

Badania zakotwień w systemie wzmacniania konstrukcji sprężonymi taśmami CFRP

Paulina Paśko¹, Bartosz Piątek², Tomasz Siwowski³

^{1,2,3} Zakład Dróg i Mostów, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska, e-mail: ¹ppasko@prz.edu.pl, ²piatek@prz.edu.pl, ³siwowski@prz.edu.pl

Streszczenie: Materiały kompozytowe CFRP ze względu na swoje znakomite parametry mechaniczne są coraz szerzej wykorzystywane w budownictwie. W ostatnich kilkunastu latach obserwuje się m.in. coraz większe wykorzystanie kompozytów FRP (taśm, mat, kształtek, itp.) do wzmacniania różnego rodzaju konstrukcji budowlanych. Dotychczasowe badania jednoznacznie wykazują korzyści wynikające z zastosowania sprężonych taśm CFRP. Wykorzystanie materiału jest wówczas dużo bardziej efektywne pod względem wytrzymałościowym i ekonomicznym. Jednak efektywność takich aplikacji zależy od niezawodności zastosowanego systemu zakotwienia. Celem przeprowadzonych badań było opracowanie nowego, efektywnego i niezawodnego zakotwienia dla systemu sprężania taśm CFRP. Osiągnięcie wysokiej nośności zakotwienia stało się możliwe dzięki wykorzystaniu różnych cech połączenia stal-kompozyt (skleina, tarcie, nity). Wyniki badań potwierdziły skuteczność nowego rozwiązania – osiągnięto efektywność zakotwienia na poziomie 70% wytrzymałości taśmy CFRP na rozciąganie.

Słowa kluczowe: kompozyty CFRP, sprężanie taśm, zakotwienia, wzmacnianie konstrukcji

1. Wprowadzenie

W połowie lat 80-tych rozpoczęto w szwajcarskim instytucie *EMPA* realizację programu badawczego, którego celem była ocena możliwości zastosowania taśm kompozytowych z włókien węglowych zatopionych w żywicy epoksydowej (CFRP - *carbon fibre reinforced polymer*) do wzmacniania konstrukcji żelbetowych, w tym mostów. Wyniki tych badań udowodniły przydatność taśm CFRP w budownictwie [1]. W Polsce taśmy CFRP do wzmacniania obiektów budowlanych stosuje się już ponad 15 lat. Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu miało miejsce w 1997 r. na moście przez rzekę Wiar w Przemysłu. Dzięki zastosowaniu nowej wówczas technologii skutecznie i trwale podniesiono klasę nośności obiektu, a opracowany algorytm obliczeniowy był wielokrotnie stosowany do projektowania kolejnych realizacji i wdrożeń [2]. Od tego czasu technologia wzmacniania konstrukcji żelbetowych taśmami kompozytowymi została kompleksowo przebadana w wielu krajowych ośrodkach naukowych i uchodzi obecnie za procedurę standardową, o znanym algorytmie projektowania i sposobie aplikacji.

Wyniki badań naukowych wykazały jednak, że efektywność wzmocnienia elementów za pomocą przyklejanych biernie taśm kompozytowych jest ograniczona z powodu przedwczesnego odpajania taśmy od podłoża, bez pełnego wykorzystania wytrzymałości kompozytu. Liczne badania wykazały, że jedynie 30-35% wytrzymałości na rozciąganie kompozytu CFRP może być zmobilizowane w stanie granicznym nośności, ponieważ

wytrzymałość skleiny, która zależy m.in. od wytrzymałości na rozciąganie betonu otuliny, jest niewystarczająca do pełnego wykorzystania wytrzymałości na rozciąganie taśmy CFRP. Osiągany efekt wzmocnienia elementu jest zatem niewspółmierny do potencjału kompozytu CFRP. Taśmy kompozytowe z włókien węglowych charakteryzują się bowiem bardzo dużym zakresem liniowych odkształceń sprężystych, dochodzących do wartości ponad 15 %. Dopuszczalne wydłużenie przyklejonej taśmy kompozytywnej jest parametrem decydującym o sposobie jego wykorzystania oraz wpływa na opłacalność stosowania tego typu materiału do wzmocnienia konstrukcji.

