

Nośność i odkształcalność żelbetowych belek wzmocnionych na zginanie przy użyciu kompozytowych profili węglowych o przekroju teowym – badania doświadczalne

Szymon Chołostiakow¹, Renata Kotynia²

^{1,2} *Katedra Budownictwa Betonowego, Wydział Budownictwa i Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, email: ¹szymon.cholostiakow@p.lodz.pl, ²renata.kotynia@p.lodz.pl*

Streszczenie: Praca dotyczy zagadnienia wzmocnienia żelbetowych belek na zginanie, za pomocą kompozytów z włókien węglowych (CFRP) o przekroju prostokątnym 270x550mm wzmocnionych jednym lub dwoma profilami CFRP. Wzmocnienie polegało na jednoczesnym wklejeniu środka kształtownika w bruzdy i przyklejeniu jego półki do przylegającej spodniej powierzchni belki. Wyniki badań tego nowego sposobu wzmocnienia są bardzo obiecujące. Jego skuteczność potwierdziły: zwiększenie sztywności belek po wzmocnieniu, wzrost nośności belki nawet o 130% oraz redukcja ich maksymalnych ugięć o 70-80% w porównaniu z elementami referencyjnymi. Osiągnięto wysoki stopień wykorzystania wytrzymałości kompozytu na rozciąganie równy 67%. Proponowany system wzmocnienia nazwany przez autorów T-NSMR jest alternatywą dla dotychczas powszechnie stosowanych sposobów wzmocnień przyklejanych na powierzchni betonu (Externally Bonded Reinforcement – EBR) i wklejanych w betonową otulinę (Near Surface Mounted Reinforcement – NSMR).

Słowa kluczowe: profil teowy, CFRP, wzmocnianie na zginanie, kompozyt, belka żelbetowa, nośność, odkształcalność

1. Wprowadzenie

Wzmocnianie konstrukcji żelbetowych na zginanie oraz ścinanie kompozytami FRP przyklejanymi na powierzchni betonu (EBR) i wklejanymi w bruzdy wycięte w betonowej otulinie (NSMR) jest coraz częściej spotykaną techniką towarzyszącą pracom remontowym w trakcie przebudowy istniejących obiektów budowlanych. Mimo, że wzmocnianie zewnętrznej powierzchni konstrukcji jest bardziej powszechnie stosowaną techniką, badania dowodzą o wyższej skuteczności wklejania taśm/prętów FRP w betonową otulinę. Pionowe usytuowanie taśmy wpływa bowiem na wyższą sztywność na zginanie, a zwiększona powierzchnia styku między betonem a kompozytem, poprawia przyczepność i pozwala na efektywniejsze wykorzystanie wytrzymałości materiału kompozytowego na rozciąganie (nawet do 80%). Istotnym jednak ograniczeniem w stosowaniu przypowierzchniowego zbrojenia kompozytowego (NSMR) w postaci taśm, są nadmierne ugięcia istniejącej konstrukcji. W przypadku dużych strzałek ugięcia wzmocnianej konstrukcji, bardziej celowe jest stosowanie prętów o przekroju kołowym lub kwadratowym, niż prostokątnych taśm. Skutkuje to jednak niższą efektywności wzmocnienia (Chołostiakow i inni [4]).

Dzięki obecności półki, kształtowniki teowe CFRP mogą być z powodzeniem stosowane do wzmocniania nawet nadmiernie ugiętych konstrukcji. Przedstawiony w pracy system wzmocnienia przy użyciu teowych kształtowników CFRP łączy w sobie obie

