

# Analiza nośności dźwigarów mostowych przed i po wzmocnieniu przy użyciu naprężonych taśm CFRP z zastosowaniem metody gradientowej

prof. dr hab. inż. Renata Kotynia, dr inż. Michał Staśkiewicz, Katedra Budownictwa Betonowego, Politechnika Łódzka

## 1. Wprowadzenie

Badania doświadczalne przedstawione w tym artykule wykonano w ramach polsko-szwajcarskiego projektu „Innovative Structural Health Monitoring in Civil Engineering Infrastructure Sustainability”, akronim TULCOEMPA, realizowanego przez Politechnikę Łódzką we współpracy ze szwajcarskim instytutem badawczym EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Dübendorf. Głównym celem projektu było wykonanie pionierskiego wzmocnienia dźwigarów mostu w Szczercowskiej Wsi, przy użyciu naprężonych taśm kompozytowych CFRP z zastosowaniem innowacyjnej metody gradientowego kotwienia taśm. Warunkiem tej aplikacji była

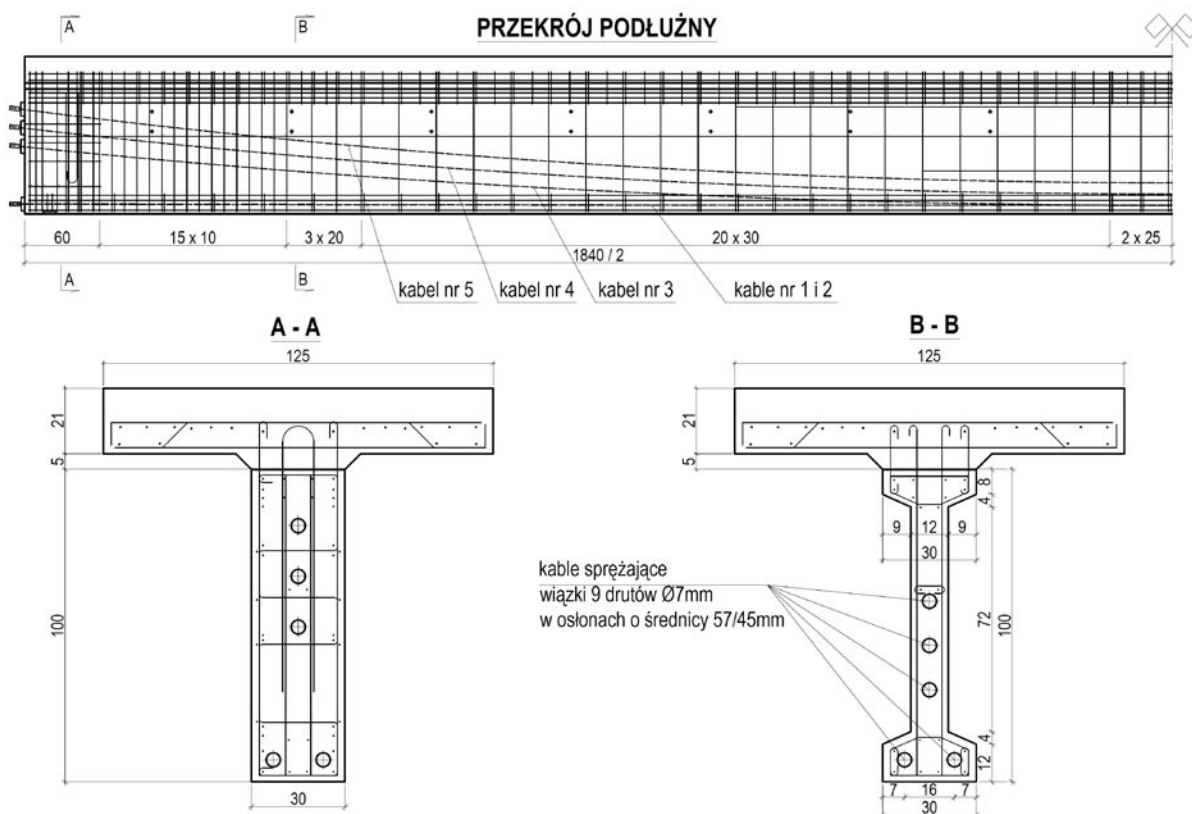
doświadczalna weryfikacja efektywności wzmocnienia przed przystąpieniem do realizacji na moście. W tym celu przeprowadzono badania laboratoryjne dwóch dźwigarów mostowych, obejmujące:

- rekonstrukcję dźwigarów mostowych w skali 1:1,
- wykonanie wzmocnienia identycznie do rozwiązania istniejącego mostu,
- analizę efektywności wzmocnienia na podstawie badań.

