

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. PG^{1)*}
Przemysław Kalitowski¹⁾

Wzmocnienie uszkodzonej belki typu T w przęśle wiaduktu drogowego

Reinforcement of damaged precast beam type T in road viaduct

DOI: 10.15199/33.2017.10.35

Streszczenie. W artykule opisano metodę wzmocnienia belki prefabrykowanej typu T dźwigara wiaduktu drogowego uszkodzonej przez pojazd „wozidło”. Beton belki uległ zarysowaniom w wielu miejscach. Wystąpiły też ubytki otuliny strun sprężających. Zaproponowano naprawę i wzmocnienie przez dobetonowanie dodatkowej belki. Podczas naprawy zastosowano balastowanie przęsła w celu wciągnięcia nowego dźwigara do współpracy od ciężaru własnego i sprężenia. Przewidziano połączenie starego betonu z nowym m.in. za pomocą kołkowania i prętów poprzecznych. Iniekcję rys oraz ubytków wywołanych uderzeniem przeprowadzono w trakcie balastowania. W celu określenia wielkości balastu i efektów wzmocnienia wykonano wiele analiz MES. Uwzględniono fazy budowy obiektu oraz dalsze efekty reologiczne. W trakcie naprawy dokonano pomiarów przemieszczeń i odkształceń belki w celu weryfikacji poprawności przeprowadzonych obliczeń oraz pracy konstrukcji.

Słowa kluczowe: wzmocnienie, belka T, belka prefabrykowana, wiadukt, uderzenie pojazdu, analiza MES, ocena stanu technicznego.

Abstract. In the paper strengthening of the damaged T-type prefabricated beam was described. Overpass was hit by dump truck and has been extensively cracked. Losses of coating of prestressing strings appeared. Addition of the new concrete girder was proposed to repair and strength overpass. In the process of building ballast was used. This allowed new beam work under dead load. New concrete was connected with the old one by studs, transverse bars and by adhesion. Injection of cracks and losses caused by hit have been made during ballasting. FEM analysis was made. It allowed to determine weight of the ballast and evaluate the work of structure. In the analysis construction stages, creep and relaxation of the tendons was included. During construction, strains and displacements of beam was measured to evaluation of analysis and working of construction.

Keywords: strengthening, T-beam, prefabricated beam, overpass, vehicle impact, FEM analysis, assessment of the technical condition.

Prefabrykowane dźwigary betonowe są wykorzystywane do budowy przęseł drogowych wiaduktów o niedużej rozpiętości. Dzięki prefabrykacji można zrealizować inwestycję w krótkim czasie i w łatwy sposób, niewymagający skomplikowanych systemów deskowań i rusztowań. Większość stosowanych w Polsce prefabrykowanych dźwigarów mostowych wykonywanych jest jako strunobetonowe (np. belka typu Kujan, belka typu T). Belki typu T [2] zostały tak zaprojektowane, by przenosić jak największy moment zginający od obciążeń pionowych przy jak najmniejszym ciężarze własnym (rysunek 1). Są jednak wrażliwe na niepożądane, poprzeczne siły poziome będące wynikiem kolizji pojazdu ponadgabarytowego z przęsłem.

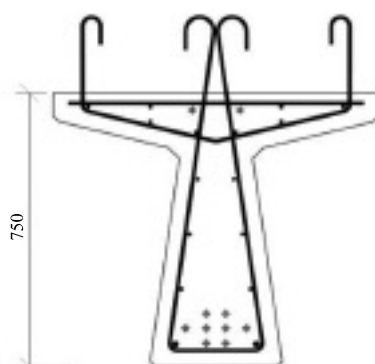
Opis obiektu i uszkodzenia

Wiadukt WS32 zlokalizowany jest w ciągu drogi ekspresowej S-5 nad drogą powiatową nr 1343D w pobliżu węzła

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii

Lądowej i Środowiska

^{*}) Adres do korespondencji: zoltowski@pg.gda.pl



Rys. 1. Przekrój poprzeczny belki typu T

Fig. 1. The cross section of a T-beam

„Trzebnica”. Ustrój o rozpiętości $L_1 = 15$ m składa się z dziewiętnastu prefabrykowanych belek typu T15 w przypadku nitki lewej i dwudziestu trzech belek w przypadku nitki prawej. Wskutek uderzenia pojazdu uszkodzeniu uległy skrajne belki lewej nitki od strony północnej.

