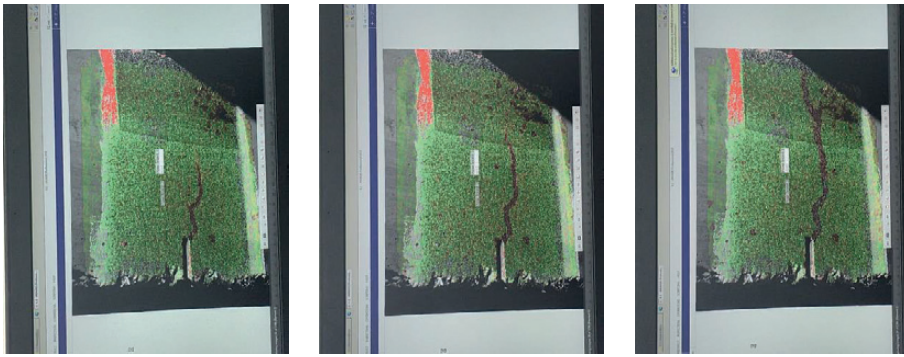
Rys. 4. Stanowisko badawcze dla testu 3PBT: 1 – próbka; 2 – podpora ruchoma (przekazująca siłę); 3 – podpora nieruchoma; 4 – sztywna rama do zainstalowania czujnika LVDT; 5 – czujnik LVDT do pomiaru ugięcia; 6 – miernik zaciskowy do pomiaru CTOD; 7 – miernik zaciskowy do pomiaru CMOD

równego 5 mm. W wyniku badania uzyskano wykresy F-CMOD i F-CTOD dla każdej z 15 belek.

W celu przygotowania próbki do badania z użyciem systemu DIC konieczne było pomalowanie prostokątnego obszaru wokół nacięcia białym, a następnie czarnym sprayem, aby stworzyć przypadkowy wzór czarno-białych plamek. Umieszczenie kamery przed próbką było niemożliwe ze względu na ramę urządzenia do badania 3PBT. W rezultacie kamera została ustawiona pod pewnym kątem widocznym na rys. 5. Podczas badania możliwa była ciągła obserwacja w czasie rzeczywistym pojawiających się zarysowań belek (rys. 6). Uszkodzenia te były widoczne wcześniej na ekranie komputera, który rejestrował obraz dzięki technice DIC, niż gołym okiem. W trakcie testu były wykonywane zdjęcia co 2 s, a więc z częstotliwością $0,5 \text{ Hz}$. Ich późniejsze przetworzenie w oprogramowaniu GOM Correlate umożliwiło analizę propagacji rysy, zmiany jej szerokości oraz stworzenie map odkształceń. Analiza polegała na porównaniu wartości CMOD i CTOD pomiędzy obrazem referencyjnym, zapisanym przed badaniem, a zdjęciami próbki wykonanymi podczas badania. Poprzez wprowadzenie wirtualnych czujników zmierzono wartości rozwarcia rysy na początku oraz przy wierzchołku nacięcia, co umożliwiło uzyskanie wykresów