## 2. Realizacja programu badawczego

### 2.1. Budowa dźwigarów w laboratorium EMPA

Na potrzeby badań laboratoryjnych zrekonstruowano w warunkach laboratoryjnych dwa dźwigary kabl betonowe



Rys. 1. Przekrój i zbrojenie dźwigarów laboratoryjnych (wymiar w cm)



Rys. 2. Zbrojenie dźwigara (a), dźwigar po betonowaniu i sprężeniu (b), dźwigar po dobetonowaniu płyty pomostu (c)

wraz z fragmentami płyty pomostu. Dźwigary wykonano w skali 1:1 w stosunku do dźwigarów mostowych, co oznacza, że każdy z dźwigarów miał całkowitą długość 18,4 m i wysokość przekroju dwuteowego równą 1,0 m. Na każdym z dźwigarów wykonano płytę żelbetonową reprezentującą fragment płyty pomostu, o szerokości 1,25 m i grubości 0,21 m (rys. 1). Rekonstrukcję dźwigarów wykonano w laboratorium EMPA.

Główne zbrojenie rozciągane wykonano z 8 prętów o średnicy 6 mm w dolnej półce dźwigara, a zbrojenie ściskane z 10 prętów o średnicy 6 mm w górnej półce. Zbrojenie poprzeczne wykonano z pionowych strzemion dwuciętych o średnicy 8 mm w rozstawie co 10–30 cm. Strefy zakotwienia kabli sprężających dodatkowo zbrojono 4 strzemionami poziomymi o średnicy 6 mm oraz wielokrotnie odgiętymi strzemionami pionowymi. W szalunkach umieszczono dwie płyty stalowe łożysk stycznych stanowiących podpory dźwigara. Płyty o wymiarach 300x80 mm i grubości 30 mm usytuowano symetrycznie w rozstawie osiowym 18,0 m. Za dostarczenie zbrojenia sprężającego odpowiadała szwajcarska firma Stahlton AG. Na podstawie archiwalnej dokumentacji projektowej mostu w Szczercowskiej Wsi zastosowano kable ze stali sprężającej o wytrzymałości charakterystycznej na rozciąganie  $R_r = 16500 \text{ kG/cm}^2$  (co odpowiada wytrzymałości  $R_r = 1618 \text{ MPa}$ ) w postaci wiązek 18 drutów o średnicy 5 mm (o polu  $A_p = 353 \text{ mm}^2$ ). Do wykonania zbrojenia belek laboratoryjnych wykorzystano ostatecznie wiązki 9 drutów ze stali gatunku Y1670C o średnicy 7 mm i charakterystycznej wytrzymałości na rozciąganie  $f_{tk} = 1670 \text{ MPa}$ .

