

USZKODZONA BELKA TYPU T WIADUKTU DROGOWEGO. OCENA USZKODZEŃ I NAPRAWA

KRZYSZTOF ŻÓŁTOWSKI, e-mail: zoltowk@pg.gda.pl

PRZEMYSŁAW KALITOWSKI

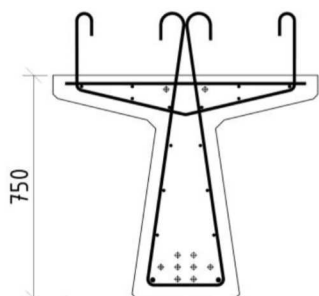
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska

Streszczenie: W rozdziale opisano metodę wzmocnienia uszkodzonej belki prefabrykowanej typu T. Dźwigar wiaduktu drogowego został uderzony przez wozidło, co spowodowało jego zarysowanie i ubytki. Zaproponowano naprawę poprzez dobetonowanie dodatkowej belki. W procesie budowy belki zastosowano balastowanie płytami betonowymi w celu wciągnięcia nowego dźwigara do przenoszenia obciążeń od ciężaru własnego obiektu. Przewidziano połączenie starego betonu z nowym za pomocą kołkowania, prętów poprzecznych oraz przez przyczepność. Iniekcję rys oraz ubytków wywołanych uderzeniem przeprowadzono pod obciążeniem balastem, aby doprowadzić do ich zamknięcia w czasie normalnej eksploatacji. Wykonano szereg analiz MES w celu określenia wielkości balastu i efektów wzmocnienia. W analizie uwzględniono fazy budowy obiektu oraz dalsze efekty reologiczne. W trakcie realizacji 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

1. Wstęp

Betonowe dźwigary prefabrykowane są popularnym rozwiązaniem wykorzystywanym do budowy prześel drogowych wiaduktów o niedużej rozpiętości. Dzięki zaletom prefabrykacji wykonawca jest w stanie zrealizować zadanie w szybki sposób, niewymagający skomplikowanych systemów deskowań i rusztowań. Większość stosowanych w Polsce dźwigarów prefabrykowanych przeznaczonych pod obiekty mostowe wykonywanych jest jako strunobetonowe (np. belka typu Kujan, belka typu T). W zależności od przyjętego rozwiązania dźwigary prefabrykowane są optymalizowane z wykorzystaniem różnorodnych funkcji celu i warunków ograniczających. Bez skomplikowanych wyliczeń można stwierdzić, że belki typu T zostały zaprojektowane by przenosić jak największy moment zginający od obciążeń pionowych przy jak najmniejszym ciężarze własnym (rys. 1).



Rys. 1. Przekrój poprzeczny belki typu T (lewo). Dźwigary typu T składowane w wytwórni (prawo)
[materiały promocyjne firmy Sibet]

Słabym elementem tego rozwiązania jest wrażliwość dźwigarów typu T na niepożądane, wyjątkowe, poprzeczne siły poziome będące wynikiem kolizji pojazdu ponadgabarytowego z przesłem. Kolizje takie niestety zdarzają się często w rejonach objętych intensywną działalnością budowlaną, a więc praktycznie w całej Polsce.

2. Opis obiektu i uszkodzenia

Przedmiotowy wiadukt WS32 zlokalizowany jest w ciągu drogi ekspresowej S-5 nad drogą powiatową nr 1343D w pobliżu węzła „Trzebnica”. Ustrój o rozpiętości $L_t = 15$ m składa się z 19 prefabrykowanych belek typu T15 dla nitki lewej i 23 belek dla nitki prawej. Uszkodzeniu w skutek uderzenia wozidła, które nie opuściło do końca skrzyni ładunkowej (rys. 2) uległy skrajne belki nitki lewej od strony północnej.

