

Badania dźwigara mostowego z kompozytów FRP pod obciążeniem statycznym

Paweł Poneta¹, Tomasz Siwowski²

¹ Mostostal Warszawa S.A., Dział Analiz i Rozwoju, e-mail: p.poneta@mostostal.waw.pl

² Zakład Dróg i Mostów, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska, e-mail: siwowski@prz.edu.pl

Streszczenie: Materiały kompozytowe FRP (*fibre reinforced polymer*) ze względu na swoje znakomite parametry mechaniczne są coraz szerzej wykorzystywane w budownictwie. W ostatnich kilkunastu latach obserwuje się m.in. coraz szersze wykorzystanie kompozytów FRP do budowy mostów. Głównym celem projektu badawczego było opracowanie kompozytowego dźwigara mostowego, poczynając od projektu technicznego, przez badania materiałowe, wybór metody wytwarzania, aż do badań wytrzymałościowych modelu dźwigara w skali naturalnej. Przedmiotem pracy jest omówienie wstępnych wyników badań wytrzymałościowych dźwigara wytworzonego metodą VARTM (*vacuum assisted resin transfer moulding*). Badania przeprowadzono na modelu o długości 13,5 m i docelowym przekroju poprzecznym. Celem badań było wyznaczenie nośności granicznej dźwigara oraz ocena jego zachowania pod obciążeniem statycznym, a także analiza postaci zniszczenia. Dźwigar kompozytowy spełnił wymagania w zakresie nośności, użyteczności i zapasu bezpieczeństwa, dlatego z dużym prawdopodobieństwem zostanie wykorzystany w budowie prototypowego obiektu mostowego. Wyniki badań potwierdziły także bardzo duży potencjał materiałów kompozytowych FRP w budownictwie mostowym.

Słowa kluczowe: kompozyt FRP, dźwigar mostowy, technologia VARTM, badanie statyczne, postać zniszczenia

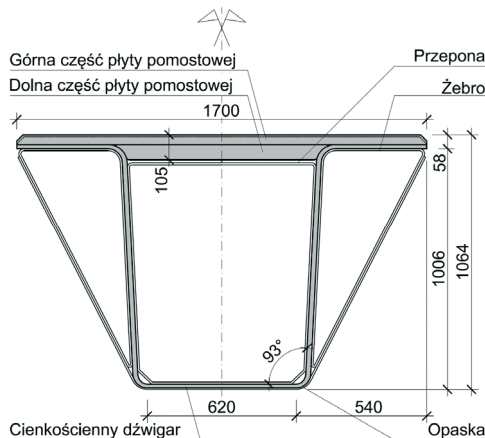
1. Wprowadzenie

Od ponad 20 lat dzięki zastosowaniu w obiektach mostowych bardzo wytrzymałych, lekkich i odpornych na korozję materiałów z kompozytów włóknistych o osnowie polimerowej FRP (ang. *fibre reinforced polymers*), jest możliwe znaczące wydłużenie ich trwałości [1]. Kompozyty FRP powstają z połączenia włókien syntetycznych (węglowych, szklanych, aramidowych, bazaltowych) oraz polimerów (np. żywicy epoksydowej, poliestrowej, winyloestrowej). Charakteryzują się one zdecydowanie lepszymi właściwościami mechanicznymi i fizycznymi niż powszechnie stosowane w budownictwie mostowym materiały konstrukcyjne (beton, stal). Z konstrukcyjnego punktu widzenia, do największych zalet kompozytów FRP należą m.in.: duża wytrzymałość na rozciąganie, duża wartość odkształceń granicznych, duża sztywność (w przypadku kompozytu z włókien węglowych), doskonała odporność na korozję oraz mała masa konstrukcji z kompozytów. Od kilkudziesięciu lat te właściwości kompozytów FRP są z powodzeniem wykorzystywane w przemyśle lotniczym, samochodowym i stoczniowym. Pierwsze dziesięciolecie XXI w. przyniosło także upowszechnienie tych materiałów w budownictwie, w tym w budownictwie mostowym [2].

