

## ODKSZTAŁCENIA MOSTU Z KOMPOZYTÓW FRP W ŚWIETLE RÓŻNYCH METOD POMIAROWYCH<sup>1</sup>

Damian KALETA<sup>\*</sup>, Mateusz RAJCHEL<sup>\*\*</sup>, Tomasz SIWOWSKI<sup>\*\*</sup>,  
Rafał SIENKO<sup>\*\*\*</sup>,

<sup>\*</sup> Promost Consulting, Rzeszów

<sup>\*\*</sup> Zakład Dróg i Mostów, Politechnika Rzeszowska

<sup>\*\*\*</sup> SHM System, Systemy Monitorowania Konstrukcji, Kraków

Konstrukcje mostowe zbudowane z kompozytów FRP charakteryzują się bardzo małym ciężarem zapewniającym łatwy transport i szybki montaż, możliwościami prefabrykacji całych przęseł, bardzo dużą wytrzymałością, doskonałą trwałością, odpowiednią sztywnością i dobrymi parametrami dynamicznymi. W referacie przedstawiono wyniki pomiarów odkształceń belkowego przęsła mostu typu *all-composite*. Pomiar odkształceń pod obciążeniem statycznym wykonano trzema różnymi metodami: metodą konwencjonalnej tensometrii elektrooporowej oraz za pomocą technologii strunowej i za pomocą rozłożonych czujników światłowodowe DFOS (ang. *distributed fibre optic sensors*). Przeprowadzone badania wykazały bardzo dużą zgodność odkształceń pomierzonych tymi metodami. Porównanie trzech technologii pomiarowych pozwoliło także na wybór technologii najbardziej odpowiedniej dla mostów kompozytowych.

Słowa kluczowe: kompozyt FRP, most drogowy, badania mostu, pomiar odkształceń, czujniki strunowe, światłowody.

### 1. WPROWADZENIE

Systemy monitorujące zachowanie się konstrukcji w czasie, na świecie wdrażane są od kilkunastu lat, szczególnie w Stanach Zjednoczonych, Dalekim Wschodzie i Japonii. W Polsce tego typu realizacje dopiero są rozwijane ze względu na budowanie mostów o dużej rozpiętości [1, 3], jak również w konstrukcjach o niestandardowych rozwiązaniach materiałowych tj. mostów kompozytowych [7, 8]. Jednym z głównych celów projektu badawczego pn. *Com-Bridge* ([www.com-bridge.pl](http://www.com-bridge.pl)), finansowanego przez NCBiR w ramach programu Demonstrator+, była budowa pełnowymiarowego mostu drogowego z kompozytów FRP o parametrach użytkowych wymaganych przepisami dla obiektu mo-

---

<sup>1</sup> DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.24.11

stowego w ciągu drogi publicznej oraz stworzenie systemu jego monitoringu. Opisane badania porównawcze miały na celu wybór takiego systemu.

Monitorowanie stanu konstrukcji SHM (ang. *Structural Health Monitoring*) to zastosowanie czujników, układów pomiarowych, transmisji danych i modułów obliczeniowych zintegrowanych z badanym obiektem w celu detekcji, lokalizacji, identyfikacji i przewidywania rozwoju uszkodzeń, które mogą spowodować zniszczenie konstrukcji. Interdyscyplinarny charakter układów SHM wymaga specjalistycznego, dedykowanego podejścia podczas ich projektowania, wytwarzania i eksploatacji. W mostach z kompozytów FRP, charakteryzujących się m.in. wysoką wytrzymałością, doskonałą trwałością, odpowiednią sztywnością, małą masą oraz możliwością prefabrykacji nawet całych przęseł [10] zarówno typu „*all-composite*” (dźwigary i pomost w całości kompozytowe) jak i hybrydowego (dźwigary kompozytowe i pomost betonowy), monitorowanie ich zachowania w sposób ciągły w czasie użytkowania obiektu jest szczególnie pożądane. Monitorowanie tych konstrukcji jest również szczególnie ważne, ze względu na złożone kryteria i mechanizmy zniszczenia ich elementów.

