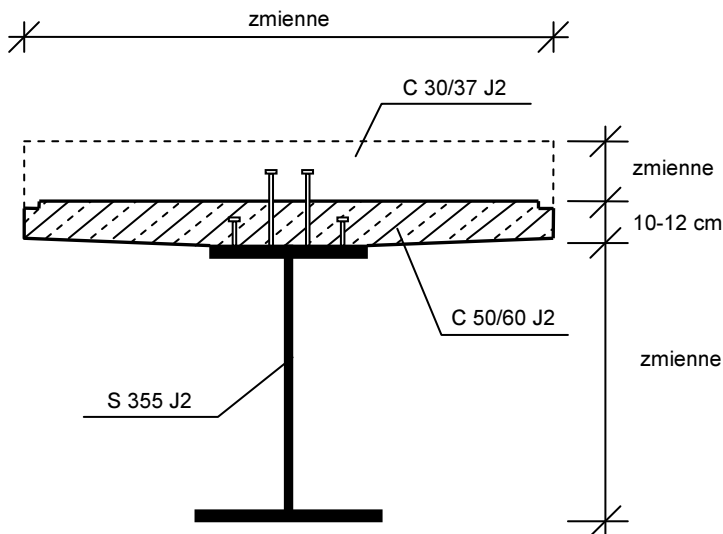


Piotr Lacki<sup>1</sup>, Jacek Nawrot<sup>1</sup>, Anna Derlatka<sup>1</sup>

## ANALIZA NUMERYCZNA SEGMENTU STALOWO-BETONOWEGO DŹWIGARA MOSTOWEGO OBCIĄŻONEGO CIĘŻAREM WŁASNYM

### Wprowadzenie

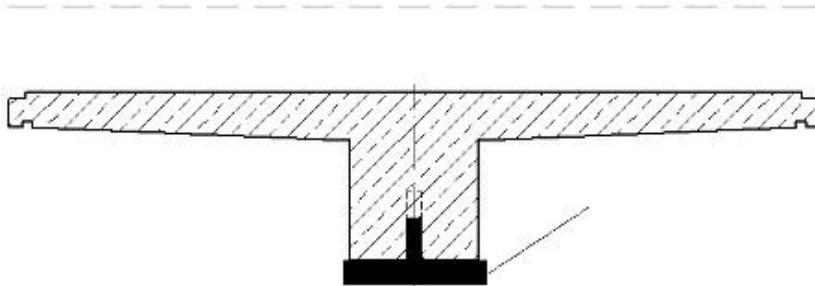
Jednym ze sposobów konstruowania przęseł mostów średniej rozpiętości jest stosowanie zespolonych dźwigarów stalowo-betonowych typu VFT, które przedstawiono między innymi w pracach [1, 2]. W rozwiązaniu tym stalowa blachownica spawana prefabrykowana jest wraz z półką żelbetową, stanowiącą jednocześnie deskowanie dla monolitycznej płyty pomostu, betonowanej podczas montażu. Zespolenie belki z płytą zapewnione jest za pomocą łączników sworzniowych (rys. 1).



Rys. 1. Przekrój poprzeczny przykładowego dźwigara VFT [2]

<sup>1</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42-200 Częstochowa, e-mail: piotr@lacki.com.pl, jnawrot@bud.pcz.czest.pl, aderlatka@bud.pcz.czest.pl

Rozwinięciem systemu VFT jest system VFT-WIB [3], w którym zamiast blachownic spawanych stosowane są dwuteowniki walcowane rozcięte na dwie części w taki sposób, aby z jednego kształtownika uzyskać elementy na dwa dźwigary. Przykładowy dźwigar VFT-WIB pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny dźwigara VFT-WIB [3]

Według autorów prac [4, 5], linia rozcięcia ukształtowana została tak, aby powstałe wycięcia w środniku zapewniły zespolenie belki stalowej z płytą, eliminując konieczność stosowania dodatkowych łączników. Ten sposób zespolenia nazwany został „composite dowels”.

