

mgr inż. Agnieszka Wiater<sup>1)\*</sup>  
 ORCID: 0000-0001-5559-3841  
 prof. dr hab. inż. Tomasz Siwowski<sup>1)</sup>  
 ORCID: 0000-0002-2003-000X

# Nośność na ścinanie płyt pomostowych z betonu lekkiego zbrojonych prętami kompozytowymi GFRP

## *Shear strength of lightweight concrete slabs reinforced with GFRP bars*

DOI: 10.15199/33.2020.05.06

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono badania nośności na ścinanie płyt z betonu zwykłego oraz lekkiego zbrojonego prętami kompozytowymi GFRP (ang. *Glass Fibre Reinforced Polymer*), w schemacie czteropunktowego zginania. Wykonano i poddano obciążeniu statycznemu łącznie 7 płyt betonowych o długości 2,8 m, szerokości 1,0 m i grubości 18 cm. Analizowano wpływ takich czynników, jak rodzaj betonu (zwykły, lekki), stopień zbrojenia i jego konfiguracja, obecność zbrojenia górnego a zachowanie się badanych płyt pod obciążeniem oraz ich nośność na ścinanie. Weryfikowano wybrane normowe modele obliczeniowe do określania nośności na ścinanie elementów zbrojonych prętami kompozytowymi. Stwierdzono brak wystarczająco wiarygodnej procedury obliczeniowej do wyznaczenia nośności na ścinanie płyt z betonu lekkiego zbrojonego prętami GFRP.

**Słowa kluczowe:** beton lekki; zbrojenie GFRP; płyty betonowe; nośność na ścinanie; badania doświadczalne; modele obliczeniowe.

**Abstract.** This paper evaluates the shear behaviour of simply supported normal-weight and lightweight concrete slabs reinforced with glass fibre reinforced polymer (GFRP) rebars and subjected to four-point static loading. A total of seven concrete slabs of 2.8 m long, 1.0 m wide and 0.18 m deep, were constructed and tested. Different parameters like type of concrete (normal – and lightweight), reinforcement ratio, reinforcement configuration and the existence of top reinforcement are considered in order to assess their influence on static behaviour and shear strength of concrete slabs. Furthermore several codes and theoretical models applied for predicting shear strength of concrete members reinforced with GFRP rebars have been compared with test results, and the discrepancies and compatibilities have been established and discussed. The lack of code models to predict accurately shear strength of LW concrete slabs reinforced with GFRP has been revealed.

**Keywords:** lightweight concrete; GFRP reinforcement; concrete slabs; shear strength; experimental test; code models.

Z względu na doskonałe właściwości mechaniczne i odporność na korozję, pręty kompozytowe GFRP (ang. *Glass Fibre Reinforced Polymer*) są obiecującą alternatywą dla konwencjonalnego zbrojenia stalowego. W przypadku betonu lekkiego największą zaletą jest jego mały ciężar własny w stanie suchym, co pozwala na budowanie lekkich konstrukcji o niewielkich wymiarach. Połączenie prętów zbrojeniowych GFRP z betonem lekkim ma szczególne znaczenie w płytach obiektów mostowych, gdyż redukuje to koszty cyklu życia konstrukcji. W literaturze nie ma zbyt wielu przykładów badań i/lub analiz obliczeniowych płyt z betonu lekkiego ze zbrojeniem GFRP (w skrócie LWC/GFRP). Jedyne badania tego typu płyt przeprowadzono na University of Utah w Salt Lake City

w USA [9]. Ich celem była ocena nośności płyt na ścinanie w kontekście weryfikacji wzorów do projektowania zawartych w amerykańskich wytycznych ACI [1]. Polskie doświadczenia z analizy płyt z betonu lekkiego ze zbrojeniem GFRP są również bardzo małe.

W ramach projektu badawczo-rozwojowego „Com-bridge” przeprowadziliśmy przegląd literatury dotyczącej badania płyt LWC/GFRP [18] oraz ich badania m.in. pod obciążeniem statycznym [19], dynamicznym [10] i zmęczeniowym w celu weryfikacji procedury projektowej [17] przed zastosowaniem płyt LWC/GFRP w pierwszym polskim moście z kompozytów [16]. Ze względu na ograniczone badania krajowe i zagraniczne płyt LWC/GFRP, istnieje potrzeba prowadzenia dalszych analiz nad zachowaniem się tego typu elementów konstrukcyjnych w celu upowszechnienia ich

stosowania, szczególnie w konstrukcjach mostowych.

