



PETER KOTEŠ¹⁾
 MIROSLAV BRODŇAN²⁾
 MILAN CHANDOGA³⁾
 TATIANA BACÍKOVÁ⁴⁾
 WOJCIECH KUBISSA⁵⁾

THE ZLATNÉ BRIDGE - CONDITION SURVEY, TEMPORARY REMEDIAL WORKS REQUIRED DUE TO DANGEROUS CONDITION AND BRIDGE RESTORATION PROJECT

MOST „ZLATNÉ” - DIAGNOSTYKA, ROZWIĄZANIE DORAŻNE W CELU USUNIĘCIA STANU AWARYJNEGO ORAZ REMONT OBIEKTU

STRESZCZENIE. Obiekty mostowe projektowane są na okres użytkowania określony w normach obowiązujących w czasie opracowywania projektu. Eurokody określają dla nowo projektowanych obiektów okres użytkowania wynoszący 100 lat w porównaniu do zaledwie 80 lat według poprzednio obowiązujących norm słowackich. Tym samym obiekty mostowe z betonu sprężonego pierwszej generacji, które powstawały na terenie obecnej Słowacji (wówczas Czechosłowacji) w latach 50. ubiegłego wieku zbliżają się już końca ich zakładanego okresu użytkowania. Dziś wiele z tych mostów ze względu na zaniedbania konserwacyjne jest w niezadowalającym stanie technicznym. Przedmiotem niniejszego artykułu jest diagnostyka mostu na drodze nr I/18 w rejonie "Zlatné" wsi Strečno oraz projekt doraźnego usunięcia stanu awaryjnego konstrukcji. Opisano również projekt remontu obiektu.

ABSTRACT. Bridges are and have been designed on lifetime basis, as given in standards applicable at the time of design. The design lifetime for newly designed bridges as given in Eurocodes is 100 years and according to the old Slovak standard it was 80 years only. The first generation of prestressed concrete bridges have been used in Slovakia (formerly part of Czechoslovakia) starting from 1950s, and thus, according to old standards, they approach the end of their design lifetime. Nowadays, due to insufficient maintenance, many of them are in unsatisfactory condition. This paper focuses on the condition survey of the bridge on the road No. I/18 - in the part "Zlatné" of village Strečno and on the design of immediate remedial works which were necessary due to its potentially dangerous condition. Moreover, the design of restoration is also described.

SŁOWA KLUCZOWE: beton, diagnostyka, monitoring (bieżąca obserwacja) obiektów mostowych, most, remont, sprężanie, stan awaryjny.

KEYWORDS: bridge, concrete, condition survey, dangerous condition, monitoring, prestressing, restoration.

DOI: 10.7409/rabdim.017.012

¹⁾ University of Žilina, Civil Engineering Faculty, 8215/1 Univerzitná Street, 010 26 Žilina; kotes@fstav.uniza.sk

²⁾ University of Žilina, Civil Engineering Faculty, 8215/1 Univerzitná Street, 010 26 Žilina; brodnan@fstav.uniza.sk (✉)

³⁾ Projstar-PK Ltd., 1 Nad ostrovom Street, 841 04 Bratislava; milan.chandoga@stonline.sk

⁴⁾ Valbek Ltd., 11 Kutuzovova Street, 831 03 Bratislava; bacikova@valbek.sk

⁵⁾ Warsaw University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Mechanics and Petrochemistry, 17 Łukasiewicza Street, 09-400 Płock; wkubissa@pw.plock.pl

1. WPROWADZENIE

Odcinek drogi krajowej nr I/18 między miejscowościami Žyľina i Martin należy do najbardziej ruchliwych odcinków słowackiej sieci drogowej. Średnie dobowe natężenie ruchu na tym odcinku przekracza 29 tys. pojazdów, z czego 7,5 tys. to pojazdy ciężarowe [1]. Niektóre obiekty mostowe na tym odcinku powstały w latach 60-tych ubiegłego wieku. Biorąc pod uwagę wiek konstrukcji (przynajmniej 50 lat), zaniedbania konserwacyjne oraz obciążenia środowiskowe, spodziewać można się znaczącego pogorszenia stanu technicznego na poziomie zagrażającym przydatności użytkowej obiektu. „Zlatné” jest jednym z takich zdegradowanych mostów. Przedmiotem artykułu jest diagnostyka, naprawy doraźne oraz kompleksowy remont mostu na drodze nr I/18 w rejonie „Zlatné” wsi Strečno. Problem awarii i napraw obiektów mostowych był przedmiotem licznych publikacji autorów krajowych i zagranicznych [2, 3]. Wśród przyczyn awarii zwraca się uwagę na czynniki zewnętrzne i pogorszenie parametrów materiałów [4-6] oraz obciążenia komunikacyjne [7]. W projektowaniu wykorzystuje się podejście probabilistyczne [4, 8] oraz podejście oparte na analizie parametrów eksploatacyjnych w cyklu życia obiektu [5, 9, 10].

Podstawą opracowania doraźnego usunięcia stanu awaryjnego mostu na drodze krajowej nr I/18 w rejonie Zlatné wsi Strečno było zlecenie słowackiej administracji drogowej SRA [11]. Stan awaryjny obiektu, który wymagał natychmiastowego usunięcia stwierdzono w styczniu 2012 roku. Odnotowano również pewne zdarzenia poprzedzające wystąpienie stanu awaryjnego. W wyniku podstawowego przeglądu przeprowadzonego w 2007 roku konstrukcja i ogólny stan techniczny uzyskały ocenę 4 oznaczającą stan zadowolający. W związku z powiększaniem się uszkodzeń nawierzchni asfaltowej obiektu w 2011 roku pracownicy SRA przeprowadzili przegląd sprawdzający. Wyniki przeglądu potwierdziły spodziewany rozwój odnotowanych poprzednio uszkodzeń pionowych splotów przy łożyskach wałkowych zwornika przegubowego pośrodku drugiego przęsła pomostu (rozwiązanie konstrukcyjne mostu oraz wyniki przeprowadzonej diagnostyki przedstawiono w punkcie 2). Z tego względu, autorzy niniejszego artykułu przeprowadzili diagnostykę i ponowne obliczenia konstrukcji obiektu [12]. Przedmiotem raportu końcowego była ocena aktualnego stanu obiektu oraz propozycja rozwiązania zwiększającego nośność i przydatność użytkową obiektu. Raport wskazał na niezadowolający stan obiektu w zakresie nośności oraz ogólnego rozwiązania konstrukcyjnego. Jednocześnie przedstawiono trzy warianty rozwiązania docelowego z całkowitą odbudową jako wariantem zalecanym. Na pod-

1. INTRODUCTION

The section between Žilina and Martin of the national road No. I/18 is one of the busiest road sections of the entire road network in Slovakia. The average daily traffic exceeds 29,000 vehicles, this number including 7,500 HGV's [1]. Some bridges on that section were built in the 1960s. Major deterioration can well be expected of them considering their age (about 50 years or more), maintenance backlog and environmental loads, this at the level that can lead to the loss of their functionality. The Zlatné bridge is one of such deteriorated bridges. This paper focuses on the condition survey, design of immediate measures and restoration of the bridge on the road No. I/18 located in the “Zlatné” part of the village Strečno. There are many experts in Slovakia and in other countries dealing with the problem of bridge failures and their repairs [2, 3]. The factors responsible for failures include environmental factors and deterioration of materials [4-6] as well as traffic loads [7]. The design is based on probabilistic approach [4, 8] and life-cycle performance of bridges [5, 9, 10].

