

BADANIA NIENISZCZĄCE MOSTU JAKO PODSTAWA DO OCENY JEGO STANU NA POTRZEBY REALIZACJI PRZEJAZDU PONADNORMATYWNEGO

Andrzej KOZAKIEWICZ*, Mikołaj MIŚKIEWICZ*, Łukasz PYRZOWSKI*,
Bartosz SOBCZYK*
*) Politechnika Gdańska

Streszczenie

Zagadnieniami związanymi z analizą możliwości realizacji przejazdów ponadnormatywnych przez obiekty mostowe zajmują się zespoły inżynierskie i naukowe na całym świecie. Wiele z analiz udaje się wykonać przy użyciu standardowych i typowych metod. Jest jednak grupa obiektów, dla których wymagane jest podejście indywidualne. Dla nich dopiero zaprojektowanie i zrealizowanie indywidualnie dobranego planu badawczego jest jedyną możliwością oceny czy przejazd ponadnormatywny o zdefiniowanych parametrach nie spowoduje awarii obiektu. W referacie przedstawiono metodykę postępowania, w wyniku którego możliwe było zezwolenie na przejazd transportu ponadnormatywnego o masie ponad 300 t po żelbetowym dwuprzęsłowym moście, którego nośność określono na 30 t. W celu oceny nośności mostu przeprowadzono szczegółowe oględziny, inwentaryzację, badania w trakcie próbnego obciążenia, polowe i laboratoryjne badania betonu, lokalizację i inwentaryzację zbrojenia oraz obliczenia statyczno-wytrzymałościowe. Co istotne, most poddano badaniom podczas przejazdu, dzięki którym możliwa była eksperymentalna ocena pracy konstrukcji oraz zgodności deklaracji przewoźnika względem rzeczywistej masy transportu ponadnormatywnego.

Słowa kluczowe: most żelbetowy, transport ponadnormatywny, MES, GPR, próbne obciążenie

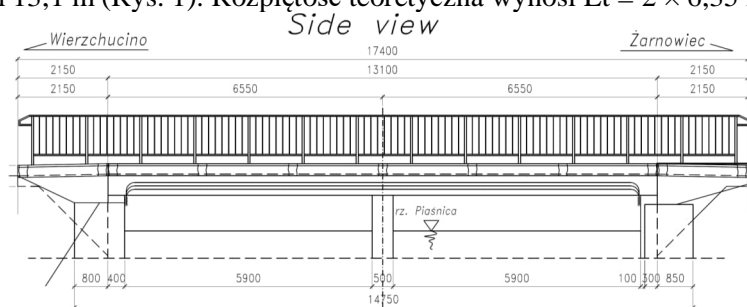
1. WPROWADZENIE

Jednym z problemów badawczych związanych ze zrównoważonym rozwojem, z którym muszą się mierzyć zespoły inżynierskie i naukowe na całym świecie, są przejazdy ponadnormatywne przez mosty. Wiele z nich jest kilka, a czasem nawet kilkudziesięciokrotnie cięższych od szacowanej nośności użytkowej mostu, po którym zamierzają przejechać. W przypadku, gdy dostępna jest dokumentacja archiwalna obiektu ocena możliwości udzielenia pozwolenia na transport ponadnormatywny często ogranicza się do obliczenia odpowiedzi konstrukcji tylko pod nowym, nadzwyczajnym schematem obciążenia. Niestety zwłaszcza w

przypadku starych mostów oraz tych zlokalizowanych w ciągu dróg mniejszej kategorii dokumentacja archiwalna często nie zachowała się. W takim przypadku zatwierdzenie przejazdu pojazdu o dużej masie jest dość skomplikowane. Standardowe metody obliczeniowe i diagnostyczne stosowane przez inżynierów nie są tu wystarczające. W tym przypadku wydanie zezwolenia na przejazd wymaga kompleksowej analizy mostu. Zagadnienie to jest niezwykle ważne, ale dość rzadko podejmowane przez badaczy [1]-[5]. Dlatego celem pracy jest przedstawienie reprezentatywnej metodyki oceny nośności mostu umożliwiającej przejazd pojazdu ponadnormatywnego. Przedstawione studium przypadku umożliwiło najszybsze dostarczenie nowego generatora do elektrowni.

