

PIERWSZY POLSKI MOST KOMPOZYTOWY W BADANIACH

dr hab. inż. Tomasz Siwowski,
prof. PRZ
Politechnika Rzeszowska
siwowski@prz.edu.pl
mgr inż. Mateusz Rajchel
Politechnika Rzeszowska
mrajchel@prz.edu.pl
mgr inż. Agnieszka Wiater
Politechnika Rzeszowska
wiater@prz.edu.pl

Pierwsza dekada XXI w. przyniosła znaczące upowszechnienie w budownictwie mostowym nowego materiału konstrukcyjnego, jakim są kompozyty włókniste FRP (ang. *fibres reinforced polymers*). Charakteryzują się one zdecydowanie lepszymi właściwościami mechanicznymi i fizycznymi niż drewno, beton czy stal, tradycyjne materiały budowlane. Z konstrukcyjnego punktu widzenia do największych zalet kompozytów FRP należą m.in.: wysoka wytrzymałość, doskonała trwałość, duża sztywność (w przypadku kompozytu z włókien węglowych) oraz mała masa konstrukcji, a co za tym idzie łatwość i szybkość jej wznoszenia. Te cechy kompozytów FRP powodują, że materiał ten coraz częściej jest stosowany w budownictwie mostowym, szczególnie w przypadkach, gdy o wyborze rodzaju konstrukcji decydują całkowite koszty liczone w cyklu życia.

Zakład Dróg i Mostów Politechniki Rzeszowskiej (ZDiM PRz) od kilku lat prowadzi intensywne badania naukowe w zakresie możliwości zastosowania kompozytów FRP w polskim budownictwie mostowym. Wyniki pierwszych badań kompozytowych elementów mostowych przedstawio-

Doświadczenia z budowy i wyniki badań pierwszego polskiego mostu drogowego z kompozytów FRP potwierdziły, że ten nowoczesny i innowacyjny materiał może być pełnowartościową alternatywą dla stosowanych powszechnie w budownictwie mostowym stali i betonu.

no w pracy [1]. W niniejszym artykule podsumowano prace badawcze związane z wdrożeniem do eksploatacji pierwszego polskiego mostu drogowego, wytworzonego z kompozytów FRP. Pełnowymiarowy most drogowy o parametrach użytkowych wymaganych przepisami dla obiektu mostowego w ciągu drogi publicznej powstał jako rezultat projektu badawczego pn. Com-Bridge. Projekt był realizowany przez konsorcjum naukowo-badawcze, którego liderem był Mostostal Warszawa SA, a partnerami: firma Promost Consulting z Rzeszowa (projekt budowlany i wykonawczy mostu, analizy obliczeniowe) oraz Politechnika Rzeszowska (badania elementów konstrukcyjnych) i Politechnika Warszawska (badania materiałowe). Rezultaty przeprowadzonych badań naukowych oraz efekty ich wdrożenia wykazały, że mosty kompozytowe mogą być pełnowartościową alternatywą dla stosowanych powszechnie przeseł mostowych ze stali i betonu.

Opis mostu

Pierwszy polski most kompozytowy zbudowano w miejscowości Błażowa k. Rzeszowa (rys. 1.). Most jest obiektem jednoprzęsłowym, swo-

bodnie podpartym, a główne jego parametry techniczno-geometryczne są następujące: nośność 40 ton, rozpiętość teoretyczna przęsła 21 m, szerokość całkowita mostu 10,5 m. Przęsło mostu jest konstrukcją hybrydową, wykonaną z czterech kompozytowych dźwigarów skrzynkowych zespolonych z betonową płytą pomostu. Dźwigary są stężone dwiema skrajnymi poprzecznkami żelbetowymi, wykonanymi monolitycznie z płytą pomostu. Płyta o stałej grubości 0,18 m jest wykonana z betonu lekkiego klasy LC 35/38, zbrojonego dwiema siatkami z prętów kompozytowych GFRP o średnicy 12 mm. Płyta jest zespolona z dźwigarami za pomocą łączników sworzniowych, osadzonych w pasach górnych dźwigarów. Podobne zespolenie kompozytu i betonu jest wykonane w strefie podporowej przęsła. Wyposażenie przęsła składa się z kap chodnikowych, wykonanych z betonu lekkiego LC 30/33 zbrojonego prętami GFRP, konwencjonalnej nawierzchni i izolacji, odwodnienia, urządzeń dylatacyjnych oraz barier mostowych. Podpory mostu wykonano w postaci żelbetowych przyczółków pełnościennych posadowionych pośrednio.