The design of the temporary remedial works required due to the dangerous condition of the bridge located on the state road No. I/18, in “Zlatné” part of village Strečno was commissioned by the Slovak Road Administration office (SRA) [11]. The dangerous condition of the bridge, requiring immediate remedial works, was discovered in January 2012. However, certain events were predated to that state. In the main inspection performed in 2007 the bridge structure and the overall condition obtained the rating value of 4 - satisfactory. In the beginning of 2011, a follow-up inspection of bridge was performed by the SRA personnel due to expansion of the asphalt surface defects. The inspection confirmed the expected increase of the already recorded distress of the vertical strands located at the roller bearings of the hinge joint in the middle of the second span (the structural design of the bridge and the condition survey results are presented in 2). For this reason, the authors carried out a condition evaluation and structural calculations of the bridge structure [12]. The final report provided appraisal of the current state of the bridge, recommending measures to increase the load carrying capacity and service life of the bridge. The report declared unsatisfactory state of bridge in terms of load carrying capacity and the structural design. Three project options were proposed, including complete restoration as the recommended one. Based on report [12], in December 2011 the Slovak Ministry of Transport, Construction and

stawie raportu [12] w grudniu 2011 roku słowackie ministerstwo transportu, budownictwa i rozwoju regionalnego (MDVRR) zawarło umowę na opracowanie w 2012 roku projektu remontu mostu.

Tymczasem na początku stycznia 2012 roku przedstawiciele krajowej administracji drogowej (SRA) oraz miejscowych władz samorządowych stwierdzili powiększanie się uszkodzeń nawierzchni nad zwornikiem oraz widoczne zwiększenie zakresu przemieszczeń konstrukcji (zarówno w płaszczyźnie poziomej jak i pionowej). Niezwłocznie zorganizowano spotkanie ekspertów. W wyniku spotkania opracowano raport stwierdzający wystąpienie stanu awaryjnego oraz potrzebę wprowadzenia doraźnych rozwiązań [13]. Wskazano na konieczność natychmiastowego zastosowania środków administracyjnych i technicznych, które powstrzymają dalszy rozwój uszkodzeń, jak również całkowitego wyłączenia obiektu z eksploatacji.

2. DIAGNOSTYKA I ROZWIĄZANIE KONSTRUKCYJNE OBIEKTU

Z punktu widzenia analizy statycznej most jest konstrukcją ramową o trzech przęsłach o długościach 42,0 + 64,0 + 42,0 m z przegubem pośrodku drugiego przęsła. Ustrój nośny stanowi konstrukcja ramowa złożona ze sprężonych dźwigarów skrzynkowych opartych na żelbetowych podporach – przyczółkach i filarach. Podpory połączone są z pomostem oraz blokami fundamentowymi (Rys. 1 i 2). Analizę numeryczną przeprowadzono przy wykorzystaniu programu Scia Engineer. W analizie przyjęto model elementu niejednorodnego. Przekroje zamodelowano jako dźwigary skrzynkowe ze skosami. Zwornik pośrodku drugiego przęsła zamodelowano jako węzeł przegubowy.

Metoda wspornikowa, która została wykorzystana w budowie mostu była wówczas technologią relatywnie nową. Cechą charakterystyczną tej technologii jest przesuw wzdłużny ustroju możliwy dzięki umieszczeniu przegubu w zworniku przęsła z wykorzystaniem łożysk stalowych. Obie połowy przęsła sprężono cięgnami z drutów 4,5 mm (1 splot wykonany z 17 drutów o średnicy 4,5 mm). Takie rozwiązanie, choć miało racjonalne uzasadnienie na etapie opracowywania projektu (duże przemieszczenia wzdłużne wywołane rozszerzalnością oraz projekty zrealizowane w innych krajach) to okazało się prowadzić z czasem do awarii ustrojów nośnych i wyposażenia obiektów mostowych. W przypadku mostu „Zlatné” w okresie jego użytkowania nie usunięto przyczyny problemu ograniczając się do usuwania uszkodzeń będących konsekwencją tego rozwiązania.

Regional Development (MDVRR) executed a contract for the design services to be performed in 2012 in relation to the bridge restoration project.

However, in the beginning of January 2012 the representatives of SRA and Žilina self-governing region observed an expansion of the pavement distress over the middle joint accompanied with a visible increase in the range of movement of the bridge components (in both horizontal and vertical planes). A meeting of experts was arranged immediately. The outcome of that meeting was a report on the dangerous condition of the bridge stating the necessity of immediate measures to be implemented [13]. According to the observed dangerous condition, immediate implementation of both administrative and physical measures was recommended to prevent further deterioration accompanied with immediate closing of the bridge.

2. CONDITION SURVEY AND THE STRUCTURAL SYSTEM OF THE BRIDGE

From the point of view of static analysis the bridge is a frame structure with three spans of 42.0 + 64.0 + 42.0 m in length with a hinge located in the middle of the second span. The superstructure consists of a prestressed frame composed of a prestressed box girder and a reinforced concrete sub-structure comprising abutments and piers. Piers are fixed to the superstructure and to the foundation blocks (Figs. 1 and 2). A numerical analysis was done in the Scia Engineer program with the bridge represented by a non-uniform member model. The cross-sections were modelled as a box girder with haunches. The hinge represents the connection in the middle of the second span.

The cantilever method used to construct the bridge was a relatively new technology at that time. Its characteristic feature was accommodation of longitudinal movements by the hinge in the middle joint including steel bearings installed there. The two ends the bridge halves were prestressed with strands from 4.5 mm wires (1 strand made of 17 wires, diameter of 4.5 mm). Being a reasonable option at the time of design (large longitudinal expansion movements and successful implementation in other countries) over time this design was found to be a source of distress of the bridge superstructure and equipment. In the specific case of the Zlatné bridge instead of removing the cause of problems only the resulting defects were remediated during the lifetime of the structure.