2. OPIS MOSTU

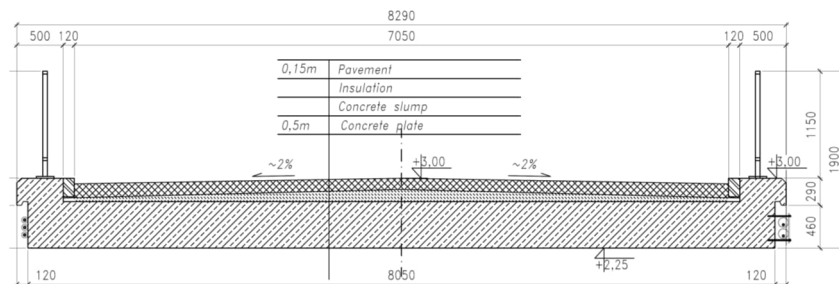
Most stanowi przeprawę drogową nad rzeką Piaśnica w województwie pomorskim w Polsce. Most to dwuprzęsłowa ciągła płyta żelbetowa o całkowitej długości 13,1 m (Rys. 1). Rozpiętość teoretyczna wynosi $L_t = 2 \times 6,35$ m.



Rys. 1. Widok z boku

Płyta jest oparta na płask na żelbetowych przyczółkach oraz filarze, którego szerokość wynosi 0,5 m. Grubość płyty wynosi 0,5 m. Na niej znajduje się nadbeton o zmiennej wysokości, izolacja oraz warstwy nawierzchni grubości około 0,15 m. Całkowita szerokość mostu wynosi 8,29 m, a szerokość użytkową jezdni określa się na 7,05 m. Na krawędziach konstrukcji zastosowano poręcze stalowe. Sposób posadowienia przyczółków i filara jest nieznan.

Archiwalna dokumentacja obiektu nie była dostępna. Jednak rok jego budowy szacowano na lata siedemdziesiąte dwudziestego wieku. W dostępnych protokołach z przeglądów okresowych, nośność obiektu określono na 30 ton (300 kN) wg [1]. Brakowało jednak jakichkolwiek danych o wykonanych obliczeniach. Z tego względu stan i nośność mostu należało określić na podstawie szczegółowych oględzin, próbnego obciążenia oraz badań.



Rys. 2. Przekrój poprzeczny

3. PRZEGLĄD SZCZEGÓŁOWY

Szczegółowy przegląd mostu nie wykazał występowania pęknięć, zarysowań czy rozwarstwień, które mogłyby świadczyć o znacznym spadku nośności czy przeciążeniu mostu. Zarejestrowano jednak na spodzie płyty betonowej liczne ubytki betonu, wykwyty i korozję zbrojenia (Rys. 3).



Rys. 3. Spód płyty pomostu

Ewidentnie uszkodzenia te były spowodowane nieszczelnością izolacji. W odniesieniu do podpór jako najistotniejsze uszkodzenia zidentyfikowano pęknięcie skrzydła przyczółka oraz jego podmywanie przez wody opadowe.

4. PRÓBNE OBCIĄŻENIE

Badania miały na celu sprawdzenie zachowania się mostu pod schematami obciążenia wywołującymi w poszczególnych elementach konstrukcji (przęsło, filar, przyczółek) stan odpowiadający zadeklarowanej nośności obiektu. Zgodna z przewidywaniami teoretycznymi odpowiedź konstrukcji w zakresie sprężystym miała umożliwić podjęcie dalszych prac diagnostycznych związanych z



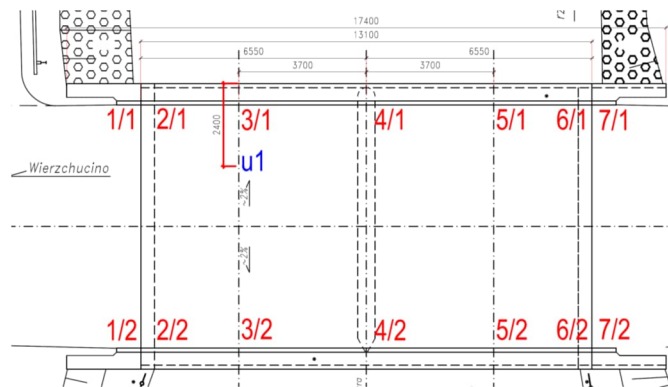
dopuszczeniem i określeniem warunków na jednokrotny przejazd pojazdu nienormatywnego o deklarowanej masie całkowitej wynoszącej 300 t. Badania poprzedzono zgrubną analizą statyczną mostu w odniesieniu do normy [1].

