



Analiza nośności przęsła mostowego z prefabrykowanych belek strunobetonowych typu T w zależności od ich rozstawu osiowego

Roman Gąćkowski¹

STRESZCZENIE:

We współczesnym projektowaniu obiektów mostowych betonowych, stalowych, drewnianych czy kompozytowych bardzo często stosuje się prefabrykaty. W praktyce zawodowej, przy projektowaniu przęseł mostowych z prefabrykowanych belek sprężonych strunobetonowych typu T, stosuje się rozwiązania katalogowe, w których belki układane są jedna obok drugiej w rozstawie osiowym równym 0,9 m i zespalane płytą żelbetową. W artykule przedstawiono analizę porównawczą stanów granicznych nośności przęsła mostowego wykonanego z prefabrykowanych belek strunobetonowych typu T w zależności od ich rozstawów osiowych, w świetle normy mostowej PN-85/S-10042 i Eurokodu PN-EN 1992-2:2010. Wykazano, że belki prefabrykowane można rozsunąć osiowo na optymalną odległość 1,35 m przy zachowaniu normowych warunków stanów granicznych nośności. Zwiększenie rozstawu belek prefabrykowanych wpływa korzystnie na koszty całego przedsięwzięcia, obniżając znacznie globalny koszt inwestycji.

SŁOWA KLUCZOWE:

belki mostowe typu T; belki prefabrykowane mostowe; strunobeton

1. Wprowadzenie

Prefabrykacja w projektowaniu obiektów mostowych jest bardzo popularna z uwagi na zbliżoną trwałość w porównaniu z technologiami monolitycznymi, szybkość realizacji obiektów z pominięciem często deskowań i podpór tymczasowych oraz zmniejszenie nakładów finansowych na inwestycje. Prefabrykacja stosowana jest zawsze tam, gdzie ważny jest krótki czas realizacji budowy (przęsła nad przeszkodami drogowymi wykonuje się w ciągu kilku dni).

Zakres stosowania prefabrykowanych belek mostowych w Unii Europejskiej zależy do kraju. Zgodnie z [1], w Niemczech co czwarty obiekt mostowy projektowany jest w oparciu o belki prefabrykowane, a już w Holandii prefabrykaty są stosowane prawie w 75%.

Przykładem zastosowania po raz pierwszy prefabrykatów w przęsłach mostowych jest most Lake Pontchartrain Causeway w Stanach Zjednoczonych przez jezioro Pontchartrain w okolicy Nowego Orleanu w południowej Luizjanie. Składa on się z dwóch równoległych nitek oddalonych od siebie o około 24 metry. Każda nitka posiada dwa pasy jezdni. Północna część mostu mierzy 39,92 km i była oddana do użytku w 1956 roku, a część południowa o długości 38,17 km została oddana w 1969 roku.

W Polsce stosowanie prefabrykatów na dużą skalę datuje się od drugiej połowy XX wieku. Wytwórnice prefabrykatów opracowały około 20 typów belek mostowych sprężonych. Przykła-

¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42-218 Częstochowa, e-mail: rgack@wp.pl, orcid id: 0000-0002-4456-3011

dem wykorzystania prefabrykatów w obiektach mostowych jest belka T, którą można zastosować w różnych układach konstrukcyjnych i schematach statycznych. Belki T są wykonywane w dwóch wariantach: typ A z podciętymi półkami i średnikiem dla układów ciągłych, typ B belka prosta dla układów swobodnie podpartych.

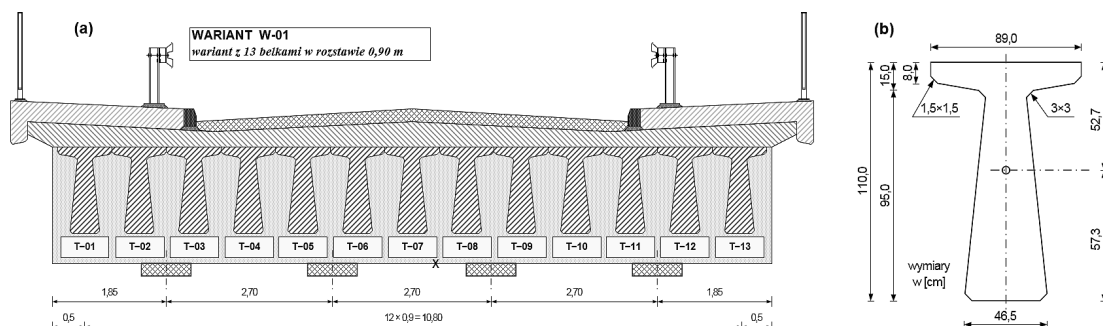
Standardowe długości prefabrykowanych belek T to: 12, 15, 18, 21, 24 i 27 m [4]. Belki T są zespalande na budowie z żelbetową płytą monolityczną. Wysokość belek przyjęto w zależności od rozpiętości w granicach 60–110 cm.