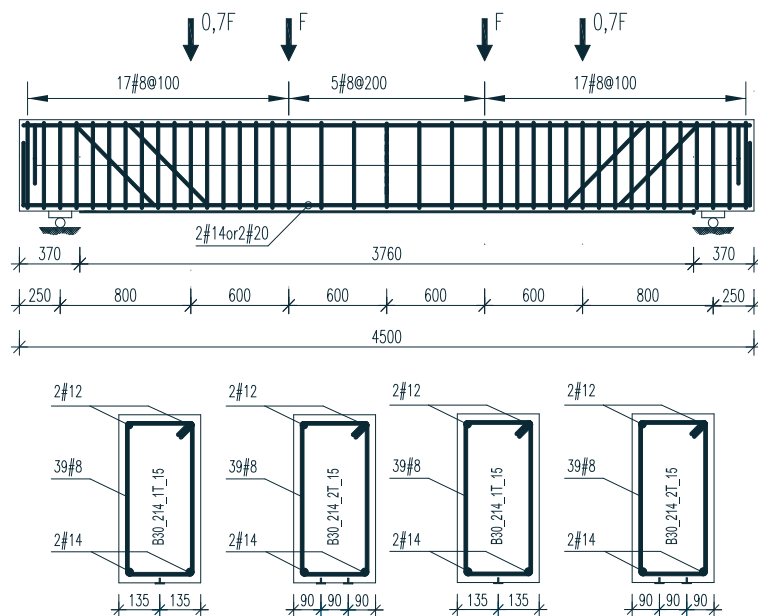
wspomniane metody, co znacząco poprawia warunki przyczepności. Teowy kształt profili (Rys. 1) zwiększa sztywność wzmocnionych elementów, co korzystnie wpływa na ograniczenie ugięć po wzmocnieniu.



Rys. 1. Przekrój profili T-NSMR, sposób wzmocniania belek profilami CFRP oraz widok wzmocnionej powierzchni (wymiary w mm)

2. Opis badań

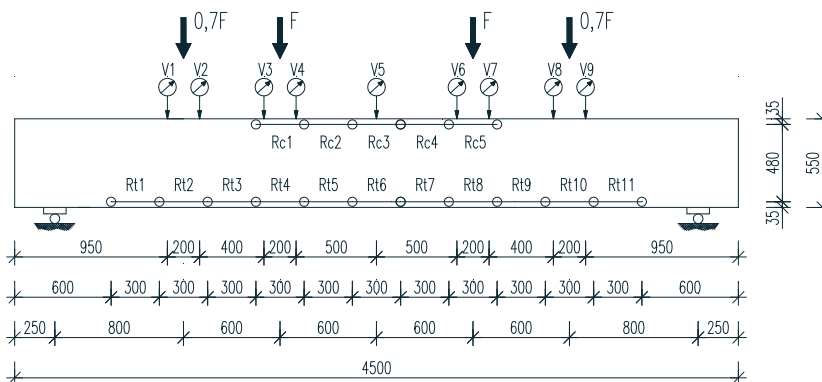
Badania przeprowadzono w laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej. Program obejmował sześć elementów badawczych o wymiarach poprzecznych 270x550mm i rozpiętości 4500mm, wykonanych z betonu klasy C25/30. W celu odzwierciedlenia równomiernie rozłożonego obciążenia, belki obciążono czterema skupionymi siłami, z których skrajne stanowiły 70% sił środkowych (Rys. 2.). Jednym z badanych parametrów zmiennych był stopień zbrojenia stalowego, który wynosił 0,22% dla belek zbrojonych dwoma prętami o średnicy 14mm lub 0,45% w przypadku dwóch prętów o średnicy 20mm, w strefie rozciąganej przekroju.



Rys. 2. Schemat statyczny, zbrojenie oraz sposób wzmocnienia belek

Zbrojenie ściskane w postaci dwóch prętów o średnicy 12mm było identyczne we wszystkich belkach. Aby zabezpieczyć elementy przed zniszczeniem na ścinanie, zaprojektowano strzemiona dwucięte o średnicy 8mm oraz pręty odgięte o średnicy 14mm. Belki różniły się również stopniem podłużnego zbrojenia kompozytowego, na który