Rys. 1. Pierwszy polski most drogowy z kompozytów FRP



Tabela 1. Parametry materiałowe kompozytów zastosowanych do budowy dźwigarów mostu

Rodzaj użytej tkaniny	Stałe inżynierskie				Charakterystyki wytrzymałościowe				
	E_x	E_y	G_{xy}	ν_{xy}	f_{tx}	f_{cx}	f_{ty}	f_{cy}	f_{xy}
	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[-]	[MPa]				
węglowa jednokierunkowa 0°	115,8	5,7	4,00	0,410	1150	464	12	94	54
szklana jednokierunkowa 0°	41,1	10,9	4,40	0,294	855	537	44	84	51
szklana dwukierunkowa 0°/90°	20,0		3,90	0,029	522	321	522	321	60



Rys. 2. Model płyty pomostu na stanowisku badawczym

Badania elementów mostu kompozytowego

Aspekty projektowe pierwszego polskiego mostu z kompozytów FRP przedstawiono w pracy [2]. Ze względu na nowatorski charakter konstrukcji mostu pozwolenie na jego budowę wymagało (w trybie art.33 ust.3 pkt.2 ustawy Prawo Budowlane) specjalistycznej opinii, wydanej przez jednostkę naukową wskazaną przez właściwego ministra. Minister Infrastruktury i Rozwoju wskazał Politechnikę Rzeszowską jako jednostkę właściwą do wydania takiej opinii. Politechnika wydała pozytywną opinię po przeprowadzeniu kompleksowych badań kluczowych elementów obiektu. Zakres badań obejmował m.in.:

- badania materiałowe kompozytów;
- badania nośności doraźnej i trwałości zmęczeniowej płyty pomostu z betonu lekkiego, zbrojonego prętami GFRP;
- badania nośności doraźnej, charakterystyki dynamicznej i trwałości zmęczeniowej dźwigara kompozytowo-betonowego (hybrydowego) w skali 1:1.

Badania materiałowe miały na celu wyznaczenie podstawowych parametrów poszczególnych składni-

ków kompozytów zastosowanych do budowy dźwigarów głównych mostu (tabela 1.). Parametry materiałowe zostały wykorzystane w projektowaniu dźwigarów. Oprócz ustalenia podstawowych parametrów do projektowania przeprowadzono także szerokie badania związane z trwałością zastosowanych kompozytów, w tym m.in.: wpływ temperatury, pełzania, promieni UV, zmęczenia, cykli zamrażanie-rozmarzanie oraz soli do odładzania jezdni na podstawowe parametry materiałowe kompozytów.

Bardzo ważnym badaniem dla potwierdzenia projektowanej nośności mostu były badania innowacyjnej płyty pomostu z betonu lekkiego zbrojonego prętami kompozytowymi GFRP (rys. 2.). Celem badań było określenie nośności i trwałości zmęczeniowej płyt oraz porównanie wyników badań z wynikami obliczeń projektowych. Podczas badań modeli płyt pomostu pod obciążeniem statycznym mierzono wartości przemieszczeń pionowych, odkształceń betonu, oceniano morfologię i szerokości rozwartha rys. Wyznaczono maksymalne wartości obciążenia (tzw. nośności graniczne) oraz opisano towarzyszące im postacie zniszczenia. Badania zmęczenio-

we pozwoliły na oszacowanie trwałości zmęczeniowej płyt.

Przeprowadzone badania wykazały, że prototypowe panele pomostowe charakteryzują się dużą nośnością, trwałością zmęczeniową oraz zachowują się sprężysto aż do zniszczenia, które ma charakter pseudosprężysty. Analiza wyników badań statycznych wykazała wystarczającą nośność i sztywność badanych płyt pomostu do zastosowań w obiektach mostowych. Porównanie nośności uzyskanych doświadczalnie z wartościami projektowymi, obliczonymi według wytycznych ACI, wykazało bardzo dobrą zgodność w zakresie nośności na zginanie oraz nieadekwatność tej normy w zakresie szacowania nośności na ścinanie (rys. 3.). Badania zmęczeniowe nie potwierdziły nieograniczonej (2 mln cykli) nośności zmęczeniowej płyty pomostu. Na podstawie badań zmęczeniowych wyznaczono niszczącą liczbę cykli, która wyniosła 980,5 tys. przy wartości obciążenia projektowego 210 kN na os. Utrata nośności zmęczeniowej nastąpiła na skutek gwałtownej utraty sztywności płyty, spowodowanej utratą przyczepności prętów GFRP do betonu. W rzeczywistości jednak obciążenie eksploatacyj-

ne płyty pomostu (np. przy założeniu nośności mostu 40 t) będzie znacząco mniejsze, dlatego rezultat jakościowy badań zmęczeniowych przyjęto jako zadowalający. W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że płyty pomostowe z betonu lekkiego, zbrojone prętami kompozytowymi, mogą być pełnowartościową alternatywą dla konwencjonalnych płyt pomostowych. Szczegółowy opis badań przedstawiono w pracy [3].