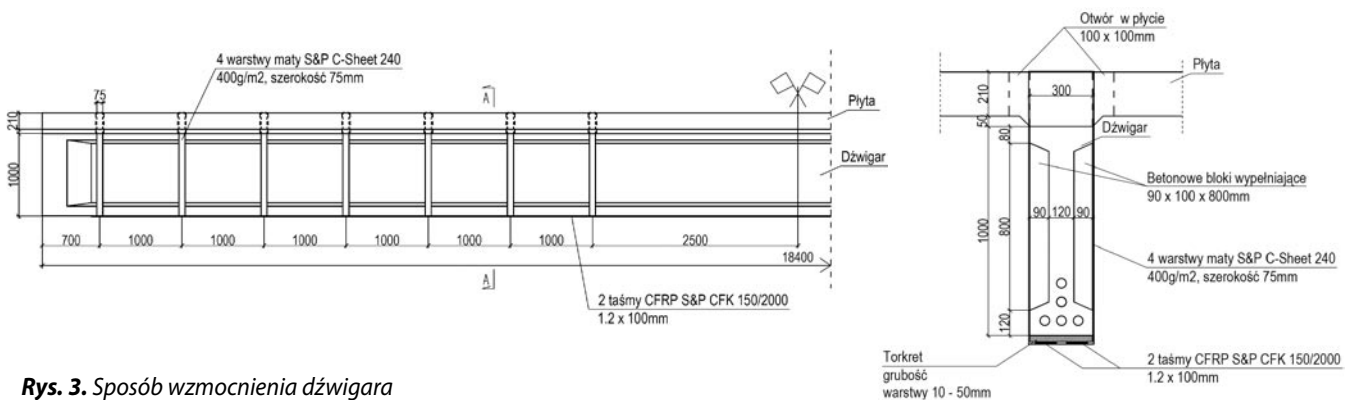
Betonowanie belek wykonano w odstępie czasowym jednego tygodnia. Do betonowania każdej belki użyto  $3,1 \text{ m}^3$

betonu samozagęszczalnego C35/45, co odpowiadało masie 7,5 tony. Podczas betonowania dźwigarów wykonano próbki sześciennie oraz prostopadłościennie w celu doświadczalnego badania wytrzymałości betonu po 7 i 28 dniach od betonowania oraz w dniu badania każdego z dźwigarów. Sprężanie dźwigarów wykonano 28 dni po betonowaniu. Do naciągu kabli użyto siłownik hydrauliczny kompatybilny z głowicami sprężającymi BBRV Typ A. W ostatnim etapie wykonano żelbetonowe płyty o szerokości 1,25 m i grubości 0,21 m, odpowiadające współpracującej szerokości płyty pomostu w moście (rys. 2).

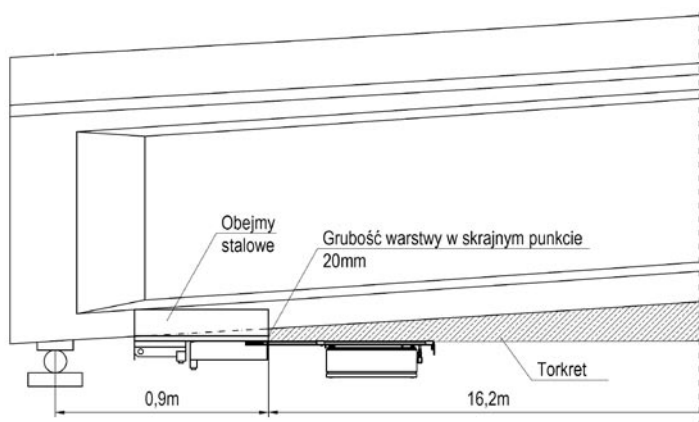
### 3. Wzmacnianie dźwigara

#### 3.1. Przygotowanie dźwigara do wzmocnienia

W pierwszym etapie dolna powierzchnia dźwigara została oczyszczona i przygotowana do reprofilacji w procesie hydromonitoringu. Następnie w strefach przypodporowych, po obu stronach dźwigara, zamontowano stalowe obejmy ze śrubami kotwiącymi i otworami służącymi do montażu urządzeń sprężająco-kotwiących w procesie naprężania kompozytów CFRP. W kolejnym etapie na bocznych powierzchniach dźwigara przyklejono betonowe bloki o kształcie trapezu, które miały wypełnić przestrzeń między półkami dwuteowego dźwigara do jednolitego przekroju prostokątnego i umożliwić wykonanie oplotów z mat CFRP wokół przekroju belki (rys. 3). W ostatnim etapie wykonano reprofilację dolnej powierzchni dźwigara przy użyciu zaprawy AP UVM 8, nakładanej maszynowo metodą torkretowania „na sucho”. Powierzchnia, na której zaplanowano przyklejenie naprężonych taśm CFRP, została wyrównana



Rys. 3. Sposób wzmocnienia dźwigara



Rys. 4. Schemat wzmocnienia z widokiem urządzeń sprężających

Rys. 5. Komplet urządzeń sprężająco-kotwiących



do poziomu i zrównana z dolnymi powierzchniami zamontowanych wcześniej stalowych obejm.

