

mgr inż. Ewelina Kusa*

prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński*

Taśmy CFRP we wzmacnianych belkach żelbetowych

CFRP-strengthened reinforced concrete beams

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych belek żelbetowych wzmocnionych taśmami CFRP przyklejanymi do betonu w strefie rozciąganej lub wklejanymi w bruzdy prostopadłe do powierzchni rozciąganej belki. Redukcja ugięcia i szerokości rozwarcia rys w tak wzmacnianych belkach zależy przede wszystkim od stopnia tego wzmocnienia.

Słowa kluczowe: beton, CFRP, wzmacnianie, belki, ugięcia.

Abstract. This paper presents the comparison of unstrengthened RC beam to Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)-strengthened reinforced concrete beams. The experimental results show significant reductions in deflections and increased bearing capacity of CFRP-strengthened RC beams. Elements were strengthened by two methods: Externally Bonded Reinforcement (EBR) and Near Surface Mounted Reinforcement (NSMR).

Keywords: concrete, CFRP, strengthening, beams, deflections.

Do wzmacniania konstrukcji żelbetowych coraz częściej stosuje się taśmy i maty FRP (Fiber Reinforced Polymer) z włókien aramidowych, bazaltowych, szklanych lub węglowych. Charakteryzują się one anizotropowością i dlatego należy określić pożądany kierunek ułożenia włókien we wzmocnieniu i wybrać rodzaj kompozytu. Taśmy mają włókna ułożone tylko w jednym kierunku, natomiast maty mogą mieć włókna układane w jednym, w dwóch lub kilku kierunkach. Włókna są zatopione w matrycy epoksydowej, która stanowi 50 – 70% objętości taśm i 25 – 30% objętości mat [1].

Zalety i wady kompozytów

Wadą wszystkich kompozytów FRP jest brak rezerwy plastycznej przy rozciąganiu, przez co nie jest sygnalizowane zniszczenie wzmocnionego elementu. Mała odporność ogniowa żywic epoksydowych (które stosuje się w matrycach kompozytów i niektórych klejach) powoduje konieczność projektowania dodatkowych zabezpieczeń przeciwogniowych. Odpowiedzią na tę wadę mogą być wprowadzane na rynek zaprawy mineralne, ale przeznaczone są one tylko do stosowania w przypadku wzmacniania matami.

Kompozyty z włókna węglowego CFRP są bardziej powszechne w użyciu od pozostałych ze względu na swoje właściwości. Charakteryzują się

* Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

dużą odpornością na korozję, małym ciężarem własnym, dużą swobodą stosowania, łatwością transportu i nieskomplikowaną aplikacją. Bardzo istotną jest ich duża wytrzymałość na rozciąganie oraz wytrzymałość zmęczeniowa. Różnica we współczynnikach rozszerzalności termicznej włókien węglowych ($-0,6 + -2,0 \times 10^{-6} K^{-1}$) i betonu ($+10 \times 10^{-6} K^{-1}$) powoduje dodatkowe naprężenia w miejscach połączeń tych materiałów.

Pomimo dużej odporności kompozytów węglowych na agresywne środowisko chemiczne, zaleca się stosowanie współczynników zmniejszających wartości wytrzymałości kompozytu na rozciąganie, które wpływają na trwałość materiału w czasie zależnym od warunków środowiskowych, w jakich pracuje kompozyt (warunki wewnętrzne – 0,95; zewnętrzne oraz agresywne – 0,85) [2]. Kolejną wadą kompozytów CFRP jest duży koszt i brak fachowej literatury dotyczącej sposobów wzmacniania oraz przykładów obliczania konstrukcji z ich zastosowaniem.