Próbne obciążenie przeprowadzono przy wykorzystaniu 2 samochodów 3-osiowych o masie 33 t każdy oraz 2 samochodów 4-osiowych o masie 40 t każdy. Zachowanie konstrukcji mostu sprawdzano poprzez wykonanie 5 ustawień statycznych wywołujących normowe wartości reakcji na podporach oraz momentu zginającego w przęśle i nad podporą. Przykładowy schemat ustawienia pojazdów przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Przekładowe ustawienia obciążenia próbnego: góra - wywołujące minimalny moment zginający nad podporą pośrednią, dół - wywołujące maksymalny moment zginający przęsłowy

Podczas badań wykonywano pomiary przemieszczeń przy użyciu niwelatorów precyzyjnych i czujników indukcyjnych (Rys. 5) oraz odkształceń przy użyciu ekstensometrów strunowych.



Rys. 5. Lokalizacja punktów pomiarowych

Pomierzone ekstremalne wartości przemieszczeń oraz odkształceń przęsła podczas prób statycznych były mniejsze od wartości teoretycznych (Tabela 1).

Tabela 1. Przemieszczenia pionowe w środku rozpiętości przęsła

Punkt pomiarowy	Wart. pomierzona (M) [mm]	Wart. obliczona (C) [mm]	M/C [%]
5/2	0,60	0,74	81
5/1	0,40	0,45	89

Pomiary osiadania podpór w trakcie realizacji próbnych obciążeń nie wykazały występowania znacznych trwałych przemieszczeń. Oględziny konstrukcji nie wykazały pojawienia się nowych uszkodzeń, które mogłyby być wynikiem próbnego obciążenia. Wyniki badań statycznych potwierdziły zgodną z założeniami pracę mostu w zakresie sprężystym. Analiza eksperymentalna potwierdziła zdolność do przenoszenia przez obiekt obciążeń do 30 t.

5. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW MATERIAŁU

Przeprowadzone badania polowe miały na celu zbadanie jakości betonu i stwierdzenie ewentualnego występowania procesów degradacyjnych oraz określenie ilości i rozmieszczenia zbrojenia w dźwigarach. Zakres wykonanych prac obejmował badania chemiczne, określenie wytrzymałości betonu, sprawdzenie średnicy i rozstawu prętów zbrojeniowych płyty.

5.1. Badania chemiczne

Badania chemiczne miały na celu sprawdzenie wartości pH oraz zawartości i poziomu jonów Cl^- i SO_4^{2-} w betonie. Najmniejsza wartość pH wyniosła 10,7. Zaobserwowane zjawisko świadczy o nieznacznej karbonizacji, która wraz z upływem czasu może być przyczyną utraty ochrony betonu przed postępowaniem procesów korozji. Zawartość jonów Cl^- oraz SO_4^{2-} nie przekroczyła wartości granicznych powodujących korozję betonu i stali.

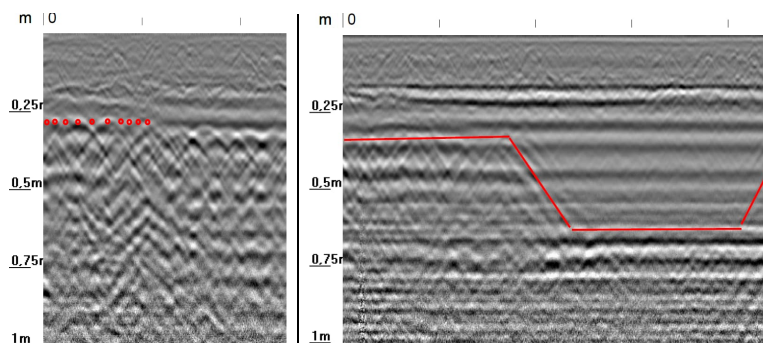
5.2. Wytrzymałość betonu

Z płyty w rejonie przyczółków wykonano 2 odwierty rdzeniowe o średnicy 100 mm. Umożliwiły one przygotowanie walcowych próbek do badań wytrzymałości betonu na ściskanie. Wytrzymałość gwarantowana wyniosła 23 MPa, a do obliczeń przyjęto $f_c=12,8$ MPa. Badania sklerometryczne potwierdziły, że beton płyty jest jednorodny.

