

mgr inż. Ewelina Kusa*

prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński*

Badania ugięć belek żelbetowych wzmocnianych taśmami węglowymi CFRP

Deflections of CFRP-strengthened reinforced concrete beams

Obecnie coraz częściej stosuje się materiały kompozytowe FRP, ale wiele z nich nie jest do końca przebadanych. Wielokrotnie określa się cechy fizyczne i mechaniczne danego materiału, sprawdza jego wytrzymałość od obciążeń doraźnych, pomijając badanie właściwości materiału w funkcji obciążeń długotrwałych. Bardzo ważne jest poznanie w pełnym zakresie właściwości stosowanego materiału. Brak kompleksowej wiedzy na ich temat może skutkować błędami w obliczeniach, a tym samym błędami projektowymi.

Rozwój badań właściwości reologicznych kompozytów CFRP

Dotychczasowe badania właściwości reologicznych materiałów CFRP dotyczyły: kompozytów węglowych; żywicy wykorzystywanych do łączenia materiałów CFRP z podłożem; połączenia kompozytu z innym materiałem; całych elementów konstrukcyjnych wzmocnionych kompozytami CFRP.

Podczas badań F. Ascione [1] i jego zespołu prowadzonych na próbkach CFRP przez ponad rok w stałej temperaturze 20 °C zauważono pomijalnie małe odkształcenia w pierwszej fazie pełzania. Próbkami były różnej szerokości taśmy CFRP, charakteryzujące się wysokim modułem sprężystości oraz dużą zawartością włókien węglowych w matrycy. Wszystkie próbki poddano niezmiennie w czasie sile rozciągającej, przyłożonej w postaci przeciwwagi na systemie bloczków. Badania doprowadziły do wniosku, że materiały te będą ograniczać odkształcenia spowodowane pełzaniem elementów przez nie wzmocnionych.

Przełomowym badaniem zajął się E. Ferrier [2] wraz z zespołem. Poddano mu różne żywice polimerowe dostępne na rynku, stosowane do połączeń materiałów

kompozytowych z betonem. Żywice miały temperaturę zeszklenia 46 ± 80 °C. Każdą z żywic przez ok. 4 miesiące poddano działaniu temperatury 20 ± 60 °C oraz stałej sily. Podczas badań zauważono: wpływ temperatury otoczenia na naprężenia badanych elementów oraz wpływ temperatury zeszklenia na odkształcenia spowodowane pełzaniem przy jednakowej temperaturze otoczenia. Wyniki eksperymentu sugerują, że bezpiecznie można stosować żywice polimerowe tylko w temperaturze środowiska niższej o 15 °C od temperatury zeszklenia użytego polimeru.

Co dzieje się w strefie zakotwienia kompozytu do betonu podczas obciążeń długotrwałych, badali C. Mazzotti i M. Savoiron [3]. W tym celu do bloków betonowych przyklejono taśmy CFRP, które następnie przez ok. 7 miesięcy rozciągano siłą ok. 1/3 nośności zakotwienia. Próbki miały różną długość zakotwienia (100 – 400 mm). W przypadku próbek o długości zakotwienia co najmniej 200 mm zauważono, iż w odległości powyżej 160 mm od przyłożonej sily do zakotwienia, odkształcenia od obciążenia długotrwałego dążą do zera. Kolejny zespół badawczy prowadzony przez P. Meshgin [4] skupił się na wpływie czasu pomiędzy aplikacją taśmy CFRP na element badawczy a momentem przyłożenia sily. Przez 9 miesięcy w stałych warunkach temperaturowo-wilgotnościowych badano próbki, których czas pomiędzy aplikacją a obciążeniem wynosił 1 ± 7 dni. Zauważono, iż końcowe odkształcenia od pełzania zmniejszają się wraz ze zwiększeniem wspomnianego czasu.

Rozpoczęto również badania całych elementów wzmocnionych materiałami CFRP i obciążonych obciążeniem długotrwałym. Wzmocnienie belek żelbetowych różnej szerokości taśmami FRP testowali N. Pelvris i T.C. Triantafillou [5]. Zauważyli, że im większa powierzchnia materiału kompozytowego, tym mniejsze ugięcia spowodowane pełzaniem. Belki żelbetowe wzmocnione mate-

riałami CFRP i poddane działaniu sily długotrwałej badał też zespół G. Al Chami [6]. Próbki miały różny stopień rozciąganego zbrojenia stalowego i jednakową powierzchnię wzmocnienia kompozytowego. Po półtorarocznych badaniach stwierdzono, że zastosowany kompozyt CFRP ma pomijalnie mały wpływ na redukcję ugięć od małych obciążeń długotrwałych i mały wpływ na ugięcia od dużych obciążeń długotrwałych.