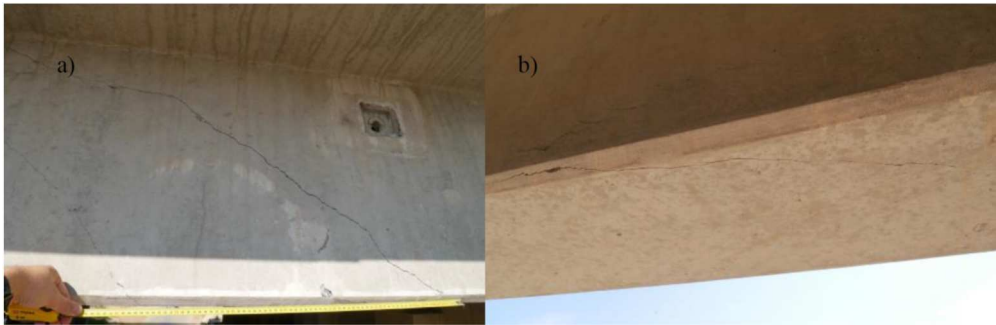


Rys. 2. Wozidło z podniesioną skrzynią ładunkową

Oceny skutków i inwentaryzacji uszkodzeń dokonał zespół pod kierownictwem profesora Jana Bienia z Politechniki Wrocławskiej [1]. W miejscu uderzenia stwierdzono ubytek betonu na długości ok 1,7 m, przerwanie strzemienia, odsłonięcie podłużnych prętów zbrojeniowych oraz strun sprężających w skrajnym dźwigarze (rys. 3a). Dodatkowo zauważono poziome zarysowanie na długości ok. 6 m o rozwarości do 1,4 mm (pomierzone na powierzchni zarysowanej) w miejscu połączenia środnika z półką (rys. 3b). Na wysokości środnika wystąpiły rysy ukośne o rozwarości od 0,2 mm do 0,5 mm (rys. 4a i 4b). Na pozostałych belkach rozpoznano ubytki o głębokości lokalnie do 4 cm, lecz bez odsłonięcia zbrojenia (rys. 5). Zestawienie uszkodzeń w dźwigarze skrajnym przedstawiono na rysunku 6.



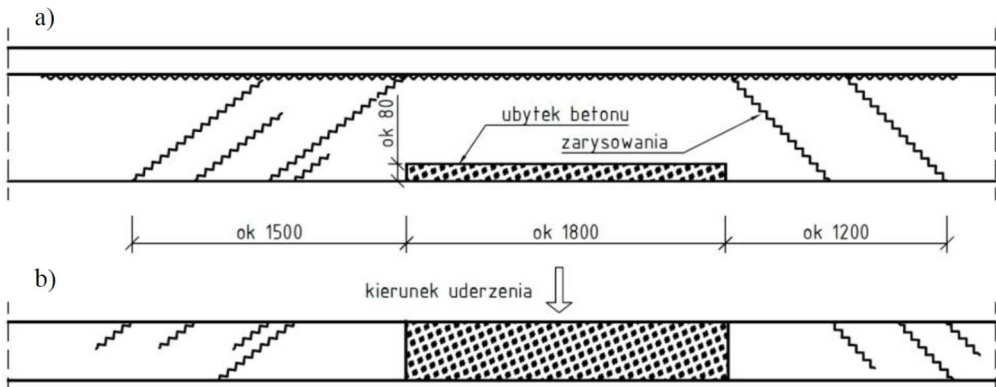
Rys. 3. Ubytki w dźwigarze skrajnym: a) widok od dołu, b) zarysowanie pomiędzy półką górną a środnikiem



Rys. 4. Zarysowania belki T: a) rysy ukośne, b) rysy po spodniej stronie dźwigara



Rys. 1. Uszkodzenia dźwigarów wewnętrznych



Rys. 6. Szkic stanu zarysowania wywołanego uderzeniem: a) widok z boku na dźwigar skrajny, b) widok od dołu

Autorzy ekspertyzy [1] stwierdzili, że jedynie ubytki w belce skrajnej implikują potrzebę przeprowadzenia obliczeń statyczno-wytrzymałościowych, na podstawie których możliwa jest ocena nośności i dopuszczenie do eksploatacji całego obiektu.

