



BARTOSZ PIĄTEK¹⁾
TOMASZ SIWOWSKI²⁾

INVESTIGATION OF STRENGTHENING EFFECTIVENESS OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE WITH PRESTRESSED CFRP STRIPS

BADANIA EFEKTYWNOŚCI WZMOCNIENIA MOSTU ŻELBETOWEGO WSTĘPNIE NAPRĘŻONYMI TAŚMAMI CFRP

STRESZCZENIE. Taśmy CFRP są powszechnie stosowane do wzmacniania konstrukcji budowlanych, w tym mostów. W ostatnich latach coraz częściej stosuje się wstępnie naprężone taśmy CFRP, przez co zwiększa się efektywność i trwałość wzmocnienia. Na świecie powstało kilka systemów sprężająco-kotwiących, służących do stosowania tej technologii. W artykule opisano wdrożenie nowego systemu sprężająco-kotwiącego do wzmacniania mostów oraz badania jego efektywności. Przedmiotem wzmocnienia był most żelbetowy, belkowy, o schemacie belki swobodnie podpartej ze wspornikami. Podczas prac remontowych przeprowadzono badania mostu pod obciążeniem statycznym zarówno przed, jak i po wzmocnieniu mostu wstępnie naprężonymi taśmami CFRP. Celem badań było sprawdzenie efektywności wzmacniania mostu oraz ocena nowego systemu wzmacniania w warunkach in-situ. W wyniku wzmocnienia naprężonymi taśmami CFRP stwierdzono redukcję naprężeń w zbrojeniu stalowym w granicach 20-30% oraz wykazano włączenie się taśm CFRP do współpracy ze zbrojeniem stalowym. Na podstawie wyników badań mostu stwierdzono, że efektywność wzmocnienia była zadowalająca, a zastosowanie nowego systemu skuteczne.

SŁOWA KLUCZOWE: badania mostu, sprężenie, system wzmacniania, taśmy CFRP, wzmacnianie mostów.

ABSTRACT. CFRP strips are commonly used for post-strengthening of various structures including bridges. In the recent years prestressed strips have been phased in due to their better effectiveness and durability as compared to non-prestressed strips. Several tensioning-anchoring kits have been developed to implement the prestressed CFRP strips technology. This paper describes implementation of a newly developed tensioning-anchoring kit and the results of experimental investigation of its effectiveness. The structural system of the bridge in question is a reinforced concrete simply supported beam with cantilevers at both sides. During the repair static load tests were carried out before and after installation of prestressed CFRP strips. The purpose of these tests was to verify the post-strengthening effect and assess the in-field performance of system. It was established that post-strengthening with prestressed CFRP strips reduced by 20-30% the stresses induced in the existing reinforcing steel and that the strips acted in combination with the existing reinforcement. The results of the performed tests have proven satisfactory effect and desired performance of the newly developed tensioning-anchoring kit.

KEYWORDS: bridge tests, CFRP strips, post-strengthening of bridges, post-strengthening system, prestressing.

DOI: 10.7409/rabdim.016.019

¹⁾ Politechnika Rzeszowska, Zakład Dróg i Mostów, ul. Poznańska 2, 35-084 Rzeszów; piatek@prz.edu.pl (✉)

²⁾ Politechnika Rzeszowska, Zakład Dróg i Mostów, ul. Poznańska 2, 35-084 Rzeszów; siwowski@prz.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Taśmy kompozytowe CFRP (ang. *carbon fiber reinforced polymer*) są powszechnie wykorzystywane do wzmacniania obiektów mostowych. Prace badawcze nad możliwością ich zastosowania do wzmacniania konstrukcji żelbetowych zostały zapoczątkowane w latach 80-tych w szwajcarskim instytucie EMPA [1]. W 1991 roku w Ibach koło Lucerny po raz pierwszy wykorzystano technologię biernego przyklejania taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu [2]. Pierwszym obiektem mostowym w Polsce wzmocnionym tą metodą był most przez rzekę Wiar w Przemyślu [3]. Kolejne liczne badania wykazały, że w celu zwiększenia efektywności wzmocnienia uzasadnione jest wstępne naprężanie taśm CFRP przed ich przyklejeniem do konstrukcji. Podjęte prace rozwojowe doprowadziły do powstania pierwszego systemu wzmacniania konstrukcji za pomocą wstępnie naprężanych taśm. System ten wykorzystano po raz pierwszy w 1998 roku do wzmocnienia mostu z betonu sprężonego Lauterbrücke koło Gomadingen w południowych Niemczech [4]. W kolejnych latach na rynku pojawiło się wiele systemów wzmacniania konstrukcji z technologią sprężonych taśm CFRP. Do najczęściej stosowanych należy zaliczyć rozwiązania niemieckie [4] i szwajcarskie [5], wykorzystujące zakotwienia mechaniczne z blach stalowych oraz system z zakotwieniami z głowic wykonanych w całości z kompozytu [6]. Warto także wspomnieć o opracowanej w instytucie EMPA metodzie gradientowej, wykorzystującej stopniowy spadek siły sprężającej na końcowych odcinkach taśm w celu redukcji naprężeń ścinających powstających w warstwie skleiny przy końcach taśm [7]. W 2014 roku metoda ta doczekała się pilotażowej aplikacji in-situ w Polsce na moście przez rzekę Pilzę w Szczercowskiej Wsi [8].

Krajowe doświadczenia we wdrażaniu tej technologii do wzmacniania konstrukcji budowlanych reprezentują dwa systemy. W połowie ubiegłej dekady w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów opracowano pierwszy polski system wzmacniania sprężonymi taśmami CFRP, będący modyfikacją systemu niemieckiego [9]. W 2009 roku zaprezentowano drugi polski system, w którym łączenie taśm kompozytowych z kotwiącymi blachami stalowymi odbywa się za pomocą kleju, nitów oraz wewnętrznego tarcia [10]. System ten był wielokrotnie wykorzystywany w Polsce do wzmacniania zarówno konstrukcji żelbetowych, jak i stalowych [11]. W 2015 roku zakończono prace badawczo-rozwojowe nad nową generacją systemu. Udoskonalona wersja pozwala na użycie większej siły sprężającej, a co za tym idzie uzyskanie wyższej efektywności wzmocnienia i większego stopnia wykorzystania taśm CFRP. Modyfikacja obejmuje

1. INTRODUCTION

Strips made of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) are a composite material commonly used for strengthening bridge structures. The research on the reinforced concrete structures strengthening with this composite material dates back to the 1980s when it was started by EMPA - Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology [1]. For the first time the strips were used for post-strengthening of an existing bridge as passive reinforcement in 1991 on the Ibach bridge near Lucerne where they were bonded to the concrete surfaces with adhesive [2]. In Poland, the first bridge on which this method was used was the bridge over the Wiar river in Przemyśl [3]. The subsequent research proved that tensioning of CFRP strips before adhering them to the surface of the structure can improve the strengthening effect. This has led to developing the first post-strengthening system using prestressed composite strips. For the first time it was used for post-strengthening of Lauterbridge prestressed concrete bridge located near the town of Gomadingen in the south of Germany [4]. A large number of systems based on the application of prestressed CFRP strips have appeared since then. The most frequently used are German [4] and Swiss [5] systems, including steel plates for mechanical anchoring and another system using composite anchor heads [6]. Worth noting is also the EMPA's gradient anchoring method utilising gradual reduction of the level of prestressing force applied at the ends of the strip to reduce the shear stresses induced in the bonding layer near the strip ends [7]. This system was used in Poland for the first time in 2014 in a pilot application on the bridge over the Pilsa river in the village of Szczercowska Wieś [8].

There are also two Polish post-strengthening systems using the prestressed CFRP strip technology. The first one was developed in the mid-2000s at the Road and Bridge Research Institute IBDiM as a modification of the existing German system [9]. In 2009 the second Polish system was presented, in which the composite strips are secured to the steel anchor plates with glue, rivets and by internal friction [10]. The second system was used many times in the area of Poland for post-strengthening of reinforced concrete as well as steel structures [11]. Moreover, in 2015 research work on a new generation of the latter system was completed. The improved version of the system allowed increasing the prestress level and consequently the strengthening effect as well as the degree of capturing of the material's potential. The main improvements included a newly developed anchorage kits featuring a higher load capacity and a new strip tensioning device [12, 13]. The

w głównej mierze nowe zakotwienia o większej nośności oraz nowe urządzenie do naprężania taśm [12, 13]. Pierwsze wdrożenie in-situ nowego systemu miało miejsce w 2015 roku podczas wzmacniania typowego mostu żelbetowego o konstrukcji belkowej. W artykule opisano wzmocnienie mostu przy użyciu nowego systemu oraz przedstawiono wyniki badań mostu pod obciążeniem statycznym zarówno przed, jak i po wykonaniu wzmocnienia. Celem badań było sprawdzenie efektywności wzmacniania mostu oraz ocena nowego systemu wzmacniania w warunkach polowych.