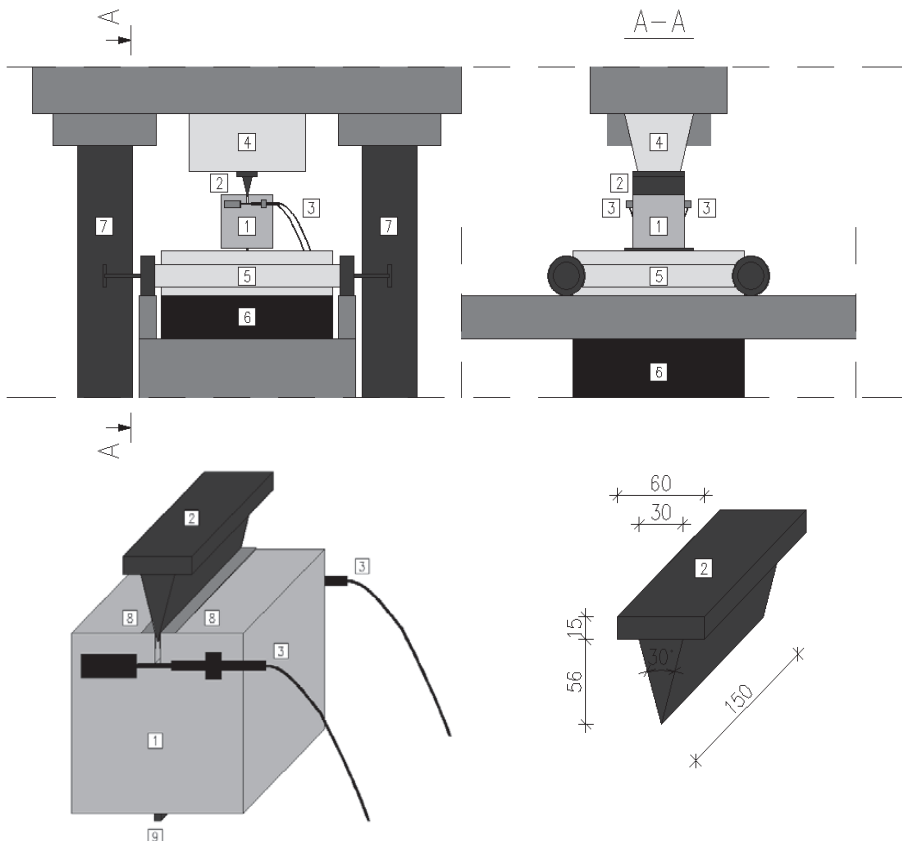
Rys. 5. Stanowisko badawcze dla testu 3PBT wraz z zestawem pomiarowym systemu DIC: kamerą, lampą oświetleniową i komputerem przechowującym dane z badania



Rys. 6. Obraz propagującej rysy zarejestrowany na komputerze dzięki technice DIC

F-CMOD oraz F-CTOD. Kolejnym krokiem było porównanie wyników z mierników zaciskowych z wynikami z systemu DIC. Dodatkowo przeanalizowano mapy odkształceń i propagację rys dla poszczególnych wartości CMOD.

Test MVDT przeprowadzono w standardowej maszynie wytrzymałościowej (rys. 7). Na początku sześcienna próbka została ułożona na stalowym pręcie, umieszczonym pośrodku kostki, aby umożliwić jej obrót podczas rozłupywania i powiększania się rysy. Kostka była rozłupywana przez specjalnie zaprojektowany klin umieszczony w nacięciu próbki, na który działała siła pionowa F (rys. 7). Dodatkowo, aby ograniczyć tarcie pomiędzy betonową próbką a stalowym klinem, po obu stronach nacięcia umieszczono stalowe kątowniki. Skuteczność tego rozwiązania została przetestowana przez Segura-Castillo i in. [15]. Stwierdzono, że zastosowanie kontaktu typu stal-stal



Rys. 7. Stanowisko badawcze dla testu MVDT: 1 – próbka; 2 – klin; 3 – czujnik LVDT do pomiaru CTOD; 4 – górna belka; 5 – dolna belka; 6 – tłok; 7 – suw; 8 – stalowe kątowniki; 9 – pręt stalowy

charakteryzuje się mniejszym rozrzutem wyników w porównaniu z kontaktem stal-beton, stabilnym współczynnikiem tarcia oraz brakiem nieoczekiwanych uszkodzeń próbki. Zamontowane zostały też dwa czujniki LVDT (jeden z przodu i jeden z tyłu kostki) w miejscu wierzchołka nacięcia do pomiaru wartości CTOD.

W celu utworzenia wykresu F-CTOD obliczono średnią z obu czujników przemieszczeń. Siłę ściskającą F zwiększano, kontrolując wzrost pionowego przemieszczenia urządzenia o 1 mm/min. Utworzenie wykresu F-CMOD wymagało dodatkowych obliczeń. Wzór (1) wykorzystuje wartości przemieszczeń przy wierzchołku nacięcia do obliczeń wartości CMOD, a mianowicie:

$$CMOD = CTOD \frac{h}{h_{sp}}, \quad (1)$$

gdzie:

