

Alternatywne rozwiązania połączeń prefabrykatów w prętowych ustrojach nośnych mostów

Marian Krężel¹, Marek Łagoda²



1. Wstęp

Na krajowych budowach obiektów mostowych coraz częściej można zobaczyć różnego rodzaju łukowe konstrukcje nośne. W ostatnich latach obserwuje się prawdziwy renesans ustrojów łukowych. Prawdopodobnie jest to związane z poszukiwaniem przez projektantów alternatywnych rozwiązań dla ustrojów belkowych i wantowych. Wydaje się, że zarówno pod względem ekonomicznym, jak i architektonicznym mosty łukowe wzbogacają dokonania polskiego mostownictwa i mogą być z powodzeniem stosowane w zakresie średnich i większych rozpiętości ($L = 30 \div 200$ m).

Pewną trudnością dla projektantów jest brak tych konstrukcji w normach budownictwa ogólnego [5, 6] i pobieżne potraktowanie ich w normach budownictwa mostowego [7, 8]. W normach mostowych ograniczono się tylko do podania długości wybozczeniowych dla kilku typowych łuków parabolicznych, niestety, pominięto całkowicie stateczność łuków w dźwigarach Langerera. Wpływ wieszaków na stateczność łuku podaje natomiast niemiecka norma DIN 18800, która w tym właśnie zakresie powołuje się na prace prof. Szymona Pałkowskiego z Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie (obecnie Politechnika Koszalińska).

W dobrze opracowanym projekcie mostu powinna być uwzględniona technologia jego budowy. Część technologiczną projektu należałoby na bieżąco uzgadniać z przyszłym wykonawcą. Obecny system zlecania prac projektowych praktycznie uniemożliwia takie działanie i projekty opracowywane są w sposób akademicki – dla wirtualnego wykonawcy. Z tego względu w projektach wykonawczych strona technologiczna jest w większości przypadków pomijana lub sprowadzana do kilku zdań, mogących równie dobrze odnosić się do większości

innych obiektów. Z pewnością taki system projektowania ma swoje odzwierciedlenie w kosztach budowy [3].

Wydaje się, że w okresie odbudowy mostów tymczasowych, zniszczonych w rejonie beskidzkim przez lokalne powodzie, udało się wypracować modelowy sposób współpracy pomiędzy jednostką projektową a firmą wykonawczą [1, 2]. Katalizatorem, który w dużym stopniu wymusił tak bliską współpracę projektanta i wykonawcy, było wejście w życie rozporządzenia [9] porządkującego odbudowę mostów na rzekach górskich. Ponieważ mosty te należało odbudować w bardzo krótkim czasie i przy ograniczonych środkach finansowych, przeprowadzono wnikliwą analizę przydatności różnych konstrukcji nośnych pod kątem: możliwości w miarę pełnego wykorzystania materiałów w elementach nośnych (preferowano pręty ściskane, rozciągane), możliwości ograniczania wartości momentów zginających, ponieważ w elementach zginanych pod względem wytrzymałości wykorzystane są tylko włókna skrajne, możliwości ograniczenia kosztów budowy przez projektowanie obiektów bezprzyczółkowych i wreszcie możliwości kształtowania obiektów przestrzennych o zróżnicowanej formie architektonicznej, a także możliwości zachowania niwelety istniejących dojazdów do mostów (tereny o gęstej rozbudowie).

Po przeprowadzeniu analiz okazało się, że ustrojem nośnym, który w największym stopniu spełnia wymienione wymagania jest dźwigar łukowy typu Langerera. W dźwigarach Langerera, podobnie jak w kratownicach, elementy nośne w naturalny sposób dzielą się na ściskane i rozciągane.

Momenty zginające, występujące w pomoście oraz w łukach, mogą być regulowane przez różnicowanie sztywności elementów konstrukcyjnych oraz przez zmianę rozstawu i rodzaju wieszaków. Dodatkowo obiekty łukowe typu Langerera charakteryzują się niską wysokością konstrukcyjną.