Oceny skutków i inwentaryzacji uszkodzeń dokonał zespół pod kierownictwem profesora Jana Bienia z Politechniki Wrocławskiej [1]. W skrajnym dźwigarze stwierdzono ubytek betonu na długości ok. 1,7 m, przerwanie strzemięcia, odsłonie-

nięcie podłużnych prętów zbrojeniowych oraz strun sprężających (fotografia 1), zarysowanie o rozwarości do 1,4 mm na długości ok. 6 m (pomierzone na powierzchni zarysowanej) w miejscu połączenia środka z półką. Na wysokości środka zaobserwowano rysy ukośne o rozwarości $0,2 \div 0,5$ mm (fotografia 2), a na pozostałych belkach ubytki o głębokości lokalnie do 4 cm, bez odsłonięcia zbrojenia. Schemat uszkodzeń w dźwigarze skrajnym przedstawiono na rysunku 2.



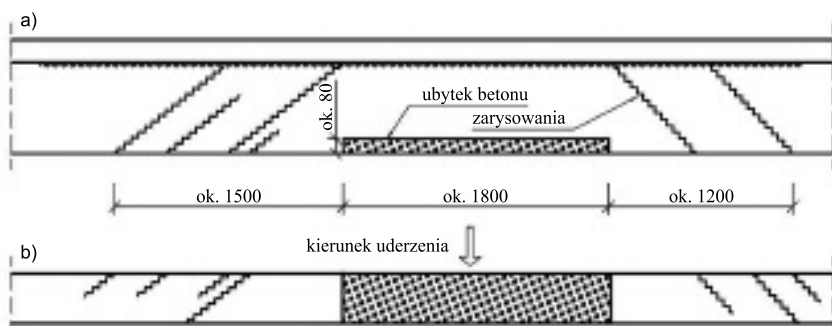
Fot. 1. Ubytki w dźwigarze skrajnym

Photo 1. The losses in utmost girder



Fot. 2. Zarysowania belki T
Photo 2. Cracks in T-beam

- inekcję wszystkich rys w belce i reprofilację uszkodzonej otuliny od spodu;
 - wykonanie dodatkowej belki żelbetowej pomiędzy dwoma skrajnymi belkami prefabrykowanymi (rysunek 3);
 - zdjęcie balastu i kontynuowanie prac wykończeniowych.
- Założenia potwierdzono obliczeniami statyczno-wytrzymałościowymi uwzględniającymi fazy budowy i ewentualne ubytki siły sprężającej.



Rys. 2. Schemat zarysowania wywołanego uderzeniem: a) widok z boku na dźwigar skrajny; b) widok od dołu

Fig. 2. The scheme of cracks caused by impact: a) side view on utmost girder; b) bottom view

Autorzy ekspertyzy [1] stwierdzili, że ubytki w belce skrajnej implikują potrzebę przeprowadzenia obliczeń statyczno-wytrzymałościowych, na podstawie których można ocenić nośność. Wnioski z analizy:

- obiekt nie może być oddany do użytkowania bez naprawy uszkodzeń;
- najbardziej zniszczoną belkę należy naprawić.

Zaproponowano inekcję rys żywicą, reprofilację uszkodzonej otuliny prętów oraz wzmocnienie elementu matami i biernymi taśmami węglowymi. Rozwiązanie spełniało wymagania normowe, ale inwestor (GDDKiA Oddział Wrocław) wyraził obawy co do trwałości i zmniejszonej odporności na ponowne uderzenia poziome. Zespół autorski opracował więc alternatywny projekt wzmocnienia przęsła, zapewniający wymaganą nośność pionową belki i radykalnie zwiększający odporność krawędzi przęsła na uderzenia poziome.

