

VII Ogólnopolska Konferencja Mostowców – Konstrukcja i Wyposażenie Mostów

Wisła, 28-29 maja 2015 r.

Tomasz SIWOWSKI¹

Damian KALETA²

Maciej KULPA³

Lech WŁASAK⁴

PROJEKT I BADANIA PIERWSZEGO POLSKIEGO MOSTU Z KOMPOZYTÓW FRP

W pracy przedstawiono niektóre wyniki projektu R&D pn. Com-bridge, którego efektem będzie budowa pierwszego w Polsce mostu drogowego o konstrukcji nośnej z kompozytów FRP. Zakres projektu R&D obejmuje m.in. opracowanie projektu mostu i technologii wytworzenia jego głównych elementów, badania materiałowe oraz badania elementów konstrukcyjnych mostu. Te ostatnie obejmowały m.in. pełnowymiarowy dźwigar główny mostu o długości 22 m, płytę pomostu z betonu lekkiego zbrojoną prętami GFRP, deskowanie tracone w postaci kształtowników i paneli GFRP oraz zespolenie płyty z dźwigarem głównym. W pracy zaprezentowano projekt mostu kompozytowego oraz niektóre wyniki badań. Ich pozytywne rezultaty pozwoliły na rozpoczęcie budowy mostu, który powstanie na jesieni 2015 r. w Błażowej k. Rzeszowa. Uzyskane doświadczenia z projektowania i wytwarzania wielkogabarytowych elementów kompozytowych oraz wyniki badań potwierdziły możliwość dalszej optymalizacji materiałowej konstrukcji kompozytowej, co pozwala z optymizmem patrzeć na rozwój mostów kompozytowych w Polsce.

1. Wprowadzenie

Kompozyty włókniste FRP (ang. *fibre reinforced polymers*) to materiały powstałe 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.: wysoka wytrzymałość, duża sztywność (w przypadku kompozytu z włókien węglowych), doskonała trwałość oraz mała masa konstrukcji, a co za tym idzie łatwość i szybkość budowy obiektu. Od kilkudziesięciu lat te właściwości kompozytów FRP są z powodzeniem wykorzystywane w przemyśle lotniczym, samochodowym i stoczniowym. Pierwsze dziesięciolecie XXI w. przyniosło także znaczące upowszechnienie tych materiałów w budownictwie, w tym w budownictwie mostowym [1]. Dzięki zastosowaniu w obiektach mostowych bardzo wytrzymałych, lekkich i odpornych na korozję elementów z materiałów kompozytowych jest możliwe obecnie znaczące podniesienie ich nośności oraz zwiększenie trwałości i niezawodności.

W Polsce kompozyty FRP szeroko wykorzystuje się w mostownictwie od 1997 r. do wzmocnienia istniejących obiektów [2]. Wybudowano także jedną kładkę technologiczną na terenie zamkniętym [3]. Do dzisiaj nie zbudowano jednak żadnego mostu lub wiaduktu o konstrukcji nośnej z kompozytów FRP. Projekty badawcze, realizowane przez konsorcjum pod kierunkiem Mostostal Warszawa SA i Politechniki Rzeszowskiej stanowią pierwszą krajową próbę zmiany tego stanu rzeczy [4], [5], [6], [7]. W pracy przedstawiono projekt pierwszego polskiego mostu drogowego z kompozytów FRP, który będzie rezultatem projektu badawczego pn. *Com-bridge*, finansowanego przez NCBiR w ramach programu *Demonstrator+* (www.com-bridge.pl). Prezentowana konstrukcja kompozytowa już wkrótce może stać się pełnowartościową alternatywą dla stosowanych powszechnie przeseł ze stali i betonu.

¹ Dr hab. inż., prof. PRz., Politechnika Rzeszowska

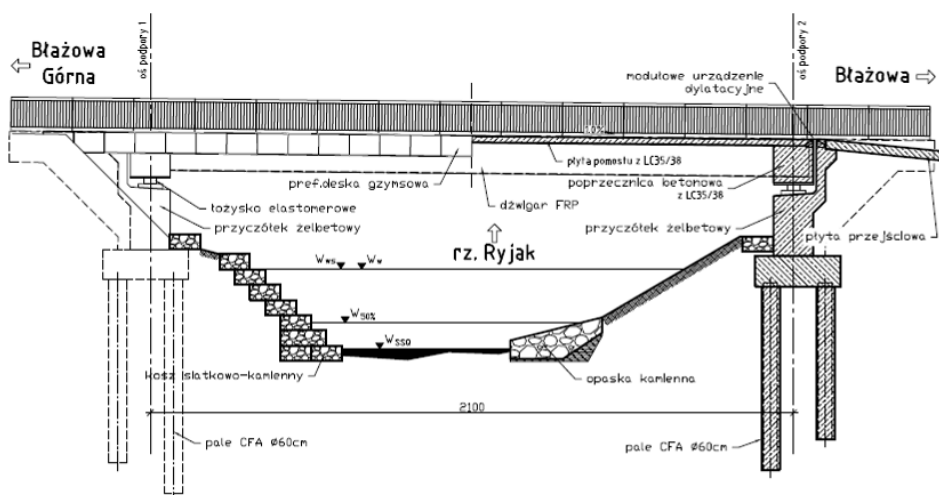
² Mgr inż., Promost Consulting, Rzeszów

³ Mgr inż., Politechnika Rzeszowska

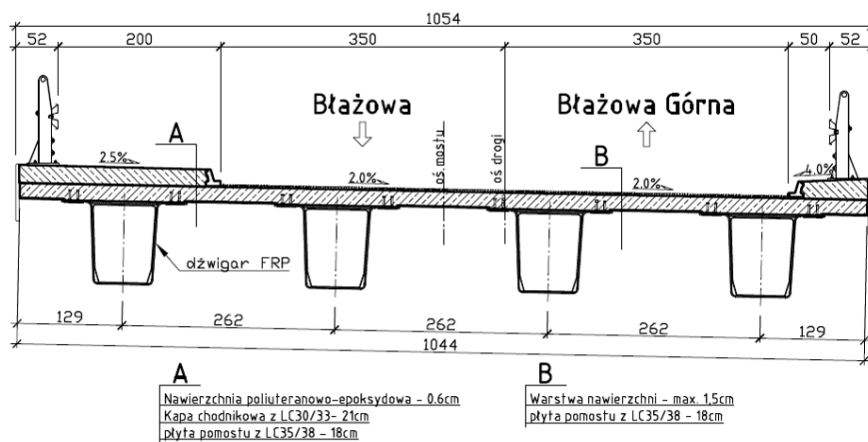
⁴ Mgr inż., Mostostal Warszawa S.A.

2. Opis mostu

Most kompozytowy powstanie w Błażowej k.Rzeszowa. Będzie on obiektem jednoprzęsłowym, swobodnie podpartym, położonym zgodnie z projektowaną niweletą drogi powiatowej w spadku podłużnym 1% (rys. 1). Przęsło mostu zaprojektowano z kompozytowych dźwigarów skrzynkowych, zespolonych z płytą pomostu z betonu lekkiego zbrojonego prętami kompozytowymi GFRP. W przęśle zaprojektowano 4 dźwigary w rozstawie osiowym co 2,62 m (rys. 2). Dźwigary mają wysokość 1,02 m i zmienną szerokość od 0,73 m (pas dolny) do 1,55 m (na wysokości pasów górnych). Dźwigary są usztywnione wewnętrznymi przeponami kompozytowymi w zmiennym rozstawie 1,25 – 2,20 m i stężone dwiema poprzecznicami żelbetowymi, wykonanymi, podobnie jak płyta pomostu, z betonu lekkiego i prętów kompozytowych. Most został zaprojektowany na obciążenia klasy B wg [8].



