

Tomasz KOŁAKOWSKI¹

Witold KOSECKI²

Wojciech LORENC³

Józef RABIEGA⁴

Günter SEIDL⁵

PREFABRYKOWANE DŹWIGARY ZESPOLONE STALOWO-BETONOWE TYPU VFT-WIB DO BUDOWY PRZĘSEŁ MOSTÓW DROGOWYCH I KOLEJOWYCH

1. Prefabrykacja w budowie mostów stalowych i zespolonych

Prefabrykacja w odniesieniu do mostów stalowych znajdowała zastosowanie na długo, długo wcześniej niż stała się modna w odniesieniu do budownictwa kubaturowego i tzw. mostów prefabrykowanych w latach 70. XX wieku z typowych belek sprężonych m.in. Kujan, Gromnik, Wągrowiec, Płońsk, CZDP, WBS, T, MPR, Korytkowe, U, Strzegom, INKOM i innych. Trwałość wielu z obiektów wykonanych z w/w belek nie zawsze okazywała się wystarczająca i niektóre z nich trzeba było rozebrać. Gotowe elementy przęseł mostów stalowych, dla stalowych przęseł łukowych wytwarzane były już od samego zarania mostownictwa np. pierwsze mosty metalowe jako odlewy żeliwnych łuków i płyt pomostu dostarczane były zimą 1796 roku m. in. saniami z huty Mała Panew w Ożimku do Łażan gdzie zostały połączone ze sobą za pomocą najprostszych środków jak bolce, dociski, kliny i śruby. Transport części każdego z pięciu łuków o długości 8 m i wadze 2500 kg każdy oraz reszty obiektu o łącznej masie 48000 kg stanowił na tamte czasy swego rodzaju wyczyn. Most wybudowano w przeciągu 10 tygodni przy pomocy 60 pracowników.

Podobnie w późniejszych latach, jako prefabrykaty, dostarczano z wytwórni konstrukcji stalowych pręty kratownicowych lub segmenty łukowych dźwigarów, które scalano na budowie, z początku z użyciem nitów, później śrub, śrub ww oraz spawania. Ta technologia obowiązywała przez całe lata, stosowana jest po dzień dzisiejszy z tą tylko różnicą, że z racji coraz potężniejszych dźwigów używanych do montażu przęseł, same elementy prefabrykowane mogą mieć coraz większe gabaryty i ciężar.

¹ mgr inż. EUROPROJEKT Gdańsk sp. z o. o.

² mgr inż. EUROPROJEKT Gdańsk sp. z o. o.

³ dr inż. Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej

⁴ dr inż. Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej

⁵ dr inż. SSF Ingenieure

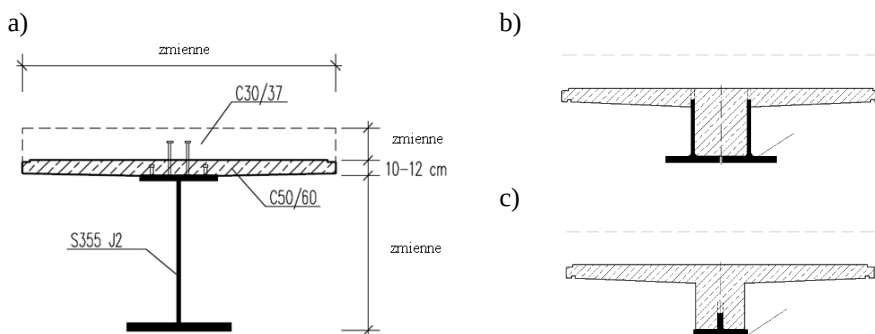
Jedną z wielu zalet konstrukcji stalowych, w tym przęseł mostów jest możliwość ich wykonania w dużych elementach lub w całości w wytwórniach. Gotowe elementy wysyłkowe (tzw. prefabrykaty) dostarcza się na miejsce wbudowania gdzie są scalane przy zastosowaniu łączników (nitowanie, śruby ww, spawanie). Wydatnie skraca to czas budowy mostu oraz daje wszelkie znane korzyści wynikające z uprzemysłowionego procesu wytwarzania. Gdy tylko jest to możliwe dąży się do stosowania takich ustrojów (mosty wiszące i podwieszone), których montaż nie wymaga rusztowań, zwłaszcza przy przekraczaniu uciążliwych przeszkód terenowych. W takich przypadkach dla małych i średnich rozpiętości znakomicie nadają się przęsła z dźwigarów VFT, gdzie sprawa wykonania płyt pomostu nie stanowi prawie żadnej uciążliwości, bo nie ma potrzeby stosowania dodatkowych szalunków pod płytę pomostową.

