



WIT DERKOWSKI, *derkowski@pk.edu.pl*

Politechnika Krakowska, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych

ARKADIUSZ KWIECIEŃ, *akwiecie@pk.edu.pl*

BOGUSŁAW ZAJĄC, *bz@limba.wil.pk.edu.pl*

Politechnika Krakowska, Instytut Mechaniki Budowli

BADANIE ZNISZCZONEJ BELKI ŻELBETOWEJ NAPRAWIONEJ W TRYBIE AWARYJNYM TAŚMAMI CFRP NA SZTYWNEJ I PODATNEJ WARSTWIE ADHEZYJNEJ

TEST OF DAMAGED RC BEAM REPAIRED IN EMERGENCY RULE USING OF CFRP LAMINATES BONDED ON STIFF AND FLEXIBLE ADHESIVES

Streszczenie Artykuł prezentuje wyniki badań doświadczalnych belki naprawionej oraz wzmocnionej taśmami CFRP, zniszczonej uprzednio obciążeniem zmęczeniowym. Zastosowane zostało innowacyjne rozwiązanie, polegające na równoczesnym wykorzystaniu sztywnej i podatnej warstwy adhezyjnej.

Abstract Results of the experimental research of repaired and strengthened RC beam, which was previously destroyed in fatigue test, are presented in the paper. Innovative solution for repair and strengthening by means of CFRP laminates has been applied, consisting the simultaneous use of a rigid and flexible adhesive layers.