Możliwość monitorowania za pomocą pomiarów odkształceń konstrukcji daje technologie strunowe i światłowodowe, w przeciwieństwie do tradycyjnych tensometrów elektrooporowych. Przewagą technologii światłowodowej DFOS (ang. *distributed fibre optic sensors*) jest możliwość uzyskania pomiarów quasi-ciągłych, polegających na rozmieszczeniu kilkudziesięciu punktów pomiarowych na długości pojedynczego światłowodu oraz uzyskaniu pomiarów rozproszonych o rozdzielczości przestrzennej rzędu 5-10 mm, którą z inżynierskiego punktu widzenia można uznać za geometrycznie ciągłą [4]. Podejście to umożliwia zastąpienie nawet kilkudziesięciu tradycyjnych czujników pojedynczym włóknom światłowodowym.

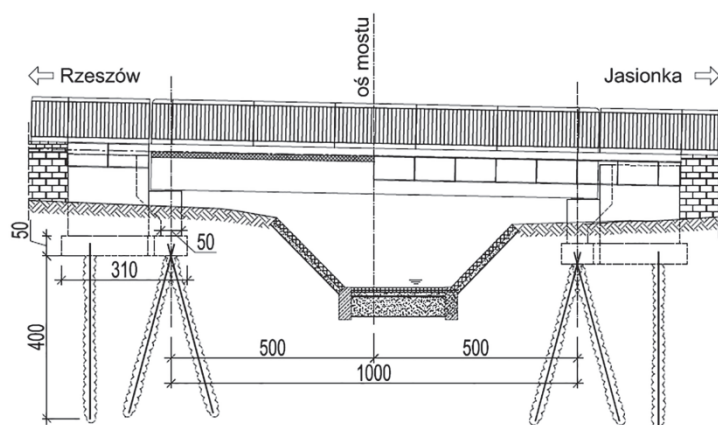
W pracy przedstawiono główne wyniki pomiarów odkształceń pod obciążeniem statycznym pierwszego polskiego mostu drogowego, którego przęsło jest w pełni kompozytowe [7]. Pomiary te wykonano trzema różnymi metodami pomiarowymi, tj. za pomocą czujników strunowych, światłowodowych i tensometrów elektrooporowych, co pozwoliło na porównanie tych metod w kontekście ich zastosowania w monitoringu mostów kompozytowych.

## 2. OPIS OGÓLNY MOSTU

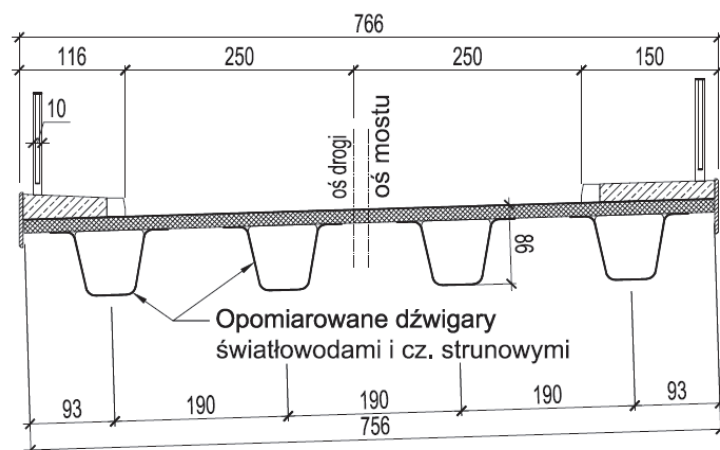
Pierwszy polski most drogowy, którego przęsło wykonano w całości z kompozytów FRP, zbudowany został w miejscowości Nowa Wieś k. Rzeszowa. Most jest obiektem jednoprzęsłowym, swobodnie podpartym (rys. 1). Konstrukcję przęsła tworzy ustrój płytowo-belkowy o następujących głównych parametrach technicznych:

- nośność: klasa C wg normy PN-85/S-10030, tj. pojazdy o ciężarze 30 ton,
- rozpiętość teoretyczna przęsła: 10,00 m,

- całkowita długość mostu: 10,70 m,
- całkowita szerokość pomostu: 7,66 m,
- szerokości użytkowe pomostu: jezdnia 5,00 m ( $2 \times 2,50$  m), opaska bezpieczeństwa  $2 \times 0,50$  m, chodnik 0,75–1,10 m, balustrada z gzymsem  $2 \times 0,25$  m,
- wysokość konstrukcyjna przęsła: 0,86 m.