Po przeprowadzeniu przez zespół profesora Bienia analiz sformułowano następujące wnioski:

- obiekt bez dodatkowych działań naprawczych nie może być oddany do użytku,
- belka najbardziej zniszczona może być w dalszym ciągu wykorzystywana pod warunkiem dokonania naprawy.

Zaproponowano naprawę polegającą na iniekcji wszystkich rys żywicą sklejącą, reprofilację uszkodzonego otulenia prętów i wzmocnienie matami i biernymi taśmami węglowymi.

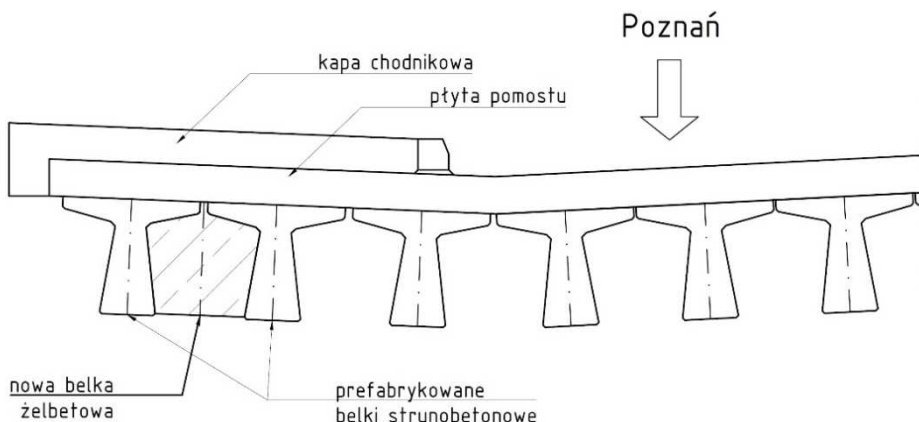
Zaproponowane rozwiązanie spełniało normowe wymogi wytrzymałościowe przęsła. Inwestor jednak (GDDKiA Oddział Wrocław) wyraziła obawy co do trwałości i osłabionej odporności na ponowne uderzenia poziome. Wychodząc naprzeciw życzeniom Inwestora zespół autorski opracował alternatywny projekt wzmocnienia przęsła, zapewniający wymaganą nośność pionową belki i radykalnie ponoszący odporność krawędzi przęsła na uderzenia poziome.

3. Koncepcja wzmocnienia

Cel naprawy to przywrócenie pierwotnych właściwości uszkodzonej belki i zabezpieczenie jej przed ponownym skutkiem uderzenia poziomego. Wyszczególniono następujące etapy działań:

- Wprowadzenie obciążenia (balastu) nad uszkodzoną belką w celu zredukowania naprężeń ściskających (pochodzących od sprężenia dołem) w betonie uszkodzonej belki.
- Wykonanie iniekcji sklejącej we wszystkie zidentyfikowane rysy w belce i reprofilacja uszkodzonego otulenia od spodu.
- Wykonanie dodatkowej belki żelbetowej pomiędzy dwoma skrajnymi belkami prefabrykowanymi (rys. 7)
- Zdjęcie balastu i kontynuowanie prac wykończeniowych.

Cała procedura została poparta obliczeniami statyczno-wytrzymałościowymi uwzględniającymi fazy budowy i ewentualne ubytki siły sprężającej.

