



PIOTR ŁAZIŃSKI, *piotr.lazinski@polsl.pl*
ANDRZEJ RADZIECKI, *andrzej.radziecki@polsl.pl*
MAREK SALAMAK, *marek.salamak@polsl.pl*
Politechnika Śląska

PRZESTRZENNA ANALIZA WYTEŻENIA BLACHOWNICOWYCH DŹWIGARÓW WIADUKTÓW KOLEJOWYCH USZKODZONYCH W WYNIKU UDERZENIA POJAZDÓW

THREE-DIMENSIONAL STRAIN ANALYSE OF RAILWAY BRIDGE PLATE GIRDERS DAMAGED BY VEHICLE IMPACTS

Streszczenie Referat przedstawia przestrzenną analizę pracy statycznej i wyteżenia dźwigarów blachownicowych wiaduktów kolejowych uszkodzonych w wyniku uderzenia pojazdów. Zgodnie z wnioskami analizy przedstawiono różne sposoby naprawy uszkodzonych konstrukcji.

Abstract The paper presents three-dimensional static and capacity analyse of damaged railway bridges with permanently deformed plate girders. Damages were induced by the impact of trucks exceeding the allowable height clearance of the bridges. According to the results of analyse different repair techniques are presented.

1. Wstęp

Na skutek dużego wzrostu natężenia ruchu samochodowego (w tym ciężkiego) na drogach w Polsce, przy wciąż jeszcze przestarzałej infrastrukturze drogowej, dochodzi do wypadków i groźnych w skutkach kolizji. Częstym zdarzeniem jest uderzenie wysokiego pojazdu w dźwigary wiaduktów, które nie mają, wymaganych obecnie, skrajni pod obiektami. Uszkodzeniu ulegają zazwyczaj dolne części skrajnych dźwigarów i sąsiadujące z nimi elementy konstrukcji.

W referacie przedstawiono przestrzenną analizę pracy statycznej i wyteżenie dźwigarów blachownicowych, które w wyniku uderzenia przez przejeżdżający pod nim pojazd, zostały trwale odkształcone, lub w których przerwana została ciągłość materiału pasa dolnego. Zgodnie z wnioskami analizy przedstawiono również sposoby naprawy uszkodzonych konstrukcji wiaduktów.

2. Kolizje pojazdów z konstrukcjami mostów

Uderzenia pojazdów w konstrukcje mostów są jednym z wielu przykładów dynamicznego działania obciążeń, do których zalicza się między innymi: ruch taboru z różnymi prędkościami, siły hamowania i przyspieszania, uderzenia wynikające z nierówności nawierzchni lub niedoskonałości taboru, działanie pieszych i efekty rezonansowe oraz zjawiska zmęczeniowe i aerodynamiczne. Jednak w odróżnieniu do wyżej wymienionych, skutki kolizji są niemal zawsze natychmiastowe, a towarzyszące temu uszkodzenia często mają charakter awarii lub nawet katastrofy. Klasyfikację i opis efektów dynamicznych

w mostownictwie, które mogą prowadzić do różnych pod względem zasięgu awarii przedstawił Radomski [6]. Zjawiska będące konsekwencją uderzeń pojazdów są zwykle zupełnie inne niż przy statycznym oddziaływaniu tego samego obciążenia. Związane to jest nie tylko z dynamicznymi cechami tych obciążeń, ale również niektórymi właściwościami konstrukcyjnymi materiałów, które mogą zmieniać się w zależności od prędkości wywierania obciążenia. Ilustracją niech będzie, trudne do przewidzenia w skutkach zderzenie, zdawać by się mogło delikatnego ramienia koparki z ciężką, żelbetową płytą przęsła (rys. 1).