2. CHARAKTERYSTYKA WZMACNIANEGO MOSTU

Przedmiotem wzmocnienia był most żelbetowy położony w ciągu drogi wojewódzkiej nr 897 w km 33+818 nad potokiem Barbarka w miejscowości Komańcza, województwo podkarpackie. Obiekt został wybudowany w 1965 roku. Jest to most trzyprzęsłowy o schemacie statycznym belki swobodnie podpartej, wspornikowej. Rozpiętość teoretyczna przęsła głównego wynosi 16,0 m, a bocznych przęseł wspornikowych po 5,5 m (Rys. 1 i Rys. 2). Kąt skrzyżowania obiektu z przeszkodą wynosi 50° . Przęsła betonowe wykonano jako monolityczne w postaci czterech dźwigarów głównych o przekroju prostokątnym $0,5 \times 1,2$ m, stężonych poprzecznikami i przykrytych płytą pomostu o grubości 0,12 m (Rys. 3a). Most został zaprojektowany na obciążenie klasy II (ciągnik T-80) wg obowiązującego wówczas normatywu [14]. Przęsła wykonano z betonu o marce $R_w = 200 \text{ kG/cm}^2$ wg normy [15] (klasa C 16/20, $f_{ck} = 16 \text{ MPa}$, $f_{ctm} = 1,9 \text{ MPa}$ wg Eurokodu 2 [16], określona na podstawie badań próbek rdzeniowych), a do zbrojenia przęsła zastosowano stal St 37-S wg [15].

system was applied in field for the first time in 2015 during strengthening of a typical RC beam bridge. This paper describes a bridge strengthening project using the aforementioned new generation system and the results of the static load tests conducted before and after the strengthening. The purpose of these tests was to verify the strengthening effect and to assess the in-field performance of the system.

2. DESCRIPTION OF THE REINFORCED BRIDGE

The bridge is located in the south-east of Poland on a regional road No. 897 at km 33+818 in the village of Komańcza, where the road crosses the Barbarka stream. The bridge construction was completed in 1965. The structural system is a three-span simply supported beam with two cantilever side spans. The bridge has the effective span of 16.0 m with 5.5 m long cantilevers at both sides (Fig. 1 and Fig. 2). The bridge crossing angle is 50° . The concrete spans are composed of cast-in-place four girders of 0.5×1.2 m rectangular cross-section, braced with cross-beams and covered by 0.12 m thick concrete deck (Fig. 3a). The bridge is designed for load class II (T-80 tractor) according to the standard in force at that time [14]. The strength of concrete used for the spans is $R_w = 200 \text{ kG/cm}^2$ as per [15] (class C 16/20, $f_{ck} = 16 \text{ MPa}$, $f_{ctm} = 1.9 \text{ MPa}$ according to Eurocode 2 [16], determined on cores cut from the structure) and the type of steel used for reinforcement is St 37-S according to [15].

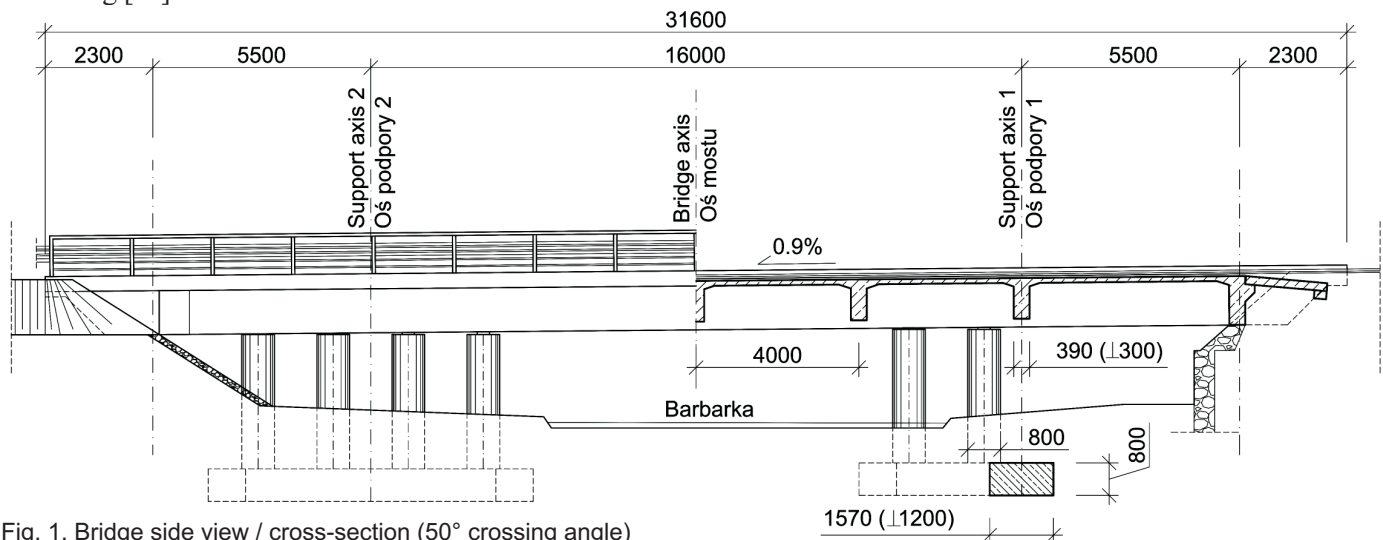


Fig. 1. Bridge side view / cross-section (50° crossing angle)
Rys. 1. Widok z boku / przekrój podłużny mostu (skos 50°)

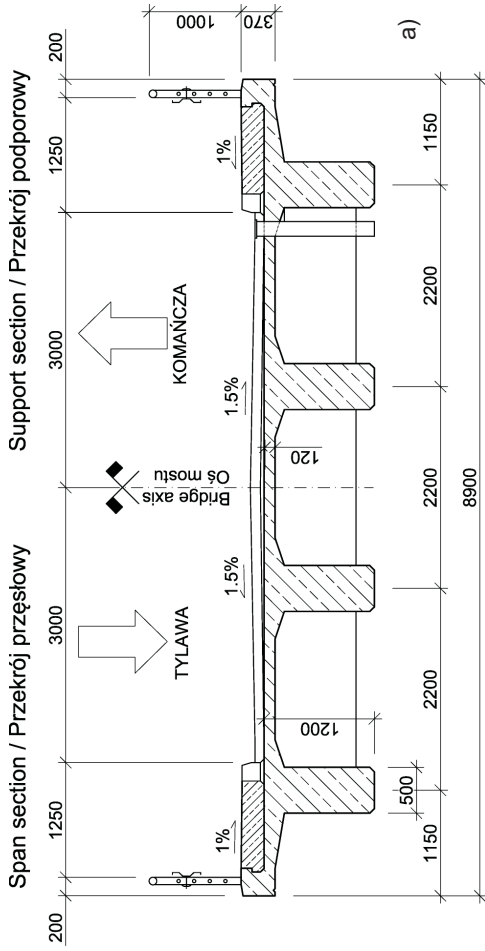


Fig. 2. Overall view of the bridge
Rys. 2. Widok ogólny mostu

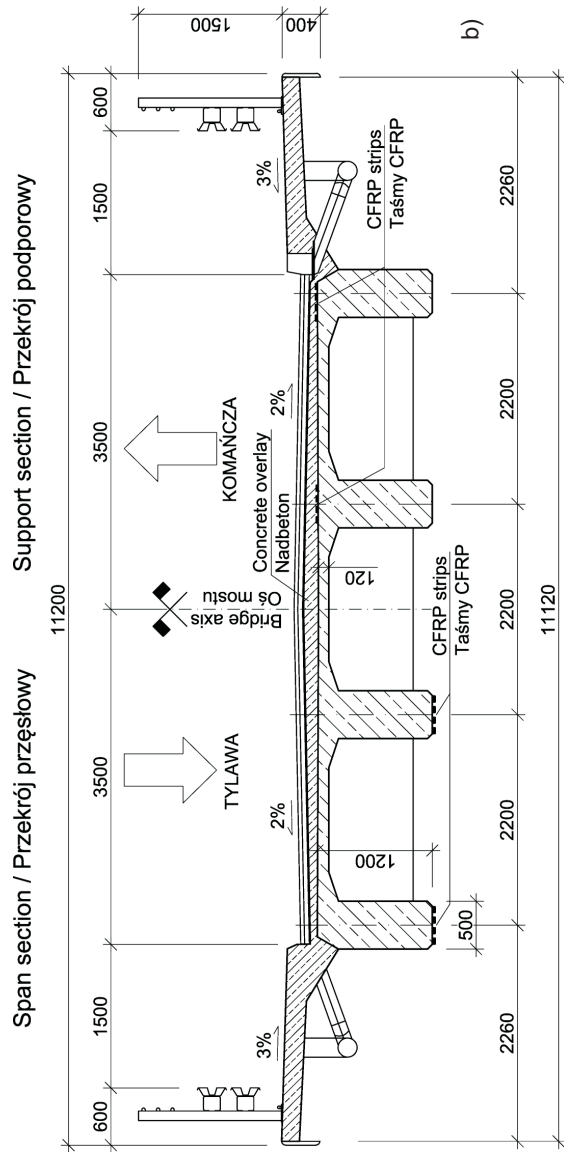


Fig. 3. Bridge cross-sections: a) before and b) after strengthening and renovation
Rys. 3. Przekrój poprzeczny mostu: a) przed oraz b) po wzmocnieniu i remoncie

