

Wpływ kotwienia mechanicznego taśm CFRP na efektywność wzmocnienia belek żelbetowych

Zwiększenie obciążeń i intensywności ruchu na polskich drogach, a także funkcjonalne starzenie się obiektów mostowych powodują często konieczność zwiększania ich nośności.

Obecnie w ciągu sieci dróg publicznych w Polsce znajduje się ponad 35 tysięcy mostów, z których ponad 85% stanowią obiekty wykonane z betonu zbrojonego bądź sprężonego. Problem niedostatecznej nośności zginanych elementów mostów betonowych wiąże się zazwyczaj z niewystarczającym zbrojeniem ich stref rozciąganych. Często istnieje możliwość wzmocnienia takich konstrukcji przez wprowadzenie dodatkowego zbrojenia w tych strefach. Jedną z metod wzmocnienia jest doklejenie do elementu betonowego taśm z materiałów kompozytowych. Najczęściej w tym celu są stosowane taśmy kompozytowe CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) z włókien węglowych i matrycy z żywicy epoksydowej. Dzięki bardzo dobrym parametrom taśm CFRP, takim jak wytrzymałość, trwałość, bardzo duży zakres odkształceń sprężystych oraz łatwość zastosowania, technologia ta coraz częściej wypiera konwencjonalne metody wzmocniania konstrukcji betonowych.

W świetle wyników badań można stwierdzić, że efektywność wzmocnienia przy użyciu taśm biernych, tj. wyłącznie przyklejanych do konstrukcji, jest ograniczona z powodu przedwczesnego odspajania taśm od podłoża betonowego [1÷4]. Jedynie 30÷35% wytrzymałości na rozciąganie kompozytu CFRP może być zmobilizowane w stanie granicznym nośności, gdyż wytrzymałość skleiny, która zależy m.in. od wytrzymałości na rozciąganie betonu otuliny jest niewystarczająca do pełnego wykorzystania wytrzymałości na rozciąganie taśmy CFRP. Z tych względów podjęto poszukiwania nowych sposobów zwiększenia stopnia wykorzystania stosunkowo drogiego materiału, jakim jest kompozyt węglowy.

Mechanizm zniszczenia belki żelbetowej wzmocnionej taśmami na skutek ich odspojenia może mieć jedną z dwóch form. Pierwszą z nich jest odspajanie końcowych fragmentów taśm postępujące w kierunku środka rozpiętości belki (tzw. end debonding), a druga polega na odspojeniu taśmy w strefie jednoczesnego występowania momentu zginającego i siły poprzecznej (tzw. intermediate crack debonding) [2]. W wyniku działania momentu zginającego belka ulega zarysowaniu. Siła poprzeczna powoduje natomiast pionowe przesunięcie jednej części elementu względem drugiej po przeciwnej stronie rysy, wskutek czego następuje rozszczepienie otuliny betonu i delaminacja taśmy postępująca w kierunku jej końców [3].

Wprowadzenie skutecznych zakotwień na końcach taśm CFRP uniemożliwia rozwój pierwszej formy zniszczenia, natomiast w przypadku drugiej pozwala na zwiększenie nośności granicznej elementu. Taśmy po odspojeniu pracują bez przyczepności, pełniąc rolę ściągu zamocowanego do konstrukcji w miejscach zakotwień. Wtedy element nadal jest w stanie przetrwać obciążenia aż do zerwania taśm lub awarii zakotwień [5].

Drugim sposobem zwiększenia stopnia wykorzystania materiału kompozytowego jest wstępne naprężanie taśm przed ich przyklejeniem i zakotwieniem w konstrukcji [1, 6, 7]. Uży-