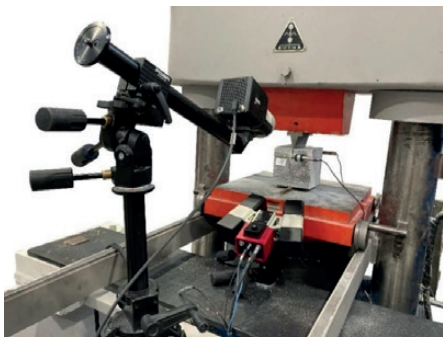
CMOD – szerokość rozwarcia rysy na początku nacięcia [mm];

CTOD – szerokość rozwarcia rysy przy wierzchołku nacięcia [mm];

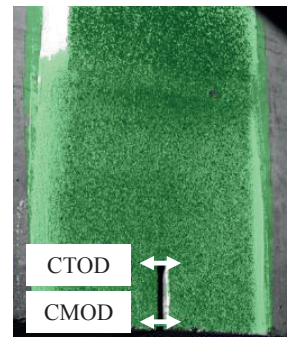
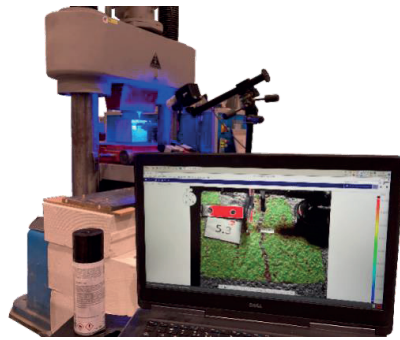
h – wysokość kostki [mm]; $h = 150$ mm;

h_{sp} – wysokość kostki pomniejszona o głębokość nacięcia [mm]; $h = 150$ mm – 25 mm = 125 mm.

Podobnie jak w przypadku testu 3PBT, w celu przygotowania próbki do badania z użyciem systemu DIC, jedna strona próbki została pomalowana w taki sposób, aby uzyskać biało-czarny wzór. Kamerę umieszczono z przodu, nieco poniżej sześcienniej kostki, aby rejestrować zmiany wartości CMOD, CTOD, propagację rysy oraz strefę zarysowań (rys. 8). Stanowisko badawcze zostało dodatkowo wyposażone w lampę do oświetlenia badanej powierzchni oraz komputer do zapisu danych (rys. 8). W trakcie badania wykonywano zdjęcia z częstotliwością 1,0 Hz, a więc co 1 s. Następnie poddano je analizie w oprogramowaniu GOM Correlate, gdzie szerokości rozwarcia rysy zostały zmierzone dzięki wprowadzonym tam wirtualnym czujnikom. Idea była taka sama jak w przypadku analiz DIC dla testu 3PBT i polegała na porównywaniu oraz korelacji obrazów cyfrowych. Możliwe więc było uzyskanie techniką DIC wykresów F-CMOD oraz F-CTOD, a następnie porównanie ich z wynikami z czujników LVDT. Dodatkowo przeanalizowano mapy odkształceń oraz propagację rys dla charakterystycznych wartości CMOD.



Rys. 8. Stanowisko badawcze dla testu MVDT wraz z zestawem pomiarowym systemu DIC: kamerą, lampą oświetleniową i komputerem przechowującym dane z badania