Ze względu na wąską jezdnię, niewystarczającą nośność i pogarszający się stan techniczny mostu w 2015 roku wykonano jego generalny remont, którego głównymi elementami były wzmocnienie przęseł oraz poszerzenie pomostu. Przed remontem na moście znajdowały się dwa pasy ruchu o szerokości 3,0 m oraz dwa chodniki o szerokości 1,25 m. Szerokość całkowita pomostu wynosiła 8,9 m. Nośność użytkowa obiektu przed wzmocnieniem została określona przez administratora na 15 ton, a w wyniku własnych obliczeń sprawdzających ustalono ją na klasę D (20 ton) wg [17]. Była to nośność zbyt niska w stosunku do krajowych wymagań dla mostów w ciągu drogi wojewódzkiej (tj. min. klasa B wg [17], 40 ton). W związku z tym zaprojektowano wzmocnienie mostu przez sprężenie dźwigarów żelbetonowych taśmami CFRP. Oprócz wzmocnienia remont mostu obejmował m.in. zwiększenie szerokości pomostu do 11,2 m przez wykonanie nowych, poszerzonych wsporników chodnikowych, wykonanie na płycie pomostu wzmacniającej warstwy nadbetonu o grubości 7-14 cm oraz wzmocnienie filarów płaszczem betonowym o grubości 10 cm (Rys. 3b).

3. WZMOCNIENIE DŹWIGARÓW SPRĘŻONYMI TAŚMAMI CFRP

W celu zwiększenia nośności mostu zaprojektowano wzmocnienie rozciąganych stref dźwigarów głównych wstępnie naprężanymi taśmami CFRP. Taśmy zlokalizowano na dolnych powierzchniach dźwigarów w przęśle głównym (Rys. 3b, Rys. 4a) oraz na górnej powierzchni płyty pomostu nad dźwigarami w przęsłach wspornikowych (Rys. 3b, Rys. 4b). Do wzmocnienia mostu użyto 48 wysokowytrzymałych taśm o przekroju poprzecznym 60×1,4 mm, wytrzymałości na rozciąganie 3200 MPa, module sprężystości 160 GPa i odkształceniu granicznym ~2,0%. Na podstawie obliczeń ustalono, że każda z taśm powinna zostać naprężona siłą 75 kN, co odpowiadało odkształceniom kompozytu na poziomie ok. 5,6‰.

Naprężenie taśm wykonano testowanym systemem wzmacniania konstrukcji. System składa się z urządzenia naciągowego oraz prefabrykowanych stalowych zakotwień taśm, dostosowanych do urządzenia. Urządzenie naciągowe złożone jest z trzech montowanych osobno elementów: szyn prowadzących, wózka mocowanego do zakotwienia czynnego oraz bloku oporowego z siłownikiem hydraulicznym, umożliwiającym uzyskanie maksymalnej siły sprężającej na poziomie 170 kN (Rys. 5). Dzięki optymalizacji wszystkich elementów pod względem ciężaru, urządzenie jest lekkie i umożliwia szybką oraz łatwą instalację taśm na wzmacniającej konstrukcji.

Considering narrow roadway, insufficient load bearing capacity and progressively deteriorating condition in 2015 a total renovation decision was taken to the scope including in particular post-strengthening of the bridge spans and widening of the deck. Before the renovation the bridge carried two 3.0 m wide traffic lanes and two 1.25 m wide pedestrian walkways. The total width of the deck before renovation was 8.9 m. According to the bridge operator the load capacity of the bridge before renovation was 15 tonnes. However, this was not confirmed by calculations according to [17], which gave bridge load rating D (20 tonnes). This load rating was lower than the national requirement for bridges carrying regional roads (min. B rating according to [17], i.e. 40 tonnes). Hence it was proposed to strengthen the reinforced-concrete girders with prestressed CFRP strips. Besides the above-mentioned strengthening the scope of renovation included increasing the deck width to 11.2 m by providing new, wider walkway cantilevers, placement of 7-14 cm thick concrete overlay to strengthen the deck slab and strengthening the bridge piers by constructing a 10 cm thick concrete jacket (Fig. 3b).

3. STRENGTHENING OF GIRDERS WITH PRESTRESSED CFRP STRIPS

Retrofitting of the tension zones of the main girders with prestressed CFRP strips was the chosen post-strengthening method to increase the overall load rating of the bridge. The strips were bonded to the bottom surfaces of girders within the main span (Fig. 3b and Fig. 4a) and to the top surface of bridge deck over the girders in the side spans (Fig. 3b and Fig. 4b). The installation comprised forty eight strips of 60×1.4 mm cross-section having the tensile strength of 3200 MPa, *E*-modulus of 160 GPa and ca. 2% ultimate strain. The level of prestress was calculated at 75 kN, inducing ca. 5.6‰ strain in the composite material.

The strips were prestressed using the tested post-strengthening kit. The system is composed of the tensioning device and appropriate prefabricated steel anchorages for clamping the strips. The tensioning device comprises three separately installed elements: guide rails, carriage bolted to the active anchorage and hydraulic jack/bearing plate assembly providing the level of prestress of 170 kN (Fig. 5). With optimum weight of all the components the kit has a small total weight facilitating and speeding up installation.

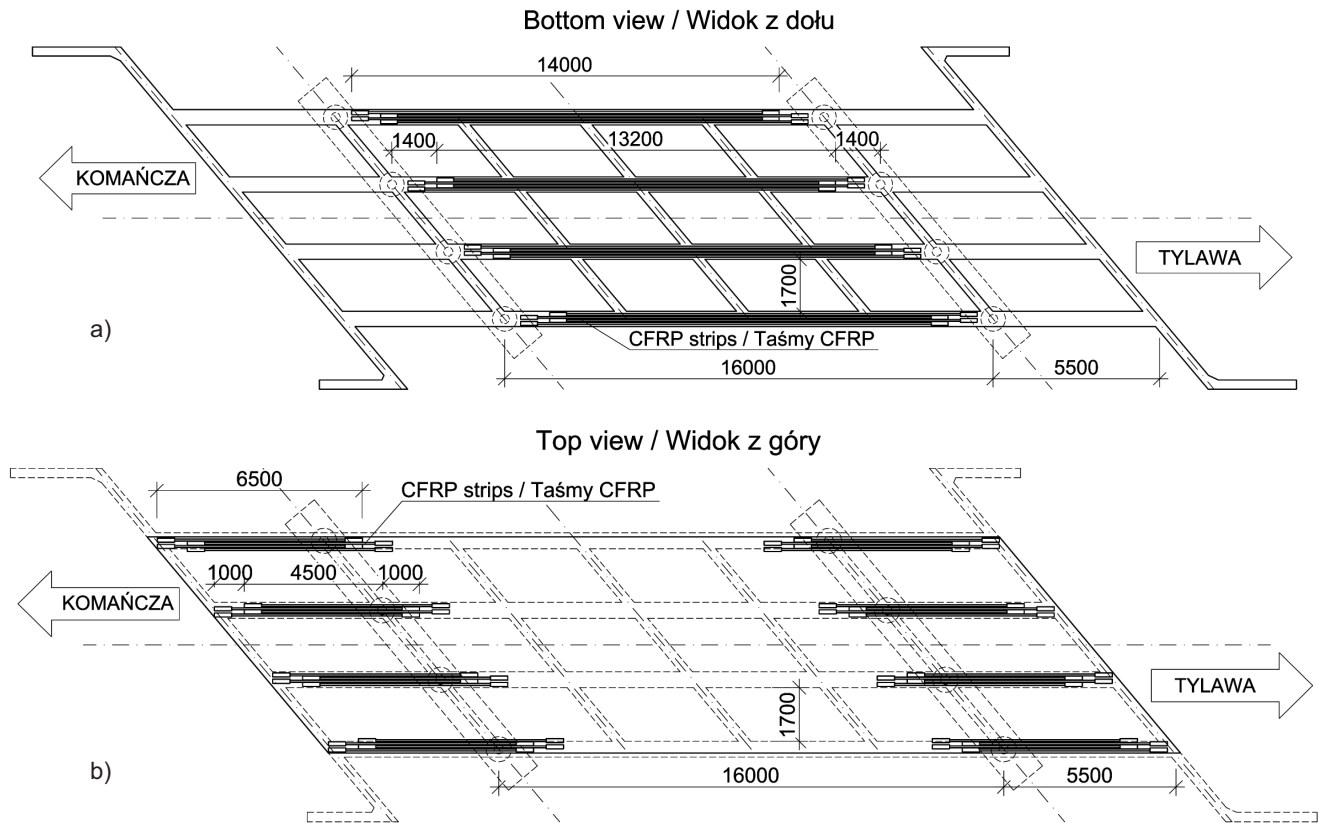


Fig. 4. Layout of strips on the bottom (a) and on the top of girders (b)
 Rys. 4. Schemat rozmieszczenia taśm dolnych w przęśle (a) i górnych na wspornikach (b)