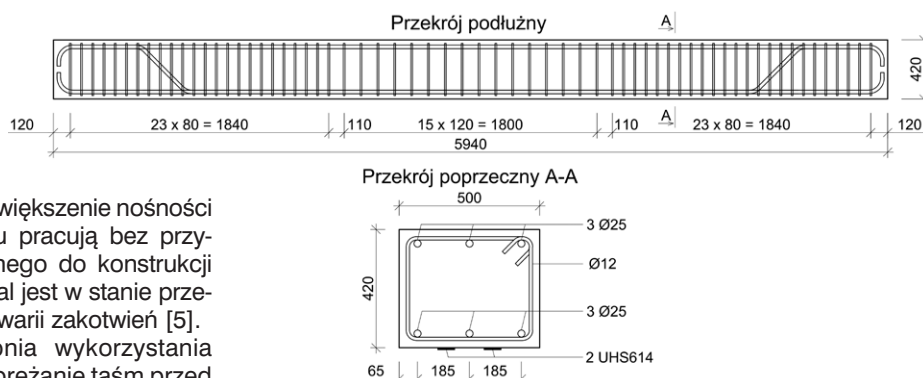
skane w ten sposób sprężanie belek skutkuje przede wszystkim zwiększeniem ich sztywności, co jest pożądane szczególnie wówczas, gdy występuje problem ze spełnieniem warunków stanów granicznych użytkowalności, a w szczególności ograniczenia ugięć i zarysowań.

W artykule przedstawiono wyniki badań zrealizowanych w Zakładzie Dróg i Mostów Politechniki Rzeszowskiej, których celem było sprawdzenie, w jakim stopniu mechaniczne zakotwienie końców taśm wpływa na zwiększenie nośności granicznej wzmocnionej belki żelbetowej. Do badań wykorzystano zakotwienia mechaniczne systemu Neoxe Prestressing System II (NPS II), który został opracowany przez ZDIM Politechniki Rzeszowskiej we współpracy z AGH Kraków i krakowską spółką Tines Composites [1, 8]. Przeprowadzone badania statyczne zakotwień wykazały, że nowy system może zapewnić powtarzalną efektywność wykorzystania taśm CFRP do około 60% ich wytrzymałości na rozciąganie. Uzupełniające badania zmęczeniowe zakotwień potwierdziły jednocześnie ich wymaganą trwałość [9].

Opis badań

W ramach badań przeanalizowano zachowanie się trzech belek żelbetowych wzmocnionych taśmami CFRP poddanych obciążeniu statycznemu. W celu uwzględnienia efektu skali wykorzystano belki o wymiarach zbliżonych do wymiarów prefabrykowanych belek mostowych. Belki o prostokątnym przekroju poprzecznym $0,50 \times 0,42$ m i długości około 6,0 m zostały wykonane z betonu klasy C45/55. Zbrojenie górne i dolne belek stanowiły trzy pręty $\phi 25$ mm ze stali B500SP (rys. 1).

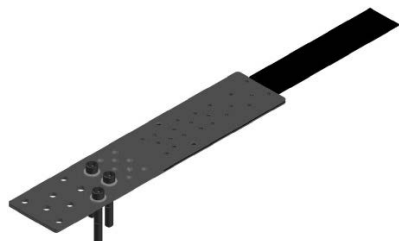
Pierwszą z badanych belek – B1 pozostawiono bez wzmocnienia jako referencyjną. Kolejna belka – B2 została wzmocniona dwiema taśmami CFRP o przekroju poprzecznym $60 \times 1,4$ mm, przyklejonymi biernie do rozciąganej powierzchni belki. Trzecią belkę – B3 wzmocniono takimi samymi taśmami, które dodatkowo na końcach zostały przymocowane do konstrukcji przy użyciu zakotwień mechanicznych systemu NPS II. Do wzmocnienia belek wykorzystano taśmę NEOXEPLATE UHS614 o zweryfikowanej w badaniach wytrzymałości na rozciąganie wynoszącej 3200 MPa, module sprężystości podłużnej 160 GPa i zakresie liniowych odkształceń sprężystych 2%.



Rys. 1. Zbrojenie belki

Zakotwienia zastosowane w belce B3 były złożone z trzech blach stalowych, dwóch zewnętrznych i jednej wewnętrznej, tworzących kieszeń, w której taśma kompozytowa była mocowana za pomocą kleju i nitów (rys. 2). Zakotwienia taśm przytwierdzano do belki żelbetowej przy użyciu mechanicznych kotów do betonu o średnicy ϕ 16 mm.

Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym Wydziałowego Laboratorium Badań Konstrukcji Politechniki Rzeszowskiej (rys. 3). Rozpiętość belek w osiach podparcia wynosiła 5,6 m. Obciążenie wywierano za pomocą siłownika hydraulicznego Instron Schenck o maksymalnej sile nacisku 630 kN. Schemat czteropunktowego zginania uzyskano przez



Rys. 2. Schemat zakotwienia taśm

rozłożenie obciążenia z siłownika za pomocą belki trawersowej (rys. 4). Obciążenie belek realizowano w kilku etapach. Po wykonaniu etapu próbnego wymuszano siłę wywołującą w belkach momenty zginające o wartości kolejno 100, 150, 200, 225 i 250 kN·m. W przypadku belek B2 i B3 wykonano dwa dodatkowe etapy obciążenia do 275 i 300 kN·m.