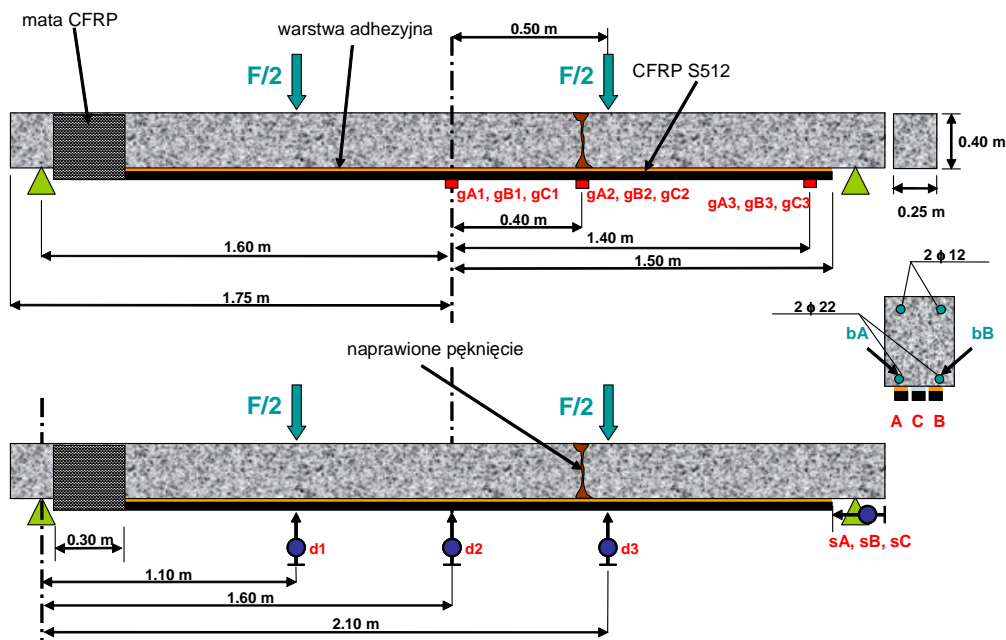
1. Wstęp

Wzmacnianie belek żelbetowych przy użyciu taśm CFRP jest najbardziej rozpowszechnione w budownictwie mostowym [1, 2, 3, 4]. Te elementy konstrukcyjne poddane są obciążeniami zmiennym, mogącym prowadzić do zniszczenia o charakterze zmęczeniowym [5]. Naprawa i wzmocnienie (materiałami kompozytowymi) takich elementów, w których doszło do utraty nośności zbrojenia głównego i powstania pęknięć, będących źródłem koncentracji naprężeń, jest trudne i wymaga zapewnienia należytego zapasu bezpieczeństwa wzmocnionej konstrukcji. Ten ostatni aspekt jest dyskusyjny, gdy konstrukcja budowlana jest wzmacniana taśmami kompozytowymi przyklejanymi na sztywnych warstwach adhezyjnych (żywice epoksydowe). Wrażliwość tego systemu na koncentracje odkształceń i naprężeń oraz krucha i gwałtowna postać zniszczenia [6] powoduje, że wzmacnianie taśmami CFRP konstrukcji silnie uszkodzonych jest ograniczone, pomimo wielu zalet, jakie ten sposób wzmacniania posiada. Rozwiązaniem tego problemu wydaje się być równoległe wprowadzenie podatnych warstw adhezyjnych wykonanych z mas poliuretanowych, których efektywność została wykazana w pracy [7] przy wzmacnianiu belek żelbetowych taśmami CFRP. Podatność warstwy adhezyjnej zwiększa ciągliwość konstrukcji, co zostało wykorzystane w niniejszej pracy do naprawy i wzmocnienia belki żelbetowej uszkodzonej obciążeniem zmęczeniowym.

