



AGNIESZKA WIATER¹⁾
TOMASZ SIWOWSKI²⁾

LIGHTWEIGHT CONCRETE BRIDGE DECK SLABS REINFORCED WITH GFRP COMPOSITE BARS

PŁYTY POMOSTOWE Z BETONU LEKKIEGO ZBROJONE PRĘTAMI KOMPOZYTOWYMI GFRP

STRESZCZENIE. Trwałość typowych żelbetonowych płyt pomostowych jest kilkukrotnie krótsza od trwałości dźwigarów głównych lub innych podstawowych elementów obiektów mostowych. Jest to związane ze stale wzrastającymi obciążeniami od ruchu drogowego oraz z agresywnością środowiska, potęgowaną koniecznością zimowego utrzymania mostów. W ciągu ostatnich kilkunastu lat opracowano liczne rozwiązania technologiczne, materiałowe i konstrukcyjne, służące wydłużeniu życia technicznego płyt pomostowych obiektów mostowych. Należą do nich m.in. zastosowanie betonów lekkich oraz wykorzystanie zbrojenia z prętów kompozytowych. Łącząc ze sobą te dwa materiały w płyty z betonu lekkiego zbrojone prętami kompozytowymi GFRP, można otrzymać synergję wysokiej wytrzymałości i trwałości kompozytu GFRP oraz redukcji ciężaru własnego mostu. W pracy przedstawiono przegląd zastosowań betonu lekkiego i prętów kompozytowych GFRP w płytach pomostowych obiektów mostowych. Zaprezentowano również nieliczne jeszcze prace badawcze nad tym rozwiązaniem konstrukcyjnym, zakończone pierwszym krajowym wdrożeniem na moście drogowym. Podano także kierunki niezbędnych dalszych badań w celu opracowania zasad projektowania oraz umożliwienia szerszego zastosowania tego typu płyt pomostowych.

SŁOWA KLUCZOWE: badania wytrzymałościowe, beton lekki, obiekt mostowy, płyta pomostu, pręty GFRP.

ABSTRACT. The durability of typical reinforced concrete bridge deck slabs is several times shorter than the durability of the main girders or other basic elements of bridges. This is due to ever-increasing traffic loads and the aggressiveness of the environment, which is intensified by the need for winter maintenance of bridges. Over the past several years, numerous technological, material and construction solutions have been developed in order to extend the technical life of the deck slabs of bridge structures. These include, among others, the use of lightweight concrete and also reinforcements made of composite bars. By combining these two materials into lightweight concrete slabs that are reinforced with GFRP composites, it is possible to obtain a synergy of high strength and durability of GFRP composite and also a reduction of the self-weight of a bridge. The paper presents an overview of the applications of lightweight concrete and GFRP composite bars in the deck slabs of bridge structures. Limited research on this constructional solution, which was completed with its first national implementation on a road bridge, was also presented. Moreover, the directions of further studies, which are necessary to develop the design principles that would enable wider use of this type of bridge deck slabs, were also provided.

KEYWORDS: bridge, bridge deck slab, GFRP rebars, lightweight concrete, structural testing.

DOI: 10.7409/rabdim.017.018

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

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

1. WPROWADZENIE

Płyta pomostu to element konstrukcyjny drogowego obiektu mostowego, który przekazuje i rozkłada bezpośrednie obciążenie kołami pojazdu samochodowego na belki pomostu i dźwigary główne. Najbardziej rozpowszechnionym rodzajem płyt pomostowych jest płyta żelbetowa o grubości 20 - 30 cm wykonywana monolitycznie i zespolona z belkami pomostu lub bezpośrednio z dźwigarami głównymi. Poprawnie zaprojektowana i utrzymywana żelbetowa płyta pomostu może bezpiecznie przenosić obciążenia od ruchu drogowego przez kilkadziesiąt lat eksploatacji obiektu. Jednakże ze względu na stale zwiększające się natężenie ruchu pojazdów ciężkich oraz wzrastającą agresywność środowiska potęgowaną przez konieczność zimowego utrzymania mostów, trwałość płyt żelbetowych jest kilkukrotnie krótsza od trwałości dźwigarów głównych lub innych podstawowych elementów obiektów mostowych. Dla przykładu w USA średnia trwałość żelbetowej płyty pomostu wynosi 20 lat co powoduje, że około 40% całkowitych kosztów remontów mostów w USA jest ponoszonych w bezpośrednim związku z degradacją płyt pomostowych [1]. Z kolei w Południowej Korei średnia długość życia technicznego żelbetowej płyty pomostu wynosi 16 lat, natomiast dźwigarów głównych 40 lat [2]. O trwałości płyt pomostów obiektów mostowych w Polsce można wnioskować np. na podstawie oceny stanu mostów przeprowadzanej corocznie przez GDDKiA na sieci dróg krajowych [3]. W sześciopunktowej skali ocen średnia ocena dla konstrukcji pomostów w latach 2011-2015 wyniosła 3,42- 3,58 (Rys. 1), gdzie ocena 3 oznacza stan niepokojący, tj. pomost wykazuje uszkodzenia, których nienaprawienie spowoduje skrócenie okresu bezpiecznej eksploatacji.

1. INTRODUCTION

A bridge deck slab is a structural element of a road bridge and it transfers and distributes the direct loads of a vehicle's wheels to the beams and main girders of a bridge. The most common type of bridge deck slab is a reinforced concrete slab with a thickness of 20 to 30 cm that is made monolithically, and either combined with deck beams, or directly with main girders. An appropriately designed and maintained reinforced concrete deck slab can safely carry loads from road traffic for several decades of operation. However, due to the constantly increasing traffic of heavy vehicles and the increasing aggressiveness of the environment, which is intensified by the need for winter maintenance of bridges, the durability of reinforced concrete slabs is several times shorter than the durability of the main girders or other basic elements of bridges. For example, in the USA, the average lifetime of a reinforced concrete bridge deck slab is equal to 20 years, which means that approximately 40% of the total cost of bridge repairs in the USA is related directly to the degradation of bridge deck slabs [1]. In turn, in South Korea, the average lifespan of a reinforced concrete slab is 16 years, while for main girders it is 40 years [2]. The durability of the deck slabs of bridge structures in Poland can be evaluated e.g. on the basis of the assessments of a bridge's technical condition that are carried out annually by the General Directorate for National Roads and Motorways (GDDKiA) [3]. In the six-step rating scale, the average rating for deck structures in 2011-2015 was 3.42-3.58 (Fig. 1), where a rating of 3 indicates a worrying condition, i.e. a bridge deck slab exhibits damage that if not repaired will result in a shorter lifespan.

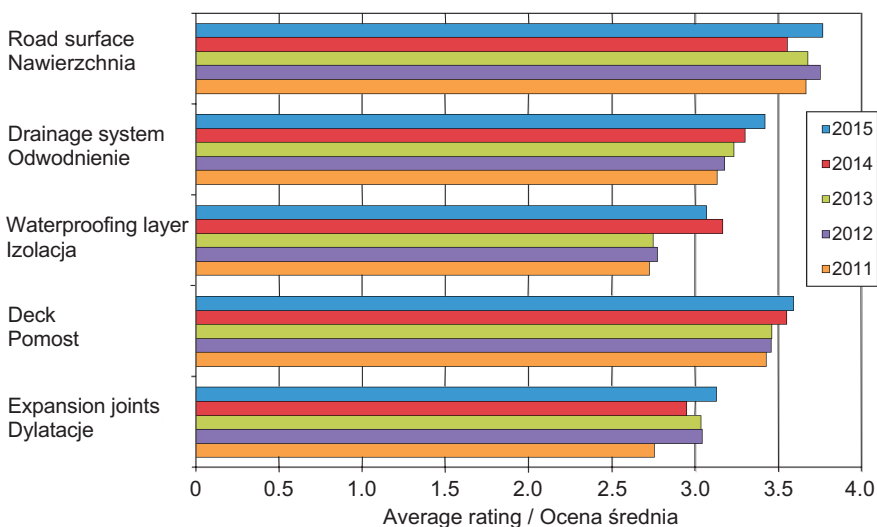


Fig. 1. The average assessment of the technical condition of the deck elements in the years 2011-2015 (according to GDDKiA [3])
Rys. 1. Średnia ocena stanu technicznego elementów pomostu w latach 2011-2015 (wg GDDKiA [3])

Decyzja o całkowitej wymianie zniszczonej płyty pomostu w istniejącym obiekcie mostowym jest podejmowana zwykle w ostateczności, tj. po wykorzystaniu innych, możliwych w danym przypadku działań remontowych. W USA uważa się, że wymiana płyty pomostu jest niezbędna wówczas, gdy jej roczny koszt utrzymania przewyższa zdyskontowany koszt nowej płyty, obliczony w stosunku rocznym dla całego życia technicznego obiektu [4]. Konsekwencją decyzji o całkowitej wymianie płyty jest wybór nowego systemu konstrukcyjnego, który zastąpi stary i zniszczony pomost, zapewniając jednocześnie uzyskanie wymaganych parametrów użytkowych oraz trwałości.