W czasie badań prowadzono ciągły pomiar przykładanej siły, przemieszczeń i odkształceń, a także kontrolowano osiadanie podparć (por. rys. 4). Przemieszczenia mierzono w 7 punktach czujnikami indukcyjnymi WA-20 i WA-100, a odkształcenia – w strefie stałego momentu zginającego na górnych i dolnych powierzchniach betonu, na prętach zbrojeniowych oraz taśmach kompozytowych (rys. 5). Do pomiaru odkształceń w betonie zastosowano tensometry RL-50/500, a odkształceń stali i kompozytu CFRP – tensometry TFs-10/120. Łącznie mierzono odkształcenia w 18, 36 i 32 punktach, odpowiednio w przypadku belek B1, B2 i B3. W kolejnych etapach obciążenia prowadzono także inwentaryzację rys na bocznych powierzchniach belek i szczegółowo identyfikowano postać zniszczenia belek.

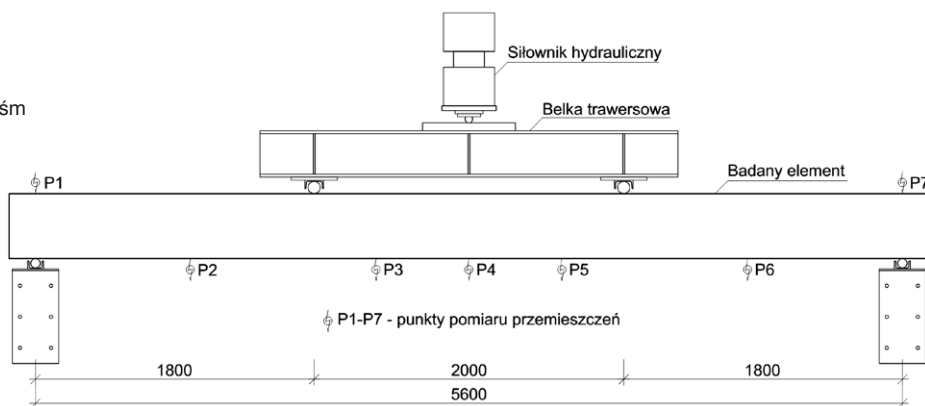
Wyniki badań

Wyniki badań belek zestawiono w tablicy. Do przypadku każdej belki podano wartości: momentu rysującego, momentu uplastycznienia stali zbrojeniowej, nośności granicznej oraz efektywności wzmocnienia, określonej jako stosunek przyrostu nośności granicznej w belce wzmocnionej taśmą B2 lub B3 (w odniesieniu do belki referencyjnej B1) do nośności granicznej belki referencyjnej B1. Dodatkowo podano maksymalne odkształcenia taśm kompozytowych w chwili zniszczenia oraz stopień wykorzystania kompozytu CFRP, czyli stosunek maksymalnych naprężeń uzyskanych w taśmie do wytrzymałości kompozytu CFRP na rozciąganie. W ostatniej kolumnie tablicy opisano postać zniszczenia belek.

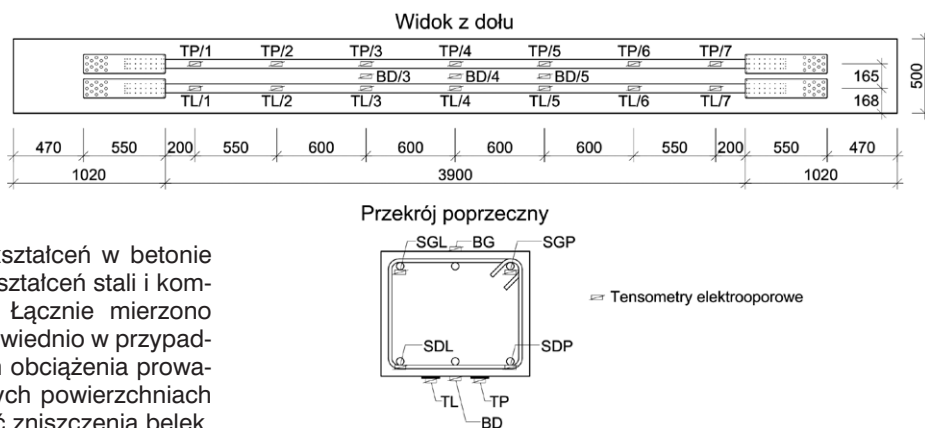
Na rysunku 6 przedstawiono wykres zależności przemieszczenia (ugięcia) od obciążenia belek. Widoczne odchylenie krzywych $M - \delta$ belek wzmocnionych od krzywej dotyczącej