W Polsce materiały FRP wykorzystano w mostownictwie początkowo do wzmacniania istniejących obiektów za pomocą taśm i mat kompozytowych [3]. Jednak do tej pory, z wyjątkiem użycia drobnowymiarowych, katalogowych elementów kompozytowych w specyficznych lokalizacjach [4, 5] nie zbudowano obiektu mostowego o konstrukcji nośnej z kompozytów FRP. Projekty badawcze, realizowane przez konsorcjum pod kierunkiem Mostostalu Warszawa SA z udziałem Politechniki Rzeszowskiej są pierwszą krajową próbą zmiany tego stanu rzeczy. W pracy przedstawiono koncepcję kompozytowego dźwigara mostowego, opisano zrealizowany proces produkcji dźwigara, a także przedstawiono wybrane wyniki badań dźwigara pod obciążeniem statycznym.

2. Opis konstrukcji i wytworzenia modelu dźwigara FRP

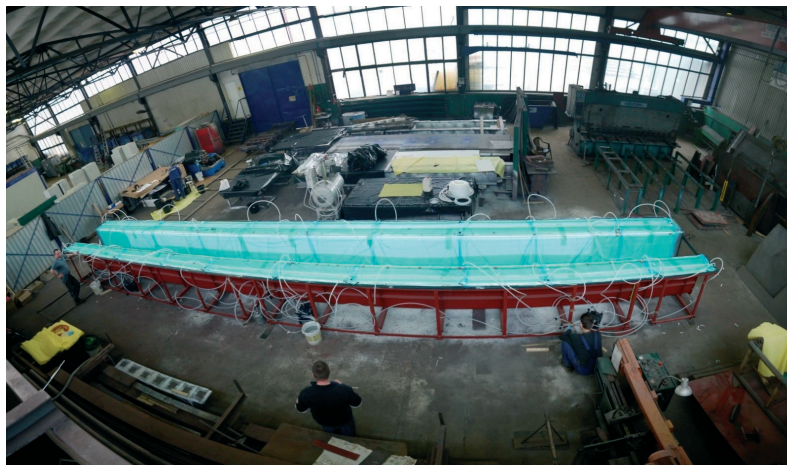
Zaprojektowany na podstawie założeń wstępnych kompozytowy dźwigar mostowy ma cienkościenną konstrukcję skrzynkową o rozpiętości teoretycznej 25,0 m, wysokości konstrukcyjnej (wraz z pomostem) 1,1 m i szerokości 1,7 m (rys. 1). Typowy most drogowy będzie składać się z czterech takich dźwigarów, połączonych kompozytową lub żelbetową płytą pomostu oraz stężonych żelbetowymi poprzecznikami podporowymi. W przypadku zastosowania kompozytowych paneli pomostu (typu sandwich), będą one połączone z dźwigarami głównymi za pomocą kleju epoksydowego.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny kompozytowego dźwigara mostowego

Dźwigar główny został zaprojektowany z kompozytowych elementów warstwowych, składających się z płyt zewnętrznych, wykonanych z laminatów, oraz z rdzenia z pianki PVC. W górnych i dolnych pasach dźwigara zastosowano laminat hybrydowy, szklano-węglowy, natomiast w pozostałych elementach (środkach) wykorzystano do zbrojenia kompozytu jedynie włókno szklane. Skrzynkowa konstrukcja dźwigara jest usztywniona przeponami wewnętrznymi i żebrami zewnętrznymi, wykonanymi jako elementy kompozytowe warstwowe z tkanin szklanych oraz pianek PVC, przyklejanymi do dźwigara głównego klejem epoksydowym. Integralną częścią badanego dźwigara są kompozytowe panele pomostu. Składają się one z części dolnej i górnej (rys.1). Pierwsza z nich zamyka od góry przekrój dźwigara i jest zbudowana z dwóch warstw. Na spodzie panelu pomostowego znajduje się laminat szklany, a na górze pianka PVC grubości 60 mm. Górny panel składa się z pianki PVC grubości 60 mm oraz laminatu szklanego grubości 10 mm, stanowiącego jednocześnie nawierzchnię pomostu. Wyniki badań materiałowych kompozytów FRP, z których jest zbudowany dźwigar podano w pracy [6].

