

Mosty hybrydowe stalowo-betonowe: najnowsze rozwiązania dostosowane do polskiej specyfiki budowy mostów drogowych

Steel-concrete hybrid bridges: the latest solutions adapted to the Polish specifics of road bridge construction



dr hab. inż. Maciej Kozuch, prof. uczelni

Politechnika Wrocławska,
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
maciej.kozuch@pwr.edu.pl
ORCID 0000-0002-1743-5233



prof. dr hab. inż. Wojciech Lorenc

Politechnika Wrocławska,
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
wojciech.lorenc@pwr.edu.pl
ORCID 0000-0003-2693-1252

Streszczenie

W artykule przedstawiono dwie najnowsze technologie budowy mostów (wraz z ich wdrożeniami) oparte na użyciu belek hybrydowych z łącznikami ścinanymi typu composite dowels. Jedna z nich, z zastosowaniem belek CB, jest przeznaczona do przęseł o długości 20–40 m. Wykorzystuje się w niej środniki betonowe o grubości jedynie 20 cm, w powiązaniu

z nowo opracowanym systemem zbrojenia SRCD doweli betonowych. Druga technologia, nazywana krokodylem, powstała z myślą o budowie mostów o rozpiętości 50–60 m. Przedstawiono zalety obu technologii, a także kwestie normalizacji związanej z wykorzystaniem łączników typu composite dowels w belkach hybrydowych.

Słowa kluczowe łączniki composite dowels, belki hybrydowe, mosty hybrydowe, belki CB, belki typu krokodyl

Abstract

The paper presents two of the latest bridge construction technologies (along with their implementations) based on the use of hybrid beams with shear connectors of the composite dowel type. One of them, employing CB beams, can be used for spans ranging from 20 to 40 m and utilizes concrete webs only 20 cm thick, combined with a newly

developed SRCD reinforcement system for concrete dowels. The second technology, called the Crocodile, is used for bridges with spans of 50 to 60 m. The advantages of both technologies are presented, as well as issues related to standardization of the use of composite dowel connectors in hybrid beams.

Keywords composite dowels, hybrid beams, hybrid bridges, CB beams, Crocodile beams