Montaż przęseł mostowych jest jednym z zasadniczych etapów powstawania obiektu [1]. Bywa, że w trakcie montażu dźwigarów głównych np. nad liniami kolejowymi z trakcją elektryczną, jedynym rozwiązaniem pozostaje układanie gotowych belek prefabrykowanych z użyciem dźwigów samochodowych. Przy wyborze technologii montażu oprócz tradycyjnych prac przygotowawczych, uwzględnić należy warunki: terenowe, hydrologiczne, żeglugi i spławu, geologiczne, możliwość dostawy elementów co do dopuszczalnych ciężarów i gabarytów (skrajnie nad i pod obiektem) oraz możliwości zmechanizowania robót i zapewnienia bhp. Często bywa, że sprawa technologii wykonania obiektu traktowana jest raczej marginalnie, pozostawiona inwencji przedsiębiorstwa wykonawczego, głównie w przypadku przęseł niewielkich rozpiętości, choć nie należy tego akceptować w każdym przypadku.

Na tym tle przedstawiono przęsła z prefabrykowanych dźwigarów VFT i VFT-WIB o konstrukcji zespolonej stalowo-betonowej.

2. Wprowadzenie do systemu VFT-WIB

Zastosowanie zespolonych dźwigarów z profili walcowanych stanowi kolejny krok w rozwoju systemu VFT. W nowym systemie (VFT-WIB) zamiast dwuteowych blachownic spawanych wykorzystuje się dwuteowe profile walcowane przecięte w specyficzny sposób w pobliżu osi środkowej tak, że powstają dwa teowe profile, z których każdy stanowi stalową część dźwigara zespolonego, natomiast kształt przecięcia środkownika formuje jednocześnie element zespolenia.



Rys. 1. Typowy przekrój poprzeczny dźwigara VFT: a) blachownica spawana z cienką półką betonową (VFT), b) VFT-WIB o stałej wysokości, c) VFT-WIB: możliwa zmienna wysokość przekroju

Specjalnie ukształtowana krzywa przecięcia stanowi element połączenia środnika z częścią betonową prefabrykatu zespolonego i nie są tu wymagane żadne dodatkowe zabiegi konieczne do zrealizowania zespolenia w części stalowej dźwigara. System został opracowany przez SSF Ingenieure a do rozwoju technologii w latach 2006-2009 przyczyniły się prace realizowane w ramach projektu PreCo-Beam [2].

a)



b)



c)



d)



Rys. 2. Obiekt z dźwigarów VFT-WIB (wiadukt w Pöcking): a) dźwigary walcowane po przecięciu i zabezpieczeniu antykrozyjnym w warsztacie, b) zespolenie płyty prefabrykowanej, c) transport dźwigarów na plac budowy, d) montaż dźwigara o długości 32,5m (belka dwuprzęsłowa)

3. Rys historyczny i statystyka w odniesieniu do technologii VFT

W mostach drogowych standardem są ustroje nośne z betonu i przy takiej samej geometrii rozwiązanie w stali zwykle nie będzie atrakcyjną alternatywą jeżeli chodzi o koszty konstrukcji. Konstrukcje zespolone zaczęły upowszechniać się znacząco w mostownictwie w Niemczech gdy na początku lat 90-tych władze wyszły z inicjatywą stosowania w konstrukcjach nośnych mostów drogowych rozwiązań stalowych celem uzyskania większej różnorodności rozwiązań konstrukcyjnych (ustroje nośne z betonu są standardem). System VFT przyjął się powszechnie od 1997 r. i do tej pory wybudowano tam ponad 700 obiektów mostowych w tej technologii. Na początku stosowany do belek swobodnie podpartych i ciągłych szczególnie korzyści uwydatnił w odniesieniu do konstrukcji ramowych tj. w mostach zintegrowanych, umożliwiając uzyskanie smukłości do 1/17 w narożu i 1/40 w prześle a ponadto korzystne rozwiązania konstrukcyjne są możliwe w odniesieniu do przyczółków i posadowienia. Ostatnio zaprojektowanych zostało przez SSF około 50 tego typu obiektów z przęsłami o rozpiętości od 30 do 60 metrów.