Efektywność wzmocnienia elementów konstrukcyjnych za pomocą taśm kompozytowych może zostać znacznie zwiększona przez wstępne sprężenie taśm przed ich przyklejeniem do elementu. Np. badania przeprowadzone w *EMPA* pozwoliły na określenie wpływu wstępnego sprężenia taśm na sposób zniszczenia wzmocnionego elementu żelbetowego. Przy naprężeniu taśmy powyżej 70% jej wytrzymałości na rozciąganie (f_{Lu}) do zniszczenia wzmocnionego elementu dochodzi na skutek zerwania taśmy. Przy wstępnym sprężeniu poniżej 60% f_{Lu} zniszczenie jest spowodowane zazwyczaj odspojeniem taśmy od powierzchni betonu. Zatem za najbardziej efektywne zostało uznane naprężenie około 60% f_{Lu} , gdyż wówczas dochodzi do jednoczesnego rozwoju obu form zniszczenia. Ponadto zastosowanie wstępnego sprężenia taśmy przed jej przyklejeniem do powierzchni betonu pozwala na znaczące zwiększenie nośności i sztywności elementów oraz zmniejszenie ugięć i rozwarości rys w betonie w porównaniu do elementów wzmocnionych biernie [3].

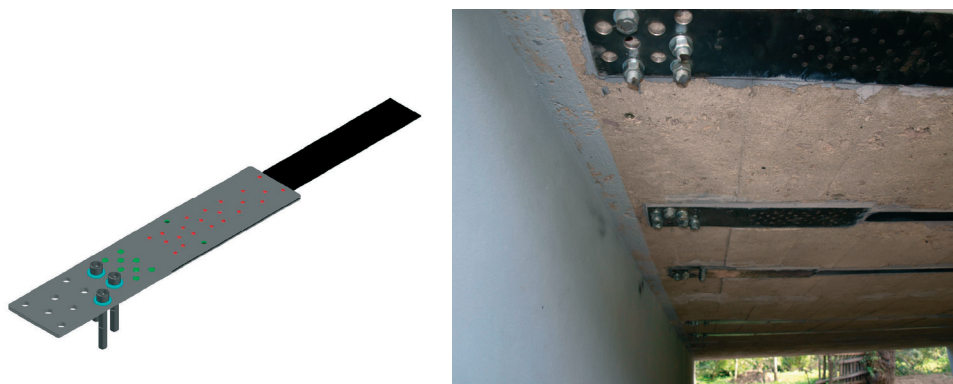
W ciągu ostatnich 10 lat powstało na świecie kilka różnych systemów czynnego wzmocniania konstrukcji żelbetowych za pomocą wstępnie naprężonych taśm CFRP [3], [4], [5], [6]. Wykorzystując i modyfikując rozwiązanie niemieckie opracowano także pierwszy polski system sprężania taśm kompozytowych [7]. Systemy różnią się metodami sprężania taśmy oraz sposobami przekazywania siły sprężającej taśmę na wzmocnianą konstrukcję. W pracy [8] został przedstawiony kolejny polski system sprężania taśm kompozytowych CFRP, który powstał w dziale badań i rozwoju krakowskiej firmy *Neoxe Sp. z o.o.* W podsumowaniu wymieniono zalety nowego systemu, które wg autorów mogą stanowić o jego przewadze nad innymi dostępnymi systemami sprężania taśm kompozytowych CFRP. Systemy różnią się między sobą rodzajem zakotwień taśm oraz sposobem wprowadzania siły sprężającej w taśmę. Elementem decydującym o efektywności i niezawodności systemu są zakotwienia taśm CFRP. Dlatego właśnie te elementy są stałym przedmiotem badań i rozwoju.