Rys. 1. Widok z boku i przekrój podłużny mostu



Rys. 2. Przekrój poprzeczny konstrukcji przęsła

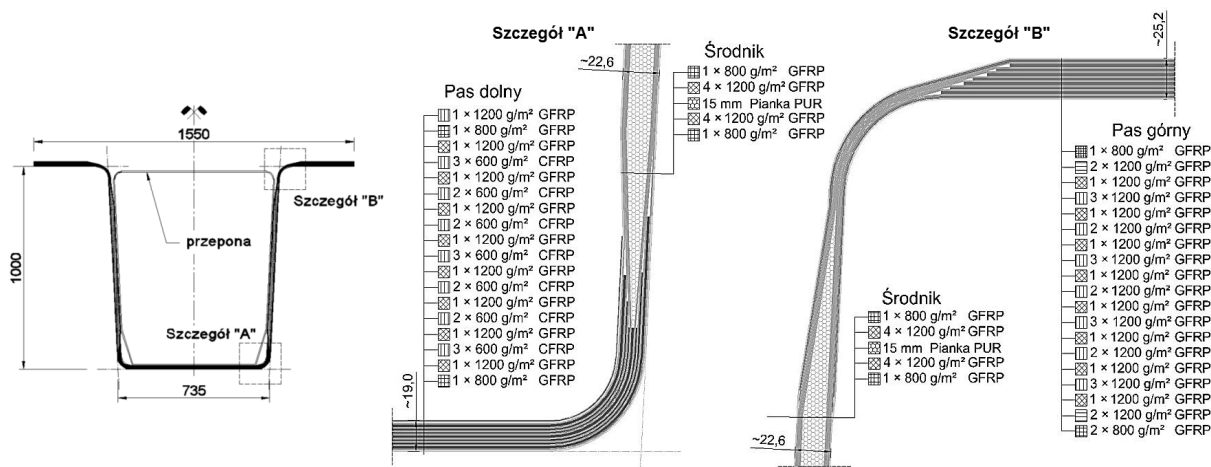
Płyta pomostu o stałej grubości 0,18 m, szerokości 10,44 m i długości 22,30 m, jest zaprojektowana z betonu klasy LC 35/38, zbrojonego dwiema siatkami o boku 0,12 × 0,12 m z prętów GFRP o średnicy 12 mm. Zaprojektowano jednostronne spadki poprzeczne: 2% na szerokości jezdni oraz 2,5 ÷ 4% na chodnikach. Płytę pomostu zespolono z dźwigarami kompozytowymi za pomocą łączników sworzniowych, osadzonych w kompozytowych pasach górnych dźwigarów. Podobne zespolenie wykonano na środnikach dźwigarów w strefie podporowej w celu poprawy sztywności poprzecznej przęsła.

Wyposażenie przęsła składa się z kap chodnikowych, nawierzchni pełniącej jednocześnie rolę izolacji, elementów odwodnienia, urządzeń dylatacyjnych oraz barier mostowych. Na płycie pomostu zostaną wykonane betonowe kapy chodnikowe o grubości 0,21 m, wykonane z betonu lekkiego LC 30/33, zbrojonego dwiema siatkami o boku 0,15 m z prętów GFRP o średnicy 12 mm. Kapy będą ograniczone od strony jezdni krawężnikami polimerobetonowymi o wymiarach 0,20 × 0,18 m, natomiast od strony zewnętrznej deskami gzymsowymi z GFRP o wysokości 0,70 m. Nawierzchnia na jezdni będzie produktem systemowym na bazie wysokoelastycznej żywicy metakrylowej o łącznej

grubości ok. 10 mm. Na kapach chodnikowych przewidziano nawierzchnię poliuretanowo-epoksydową o grubości ok. 6 mm. Odwodnienie pomostu będzie realizowane za pomocą systemu spadków podłużnych i poprzecznych oraz czterech krawężnikowych, polimerobetonowych wpustów mostowych. Z wpustów woda będzie odprowadzana do podwieszonych kolektorów zbiorczych, a następnie za przyczółki do kanalizacji i po podczyszczeniu do rzeki. W płycie pomostu zostaną osadzone jednomodułowe, szczelne urządzenia dylatacyjne, umożliwiające kompensację przesuwów w zakresie ± 40 mm. Ruch pieszych i samochodowy na moście będzie zabezpieczony od strony krawędzi pomostu systemowymi barierami mostowymi o minimalnych parametrach H1/W7.

Podpory mostu zaprojektowano w postaci żelbetonowych przyczółków pełnościennych, posadowionych pośrednio. Korpusy przyczółków o szerokości 10,54 m i wysokości 3,88 m mają grubość 1,30 m. Do korpusów podwieszono skrzydła o długości 3,80 m i grubości 0,40 m. Ze względu na uwarstwione podłoże gruntowe zaprojektowano fundamenty pośrednie w postaci pali wierconych, formowanych w gruncie. Każdy przyczółek będzie posadowionych na 10 palach, rozmieszczonych w dwóch rzędach co 2,20 m, w rozstawie osiowym 1,80 m. Zastosowano pale o średnicy 0,60 m i długości 8,0 m, wykonane z betonu C25/30, zbrojonego dwuteownikami I 450. Pale zwieńczono żelbetowymi ławami fundamentowymi o wymiarach $1,00 \times 2,80 \times 10,86$ m. Za każdym z przyczółków zaprojektowano płyty przejściowe o długości 4,0 m, szerokości 9,0 m i grubości 0,30 m, oparte na wspornikach ukształtowanych w korpusach podpór. Przyczółki wraz ze skrzydłami, ławami fundamentowymi i płytami przejściowymi zaprojektowano z betonu C30/37, zbrojonego stalą A-IIIIN gatunku B500SP.

Głównymi, innowacyjnymi elementami mostu są dźwigary z kompozytu FRP oraz płyta pomostu z betonu lekkiego, zbrojona prętami kompozytowymi GFRP. Oba te elementy współpracują ze sobą w przenoszeniu obciążeń dzięki specjalnemu zespoleniu w postaci łączników sworzniowych. Powstała w ten sposób konstrukcja dźwigara hybrydowego, kompozytowo-betonowego, charakteryzuje się doskonałymi właściwościami wytrzymałościowymi, co wykazały badania prowadzone w ramach projektu *Com-bridge*.

