

Prefabrykowane dźwigary zespolone stalowo-betonowe VFT-WIB do budowy przęseł mostów drogowych i kolejowych

Charakterystyka dźwigarów VFT-WIB

Istotą systemu VFT jest stosowanie prefabrykowanych dźwigarów zespolonych z półką żelbetową grubości $10 + 12$ cm, która jednocześnie stanowi deskowanie pomostu, aktywnie współpracujące przy przenoszeniu obciążeń stałych i użytkowych. Prefabrykaty są ustawiane obok siebie na uprzednio przygotowanych podporach i łączone ze sobą na czas montażu. Następnie są wykonywane (mieszanka betonowa układana w miejscu wbudowania): płyta pomostu oraz poprzecznicę podporową (lub narozę ramy). W ten sposób powstaje przeszło monolityczne, mimo że większa część procesu produkcyjnego odbywa się poza obiektem. Nie ma konieczności stosowania stężeń pomiędzy dźwigarami, a prefabrykowana półka betonowa zapewnia wystarczającą nośność ze względu na zwiercenie w trakcie montażu. Prefabrykaty mają szerokie półki, stanowiące deskowanie płyty monolitycznej, więc montaż konstrukcji nad czynnymi szlakami komunikacyjnymi odbywa się przy minimalnej ingerencji w ruch pod budowany obiekt. W dźwigarach VFT stosuje się blachownice spawane (rys. 1a), a wymiary górnej półki determinuje klasa sworzni potrzebnych do ukształtowania zespolenia pomiędzy stacją i betonem. W systemie VFT są stosowa-

wane klasyczne łączniki zespalaające w postaci sworzni z głowką. Ponieważ są one elementem generującym koszty w konstrukcjach zespolonych, poszukiwano alternatywnego rozwiązania zespolenia, co zaowocowało stworzeniem systemu VFT-WIB, opracowanego przez SSF Ingenieure, a pierwszy obiekt mostowy zrealizowano w miejscowości Pöcking w Niemczech.

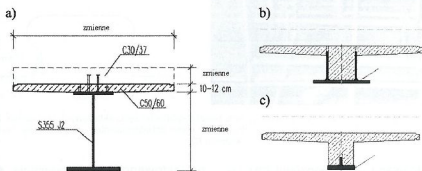
Zastosowanie zespolonych dźwigarów z kształtowników walcowanych (rys. 1b, c) stanowi kolejny krok w rozwoju systemu VFT. W nowym systemie (VFT-WIB) zamiast dwuteowych blachownic spawanych wykorzystuje się dwuteowniki walcowane przecięte w specyficzny sposób w pobliżu osi środknika tak, że powstają dwa elementy teowe, z których każdy stanowi stalową część dźwigara zespolonego, natomiast kształt przecięcia środknika formuje jednocześnie stalową część połączenia ścinanego. Specjalnie ukształtowana krzywza przecięcia stanowi element połączenia środknika 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 (Monachium), a do rozwoju technologii w latach 2006-2009 przyczyniły się prace realizowane w ramach projektu PreCo-Beam [2].

Rys historyczny technologii VFT

W mostach drogowych standardem są ustroje nośne z betonu i przy takiej samej geometrii rozwiązanie o konstrukcji stalowej zwykle nie będzie atrakcyjną alternatywą, jeżeli chodzi o koszty konstrukcji. Konstrukcje zespolone zaczęły upowszechniać się znacząco w mostownictwie w Niemczech od lat dziewięćdziesiątych XX w. System VFT jest stosowany powszechnie od 1997 r. Dotychczas wybudowano ponad 700 obiektów mostowych według tej technologii. Na początku ustroje nośne były projektowane jako swobodnie podparte i ciągłe, a następnie ramowe w mostach zintegrowanych, umożliwiając uzyskanie smukłości do $1/17$ w narozu i $1/40$ w przęśle. W przypadku ustrojów ramowych jest też możliwe uzyskanie korzystnych rozwiązań przyczółków i posadowienia. Ostatnio zaprojektowano około 50 tego rodzaju obiektów, z przęsłami rozpiętości od 30 do 60 m. Jakkolwiek w mostach kolejowych małych rozpiętości typowym rozwiązaniem, zarówno na terenie Polski, jak i Niemiec, są obecnie dźwigary obetonowane, to w Niemczech są stosowane również wspomniane wyżej ramy zespolone. Na koniec roku 2010 liczba projektowania/realizacji obiektów w technologii VFT i VFT-WIB w Polsce wynosi 50 (w tym 6 obiektów VFT-WIB).

