

mgr inż. Rafał Wasilczyk<sup>1)</sup>  
ORCID: 0000-0001-5136-6801

# Wpływ cyklicznego zamrażania i rozmrażania na efektywność zakotwienia zbrojenia FRP w betonie

## *The influence of cyclic freezing – thawing on the effectiveness of anchoring FRP reinforcement in concrete*

DOI: 10.15199/33.2023.10.03

**Streszczenie.** Celem badań było określenie wpływu cyklicznego zamrażania i rozmrażania na efektywność zakotwienia zbrojenia niemetalicznego BFRP i HFRP w belkach betonowych. Analizy pozwoliły na potwierdzenie identycznego zachowania się innowacyjnego zbrojenia HFRP w porównaniu z prętami BFRP. Wartości poślizgu prętów zbrojeniowych poddanych wpływowi cyklicznego zamrażania i rozmrażania były średnio o 50% większe niż prętów utrzymywanych w stałej temperaturze +20°C. **Słowa kluczowe:** zbrojenie niemetaliczne; efektywność zakotwienia; rozszerzalność termiczna; cykliczne zamrażanie i rozmrażanie.

**Abstract.** The aim of the research work was to determine the influence of cyclic freezing and thawing on anchoring non-metallic BFRP and HFRP reinforcements in concrete beams. The analyses allowed confirmation of the analogy of the behavior of innovative HFRP bars in relation to the widely known BFRP bars. The values of slip for rebars subjected to cyclic freezing and thawing were an average of 50% greater than the values of slip recorded for those kept at constant temperature +20°C.

**Keywords:** non-metallic reinforcement; effectiveness of anchoring; thermal expansion; cyclic freezing and thawing.

Pręty FRP charakteryzują się większym współczynnikiem rozszerzalności termicznej CTE [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ] niż beton. W przypadku materiałów kompozytowych należy rozróżnić wartości współczynnika w kierunku poprzecznym do włókien TCTE (*Transverse Coefficient of Thermal Expansion*), zależnym w głównej mierze od właściwości matrycy polimerowej, oraz podłużnym LCTE (*Longitudinal Coefficient of Thermal Expansion*), który zależy przede wszystkim od właściwości włókien. Wartości współczynników TCTE w przypadku prętów AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*) są 8-krotnie, a w przypadku prętów CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) i GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) 3-krotnie większe od wartości współczynnika rozszerzalności betonu [1]. Pod wpływem cyklicznego zamrażania i rozmrażania zbrojenie kompozytowe, znajdujące się wewnątrz elementów betonowych, będzie odkształcało się znacznie bardziej niż otaczający je beton. To z ko-

lei spowoduje powstanie naprężeń i mikroprzeźreń na styku obu materiałów. Konsekwencją opisanego zjawiska może być zmniejszenie przyczepności na styku zbrojenie – beton, prowadzące do przedwczesnej utraty nośności elementów betonowych [2, 3]. Większość badań opisujących zagadnienie rozszerzalności termicznej zbrojenia niemetalicznego obejmowała zachowanie się GFRP, CFRP lub AFRP pod wpływem zmiennej temperatury [3, 4], podczas gdy tylko nieliczne prace traktowały o BFRP (*Basalt Fiber Reinforced Polymer*) [5, 6], co stało się przyczynkiem do przeprowadzenia eksperymentów opisanych w artykule.

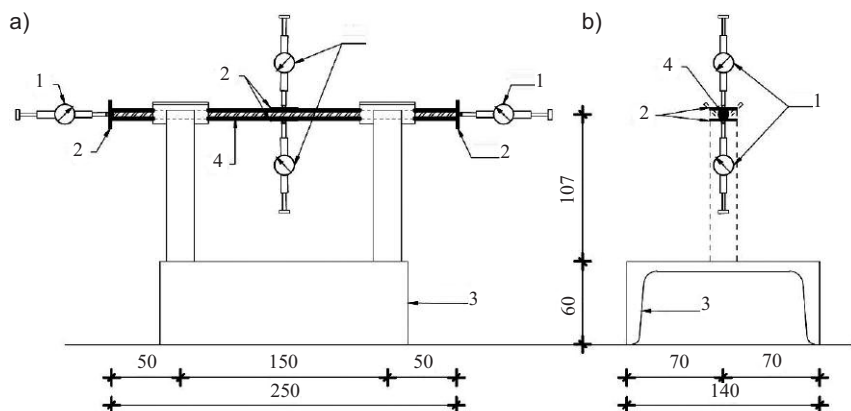
Program badań obejmował wyznaczenie współczynników rozszerzalności termicznej podłużnej LCTE i poprzecznej TCTE oraz badanie efektywności zakotwienia zbrojenia kompozytowego typu BFRP i HFRP (*Hybrid Fiber Reinforced Polymer*) w betonie. Ich celem było określenie wpływu cyklicznego zamrażania i rozmrażania na efektywność zakotwienia prętów bazaltowych i hybrydowych (wykonanych z włókien węglowych i bazaltowych) w betonie.