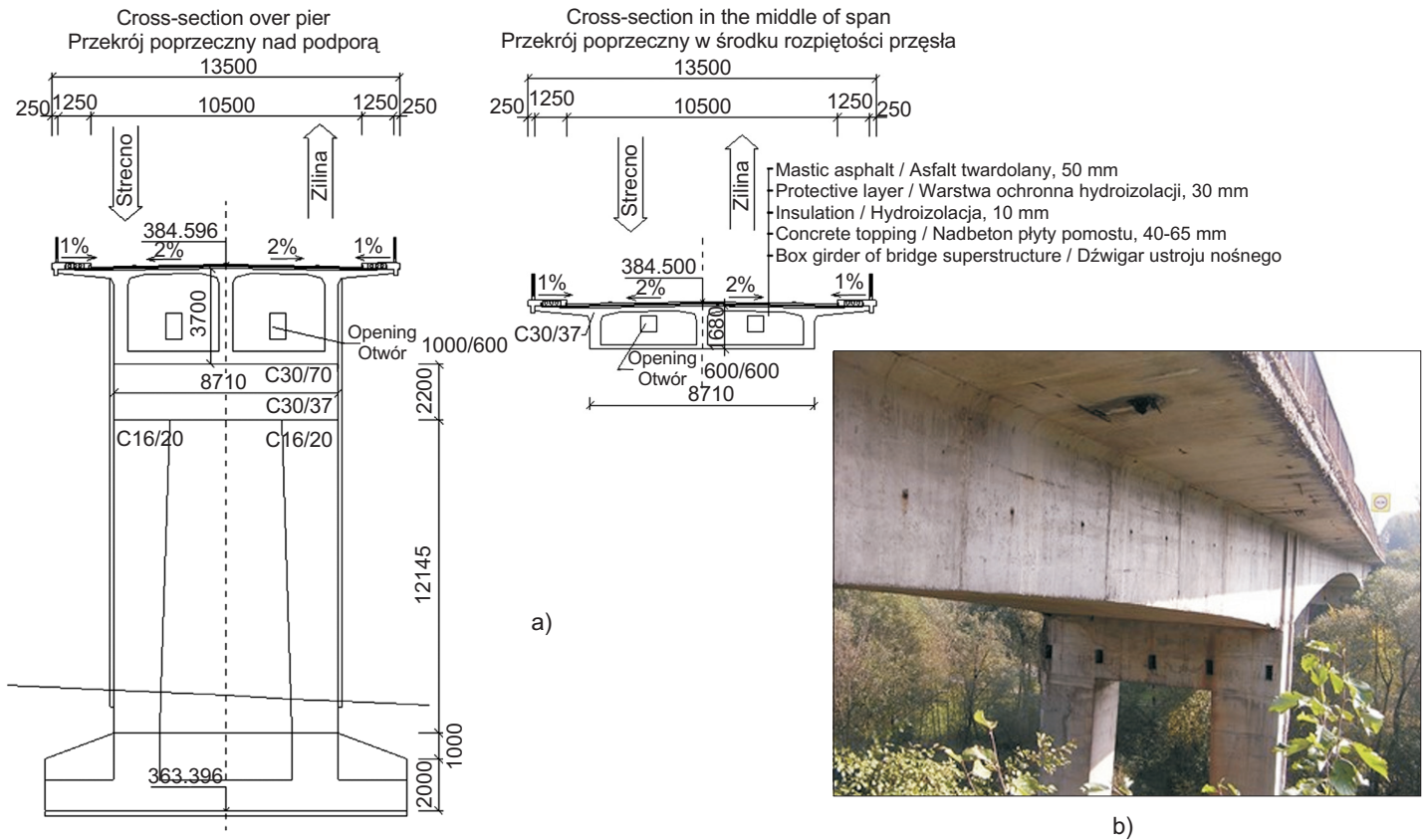


Fig. 1. The view of the bridge before the reconstruction: a) cross sections, b) view
Rys. 1. Widok mostu przed remontem: a) przekroje, b) widok

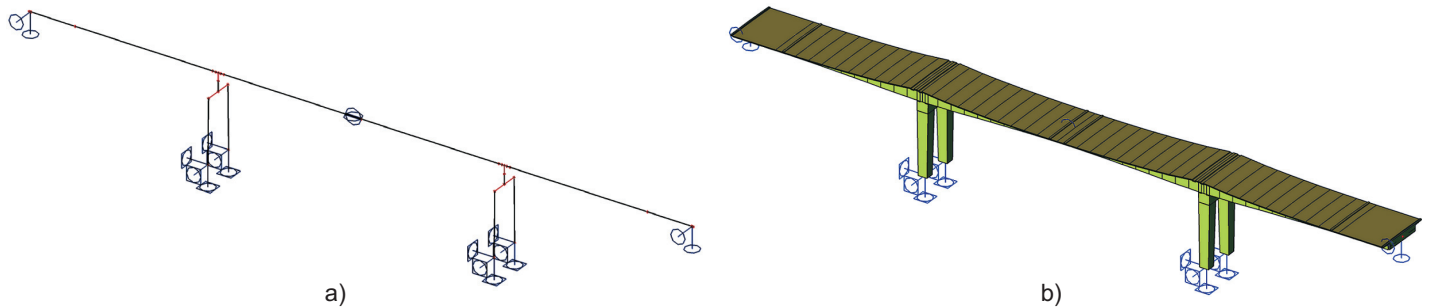


Fig. 2. Static scheme (a) and numerical model of the bridge (b)
Rys. 2. Schemat statyczny (a) i model numeryczny mostu (b)

Potwierdzono wykonanie ustroju nośnego z betonu klasy C 30/37, a podpór z betonu klasy C 16/20. Fundamenty wykonano z betonu C 12/15. Dźwigar skrzynkowy stanowiący ustrój nośny obiektu ma wysokość zmienną na długości – od 3,70 m nad podporami do 1,68 metra pośrodku przęsła i nad przyczółkami. Nad dźwigarami znajdują się paraboliczne ukosy. Charakterystykę materiałów ustalono i sprawdzono wyłącznie przy wykorzystaniu metod nieniszczących [14, 15]. Diagnostykę i oględziny przeprowadzili autorzy niniejszego artykułu. Wykonane oględziny pozwoliły

The concrete of superstructure was verified to be class C 30/37 and concrete of sub-structure was verified to be class C 16/20. The foundations were made from C 12/15 concrete. The superstructure is composed of box girder of variable height – from 3.70 m over piers to 1.68 m in the middle of the span and over abutments. Haunches are parabolic in shape. Only non-destructive methods were used for determining and verifying the material characteristics [14, 15]. The condition survey and the visual inspection were done by authors of this article. The visual inspection

ustalić sposób powstania uszkodzeń, ich lokalizację oraz intensywność. Wady i uszkodzenia podzielono na następujące grupy:

- wady związane z nieprawidłowym przyjęciem rozwiązań detali konstrukcji, np. przegubu pośrodku środkowego przęsła – trwałe wygięcie, itd.,
- wady konstrukcyjne dotyczące m.in. zakończeń hydroizolacji na krawędziach mostu, podpór ustroju nośnego, zastosowania niewystarczającej grubości otulenia zbrojenia, itd.,
- inne wady, takie jak projekt dylatacji itd.

Inspekcja potwierdziła uszkodzenia niektórych splotów sprężających w strefie łożysk wałkowych (środek drugiego przęsła) obejmujące głęboką korozję lub całkowite zniszczenie kanałów ciągnowych, uszkodzenie zaprawy wypełniającej, uszkodzenie (pęknięcie) 30% splotów, korozję drutów (splotów), pęknięcia poprzecznic usztywniającej, itd. Przeprowadzona analiza diagnostyczna potwierdziła, że głównym źródłem uszkodzeń jest przegub pośrodku drugiego przęsła (środkowego). Stwierdzono również trwałe wygięcie przęsła środkowego wywołane zmianami reologicznymi, które zaszły w betonie i cięgnach, a zanieczyszczenie strefy przegubu spowodowało zatrzymywanie wody i korozję splotów, zbrojenia i łożysk wałkowych i takie same były też skutki gromadzenia się wody nad podporami. Wygięcie ustroju nośnego (w strefie przegubu) spowodowało obniżenie komfortu jazdy na odcinku mostu (Rys. 3). Wyniki oględzin pozwoliły na ocenę ogólnego stanu obiektu zgodnie z instrukcją techniczną TP 9B/2005 [16] i zaliczenie go do klasy V oznaczającej stan niedostateczny.

carried out for the purpose of the bridge condition survey showed the origin, location and severity of the existing damages. The defects were classified into the following groups:

- damage caused by incorrect design of details, for example the hinge in the middle of the middle span - permanent deflection, etc.,
- structural failures, for example terminations of waterproofing on the bridge edges, support of superstructure, insufficient concrete cover, etc.,
- other failures, such as for example expansion joint design.

The inspection confirmed strand damage in the area of roller bearing (in the middle of the second span) - deep corrosion of ducts, complete failure of ducts, damaged grouting, failure (snap) of 30% of strands, corrosion of wires (strands), cracks in the transverse stiffener, etc. The evaluation of the condition survey results confirmed that the main source of damages was the hinge in the middle of the second (middle) span. Other defects included permanent deflection in the middle span due to rheological changes in concrete and in strands, accumulation of dirt which retained water causing corrosion of the strands, the reinforcement and the roller bearings (accumulation of water over piers caused defects of the same kind). The resulting permanent deflection of the superstructure (in the hinge area) resulted in decreased riding comfort over the bridge (Fig. 3). Based on the visual inspection results it was possible to evaluate the overall condition (state) of the bridge and according to TP 9B/2005 [16] the bridge obtained class V, that is “poor” rating.