Wybór najlepszego rozwiązania spośród wielu, spełniających wymagania w zakresie przede wszystkim bezpiecznego przenoszenia zwiększonych obciążeń, wysokiej trwałości i niskiego kosztu utrzymania, nie jest sprawą łatwą. Stosuje się w tym celu różne techniki optymalizacyjne, bazujące na analizie kosztów w ciągu całego życia technicznego obiektu (LCCA, ang. *Life Cycle Cost Analysis*) oraz na ocenie niezawodności. Ogólne omówienie technik i analiz optymalizacyjnych przy wyborze pomostu przedstawiono m.in. w pracach [5] i [6]. W ciągu ostatnich kilkunastu lat opracowano i wdrożono liczne rozwiązania technologiczne, materiałowe i konstrukcyjne, służące wydłużeniu życia technicznego płyt pomostowych obiektów mostowych. W pracach [7] i [8] zostały przedstawione nowe rodzaje płyt pomostów, które w ostatnich latach są stosowane głównie w przebudowach i modernizacjach istniejących obiektów mostowych. Wśród tych rozwiązań można wymienić m.in. rozwiązania z materiałów konwencjonalnych (stal i beton wysokowartościowe, beton z inhibitorami korozji, wysokowartościowe betony lekkie) czy też zastosowanie materiałów niekonwencjonalnych, takich jak stopy aluminium, kompozyty FRP czy drewno klejone.

Z szerokiej gamy przedstawionych w pracach [7] i [8] rozwiązań materiałowo - konstrukcyjnych niekonwencjonalnych pomostów mostów drogowych jako przedmiot prac naukowo - badawczych prowadzonych w Zakładzie Dróg i Mostów Politechniki Rzeszowskiej wybrano betonowe płyty pomostowe, prefabrykowane lub monolityczne, wykonane z betonu lekkiego LWC (ang. *Lightweight Concrete*) i zbrojone prętami kompozytowymi GFRP (ang. *Glass Fibre Reinforced Polymer*). W obecnych warunkach krajowych wydaje się to być rozwiązanie optymalne pod względem stosunku kosztów do efektów. Płyty z betonu lekkiego zbrojone prętami kompozytowymi łączą wysoką wytrzymałość i trwałość kompozytu oraz możliwość redukcji ciężaru własnego mostu, co w przypadku modernizacji prowadzi zwykle do zwiększenia jego nośności użytkowej. W niniejszej pracy

The decision to completely replace a damaged bridge deck slab in an existing bridge structure is usually taken as a last resort, i.e. after using other possible repair measures. In the USA, it is considered that the replacing of a deck slab is necessary when its annual maintenance cost exceeds the discounted cost of a new slab, which is calculated annually in relation to the entire technical life of a structure [4]. The consequence of the decision to replace the deck slab is the selection of a new construction system that will replace the old and damaged bridge deck while providing the required performance parameters and durability.

The selection of the best solution out of the many that meet the requirements in the area of the safe transferring of increased loads, high durability and low maintenance costs is not easy. Various optimization techniques are used for this purpose, which are based on Life Cycle Cost Analysis (LCCA) and the assessment of reliability. A general discussion of the techniques and optimization analysis for the selection of a deck slab is presented, among others, in papers [5] and [6]. Over the past several years, numerous technological, material and construction solutions have been developed and implemented in order to extend the technological lifespan of the bridge deck slabs of bridge structures. In papers [7] and [8], new types of deck slabs were presented, which in recent years have mainly been used in the reconstruction and modernization of existing bridge structures. These solutions include, among others, solutions using conventional materials (steel and high performance concrete, corrosion inhibitor concrete and high-performance lightweight concrete), or those using unconventional materials such as aluminium alloys, FRP composites or glue laminated timber.

Concrete deck slab, which are prefabricated or monolithic and made of lightweight concrete (LWC) and reinforced with Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP) bars, were selected as a subject of research work that is carried out at the Department of Roads and Bridges at the Rzeszow University of Technology. They were selected from a wide range of material and construction solutions of unconventional deck slabs of road bridges, which were presented in papers [7] and [8]. In the current domestic conditions, this seems to be an optimal solution with regards to the cost-effect ratio. Lightweight reinforced concrete slabs, which are reinforced with composite bars, combine a high strength and durability of the composite and also the ability to reduce the self-weight of a bridge, which in the case of modernization usually leads to an increase in its operational load-bearing capacity. The paper presents a brief overview of the applications of these two materials (LWC,

przedstawiono krótki przegląd zastosowań tych dwóch materiałów (LWC, GFRP) w płytach pomostowych obiektów mostowych. Zaprezentowano również nieliczne jeszcze prace badawcze nad tym rozwiązaniem konstrukcyjnym, w tym wstępne prace własne, zakończone pierwszym wdrożeniem płyty LWC/GFRP na moście drogowym. Podano także kierunki niezbędnych badań w celu umożliwienia szerszego zastosowania tego typu płyt pomostowych obiektów mostowych.

2. ZASTOSOWANIE BETONU LEKKIEGO W PŁYTACH POMOSTOWYCH

Zgodnie z normą PN-EN 206 [9] lekki beton kruszywowy jest materiałem o gęstości w stanie suchym $800\text{-}2000\text{ kg/m}^3$, który zawiera lekkie kruszywo pochodzenia naturalnego lub sztucznego. Obecnie najpopularniejszymi kruszywami stosowanymi do produkcji betonów lekkich są kruszywa otrzymywane w wyniku przetwarzania surowców mineralnych. Można tu wyróżnić kruszywa z takich surowców jak gliny, iły i skały łupkowe (np. keramzyt), popioły lotne oraz odpady przemysłowe – łupki przywęglowe. Kruszywa lekkie pozwalają na uzyskanie betonów o wytrzymałości przekraczającej 60 MPa, przy jednoczesnej redukcji ciężaru własnego elementu o 25 - 30% w stosunku do betonu zwykłego. Oznacza to możliwość znacznego obniżenia kosztów deskowań, rusztowań i fundamentów. Następuje zmniejszenie całkowitej objętości betonu i zwiększenie swobody projektowania poprzez możliwość zastosowania mniejszych przekrojów poprzecznych elementów, zwiększenie rozpiętości i/lub nośności elementu konstrukcyjnego. W porównaniu do betonu zwykłego, beton lekki ma mniejszy moduł sprężystości, większą przyczepność kruszywa i zaczynu cementowego skutkującą bardziej jednorodną strukturą. Posiada również mniejszy współczynnik rozszerzalności termicznej oraz więcej wody porowej, umożliwiającej ciągłą wewnętrzną pielęgnację betonu. Powyższe cechy betonu lekkiego mają istotne znaczenie w płytach pomostowych obiektów mostowych, gdyż redukują jego zarysowanie skurczowe [10]. Konstrukcyjny beton lekki charakteryzuje się także większą odpornością na obciążenia dynamiczne niż beton zwykły o analogicznej klasie wytrzymałości, co ma również duże znaczenie w przypadku płyt pomostowych. Ponadto na wysoką trwałość betonu lekkiego wpływa wysoka odporność na chlorki i cykle zamrażania – odmrażania [11]. W Tabl. 1 zestawiono podstawowe własności betonu lekkiego i porównano z własnościami betonu zwykłego o zbliżonej wytrzymałości na ściskanie.

GFRP) in the deck slabs of bridge structures. It also presents some research work on this constructional solution, including preliminary own work that was completed with the first implementation of this solution on a road bridge. Moreover, the further of research that is necessary in order to allow a wider application of this type of bridge deck slabs is provided.

2. THE APPLICATION OF LIGHTWEIGHT CONCRETE IN BRIDGE DECK SLABS

According to PN-EN 206 [9], lightweight aggregate concrete is a material with a dry density of $800\text{-}2000\text{ kg/m}^3$ that contains light aggregate of a natural or artificial origin. The most popular aggregates that are currently used for the production of lightweight concretes are aggregates obtained by the processing of mineral raw materials. They include aggregates from raw materials such as clay, loam and shale rocks, fly ash and industrial wastes – charcoal shale. Light aggregates allow concrete with a strength of over 60 MPa to be obtained, while also reducing the self-weight of an element by 25 - 30% when compared to plain concrete. This makes it possible to significantly reduce the cost of formwork, scaffoldings and foundations. There is a decrease in the total volume of concrete and an increase of design options due to the possibility of using smaller transverse cross-sections of elements and by increasing the spans and/or load-bearing capacity of any structural element. When compared to conventional concrete, lightweight concrete has a lower deformation modulus and also a greater adhesion between aggregate and cement paste, which results in a more homogeneous structure. It also has a lower thermal expansion coefficient and more pore water, which allows for continuous internal concrete care. The above characteristics of lightweight concrete are important in the bridge deck slabs, as they reduce shrinkage cracks in the concrete [10]. Lightweight concrete is characterized by a bigger resistance to dynamic loads when compared to conventional concrete with an analogous strength class. This is also important in the case of bridge deck slabs. In addition, the high durability of lightweight concrete is influenced by a high resistance to chlorides and freeze-thaw cycles [11]. Table 1 summarizes the basic properties of lightweight concrete, which are compared to the properties of normal weight concrete with a similar compressive strength.