Rys. 3. Widok belki referencyjnej na stanowisku badawczym. Fot. B. Piątek



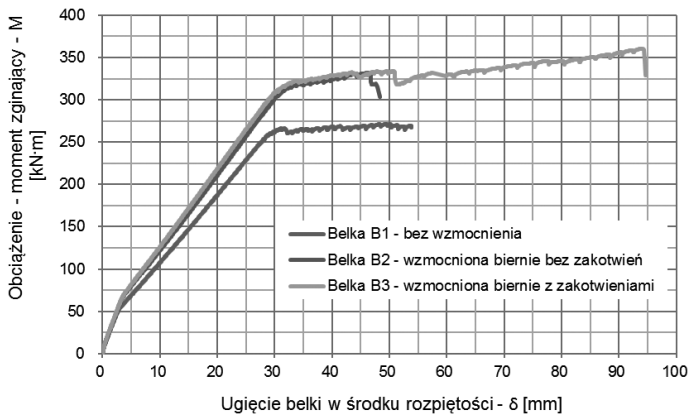
Rys. 4. Schemat obciążenia belek



Rys. 5. Usytuowanie punktów do pomiaru odkształceń w belce B3

Wyniki badań belek

Oznaczenie belki	Moment rysujący kN·m	Moment uplastyczniający kN·m	Nośność graniczna kN·m	Efektywność wzmocnienia %	Maksymalne odkształcenie taśm ‰	Stopień wykorzystania taśm %	Postać zniszczenia
B1	55	266	272	–	–	–	uplastycznienie zbrojenia
B2	70	318	332	22	5,9	30	odspojenie taśm
B3	72	321	361	33	7,8	39	odspojenie taśm, wysunięcie z zakotwień

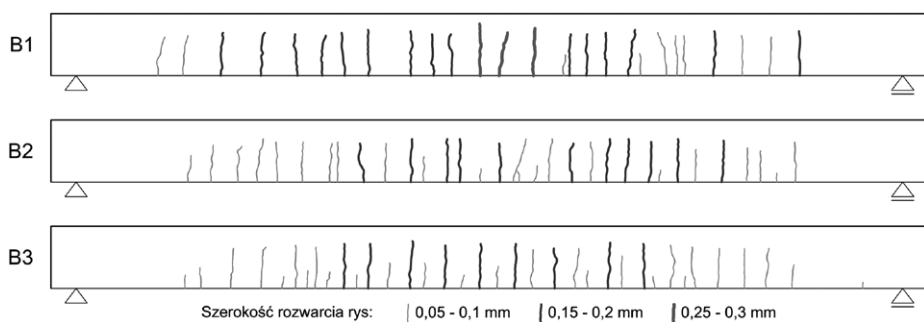


Rys. 6. Wykres zależności ugięcia od obciążenia

belki referencyjnej świadczy o niewielkim zwiększeniu sztywności na skutek wzmocnienia. Zwiększenie sztywności belek wzmocnionych przekłada się na zmniejszenie ich ugięcia. W przypadku obciążenia 200 kN·m redukcja ta wynosiła około 15% w stosunku do belki referencyjnej. Krzywe zależności przemieszczenia od obciążenia belek B2 i B3 przebiegają prawie identycznie do momentu odspojenia taśmy (debonding). Do tego momentu zastosowanie zakotwień nie wpływa na pracę belek. Wpływ zakotwień jest widoczny dopiero w fazie pracy belki następującej po odspojeniu taśmy kompozytowej od powierzchni betonu.