Koncepcja wzmocnienia

Celem naprawy było przywrócenie pierwotnych właściwości uszkodzonej belki i zabezpieczenie jej przed ponownymi skutkami uderzenia poziomego. Zalecono:

- wprowadzenie obciążenia (balastu) nad uszkodzoną belką w celu zredukowania naprężeń ściskających (pochodzących od sprężenia dołem) w betonie uszkodzonej belki;

belce zamodelowano sprężenie. Poszczególным częścią modelu przypisano beton C 40/50 zgodny z dokumentacją projektową [4]. Rozważano również parametry betonu określone na podstawie wyników badań próbek.

Aby ocenić potrzebę wzmocnienia belki skrajnej, przeprowadzono analizę statyczno-wytrzymałościową z uwzględnieniem procesu budowy obiektu uwzględniającego:

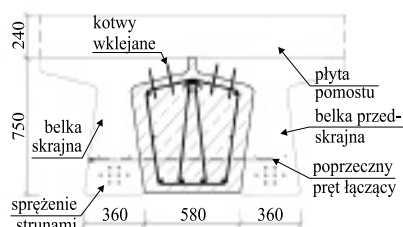
- betonowanie, dojrzewanie i sprężenie belek prefabrykowanych w wytwórni,
- ustawienie belek prefabrykowanych w miejscu docelowym;
- betonowanie płyty pomostu;
- instalację wyposażenia zgodnie ze stanem faktycznym;
- osłabienie przekroju;
- montaż wyposażenia.

Model z powstałym w procesie budowy stanem naprężeń obciążono taborem samochodowym oraz tłumem pieszych zgodnie z [3]. W obliczeniach uwzględniono efekty reologiczne występujące w trakcie i po zakończeniu budowy. Podobnie jak w ekspertyzie [1], założono brak współpracy przy przenoszeniu obciążeń przez wygięte zbrojenie podłużne oraz odkryte struny sprężające. Stwierdzono przekroczenie dopuszczalnych wartości naprężeń rozciągających w betonie.

Naprawa i wzmocnienie dźwigara

Poza wynikającą z przeprowadzonych analiz potrzebą wzmocnienia belki z uwagi na nośność pionową, autorom przyświecała idea, by nie dopuścić do całkowitego zniszczenia dźwigara przy następnym, potencjalnym uderzeniu przez przejeżdżający pojazd ponadgabarytowy. Ze względu na rysy ukośne występujące w środkniku oraz szeroką rysę w połączeniu półki ze środknikiem, ryzykowne było uznanie dźwigara skrajnego za jednorodny element pracujący w sposób liniowy na zadane obciążenia pionowe, a tym bardziej poziome.

Żelbetowa belka wewnętrzna została połączona ze skrajnymi belkami prefabrykowanymi za pomocą prętów $\phi 10$ wklejanych na żywicę w rozstawie co 25 cm w strefie przypodporowej oraz co 40 cm w przęśle (rysunek 3). Rozstaw zakotwień na długości dobrano tak, aby przenieść siłę rozwarstwiająca pomiędzy starym i nowym betonem. Sąsiednie belki prefabrykowane połączono prętami $\phi 12$ co 30 cm. Wzmacniając zbrojenie podłużne oraz poprzeczne, ba-



Rys. 3. Dodatkowa belka wzmacniająca – szczegół konstrukcyjny

Fig. 3. The additional strengthening beam

Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe

Po wstępnym założeniu spadku nośności obiektu ze względu na ubytki w skrajnym dźwigarze przeprowadzono obliczenia statyczno-wytrzymałościowe. Wykonano model numeryczny obiektu (rysunek 4) w środowisku MES SOFiSTiK. Betonową płytę pomostu odwzorowano za pomocą elementów powłokowych, a dźwigary prefabrykowane – jednowymiarowych elementów belkowych. W każdej



