

## **Badania doświadczalne kablobetonowych dźwigarów wzmocnionych materiałami kompozytowymi CFRP**

**Michał Staśkiewicz<sup>1</sup>, Renata Kotynia<sup>2</sup>,  
Julien Michels<sup>3</sup>, Christoph Czaderski<sup>4</sup>, Masoud Motavalli<sup>5</sup>**

<sup>1,2</sup> *Katedra Budownictwa Betonowego, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, e-mail: <sup>1</sup>michal.staskiewicz@p.lodz.pl, <sup>2</sup>renata.kotynia@p.lodz.pl*

<sup>3,4,5</sup> *EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, e-mail: <sup>3</sup>julien.michels@empa.ch, <sup>4</sup>christoph.czaderski@empa.ch, <sup>5</sup>masoud.motavalli@empa.ch*

**Streszczenie:** Tematem pracy jest program badań doświadczalnych przeprowadzonych w ramach Polsko-Szwajcarskiego Programu Badawczego „TULCOEMPA” realizowanego przez Politechnikę Łódzką we współpracy ze szwajcarskim instytutem EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology. Głównym celem projektu jest wzmocnienie istniejących belek mostowych przy użyciu naprężonych taśm kompozytowych CFRP z zastosowaniem innowacyjnej metody bezkotwowej aplikacji „gradientowej”. Badania doświadczalne przeprowadzone na replikach dźwigarów mostowych o długości 18,4m, wykonanych w rzeczywistej skali, potwierdziły skuteczność zaproponowanego wzmocnienia. Przyrost nośności kablobetonowego dźwigara po wzmocnieniu wyniósł 24% w porównaniu z elementem referencyjnym, osiągając przy tym o ponad 60% mniejsze ugięcia.

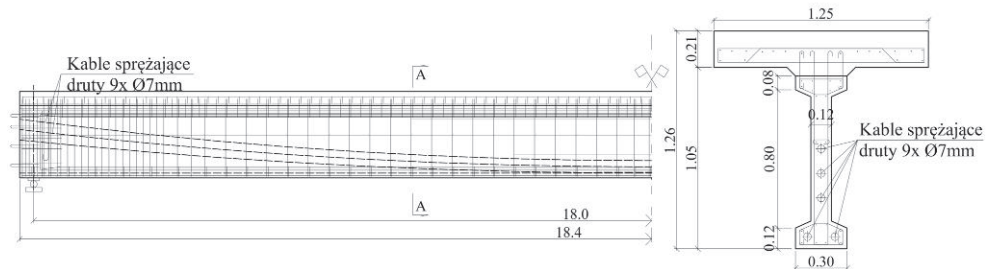
**Słowa kluczowe:** wzmocnienie, kablobetonowy dźwigar mostowy, zginanie, sprzężenie, taśmy kompozytowe CFRP

### **1. Wprowadzenie**

Wzmacnianie konstrukcji żelbetonowych przy użyciu materiałów kompozytowych z włóknami węglowymi (*carbon fibre reinforced polymer* – CFRP) jest w ostatnich latach jedną z najprężniej rozwijających się technik stosowanych w rekonstrukcjach obiektów budowlanych. Liczne badania naukowe, a także praktyczne realizacje wzmocnień z zastosowaniem kompozytów polimerowych potwierdziły wysoką skuteczność tego typu rozwiązań w podnoszeniu nośności na zginanie oraz poprawie warunków użytkowania wzmocnionych konstrukcji. Biernie aplikacje kompozytów są jednocześnie mało inwazyjne i stosunkowo łatwe w wykonaniu, nie wymagają dużych nakładów oraz wyłączenia wzmacnianego obiektu z użytkowania na długi czas. W wypadku zastosowania naprężonych taśm lub mat, powstaje konieczność montowania stalowych elementów kotwiących, które naruszają powierzchnię betonu i mogą być przyczyną powstawania korozji galwanicznej na styku z materiałem kompozytowym. Opracowanie nowatorskiej, gradientowej metody wzmocnień przez U. Meiera i I. Stoecklina [1, 2] w szwajcarskim instytucie EMPA było pierwszą próbą zmierzenia się z tym problemem. Dalszy rozwój tej technologii [3] zaowocował stworzeniem samodzielnego systemu wzmacniania przy użyciu metody „gradientowej”, gotowego do zastosowań praktycznych na dowolnych obiektach budowlanych.