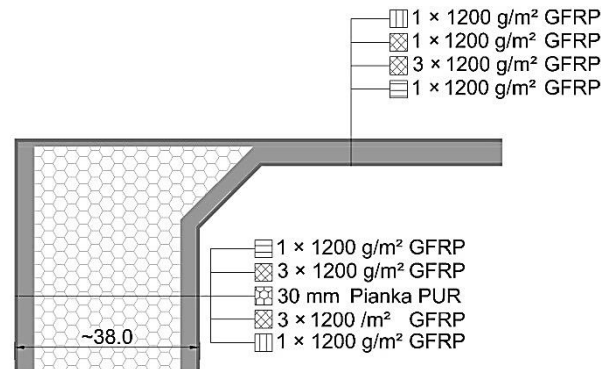


Rys. 3. Budowa laminatów poszczególnych części dźwigara kompozytowego

Dźwigar kompozytowy został zaprojektowany z naprzemiennie ułożonych tkanin z włókien szklanych i węglowych oraz z poliuretanowej pianki wypełniającej (tylko w środkach). Pasy dźwigara składają się z jednokierunkowych tkanin węglowych i szklanych. Pas dolny o nominalnej grubości 19 mm składa się łącznie z 28 warstw tkanin, z czego 60% stanowią tkaniny węglowe (rys. 3). Tkaniny węglowe zapewniają wysoką wytrzymałość pasa dolnego oraz wymaganą sztywność dźwigara. Są jednak znacznie droższe od tkanin szklanych, dlatego ich ilość w konstrukcji została dobrana w zależności od stopnia wyężenia danej strefy dźwigara. Mniej wytrzymałe tkaniny szklane tworzą pas górny o nominalnej grubości 23 mm, składający się łącznie z 32 warstw (rys. 3). Jego grubość i układ tkanin zaprojektowano na obciążenia w I fazie (betonowanie płyty pomostu), a stanem krytycznym była stateczność pasa przed zespoleniem z płytą. Po związaniu betonu dźwigar pracuje w II fazie, oś obojętna przesuwana się na wysokość płaszczyzny zespolenia, a funkcję pasa ściskanego przejmuje płyta betonowa.

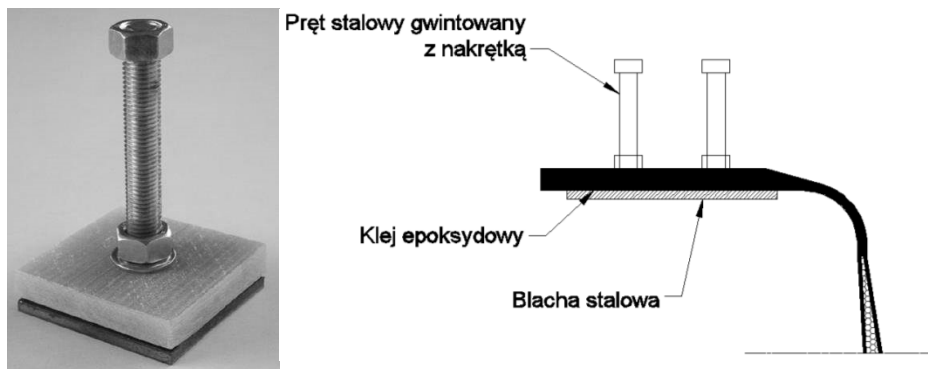
Środek dźwigara o nominalnej grubości 23 mm jest zbudowany łącznie z 10 warstw dwukierunkowych tkanin szklanych, ułożonych pod kątem $\pm 45^\circ$ do osi podłużnej (rys. 3). Tkaniny

rozdzielone są w środku grubości środnika wkładką z pianki PUR o grubości 15 mm, nadającej konstrukcji środnika charakter płyty warstwowej (sandwich). Zastosowanie pianki ma na celu zwiększenie wytrzymałości kompozytu na ścinanie, zapewnienie odpowiedniej wielokierunkowej sztywności środnika, a także zmniejszenie zużycia tkanin szklanych. Tkaniny szklane ze środnika wchodziły płynnie w pas górny i dolny dźwigara, tworząc dodatkowe zbrojenie stref jego załomów i umożliwiając łagodny transfer siły poprzecznej. Zbliżoną do środnika budowę mają także przepony wewnętrzne o nominalnej grubości 38 mm. Kompozyt przepon składa się z 8 warstw dwukierunkowych tkanin szklanych, przedzielonych w środku 30 mm warstwą z pianki PUR (rys. 4).



Rys. 4. Budowa przepon wewnętrznych

Tkaniny węglowe i szklane w poszczególnych elementach stanowią zbrojenie kompozytu FRP, które jest przesączane żywicą epoksydową (tzw. matrycą) w procesie infuzji. Infuzja to obecnie jedna z dwóch głównych, obok pultruzji, metod produkcji elementów kompozytowych, stosowanych w budownictwie mostowym. Współcześnie infuzja stosowana jest z wykorzystaniem tzw. worka próżniowego, a unowocześniona metoda produkcji nosi nazwę VARTM (ang. *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*). Lider projektu *Com-bridge*, Mostostal Warszawa S.A. ma bardzo duże doświadczenie w wytwarzaniu wielkogabarytowych elementów mostowych z wykorzystaniem tej metody [9]. To zdecydowało o jej zastosowaniu w realizacji mostu kompozytowego.



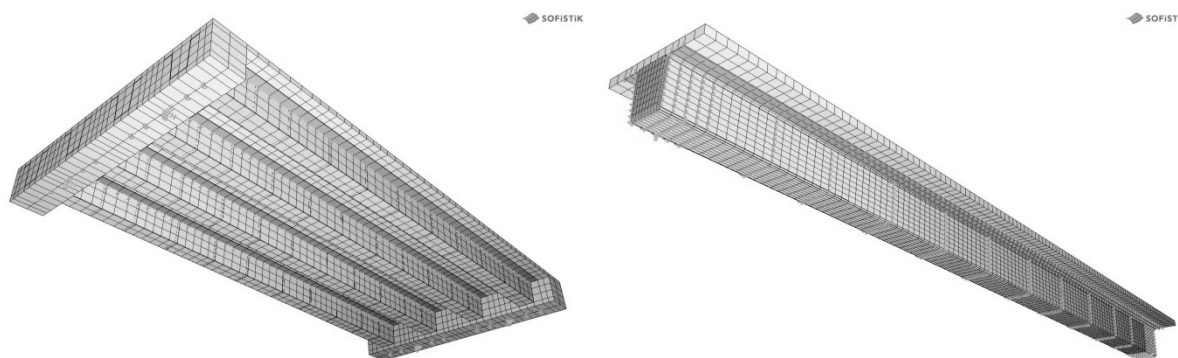
Rys. 5. Elementy składowe połączenia sworzniowego pomiędzy płytą pomostu a dźwigarem kompozytowym

Do wykonania płyty pomostowej przewidziano zastosowanie kolejnych dwóch innowacyjnych materiałów, dość rzadko jeszcze stosowanych w budownictwie mostowym w Polsce: betonu lekkiego oraz prętów kompozytowych GFRP do zbrojenia betonu. Beton lekki będzie wykonany z kruszywa popiołoporytowego *Pollytag* oraz cementu niskoalkalicznego. Jego receptura oraz trwałość eksploatacyjna została już kilkakrotnie sprawdzona przy remontach i modernizacjach mostów w Polsce [10]. Natomiast nie było dotychczas w kraju żadnego zastosowania prętów kompozytowych do zbrojenia betonowych elementów nośnych w obiekcie mostowym. Tymczasem, jak wykazały doświadczenia kanadyjskie i amerykańskie, użyteczność płyt pomostowych (ugięcia, zarysowanie), które są oparte na dźwigarach głównych w rozstawie nieprzekraczającym 2,50 m jest dobra, mimo że pręty kompozytowe cechuje dużo niższa sztywność niż pręty stalowe [11]. Dlatego, chcąc uzyskać płytę pomostu o trwałości zbliżonej do dźwigarów kompozytowych, zdecydowano o ich zastosowaniu w projekcie *Com-bridge*. Zaprojektowano pręty kompozytowe GFRP o średnicy 12 mm, wykonane z włókien szklanych typu S oraz żywicy epoksydowej.