Przedmiotem pracy są badania zakotwień polskiego systemu wzmocniania sprężonymi taśmami CFRP [8], zmodyfikowanego w stosunku do jego pierwotnej wersji. W artykule przedstawiono budowę zakotwienia, opis wprowadzonych modyfikacji oraz badania wytrzymałościowe zakotwień w pełnej skali. Wykazano, że modyfikacja parametrów zakotwienia wpłynęła znacząco na zwiększenie jego efektywności do poziomu 70% wytrzymałości taśmy CFRP na rozciąganie.

2. Charakterystyka badanych zakotwień

System wzmocniający składa się z dwóch zakotwień taśmy CFRP, biernego i czynnego. Oba zakotwienia są wykonane z dwóch blach stalowych o grubości 2 mm oraz blachy dystansowej o grubości taśmy kompozytywnej, powiększonej o dwie grubości kleju. Wymiary blach są dostosowane do szerokości i grubości taśmy CFRP stosowanej do wzmocnienia, np. dla taśm o szerokości 60 mm typowe wymiary zakotwień stalowych wynoszą 550x128 mm. Zakotwienie jest podzielone na dwa równe obszary: skrajny

i wewnętrzny. W obszarze skrajnym elementy zakotwienia są połączone przez spawanie na krawędziach blach. W tej części zakotwienia są wykonane otwory przelotowe do mocowania zakotwienia do podłoża oraz, w zakotwieniu czynnym, otwory gwintowane do mocowania zaczepu urządzenia naciągowego. W obszarze wewnętrznym zakotwienia pomiędzy blachy jest wklejona taśma kompozytowa za pomocą specjalnej zaprawy klejowej. Skleina jest wzmocniona na całej powierzchni za pomocą metalowych nitów $\text{\O} 4$ mm, łączących blachy zakotwienia i taśmę. Dodatkowo, w celu zwiększenia nośności zakotwienia, przy wyjściu poza krawędź blach stalowych taśma kompozytowa jest specjalnie wzmocniona włóknami węglowymi. Zakotwienie o opisanej konstrukcji przenosi siłę sprężającą z taśmy na podłoże wzmacnianego elementu jednocześnie za pomocą skleiny, nitów i tarcia (rys.1).

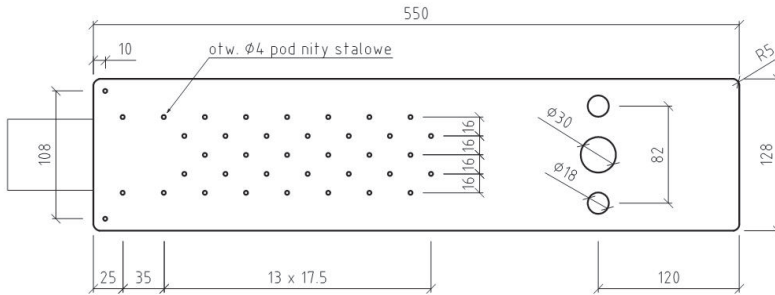


Rys. 1. Stalowe zakotwienie systemu wzmacniającego: schemat i zastosowanie na konstrukcji