Rys. 1. Widok z boku i przekrój podłużny mostu kompozytowego



Rys. 2. Przekrój poprzeczny przęsła mostu kompozytowego

Przęsło mostu wykonane jest z czterech dźwigarów kompozytowych o przekroju skrzynkowym (typu U) w rozstawie osiowym 1,90 m oraz zespolonej z dźwigarami warstwowej płyty pomostu typu „sandwich” (rys. 2). Zespolone wykonano za pomocą kleju epoksydowego, co gwarantuje wzajemną współodkształcalność dźwigarów FRP z warstwową płytą pomostową.

Dźwigary główne mają następujące wymiary: wysokość – 0,715 m, szerokość w poziomie pasa dolnego – 0,48 m, szerokość w poziomie pasa górnego – 1,38 m. Nominalna grubość laminatów pasa górnego i dolnego wynosi 15 mm. Środniki dźwigarów są kompozytem warstwowym, składającym się z dwóch zewnętrznych laminatów oraz przekładki z pianki PVC. Nominalna grubość środników wynosi 17 mm. Wnętrze przekrojów skrzynkowych dźwigarów usztywniono przeponami o budowie analogicznej jak środniki i grubości 46 mm w rozstawie 1,25 m. Wszystkie laminaty dźwigarów wykonano w całości z kompozytu na bazie włókien szklanych i żywicy epoksydowej. Wszystkie elementy kompozytowe dźwigarów wykonano w technologii VARTM (ang. *vacuum assisted resin transfer moulding*) na bazie żywicy epoksydowej.

Płyta pomostu jest kompozytem warstwowym typu *sandwich*, składającym się z dwóch zewnętrznych laminatów kompozytu z włókien szklanych i żywicy epoksydowej o grubości 11,5 mm każdy oraz przekładki z pianki PUR o wysokości 105 mm i grubości 25 mm, usztywnionej kompozytowymi żeberkami wewnętrznymi w postaci laminatów o grubości ok. 1 mm. Na szerokości 1 mb panelu płyty pomostu znajduje się 37 wewnętrznych żeber kompozytowych. Ze względów transportowych przeszło zostało podzielone po szerokości na trzy części: dwa identyczne tandemy (po 2 dźwigary i odpowiadający im fragment płyty) oraz środkowy, płytowy element scalający.

### 3. BADANIA MOSTU POD OBCIĄŻENIEM STATYCZNYM

#### 3.1. Schematy obciążeń i układ pomiarowy

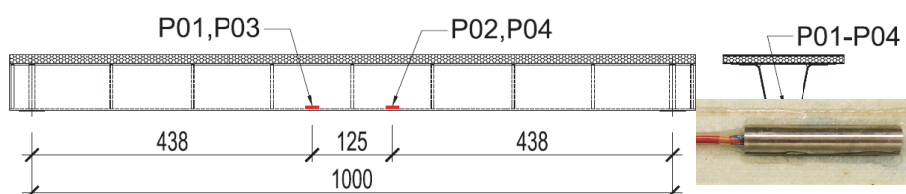
Do badań statycznych mostu użyto dwa samochody ciężarowe o nominalnej masie pojazdu z ładunkiem 30 ton i masie łącznej podczas badań 64,22 tony (rys. 3). Badania statyczne przeprowadzono dla dwóch schematów ustawienia pojazdów (etap 1: układ niesymetryczny – 1 samochód oraz etap 2: symetryczny – 2 samochody).