Przygotowanie elementów do badań

Badania belek żelbetowych wzmocnianych taśmami CFRP zrealizowano na prostokątnych belkach żelbetowych o wymiarach $150 \times 250 \times 3300$ mm. Na próbkach walcowych i sześciennych określono wytrzymałość betonu na ściskanie $f_{cm,cyl} = 45,07$ MPa oraz $f_{cm,cube} = 54,07$ MPa. Zbrojenie belek stanowiły po dwa pręty #12 mm góra

i dół ze stali RB500W [3]. Belki wzmocniano taśmami węglowymi Neoxeplate HS 514 o przekroju $50 \times 14 = 70$ mm² [4]. W stosunku do przekroju stali w strefie rozciąganej $A_{s1} = 2 \cdot 113 = 226$ mm² stanowi to wzmocnienie belki na zginanie o co najmniej 50%.

Zastosowano dwa sposoby łączenia taśm ze strefą rozciąganą:

- podklejenie taśmy stycznie do spodu belki – taśmy przyklejono na szerokości 50 mm do rozciąganej powierzchni belki B_n ;
- wklejenie taśmy prostopadłe do spodu belki (metoda NSMR – Near Surface Mounted Reinforcement) – wklejono 3 taśmy łącznej szerokości 50 mm w wycięte bruzdy w strefie rozciąganej belki B_w (fotografia).



Bruzdy wycięte w belce w celu wklejenia prostopadłych taśm CFRP Fot. E. Kusa

Otrzymano dwa różne wzmocnienia dwóch belek żelbetowych o takim samym polu przekroju materiału wzmacniającego.

Prostopadłe wklejanie taśm CFRP jest bardzo czasochłonne i trudne do wykonania, gdyż wymaga wycięcia bruzd w pozycji sufitowej. Bruzdy czyści się z luźnego materiału sprężonym powietrzem i ewentualnie odtłuszcza. Wzmacniany element konstrukcyjny musi mieć otulinę na tyle dużą, by podczas wycinania bruzd nie naruszyć strzemion. Wąskie bruzdy należy wypełnić klejem, a następnie wciska się w nie taśmy pokryte klejem i wygładza powierzchnię. Wklejanie taśm CFRP należy wykonywać starannie i szybko, gdyż czas wiązania kleju w temperaturze otoczenia $20 \pm 30^\circ\text{C}$ ulega skróceniu i wynosi ok. 30 min.

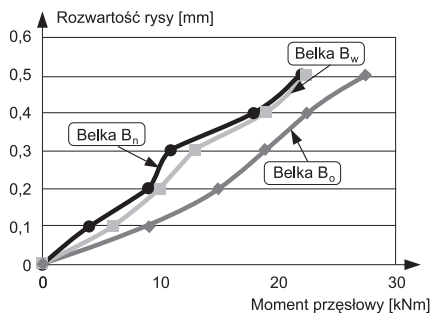
Nośność na zginanie wzmacnianych belek

Belki o rozpiętości teoretycznej $l_{\text{eff}} = 3,0$ m obciążano dwiema siłami skupionymi umieszczonymi w odległościach 1,0 m od podpór. Żelbetowa belka niewzmocniona B_0 osiągnęła nośność na zginanie $M_0 = 25,66$ kNm, belka wzmacniona przez podklejenie taśmy (B_n) – nośność $M_n = 37,76$ kNm, a belka B_w wzmacniona taśmami prostopadłymi wklejanymi w bruzdy (NSMR) – $M_w = 51,26$ kNm. Belka B_w osiągnęła więc o 35,8% większą nośność niż belka B_n , chociaż obie belki wzmacniono taśmami CFRP o identycznym przekroju poprzecznym.

Belka B_0 zniszczyła się przez uplastycznienie stali. W belce B_n w momencie zniszczenia odspoiła się taśma w strefie zakotwienia, co spowodowało gwałtowne zniszczenie elementu. Taśma oderwała się z cienką warstwą betonu, co sugeruje zbyt duże siły ścinające na styku taśmy z betonem. W belce B_w wzmacnionej taśmami wklejanymi wystąpiły rysy wzdłuż belki, od których rozpoczęło się wrywanie taśm wraz z betonem znajdującym się pomiędzy nacięciami. Obie wzmacnione belki zniszczyły się gwałtownie, co potwierdza wpływ braku rezerwy plastycznej kompozytów węglowych, również w zginanych belkach żelbetowych wzmacnianych taśmami CFRP.