Zwiększenie sztywności jest także widoczne w ograniczeniu zarysowania wzmocnionych belek. Wzmocnienie taśmami CFRP spowodowało zwiększenie momentu rysującego z 55 kN·m w belce B1 do około 70 kN·m w przypadku belek B2 i B3. Na rysunku 7 przedstawiono obrazy zarysowania bocznej powierzchni trzech badanych belek. W belkach wzmocnionych taśmami CFRP zaobserwowano większą liczbę rys o mniejszej szerokości rozwarcia w porównaniu z belką niewzmocnioną. Poza tym sumaryczna szerokość rozwarcia rys na jednej powierzchni belki była mniejsza w przypadku belek wzmocnionych taśmami. Przykładowo pod obciążeniem momentem zginającym równym 200 kN·m nastąpiło zmniejszenie rozwarcia z 4,25 mm w przypadku belki B1 do 3,35 mm w przypadku belek wzmocnionych, czyli o ponad 20%. Przy tym obciążeniu w belce referencyjnej powstały rysy o szerokości rozwarcia 0,3 mm, a w belkach wzmocnionych – do 0,2 mm. Rozwój zarysowania w belkach wzmocnionych był podobny, a zatem zakotwienie taśm nie poprawiło rysoodporności elementów.

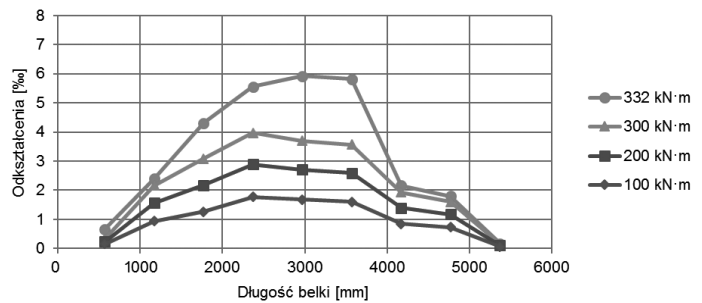
Wyniki pomiarów tensometrycznych wskazują na podobne odkształcenia w strefie ściskanej betonu wszystkich belek w kolejnych etapach obciążenia, natomiast różne były wartości tych odkształceń w chwili zniszczenia belek. Uplastycznienie zbrojenia niszczące belkę referencyjną B1 nastąpiło przy odkształceniach betonu wynoszących około 0,8‰, odspojenie taśmy w belce B2 – przy odkształceniach 1,1‰, a zniszczenie belki B3 – przy odkształceniach 2,3‰.



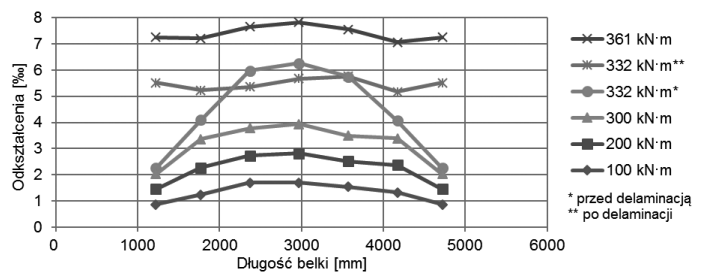
Rys. 7. Obrazy zarysowania belek przy obciążeniu 200 kN·m

Wzmocnienie belek taśmami wpłynęło na zmniejszenie odkształceń w prętach zbrojeniowych. Jest to spowodowane włączeniem taśm do współpracy ze zbrojeniem przy przeniesieniu sił rozciągających w przekroju. Ponadto w belkach wzmocnionych zaobserwowano zwiększenie momentu uplastyczniającego w stosunku do belki referencyjnej o około 20%.

Rozkład odkształceń na długości taśm kompozytowych w belkach B2 i B3 przedstawiono na rys. 8 i 9. Odspojenie taśm w obu belkach następowało przy odkształceniach kompozytu wynoszących około 6‰, a maksymalne odkształcenia przy zniszczeniu belki B3 nie przekraczały 8‰. Dzięki zastosowaniu zakotwień stopień wykorzystania materiału kompozytowego zwiększył się z 30% w belce B2 do prawie 40% w belce B3.