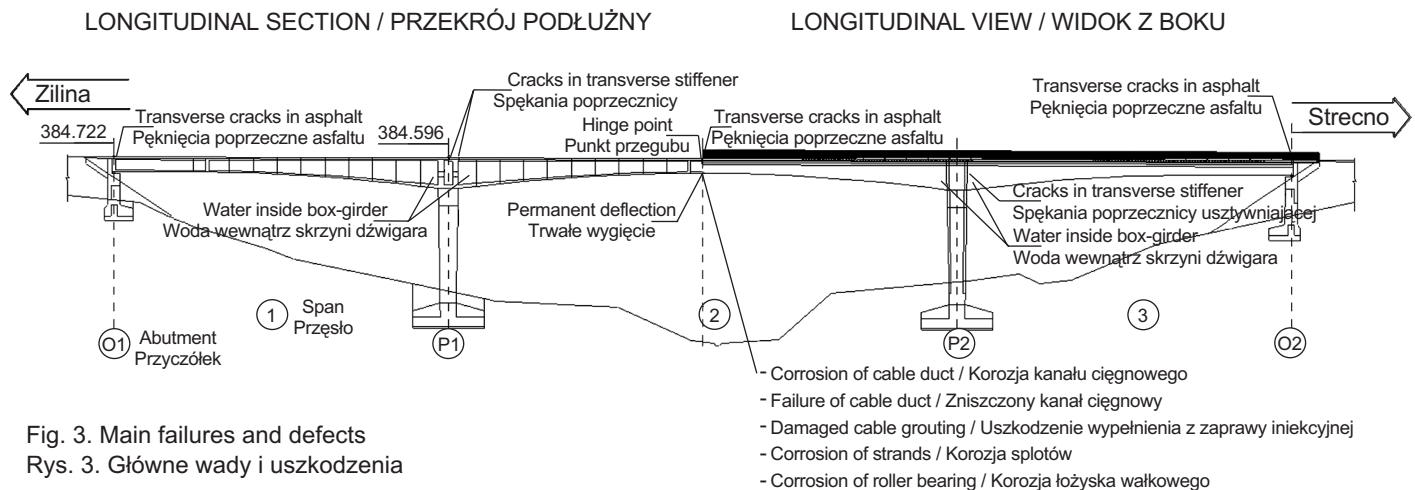


Fig. 3. Main failures and defects
Rys. 3. Główne wady i uszkodzenia

3. PRZYCZYNY STANU AWARYJNEGO I ŚRODKI DORAŻNE ICH USUNIĘCIA

Jak już wspomniano, na obiekcie rozwinęła się korozja splotów utwierdzających przegub w połowie drugiego przęsła. Korozja powstała wskutek obciążeń środowiskowych oraz niewystarczających nakładów na utrzymanie obiektu. Znaczna korozja splotów spowodowała stopniową redukcję ich przekroju poprzecznego prowadzącą do ich zerwania. Zerwanie około 3-4 splotów zostało stwierdzone już na etapie raportu [12] z przeglądu w październiku/listopadzie 2011 roku. W trakcie przeglądu specjalnego przeprowadzonego w styczniu 2012 r. [13] stwierdzono zwiększenie liczby zerwanych splotów (sześć z łącznie dwunastu, czyli co drugie). W lutym 2012 r. zerwanych było już 9, z łącznej liczby 12 splotów. Uszkodzenia te były przyczyną nadmiernych odkształceń oraz powstawania naprężeń dynamicznych w strefie przegubu pośrodku przęsła przy każdym przejeździe pojazdu o wadze przekraczającej 30-40 ton. Stan mostu został uznany za przedawaryjny, czyli warunkujący dalsze użytkowanie obiektu przy bezzwłocznym podjęciu działań naprawczych. Zmniejszenie liczby pracujących splotów przyniosło zmianę pracy konstrukcji mostu w stosunku do wynikającej z projektu i oceny stanu technicznego obiektu oraz pracy w okresie wieloletniej eksploatacji. Zaproponowano natychmiastowe zastosowanie następujących środków o charakterze administracyjnym:

- zmniejszenie obciążeń zmiennych oddziałujących na most przez zamknięcie jednego pasa i przekierowanie ruchu poza most,
- wprowadzenie podczas przejazdu przez most ograniczenia prędkości jazdy do 30 km/godz.

Jako doraźne rozwiązanie techniczne zaproponowano wymianę skorodowanych i zerwanych splotów z drutów ϕ 4,5 mm. Zastosowano ciągną jednosplotowe (Monostrand) z zabezpieczeniem antykorozyjnym. Biorąc pod uwagę oczekiwaną w niedalekiej przyszłości odbudowę obiektu, która powinna wyeliminować podstawową przyczynę uszkodzeń (przegub pośrodku drugiego przęsła) zaprojektowano rozwiązanie doraźne na okres około 2 lat, do momentu rozpoczęcia remontu mostu.

4. ROZWIĄZANIE DORAŻNE W CELU USUNIĘCIA STANU AWARYJNEGO

4.1. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA PROJEKTU KABLI SPRĘŻAJĄCYCH

Zerwanie oryginalnych kabli spowodowało odciążenie wsporników w płaszczyźnie pionowej, skutkujące powsta-

3. CAUSES OF DANGEROUS CONDITION AND TEMPORARY MEASURES

As it was previously mentioned, corrosion of prestressed strands which secured the position of the hinge in the middle of the second span has developed over time. This corrosion was caused by environmental loads imposed on the bridge and insufficient maintenance outlays. The considerable corrosion of strands caused gradual reduction of their cross-section leading to their rupture. Rupture of about 3-4 strands was noted already in the report from inspection during October and November 2011 [12]. At the time of the special condition survey, carried out in January 2012 [13] the number of broken strands increased to 6 out of the total number of 12, which is 50%. In February 2012 there were 9 broken strands out of the total number of 12. As a result excessive deformations and dynamic stresses occurred at the hinge each time a heavy vehicle weighing more than 30-40 tons passes the bridge. That bridge condition was considered critical, necessitating immediate implementation of the proposed measures as a precondition of further operation on the bridge. Reduction in the number of active strands changed the behaviour of the bridge structure in relation to the design, the results of evaluation and behaviour during long-term operation. The following administrative measures were proposed:

- reduction of variable traffic load on the bridge by temporary traffic management measures – closing one lane and diversion of traffic out of the bridge,
- implementation of posted speed limit of 30 km/h.

Replacement of corroded and ruptured strands of 4.5 mm wires was proposed as an immediate physical measure. Monostrand strands with corrosion-protection were used. In view of the expected restoration of the bridge structure to take place in the near future which should remove the main cause of failures (hinge in the middle of the second span), the solution was considered temporary to last for about two years until the restoration works start.

4. IMMEDIATE REMEDIAL WORKS REQUIRED DUE TO POTENTIALLY DANGEROUS CONDITION

4.1. BASIC TECHNICAL REQUIREMENTS FOR THE DESIGN OF THE CABLE

Rupture of the original cables resulted in vertical relieve of the bridge brackets creating a 10 mm gap. This shows

niem 10 milimetrowej przerwy. Wskazuje to na inne początkowe ugięcia wsporników oraz zmianę ich położenia wywołaną sprężeniem konstrukcji w przegubie. Trwałość układu sprężającego (zabezpieczenie antykorozyjne), przyjęta w projekcie zgodnie z poprzednią normą, jest na dzisiaj niewystarczająca (Rys. 4 i 5). Górne zakotwienia nie posiadały otuliny betonowej i były pokryte jedynie cienką warstwą betonu, natomiast zakotwienia dolne były jedynie zalane zaprawą cementową. Cienkościenne osłony z rur o średnicy 42 mm były osadzone w betonie niedokładnie, ze znacznymi odchyłkami w stosunku do projektu. Wyniki oględzin wskazały na konieczność pomiarów w celu określenia rzeczywistego stanu konstrukcji oraz ukończenia dokumentacji projektowej [16, 17] po wywiercieniu nowych otworów metodą rdzeniową po trasie istniejących osłon cienkościennych poprzedniego systemu sprężającego.



Fig. 4. View at the original cables
Rys. 4. Widok oryginalnie założonych kabli sprężających

Projekt nowego układu sprężającego oparty był na trwałości zmęczeniowej i wymaganym okresie użytkowania kabli [18]. W projekcie układu sprężania przyjęto następujące założenia projektowe:

- a) siła po zakotwieniu, z uwzględnieniem strat doraźnych, powinna być na poziomie 50-60% siły F_p . Uwzględniając doświadczenia ze sprężaniem i kotwieniem krótkich splotów, wartość maksymalnej siły sprężającej F_o (siła na prasie przed zakotwieniem) ustalono na podstawie wyników sprężania próbnego. Rzeczywiste wartości strat w zakotwieniu uzyskano z elastomagnetycznych pomiarów siły przy użyciu czujnika PSS20. W ten sposób wyznaczono siłę F_o gwarantującą uzyskanie 50%

that the structure had different brackets' deflections during construction and were aligned by hinge prestressing. As for the prestressing durability (corrosion protection), the prestressing was designed according to the former standard what is now insufficient (Figs. 4 and 5). The upper anchors did not have the required concrete cover and were covered only with a thin layer of concrete and the lower anchors were only coated by cement mortar. The cable ducts made of thin-wall pipes of 42 mm in diameter were embedded in concrete inaccurately with major deviations from the design. This called for measurements to determine the actual condition and finalize the design documentation [16, 17] after drilling new holes by core drills along the routes of the existing ducts of thin-walled tubes.