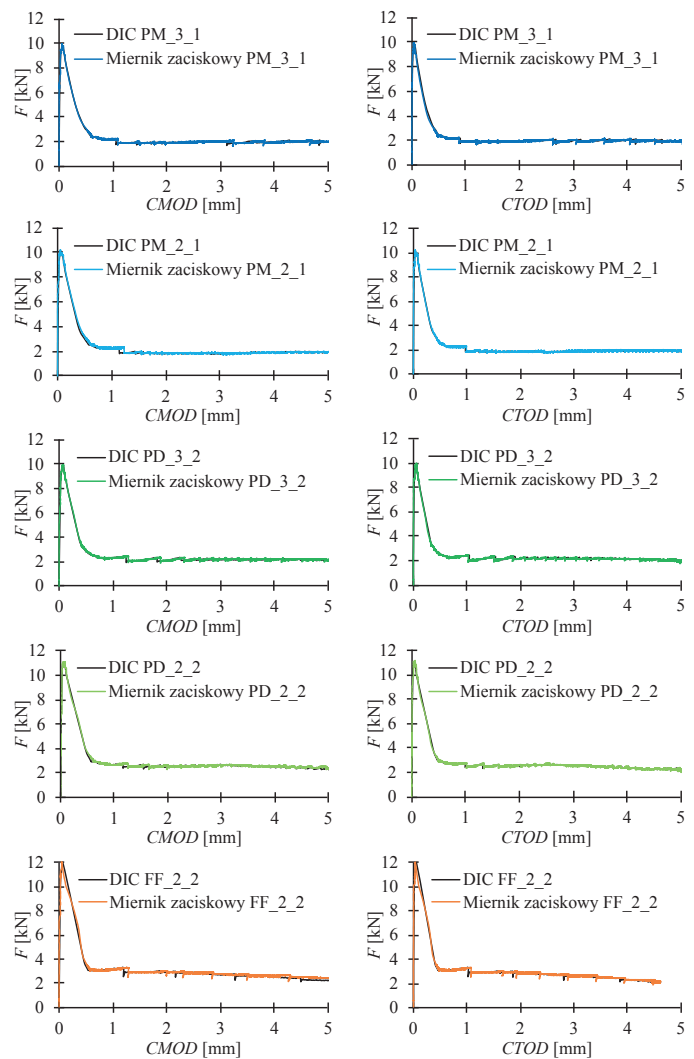


Rys. 9. Wirtualne czujniki wprowadzone w oprogramowaniu GOM Correlate do pomiaru CMOD i CTOD w teście 3PBT

Wyniki badań i ich omówienie

Test trzypunktowego zginania

Celem pracy było porównanie wyników otrzymanych podczas testu 3PBT z mierników zaciskowych z wynikami uzyskanymi dzięki technice DIC. Wartości CMOD i CTOD z mierników zaciskowych uzyskano bezpośrednio z urządzeń pomiarowych. Natomiast, jeśli chodzi o analizy DIC, to w oprogramowaniu GOM Correlate wprowadzono wirtualne czujniki do pomiaru szerokości rozwarcia rysy w wierzchołku i na początku nacięcia, jak pokazano na rys. 9. Następnie skorelowano je z odpowiadającymi siłami F . Na koniec zostały przygotowane i porównane wykresy F -CMOD oraz F -CTOD wynikające z bezpośrednich pomiarów z wynikami uzyskanymi za pomocą techniki DIC. Na rysunku 10 pokazano wykresy F -CMOD i F -CTOD dla jednej próbki z każdej serii. Na ich podstawie można stwierdzić, że dopasowanie pomiędzy tymi dwoma metodami pomiarowymi było niemal idealne, zwłaszcza dla wykresów F -CTOD. W przypadku wykresów F -CMOD warto zauważyć, że mierniki zaciskowe do pomiaru CMOD podczas badania były umieszczone pod próbką, a więc wartość CMOD była rejestrowana na dolnej powierzchni belki, podczas gdy wirtualne czujniki były zlokalizowane na boku belki. Wynika to z faktu, że kamera nie obejmowała dolnej części próbki, a więc konieczna była zmiana miejsca pomiarowego wartości CMOD w oprogramowaniu w stosunku do lokalizacji miernika zaciskowego. Zatem różnice na wykresach F -CMOD pomiędzy wynikami z bezpośrednich i wirtualnych czujników mogły wynikać z innych miejsc pomiarowych. Te niezgodności są zauważalne głównie w miejscach gwałtownego spadku F , czyli w momentach zerwania lub wyciągnięcia włókien z matrycy w przekroju zarysowania (zaobserwowano oba rodzaje zniszczenia [20]). W przypadku wykresów F -CTOD niewielkie przesunięcia mogły być również przyczyną różnych pozycji czujników bezpośrednich i wirtualnych do pomiaru CTOD. Mimo to osiągnięto dobrą korelację pomiędzy wynikami z mierników zaciskowych a wynikami uzyskanymi dzięki technice DIC. W związku z tym stwierdzono, że technika cyfrowej korelacji obrazu mogłaby być metodą sprawdzającą bądź zastępującą tradycyjne metody pomiarowe. Należy jednak zaznaczyć, że dla dwóch próbek: PM_3_3 i PD_2_3 uzyskanie wyników z systemu DIC było niemożliwe ze względu na problemy