2. Dane geometryczne i parametry sprężenia wiaduktu drogowego

Analizę nośności przęsła mostowego, wykonanego z prefabrykowanych belek strunobetonowych T27, przeprowadzono na przykładzie wiaduktu drogowego (rys. 1). Wykorzystano różne warianty rozstawu osiowego belek T27 w przekroju poprzecznym (rys. 2). Za podstawę przyjęto wariant W-01 (rys. 1).

Założono podstawowe parametry wiaduktu drogowego w obliczeniach statycznych i wytrzymałościowych:

- Rozpiętość efektywna w osiach podparcia: $L_{eff} = 26,2$ m
- Długość całkowita belki T27 z końcówkami cięgien: $L_b = 27,0$ m
- Szerokość całkowita wiaduktu: $b_{tot} = 13,0$ m
- Schemat statyczny: ustrój jednoprzęsłowy
- Klasa obciążenia drogowego:
według normy PN-85/S-10030 klasa A + obciążenie pojazdem specjalnym klasy 150
według normy PN-EN 1991-2:2007 Model LM1 + model LM3

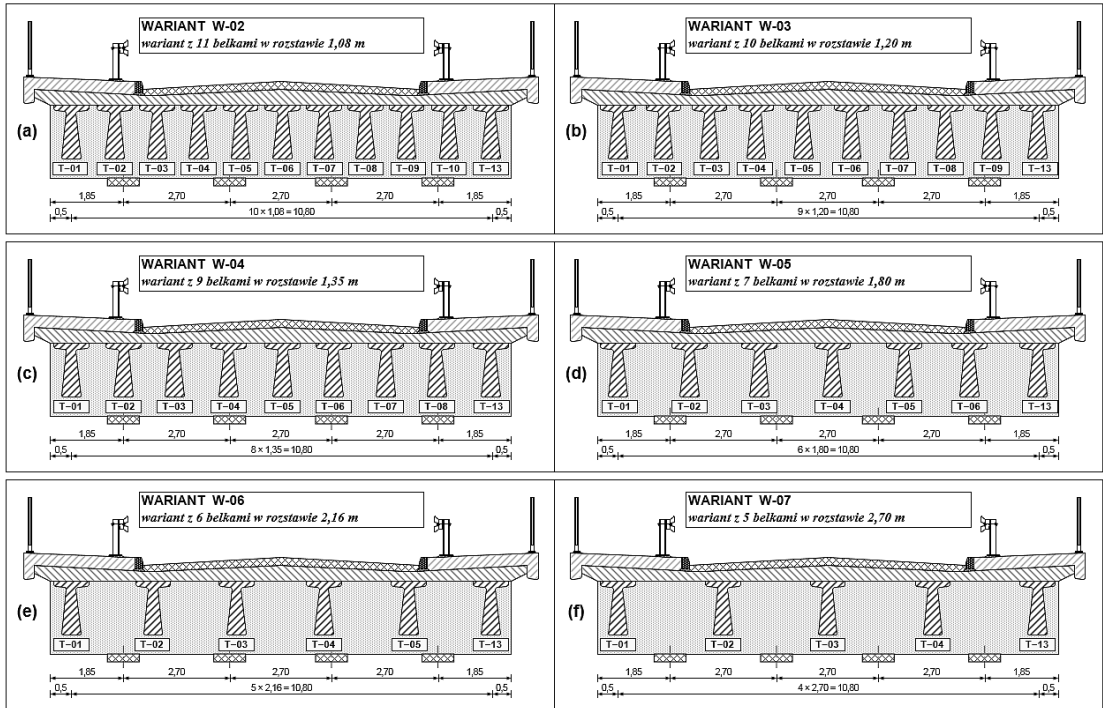


Rys. 1. Przekrój poprzeczny wiaduktu drogowego: a) W-01 – wariant podstawowy 13 belek T27 w rozstawie 0,9 m; b) wymiary belki T27