Badania własne

Badania przeprowadzone w Laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej miały na celu porównanie dwóch metod wzmocnienia i jednocześnie uzupełnienie wiedzy z zakresu właściwości reologicznych belek żelbetowych wzmocnionych materiałami CFRP. Przebadano trzy belki:

- Bo – bez wzmocnienia;
- Bnz – z naklejonym w strefie rozciąganej wzmocnieniem w postaci taśmy CFRP;
- Bwz – ze wzmocnieniem kompozytem CFRP wklejonym we wcześniej wycięte bruzdy – metoda zwana NSM (Near Surface Mounted). Belki zostały obciążone i przy rozwarości rysy 0,1 mm, pod stałym obciążeniem wzmocnione. Następnie po 24 godzinach zwiększono obciążenie do 1/2 teoretycznej nośności belki niewzmocnionej i pod takim obciążeniem elementy badano przez 10 miesięcy.

Badania materiałowe. Zbrojenie główne wykonano ze stali żebrowanej średnicy 12 mm, strzemiona ze stali gładkiej średnicy 6 mm. Cechy wytrzymałościowe określone na próbkach prętów stalowych podano w tabeli 1.

Tabela 1. Cechy wytrzymałościowe stali zbrojeniowej

Średnice prętów	Wytrzymałość na rozciąganie – f_t [MPa]	Moduł Younga – E_s [GPa]	Granica plastyczności – f_{sy} [MPa]
ø6	500	187	426
ø12	636	190	499

*Politechnika Wroclawska

Podczas wykonywania belek, z tego samego zarobu betonowego pobrano materiał na próbki do oznaczania wytrzymałości betonu. Uzyskano następujące wartości średnie:

- wytrzymałości na ściskanie – kostka – $f_{c,cube} = 37,41$ [MPa];
- wytrzymałości na ściskanie – walec – $f_c = 32,75$ [MPa];
- moduł Younga – $E_c = 30,86$ [GPa];
- wytrzymałości na rozciąganie – $f_{ct} = 4,86$ [MPa].

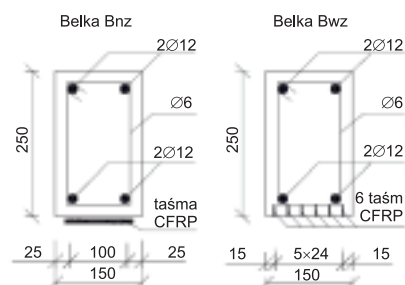
Z materiałów CFRP do badań [7] przygotowano 10 próbek długości 250 mm i szerokości 15 mm. Każda próbka miała grubość 1,4 mm, taką samą jak naklejana taśma. Otrzymane wyniki są następujące:

- wytrzymałość na rozciąganie – $f_{tu} = 2,339$ [GPa];
- moduł Younga – $E_f = 177,189$ [GPa];
- odkształcenia przy rozciąganiu – $\epsilon_{fu} = 1,32$ [%].

Elementy badawcze. Belki żelbetowe jednakowych wymiarów: 150 x 250 x 3300 mm wykonano w zakładzie prefabrykacji. W belce Bwz w strefie rozciąganej wycięto sześć bruzd głębokości 20 mm i szerokości 6 mm, w które po obciążeniu wklejono pociętą na paski taśmę CFRP. Przed przystąpieniem do aplikacji kompozytu starannie oczyszczono i odtłuszczono elementy oraz taśmę. Na belkę Bnz w strefie rozciąganej naklejono taśmę CFRP. W obu przypadkach wzmocnienia jednakowa była powierzchnia materiału CFRP (rysunek 1).

Belki swobodnie podparte o rozpiętości przeszła 3100 mm były obciążone dwiema siłami skupionymi o rozstawie 2000 mm i umieszczone w namiocie izolującym badane elementy od środowiska zewnętrznego. Wewnątrz namiotu za pomocą klimatyzatora utrzymywano temperaturę ok. 20 °C i za pomocą nawilżacza powietrza wilgotność 50 – 60%. Ugięcia w badanych elementach były odczytywane z czujników zegarowych.

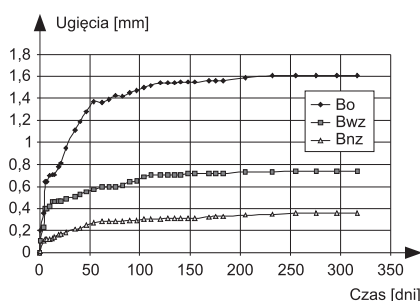
Wyniki badań. Celem badań było sprawdzenie wielkości redukcji ugięć dzie-



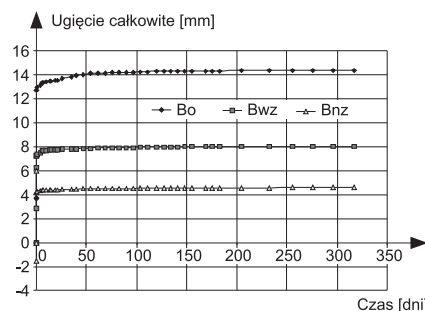
Rys. 1. Schemat wzmocnień belek żelbetowych Bnz i Bwz

ki zastosowanemu wzmocnieniu oraz porównanie dwóch stosowanych metod wzmocniania elementów żelbetowych materiałami kompozytowymi CFRP. Pierwsza z nich to podklejenie taśmy do strefy rozciąganej, druga to metoda NSM – wklejenie pasków taśmy w bruzdy.