Jakkolwiek w mostach kolejowych dla krótkich rozpiętości typowym rozwiązaniem zarówno na terenie Polski jak i Niemiec są obecnie dźwigary obetonowane, w Niemczech stosowane są również wspomniane powyżej ramy zespolone.

Na czas pisania tego referatu statystyka dotycząca projektowania/realizacji obiektów w technologii VFT w Polsce przedstawia się tak jak pokazano w tablicy 1, w sumie jest to 50 obiektów w technologii VFT (i VFT-WIB).

Tablica 1. Statystyka dotycząca obiektów w technologii VFT na terytorium Polski (ujęto obiekty zaprojektowane przez EUROPROJEKT Gdańsk)

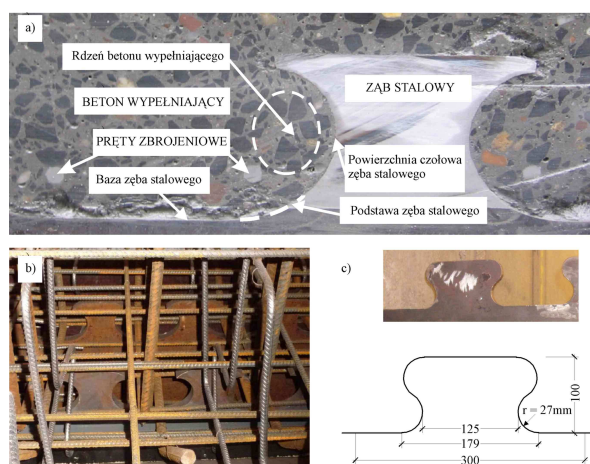
Konstrukcja dźwigarów VFT/VFT-WIB	Liczba obiektów zaprojektowanych i w fazie budowy	Liczba obiektów wybudowanych
VFT	21	23
VFT-WIB	3	3

4. Połączenie ścinane typu *composite dowels*

Podstawą systemu VFT-WIB jest innowacyjny typ połączenia ścinanego tzw. *composite dowels*. Punktem wyjścia do stosowanych obecnie rozwiązań było zespolenie typu listwowego opracowane przez Leonharda na początku lat 80-tych ubiegłego wieku tzw. listwa „perfobond” [3]. Poprzez różne formy łączników otwartych [4,5] połączenie ścinane ewoluowało do stosowanych obecnie rozwiązań, co przedstawiono między innymi w [6,7]. Termin „*composite dowels*” został wprowadzony w trakcie realizacji projektu PreCo-Beam [2] i nazwa ta w pełni oddaje charakter pracy konstrukcji. Pierwotnie projektowane łączniki ciągłe kształtowane były bowiem w ten sposób, że pole betonu w przekroju równoległym do płaszczyzny zespolenia i przechodzącym przez środek blachy, w której wycięto otwory dla zespolenia stali z betonem było znacznie mniejsze aniżeli pole stali konstrukcyjnej. Takie kształtowanie konstrukcji powodowało, że problem nośności blachy, w której wycinano otwory był marginalizowany ponieważ o nośności konstrukcji decydowała nośność betonu w otworach i ich bezpośrednim sąsiedztwie. Stąd określenie tego typu połączenia jako *concrete dowels*. Idea przecinania środnika jedną ciągłą linią cięcia z definicji powoduje, że wspomniane powyżej pole betonu będzie równe lub większe aniżeli stali, a to natomiast generuje problem nośności tak uformowanych elementów stalowych zamocowanych w otaczającym je betonie. *Steel dowels* czyli zęby stalowe, w uproszczeniu można rozpatrywać w modelu belkowym jako elementy ścinane i zginane pracujące w płaskim stanie naprężeń. W takiej sytuacji powstaje bardzo złożony układ, w którym przy wzajemnym przesunięciu elementów składowych, będącym efektem ścinania podłużnego w konstrukcji, czyli zasadniczej pracy zespolenia, możliwe są różne mechanizmy zniszczenia, zarówno stali jak i betonu. Zasadniczą formę stosowanego obecnie przemysłowo kształtu wycięcia zaproponował Barthelémy [6] (SETRA), procedury stosowane obecnie do wymiarowania połączenia ścinanego ze względu na zniszczenie betonu podał Seidl [8] (SSF) a procedury wymiarowania stalowej części połączenia zostały opracowane przez Lorenca [9] (PWt). Pierwotnie stosowano kształt PZ jak na rys. 3b oraz rys. 2, obecnie stosuje się kształt MCL jak na rys 3c.