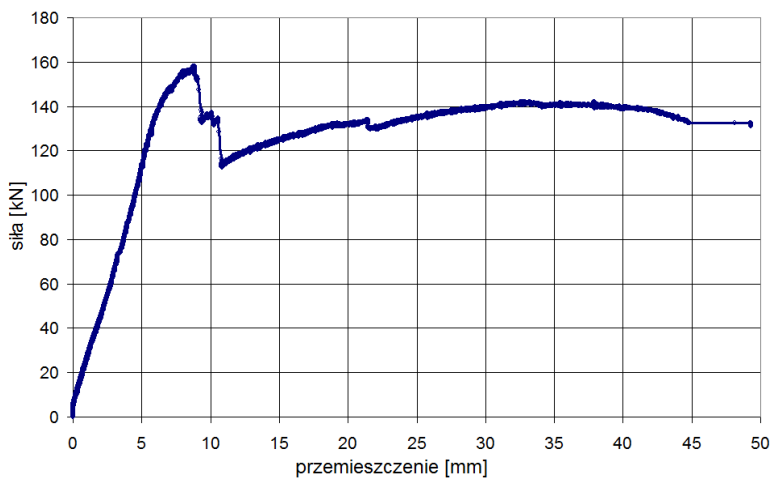
2. Opis naprawy i wzmocnienia belki zniszczonej obciążeniem cyklicznym

Badana belka żelbetowa (rys. 1), wykonana z betonu B45 i dołem zbrojona prętami $2 \times \phi 22$ klasy AII oraz górą $2 \times \phi 12$ klasy AIIIIN, została uszkodzona po 696 273 cyklach obciążenia cyklicznego z częstotliwością $f = 2$ Hz i współczynnikiem asymetrii obciążenia $R = 0,2$.

W zbrojeniu dolnym pręt „bA” uległ kruchemu pęknięciu zmęczeniowemu, a następnie nastąpiło uplastycznienie pręta „bB” (oznaczenia prętów pokazano na rys. 1) oraz zniszczeniu uległa strefa ściskana betonu. Pręt „bB” zabezpieczał belkę przed przetamaniem.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia układu pomiarowego na naprawionej i wzmocnionej belce żelbetowej



Rys. 2. Wykres siła (F) przemieszczenie ($d2$) obrazujący poszczególne etapy pracy konstrukcji



Rys. 3. Ściana boczna i podstawa belki w miejscu naprawy pęknięcia (na początku badania)



Rys. 4. Widok stanowiska badawczego z belką w trakcie badania (po oderwaniu obu taśm A i B)



