

Cezary AJDUKIEWICZ ¹
Marcin GAJEWSKI ²
Przemysław MOSSAKOWSKI ³

ZASTOSOWANIE SYSTEMU OPTYCZNEJ KORELACJI OBRAZU „ARAMIS” DO IDENTYFIKACJI RYS W ELEMENTACH BETONOWYCH

System optycznej korelacji obrazu ARAMIS jest przeznaczony do bezkontaktowych pomiarów przemieszczeń w elementach płaskich i przestrzennych poddanych obciążeniu. W niniejszej pracy przedstawiono przykład wykorzystania tego systemu jako narzędzia pomocnego do lokalizacji rys w elementach betonowych. System pozwala na lokalizację i śledzenie rozwoju rys od rozwartości rzędu 0,01 mm. Przedstawione w pracy wyniki stanowią część badań nad wpływem i skutecznością zastosowania do zbrojenia betonu kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi lub węglowymi zamiast zwykłych prętów stalowych.

APPLICATION OF THE OPTICAL IMAGE CORELATION SYSTEM „ARAMIS” FOR IDENTIFICATION CONCRETE SAMPLE CRACKING

The optical image correlation system „ARAMIS” is designed for measurements of displacement in plane and spatial elements exposed for any type of loading. In this paper aforementioned system is applied for cracks localization in concrete samples. The system is capable to localize crack with opening equal to 0.01 mm or more, than it is possible to see crack development and eventual opening of the other crack in the system measuring field. The results presented here are part of the research on the influence and effectiveness of the polymer composites with glass or carbon fibers used as the concrete reinforcement instead of the steel bars.

1. WSTĘP

Badania doświadczalne mające na celu lokalizację i śledzenie rozwoju rys z natury rzeczy powinny wykorzystywać metody pomiarowe pozwalające na analizę zmian na

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej, 00-637 Warszawa, Al. Armii Ludowej 16,
tel.: +48 22 234-57-54, e-mail: c.ajdukiewicz@il.pw.edu.pl

² PW WIL adres jak wyżej; tel.: +48 22 234-57-54, e-mail: m.gajewski@il.pw.edu.pl

³ PW WIL adres jak wyżej; tel.: +48 22 234-63-02, e-mail: p.mossakowski@il.pw.edu.pl

większych obszarach badanego elementu. Zwykle w takich badaniach nie jest możliwe określenie miejsca wystąpienia rys, można jednak przewidzieć pole, na którym się ona pojawi. Ponadto powstanie rysy wiąże się zwykle ze znaczną zmianą przemieszczeń sąsiadujących punktów, a co za tym idzie z powstaniem dużych gradientów odkształceń.

Metody pozwalające na analizę zmian stanu przemieszczenia i odkształcenia większych obszarów przyjęło się nazywać metodami polowymi. Wśród metod analizy pola najliczniejszą grupę stanowią metody optyczne. Są to głównie: metoda elastooptyczna, metoda interferometrii holograficznej plamkowej i siatkowej, metoda mory i rozwijająca się ostatnio dość prężnie metoda optycznej korelacji obrazu.

Metoda optycznej korelacji obrazu polega na wykonaniu serii zdjęć analizowanego obszaru badanej konstrukcji przy różnych obciążeniach, a następnie analizie wykonanych zdjęć, mającej na celu obliczenie przemieszczeń wybranych punktów analizowanego obszaru. Wielkość obszaru nie ma tutaj specjalnego znaczenia, bowiem dokładność pomiaru zależy głównie od rozdzielczości matrycy kamery cyfrowej. Oznacza to, że procentowy błąd wyznaczenia przemieszczenia w stosunku do wybranego wymiaru charakterystycznego badanego obiektu jest stały i nie zależy od jego wielkości, lecz tylko od jego wielkości na obrazie. Jednak do badania obiektów o różnych wielkościach konieczne jest użycie różnych obiektywów, dlatego też rozróżnia się systemy do pomiarów wielkogabarytowych i małogabarytowych. Przykładem systemu optycznej korelacji obrazu do pomiarów małego i średnio gabarytowych jest system ARAMIS [1] opracowany przez niemiecką firmę GOM. W niniejszej pracy przedstawiono przykład zastosowania tego systemu jako narzędzia pomocnego do lokalizacji i śledzenia rys w elementach betonowych.