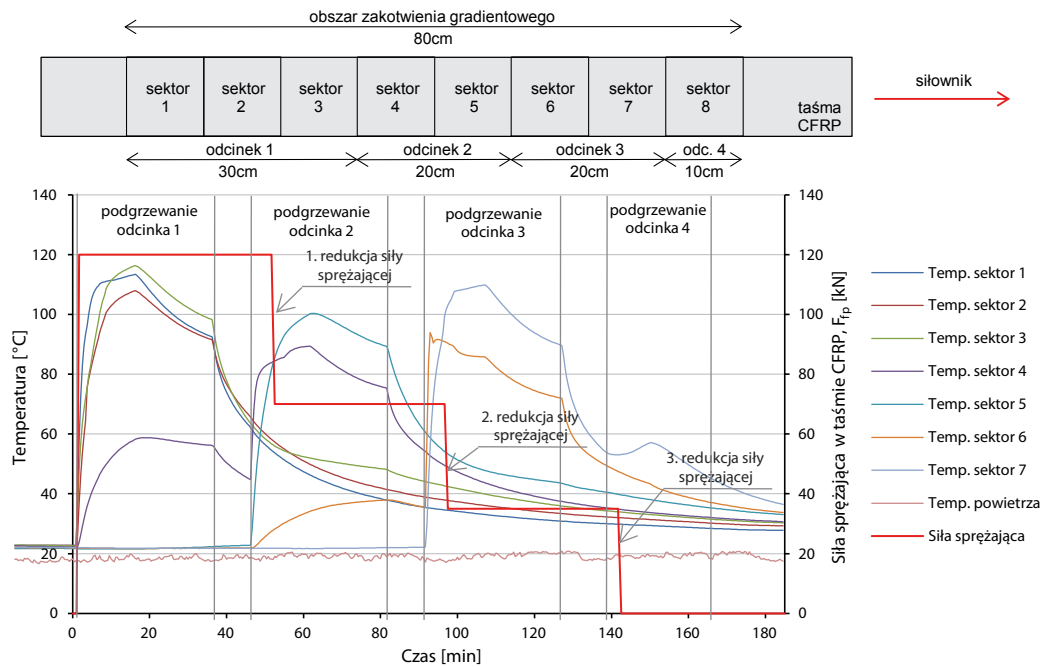
W miejscu instalacji urządzenia grzewczego zamontowano zestaw 6 śrub M10. Ze względu na niewielkie obciążenia działające na urządzenie grzewcze, wynikające jedynie z jego ciężaru własnego, śruby do jego montażu zamocowano przy użyciu oddzielnych kątowników stalowych przyklejonych do dolnej i bocznej powierzchni dźwigara oraz przy użyciu kotew umieszczonych w osi belki. Kompletów stalowych obejm, kątowników i kotew zamontowano symetrycznie w obu strefach przypodporowych dźwigara przeznaczonego do wzmocnienia (rys. 4).

Wzmocnienie dolnej powierzchni dźwigara wykonano przy użyciu urządzeń sprężająco-kotwiących systemu S&P Clever Reinforcement, w skład których wchodzi: aluminiowe szczęki zaciskowe z szynami przewodzącymi; aluminiowe bloki oporowe do montażu siłowników hydraulicznych; urządzenia grzewcze kontrolujące temperaturę wiązania zaprawy, podzielone na 8 sektorów; siłowniki hydrauliczne wraz z przewodami oraz ręczne pompy hydrauliczne z manometrami analogowymi i cyfrowymi (rys. 5). Dźwigar został wzmocniony na zginanie z wykorzystaniem innowacyjnej „metody gradientowej” opracowanej przez Stoecklina i Meiera [1] i dalej rozwijanej w EMPA. Odształcenia taśm CFRP kontrolowano przy użyciu tensometrów elektrooporowych umieszczonych w środku rozpiętości taśm. W metodzie gradientowej końce naprężonego kompozytu kotwiono poprzez przyspieszenie wiązania kleju na odcinku taśmy oraz redukcję siły sprężającej na jej końcu. Przyspieszone wiązanie kleju osiągnięto, stosując

elektroniczne urządzenie grzewcze. Powtarzając tę procedurę na kolejnych odcinkach taśmy otrzymano stopniową redukcję siły sprężającej w taśmach CFRP do zera na ich końcu. Szczegółowy opis działania metody gradientowej przedstawiono w publikacjach [2, 3, 4].