Nośność i trwałość zaprojektowanego mostu w dużej mierze będzie zależęć od skuteczności zespolenia betonowej płyty pomostu z dźwigarami kompozytowymi. Założenie o zespoleniu i pełnej współpracy płyty i dźwigarów (przekrój zespolony) pozwoliło na dużą optymalizację materiałową kompozytów w pasach i środnikach dźwigara. Zespolenie zaprojektowano w postaci łączników sworzniowych, które będą wykonane ze śrub klasy 4.8 o średnicy 20 mm z podwójnymi nakrętkami. Sworznie śrub będą jednostronnie zgrzewane do płaskowników stalowych, klejonych następnie od spodu do pasów górnych dźwigarów kompozytowych (rys. 5). Stalowe elementy zakotwień będą zabezpieczone przed korozją przez metalizację.

3. Analiza numeryczna

Wymiary głównych elementów nośnych przęsła, dobrane wstępnie na podstawie wcześniejszych doświadczeń realizatorów projektu, zostały szczegółowo sprawdzone w toku analiz statyczno-wytrzymałościowych, bazujących na procedurach i normach wykorzystywanych w innych krajach do projektowania konstrukcji kompozytowych. Dla potrzeb tych analiz zostały wykonane dwa modele numeryczne MES w programie *SOFiSTiK*: przestrzenny model całej konstrukcji przęsła (klasa e2+e3-p3) oraz model kompozytowego dźwigara głównego, zespolonego z betonową płytą pomostu (klasa e2+e3-p3) (rys. 6). W obu modelach zastosowano czterowęzłowe elementy powierzchniowe do modelowania laminatów (tj. poszczególnych kompozytów) oraz ośmiowęzłowe elementy bryłowe do modelowania elementów betonowych. Zespolenie pomiędzy dźwigarem kompozytowym a płytą betonową i poprzecznicami uzyskano poprzez opis elementów skończonych na wspólnej siatce węzłów w poziomie styku elementów.



Rys. 6. Modele numeryczne: model globalny całej konstrukcji przęsła (po lewej), model lokalny pojedynczego dźwigara (po prawej);

Tablica 1. Stałe służące do opisu pojedynczych lamin

Rodzaj użytej tkaniny	Stałe inżynierskie				Charakterystyki wytrzymałościowe				
	E_x [GPa]	E_y [GPa]	G_{xy} [GPa]	ν_{xy} [-]	f_{tx}	f_{cx}	f_{ly}	f_{cy}	f_{xy}
węglowa jednokierunkowa 0°	111,9	5,7	3,32	0,382	1159	464	11,9	93,6	21,8
szklana jednokierunkowa 0°	41,5	10,5	2,71	0,294	855	537	43,8	93,6	25,7
szklana dwukierunkowa 0°/90°		19,6	2,83	0,031	522	321	522	321	25,9

Budowę poszczególnych laminatów odwzorowano w modelach bardzo dokładnie dzięki wykorzystaniu elementów skończonych, w których możliwy był opis 10 pojedynczych warstw każdego kompozytu (tzw. lamin). Ponieważ laminaty pasów dźwigara składały się z większej liczby lamin, dlatego posłużono się definicją klasy zagnieżdżonej, tzn. zdefiniowano pomocniczy materiał warstwowy składający się z wybranych lamin, po czym użyto go do definicji docelowego kompozytu jako pojedynczą laminę o wypadkowych właściwościach. Do opisu poszczególnych lamin wykorzystano parametry materiałowe, uzyskane na podstawie badań na próbkach o grubości 2 mm i szerokości 20 mm, wykonanych w Uczelnianym Centrum Badawczym "Materiały Funkcjonalne" Politechniki Warszawskiej, będącym partnerem projektu *Com-bridge*. Wyznaczono

parametry dla 3 rodzajów tkanin, wykorzystanych w budowie kompozytów: jednokierunkowej tkaniny węglowej, jednokierunkowej tkaniny szklanej oraz dwukierunkowej tkaniny szklanej. Parametry tych trzech materiałów, przyjęte w modelach numerycznych, przedstawiono w tab. 1. Natomiast charakterystyki materiałowe elementów płyty pomostu i zespolenia zostały zestawione w tab. 2. Parametry prętów kompozytowych zostały wyznaczone na podstawie badań wytrzymałościowych, natomiast pozostałe dane zostały przyjęte na podstawie norm przedmiotowych.

Jako główne kryterium projektowe, stosowane przy doborze liczby i rodzaju tkanin poszczególnych laminatów, przyjęto graniczną wartość dopuszczalnego ugięcia przęsła w środku rozpiętości. Na podstawie zaleceń projektowych [12] przyjęto wartość $L/300$, co w przypadku projektowanego mostu wynosiło 70 mm. W pierwszym etapie obliczeń wykonano analizę statyczną na modelu całego przęsła (rys. 6). Wyznaczono siły wewnętrzne w poszczególnych elementach konstrukcji oraz przemieszczenia pionowe i poziome pod zadaniem obciążenia normowych, zakładając dwufazowość wykonania przęsła. Wartości przemieszczeń pionowych, wywołane charakterystycznym obciążeniem zmiennym, posłużyły do wstępnej optymalizacji budowy kompozytów i dźwigarów. Korzystając z wyników analizy globalnej przęsła, wyznaczono wartość obciążenia zmiennego przypadającego na pojedynczy, najbardziej obciążony dźwigar.

Tablica 2. Charakterystyki materiałów elementów płyty pomostu

Materiał	Ciężar jednostkowy [kN/m ³]	Wytrzymałość charakterystyczna			Moduł Younga [GPa]
		rozciąganie [MPa]	ściskanie [MPa]	ścianianie [MPa]	
Beton lekki LC33/38	19,0	2,82	35,0	-	21,5
Stal konstrukcyjna S355	78,5	355	355	205	210
Stal klasy 4.8 (sworznie)	78,5	314	314	220	210
Pręty kompozytowe	-	1018	775	-	57,8

W drugim etapie obliczeń wykorzystano znacznie bardziej złożony model numeryczny pojedynczego dźwigara, w którym zagęszczono siatkę elementów skończonych i wykorzystano analizę nieliniową w zakresie geometrii (rys. 6). Pozwoliło to na wyznaczenie nośności poszczególnych elementów z uwzględnieniem zagadnień nieliniowych geometrycznie (stateczność miejscowa pasów górnych podczas fazy betonowania, stateczność miejscowa środników w fazie użytkowej). Bazując na obliczeniowych wartościach sił wewnętrznych uzyskanych dla modelu pojedynczego dźwigara (z uwzględnieniem etapów budowy przęsła) wyznaczono maksymalne siły wewnętrzne w poszczególnych jego elementach, a następnie przeprowadzono szczegółową analizę wytrzymałościową laminatów.

Analizę wytrzymałościową poszczególnych kompozytów rozpoczęto od wyodrębnienia pojedynczych lamin, a następnie stosując teorię płyt cienkich (tzw. hipotezę *Kirchhoffa-Love'a*) wyznaczono macierze sztywności i podatności dla poszczególnych lamin w układzie osiowym względem osi głównych dźwigara oraz w układzie po obrocie o kąt zgodny z kierunkiem ułożenia włókien. Pozwoliło to na wyznaczenie dla każdego laminatu macierzy sztywności: tarczowej, sprzężeń i zginania. Dysponując wartościami sił wewnętrznych, wyznaczonych na modelu numerycznym dźwigara, obliczono odkształcenia i naprężenia zarówno w płaszczyźnie środkowej całego laminatu, jak i w płaszczyznach środkowych poszczególnych jego lamin. Na podstawie obliczonych wartości naprężeń w kierunkach pokrywających się z osiami materiałowymi dla wszystkich wyodrębnionych lamin, przeprowadzono analizę wytrzymałościową w oparciu o trzy wybrane kryteria, najczęściej stosowane w projektowaniu konstrukcji kompozytowych. Są to: kryterium maksymalnych naprężeń, kryterium *Azzi'ego-Tsai'a-Hill'a* oraz kryterium *Tsai'a-Wu* [13]. W analizie przyjęto średnie wytrzymałości poszczególnych lamin wg tab. 1, zmodyfikowane za pomocą materiałowych współczynników bezpieczeństwa γ_m , przyjętych wg zaleceń [12]. Współczynniki te uwzględniają takie efekty jak pęcznienie kompozytu, degradację nośności w czasie, wahania temperatury czy absorpcję wilgoci. Dla lamin z włóknami szklanymi przyjęto współczynnik $\gamma_m = 3,9$ a dla włókien węglowych $\gamma_m = 3,25$.