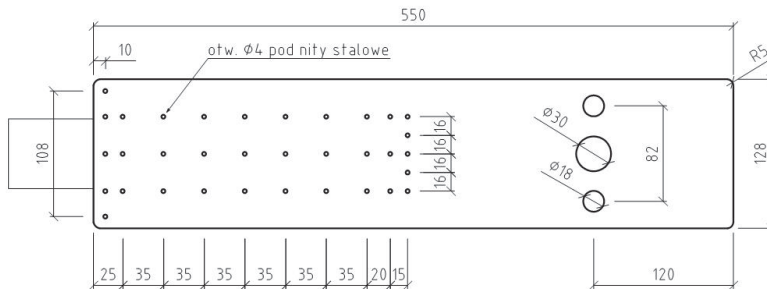
Zakotwienia przeznaczone do badań wykonano z dwóch blach ze stali S355 o grubości 2 mm oraz blachy dystansowej o grubości taśmy kompozytowej, powiększonej o dwie grubości kleju. Wymiary zakotwień dla taśm CFRP o szerokości 60 mm i grubości 1,4 mm wynosiły 550 x 128 mm. W skrajnej części zakotwień wykonano otwory przelotowe o średnicy 18 mm i 30 mm, służące do montażu próbek w specjalnie zaprojektowanych szczękach maszyny wytrzymałościowej. W obszarze wewnętrznym wykonano otwory $\text{\O} 4$ mm na nity. Układ otworów zróżnicowano w zależności od badanej serii (rys. 2 i 3). Wykonano cztery serie po trzy zakotwienia w każdej. Poszczególne serie zakotwień różniły się następującymi parametrami: geometrią, układem nitów, sposobem przygotowania powierzchni taśmy i blach stalowych, zaprawą klejową użytą oraz rodzajem taśmy kompozytowej (Tab.1). Seria 1 i 2 zawierała zakotwienia częściowo przebadane przy pierwszych aplikacjach systemu [8], seria 3 i 4 obejmowała zakotwienia zmodyfikowane w oparciu o wyniki badań małych próbek.

Tabela 1. Parametry zakotwień w kolejnych seriach badań

Nr serii	Rodzaj taśmy	Grubość płytki kotwiącej	Mieszanka klejowa	Przygotowanie powierzchni stalowej	Nity
S1	HM 614	2 mm	Standardowa	Bez obróbki	38 $\text{\O}4$ mm
S2	HS 614	2 mm	Standardowa	Bez obróbki	38 $\text{\O}4$ mm
S3	HS 614	3 mm	Zmodyfikowana	Piaskowanie, aktywator	34 $\text{\O}4$ mm
S4	HS 614	3 mm	Zmodyfikowana	Piaskowanie, aktywator	34 $\text{\O}4$ mm



Rys. 2. Zakotwienie stalowe taśm kompozytowych w badaniach serii S1 i S2



Rys. 3. Zakotwienie stalowe taśm kompozytowych w badaniach serii S3 i S4

Do badań wykorzystano dwa rodzaje taśm CFRP: wysokomodułowe taśmy HM 614 o maksymalnej wytrzymałości na rozciąganie 2800 MPa, module sprężystości podłużnej 250 GPa i zakresie liniowych odkształceń sprężystych ok. 1% oraz taśmy HS 614 o maksymalnej wytrzymałości na rozciąganie 2600 MPa, module sprężystości podłużnej 170 GPa i zakresie liniowych odkształceń sprężystych ok. 1,5%.

W pierwszej kolejności badano zakotwienia stosowane dotychczas, w których powierzchnie taśm i stali nie zostały poddane żadnej specjalnej obróbce, a w połączeniach wykorzystano standardową mieszankę klejową. W kolejnych dwóch seriach testowano zmodyfikowane zakotwienia. Zmieniono geometrię blach zwiększając ich grubość do 3 mm, zmniejszono liczbę nitów oraz zmieniono ich układ (rys. 3), natomiast powierzchnie materiałów poddano specjalnej obróbce ścierno – chemicznej. Zmodyfikowano także skład zaprawy klejowej.

3. Metodyka badawcza

Wszystkie zakotwienia zostały poddane próbie osiowego rozciągania w maszynie wytrzymałościowej Instron J1D 1200 kN. Badania serii 1 i 2 przeprowadzono na taśmach z podwójnymi zakotwieniami, natomiast próbki taśm w badaniach serii 3 i 4 miały tylko jedno zakotwienie, a drugi koniec taśmy był specjalnie przygotowany do zamocowania w szczękach maszyny (rys. 4). Badania zostały przeprowadzone w warunkach sterowania przemieszczeniem z szybkością 2 mm/min. Podczas badań mierzone były w sposób ciągły przyrost siły rozciągającej oraz przemieszczenia siłowników maszyny. Pomiar tych wartości odbywał się jednocześnie przy użyciu wbudowanego w maszynę wytrzymałościowej zestawu tensometrów oraz indukcyjnych czujników przemieszczeń. Rejestrowano także postać niszczenia zakotwień specjalną kamerą.