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 osiemdziesiątych ubiegłego wieku – tzw. listwa „perforbond” [3]. Przez różne formy łączników otwartych [4, 5] połączenie ścinane ewoluowało do stosowanych obecnie rozwiązań, co przedstawiono m.in. w [6, 7]. Termin *composite dowels* został wprowadzony w trakcie realizacji projektu PreCo-



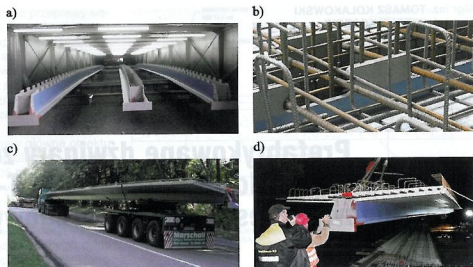
Rys. 1. Typowy przekrój poprzeczny dźwigara VFT: a) blachownica spawana z cienką półką betonową (VFT), b) VFT-WIB o stałej wysokości, c) VFT-WIB: możliwa zmienna wysokość przekroju

-Beam [2]. Pierwotnie projektowane łączniki ciągłe były kształtowane w ten sposób, że pole powierzchni betonu w przekroju równoległym do płaszczyzny zespolenia i przechodzącym przez środek blachy, w której wycięto otwory do zespolenia stali z betonem, było znacznie mniejsze niż pole powierzchni stali konstrukcyjnej. W takim rozwiązaniu problem nośności blachy, w której wycinano otwory, był marginalizowany, ponieważ o nośności konstrukcji decydowała nośność betonu w otworach i ich bezpośrednim sąsiedztwie. Idea przecinania środkiem jedną ciągłą linią cięcia powoduje, że wspomniane wycięcie pola przekroju betonu będzie równe lub większe niż 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 naprężenia. W takiej sytuacji powstaje złożony układ, w którym przy wzajemnym przesunięciu elementów składowych, będącym efektem ścinania podłużnego w konstrukcji, czyli zasadniczej pracy zespolenia, są możliwe różne mechanizmy zniszczenia, zarówno stali, jak i betonu. Zasadniczą formę stosowaną obecnie przemysłowo kształtu wycięcia zaproponował Barthellerny [6] (SETRA – Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes, Francja), a procedury wymiarowania połączenia ścinanego ze względu na zniszczenie betonu podał Seidl [8] (SSF Ingenieure, Monachium), natomiast koncepcję podejścia do problemu kształtu zębów oraz wymiarowania stalowej części połączenia opracował Lorenz [9] (Politechnika Wrocławska). Pierwotnie stosowano kształt PZ (rys. 2 oraz 3b i 4c), a obecnie stosuje się kształt MCL (rys. 3c oraz 4b).

Wybrane realizacje

Omówiono wybrane obiekty zrealizowane w Polsce, w których zastosowano połączenie docelowe w kształcie MCL.