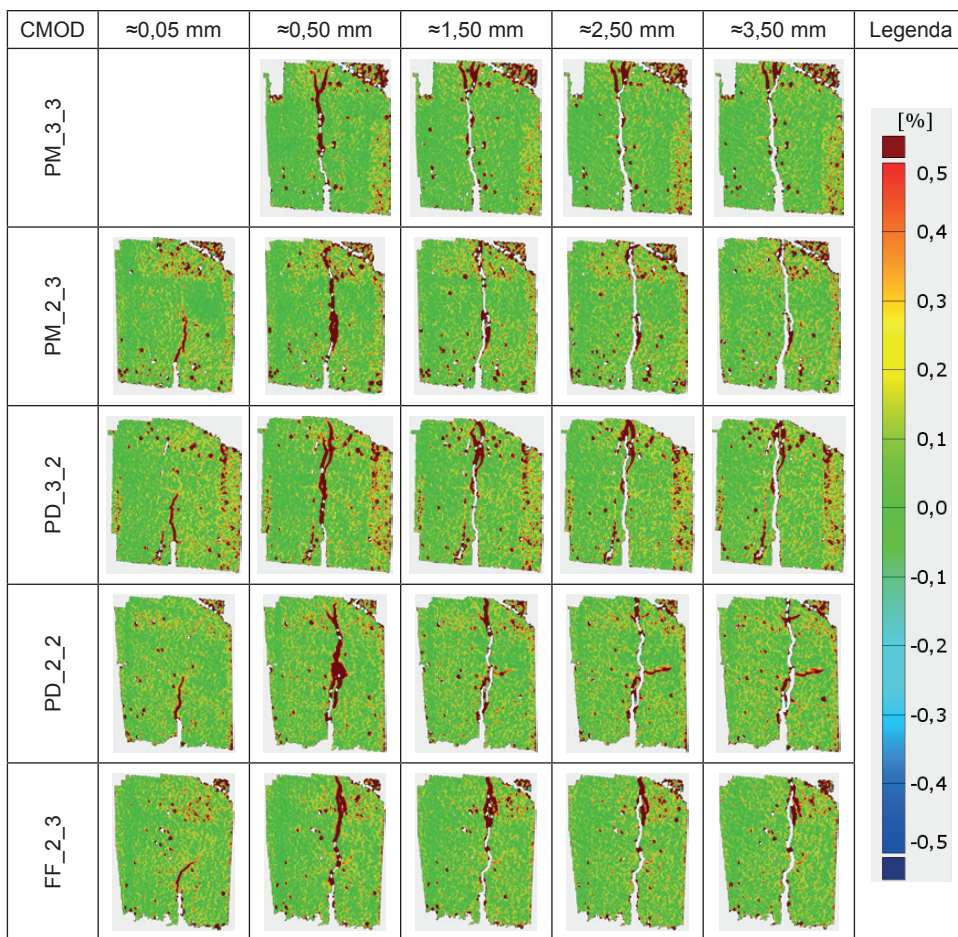


Rys. 10. Wykresy F -CMOD i F -CTOD dla testu 3PBT

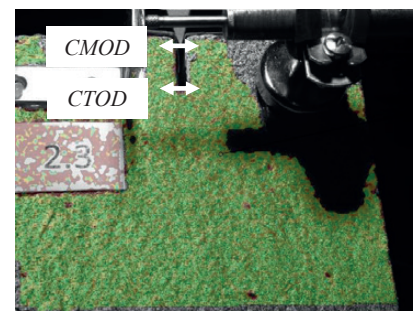
techniczne (wykonano za mało zdjęć). Z drugiej strony, problemy zdarzały się też z bezpośrednimi urządzeniami pomiarowymi – w przypadku belki FF_2_1 zawiódł miernik zaciskowy do pomiaru CTOD po nagłym spadku F . Dlatego też można by traktować te dwie metody badawcze jako swoje uzupełnienie, w razie pojawiających się problemów technicznych z jedną z nich.