Rys. 4. Badanie zakotwień serii S1 i S3 w maszynie wytrzymałościowej

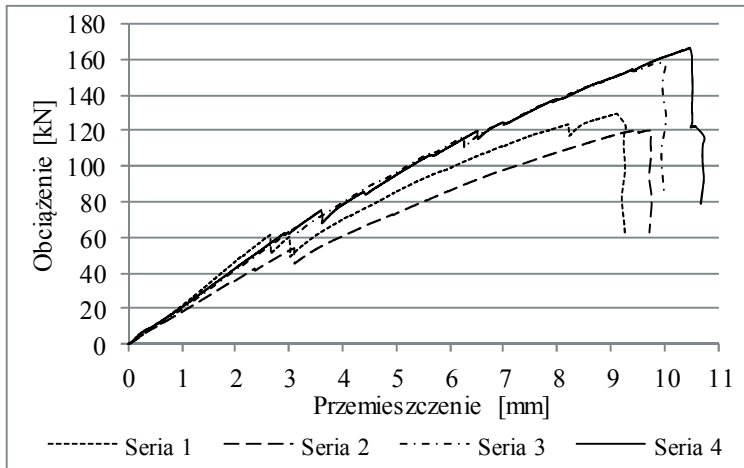
4. Wyniki badań

Zbiorcze wyniki badań zakotwień przedstawiono w tabeli 2. Podano siłę niszczącą poszczególne zakotwienia w każdej serii, obliczono dla serii średnią siłę niszczącą oraz jej odchylenie standardowe i współczynnik zmienności. W ostatniej kolumnie tabeli 2 podano efektywność zakotwienia, obliczoną poprzez porównanie średniej siły niszczącej zakotwienie w danej serii do średniej siły niszczącej taśmę CFRP wg katalogu technicznego producenta. Na rys. 5 przedstawiono wykresy zależności P- δ dla zakotwień, w których uzyskano maksymalne wartości sił niszczących w każdej serii.

Tabela 2. Zbiorcze zestawienie wyników badań dla 4 serii próbek zakotwień

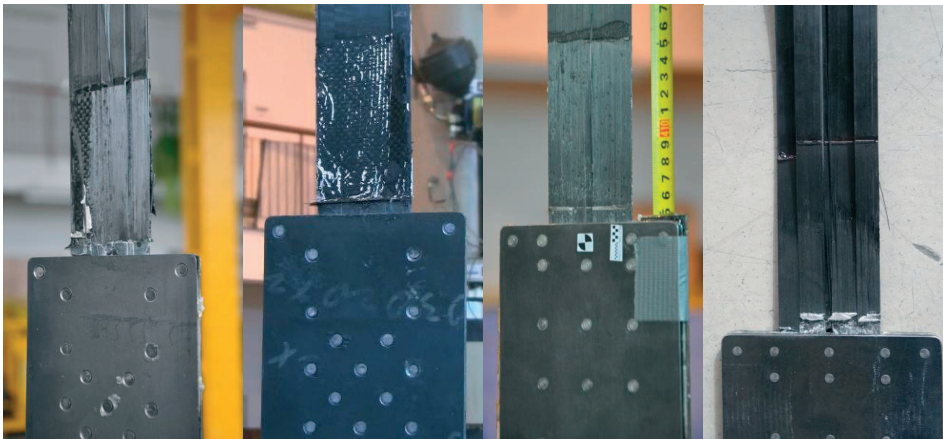
Seria badań	P _{max} (siła niszcząca próbkę) [kN]			Średnia siła niszcząca w serii P _{max} [kN]	Odchylenie standardowe [kN]	Współczynnik zmienności [%]	Efektywność zakotwienia [%]
	P1	P2	P3				
S1	90,63	111,16	129,32	110,37	19,36	17,54	47
S2	103,48	120,01	103,37	108,95	9,58	8,79	50
S3	125,98	157,59	151,11	144,89	16,70	11,52	66
S4	166,38	143,65	155,55	155,19	11,37	7,33	71