Rys. 1. Przykład kolizji pojazdu z konstrukcją mostu (źródło: dailycognition.com)

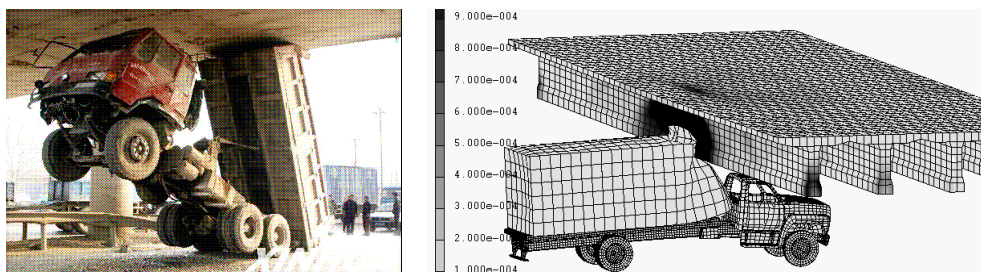
Najczęściej występujące przypadki kolizji pojazdów z konstrukcjami mostów to uderzenia w podpory oraz spód lub bok przęsła. Szacuje się, że około 20% awarii mostów w Pekinie spowodowanych jest właśnie takimi rodzajami kolizji [1]. Autorzy nie dotarli do tego typu statystyk w Polsce, ale wystarczy śledzić pojawiające się coraz częściej w naszych mediach spektakularne przykłady takich wypadków. Natężenie ciężkiego ruchu ciągle wzrasta. Presja czasu i kosztów w firmach transportowych jest z każdym dniem silniejsza. Tymczasem, wciąż na naszych drogach natknąć się można na dużą liczbę starych, zwłaszcza kolejowych wiaduktów z mocno zanizoną skrajnią. Przykłady ostatnich kolizji z naszego kraju pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Z lewej uderzenie ciężarówki w wiadukt w Nowym Sączu (źródło: wiadomosci24.pl), z prawej uderzenie autobusu w wiadukt w Świdnicy (źródło: PAP)

Uderzenia w podpory wiaduktów, choć zdarzają się rzadziej i są zwykle osłabione przez oddzielające je od jezdni bariery energochłonne, mają jednak skutki tragiczne. Betonowe filary projektowane są na możliwość wystąpienia takiej sytuacji, przez co ich uszkodzenia przeważnie nie stwarzają zagrożenia dla konstrukcji. Samo uderzenie ma najczęściej charakter twardy (ang. hard impact), skutkiem jest znaczna deformacja pojazdu i w ślad za tym zranienia lub śmierć pasażerów.

Znacznie częściej występującym przykładem kolizji jest próba przejazdu pod obiektem pojazdu, którego wysokość przekracza wysokość skrajni. Charakter takiego uderzenia jest raczej miękki (ang. soft impact). Energia absorbowana jest częściowo przez pojazd i odkształcenia konstrukcji. Zdarzenia takie wciąż mają miejsce mimo powszechnego stosowania przez służby drogowe oznaczeń i sygnalizacji. Bramki ostrzegające przed wiaduktami o ograniczonej wysokości są często ignorowane i niszczone jako pierwsze. Autorzy w swojej praktyce zawodowej zetknęli się z podobnymi przypadkami już kilkanaście razy, lecz nie wszystkie one zostały opisane w publikacjach. Wystarczy jednak zestawić poświęcone temu referaty z dwóch ostatnich konferencji *Awarie Budowlane*, aby stwierdzić, że problem ten nie jest wcale marginalny [1], [2], [4], [6], [8]. W większości przypadków są to jedynie opisy zaistniałej sytuacji wraz z opisem rozległości uszkodzeń oraz sposobów naprawy [2], [4]. Rzadziej występują próby analizy przęsła z uwzględnieniem stwierdzonych uszkodzeń [1], [8].