W artykule zweryfikowano procedurę projektowania płyt z betonu lekkiego zbrojonego prętami GFRP. Ponadto przedstawiono wyniki badań płyt z betonu zwykłego i lekkiego zbrojonego prętami GFRP, przeprowadzonych na Politechnice Rzeszowskiej. Porównano je z wynikami uzyskanymi wg wybranych procedur normowych określania nośności na ścinanie tego typu płyt.

### Badania

Badaniom pod obciążeniem statycznym poddano łącznie siedem pełnowymiarowych płyt, zbrojonych ortogonalnie siatkami z prętów GFRP, o długości 2,80 m, szerokości 1,00 m i grubości 18 cm. Modele badawcze zaprojektowano tak, aby odpowiadały geometrii płyt pomostowych stosowanych w obiektach mostowych. W oznaczeniach płyt NC-D1-G1; NC-D2a-G1; NC-D2b-G1;

<sup>1)</sup> Politechnika Rzeszowska; Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury  
<sup>\*)</sup> Adres do korespondencji: wiater@prz.edu.pl

LC-D1-G1; LC-D2a-G1; LC-D2a-G2; LC-D2a-G0 zastosowano symbole oznaczające: „NC” i „LC” odpowiednio elementy z betonu zwykłego i lekkiego; „D1” i „D2” – stopień zbrojenia głównego dolnego; „a” i „b” – konfigurację zbrojenia; „G1” i „G2” – stopień zbrojenia górnego, przy czym, „G1” odpowiada stopniowi zbrojenia dolnego „D1”, a „G2” stopniowi zbrojenia „D2a”, natomiast „G0” – brak zbrojenia górnego. Otulina zbrojenia wynosiła 30 i 25 mm odpowiednio w przypadku płyt z betonu zwykłego i lekkiego. Charakterystykę zbrojenia badanych płyt przedstawiono w tabeli 1.

Płyty wykonano z betonu zwykłego i lekkiego o zbliżonej wytrzymałości na ściskanie określonej na próbkach sześciennych. Założono docelową klasę betonu C30/37 oraz LC35/38 wg Eurokodu 2 [15], co oznacza wytrzymałość na ściskanie betonu 37 – 38 MPa. Beton lekki wykonano na bazie lekkiego kruszywa popiołoporytowego „Certyd” oraz piasku jako kruszywa drobnego. Maksymalny wymiar kruszywa w przypadku betonu zwykłego wyniósł 16 mm, a lekkiego 8 mm.

Wykonano po 18 próbek sześciennych o boku 150 mm, zgodnie z normą [11], w celu określenia wytrzymałości na ściskanie wg [13], wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu wg [14] oraz modułu sprężystości wg [6].

**Tabela 1. Charakterystyka zbrojenia modeli badawczych**

Table 1. Reinforcement details of the tested slabs

Oznaczenie płyt	Zbrojenie (siatka dwukierunkowa)			Otulina [mm]
	dolne (główne) [mm]	stopień zbrojenia głównego [%] $\rho_f$	górne [mm]	
NC-D1-G1	ø10 co 200	0,20	ø10 co 200	30
NC-D2a-G1	ø8 co 100	0,28	ø10 co 200	30
NC-D2b-G1	ø12 co 200	0,28	ø10 co 200	30
LC-D1-G1	ø10 co 200	0,19	ø10 co 200	25
LC-D2a-G1	ø8 co 100	0,27	ø10 co 200	25
LC-D2a-G2	ø8 co 100	0,27	ø8 co 100	25
LC-D2a-G0	ø8 co 100	0,27	brak	25

Po 9 próbek z każdego typu betonu (po 3 w przypadku każdego badania) pielęgnowano w wodzie przez 28 dni zgodnie z normą [12], natomiast kolejne 9 próbek przechowywano w takim samym środowisku, jak modele badawcze i poddano badaniom w tym samym dniu co płyty. Właściwości betonów przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2. Właściwości betonu**