Po zamontowaniu systemu sprężająco-kotwiącego wykonano sprężenie taśmy CFRP przy użyciu siły 120 kN, co odpowiadało odkształceniu  $\epsilon_{fp} = 6\text{‰}$ . Bezpośrednio po wykonaniu sprężenia rozpoczęto proces gradientowego zakotwienia taśmy. Panel roboczy urządzenia grzewczego podzielono na 8 sektorów o długości 100 mm każdy, co umożliwiło kontrolowanie temperatury odrębnie w każdym sektorze. W pierwszej kolejności uruchomiono podgrzewanie pierwszego odcinka taśmy o długości 30 cm (sektor 1, 2 i 3 – rysunek 6). Temperatura grzania ok. 140°C pozwoliła osiągnąć temperaturę zaprawy klejowej równą 100°C mierzoną przy użyciu termopar. Podgrzewanie pierwszego odcinka taśmy trwało 35 minut, po czym grzałki wyłączono i rozpoczęto 10-minutową fazę studzenia kleju. Po 10 minutach rozpoczynano podgrzewanie drugiego odcinka taśmy o długości 200 mm (sektor 4 i 5) przez kolejne 35 minut, a następnie po kolejnych 5 minutach od rozpoczęcia podgrzewania drugiego odcinka wykonano pierwszą redukcję siły sprężającej w taśmie. Siłę naciągu taśmy zredukowano o 50 kN, to znaczy do poziomu 70 kN, co potwierdziły odkształcenia taśmy CFRP ustabilizowane po redukcji na poziomie 3,5‰. Po wzmocnieniu na zginanie (rys. 7a) wykonano wzmocnienie na ścinanie przy użyciu 12 opłotów z mat CFRP (rys. 7b).

Rys. 6. Przebieg zmian temperatury wraz z siłą sprężającą w taśmie CFRP w kolejnych sektorach



Rys. 7. Wzmocnienie dźwigara: a) na zginanie; b) na ścinanie

## 4. Badania doświadczalne

### 4.1. Badania materiałowe

Badania wytrzymałości betonu na ściskanie i rozciąganie wykonano na próbkach sześciennych, a moduł sprężystości betonu na próbkach prostokątnych 100x100x500 mm (tab. 1).

Charakterystyki wytrzymałościowe zbrojenia pasywnego oraz taśm CFRP określono w badaniach na rozciąganie, podczas

gdy stali sprężającej i mat określono na podstawie danych producentów BBRV, 2010 [5] oraz S&P, 2012 [6] (tab. 2).

### 4.2. Badania doświadczalne dźwigarów

Badania obu dźwigarów realizowano w schemacie jedno-przęsłowym o rozpiętości 18,0 m, z obciążeniem czterema siłami skupionym. Siłowniki ustawiono symetrycznie względem środka rozpiętości, w rozstawie co 1,20 m (rys. 8). Podczas badania dźwigarów realizowano pomiary ugięć:

Tabela 1. Charakterystyki wytrzymałościowe betonu dźwigarów i płyt dla obu dźwigarów D1/D2

Element	Parametr	Jednostka	Wiek betonu		
			7 dni	28 dni	Wiek badania/badania
Dźwigar 1/ Dźwigar 2	$f_{cm,cube}$	MPa	47,2/47,5	61,4/62,1	64,6 (143 dni)/66,9 (617 dni)
	$f_{ctm}$	MPa	-	3,8/3,6	4,3 (143 dni)/4,7 (617 dni)
	$E_{cm}$	GPa	-	34,9/33,5	34,6 (143 dni)
Płyta 1/ Płyta 2	$f_{cm,cube}$	MPa	36,0/42,0	47,5/51,1	50,0 (79 dni)/53,5 (550 dni)
	$f_{ctm}$	MPa	-/2,0	2,1/2,2	3,9 (79 dni)/3,9 (550 dni)
	$E_{cm}$	GPa	-	33,3/34,0	32,1 (79 dni)/-