Rys. 3. Przykład zaawansowanej symulacji uderzenia pojazdu w konstrukcję wiaduku [3]

Natomiast w literaturze światowej w ostatnim czasie, ukazało się kilka opisów pogłębionej analizy, obejmującej modelowanie samego zjawiska zderzenia ze szczegółowym modelem uderzającego pojazdu (rys. 3) oraz nieliniowym modelem przęsła [3] [7]. Taka zaawansowana symulacja pozwala na ocenę stopnia zagrożenia w przypadku kolizji pojazdu z przęsłem mostu, przewidywania skutków takiego zdarzenia oraz poszukiwania i projektowania odpowiednich zabezpieczeń. Zabezpieczenia te mogą być, albo w postaci zaleceń projektowych dotyczących kształtowania konstrukcji (kształt dźwigarów, rozstaw i sztywność poprzecznicy, geometria i położenie stężeń) [7], albo przez zastosowanie specjalnych urządzeń absorbujących energię zderzenia np. warstwowych laminatów kompozytowych (ang. I-Lam composite sandwich panels) [5].

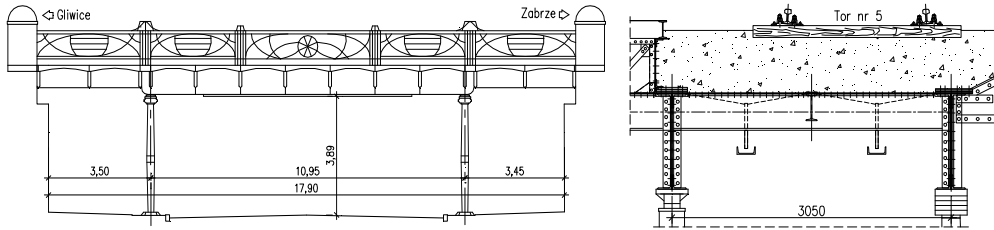
3. Wielotorowy wiadukt o konstrukcji nitowanej

Pierwszym z prezentowanych przykładów uszkodzenia ustroju nośnego spowodowanego uderzeniem pojazdu jest ponad stuletni wiadukt położony w sąsiedztwie dworca kolejowego w Gliwicach (rys. 4). Jest to trójprzęsłowa, swobodnie podparta konstrukcja stalowa z zamkniętym pomostem na blachach cylindrycznych. Uszkodzone zostało środkowe przęsło o rozpiętości teoretycznej 10,90 m, które oparte jest na wahaczach w postaci zdobionych, żeliwnych słupów (rys. 4).

Przedmiotem analizy były skutki uderzenia jakie miało miejsce w listopadzie 2008 r. Przejeżdżający pod wiaduktem wysoki pojazd zahaczył o pas dolny pierwszego dźwigara najstarszej części, około 3,0 m od podparcia na wahaczu. W wyniku tego uderzenia doszło do następujących deformacji nitowanej blachownicy (rys. 5):

- wygięcie środknika z pasem dolnym o wartość 65 mm od pierwotnego położenia,
- wygięcie pasa dolnego w planie, gdzie strzałka wynosi 95 mm i zanika przy podporach,

- skęcenie pasa dolnego w płaszczyźnie prostopadłej do osi dźwigara o kąt 8° ,
- lokalną deformację pasa dolnego ku górze od strony uderzenia o wartość 25 mm,
- pęknięcie kątownika żeberka tuż pod poprzeczną o rozwarciu 3 mm.



Rys. 4. Widok z boku i przekrój poprzeczny wiaduktu w rejonie dworca w Gliwicach

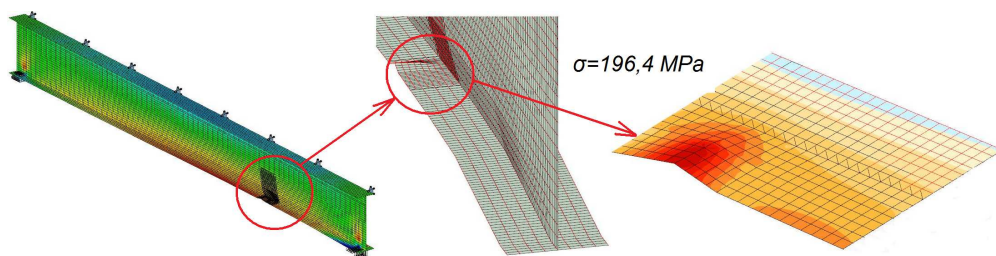
Obliczenia uszkodzonej blachownicy wykonane zostały z wykorzystaniem modelu o klasie (e^2, p^3). Zawierał on 69 elementów powłokowych z wygenerowaną siatką 4-węzłowych elementów powierzchniowych. W celu określenia wpływu uderzenia na nośność ustroju, utworzono dwa podobne modele. Pierwszy odwzorowujący dźwigar bez uszkodzeń i drugi – po uszkodzeniu. Na rys. 6 pokazano wizualizację dźwigara z zamodelowanym udarowym odkształceniem.