Bardzo istotną zaletą mostów łukowych z dźwigarami Langerera okazała się ich bezprzyczółkowość [4], czyli możliwość posadowienia na dwóch słupach, będących przedłużeniem pali dużych średnic. Mosty te zaprojektowano jako swobodnie podparte z krótkimi wspornikami, na których zawieszono płyty przejściowe. Takie rozwiązanie bardzo wydatnie pomogło ograniczyć koszty budowy.

2. Przegląd metod budowy mostów łukowych

W obiektach mostowych typu Langerera, z betonowym dźwigarem łukowym, występuje problem sposobu wykonania łuków. Technologia tradycyjna, czyli betonowanie łuku na budowie, każdorazowo wiąże się z koniecznością wykonania rusztowań, deskowań i zbrojenia na miejscu budowy. Nie tylko ze względu na warunki atmosferyczne, ale i z uwagi na znaczne wysokości (średnio ok. $1/6 \times L$) roboty te są pracochłonne, niebezpieczne i wydłużają czas budowy.

Aby zmniejszyć uzależnienie wykonawcy od warunków pogodowych, zaproponowano budowę mostów typu Langerera z wykorzystaniem częściowej prefabrykacji do wykonania łuków. Dźwigar łukowy dzielono na elementy prefabrykowane, które później łączono „na mokro” na budowie. W stykach, w pierwszej kolejności uciągano zbrojenie wyprowadzone z prefabrykatów, a następnie je betonowano. W tej technologii zmniejszono ogólnie pracochłonność wykonania łuków, lecz pozostał problem stateczności prefabrykatów w czasie montażu i dalszej minimalizacji robót przy wykonaniu styków.

Przedmiotem niniejszego artykułu jest próba opracowania takiej technologii łączenia elementów prefabrykowanych łuku, któ-

¹ Mgr inż.; MK Projekt.

² Prof. nzw. dr hab. inż.; Politechnika Lubelska, Instytut Badawczy Dróg i Mostów.



Ryc. 1. Most drogowy nad Wartą w Mstowie: a) widok na rusztowanie i deskowanie łuków, b) widok z boku, c) widok z osi drogi

ra pod względem pracochłonności oraz czasu wykonania będzie bliska rozwiązaniom stosowanym w konstrukcjach stalowych, łączonych na śruby. Płaszczyzny czołowe prefabrykatów traktuje się jak blachy w stykach czołowych elementów stalowych.

Szczegółowe omówienie proponowanego sposobu łączenia prefabrykatów przy pomocy śrub, poprzedzono, dla lepszego zilustrowania problemu, opisem technologii stosowanych w projektach sporządzonych w Pracowni Inżynierskiej PROJEKT s.c. Krężel Marian, Krężel Marta z siedzibą w Bielsku-Białej.

3. Wykonanie dźwigarów łukowych w technologii tradycyjnej

Na rzece Warcie w miejscowości Mstów został zaprojektowany most drogowy jednonprzęsłowy, z obustronnymi wspornikami. Konstrukcję nośną mostu stanowi dźwigar łukowy o rozpiętości $L = 4,50 + 33,00 + 4,50$ m i strzałce $f = 5,58$ m. W projekcie mostu zastosowano zbrojenie sztywne z dwuteowników odzyskanych z rozebranego mostu tymczasowego. W belkach pomostowych przewidziano $2 \times I550$ (w płaszczyźnie pionowej), a w każdym łuku $1 \times I550$ (na płask). Aby zespolić dwuteowniki z żelbetowym pomostem oraz żelbetową częścią łuku, do środników dwuteowników



Ryc. 2. Most drogowy nad Piśą w Puszczy Piskiej: a) widok na montaż styków łuków, b) widok z boku, c) widok z osi drogi