WPROWADZENIE

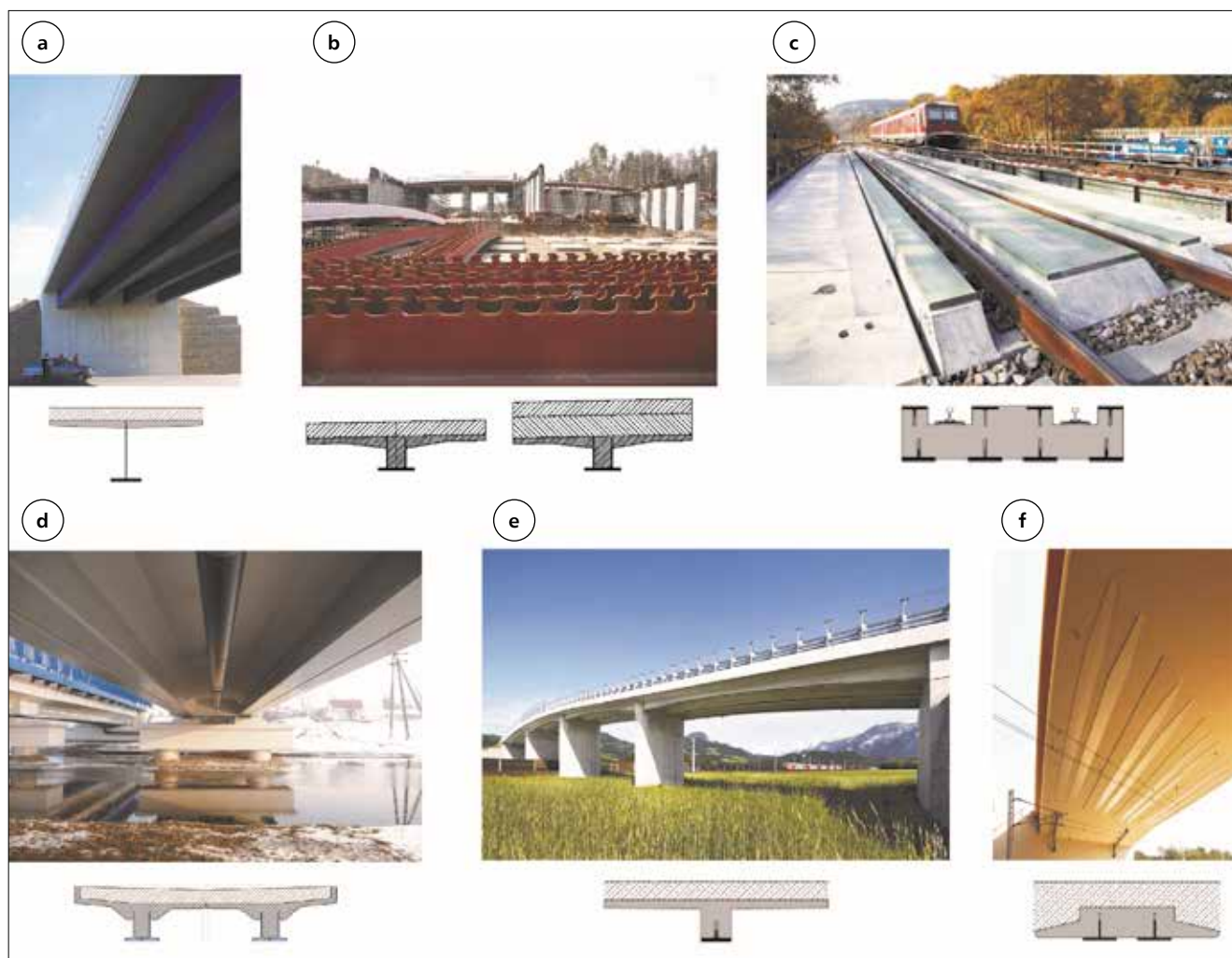
W ciągu ostatnich 20 lat nastąpił rozwój technologii, która pozwoliła na wprowadzenie do budownictwa belek o przekrojach złożonych z teownika stalowego zintegrowanego z teownikiem betonowym [1]. Stało się to możliwe dzięki połączeniu typu composite dowels (CD – tzw. dowele zespolone)

i dało początek powstaniu nowych form mostów. Zebrano nieformalne wytyczne projektowe i opracowano Eurokod 1994-1-102 [2]. W pracach tych kluczową rolę odegrali polscy inżynierowie i naukowcy, a najnowsze technologie powstały w Polsce, w warunkach bardzo konkurencyjnego rynku projektowego. Obecnie w mostach drogowych

stosuje się zasadniczo dwa systemy belek hybrydowych: belki CB i typu krokodyl. Autorzy przedstawiają zrealizowane ostatnio mosty oraz postęp technologii.

TŁO HISTORYCZNE

Od 2005 r. prowadzono prace, w wyniku których zbudowano wiele mostów



Rys. 1. Przekroje poprzeczne i zrealizowane konstrukcje mostów z zespoleniem CD [1]

o nowych typach przekrojów poprzecznych (rys. 1). Ich wspólną cechą było stosowanie teownika stalowego zintegrowanego z betonem za pomocą połączenia ścinanego composite dowels. Rozwiązania te były raczej poszukiwaniem nowych kierunków i nie doprowadziły do wypracowania gotowych systemów; nie były w stanie wejść do głównego nurtu jako alternatywa dla standardowych rozwiązań.

W obecnej dekadzie sytuacja uległa zmianie: rozwój technologii doprowadził do powstania dwóch systemów budowy mostów – CB i tzw. krokodyl. Są one w Polsce konkurencją dla istniejących rozwiązań w przedziale rozpiętości mostu odpowiednio: 20–40 m oraz 50–60 m. W artykule przedstawiono te rozwiązania.