Rys. 5. Pomiar wychylenia dźwigara z pionu i zbliżenie na rejon uszkodzenia

W analizie przyjęto obciążenia zgodnie z PN-85/S-10030 przy klasie k+2 oraz dodatkowo obciążenie użytkowe lokomotywą ST 44. Obliczenia sprawdzające nośność wykonano w miarodajnych przekrojach wyznaczając naprężenia od obciążeń charakterystycznych i obliczeniowych. Z przeprowadzonej analizy wynika, że trwałe deformacje przyczyniły się do dużego lokalnego wzrostu i przekroczenia naprężeń normalnych (rys. 6). Przy obciążeniu normowym wyniosły one maksymalnie 349,2 MPa. W przypadku obciążenia użytkowego wymagania stanu granicznego nośności były spełnione, a największe naprężenia obliczeniowe wyniosły 196,4 MPa.

Ostatecznie uznano, że konstrukcja dźwigara ma rezerwy nośności, które wynikają z faktu, że odkształcenia plastyczne dotyczą głównie zawsze rozciąganego pasa dolnego. Potencjalny przyrost obciążenia dźwigara będzie działał zatem zmniejszająco na istniejące strzałki wygięć, a tym samym zmniejszył udział niekorzystnych sił wewnętrznych i wyrównywał dysproporcje naprężeń na szerokości pasa. Ma to bezpośredni wpływ na realne zwiększenie nośności uszkodzonego dźwigara w porównaniu z obliczeniami teoretycznymi, które wykonano przy założeniu sprężystej pracy statycznej konstrukcji.



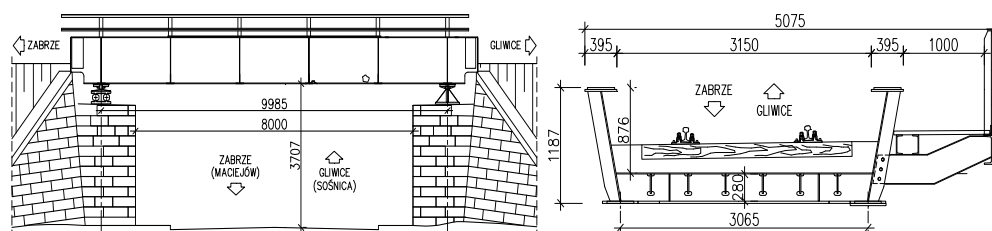
Rys. 6. Model dźwigara z mapą naprężeń i zbliżenia na rejon uszkodzenia

Z bezpośrednich obserwacji wynikało, że uszkodzony dźwigar nie wykazywał oznak nadmiernego przeciążenia pod wpływem obciążeń przejeżdżającymi pociągami. Stan dźwigara był stabilny i nie miał widocznych symptomów nieprawidłowej pracy statycznej. Dlatego zalecono pozostawienie uszkodzenia do czasu kapitalnego remontu obiektu, ale pod warunkiem poddania jego pracy trzyletniej obserwacji. W tym czasie ograniczono prędkość pociągów do 50 km/h. Biorąc jednak pod uwagę zaawansowany wiek obiektu oraz powstanie dodatkowego karbu, mającego wpływ na wytrzymałość zmęczeniową konstrukcji, w wieloletniej perspektywie zalecono kapitalny remont z wymianą uszkodzonego dźwigara.