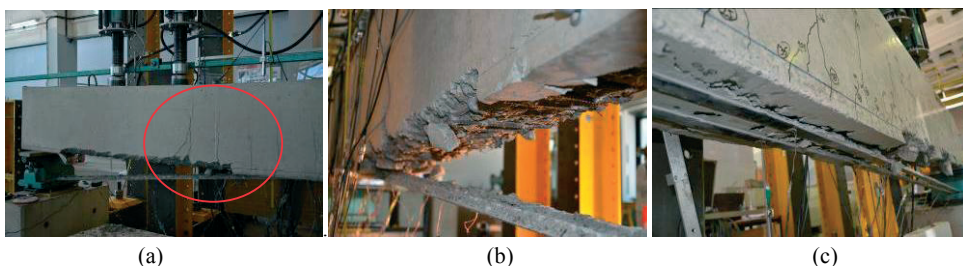
składały się jeden lub dwa teowe profile, przyklejone na długości 3760mm przy użyciu dwuskładnikowej epoksydowej zaprawy klejowej S&P Resin 220. Wszystkie belki były obciążane po wzmocnieniu. Obciążenie przykładano za pomocą czterech siłowników hydraulicznych, wyposażonych w elektroniczny moduł sterujący siłą ze stałą prędkością 1kN/min. Do pomiaru przemieszczeń pionowych i odkształceń w strefie ściskanej i rozciąganej w betonie użyto przetworników przemieszczeń liniowych rozmieszczonych zgodnie z Rys. 3.



Rys. 3. Układ czujników przemieszczeń (V) oraz przetworników przemieszczeń liniowych (Rc, Ri)

3. Wyniki badań

Wszystkie belki zniszczyły się na skutek odspojenia kompozytu wraz z przyległą betonową otuliną. Proces odspojenia poprzedzony był silnym zarysowaniem belek typowym dla zginania (Rys. 4a). Jedną z głównych rys pionowych w sąsiedztwie zewnętrznej siły obciążającej zmieniła pochylenie, które w końcowej fazie obciążania rozwinęło się w postaci podłużnej rysy niszczącej widocznej na bocznej powierzchni belek i położonej na wysokości zbrojenia zwykłego (Rys. 4b). Takiemu zarysowaniu towarzyszyły podłużne rysy na spodniej powierzchni belki, równoległe do wklejonych profili (Rys. 4c). Nie zaobserwowano uszkodzenia bądź rozwarstwienia profilu CFRP, ani jego poślizgu w warstwie kleju, co świadczy o bardzo dobrej przyczepności kompozytów do zaprawy klejowej w całym zakresie obciążeń osiągniętym w badaniu. Zmiażdżenie betonu w ściskanej strefie belki wystąpiło tylko w elementach referencyjnych, bez zbrojenia CFRP.



Rys. 4. Sposób zniszczenia wzmocnionych elementów

Wartości sił niszczących F_u , odkształceń mierzonych na środniku ($\epsilon_{f,web}$) oraz na półce ($\epsilon_{f,flange}$) profilu teowego, maksymalnych ugięć belek (u_{max}) wraz charakterystyką wytrzymałościową betonu przedstawiono w tabeli 1. Efektywność wzmocnienia η_f wyrażono

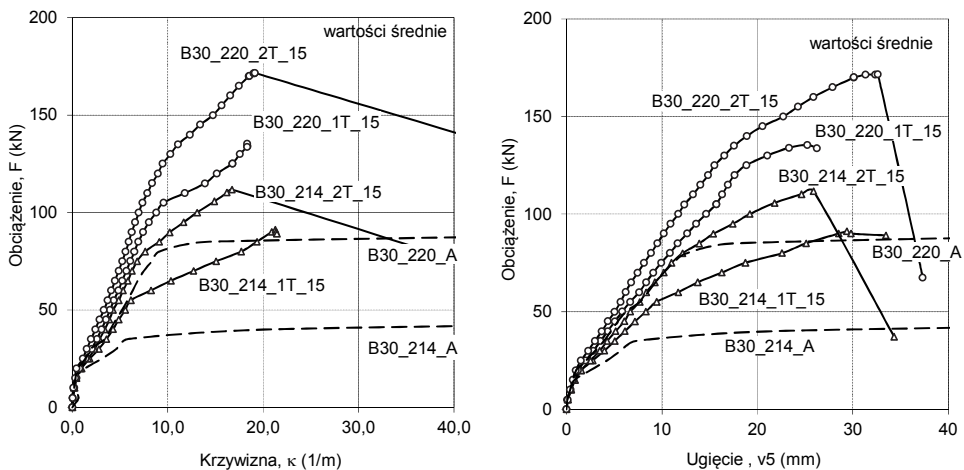
stosunkiem przyrostu siły niszczonej belkę wzmocnioną (F_u) i referencyjną (F_0), do wartości siły niszczonej belkę niewzmocnioną, zgodnie ze wzorem (1). Nazewnictwo poszczególnych belek odpowiada bezpośrednio ich konstrukcji i sposobowi wzmocnienia. Przykładowo: element B30_214_1T_15 oznacza belkę wykonaną z betonu klasy C25/30, zbrojoną dwoma prętami o średnicy 14mm i wzmocnioną jednym teownikiem CFRP o wysokości środnika 15mm. Belki oznaczone symbolami B30_214_A i B30_220_A były niewzmocnione.