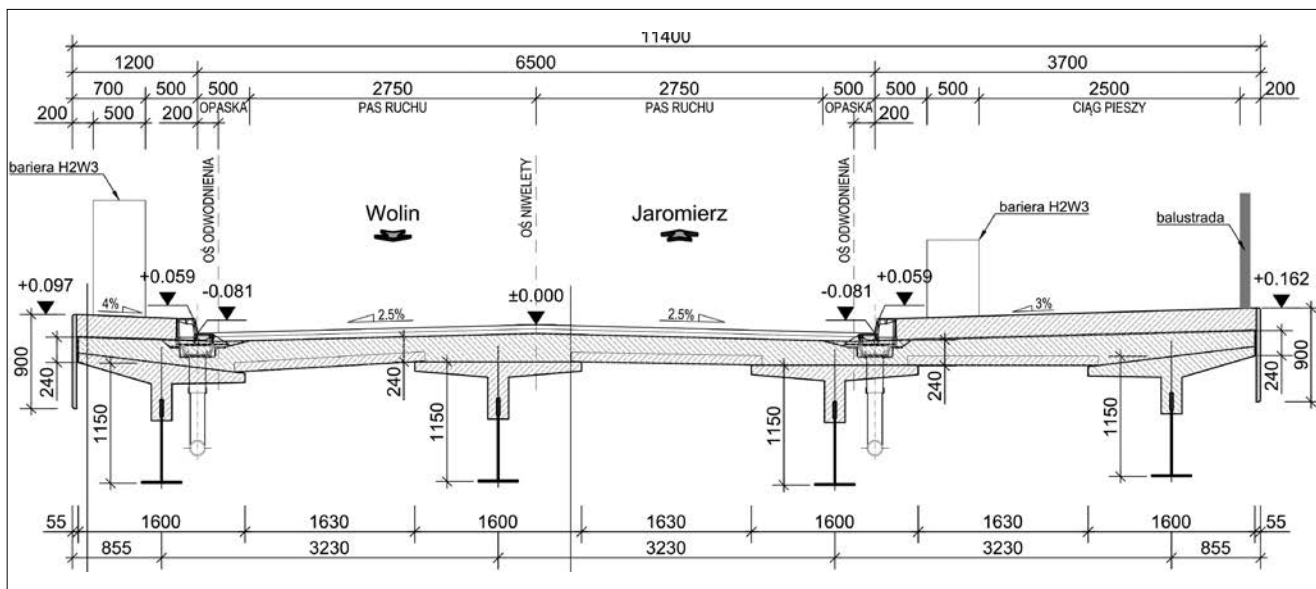
Zaznacza się, że termin „mosty hybrydowe” ma charakter nieformalny (na tym etapie). Terminem formalnym jest definiowany w [2] „element hybrydowy” stalowo-betonowy, który jest po prostu elementem zespolonym stalowo-betonowym, ale charakteryzującym się tym, że przy jego projektowaniu można uwzględnić przeniesienie części siły poprzecznej przez część betonową [2].

BELKI CB

System opracowano na potrzeby budowy obiektów mostowych w ciągu drogi S3 na odcinku Dargobądz–Troszyn. Wybudowano 5 obiektów nad drogą oraz jedną długą estakadę w ciągu drogi. Jest to nowy system belek hybrydowych, w którym zastosowano prefabrykację oraz nowy typ

połączenia ścinanego composite dowels, umożliwiający budowanie cienkich środników betonowych o grubości 20 cm (nigdy wcześniej nie stosowano łączników CD w tak cienkich środnikach betonowych). Wyniki obciążeń próbnych jednoznacznie pozytywnie potwierdziły wszystkie założenia projektantów.

Na zdjęciach zaprezentowano: przekrój poprzeczny wiaduktu nad drogą (rys. 2), budowę obiektów nad S3 (fot. 1), estakadę w ciągu drogi w trakcie budowy (fot. 2), ukończoną estakadę (fot. 3). Na fot. 4–6 pokazano części składowe belki. W połączeniu ścinanym (fot. 5) zastosowano opracowany specjalnie na potrzeby tego kontraktu nowy typ zbrojenia doweli betonowych, tzw. SRCD (strongly reinforced composite dowels), który



Rys. 2. Przekrój poprzeczny jednego z wiaduktów nad S3



Fot. 1. Belki CB w wiaduktach nad S3 w trakcie budowy: a) widok ogólny na jeden z wiaduktów, b) ustawiona pierwsza belka wiaduktu (widoczne tymczasowe podpory przygotowane w połowie rozpiętości każdego przęsła), c) widok z góry na wiadukt podczas układania prefabrykowanych płyt deskowania traconego płyty pomostowej, d) zbliżenie na belkę CB od strony poprzecznic betonowej – widoczne pręty do zespolenia z płytą pomostową

umożliwił zrealizowanie środnika betonowego o grubości jedynie 20 cm.