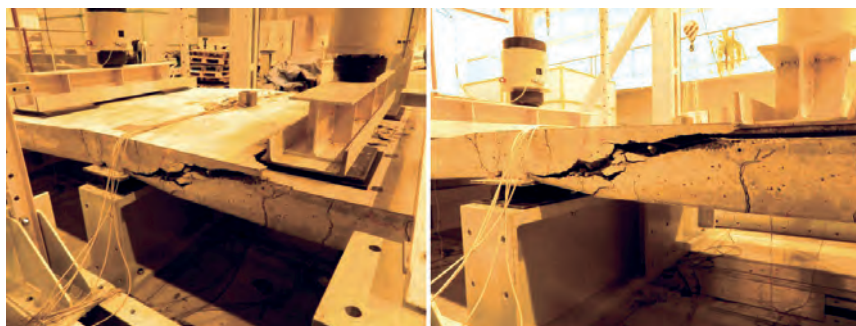
Celem badań dźwigara kompozytowego w skali 1:1 (rys. 4.) była oce-

na jego nośności doraźnej, sztywności, charakterystyki dynamicznej i trwałości zmęczeniowej oraz ocena rozwoju uszkodzeń i postaci zniszczenia oraz walidacja modelu numerycznego MES, zastosowanego do projektowania mostu.

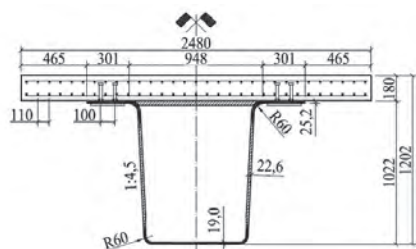
Badania statyczne mostowego dźwigara hybrydowego w pełnej skali wykazały jego całkowicie sprężystą pracę w całym zakresie przyłożonego obciążenia (rys. 5.). Sztywność dźwigara oceniona na podstawie maksymalnego ugięcia w środ-

ku rozpiętości wynosiła $L/380$ na poziomie projektowego obciążenia charakterystycznego. Maksymalny poziom naprężeń kompozytu FRP i betonu dźwigara wyniósł odpowiednio 52,4% i 52,8% ich wytrzymałości charakterystycznej. Maksymalna wyznaczona nośność doraźna dźwigara stanowiła 323% wartości charakterystycznego momentu zginającego, na który dźwigar został zaprojektowany. Lokalne zniszczenia dźwigara (głównie delaminacja kompozytu) wystąpiły w miejscach karbów konstrukcyjnych (nieciągłości), powstałych w konstrukcji na etapie produkcji kompozytu (rys. 6.). Nie miały one jednak wpływu na nośność i sztywność dźwigara. Przeprowadzone badania wykazały, że dźwigar hybrydowy typu „kompozyt FRP – beton” mógł zostać zastosowany w budowie pełnowymiarowego mostu drogowego. Szczegółowy opis badań przedstawiono w pracy [4].

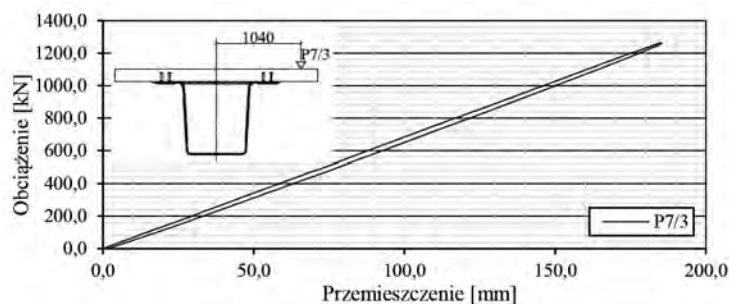
Wszystkie przeprowadzone badania wytrzymałościowe (badano także m.in. zespolenie dźwigara kompozytowego i płyty) w pełni potwierdziły przyjęte założenia oraz wyniki analiz statyczno-wytrzymałościowych, wykonanych na etapie projektowania mostu. Ostateczna weryfikacja tych założeń, a także zachowania się mostu pod obciążeniem użytkowym miała miejsce podczas próbnego obciążenia obiektu.