Fig. 5. View at the original upper anchorages of cables
Rys. 5. Widok oryginalnie zamontowanych górnych zakotwień

The new prestressing design was based on the fatigue reliability and on the required cable lifetime [18]. The basic requirements on prestressing were:

- a) stressing force after anchoring, reduced by losses on the prestressing element (strand) was at the level of 50-60% of strength F_p . Concerning to experiences with stressing and anchoring short strands, trial prestressing was performed to determine the final value of the prestressing force F_o (force in stressing jack prior to anchoring). The real losses of prestressing in anchorage were obtained by the elastomagnetic measurement of the force using PSS20 transducer. The value of F_o was determined to guarantee reaching 50% of the limit F_p . Such a high value could be adopted assuming a very small increment of tension ΔF from variable loads. The measurements of ΔF carried out

wartości granicznej F_p . Przyjęcie tak dużej wartości jest dopuszczalne pod warunkiem bardzo małego przyrostu sił rozciągających ΔF , wywołanych obciążeniami zmiennymi. Wyniki pomiarów wartości ΔF w trakcie eksploatacji obiektu (w warunkach obciążenia ruchem) przedstawiono na Rys. 6. Największa siła wystąpiła w ciężnie nr 6:

$$\text{maks. } F_6 = 133,6 \text{ kN} \leq 0,5 \cdot F_p = 0,5 \cdot 281,4 = 140,7 \text{ kN},$$

- kołnierz oporowy zakotwienia wyposażono w płytę zamkającą (dociskową) zapobiegającą przenoszeniu obciążeń zmiennych na szczęki zaciskowe (Rys. 7),
- kabel wykonany był z jednosplotów typu Monostrand posiadających zabezpieczenie antykorozyjne złożone z dwóch warstw ochronnych – warstwy środka smarnego oraz warstwy HDPE (Rys. 8) i był przewidziany jako rozwiązanie doraźne na okres trzech lat,
- zastosowano zakotwienia ze stali ocynkowanej (Rys. 7),
- z uwagi na bardzo krótkie długości splotów, spodziewane duże straty sprężania oraz trudne do określenia straty wywołane sprężystym odkształceniem wsporników na wszystkich splotach, zamontowano czujniki elastomagnetyczne typu PSS20 (Rys. 8).

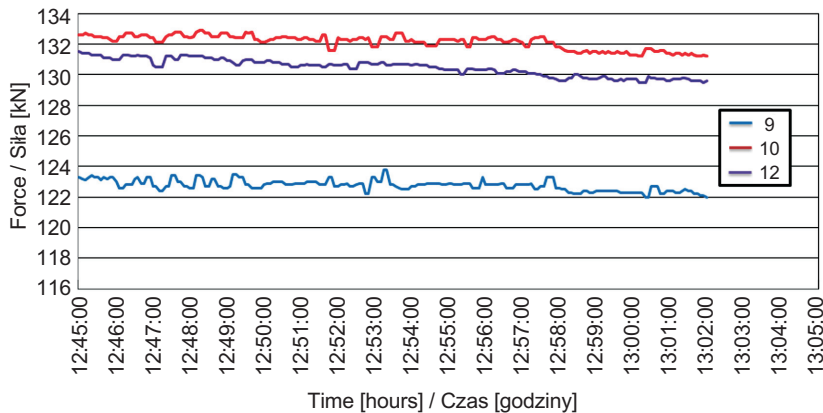


Fig. 6. Changes of stressing in strands No. 9, 10 and 12 due to variable loads during the single lane traffic

Rys. 6. Zmiany naprężenia splotów 9, 10 i 12 wywołane obciążeniami zmiennymi od ruchu w okresie jego jednopasmowej organizacji

during the bridge operation (under traffic) are presented in Fig. 6. The maximum force occurred in strand No. 6:

$$\text{max } F_6 = 133.6 \text{ kN} \leq 0.5 \cdot F_p = 0.5 \cdot 281.4 = 140.7 \text{ kN},$$

- the anchor collar was provided with a pressure plate to protect the grips from variable loads (Fig. 7),
- the cables consisted of Monostrand strands protected against corrosion by a two-layer system comprising lubricant and HDPE coat (Fig. 8) and were designed as a temporary measure to last for three years only,
- the anchorage blocks were made of galvanized steel (Fig. 7),
- due to very short lengths of the prestressing strands, the expected large prestress losses and losses due to elastic deformation of the brackets which were hard to determine, elastomagnetic transducers of forces PSS20 were mounted on all strands (Fig. 8).



a)



b)

Fig. 7. View on the new bottom (a) and upper (b) cables' anchorage
Rys. 7. Widok nowych dolnych (a) i górnych (b) zakotwień

4.2. WYKONANIE NOWEGO SYSTEMU SPRĘŻAJĄCEGO

Jako standardowy element sprężający zastosowano zakotwienie na dwa sploty PROJSTAR SH-2. Płyty oporowe można było wykonać dopiero po odsłonięciu starych zakotwień oraz wywierceniu nowych otworów pod sploty. W przypadku każdego kabla (złożonego z dwóch splotów) wykonano następujące czynności:

- pomiar położenia i wymiarów nowych otworów w górnej i dolnej płycie dźwigara skrzynkowego, wykonanych wiertłami rdzeniowymi o średnicach 60 mm i 70 mm,
- wykonanie indywidualnych płyt oporowych,
- wycięcie nowych wnęk pod płyty oporowe z uwzględnieniem położenia nowo wywierconych otworów (Rys. 7).

4.3. PROCEDURA NACIĄGNIA SPLITÓW I POMIAR SIŁ W NICH DZIAŁAJĄCYCH

Przed przystąpieniem do naprężania splotów przy użyciu dynamometru PAUL przeprowadzono kalibrację prasy naciągowej (Rys. 9). Pomiar przy użyciu czujników elastomagnetycznych PSS20 (Rys. 10) potwierdził właściwą kalibrację dla wartości ciśnień 290, 350 i 450 barów. Powyższa procedura umożliwia pomiar sił w splotach z dokładnością do ± 1 kN. Naciąganie kabli rozpoczęto od kabla skrajnego (złożonego z dwóch splotów). Naciągnięcie pierwszego kabla zamknęło łożysko w zworniku przęsła. Dla zilustrowania zmian wartości siły podczas sprężania następnego splotu wybrano kabel przy łożysku środkowym (Rys. 6 i 11).

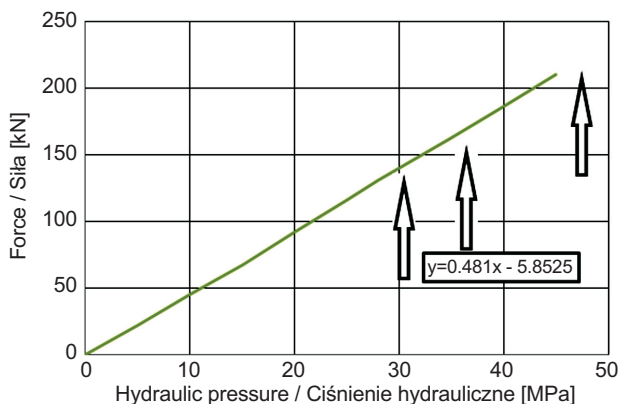


Fig. 9. Calibration of prestressing tool PAUL TENSA SM 240 kN with strand Monostrand using dynamometer PAUL DMS 500 kN with accuracy $\pm 0.5\%$

Rys. 9. Kalibracja prasy naciągowej PAUL TENSA SM 240 kN do naciągu jednosplotów Monostrand przy użyciu dynamometru PAUL DMS 500 kN o dokładności $\pm 0,5\%$



Fig. 8. View at new cables

Rys. 8. Widok nowych kabli

4.2. NEW PRESTRESSING SYSTEM INSTALLATION

Two-strand anchorage PROJSTAR SH-2 was used as a standard prestressing element. The bearing plates could be made only after exposing old anchorages and drilling new holes for strands. For each (double-strand) cable the procedure was as follows:

- measure the position and size of the new openings in the upper and bottom slabs of the box girder made with 60 and 70 mm core drills,
- fabricate custom bearing plates,
- cut new recesses for the bearing plates to match positions of new holes (Fig. 7).