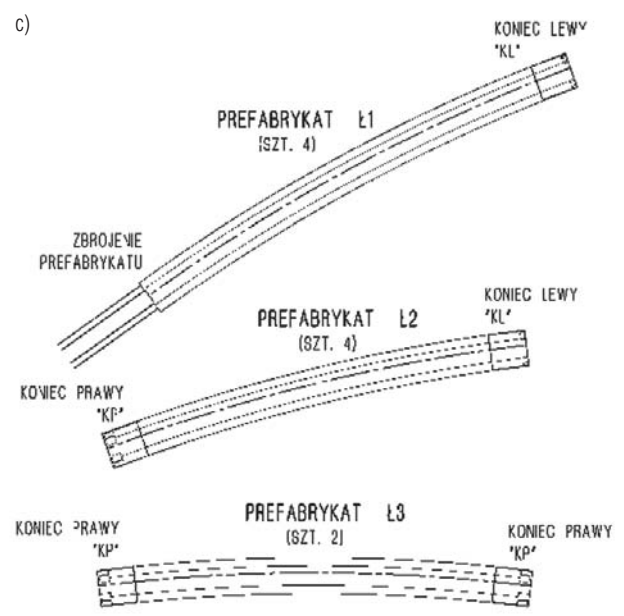
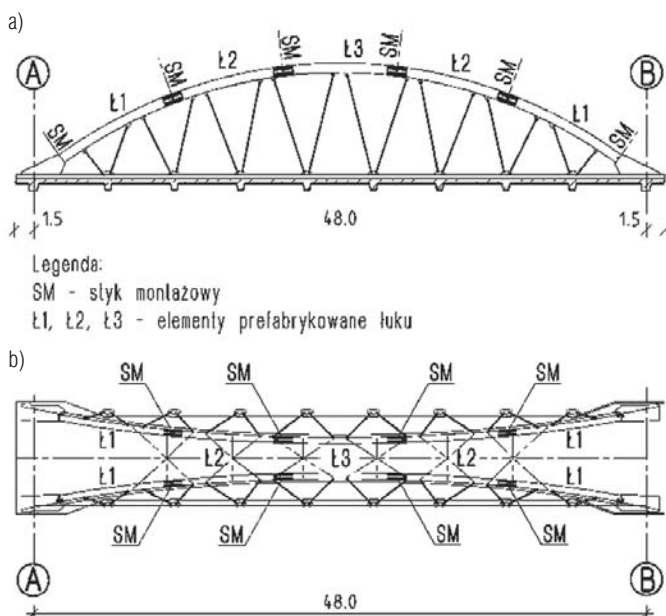
przyspawano klamry z prętów zbrojeniowych i całość wraz ze zbrojeniem podłużnym objęto strzemionami. W przyjętej technologii budowy, do czasu obetonowania łuku, zbrojenie sztywne pełniło rolę rusztowania, do którego zostało podwieszono deskowanie pomostu. Dźwigar łukowy został wykonany w technologii „na mokro”. W tym celu na płycie pomostowej ustawiono tradycyjne rusztowanie wraz z deskowaniem z desek struganych.

Na rycinach pokazano rusztowanie do betonowania łuków oraz widok ogólny mostu po zakończeniu budowy.

4. Wykonanie dźwigarów łukowych w technologii prefabrykowanej

Zasadniczym celem wprowadzenia technologii prefabrykowanej do budowy łuków w mostach typu Langerera było dążenie do obniżenia kosztów budowy, skrócenia czasu budowy i większego uniezależnienia wykonawcy od warunków pogodowych. Sumarycznie, wszystkie te warunki sprowadzają się do sfery kosztowej.

W tej technologii, elementy prefabrykowane mogą być wykonywane bezpośrednio przez wykonawcę mostu lub zamawiane



Ryc. 3. Most drogowy nad rzeką Wisłoką: a) schemat łuku w widoku z boku, b) schemat łuku w widoku z góry, c) zestawienie elementów prefabrykowanych

w wyspecjalizowanym zakładzie prefabrykacji. Na budowę dostarczane są prefabrykaty łuku wraz z wbudowanymi blachami węzłowymi wieszaków. Z płaszczyzn czołowych prefabrykatów wystaje zbrojenie, które w stykach łączone jest „na zakład” lub spoinami pachwinowymi, z wyjątkiem prętów narożnych, które z uwagi na brak miejsca i dążenie do eliminacji karbów łączone są spoinami czołowymi.