Table 1. Comparison of the strength parameters of lightweight concrete and normal weight concrete of a similar class
 Tablica 1. Porównanie parametrów wytrzymałościowych betonu lekkiego i betonu zwykłego analogicznych klas

Parameter / Parametr	Lightweight concrete / Beton lekki	Normal weight concrete / Beton zwykły
Compressive strength / Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	31.3÷42.6	31.0÷40.7
Tensile strength / Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	2.3÷4.6	2.7÷4.0
Modulus of elasticity / Moduł sprężystości [GPa]	17.2÷24.1	22.3÷35.2
Density / Gęstość [kg/m ³]	1800÷2000	2300÷2500

W Polsce pierwsze mostowe zastosowania betonów z kruszywem lekkim popiołowym miały miejsce na Podkarpaciu z inicjatywy jednego z autorów [12]. Beton lekki został wykorzystany do wymiany lub wzmocnienia istniejących płyt pomostowych oraz w kapach chodnikowych mostów. Oprócz wymienionych realizacji beton lekki z kruszywem lekkim popiołowym zastosowano także na moście nad Kanałem Praskim w Warszawie oraz w mostach na Odrze Wschodniej i Zachodniej w Szczecinie. Ostatnią dużą polską realizacją z wykorzystaniem betonu lekkiego był most przez Wisłę w Toruniu, gdzie beton lekki zastosowano w kapach chodnikowych. Łącznie wbudowano tam 540 m³ betonu z kruszywem lekkim popiołowym, przy czym gęstość betonu wynosiła 1800 kg/m³, a średnia wytrzymałość na ściskanie była powyżej 36 MPa [13]. Obecnie w polskim mostownictwie trudno znaleźć większą liczbę przykładów zastosowania betonu lekkiego, który w dalszym ciągu uchodzi za „niekonwencjonalny” [12].

Zgoła odmienna jest sytuacja w krajach Europy Zachodniej i Północnej (zwłaszcza w Norwegii) oraz w USA [14]. Liczba mostów wykonanych w całości lub w części z betonu lekkiego rośnie tam bardzo szybko. Coraz częściej wykorzystuje się także beton lekki do prac modernizacyjnych w mostach istniejących. W stanie Wirginia w USA zmodernizowano w latach 2012-2014 siedem dużych obiektów mostowych, w których wykonano nowe płyty pomostowe z betonu lekkiego. Najdłuższym z tych obiektów jest 54-letni most stalowy Twigg Bridge nad rzeką Piankatank o całkowitej długości 1277 m i szerokości płyty pomostu 8,5 m [11]. Nowa płyta pomostu została wykonana z betonu lekkiego o gęstości 1840 kg/m³ na bazie kruszywa Stalite i wytrzymałości na ściskanie około 40 MPa.

Naturalny kierunek rozwoju lekkich betonów konstrukcyjnych stanowią lekkie betony wysokowartościowe (ang. LWA/HPC, *Lightweight Aggregate/High Performance Concrete*). Betony te znalazły zastosowanie przede wszystkim w elementach konstrukcji platform wydobywczych – z racji konieczności zapewnienia pływerności w początkowej fazie budowy – oraz w przęsłach mostów i przykryciach dachowych o dużej rozpiętości. W betonach LWA/HPC stosuje się wyłącznie kruszywa lekkie lub kombinacje kruszywa

In Poland, the first bridge application of concrete with lightweight fly-ash aggregate took place in Podkarpacie as a result of the initiative of one of the authors [12]. Lightweight concrete was used to replace or strengthen the existing deck slabs and sidewalk slabs of bridges. In addition to the above-mentioned application, concrete with lightweight fly-ash aggregate was also used on a bridge over the Prague Channel in Warsaw and on bridges over the Eastern and Western Oder in Szczecin. The last large Polish structure using lightweight concrete is a bridge across the Vistula River in Toruń, where lightweight concrete was used in the sidewalk slabs. In total, there were 540 m³ of concrete with lightweight fly-ash aggregate used with a density of about 1800 kg/m³ and an average compressive strength of over 36 MPa [13]. It is difficult to find more examples of the use of lightweight concrete in the Polish bridge industry, as it is still considered as an “unconventional” material [12].

The situation in Western and Northern Europe (especially in Norway) and in the USA is very different [14]. The number of bridges that are entirely or partially made of lightweight concrete has increased very fast. Lightweight concrete is also more and more often used for the modernization of existing bridges. In the years 2012-2014 in Virginia, USA, seven large bridge were modernized, in which new lightweight concrete deck slabs were constructed. The longest of these facilities is the 54-year-old steel Twigg Bridge over the Piankatank River with a total length of 1277 m and a deck width of 8.5 m [11]. The new deck slab was made of lightweight concrete with Stalite aggregate with a density of 1840 kg/m³ and compressive strength of about 40 MPa.

The natural direction of the development of constructional lightweight concretes are high-quality lightweight concretes – Lightweight Aggregate/High Performance Concrete (LWA/HPC). These concretes are primarily used in the elements of sea rig constructions, due to the need to provide flotation in the initial phase of their construction, and also in the spans of bridges and roofs with a large span. Only light aggregates or combinations of light and natural aggregates are used in LWA/HPC concretes. The other

lekkiego z kruszywem naturalnym. Pozostałe składniki mieszanki to materiały charakterystyczne do betonów wysokowartościowych czyli superplastyfikatory oraz dodatki mineralne: pyły krzemionkowe i popioły lotne. Obecnie osiąga się wytrzymałości na ściskanie tych betonów w przedziale od 60 MPa do 85 MPa przy gęstości 1850 do 2000 kg/m³. Drugim kierunkiem rozwoju betonów lekkich są lekkie betony samozagęszczalne. W przeprowadzonych w kraju badaniach uzyskano betony o dobrych właściwościach samozagęszczalnych, gęstości poniżej 2000 kg/m³ i wytrzymałości od 53,3 MPa do 76,9 MPa [15].

Betony z kruszywem lekkim w połączeniu z współczesnymi osiągnięciami technologii betonu już dzisiaj w wielu zastosowaniach stanowią cenną alternatywę dla betonów zwykłych. Do obszarów potencjalnego zastosowania betonów lekkich należy na pewno budownictwo mostowe, w którym ciężar własny ma duży wpływ na wymiary elementów, a w konsekwencji na koszt budowy lub przebudowy mostu. Zwłaszcza ten drugi obszar wydaje się być racjonalnym kierunkiem zastosowań betonów lekkich, dzięki którym można dość łatwo uzyskać redukcję ciężaru własnego.

3. ZASTOSOWANIE PRĘTÓW KOMPOZYTOWYCH GFRP W PŁYTACH POMOSTOWYCH

Pręty kompozytowe FRP (ang. *Fibre Reinforced Polymer*) są obecnie stosowane w płytach pomostowych obiektów mostowych znacznie częściej niż betony lekkie. Ze względu na swoje doskonałe własności mechaniczne pręty FRP stają się ostatnio obiecującą alternatywą dla tradycyjnego zbrojenia stalowego. W zależności od rodzaju włókien zastosowanych do produkcji kompozytu wyróżnia się pręty z włókien szklanych (GFRP), z włókien węglowych (CFRP), z włókien aramidowych (AFRP) oraz z włókien bazaltowych (BFRP). Matrycę kompozytów w przypadku prętów stanowią najczęściej żywice: poliestrowa, winyloestrowa lub epoksydowa. Ze względu na różną budowę kompozytów pręty różnią się między sobą własnościami mechanicznymi [16]. Najszersze zastosowanie w budownictwie, w tym w mostownictwie, mają pręty kompozytowe GFRP z włókien szklanych, głównie ze względu na najlepszą relację wytrzymałości doraźnej i trwałości zmęczeniowej do ceny [17].

W porównaniu do konwencjonalnych prętów stalowych można wymienić wiele zalet zbrojenia kompozytowego: wyższa wytrzymałość, mniejsza masa, neutralność elektromagnetyczna oraz przede wszystkim zdecydowanie wyższa odporność na korozję. Wymienione cechy prętów kompozytowych zapewniają wysoką trwałość betonowych elementów

components of the mix are materials that are characteristic for high-quality concretes, i.e. superplasticizers and mineral additives such as silica dust and fly ash. The compressive strength of these concretes is now within the range of 60 MPa and 85 MPa at a density of 1850 kg/m³ to 2000 kg/m³. Another direction in the development of lightweight concretes is lightweight self-compacting concretes. During conducted national research, concretes with good self-compacting properties, a density of less than 2000 kg/m³ and a strength from 53.3 MPa to 76.9 MPa were obtained [15].