Istotną kwestią jest określenie odpowiedniego kształtu linii rozcięcia, tak aby uzyskać odpowiednią nośność połączenia kształtownika stalowego z płytą. Najczęściej stosowane rozwiązania pokazano na rysunku 3.

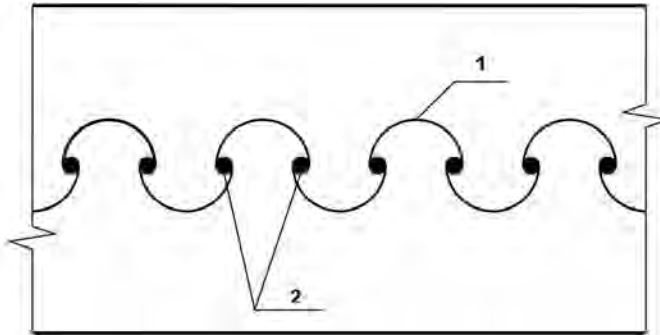


Rys. 3. Zespolenie typu „composite dowels”: a) kształt PZ, b) kształt MCL [3]

W pracach [6-8] podjęto próbę zaadaptowania zespolenia typu „composite dowels” (dla nowego kształtu linii rozcięcia) do blachownic spawanych, stanowiących elementy składowe prefabrykowanych dźwigarów mostowych. Propozycja ta może stanowić uzupełnienie dotychczas stosowanych rozwiązań zespolonych dźwigarów mostowych.

## 1. Opis przyjętego rozwiązania

Założono, że stalowy element nośny dźwigara wykonany będzie jako teownik spawany, którego środnik stanowić będzie arkusz blachy rozcięty na dwie części, tak aby za pomocą jednego cięcia uzyskać elementy na dwa dźwigary. Zastosowanie teownika spawanego z blach cechuje się większą pracochłonnością, pozwala jednak w sposób bardziej swobodny kształtować geometrię przekroju i uzyskać większą nośność oraz sztywność elementu niż w przypadku dźwigarów, w których jako komponent stalowy jest używany dwuteownik walcowany. W zależności od oczekiwanej nośności dźwigara wysokość teownika stalowego można regulować, dobierając odpowiednią szerokość arkusza blachy przeznaczonej na środnik. Kształt wycięć mających zapewnić zespolenie elementu stalowego z płytą żelbetową dobrano w taki sposób, aby zapewnić wystarczające zakotwienie środnika w betonie przy jednoczesnym zminimalizowaniu ilości odpadów. Kształt linii cięcia pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Schemat rozcięcia blachy środnika dźwigara: 1 - linia cięcia, 2 - odpad

Istotną kwestią jest odpowiednie dobranie promieni krzywizn, tak, aby uzyskany kształt górnej krawędzi środnika umożliwił poprawne zespolenie elementu stalowego z płytą betonową oraz aby zachowane były minimalne wymagane grubości otuliny betonowej prętów zbrojenia usytuowanych w dolnych wycięciach blachy. Biorąc pod uwagę powyższe czynniki, zaproponowano rozwiązanie pokazane na rysunku 5, gdzie promień wycięcia  $R1$  wyniósł 60 mm, a promień  $R2$  był równy 10 mm.

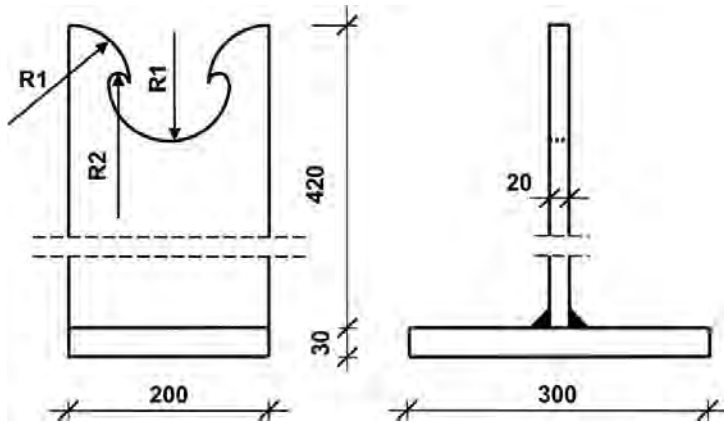
Ponieważ proponowane rozwiązanie jest dedykowane mostom zespolonym o średniej rozpiętości przęsła, przyjęto, że komponent stalowy przekroju zespolonego będzie teownikiem spawanym o następujących parametrach:

- szerokość pasa 300 mm
- grubość pasa 30 mm
- całkowita wysokość środnika 420 mm
- grubość środnika 20 mm
- geometria wycięć górnej krawędzi środnika wg rysunku 5
- grubość spoiny pachwinowej łączącej środnik z pasem 10 mm
- gatunek stali S235

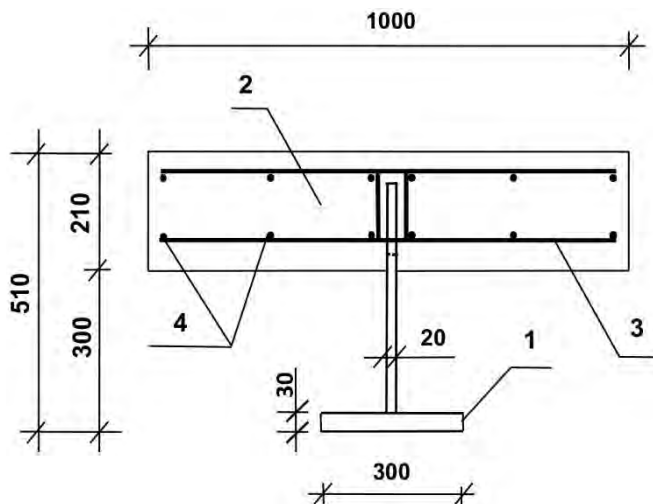
Płytę żelbetową zespoloną z teownikiem stalowym przyjęto jako element o stałej grubości i następujących parametrach:

- grubość 210 mm
- szerokość półki betonowej 1000 mm
- beton C20/25
- pręty zbrojenia podłużnego  $\phi 10$  (rozmieszczenie wg rysunku 6)
- pręty zbrojenia poprzecznego  $\phi 10$  w rozstawie co 200 mm
- stal zbrojeniowa A-III, RB400

Przekrój poprzeczny analizowanego dźwigara pokazano na rysunku 6.



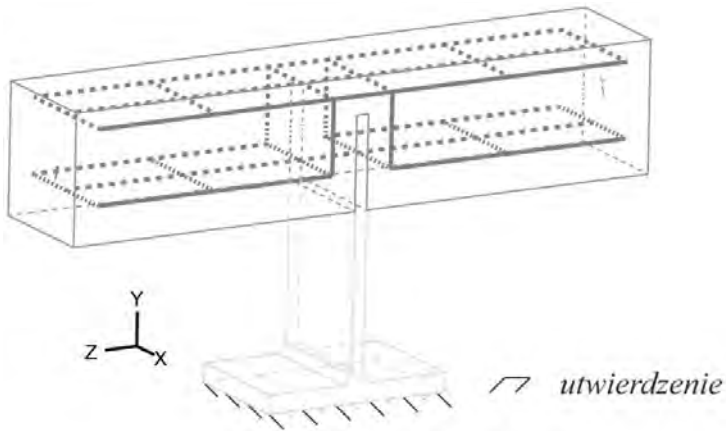
Rys. 5. Geometria wycięć w środniku powtarzalnego fragmentu teownika stalowego