5.3. Zbrojenie

W celu określenia stopnia zbrojenia płyty nośnej przeprowadzono nieniszczące badania połowe w postaci identyfikacji widocznego zbrojenia u dołu płyty (Rys. 3) oraz skanowania płyty od góry z wykorzystaniem techniki georadarowej. Oględziny wykazały, że płyta w przęśle zbrojona jest prętami gładkimi $\text{Ø}20$ w rozstawie 10 cm. Przyjęto, że stal z której wykonano zbrojenie płyty odpowiada właściwościami stali klasy A0 ($f_d=190$ MPa).

W celu określenia ilości zbrojenia nad podporą wykorzystano metodę GPR. Opiera się ona na zasadzie rozpraszania fal elektromagnetycznych (EM) i pozwala na lokalizację obiektów zanurzonych wewnątrz jednolitego ośrodka. Nadajnik georadaru wysyła pojedyncze, impulsy fal elektromagnetycznych ($t \leq 1$ ns), które odbite są odbierane przez odbiornik. Odbicie fali elektromagnetycznej wskazuje na zmianę w analizowanym ośrodku, co z kolei w przypadku konstrukcji żelbetowej pozwala na lokalizację zbrojenia. W celu zbadania płyty od góry wykonano w sumie 10 skanów, co pozwoliło na odzwierciedlenie układu prętów zbrojeniowych nad filarem. Wyniki wskazały, że co drugi pręt występujący na dole w przęśle jest odginany w górę nad podporą oraz występują dodatkowe pręty (Rys. 6).



Rys. 6. Skany GPR płyty mostu w poprzek jedni nad filarem (z lewej) oraz wzdłuż jedni przy krawężniku (z prawej). Na czerwono zaznaczono układ prętów zbrojenia głównego

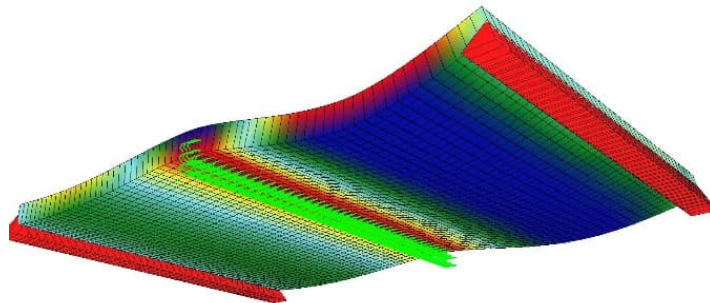
W wyniku wykonanych badań określono zbrojenie nad podporą górą jako $\varnothing 20$ w rozstawie 10 cm.

6. ANALIZA STATYCZNO-WYTRZYMAŁOŚCIOWA

Analiza statyczno-wytrzymałościowa miała na celu stwierdzenie czy przy aktualnym stanie konstrukcji jest możliwość bezpiecznego przejazdu przez obiekt pojazdem ponadnormatywnym. Wykonano obliczenia statyczne uwzględniając aktualny stan obiektu w zakresie liniowym i nieliniowym z uwzględnieniem charakterystyk pracy materiałów konstrukcyjnych, z których wykonano ustroj nośny obiektu oraz przeprowadzono wymiarowanie zgodnie z [8].

6.1. Symulacje numeryczne

Obliczenia przeprowadzono metodą elementów skończonych (MES) na podstawie danych uzyskanych z przeprowadzonej inwentaryzacji oraz badań obiektu. Płytę pomostu opisano na siatce 2747 węzłów i modelowano elementami powłokowymi. W celu uwzględnienia rzeczywistej pracy ustroju na podporze środkowej zastosowano elementy sprężyste.