Concretes with lightweight aggregates, in combination with today's concrete technology, have already become a valuable alternative to conventional concretes. The areas of the potential application of lightweight concretes include the bridge industry, in which the self-weight of a structure has a large influence on the dimensions of elements and therefore on the cost of the construction or reconstruction of a bridge. This area of application seems to be the most rational direction for the use of lightweight concretes, due to which it is easy to obtain a reduction of the self-weight of a structure.

3. THE APPLICATION OF GFRP COMPOSITE BARS IN BRIDGE DECK SLABS

Fibre Reinforced Polymers (FRP) are currently more often used in the bridge deck slabs than lightweight concretes. Due to their excellent mechanical properties, FRP bars have become a promising alternative to conventional steel reinforcement. Depending on the type of fibre that is used to produce a composite, the following bars are distinguished: Glass Fibre (GFRP), Carbon Fibre (CFRP), Aramid Fibre (AFRP) and also Basalt Fibre (BFRP). In the case of these bars, the matrix for the composites is usually made of polyester, vinyl ester or epoxy resin. Because of the different structure of the composites, the bars differ in their mechanical properties [16]. GFRP composite bars made of glass fibre are the most widely used in the building industry, including bridges, mainly due to their superior relation between their price and tensile strength and fatigue resistance [17].

When compared to conventional steel bars, there are many advantages of composite reinforcement, including: higher strength, less weight, electromagnetic neutrality, and above all, a significantly higher corrosion resistance. These characteristics of composite bars ensure a high durability of concrete elements and also reduce their maintenance

konstrukcyjnych oraz redukcję kosztów ich utrzymania. Za interesowanie prętami kompozytowymi w mostach wiąże się głównie z ich trwałością w środowisku agresywnym, gdzie stal zbrojeniowa jest szczególnie narażona na działanie korozji. W związku z tym ich zastosowanie jest zalecane szczególnie w płytach pomostu, kapach chodnikowych, betonowych barierach ochronnych, ekranach akustycznych, itp., gdzie niekorzystny wpływ soli w środkach odładzających jezdnie mostowe jest szczególnie widoczny. Ponadto kompozytowe pręty zbrojeniowe są odporne na działanie kwasów oraz innych czynników agresywnych. W Tabl. 2 zestawiono podstawowe własności prętów GFRP i porównano z własnościami konwencjonalnej stali zbrojeniowej.

Table 2. Comparison of the strength parameters of steel and GFRP reinforcements
Tablica 2. Porównanie parametrów wytrzymałościowych zbrojenia stalowego i GFRP

Parameter / Parametr	GFRP reinforcement / Zbrojenie GFRP	Steel reinforcement / Zbrojenie stalowe
Tensile strength / Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	450÷1600	450÷800
Modulus of elasticity / Moduł sprężystości [GPa]	35÷65	200
Ultimate strain / Odkształcenie graniczne [%]	1.2÷3.7	5÷20
Density / Gęstość [kg/m ³]	1.7÷2.4	7.85
Thermal expansion / Rozszerzalność cieplna [1/°C]	(6÷9)·10 ⁻⁶	(11÷13)·10 ⁻⁶

Zastosowanie prętów kompozytowych w obiektach mostowych do roku 2006 opisano szeroko w pracy [17]. Największy wzrost zastosowań prętów kompozytowych do zbrojenia płyt pomostów obserwuje się w Kanadzie, USA czy Japonii. Ostatnie realizacje potwierdzają, że pręty GFRP są już dzisiaj alternatywą dla stali konwencjonalnej [18-20]. Przykładami współczesnych realizacji w USA są m.in. Emma Park Bridge wybudowany w 2009 r. w Utah oraz obiekt I-635 Bridge wybudowany w Kansas z 2013 r. Płyta pomostu obiektu w Utah została wykonana z prefabrykowanych paneli betonowych zbrojonych prętami GFRP i sprężona podłużnie. Płyta pomostu składa się z 24 paneli o wymiarach około 1,6 m × 12,4 m i o grubości 235 mm [18]. Wzrost kosztów budowy płyty wynikający z zastosowania prętów GFRP wynosił 14% w porównaniu do konwencjonalnego zbrojenia stalowego. Według oszacowań administracji drogowej ten dodatkowy koszt powinien zwrócić się w ciągu 6 dodatkowych lat żywotności obiektu [19]. Z kolei w obiekcie mostowym I-635 Bridge w Kansas istniejącą żelbetową płytę pomostu wymieniono na hybrydową płytę betonową: na jednej jezdni obiektu zbrojoną prętami GFRP oraz na drugiej jezdni zbrojoną prętami stalowymi, zabezpieczonymi powłoką epoksydową. Ze względu na odporność prętów GFRP na korozję zmniejszono wymaganą w USA otulinę zbrojenia z 76 mm (3 cale) do 25 mm (1 cal). Koszt zbrojenia kompozytowego był o 18% wyższy od kosztu zbrojenia z powłoką epoksydową,

costs. The interest in composite bars for bridges is mainly related to their durability in an aggressive environment, where reinforcing steel is particularly exposed to corrosion. Therefore, their use is particularly recommended in bridge deck slabs, sidewalk slabs, concrete barriers, acoustic screens etc., where the adverse effect of de-icing salts is particularly visible. In addition, composite reinforcement bars are resistant to acids and other aggressive agents. Table 2 presents the basic properties of GFRP bars, which are compared with the properties of conventional reinforcing steel.

The use of composite bars in bridge structures until 2006 was extensively described in paper [17]. The largest increase in the use of composite bars as the reinforcement of deck slabs has been observed in Canada, USA and Japan. Recent constructions have confirmed that GFRP bars are now an alternative to conventional steel [18-20]. Examples of contemporary application in the USA are, among others: Emma Park Bridge built in 2009 in Utah and the I-635 Bridge built in Kansas in 2013. The deck slab of the structure from Utah was made from prefabricated concrete panels reinforced with GFRP bars and prestressed longitudinally. The deck slab consists of 24 panels with dimensions of approximately 1.6 m × 12.4 m and a thickness of 235 mm [18]. The increase in the cost of constructing the slab, which resulted from the use of GFRP bars, was equal to 14% when compared to conventional steel reinforcements. According to the estimations of the road administration, this additional cost should be paid back within 6 additional years of the facility's lifetime [19]. In turn, in the I-635 Bridge in Kansas, the existing reinforced concrete slab was replaced with a hybrid concrete slab, which was reinforced with GFRP bars on one roadway of the object and reinforced with steel bars that were protected with an epoxy coating on the other roadway. Due to the resistance of GFRP bars to corrosion, the reinforcement cover, was reduced from 76 mm (3 in.), which is required in the

jednak porównując całkowity koszt płyty dla obu jezdni różnica ta wyniosła już tylko 3,4% [20].

W Kanadzie coraz częściej stosuje się mieszaną technologię zbrojenia płyt pomostowych mostów: na siatkę górną stosuje się pręty kompozytowe, natomiast siatkę dolną wykonuje się z galwanizowanych prętów stalowych. Celem stosowania takiego rozwiązania jest zmniejszenie kosztów zbrojenia prętami GFRP. Przykładami zastosowania tej technologii są wybudowane w latach 2010-2012 obiekty mostowe w Sherbrooke w ciągu autostrady nr 410 [21]. Każdy z dwóch bliźniaczych obiektów składa się z pięciu przęseł swobodnie podpartych o konstrukcji zespolonej i rozpiętości 43,4 m. Płyta pomostu o grubości 200 mm została wykonana z betonu o wytrzymałości na ściskanie 35 MPa, zbrojonego górną prętami GFRP o średnicy 20 mm oraz dołem prętami ze stali galwanizowanej o takiej samej średnicy.

Ciekawym europejskim przykładem zastosowania zbrojenia kompozytowego w płycie pomostu jest most Thompson's Bridge w Irlandii Północnej. Obiekt z betonowych belek prefabrykowanego typu U ma całkowitą długość 32 m i szerokość 8 m. Płyta pomostu o grubości 200 mm została wykonana z betonu samozagęszczalnego o wytrzymałości na ściskanie 50,5 MPa. W centralnej części przeszła płyta jest zbrojona prętami kompozytowymi BFRP (ang. *Basalt Fibre Reinforced Polymer*) o średnicy 12 mm, natomiast w pozostałej części zastosowano konwencjonalne zbrojenie stalowe. Podczas badań mostu wykazano, że płyta zbrojona prętami BFRP ma większą sztywność od płyty zbrojonej prętami stalowymi [22].