Najslabszym miejscem w przypadku wzmocnienia przez podklejenie taśmy jest strefa zakotwienia, która powoduje, iż wzmocnienie jest mniej efektywne. Nie zauważono tej wady w belce z wklejonymi taśmami w bruzdach (NSMR), za co odpowiada większa powierzchnia styku kleju z betonem. Poprawność naklejenia taśmy belki B_n determinuje nośność wzmocnienia, co jest trudne do sprawdzenia w trakcie wykonywania wzmocnienia. Należy więc zwrócić dużą uwagę na zapewnienie jak najlepszej przyczepności pomiędzy taśmą a powierzchnią betonową (lub ewentualnie zastosować zakotwienie mechaniczne).

Taśmy z włókien węglowych mogą być wykorzystywane również do redukcji szerokości rozwarcia rys. Z rysunku 1 wynika, że lepsze efekty daje przyklejenie taśmy do strefy rozciąganej. Wklejanie taśm w bruzdy w mniejszym stopniu ogranicza rysy niż ich przyklejenie w strefie rozciąganej belki żelbetowej.



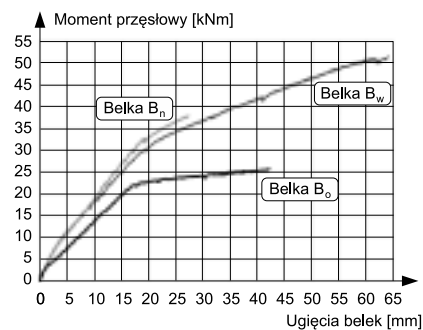
Rys. 1. Rozwartości rys prostopadłych w zależności od momentu przęsłowego

Ocena wpływu wzmocnienia na ugięcia belek

Wpływ wzmocnienia belek żelbetowych taśmami CFRP na ugięcie w środku rozpiętości pokazano na rysunku 2. Belki wzmacnione taśmami wykazują o 30 ÷ 40% mniejsze ugięcie niż belki niewzmocnione, gdyż wzmocnienie zmniejsza naprężenia w zbrojeniu strefy rozciąganej. Różnica ugięć pomiędzy dwoma typami wzmocnień jest niewielka przy niskich wartościach obciążenia.

Podobna zależność występuje przy badaniach ugięć belek żelbetowych pod obciążeniem długotrwałym [5]. W badaniach można zauważyć różnicę w redukcji ugięć belki B_n i B_w .

Belka wzmacniona B_w charakteryzuje się nieco większymi wartościami ugięć w porównaniu z belką B_n (rysunek 2).



Rys. 2. Ugięcia badanych belek w zależności od momentu w przęśle

Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdzają pozytywny wpływ wzmocnienia belek żelbetowych taśmami z kompozytów węglowych. Nośność belek wzmacnianych taśmami CFRP wzrasta co najmniej o tyle, o ile zwiększa się siła w strefie rozciąganej z tytułu zastosowania konkretnej taśmy z ograniczeniem odkształceń w taśmie. Redukcja rozwartości rys (najkorzystniejsza w przypadku belki B_n) oraz redukcja ugięć obu belek wzmacnianych w stosunku do belki żelbetowej bez wzmocnienia wynikają głównie ze zwiększonego zbrojenia zastępczego w strefie rozciąganej. Aby osiągnąć pożądane efekty wzmocnienia, należy dobrze zakotwić taśmy CFRP, a tym samym uzyskać odpowiednią przyczepność do betonu.

Literatura

- [1] Kotynia R.: Wzmacnianie żelbetowych belek na ścinanie za pomocą kompozytów polimerowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej nr 1106, Łódź 2011.
- [2] CNR DT 200 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, National Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2004.
- [3] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [4] Karta techniczna taśm Neoxplate – Megachemie.
- [5] Kusa E., Kamiński M.: Badania ugięć belek żelbetowych wzmacnianych taśmami węglowymi CFRP. Materiały Budowlane 3/2013.