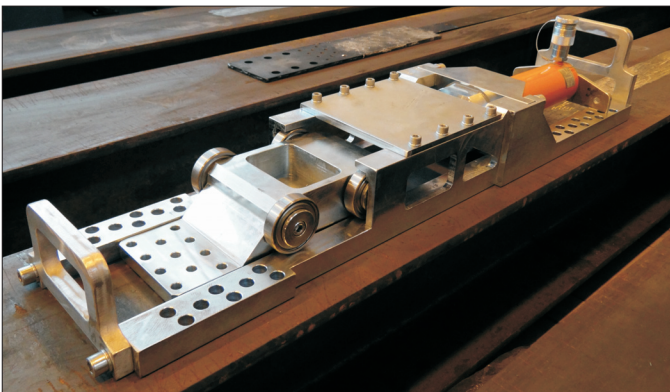


Fig. 5. Tensioning device
 Rys. 5. Urządzenie naciągowe

Do kotwienia taśm zastosowano zakotwienia z blach stalowych, w których taśma kompozytowa mocowana jest za pomocą kleju, nitów i/lub śrub. Schemat budowy zakotwienia przedstawiono na Rys. 6. Typowe zakotwienie jest podzielone na dwa obszary: zewnętrzny i wewnętrzny. Mocowanie taśmy jest zlokalizowane w obszarze wewnętrznym. W obszarze zewnętrznym wykonane są otwory do mocowania

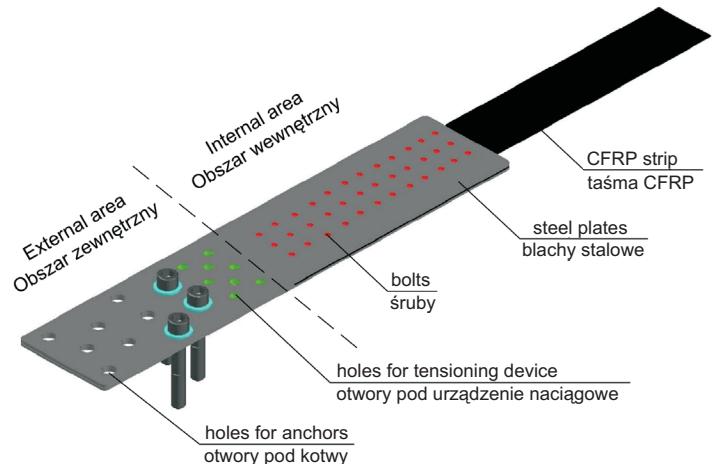


Fig. 6. Active end anchorage
 Rys. 6. Schemat budowy zakotwienia czynnego

The strips are attached to the steel anchor plates with glue, rivets and/or bolts. The anchorage kit is presented schematically in Fig. 6. A typical anchorage kit has two functional areas: external and internal. The strip is clamped within the internal area. The internal area includes holes for anchoring the plate to the concrete surface and threaded

zakotwienia do podłoża oraz otwory gwintowane do mocowania urządzenia naciągowego (tylko w zakotwieniu czynnym). Wyniki badań nośności zakotwienia w warunkach obciążeń statycznych i zmęczeniowych przedstawiono w pracach [12-13].

Taśmy o projektowanych wymiarach zostały dostarczone na budowę w kęgach razem z zakotwieniami wykonanymi w zakładzie prefabrykacji. Ze względu na konieczność wykonania remontu mostu pod ruchem (tj. połową jezdni) instalację taśm na dźwigarach podzielono na trzy etapy. W pierwszym etapie, po sfrezowaniu nawierzchni i usunięciu izolacji zainstalowano taśmy górne na połowie płyty pomostu. W drugim etapie zamontowano wszystkie taśmy dolne w prześle środkowym, a w ostatnim etapie – po zmianie organizacji ruchu – taśmy górne na drugiej połowie pomostu.

Przed instalacją taśm betonowe powierzchnie dźwigarów zostały przygotowane przez szlifowanie, natomiast w przypadku pomostu konieczna była reprofilacja powierzchni płyty (Rys. 7). Po przygotowaniu powierzchni betonu oraz taśm przystąpiono do ich montażu. W pierwszej kolejności taśmy były mocowane do betonu za pomocą zakotwień biernych, następnie kotwiono urządzenie naciągowe do dźwigarów, nakładano klej na taśmie i na betonie oraz naprężano taśmy do odpowiedniej wartości siły sprężającej. Po naprężeniu taśm instalowane były zakotwienia czynne, a taśmy dociskano wałkami do powierzchni belek, usuwając nadmiar kleju. Sekwencję czynności przy montażu taśm przedstawiono na Rys. 8.

holes for mounting the tensioning device (in the active end anchorage only). The anchorage was tested for resistance to static and fatigue loading and the results are presented in [12-13].

Strips with the specified dimensions were supplied to the site in coils together with anchorages prepared at the fabrication shop. Since the bridge was to remain open to traffic (single lane arrangement), the installation of strips on the girder was split in three stages. In the first stage, after milling of the road surface and removal of waterproofing the strips were bonded on one half of the deck from the top. In the second stage the strips were bonded to the girders of the main span and in the third stage – after redirecting the traffic – to the top surface of the other half of the deck.

The surfaces were prepared for installation of strips by grinding – in the case of girders or re-grading of the slab surface to the required profile – in the case of the bridge deck (Fig. 7). Installation started when the surfaces of both concrete and strips were prepared. The process of installation started by fixing the dead end anchorage, followed by anchoring the tensioning device to the girders, application of glue on the mating surfaces of the tape and concrete and finally tensioning the strips to the desired level of prestress. Then the active end anchorage was fixed and the strips were pressed down with rollers against the beam surface to squeeze out excess glue. The strip installation sequence is illustrated in Fig. 8.

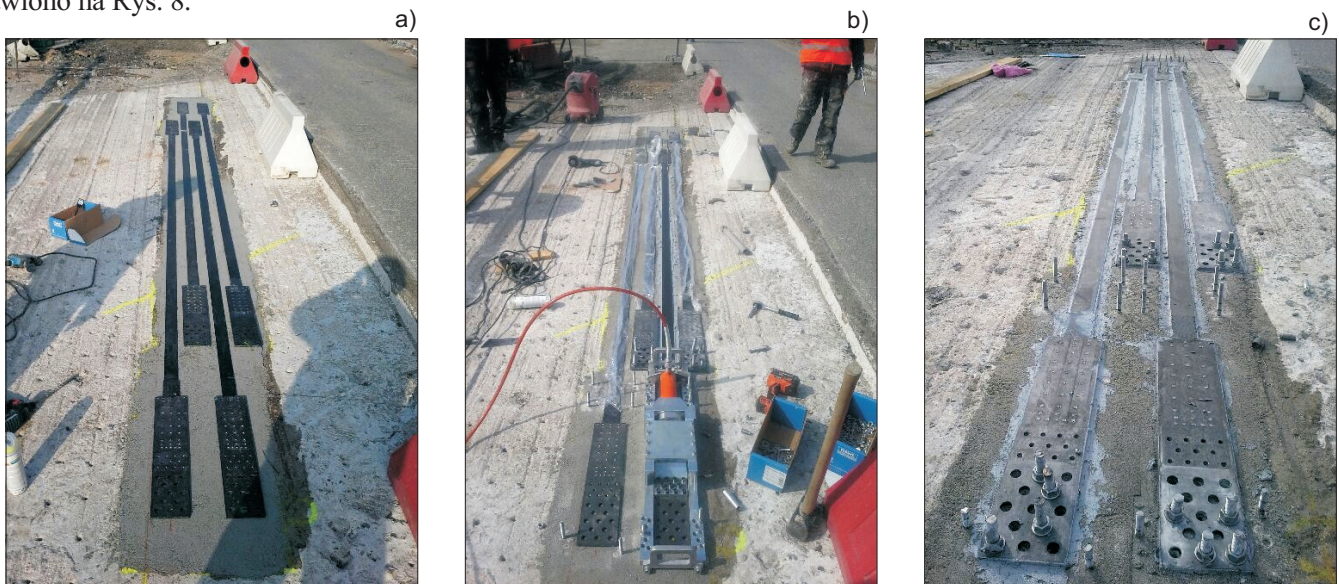


Fig. 7. Installation of strips on the deck surface: a) strips placed on the levelled out surface of the deck, b) prestressing, c) completed installation