Prace badawcze nad stałym ulepszaniem technologii zwiększania trwałości obiektów mostowych poprzez zastosowanie zbrojenia kompozytowego mają miejsce głównie w krajach i regionach, w których klimat (np. liczne przejścia temperatury przez 0°C) w połączeniu z tradycyjnymi metodami zwalczania śliskości jezdni prowadzą do przyspieszonej degradacji płyt pomostowych (m.in. w Kanadzie, USA oraz Japonii). Polskę bez wątpienia można zaliczyć również do tych obszarów, dlatego też wydaje się racjonalne wdrożenie płyt pomostowych zbrojonych prętami GFRP także do naszego budownictwa mostowego.

4. BADANIA PŁYT POMOSTOWYCH Z BETONU LEKKIEGO ZBROJONEGO PRĘTAMI GFRP

Opisane zalety betonu lekkiego oraz zbrojenia kompozytowego w odniesieniu do płyt pomostowych obiektów mostowych skłaniają do głębszego rozpoznania możliwości połączenia tych dwóch materiałów i wykorzystanie synergii

USA, to 25 mm (1 in.). The composite reinforcement cost was 18% higher than the cost of reinforcement with epoxy coating. However, when comparing the total cost of the slab for both roadways, the difference was equal to only 3.4% [20].

In Canada, mixed reinforcement technology of bridge deck slabs is used more often - composite bars are used in the top grid, while the bottom grid is made of galvanized steel bars. The aim of using such a solution is to reduce the cost of reinforcing when using GFRP bars. Bridge structures in Sherbrooke, which were built in the years 2010-2012 along Highway 410, are examples of such technology [21]. Each of the twin objects consists of five simply supported spans with a composite steel - concrete structure and a length of 43.4 m. The deck slab, with a thickness of 200 mm, was made of concrete with a compressive strength of 35 MPa, which was reinforced at the top with GFRP rods with a diameter of 20 mm, and at the bottom with galvanized steel bars with the same diameter.

An interesting European example of the use of composite reinforcement in bridge deck slabs is Thompson's Bridge in Northern Ireland. The bridge is made of U type concrete prefabricated beams and has a total length of 32 m and a width of 8 m. The deck slab, with a thickness of 200 mm, was made of self-compacting concrete with a compressive strength of 50.5 MPa. In the central part of the span, the slab is reinforced with BFRP bars with a diameter of 12 mm, while the rest of the structure has a conventional steel reinforcement. Tests of the bridge have shown that the slab, which is reinforced with BFRP bars, has a greater stiffness than the slab that is reinforced with steel bars [22].

Research on the continuous improvement of the technology of increasing the durability of bridge structures with the application of composite reinforcements mainly takes place in countries and regions where the climate (e.g. numerous temperature transitions through 0°C), in combination with traditional methods of combating slippery roads (de-icing salt), leads to accelerated degradation of bridge deck slabs (among others, Canada, the USA and Japan). Poland can undoubtedly be included in these areas, and therefore it also seems reasonable to implement deck slabs that are reinforced with GFRP bars into our bridge industry.

4. TESTS OF DECK SLABS MADE OF LIGHTWEIGHT CONCRETE REINFORCED WITH GFRP BARS

The described advantages of lightweight concrete and composite reinforcement in relation to bridge deck slabs

korzyści, jaką może przynieść ich łączne zastosowanie w budowie i/lub utrzymaniu mostów. Taki jest główny cel prac naukowo-badawczych, rozpoczętych w 2015 r. w ramach projektu „Com-bridge” (www.com-bridge.pl). Zakres prac obejmuje m.in. analizę stanu wiedzy w przedmiotowym zakresie, badanie modeli płyt pomostowych z betonu lekkiego zbrojonego prętami GFRP (dalej: płyt LWC/GFRP) pod obciążeniem statycznym, dynamicznym i zmęczeniowym, modyfikację i/lub opracowanie procedur ich projektowania, badanie trwałości płyt oraz wdrożenie ich do polskiego mostownictwa. Pierwsze efekty tych prac badawczych przedstawiono w artykule.

W literaturze naukowo-technicznej nie znaleziono zbyt wielu przykładów badań i/lub analiz obliczeniowych płyt LWC/GFRP, w szczególności dedykowanych do zastosowań w płytach pomostów obiektów mostowych. Jedyne znane autorom badania płyt LWC/GFRP przeprowadzono na University of Utah w Salt Lake City, USA [23]. Głównym celem wymienionych badań była ocena nośności płyt na ścinanie w kontekście weryfikacji wzorów do projektowania, zawartych w amerykańskiej normie ACI [24]. Badaniami objęto dwanaście płyt z betonu lekkiego o gęstości 1970 kg/m^3 , wykonanego na kruszywie z ekspandowanych łupków oraz osiem płyt wykonanych z betonu zwykłego. Wytrzymałości na ściskanie obu betonów wahały się w granicach 55-75 MPa. Płyty były zbrojone dwiema siatkami z prętów GFRP o średnicy 16 mm, średniej wytrzymałości na rozciąganie 715 MPa i średnim module sprężystości 43,3 GPa. Otulina zbrojenia dolnego i górnego wynosiła odpowiednio 25 mm i 54 mm. Badaniom poddano płyty o grubości 235 mm i 275 mm, szerokości 0,61 m i 1,83 m oraz rozpiętości 2,44 m i 2,90 m. W wyniku badań stwierdzono, że nośność na ścinanie płyt LWC/GFRP wynosiła średnio ok. 80% nośności analogicznych płyt z betonu zwykłego. W wyniku badań zaproponowano modyfikację procedury projektowej ACI przez wprowadzenie współczynnika redukującego nośność na ścinanie [23].

Pierwsze polskie badania płyt LWC/GFRP przeprowadzono w Politechnice Rzeszowskiej w ramach projektu „Com-bridge” [25]. Płyty zostały wykonane z betonu klasy LC 35/38 o gęstości 1970 kg/m^3 , wykonanego na kruszywie lekkim popiołowym. Beton był zbrojony dwiema siatkami prętów kompozytowych GFRP o średnicy 12 mm, średniej wytrzymałości na rozciąganie 1019 MPa i średnim module sprężystości 57,8 GPa. Otulina zbrojenia dolnego i górnego wynosiła 30 mm (Rys. 2). Badania przeprowadzono na trzech panelach płyt pomostowych o wymiarach $1,90 \times 5,14 \text{ m}$ i grubości 180 mm w dwóch schematach: schemat jedno-przęsłowy o rozpiętości płyty 4,80 m oraz schemat dwu-

encourage the extension of knowledge regarding the possibilities of combining these two materials and also the use of the synergy of benefits that can be achieved by its combined application in the construction and/or maintenance of bridges. This is the main goal of the research and scientific work that commenced in 2015 within the framework of the “Com-bridge” project (www.com-bridge.pl). The scope of work includes, among others: analysis of the state of knowledge in the assessed area; tests of models of the bridge deck slabs made of lightweight concrete and reinforced with GFRP bars (hereafter as LWC/GFRP slabs) under static, dynamic and fatigue loading; the modification and/or development of their design procedures; tests of the durability of slabs and also their implementation into Polish bridge engineering. The first results of this research are presented in the paper.

In scientific and technical literature there are not many examples of research and/or analysis of LWC/GFRP slabs that are especially dedicated to be used in the bridge deck slabs. The only studies known to the authors of LWC/GFRP slabs were conducted at the University of Utah in Salt Lake City, USA [23]. The main objective of the above-mentioned studies was to evaluate the shear slab capacity in the context of the verification of design formulas that are included in the American ACI standard [24]. Tests were conducted on twelve slabs made of lightweight concrete with a density of 1970 kg/m^3 with the addition of expanded shale aggregate, and also eight slabs made of normal weight concrete. The compressive strengths of both concretes varied between 55 and 75 MPa. The slabs were reinforced with two grids made of GFRP bars with a diameter of 16 mm, an average tensile strength of 715 MPa and an average deformation modulus of 43.3 GPa. The cover of the lower and upper reinforcement was equal to 25 mm and 54 mm, respectively. Slabs with a thickness of 235 mm and 275 mm, a width of 0.61 m and 1.83 m and a span of 2.44 m and 2.90 m were subjected to the tests, which showed that the shear capacity of the LWC/GFRP slabs was equal to approximately 80% of the load-bearing capacity of analogous slabs that were made of ordinary concrete. As a result of the studies, a modification of the ACI design procedure was proposed, which involved the introduction of the shear strength reduction factor [23].