Rozwiązanie to na różnych etapach projektowania i realizacji było prezentowane podczas kolejnych edycji konferencji Wrocławskie Dni Mostowe. Polega ono na zastosowaniu belki o przekroju hybrydowym, w którym spawany teownik stalowy połączono z relatywnie ciekim betonowym środnikiem o grubości 20 cm za pomocą doweli zespolonych:

- część stalowa składa się z pasa dolnego, środnika o relatywnie małej grubości (min. 10 mm) oraz listwy z doweli o grubości 30 mm, spawanej do środnika;
- połączenie ścinane stanowią dowele zespolone złożone ze wspomnianych już doweli stalowych zatopionych w środniku betonowym w taki sposób, że otulina betonowa doweli stalowych wynosi 100 mm;
- zastosowano nowy sposób zbrojenia doweli, a za pomocą badań, zgodnie z Eurokodem 4, określono nośność połączenia (niezależnie od obliczenia według dostępnych wytycznych projektowych);
- przekrój zaprojektowano zgodnie z koncepcją hybrydową: w przekroju podłużnym teownik stalowy występuje zasadniczo w strefie dodatnich momentów zginających, a na pozostałym obszarze przekrój jest betonowy; strefa przejściowa jest złożoną konstrukcją stalowo-betonową;

• zastosowano prefabrykację płyty pomostowej wprowadzoną wcześniej na moście w Sobieszewie.

Nowe belki wykorzystano w mostach nad drogą ekspresową i w jej ciągu. W pierwszym przypadku w dwuprzęsłowych wiaduktach o rozpiętości ok. 20 m, a w drugim – w przęsłach dojazdowych do głównego mostu łukowego, tworzących wieloprzęsłową estakadę (belka ciągła) z przęsłami o rozpiętości 36 m. Niezależnie od analiz za pomocą MES (np. dwuprzęsłowy obiekt WD5 był analizowany niezależnie przez trzy osoby stosujące różne podejścia) wykonano badania mające na celu pokazanie nośności zespolenia (zarówno w próbie bezpośredniego ścinania, jak i w belce) pod obciążeniem statycznym oraz cyklicznym (zmęczeniowym).

SYSTEM KROKODYL

Pierwszy most wybudowany w technologii krokodyl został oddany do użytku na przełomie 2024 i 2025 r. Była to przeprawa przez rzekę Kwisę w Trzebowie koło Żagania, zlokalizowana w ciągu drogi powiatowej łączącej m.in. znajdujące się w bliskiej odległości od siebie dwa poligony sił pancernych NATO. System krokodyl został opisany m.in. w [3], a wybrane doświadczenia z pierwszej budowy przedstawiono w [4].

Krokodyl powstał w odpowiedzi na zapotrzebowanie na wydajną i tanią technologię budowy mostów kilkuprzęsłowych o rozpiętości głównego przęsła do ok. 60 m w schemacie statycznym belki ciągłej lub nawet większej w przypadku konstrukcji ramowych. Ten segment rozpiętości zdominowany jest aktualnie przez dwa rozwiązania: sprężone mosty betonowe oraz klasyczne konstrukcje zespolone stalowo-betonowe, w których dźwigary główne są wykonane z blachownic spawanych. W systemie krokodyl dźwigary betonowe lub stalowe (zespolone z płytą pomostową) zastąpiono dźwigarami hybrydowymi, aby łączyć zalety i eliminować wady obu stosowanych do tej pory rozwiązań.



Fot. 2. Budowa estakady z belek CB sekcji A (osie 1-14) mostu nad Dziwną M-7L na odcinku S3 Dargobądz-Troszyn