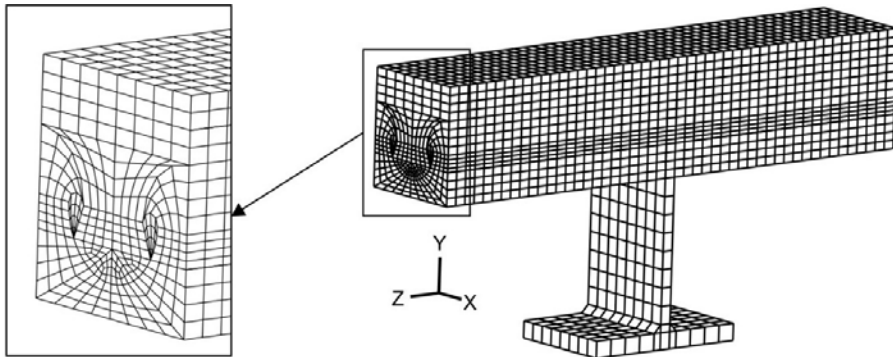
Rys. 6. Dźwigar mostowy będący przedmiotem analizy: 1- belka stalowa, 2 - płyta żelbetowa, 3 - pręty zbrojenia poprzecznego, 4 - pręty zbrojenia podłużnego

## 2. Model numeryczny analizowanego dźwigara

Obliczenia numeryczne przeprowadzono przy użyciu programu ADINA System, wykorzystującego metodę elementów skończonych. Element stalowy i beton zamodelowano jako 8-węzłowe elementy typu 3D-solid. Natomiast pręty zbrojenia zamodelowano jako elementy prętowe jednowymiarowe typu „truss”. Model obciążono ciężarem własnym. Warunki brzegowe w postaci pełnego utwierdzenia przyłożono do dolnej powierzchni półki stalowej, zgodnie z rysunkiem 7. Elementy połączone w węzłach, co przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 7. Model numeryczny segmentu dźwigara stalowo-betonowego



Rys. 8. Siatka segmentu dźwigara stalowo-betonowego

Dla materiału kształtownika stalowego przyjęto bilinearny sprężysto-plastyczny model materiału z następującymi parametrami:

- gęstość  $7850 \text{ kg/m}^3$
- współczynnik Poissona 0,3
- moduł Younga 210 GPa

- granica plastyczności 235 MPa
- moduł umocnienia 629 MPa

Dla materiału stalowych prętów zbrojeniowych przyjęto bilinearny sprężysto-plastyczny model materiału z następującymi parametrami:

- gęstość 7850 kg/m<sup>3</sup>
- współczynnik Poissona 0,3
- moduł Younga 210 GPa
- granica plastyczności 400 MPa
- moduł umocnienia 202 MPa

Dla materiału betonu przyjęto model z następującymi parametrami:

- gęstość 2500 kg/m<sup>3</sup>
- sieczny moduł sprężystości betonu 30 GPa
- średnia wartość wytrzymałości betonu na rozciąganie osiowe 2,2 MPa
- charakterystyczna wytrzymałość walcowa na ściskanie betonu po 28 dniach 28 MPa
- najmniejsze odkształcenie, przy którym osiągnięta jest wytrzymałość betonu 2‰
- ostateczna wytrzymałość betonu na ściskanie 20 MPa
- odkształcenie graniczne 3,5‰

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń uzyskano rozkład naprężeń zredukowanych w przekroju stalowym i w betonie oraz rozkład sił osiowych w prętach zbrojeniowych.

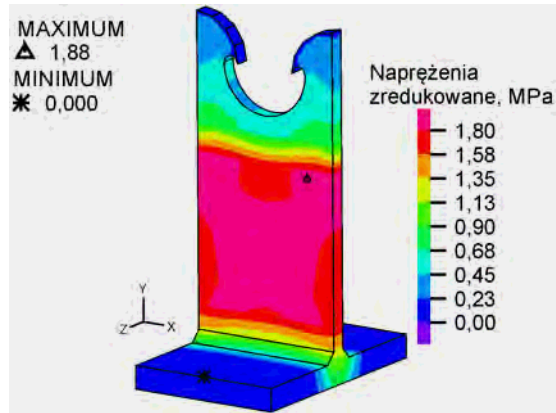
### **3. Analiza wyników**

Rozkład naprężeń zredukowanych w przekroju stalowym zamieszczono na rysunku 9. Minimalne wartości naprężeń zredukowanych w elemencie stalowym są zlokalizowane na krawędzi pasa i wynoszą 0,001 MPa. Natomiast maksymalne wartości naprężeń zredukowanych występują w środku i wynoszą 1,881 MPa. Wycięcie górnej części środka wpływa na niejednorodny rozkład naprężeń zredukowanych w środku. Naprężenia w elemencie stalowym nie przekraczają granicy plastyczności wynoszącej 235 MPa.