Rys. 3. Zniszczenie płyty w wyniku ścinania betonu



Rys. 4. Przekrój poprzeczny dźwigara hybrydowego (z lewej) oraz pełnowymiarowy dźwigar na stanowisku badawczym (z prawej)



Rys. 5. Wykres przemieszczeń w środku rozpiętości przęsta



Rys. 6. Delaminacja kompozytu pasów górnych oraz pasa dolnego w środku rozpiętości dźwigara

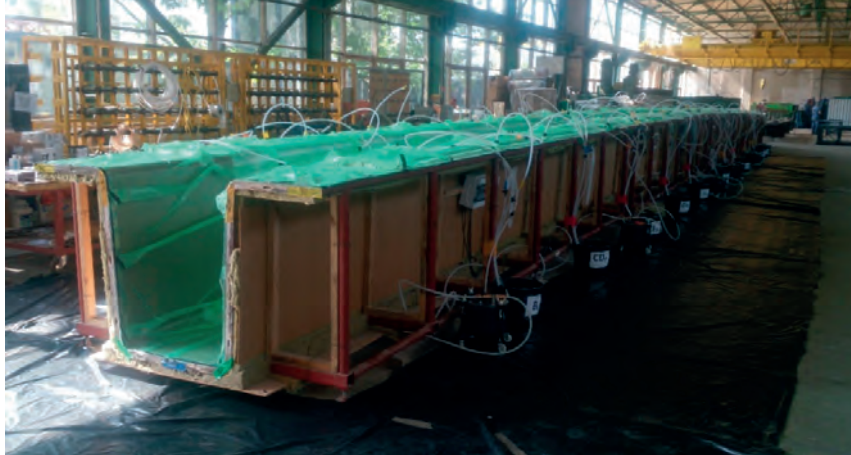
Wytworzenie dźwigarów kompozytowych i budowa mostu

Wszystkie kompozytowe elementy składowe dźwigarów głównych, tj. korpus dźwigarów, przepony wewnętrzne oraz deskowanie tracone zamykające dźwigary od góry, zostały wykonane w procesie infuzji [5]. Jej cechą charakterystyczną jest to, że zbrojenie w postaci włókien (tkaniny, maty) jest układane na sucho w formie o kształcie wykonywanego elementu. Następnie forma jest uszczel-

niana (w naszym przypadku za pomocą plastikowej folii i taśmy butylowej) i rozpoczyna się przesyłanie elementu żywicą przy wykorzystaniu pompy próżniowej (rys. 7.).

Aby ułatwić, przyspieszyć i lepiej kontrolować ten proces, stosuje się dodatkowe materiały technologiczne do rozprowadzania żywicy (m.in. siatki, rurki, dodatkowe kanały w formie). Elementy kompozytowe dźwigarów wykonano z sztych tkanin szklanych i węglowych, jedno- i dwukierunkowych (ułożenie włókien $\pm 45^\circ$ i $0/90^\circ$ w stosunku do kierunku głównego tkanin), o gramaturze od 600 do 1200 g/m². Do budowy kompozytów warstwowych, z których wykonano środniki korpusów dźwigarów, zastosowano piankę PVC o gramaturze 80 kg/m³. Ośnowę kompozytu stanowiła żywica epoksydowa Araldit LY 1564 SP wraz z utwardzaczem Aradur XB 3486 (produkty firmy Huntsman). Proces wytworzenia dźwigarów głównych opisano szczegółowo w pracy [6].

Budowę mostu rozpoczęto w czerwcu 2015 r. od rozbiórki mostu istniejącego. W pierwszej kolejności wykonano fundamenty palowe nowych podpór, a na nich żelbetowe oczepy zwieńczające oraz korpusy pełnościenne z podwieszonymi skrzydełkami. Po wykonaniu podpór i osadzeniu łożysk rozpoczęto montaż dźwigarów kompozytowych. Montaż dźwigarów na łożyskach wymagał tylko jednego dźwigu o nośności 5 ton. Łączny czas całej operacji ustawienia czterech dźwigarów głównych na łożyskach zajął niewiele ponad godzinę (rys. 8.). Na ustawionych dźwigarach ułożono kompozytowe deskowanie tracone płyty pomostu. Następnym etapem budowy było wykonanie zbrojenia części betonowej konstrukcji płyty za pomocą prętów kompozytowych ComRebars (rys. 9.). Do wykonania poprzecznic i płyty pomostu użyto betonu lekkiego LC35/38 na kruszywie Pollytag. Ostatnią fazą budowy mostu było wykonanie wyposażenia. Kolejno wykonano: kapy chodnikowe z betonu lekkiego klasy LC 30/33, zbrojonego prętami kompozytowymi GFRP, krawężnikowe wpusty mostowe z polimerobetonu, jednomodułowe urządzenia dylatacyjne, polimerobetonowe deski gzym-sowe, stalowe bariery ochronne oraz nawierzchnię poliuretanowo-epoksydową na chodnikach i nawierzchnię mastyksowo-gryśową SMA na