Table 2. Properties of concrete

Właściwość	Próbki pielęgnowane w wodzie (warunki laboratoryjne)		Próbki przechowywane w warunkach pielęgnacji płyt (warunki otoczenia)	
	C 30/37	LC 35/38	C 30/37	LC 35/38
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	47,3	46,1	46,3	46,4
Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu [MPa]	3,6	3,3	3,2	2,6
Moduł sprężystości [GPa]	34,7	34,8	34,6	34,5
Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	2301	1959	2239	1857

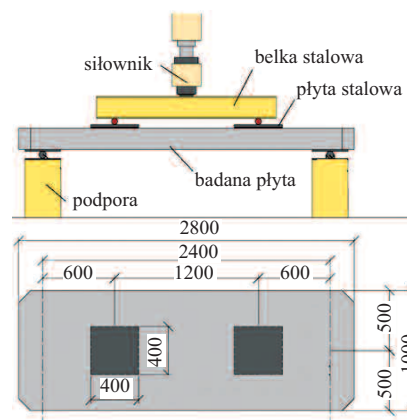
Jako zbrojenie GFRP zastosowano pręty o średnicy 8, 10 i 12 mm ze spiralnym oplotem z włókna szklanego. Ich właściwości mechaniczne określono na podstawie badań piętnastu próbek. Wytrzymałość na rozciąganie badano zgodnie z normą [7]. Końce prętów GFRP zakotwiono w rurach stalowych wypełnionych ekspansywną zaprawą cementową w celu ułatwienia chwytania próbek i zapobieżenia przedwczesnemu uszkodzeniu prętów w stalowych szczękach maszyny. Wybrane właściwości prętów przedstawiono w tabeli 3.

Płyty badano w schemacie swobodnie podpartym o rozpiętości teoretycznej przeszła 2,40 m (rysunek 1). Odległość punktu przyłożenia obciążenia od punktu podparcia została tak dobrana, aby każda płyta uległa zniszczeniu w wyniku ścinania. Bazowano na obliczeniach teoretycznych wg wytycznych japońskich [8]. Każda płyta została poddana czteropunktowemu zginaniu w przypadku rozstawu sił 1,20 m. Obciążenie generowano przy użyciu siłownika hydraulicznego umieszczo-

**Tabela 3. Właściwości prętów GFRP**

Table 3. Properties of GFRP rebars

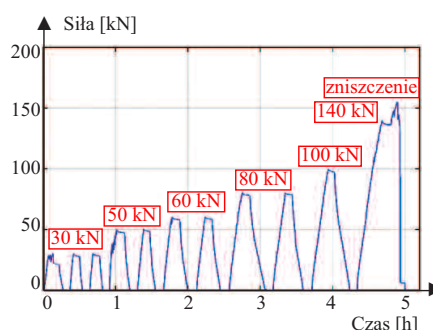
Właściwość	Typ pręta		
	ø8	ø10	ø12
Średnica rdzenia pręta [mm]	7,2	8,5	10,2
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	1175	1241	1166
Moduł sprężystości [GPa]	49	53	53
Odształcenie graniczne [%]	2,5	2,3	2,4



**Rys. 1. Stanowisko badawcze: a) widok z boku; b) widok w planie**

Fig. 1. Test setup: a) elevation; b) plan

nego na ramie stalowej zamocowanej do podłogi w hali laboratoryjnej. Płyty obciążano statycznie w sześciu etapach, a następnie aż do zniszczenia (rysunek 2). W celu ustabilizowania wyników pomiarów utrzymywano obciążenie maksymalne i zerowe przez ok. 5 minut.



**Rys. 2. Program obciążania statycznego badanych płyt**

Fig. 2. Actual loading scheme for static load test of slab

## Wyniki badań i ich analiza

Wyniki badań trzech płyt z betonu zwykłego i czterech z betonu lekkiego przedstawiono w tabeli 4. Pomimo przyjętych założeń nie wszystkie płyty zniszczyły się w wyniku ścinania. Ele-