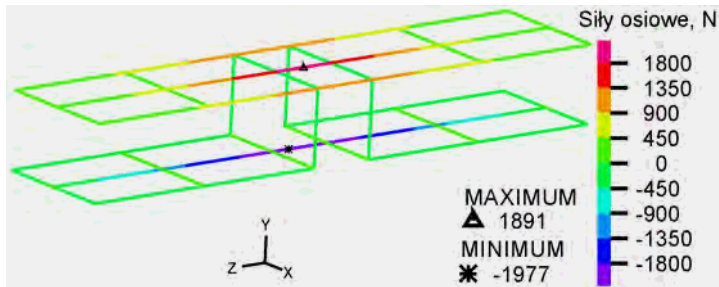
Rozkład sił osiowych w prętach zbrojenia przedstawiono na rysunku 10. Koncentracja sił występuje w środkowej części zbrojenia, w strefie połączenia elementu stalowego z elementem betonowym. Pręty, z wyjątkiem jednego, ulegają rozciąganiu. Maksymalna siła rozciągająca wynosząca 1891 N występuje na środkowym pręcie zbrojenia górnego. Maksymalna siła ściskająca o wartości 1977 N jest zlokalizowana na środkowym pręcie dolnej warstwy zbrojenia.

Rozkład naprężeń zredukowanych wstępujących w elemencie betonowym przedstawiono na rysunkach 11 i 12. Koncentracja naprężeń występuje w środkowej części zamodelowanego elementu, w otoczeniu połączenia z elementem stalowym. Wartość maksymalna naprężenia wynosząca 1,108 MPa znajduje się na dolnej

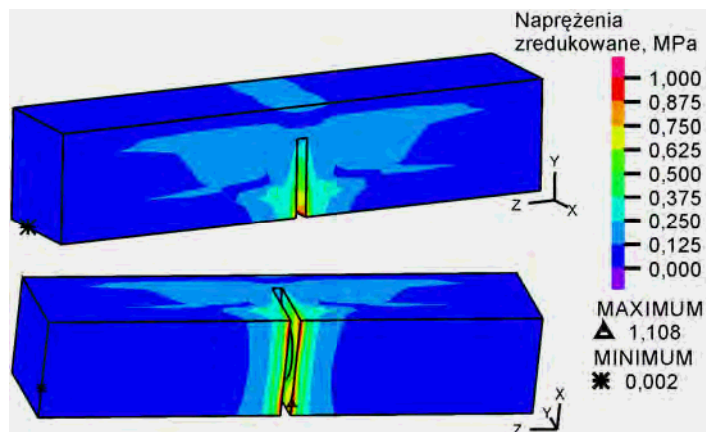
części półki betonowej, na styku ze środnikiem elementu stalowego. Naprężenia zredukowane w płycie betonowej nie przekraczają wytrzymałości betonu na ściskanie, czyli 20 MPa.



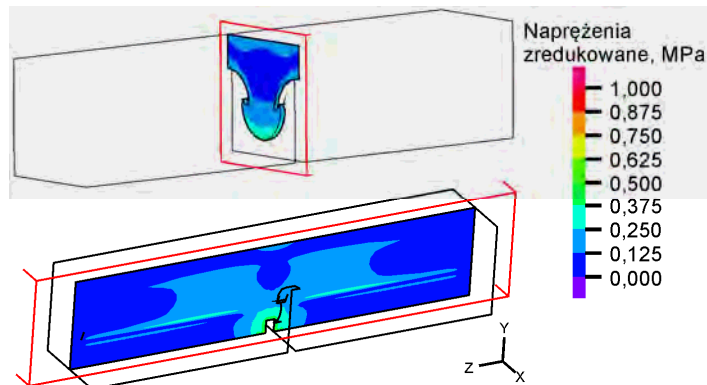
Rys. 9. Rozkład naprężeń zredukowanych w elemencie stalowym [MPa]