4. Wiadukt o konstrukcji spawanej w terenie zurbanizowanym

Kolejnym przykładem podobnego uszkodzenia jest położony w równie zurbanizowanym terenie wiadukt kolejowy w Gliwicach – Sośnicy. Ustrój nośny to jednoprzęsłowa konstrukcja stalowa z pomostem ortotropowym. Uszkodzone w środkowej części przęsła, o rozpiętości teoretycznej 9,98 m, oparte jest na masywnych przyczółkach (rys. 7). Kolidzja zdarzyła się w lutym 2010 roku, a uderzenie pojazdu spowodowało następujące uszkodzenia (rys. 8):

- lokalne wygięcie pasa dolnego ku górze o wartość 70 mm,
- rozerwanie pasa dolnego od brzegu do miejsca połączenia ze środnikiem blachownicy,
- deformację środnika w pobliżu rozerwania pasa dolnego,
- nieznaczną deformację plastyczną poprzecznicy w miejscu połączenia z blachownicą,
- zerwanie części śrub mocujących wsporniki podchodnikowe.



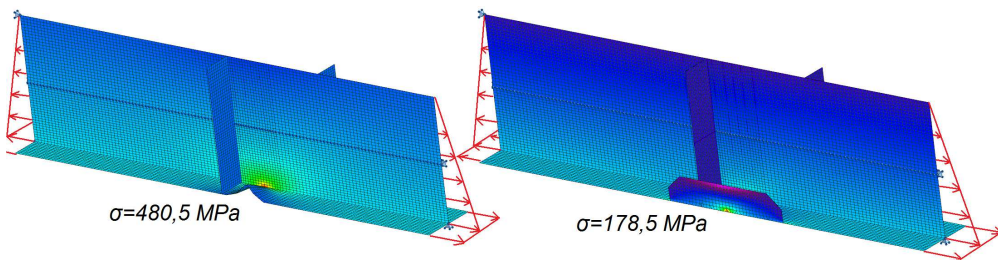
Rys. 7. Widok z boku i przekrój poprzeczny wiaduku w Gliwicach-Sośnicy

W celu sprawdzenia stanu naprężeń w miejscu uderzenia, fragment uszkodzonego dźwigara o długości 2,0 m i wysokości środnika do osi bezwładności wraz z częścią poprzecznic, odwzorowano przestrzennym modelem powłokowym klasy (e^2, p^3). Składał się on z 40 elementów powłokowych z wygenerowaną siatką 4-węzłowych elementów powierzchniowych. Tutaj również utworzono dwa modele. Pierwszy obejmował fragment z uszkodzeniem dźwigara, a drugi dotyczył tego samego fragmentu, ale po doraźnej naprawie (rys. 9), która polegała na wzmocnieniu pasa przez dospawanie nakładki i zebra.



Rys. 8. Deformacja pasa dolnego dźwigara i poprzecznicy z widocznym pęknięciem

W obliczeniach przyjęto obciążenia zastępcze na krawędziach wyciętego fragmentu, których wartości i rozkład wynikają z teoretycznego wykresy naprężeń, wywołanych momentem zginającym z obliczeń całego modelu belkowego. Uwzględniono przy tym obciążenie ruchome zgodnie z PN-85/S-10030 klasy k+2 i k0 oraz obciążenie użytkowe lokomotywą SM 31.



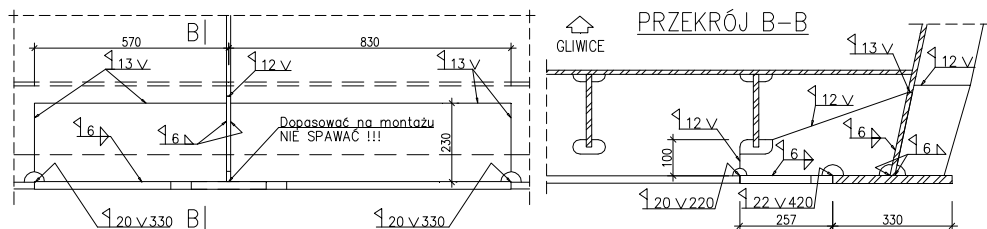
Rys. 9. Wizualizacja modeli z mapą naprężeń dźwigara uszkodzonego (a) i po doraźnym wzmocnieniu (b)