W tabelicy 1 przedstawiono mapy odkształceń wybranych próbek dla charakterystycznych wartości CMOD dla

Tablica 1. Mapy odkształceń dla charakterystycznych wartości CMOD dla 3PBTrzy)



dzenie wirtualnych czujników do pomiaru zarówno CTOD, jak i CMOD, co pokazano na rys. 11. Po skorelowaniu wartości z odpowiednimi F , porównano wykresy F -CMOD i F -CTOD, które zostały uzyskane dzięki pomiarom bezpośrednim z wykresami uzyskanymi na podstawie wyników z czujników wirtualnych. Na rysunku 12 pokazano analizę porównawczą metod pomiarowych dla jednej próbki z każdej serii. Podobnie jak w przypadku badań 3PBTrzy, można było zauważyć dużą zgodność wyników dwóch analizowanych metod. Dodatkowo można stwier-



Rys. 11. Wirtualne czujniki wprowadzone w oprogramowaniu GOM Correlate do pomiaru CMOD i CTOD w teście MVDT

testu 3PBTrzy. Pierwsze zarysowanie pojawiało się zazwyczaj w sposób nagły, ale mimo to możliwe było jego uchwycenie metodą DIC, a później obserwacja propagacji oraz zwiększania się szerokości rozwarcia rysy. Zdolność przenoszenia dalszych obciążeń przy zwiększającym się CMOD jest charakterystyczna dla fibrobetonów, gdyż mają one pewną ciągliwość. Inaczej jest w przypadku betonów bez włókien, gdzie po osiągnięciu maksymalnej nośności następuje kruche zniszczenie elementu badanego. Można również zauważyć, że wszystkie próbki były zarysowane już przed uzyskaniem CMOD wartości równej 0,05 mm, co oznacza, że maksymalna nośność została osiągnięta dla mniejszego CMOD. Dodatkowo, już przy CMOD równym około 0,5 mm zarysowanie sięgało górnej powierzchni prawie każdej badanej belki. Coraz szersze otwieranie się rysy pionowej następowało wraz ze wzrostem wartości CMOD.

Test rozłupywania Montevideo

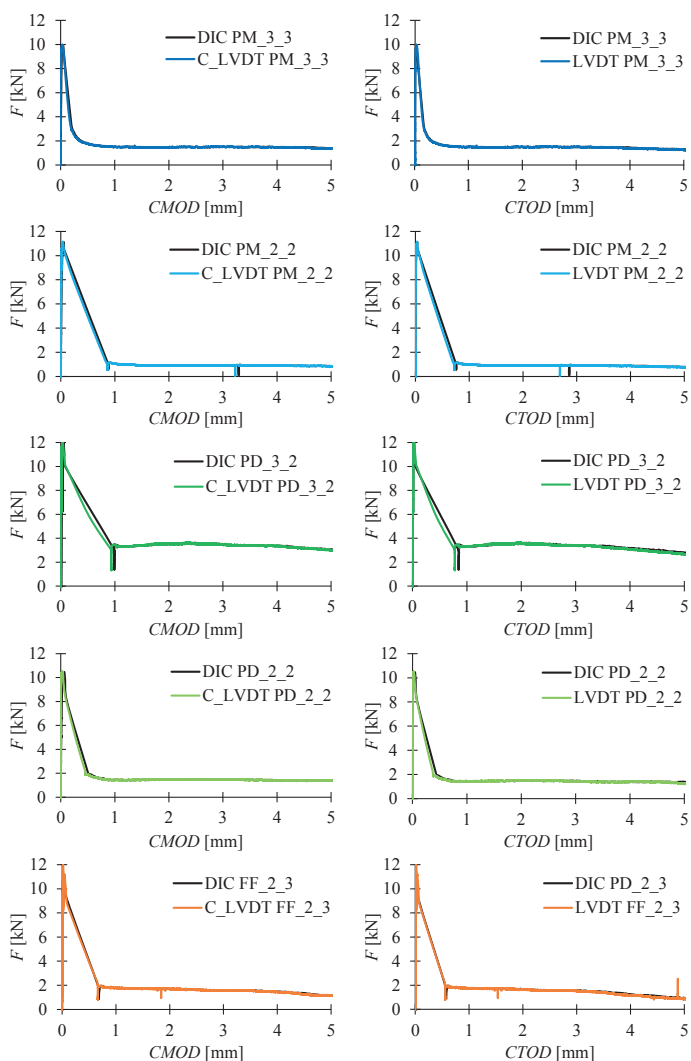
Po przeprowadzeniu wszystkich badań porównano wyniki uzyskane podczas testu MVDT z czujników LVDT i z systemu DIC. Wartości CTOD z czujników LVDT uzyskano bezpośrednio z urządzeń pomiarowych, natomiast wartości CMOD zostały obliczone za pomocą wzoru (1) – na wykresach krzywe F -CMOD oznaczono jako C_{LVDT} . W oprogramowaniu GOM Correlate możliwe było wpro-