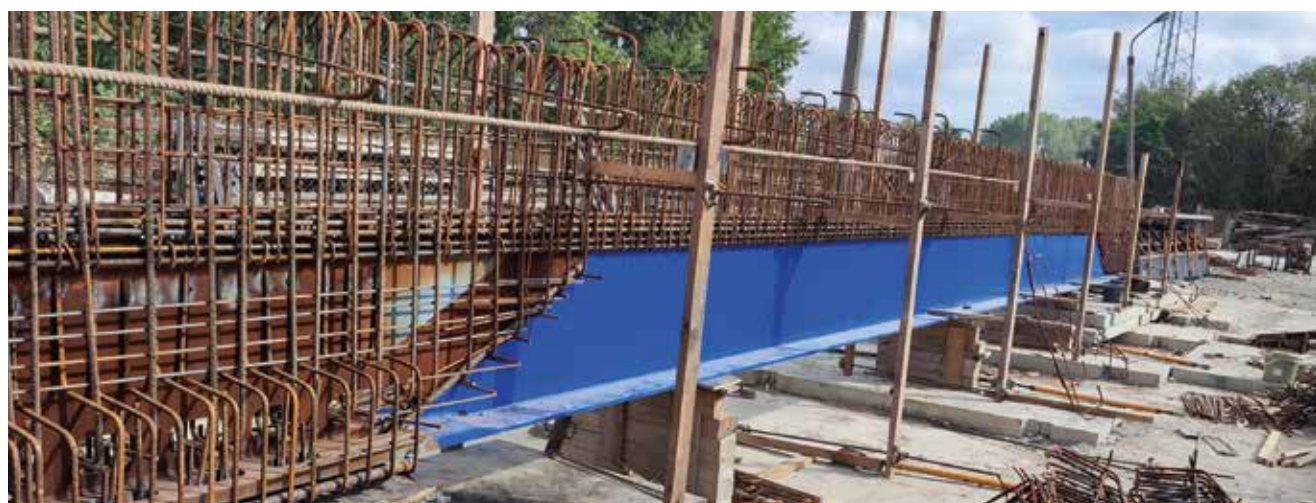
Fot. 3. Sekcja A (osie 1-14) mostu nad Dziwną M-7L na odcinku S3 Dargobądz-Troszyn z belek CB



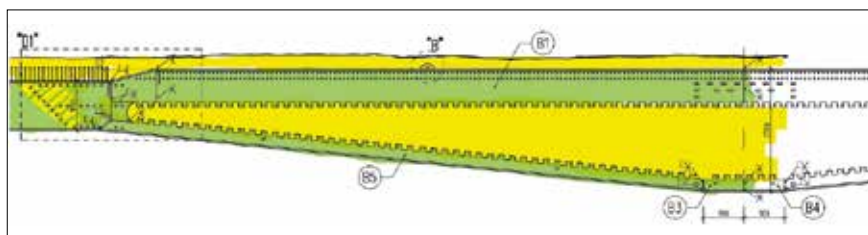
Fot. 4. Konstrukcja stalowa belek CB



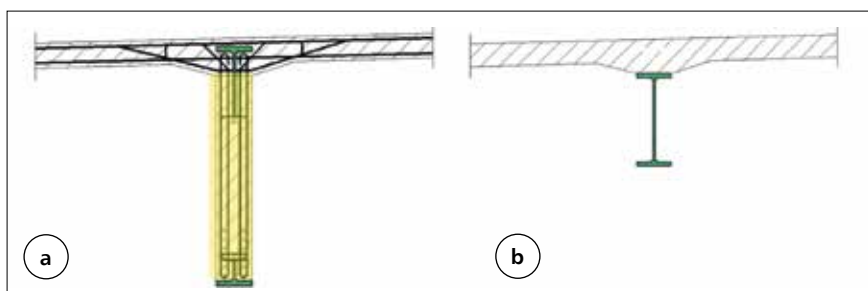
Fot. 5. Połączenie ścinane SRCD belek CB



Fot. 6. Zbrojenie belki CB



Rys. 3. Konstrukcja stalowa dźwigara typu krokodyl



Rys. 4. Przekroje poprzeczne w części podporowej (a) oraz przęsłowej (b)

Dźwigary główne typu krokodyl składają się z dwuteowników gorącowalowanych i zbrojonego betonu. W strefach przęsłowych mostu, odpowiedzialnych za przenoszenie dodatnich momentów zginających, wykorzystuje się zwykły dwuteownik gorącowalcowany (zespólny docelowo z płytą pomostową), a w strefach podpór pośrednich dwuteownik taki jest rozcinany na dwa teowniki – przy czym stosuje się specyficzną linię cięcia, aby uzyskać łączniki typu CD o kształcie MCL. Teownik górny układany jest najwyżej jak to możliwe, więc jego pas górny jest zatopiony w płycie pomostowej (oczywiście z zachowaniem otuliny i niezbędnej przestrzeni na ułożenie zbrojenia płyty pomostowej), natomiast teownik dolny