Rys. 5. Nieuszkodzona i uszkodzona strefa ściskana w belce pracującej na jednej taśmie C/PXBM

Naprawa belki polegała na sklejeniu uszkodzeń w betonie żywicą epoksydową Sikadur 52 oraz podklejeniu na spodzie belki trzech taśm CFRP S512. Dwie z nich zamocowano na sztywnej warstwie adhezyjnej Sikadur 30 (taśmy A i B na rys. 1, oznaczane dalej jako A/S30 i B/S30), a jedną na podatnej warstwie adhezyjnej z polimeru PXBM (taśma C – oznaczana dalej jako C/PXBM), po czym jeden koniec belki opasano matą CFRP. Sztywna warstwa adhezyjna (Sikadur 30) cechuje się modułem Younga $E = 12\,800$ MPa i odkształcalnością graniczną $\varepsilon = 0,2\%$, natomiast podatna (polimer PXBM): $E = 0,3$ MPa i $\varepsilon = 1000\%$. Mocowanie wzmocnienia do konstrukcji na podatnych warstwach adhezyjnych jest objęte zgłoszeniem w Urzędzie Patentowym RP na rzecz Politechniki Krakowskiej.

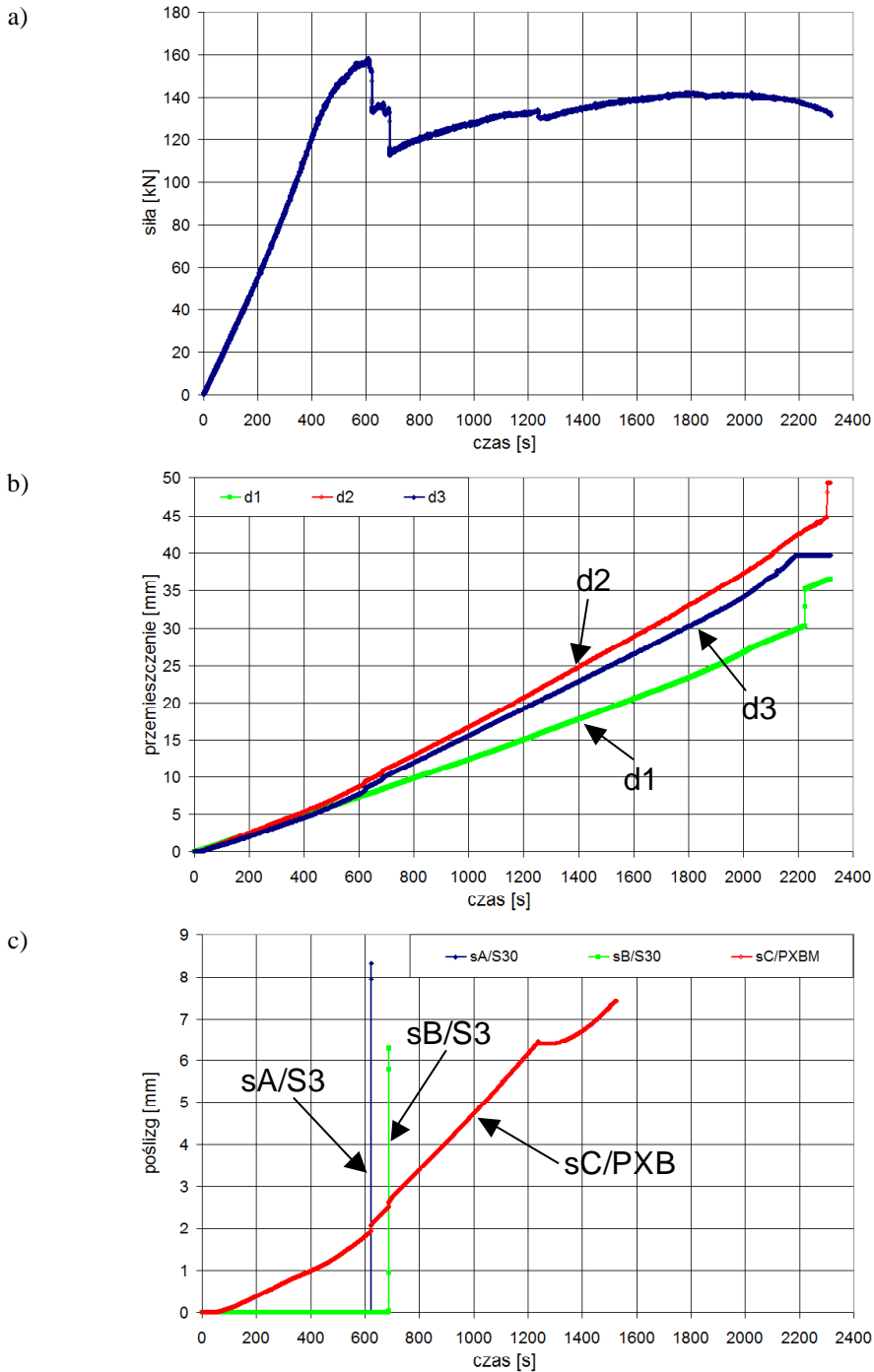
3. Opis wykonanych badań i dyskusja otrzymanych wyników