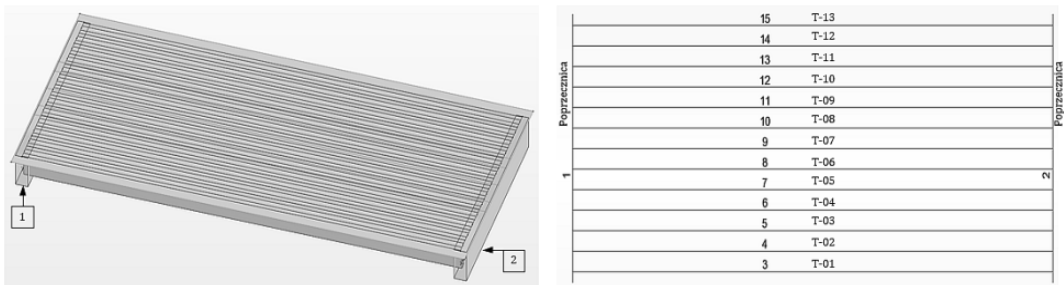
Przedstawiony obiekt mostowy jest typowym jednoprzęsłowym wiaduktem drogowym nad przeszkodą wodną. Szczegółową analizę statyczną i wytrzymałościową przęsła mostu przeprowadzono w oparciu o dwie normy:

- PN-91/S-10042 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Projektowanie (norma mostowa) [5].
- PN-EN 1992-2: 2010. Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 2. Mosty z betonu. Obliczenia i reguły konstrukcyjne [6].

Obliczenia statyczne wykonano na modelu Rama 3D + Powłoka w programie Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2018. W modelu zastosowano elementy belkowe (belki T27 strunobetonowe i żelbetowe poprzecznice podporowe) i powłokowe (żelbetowa płyta zespalandą belki prefabrykowane wiaduktu drogowego). Schemat modelu obliczeniowego dla wariantu W-01 przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 2. Warianty przekrojów poprzecznych wiaduktu drogowego: a) W-02 wariant z 11 belkami T27; b) W-03 wariant z 10 belkami T27; c) W-04 wariant z 9 belkami T27; d) W-05 wariant z 7 belkami T27; e) W-06 wariant z 6 belkami T27; f) W-07 wariant z 5 belkami T27



Rys. 3. Model obliczeniowy wiaduktu drogowego – wariant podstawowy W-01

W analizie nośności przęsła mostowego wykorzystano wyniki obliczeń statycznych i wytrzymałościowych dla wariantu podstawowego W-01 oraz wariantów opcjonalnych od W-02 do W-07. Belki T27 mają wysokość 1,1 m, szerokość półki górnej 0,89 m i zmienną szerokość środka od 0,20 do 0,465 m poszerzonego ku dołowi (rys. 1). Całkowita długość belki T27 wynosi 27,0 m, belka wykonana jest z betonu B50 [5] (C40/50 [6]). Zbrojenie sprężające to 22 cięgna ze stali Y1860S7 (2 cięgna w strefie ściskanej oraz 20 cięgien w strefie rozciąganej betonu). Zbrojenie zwykle przyjęto ze stali A-I oraz A-IIIIN [5].

Belki prefabrykowane T27 zostały zespolone z żelbetową płytą pomostową o grubości od 0,24 do 0,31 m. Czola belek T27 połączono monolitycznie za pomocą poprzecznic podporowych, które oparto na czterech łożyskach w rozstawie 2,7 m (rys. 1).

3. Analiza nośności przęsła wiaduktu drogowego

Przeprowadzono obliczenia statyczne w programie Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2018, natomiast obliczenia wytrzymałościowe wykonano zgodnie z normą PN-91/S-10042 [5] oraz PN-EN 1992-2:2010 [6]. Kombinację obciążeń wykonano na podstawie [7], [8] oraz [9]. W obliczeniach statycznych uwzględniono obciążenia: od ciężaru własnego, od mokrego betonu płyty pomostowej, od suchego betonu płyty pomostowej, od ciężaru wyposażenia mostu, od skurczu betonu, od obciążeń użytkowych (tłum pieszych i pojazdy kołowe). Uwzględnienie obciążeń użytkowych wg norm [5] i [6] różni się znacznie między sobą.