The first Polish studies of LWC/GFRP slabs were carried out at the Rzeszow University of Technology within the “Com-bridge” project [25]. The slabs were made of concrete of LC 35/38 class with a density of 1970 kg/m^3 with the addition of lightweight fly-ash aggregate. The concrete was reinforced with two meshes made of GFRP

prześlony o rozpiętości obu przęseł płyty 2,40 m (Rys. 3). Zastosowane układy statyczne odpowiadały geometrycznie płytom pomostowym stosowanym w rzeczywistych obiektach mostowych. Podczas badań statycznych płyty uległy zniszczeniu w wyniku zginania i ścinania odpowiednio dla schematu jedno- i dwuprzęsłowego (Rys. 4 i 5). Przeprowadzone badania wykazały, że płyty pomostowe LWC/GFRP charakteryzują się odpowiednią nośnością, trwałością zmęczeniową oraz zachowują się sprężysto aż do zniszczenia. Na podstawie wyników badań doświadczalnych wyznaczono globalny zapas bezpieczeństwa w stanach granicznych nośności (SGN), definiowany jako stosunek doświadczalnej nośności na zginanie i ścinanie do projektowanego (docelowego) momentu zginającego w płycie pomostu. Wartość tak definiowanego współczynnika bezpieczeństwa płyty pomostu wyniosła powyżej 4,0, co daje satysfakcjonujący wynik w aspekcie bezpieczeństwa obiektu mostowego. Na podstawie porównania wartości doświadczalnych dla poziomu obciążenia wywołującego charakterystyczny moment zginający w rzeczywistej konstrukcji z przyjętymi wartościami granicznymi (na podstawie wytycznych ACI [24] i normy [26]) stwierdzono spełnienie warunków stanów granicznych użyteczności w zakresie ugięć i rozwartości rys. Uzyskane wyniki badań rozpoznawczych świadczą o poprawności przyjętego rozwiązania konstrukcyjnego i materiałowego płyty pomostowej i celowości dalszych badań [25]. Bazując na wynikach badań pilotażowych zaprojektowano i wykonano pierwszy polski most drogowy z płytą pomostową LWC/GFRP w celu prowadzenia monitoringu zachowania się płyty podczas eksploatacji mostu i oceny jej trwałości.

composite bars with a diameter equal to 12 mm, an average tensile strength of 1019 MPa and an average deformation modulus of 57.8 GPa. The cover of the top and bottom reinforcement was equal to 30 mm (Fig. 2). The tests were carried out on three bridge deck slabs with dimensions of 1.90×5.14 m and a thickness of 180 mm in two schemes: a single span scheme with a length of 4.80 m and a double-span scheme with the length of both spans equal to 2.40 m (Fig. 3). The static schemes corresponded geometrically to the bridge deck slabs that are used in real bridge objects. During static tests, the slabs were destroyed as a result of bending and shearing in the case of the single- and double-span schemes, respectively (Figs. 4 and 5). The conducted tests showed that LWC/GFRP deck slabs are characterized by an appropriate load-bearing capacity, fatigue durability and fatigue life, and they also behave elastically until failure. Based on the results of experimental research, a global safety reserve in load limit states was determined. It was defined as the ratio of experimental bending and shear strength to the design (target) bending moment in a deck slab. The value of the defined safety factor of the deck slab was above 4.0, which is a satisfactory result regarding the safety of the bridge object. On the basis of the comparison of the experimental values for the load level causing the characteristic bending moment in the real construction with the assumed limit values (based on the ACI guidelines [24] and standard [26]), it was found that the conditions of the serviceability limits in the area of the deflection and of cracks width were met. The obtained results of the preliminary investigations proved the correctness of the adopted constructional and material solution of the bridge deck slab and also justified the need for further investigations [25]. Based on the results of the pilot studies, the first Polish road bridge with a LWC/GFRP bridge deck slab was designed and constructed in order to monitor the behaviour of the slab during the operation of the bridge and to also evaluate its durability.

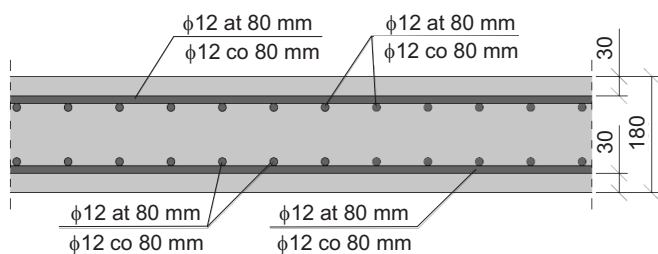


Fig. 2. Reinforcement scheme of the deck slab test models
Rys. 2. Schemat zbrojenia modeli badawczych płyt

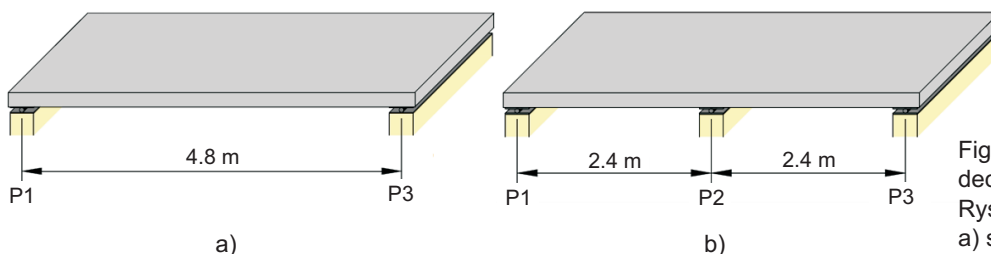


Fig. 3. Static schemes of the tested deck slabs: a) scheme M1, b) scheme M2
Rys. 3. Schematy statyczne badanych płyt: a) schemat M1, b) schemat M2



Fig. 4. Deck slab during structural tests
Rys. 4. Płyta pomostu podczas badań wytrzymałościowych



Fig. 5. Failure modes of the tested deck slabs
Rys. 5. Postacie zniszczenia badanych płyt pomostowych

5. PIERWSZE KRAJOWE ZASTOSOWANIE PŁYTY POMOSTOWEJ TYPU LWC/GFRP

Pierwszy polski most drogowy z płytą LWC/GFRP (Rys. 6) zbudowano w ciągu drogi powiatowej nr 1411R w miejscowości Błażowa koło Rzeszowa nad potokiem Ryjak [27]. Most ma cztery dźwigary główne typu U oraz zespoloną z nimi betonową płytę pomostu (Rys. 7). Płyta pomostu ma grubość 180 mm, długość całkowitą 22,10 m oraz szerokość całkowitą 10,54 m. Płytę wykonano z betonu lekkiego klasy LC35/38, zbrojonego dwiema siatkami z prętów GFRP o średnicy 12 mm i wymiarze oczka 12 × 15 cm. Płytę pomostu zaprojektowano w oparciu o wytyczne ACI [24].



Fig. 6. Bridge in Błażowa with the LWC/GFRP deck slab
Rys. 6. Most w Błażowej z płytą pomostu typu LWC/GFRP

Do wykonania płyty pomostu wykorzystano beton o gęstości 1970 kg/m^3 na bazie z kruszywem lekkim popiołowym. Dostawcą mieszanki była firma produkująca beton towarowy, która zaprojektowała skład mieszanki, nadzorowała proces

5. FIRST NATIONAL APPLICATION OF THE LWC/GFRP TYPE DECK SLAB

The first Polish road bridge with a LWC/GFRP slab (Fig. 6) was built on the district road No. 1411R in Błażowa near Rzeszow over the Ryjak stream [27]. The bridge has a hybrid FRP composite structure with four main U-type girders and a concrete deck slab (Fig. 7). The deck slab has a thickness of 180 mm, a total length of 22.10 m and a total width of 10.54 m. The slab is made of LC35/38 lightweight concrete and reinforced with two grids made of GFRP bars with a diameter of 12 mm and a single grid size of 12 × 15 cm. The deck slab was designed on the basis of the ACI guide [24].

Concrete with a density of 1970 kg/m^3 and lightweight fly-ash aggregate was used to make the deck slab. The concrete mix was provided by a readymix company, which designed the concrete mix, supervised the process of its implementation, participated in the process of testing the strength, and also evaluated the hardened concrete. The detailed recipe of lightweight concrete is shown in Table 3. The average compressive strength of the lightweight concrete, which was determined during tests after

jej wbudowania, uczestniczyła w procesie badań wytrzymałościowych i wykonywała ocenę betonu stwardniałego. Szczegółową recepturę betonu lekkiego przedstawiono w Tabl. 3. Ustalona na podstawie badań średnia wytrzymałość betonu lekkiego na ściskanie po 28 dniach wynosiła 43,3 MPa. Zaprojektowany beton spełniał wymagania mrozoodporności (klasa F150) oraz wodoszczelności (klasa W8), stawiane betonom mostowym. Nasiąkliwość betonu wynosiła poniżej 9%. Do wykonania płyty pomostu wykorzystano 53 m³ mieszanki, która była podawana za pomocą żurawia z koszem – podawanie betonu przy użyciu pompy skutkowało uszkodzeniem kruszywa lekkiego (Rys. 8).