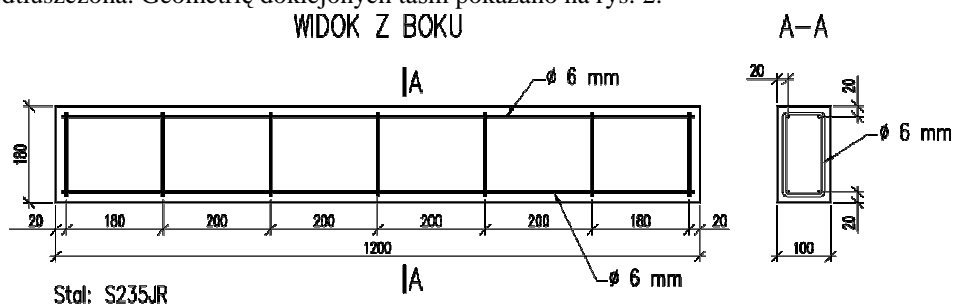
2. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH ELEMENTÓW

Prezentowane wyniki badań mają na celu pokazanie możliwości systemu optycznej korelacji obrazu ARAMIS w identyfikacji rys w obciążanych elementach betonowych niezbrojonych i zbrojonych. Wyniki stanowią część badań nad wpływem i skutecznością zastosowania do zbrojenia betonu kompozytów polimerowych z włóknami szklanymi lub węglowymi zamiast zwykłych prętów stalowych. Rozpatrywane były dwa sposoby zbrojenia. Pierwszy z nich to zbrojenie klasyczne w postaci prętów kompozytowych wprowadzonych do betonu w podobny sposób jak zwykłych prętów zbrojeniowych (np.: [2], [3]). Drugi z nich to naklejanie na wykonane elementy betonowe, taśm z kompozytu polimerowego z włóknami węglowymi [4]. Ten drugi sposób jest już stosowany jako sposób napraw uszkodzonych elementów żelbetowych (por. [5] i [6] i literatura tam cytowana). Dlatego też, demonstrując możliwości systemu ARAMIS, przedstawiono dalej wpływ naklejania taśm z w/w kompozytu na nośność elementów zginanych.

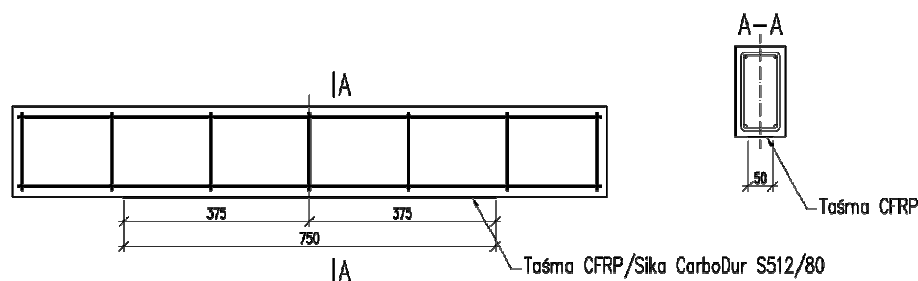
Badania zginania przeprowadzono na belkach wykonanych z betonu o wytrzymałości charakterystycznej 50 MPa. Belki wykonano jako betonowe z minimalnym zbrojeniem ze stali S235JR wg rys.1. Zbrojenie było wykonane tylko w celu uniknięcia w czasie badań niekontrolowanego zniszczenia, które mogłyby uszkodzić stanowisko badawcze.