Polsko-Szwajcarski Projekt Badawczy TULCOEMPA, realizowany na Wydziale Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej we współpracy ze

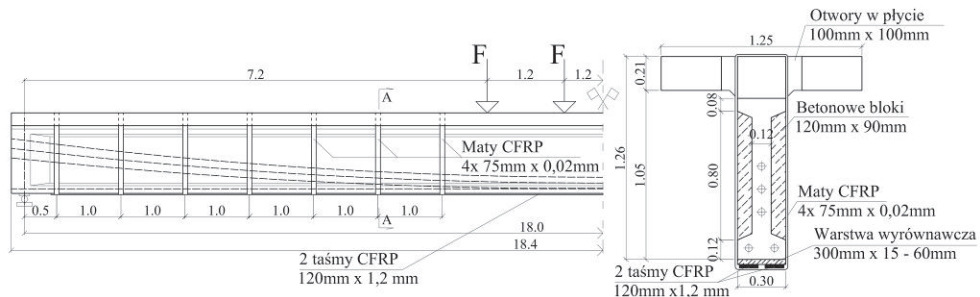
szwajcarskim instytutem badawczym EMPA, ma na celu przeprowadzenie pierwszej aplikacji wzmocnienia metodą „gradientową” na istniejącym obiekcie mostowym, a także zdalny monitoring konstrukcji mostu w celu długoterminowej oceny rezultatów takiego wzmocnienia. Obiekt wytypowany do rozbudowy znajduje się w miejscowości Szczercowska Wieś w powiecie bełchatowskim. Konstrukcja mostu wzniesiona w latach 60-tych obejmuje pięć kablobetonowych dźwigarów typu WBS o całkowitej długości 18,4m i wysokości 1,0m. Dźwigary o rozpiętości w osiach podpór 18,0m usytuowane są na żelbetowych, masywnych przyczółkach. W celu podwyższenia klasy obiektu mostowego z „C” do „B”, dźwigary wymagają wzmocnienia zarówno na zginanie, jak i na ścinanie. Pierwsze z nich polegać będzie na przyklejeniu dwóch naprężonych laminatów CFRP na dolnej powierzchni każdego dźwigara, przy użyciu bezkotrwej metody „gradientowej”. Dodatkowo, ze względu na niedobór nośności na ścinanie, na każdym dźwigarze wykonane zostaną oploty z mat CFRP pełniące funkcję zamkniętych, zewnętrznych strzemion zakotwionych w płycie mostu. Wykonanie wzmocnienia poprzedzone zostało serią laboratoryjnych badań weryfikujących jego skuteczność.



Rys. 1. Zbrojenie dźwigarów

## 2. Elementy badawcze

Na podstawie archiwalnej dokumentacji mostu, w laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej przygotowano elementy zbrojenia dźwigarów, które wraz z segmentami drewnianych szalunków przetransportowano do laboratorium szwajcarskiego instytutu EMPA w Zurychu. Na miejscu zrekonstruowano dwa dźwigary mostowe w skali 1:1, będące dokładnym odwzorowaniem dźwigarów istniejącego mostu.



Rys. 2. Schemat wzmocnienia i badania dźwigara laboratoryjnego

W pierwszym etapie produkcji złożono szkielety zbrojenia obu dźwigarów w oparciu o oryginalne rysunki wykonawcze. Do budowy każdego szkieletu wykorzystano blisko 500kg stali gatunków S235 oraz BSt500s, z których wykonano zbrojenie podłużne i poprzeczne. Kable sprężające, wykonane na specjalne zamówienie przez firmę Stahlton