$$\eta_f = \frac{F_u - F_0}{F_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

Tabela 1. Wyniki badań oraz charakterystyka materiałowa belek

Lp.	Symbol belki	F_u	η_f	$\varepsilon_{f,flange}$	$\varepsilon_{f,web}$	u_{max}	$f_{ct,cube}$	$f_{ct,cube}$	Stal
		[kN]	[%]	[%]	[%]	[mm]	[MPa]	[MPa]	
1	B30_214_A	49	-	-	-	107,5	41,5	3,5	$f_y=523\text{Mpa}$ $E_s=209\text{GPa}$ $\rho_{sf}=0.22\%$
2	B30_214_1T_15	91	86	0,73	0,75	29,4	-	-	
3	B30_214_2T_15	112	129	0,52	0,55	25,9	41,4	3,5	
4	B30_220_A	94	-	-	-	128,2	39,6	3,5	$f_y=565\text{Mpa}$ $E_s=198\text{GPa}$ $\rho_{sf}=0.45\%$
5	B30_220_1T_15	135	44	0,64	x	26,2	41,1	3,6	
6	B30_220_2T_15	172	83	0,66	0,71	32,6	46,8	3,6	

Belki wzmocnione teowymi kształtownikami CFRP wykazały znacznie większą nośność i sztywność niż odpowiadające im belki z tradycyjnym zbrojeniem stalowym. Największy przyrost sił niszczonej zanotowano dla belki zbrojonej dwoma prętami o średnicy 14mm i wzmocnionej dwoma profilami (129%). Dla belek zbrojonych dwoma prętami o średnicy 20mm i wzmocnionych dwoma wklejonymi profilami, stopień wzmocnienia wyniósł 83%. Dla porównania, przyrost nośności belek o różnym stopniu zbrojenia stalowego, lecz wzmocnionych jednym profilem CFRP, był odpowiednio równy 86% (belki o $\rho_{sf}=0.22\%$) i 44% (belki o $\rho_{sf}=0.45\%$.) We wszystkich wzmocnionych belkach zanotowano znaczny przyrost sztywności, tuż po zarysowaniu, w porównaniu z belkami niewzmocnionymi.



Rys. 5. Zależność krzywizny i ugięcia w środku rozpiętości belek w funkcji ich obciążenia

Zwiększenie liczby profili znacznie wpłynęło na wzrost sztywności elementów badawczych po uplastycznieniu stali zbrojeniowej w strefie rozciąganej (Rys. 5.). Maksymalne ugięcia i siły niszczące belek niewzmocnionych zostały określone przy zmiążdżeniu betonu w ściskanej strefie przekroju.

Porównując maksymalne ugięcia w środku rozpiętości belek można zauważyć, że maksymalne ugięcia zmniejszają się, wraz ze zwiększeniem liczby kompozytowych profili (Rys. 5.). Ubytek maksymalnych ugięć w belkach wzmocnionych jednym i dwoma profilami wynosił odpowiednio 70% i 80%. Szczegółową analizę ugięć przedstawiono w tabeli 2, porównując pionowe przemieszczenia przęśla belki dla poszczególnych poziomów obciążenia. Interesujące jest spostrzeżenie, że w miarę zwiększania stopnia zbrojenia kompozytowego CFRP w elementach wzmocnionych, zaobserwowano redukcję maksymalnych ugięć tych belek np. w belkach B30_214A, B30_214_1T_15 i B30_214_2T_15, na poziomie 35kN zarejestrowano odpowiednio maksymalne ugięcie 6mm, 5mm i 4mm. Podobną tendencję zaobserwowano w przypadku belek o wyższym stopniu zbrojenia. Po uplastycznieniu zbrojenia rozciąganego w belkach referencyjnych, maksymalne ugięcia w elementach wzmocnionych wynosiły od 6mm - 8mm dla belek o niższym stopniu zbrojenia i 12mm -16mm dla belek zbrojonych dwoma prętami o średnicy 20mm. Szare pola obejmują maksymalne wartości ugięć przed uplastycznieniem zbrojenia zwykłego, natomiast pozostałe pola dotyczą maksymalnych wartości ugięć po jego uplastycznieniu.