Fot. 5–6. autorów, rys. 3, 4. autorów



Fot. 7. Most w Trzebowie – widok z boku

jest odginany w dół, by zwiększyć wysokość dźwigara ku podporze pośredniej. Ułożone w ten sposób teowniki, zwrócone do siebie środkami zakończonymi łącznikami MCL w kształcie zębów, przypominają otwartą paszczę krokodyla – stąd nazwa systemu. Przestrzeń między teownikami wypełniana jest betonem i tworzy w rozwiązaniu docelowym środnik betonowy. Idea opisywanego rozwiązania została przedstawiona na rys. 3 i 4, a pierwszy wybudowany w tej technologii most – na fot. 7.

Korzyści z zastosowania takiej technologii obejmują m.in. wyeliminowanie środnika stalowego w strefie podporowej i zastąpienie go tańszym środnikiem betonowym. Prowadzi to nie tylko do oszczędności w kosztach materiałów, spawania i malowania, ale także utrzymania obiektu. Zmniejszenie powierzchni stalowej redukuje potrzebę cyklicznego czyszczenia i odtwarzania powłok antykorozyjnych. Duża sztywność giętna środnika betonowego z płaszczyzny dźwigara korzystnie wpływa na ograniczenie problemu wyboczenia z planu ściskanego pasa stalowego (w praktyce problem ten znika i możliwe jest pełne

wykorzystanie nośności ściskanej stali w strefie dolnej). I w końcu sam beton w strefie dolnej dźwigara bierze też udział w przenoszeniu naprężeń ściskających od momentu ujemnego w strefach podpór pośrednich, co pozwala na dodatkową redukcję zużycia stali konstrukcyjnej.

Wymienione czynniki przekładają się na korzyści materiałowe, ale równie ważne są technologiczne. Konstrukcja stalowa składa się bowiem wyłącznie z dwuteowników gorącowalcowanych dostarczanych w całości (na strefy przęsłowe) albo

rozciętych na dwa teowniki (do wykonania stref podporowych – tzw. krokodyli). Pochodzą one więc z jednego źródła jako gotowe elementy do wbudowania w konstrukcję, podobnie zresztą jak pręty zbrojeniowe. Cała strefa podporowa, a zatem teowniki i środnik betonowy między nimi, może być albo prefabrykowana i wbudowana w docelowe miejsce (fot. 8 i 9 – jak przy budowie wiaduktu w Warszawie), albo wykonana in situ (ułożenie w docelowym miejscu teowników stalowych, a następnie wykonanie środnika betonowego



Fot. 8. Wykonanie na placu budowy prefabrykowanych belek hybrydowych typu krokodyl. Widoczna zamontowana bezpośrednio do prefabrykatu konstrukcja wsporcza deskowania płyty pomostowej



Fot. 9. Montaż prefabrykowanych krokodyli na podporach tymczasowych przy podporze w osi C – wiadukt w technologii krokodyl w Warszawie

– fot. 10 i 11 – jak przy budowie mostu w Trzebowie). To zależy już od preferencji wykonawcy – rozwiązanie jest zatem elastyczne.

Po scaleniu stref podporowych i przęsłowych uzyskuje się samonośną konstrukcję, zdolną do przenoszenia dal-

szych obciążeń bez jakichkolwiek podpór tymczasowych. Zastosowanie stali trudnordzewiejącej może prowadzić do dalszej redukcji kosztów, nie tylko tych utrzymaniowych (które w tym przypadku są ograniczone do minimum ze względu na brak konieczności odtwarzania zabezpieczeń

antykorozyjnych), ale także tych na etapie budowy mostu, bo stal nie musi być czyszczona i malowana.

Doświadczenia z dotychczasowych budów obiektów w systemie krokodyl potwierdzają jego elastyczność. Dwa zrealizowane do tej pory obiekty zostały wykonane w różny sposób: in situ lub z zastosowaniem prefabrykacji. Ta ostatnia wydaje się najbardziej uzasadniona w przypadku pokonywania przeszkód terenowych lub komunikacyjnych, ponieważ ogranicza zakres prac w obrębie przeszkody (jaką w przypadku wiaduktu w Warszawie były tory kolejowe). Krokodyle były prefabrykowane w pozycji pionowej, z wykorzystaniem wibratorów pogrążalnych oraz zewnętrznych przyczepnych. Powierzchnia uzyskanego betonu była dobrej jakości, wolna od wad. Ustrój nośny obiektu razem z płytą pomostową został wykonany w ok. 6 miesięcy.