Porównując wyznaczone wartości naprężeń oraz obliczeniowe wartości wytrzymałości laminatów, odniesione do ich osi materiałowych, oceniono globalne bezpieczeństwo dźwigara ze względu na zniszczenie materiału kompozytowego. Wybrany sposób analizy (teoria płyt cienkich) wymusił założenie o braku zniszczenia laminatu w wyniku ścięcia międzypłaszczyznowego. Nośność kompozytu jest zapewniona w przypadku, gdy stosunek wartości naprężeń do wytrzymałości laminatów jest $\leq 1,0$. Wyniki takiego porównania dla lamin leżących w płaszczyznach środkowych poszczególnych laminatów przedstawiono w tab. 3. Jak wynika z porównania, w żadnym sprawdzanym laminacie nie przekroczono wartości 1,0, co świadczy o poprawności doboru liczby i orientacji tkanin zbrojących laminaty. Decydujący o nośności dźwigara pas dolny został zbudowany optymalnie. Natomiast w przypadku laminatów pasów górnych i środników o ich stanach granicznych decydują inne warunki niż nośność przekroju, np. stateczność pasa górnego (ściskanego) w czasie betonowania czy stateczność miejscowa środników w strefach podporowych. Obliczenia MES z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej wykazały m.in. konieczność zmniejszenia rozstawu przepon w strefie podporowej i zwiększenia ich sztywności poprzez dodanie warstwy pianki wypełniającej przekrój poprzeczny przepon.

Tablica 3. Wytyczenie laminatów dźwigara głównego pod działaniem obliczeniowych sił wewnętrznych

Kryterium wytrzymałościowe	Element		
	Pas dolny (jednokierunkowe włókna węglowe)	Pas górny (jednokierunkowe włókna szklane)	Środek (dwukierunkowe włókna szklane)
Maksymalne naprężenie	0,981	0,262	0,371
<i>Azzi-Tsai-Hill</i>	0,984	0,263	0,626
<i>Tsai-Wu</i>	0,952	0,268	0,549

4. Badania elementów przęsła

Ze względu na prototypowy charakter przęsła mostu podstawowe założenia projektowe oraz główne wyniki obliczeń zostały poddane weryfikacji podczas badań wytrzymałościowych wybranych elementów mostu w skali 1:1. Weryfikacji doświadczalnej poddano następujące elementy konstrukcji przęsła:

- płytę pomostu z betonu lekkiego, zbrojonego prętami FRP;
- połączenie płyty pomostu z dźwigarem głównym (zespolecie),
- system kompozytowego deskowania traconego dla płyty pomostu;
- kompozytowy dźwigar główny, zespolony z betonową płytą pomostu.

Wszystkie badania wytrzymałościowe przeprowadzono w akredytowanym Wydziałowym Laboratorium Badań Konstrukcji WBIŚiA PRz. Elementy przęsła badano głównie pod obciążeniem statycznym, na różnych projektowych poziomach obciążenia: charakterystycznym, obliczeniowym oraz niszczącym. W przypadku płyty pomostu oraz zespolenia przeprowadzono również badania zmęczeniowe, pozwalające potwierdzić wymaganą trwałość zmęczeniową tych elementów. Podczas badań symulowano normowe układy obciążenia poszczególnych elementów przęsła wg normy europejskiej [14]. Wyniki badań porównano z wynikami analiz numerycznych dla poszczególnych elementów przęsła, weryfikując m.in. ich nośność, sztywność, trwałość zmęczeniową lub inne kluczowe parametry. W przypadku dźwigara kompozytowego przewidziano również pełne badania dynamiczne (modalne).

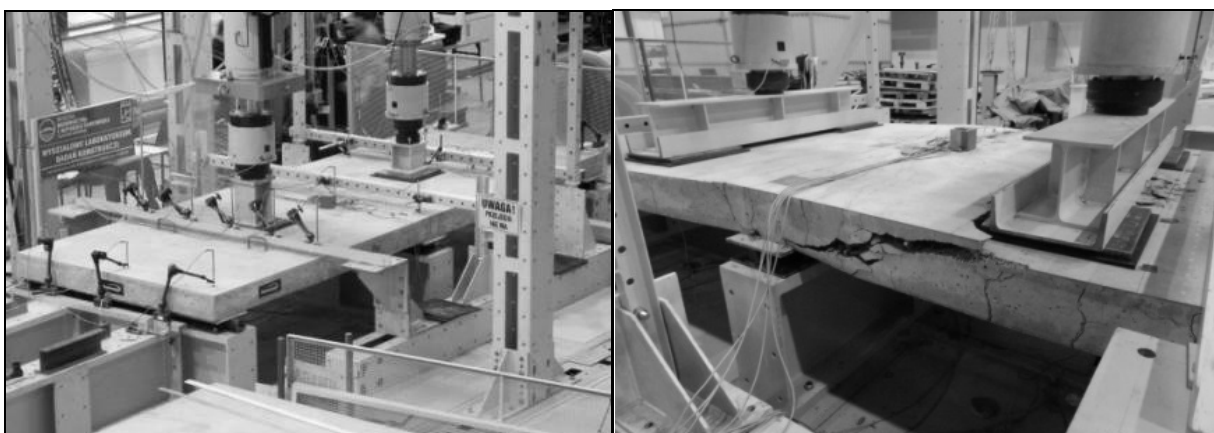
4.1. Badania płyty pomostu

Celem badań było potwierdzenie m.in. wymaganej sztywności, nośności granicznej oraz trwałości zmęczeniowej płyty pomostu. Badania przeprowadzono na trzech pełnowymiarowych modelach płyty (M1 do M3) o rzeczywistej grubości 0,18 m i projektowym układzie zbrojenia prętami GFRP. Wymiary wszystkich płyt wynosiły 1,90 × 5,10 m. Badania laboratoryjne modeli M1 i M3 przeprowadzono w zbliżonym do docelowego, dwuprzęsłowym układzie statycznym: 2 x 2,40 m. badania modelu M2 przeprowadzono w powiększonym układzie jednoprzęsłowym o rozpiętości 4,80 m. W przypadku modeli M1 i M2 badania miały charakter quasi-statyczny do zniszczenia, model M3 został poddany obciążeniu cyklicznemu (zmęczeniowemu). Obciążenie statyczne symulowały dwa modele

