

VFT-VIB® – prefabrykowane dźwigary zespolone z innowacyjnym połączeniem stali i betonu

Wojciech Lorenc¹, Tomasz Kołakowski², Witold Kosecki³, Günter Seidl⁴

1. Wstęp

W artykule przedstawiono technologię budowy obiektów mostowych o przęsłach z dźwigarów zespolonych nowego typu, łączącą zalety technologii VFT® z zastosowaniem nowego rodzaju dźwigarów zespolonych, powstałych z połączenia przeciętych dwuteowników walcowanych z betonem za pomocą innowacyjnego zespolenia. Nowe rozwiązanie znajduje zastosowanie zarówno w przypadku obiektów drogowych, jak i kolejowych. Zwłaszcza w przypadku tych drugich szczególnie istotne jest to, że osiąga się najwyższą z możliwych kategorii zmęczenia dla pasa dolnego. Przedstawiono podstawowe założenia dotyczące technologii budowy i projektowania oraz zaprezentowano pierwsze zrealizowane obiekty. Technologia VFT-VIB® umożliwia szybką realizację ekonomicznych obiektów mostowych zwłaszcza przy rozpiętości do nieco ponad 30 metrów. Tak jak dla typowego VFT®, możliwe jest zastosowanie schematu belki swobodnie podpartej, ciągłej oraz ramy jedno- i wielonawowej (obiekty integralne). Ponieważ obliczenia nowego rodzaju konstrukcji są stosunkowo skomplikowane poprzez wprowadzenie nowego rodzaju zespolenia, wdrażanie odbywa się przy wsparciu jednostek naukowo-badawczych poprzez międzynarodowe oraz krajowe projekty badawcze, które w skrócie przedstawiono.

2. Ogólna charakterystyka technologii VFT-VIB®

2.1. VFT®

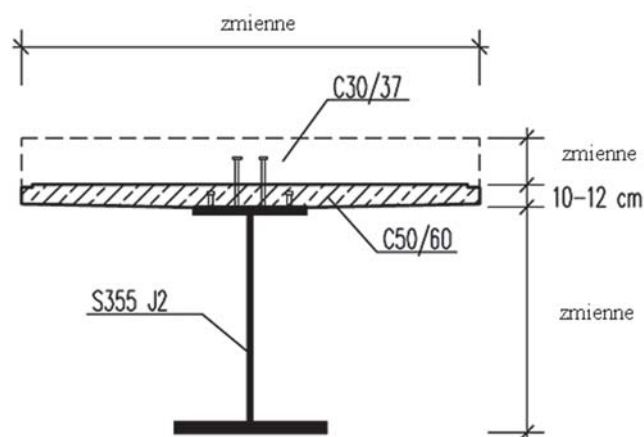
Technologia VFT® (ryc. 1a) jest obecnie jednym z typowych sposobów budowy obiektów o przęsłach z dźwigarów zespolonych. Istotą systemu VFT® jest stosowanie prefabrykowanych dźwigarów zespolonych z półką żelbetową o grubości 10–12 cm, która jednocześnie stanowi deskowanie pomostu aktywnie współpracujące przy przenoszeniu obciążeń stałych i użytkowych. Prefabrykaty zespolone ustawiane są obok siebie na uprzednio przygotowanych podporach i łączone ze sobą na czas montażu, bez stosowania podparć w przęśle. Następnie wykonywane są na mokro: płyta pomostu oraz poprzecznice podporowe (lub naroże ramy). Szczegółowy opis dotyczący technologii przedstawiono m.in. w [1], a obiekty zrealizowane na terenie Polski do 2007 r. w skrócie zaprezentowano w [2].

Technologia jest z powodzeniem stosowana w Polsce, a realizacja wiaduktu drogowego w miejscowości Kije [2] (dwuprzęsłowa belka ciągła VFT 2 x 43 m) została wyróżniona jako „Dzieło Mostowe roku 2006” [3].