Rys. 7. Wizualizacje deformacji zastosowanego do obliczeń modelu MES

Do budowy wykorzystano 2 – wymiarowe, 4 – węzłowe powłokowe elementy skończone typu Timoszenko – Reissnera. Są to elementy klasy C^0 o dwuliniowych funkcjach kształtu ze wzbogaceniem stanu deformacji w powierzchni eliminującym efekt blokady. Uwzględniają one efekt ścinania oraz zróżnicowanie położenia powierzchni odniesienia powłoki (mimośród). W obliczeniach uwzględniono obciążenia stałe, ruchome zgodne z [1], schematy obciążeń próbnych oraz zestaw ponadnormatywny. Zestaw składał się z ciągnika FAUN (8x8) i naczepy COMETTO-1M o masie całkowitej 300 t i naciskach na osie od 6 t do 19,45 t (Rys. 8).

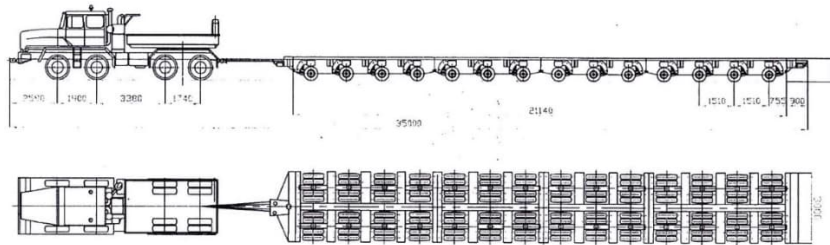
W zastosowanych schematach obciążeń założono, że przejazd pojazdu ponadnormatywnego będzie odbywał się środkiem jezdni z prędkością maksymalną 10 km/h. Ponadto przyjęto, że jednocześnie z zestawem na obiekcie nie będzie się znajdowało żadne inne obciążenie. Uwzględniono fakt rozkładu nacisku od kół na powierzchnię dodatkowo powiększoną o warstwy nawierzchni. Pominięto wpływ ew. współpracy nadbetonu z płytą nośną.

W celu wydania pozytywnej opinii o możliwości realizacji przejazdu ponadnormatywnego przyjęto, że siły wewnętrzne/naprężenia/reakcje podporowe/przemieszczenia dla obciążenia pojazdem ponadnormatywnym powinny być mniejsze od tych samych wielkości wywołanych obciążeniami normowymi normowego i/lub najniekorzystniejszym schematem obciążenia próbnego.

Niezależnie od przeprowadzonego wymiarowania wykonano analizy obliczeniowe z uwzględnieniem nieliniowej pracy materiałów

6.2. Wyniki

Jako wynik przeprowadzonych w zakresie liniowym analiz MES w reprezentatywnych przekrojach konstrukcji (środek rozpiętości przęsła, filar, przyczółki) zestawiono ekstremalne siły wewnętrzne (momenty zginające, siły tnące), wypadkowe reakcje podporowe oraz naprężenia.



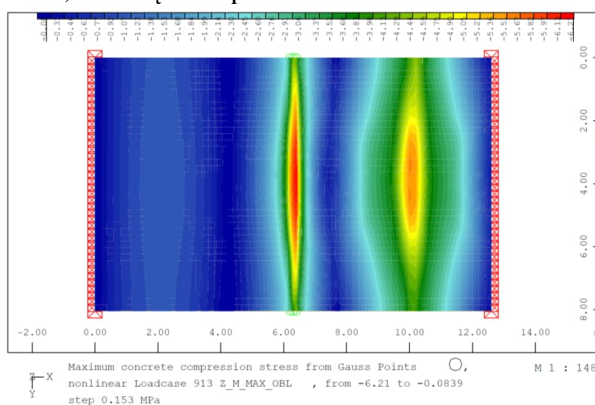
Rys. 8. Schemat zestawu ponadnormatywnego

Tabela 2. Naprężenia w płycie pomostu w środku jej rozpiętości

Przypadek obc.	σ_s (S) [MPa]	σ_c (C) [MPa]	S/ f_d [%]	C/ f_c [%]
Cw.+stałe+normowe	121	-5,9	64	46
Cw+stałe+próbne	96	-4,6	50	36
Cw+stałe+ponadnormatywne	103	-5,0	54	39

Reprezentatywne mapy naprężeń wyznaczonych w wyniku obliczeń nieliniowych dla przejazdu pojazdu ponadnormatywnego przedstawiono na Rys. 9.