Do części belek zostały przyklejone taśmy z kompozytu CFRP (ang. Carbon Fibre Reinforced Polymer) CarboDur S 512/80 o długości 750 mm symetrycznie względem osi symetrii podłużnej i poprzecznej za pomocą kleju Sikadur 30 o grubości około 1 mm. Dodatkowo za pomocą tego samego kleju i w tych samych warunkach przyklejono stemple

stalowe do wykonania badania wytrzymałości otuliny betonowej w próbie „pull-off”. Przed przyklejeniem taśm powierzchnia betonu została oszlifowana szlifierką diamentową oraz odtłuszczona. Geometrię doklejących taśm pokazano na rys. 2.



Rys.1. Konstrukcja i parametry badanych elementów betonowych (B50).



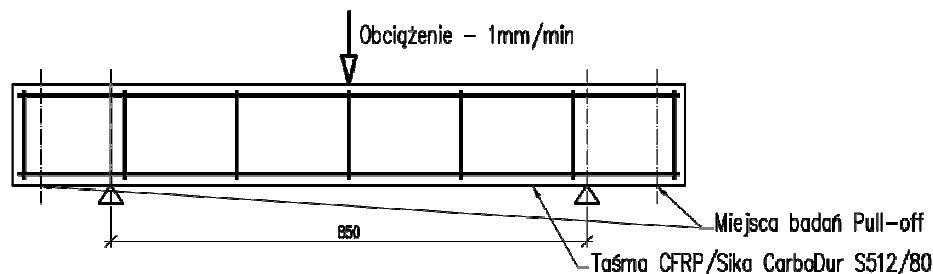
Zbrojenie w postaci taśm: lamella o szerokości 50 mm i grubości 1,2 mm z CFRP/Sika CarboDur S512/80.

Zbrojenie przyklejone na klej na bazie żywicy epoksydowych Sikadur 30, grubość warstwy kleju – 1,0 mm.

Rys.2. Sposób i parametry przyklejanych taśm z CRFP do belek z rys. 1

Badania zginania przeprowadzono wg schematu przedstawionego na rys. 3. Schematem statycznym była belka swobodnie podparta o rozpiętości 85cm obciążona siłą skupioną w środku rozpiętości. Belki były oparte na trawersie umieszczonej w uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8802 o zasilaniu hydraulicznym. Mierzonymi parametrami w poszczególnych próbach były: siła obciążająca, przemieszczenie trzpienia obciążającego oraz pomiar pola przemieszczeń za pomocą systemu ARAMIS. Sterowanie obciążeniem było uzależnione od przemieszczenia szczęki obciążającej i wynosiło 1 mm/min.

W dalszej części przedstawiono wyniki badań następujących belek. Badanie 1 to badanie belki z rys. 1, tj. bez przyklejonej taśmy na dole. Badanie prowadzono wg schematu podanego na rys. 3 aż do maksymalnej wartości obciążenia jakie jest w stanie przenieść belka. Następnie belka została odciążona, zdjęta i naprawiona. Naprawienie polegało na przyklejeniu do dolnej spękanej strony taśmy wg rys. 2. Następnie belkę poddano badaniu 2, które polegało ponownym jej zginaniu do maksymalnego obciążenia. Badanie 3 polegało na zginaniu belki wykonanej wg rys. 2, czyli zginaniu minimalnie zbrojonej belki wzmocnionej „zbrojeniem” w postaci taśmy wykonanej z CFRP. Wszystkie badania wykonano przy wykorzystaniu systemu ARAMIS w sposób przedstawiony w następujących punktach.



Rys. 3. Schemat statyczny badania zginania.

3. KRÓTKI OPIS SYSTEMU ARAMIS

System optyczno-pomiarowy ARAMIS jest przeznaczony do bezkontaktowych pomiarów przemieszczeń w elementach płaskich i przestrzennych poddanych obciążeniu. Składa się on z zestawu kamer rejestrujących zmiany kształtu badanego obiektu oraz odpowiednio przystosowanego i zaprogramowanego komputera przechowującego i przetwarzającego zarejestrowane obrazy. W zależności od konfiguracji tj. liczby i szybkości kamer system może służyć do analizy pól przemieszczeń i odkształceń elementów płaskich lub przestrzennych obciążonych statycznie lub dynamicznie.