zić dużą dokładność wzoru (1) zaproponowanego do obliczenia wartości CMOD. Niezgodności, które były szczególnie widoczne w miejscach nagłego spadku F , mogły być przyczyną wspomnianych wcześniej różnych pozycji czujnika LVDT i czujnika wirtualnego wprowadzonego w oprogramowaniu GOM Correlate. Mimo to można stwierdzić, że technika cyfrowej korelacji obrazu mogłaby być metodą uzupełniającą, sprawdzającą bądź zastępującą tradycyjne metody pomiarowe. W tabelicy 2 przedstawiono mapy odkształceń wybranych próbek dla wartości charakterystycznych CMOD dla testu MVDT. Powstającą rysę elementów badawczych można było zauważyć na ekranie komputera już przy CMOD równym około 0,05 mm. Było to możliwe do uchwycenia tylko metodą DIC, gdyż ludzkie oko nie było w stanie dostrzec tak małego rozwarcia. Przy szerokości rozwarcia rysy około 0,5 mm propagacja rysy sięgała już dolnej powierzchni kostki w przypadku większości próbek. Kolejnym etapem było zwiększanie się szerokości rysy. Analiza map odkształceń pozwoliła na śledzenie propagacji zarysowania.

Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych analiz można wyciągnąć następujące wnioski:

- Istnieje znacząca zgodność wyników uzyskanych bezpośrednimi metodami pomiarowymi (mierniki zaci-



Rys. 12. Wykresy F-CMOD i F-CTOD dla testu MVDT

skowe i czujniki przemieszczeń) oraz techniką cyfrowej korelacji obrazu w przeprowadzonych testach trzypunktowego zginania oraz testach rozłupywania Montevideo.

- Niedokładności pomiędzy dwoma metodami pomiarowymi mogą wynikać z różnic w lokalizacji czujników bezpośrednich i wirtualnych wprowadzonych w oprogramowaniu GOM Correlate.

- Mapy odkształceń pozwalają na analizę propagacji oraz zwiększania się szerokości rozwarcia rysy w badanych elementach.

- Technika cyfrowej korelacji obrazu mogłaby być metodą uzupełniającą, sprawdzającą bądź zastępującą tradycyjne metody pomiarowe.

- Porównanie wyników uzyskanych dwoma metodami pomiarowymi pozwala na dodatkową weryfikację wiarygodności otrzymanych wyników badań.

- Istotnym aspektem pomiarów optycznych jest odpowiednie dobranie częstotliwości pomiarowej w celu uzyskania zamierzonych wyników.

PIŚMIENNICTWO

[1] *Drobiec Ł., Blazy J.*: Współczesne niemetaliczne zbrojenie rozproszone stosowane w konstrukcjach betonowych, *Izolacje*, t. 61, nr 5, ss. 70–84, 2020.

Tablica 2. Mapy odkształceń dla charakterystycznych wartości CMOD dla MVDT

CMOD	≈0,05 mm	≈0,50 mm	≈1,50 mm	≈2,50 mm	≈3,50 mm	Legenda
PM_3_3						
PM_2_2						
PD_3_2						
PD_2_2						
FF_2_2						

[2] *Drobiec Ł., Blazy J.*: Wpływ włókien polipropylenowych na ściskanie i rozciąganie betonu w świetle norm PN-EN 206-1 i PN-EN 14651, *Inżynieria i Budownictwo*, z. 8, ss. 391–396, 2021.