W analizowanym fragmencie dźwigara z uszkodzeniem, przy obciążeniu taborem kolejowym, naprężenia dopuszczalne są wielokrotnie przekroczone. Lokalnie, w miejscu silnego karbu, przekroczenia w pasie dolnym i środku (rys. 9) dochodzą do 240% (dla SM31). Taki poziom naprężeń, zwłaszcza przy dynamicznym, pulsacyjnym obciążeniu, grozi dalszą propagacją pęknięcia i wymaga szybkiej naprawy. Dlatego, w celu utrzymania koniecznego ruchu po wiadukcie, do czasu kompleksowej naprawy, przewidziano możliwość doraźnego wzmocnienia uszkodzonego pasa blachownicy, obejmującego między innymi:

- wyprostowanie pękniętego pasa dolnego przez jego podgrzanie,
- oszlifowanie krawędzi pasa dolnego w miejscu pęknięcia z wykonaniem spoiny czołowej,
- przyspawanie od góry nakładki z blachy 16×50×460 mm.
- przyspawanie bocznej listwy wzmocniającej z blachy 25×120×520 mm.

Wyniki analizy stanu naprężeń wzmocnionej konstrukcji świadczyły o tym, że zaproponowany sposób naprawy, chociaż nie usuwa całkowicie skutków uszkodzenia konstrukcji, pozwoli na tymczasową eksploatację obiektu przy zaniżonej klasie k0.

W celu przywrócenia pierwotnych parametrów użytkowych wiaduktu (klasy k+2) opracowano projekt remontu, który polegał na wymianie zniszczonych fragmentów dźwigara głównego oraz poprzecznicy. Ideę naprawy uszkodzonych elementów pokazano na rys. 10.



Rys. 10. Projekt naprawy uszkodzonej części konstrukcji

4. Wiadukt o konstrukcji spawanej w terenie pozamiejskim

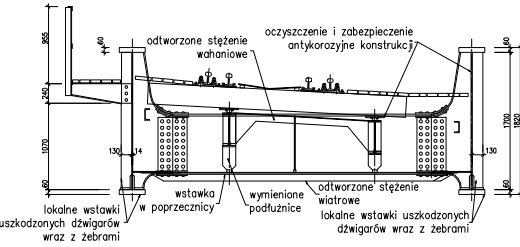
Ostatni przykład podobnego uszkodzenia jest pozamiejski wiadukt kolejowy nad drogą krajową nr 94 na odcinku Pyskowice-Toszek. Ustrój nośny jest trójprzęsłową konstrukcją blachownicową z pomostem otwartym. Środkowe, uszkodzone przęsło, o rozpiętości teoretycznej 19,59 m, oparte jest na masywnych filarach. Po obu jego stronach wypuszczone są poza oś podparcia krótkie wsporniki z przegubami walcowymi, na których oparte są skrajne przęsła o rozpiętościach 6,800 m. Uderzenie transportowanej pod obiektem koparki w listopadzie 2008 roku spowodowało następujące uszkodzenia (rys. 11):

- lokalne, plastyczne wygięcie pasa dolnego i dolnej części środnika,
- oderwanie i wygięcie sąsiadujących z miejscem uderzenia pionowych żeberek,
- deformację środnika w pobliżu rozerwania pasa dolnego,
- deformację plastyczną poprzecznicy w miejscu połączenia z blachownicą,
- skręcenie całego dźwigara w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiaduktu,
- wygięcie w planie pasa dolnego i środnika między poprzecznicami ze strzałką 58 mm,
- wyboczenie się pasa dolnego poprzecznicy na długości 40 cm,
- skręcenie i zdeformowanie podłużnic w polach sąsiadujących z miejscem uderzenia,
- zerwanie poprzecznic wiatrowych i deformacja stężeń wahanowych.