Rys. 3. Stalowe łączniki jako części składowe zespolenia: a) łączniki sworznikowe (klasyka), b) zespolenie „*composite dowels*” kształt PZ, c) zespolenie „*composite dowels*” kształt MCL (zdjęcie: INTOP Szczecin)



Rys. 4. Zespolenie typu „*composite dowels*”: a) opis poszczególnych części składowych zespolenia, b) zespolenie o kształcie MCL z przygotowanym zbrojeniem przed zabetonowaniem, c) geometria i wymiary kształtu PZ

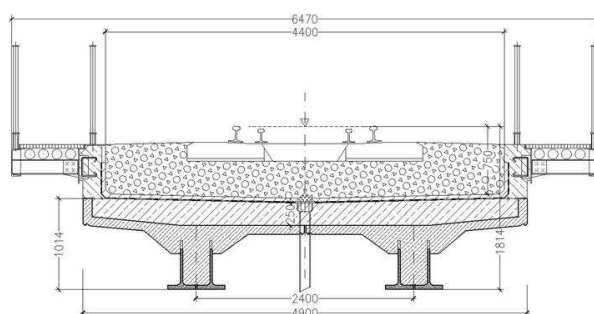
5. Wybrane realizacje

Zaprezentowano wybrane obiekty zrealizowane w Polsce z połączeniem w kształcie MCL, czyli obecnie zakładanym jako docelowy (nie prowadzi się już prac badawczych nad optymalizacją kształtu). Są to obiekty o unikatowych, jak na dzień dzisiejszy, konstrukcjach.

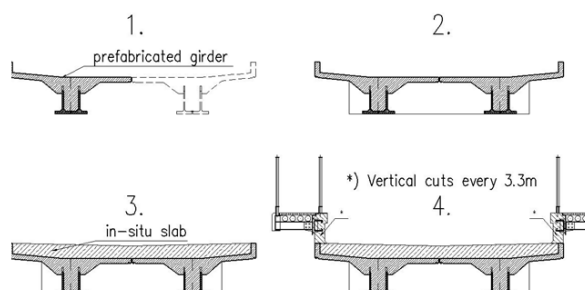
5.1. Most kolejowy

Pierwszy na świecie most kolejowy w technologii VFT-WIB został zaprojektowany i zrealizowany w Polsce (Linia nr. 61 Kielce – Fosowskie, km 23.0 + 93) jako rozwiązanie zamienne w stosunku do pierwotnego projektu klasycznego przęsła

zespólonego. Konstrukcję stanowią 4 przęsła swobodnie podparte (2 w każdym torze) o rozpiętości 16,5m. Przekrój poprzeczny przęsła pokazano na rysunku 5. Zastosowano przecięte kształtowniki HE1000x438 ze stali S460ML oraz beton C50/60 w prefabrykatach i C40/50 w płycie monolitycznej. **Konstrukcję nośną przęseł stanowią przecięte dwuteowniki walcowane zabetonowane bez żadnych dodatkowych zabiegów związanych z obróbką części stalowej; ustrój nośny zaprojektowano bez żadnej śruby oraz spoiny.** Prace związane z realizacją tego innowacyjnego mostu prowadzono przy wsparciu finansowym MNiSW w ramach projektu M3M (Inicjatywa Technologiczna I) koordynowanego przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów. Proces jej wytwarzania przedstawiono w [7].