Jak łatwo zauważyć, modyfikacje parametrów zakotwień w seriach 3 i 4 przyczyniły się do znacznego wzrostu efektywności zakotwienia (siły niszczącej), uzyskanego podczas testów osiowego rozciągania. Odnotowany 20% przyrost nośności zakotwienia był w dużej mierze zasługą zastosowania nowej, zmodyfikowanej zaprawy klejowej oraz specjalnej obróbki powierzchni obu materiałów. Pewien udział w wzroście nośności miała także zmiana grubości blach oraz układu nitów. W celu uzyskania odpowiedzi na pytanie, która z w/w modyfikacji zakotwień miała największy wpływ na wzrost ich nośności, planowane są kolejne badania.



Rys. 5. Wykres zależności P- δ dla zakotwień o maksymalnej nośności w każdej serii

Typowe formy zniszczenia zakotwień w każdej z czterech serii pokazano na rys. 6. Niezależnie od serii zniszczenie zawsze miało podobną postać: wysunięcie taśmy z zakotwienia (blach stalowych) z jednoczesnym podłużnym rozwarstwieniem taśmy w osiach nitów zakotwienia. W przypadku serii 1 i 2 wysunięcie (poślizg) znacząco wyprzedzało rozwarstwienie, w seriach 3 i 4 obie formy występowały praktycznie jednocześnie.



Rys. 6. Typowe postacie zniszczenia 4 serii próbek

Badania potwierdzały wysoką efektywność zmodyfikowanych zakotwień. Zniszczenie próbek serii 3 i 4 nastąpiło przy wykorzystaniu około 70% wytrzymałości na rozciąganie materiału kompozytowego CFRP. Jest to wartość satysfakcjonująca z punktu widzenia systemu wzmacniania sprężonymi taśmami. Jak wykazały bowiem dotychczas prowadzone badania, optymalny poziom wzmocnienia konstrukcji uzyskuje się przy sprężeniu taśm do wartości 60-70% wytrzymałości CFRP na rozciąganie [3]. W kolejnej fazie badań przewiduje się wzmocnienie belek stalowych i żelbetowych sprężonymi taśmami CFRP przy użyciu opisanego systemu w warunkach laboratoryjnych oraz analizę efektywności tego wzmocnienia na zginanie i ścinanie.

5. Podsumowanie

Obserwując rozwój technologii wzmacniania konstrukcji materiałami kompozytowymi można sądzić, że już wkrótce większość realizacji takich wzmocnień będzie wykonywana z zastosowaniem wstępnego sprężenia taśm. Dotyczy to zwłaszcza mostów. Sprężenie taśm powoduje bowiem nie tylko znaczne zwiększenie nośności na zginanie, ale również poprawia warunki użytkowości wzmacnianego elementu, zwłaszcza w odniesieniu do ugięć i szerokości rozwarcia rys konstrukcji betonowych. Ponadto metoda czynnego wzmocnienia pozwala lepiej wykorzystać stosunkowo drogi materiał, co umożliwia zmniejszenie liczby taśm na danym obiekcie, a przez to znaczące obniżenie kosztów wzmocnienia.