AG, składały się z wiązki 9 drutów o średnicy 7mm i wyposażone były w głowice kotwiące w postaci prostopadłościennych bloków stalowych, wzorowanych na oryginalnych dźwigarach. Do betonowania obu dźwigarów zastosowano samozagęszczalny beton klasy C35/45. Wymiary dźwigarów przedstawiono na rysunku 1. Po 28 dniach od betonowania dźwigary zostały sprężone. Każdy z 5 kabli w obu dźwigarach został naprężony siłą 363kN. W drugim etapie produkcji wykonano szalunki oraz zbrojenia płyt pomostów. Płyta o szerokości 1,25m i grubości 0,21m zespolona z dźwigarem reprezentowała współpracującą z dźwigarem mostowymi część pomostu w istniejącym obiekcie. Do betonowania płyt wykorzystano beton zwykły klasy C 30/37.



Rys. 3. Widok dźwigara podczas reprofilacji (lewa) i po wklejeniu bloków wypełniających (prawa)

Pierwszy dźwigar służył jako element referencyjny, natomiast drugi był poddany złożonemu procesowi przygotowania powierzchni betonu, a następnie został wzmocniony. W pierwszej kolejności dźwigar wymagał wykonania reprofilacji dolnej powierzchni. Ujemna strzałka ugięcia wynikająca ze sprężenia kablobetonu osiągała ponad 50mm w środku rozpiętości. Powierzchnię betonu poddano hydromonitoringowi. Działanie strumienia wody pod ciśnieniem 2500 bar pozwoliło usunąć zewnętrzną warstwę betonu, odstąpić ziarna kruszywa i uzyskać powierzchnię o bardzo dobrej przyczepności. Następnie na tak przygotowane podłoże naniesiono warstwę zaprawy wyrównawczej typu PCC AP UVM 8 z wykorzystaniem techniki torkretowania na sucho. Grubość naniesionej warstwy wahała się od 15mm w strefie przypodporowej dźwigara do 60mm w środku rozpiętości (Rys. 3). Po osiągnięciu przez zaprawę pełnej wytrzymałości (28 dni), oszlifowano i oczyszczono jej powierzchnię.

Tabela 1. Charakterystyki wytrzymałościowe użytych materiałów ( $f_{c,cube}$ , E – w dniu badania dźwigarów)

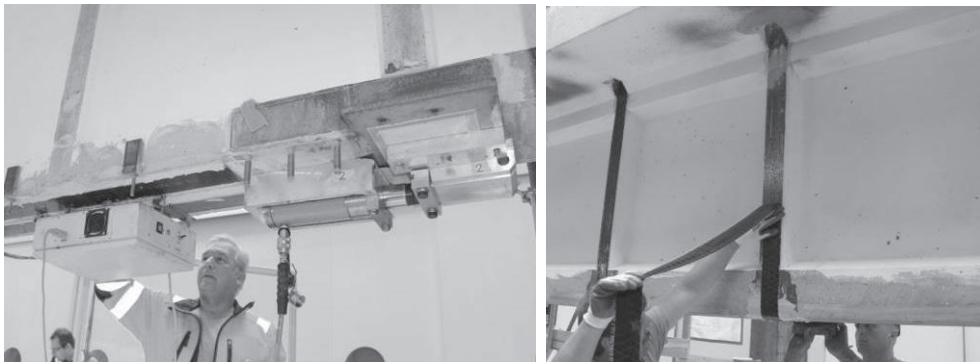
| Materiał                                 | $f_{c,cube}$ (MPa) |       | $f_{yk}$ (MPa) | $f_u$ (MPa) | E (GPa) |       | $\epsilon_u$ (‰) |
|--|--------------------|-------|----------------|-------------|---------|-------|------------------|
|  | Dźwigar            | Płyta |                |             | Dźwigar | Płyta |                  |
| Beton                                    | Dźwigar 1          | 64,6  | 50,3           |             | 34,7    | 32,1  |                  |
|  | Dźwigar 2          | 66,9  | 53,5           |             | 33,5    | 34,0  |                  |
| Stal zbrojeniowa (pręty podłużne)        |                    |       | 387            | 485         | 227     |       |                  |
| Stal sprężająca*                         |                    |       | 1440           | 1670        | 205     |       | 35               |
| Taśmy CFK 150/200 1,2x100mm              |                    |       |                | 2795        | 160     |       | 16               |
| Maty C-Sheet 240 / 400g/m <sup>2</sup> * |                    |       |                | 4300        | 240     |       | 17               |