Rys. 5. Przekrój poprzeczny prototypowego przęsła mostu kolejowego



Rys. 6. Etapy realizacji przęseł kolejowych VFT-WIB



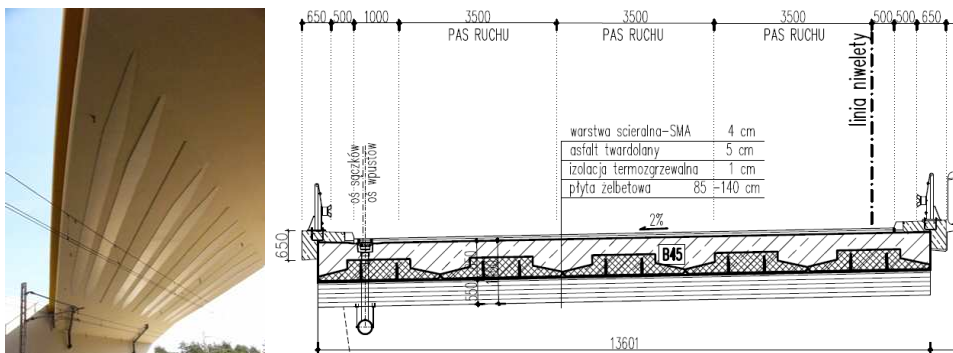
Rys. 7. Prefabrykat zespolony w trakcie montażu na placu budowy (zdjęcie: Intop Tarnobrzeg)



Rys. 8. Most podczas obciążenia próbnego realizowanego przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów (zdjęcie: Intop Tarnobrzeg)

5.2. Wiadukt drogowy

Wiadukt drogowy WD4 przeprowadzający drogę ekspresową S5 (odcinek wężła Stryśzek do wężła Białe Błota) oraz drogę dojazdową nad torami PKP zaprojektowano i wybudowano w sposób odbiegający od technologii powszechnie stosowanych, co widoczne jest już w konstrukcji przęsła od spodu (rys. 9). Obiekt stanowią 3 niezależne konstrukcje w postaci ram jednoprzęsłowych w dużym skosie (dwie pod obie nitki drogi ekspresowej i jedna pod drogę dojazdową), kąt skrzyżowania z przeszkodą wynosi tylko 38.36 stopnia (rys. 10). Proces realizacji obiektu zaprezentowano szczegółowo w [10].



Rys. 9. Widok ramy od spodu i przekrój poprzeczny pojedynczej konstrukcji przęsła



Rys. 10. Realizacja obiektu – prefabrykat ustawiony nad linią kolejową (z lewej) i prefabrykaty na tle dwóch zrealizowanych ram (z prawej); zdjęcia Budimex-Dromex

6. Podstawy projektowania

Przy projektowaniu dźwigarów VFT-WIB w aspekcie analizy globalnej postępuje się tak jak przy VFT, natomiast zupełnie inne są dwie kwestie dotyczące wymiarowania: przenoszenie siły poprzecznej oraz wymiarowanie połączenia ścinanego – syntetycznie przedstawiono to w tablicy 2 na tle klasycznych rozwiązań. Przenoszenie siły poprzecznej zależy od udziału środnika stalowego w całkowitej powierzchni pola przekroju poprzecznego. Połączenie ścinane projektuje się zgodnie z [8] w odniesieniu do części betonowej lub za pomocą badań zgodnie z załącznikiem B normy PN-EN 1994-1-1 (nośność połączenia ścinanego jako całości), oraz zgodnie z [9] w odniesieniu do części stalowej. Algorytm przy projektowaniu części stalowej zależy od położenia poziomu połączenia ścinanego w stosunku do osi bezwładności przekroju w poszczególnych fazach obliczeniowych i sprawdza się stan graniczny nośności, użyteczności i zmęczenie. Współczynniki w równaniach (12) i (41) wg [9] zależą od kształtu wycięcia.

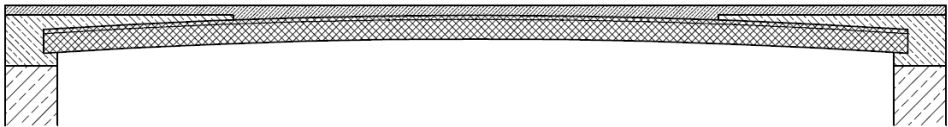
7. Perspektywy rozwoju i wnioski

Na rys. 11 przedstawiono obecnie wprowadzaną koncepcję z zakrzywionym prefabrykatem co ma umożliwiać sprawne uzyskanie zmiennej wysokości konstrukcji (i tym samym większych rozpiętości) nie wprowadzając jednocześnie dodatkowych faz technologicznych w stosunku do klasycznego VFT – obliczeniowo można to ująć jako pojawienie się w ustroju przekrojów zespolonych, w których występują 3 stadia realizacji płyty pomostowej. Przy realizacji zbrojenie uciągające prefabrykat w poprzecznicę układane jest po ustawieniu prefabrykowanej belki, co umożliwić ma dogodne zazbrojenie poprzecznic. Zbrojenie to nie musi być sprawdzane na zarysowanie co umożliwia jego znaczne wycięcie i stanowi efektywne odciążenie stali konstrukcji w przeszle.