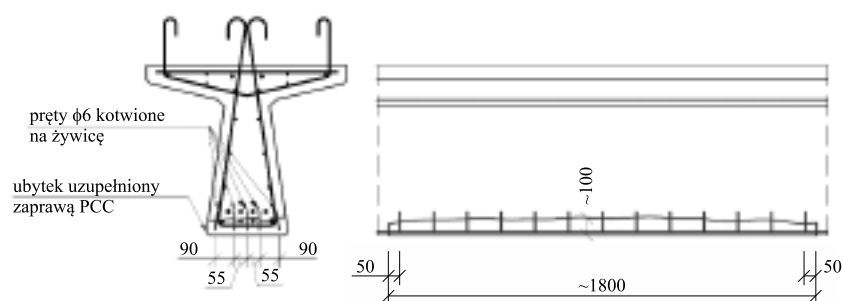
Rys. 4. Wizualizacja modelu numerycznego MES wykonanego w środowisku MES SOFiSTiK

Fig. 4. The visualisation of numerical FEM model made by in SOFiSTiK FEM environmental

zowano na siłach wewnętrznych odczytanych z modelu numerycznego. Belkę wykonano z samozagęszczalnego betonu ekspansywnego. W przypadku wprowadzenia dodatkowego elementu konstrukcyjnego do już istniejącej konstrukcji należy wciągnąć go do współpracy przy przenoszeniu obciążeń od ciężaru własnego i sprężenia. Standardowo nowa belka pracowałaby wyłącznie od obciążeń dodatkowych, a wcześniej zmontowane dźwigary sprężone (w tym uszkodzona belka skrajna) doznałyby dodatkowego obciążenia ciężarem własnym nowej konstrukcji. Spodziewany przyrost nośności byłby więc zniwelowany przez dodatkowe obciążenie. Zdecydowano o wciągnięciu nowej belki do współpracy pod ciężarem własnym i od sprężenia przez balastowanie obiektu, a następnie dobetonowanie nowej belki do prefabrykatu pozbawionego naprężeń ściskających od sprężenia. Zdjęcie balastu po okresie dojrzewania betonu spowodowało wprowadzenie siły sprężającej z belek T w nową belkę, dzięki zespoleniu starego i nowego betonu przez uszorstnienie powierzchni styku (piaskowanie) i wprowadzenia zbrojenia poprzecznego.

Balast zaprojektowano z kilku płyt betonowych 1,5 x 3,0 m ułożonych na kapie chodnikowej, w miejscu, w którym w belkach wystąpi maksymalny moment zginający. Dzięki temu możliwe było uzyskanie pożądanego efektu odprężenia betonu uszkodzonego prefabrykatu. Ciężar betonu ustalono na podstawie analizy statycznej. W obliczeniach zwiększano ciężar balastu, aż do momentu, w którym naprężania ściskające we włóknaх dolnych skrajnych dźwigarów prefabrykowanych po zabetonowaniu belki spadną do zera (rysunek 5). Ze względów bezpieczeństwa nie dopuszczono rozciągania w betonie elementów prefabrykowanych. Nie uwzględniono również współpracy przęsła z kapą chodnikową. Ciężar balastu określono na ok. 22,5 t.

W celu przywrócenia geometrii początkowej uszkodzonych dźwigarów, małe ubytki uzupełniono zaprawą PCC, a w przypadku dużych zdecydowano się na wzmocnienie połączenia pomiędzy betonem i zaprawą metodą kółkowania za pomocą prę-



Rys. 6. Schemat uzupełnienia ubytku w dźwigarze skrajnym

Fig. 6. The scheme of replenish of losses in utmost girder

tów $\phi 6$ (rysunek 6). Reprofilację oraz iniekcję rys wykonano w momencie obciążenia obiektu balastem, co pozwoliło domknąć rysy po zdjęciu balastu.

Zgodnie z dokumentacją projektową [5] naprawę rozpoczęto od montażu zbrojenia. Następnie przystąpiono do obciążania przęsła balastem i pomiaru odkształceń na belce przedskrajnej w środku rozpiętości przęsła. Ekstensometrów nie zamontowano na belce skrajnej z uwagi na spodziewane zaburzenia wynikające z jej zarysowania. Kontrolowano ugięcia pionowe za pomocą zegarkowego miernika przemieszczeń. Obciążenie przykładowo przyrostowo po 30 kN (dwie płyty) i odczytywano wielkość odkształcenia i ugięcia.