Rysunek 2 przedstawia wykres ugięcia w przęśle od obciążeń długotrwałych wszystkich belek, natomiast rysunek 3 wykres ugięć całkowitych. Widoczne na rysunku 3 ujemne wartości ugięcia dla belki Bnz zostały spowodowane wiązaniem kle-



Rys. 2. Wykres ugięcia badanych belek żelbetowych od obciążenia długotrwałego w czasie (od momentu przyłożenia obciążenia długotrwałego)



Rys. 3. Wykres całkowitych ugięć badanych belek żelbetowych od obciążenia długotrwałego w czasie

ju. Aplikacje taśm CFRP nastąpiły po obciążeniu i po odczytaniu ugięć doraźnych, następnie po związaniu kleju zauważono redukcję ugięć zarówno dla belki Bwz, jak i Bnz. Analizując wykresy, można zauważyć, iż ugięcia dla belki niewzmocnionej Bo są największe. Jednak obliczeniowa sztywność tego przekroju uwzględniając zarysowanie jest dwukrotnie mniejsza niż analogiczna sztywność belek wzmocnionych. Ugięcia dla belki Bnz, która miała podklejone wzmocnienie, są mniejsze niż dla belki Bwz wzmocnionej metodą NSM. Tradycyjna metoda podklejania taśm w większym stopniu redukuje ugięcia niż metoda NSM, bowiem środek ciężkości kompozytu w metodzie NSM jest w mniejszej odległości od środka ciężkości przekroju niż w meto-

dzie podklejenia taśmy, jaka miała miejsce w belce Bnz. Zastosowanie taśm CFRP prawie trzykrotnie zwiększyło nośność przekroju, co spowodowało, że wartość obciążenia długotrwałego stanowiła ok. 20% ich nośności.

Na podstawie tych badań można zauważyć, że materiały kompozytowe CFRP redukują ugięcia od obciążeń długotrwałych dzięki temu, że znacząco wpływają m.in. na sztywność, nośność i odkształcenia.

Badania powinno się kontynuować także z wyższymi wartościami obciążeń w stosunku do nośności belek wzmocnionych.

Abstract

The strengthening of reinforced concrete structures with steel plate bonding techniques are currently being replaced by fiber reinforced polymer (FRP) laminates. Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) is a quite new material and the rheological behavior of structural materials is significant. The studies focusing on long-term behavior of FRP-strengthened concrete elements. The aim of this paper was to compare two strengthening methods: near surface mounted reinforcement (NSM CFRP) and CFRP strip bonding technique. It presents results of experiment performed on three bonding concrete beams with dimensions of 150 x 250 x 3300 mm, under sustained load.

Literatura

[1] Ascione F., Berardi V.P., Feo L., & Giordano A. *An experimental study on the long-term behavior of CFRP pultruded laminates suitable to concrete structures rehabilitation*. Composites: Part B 2008, Vol. 39.

[2] Ferrier E., Michel L., Jurkiewicz B. & Hamelin P. *Creep behavior of adhesives used for external FRP strengthening of RC structures*. Construction and Building Materials 2011, Vol. 25. No. 2.

[3] Mazzotti C. & Savoia M. *Long term properties of bond between concrete and FRP*. Chen & Teng (eds), *Bond behaviour of FRP in structures*; Proc. Int. Symp. 7-9 December 2005. Hong Kong, China 2005.

[4] Meshgin P., Choi K-K. & Reda Taha M.M. *Experimental and analytical investigations of creep of epoxy adhesive at the concrete-FRP interfaces*. International Journal of Adhesion & Adhesives 2009, Vol. 29.

[5] Pelvis N. & Triantafillou T.C. *Time-dependent behavior of RC members strengthened with FRP laminates*. J Struct Eng, ASCE 1994, Vol. 120, No. 3.

[6] Chami G.A., Thériault M. & Neale K.W. *Creep behaviour of CFRP-strengthened reinforced concrete beams*. Construction and Building Materials 2009, Vol. 23, No. 4.

[7] Trapko T. *Identyfikacja parametrów wytrzymałościowych kompozytów węglowych CFRP*. Materiały Budowlane 2010, nr 7.