Rys. 3. Ustawienie pojazdów obciążających w etapie 1 (po lewej) oraz w etapie 2 (po prawej)

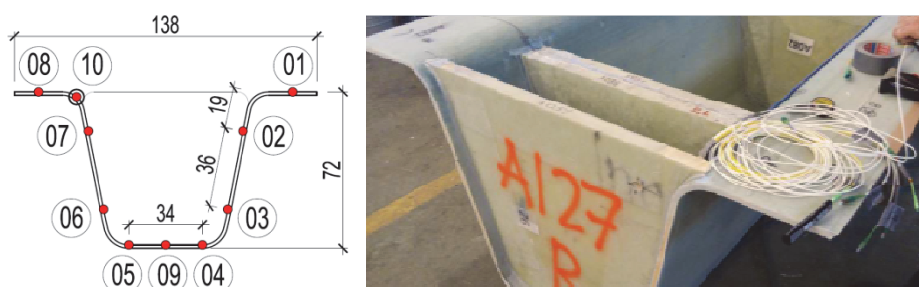
Do pomiaru odkształceń konstrukcji mostu zastosowano: cztery strunowe czujniki Geokon 4150, czujniki światłowodowe o łącznej długości około 200 m oraz 31 tradycyjnych tensometrów elektrooporowych.

Czujniki strunowe (rys. 4) zainstalowano na wewnętrznej powierzchni pasów dolnych, po dwa na dźwigar zewnętrzny i wewnętrzny w pobliżu środka rozpiętości pomiędzy przeponami wewnętrznymi. Czujniki te zostały dodatkowo wyposażone w termostaty, dzięki czemu możliwe było prowadzenie równoległych pomiarów odkształceń od zmian temperatury [2].



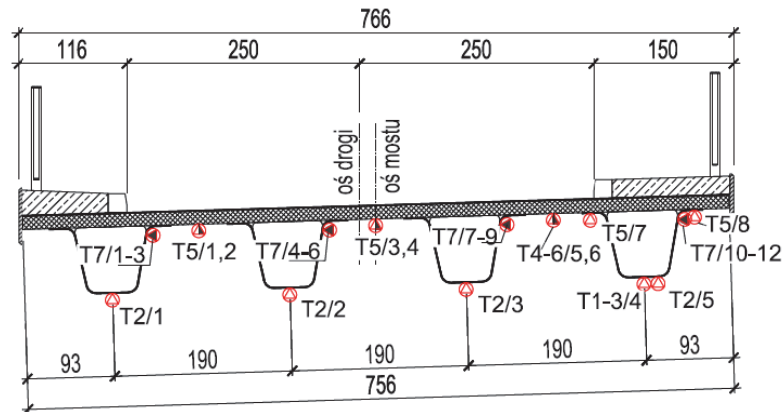
Rys. 4. Lokalizacja czujników strunowych oraz widok czujnika Geokon 4150 w obudowie ochronnej

Czujniki światłowodowe (rys. 5) zainstalowano łącznie w 16 prostoliniowych odcinkach pomiarowych o długości około 10 m każdy na wewnętrznej powierzchni dźwigara zewnętrznego i wewnętrznego wg rys. 1 oraz na dolnej powierzchni płyty pomostu. Odcinki pomiarowe na długości światłowodu znajdowały się co 10 mm. Jedno z włókien (punkt pomiarowy nr 10) zostało swobodnie umieszczone w rurce poliamidowej w celu wykonania pomiaru odkształceń od obciążeń termicznych. Jako włókna pomiarowe wykorzystano jednomodowe światłowody telekomunikacyjne. Do analizy włókien światłowodowych zastosowano reflektometr optyczny OBR 4600 firmy LUNA. Urządzenie przetwarzało sygnał z wykorzystaniem zjawiska rozpraszania Rayleigha. Zarejestrowany sygnał w [dB] reflektometr przeliczał na odkształcenia wyrażone w mikrodeformacjach w [ $\mu\epsilon$ ].