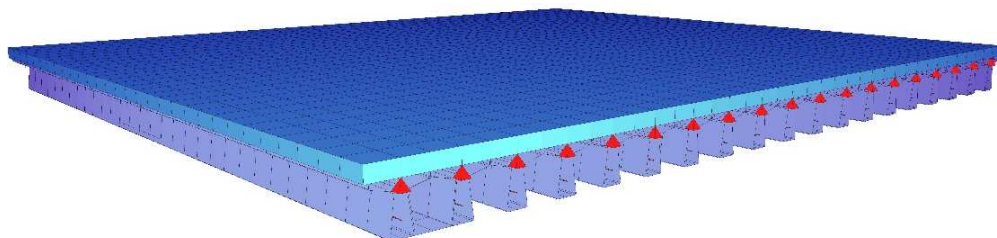


Rys. 7. Lokalizacja oraz kształt koncepcji wzmocnienia

4. Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe

Po wstępnym założeniu spadku nośności obiektu ze względu na ubytki wyłącznie w skrajnym dźwigarze przeprowadzono obliczenia statyczno-wytrzymałościowe. Na potrzeby analizy wykonano model numeryczny obiektu (rys. 8). Wykonano go w środowisku MES SOFiStiK. Betonową płytę pomostu odwzorowano za pomocą elementów powłokowych, a dźwigary prefabrykowane za pomocą jednowymiarowych elementów belkowych. Zamodelowano sprężenie w każdej belce. Poszczególnym częściom modelu przypisano materiał zgodny z dokumentacją

projektową [2] – beton C 40/50. Rozważano w modelu również parametry betonu określone na podstawie wyników badań próbek.



Rys. 8. Wizualizacja modelu numerycznego MES wykonanego w środowisku MES SOFiSTiK

Aby ocenić potrzebę wzmocnienia belki skrajnej przeprowadzono analizę statyczno-wytrzymałościową z uwzględnieniem procesu budowy obiektu. Całość podzielono na następujące fazy:

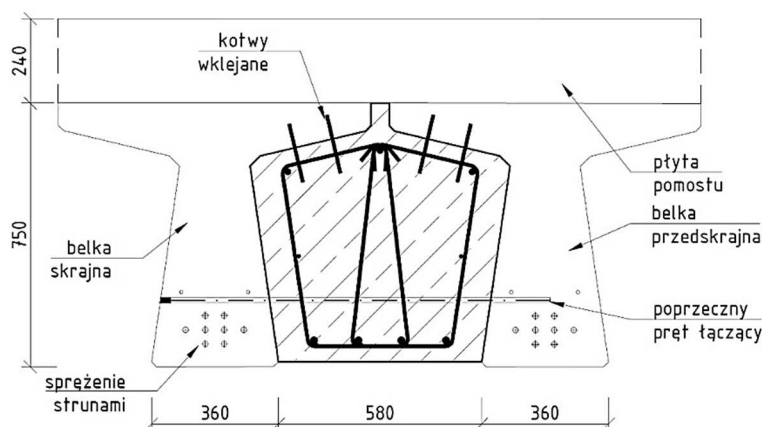
- betonowanie, dojrzewanie i sprężenie belek prefabrykowanych w wytwórni,
- ustawienie belek prefabrykowanych w miejscu docelowym,
- wybetonowanie płyty pomostu,
- instalacja części wyposażenia zgodnie ze stanem faktycznym,
- osłabienie przekroju,
- wykonanie pozostałej części wyposażenia.

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

5. Wzmocnienie

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. Z uwagi na rysy ukośne występujące w środku oraz szeroko rozwartą rysę w połączeniu półki ze środkiem, wysoce ryzykowne było uznanie dźwigara skrajnego za jednorodny element pracujący w sposób liniowy na zadane obciążenia pionowe, a tym bardziej poziome. Ze względu na powyższe zrealizowano koncepcję opisaną powyżej. Istotnym elementem wzmocnienia jest dodatkowa belka pomiędzy skrajnymi dźwigarami (rys. 9)

Żelbetowa belka wewnętrzna połączona jest z belkami prefabrykowanymi za pomocą prętów $\phi 10$ wklejanych na żywicę w rozstawie co 25 cm w strefie przypodporowej oraz co 40 cm w przęśle. Rozstaw zakotwień po długości dobrano tak, aby przenieść siłę rozwarstwiającą pomiędzy starym i nowym betonem. Sąsiednie belki prefabrykowane są dodatkowo połączone prętami $\phi 12$ co 30 cm. Zbrojenie podłużne oraz poprzeczne wyznaczono bazując na siłach wewnętrznych odczytanych z modelu numerycznego. Kosz zbrojeniowy zaprojektowano tak, aby po wykonaniu na placu budowy możliwe było jego osadzenie pomiędzy belkami. Betonowanie belki założono betonem samozagęszczalnym i ekspansywnym w celu uzyskania dobrej jakości materiału, w sytuacji utrudnionego dostępu do niszy od góry.