Wszystkie kompozytowe elementy konstrukcyjne dźwigara zostały wykonane metodą infuzji VARTM (ang. *vacuum assisted resin transfer moulding*). W tym procesie produkcji elementów kompozytowych suche warstwy tkanin zbrojących (węglowej, szklanej), wraz z liniowymi elementami doprowadzającymi i odprowadzającymi żywicę, są umieszczane w specjalnej formie o kształcie wykonywanego elementu i przykrywane workiem foliowym, uszczelnianym na obwodzie formy. Następnie za pomocą pompy próżniowej jest odsysane spod folii powietrze, a dzięki wytworzonemu podciśnieniu, po odkręceniu zaworu doprowadzającego żywicę, zaczyna się przesycanie żywicą tkanin zbrojących. Po zakończeniu procesu przesycania (zwykle od 0,5 do 3 h w zależności od wielkości elementu), żywica sieciuje w temperaturze pokojowej, formując ostateczny kształt elementu. Aby zwiększyć wytrzymałość oraz odporność kompozytu na zmiany temperatury, wytworzony dźwigar kompozytowy był wygrzewany przez dobę w temperaturze 50°C. Metodę infuzji zastosowano również do wykonywania paneli pomostowych, żeber zewnętrznych i przepon wewnętrznych. Panele, żebra i przepony połączono z konstrukcją dźwigara za pomocą kleju epoksydowego. Na rys.2 przedstawiono proces infuzji dźwigara o długości całkowitej 13,5 m w wytwórni Mostostalu Warszawa SA.



Rys. 2. Wytwarzanie dźwigara kompozytowego w procesie infuzji

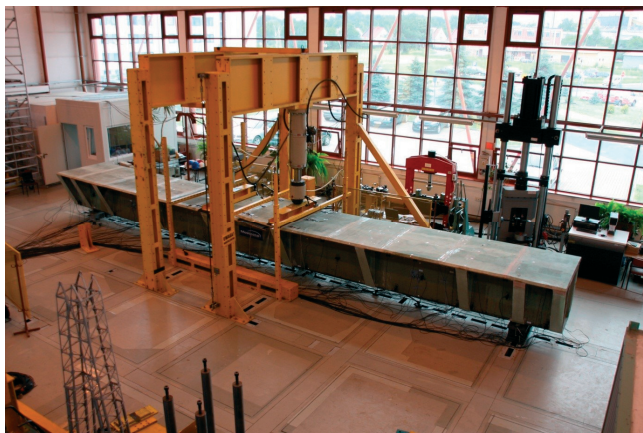
Po wykonaniu dźwigara kompozytowego oraz montażu wszystkich elementów usztywniających, obie jego strefy podporowe wypełniono betonem klasy C25/30. W strefie podporowej A beton ułożono na długości 1,65 m od osi podparcia do wysokości 90 cm od dolnego pasa dźwigara. Beton zbrojono kompozytowymi prętami $\phi 8$ mm i teownikami $30 \times 30 \times 3,5$ mm. Teowniki zostały przyklejone do ścianek dźwigara. Na drugim końcu dźwigara (w strefie B) zastosowano trzy przepony, pomiędzy które wklejono w pionie 8 kompozytowych rur kwadratowych (o boku 18 cm). Przestrzeń pomiędzy nimi wypełniono betonem klasy C25/30, aż do poziomu paneli pomostu. Następnym etapem wykonania dźwigara był montaż paneli pomostu. Dolne części paneli pomostowych o wymiarach $1,0 \times 2,0$ m przyklejono do pasów górnych dźwigara. Utworzona w ten sposób płaska powierzchnia posłużyła do montażu górnych części paneli pomostowych o takich samych wymiarach. W procesie wytwarzania paneli (tj. podczas infuzji) oba elementy składowe przesunięto względem siebie o 0,20 m w celu ukształtowania połączenia zakładkowego między panelami. Obie części paneli połączono między sobą oraz z pasami górnymi dźwigara za pomocą kleju epoksydowego. Gotowy model dźwigara kompozytowego, wytworzonego w celu przeprowadzenia badań wytrzymałościowych pokazano na rys.3.