Rys. 7. Dźwigar kompozytowy podczas infuzji



Rys. 8. Montaż dźwigarów kompozytowych na podpory



Rys. 9. Zbrojenie kompozytowe płyty pomostu przed betonowaniem

jezdni. Całość inwestycji uzupełniło wykonanie adaptacji dojazdów do mostu oraz wycinkowe umocnienia koryta rzeki. Budowę mostu zakończono w listopadzie 2015 r., a realizacja wszystkich opisanych prac trwała zaledwie 6 miesięcy.

Badania mostu kompozytowego

Badania mostu pod próbnym obciążeniem statycznym i dynamicznym przeprowadził ZDiM PRz (rys. 10.). Podczas badań statycznych by-



Rys. 10. Badania mostu kompozytowego pod próbnym obciążeniem

ły mierzone i rejestrowane wartości przemieszczeń pionowych dźwigarów, odkształceń kompozytu, przemieszczeń łożysk oraz osiadań podpór. Wyniki badań statycznych porównano z teoretycznymi wartościami przemieszczeń i odkształceń od obciążenia próbnego, obliczonymi przy wykorzystaniu modelu numerycznego konstrukcji przęsła, który został zastosowany w projektowaniu mostu. Porównując wyniki pomiarów przemieszczeń pionowych (ugięć) i odkształceń dźwigarów głównych do wartości teoretycznych i dopuszczalnych, wyciągnięto następujące wnioski:

- maksymalne ugięcie sprężyste dźwigara wynosiło 30 mm, co stanowi 61% wartości ugięcia teoretycznego i jest mniejsze od ugięcia dopuszczalnego ($f/L=1/300 = 70,0 \text{ mm}$);
- maksymalne odkształcenie sprężyste kompozytu (laminatu) pasa dolnego wynosiło 0,521‰, co stanowi 98% wartości odkształcenia teoretycznego i jest mniejsze od wartości odkształceń granicznych dla jedno- oraz dwukierunkowej warstwy szklanej, odpowiednio $\varepsilon_{tg} = 2,03\%$ i $\varepsilon_{tg} = 2,54\%$ oraz węglowej ($\varepsilon_{tc} = 0,99\%$) kompozytu pasa dolnego;
- maksymalne odkształcenie sprężyste kompozytu warstwowego środka wynosiło 0,385‰, co stanowi 82% wartości odkształcenia teoretycznego i jest mniejsze od wartości odkształceń granicznych dla dwukierunkowej warstwy szklanej ($\varepsilon_{tg} = 2,54\%$).

Badania dynamiczne mostu zrealizowano przy użyciu dwóch samochodów, które poruszały się po obiekcie z prędkością 10 km/h, 30 km/h i 50 km/h. Podczas badań dynamicznych rejestrowano czasowe zmiany wartości przemieszczeń w dwóch punktach pomiarowych zlokalizowanych w środku rozpiętości przęsła. Na podstawie pomiarów przemieszczeń dźwigarów pod obciążeniem dynamicznym wyciągnięto następujące wnioski:

- maksymalne wartości współczynnika dynamicznego dla poszczególnych prędkości (10/30/50 km/h) wynoszą odpowiednio 1,055/1,104/1,063 i nie przekraczają wartości przyjętej w projektowaniu, wynoszącej 1,25;
- zidentyfikowana podstawowa częstotliwość drgań własnych przęsła wynosi 3,98 Hz i jest większa

od zalecanej wartości dopuszczalnej (3 Hz);

- oszacowany logarytmiczny dekrement tłumienia przęsła wynosi 0,087 i świadczy o zadowalającym tłumieniu konstrukcji.