$f_{cm,cube}$  – wytrzymałość kostkowa betonu na ściskanie,  $f_{ctm}$  – wytrzymałość betonu na rozciąganie,  $E_{cm}$  – moduł sprężystości podłużnej betonu

**Tabela 2.** Charakterystyki wytrzymałościowe stali zbrojeniowej, sprężającej i taśm CFRP

Parametr	Jedn.	Stal zbrojeniowa		Stal sprężająca
		6 mm	8 mm	druty 7 mm*
$f_{yk}$	MPa	387	461	1440
$f_{tk}$	MPa	487	545	1670
$E_s$	GPa	227	216	205
$\epsilon_u$	%	153	105	35
Taśma S&P CFK 150/2000		Mata S&P C-Sheet		
$f_{tu}$	MPa	2875		3800*
$E_f$	GPa	168		240*
$\epsilon_{fu}$	%	16,8		15,5*

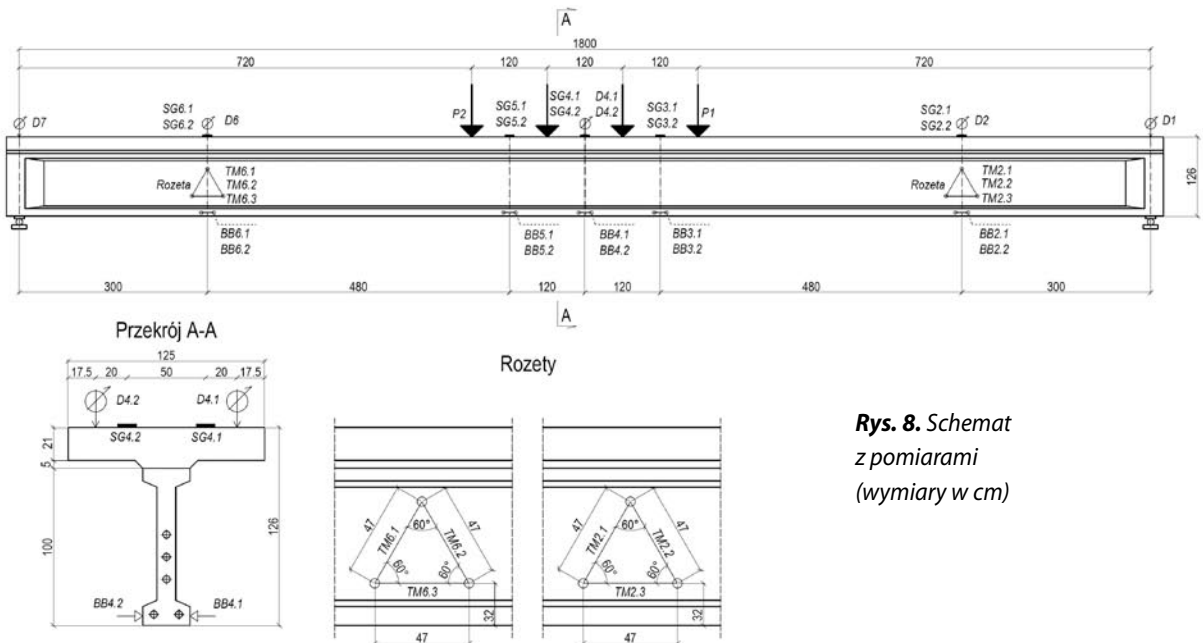
$f_{yk}$ ,  $f_{tk}$  – charakterystyczna granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie,  $E_s$  – moduł sprężystości,  $\epsilon_u$  – odkształcenia przy zerwaniu, \* wartości według producenta [5];  $f_{tu}$  – wytrzymałość na rozciąganie kompozytu,  $E_f$  – moduł sprężystości kompozytu,  $\epsilon_{fu}$  – odkształcenia graniczne kompozytu, \* wartości według producenta [6]