4.3. PROCEDURE OF PRESTRESSING AND MEASUREMENT OF FORCES IN STRANDS

The stressing jack was calibrated with PAUL dynamometer (Fig. 9) before stressing the strands. The check measurements done with elastomagnetic force transducers PSS20 (Fig. 10) confirmed calibration values for 290, 350, 450 bars. This procedure allows to measure the forces in strands with an accuracy of ± 1 kN. The stressing operation started with the outermost cable (composed of two strands) of the lane heading to Strečno. After prestressing of the first cable the bearing in joint was closed. The cable near the centre bearing was selected to monitor the changes of force in cables during stressing of the consecutive strands (Figs. 6 and 11).



Fig. 10. Strand prestressing using tool PAUL
Rys. 10. Naciąg cięgien przy użyciu prasy PAUL

5. REMONT MOSTU

5.1. OGÓLNE ZAŁOŻENIA REMONTU MOSTU

W ramach kompleksowego remontu obiektu przewidziano demontaż wyposażenia obiektu, rozebranie środkowej części konstrukcji wraz ze stalowymi łożyskami, wykonanie połączenia monolitycznego między końcami ustroju nośnego w środkowym przęśle mostu oraz wzmocnienie przęsła przy użyciu zewnętrznych kabli sprężających, zabetonowanie filarów i wykonanie naciąg dylatacyjnych w dolnej części filarów, zastąpienie łożysk na przyczółkach, wykonanie nowych ścianek zapleczyńnych oraz stref przejściowych mostu, remont ustroju nośnego i przyczółków, wymianę wyposażenia mostu. Zakres i złożoność remontu, skutkujące zmianą schematu statycznego oraz użytkowania konstrukcji, wymagały realizacji etapowej przewidzianej w dokumentacji projektowej.

5.2. ROZBIÓRKI

Po przeniesieniu ruchu z mostu przystąpiono do frezowania nawierzchni drogowej oraz rozbiórki wyposażenia obiektu. Następnie przeprowadzono jeden z najważniejszych etapów remontu polegający na wycięciu środkowej części konstrukcji obejmującej uszkodzone łożyska stalowe (Rys. 12). Dalsze prace rozbiórkowe dotyczyły usunięcia ścianek zapleczyńnych na przyczółkach oraz konstrukcji strefy przejściowej mostu. Do prac związanych z usuwaniem uszkodzonych elementów mostu oraz przygotowywaniem wymaganych otworów montażowych wykorzystano piłę z liną diamentową oraz przecinarki.

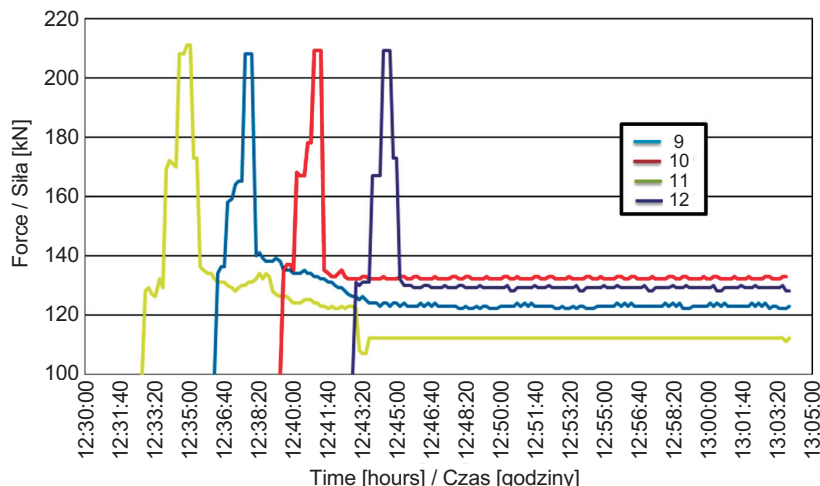


Fig. 11. Forces in strands no. 9-12 in the middle of the bridge cross-section
Rys. 11. Siły w splotach 9-12 w środkowej części przekroju poprzecznego mostu

5. BRIDGE RESTORATION PROJECT

5.1 THE OVERALL CONCEPT OF THE BRIDGE RESTORATION

The overall restoration of the bridge included removal of accessory equipment, demolition of the central part of the bridge, including the steel bearings, new monolithic connection of the mating ends of the middle span and its strengthening with external cables, concreting the pillars and cutting joints in the bottom parts of pillars, substitution of bearings on abutments, construction of new ballast walls and approach slab areas of the bridge, restoration of the superstructure and abutments, replacement of the bridge accessory equipment. Given the scope and complexity of restoration that changed the structural diagram and operation system, required observing the construction sequence defined in the project documents.

5.2. DEMOLITION WORKS

After diversion of traffic from the bridge, milling of the road pavement could begin together with complete removal of the bridge accessory equipment. Subsequently, cutting the central part of the structure, including the damaged joints (steel bearings) was done as one of the most important operations of the entire restoration process (Fig. 12). Further demolition works included removing of the ballast walls on abutments and of the transitional (approach) area. The operations related to removal of the deteriorated parts of the bridge and preparation of the necessary mounting holes were carried out with concrete cutting saws (diamond wire saw and cutting saw types).



Fig. 12. Removing of the degraded central parts of the bridge in the place of joint

Rys. 12. Rozbiórka uszkodzonych części pomostu w strefie środkowego zwornika

5.3. REMONT I WZMOCNIENIE USTROJU NOŚNEGO I PODPÓR MOSTU

Po usunięciu uszkodzonego zwornika środkowego i przyległych części konstrukcji w pasie o szer. 2,8 m w środku głównego przęsła, przystąpiono do montażu szalunków, zbrojenia oraz betonowania nowej środkowej części przęsła. Zachowano oryginalny kształt dwukomorowego dźwigara. W wykonanych z betonu monolitycznego nowych i istniejących częściach obiektu zamontowano elementy łączące zamykając obie części ułożonymi na obwodzie prętami gwintowanymi ϕ 40 mm ze stali Y1050H St 950/1050 MPa (łącznie 32 szt.). Następnie przystąpiono do następnego zadania polegającego na wykonaniu nacięć w dolnej części filarów (Rys. 13), co było zadaniem najtrudniejszym po wykonaniu monolitycznej części ustroju nośnego. Wykonanie nacięć (4 szt.) było konieczne ze względu na duże naprężenia zginające wywołane w filarach w związku ze zmianą schematu statycznego i sprężeniem ustroju nośnego. Przed wykonaniem nacięć dylatacyjnych na obwodzie filarów powyżej i poniżej nacięcia dylatacyjnego wykonano nowe żelbetowe występy w celu przejścia naprężeń osiowych. Występy sprężono za pomocą prętów o średnicy 36 mm ze stali Y1230H St 1080/1230 MPa (łącznie 6 szt.).