Podsumowanie

Doświadczenia z budowy i wyniki badań pierwszego polskiego mostu drogowego z kompozytów FRP potwierdziły, że ten nowoczesny i innowacyjny materiał może być pełnowartościową alternatywą dla stosowanych powszechnie w budownictwie mostowym stali i betonu. Jednakże do pełnego przekonania administracji drogowej i środowiska mostowego o jakości, niezawodności i korzyściach płynących z budowy takich mostów jest niezbędna kontynuacja prac naukowo-badawczych, które uzupełnią i poszerzą wiedzę o zachowaniu się mostów kompozytowych podczas eksploatacji pod obciążeniem użytkowym, jak również pod wpływem oddziaływań środowiskowych. Niektóre z tych zagadnień były badane w ramach zakończonego w marcu 2017 r. projektu Com-bridge. Na przykład dzięki systemowi monitoringu konstrukcji (system czujników światłowodowych) zainstalowanemu na obiekcie będzie możliwa ocena zachowania się mostu pod obciążeniem użytkowym podczas jego eksploatacji. Informacje uzyskane w trakcie monitoringu mostu zostaną wykorzystane do oceny jej trwałości konstrukcji kompozytowej i jej optymalizacji. Kolejnym zrealizowanym działaniem w ramach projektu Com-bridge jest analiza LCA/LCCA zbudowanego mostu i porównanie go w cyklu życia z typowym mostem stalowym i betonowym. Wyniki tych działań na pewno pozwolą na zdobywanie nowej wiedzy, umożliwiającej upowszechnienie mostów kompozytowych w budownictwie mostowym w Polsce.

Badania, projekt mostu oraz jego budowa zostały zrealizowane 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).

Bibliografia:

1. Siwowski T., Kulpa M., Poneta P., Badania nad zastosowaniem kompozytów FRP do budowy mostów w Polsce. „Materiały Budowlane”, nr 11, 2014, s. 58-60.
2. Siwowski T., Kaleta D., Kulpa M., Projekt pierwszego polskiego mostu drogowego z kompozytów FRP. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 9/2015, rok LXXI, s. 465-470.
3. Wiater A., Rajchel M., Siwowski T., Badania płyt pomostu z betonu lekkiego zbrojonych prętami kompozytowymi GFRP. „Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury” / „Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture JCEEA”, tom XXXII, zeszyt 62 (nr 4/2015), październik-grudzień 2015, s. 469-492.
4. Rajchel M., Siwowski T. Badania pod obciążeniem statycznym pełnowymiarowego mostowego dźwigara hybrydowego typu „kompozyt FRP – beton”. „Materiały Budowlane”, nr 8/2016 (nr 528), s. 79-81.
5. Poneta P., Siwowski T.: Technologie wytwarzania dźwigarów mostowych z kompozytów FRP. Materiały seminarium pn.: „Współczesne technologie budowy mostów”. Politechnika Wrocławska, listopad, 2014. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, s. 361-368.
6. Siwowski T., Rajchel M., Kaleta D., Własak L. Pierwszy w Polsce most drogowy z kompozytów FRP. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 10/2016, rok LXXII, s. 534-538.

Streszczenie: W pracy opisano badania przeprowadzone w ramach projektu badawczego Com-Bridge, którego celem była budowa pierwszego polskiego mostu drogowego wykonanego z kompozytów FRP. Przedstawiono także charakterystykę mostu, opisano wytwarzanie dźwigarów kompozytowych oraz przedstawiono proces budowy mostu. Na zakończenie podano główne wyniki badań odbiorczych mostu pod próbnym obciążeniem statycznym i dynamicznym, które potwierdziły zakładaną nośność obiektu. Doświadczenia z realizacji mostu potwierdziły, że most kompozytowy może być pełnowartościową alternatywą dla stosowanych powszechnie przęsł mostowych ze stali i betonu.

Słowa kluczowe: kompozyt FRP, pręty GFRP, beton lekki, dźwigar mostowy, płyta pomostu, most drogowy, badania wytrzymałościowe

The first Polish composite bridge in research

Summary: The research works on the first Polish road bridge made of FRP composites, carried out in the frame of R&D project Com-Bridge, has been presented in the paper. The general characteristic of the bridge, manufacturing of main FRP girders as well as construction process have been also described. Finally, main results of the proof test have been discussed and compared with the theoretical assumptions. The experience gained on this case study has revealed, the FRP composite road bridge could be the valuable alternative for standard steel and concrete bridges.

Keywords: FRP composite, GFRP re-bars, lightweight concrete, bridge girder, deck slab, road bridge, strength tests