KWESTIE NORMALIZACJI

Dalej przedstawiono wybrane kwestie dyskutowane podczas konferencji Wrocławskie Dni Mostowe 2025 i dotyczące normalizacji – czas publikacji niniejszego tekstu zbiega się bowiem z wprowadzeniem nowej normy europejskiej.



Fot. 10. Most w Trzebowie – widok z boku na strefy przypodporowe w trakcie realizacji. Widoczne podpory tymczasowe i pomosty umożliwiające prace zbrojarskie i betoniarskie przy dźwigarach głównych

Fot. 9. H. Windorpski, fot. 10. M. Kożuch



Fot. 11. Most w Trzebowie – widok z boku na strefy przypodporowe w trakcie realizacji. Widoczna pozioma przerwa robocza w betonowaniu środników krokodyli

Polska jest obecnie liderem zarówno pod względem zrealizowanych obiektów mostowych z dowelami zespolonymi, jak i postępu w tej dziedzinie oraz tworzenia podstaw naukowych rozwiązań rozwijanych na potrzeby mostownictwa. Autorzy współtworzyli nową część Eurokodu wprowadzającą zasady projektowania opisanych konstrukcji. Oczekuje się, że nowa część Eurokodu 4, EN 1994-1-102, Composite dowels („Part 102”) osiągnie etap formalnego głosowania w 2025 r. i zostanie opublikowana w 2026 r. Definiuje ona dowlę zespoloną i przekrój hybrydowy (tu autorzy celowo wprowadzają polskie pojęcia). Niniejszy Eurokod został opracowany głównie przez polskich i niemieckich inżynierów odpowiedzialnych za jego liczne innowacje.

Należy zaznaczyć, że formalnie (i faktycznie) w normie mamy do czynienia z konstrukcjami zespolonymi stalowo-betonowymi. Element hybrydowy jest zespolony, ponieważ składa się z części ze stali konstrukcyjnej i części betonowej. Wcześniej w Polsce nieformalnie używano pojęć odnoszących się do metody projektowania na ścinanie poprzeczne. Wprowa-

dzenie normy i odpowiednich pojęć wyjaśnia te kwestie. Warto przytoczyć dwie podstawowe definicje zgodne z normą, stanowiące jej zasadnicze innowacje. Są one podane w pkt 3.1 normy jako odpowiednio: 3.1.1 i 3.2.2:

- “Composite dowel – composite shear connector of steel cut from hot-rolled steel plates, sections or bars, and encased in reinforced concrete to achieve composite action between the steel part and the concrete part of the composite member”.

(Nazwa „dowele” stała się tak powszechna, że autorzy zdecydowali się ją tu usankcjonować, aby nazewnictwo stosowane w projektowaniu i wykonawstwie współgrało z tekstami publikacji. Dowela zespolona = dowela stalowa + dowela betonowa).

- “Hybrid composite member – composite member with cross-section that includes a concrete web or concrete member of size such that the design may take account of its contribution to the resistance to vertical shear of the composite section”.

Dowele zespolone to forma połączenia ścinanego – rozwiązanie konstrukcyjne. Realne elementy konstrukcji oraz kształty doweli mogą być dowolne. Mają one róż-

nego rodzaju wycięcia i otwory. Przekrój hybrydowy jest definiowany przez sposób projektowania – to koncepcja projektowa (będąca uogólnieniem dotychczasowych) zdefiniowana w wyrafinowany sposób, pozostawiający decyzję co do jej stosowania projektantowi. W normie, dedykowanej przede wszystkim połączeniu ścinanemu, wprowadzono to pojęcie dodatkowo. Wynika to z następującej logiki: dowele umożliwiły racjonalne łączenie środnika stalowego bezpośrednio z betonowym, by zaś racjonalnie projektować takie rozwiązania, potrzebna była nowa koncepcja (przekrój hybrydowy).