Wyniki obliczeń statycznych wykazały, że wszystkie siły wewnętrzne w moście podczas realizacji przejazdu ponadnormatywnego będą mniejsze od wartości generowanych przez obciążenie normowe czy obciążenie próbne. Wyjątkiem były wyłącznie przekroczenia wartości ekstremalnych reakcji na filarze. Obliczenia wykazały, że podczas przejazdu ponadnormatywnego ekstremalna wartość reakcji wyniesie 2586 kN, podczas gdy obciążenie normowe spowoduje 2326 kN, a obciążenie próbne 2269 kN.



Rys. 9. Mapa naprężeń w płycie pomostu podczas przejazdu pojazdu ponadnormatywnego

7. PRZEJAZD PONADNORMATYWNY

7.1. Decyzja

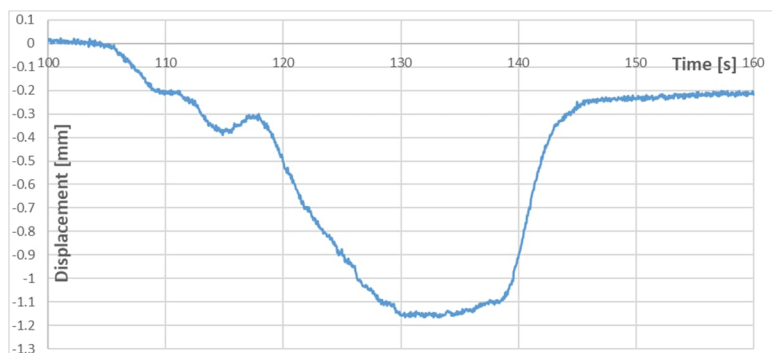
Ostatecznie po przeprowadzeniu kompletu prac diagnostycznych wydano zgodę na realizację przejazdu po spełnieniu kilku warunków. Po pierwsze zalecono, że przejazd musi być pilotowany, odbywać się środkiem jezdni i jego prędkość nie może przekroczyć 10 km/h. Po drugie zalecono kontrolę geometrii i nacisków na osie zestawu transportowego. Po trzecie należało usunąć z mostu wszelkie przeszkody, które mogłyby powodować pojawienie się efektów dynamicznych. Po czwarte z uwagi na stan obiektu zalecono wykonanie przeglądów szczegółowych bezpośrednio przed przejazdem oraz po jego zakończeniu. Po piąte w związku z faktem przekroczenia o 11% ekstremalnej reakcji i brakiem danych dotyczących posadowienia zalecono wykonać monitoring mostu i podpór podczas przejazdu. Pojazd ponadnormatywny przedstawiono na Rys. 10.



Rys. 10. Pojazd ponadnormatywny przed wjazdem na most

7.2. Monitoring konstrukcji

Zgodnie z zaleceniami podczas realizacji przejazdu wykonywano badania mostu. Wykonywano pomiary osiadania podpór oraz monitoringu technicznego przemieszczenia przęsła. Pomiary osiadania wykazały wystąpienie osiadania podpór rzędu 0,2 mm. Ekstremalna całkowita wartość przemieszczenia pionowego przęsła wyniosła 1,16 mm, a wartość ugięć sprężystych 0,96 mm. Zarejestrowany przebieg deformacji (Rys. 11) potwierdził, że przejazd realizowano zgodnie z założeniami dotyczącymi minimalizacji jakichkolwiek efektów dynamicznych.