Posiadana przez nas konfiguracja tj. ARAMIS 2M jest układem dwóch kamer (Rys. 4) o ogniskowej 17 mm i szybkości wykonywania zdjęć 12 Hz o rozdzielczości 1600×1200 pikseli tj. 1,92 Mpix. Jest to zestaw standardowy pozwalający na badania stanów przemieszczeń i odkształceń płaskich lub lekko zakrzywionych powierzchni elementów przestrzennych pod obciążeniem quasi-statycznym z dokładnością pomiaru odkształceń do 0,01% na obrazie, jak podaje producent sprzętu firma GOM. Bardziej właściwym, naszym zdaniem, jest podanie dokładności odczytu położenia na obrazie tj. $0,01 \pm 0,04$ piksela w zależności od prawidłowo przeprowadzonej kalibracji układu.



Rys. 4. Układ dwóch kamer systemu ARAMIS

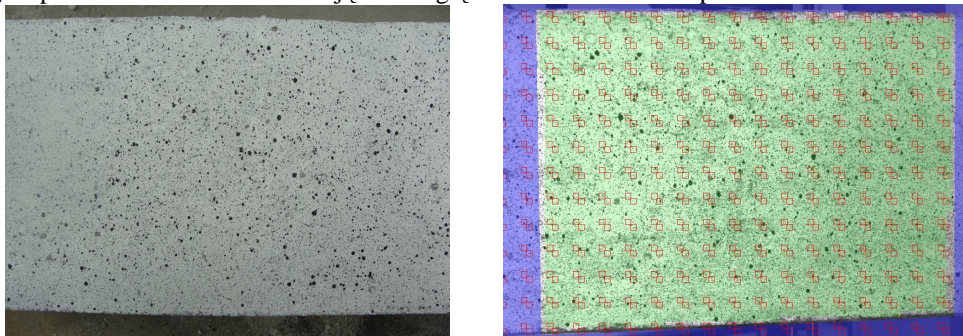
Dokładność odczytu położenia na rzeczywistym obiekcie zależy wtedy od zakresu pomiarowego, a właściwie od stosunku rzeczywistych rozmiarów badanego obszaru do rozmiarów analizowanego obrazu na matrycy. Producent zaleca przyjmować zakresy analizowanych obszarów zgodnie z zaprojektowanymi płytkami wzorcowymi. Najmniejsza próbka wzorcowa dostarczana z zestawem umożliwia analizę obszaru 35×25 mm, a największa 2000×2000 mm. Głębokość analizowanego obrazu zależy od obiektu i przesłony. Zwykle największa głębokość odpowiada wysokości analizowanego obszaru.

Posiadane przez nas płytki wzorcowe pozwalają na pomiar w obszarach zbliżonych do prostokątów 100×75 mm, 150×110 mm i 400×300 mm. Wtedy dokładność oceny położenia na obrazie równa 0,04 piksela odpowiada dokładności pomiaru w podanych wyżej obszarach: 2,5, 4 i 10 μm .

Zasada pomiaru jest taka sama jak w fotogrametrii, tzn. na podstawie zdjęć określone są współrzędne przestrzenne wybranych punktów. Pomiar przebiega następująco: Wykonywane jest zdjęcie obiektu w stanie nieodkształconym, a następnie seria zdjęć odpowiadająca kolejnym etapom obciążenia obiektu. Następnie każde ze zdjęć jest porównywane z wyjściowym i tworzony jest zbiór wartości przemieszczeń wybranych punktów na powierzchni obiektu. Wybrane punkty to punkty szczególne na powierzchni obiektu. Mogą to być np. plamki, kropki lub inne zmiany zabarwienia naturalnie występujące na powierzchni. W wypadku, gdy powierzchnia jest mało kontrastowa bez widocznych zmian zabarwienia nanosi się na nią najpierw białą farbę o odpowiedniej przyczepności, a następnie zabarwia najlepiej farbą czarną w sprayu tworząc nieregularny deseń. Korzystając z tego nieregularnego desenia, program analizujący obszar tworzy siatkę analizowanych punktów. Punkty te, są to środki tzw. „fasetek”, czyli środki małych obszarów, na który został podzielony cały analizowany obszar. Program rejestruje współrzędne tych punktów, a następnie wyznacza zmiany ich położenia i dalej na tej postawie wyznacza odkształcenia. W zależności od decyzji prowadzącego badanie mogą to być odkształcenia tzw. techniczne, logarytmiczne lub Green'a.