Tabela 4. Wyniki badań płyt

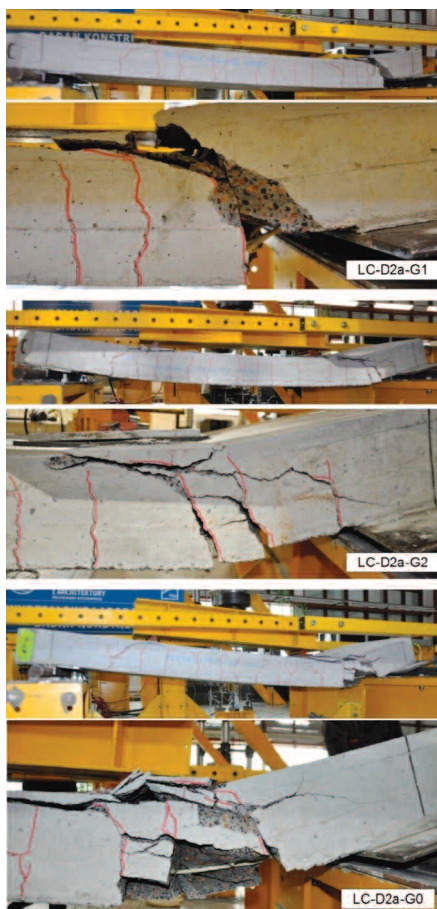
Table 4. Experimental results for tested slabs

Oznaczenie płyty	Siła niszcząca $P_{ul}$ [kN]	Maksymalna siła ścinająca odpowiadająca $P_{ul}$ [kN]	Maksymalny moment zginający odpowiadający $P_{ul}$ [kNm]	Postać zniszczenia
NC-D1-G1	171,9	91,6	54,5	zginanie
NC-D2a-G1	197,7	104,5	62,2	zginanie
NC-D2b-G1	202,6	106,9	63,7	zginanie (balanced failure)
LC-D1-G1	144,7	77,0	45,8	zginanie (balanced failure)
LC-D2a-G1	155,5	82,4	63,3	ściananie
LC-D2a-G2	203,1	106,2	48,9	ściananie
LC-D2a-G0	155,1	82,2	49,1	ściananie

menty z betonu zwykłego NC-D1-G1 i NC-D2a-G1 uległy zniszczeniu przez zginanie w wyniku rozerwania prętów GFRP przy sile maksymalnej odpowiednio 171,9 i 197,7 kN. Tak jak się spodziewano, większy stopień zbrojenia płyty skutkowało większym obciążeniem niszczącym. Płyta z betonu zwykłego NC-D2b-G1 (większa średnica i rozstaw prętów zbrojenia niż w płycie NC-D2a-G1) miała zbliżoną nośność do płyty NC-D2a-G1, która wyniosła 202,6 kN, ale jej zniszczenie nastąpiło przez zginanie przy jednoczesnym rozerwaniu prętów GFRP oraz zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej (określane w języku angielskim jako „balanced failure”).

Prawie wszystkie płyty z betonu lekkiego uległy zniszczeniu w wyniku ścianania. W trzech płytach wystąpiła propagująca rysa ukośna i w efekcie zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej. Płyty LC-D2a-G1 i LC-D2a-G0 wykazały podobną nośność, a siła niszcząca wynosiła odpowiednio 155,5 oraz 155,1 kN. Największą wartość obciążenia niszczącego 203,1 kN uzyskano w przypadku płyty LC-D2a-G2. Wyjątkiem była płyta LC-D1-G1, która uległa zniszczeniu przez zginanie typu „balanced failure” pod obciążeniem niszczącym 144,7 kN. Postacie zniszczenia płyt z betonu lekkiego przez ściananie przedstawiono na fotografii.

Uzyskane wyniki badań porównano z nośnością na ściananie płyt wyznaczoną wg różnych norm i wytycznych, dotyczących projektowania konstrukcji betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi GFRP, m.in. amerykańskich [2], kanadyjskich [5], włoskich [3] i japońskich [8], ale pominięto obliczeniowe współczynniki bezpieczeństwa.



Zniszczenie płyt z betonu lekkiego przez ściananie: rysa ukośna i zmiążdżenie betonu

Shear failure of LWC slabs: diagonal tension crack and concrete crushing

W związku z tym, że w obliczeniach należało stosować wytrzymałość betonu na ściskanie określoną na próbkach cylindrycznych, a w badaniach wyznaczano ją na próbkach sześciennych, przyjęto do analizy 81% i 92% wytrzymałości odpowiednio betonu zwykłego i lekkiego (na podstawie relacji tych wytrzymałości w zadanej klasie betonu wg [15]). W tabeli 5 przedstawiono obliczeniową