Montaż prefabrykatów prowadzony jest z poziomu płyty pomostowej. W miejscach występowania styków montażowych ustawione są odpowiednio usztywnione wieże z rusztowań inwentaryzowanych. Wieże wykorzystywane są do podparcia prefabrykatów łuku i do ustawienia pomostów roboczych dla wykonania styków (uciąglenie zbrojenia, deskowanie, betonowanie).

Poniżej zamieszczono rycinę ilustrującą budowę mostu łukowego nad rzeką Pisą w Puszczy Piskiej k. Pizsa. Konstrukcję nośną mostu stanowi swobodnie podparty dźwigar Langerera z obustronnymi wspornikami o rozpiętości $L = 3,0 + 38,0 + 3,0$ m i strzałce $f = 7,50$ m. Łuk charakteryzuje się zmiennym przekrojem na długości (w wezgiu $h/b = 0,40/0,90$ m, a w kłuczu $h/b = 0,90/0,40$ m).

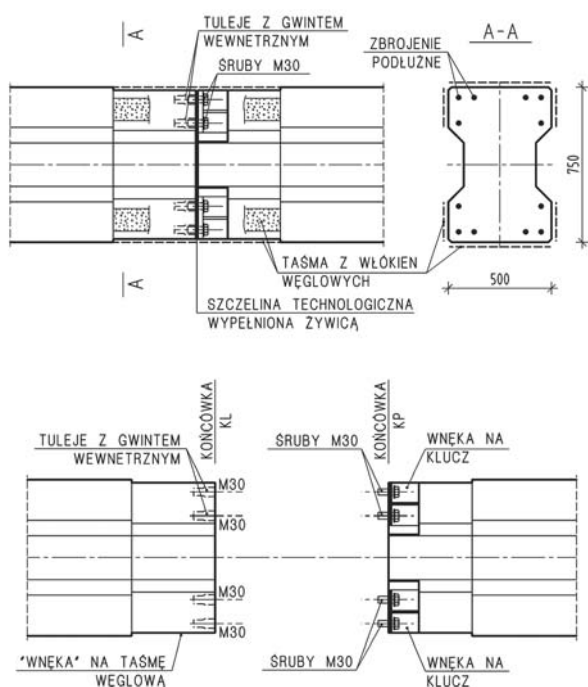
5. Połączenie prefabrykatów łuku

5.1. Opis koncepcji i podział łuku na elementy prefabrykowane

Ideą przewodnią tej koncepcji łączenia elementów prefabrykowanych w styku montażowym łuku jest:

- dążenie do minimalizacji pracochłonności i pełnego uprzedzenia technologii budowy łuków, a tym samym ograniczenia kosztów ich wykonania, przez wyeliminowanie konieczności łączenia zbrojenia, deskowań i betonowania styków,
- uzyskanie już w czasie montażu połączenia sztywnego, przenoszącego bezpiecznie siły mogące wystąpić w tej fazie,
- zmniejszenie liczby wież rusztowaniowych podpierających elementy prefabrykowane,
- uzyskanie większej niezależności od warunków pogodowych.

Podział łuku na elementy prefabrykowane został pokazany na przykładzie projektu mostu drogowego nad rzeką Wisłoką w gminie Nowy Żmigród. Konstrukcję nośną mostu stanowi dźwigar Langerera o schemacie statycznym belki dwuwspornikowej, swobodnie podpartej, o rozpiętości $L = 1,5 + 48,0 +$



Ryc. 4. Szyk montażowy prefabrykatów łuku: a) widok z boku, b) końcówka KL, c) końcówka KP

1,5 m i strzałce $f = 8,64$ m. Dźwigary łukowe usytuowane są na zewnątrz pomostu i nachylnono do osi jezdni pod kątem 76° . Łuki w przekroju poprzecznym mają kształt dwuteowy o wymiarach $h/b = 0,75/0,50$ m.