4. BADANIA PRZY WYKORZYSTANIU SYSTEMU ARAMIS

Zgodnie z celem postawionym na wstępie pracy przedstawiono dalej wyniki badań przy wykorzystaniu systemu ARAMIS zginania belek opisanych w punkcie 2. Belki przeznaczone do badań przygotowano nanosząc na nie białą farbę, na którą następnie nanoszono deseń rozpylając czarną farbę. Deseń ten widoczny jest na Rys. 5 po lewej stronie. Po prawej stronie rys. 5 przedstawiono zaznaczony na zielono fragment analizowanego obszaru przez system pomiarowy ARAMIS z zaznaczoną wielkością tzw. fasetek. Dobór wielkości fasetek zależy od opracowywanego wyniku badań i dokonywany jest po zakończeniu badania mając na względzie cel i dokładność pomiaru.



Rys. 5. Deseń naniesiony na badaną próbkę i wygenerowany przez system ARAMIS obszar pomiarowy (zielony) z pokazanymi wielkościami „fasetek”.

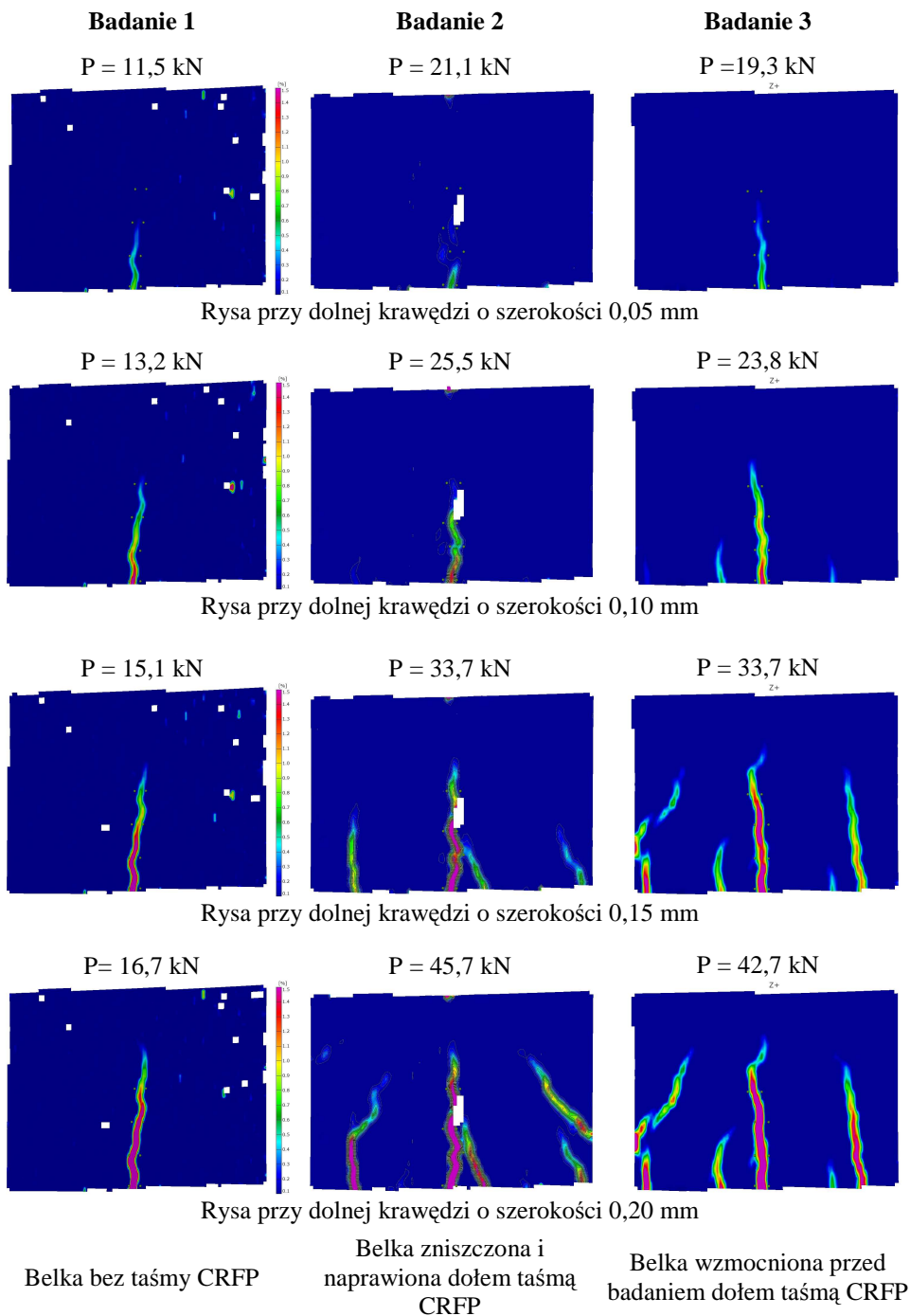
Standardowo producent zaleca przyjmowanie wielkości fasetek 15×15 pikseli i odległości między nimi 13 pikseli. Przy niepewności oceny położenia w wielkości 0,04 pikseli daje błąd oceny zmiany odległości pomiędzy fasetkami $0,04/13 = 0,003$ tj. 0,3%. Wielkość tego błędu jest za duża jeśli chcemy dokładnie rejestrować odkształcenia sprężyste w materiale badanej próbki. Jeśli celem jest rejestracja większych odkształceń to odległość tę można uznać za zadowalającą. Wielkość fasetek ma również wpływ na szybkość obliczeń, która maleje jeśli będziemy zwiększać obszar pomiarowy.