Rys. 9. Dodatkowa belka wzmacniająca – szczegół konstrukcyjny

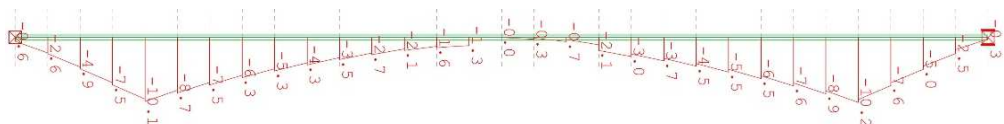
Podstawowym zadaniem w sytuacji dodania dodatkowego elementu konstrukcyjnego do już wykonanej struktury jest wciągnięcie go do współpracy przy przenoszeniu ciężaru własnego. Standardowo nowa belka po wybetonowaniu pracowałaby wyłącznie od obciążeń dodatkowych, a wcześniej zmontowane dźwigary sprężone (w tym uszkodzona belka skrajna) doznałyby dodatkowego obciążenia ciężarem własnym nowej konstrukcji. Spodziewany przyrost nośności byłby więc zniwelowany przez dodatkowe obciążenie. Sprawa jest tym bardziej istotna, gdy ciężar własny stanowi znaczący składnik całkowitych obciążeń. Nową belkę wciągnięto do współpracy pod ciężarem własnym. Dokonano tego poprzez balastowanie obiektu i następnie dobetonowanie nowej belki do prefabrykatu częściowo pozbawionego naprężeń ściskających. Zdjęcie balastu po okresie dojrzewania betonu spowodowało wprowadzenie siły sprężającej w nową belkę, dzięki zespoleniu starego i nowego betonu. Efekt zespolenia uzyskano przez uszorstnienie powierzchni styku (piaskowanie) i wprowadzenia zbrojenia poprzecznego.

Balast zaprojektowano jako stos płyt betonowych $1,5 \times 3,0$ m (rys. 10). Stos ułożono na kapie chodnikowej, w miejscu dla którego wystąpią maksymalne momenty zginające w belkach.



Rys. 10. Balast z płyt betonowych

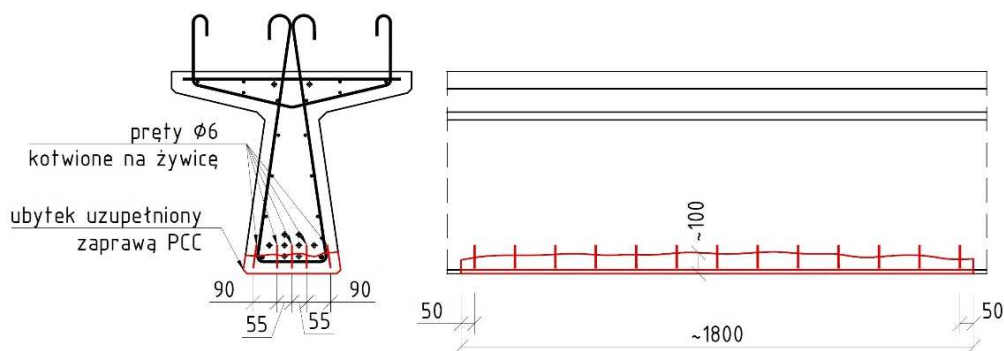
Dzięki temu było możliwe uzyskanie pożądanego efektu odprężenia betonu uszkodzonego prefabrykatu. Wysokość, a co za tym idzie ciężar stosu, ustalono na podstawie analizy statycznej. W obliczeniach zwiększano ciężar balastu, aż do momentu, w którym we włóknach dolnych skrajnych dźwigarów prefabrykowanych naprężenia ściskające w fazie po zabetonowaniu belki spadną do zera (rys. 11). Ze względów bezpieczeństwa nie dopuszczono rozciągania w betonie elementów prefabrykowanych. Nie uwzględniono również współpracy przęsła z kapą chodnikową. Powyższa procedura pozwoliła ustalić wymagany ciężar wynoszący ok. 22,5 t.