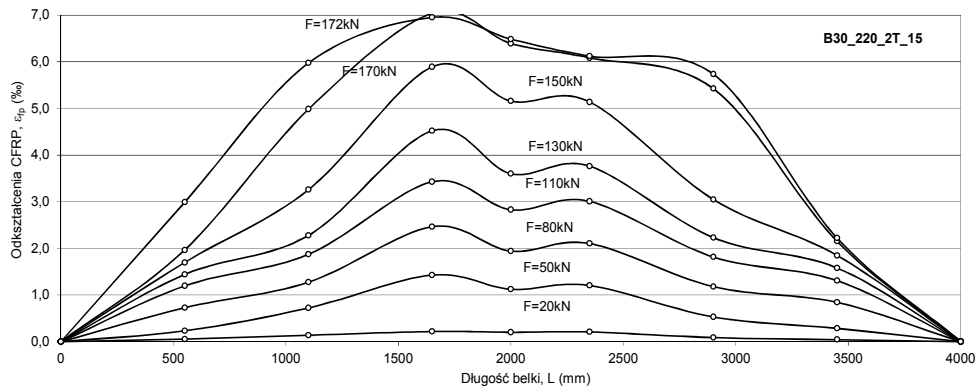
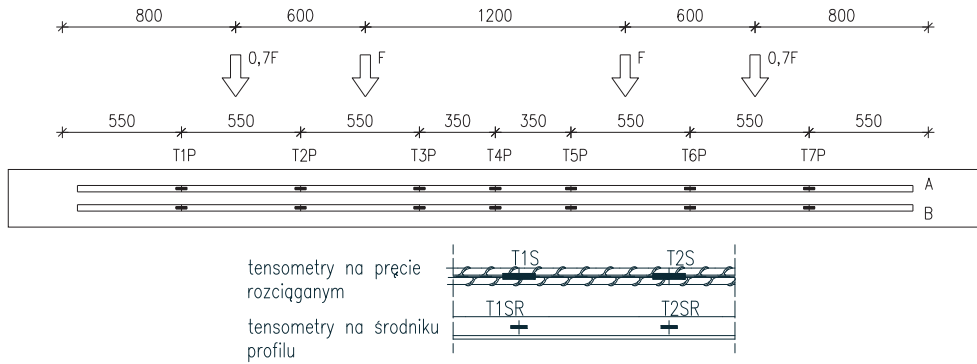
Tabela 2. Analiza ugięć belek na danym poziomie obciążenia.

Lp.	Symbol belki		25kN	35kN	50kN	75kN	100kN	125kN	150kN
1	B30_214_A	Maksymalne ugięcie (mm)	5,0	6,0	-	-	-	-	-
2	B30_214_1T_15		3,0	5,0	8,0	19,0	-	-	-
3	B30_214_2T_15		3,0	4,0	6,0	11,0	19,0	-	-
4	B30_220_A		2,0	4,0	6,0	11,0	-	-	-
5	B30_220_1T_15		2,0	3,5	6,0	10,0	16,0	19,0	-
6	B30_220_2T_15		1,5	3,0	5,0	8,0	12,0	15,5	23,0