Norma składa się z zasadniczej części oraz dwóch aneksów. W zasadniczej części sformułowano zakres normy, zdefiniowano pojęcia, opisano typowe kształty doweli (jest ich wiele) i podstawowe mechanizmy ich zniszczenia, podano symbole i oznaczenia. W pkt 8.4 znajdują się również klauzule szczegółowe określające, jak projektuje się przekrój hybrydowy (ta koncepcja może być stosowana niezależnie od typu połączenia ścinanego; stanowi ona uzupełnienie zapisów normy EN 1994-1-1 [5]).

W załączniku A zebrano szczegółowe wytyczne do projektowania doweli w czterech kształtach:

- puzzle shape (PZ),
- specific puzzle shape (PZT),
- modified specific puzzle shape (MPZT),
- modified clothoidal shape (MCL).

Do mostów przeznaczony jest kształt MCL (opracowany w Polsce) o najlepszych parametrach zmęczeniowych. Podano odpowiednio (upraszczając):

- wzory do projektowania (obciążenia statyczne),
- konstruowanie (Detailing: A.7),
- wytyczne do projektowania na zmęczenie (A.8),
- tolerancje wytwarzania (A.9).

W załączniku B opisano z kolei zasady projektowania belek obetonowanych w stropach (shallow-floor steel-concrete composite beams) z otworami w środkach pracującymi jako łączniki zespalające.

PODSUMOWANIE

Opracowane technologie, a także wybudowane obiekty są pionierskie w skali światowej. Zastosowane w nich rozwiązania wyprzedzają również to, co zostanie wdrożone w Eurokodzie EN 1994-1-102. Obiekty zostały w całości zaprojektowane w Polsce, przez krajowych inżynierów.

System belek CB zastosowano do wybudowania sześciu obiektów: od dwu- do wieloprzęsłowych (w sumie ponad 20 przęseł), o rozpiętościach przęseł od ok. 20 do 36 m, przy zużyciu stali konstrukcyjnej na poziomie $<40 \text{ kg/m}^2$. Na potrzeby większych rozpiętości, od ok. 50 do 60 m, opracowano system krokodyl. Wybudowano w nim do tej pory dwa obiekty trzyprzęsłowe. Zużycie stali konstrukcyjnej w tej metodzie wynosi ok. 130 kg/m^2 . Wszystkie te obiekty pozytywnie przeszły badania pod próbnymi obciążeniami, a technologie, w których wykorzystuje się belki hybrydowe, nadal są w Polsce rozwijane. ■

Literatura

- [1] Lorenc W., "Composite Dowels: The Way to the new Forms of Steel-Concrete Composite Structures" w *IABSE Symposium: Synergy of Culture and Civil Engineering – History and Challenges*, Wrocław, Poland, 7–9 October 2020, s. 98–138.
- [2] FprCEN/TS 1994-1-102:2025. Eurocode 4 – Design of composite steel and concrete structures – Part 1-102: Composite dowels. 2025.
- [3] Kożuch M. i in., „Mosty zespolone o konstrukcji Krokodyl o rozpiętości przęsła 50–60 m” w Biliszczuk J., Teichgraber M. (red.), *Wyzwania współczesnego mostownictwa: Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe*, Wrocław, 24–25 listopada 2022, Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2022, s. 203–210.
- [4] Kożuch M. i in., „Budowa mostu zespolonego o konstrukcji Krokodyl przez rzekę Kwisę w Trzebowie” w *Inżynieria i Budownictwo*, nr 7, 2024, s. 400–404.
- [5] EN 1994-1-1:2004. Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.

REKLAMA



WIĘCEJ W PODCAŚCIE:

#TOMYBUDUJEMYTWÓJŚWIAT

Maciej Kożuch:
twórca technologii mostowej „Krokodyl”



OGLĄDAJ



SŁUCHAJ

SŁUCHAJ NASZYCH PODCASTÓW



NA YOUTUBE I SPOTIFY



WYDAWNICTWO
POLSKIEJ IZBY INŻYNIERÓW BUDOWNICTWA

#TOMYBUDUJEMYTWÓJŚWIAT

Rozmowy z inżynierami odpowiedzialnymi
za znaczące realizacje budowlane.
Pokazujemy, inspirujemy, angażujemy.

<https://www.piib.org.pl/>