Rys. 3. Model dźwigara kompozytowego przygotowany do badań wytrzymałościowych

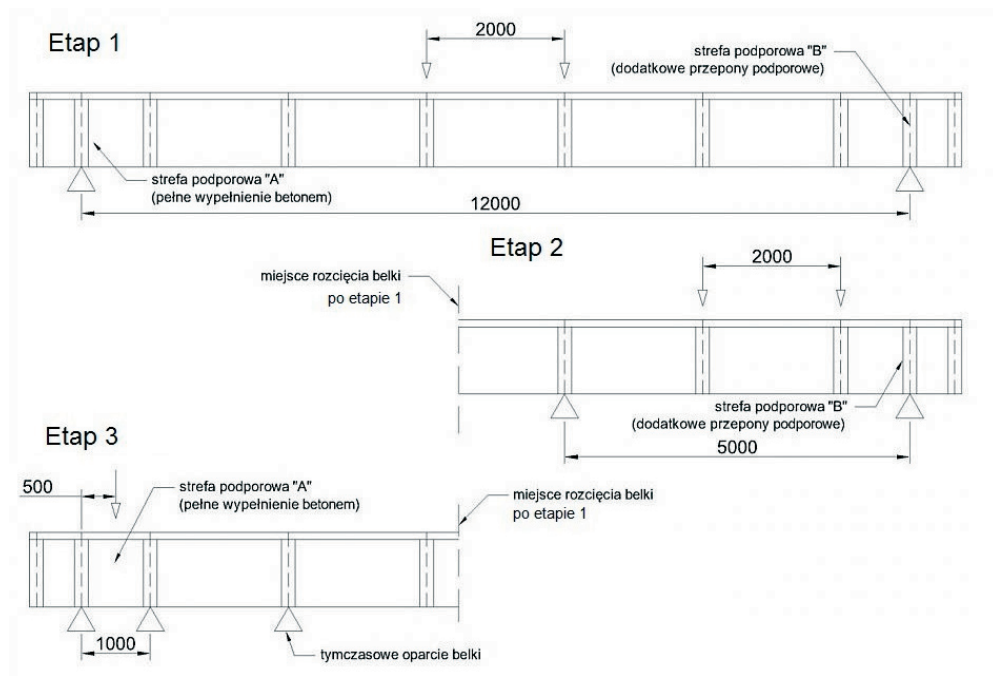
3. Badania wytrzymałościowe dźwigara FRP

Do badań wytrzymałościowych w skali naturalnej zaprojektowano dźwigar skrzynkowy o rozpiętości teoretycznej 12,0 m i długości całkowitej 13,5 m (rys.3). W celu wzmocnienia strefy ścinanej środkiem nad podporami oraz poprawy parametrów dynamicznych dźwigara w obu jego strefach podporowych zastosowano dodatkowe elementy kompozytowe (przepony, rury kwadratowe, teowniki) oraz wypełnienie betonem zbrojonym prętami kompozytowymi. Przed rozpoczęciem badań dźwigar był przedmiotem wstępnej analizy numerycznej pod obciążeniem badawczym [6]. Następnie model dźwigara poddano kompleksowym badaniom statycznym i dynamicznym na stanowisku badawczym w Wydziałowym Laboratorium Badań Konstrukcji PRz (rys.4). Celem badań była ocena zachowania dźwigara i jego wybranych elementów pod obciążeniem statycznym, ustalenie parametrów dynamicznych dźwigara oraz weryfikacja modelu numerycznego MES, służącego do projektowania mostu. W ostatnim etapie badań dźwigar obciążono do zniszczenia w celu identyfikacji postaci zniszczenia i wyznaczenia nośności granicznej.