Rys. 7. Montaż taśm na pomoście: a) taśmy ułożone na wyrównanej powierzchni płyty, b) sprężanie, c) taśmy po instalacji

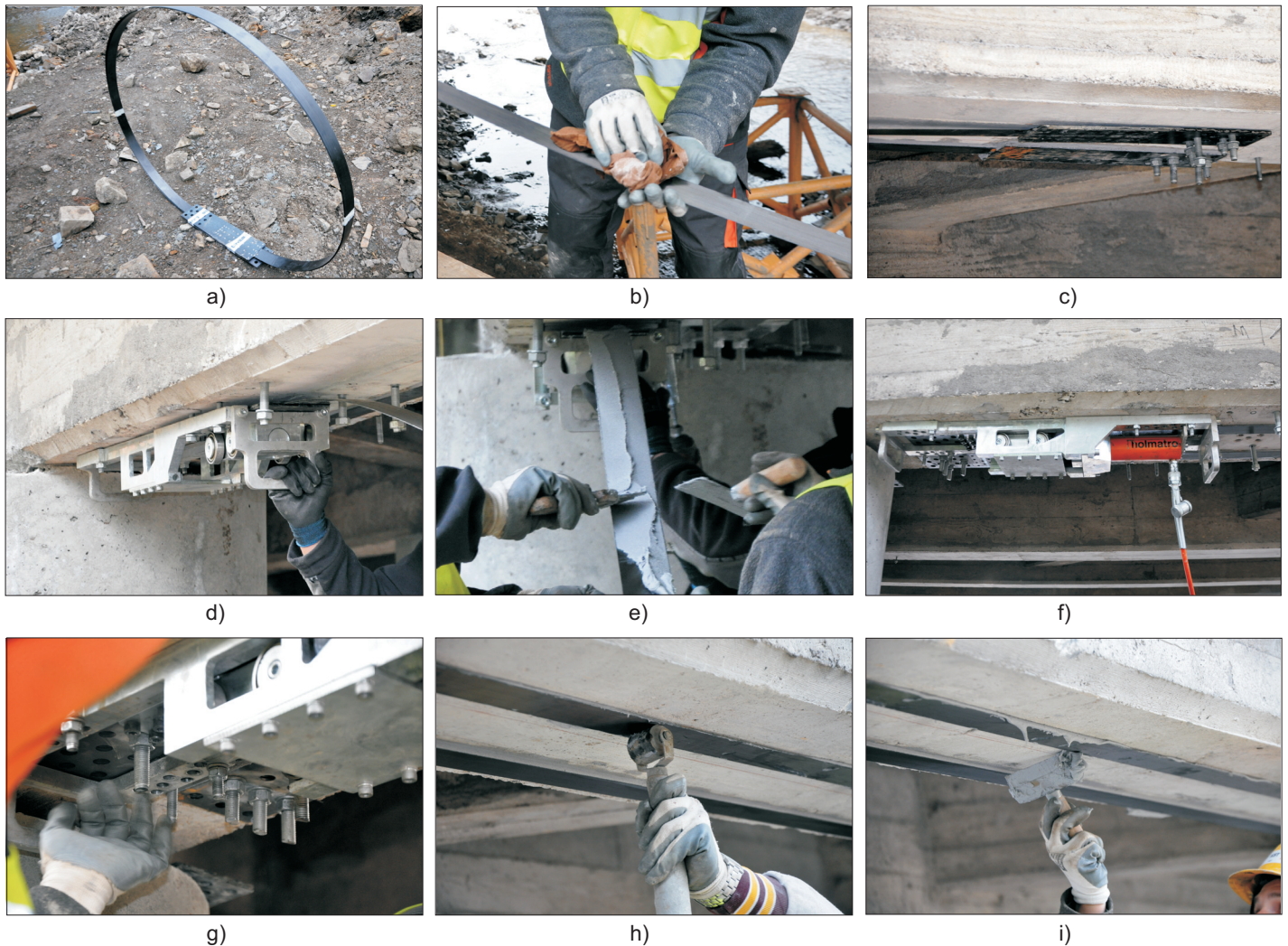


Fig. 8. Installation procedure: a) strips supplied in coils, b) preparation of strip surface, c) installation of passive end anchorage, d) installation of prestressing system, e) application of glue, f) prestressing, g) installation of active end anchorage, h) pressing down the strips, i) removal of excess glue

Rys. 8. Wzmacnianie mostu: a) taśmy zwinięte w kręgi, b) przygotowanie powierzchni taśm, c) montaż zakotwienia biernego, d) instalacja urządzenia naciągowego, e) nakładanie kleju, f) sprężanie, g) montaż zakotwienia czynnego, h) docisk taśmy, i) usuwanie nadmiaru kleju

4. BADANIA MOSTU POD OBCIĄŻENIEM STATYCZNYM

Głównym celem badań mostu było sprawdzenie efektywności wzmocnienia dźwigarów w przęśle środkowym. Badania przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym obciążono most przed wzmocnieniem dźwigarów. Na jednej stronie pomostu zostały sprężone taśmy na przęsłach wspornikowych, wykonano nadbeton wzmacniający oraz nawierzchnię, a na drugiej stronie pomostu została sfrezowana istniejąca nawierzchnia. Drugi etap badań wykonano bezpośrednio po wzmocnieniu dźwigarów, tj. instalacji

4. STATIC LOAD TEST

The main purpose of testing was to check the effect of strengthening in the main span. The tests were conducted in two stages. The first stage was conducted before strengthening of girders. At that time the strips had been installed and prestressed on one half of the deck within the side spans, the concrete overlay had been placed on the deck and the existing road surface had been milled from the other half of the deck. The second stage of testing was conducted right after strengthening the girders that is after installation of the strips on all the four girders within the

taśm na wszystkich czterech dźwigarach w prześle środkowym. W obu etapach badań zastosowano takie samo obciążenie przeszła. Jako środki obciążające wykorzystano dwa samochody samowładowcze o masie z ładunkiem 38 ton każdy. W Tabl. 1 podano uśrednione wartości nacisków na osie oraz rozstawów osi obu pojazdów obciążających. Pojazdy zostały ustawione na połowie pomostu bezpośrednio na płycie żelbetowej (Rys. 9).

main span. The test load applied on the span was the same in both stages. The load was applied by two loaded dump trucks weighing 38 tonnes each. The average axle load values and wheel bases of both test vehicles are given in Table 1. The test vehicles were position at the half-length of the roadway directly on the concrete slab (Fig. 9).

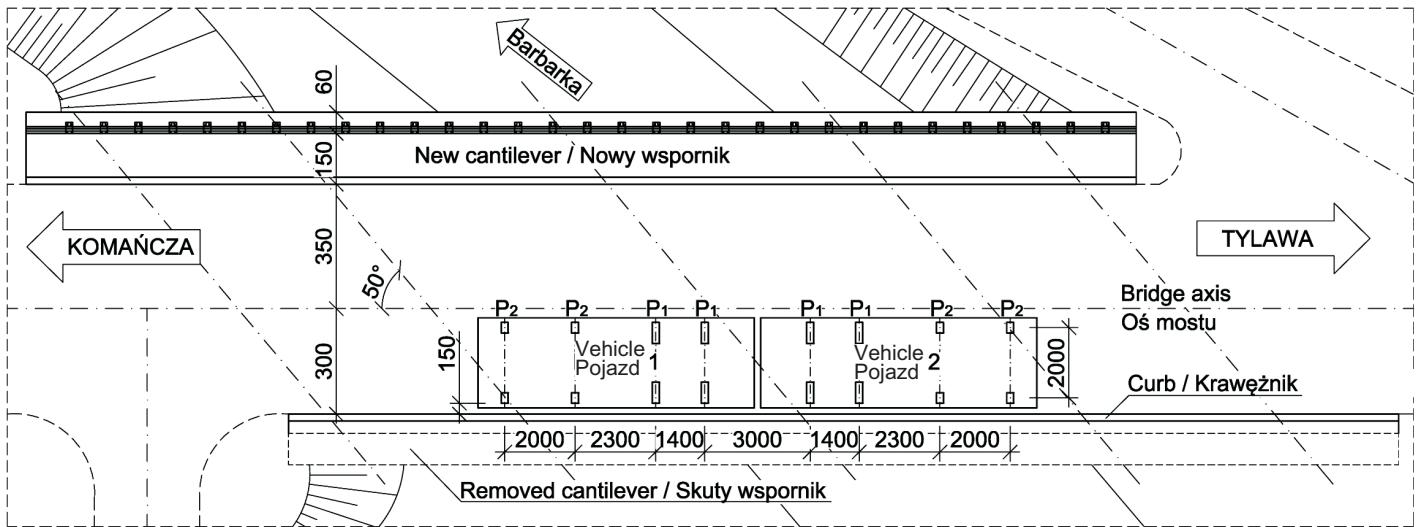


Fig. 9. Load distribution diagram during the test
Rys. 9. Schemat ustawienia obciążenia na moście