W wyniku obciążenia w przekrój belki wprowadzono naprężenie wynoszące 1,7 MPa i ugięcie – 1,5 mm [6], a więc niemal dwukrotnie mniejsze, niż wynikało to z analizy. W rzeczywistości obiekt okazał się sztywniejszy, na co wpłynął moduł betonu (w obliczeniach przyjęto 32 GPa), grubość nadbetonu, współpraca z kapą chodnikową i belką policzkową. Z uwagi na bardzo małe wartości odkształceń należy spodziewać się błędów w pomiarach. Ze względu na bezpieczeństwo konstrukcji w analizie poziomu balastowania nie można było uwzględnić wpływu kapy chodnikowej. Uzyskany mniejszy stan naprężeń nie wpływa negatywnie na technologię naprawy. Balastowanie przęsła wykazało jego rzeczywistą sztywność, która okazała się większa od projektowanej. Po przeanalizowaniu wyników z kontrolowanego balastowania zezwolono na kontynuację naprawy

zgodnie z dokumentacją naprawczą. Z uwagi na wrażliwość konstrukcji na efekty reologiczne zalecono jak najdłuższe balastowanie przęsła po betonowaniu belki – minimum 14 dni.

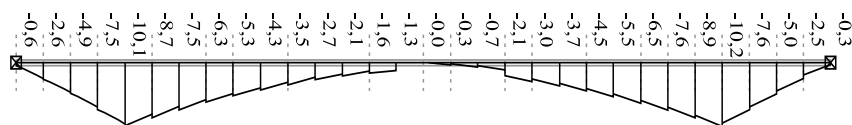
Podsumowanie

Niektóre prefabrykowane dźwigary stosowane w wiaduktach drogowych, mimo zalet, są wrażliwe na uderzenia pojazdów przejeżdżających pod obiektem. Zaproponowana metoda naprawy pozwala zwiększyć nośność uszkodzonego obiektu, a dodatkowa belka – odporność skrajnych dźwigarów na potencjalne uderzenia poziome, natomiast balastowanie uszkodzonego dźwigara przed iniekcją rys i reprofilacją ubytków – na odtworzenie ciągłości pomiędzy popękаныmi fragmentami przęsła. Jednocześnie efektywnie wciąga się do współpracy wzmocnienia wykonane podczas naprawy. Ze względu na wrażliwość na uderzenia poziome prefabrykowanych belek typu T warto byłoby podjąć próbę modyfikacji obszarów krawędziowych tych konstrukcji.

Literatura

- [1] Bień Jan, K. Sadowski K. 2016. *Ekspertyza naukowo-techniczna z oceną możliwości eksploatacji wiaduktów WS32 oraz WD44*. Politechnika Wroclawska.
- [2] Doboszyński W., G. Głowacki, R. Kozłowski. 2011. „Prefabrykowane belki mostowe typu T – 10 lat doświadczeń”. *Inżynieria i Budownictwo* 7/8: 364 – 368.
- [3] PN-85/S-10030 Obiekty mostowe. Obciążenia.
- [4] Projekt wykonawczy WS-32, Budowa drogi ekspresowej S-5 Poznań-Wrocław na odcinku Korzeńsko (bez węzła) – węzeł Widawa Wrocław. Odcinek od km. 137+500 do węzła Widawa Wrocław (wraz z węzłem) IRP Biuro Projektów Sp. z o.o.
- [5] Żółtowski Krzysztof, Przemysław Kalitowski. 2016. *Ocena nośności i projekt naprawy obiektu WS-32*. Gdańsk.
- [6] Żółtowski Krzysztof, Przemysław Kalitowski, T. Romaszkiwicz. 2016. *Raport z obciążania technologicznego wiaduktu WS-32*. Gdańsk.

Przyjęto do druku: 19.06.2017 r.



Rys. 5. Naprężenia normalne we włóknaх dolnych zabalastowanego dźwigara skrajnego po zabetonowaniu belki dodatkowej

Fig. 5. Normal stresses in bottom fibres of ballasted girder after concreting of additional beam