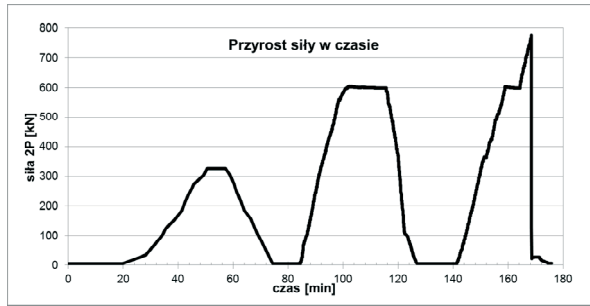
Rys. 4. Model dźwigara kompozytowego na stanowisku badawczym

Program badań statycznych obejmował 3 etapy (rys.5). W etapie 1 dźwigar obciążono przyjmując schemat czteropunktowego zginania. Rozstaw osiowy skupionych sił obciążających wynosił 2,0 m. Obciążenie zewnętrzne wywierano przez nacisk siłowników, rozłożony na powierzchnię kontaktu z panelami pomostu na całej ich szerokości, tj. 1,60 m i na długości 0,30 m. Obciążenie skupione od siłowników było rozkładane przez sztywne belki stalowe, ułożone na warstwie twardej gumy, zapewniającej równomierny rozkład obciążenia na powierzchnię paneli. W tym etapie badań dźwigar obciążono w kilku fazach, aż do jego zniszczenia. Po badaniach etapu 1 dźwigar rozcięto w zniszczonym przekroju, tj. w pobliżu środka rozpiętości, a obie powstałe w ten sposób części wykorzystano do badań w etapach 2 i 3. Celem badań w etapach 2 i 3 była ocena zachowania się obu różnie wykonanych stref podporowych dźwigara pod działaniem sił ścinających. W etapie 2 rozstaw osiowy podpór dźwigara wynosił 5,0 m, przy takim samym rozstawie dwóch sił obciążających jak w etapie 1. W etapie 3 fragment dźwigara podparto w rozstawie 1,0 m, wynikającym z rozstawu żeber w strefie podporowej A oraz obciążono pojedynczą siłą w środku badanego fragmentu dźwigara.



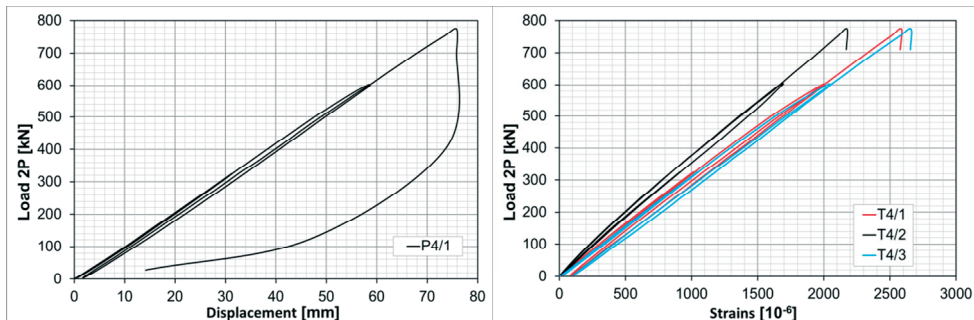
Rys. 5. Schemat badań statycznych dźwigara w etapach 1÷3

Podczas badań statycznych w etapie 1 obserwację zachowania dźwigara prowadzono za pomocą 16 czujników przemieszczeń oraz 44 czujników odkształceń, w tym 6 rozet tensometrycznych, pozwalających określić naprężenia główne w środku dźwigara. Wartości sił obciążających mierzono siłomierzami w czasie rzeczywistym. Przyrost przemieszczeń tłoka siłowników został tak dobrany, aby zachować prędkość przyrostu siły równą 15 kN/min. Odczyty wskazań czujników rejestrowano co 30 kN przyrostu obciążenia całkowitego. W końcowej fazie obciążenia oraz podczas fazy zniszczenia dźwigara rejestracja wskazań odbywała się co 0,5 s.