Podczas badań mostu wykonywano pomiary przemieszczeń pionowych w środku rozpiętości dwóch dźwigarów położonych pod obciążoną częścią jezdni. W tych samych przekrojach środkowych dźwigarów mierzono wartości odkształceń betonu, stali zbrojeniowej i kompozytu taśm. Kontrolowano także osiadania podpór. Lokalizację punktów pomiarowych przedstawiono na Rys. 10. Do pomiaru przemieszczeń pionowych dźwigarów wykorzystano czujniki zegarowe o zakresie 80 mm i dokładności 0,01 mm, które zostały umocowane na statywach pod badanym mostem (Rys. 11a). Do pomiaru odkształceń wykorzystano tensometry elektrooporowe oraz zestaw wzmacniaczy pomiarowych z komputerem wyposażonym w oprogramowanie rejestrujące pomiary (Rys. 11b, Rys. 11c). Odkształcenia w betonie mierzono tensometrami elektrooporowymi typu RL-50/500, a odkształcenia stali i kompozytu tensometrami typu TFs-10/120. Tensometry do pomiaru odkształceń stali zostały przyklejone do sfrezowanych prętów zbrojeniowych (po odkuciu otuliny betonowej). We wszystkich przypadkach pomiarów tensometrycznych wpływy temperatury zostały zredukowane przez zastosowanie dodatkowych tensometrów kompensacyjnych. Osiadania podpór kontrolowano

Table 1. Schematic of the test vehicle
Tablica 1. Schemat pojazdu obciążającego

Test vehicle schematic Schemat pojazdu	Axle load Naciski na osie	Wheel base Rozstaw osi
	$P_1 = 11500 \text{ kg (112.8 kN)}$	$d_1 = 1.50 \text{ m}$
		$d_2 = 1.40 \text{ m}$
	$P_2 = 7500 \text{ kg (73.6 kN)}$	$d_3 = 2.30 \text{ m}$
		$d_4 = 2.00 \text{ m}$

During the load test the deflections were measured at the mid-span of the two girders located under the loaded half of the roadway. The strains of the concrete, the reinforcing steel and the strips were measured at the same mid-span section. Pier settlement was also monitored. The distribution of measuring points is presented in Fig 10. The deflections of girders were measured with dial gauges with 80 mm displacement range and 0.01 mm resolution, mounted on tripods under the bridge (Fig. 11a). The strains were measured with electrical resistance strain gauges coupled with a set of strain gauge amplifiers and a computer equipped with software for collecting the measurement data (Fig. 11b and Fig. 11c). The types of strain

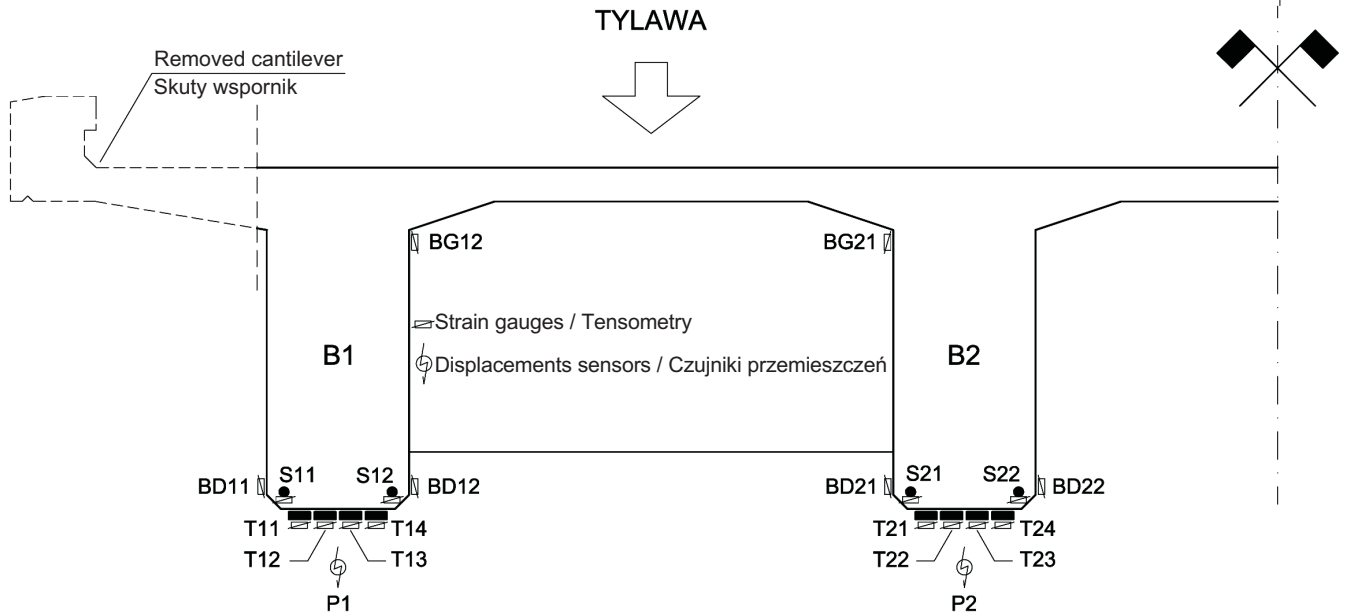
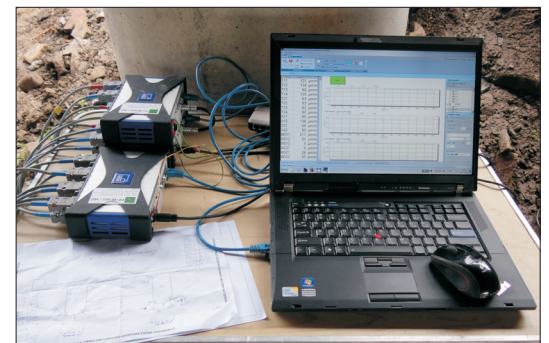


Fig. 10. Measuring point location

Rys. 10. Lokalizacja punktów pomiarowych



b)



c)

Fig. 11. Dial gauges for measuring deflections (a) and a set of electrical resistance strain gauges (b) with data acquisition system (c)

Rys. 11. Czujniki zegarowe do pomiaru przemieszczeń (a) oraz zestaw tensometrów elektrooporowych do pomiaru odkształceń (b) z systemem rejestrowania danych (c)

za pomocą niwelacji precyzyjnej. Przed wjazdem samochodów na obiekt zostały wykonane odczyty zerowe, a następnie, po ustawieniu i stabilizacji obciążenia, wykonywano odczyty w odstępach 10 minut aż do całkowitej stabilizacji mierzonych wielkości. Po odciążeniu przęsła odczytano wartości przemieszczeń i odkształceń trwałych.

5. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W celu oceny skuteczności i efektywności wzmocnienia mostu wykonano analizę porównawczą wartości przemieszczeń (ugięć), odkształceń betonu, stali zbrojeniowej oraz kompozytu, zmierzonych pod obciążeniem mostu przed i po

gauges were RL-50/500 – for concrete and TFs-10/120 – for steel and composite material. The strain gauges used for steel were glued to the milled surfaces of rebars exposed after removing of the concrete cover. In all cases the influence of temperature was reduced by providing additional unstrained (“dummy”) gauges. The settlement of the bridge supports was monitored by using precise levelling technique. The first measurement was taken before the test vehicles entered the bridge to obtain the reference value and then, after positioning vehicles and waiting for stabilisation, the successive measurements were taken at 10 minute intervals until the readings have stabilised. The displacement and residual strain values were read after unloading of the bridge.

jego wzmocnieniu. W wyniku badań porównawczych nie stwierdzono praktycznie żadnych zmian ugięć dźwigarów wskutek ich wzmocnienia naprężonymi taśmami CFRP. Ugięcia w pierwszym (przed wzmocnieniem) i drugim (po wzmocnieniu) etapie badań wynosiły odpowiednio 2,02 mm i 2,04 mm w przypadku dźwigara skrajnego B1 oraz 1,80 mm i 1,82 mm dla dźwigara środkowego B2. Przyrost ugięcia w kolejnych etapach obciążenia przebiegał podobnie. Takiego wyniku można się było jednak spodziewać, gdyż wzmocnianie mostowych dźwigarów żelbetowych (tj. o dużym, masywnym przekroju poprzecznym) taśmami CFRP nie wpływa na ich sztywność. Przekrój taśmy stanowi bowiem niewielki ułamek procenta przekroju dźwigara, a taka mała zmiana przekroju nie wpływa na zmianę momentu bezwładności, a co za tym idzie – zmianę sztywności dźwigara. Brak redukcji ugięcia można tłumaczyć także tym, że zastosowane obciążenie badawcze generowało stosunkowo nieduże siły wewnętrzne w porównaniu do nośności dźwigarów. Obciążenia badawczego nie można było jednak zwiększyć ze względu na wymaganą technologię remontu (tj. pod ruchem, połową jezdni) oraz geometrię przęsła (rozpiętość: 16,0 m, skos: 50°). Jednakże w przypadku badanego mostu ugięcia belek pod obciążeniem były zdecydowanie mniejsze od wartości dopuszczalnych ($L/800$ wg [18]), a zastosowane wzmocnienie nie miało na celu redukcji deformacji mostu.