Rys. 11. Naprężenia normalne we włóknach dolnych zabalastowanego dźwigara skrajnego po zabetonowaniu belki dodatkowej

6. Reprofilacja dźwigarów i iniekcja rys

Poza wykonaniem dodatkowej belki konieczne było przywrócenie geometrii początkowej uszkodzonych dźwigarów. Zdecydowano się na reprofilację zaprawą PCC. Zabieg ten niewątpliwie zwiększa nie tylko estetykę, ale jest też wymagany dla utrzymania trwałości konstrukcji. Mniejsze ubytki uzupełniono samą zaprawą. Odłupana część w dźwigarze skrajnym była na tyle duża, że zdecydowano się na wzmocnienie połączenia pomiędzy betonem i zaprawą. Zastosowano system kołkowania za pomocą prętów $\phi 6$ (rys. 12).

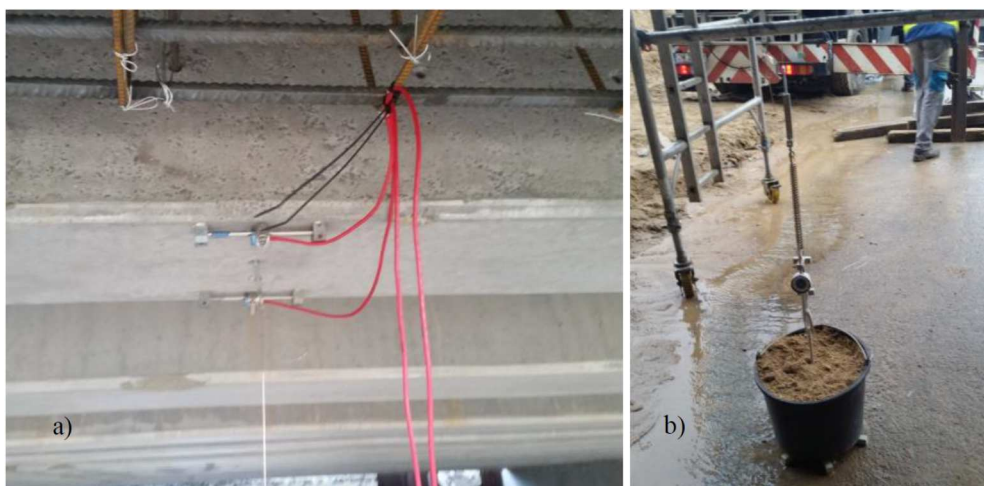


Rys. 12. Schemat uzupełnienia ubytku w dźwigarze skrajnym

Reprofilację oraz iniekcję sklejącą w rysach wykonano w momencie obciążenia obiektu balastem. Pozwala to domknąć powstałe rysy po zdjęciu balastu, w czasie normalnej eksploatacji obiektu.

7. Wykonanie wzmocnienia i pomiary

Zgodnie z dokumentacją projektową [4] naprawę rozpoczęto od montażu zbrojenia. Następnie przystąpiono do obciążania przęsła balastem. W trakcie obciążania prowadzono pomiary odkształceń na belce przedskrajnej w środku rozpiętości przęsła. Ekstensometrów nie zamontowano na belce skrajnej z uwagi na spodziewane zaburzenia wynikające z jej porośnięcia. Dodatkowo kontrolowano ugięcia pionowe za pomocą zegarkowego miernika przemieszczeń (rys. 13b).