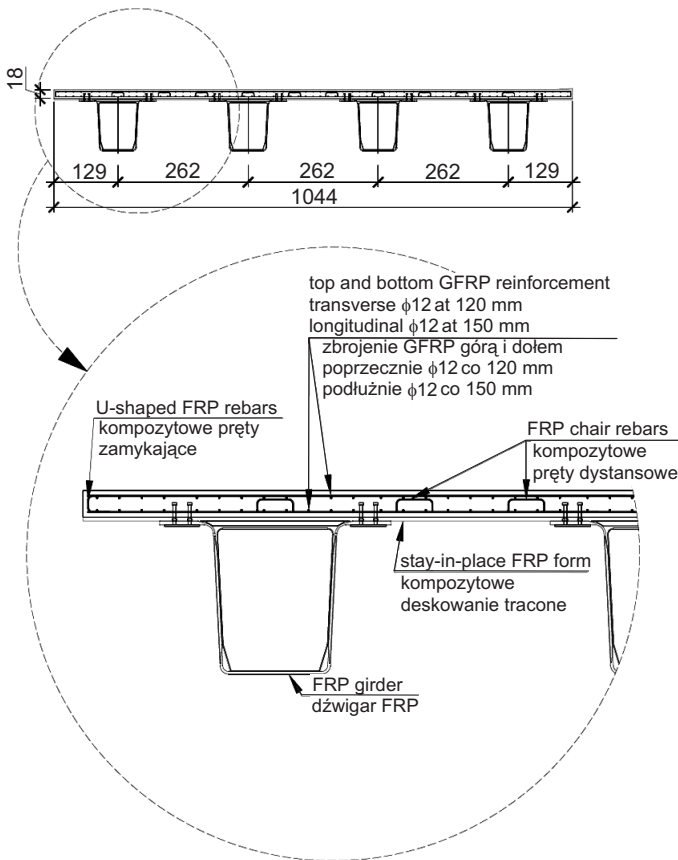


Fig. 7. Transverse cross-section of the Blazowa bridge span
Rys. 7. Przekrój poprzeczny przęsła mostu w Błazowej

Do zbrojenia płyty pomostu zastosowano pręty kompozytowe GFRP polskiej firmy ComRebars. Pręty kompozytowe na bazie kompozytu epoksydowo-szklanego (zawartość wagowa włókna szklanego 75 ÷ 80%) wytwarzane są metodą pultruzji i mają spiralne uźebrowanie (jednokierunkowy oplót). Na podstawie wstępnych badań prętów kompozytowych przeprowadzonych w oparciu o wytyczne [28] określono średnią wytrzymałość na rozciąganie na poziomie

28 days, was equal to 43.3 MPa. The designed concrete met the requirements of frost resistance (F150 class) and watertightness (W8 class) that are necessary for bridge concretes. The absorptivity of the concrete was below 9%. The deck slab was made of 53 m³ of the concrete mix, which was added from a crane with a basket – application of the concrete with the use of a pump would have resulted in damage to the light aggregate (Fig. 8).

Table 3. Recipe of lightweight concrete applied in the Blazowa bridge
Tablica 3. Receptura betonu lekkiego zastosowanego na moście w Błazowej

Component Składnik	Contents Zawartość
Cement / Cement CEM I 42.5 MSR	420 kg/m ³
Sand / Piasek 0/2	55%
Lightweight aggregate / Kruszywo lekkie popiołowe 4/12	45%
Plasticizer / Plastyfikator	0.4% m.c.
Superplasticizer / Superplastyfikator	0.4% m.c.
W/C ratio / Wskaźnik W/C = 0.45, Slump class / Konsystencja – opad stożka S3/S4, m.c.– by mass of cement / na jednostkę masy cementu	

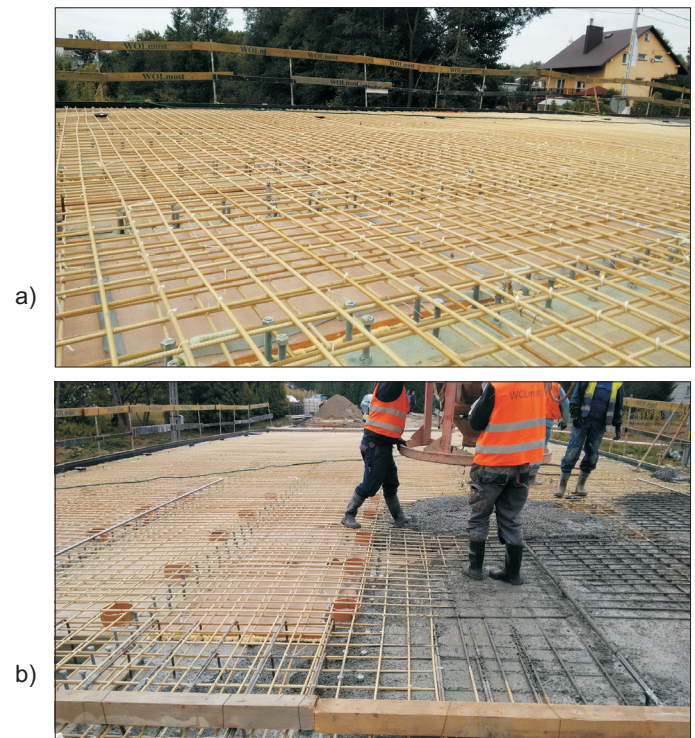


Fig. 8. GFRP reinforcement (a) and concreting (b) of the bridge deck slab in Blazowa
Rys. 8. Zbrojenie kompozytowe (a) i betonowanie (b) płyty pomostu mostu w Błazowej

1150 MPa oraz średni moduł sprężystości przy rozciąganiu jako 50 GPa. Doświadczenia z wykonania pierwszej płyty pomostowej typu LWC/GFRP są pozytywne. Technologia robót zasadniczo nie odbiega od wykonania płyt konwencjonalnych z betonu zwykłego. Jedną ze zidentyfikowanych różnic była wiotkość siatki zbrojeniowej, która znacznie ugięła się pod ciężarem pracowników (po odciążeniu siatka zbrojeniowa powracała do pierwotnego położenia). Aby zapewnić stałą odległość pomiędzy zbrojeniem dolnym i górnym zastosowano dodatkowe elementy dystansowe z rur PCV. Inną różnicą w wykonywaniu płyty pomostu LWC/GFRP w porównaniu z technologią konwencjonalną, był sposób łączenia prętów, który realizowano przy użyciu specjalnych opasek zaciskowych.

6. WNIOSKI - KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Współczesny postęp inżynierii materiałowej pozwala na wdrażanie do mostownictwa nowych, zaawansowanych technologicznie materiałów konstrukcyjnych. Wśród nich znajdują się wysokowartościowe betony lekkie oraz kompozyty FRP. Dzięki swoim korzystnym cechom fizycznym i parametrom mechanicznym w porównaniu z materiałami konwencjonalnymi (betonem zwykłym i stalą zbrojeniową) każdy z tych materiałów jest już od dłuższego czasu stosowany w budownictwie mostowym. W przypadku betonów lekkich głównym pożądanym parametrem jest mała gęstość w stanie suchym, która pozwala na budowę obiektów o mniejszym ciężarze własnym i ograniczonych gabarytach elementów. Natomiast kompozyty GFRP są stosowane ze względu na swoją dużą wytrzymałość i trwałość w agresywnym środowisku. Synergia tych korzystnych cech i parametrów obu materiałów prowadzi bez wątpienia do zmniejszenia kosztów w cyklu życia (LCC) obiektów mostowych.

Wstępne wyniki badań rozpoznawczych, zarówno amerykańskich jak i własnych wskazują, że stosowanie płyt pomostowych typu LWC/GFRP jest możliwe i celowe, a ich zachowanie pod obciążeniem nie odbiega zasadniczo od konwencjonalnych płyt pomostowych. Pomimo pierwszych wdrożeń w budownictwie mostowym takie rozwiązanie konstrukcyjne i technologiczne wymaga dalszych działań mających na celu jego rozpowszechnienie. Ze względu na wyższą cenę betonu lekkiego i prętów kompozytowych w odniesieniu do materiałów konwencjonalnych, konieczna jest optymalizacja zużycia poszczególnych materiałów. W tym celu należy poddać weryfikacji i ewentualnej modyfikacji istniejące procedury obliczeniowe dla elementów zbrojonych prętami GFRP w kontekście zastosowania betonu lekkiego. Obecne procedury obliczeniowe dla elementów

GFRP composite bars from the Polish company ComRebars were used to reinforce the deck slab. The composite bars, which were based on epoxy-glass composite (a glass fiber weight content of 75 ÷ 80%), were produced using the pultrusion process and have spiral ribbing (unidirectional). Based on preliminary tests of the composite bars, which were carried out on the basis of guidelines [28], an average tensile strength of 1150 MPa and an average tensile deformation modulus of 50 GPa were determined. The experience gained after the execution of the first LWC/GFRP bridging deck slab is positive. The technology of construction works did not essentially differ from the construction of conventional slabs made of ordinary concrete. One of the identified differences was the stiffness of the reinforcing grid, which was significantly deflecting under the weight of workers (after unloading, the reinforcement mesh returned to its original position). Additional spacers made of PVC pipes were used to ensure a constant distance between the top and bottom reinforcement grids. Another difference in the performance of the LWC/GFRP deck slab when compared to conventional technology was the method of connecting the bars, which was conducted using special clamping bands.