\*wartości wg danych producenta

W ostatnim etapie do środka wzmocnianego dźwigara po obu stronach przyklejono betonowe bloki wypełniające w kształcie trapezu o szerokości 120mm i grubości 80mm, w rozstawie 1000mm. Elementy pełniące funkcję wypełnienia przekroju na potrzeby wzmocnienia na ścinanie przyklejono przy użyciu epoksydowego kleju S&P Epoxy Resin 220. W miejscu występowania planowanych oplotów z mat CFRP wycięto otwory w płycie pomostu w celu przeprowadzenia przez nie mat kotwionych na zakład na górnej powierzchni płyty (Rys. 2). W tych samych miejscach wykrąglono krawędzie betonu w celu uniknięcia zerwania mat na narożnikach przekroju. W kolejnym etapie dźwigar wzmocniono na zginanie a następnie na ścinanie. Charakterystyki wytrzymałościowe użytych materiałów przedstawiono w Tabeli 1.

### 3. Wzmocnienie

Wzmocnienie kablobetonowego dźwigara na zginanie wykonano przy użyciu naprężonych taśm kompozytowych przyklejonych na dolnej powierzchni dźwigara ze stopniową redukcją siły sprężającej na odcinku zakotwienia taśmy. Główną zaletą tej metody jest rezygnacja z klasycznych, stalowych elementów kotwiących końce naprężonego kompozytu. Stopniową redukcję siły sprężającej osiąga się przez naprzemienne zmniejszanie siły naciągu i przyspieszone wiązanie kleju na kolejnych odcinkach pod wpływem podwyższonej temperatury. Pozwala to zredukować siłę naciągu w taśmie do zera na jej końcach, utrzymując jednocześnie pełne naprężenie w środkowej części kompozytu. Metoda ta pozwala uniknąć koncentracji naprężeń na końcach kompozytu i ryzyka nagłego ich odspojenia. Do wykonania wzmocnienia wykorzystuje się standardowe oprzyrządowanie sprężające S&P Clever Reinforcement oraz specjalne urządzenie grzewcze. Szczegółowy opis metody gradientowej przedstawiony jest w publikacji J. Michelsa [3].



Rys. 4. Wzmocnienie dźwigara na zginanie (lewa) oraz na ścinanie (prawa) przy użyciu kompozytów

Obecność kabli sprężających w dolnej półce dźwigara wykluczyła możliwość zastosowania standardowych kotew służących do zamontowania urządzeń sprężająco-kotwiących. Z tego powodu urządzenia montowano do spodu dźwigara z wykorzystaniem stalowych obejm przyklejonych do powierzchni betonu (Rys. 4). Po zamontowaniu oprzyrządowania dźwigar został wzmocniony na zginanie przy użyciu dwóch taśm kompozytowych S&P CFK 150/2000 o wymiarach przekroju 100 x 1,2mm, naprężonych wstępnie do poziomu odkształceń wynoszącego  $\varepsilon_{fp} = 5,8\%$ . Do przyklejenia kompozytu wykorzystano klej S&P Epoxy Resin 220. Aplikacja dwóch taśm kompozytowych wraz z wykonaniem zakotwienia zajęła około 6 godzin, a bezpośrednio po wzmocnieniu wszystkie urządzenia zostały zdemontowane.

Wzmocnienie dźwigara na ścinanie stanowiły zamknięte oploty, które wykonano z kompozytowej maty S&P C-Sheet 240/400. Cztery warstwy maty o szerokości 75mm zostały naklejone w rozstawie 1,0m przy użyciu kleju S&P Epoxy Resin 55 łącznie w 14 miejscach. Oploty łączono na zakład o długości 300mm na górnej powierzchni płyty.