- 7 czujników przemieszczeń liniowych LVDT (D1–D7),
- 5 par tensometrów do pomiaru odkształceń betonu w strefie (SG2.1–SG6.2),

- 5 par czujników LVDT o długości bazy pomiarowej 200 mm do pomiaru odkształceń betonu w strefie rozciąganej na poziomie środka ciężkości głównego zbrojenia rozciąganego (BB2.1–BB6.2),

- 2 siłomierze wbudowane w siłowniki rejestrujące obciążenie (P1 i P2).

Program badań obejmował dwa etapy: najpierw element obciążono wstępnie siłami 4x100 kN, a w drugim etapie element obciążano stopniowo do zniszczenia. Dźwigar niewzmocniony uległ zniszczeniu na skutek uplastycznienia zbrojenia sprężającego. Przy obciążeniu równym 4x80 kN zaobserwowano znaczący spadek sztywności badanego elementu skutkujący wyraźnym przyrostem ugięć i odkształceń betonu, mimo nieznacznego przyrostu obciążenia. Element niewzmocniony nie utracił nośności na zginanie, ale ze względu na ograniczenia techniczne dotyczące maksymalnego wysunięcia siłowników badanie przerwano. Dźwigar wzmocniony zniszczył się na skutek zerwania taśm kompozytowych CFRP. Pod obciążeniem bliskim granicznemu pojedyncze pasma taśm ulegały kolejno zerwaniu, na skutek czego odspajały się od powierzchni betonu w środkowej strefie dźwigara. Dalsze odspojenie było



**Rys. 8.** Schemat z pomiarami (wymiary w cm)



**Rys. 9.** Widok zerwanych taśm kompozytowych, powstrzymany przez oploty mat CFRP

Tabela 3. Wyniki badań dźwigarów

Parametr	Czujnik	D1	D2	$\eta$
Obciążenie rysujące, $4F_{cr}$ [kN]	P1-2	380	440	+16%
Obciążenie przy uplastycznieniu stali, $4F_y$ [kN]	P1-2	720	880	+22%
Obciążenie niszczące, $4F_u$ [kN]	P1-2	772	960	+24%
Ugięcie, $v_{max}$ [mm]	D4.1-4.2	260	210	-19%
Odształcenia betonu – ściskanie, $\epsilon_{cc}$ [‰]	SG4.1-4.2	2,3	1,5	-35%
Odształcenia betonu – rozciąganie, $\epsilon_{ct}$ [‰]	BB4.1-4.2	8,7	9,4	+8%
Odształcenie wstępnie taśm CFRP, $\epsilon_{fp}$ [‰]	-	-	6,0	-
Przyrost odształceń taśm CFRP, $\epsilon_{ftest}$ [‰]	CFRP4.1-4.2	-	10,0	zerwanie

D1, D2 – Dźwigary niewzmocniony i wzmocniony;  $\eta$  – stopień wzmocnienia

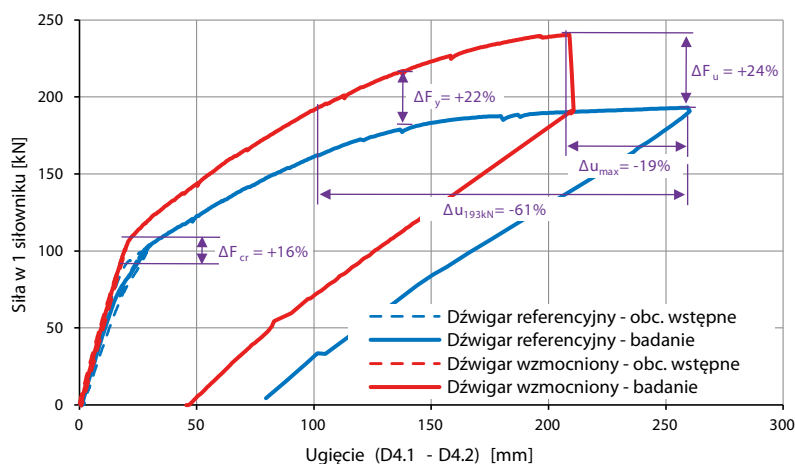
Rys. 10. Porównanie zależności obciążenie-ugięcie dźwigarów: referencyjnego i wzmocnionego