Rys. 6. Przebieg siły obciążającej ($2P$) w czasie badań statycznych w etapie I

Na rys. 6 pokazano przebieg całkowitej siły obciążającej dźwigar ($2P$) podczas badań statycznych w etapie I, a na rys.7 - wykres przemieszczeń i odkształceń pasa dolnego dźwigara w środku rozpiętości w poszczególnych fazach obciążenia tego etapu. Z tego wykresu wynika, że dźwigar pracował sprężysto aż do zniszczenia, które nastąpiło przy obciążeniu $2P = 774$ kN. Taki charakter pracy dźwigara potwierdzają także przebiegi odkształceń kompozytu węglowego pasa dolnego dźwigara, zmierzone w środku jego rozpiętości. W momencie zniszczenia dźwigara maksymalne naprężenie w pasie dolnym było równe około 26% wytrzymałości charakterystycznej laminatu węglowego na rozciąganie (tj. 332 MPa). Inny był charakter odkształceń na powierzchni panelu pomostu w strefie ściskanej, w tym samym przekroju środkowym dźwigara. Jeden z tensometrów skrajnych pokazał wyraźną nieliniowość materiału, która mogła być jednym z powodów przedwczesnego zniszczenia dźwigara w tej strefie. Całkowite ugięcie dźwigara przy sile niszczącej wynosiło 76 mm, co stanowi 1/165 L.



Rys. 7. Wykres przemieszczeń (lewy) i odkształceń (prawy) dźwigara w środku rozpiętości

Zniszczenie dźwigara było nagłe i wystąpiło w strefie ściskanej dźwigara (w panelu pomostu) na odcinku stałego momentu zginającego, w odległości 0,55 m od środka rozpiętości dźwigara. W pierwszej kolejności nastąpiła delaminacja części panelu pomostu i odklejenie panelu od pasów dźwigara, a następnie deformacja pasów górnych dźwigara skrzynkowego, lokalna utrata stateczności jego środników bezpośrednio pod obciążeniem oraz odspojenie zewnętrznych żeber pionowych w tym samym przekroju (rys.8). Dokładna analiza postaci i lokalizacji zniszczenia wykazała, że wystąpiło ono w połączeniu zakładkowym sąsiadujących paneli pomostu. Połączenie to okazało się najsłabszym fragmentem dźwigara, a jego nagłe zniszczenie wywołało szybko postępującą destrukcję w pasach, środniku i żebrach dźwigara. Jednak pomimo tej nagłej i niespodziewanej postaci zniszczenia, uzyskana w badaniach etapu I nośność graniczna dźwigara ($M_n = 1965$ kNm) była ponad 3-krotnie większa od charakterystycznego momentu zginającego, na który

zaprojektowano dźwigar. Wyznaczony doświadczalnie poziom bezpieczeństwa jest wystarczający do pozytywnej oceny dźwigara w aspekcie potencjalnego zastosowania w projektowanym obiekcie mostowym. Jednocześnie duży zapas nośności oraz nieoczekiwana postać zniszczenia wskazują na konieczność podjęcia prac nad optymalizacją, zarówno materiałową, jak również konstrukcyjną dźwigara.



Rys.8. Podstawowa postać zniszczenia dźwigara

Narzędziem do wykonania optymalizacji dźwigara będzie model numeryczny, który został pozytywnie zweryfikowany na podstawie uzyskanych wyników badań. Wyniki pomiarów wykazały bowiem wysoką zgodność z wynikami analizy numerycznej i pozwalają na akceptację modelu numerycznego jako wiarygodnego narzędzia do optymalizacji materiałowo-konstrukcyjnej oraz do dalszych prac projektowych w zakresie wykorzystania dźwigara kompozytowego do budowy obiektów mostowych [6].