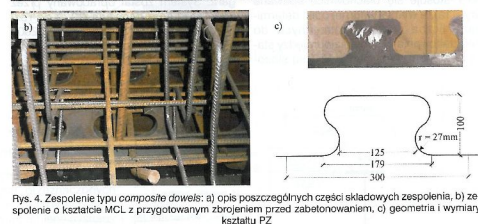
- **Most kolejowy.** Pierwszy na świecie most kolejowy z dźwigarami VFT-WIB zaprojektowano i zrealizowano w Polsce (linia nr 61 Kielce – Fosowskie, km 23,0 + 93) jako rozwiązanie zamienne w stosunku do pierwotnego projektu klasycznego przęsła swobodnie podparte (2 w każdym torze) rozpiętości 16,5 m. Przekrój poprzeczny przęsła pokazano na rys. 5, a prefabrykat na rys. 6. Zastosowano przecięcie kształtowniki HE1000 × 438 ze stali S460ML oraz beton klasy C50/60 w prefabrykatakach i C40/50 w płycie monolitycznej. Konstrukcję nośną przęsła stanowią przecięte dwuteowni-



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



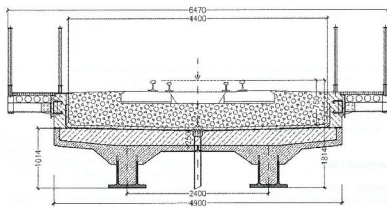
Rys. 3. Stalowe łączniki jako części składowe zespolenia: a) łączniki sworzniowe (rozwiązanie klasyczne), b) zespolenie composite dowels kształt PZ, c) zespolenie composite dowels kształt MCL (fot. INTOP Szczecin)



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

ki walcowane, zabetonowane bez dodatkowych zabiegów związanych z obróbką części stalowej; ustrój nośny za-

projektowano bez stosowania śrub i spoin. Most zrealizowano przy wsparciu finansowym Ministerstwa Nauki i Szkol-



Rys. 5. Przekrój poprzeczny prototypowego przęsta mostu kolejowego

nictwa Wyższego w ramach projektu M3M (Inicjatywa Technologiczna I) koordynowanego przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów (por. [7]).

• **Wiadukt drogowy.** Konstrukcję wiaduktu WD4 przeprowadzającego nad torami PKP drogę ekspresową S5 (odcinek od węzła Stryżek do węzła Białe Błota) 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 38,36° (rys. 7). Realizację obiektu omówiono szczegółowo w [10].



Rys. 7. Realizacja obiektu – prefabrykat ustawiony nad linią kolejową (z lewej) i prefabrykaty na tle dwóch zrealizowanych ram (z prawej); fot. Budimex-Dromex

Podstawy projektowania

Przy projektowaniu dźwigarów VFT-WiB w aspekcie analizy globalnej postępuje się tak jak w przypadku VFT (klasyczne konstrukcje zespolone), natomiast zupełnie inne niż w rozwiązaniach klasycznych są dwie kwestie dotyczące wymiarowania: przenoszenie siły poprzecznej oraz wymiarowanie połączenia ścinanego. Przenoszenie siły poprzecznej zależy od udziału środka stalowego w całkowitej powierzchni pola przekroju poprzecznego (tablica). Oznacza to, że w przypadku konstrukcji z połączeniem ścinanym oddalonym od środka ciężkości przekroju zespolonego można stosować algorytm jak w odniesieniu do belki żelbetonowej, a w przypadku konstrukcji z połączeniem ścinanym w poziomie środka ciężkości w przenoszeniu siły poprzecznej bierze udział zarówno środek stalowy, jak i beton. Połączenia 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 [11] (nośność połączenia ścinanego jako całości), oraz zgodnie z [9] w przypadku części stalowej. Algorytm projektowania części stalowej zależy od położenia poziomu połączenia ścinanego w stosunku do osi bezwładności przekroju w poszczególnych fazach obciążeniowych. Sprawdza się stan graniczny nośności, użytkowości i zmęczenia