x – tensometr uległ uszkodzeniu przy wklejaniu profilu

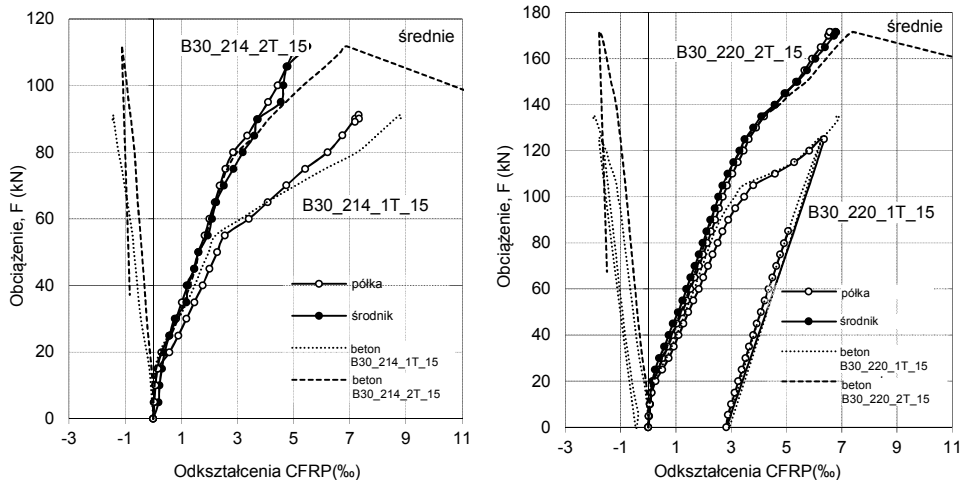
Odkształcenia profili CFRP mierzono przy użyciu siedmiu tensometrów elektrooporowych umieszczonych na półce oraz dwóch tensometrów przyklejonych na środku teowego profilu. Rozmieszczenie czujników zilustrowano na Rys. 6. Przykładowy rozkład odkształceń półki profilu na całej jego długości zarejestrowany dla wybranych poziomów obciążenia w elemencie B30_220_2T_15 zamieszczono na Rys. 7. Wykres pokazuje symetryczny rozkład odkształceń względem środka rozpiętości belki do chwili osiągnięcia obciążenia $F = 172\text{kN}$, przy którym rozpoczął się stopniowy proces odspojenia profilu. Wyraźnie widać, że odkształcenia w kompozycie zaczęły rosnać po lewej stronie belki w bezpośrednim sąsiedztwie siły obciążającej, dalej odspajanie profilu postępowo w kierunku lewej podpory. Maksymalne odkształcenia mierzone na półce profilu $\epsilon_{f,flange,max} = 7,5\%$ zarejestrowano w belce B30_214_1T_15, a minimalne równe $\epsilon_{f,flange,min} = 5,2\%$ w belce o tym samym zbrojeniu zwykłym, lecz wzmocnionej dwoma profilami kompozytowymi.

Pomiary odkształceń pomierzone na obu częściach teownika wskazują, że najbardziej wyteżoną częścią profilu jest środek i to on jest odpowiedzialny za przenoszenie sił rozciągających po rozpoczęciu odspojenia półki tego profilu. Porównanie odkształceń półki (znaczniki wypełnione) i środka (znaczniki puste) przedstawiono na Rys. 7.



Rys. 6. Rozmieszczenie tensometrów elektrooporowych na kształtownikach CFRP w belce B30_220_2T_15 oraz rozkład odkształceń na długości profilu

Liniami kropkowaną oraz przerywaną oznaczono odkształcenia betonu w rozciąganej i ściskanej strefie przekroju wzmocnionych belek mierzone na poziomie zbrojenia podłużnego. Największe odkształcenia w strefie ściskanej nie przekraczały 2‰ dla belek o $\rho_{st}=0.45\%$ oraz 1,5‰ dla belek o $\rho_{st}=0.22\%$.



Rys. 7. Zależności odkształceń profili CFRP i betonu w belkach B30_214_1T15 i B30_220_2T15

Wykresy odkształceń wzmocnionych belek potwierdzają, że beton w ściskanej strefie przekroju posiadał rezerwę nośności. Porównując odkształcenia w betonie i kompozycie, zaobserwowano bardzo dobrą zgodność pomiarów do momentu uplastycznienia się stali zbrojeniowej. Po przekroczeniu granicy plastyczności, na poziomie 75%-80% maksymalnego obciążenia, odkształcenia w betonie zaczęły przyrastać szybciej niż te w kompozycie (Rys. 7). Świadczy to o rozpoczęciu odspojenia kompozytu od otaczającego betonu w obrębie półki profilu CFRP.