6. CONCLUSIONS AND DIRECTIONS OF FUTURE RESEARCH

Modern progress in material engineering has allowed for the introduction of new technologically advanced construction materials, including high-quality lightweight concretes and FRP composites. Due to their favorable physical and mechanical characteristics when compared to conventional materials (normal weight concrete and reinforcing steel), each of these materials has been used in bridge constructions for a long time. In the case of lightweight concretes, low density in its dry state is the main desired parameter, which allows for the construction of structures with a smaller self-weight and reduced overall dimensions. In turn, GFRP composites are widely used due to their high strength and durability in aggressive environments. The synergy of these beneficial features and the parameters of both materials undoubtedly leads to a reduction in the life cycle cost (LCC) of bridge structures.

Preliminary results of both US and Polish surveys indicate that the use of LWC/GFRP bridge deck slabs is possible and desirable, and that their behavior under loading does not substantially differ from conventional bridge slabs. In spite of the first implementations in bridge construction, such a construction and technological solution requires further actions that aim at its dissemination. Due to the

betonowych zbrojonych prętami GFRP nie uwzględniają zastosowania betonu lekkiego, jak ma to miejsce w przypadku norm dotyczących konstrukcji żelbetowych. Nie istnieje zatem wiarygodna procedura projektowa pozwalająca z wystarczającym poziomem niezawodności ocenić m.in. nośność i sztywność takich elementów. Innym zagadnieniem jest wykazanie odpowiedniej trwałości środowiskowej i zmęczeniowej płyt betonowych typu LWC/GFRP zwłaszcza w środowisku zbliżonym do standardowego dla obiektów mostowych, zarówno pod względem oddziaływań środowiskowych jak i obciążeń eksploatacyjnych.

INFORMACJE DODATKOWE

Praca została wykonana w ramach Przedsięwzięcia Pilotażowego „Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej – Demonstrator+”, projekt pn.: „Com-bridge – Innowacyjny most drogowy z kompozytów FRP” (umowa nr UOD-DEM-1-041-/001), współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Dostawcą mieszanki betonowej była firma LafargeHolcim, która zaprojektowała skład mieszanki, nadzorowała proces jej wbudowania, uczestniczyła w procesie badań wytrzymałościowych i wykonywała ocenę betonu stwardniałego.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Russell H.G.*: Concrete bridge deck performance. NCHRP synthesis 333, National Research Council. Transportation Research Board, Washington, D.C., 2004
- [2] *Kim H.-Y., Kim S.-M., Hwang Y.-K.*: Design of a pultruded GFRP deck for highway bridges. In: The Proceedings of the 2003 ECI Conference on Advanced Materials for Construction of Bridges, Buildings, and Other Structures III, Davos, Switzerland, ECI Symposium Series, Vol. P5, 2003
- [3] GDDKiA, Stan techniczny mostów, 2017, www.gddkia.gov.pl
- [4] *Zobel H., Karwowski W.*: Kompozyty polimerowe w mostownictwie – pomosty wielowarstwowe. Geoinżynieria – drogi, mosty, tunele, 2, 2006, 42-49
- [5] *Frangopol D.M., Ghosn M., Hearn G., Nowak A.*: Guest Editorial: Structural reliability in bridge engineering. Journal of Bridge Engineering, 3, 4, 1998, 151-154
- [6] *Stewart M.G., Estes A.C., Frangopol D.M.*: Bridge deck replacement for minimum expected cost under multiple reliability constraints. Journal of Structural Engineering, 130, 9, 2004, 1414-1419
- [7] *Siwowski T.*: Pomosty drogowe, Część I. Magazyn Autostrady, wydanie specjalne – jesień 2006, pn.: Mosty – konstrukcja, wyposażenie, utrzymanie, 10, 2006, 30-38
- [8] *Siwowski T.*: Pomosty drogowe, Część II. Magazyn Autostrady, 11, 2006, 67-72
- [9] PN-EN 206+A1:2016-12. Beton. Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność. Warszawa, 2016
- [10] *Nair H., Ozyildirim C., Sprinkel M.*: Use of Lightweight Concrete for Reducing Cracks in Bridge Decks. Final Report VTRC 16-R14, Virginia Transportation Research Council, 2016
- [11] *Wagner A.*: Durability of Lightweight Concrete for Bridge Decks. Master's Thesis, University of Tennessee, USA, 2015
- [12] *Siwowski T.*: Przykłady zastosowań betonów niekonwencjonalnych w polskim mostownictwie. Geoinżynieria – drogi, mosty, tunele, 4, 2005, 40-46

higher price of lightweight concrete and composite bars in relation to conventional materials, it is necessary to optimize the usage of individual materials. For this purpose, the existing design procedures for GFRP reinforced elements should be verified and possibly modified in the context of the use of lightweight concrete. The current calculation procedures for concrete elements reinforced with GFRP bars do not take into account the use of lightweight concrete. This is not the case in standards regarding reinforced concrete structures. There is therefore no reliable design procedure that allows an evaluation of, among others, the load-bearing capacity and stiffness of such elements with a sufficient level of reliability. Another issue is to demonstrate the appropriate environmental and fatigue durability of concrete LWC/GFRP slabs, especially in an environment that is typical for bridge structures, both in terms of environmental impacts and traffic loads.

ACKNOWLEDGEMENT

The work was done within the framework of the Pilot Project “Support for research and development in a demonstration scale – Demonstrator+”, a project titled: “Com-bridge – An innovative road bridge with FRP composites” (contract No. UOD-DEM-1-041-/001), co-financed by the National Center for Research and Development.

The concrete mix was provided by LafargeHolcim company, which designed the concrete mix, supervised the process of its implementation, participated in the process of testing the strength, and also evaluated the hardened concrete.

- [13] *Konopska-Piechurska M., Walkowiak R., Weretelnik J.*: Zastosowanie technologii betonu lekkiego przy realizacji budowy mostu drogowego w Toruniu. *Budownictwo, Technologie, Architektura*, 1, 2016, 38-40
- [14] *Greene G., Graybeal B.A.*: Synthesis and Evaluation of Lightweight Concrete Research Relevant to the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications: Potential Revisions for Definition and Mechanical Properties. Federal Highway Administration, Washington, 2012
- [15] *Kaszyńska M.*: Lekkie betony samozagęszczalne do konstrukcji mostowych. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*, 2, 2009, 68-72
- [16] *Szumigala M., Pawłowski D.*: Zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach budowlanych. *Przeład Budowlany*, 3, 2014, 47-50
- [17] *Mossakowski P.*: Pręty z kompozytów polimerowych z włóknami do zbrojenia betonowych konstrukcji inżynierskich. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, 5, 1, 2006, 35-52
- [18] *Pantelides C.P., Ries J., Reaveley L.D.*: Monitoring GFRP Reinforced Precast Deck Panels. 2009 (https://www.civil.utah.edu/wp-content/themes/cvee-express-theme/pdf/research_areas/structures_1_09.pdf 20.01.2017)
- [19] *Gremel D., Koch R.*: Holistic approach to reduce the costs of bridge decks using FRP rebar. (<http://docplayer.net/22561537-Holistic-approach-to-reduce-the-costs-of-bridge-decks-using-frp-rebar.html> 20.01.2017)
- [20] *Koch R., Karst J.*: Using GFRP Reinforcing as a cost effective solution to extending the service life of bridge decks: A case study of the Kansas Department of Transportation I-635 Bridges over State Ave in Kansas City, KS. In: *Proceedings of 2014 National Accelerated Bridge Construction Conference*, December 4-5, 2014, Miami, Florida, 580-589
- [21] *Ahmed E., Settecasì F., Benmokrane B.*: Construction and Testing of Hybrid Reinforced Concrete Bridge Deck Slabs for the Ste-Catherine Twin Overpass Bridges. *ASCE Journal of Bridge Engineering*, 19, 6, 2014
- [22] *Taylor S., Robinson D., Sonebi M.*: Basalt-fibre-reinforced polymer reinforcement. *Concrete*, 45, 4, 2011, 48-50
- [23] *Liu R., Pantelides C.P.*: Shear strength of GFRP reinforced precast lightweight concrete panels. *Construction and Building Materials*, 48, 2013, 51-58
- [24] *ACI 440.1R-06* Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. American Concrete Institute (ACI), USA, 2006
- [25] *Wiater A., Rajchel M., Siwowski T.*: Badania płyt pomostu z betonu lekkiego zbrojonego prętami kompozytowymi GFRP. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, XXXII, Zeszyt 62, Nr 4, 2015, 469-492
- [26] *PN-EN 1992-1-1:2008*. Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2008
- [27] *Siwowski T., Rajchel M., Kaleta D., Własak L.*: Pierwszy w Polsce most drogowy z kompozytów FRP. *Inżynieria i Budownictwo*, LXXII, 10, 2016, 534-538
- [28] *ACI 440.3R-04* Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute (ACI), USA, 2004