Równocześnie z wykonaniem nacięć dylatacyjnych w dolnej części filarów prowadzono prace związane z kompleksową naprawą zewnętrznych i wewnętrznych powierzchni konstrukcji. Wykonano otwory i zabetonowano dźwigary poprzeczne i dewiatory w dźwigarach skrzynkowych w celu umożliwienia zakotwienia zewnętrznych kabli sprężających. W tym samym czasie wykonano wzmocnienie filarów przez obudowanie ich warstwą żelbetową o grubości

5.3. SUPERSTRUCTURE AND SUB-STRUCTURE RESTORATION AND STRENGTHENING

After removal of the damaged joint and adjacent parts of the structure within 2.8 m strip in the middle of the main span followed the works related to formwork, reinforcing and concreting of the new middle part of the span. The original shape of the two-box girder was retained. The new and old monolithic parts of the structure were provided with connectors and the two parts were closed with 40 mm threaded rods of Y1050H St 950/1050 MPa steel installed on the circumference (32 in total). Then the work proceeded to the most difficult stage after casting the monolithic part of the superstructure: cutting joints in the bottom parts of piers (Fig. 13). The joints (4 No.) were made to accommodate large bending stresses of piers after the change of the structural system and subsequent stressing of the superstructure. Before cutting the joints new reinforced concrete rims were installed around the piers above and below the joint location to capture axial stresses. The reinforced concrete rims were prestressed by 36 mm prestressing bars made of Y1230H St 1080/1230 MPa steel (6 in total).

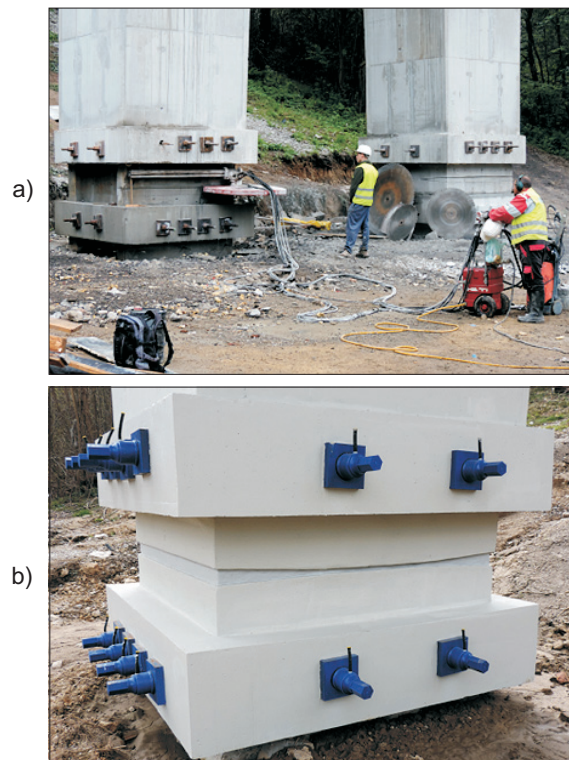


Fig. 13. The notched joint of piers: during (a) and after realisation (b)
Rys. 13. Nacięcia dylatacyjne podpór: w trakcie wykonywania (a) i gotowe (b)

100-150 mm oraz wymieniono łożyska na przyczółkach. Na tym etapie ustrój nośny oraz podpory były już przygotowane do osadzenia kratownicowych bloków kotwiących pod nowym środkowym segmentem mostu zwiększając efekt naprężania przez zwiększenie mimośrodowości prowadzenia zewnętrznych kabli.

Ostatnim krokiem procesu wzmocnienia ustroju nośnego było naprężenie 4 zewnętrznych kabli, każdy złożony z 22 splotów. Zastosowano sploty ze stali Y1860S7 St 1600/1860 o średnicy 15,7 mm i polu przekroju poprzecznego 150 mm². Zewnętrzne kable sprężające były wprowadzane w stalowe dewiatory ruchem ciągłym i następnie do komór dźwigarów przez dolną płytę dochodząc do poprzecznic nad podporami, gdzie były kotwione w nowo zabetonowanych dewiatorach. Zabetonowanie i sprężenie ustroju nośnego oraz wykonanie nowych nacięć dylatacyjnych w dolnych częściach filarów spowodowało zmianę schematu statycznego na schemat ramy dwuprzegubowej.

5.4. REMONT WYPOSAŻENIA OBIEKTU I WYKOŃCZEŃ

Remont mostu obejmował całkowitą wymianę wyposażenia obiektu. Na górnej powierzchni ustroju nośnego ułożono warstwę balastową o zmiennej grubości, która zlikwidowała nierówności i trwale ugięcia mostu. Dalsze prace obejmowały betonowanie ścian zapleczy na przyczółkach, wykonanie nowych płyt przejściowych w strefach przejściowych, wykonanie pełnej hydroizolacji pomostu oraz betonowanie gzymsów mostu. Prace wykończeniowe dotyczyły odwodnienia wzdłuż krawędzi jezdni, urządzeń dylatacyjnych, montażu barier, ułożenia nawierzchni i zagospodarowania terenu wokół obiektu. Ostatni etap robót obejmował renowację obszarów przed i za mostem w ciągu drogi Nr I/18. Punktem kontrolnym zakończenia procesu remontu było próbne obciążenie statyczne, którego wyniki potwierdziły bezpieczeństwo konstrukcji mostu po wzmocnieniu. W tej sytuacji nie było przeszkód dla zlikwidowania objazdu i przywrócenia ruchu na drogę nr I/18 (Rys. 14).



Fig. 14. The bridge substructure and bridge accessory equipment after reconstruction

Rys. 14. Podpory i wyposażenie mostu po odbudowie

Simultaneously with making cut joints other works were carried out related to comprehensive restoration of external and internal surfaces of the structure. Openings were made and transverse girders and deviators in box girders were concreted for anchoring external cables. At the same time, the piers were strengthened by encasing them with 100 to 150 mm thick layer of reinforced concrete and bearings on abutments were replaced. With the superstructure and piers prepared as described above, the new steel truss anchorage blocks from steel S355 were embedded under the new middle segment of bridge. The effect of prestressing was increased by increasing the eccentricity of cable runs.

The last step in the strengthening of the superstructure was the prestressing of 4 external cables, each consisting of 22 strands. The strands were made of steel Y1860S7 St 1600/1860, had a diameter of 15.7 mm and a cross-section area of 150 mm². The external cables were continuously entered into the steel deviators, then passed into the box girder through the bottom slab ending on transverse girders over piers where they were anchored on the new concreted deviators. By concreting and prestressing the superstructure and making the new cut joints in the bottom parts of piers the structural system has changed to a compound frame with two hinges.

5.4. RENOVATION OF THE BRIDGE ACCESSORY EQUIPMENT AND FINISHING WORKS

The bridge restoration project included complete replacement of accessory equipment. A pressure (loading) layer of concrete of varying thickness was placed on top of the superstructure to eliminate irregularities and permanent deflections. Subsequent works were related to concreting the ballast walls on abutments, construction of new approach slabs in the transition areas, installation of complete deck waterproofing system and concreting of fascia girders. Finishing works on the bridge were related to shoulder drainage and expansion joints, installation of vehicle restraint systems, laying the pavement and landscaping around the bridge. In the final stage of construction works, the adjacent areas before and after the bridge of road No. I/18 were restored. The check point of the restoration works was the static loading test which confirmed structural safety of the bridge after strengthening. As such, the traffic could return back to the road No. I/18 from the detour (Fig. 14).

5.5. DIAGNOSTYKA I BIEŻĄCA OBSERWACJA KONSTRUKCJI OBIEKTU

W czasie prac remontowych przeprowadzono szczegółową diagnostykę mającą na celu kontrolę stanu kabli i elementów betonowych obiektu. Pomimo znacznych przecieków wody do wnętrza dźwigara sprężone elementy konstrukcji były w dobrym stanie. W badaniach wytrzymałościowych, którym poddano próbki betonu wycięte z ustroju nośnego i podpór, uzyskano wartości wyższe niż założone w projekcie konstrukcji.