Usystematyzowanie dźwigarów VFT-WiB

Przekrój poprzeczny dźwigara	Przenoszenie siły poprzecznej	Projektowanie części stalowej połączenia ścinanego
	Stal konstrukcyjna przenosi ścinanie (środek)	–
		EC4
	stal konstrukcyjna + beton + strzemienna przenoszą ścinanie	EC4
		$V_r = A_{ef} u_f l_y$ wzór (12) wg [9]
	beton i strzemienna przenoszą ścinanie	$\sigma_s = \frac{1}{A_{ef}} \left(V \frac{S_y}{I_y l_w} \right) + \beta \left(M \frac{z}{I_y} + N \frac{1}{F} \right)$ wzór (41) wg [9]
		–

według procedur podanych w [9]. We wzorach w tablicy σ_s oznacza naprężenia główne maksymalne przy podstawie zęba (por. rys. 4a), V_r – ścinanie podłużne (siłę przypadającą na jednostkę długo-

ści), A_{ef} – współczynnik kształtu zęba zgodnie z [9], l_y – granicę plastyczności stali, V , M i N – siłę poprzeczną, moment zginający i siłę osiową w belce, odpowiednio, I_y , S_y i F – moment bezwładności

ści przekroju zespolonego, moment statyczny stalowej części przekroju i pole przekroju zespolonego, odpowiednio, t_w – grubość środnika stalowego, a z – odległość poziomu podstawy zęba od osi bezwładności przekroju zespolonego.



Rys. 8. Nowe rozwiązanie betonowania poprzecznic umożliwiające uzyskanie zmiennej wysokości konstrukcji (przykładowa rama jednoprzęslowa)

Uwagi końcowe

Obecnie wprowadzaną koncepcję rozwiązania z zakrzywionym prefabrykatem przedstawiono na rys. 8. Umożliwia ona uzyskanie zmiennej wysokości konstrukcji (i tym samym większych rozpiętości) bez wprowadzania dodatkowych faz technologicznych w stosunku do klasycznego rozwiązania VFT. Obliczenia można to ująć jako pojawienie się w ustroju przekrojów zespolonych, w których występują trzy stadia realizacji płyty pomostowej. Podczas realizacji zbrojenie uciągające prefabrykat w poprzecznicę jest układane po ustawieniu prefabrykowanej belki, co ma umożliwić dogodne zazbrojenie poprzecznic. Zbrojenie to nie musi być sprawdzane na zarysowanie; umożliwia to jego znaczne wyłączenie. Ponadto rozwijane są inne rozwiązania. Stosowanie dźwigarów VFT-WIB przyno-

si wymierne efekty ekonomiczne oraz skrócenie czasu realizacji konstrukcji.

PIŚMIENNICTWO

- [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° RFSCR-CT-2006-00030. 01/07/2006 – 30/06/2009.
- [3] Leonhard F. et al.: Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit; New advantageous shear connection for composite structures with high fatigue strength. „Beton- und Stahlbetonbau”, 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. Disserta-

tion. Universität der Bundeswehr, München 2001.

- [6] Barthélémy J., Hechler O., Lorenc W., Seidl G., Viehues E.: Premiers résultats du projet de recherche européen Precobeam du projet de recherche européen Precobeam de connexion par découpe d'une tôle. „Construction métallique”, CTICM, 2009, vol. 46, no 3.
- [7] Seidl G., Lorenc W., Kolakowski T.: Innovative composite bridges. Konferencja „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 Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.
- [10] Kolakowski T., Kosecki W., Lorenc W., Leusz R.: Nowatorska konstrukcja wiaduktu drogowego. „Mosty”, nr 1/2010.
- [11] PN-EN 1994-1-1 Eurokod 4: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

Mgr inż. EDMUND BUDKA

Mgr inż. SZYMON GRUBA

Mgr inż. ADAM STEMPNIEWICZ

Biurowo Projektowo-Badawcze PROMOST Wrocław

Mgr inż. JANUSZ KANIA

Przedsiębiorstwo Budowlane FILAR Sp. z o.o.

Dr inż. WOJCIECH LORENC

Dr inż. JÓZEF RABIEGA

Politechnika Wrocławska