4. Wnioski

Proponowany przez autorów nowy system wzmocnienia T-NSMR przy użyciu teowych kształtowników z włókien węglowych został zastosowany do wzmocnienia żelbetowych belek na zginanie. Wyniki badań są bardzo obiecujące i zachęcają do stosowania przedstawionego systemu do wzmocnień istniejących konstrukcji żelbetowych. Na podstawie analizy wyników badań można wysnuć następujące wnioski:

- Zastosowanie teowych kształtowników CFRP do wzmocnień na zginanie znacząco zwiększa nośność elementów po wzmocnieniu w zakresie od 45% do 130% w porównaniu z elementami niewzmocnionymi.
- Charakterystycznym sposobem zniszczenia wzmocnionych belek było odspojenie materiału kompozytowego wraz z otaczającą betonową otuliną.
- Stopień wzmocnienia belek rośnie wraz ze spadkiem stopnia zbrojenia stalowego.
- Wykorzystanie nośności na rozciąganie profilu CFRP ściśle zależało od liczby wklejonych kompozytów. Efekt był bardziej widoczny dla belek o niższym stopniu zbrojenia stalowego, gdzie maksymalne odkształcenia kompozytu osiągnęły 7,5%.
- Stopień zbrojenia kompozytowego istotnie wpływa na maksymalne wartości sił niszczących oraz wartości maksymalnych ugięć. Zwiększenie liczby profili skutkuje wzrostem sztywności elementów już po zarysowaniu, lecz prowadzi do szybszego odspojenia profilu, co potwierdza spadek maksymalnych odkształceń kompozytu zarejestrowanych w badaniu.

Dalsze badania prowadzone przez autorów będą dotyczyły wpływu głębokości wklejenia kompozytu oraz wytrzymałości betonu na zachowanie się belek wzmocnionych teowymi profilami.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować firmie Mostostal Warszawa S. A. za finansowe wsparcie programu badawczego.

Literatura

- 1 Barros, J. A. O., Dias, S. J. E., Lima, J. L. T. Efficacy of CFRP-based techniques for flexural and shear strengthening of concrete beams. *Journal of Cement & Concrete Composites*, 82 (1999) 247–269.
- 2 Bonaldo E., Barros J. A. O., Lourenco P. B. Efficient Strengthening Technique to Increase the Flexural Resistance of Existing RC Slabs. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2008, pp. 149-159.
- 3 Chołostiakow Sz., Kotynia R., Przygocka M., Flexural strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounded FRP composites. *Proceedings of the 9th Central European Congress on Concrete Engineering, CCC 2013, Wrocław, Poland 2013.*

- 4 De Lorenzis, L., Teng, J. G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Journal of Composites: Part B* No 38 2007, pp.119-143.
- 5 Kotynia R. Analysis of the flexural response of NSM FRP strengthened concrete beams. *Proceeding of the eight international conference on fibre-reinforced plastics for reinforced concrete structures, (FRPRSCS-8), Patras, Greece 2007.*

Flexural strengthening of RC beams by using a near surface mounted T-section profiles

Szymon Chołostiakow¹, Renata Kotynia²

*^{1,2} Department of Concrete Structures, Faculty of Civil Engineering and Architecture and
Environment Engineering, Lodz University of Technology,
e-mail: ¹szymon.cholostiakow@p.lodz.pl, ²renata.kotynia@p.lodz.pl*

Abstract: The paper presents test results of an experimental program of four full-scale RC beams, strengthened in flexure with T-section carbon fiber reinforced polymer (CFRP) profiles and two reference beams subjected to a six point bending. The novel shape of CFRP profile combines both the near surface mounted (NSM) and externally bonded (EB) strengthening systems. The application of the CFRP profiles consisted of gluing both the web and the flange of the profile to the concrete surface. RC beams made of the same concrete class were differed by the internal steel reinforcement ratio and in a number of applied profiles. Efficiency of this new strengthening product was determined by comparison of the strengthened and non-strengthened RC beams. An increase of the CFRP-concrete bond area and high stiffness of the T-section profiles significantly improved the strengthening ratio (up to 130% of the reference beam) and reduced the maximum mid-span deflection (ranged of 70-80%) of the non-strengthened beams. The CFRP strain utilisation equal to 67% of the tensile strain corresponded to the maximum CFRP strains equal to 0,73%. The promising test results exhibit this system as a very attractive proposal of new strengthening technique used for field applications of the existing structures.

Keywords: T section profile, CFRP, flexural strengthening, composite, Reinforced concrete beam, capacity, strain