W porównaniu do dostępnych systemów wzmocnienia opisany w referacie system ma zalety, które wg autorów mogą stanowić o jego przewadze nad innymi systemami. Do tych zalet można zaliczyć [8]:

- nowatorski system zakotwienia taśm, łączący działanie kleju, nitów i tarcia, eliminujący szkodliwy docisk prostopadły do taśmy oraz konieczność wykonywania wgłębienia w betonie (tj. osłabiania przekroju elementu), charakteryzujący się wysoką niezawodnością związaną z całkowitą prefabrykacją i kontrolą jakości w zakładzie wytwórczym, przed dostarczeniem na budowę;
- sposób zakotwienia eliminuje niebezpieczeństwo poślizgu taśmy i straty siły sprężającej (np. wskutek wysunięcia taśmy ze szczęk zaciskowych) oraz daje gwarancję utrzymania stałego naciągu taśmy podczas polimeryzacji kleju oraz w eksploatacji;
- geometria zakotwień może być kształtowana dowolnie na podstawie inwentaryzacji istniejącego elementu oraz parametrów stosowanej taśmy kompozytowej;
- system daje możliwość ciągłego pomiaru i regulacji siły naciągu taśm podczas ich instalacji;
- system wymusza próbną (tzn. „na sucho”) instalację taśm z pełnym naciągiem, co umożliwia sprawdzenie działania całego systemu i poprawności jego aplikacji.

Nowy system sprężania taśm kompozytowych, w tym w szczególności metoda zakotwień, jest przedmiotem ochrony patentowej w Polsce i Europie.

Opisane w referacie badania zostały zrealizowane w ramach projektu w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG) pt.: *"Innowacyjny system wzmacniania konstrukcji budowlanych naprężonymi taśmami z kompozytów węglowych"*, nr projektu POIG.01.03.01-18-010/12. Projekt jest współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

Literatura

- 1 Meier U., Carbon fiber - reinforced polymers: modern materials in bridge engineering. Structural Engineering International, 2/1 (1992) 7-12.
- 2 Siwowski T., Radomski W., Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu. Inżynieria i Budownictwo, 54 (1998) 382 - 388.
- 3 Meier U., Kotynia R., Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych naprężonymi materiałami kompozytowymi FRP. Inżynieria i Budownictwo, 62 (2006) 596-599.
- 4 André H-P., Maier M., Post-strengthening with externally bonded prestressed CFRP strips. The proceedings of the 16th Congress of IABSE, Lucerne, 2000.
- 5 El-Hacha R., Gren M., Wight G., Innovative system for prestressing fiber-reinforced polymer sheets. ACI Structural Journal, 100 (2003) 305-313.

- 6 Garden H.N., Hollaway L.C., An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates. *Composites, Part B*, 29B (1998) 411-424.
- 7 Łagoda M., Wzmacnianie mostów przez doklejanie elementów. Monografia 322. Seria: Inżynieria Lądowa, Politechnika Krakowska, 2005.
- 8 Siwowski T., Michałowski J., Błażewicz S. Nowy system sprężania taśm kompozytowych CFRP do wzmacniania konstrukcji żelbetowych. *Inżynieria i Budownictwo* 66 (2010) 152-156.

Research on anchorages of the structural strengthening system with prestressed CFRP strips

Paulina Paško¹, Bartosz Piątek², Tomasz Siwowski³

^{1,2,3} *Department of Road and Bridges, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Rzeszow University of Technology, e-mail: ¹ppasko@prz.edu.pl, ²piatek@prz.edu.pl, ³siwowski@prz.edu.pl*

Abstract: The CFRP composite materials due to their excellent mechanical properties are more often used in civil engineering. In recent more than ten years has been observed e.g. much wider application of CFRP strips in structural strengthening. The research on this subject clearly showed the advantages of prestressed strips application in contrast to passive one. The CFRP utilization is much more effective in terms of strength and economy. However, the system effectiveness depends on reliability of anchoring used for prestressed strips. The main goal of the research presented in the paper was to develop a new, innovative, effective and reliable anchoring system for CFRP strips. The achievement of quite high carrying capacity of new anchorages was able thanks to combining friction, bonding and rivet clamping in one CFRP-steel joint. The research results revealed the effectiveness of new anchoring system with carrying capacity level of about 70% of the CFRP ultimate tensile strength.

Keywords: CFRP composites, strip prestressing, anchorages, structural strengthening