Według [5], wiadukt obciążony jest na klasę A (obciążenie równomiernie rozłożone q + obciążenie pojazdem K lub obciążenie samochodem S + obciążenie tłumem pieszych q_1).

Według [6], obciążenia użytkowe przedstawione są w postaci modeli obciążeń [9]: LM1 (obciążenie skupione i równomiernie rozłożone), LM2 (nacisk pojedynczej osi przyłożony do powierzchni kontaktu opon pojazdu z nawierzchnią) oraz LM4 (obciążenie tłumem pieszych).

W obliczeniach statycznych uwzględniono również obciążenia specjalne pojazdem kołowym klasy 150 wg STANAG 2021.

W pierwszej kolejności wykonano obliczenia dla wariantu W-01, w którym rozstaw osiowy belek prefabrykowanych jest katalogowy i wynosi 90 cm. W następnych krokach dokonano obliczeń dla wariantów W-02 do W-07. Analizie poddano wszystkie belki w każdym wariantcie i na tej podstawie wybrano najbardziej miarodajne wyniki. Belki T-01 i T-13 (zewnętrzne) w każdym wariantcie znajdują się w tym samym miejscu przekroju poprzecznego. Zmianie rozstawu osiowego i redukcji ilości elementów nośnych ulegały belki wewnętrzne wiaduktu drogowego oznaczone od T-02 do T-12 (rys. 2). Rozstaw osiowy belek środkowych wiaduktu kształtował się odpowiednio: 0,90 m dla W-01; 1,08 m dla W-02; 1,20 m dla W-03; 1,35 m dla W-04; 1,80 m dla W-05; 2,16 m dla W-06; 2,70 m dla W-07. Elementem zespalaającym była płyta pomostowa żelbetowa o grubości od 0,24 do 0,31 m..

Według [5], tego typu konstrukcję mostu można analizować w zakresie nośności pozasprężystej. Kombinacje obciążeń w analizie statycznej przyjęto w 4 stadiach obciążeń: stadium początkowe (zerowe) z płytą niezespoloną, stadium przejściowe (montażowe) z płytą niezespoloną, stadium bezużytkowe z płytą zespoloną z belkami, stadium użytkowe (eksploatacji). Zgodnie z normą [5] pkt 9.4, konstrukcje zespolone sprężone i żelbetowe należy sprawdzać ze względu na nośność graniczną rozumianą jako wartość sił wewnętrznych, które wywołują w elemencie sprężonym zniszczenie przekroju poprzecznego z uwagi na:

- wyczerpanie nośności strefy rozciąganej przy zginaniu

$$M_{ns} = c \cdot R_{pk} \cdot (S_p + S_{pc}) + R_{ak} \cdot (S_a + S_{ac}) \geq s_2 \cdot M_k \quad (1)$$

- wyczerpanie nośności strefy ściskanej betonu

$$M_{nb} = R_{bk} \cdot S_{bc} + R_{ak} \cdot (S_a - S_{ac}) + \sigma_{pc} \cdot S_{pc} \geq s_3 \cdot M_k \quad (2)$$

Oprócz tego należy sprawdzić warunek (3) związany z momentem rysującym i naprężeniem rozciągającym w betonie zgodnie z [5] pkt 9.3.3:

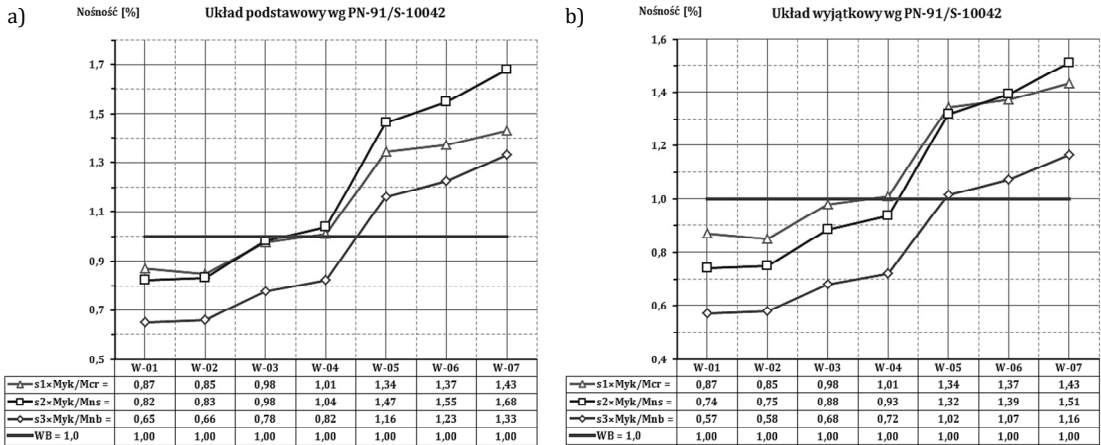
- naprężenia rozciągające w betonie

$$M_{cr} = M_{gc} + M_{gn} + [(\sigma_{dc}^p - \Delta\sigma_{dc}) + \lambda \cdot f_{ctm}] \cdot W \geq s_1 \cdot M_k \quad (3)$$