### Procedura wyznaczenia współczynnika rozszerzalności termicznej

Procedura badania rozszerzalności termicznej podłużnej LCTE i poprzecznej TCTE prętów kompozytowych polegała na umieszczeniu prostego odcinka pręta typu BFRP oraz HFRP długości 250 mm w specjalnie zaprojektowanej, stalowej ramie podporowej i przyłożeniu do niego dwóch przeciwstawnych par czujników zegarowych o dokładności 0,001 mm i zakresie 1,0 mm (rysunek 1). Próbkę ułożono swobodnie na dwóch podporach, a ich pozycja była stabilizowana siłami nacisku trzpieni czujników pomiarowych. W celu zwiększenia dokładności pomiarów i uniknięcia przypadkowego zsunienia się główek czujników z nieregularnej powierzchni prętów, naklejono stalowe blaszki o wymiarach 20×20×2 mm w miejscach planowanych pomiarów.

Przedmiotem badań były pręty BFRP i HFRP na bazie matrycy z żywicy epoksydowej oraz osnowie z włókien bazaltowych i mieszanych (75% włókien bazaltowych i 25% włókien węglowych). Do eksperymentu zastosowano po trzy pręty o średnicy 4, 6 i 8 mm.

<sup>1)</sup> Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku; r.wasilczyk@pb.edu.pl



Rys. 1. Schemat stanowiska do badania podłużnej i poprzecznej rozszerzalności termicznej prętów kompozytowych; a) widok z boku; b) przekrój; 1 – czujniki zegarowe; 2 – naklejane stalowe blaszki; 3 – rama podporowa; 4 – pręty kompozytowe o długości 250 mm. Wszystkie wymiary podano w mm

Fig. 1. Scheme of a test stand for testing longitudinal and transverse thermal expansion of composite bars: a) side view; b) cross-section; 1 – dial indicators; 2 – steel plates; 3 – support frame; 4 – composite bars 250 mm long. All dimensions are in mm

W pierwszej kolejności cały przedstawiony układ umieszczono w komorze zamrażalniczej i dokonano referencyjnych odczytów czterech czujników zegarowych w temperaturze  $+20^{\circ}\text{C}$ . Następnie uruchomiono komorę, zadając 3 cykle zamrażania/rozmarzania w zakresie temperatury od  $-20$  do  $+20^{\circ}\text{C}$  w czasie 8 h każdy. Wykonano 5 pomiarów zmiany wydłużenia w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$  oraz  $+20^{\circ}\text{C}$  w przypadku każdego z rozpatrywanych prętów zbrojeniowych. Odnosząc wyniki pomiarów do długości próbek, przedstawiono je w tabeli w postaci współczynników rozszerzalności termicznej LCTE i TCTE [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ].

#### Wartości współczynników rozszerzalności termicznej podłużnej (LCTE) i poprzecznej (TCTE) oraz odchylenia standardowego ( $\sigma$ ) w przypadku zbrojenia BFRP i HFRP

Average values of longitudinal (LCTE) and transverse (TCTE) thermal expansion coefficients and standard deviation ( $\sigma$ ) values for BFRP and HFRP reinforcement

Rodzaj pręta	Średnica [mm]	LCTE ( $\sigma$ ) [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]		TCTE ( $\sigma$ ) [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	
BFRP	4,0	1,4 (0,2)		38,8 (2,3)	37,8 (2,1)
	6,0	1,7 (0,2)	1,5 (0,2)	36,5 (2,5)	
	8,0	1,5 (0,3)		38,2 (1,4)	
HFRP	4,0	1,7 (0,2)		32,6 (2,5)	33,5 (2,0)
	6,0	1,0 (0,2)	1,4 (0,2)	34,2 (2,9)	
	8,0	1,5 (0,2)		33,7 (0,4)	