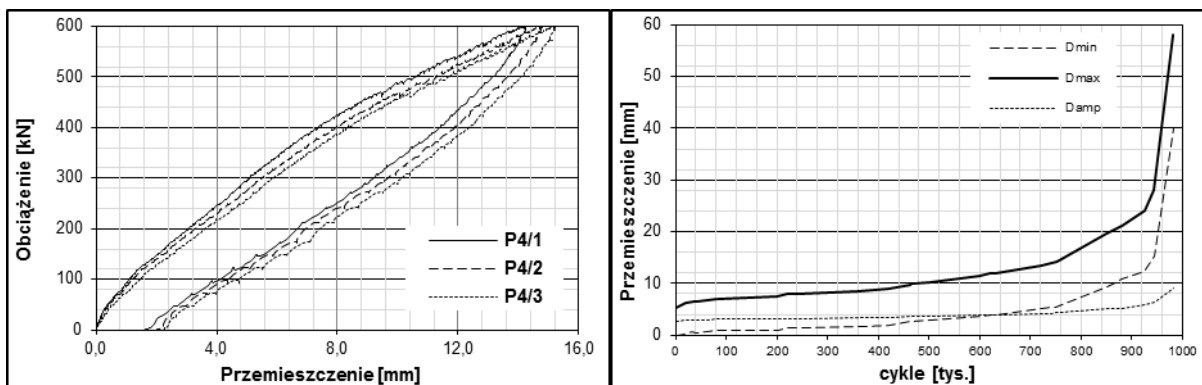
obciążeniowe LM1 i LM2 wg normy [14], natomiast zakres zmienności obciążenia w badaniach zmęczeniowych został ustalony na podstawie sił wewnętrznych w docelowym moście, wywoływanych przejazdem pojazdu FLM1 według normy [14].

Sprawdzenie sztywności płyty obejmowało pomiar maksymalnego jej przemieszczenia pionowego (ugięcia) pod normowym obciążeniem charakterystycznym w środku rozpiętości przęseł płyty w schemacie dwuprzęsłowym. Uzyskano maksymalne przemieszczenie o wartości 5,2 mm, co jest blisko dwukrotnie mniejsze niż projektowa wartość dopuszczalna ($L / 240$), wynosząca 10 mm.

Jako maksymalne obciążenie niszczące płytę przyjęto jako siłę, przy której następowało zniszczenie betonu związane z przekroczeniem nośności na rozciąganie przy przebiciu lub zginaniu wraz z utratą przyczepności prętów GFRP do betonu (rys. 7). Na podstawie uzyskanych wartości obciążenia niszczącego w poszczególnych modelach i układach obciążenia, wyznaczono nośność graniczną płyty. Uzyskane z badań wartości porównano z siłami wewnętrznymi, wywoływany charakterystycznym obciążeniem normowym, przyjętym do projektowania mostu. Minimalna wartość stosunku uzyskanej siły wewnętrznej (momentu zginającego lub siły poprzecznej) podczas badań do wartości wywoływanej obciążeniem normowym wyniosła 2,33. Wartość tą można traktować jako globalny współczynnik bezpieczeństwa dla płyty pomostu. Jest on ok. 15% większy od typowej dla mostów wartości ok. 2,0.



Rys. 7. Badania płyty pomostu: po lewej model na stanowisku badawczym, po prawej postać zniszczenia modelu M1



Rys. 8. Przemieszczenia w środku rozpiętości: podczas badań statycznych (po lewej) oraz badań zmęczeniowych (po prawej);

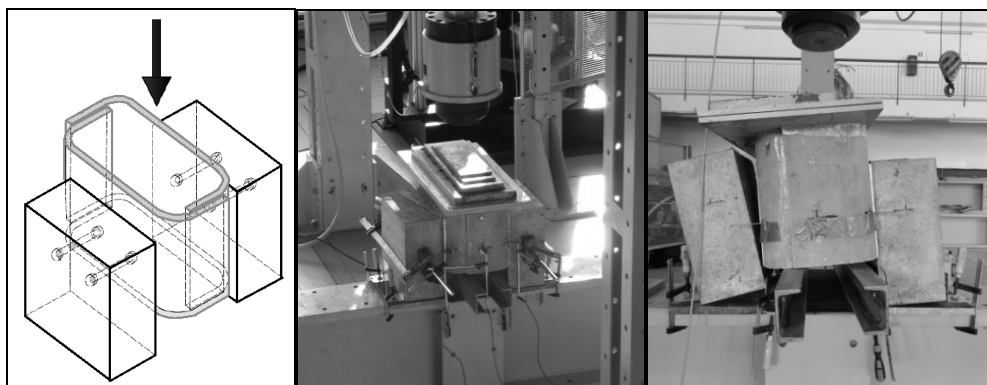
Podczas badań zmęczeniowych obciążenie było cyklicznie przykładane w układzie dwuprzęsłowym ze współczynnikiem niesymetryczności cyklu $R = 0,1$. W czasie badań przykładane obciążenie wywoływało moment zginający równy momentowi w docelowym układzie konstrukcyjnym od przejazdu pojazdu FLM1 z obciążeniem 210 kN na pojedynczą oś. Płyta pomostu uległa zniszczeniu po 980 tys. cykli obciążenia. Jest to wartość blisko dwukrotnie mniejsza niż liczba cykli (2 mln) potrzebna do potwierdzenia nieograniczonej nośności zmęczeniowej płyty pomostu z zastosowaniem modelu zmęczeniowego FLM1 według normy [14]. Jako nośność zmęczeniową płyty przyjęto wykładniczy przyrost przemieszczeń środka płyty przy wykruszaniu się betonu w strefie rozciąganej w pobliżu środka przęsła (rys. 8).

Badania płyty pomostu potwierdziły uzyskanie wymaganej sztywności i odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa. Jednocześnie przy wartości obciążenia 210 kN na oś w modelu FLM1 [14] badania nie potwierdziły nieograniczonej nośności zmęczeniowej tego elementu przęsła mostu. W rzeczywistości

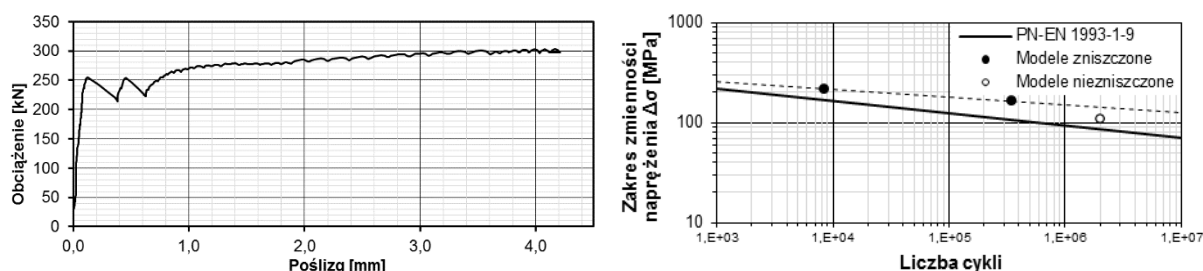
jednak obciążenie eksploatacyjne płyty (przy nośności obiektu do 40 t według [8]) będzie znacząco mniejsze, dlatego przyjęto wyniki zmęczeniowych badań zadowalające.

4.2. Badania połączenia płyty z dźwigarem głównym (zespoleńia)

Celem badań zespoleńia dźwigarów kompozytowych i płyty betonowej było doświadczalne potwierdzenie projektowej nośności zespoleńia (siły ścinającej) oraz jego trwałości zmęczeniowej. Badania przeprowadzono na modelach połączenia, które składały się z betonowych bloków zewnętrznych, zbrojonych siatką prętów kompozytowych oraz wewnętrznego elementu kompozytowego o budowie odpowiadającej pasom górnym dźwigara. W pojedynczym modelu umieszczono 4 sworznie stalowe, których wymiary i sposób zamocowania odwzorowywały stan projektowany. Łącznie zbadano 6 modeli, w tym 3 na obciążenie statyczne oraz 3 na obciążenie zmęczeniowe (rys. 9).