Rys. 5. Lokalizacja czujników światłowodowych (z lewej) oraz ich instalacja (z prawej)

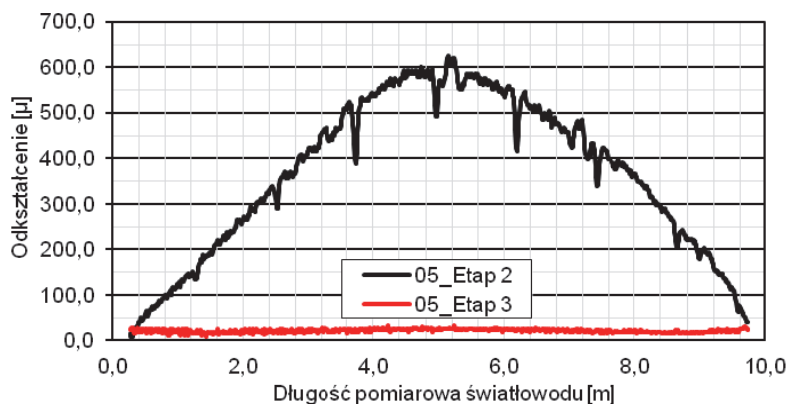
Tensometry elektrooporowe (rys. 6) zainstalowano na zewnętrznej powierzchni czterech dźwigarów oraz na dolnej powierzchni płyty pomostu. Zastosowano konwencjonalne tensometry strunowe o bazie pomiarowej 10 mm oraz system akwizycji i obróbki wyników pomiarów HBM typu *Spider*.



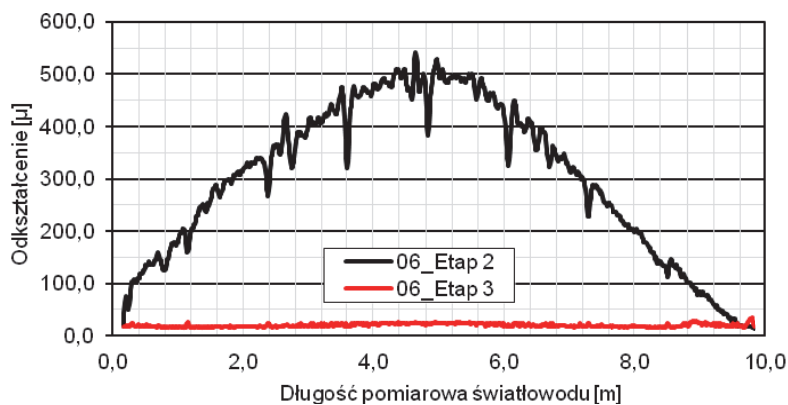
Rys. 6. Lokalizacja tensometrów elektrooporowych w środku rozpiętości przęsła

### 3.2. Wybrane wyniki pomiarów odkształceń

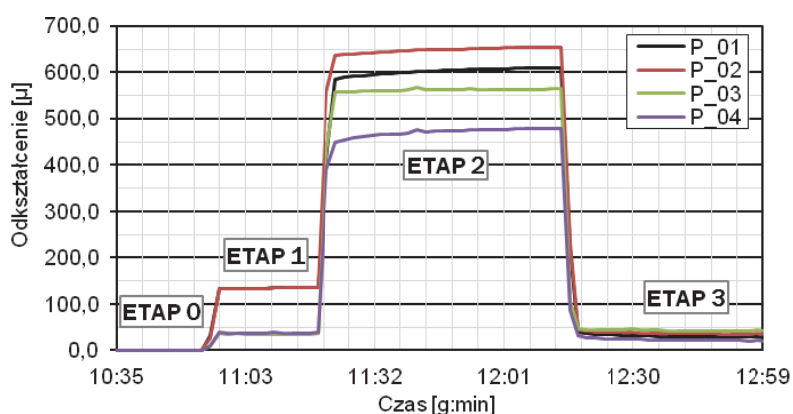
Wybrane wyniki pomiarów odkształceń za pomocą światłowodów (odcinki pomiarowe 05 i 06) oraz czujników strunowych (punkty 01-04) przedstawiono kolejno na rys. 7 – 9.