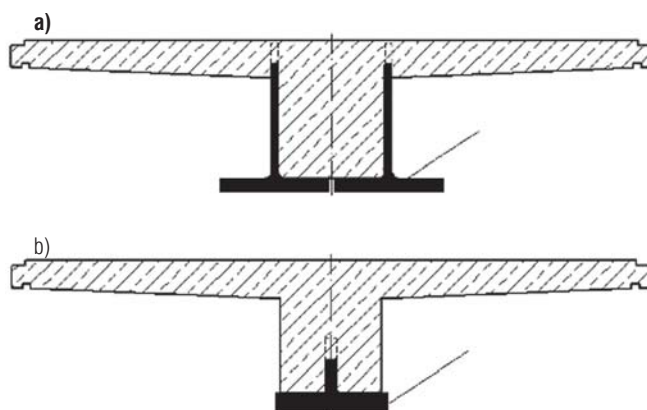
2.2. VFT-VIB®

Zastosowanie zespolonych dźwigarów z profili walcowanych stanowi kolejny krok w rozwoju systemu VFT. W nowym systemie [4] zamiast dwuteowych blachownic spawanych wykorzystuje się dwuteowe profile walcowane (ryc. 2), przecięte w specyficzny sposób w pobliżu osi środka tak, że powstają dwa teowe profile, z których każdy stanowi stalową część dźwigara zespolonego, natomiast kształt przecięcia środka formuje jednocześnie element zespolenia. Specjalnie ukształtowana krzywa przecięcia stanowi doskonały element połączenia środka z częścią betonową prefabrykatu zespolonego i nie są tu wymagane żadne dodatkowe zabiegi, konieczne do zrealizowania

zespolenia w części stalowej dźwigara. Niezbędne jest natomiast racjonalne ukształtowanie tej strefy zespolenia i dobranie odpowiedniego kształtu wycięcia kształtownika stalowego. System VFT-VIB (ryc. 3) łączy zatem korzyści systemu VFT z efektywnością wynikającą z zastosowania nowego rodzaju zespolenia (ang. *composite dowels*). W porównaniu z belkami żelbetowymi uzyskuje się większy moment statyczny półki stalowej względem betonowej, tak więc większe rozpiętości mogą być osiągnięte przy mniejszej wysokości konstrukcyjnej i mniejszym ciężarze prefabrykatów. W stosunku do belek strunobetonowych nowe belki są o ok. jedną trzecią lżejsze i nie ulegają deformacjom na skutek pełzania pod wpływem sprężenia w kierunku odwrotnym do działania obciążenia. W stosunku do blachownic spawanych większa jest odporność zmęczenia – nie ma spoin w pasie dolnym w strefie przęsłowej.



Ryc. 1. Typowy przekrój poprzeczny dźwigara VFT



Ryc. 2. Przekroje poprzeczne VFT-VIB: a) o stałej wysokości, b) możliwa zmiana wysokości przekroju

Możliwe jest konstruowanie dźwigarów o stałej wysokości (ryc. 2a i 2b) i o zmiennej wysokości przekroju (ryc. 2b). Pierwsze rozwiązanie w wariantcie z dwoma kształtownikami (ryc. 2a) jest przydatne zwłaszcza w obiektach kolejowych przy przęsłach swobodnie podpartych, a rozwiązanie drugie (ryc. 2b) w obiektach ramowych.

¹ Dr inż.; Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego.

² Mgr inż.; Europrojekt Gdańsk sp. z o.o.

³ Mgr inż.; Europrojekt Gdańsk sp. z o.o.

⁴ Dipl. ing. SSF Ingenieure.



Ryc. 3. Technologia budowy obiektu z dźwigarów VFT-VIB® (wiadukt w Pöcking): a) dźwigary walcowane po przecięciu i zabezpieczeniu antykorozyjnym w warsztacie, b) zespolecie *composite dowels* płyty prefabrykowanej, c) transport dźwigarów na plac budowy, d) montaż dźwigara o długości 32,5 m (prefabrykat pod dwa przęsta)