#### 4. Przebieg badań i rezultaty

Badanie niszczące dźwigarów przeprowadzono w laboratorium EMPA. Obciążenie w postaci czterech sił skupionych przekazywane było na element przy użyciu 4 siłowników hydraulicznych usytuowanych symetrycznie w środku rozpiętości dźwigara w rozstawie 1,20m. Tempo przykładania obciążenia kontrolowano przyrostem przemieszczenia siłowników (3,5mm / min). Podczas badania rejestrowano następujące pomiary: odkształcenia betonu na poziomie zbrojenia rozciąganego, na górnej powierzchni płyty oraz na środku dźwigara w strefie przypodporowej, odkształcenia taśm CFRP oraz ugięcia dźwigara. Wielkość obciążenia rejestrowano przy użyciu 2 siłomierzy na siłownikach hydraulicznych. Dodatkowo podczas badań wzmocnionego elementu wykonywano pomiary odkształceń betonu w strefie ścinania, pomiędzy kompozytowymi oplotami, przy użyciu trójwymiarowego systemu cyfrowej korelacji obrazu ARAMIS.

Procedura badania elementu referencyjnego przewidywała wstępne obciążenie dźwigara przed przystąpieniem do właściwego badania niszczącego. W fazie próbnej dźwigar został obciążony siłami 4x100kN. Na poziomie obciążenia 4x95kN zaobserwowano typowe dla zginania zarysowanie środkowej strefy dźwigara. Po odciążeniu ponownie obciążano element aż do zniszczenia. Pod obciążeniem rzędu 1x180kN zaobserwowano spadek sztywności dźwigara. Analiza numeryczna odkształceń w przekroju badanego elementu potwierdziła, że przyczyną było następujące po sobie uplastycznienie zbrojenia pasywnego oraz sprężającego. Badanie zakończono przy obciążeniu równym 4x193kN, kiedy siłowniki hydrauliczne osiągnęły maksymalne wydłużenie i dalsze przykładanie obciążenia nie było możliwe. Maksymalne ugięcie dźwigara zarejestrowane w środku rozpiętości wyniosło 260mm przy odkształceniach betonu w ściskanej strefie przekroju równych 2,3‰ oraz odkształceniach na poziomie zbrojenia rozciąganego równych 8,7‰. Zaobserwowano intensywne zarysowanie w środkowej części dźwigara na długości 8,0m. Pionowe rysy od zginania w dolnej części dźwigara rozgałęziały się na szereg mniejszych, nachylonych do pionowej osi elementu. W górnej części przekroju rysy rozwijały się na spodniej powierzchni płyty pomostu. W strefie przypodporowej zarejestrowano niewielkie odkształcenia betonu, nie przekraczające 1,5‰, przy stosunkowo małym zarysowaniu.



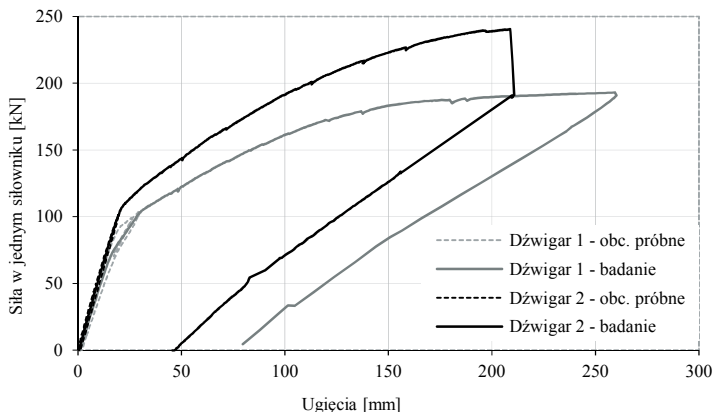
Rys. 5. Widok dźwigara referencyjnego (lewa) oraz wzmocnionego (prawa) po zniszczeniu