Tablica 2. Usystematyzowanie dźwigarów VFT-WIB w kontekście pola przekroju poprzecznego oraz mechanizmu przenoszenia ścinania

Przekrój poprzeczny dźwigara	Przenoszenie siły poprzecznej	Projektowanie części stalowej połączenia ścinanego
100% Pole stali/pole przekroju stalowy zespólny zestbet beton sprężony a) b) c) d) e) f) g)	Stal konstrukcyjna przenosi ścinanie (środnik)	-
		EC4
		EC4
	Stal konstrukcyjna +beton +strzemiona przenoszą ścinanie	$v_r = A_{el} \cdot t_w \cdot f_y$ wzór (12) wg [9]
	Beton i strzemiona przenoszą ścinanie	$\sigma_s = \frac{1}{A_{el}} \left(V \cdot \frac{S_y}{I_y \cdot t_w} \right) + \beta \left(M \cdot \frac{z}{I_y} + N \cdot \frac{1}{F} \right)$ wzór (41) wg [9]
		-
		-

Ponadto równolegle rozwijane są inne bardziej zaawansowane technologicznie rozwiązania, jednakże są one na razie na etapie projektowania a nie realizacji (rozwiązanie jak na rys. 11 jest już stosowane).



Rys. 11. Nowe rozwiązanie betonowania przekroju umożliwiające uzyskanie zmiennej wysokości konstrukcji (przykładowa rama jednoprzęsłowa)

Tak więc z racji uproszczonych metod wykonywania dźwigary VFT-WIB przynoszą wymierne efekty ekonomiczne poprzez zmniejszenie kosztów wytworzenia oraz

skrócenie czasu realizacji konstrukcji. Niezależnie od pozytywnych wyników obciążeń próbnych przedstawione w referacie zrealizowane obiekty jako prototypowe powinny być poddawane w trakcie eksploatacji specjalnym oględzinom, zwłaszcza w początkowym okresie eksploatacji.

Literatura

- [1] RABIEGA J., Sposoby i przykłady realizacji montażu stalowych przęseł mostów kolejowych. Drogi Kolejowe nr 2/1991
- [2] PreCo-Beam: Prefabricated enduring composite beams based on innovative shear transmission. Research Fund for Coal and Steel, Contract N° RFSR-CT-2006-00030. 01/07/2006 – 30/06/2009.
- [3] LEONHARD F. et alt., Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit; New advantageous shear connection for composite structures with high fatigue strength, Beton- und Stahlbetonbau, Heft 12/1987.
- [4] WURZER O., Zur Tragfähigkeit von Betondübeln, Dissertation, Universität der Bundeswehr, München 1998
- [5] ZAPFE C., Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Betondübeln zur Übertragung der Längsschubkräfte, Dissertation, Universität der Bundeswehr, München 2001
- [6] BARTHELLEMY J., HECHLER O., LORENC W., SEIDL G., VIEFHUES E., Premiers résultats du projet de recherche européen Precobeam de connexion par découpe d'une tôle. Construction métallique, CTICM, 2009, vol. 46, no 3, pp. 3-26.
- [7] SEIDL G., LORENC W., KOŁAKOWSKI T.: Innovative composite bridges. Zespolone konstrukcje mostowe. Kraków 2009.
- [8] SEIDL G., Behaviour and load bearing capacity of composite dowels in steel-concrete composite girders. Rozprawa doktorska. Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej 2009, Raport serii PRE nr 4/2009
- [9] LORENC W., Nośność ciągłych łączników otwartych w zespolonych konstrukcjach stalowo-betonowych, Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 2010.
- [10] KOŁAKOWSKI T., KOSECKI W., LORENC W., LEUSZ R. Nowatorska konstrukcja wiaduktu drogowego. MOSTY 1/2010

PREFABRICATED STEEL-CONCRETE COMPOSITE GIRDERS VFT-WIB IN SUPERSTRUCTURES OF ROAD AND RAILWAY BRIDGES

Summary

The latest achievements by VFT-WIB technology are presented. On the background of VFT development modern structures realized last year are presented. Statistics, some design aspects and expected future development are highlighted.