Rys. 9. Badania modeli zespoleńia, od lewej: schemat badania, model na stanowisku badawczym oraz postać zniszczenia po ścięciu sworzni;



Rys. 10. Wyniki badań modeli połączenia: po lewej średnia wartość poślizgu, po prawej krzywa wytrzymałości zmęczeniowej;

Podczas badań mierzono m.in. przemieszczenie pomiędzy elementem kompozytowym a blokami betonowymi, interpretowane jako poślizg w połączeniu. Jak pokazały badania, w całym zakresie obciążeń projektowych (0 - 154 kN) połączenie charakteryzowało się sprężystą pracą (rys. 10). Przy sile ścinającej o wartości ok. 250 kN następował poślizg na styku betonu i kompozytu, a sworznie zaczynały pracować w zakresie nieliniowym. Przy sile niszczącej wynoszącej ok. 300 kN następowało ścięcie sworzni stalowych. Jest to wartość blisko 2-krotnie wyższa od projektowanej nośności połączenia.

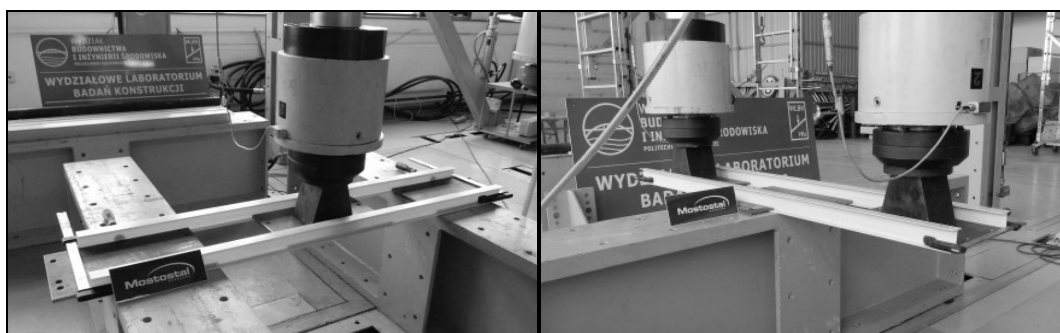
Podczas badań zmęczeniowych obciążenie było przykładane ze współczynnikiem asymetrii cyklu $R = 0,1$. Zakres zmienności siły był różny dla trzech badanych połączeń i wynosił kolejno ok. 65%, 50% i 35% średniego obciążenia niszczonego, uzyskanego w badaniach statycznych. Dwa pierwsze spośród badanych modeli uległy zniszczeniu przy 8 oraz 349 tys. cykli obciążenia, w trzecim przekroczono granice 2 mln cykli i badanie przerwano. W obu zniszczonych modelach zniszczenie nastąpiło przez oderwanie trzpienia sworznia od blachy stalowej w miejscu spoiny obwodowej (karb). Uzyskane wyniki w odniesieniu do naprężeń ścinających w trzpieniu sworznia odniesiono do krzywej normowej dla tego typu karbu według PN-EN 1993-1-9 [15] (rys. 10). Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że zaprojektowane połączenie ma wyższą kategorię zmęczeniową niż dopuszczalna wartość normowa, czyli jego trwałość zmęczeniowa także będzie wystarczająco wysoka.

Badania zespoleńia sworzniowego dźwigara i płyty potwierdziły projektową nośność i odpowiednią trwałość zmęczeniową połączenia.

4.3. Badania kompozytowego deskowania traconego

Celem badań było sprawdzenie nośności i sztywności elementów deskowania traconego, zaprojektowanego w celu przeniesienia ciężaru mokrego betonu i uformowania płyty pomostu. W projektowanym moście płyta zostanie wykonana bez rusztowań. Na dźwigarach głównych zostanie wykonany system szalunkowy, składający się z ułożonych poprzecznie kształtowników kompozytowych oraz płyt warstwowych z rdzeniem piankowym. Od sztywności i nośności tych elementów zależy poprawność wykonania płyty. Zaprojektowano dwuteowniki z GFRP o wysokości 60 mm, wykonywane metodą pultruzji. Kształtowniki stanowiące główny element nośny systemu deskowania będą przyklejane do pasów górnych dźwigarów. Pomiędzy nimi będą montowane panele z płyt warstwowych.

Badaniom wytrzymałościowym poddano kształtowniki w dwóch schematach: przęsłowym (symulując strefę pomiędzy dźwigarami) oraz wspornikowym (symulując strefę podchodnikową) (rys. 11). Obciążenie zostało przyłożone do pasów dolnych dwuteowników w sposób analogiczny, w jaki zostaną oparte na nich panele kompozytowe szalunku. Najmniejszy stosunek siły niszczącej do siły obliczeniowej, wywoływanej mieszanką betonową uzyskano w strefie międzydźwigarowej i wynosił on 2,53. Maksymalne ugięcie pionowe kształtownika pod wartością obciążenia adekwatną obciążeniu mokrym betonem wynosiło 6,4 mm w strefie międzydźwigarowej i 5,3 mm na końcach wspornika. Są to wielkości znacznie mniejsze niż tolerancje szalunku, dopuszczalne przy betonowaniu płyty pomostu.



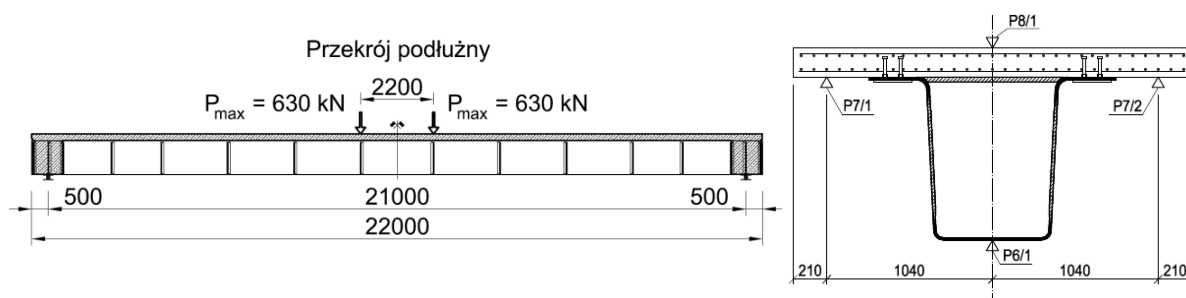
Rys. 11. Badania systemu szalunkowego: po lewej schemat przęsłowy, po prawej schemat wspornikowy;

4.4. Badania kompozytowego dźwigara głównego

Ostatnim etapem podsumowującym eksperymentalną weryfikację zaprojektowanej konstrukcji przęśla będą badania niszczące pełnowymiarowego (w skali 1:1) dźwigara kompozytowego, zespolonego z betonową płytą pomostu. Badania przewidziano pod koniec kwietnia 2015 r. Z uwagi na przyjętą technologię wykonania płyty pomostu, etap betonowania odbywał się przy niepodpartym dźwigarze głównym, ustawionym jedynie na docelowych łożyskach. Betonowanie wykonano w hali laboratoryjnej, gdzie dźwigar kompozytowy był poddany ciągłemu monitoringowi w zakresie przemieszczeń i odkształceń (rys. 12).