[3] *Drobiec Ł., Blazy J.*: Analiza wyników badań fibrobetonu z włóknami polimerowymi, *Inżynieria i Budownictwo*, z. 9–10, ss. 477–481, 2021.

[4] *Karimipour A., Ghalehnavi M., de Brito J., Attari M.*: The effect of polypropylene fibres on the compressive strength, impact and heat resistance of self-compacting concrete, *Structures*, t. 25, no. 2, pp. 72–87, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.02.022.

[5] *Yang J., Wang R., Zhang Y.*: Influence of dually mixing with latex powder and polypropylene fiber on toughness and shrinkage performance of overlay repair mortar, *Construction and Building Materials*, t. 261, p. 120521, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120521.

[6] International Federation for Structural Concrete, „Model Code 2010, Final draft- Volume 1”, 2013.

[7] The Concrete Society, Technical Report 34. Concrete industrial ground floors. A guide to design and construction, 4. ed. The Concrete Society, 2016.

[8] EN 14651+A1:2007, „Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)”, 2007.

[9] *Linsbauer H.N., Tschegg E.K.*: Fracture energy determination of concrete with cube shaped specimens, *Zement und Beton*, t. 31, pp. 38–40, 1986.

-
- [10] Korte S., Boel V., De Corte W., De Schutter G., Seif S.: Experimental study of the influence of the initial notch length in cubical concrete wedge-splitting test specimens, *Key Engineering Materials*, t. 525–526, pp. 209–212, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.209.
- [11] Guan J.F., Hu X.Z., Xie C.P., Li Q.B., Wu Z.M.: Wedge-splitting tests for tensile strength and fracture toughness of concrete, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, t. 93, pp. 263–275, 2018, doi: 10.1016/j.tafmec.2017.09.006.
- [12] Korte S., Boel V., De Corte W., De Schutter G.: Static and fatigue fracture mechanics properties of self-compacting concrete using three-point bending tests and wedge-splitting tests, *Construction and Building Materials*, t. 57, pp. 1–8, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.090.
- [13] Hou Y.K., Duan S.J., An R.M.: Solving the cohesive zone model analytic function for concrete based on wedge-splitting test on a compact tension specimen, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, t. 102, pp. 162–170, 2019, doi: 10.1016/j.tafmec.2019.04.015.
- [14] Skoček J., Stang H.: Inverse analysis of the wedge-splitting test, *Engineering Fracture Mechanics*, t. 75, no. 10, pp. 3173–3188, 2008, doi: 10.1016/j.engfracmech.2007.12.003.
- [15] Segura-Castillo L., Monte R., de Figueiredo A.D.: Characterisation of the tensile constitutive behaviour of fibre-reinforced concrete: A new configuration for the Wedge Splitting Test, *Construction and Building Materials*, t. 192, pp. 731–741, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.101.
- [16] Segura-Castillo L., Monte R., de Figueiredo A.D.: New Test for the Characterization of the Tensile Constitutive Behaviour of FRC, w High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet, D. Hordijk i M. Luković, Red. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 382–389.
- [17] Bhosale A.B., Prakash S.S.: Crack Propagation Analysis of Synthetic vs. Steel vs. Hybrid Fibre-Reinforced Concrete Beams Using Digital Image Correlation Technique, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, t. 14, no. 1. 2020, doi: 10.1186/s40069-020-00427-8.
- [18] Shih M.H., Sung W.P.: Application of digital image correlation method for analysing crack variation of reinforced concrete beams, *Sadhana – Academy Proceedings in Engineering Sciences*, t. 38, no. 4, pp. 723–741, 2013, doi: 10.1007/s12046-013-0141-5.
- [19] Manning M.P., Weldon B.D., McGinnis M.J., Jauregui D.V., Newton C.M.: Locally developed Ultra-High Performance Concrete: Behaviour Analysis of prestressed Channel Girders, *Proceedings of Hipermat 2016 – 4th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials Kassel*, pp. 1–9, 2016.
- [20] Blazy J., Drobiec Ł., Wolka P.: Flexural tensile strength of concrete with synthetic fibers, *Materials*, t. 14, no. 16, p. 4428, Aug. 2021, doi: 10.3390/ma14164428.
-