4. Podsumowanie

W pracy opisano wstępne wyniki dotychczasowych prac koncepcyjnych, projektowych i badawczych, realizowanych przez konsorcjum kierowane przez Mostostal Warszawa SA, mających na celu wdrożenie do polskiego mostownictwa trwałych, lekkich i innowacyjnych dźwigarów z kompozytów FRP. Badania materiałowe potwierdziły, że bazując na powszechnie dostępnych materiałach (włóknach i żywicach) można w warunkach przemysłowych wyprodukować elementy z kompozytów FRP, które nadają się do budowy obiektów mostowych. Faza technologiczna projektu udowodniła, że w odpowiednio wyposażonym warsztacie firmy budowlanej, dysponując odpowiednio przeszkoloną załogą, można bez większych trudności produkować mostowe dźwigary kompozytowe. Przeprowadzone badania wykazały, że prototypowy dźwigar kompozytowy ma bardzo wysoką nośność, 3-krotnie większą od charakterystycznego obciążenia projektowego, dużą sztywność oraz cechuje się sprężystą pracą aż do zniszczenia. Wytężenie materiału przy zniszczeniu osiągnęło zaledwie 53% wytrzymałości charakterystycznej kompozytu węglowego na ściskanie oraz 26% wytrzymałości w strefie rozciąganej, co świadczy o dużym potencjale optymalizacyjnym zaprojektowanej konstrukcji, po wyeliminowaniu słabych fragmentów (połączeń), odpowiedzialnych za przedwczesne zniszczenie prototypu. Modyfikacja i optymalizacja materiałowo-konstrukcyjna dźwigara zostanie wykonana za pomocą opracowanego modelu numerycznego, który został zweryfikowany na podstawie wyników przeprowadzonych badań wytrzymałościowych. Model numeryczny zostanie również wykorzystany do projektu mostu drogowego o konstrukcji kompozytowej, którego

wybudowanie będzie docelowym rezultatem projektu badawczego i jednocześnie wstępem do wdrażania w Polsce innowacyjnej technologii budowy mostów z kompozytów FRP.

Opisane w pracy badania zostały częściowo zrealizowane w ramach krajowego projektu badawczego nr 6 ZR7 2009 C/07341 pod tytułem: „*Opracowanie technologii wytwarzania i wdrożenie kompozytowych kładek dla pieszych*”, który był realizowany przez konsorcjum naukowe pod kierunkiem Mostostalu Warszawa SA z udziałem Politechniki Rzeszowskiej oraz współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- 1 Jayaraman K., Xu X.W. Life cycle assessment of products made of composite materials. *International Journal of Product Lifecycle Management* 4 (2009) 11-22.
- 2 Keller T. Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction. *Structural Engineering Documents IABSE* 7 (2003).
- 3 Siwowski T., Radomski W. Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu. *Inżynieria i Budownictwo* 54 (1998) 382 – 388.
- 4 Zobel H., Karwowski W., Wróbel M. Kładka z kompozytu polimerowego zbrojonego włóknem szklanym. *Inżynieria i Budownictwo* 59 (2003) 107-108.
- 5 Grotte B., Karwowski W., Mossakowski P., Wróbel W., Zobel H., Żółtowski P. Stalowa łukowa kładka dla pieszych z podwieszonym pomostem z kompozytów polimerowych nad drogą S-11 pod Kórnikiem. *Inżynieria i Budownictwo* 65 (2009) 69-73.
- 6 Poneta P., Kulpa M., Własak L., Siwowski T. Koncepcja i badania innowacyjnego dźwigara mostowego z kompozytów FRP. *Inżynieria i Budownictwo* 70 (2014) 147-151.

Research on the FRP bridge girder under static load

Paweł Poneta¹, Tomasz Siwowski²

¹ *Mostostal Warszawa S.A., Dział Analiz i Rozwoju, e-mail: p.poneta@mostostal.waw.pl*

² *Zakład Dróg i Mostów, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska, e-mail: siwowski@prz.edu.pl*

Abstract: The CFRP composite materials due to their excellent mechanical properties are more and more often used in civil engineering. In recent more than ten years one could have observed f.e. much more wider application of FRP in bridge construction. The main goal of the ongoing research project was to develop and demonstrate FRP composite bridge girder, including their technical design, material research, manufacturing technique selection and structural testing on full scale model. The objective of the paper is the development and research on a new FRP bridge girder fabricated by VARTM manufacturing technique. The reduced scale prototype girder with the total length of 13,5 m was tested to evaluate its carrying capacity, overall behavior under ultimate static load, as well as modes of failure. The girder met the prescribed serviceability and safety criteria and is likely to be implemented on-site soon for bridge construction. The output of the research project gives a very promising future for the FRP application in bridge engineering.

Keywords: FRP composites, bridge girder, VARTM technique, static test, failure mode