Rys. 7. Wykres odkształceń światłowodu pomiarowego 05 dla dźwigara zewnętrznego



Rys. 8. Wykres odkształceń światłowodu pomiarowego 06 dla dźwigara zewnętrznego



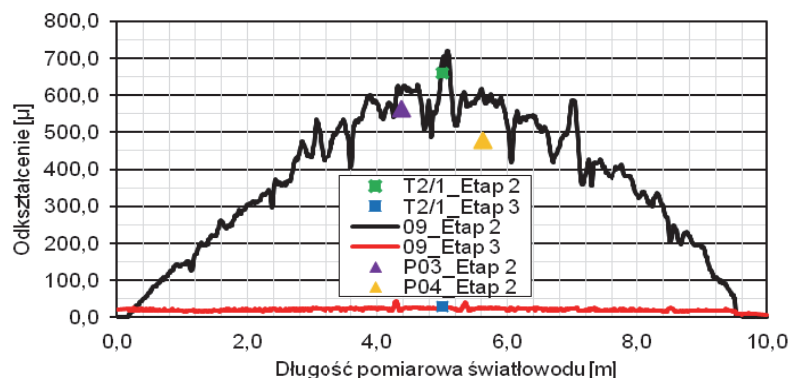
Rys. 9. Wykres odkształceń uzyskany z czujników strunowych w punktach pomiarowych P01-04

Odształcenie kompozytu pasa dolnego dźwigara zewnętrznego w etapie 2 wyznaczone za pomocą tensometrów elektrooporowych (punkt T2/1) wyniosło 0,660 ‰.

#### 4. ANALIZA I PORÓWNANIE WYNIKÓW BADAŃ

Porównanie wybranych wyników pomiarów odkształceń przęsła mostu uzyskanych z trzech metod pomiarowych tj. za pomocą światłowodów, czujników strunowych i tensometrów elektrooporowych przedstawiono na rysunku 10 i w tabeli 1.





Rys. 10. Porównanie pomierzonych wartości odkształceń trzema metodami

Tabela 1. Porównanie maksymalnych pomierzonych wartości odkształceń

Punkt pomiarowy	Odkształcenie [%] – etap 2		
	Tensometria elektrooporowa	Czujniki strunowe	Światłowody DFOS
T2/1	0,660	–	0,721
PO3	–	0,562	0,603
PO4	–	0,480	0,602

Maksymalne odkształcenie uzyskane za pomocą światłowodu w etapie 2 na odcinku pomiarowym 09 (kompozyt pasa dolnego w środku rozpiętości dźwigara zewnętrznego) wyniosło 0,721 ‰. Odkształcenie to stanowi 109% wartości odkształcenia uzyskanego z tensometrów elektrooporowych równego 0,660‰. Odkształcenie uzyskane za pomocą światłowodu w etapie 2 na tym samym odcinku pomiarowym w odległości 0,625 m od środka rozpiętości przęsła (miejsce występowania czujnika strunowego) wyniosło 0,603 ‰ i stanowi ono 107% wartości odkształcenia uzyskanego z czujnika strunowego równego 0,562 ‰.

Graniczne wartości charakterystyczne odkształceń rozciągających uzyskane z badań materiałowych (w układzie globalnym x,y w kierunku osi podłużnej dźwigara) warstw kompozytowych, składających się na laminat FRP pasa dolnego wynoszą [9]:

- 10,54 ‰ – dwukierunkowa warstwa szklana o orientacji włókien  $\pm 45^\circ$  względem osi podłużnej dźwigara,
- 20,29 ‰ – jednokierunkowa warstwa szklana o orientacji włókien  $0^\circ$  względem osi podłużnej dźwigara.

Maksymalne pomierzone wartości odkształceń kompozytu FRP pasa dolnego stanowią odpowiednio 6,84% i 3,55% wartości odkształceń granicznych warstwy szklanej  $\pm 45^\circ$  (10,54 ‰) oraz warstwy szklanej  $0^\circ$  (20,29 ‰). Uzyskane



poziomy wyężenia poszczególnych warstw są znacząco mniejsze od wartości dopuszczalnych wg właściwych zaleceń i wytycznych [5,6].