5.2. Połączenia za pomocą śrub i taśm kompozytowych

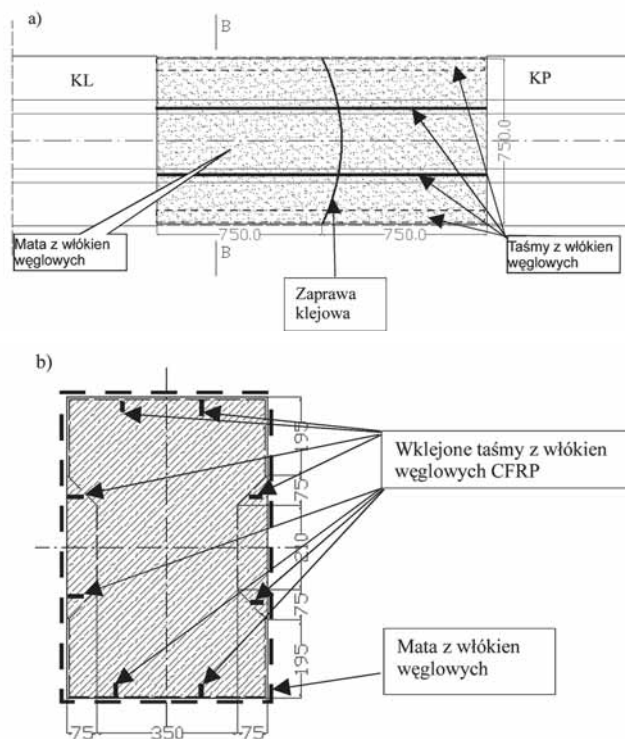
5.2.1. Opis rozwiązania projektowego

W projekcie technologicznym lub lepiej bezpośrednio w projekcie wykonawczym, łuk zostanie podzielony na elementy montażowe z uwzględnieniem możliwości transportowych i udźwigu żurawia. Zakłada się, że stykające się na montażu płaszczyzny czołowe elementów prefabrykowanych będą zaprojektowane jako prawe i lewe.

W końcówce lewej prefabrykatu osadzone zostaną nagwinutowane tuleje, będące zakończeniami prętów zbrojeniowych. Końcówka prawa to blacha z otworami rozmieszczonymi odpowiednio do rozstawu tulei w końcówce lewej. Blacha ta poprzez odpowiednie uźbrowanie łączyć się będzie ze zbrojeniem podłużnym elementu prefabrykowanego. Bezpośrednio za blachą przewiduje się stosowne wneki umożliwiające założenie i dokręcenie śrub mających zespolić obydwie prefabrykaty.

Połączenia czołowe mają tę wadę, że praktycznie nie jest możliwe uzyskanie równoległości stykających się płaszczyzn. Problem ten mocno utrudnia montaż konstrukcji stalowych, a należy się spodziewać, że w przypadku konstrukcji betonowych tolerancje wykonania będą zdecydowanie łagodniejsze. W związku z tym zakłada się pomiędzy prefabrykatami szczelinę technologiczną, która po uzyskaniu przez prefabrykat geometrii założonej w projekcie montażu, zostanie wypełniona specjalną żywicą. Ostateczne dokręcenie śrub nastąpi po związaniu i stwardnieniu żywicy wypełniającej styk montażowy.

Śruby występujące w styku montażowym mają zapewnić bezpieczny montaż elementów prefabrykowanych łuków. Siła ściskająca przenoszona przez łuk, we wszystkich fazach użytkowania, będzie przekazywała się przez płaszczyznę styku. Natomiast momenty zginające, które występują głównie od obciążeń użytkowych, zostaną przejęte przez taśmy węglowe naklejone na najdalszych płaszczyznach bocznych łączonych prefabrykatów. Taśmy węglowe mogą być klejone sukcesywnie – bezpośrednio po ostatecznym dokręceniu śrub lub jednocześnie po zmontowaniu całego łuku.



Ryc. 5. Połączenie za pomocą złączy kompozytowych: a) widok z boku, b) przekrój poprzeczny

Styk montażowy w węzłowie, będący połączeniem łuku z belką pomostową, może być wykonany na dwa sposoby:

- jak klasyczny styk pomiędzy prefabrykatami, z tym że wtedy węzłowie musi mieć zakończenie „prawe” lub „lewe”,
- jak klasyczny styk wykonywany „na mokro”, ale wtedy z prefabrykatu należy wyprowadzić zbrojenie i połączyć je na zakład ze zbrojeniem wyprowadzonym z belki pomostowej.