Przed właściwym badaniem niszczącym, belka naprawiona po uprzednim zniszczeniu zmęczeniowym badana była w trzech cyklach obciążenia monotonicznego do siły 120 kN. Kolejne badanie wstępne polegało na cyklicznym obciążeniu belki, przy zmienności siły w cyklu od 30 kN do 110 kN i częstotliwości obciążenia 2 Hz. Belkę poddano 11 000 cykli obciążenia. W trakcie obciążenia cyklicznego nie zaobserwowano znacznego przyrostu uszkodzeń belki, ani odpajania się od belki którejkolwiek z taśm wzmacniających.

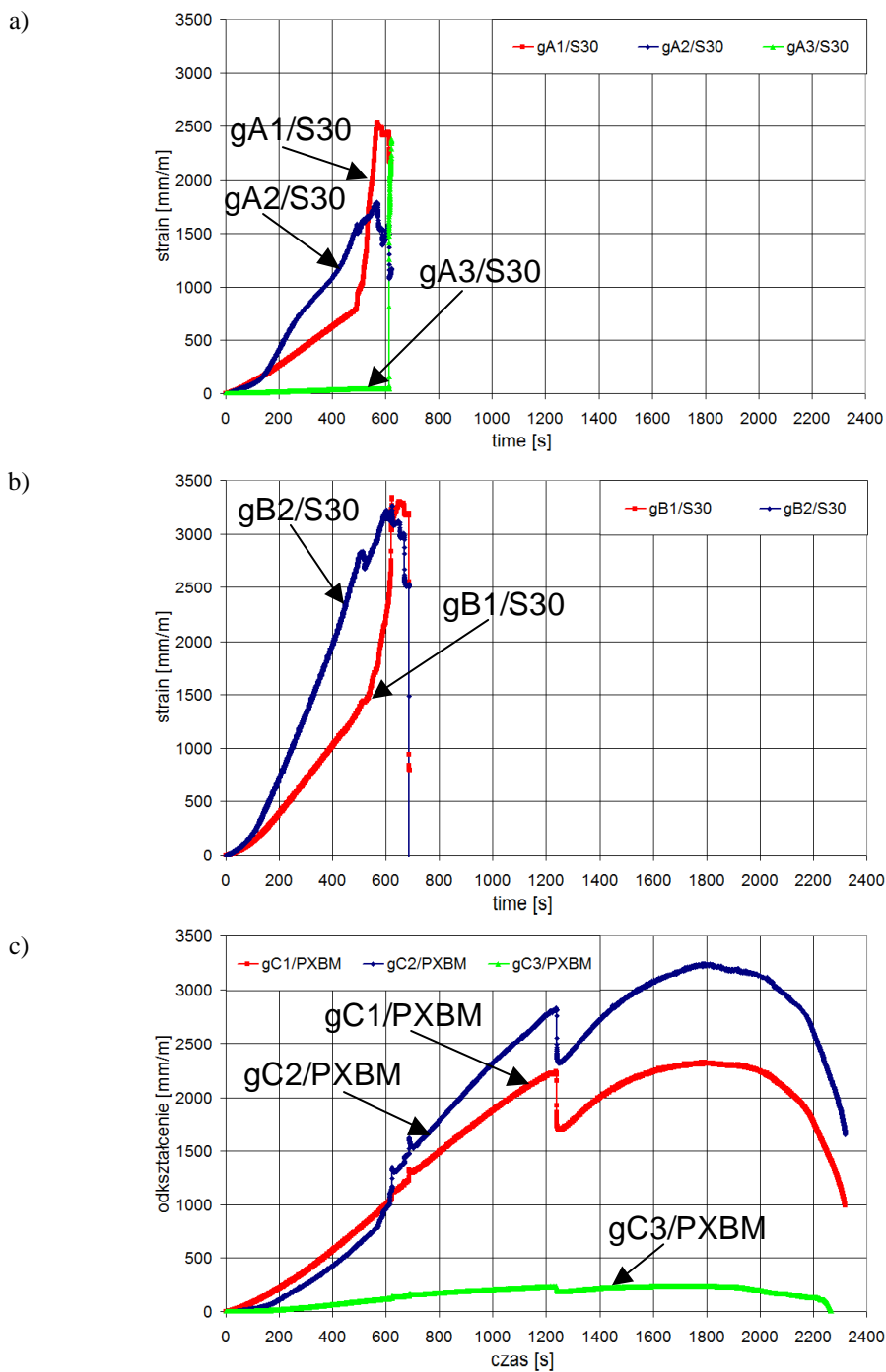
Podczas badań wstępnych, podobnie jak w trakcie badania właściwego, oprócz siły mierzone były przemieszczenia pionowe w punktach d1, d2 i d3, poślizgi wolnych końców taśm (sA, sB i sC) oraz odkształcenia taśm w środku rozpiętości belki (gA1, gB1 i gC1), pod naprawionym pęknięciem (gA2, gB2 i gC2) i 10 cm od końca taśm (gA3, gB3 i gC3) – oznaczenia pokazano na rys. 1. Widok naprawionego pęknięcia oraz układu taśm wzmacniających wraz z naklejonymi tensometrami pokazano na rys. 3.

Po serii badań wstępnych przystąpiono do właściwego testu niszczącego na zarysowanej belce, którego przebieg w układzie siła (F) – przemieszczenie (d2) przedstawiono na rys. 2. Belka była obciążana siłą ze stałym przemieszczeniem tłoka wynoszącym 1 mm/min.