Według [6], rozpatrywaną konstrukcję mostu można analizować w zakresie nośności sprężystej. W odróżnieniu od [5] obliczenia wykonano dla: sytuacji obliczeniowej trwałej, przejściowej oraz wyjątkowej. Zgodnie z normą [6], nośność graniczną konstrukcji zespolonej sprężonej i żelbetowej należy sprawdzać, korzystając z zależności:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} = M_d + M_{nd} \quad (4)$$

Analizę nośności przęśla mostu przeprowadzono w oparciu o normy [5], [6] oraz opracowanie [10] związane ze zmianami w projektowaniu i obliczaniu konstrukcji sprężonych, a w szczególności zmianami globalnych współczynników bezpieczeństwa na częściowe współczynniki bezpieczeństwa.



Rys. 4. Wykresy nośności przęśla mostowego wg normy PN-91/S-10042 przy zastosowaniu obliczeń:
 a) dla układu podstawowego, gdzie współczynniki bezpieczeństwa wynoszą odpowiednio: $s_1 = 1,2$, $s_2 = 2,0$ i $s_3 = 2,4$; b) dla układu wyjątkowego, gdzie współczynniki bezpieczeństwa wynoszą odpowiednio: $s_1 = 1,2$, $s_2 = 1,8$ i $s_3 = 2,1$

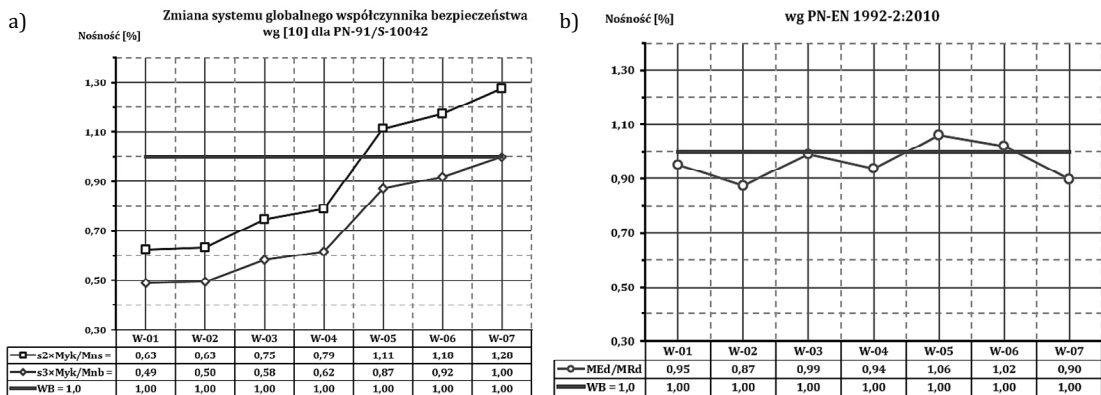
Na rysunku 4a przedstawiono na wykresach dla układu podstawowego: warunek (3) związany z momentem rysującym $M_{cr} \geq s_1 \cdot M_k$, warunek (1) związany z nośnością graniczną z uwagi na wyczerpanie nośności strefy rozciąganej przy zginaniu $M_{ns} \geq s_2 \cdot M_k$ oraz warunek (2) związany z nośnością graniczną z uwagi na wyczerpanie wytrzymałości betonu na ściskanie $M_{nb} \geq s_3 \cdot M_k$.

W tym przypadku zgodnie z [5] oraz korzystając z podanych wzorów (1), (2) i (3), można zauważyć, że w rozstawie katalogowym W-01 równym 0,9 m (najczęściej stosowanym w praktyce projektowej) wszystkie warunki nośności są spełnione w zakresie od 65 do 87%, a dla rozstawu 1,2 m zakres nośności zwiększa się od 78 do 98%. Powyżej 1,2 m nośność graniczna wg warunków (1) i (3) jest przekroczona od 1 do 4% (przekroczenie dopuszczalne z uwagi na nośność konstrukcji). Nośność graniczna wg warunku (2) jest wykorzystana w 82%.