Oprócz tego nastąpiło chwilowe podniesienie konstrukcji. Dolne pasy blachownic znalazły się powyżej ograniczników poprzecznych łożysk i cała konstrukcja nośna doznała obrotu w planie względem stałego punktu podparcia na przyczółku. Największe przemieszczenie wyniosło 150 mm. Efektem tego przemieszczenia było nieosiowe podparcie ustroju nośnego. Na większości łożysk występowało mimośrodowe położenie części górnej i dolnej.

Trwałe deformacje dźwigarów głównych i zmiany warunków ich podparcia oraz uszkodzenia podłużnic, poprzecznicy i stężeń w części środkowej przęsła głównego uniemożliwiły ocenę nośności konstrukcji pod jakimkolwiek obciążeniem kolejowym. Zakres uszkodzeń był na tyle duży, że sama analiza stanu technicznego (z uproszczonymi obliczeniami na modelu prętowym), wystarczyła do podjęcia decyzji o całkowitym wstrzymaniu ruchu do czasu wykonania kompleksowej naprawy.

Z uwagi na skomplikowany charakter prac naprawczych (wycinanie, dopasowywanie i ponowne spawanie nowych elementów) zalecono demontaż konstrukcji nośnej, co pozwoliło dodatkowo uniknąć utrudnień w ruchu drogowym pod wiaduktem.



Rys. 11. Przekroje poprzeczne wiaduktu nad DK94 pokazujące uszkodzenia i zakres naprawy

5. Podsumowanie

Z powodu przestarzałej infrastruktury kolejowej i drogowej, problem uderzeń pojazdów w konstrukcję obiektów mostowych w naszym kraju występuje stosunkowo często. Szczególnie groźne w skutkach są uderzenia w stalowe przęsła wiaduktów kolejowych. Powodują one potencjalne zagrożenie katastrofą budowlaną, jak i przyczyniają się do długotrwałych komplikacji komunikacyjnych. Jedyną skuteczną drogą ograniczenia tych, niebezpiecznych wypadków jest modernizacja wszystkich węzłów komunikacyjnych, które nie spełniają obecnych wymogów bezpieczeństwa ruchu.

Literatura

1. Bętkowski P., Pradelok S.: Uszkodzenie i tymczasowa naprawa typowego kratowego mostu kolejowego, XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 23-26 maja 2007.
2. Budka E., Lewandowski G., Kożuch M., Lorenc W., Rabiega J.: Przykłady uszkodzeń konstrukcji mostowych spowodowanych uderzeniami pojazdów, XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009.
3. Lu Xin-zheng, Zhang Yan-sheng, Jiang Jian-jing, Ren Ai-zhu, Ning Jing: Nonlinear Finite Element Simulation for the Impact between Over-high Truck and Bridge-Superstructure, Proc. 7th Int. Conf. Shock & Impact Loads on Structures, Beijing, s. 387-394, 2007.
4. Mańko Z., Mordak A.: Stan awaryjny i naprawa uszkodzonej kładki dla pieszych po uderzeniu koparką, XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 23-26 maja 2007.
5. Qiao P., Yang M., Mosallam A.: Impact analysis of I-Lam sandwich system for over-height collision protection of highway bridges, Engineering Structures 26 (2004), s. 1003-1012.
6. Radomski W.: Dynamiczne przyczyny awarii mostów, XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 23-26 maja 2007.
7. Yang M., Qiao P., McLean D., Khaleghi B.: Effects of overheight truck impacts on intermediate diaphragms in prestressed concrete bridge girders, PCI Journal, s. 58-79, Vol. 55, 2010.
8. Żółtowski K., Szafranski M.: Uszkodzenie wiaduktu kolejowego nad drogą krajową nr 7. Analiza nośności i sposób naprawy, XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 26-29 maja 2009.