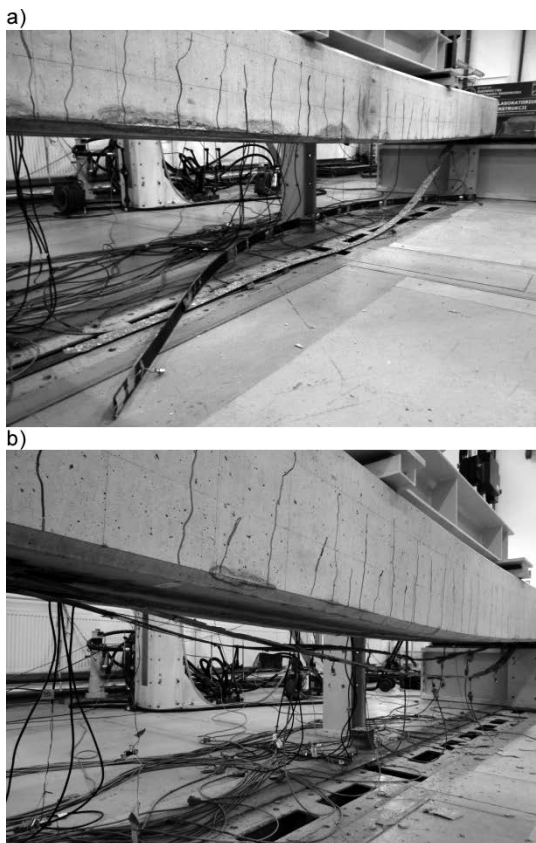
Rys. 8. Rozkład odkształceń na długości taśm w belce B2



Rys. 9. Rozkład odkształceń na długości taśm w belce B3

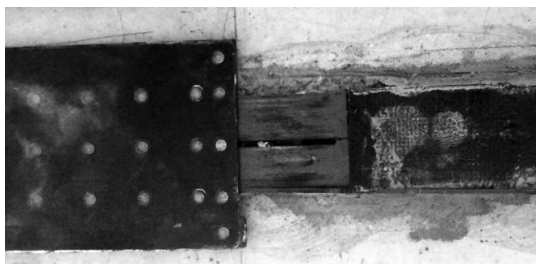
Wzmocnienie belek taśmami miało znaczący wpływ na ich nośność graniczną, określoną jako maksymalna wartość momentu zginającego uzyskana w trakcie badań. Belka referencyjna uległa zniszczeniu przy obciążeniu 272 kN·m wskutek uplastycznienia zbrojenia stalowego. Nośność graniczna wzmocnionych belek jest związana ze zniszczeniem wzmocnienia na skutek odspojenia taśm. W obu wzmocnionych belkach odspojenie taśm nastąpiło przy obciążeniu 332 kN·m. W przypadku belki B2 jest to wartość nośności granicznej. Obecność zakotwień w belce B3 spowodowała zwiększenie nośności granicznej i przedłużenie pracy belki o kolejną fazę, którą można określić jako poawaryjną. W tej fazie zakotwiona taśma pracowała jako ściąg, uczestnicząc nadal w przeniesieniu obciążeń. Siła ze ściągów była przekazywana na belki tylko w miejscach zakotwień. Dzięki zakotwieniom nośność belki B3 została zwiększona do 361 kN·m, czyli o około 9% w stosunku do belki bez zakotwień B2. Efektywność wzmocnienia belek B2 i B3 w stosunku do belki referencyjnej wyniosła odpowiednio 22 i 33%.

Zastosowanie wzmocnienia i zakotwień taśm wpływa na postać zniszczenia belek (rys. 10). Belka referencyjna uległa zniszczeniu wskutek nadmiernego ugięcia spowodowanego uplastycznieniem zbrojenia stalowego. Belka B2 uległa zniszczeniu przez odspojenie taśm, zapoczątkowane w strefie działa-



Rys. 10. Postacie zniszczenia belek: a) B2, b) B3. Fot. B. Piątek

nia momentu zginającego i siły poprzecznej, postępujące w kierunku ich końców (por. rys. 10a), a belka B3 – na skutek wysunięcia uprzednio odspojonych, podobnie jak w przypadku belki B2, taśm z kotwiących blach stalowych (rys. 11).



Rys. 11. Wysunięcie taśmy z zakotwienia. Fot. B. Piątek

Dzięki wzmocnieniu taśmami CFRP nastąpiło zwiększenie momentu rysującego i momentu uplastycznienia stali zbrojeniowej w belkach. Wzmocnione belki wykazały także większą nośność graniczną oraz niewielkie zwiększenie sztywności, tj. zmniejszenie ugięcia i zarysowania.

Zastosowanie zakotwień nie miało większego wpływu na pracę statyczną belki do momentu odspojenia taśm, natomiast po odspojeniu zakotwienie pozwoliło na wydłużenie pracy belki o kolejną fazę oraz umożliwiło zwiększenie jej nośności granicznej.