Tabela 5. Porównanie nośności na ściananie badanych płyt

Table 5. Prediction and comparison of shear strength for tested slabs

Oznaczenie płyty	Nośność na ściananie [kN] wg				Maksymalna siła ścinająca wg badań doświadczalnych [kN]
	ACI 440.1R [2]	CSA S806 [5]	CNR-DT 203 [3]	JSCE [8]	
NC-D1-G1	26,5	98,2	145,0	54,5	91,6
NC-D2a-G1	30,4	98,6	143,6	60,0	104,5
NC-D2b-G1	31,5	97,6	148,2	61,3	106,9
LC-D1-G1	28,8	108,3	121,2	58,2	77,0
LC-D2a-G1	33,1	108,8	119,9	64,1	82,4
LC-D2a-G2	33,1	108,8	119,9	64,1	106,2
LC-D2a-G0	33,1	108,8	119,9	64,1	82,2

nośność na ściananie badanych płyt wg różnych wytycznych, a w tabeli 6 nośność na zginanie wg wytycznych amerykańskich [2].

Porównując nośność na ściananie wyznaczoną wg przedstawionych procedur obliczeniowych z nośnością uzyskaną z badań doświadczalnych, można zaobserwować, że wartości uzyskane wg wytycznych amerykańskich [2] i japońskich [8] są zaniżone. Średni stosunek nośności uzyskanej w badaniach (w przypadku płyt, które uległy zniszczeniu w wyniku ścianania) do nośności obliczonej wynosi 2,73 oraz 1,41 odpowiednio w przypadku wytycznych amerykańskich [2] i japońskich [8]. Z drugiej strony nośność na ściananie wyznaczona wg normy kanadyjskiej [5] i wytycznych włoskich [3] jest zawyżona, a relacja nośności doświadczalnej do obliczonej wynosi odpowiednio 0,83 oraz 0,75. Tylko w przypadku normy kanadyjskiej [5] zastosowano współczynnik redukcyjny dla betonu lekkiego, ale nośność na ściananie analizowanych płyt jest zdeterminowana przez wartość minimalną nośności, tj. wyrażenie, w którym współczynnik ten nie występuje. W przypadku betonu na bazie kruszywa lekkiego, z piaskiem



**Tabela 6. Porównanie nośności na zginanie badanych płyt**

Table 6. Prediction and comparison of flexural strength for tested slabs

Oznaczenie płyt	Nośność na ścinanie wg ACI 440.1R [2] [kNm]	Maksymalny moment zginający [kNm]
NC-D1-G1	49,0	54,5
NC-D2a-G1	61,2	62,2
NC-D2b-G1	62,4	63,7
LC-D1-G1	50,8	45,8
LC-D2a-G1	67,5	63,3
LC-D2a-G2	67,5	48,9
LC-D2a-G0	67,5	49,1

jako kruszywem drobnym, współczynnik ten wynosi 0,85. W wyniku jego zastosowania do wartości minimalnej nośności wg normy [5], jak sugerowała wcześniejsza wersja tej normy [4], uzyskuje się znacznie lepszą zgodność wyniku obliczeń z nośnością doświadczalną (98%). Analogiczny współczynnik redukcyjny (0,75) można zaproponować do podejścia wg wytycznych włoskich [3].

W przypadku zniszczenia płyt przez zginanie (wszystkie płyty z betonu zwykłego i jedna z betonu lekkiego), można uznać, że ich nośność na ścinanie jest większa niż siła ścinająca, odpowiadająca obciążeniu niszczącemu. Fakt ten wskazuje również na niedoszacowanie nośności na ścinanie zgodnie z wytycznymi amerykańskimi [2] i japońskimi [8], gdzie siła ścinania odpowiadająca obciążeniu niszczącemu (które nie spowodowało zniszczenia w wyniku ścinania) była znacznie większa niż teoretyczna wytrzymałość na ścinanie, zarówno w przypadku płyt z betonu zwykłego, jak i lekkiego. Można zatem stwierdzić dobrą zgodność nośności na zginanie wyznaczonej wg wytycznych amerykańskich [2] z nośnością uzyskaną podczas badań (tabela 6).

## Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz stwierdzono, że:

- trudno wskazać najbardziej właściwą procedurę obliczania nośności na ścinanie płyt LWC/GFRP spośród analizowanych. Zweryfikowano cztery podejścia obliczeniowe, ale każde wy-

każało mniejsze lub większe rozbieżności w porównaniu z nośnością doświadczalną;

- na podstawie wytycznych japońskich [8] uzyskano zaniżoną wartość nośności, podobnie jak w przypadku wytycznych amerykańskich [2]. Natomiast wytyczne włoskie [3] i kanadyjskie [5] dają wynik zawyżony w porównaniu z nośnością określoną w badaniach;

- wartości uzyskane wg wytycznych amerykańskich [2] wykazują dobrą zgodność nośności na zginanie z uzyskaną w badaniach zarówno w przypadku płyt z betonu lekkiego, jak i zwykłego ze zbrojeniem GFRP, ale przedstawione podejście wyznaczania nośności na ścinanie daje najbardziej konserwatywny wynik spośród analizowanych;

- większość analizowanych wytycznych nie uwzględnia współczynnika redukcji nośności na ścinanie z uwagi na zastosowanie betonu lekkiego, jak ma to miejsce w przypadku konstrukcji zbrojonych prętami stalowymi [15]. Tylko norma kanadyjska prezentuje takie podejście [5]. Współczynnik redukcji nośności na ścinanie betonu lekkiego zaproponowany w przypadku wytycznych włoskich [3] daje najlepszą zgodność pomiędzy nośnością wyznaczoną eksperymentalnie i obliczoną analitycznie.

W artykule przeanalizowano cztery wybrane podejścia obliczeniowe wyznaczania nośności na ścinanie. Istnieje potrzeba dalszego poszukiwania procedury obliczeniowej najbardziej odpowiedniej do stosowania w przypadku płyt LWC/GFRP [17] oraz zweryfikowania jej na większej liczbie modeli badawczych.

## Literatura

[1] ACI 440.1R. 2006. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars.  
 [2] ACI 440.1R. 2015. Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) bars.  
 [3] CNR-DT 203. 2006. Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars.  
 [4] CSA S806. 2002. Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers.  
 [5] CSA S806. 2012. Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers.

[6] DIN 1048-5. 1991. Testing concrete; testing of hardened concrete (specimens prepared in mould).

[7] ISO 10406-1. 2015. Fibre-reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – Test methods – Part 1: FRP bars and grids.

[8] JSCE, 1997. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials.

[9] Liu Ruifen, Chris Pantelides. 2013. „Shear strength of GFRP reinforced precast lightweight concrete panels.” *Construction and Building Materials* 48: 51 – 58. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2013.06.057.

[10] Markiewicz Barbara, Karol Pereta, Grzegorz Piatkowski. 2015. „The dynamic properties of the bridge deck model reinforced with FRP bars.” *MATEC Web of Conferences*, 24, 09005. DOI: 10.1051/mateconf/20152409005.

[11] PN-EN 12390-1:2013. Badania betonu. Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badania form.

[12] PN-EN 12390-2:2011. Badania betonu. Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.

[13] PN-EN 12390-3:2011. Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.

[14] PN-EN 12390-6: 2011. Badania betonu. Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badań.

[15] PN-EN 1992-1-1:2008. Eurokod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

[16] Siwowski Tomasz, Damian Kaleta, Mateusz Rajchel, Lech Własak. 2017. „The first Polish road bridge made of FRP composites.” *Structural Engineering International* 27 (2): 308 – 314. DOI: 10.2749/101686617X14881932436339.

[17] Wiater Agnieszka, Tomasz Siwowski. 2017. „Nośność na ścinanie zginanych elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi FRP w świetle wybranych procedur obliczeniowych.” *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury/Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, 64 (2/II/17): 267 – 297. DOI: 10.7862/rb.2017.98

[18] Wiater Agnieszka, Tomasz Siwowski. 2017. „Lightweight concrete bridge deck slabs reinforced with GFRP composite bars.” *Roads and Bridges – Drogi i Mosty*, 16 (4): 279 – 293. DOI: 10.7409/rabdim.017.018

[19] Wiater Agnieszka. 2017. „Research on the lightweight concrete bridge deck slabs reinforced with GFRP composite bars.” *Architecture – Civil Engineering – Environment, ACEE*, 10 (4): 115 – 120. DOI: 10.21307/acee-2017-055.

## Podziękowanie

Autorzy dziękują firmie ALBA Kompozit za pręty GFRP oraz firmie LSA sp. z o.o. za kruszywo lekkie Certyd wykorzystane do wykonania modeli badawczych.

Przyjęto do druku: 03.03.2020 r.