Ze względu na dość duży obszar pomiarowy (obraz wypełnia prawie całe pole matrycy kamery) i dużą liczbę rejestrowanych zdjęć, w celu skrócenia czasu obliczeń, zdecydowano się przyjąć rozmiar fasetek równy 20×20 pikseli i odległość między środkami fasetek 18 pikseli. Przy przyjętym obszarze pomiarowym (24×18 cm) i skali odpowiada to rzeczywistej wielkości fasetek na badanej powierzchni $3,1 \times 3,1$ mm i odległości między nimi 2,8 mm i maksymalnej niepewności oceny położenia środka fasetki równej 0,006 mm. Jak widać z podanych wartości dokładność pomiaru można uznać za zadowalającą. Belkę ustawiono na stanowisku przedstawionym w dwóch ujęciach na fotografiach w na rys. 6.



Rys. 6. Widoki stanowiska pomiarowego.

Proces zginania każdej belki był rejestrowany tak, że co 1 s wykonywane były po dwa synchroniczne zdjęcia próbki wraz z wartością odpowiadającej siły. Po zakończeniu badania, przy pomocy programu ARAMIS, dokonano analizy wykonanych zdjęć. Program ARAMIS pozwala na przedstawianie wyników analiz w bardzo różnorodny sposób. Z wielu możliwych wybrano prezentację w postaci map odkształceń bez rysowania warstw. Przykłady map odkształceń, odpowiadające różnym wartościom obciążenia, przedstawiono w trzech kolumnach i czterech wierszach na rys.7. Po prawej stronie pierwszej kolumny map znajduje się skala z wartościami odkształceń jakim odpowiadają poszczególne kolory. Ze względu na to, że celem było przedstawienie procesu tworzenia się rys przedstawione mapy odkształceń mają charakter umowny. Warto też zwrócić uwagę na niewielkie białe prostokąty występujące na każdym ze zdjęć. Wynikają one ze sposobu wyrównania nierówności na powierzchni betonu i ich malowania, a następnie możliwości ich identyfikacji przez system ARAMIS. Jeśli z obserwowanej powierzchni wykruszy się spoiwo i powstanie dziura to system traci możliwość identyfikacji tego miejsca i usuwa go z obliczeń pozostawiając puste pole.