Rys. 11. Wykres zmiany przemieszczeń w punkcie u2 podczas realizacji przejazdu

Zarejestrowane wartości przemieszczeń były większe o około 25% niż uzyskane w wyniku symulacji numerycznych. Fakt, iż model obliczeniowy po realizacji próbnego obciążenia został zwalidowany umożliwia wyciągnięcie wniosku, iż ciężar pojazdu, naciski na osie i tym samym oddziaływanie na most mogło być nawet o 25% większe od zadeklarowanego przez wnioskującego o dopuszczenie obiektu do realizacji przejazdu. Na szczęście konstrukcja i wykorzystane do jej budowy materiały posiadały jeszcze dodatkowe zapasy nośności. Wykonane przeglądy nie wykazały pojawienia się na obiekcie nowych uszkodzeń powstałych na skutek zrealizowanego przejazdu. Ponadto wyniki badań potwierdziły prawidłową, tj. w zakresie sprężystym, pracę obiektu podczas zrealizowanego przejazdu ponadnormatywnego.

8. WNIOSKI

Artykuł w zwięzły sposób przedstawia zakres prac, które były wymagane do dopuszczenia przejazdu ponadnormatywnego o deklarowanej masie 300 t po ponad 40 letnim moście. Stan konstrukcji określono jako wystarczający do realizacji przejazdu. Niestety wykonane badania wskazały, że rzeczywiste oddziaływanie transportu na obiekt mogło być nawet o 25% większe niż przewidywane. Wyniki wskazują na możliwe nieprawidłowości w ocenie masy ładunku transportowanego zestawem ponadnormatywnym. Wydaje się, że w przypadku analogicznych niezwykle ryzykownych przejazdów słusznym byłoby wykonanie pomiarów nacisków na osie zestawu przed dopuszczeniem ich do ruchu. W tym przypadku udało się dostarczyć nowy transformator do elektrowni i zapewnić lokalnym odbiorcom dostęp do energii elektrycznej. Jednak analizując wyniki badań można wyciągnąć wniosek, że most bliski był osiągnięcia swojej nośności granicznej. Prawdopodobnie nie doszło do takiej sytuacji z uwagi na większą niż przyjęto w obliczeniach wytrzymałość materiałów.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Abedin M, Mehrabi A. B., Azizinamini A., Ghosn M, Nowak A.S., Ramesh Babu A.: *Reliability evaluation of twin steel box girder bridges using a simplified method*, Engineering Structures, 259, 2022, 114122
- [2] Ho Choi H., Kwon Lim J., Won Seo J., and Ki Jung P.: *An Overweight Permit Analysis System for Bridge Management*, KSCE Journal of Civil Engineering, 10 (2), 2006, 123-129
- [3] Huang P., Wang J., Han W., and Yuan Y.: *Study on impact factors of small- and medium-span bridges under the special-purpose vehicle load*, Structures, 43, 2022, 606-620
- [4] Sofi F. A. and Steelman J.A.: *Using committees of artificial neural networks with finite element modelling for steel girder bridge load rating estimation*, Structures, 33, 2021, 533-553.
- [5] Zhu Z., Xiang Z., Lic J., Huang Y., and Ruan S.: *Fatigue behavior of orthotropic bridge decks with two types of cutout geometry based on field monitoring and FEM analysis*, Engineering Structures, 209, 2020 109926.
- [6] Siwowski T., Folta L., Kulpa M., Piątek B.: *Logistyka transportu samochodowego elementów tarczy TBM – aspekty mostowe*, Mosty, 1, 2023, 32-38.
- [7] PN-85/S-10030 Obiekty mostowe. Obciążenia
- [8] PN-91/S-10042 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Projektowanie.

NON-DESTRUCTIVE TESTING AS A BASIS FOR ASSESSING BRIDGE CONDITION FOR THE PURPOSE OF CARRYING OUT THE OVERWEIGHT TRANSPORT

Summary

The article presents the scope of activities that enabled the passage of an oversized vehicle with a total weight of over 300 tons over a beam, reinforced concrete bridge with a load capacity of 30 tons. In order to assess the load capacity of the bridge, detailed visual inspection, inventory, tests during a load test, field and laboratory tests of concrete, location and inventory of reinforcement, static and strength calculations were carried out. Unfortunately, the tests carried out during the passage of an oversize vehicle on the bridge showed that the actual weight of the set were greater than originally declared. Fortunately, it turned out that there were still some reserves in the structure load-bearing capacity and the over-weighted vehicle entered the bridge without any damage to its structure.