## 5. PODSUMOWANIE

Jednym z celów badań statycznych mostu drogowego z kompozytów FRP było sprawdzenie zbieżności wyników w zakresie odkształceń uzyskanych trzema metodami pomiarowymi. Różnica w wartościach odkształceń uzyskanych za pomocą światłowodów DFOS i czujników tensometrycznych stanowiła 9%. Natomiast różnica w wartościach odkształceń uzyskanych za pomocą światłowodów DFOS i czujników strunowych wynosiła 7%.

Główną przyczyną niewielkiej niezgodności tych wyników jest m.in. możliwość niewspółosiowego zainstalowania wszystkich czujników w punkcie pomiarowym oraz duża wrażliwość światłowodów na lokalne dociski pomiędzy wewnętrznymi przeponami, a pasem dolnym dźwigara. Badania wykazały jednak, że różnice pomiędzy pomiarami wg różnych technologii są znikome, a więc zarówno czujniki strunowe jak i światłowody DFOS mogą być zastosowane do monitorowania stanu konstrukcji kompozytowej w czasie.

Badania wykonano w ramach projektu R&D pn.: „Com-Bridge – Innowacyjny most drogowy z kompozytów FRP”, współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Przedsięwzięcia Pilotażowego „Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej DEMONSTRATOR+” (umowa nr UOD-DEM-1-041/001).

## LITERATURA

1. Barcik W., Sieńko R., Biliszczuk J., *System monitorowania konstrukcji Mostu Rędziańskiego we Wrocławiu*, Mosty, 2, 56–62, 2012.
2. Bednarski Ł., Sieńko R., *Pomiary odkształceń konstrukcji czujnikami strunowymi*, Inżynieria i Budownictwo, 11, 615–619, 2013.
3. Biliszczuk J., Barcik W., Sieńko R.: *System monitorowania mostu w Puławach*, Mosty 4, 12–17, 2009.
4. Deng L., Cai C.S., *Application of fiber optic sensors in civil engineering*, Structural Engineering and Mechanics, 25, 5, 577–596, 2007.
5. Design Manual for Roads and Bridges (DMRB). Volume 1, Section 3, Part 17: DB 9/05 – Design of FRP Bridges and Highways Agency, Scottish Executive, Welsh Assembly Government, The Department for Regional Development Northern Ireland 05, 2016.
6. JRC Science for Policy Report. Prospect for new guidance in the design on FRP. Support to the implementation harmonization and failure development of the Eurocodes, 2016.
7. Siwowski T., Kulpa M., Rajchel M., Kaleta D., *Nowy most drogowy z kompozytów FRP*, Mosty, 2017.

8. Siwowski T., Rajchel M., Kaleta D., Własak L., *Pierwszy w Polsce most drogowy z kompozytów FRP*, Inżynieria i Budownictwo 10, 534–538, 2016.
9. Siwowski T., Rajchel M., Kaleta D., Własak L., *The First Polish Road Bridge Made of FRP Composites*, Structural Engineering International 2, 308–314, 2017.
10. Zoghi M., *The international Handbook of FRP Composite in Civil Engineering*, Boca Raton. CRC Press, Taylor & Francis Group LLC, 2014.

### **STRAINS OF ALL-FRP COMPOSITE BRIDGE MEASURED BY THE DIFFERENT METHODS**

#### **Summary**

The *all-composite* bridges in which both the girder and deck slab are fully made of FRP composite, are characterized by: a very low weight, prefabrication even entire spans, very high strength, excellent durability, appropriate stiffness, and proper dynamic behavior of the bridge. The main results of strain measurement in the all-composite bridge span under static load test have been presented. Three different measurement methods have been applied: vibrating strain gauge, distributed fibre optic sensors (DFOS) and strain gauge transducer. The proof load tests have revealed the good agreement and consistency between these results. The comparison made on the basis of measurements has allowed to choose the most appropriate method to be used in the further monitoring system of the bridge.