Rys. 7. Zestawienie wyników badań

Wyniki badań pogrupowano w trzech kolumnach, tak że każda kolumna odpowiada kolejnemu badaniu. Zdjęcia pogrupowano również wierszami tak, że każdy wiersz odpowiada stanowi obciążenia, przy którym w dolnej warstwie powstaje rysa o takiej samej rozwarości. Wybrano cztery wartości rozwarości rys tj. kolejno 0,05; 0,10; 0,015 i 0,20 mm. Nad każdym zdjęciem zapisano też wartość siły, przy której powstaje rysa o określonej rozwarości.

Przedstawione na rys. 7 wyniki pomiarów pokazują bardzo dużą czułość systemu ARAMIS, który jest w stanie identyfikować moment tworzenia się rysy o bardzo małej rozwarości. Warto nadmienić, że w prowadzonych badaniach system pozwalał identyfikować rysy już o rozwarości 0,01 mm. Oznacza to, że korzystając z tego systemu można weryfikować doświadczalnie teoretyczne metody wyznaczania rys. Zagadnienia tego w tym referacie nie omówiono szerzej, ze względu na to, że przedstawione badania miały charakter jednostkowy. Wykonano tylko po jednej próbce każdego rodzaju, a jak wiadomo beton jest materiałem dość niejednorodnym i wykonywane na nim badania cechują się dużą niepewnością pomiarową. Badania będą kontynuowane.

Pomimo jednostkowego charakteru badań warto zwrócić uwagę na wyraźnie widoczny efekt zastosowania naprawy uprzednio zniszczonej belki betonowej za pomocą taśmy z kompozytu CRFP. Belka uprzednio zniszczona i ponownie naprawiona wykazuje się podobną nośnością jak belka betonowa z naklejoną od razu taśmą GRFP.

5. WNIOSKI

Zgodnie z postawionym celem pracy pokazano możliwości zastosowania systemu optycznej korelacji obrazu ARAMIS do identyfikacji i obserwacji rozwoju rys w obciążanych elementach betonowych niezbrojonych i zbrojonych. W każdym z badanych elementów zaobserwowano tworzenie się rysy od rozwarości 0,01 mm i dalszą jej propagację. Na podanym przykładzie pokazano przy okazji skuteczność zastosowania taśm z kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi tzw. GRFP do naprawy zarysowanych elementów betonowych. Mocno zarysowana zginana belka betonowa naprawiona taśmą GRFP wykazała się podobną nośnością jak belka betonowa z naklejoną od razu taśmą GRFP.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] *ARAMIS v6 User Manual*, GOM mbH, Mittelweg 7-8 D-38106 Braunschweig.
- [2] *Technical Information Schock Combar. Reinforcement element for concrete made from glass fiber reinforced polymer*. Schock Bauteile GmbH – 10/2007.
- [3] Mossakowski P.: *Przyczepność prętów zbrojeniowych do betonu i metody jej badania*, Materiały Budowlane, nr 5, 2008, s.1-5
- [4] Karta produktu: Taśmy Sika CarboDur – wersja 2009.
- [5] Łagoda M.: *Wzmacnianie mostów przez doklejanie elementów*, Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, monografia 322, Kraków 2005,
- [6] Kotynia R.: *Przyczepność zbrojenia kompozytowego do betonu w żelbetowych elementach wzmocnionych za pomocą materiałów kompozytowych CFRP*, Publikacja pod patronatem Sekcji Konstrukcji Betonowych Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Zeszyt nr 16, Politechnika Łódzka, Łódź 2008.