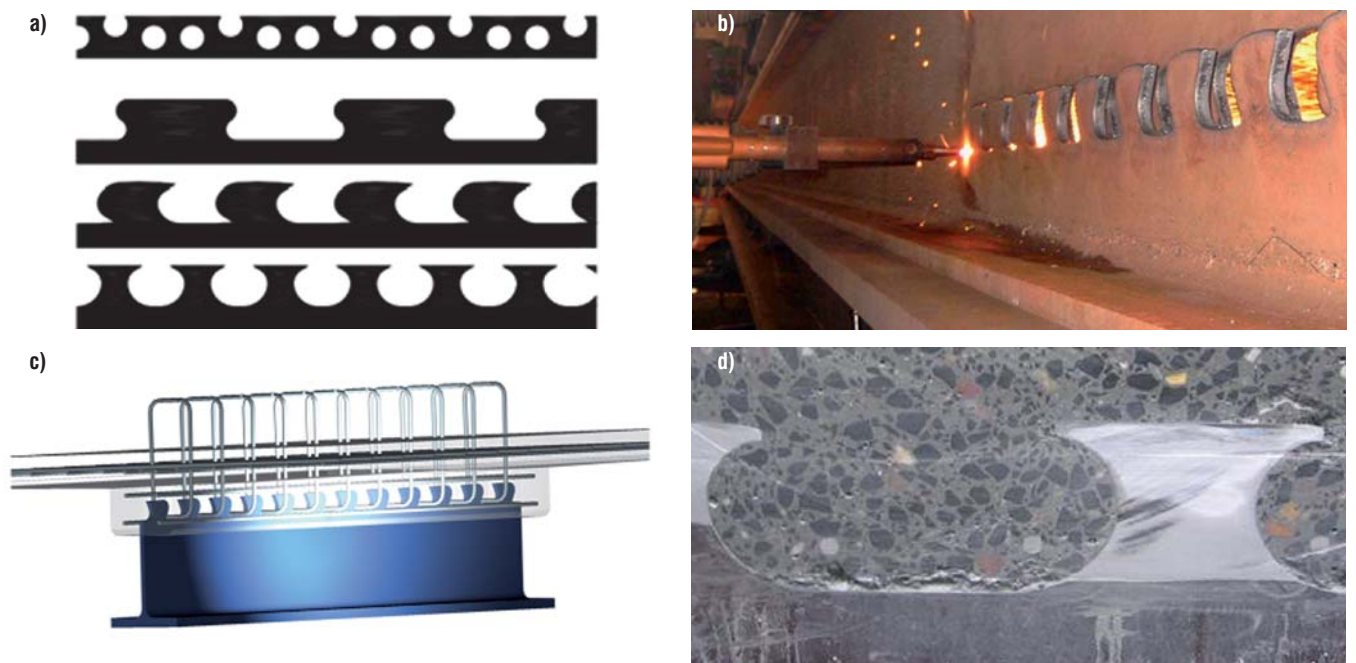
Kluczowym elementem belek VFT-VIB® jest nowy rodzaj zespolecia, a jego optymalizacja była przedmiotem prowadzonych w ostatnich latach badań, m.in. w Polsce [5].

2.3. Zespolecie typu *composite dowels*

Nowe zespolecie (ryc. 4) jest typem zespolecia zaliczanego do łączników ciągłych i jednocześnie najnowszym rodzajem tych łączników. Na początku lat 80. XX w. wprowadzono zespolecie *perforbond strip* [6], czyli listwę z otworami spawaną do pasa górnego belki, a następnie zabetonowaną w płycie pomostowej. Przez część otworów przeprowadzono zbrojenie, zwiększając nośność zespolecia na kierunku poziomym i zapobiegając zarazem odrywaniu płyty na kierunku pionowym. Rozwiązanie to następnie rozwijano wprowadzając termin *concrete dowels*, wskazując tym samym beton jako podstawowe kryterium przy projektowaniu. Termin *composite dowels* wprowadzono w zasadzie podczas realizacji projektu *PreCo-Beam* [5], ustalając podstawowe mechanizmy

zniszczenia nowego rodzaju zespolecia zastosowanego w systemie VFT-VIB, gdzie krzywa przecięcia tworzy zespolecie, w którym porównywalne są pola stali i betonu i pojawiają się mechanizmy zniszczenia stali. Dla porównania, w przypadku wymiarowania klasycznych łączników sworzniowych z główką (bolce) zgodnie z EC4 rozważa się dwa kryteria zniszczenia pod obciążeniem statycznym i jedno kryterium zmęczeniowe dla stali. Obecnie przy projektowaniu obiektów z dźwigarów VFT-VIB rozważa się łącznie minimum dziewięć mechanizmów zniszczenia zespolecia, a dodatkowo występuje interakcja efektów od zasadniczej pracy zespolecia tj. ścinania podłużnego i odrywania (ang. *uplift*) oraz efektów globalnych (zginanie dźwigara); jest to szczególnie istotne w przypadku stali w strefie rozciąganej [7].