Badanie wzmocnionego dźwigara przeprowadzono według takiej samej procedury jak niewzmocnionego. Nie zaobserwowano zarysowania dźwigara podczas obciążania w fazie wstępnej. Dopiero w trakcie właściwego badania zarysowanie pojawiło się pod obciążeniem równym  $4x110kN$ . Uplastycznienie zbrojenia pasywnego oraz sprężającego, sygnalizowane podobnie jak w przypadku dźwigara niewzmocnionego utratą sztywności dźwigara zaobserwowano przy obciążeniu równym  $4x210kN$ . Zniszczenie wzmocnionego elementu na skutek zerwania taśm CFRP w środkowej części dźwigara nastąpiło pod obciążeniem  $4x240kN$ . Proces ten był rozłożony w czasie i polegał na stopniowym zrywaniu pojedynczych włókien taśm aż do całkowitego zerwania ich przekroju poprzecznego (Rys. 5). Towarzyszyły temu efekty dźwiękowe związane ze zrywaniem kolejnych fragmentów laminatów. Maksymalne odkształcenie taśm CFRP na chwilę przed zniszczeniem osiągnęło wartość 10‰ (co po uwzględnieniu naprężenia wstępnego daje 15,8‰). Nie zaobserwowano uszkodzenia mat CFRP. Maksymalne ugięcia dźwigara wyniosły 210mm, natomiast odkształcenia betonu w strefie ściskanej nie przekroczyły 1,5‰, co świadczy o zapasie nośności betonu. Zarysowanie dźwigara przebiegało podobnie jak w przypadku elementu niewzmocnionego, chociaż kąt nachylenia rys w przypodporowej strefie dźwigara zbliżył się do 45 stopni ze względu na obecność wzmocnienia na ścinanie. Wyniki badań obu dźwigarów przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki badań dźwigarów

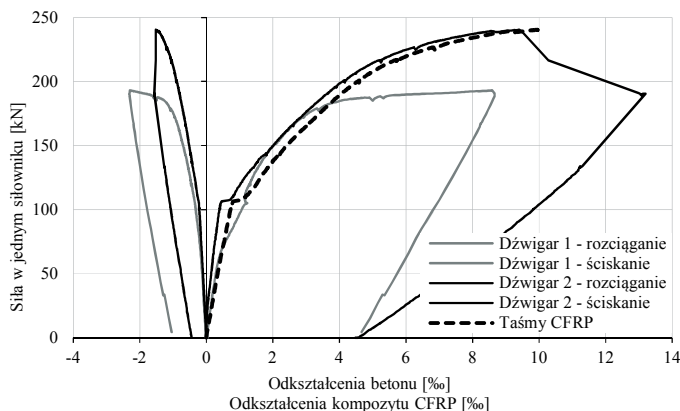
|   | Dźwigar 1 | Dźwigar 2 |
|---|-----------|-----------|
| Obciążenie niszczące, $F_u$ (kN)                          | 193       | 240       |
| Obciążenie rysujące, $F_{cr}$ (kN)                        | 95        | 110       |
| Maksymalne ugięcie, $u_{max}$ (mm)                        | 260       | 210       |
| Maksymalne odkształcenia betonu w strefie ściskanej (‰)   | 2,3       | 1,5       |
| Maksymalne odkształcenia betonu w strefie rozciąganej (‰) | 8,7       | 13,2      |
| Odształcenie wstępnie w naprężanych taśm CFRP (‰)         | -         | 5,8       |
| Przyrost odkształceń w kompozycie podczas badania (‰)     | -         | 10,0      |



Rys. 6. Porównanie zależności obciążenie-ugięcie badanych dźwigarów

Na rysunku 6 przedstawiono porównanie wykresów ugięć w środku rozpiętości obu dźwigarów w całym zakresie obciążeń. Widoczny jest wyraźny wzrost sztywności wzmocnionego dźwigara w porównaniu z elementem referencyjnym. Dźwigar wzmocniony wykazał o 24% większą nośność na zginanie niż dźwigar niewzmocniony. Wzmocnienie pozwoliło również znacząco zredukować ugięcia mierzone przy tych samych obciążeniach

oraz opóźniło zarysowanie dźwigara (Tab. 2). Przy obciążeniu odpowiadającym maksymalnemu ugięciu elementu referencyjnego, wzmocniony dźwigar wykazał o 61% mniejsze ugięcia. Natomiast obciążenie rysujące we wzmocnionym dźwigarze było o 16% niż w niewzmocnionym dźwigarze. Maksymalne odkształcenia betonu w strefie ściskanej zmniejszyły się po wzmocnieniu o 30%, podczas gdy odkształcenia na poziomie zbrojenia rozciąganego wzrosły aż o 55% (Rys. 7).