Na rysunku 4b przedstawiono dla układu wyjątkowego te same wykresy jak w przypadku 4a. Różnica wynika jedynie z zastosowania innych współczynników bezpieczeństwa zgodnie z [5].

W tym przypadku zgodnie z [5] oraz korzystając ze wzorów (1), (2) i (3), można zauważyć, że w rozstawie katalogowym W-01 równym 0,9 m wszystkie warunki nośności są spełnione w zakresie od 57 do 87%. Dla rozstawu 1,2 m (W-03) zakres nośności zwiększa się od 68 do 98%. Stosując rozstaw osiowy 1,35 m (W-04), nośność graniczna wg warunków (1) i (2) jest spełniona w zakresie od 72 do 93%. Warunek (3) nie jest spełniony (przekroczenie wartości granicznej o 1% - przekroczenie dopuszczalne z uwagi na projektowanie konstrukcji). Dla rozstawu 1,8 m (W-05) nośność graniczna wg warunków (1), (2) i (3) jest przekroczona od 2 do 34%.

Na rysunku 5a przedstawiono dwa wykresy dla warunków (1) i (2) nośności granicznej wg [5]. W tym przypadku zastosowano zmianę systemu globalnego współczynnika bezpieczeństwa przedstawionego wg [10]. Dla warunku (1) związanego z nośnością graniczną z uwagi na wyczerpanie nośności strefy rozciąganej przy zginaniu $M_{ns} \geq s_2 \cdot M_k$ wartość współczynnika bezpieczeństwa $s_2 = 1,52$ oraz dla warunku (2) związanego z nośnością graniczną z uwagi na wyczerpanie wytrzymałości betonu na ściskanie $M_{nb} \geq s_3 \cdot M_k$ współczynnik bezpieczeństwa $s_3 = 1,8$.



Rys. 5. Wykresy nośności przęsła mostowego: a) wg normy PN-91/S-10042 przy zmianie systemu globalnego współczynnika bezpieczeństwa dla warunku (1), gdzie $s_2 = 1,52$ wg [10], oraz dla warunku (2), gdzie $s_3 = 1,80$ wg [10]; b) wg normy PN-EN 1992-2:2010 [6] zgodnie z warunkiem (4), bez współczynników bezpieczeństwa w normie [5]

W tym przypadku zgodnie z [5] oraz na podstawie [10], korzystając z wzorów (1), (2), można zauważyć, że w rozstawie katalogowym W-01 równym 0,9 m wszystkie warunki nośności są spełnione w zakresie od 49 do 63%. Dla rozstawu 1,35 m zakres nośności zwiększa się od 62 do 79%, natomiast przy rozstawie 1,8 m W-05 nośność graniczna wg warunków (2) jest wykorzystana w 87%, a nośność wg warunku (1) jest przekroczona o 11%. Dla przyjętego w obliczeniach maksymalnego rozstawu osiowego 2,7 m (W-07) nośność graniczna wg warunku (1) jest przekroczona o 28%, natomiast wg warunku (2) nośność graniczna jest spełniona w 100%.

Na rysunku 5b przedstawiono wykres nośności dla warunku (4) zgodnie z zaleceniami normy [6]. W tym przypadku nośność graniczna zmienia się wyraźnie w zależności od rozstawu osiowego belek prefabrykowanych i jest zależna również od szerokości współpracującej żelbetowej płyty pomostowej z prefabrykowaną belką strunobetonową T27. Należy zauważyć, że w rozstawie katalogowym W-01 równym 0,9 m warunek nośności jest spełniony w 95%. Dla rozstawów 1,08 m (W-02), 1,2 m (W-03) i 1,35 m (W-04) naprężenia są wykorzystane odpowiednio w 87, 99 i 94%. Dla rozstawów osiowych 1,8 m (W-05) i 2,16 m (W-06) nośność jest przekroczona odpowiednio o 6 i 2%. Przy maksymalnym rozstawie osiowego 2,7 m (W-07) nośność graniczna wg warunku (4) jest wykorzystana w 90%.