Zestawienie wyników pomiarów tensometrycznych odkształceń zamieszczono w Tabl. 2, natomiast na Rys. 12 zamieszczono porównanie uśrednionych wykresów odkształceń w przekroju dźwigara B1 i B2, przed i po wykonaniu wzmocnienia taśmami. Wykresy zostały sporządzone dla średnich wartości odkształceń z tensometrów zlokalizowanych na prętach zbrojenia i taśmach CFRP w dolnej części przekroju oraz tensometrów BG12 i BG21, zlokalizowanych na spodniej części płyty pomostu. Tak zlokalizowane tensometry znalazły się w pobliżu osi obojętnej dźwigara, stąd wartości odkształceń betonu są niewielkie. Ze względu na prowadzone prace budowlane tensometrów do pomiaru odkształceń w betonie nie można było umieścić na płycie pomostu. W analizie pominięto wartości odkształceń betonu na spodzie dźwigarów (tensometry BD12, BD21 i BD22) ze względu na fakt, że znacząco one odbiegały od wartości otrzymanych dla zlokalizowanych na zbliżonym poziomie prętów zbrojenia stalowego i taśm kompozytowych. Różnice te były spowodowane tym, że belki żelbetowe mostu pracowały w fazie zarysowanej (po 50 latach eksploatacji), a tensometry przyklejone na betonie znalazły się na odcinkach belki pomiędzy rysami.

5. PRESENTATION AND ANALYSIS OF THE TEST RESULTS

In order to verify the strengthening effect and the effectiveness of the method a comparative analysis was carried out using the values of deflections and strains of concrete, reinforcing steel and composite material caused by loading the bridge before and after post-strengthening. Comparison of deflections of girders showed hardly any effect of strengthening them with prestressed CFRP strips on the deflection values. The deflections in the first and second stage of testing (i.e. before and after strengthening) were 2.02 mm and 2.04 mm respectively for the outer girder B1 and 1.80 mm and 1.82 mm respectively for the inner girder B2. The increase of deflections during progressive loading followed a similar pattern. These results are in line with expectations because the CFRP strips do not increase significantly the stiffness of massive, large cross-section reinforced-concrete girders of bridges. Note that the cross-section of the CFRP strip makes up just a small fraction of a percent of the girder cross-section and such a small modification cannot change the moment of inertia, and consequently the girder stiffness. No reduction of the deflections can also be attributed to the relatively small (in relation to the load capacity of girders) values of internal forces induced by the test load. However, the test load could not be higher due to the required renovation method (i.e. half of the roadway to remain open to traffic) and the span geometry (16.0 m span length and 50° crossing angle). However, for the bridge in question the beam deflections under the load were considerably smaller than the permitted values ($L/800$ according to [18]) and reducing of deflections was not the objective of the designed post-strengthening.

The strain gauge readings are compiled in Table 2 and Fig. 12 compares the averaged strain distribution curves determined for the cross-sections of girders B1 and B2 before and after strengthening. The curves were plotted using average values obtained from the strain gauges placed on the reinforcing bars and on the CFRP strips at the bottom of the girder cross-section and from the strain gauges BG12 and BG21, measuring the deck slab bottom strains. These locations are close to the neutral axis of the girder thus giving small values of concrete strains. Due to the construction work in progress the strain gauges intended to measure the strains of concrete could not be placed on the upper surface of the deck slab. Concrete strains on the bottom of girders (strain gauges BD12, BD21 and BD22) were not considered as being considerably different from

Table 2. Strain gauge readings
 Tablica 2. Wyniki pomiarów tensometrycznych
 odkształceń

Item Mierzona wielkość	Girder Belka	Measuring point Punkt pomiarowy	Strains / Odkształcenia		Young's modulus Moduł Younga [GPa]	Stresses / Naprężenia	
			stage / etap I	stage / etap II		stage / etap I	stage / etap II
			[‰]	[‰]		[MPa]	[MPa]
Concrete strains Odkształcenia betonu	B1	BG12	0.006	0.003	29	0.17	0.09
		B2	BG21	0.004		0.003	0.12
	B1	BD11 ^{*)}	–	–		–	–
		BD12	0.045	0.055		1.31	1.60
	B2	BD21	0.014	0.024		0.41	0.70
		BD22	0.027	0.038		0.78	1.10
Reinforcing steel strains Odkształcenia stali zbrojeniowej	B1	S11	0.136	0.093	210	28.6	19.5
		S12	0.159	0.145		33.3	30.5
	B2	S21	0.115	0.079		24.2	16.6
		S22	0.129	0.099		27.1	20.8
CFRP strips strains Odkształcenia taśm CFRP	B1	T11	–	0.125	160	–	20.0
		T12	–	0.144		–	23.0
		T13	–	0.070		–	11.2
		T14	–	0.124		–	19.8
	B2	T21	–	0.072		–	11.5
		T22	–	0.091		–	14.6
		T23	–	0.100		–	16.0
		T24	–	0.099		–	15.8

^{*)} sensor failure / uszkodzenie tensometru

Na podstawie wykresów na Rys. 12 można wnioskować, że również naprężenia w betonie na górnej powierzchni płyty pomostu są niewielkie, znacząco mniejsze od charakterystycznej wytrzymałości betonu na ściskanie, równej według badań 20 MPa. Redukcję naprężeń w poszczególnych prętach zbrojenia stalowego przedstawiono na Rys. 13. Wartości naprężeń rozciągających w zbrojeniu uzyskane w I etapie badań wynoszą średnio 28,3 MPa. W II etapie naprężenia te zostały zredukowane do średnio 21,8 MPa. Zatem średnia redukcja naprężeń w stali zbrojeniowej na skutek wzmocnienia dźwigarów wynosiła ok. 23%. Zdecydowanie mniejszą redukcję naprężeń stali zbrojeniowej w punkcie S12 (9%) w stosunku do pozostałych prętów (na poziomie 20-30%) należy tłumaczyć raczej błędem lub anomalią pomiarową, a nie zmniejszonym efektem wpływu wzmocnienia. Zarejestrowane średnie naprężenia w taśmach CFRP wynosiły 16,5 MPa. Łącznie z naprężeniami

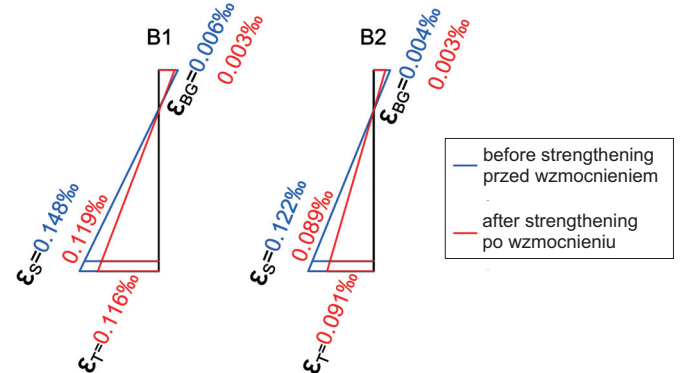


Fig. 12. Reduction of strains in the cross section as a result of strengthening with CFRP strips (ϵ_{BG} , ϵ_S , ϵ_T – average strains of concrete, reinforcing steel and CFRP strips)

Rys. 12. Redukcja odkształceń w przekroju na skutek wzmocnienia taśmami (ϵ_{BG} , ϵ_S , ϵ_T – średnie odkształcenia betonu, stali zbrojeniowej i taśm CFRP)

wprowadzonymi w wyniku sprężenia (ok. 870 MPa) dają to stopień wyęźnienia kompozytu na poziomie 28% jego wytrzymałości na rozciąganie.