Projektowanie nowego rodzaju zespolecia oraz samych belek jest zagadnieniem skomplikowanym, podstawy metody wymiarowania części stalowej zaprezentowano w [7].

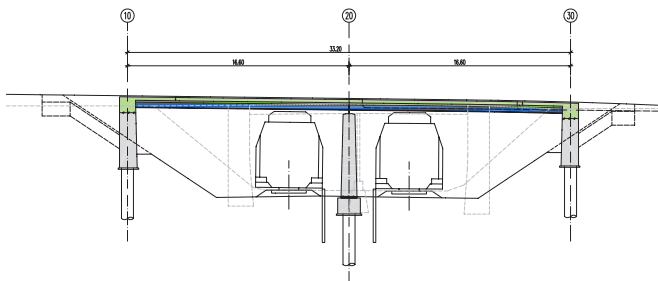


Ryc. 4. Zespolecie ciągłe: a) listwa *perforbond* oraz trzy różne kształty zespolecia typu *composite dowels*, b) cięcie belki stalowej, c) rysunek ogólny prefabrykatu zespolonego, d) przekrój elementu zespolonego po badaniach [5] przeciętego wzdłuż płaszczyzny zespolecia (widoczna część stalowa, betonowa i zbrojenie)

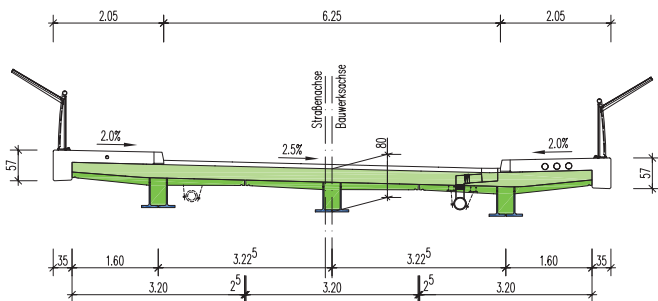
3. Zrealizowane obiekty mostowe

3.1. Wiadukt drogowy w Pöcking (Niemcy)

Obiekt jest wiaduktem drogowym przeprowadzającym drogę lokalną nad linią kolejową [8]. Schemat statyczny stanowi dwuprzęsłowa rama o rozpiętościach naw 2 x 16,6 m. Geometrię wiaduktu przedstawiono na rycinach 5, 6 i 7, a fazy montażu konstrukcji na rycinie 3. Prefabrykaty VFT-VIB zostały wykonane na całą długość obiektu, w wykonanej konstrukcji wiaduktu są one sztywno zamocowane na przyczółkach (naroże rama) i swobodnie podparte na filarach. Zastosowano prefabrykaty o konstrukcji jak na rycinie 2a.



Ryc. 5. Wiadukt drogowy w Pöcking – przekrój podłużny



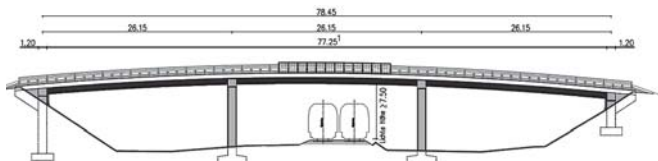
Ryc. 6. Wiadukt drogowy w Pöcking – przekrój poprzeczny



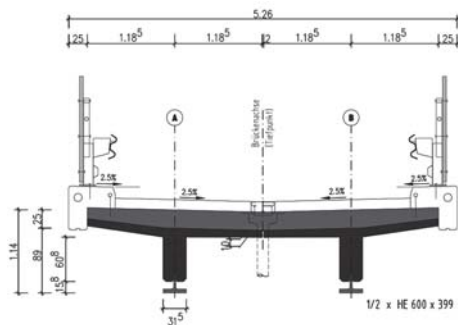
Ryc. 7. Wiadukt drogowy w Pöcking – widok ogólny obiektu