Rys. 12. Dźwigar kompozytowy: od lewej: transport do hali laboratoryjnej, ustawienie na docelowych łożyskach oraz etap betonowania płyty pomostu;



Rys. 13. Dźwigar kompozytowy podczas badań wytrzymałościowych: po lewej schemat obciążenia, po prawej lokalizacja punktów pomiaru przemieszczeń w przekroju środkowym

Badania wytrzymałościowe dźwigara zostaną przeprowadzone po uzyskaniu przez beton pełnej wytrzymałości. Przed wykonaniem badań statycznych zaplanowano badania modalne, pozwalające ustalić charakterystyki dynamiczne dźwigara, w tym m.in. częstotliwości oraz postacie drgań własnych. W zakresie obciążeń statycznych zaplanowano przyłożenie obciążenia zewnętrznego o wartościach wywołujących charakterystyczne i obliczeniowe wartości sił wewnętrznych (moment zginający i siłę poprzeczną) w docelowym dźwigarze od ciężaru elementów wyposażenia i obciążenia ruchomego klasy B wg [8]. Po pozytywnej weryfikacji nośności i sztywności dźwigara przy obciążeniu projektowym nastąpi obciążenie do zniszczenia. Maksymalne obciążenie, które może być przyłożone do dźwigara wynosi 2×630 kN, co pozwala na uzyskanie ponad dwukrotnie większego momentu zginającego niż obciążenie projektowe od obciążeń całkowitych. Planowany schemat badawczy wraz z lokalizacją niektórych punktów pomiarowych pokazano na rys. 13.

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono projekt pierwszego polskiego mostu drogowego, którego konstrukcja nośna będzie wykonana z kompozytów FRP. Obiekt został zaprojektowany na obciążenia normowe klasy B według normy [8], co odpowiada dopuszczeniu do ruchu po nim pojazdów o ciężarze całkowitym do 40 t. Do innowacyjnych elementów mostu, poza dźwigarami głównymi z kompozytów FRP, należą także: płyta pomostu z betonu lekkiego, zbrojonego prętami GFRP oraz kompozytowy system szalunków traconych.

Z uwagi na prototypowy charakter mostu, wszystkie elementy nośne przęsła oraz ich połączenia zostały poddane badaniom wytrzymałościowym w warunkach laboratoryjnych. Uzyskane do tej pory wyniki badań potwierdziły nośność i sztywność poszczególnych elementów i świadczą o poprawności przyjętych rozwiązań projektowych. Ostatnim etapem, który zostanie wykonany przed rozpoczęciem budowy mostu będą badania wytrzymałościowe pełnowymiarowego dźwigara kompozytowego zespolonego z płytą pomostu (koniec kwietnia 2015 r.). Badania statyczne i dynamiczne 22-metrowego dźwigara będą ostatecznym potwierdzeniem projektowanych parametrów mostu w zakresie nośności, sztywności oraz charakterystyki dynamicznej przęsła. Ostatnim, a jednocześnie głównym elementem projektu *Com-bridge* będzie budowa mostu demonstracyjnego w miejscowości Błazowa k. Rzeszowa w czerwcu 2015 r. Gotowy most zostanie poddany próbnemu obciążeniu statycznemu i dynamicznemu, a także monitoringowi, który planowany jest w okresie pierwszego roku eksploatacji mostu.

Projekt mostu oraz przedstawione badania zostały zrealizowane w ramach przedsięwzięcia pilotażowego pn.: *Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej DEMONSTRATOR+ pt.: „COMBRIDGE – Innowacyjny most drogowy z kompozytów FRP”* (umowa nr UOD-DEM-1-041-/001). Projekt jest realizowany przez konsorcjum naukowe pod kierunkiem Mostostalu Warszawa SA oraz jest współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- [1] ZOBEL H., KARWOWSKI W., SARNOWSKA J., WRÓBEL M. Nowa generacja mostów. Mosty z kompozytów polimerowych - cz.II. Magazyn Autostrady, Nr 5, 54-63, 2004.
- [2] SIWOWSKI T., RADOMSKI W.: Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu. Inżynieria i Budownictwo, nr 7/1998.
- [3] ZOBEL H., KARWOWSKI W., WRÓBEL M.: Kładka z kompozytu polimerowego zbrojonego włóknem szklanym. Inżynieria i Budownictwo, nr 2/2003.
- [4] KULPA M., SIWOWSKI T., Badania pomostów kompozytowych do zastosowań w mostach drogowych. Budownictwo i Architektura, Vol. 13(2), 2014, s.231-238.

- [5] PONETA P., KULPA M., WŁASAK L., SIWOWSKI T., Koncepcja i badania innowacyjnego dźwigara mostowego z kompozytów FRP. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 3/2014, rok LXX, s.147-151.
- [6] PONETA P., SIWOWSKI T., Badania dźwigara mostowego z kompozytów FRP pod obciążeniem statycznym. *Budownictwo i Architektura*, Vol. 13(2), 2014, s.291-298.
- [7] SIWOWSKI T., KULPA M., PONETA P., Badania nad zastosowaniem kompozytów FRP do budowy mostów w Polsce. *Materiały Budowlane*, nr 11, 2014, s.58-60.
- [8] PN-85/S-10030. *Obiekty mostowe. Obciążenia*. Warszawa, 1985.
- [9] PONETA P., SIWOWSKI T., Technologie wytwarzania dźwigarów mostowych z kompozytów FRP. Seminarium pn.: „Współczesne technologie budowy mostów”. Politechnika Wrocławska, 27-28 listopada, 2014. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, s. 361-368.
- [10] SIWOWSKI T., Przykłady zastosowań betonów niekonwencjonalnych w polskim mostownictwie. *Geoinżynieria – drogi, mosty, tunele*, Vol. II, nr 4/2005, s. 40-46.
- [11] MOSSAKOWSKI P., Pręty z kompozytów polimerowych z włóknami do zbrojenia betonowych konstrukcji inżynierskich. *Drogi i Mosty*, Vol. Nr 1, s. 35-52, 2006.
- [12] Design Manual for Roads and Bridges (DMRB). Volume 1, Section 3, Part 17: BD 90/05 – Design of FRP Bridges and Highway Structures. The Highways Agency, Scottish Executive, Welsh Assembly Government, The Department for Regional Development Northern Ireland, May 2005.
- [13] ZOGH M. (ed.). *The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering*. CRC Press, Taylor&Francis Group LLC, Boca Raton, 2014.
- [14] PN-EN 1991-2. Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów. Warszawa, 2007.
- [15] PN-EN 1993-1-9. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-9: Zmęczenie. Warszawa, 2007.

DESIGN AND RESEARCH ON THE FIRST POLISH FRP COMPOSITE BRIDGE

The main goal of the research project, carried out by the Polish science-business consortium was to develop and demonstrate the first Polish FRP composite vehicular bridge, including its concept design, material research, manufacturing technique selection and structural testing. The objective of the paper is the description of the bridge to be built along with its structural solutions, i.e. FRP box girders and concrete deck slab acting compositely, to be likely implemented on-site soon. The testing of an individual elements (deck slab, connections of deck and girder, composite main girder) has been also presented. After the comprehensive FEM analysis, the full scale prototype girder with the total length of 22.0 m will be tested to evaluate its carrying capacity, modes of failure, basic dynamic parameters as well as overall behaviour under ultimate static load. The FEM model of the girder will be validated against testing results and will be further used for a prototype FRP bridge design. Other components of the structure were tested to evaluate their stiffness and ultimate carrying capacity as well as modes of failure. So far tested elements met the required serviceability and safety criteria. The output of the research project gives a very promising future for the FRP application in bridge engineering in Poland. The research project has been partially financed by the Polish National Centre for Research and Development (NCBiR).