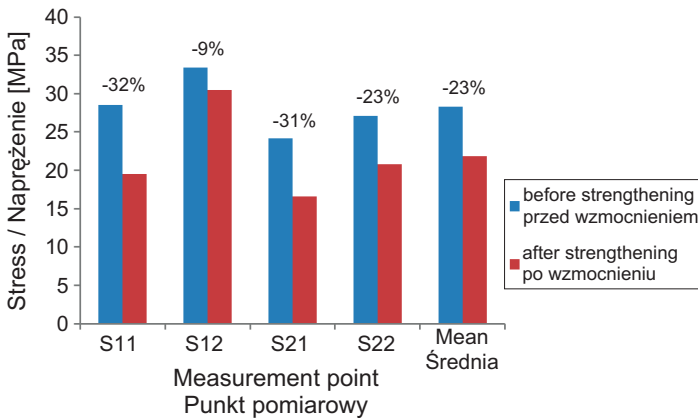


Fig. 13. Reduction of stresses induced in reinforcing bars
Rys. 13. Redukcja naprężeń w prętach zbrojeniowych

6. WNIOSKI

W artykule przedstawiono pierwsze wzmocnienie mostu żelbetowego naprężonymi taśmami przy użyciu nowego systemu wzmocniania konstrukcji budowlanych oraz wyniki badań efektywności wzmocnienia i skuteczności zastosowania systemu. Badania przeprowadzono pod próbnym obciążeniem obiektu pojazdami samochodowymi, wykonanym przed i po zastosowaniu wzmocnienia. Wyniki badań wykazały, że pomimo niewielkiego wyęźnienia dźwigarów żelbetowych podczas badań możliwe było zarejestrowanie pozytywnych efektów wzmocnienia i potwierdzenie jego skuteczności. Po wzmocnieniu mostu sprężonymi taśmami CFRP zredukowano odkształcenia/naprężenia w prętach zbrojeniowych średnio o 23%. Natomiast zarejestrowane odkształcenia w taśmach CFRP wskazują na fakt, że zostały one skutecznie włączone do współpracy przy przenoszeniu obciążeń. Jednocześnie wykorzystanie kompozytu przy wzmocnieniu ze wstępnym sprężeniem było w tym konkretnym przypadku umiarkowane, znacznie poniżej możliwości, które daje zastosowany system wzmocniania. Wynika to jednak z założeń projektowych oraz ograniczeń konstrukcyjnych istniejącego mostu.

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można uznać, że wzmocnienie mostu było efektywne w zakresie przewidzianym założeniami projektowymi, a testowany system wzmocniający został skutecznie wdrożony in-situ jako kolejna technologia wzmocniania istniejących mostów betonowych. Jednocześnie dzięki wzmocnieniu dźwigarów, poszerzeniu pomostu oraz wykonaniu innych robót remon-

It transpires from the curves in Fig. 12 that also the stresses induced in concrete in the upper surface of the deck are small, considerably smaller than the experimentally determined characteristic compressive strength of concrete of 20 MPa. Reduction of stresses in the respective rebars is presented in Fig. 13. The average value of tensile stresses induced in the reinforcement in the first stage of testing was 28.3 MPa. In the second stage this value dropped to 21.8 MPa. This gives ca. 23% average reduction of stresses in the reinforcing steel as a result of strengthening the girders. This reduction was considerably smaller at the point No. S12 (9%) as compared to the other rebars (20-30%). However, this should be attributed to measurement error or abnormality rather than to the effect of strengthening. The average value of stresses induced in the CFRP strips is 16.5 MPa. When added to the stresses induced by prestressing (ca. 870 MPa), it gives the total stress equivalent to 28% of the ultimate tensile strength of the material.

6. CONCLUSIONS

This paper describes the first in-field application of a newly developed post-strengthening system using prestressed strips, and the results of testing to check the effectiveness of strengthening and in-field performance of the system. The measurements were taken before and after installation on the bridge structure loaded with the test vehicles. According to the test results, even at load which is relatively small as against the carrying capacity of reinforced concrete girder, it was possible to observe desired effects of strengthening and to confirm the effectiveness of strengthening technology. Prestressed CFRP strips reduced the strains/stresses in the reinforcement bars on average by 23%. Besides, the recorded strains of CFRP strips indicate their participation in the transfer of loads. Attention is drawn to a moderate degree of capturing the potential of the system in consideration. The factors responsible for that are the limitations imposed by the design of the renovation project and structural constraints of the bridge.

The test results allow us to conclude that the strengthening method proved to be efficient by attaining the design objectives and the system was successfully implemented in the field, becoming yet another available technique of post-strengthening the existing concrete bridges. Simultaneously with girders strengthening, deck widening and various concrete repairs performed as part of the project it was possible to increase the load rating of the bridge and improve its operating parameters.

towych możliwe było znaczące podniesienie klasy nośności mostu oraz poprawa jego parametrów użytkowych.

INFORMACJE DODATKOWE

Badania mostu zostały zrealizowane w ramach projektu naukowo-badawczego pt.: „Innowacyjny system wzmacniania konstrukcji budowlanych naprężonymi taśmami z kompozytów węglowych”, nr projektu POIG.01.03.01-18-010/12. Projekt był współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (PO IG).

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Meier U.*: Carbon Fiber - Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering. *Structural Engineering International*, **2**, 1, 1992, 7-12
- [2] *Meier U., Deuring M.*: The Application of Fiber Composites in Bridge Repair. *Strasse und Verkehr*, **77**, 9, 1991, 534-535
- [3] *Siwowski T., Radomski W.*: Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu. *Inżynieria i Budownictwo*, **54**, 7, 1998, 382-388
- [4] *Andrä H.P., Maier M.*: Post-strengthening with Externally Bonded Prestressed CFRP Strips. *Conference Proceedings of 16th Congress of IABSE, International Association for Bridge and Structural Engineering*, Lucerne, 7, 2000, 1507-1514
- [5] *Suter R., Jungo D.*: Vorgespannte CFK Lamellen zur Verstärkung von Bauwerken. *Beton und Stahlbetonbau*, **96**, 5, 2001, 350-358
- [6] *Schwegler G., Berset T.*: The Use of Prestressed CFRP-Laminates as Post-Strengthening. *Conference Proceedings of 16th Congress of IABSE, International Association for Bridge and Structural Engineering*, Lucerne, 7, 2000, 1458-1465
- [7] *Stoecklin I., Meier U.*: Strengthening of Concrete Structures with Prestressed and Gradually Anchored CFRP Strips. *Proceedings of 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures*, Singapore, 2003, 1321-1330
- [8] *Kotynia R., Michels J., Staśkiewicz M., Czaderski C., Motavalli M.*: Pionierskie wzmocnienie kablobetonowych dźwigarów przy użyciu naprężonych taśm kompozytowych kotwionych metodą gradientową w moście przez rzekę Pilnę w Szczercowskiej Wsi. *Konferencja Dni Betonu, Wisła*, 2014, 203-210
- [9] *Łagoda M.*: Wzmacnianie mostów przez doklejanie elementów. *Seria: Inżynieria Lądowa, monografia 322*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2005
- [10] *Siwowski T., Michałowski J., Błazewicz S.*: Nowy system sprężania taśm kompozytowych CFRP do wzmacniania konstrukcji żelbetowych. *Inżynieria i Budownictwo*, **66**, 3, 2010, 152-156
- [11] *Siwowski T., Żółtowski P.*: Strengthening Bridges with Prestressed CFRP Strips. *SSP Journal of Civil Engineering*, **7**, 1, 2012, 79-86
- [12] *Paśko P., Piątek B., Siwowski T.*: Badania zakotwień w systemie wzmacniania konstrukcji sprężonymi taśmami CFRP. *Budownictwo i Architektura*, **13**, 3, 2014, 143-150
- [13] *Piątek B., Siwowski T.*: Badania statyczne i zmęczeniowe zakotwień sprężonych taśm CFRP do wzmacniania konstrukcji budowlanych. *Inżynieria i Budownictwo*, **72**, 1, 2016, 24-28
- [14] *Normatyw techniczny projektowania mostów na drogach samochodowych. Obciążenia ruchome. Ministerstwo Transportu Drogowego i Lotniczego*, Warszawa, 1956
- [15] *PN-58/B-03261 Betonowe i żelbetowe konstrukcje mostowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*
- [16] *PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków*
- [17] *PN-85/S-10030 Obiekty mostowe. Obciążenia*
- [18] *PN-91/S-10042 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Projektowanie*

ACKNOWLEDGEMENT

The testing of the bridge was done within the framework of the research project named Innovative System for Strengthening of Structures with Prestressed Strips of Carbon Fibre Reinforced Composites, project No. POIG.01.03.01-18-010/12. The project was co-funded by the European Union under the Innovative Economy Operational Programme.