skutecznie powstrzymywane przez pionowe opłaty z mat CFRP, dzięki czemu odspojenie nie postępowało w kierunku podpór (rys. 9). Przy obciążeniu równym  $F_{uD2} = 960$  kN doszło do całkowitego zerwania obu naprężonych taśm. Zniszczenie miało gwałtowny charakter i było sygnalizowane dużym ugięciem dźwigara oraz trzaskami zrywających się włókien taśm CFRP. Jednocześnie nie zaobserwowano uszkodzeń ani odspojenia opłatów mat CFRP, zarówno w strefach przypodporowych, jak i w środku rozpiętości, gdzie maty powstrzymywały postępujące odspojenie naprężonych taśm. Wzmocnienie dźwigara skutkowało wzrostem obciążenia rysującego o 16%, obciążenia wywołującego uplastycznienie zbrojenia o 22% oraz obciążenia niszczącego o 24% (rys. 10, tab. 3).

## 5. Podsumowanie

Na podstawie analizy wyników badań doświadczalnych obu dźwigarów sformułowano następujące wnioski:

- dźwigar niewzmocniony uległ zniszczeniu na skutek uplastycznienia zbrojenia, natomiast dźwigar wzmocniony na skutek zerwania taśm CFRP,
- wzmocnienie dźwigara przy użyciu naprężonych taśm CFRP skutecznie zwiększyło nośność, i ograniczyło ugięcia oraz odształcenia betonu,
- wzmocnienie skutkowało 24% wzrostem nośności dźwigara i 16% wzrostem momentu rysującego,
- wzmocnienie skutkowało zmniejszeniem maksymalnych odształceń betonu w strefie ścisanej o 35%, oraz ograniczeniem maksymalnych ugięć o 19%,
- przyrost odształceń taśm CFRP podczas badania wyniósł 10 ‰, co doprowadziło do ich zerwania, to potwierdza 100% wykorzystanie nośności taśm CFRP,
- w chwili zniszczenia nie zaobserwowano typowego odspojenia ICD, ale doszło do zerwania taśm,



- w badaniach dźwigara niewzmocnionego i wzmocnionego nie zaobserwowano żadnych oznak przekroczenia nośności na ścinanie.

## Podziękowania

Autorzy dziękują zespołowi EMPA (M. Motavalli, Ch. Czaderski, J. Michels) za udział w badaniach i wsparciu finansowym projektu „Innowacyjne systemy monitoringu w strategii zrównoważonego rozwoju infrastruktury budowlanej” TULCOEMPA, finansowanemu przez Program Operacyjny Polsko-Szwajcarskiego Programu Badawczego, nr projektu PSPB-124-2010.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Stöcklin I. and Meier U., Strengthening of concrete structures with pre-stressed and gradually anchored CFRP strips. Proc., 6th Int. Symp. FRP Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-6, K. H. Tan, ed., World Scientific, Singapore, 2003, str. 1321–1330
- [2] 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, str. 651–661
- [3] Michels J., Staśkiewicz M., Czaderski C., Lasek K., Kotynia R., Motavalli M., Anchorage resistance of CFRP strips externally bonded to various cementitious substrates, Composites Part B-Engineering 63/2014, str. 50–60
- [4] Michels J., Staśkiewicz M., Czaderski M., Kotynia R., Harmanci Y. E., Motavalli M., Prestressed CFRP Strips for Concrete Bridge Girder Retrofitting: Application and Static Loading Test, ASCEE, Journal of Bridge Engineering, 21(5)2016, 04016003
- [5] BBRV, Stahlton AG. Drahtspannsystem Stahlton-BBRV mit Verbund: Technische
- [6] S&P Clever Reinforcement. S&P C-Sheet – karta techniczna produktu, S&P Polska, 2012