Podsumowanie

Wzmocnienie belek żelbetowych taśmami CFRP spowodowało niewielkie zwiększenie ich sztywności, które można było zaobserwować jako zmniejszenie ugięć i zarysowań. Dzięki zastosowaniu taśmy na powierzchni rozciąganej belek uzyskano korzystniejszą morfologię zarysowania, tj. większą liczbę rys o mniejszej szerokości ich rozwarcia. Jednocześnie dodatkowe zbrojenie CFRP pozwoliło na przedłużenie fazy pracy belki

zarysowanej dzięki zwiększeniu momentu uplastyczniającego o około 20%. Najważniejszym efektem wzmocnienia belek jest zwiększenie nośności granicznej w przypadku belki B2 o 22% i belki B3 o 33%.

Zastosowanie zakotwień mechanicznych na końcach taśm wpłynęło na wydłużenie pracy belki o dodatkową fazę poawaryjną od momentu odspojenia taśm od podłoża do momentu zniszczenia zakotwień, zwiększenie nośności granicznej o 9% w stosunku do belki wzmocnionej biernie bez zakotwień, zwiększenie stopnia wykorzystania taśm i zmianę postaci zniszczenia wzmocnienia belki.

Uzyskana w belce B3 postać zniszczenia charakteryzuje się większą quasi-plastycznością, a zniszczenie jest sygnalizowane przez uprzednie odspojenie taśm kompozytowych. Występowanie poawaryjnej fazy pracy belki pozwala na odpowiednio wczesną identyfikację zagrożenia i przeciwdziałanie awarii. W przypadku braku zakotwień występuje nagłe niesygnalizowane zniszczenie belki.

W przeprowadzonych badaniach potwierdzono wnioski z wcześniejszych prac badawczych, a w szczególności fakt, że stopień wykorzystania taśm przy wzmocnieniu belki B2 bez zakotwień nie przekroczył 30%. Dzięki zakotwieniu taśm na końcach osiągnięto 40-procentowe wykorzystanie kompozytu. Jak wynika z innych prac badawczych dalsze zwiększenie wykorzystania materiału kompozytowego jest możliwe przez wstępne naprężanie taśm CFRP wraz z ich jednoczesnym kotwieniem [1, 6, 7].

* * *

Badania zrealizowano w ramach projektu nr POIG.01.03.01-18-010/12 pt. „Innowacyjny system wzmocnienia konstrukcji budowlanych naprężonymi taśmami z kompozytów węglowych”. Projekt był współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (PO IG).

PIŚMIENNICTWO

- [1] Siwowski T., Michałowski J., Błażewicz S.: Nowy system sprężania taśm kompozytowych CFRP do wzmocnienia konstrukcji żelbetowych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 3/2010.
- [2] Kotynia R.: Wpływ ukształtowania zewnętrznego zbrojenia kompozytowego CFRP na efektywność wzmocnienia belek żelbetowych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1/2005.
- [3] Łągoda M.: Wzmocnienie mostów przez doklejanie elementów. Monografia 322. Seria: Inżynieria Lądowa. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2005.
- [4] Meier U., Kotynia R.: Wzmocnienie konstrukcji żelbetowych materiałami kompozytowymi FRP. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 11/2006.
- [5] You Y.C., Choi K.S., Kim J.H.: An experimental investigation on flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP strips using a durable anchorage system. Composites: Part B, No. 43/2012.
- [6] Kotynia R.: Przyczepnościowe metody wzmocnienia konstrukcji żelbetowych przy użyciu naprężonych kompozytów polimerowych. „Przegląd Budowlany”, nr 7-8/2015.
- [7] Kałuża M., Ajdukiewicz A.: Comparison of behaviour of concrete beams with passive and active strengthening by means of CFRP strips. „Architecture Civil Engineering Environment – ACEE”, No. 2/2008.
- [8] Paśko P., Piątek B., Siwowski T.: Badania zakotwień w systemie wzmocniania konstrukcji sprężonymi taśmami CFRP. „Budownictwo i Architektura”, nr 13(3)/2014.
- [9] Piątek B., Siwowski T.: Badania statyczne i zmęczeniowe zakotwień sprężonych taśm CFRP do wzmocnienia konstrukcji budowlanych. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 1/2016.