W pierwszym stadium obciążenia pracowały wszystkie trzy taśmy CFRP, aż do osiągnięcia maksymalnej siły $F = 158,1$ kN (rys. 2). Efekt karbu powstały w miejscu pojawienia się nowego pęknięcia (w otoczeniu naprawionego uszkodzenia) wywołał najpierw delaminację i gwałtowne oderwanie taśmy A/S30 w miejscu pierwotnego pęknięcia pręta bA (spadek siły do 132,6 kN – w 622 sekundzie badania), a zaraz potem oderwanie taśmy B/S30 (spadek siły do 112,9 kN – w 687 sekundzie) w identyczny sposób. Odspojenie nastąpiło w przypowierzchniowej warstwie betonu pod taśmami (rys. 9). Od tego momentu belka podtrzymywana była jedynie na taśmie C/PXBM podklejonej na polimerze podatnym (rys. 4). Praca konstrukcji w czasie całego przebiegu badania została pokazana na rys. 6 i 7. Oderwanie taśm nie spowodowało istotnej zmiany wykresów ugięcia belki, jedynie zmienił się gradient przyrostu ugięcia w sąsiedztwie pęknięcia (d3). Taśmy A/S30 i B/S30 nie wykazywały poślizgu na ich końcach, natomiast dzięki podatności polimeru taśma C/PXBP doznała poślizgu 2 mm do momentu oderwania taśm mocowanych na żywicy epoksydowej. Po przejściu całego obciążenia poślizg wyniósł 2,8 mm i przyrastał dalej z dwukrotnie większym gradientem (rys. 6). Lokalizację początku odrywania taśm A i B w miejscu pierwotnego uszkodzenia belki (karbu) potwierdza obraz odkształceń taśm przedstawiony na rys. 7, odmienny dla taśm A i B w porównaniu do taśmy C. Po oderwaniu taśm A i B, taśma C/PXBP przeniosła wzrost obciążenia do siły 142,0 kN (1800 sekunda), po czym nastąpił proces powolnego (ok. 500 sekund) niszczenia polimerowej warstwy adhezyjnej (bez uszkodzenia betonu – rys. 9) przy prawie stałej sile obciążającej belkę.



Rys. 6. Wykresy w dziedzinie czasu przedstawiające: (a) zmianę siły F obciążającej belkę; (b) zmianę ugięcia belki w punktach d1, d2 i d3; (c) zmianę poślizgu końców taśm CFRP w punktach sA, sB i sC



Rys. 7. Wykresy w dziedzinie czasu przedstawiające: (a) zmianę odkształceń w taśmie A/S30; (b) zmianę odkształceń w taśmie B/S30 (uszkodzenie gB3); (c) zmianę odkształceń w taśmie C/PXBM



Rys. 8. Taśma C/PXBM utrzymująca belkę, w początkowej fazie niszczenia połączenia polimerowego



Rys. 9. Spód belki po delaminacji taśm A i B (zniszczenie kohezyjne w betonie – kruche) oraz taśmy C (zniszczenie kohezyjne w polimerze – ciągliwe)

Nawet częściowe zmiążdżenie i wykruszenie strefy ściskanej betonu (w 1240 sekundzie – rys. 5) nie wywołało znaczącego spadku siły obciążającej i skokowego przyrostu ugięcia belki, a jedynie chwilowe zatrzymanie przyrostu poślizgu taśmy (rys. 6) oraz spadek odkształceń w taśmie C (rys. 7), spowodowany redystrybucją naprężeń. Niewrażliwość taśmy C na efekt karbu i zdolność pochłaniania energii deformacji przez warstwę adhezyjną, w zaawansowanym stadium zniszczenia belki, wynika z jej dużej podatności [6]. Obrazuje to rys. 8, przedstawiający taśmę C pracującą w początkowej fazie niszczenia polimerowej warstwy adhezyjnej (w ok. 2000 sekundzie) przy ugięciu belki wynoszącym 37 mm (d_2).

4. Wnioski z przeprowadzonych badań

Wprowadzenie współpracy sztywnych i podatnych warstw adhezyjnych we wzmocnieniach konstrukcji betonowych materiałami kompozytowymi otwiera nowe możliwości wykorzystania tej technologii. Przede wszystkim, traci na znaczeniu dotychczasowa wada wzmocnień taśmami CFRP, polegająca na kruchym i gwałtownym (bez ostrzeżenia) zniszczeniu połączenia beton-kompozyt. Co istotne, zapas bezpieczeństwa konstrukcji wynika z jej właściwości ciągliwych, czyli dodatkowej energii zniszczenia, jaką jest ona w stanie zdysypować po przekroczeniu nośności granicznej. Przeprowadzone badania wskazują, że równoczesne klejenie taśm CFRP na sztywnej i podatnej warstwie adhezyjnej zwiększa pracę, jaką muszą wykonać siły zewnętrzne by doprowadzić do zniszczenia konstrukcji. Obliczony dla przedstawionego przypadku stosunek pracy belki (pole pod wykresem siła-przemieszczenie – rys. 2) utrzymywanej jedynie przez taśmę C (5120 J) do pracy belki