3.2. Wiadukt drogowy w Vigaun (Austria)

Konstrukcja w przekroju poprzecznym składa się z dwóch dźwigarów o szerokości 2,37 m i płyty monolitycznej o grubości 25 cm, tak jak dla klasycznego systemu VFT. Schemat statyczny ustroju to trójnawowa rama o rozpiętościach 26,15 m. Uzyskana smukłość ustroju nośnego to ok. 1/23. Zaprojektowano prefabrykaty o konstrukcji jak na rycinie 2b, zastosowano stal S460 ML i beton C70/85 (beton płyty C30/37). Geometrię obiektu przedstawiono na rycinach 8 i 9, jest to projekt pilotażowy zrealizowany w ramach programu *PreCo-beam* [5].



Ryc. 8. Wiadukt drogowy w Vigaun – przekrój podłużny



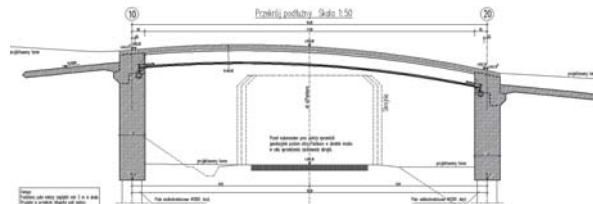
Ryc. 9. Wiadukt drogowy w Vigaun – przekrój poprzeczny



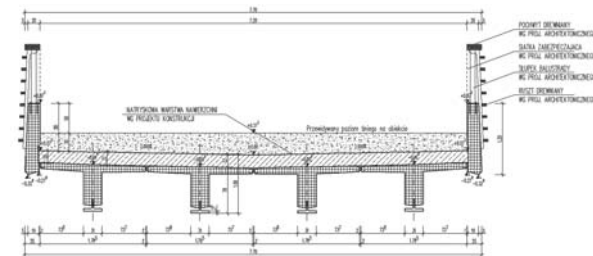
Ryc. 10. Wiadukt drogowy w Vigaun – cięcie dźwigarów stalowych

3.3. Kładka dla narciarzy w Przemyslu (Polska)

Konstrukcja w przekroju poprzecznym składa się z czterech dźwigarów o szerokości 1,785 m i płyty monolitycznej o grubości 22 cm. Schemat statyczny ustroju to jednoprzęsłowa rama o rozpiętości 18,30 m. Geometrię obiektu przedstawiono na rycinach 11 i 12.



Ryc. 11. Kładka dla narciarzy w Przemyslu – przekrój podłużny



Ryc. 12. Kładka dla narciarzy w Przemyslu – przekrój poprzeczny



Ryc. 13. Kładka dla narciarzy w Przemyslu – część stalowa dźwigara

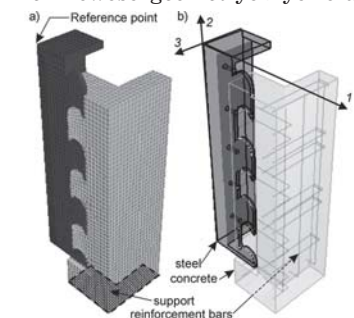
4. Prace naukowo-badawcze

Aby szybko i sprawnie wprowadzać w kraju najnowsze technologicznie rozwiązania stosowane na świecie, konieczny jest udział Polski w międzynarodowych projektach badawczych, realizowanych przez duże konsorcja przy znaczącym udziale przemysłu.