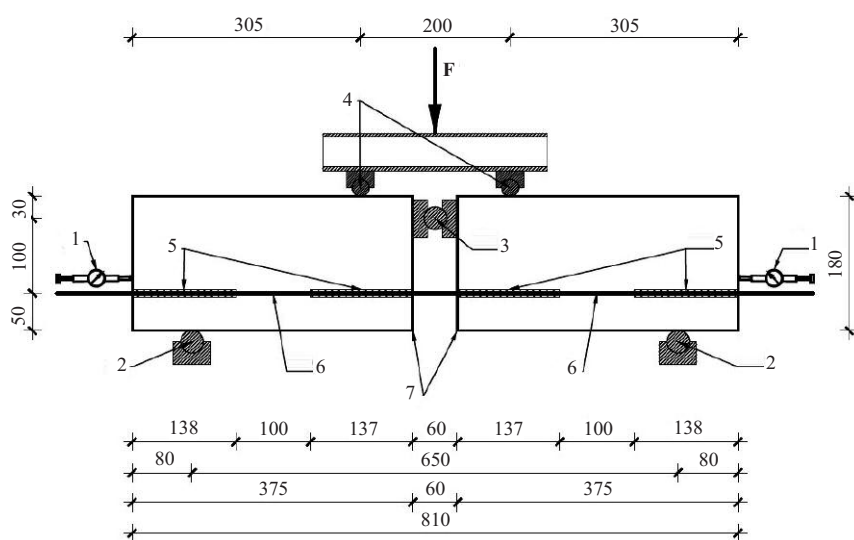
#### Procedura badania efektywności zakotwienia

Element próbny do badania efektywności zakotwienia składał się z dwóch belek betonowych połączonych stalowym przegubem, wykorzystujących wspólny pręt zbrojeniowy, co pokazano na rysunku 2. Wymiary belek odpowiadały próbkom z prętów zbrojeniowych o średnicy do 16 mm wg Rekomendacji RILEM [7]. Badano belkę swobodnie podpartą obciążoną dwiema symetrycznymi siłami. Długość zakotwienia pręta w betonie wynosiła dziesięciokrotność jego średnicy. Pozostałe odcinki pręta umieszczono w tulejach, osłaniających przed kontaktem z betonem, umożliwiając jego swobodne przemieszczanie się wzdłuż własnej osi. Na końcach prętów wystających poza obrys zewnętrzny belek zamocowano czujniki do pomiaru poślizgu zbrojenia o dokładności 0,001 mm i zakresie 30 mm. Wymagane było przygotowanie specjalnych form umożliwiających centryczne ułożenie prętów zbrojeniowych oraz stalowego zbrojenia konstrukcyjnego, uniemożliwiającego rozłupanie elementów betonowych (fotografia). Do badań zastosowano beton klasy C30/37 odpowiadający wymaganiom stawianym betonom eksploatowanym w klasie ekspozycji XF3 wg normy PN-EN 206+A1:2016-12 [8].

Wykonano łącznie 12 serii belek z zastosowaniem prętów BFRP i HFRP o średnicy 4, 6 i 8 mm, które zróżnicowano pod względem sposobu kondycjonowania. W pierwszej kolejności wszystkie próbki były sezonowane przez 28 dni w wodzie o stałej temperaturze  $+20^{\circ}\text{C}$ . Następnie, 6 serii próbek umieszczono w komorze zamrażalniczej o kontrolowanej zmiennej temperaturze, poddając je 150 cyklom zamrażania i rozmrażania w zakresie od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+20^{\circ}\text{C}$ , odwzorowując pięćdziesięcioletni okres eksploatacji elementów w przypadku, gdy te znajdują się w strefie wahań poziomu wody lub środków rozmrażających wg PN-B-06265:2018-10 [9]. Pozostałe 6 serii próbek umieszczono w klimatyzowanym pomieszczeniu o stałej temperaturze  $+20^{\circ}\text{C}$  i wilgotności powietrza 40%. Wszystkie próbki złożono w pomieszczeniu o stałej temperaturze  $+20^{\circ}\text{C}$  na 24 h w celu przygotowania do testów niszczeniowych. Elementy belkowe badano w stałej temperaturze  $+20^{\circ}\text{C}$ .

Rozstaw podpór w maszynie wytrzymałościowej wynosił 650 mm. Obciążenia przyłożono za pomocą dwóch stalowych rolek, rozsuniętych o 200 mm (rysunek 2). Zadawanie obciążeń następowało etapami, zatrzymując przyrost i stabilizując ich poziom po osiągnięciu ustalonych wartości naprężeń w prętach, co 80 MPa. Na podstawie wzorów przedstawionych w PN-EN 10080:2007 [10] obliczono, jaka siła jest wymagana do przyłożenia na trawers stanowiska badawczego, aby uzyskać teoretyczne wartości naprężenia w prętach FRP o wartości 80, 160, 240 MPa itd., aż do zniszczenia belki. Obciążenie zwiększano konsekwentnie do momentu zniszczenia badanego elementu. Każdy z zadanych kroków obciążenia był osiągnięty w czasie 30 s. Obciążenie siłą o stałej wartości w przypadku danego kroku trwało nie dłużej niż 120 s. Pomiaru poślizgów prętów dokonywano po ustabilizowaniu się odczytów z obu czujników zegarowych.