Rys. 7. Porównanie odkształceń betonu w obu dźwigarach oraz średnich odkształceń taśm CFRP

## 5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych oraz analizy wyników można wysnuć następujące wnioski:

- Wzmocnieni kablobetonowego dźwigara na zginanie przy użyciu naprzężonych taśm CFRP i zastosowaniu metody „gradientowej” przyniosło pomyślne rezultaty. Sprawdziła się również zastosowana technologia przygotowania powierzchni dźwigara (hydromonitoring i reprofilacja poprzez torkretowanie „na sucho”).
- Wzmocniony dźwigar wykazał o 24% większą nośność w porównaniu z dźwigarem referencyjnym.
- Mimo silnego sprzężenia dźwigara kablami o łącznej sile naciągu 1800kN, zastosowanie dwóch taśm CFRP naprzężonych wstępnie siłą 120kN pozwoliło ograniczyć ugięcia wzmocnionego dźwigara o ponad 61% i zwiększyć obciążenia odpowiadające jego zarysowaniu i uplastycznieniu zbrojenia rozciąganego o ponad 15%.
- Wzmocniony dźwigar uległ zniszczeniu na skutek jednoczesnego odspojenia i zerwania taśm CFRP. Odspojenie rozpoczynało się w sąsiedztwie rys pionowych o największej rozwarości. Po zerwaniu taśm ich dalsze odspojenie w kierunku obu podpór zostało powstrzymane obecnością poprzecznych oplotów z mat CFRP.

## Literatura

- 1 Stoecklin, I., Meier, U. Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips. Materiały konferencyjne FRPRCS-6, Singapore, 2003.
- 2 Kotynia, R., Walendziak, R., Stoecklin, I., Meier, U. RC Slabs strengthened with prestressed and gradually anchored CFRP strips under monotonic and cyclic loading. Journal of Composites for Construction 15 (2011) 168-180.
- 3 Michels, J., Sena-Cruz, J., Czaderski, C., Motavalli, M. Structural strengthening with prestressed CFRP strips with gradient anchorage. Journal of Composites for Construction 17(5) (2013) 651-661.

## Experimental tests of post-tensioned girders strengthened with prestressed CFRP composites

Michał Staškiewicz<sup>1</sup>, Renata Kotynia<sup>2</sup>,  
Julien Michels<sup>3</sup>, Christoph Czaderski<sup>4</sup>, Masoud Motavalli<sup>5</sup>

<sup>1,2</sup> Department of Concrete Structures, Faculty of Civil Engineering,  
Architecture and Environmental Engineering, Lodz University of Technology,  
e-mail: <sup>1</sup>michal.staskiewicz@p.lodz.pl, <sup>2</sup>renata.kotynia@p.lodz.pl

<sup>3,4,5</sup> EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology,  
e-mail: <sup>3</sup>julien.michels@empa.ch, <sup>4</sup>christoph.czaderski@empa.ch, <sup>5</sup>masoud.motavalli@empa.ch

**Abstract:** The paper presents a research carried out within the framework of the Polish-Swiss “Tulcoempa” project, carried out by Lodz University of Technology and EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology. The main goal of the project was to perform the first field application of an innovative, anchorless flexural strengthening with use of prestressed CFRP laminates on an existing bridge in Poland. Laboratory tests were conducted to verify the efficiency of the strengthening of two real-scale, 18.4m long, post-tensioned bridge girders reconstructed at EMPA institute. Flexural strengthening was successful and resulted in an increase of the member’s load capacity by 24% and reduction of the midspan deflection by more than 60%.

**Keywords:** strengthening, flexure, bridge girder, post-tensioning, prestressing, CFRP, laminate