5.2.2. Konstrukcja styku montażowego

W przyjętej technologii styk montażowy łuku składa się z końcówki lewej KL i prawej KP, połączonych w czasie montażu śrubami, a docelowo także przyklejonymi taśmami z włókien węglowych. Szczelina technologiczna pomiędzy płaszczyznami prefabrykatów jest wypełniona specjalną żywicą. Na rycinie 4 przedstawiono styk montażowy prefabrykatów łuku w moście drogowym nad Wisłoką.

5.3. Połączenie prefabrykatów łuku za pomocą złączy kompozytowych

Wykorzystując wiedzę i doświadczenie zdobyte przy stosowaniu materiałów kompozytowych [10], zaproponowano nieco inną metodę. Alternatywnym rozwiązaniem jest styk składający się również z dwóch końcówek, tj. końcówki lewej KL i końcówki prawej KP (ryc. 5a). Na długości zakończenia lewego i prawego elementu łuk przyjmuje przekrój „wypełniony”, jak to pokazano na rycinie 5b. Lewa końcówka łuku w styku ma zakończenie w postaci walcowej powierzchni wypukłej, zaś prawa jest zakończona powierzchnią walcową wklęsłą. Obie powierzchnie walcowe ściśle do siebie przylegają. Zakończenie walcowe umożliwia łatwiejsze dopasowanie obu części łączonych do geometrii łuku.

Przed montażem łuku obie powierzchnie walcowe są posmarowane zaprawą klejową. Po ustawieniu dwóch przylegających elementów łukowych zgodnie z geometrią projektową łuku, na długości 2 x 75 cm (na odcinku, w którym przekrój łuku jest „wypełniony”) wykonywane są nacięcia. W nacięcia, wypełnione

zaprawą klejową, wciskane są wąskie taśmy z włókien węglowych CFRP. Następnie cały odcinek połączenia jest dwukrotnie oklejany matą węglową. Po stwardnieniu zaprawy klejowej, wykonanej na bazie żywicy epoksydowej, styk jest gotowy do przejścia obciążeń. Cały proces technologiczny wykonania styku trwa kilka godzin.

Literatura

1. Krężel M., Radziecki A.: *Nowe spojrzenie na zastosowanie prefabrykacji w budownictwie mostowym*. „Drogownictwo” 2007, nr 2.
2. Marcinków E.: *Mosty łukowe – tanie i szybko budowane mosty średniej rozpiętości*. „Inżynieria i Budownictwo” 2002, nr 11.
3. Zielińska I., Pater Z., Głowacki Z.: *Problemy realizacji kontraktów drogowo-mostowych, z uwzględnieniem specyfiki robót mostowych*. „Inżynieria i Budownictwo” 2008, nr 1–2.
4. Wasiutyński Z.: *Budownictwo betonowe*. T. XIV. Mosty, cz. I. Warszawa 1967.
5. PN-B-03264:2002 *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
6. PN-90/B-03200 *Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
7. PN-82/S-10052 *Obiekty mostowe. Konstrukcje stalowe. Projektowanie*.
8. PN-91/S-10042 *Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Projektowanie*.
9. Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie. DzU nr 63, poz. 735.
10. Łagoda M.: *Wzmacnianie mostów przez doklejanie elementów*. „Monografia 322. Seria Inżynieria Lądowa”. Politechnika Krakowska, Kraków 2005.



WRĘCZENIE NAGRÓD
LAUREATOM KONKURSU

*Pontifex
Cracoviensis*

W KATEGORIACH:

- Budowniczy roku
- Projektant roku
- Menadżer roku
- Debiut mostowy roku

ODBĘDZIE SIĘ PODCZAS
UROCZYTEJ GALI
26 listopada 2008 roku
W FILHARMONII KRAKOWSKIEJ