4. Wnioski

W opracowaniu przedstawiono kilka sposobów sprawdzania nośności przęsła mostowego zespolonego, składającego się z prefabrykowanych belek mostowych strunobetonowych T27 oraz żelbetowej płyty pomostowej. Przedstawiona analiza nośności przęsła uzależniona była od rozstawu osiowego prefabrykowanych belek. Wykazano, że w niektórych przypadkach można belki prefabrykowane rozsunać na odległość większą niż zalecany rozstaw katalogowy. Należy przy tym zwrócić uwagę, że ważne jest, z której normy korzysta się przy obliczaniu konstrukcji [11–13].

Stosując do obliczeń normy mostowe [5], maksymalny rozstaw osiowy belek wynosi 1,20 m, co odpowiada wariantowi W-03, w którym jest 10 belek. W wariantcie klasycznym (katalogowym) w przekroju poprzecznym wiaduktu występuje 13 belek T27.

Wprowadzając zmiany systemu globalnego współczynnika bezpieczeństwa zgodnie z [10], maksymalny rozstaw osiowy wynosi 1,35 m, co odpowiada wariantowi W-04, w którym jest 9 belek T27.

Stosując normy Eurokodu, optymalny rozstaw osiowy belek T27 w przekroju poprzecznym wynosi również 1,35 m (wariant W-04). W niektórych przypadkach możliwe jest zastosowanie rozstawu belek powyżej 2,0 m.

Mniejsza ilość belek w przekroju poprzecznym daje oszczędności finansowe w danym projekcie budowlanym i wykonawczym obiektów mostowych.

Literatura

- [1] Machelski C., Obliczenia mostów z betonowych belek prefabrykowanych, Wydawnictwo DWG, Wrocław 2006.
- [2] Link do strony internetowej: <http://www.travelin.pl/lake-pontchartrain-causeway> (dostęp: 10.10.2018).
- [3] Link do strony internetowej: <http://www.sibet.com.pl/index.php/pMenuId/2/pDocId/8> (dostęp: 10.10.2018).
- [4] Przedsiębiorstwo Robót Mostowych „Mosty Łódź” S.A. Prefabrykowane belki strunobetonowe typu „T”, Łódź 2010.
- [5] PN-91/S-10042 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Projektowanie.
- [6] PN-EN 1992-2:2010. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 2: Mosty z betonu. Obliczenia i reguły konstrukcyjne.
- [7] Gąćkowski R., Tablice i algorytmy do wymiarowania zginanych elementów żelbetowych, Verlag Dashöfer, Warszawa 2013.
- [8] PN-EN 1990:2004. Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji.
- [9] PN-EN 1991-2:2007. Eurokod 1: Oddziaływanie na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów.
- [10] Kuś S., Plewako Z., Wymagania dotyczące projektowania konstrukcji sprężonych. Praca naukowa finansowana ze środków KBK w latach 2002/2004 jako projekt badawczy. Komentarz naukowy do PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone” Część podstawowa, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2004.
- [11] Blikharskyy Z., The influence of loading levels on strength of RC columns strengthened by RC jacketing, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 2016, seria Budownictwo 22, 7–14.
- [12] Blikharskyy Y., Khmil R., Yovchik O., Research of strengthening effect reinforced concrete elements subjected to combined axial load and bending with different percent of additional reinforcement, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 2014, seria Budownictwo 20, 16–27.
- [13] Ismael A.M., Test results of the damaged T-section beams, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 2013, seria Budownictwo 19, 20–25.

Analysis of the bridge span capacity with prefabricated pre-tensioned prestressed concrete T-beams depending on their axial spacing

ABSTRACT:

In professional practice, when designing bridge span with prefabricated pre-tensioned prestressed concrete T beams, catalog solutions are often used, in which beams are usually laid side by side and joined by reinforced concrete slab. The spacing of beams is rarely used because it results in lowering the ultimate limit states of the bridge structure. The paper presents a comparative analysis of limit states of individual pre-tensioned prestressed concrete T beams depending on different variants of their spacing in bridge span, using standards PN-85/S-10042 and PN-EN 1992-2:2010. It was shown that prefabricated beams can be moved axially to the optimal distance of 1.35 m. while maintaining the standard conditions of ultimate limit states. Increasing the spacing of prefabricated beams has a positive impact on the costs of the entire project, significantly lowering the global investment cost.

KEYWORDS:

bridge T beams; prefabricated bridge beams; pre-tensioned prestressed concrete beams