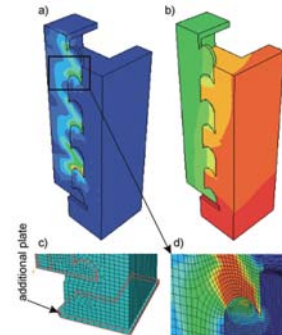
Umożliwia to szybkie wdrażanie nowych rozwiązań do praktyki budowlanej w kraju w tym samym czasie, co w pozostałych krajach UE, a nie tylko kopiowanie rozwiązań już stosowanych, a więc z założenia opracowanych wiele lat wcześniej. W przypadku technologii VFT-VIB prace badawcze realizowane są m.in. w ramach projektu *PreCo-beam (Prefabricated Enduring Composite Beams based on Innovative Shear Transmission)* [5]. Jest to duży projekt badawczy finansowany ze środków Unii Europejskiej (*Research Fund for Coal and Steel*), w ramach wspierania rozwoju przemysłu UE w obszarze węgla i stali, realizowany przez międzynarodowe konsorcjum, w skład którego wchodzi: SSF-Ingenieur GmbH (Niemcy) – koordynator, Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes – SETRA (Francja), Universität der Bundeswehr (Niemcy), Politechnika Wroclawska (Polska), Université de Liège (Belgia), Rambøll Sverige AB (Szwecja), ArcelorMittal (Luxemburg) oraz jako konsultanci przedstawiciele przyszłych inwestorów (zarządy dróg i koleje), tj. Österreichische Bundesbahnen (ÖBB), Autobahndirektion Südbayern (ABDSB), Deutsche Bahn (DB AG).

W ramach programu problemy dotyczące projektowania i realizacji konstrukcji rozwiązywane są kompleksowo, a więc począwszy od podstawowych problemów dotyczących nowego rodzaju zespolenia, tj. zbudowania odpowiedniej teorii, następnie wyprowadzenia wzorów i wytycznych do projektowania [7], a skończywszy na zaprojektowaniu dwóch obiektów mostowych (wiadukt kolejowy i drogowy), przeznaczonych do realizacji. Zakres prac realizowany w kraju (Politechnika Wroclawska) jest duży i obejmuje uczestnictwo we wszystkich pakietach zadań z wyjątkiem pakietu WP4, tj. poza badaniami w warunkach pożaru (system z pewnymi modyfikacjami stosowany będzie również w budownictwie ogólnym).

Polska strona odpowiada w programie za zagadnienia dotyczące stali konstrukcyjnej i generalnie za obliczenia MES (jest koordynatorem pakietu WP2: *Modele obliczeniowe*) oraz wykonuje badania niszczące elementów konstrukcyjnych (obciążenia statyczne i cykliczne – analiza zmęczenia elementów zespolonych). Do skomplikowanych obliczeń (modele klasy e1 + e2 + e3, p3 z uwzględnieniem nieliniowości materiałowych stali i betonu, nieliniowości geometrycznych oraz zagadnień kontaktowych [9])



Ryc. 14. Model numeryczny wybranej próby typu POST: a) dyskretyzacja, b) geometria

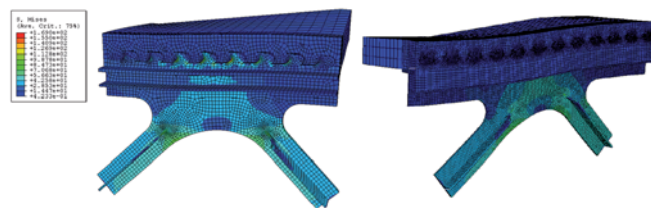


Ryc. 15. Model numeryczny próby typu POST podczas symulacji badania: a) i d) naprężenia zredukowane (d: f. plast.), b) przemieszczenia pionowe, c) dodatkowa płyta

wykorzystywany jest program ABAQUS, do większości obliczeń inżynierskich wykorzystuje się program SOFiSTiK. Na rycinach 14 i 15 przedstawiono model numeryczny próby typu POST (*push-out standard test*), zgodny z ogólnymi wytycznymi EC4, służącej do wyznaczenia charakterystyk zespolenia w belkach VFT-VIB. Tego typu elementy (oraz belki) są podstawowymi elementami do badań niszczących. W aspekcie przyszłych zastosowań w elementach do badań stosuje się stal S460 i standardowo beton C70/85. Ponadto w 2007 r. wykonano na Politechnice Wroclawskiej badania typu POST z betonem o wyższej wytrzymałości zbrojonym włóknami stalowymi (fibrobeton), wyniki zaprezentowano w [10].