Rys. 10. Rozkład sił w prętach zbrojenia [N]



Rys. 11. Rozkład naprężeń zredukowanych w elemencie betonowym [MPa]



Rys. 12. Rozkład naprężeń zredukowanych w przekrojach elementu betonowego [MPa]

## Podsumowanie

Naprężenia zredukowane występujące zarówno w elemencie stalowym, jak i w elemencie betonowym nie przekraczają wartości maksymalnych, co świadczy o poprawności zaprojektowania przekroju betonowego oraz o możliwości ustawienia segmentu stalowo-betonowego na placu budowy na płycie stalowej bez dodatkowego podparcia.

Koncentracja naprężeń zredukowanych występuje w otoczeniu połączenia elementu stalowego z betonowym. Większość prętów zbrojenia ulega rozciąganiu.

## Literatura

- [1] Lorenc W., Kożuch M., Rowiński S., The behaviour of puzzle-shaped composite dowels - Part I: Experimental study, *Journal of Constructional Steel Research* 2014, 101, 482-499.
- [2] Lorenc W., Boundary approach in shape study of composite dowel shear connector, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2009, 9, 4, 55-66.
- [3] Kołakowski T., Kosecki W., Lorenc W., Rabięga J., Seidl G., Prefabrykowane dźwigary zespolone stalowo-betonowe typu VFT-WIB do budowy przęseł mostów drogowych i kolejowych, *Inżynieria i Budownictwo* 2011, 67, 7-8, 379-382.
- [4] Lorenc W., Kubica E., Kożuch M., Testing procedures in evaluation of resistance of innovative shear connection with composite dowels, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2010, 10, 3, 51-63.
- [5] Lorenc W., Kożuch M., Rowiński S., The behaviour of puzzle-shaped composite dowels - Part II: Theoretical investigations, *Journal of Constructional Steel Research* 2014, 101, 500-518.
- [6] Kołakowski T., Kożuch M., Kubica E., Lorenc W., Rowiński S., Stosowanie hipotezy kumulacji uszkodzeń do wyznaczania trwałości zmęczeniowej połączenia ścinanego typu composite dowels w kontekście zrealizowanych badań, IX Konferencja Naukowa Konstrukcje zespolone, Zielona Góra 2011.
- [7] Harnatkiewicz P., Kopczyński A., Kożuch M., Lorenc W., Rowiński S., Research on fatigue cracks in composite dowel shear connection, *Engineering Failure Analysis* 2011, 18, 5, 1279-1294.
- [8] Dudziński W., Pękalski G., Harnatkiewicz P., Kopczyński A., Lorenc W., Kożuch M., Rowiński S., Study on fatigue cracks in steel-concrete shear connection with composite dowels, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2011, 11, 4, 839-858.



### **Streszczenie**

W artykule omówiono podstawowe informacje dotyczące kształtowania zespolonych dźwigarów mostowych typu VFT. Zaproponowano nowy kształt linii cięcia blachy środkowej w celu uzyskania zespolenia typu „composite dowels”. Dla przyjętego rozwiązania sporządzono model numeryczny segmentu zespolonego dźwigara mostowego, który poddano analizie za pomocą programu ADINA System. Model obciążono ciężarem własnym. Na podstawie uzyskanych wyników oceniono przydatność analizowanego rozwiązania do stalowo-betonowych mostów zespolonych.

**Słowa kluczowe:** stalowo-betonowe belki zespolone, dźwigary mostowe VFT

### **Numerical analysis of segment of steel-concrete bridge girder loaded by dead load**

#### **Abstract**

The paper presents the basic information about the development of a VFT composite bridge girder. A new shape of cutting line of the web sheet in order to obtain “composite dowels” was proposed. For the adopted solution, a numerical model of the bridge girder segment was prepared and it was analyzed with the ADINA System. The model was loaded by dead load. Based on the results, the suitability of the analyzed solution to steel-concrete composite bridges was assessed.

**Keywords:** steel-concrete composite beams, VFT bridge girder