w stanie przed oderwaniem taśmy A (823 J) wynosi 6,22. Tak duży zapas energii odkształcenia w stanie pokrywczym pozwala na zapewnienie bezpieczeństwa uszkodzonej konstrukcji wzmocnionej taśmami CFRP, dzięki wprowadzeniu dużej ciągliwości ustroju.

6. Podsumowanie

Przedstawione rozwiązanie, bazujące na równoczesnym klejeniu taśm CFRP na sztywnych i podatnych warstwach adhezyjnych w trakcie wzmacniania konstrukcji, mogłoby być zastosowane w naprawie i wzmacnianiu uszkodzonych konstrukcji betonowych. Dzięki redukcji koncentracji naprężeń w miejscach karbu (np. w miejscu przemieszczających się wzajemnie krawędzi pęknięć), doklejane zbrojenie zabezpieczone jest przed delaminacją lub nawet zniszczeniem przez lokalną stosunkowo dużą odkształcalność polimerowej warstwy adhezyjnej. Dopuszczenie odkształcania polimeru na całej długości przyklejenia taśm CFRP umożliwia wykorzystanie dodatkowego zapasu energii odkształcenia, którego nie są w stanie wygenerować sztywne warstwy adhezyjne (żywice epoksydowe), wywołujące koncentracje naprężeń przekraczającą wytrzymałość betonu w połączeniu beton-kompozyt, co powoduje lawinowy proces odrywania taśm. Energia ta, umożliwia zwiększenie bezpieczeństwa wzmacnianej konstrukcji w sposób znaczący, bez pogorszenia parametrów projektowych.

Zwykle uważa się, że polimer o tak niewielkiej sztywności i ogromnej odkształcalności, jaki zastosowano w prezentowanym teście, nie mieści się w klasie materiałów konstrukcyjnych. Przedstawione powyżej badania oraz te zawarte w pracy [7] są przyczynkiem do rozpoznania możliwości i ograniczeń, jakie niesie z sobą wykorzystanie polimerowych złączy podatnych w naprawie i wzmacnianiu uszkodzonych konstrukcji budowlanych.

Literatura

1. Siwowski T., Radomski W.: Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu. *Inżynieria i Budownictwo* nr 7/98, s. 382÷388.
2. Radomski W.: Wzmacnianie betonowych konstrukcji mostowych za pomocą wyrobów z polimerów zbrojonych włóknami. *Materiały Budowlane* 4/2005, s. 76÷78.
3. Furtak K.: Wzmocnienie oczepów wiaduktu drogowego taśmami kompozytowymi z włókien węglowych. *Inżynieria i Budownictwo* nr 8/98, s. 435÷437.
4. Łagoda M.: Wzmacnianie mostów przez doklejanie elementów. Monografia 322, seria Inżynieria Lądowa, Politechnika Krakowska, Kraków 2005.
5. Derkowski W.: Fatigue life of reinforced concrete beams under bending strengthened with composite materials. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. VI, No. 4, pp. 31÷46, Wrocław 2006.
6. Kwiecień A.: Mocowanie kompozytu CFRP do konstrukcji przy użyciu polimerowego złącza podatnego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Budownictwo*, Nr 55, 993, 2006.
7. Derkowski W., Kwiecień A., Zajac B.: Comparison of CFRP strengthening efficiency of bent RC elements using stiff and flexible adhesives. *3rd fib International Congress – 2010, Washington 2010*.

Podziękowanie

Autorzy dziękują SIKA Poland Sp. z o.o. za nieodpłatne przekazanie materiałów do badań.