Rys. 13. Ekstensometry strunowe i pomiar przemieszczeń pionowych

Obciążenie układano przyrostowo po 30 kN (dwie płyty). Po każdym obciążeniu odczytywano poziom odkształceń i ugięcia.



Rys. 14. Układanie płyt nad skrajną belką

W wyniku obciążenia wprowadzono w przekrój belki naprężenia na poziomie 1.7 MPa i ugięcia na poziomie 1,5 mm [5]. Jest to niemal dwukrotnie mniej, niż wynikało to z analizy. W rzeczywistości obiekt okazał się sztywniejszy. Wpływa na to aktualny moduł betonu (w obliczeniach przyjęto 32 GPa), grubość nadbetonu, współpraca z kapą chodnikową i belką policzkową. Należy również spodziewać się błędów w pomiarach z uwagi na bardzo małe wartości pomiarowe odkształceń. Niestety, w analizie balastowania nie można było uwzględnić wpływu kapy chodnikowej, z uwagi na bezpieczeństwo konstrukcji.

Uzyskany, mniejszy stan naprężeń nie wpływa negatywnie na technologię naprawy. Balastowanie przęsła pokazało jego rzeczywistą nośność, która okazała się większa od projektowanej. Przyłożone obciążenie technologiczne było obiektywnym sprawdzeniem nośności i sztywności konstrukcji. Po przeanalizowaniu wyników z kontrolowanego balastowania zezwolono na kontynuację naprawy zgodnie z dokumentacją naprawczą. Z uwagi na wrażliwość konstrukcji na efekty reologiczne przekazano Wykonawcy zalecenie jak najdłuższego balastowania przęsła po betonowaniu belki – minimum 14 dni.

8. Podsumowanie

Niektóre prefabrykowane dźwigary stosowane w wiaduktach drogowych, mimo swoich niewątpliwych zalet, są wrażliwe na uderzenia pojazdów przejeżdżających pod obiektem. Zaproponowana przez autorów metoda naprawy pozwala podnieść nośność naruszonego obiektu z zastosowaniem typowych materiałów. Jednocześnie dodatkowa belka znacząco podnosi odporność skrajnych dźwigarów na potencjalne uderzenia poziome. Balastowanie uszkodzonego dźwigara przed iniekcją rys i reprofilacją ubytków pozwala na odtworzenie ciągłości pomiędzy popękanymi fragmentami przęsła. Jednocześnie efektywnie wciąga do współpracy wzmocnienia wykonane w czasie naprawy. Opisane w referacie przęsła prefabrykowane z belek typu T są powszechnie stosowane. Z uwagi na ich wrażliwość na uderzenia poziome warto by było podjąć próbę modyfikacji obszarów krawędziowych tych konstrukcji.

Literatura

1. Bień J., Sadowski K.: Ekspertyza naukowo-techniczna z oceną możliwości eksploatacji wiaduktów WS32 oraz WD44, Politechnika Wrocławska, 2016.
2. 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.
3. PN-85/S-10030 Obiekty mostowe. Obciążenia.
4. Żółtowski K., Kalitowski P.: Ocena nośności i projekt naprawy obiektu WS-32, Gdańsk, 2016.
5. Żółtowski K., Kalitowski P., Romaszkiwicz T.: Raport z obciążania technologicznego wiaduktu WS-32, Gdańsk, 2016.

EVALUATION OF THE DAMAGE AND REPAIR OF DAMAGED T TYPE BEAM OF ROAD OVERPASS

Abstract: In the paper, a strengthening of the damaged T-type prefabricated beam was described. An overpass was hit by dump truck which resulted in beam cracking and spalling of the concrete. A reparation by adding a new beam was proposed. During the construction process slab-ballast technique was used. This allowed the new beam to transfer the dead loads. The new concrete was connected with the old one by studs, transverse bars and by adhesion. Several Finite Element Analyses were made to determine the weight of the ballast and evaluate the behavior of the structure. In the analysis, creep and relaxation of the tendons were included. During the construction, the strains and displacements of beam were recorded to verify the calculations.

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