W przypadku nowych rozwiązań przy projektowaniu konstrukcji oprócz typowej analizy statyczno-wytrzymałościowej wykonywane są dodatkowe obliczenia z uwzględnieniem nieliniowości fizycznych i geometrycznych, realizowane na skomplikowanych często modelach. Celem obliczeń jest weryfikacja założeń przyjętych do projektowa-

nia i weryfikacja modeli analitycznych. Na rycinie 16 pokazano przykładowo model numeryczny (ABAQUS) węzła kratownicy wiaduktu kolejowego (kształtowniki zespolone z płytą pomocową), zbudowany dodatkowo po wykonaniu analizy ogólnej i zwiaryowaniu podstawowym (SOFiSTiK) – model wykonano dla przeprowadzenia analizy zmęczeniowej. Przedmiotowy wiadukt jest jednym z dwóch obiektów mostowych projektowanych w ramach zadania WP6 (projekty pilotażowe).



Ryc. 16. Model węzła kratownicy z wizualizacją naprężeń Misesa: a) model wycinkowy o skróconej długości pasa górnego, b) model o rzeczywistej długości pasa górnego

Równocześnie i niezależnie realizowany będzie krajowy projekt badawczo-rozwojowy mający na celu wspomaganie wdrażania innowacyjnych technologii w mostownictwie. Koordynatorem projektu jest Instytut Badawczy Dróg i Mostów, a jednym z zadań jest opracowanie nowego przęsła wiaduktu (mostu) kolejowego typu VFT o małej/średniej rozpiętości. W ramach tego zadania zostanie zaprojektowany i zrealizowany obiekt mostowy z przęsłem zespolonym nowego typu. W związku z przebudową magistralnych linii kolejowych obecnie rozważane są dwie koncepcje budowy: rama (przebudowa obiektu wraz z przyczółkami) oraz przęsło swobodnie podparte (typowe obecnie rozwiązanie polegające na pozostawieniu istniejących przyczółków i wymianie przęsła).

PROJEKT PRECO-BEAM FINANSOWANY JEST ZE ŚRODKÓW UNII EUROPEJSKIEJ ORAZ MINISTERSTWA NAUKI I SZKOLNICTWA WYŻSZEGO.

OBLICZENIA NUMERYCZNE W PROGRAMIE ABAQUS REALIZOWANE SĄ WE WROCLAWSKIM CENTRUM SIECIOWO SUPERKOMPUTEROWYM.

Literatura

- Kołakowski T., Marecki A., Lorenc W., Kubica E.: *VFT® – prefabrykowane dźwigary zespolone z aktywnym deskowaniem betonowym*. Konferencja Naukowo-Techniczna Mosty Małe: Problemy projektowania, budowy oraz utrzymania mostów małych i średnich rozpiętości. Wrocław 2–3 grudnia 2004.
- Kołakowski T., Kosecki W., Lorenc W.: *Polskie doświadczenia z realizacji obiektów w technologii VFT®. Przyspieszenie budowy dróg ekspresowych i autostrad w programie rządowym „Infrastruktura i Środowisko”*. IBDiM, Warszawa 2007.
- „Inżynieria i Budownictwo” 2007, nr 12.
- Seidl G.: *VFT-WIB-Construction Method*. Compendium 5th Japanese-German Joint Symposium for Composite Bridges. Munich 2005.
- PreCo-Beam: Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission*. Technical Report No 2. Research Fund for Coal and Steel, Contract N RFSR-CT-2006-00030. 01/07/2006 – 30/06/2009.
- Zulassungsbescheid Z-26.1-23: Perfobond-Leiste*. Institut für Bautechnik. Berlin 1991.
- Hechler O., Lorenc W., Seidl G., Viefhues E.: *Continuous shear connectors in bridge construction*. Composite Construction in Steel and Concrete VI, 20–25 July 2008, Colorado [w druku].
- Schmitt V., Seidl G., Hever M., Zapfe C.: *Verbundbrücke Pöcking – Innovative VFT-Träger mit Betondübeln*. „Stahlbau” 2005, Band 73, Heft 6.
- Lorenc W., Ignatowicz R., Kubica E., Seidl G.: *Numerical model of shear connection by concrete dowels*. Recent Developments in Structural Engineering Mechanics and Computation. Millpress 2007.
- Seidl G., Schmitt V., Lorenc W.: *Shear Transmission of Fibre Reinforced Concrete Dowels*. The 7th German-Japanese Bridge Symposium. Osaka 30 July – 1 August 2007.