Od momentu oddania mostu do użytku (listopad 2014), co trzy miesiące przeprowadzano analizę wyników jego stanu technicznego na podstawie bieżącej obserwacji w ramach 5-letniego programu monitorowania obiektu. Wykonane pomiary kontrolne obejmowały 5 serii pomiarów naprężeń w konstrukcji betonowej nowego segmentu środkowego oraz w zewnętrznych kablach sprężających, pomiary przesuwu łożysk i urządzeń dylatacyjnych oraz pomiary przemieszczeń i odkształceń konstrukcji mostu. Na etapie budowy oraz w okresie eksploatacji przed remontem nie odnotowano przejawów nieprawidłowej pracy konstrukcji. Potwierdzono prawidłowość założeń projektowych oraz sprawdzono skuteczność wykonanego wzmocnienia konstrukcji.

6. WNIOSKI

Pierwszy etap remontu mostu polegający na wzmocnieniu zwornika pomostu za pomocą jednosplotów Monostrand przyniósł pożądany efekt. Sprężenie konstrukcji pozwoliło usunąć stan awaryjny. Ponadto w celu maksymalnego ograniczenia obciążeń dynamicznych naprawiono zniszczone urządzenie dylatacyjne w przegubie drugiego przęsła. Dokumentację projektową remontu mostu opracowano w wymaganym czasie. Zadanie inwestycyjne przewidywało usunięcie głównej przyczyny uszkodzeń – przegubu pośrodku drugiego przęsła.

Celem kompleksowego remontu mostu było usunięcie przyczyn stanu awaryjnego, zwiększenie nośności oraz zapewnienie jego dalszego bezpiecznego użytkowania. Dzięki wysiłkom wszystkich stron uczestniczących w realizacji inwestycji, w wyniku przeprowadzenia technicznie wymagających i unikatowych prac remontowych (Rys. 15) obiekt doprowadzono do stanu, w którym może pełnić swą funkcję przez wiele kolejnych lat.

Fig. 15. The detail of the stiffening prestressing structure in the main span

Rys. 15. Szczegół usztywnienia za pomocą zewnętrznej konstrukcji sprężającej zabudowanej na głównym przęsle

5.5. CONDITION SURVEY AND MONITORING

A detailed condition survey of the bridge was carried out to verify the condition of the cables and concrete elements of the bridge during the restoration project. Despite significant water leaks into the box girder, the prestressed elements were found to be in good condition. The tests carried out on samples of concrete cut from the bridge superstructure and piers gave higher strength values than assumed in the design.

Since the opening date (November 2014) evaluation of the monitoring results was performed every three months in the frame of long-term 5-year monitoring program. The measurements performed so far include 5 measurement phases for stresses in the new middle segment and in the external cables, measuring movements of bearings and expansion joints and measuring of the displacements and deformations of a bridge. There were no indications of faulty behaviour of the bridge structure during construction and during the previous operation period. The design assumptions were confirmed and the effect of the implemented strengthening was verified.

6. CONCLUSIONS

The first repair activity comprised bracing of the middle joint with Monostrand strands and it produced the desired effect. After prestressing, the bridge was no longer in dangerous condition. As an additional measure the destroyed expansion joint in the hinge of the second span was repaired to minimize the dynamic loads. The bridge restoration design documents were prepared without delay. The main cause of problems, namely the hinge in the middle of the second span was to be removed under the bridge renewal project.



INFORMACJE DODATKOWE

Badania przeprowadzono przy wsparciu ze strony Słowackiej Agencji Badań i Rozwoju w ramach umowy nr APVV-14-0772, w ramach projektu badawczego 1/0566/15, 012ŽU-4/2016 Agencji Grantów Naukowych Ministerstwa Edukacji Republiki Słowackiej oraz projektów realizowanych w ramach współpracy dwustronnej nr SK-PL-2015-0004 i DS-2016-0039.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] SSC: National traffic census 2010 - Žilina country. Table and graphic form. 2012 (in Slovak)
- [2] *Vičan J., Odrobiňák J., Gocál J., Hlinka R.*: Remarks from diagnostics and load carrying capacity estimation of existing railway bridges. In: Proceedings of 8th International conference on short and medium span bridges, Niagara Falls. The Canadian Society for Civil Engineering, Montréal, Québec, Canada, 2010, 150-1/150-9
- [3] *Guo T., Chen Z., Liu T., Han D.*: Time-dependent reliability of strengthened PSC box-girder bridge using phased and incremental static analyses. *Engineering Structures*, **117**, 2016, 358-371
- [4] *Šomodíková M., Lehký D., Doležel J., Novák D.*: Modeling of degradation processes in concrete: Probabilistic lifetime and load-bearing capacity assessment of existing reinforced concrete bridges. *Engineering Structures*, **119**, 2016, 49-60
- [5] *Furuta H., Akiyama M.*: Life-cycle of structural systems: design, assessment, maintenance and management. *Structure and Infrastructure Engineering*, **13**, 1, 2017, 1-1
- [6] *Biondini F., Frangopol D.M.*: Time-variant redundancy and failure times of deteriorating concrete structures considering multiple limit states. *Structure and Infrastructure Engineering*, **13**, 1, 2017, 94-106
- [7] *Caprani C.C., O'Brien E.J., Lipari A.*: Long-span bridge traffic loading based on multi-lane traffic. *Engineering Structures*, **115**, 2016, 207-219
- [8] *Kim S., Frangopol D.M.*: Efficient multi-objective optimisation of probabilistic service life management. *Structure and Infrastructure Engineering*, **13**, 1, 2017, 147-159
- [9] *Antucheviciene J., Kala Z., Marzouk M., Vaidogas E.R.*: Decision Making Methods and Applications in Civil Engineering. *Mathematical Problems in Engineering*, Article number 160569, 2015
- [10] *Biondini F., Strauss A.*: Life-cycle performance of civil infrastructure systems. *Structure and Infrastructure Engineering*, **12**, 7, 2016, 801-801

The aim of the comprehensive restoration of the bridge was to eliminate the causes of the dangerous condition of the structure, to increase the bridge load carrying capacity and to ensure its continued safe use. The efforts of all the stakeholders led to attaining the main objective of the challenging and unique (Fig. 15) bridge restoration project which is continued operation of the Zlatné bridge for many years to come.

ACKNOWLEDGEMENT

The research was aided by the Slovak Research and Development Agency under contract No. APVV-14-0772 and by the Research Project No. 1/0566/15, 012ŽU-4/2016 of the Slovak Grant Agency and also by the bi-lateral co-operation projects No. SK-PL-2015-0004 and No. DS-2016-0039.

- [11] *Zemko Š., Koteš P.*: Analysis and development of optimal way of superstructure rehabilitation of Bridge "Zlatné" number 018-264. KSKM, Civil Engineering Faculty, University of Žilina, 02/2012 (in Slovak)
- [12] *Zemko Š., Koteš P., Brodňan M., Bahleda F.*: Report about diagnostic and recalculation of Bridge "Zlatné" number 018-264 on state road I/18. Civil Engineering Faculty, University of Žilina, 11/2011 (in Slovak)
- [13] *Zemko Š., Koteš P.*: Report about emergency state and another procedure of solving of bridge "Zlatné" number 018-264 on state road I/18. Civil Engineering Faculty, University of Žilina, 01/2012 (in Slovak)
- [14] *Rehman S.K.U., Ibrahim Z., Memon S.A., Jameel M.*: Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and Building Materials*, **107**, 2016, 58-86
- [15] *Cikrle P.*: Importance of non-destructive diagnostic methods for surveying steel-reinforced concrete structures. Habilitation thesis, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic, 2016
- [16] TP 9B/2005: Inspections, maintenance and repairs of roads. Bridges. Technical provisions. MDPaT SR, 2005 (in Slovak)
- [17] *Chandoga M., Jaroševič A.*: The completion of the design and realization documentation of prestressing elements by focusing on a Bridge "Zlatné". The report on the measurement and prestressing forces of prestressing strands: Reconstruction of hinge joint - Bridge "Zlatné". Final reports PROJSTAR-PK Ltd., March 2012 (in Slovak)
- [18] *Koteš P., Chandoga M., Jaroševič A.*: Solution of emergency state of bridge Zlatné. Conference proceedings "Betonárske dni 2012", Bratislava, 2012, 403-408 (in Slovak)