Podczas testu zarejestrowano wartości sił przy poślizgach prętów równych 0,01, 0,1, 1 mm, a także wartość maksymalnej siły niszczącej, jaką udało się uzyskać. Badanie zakończono po całkowitej utracie przyczepności bada-



Rys. 2. Schemat stanowiska do badania efektywności zakotwienia prętów: 1 – czujniki zegarowe; 2 – podpory przegubowe; 3 – przegub stalowy; 4 – rolki obciążeniowe; 5 – osłonowe rurki aluminiowe; 6 – strefa zakotwienia prętów FRP (długość  $10 \times \varnothing$ ) o średnicy  $4 \div 8$  mm; 7 – belki betonowe. Wszystkie wymiary podano w mm

Fig. 2. Arrangement for testing the efficiency of bar anchoring: 1 – dial indicators; 2 – supports; 3 – steel joint; 4 – load rollers; 5 – aluminum shielded tubes; 6 – anchoring zone of FRP bars (length of  $10 \times \varnothing$ ) with diameter  $4 \div 8$  mm; 7 – concrete beams. All dimensions are in mm



Zbrojenie próbki w trakcie montażu w formie. Jedynie centralny pręt kompozytowy jest przeprowadzany przez ściany formy. Pozostałe otwory, to otwory montażowe na śruby  
Sample reinforcement during assembly in the mol. Only the central composite bar is routed through the mold walls. The other holes are mounting holes for screws

nych prętów w obu częściach próbek belkowych lub po zerwaniu kompozytowego pręta zbrojeniowego. W przypadku zaobserwowania poślizgu o wartości większej niż 3,0 mm na jednym z końców belki, wzmacniano zakotwienie pręta w celu zablokowania dalszego przemieszczenia i kontynuowano badanie aż do zerwania połączenia w pozostałej części elementu próbnego. Stabi-

lizacja następowała za pomocą obejm stalowej odpowiedniej długości ze śrubami i szybkowiązającego kleju mocowanych na końcu belki.

### Wyniki badań

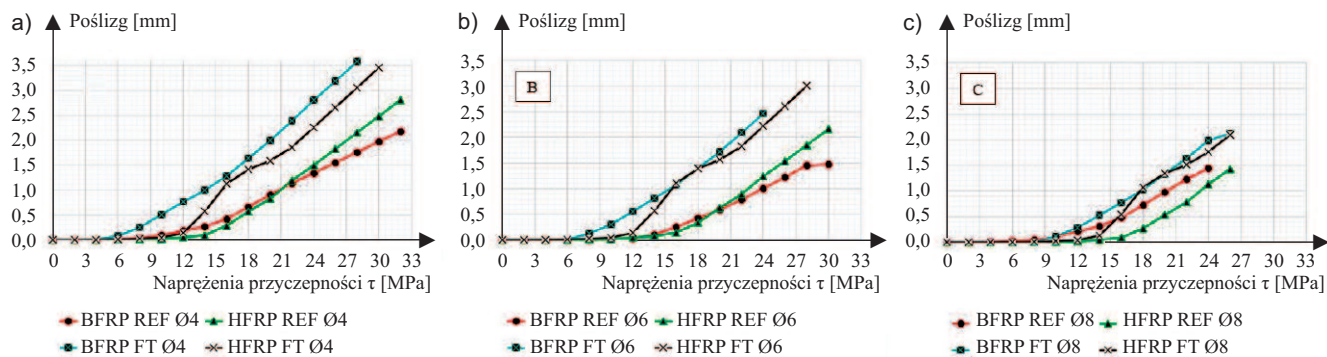
Otrzymane wartości współczynników rozszerzalności termicznej prętów bazaltowych i hybrydowych odpowiadały typowemu zakresowi wartości

współczynników, jakimi charakteryzują się pręty na bazie włókien węglowych i szklanych (tabela). Badania wykazały, że pręty HFRP charakteryzują się o 11,4% mniejszą wartością współczynnika TCTE oraz o 6,7% mniejszą wartością współczynnika LCTE niż pręty BFRP. Odpowiada za to wpływ 25% zawartości włókien węglowych w przypadku prętów hybrydowych. Zgodnie z danymi przedstawionymi w [1], próbki na bazie włókien CFRP wykazywały mniejsze wartości współczynnika rozszerzalności termicznej względem próbek na bazie włókien BFRP otrzymanych w przeprowadzonych badaniach.

Elementy belkowe, które poddano cyklicznemu zamrażaniu/rozmarzaniu, oznaczono jako FT, natomiast kondycjonowane w stałej temperaturze jako REF. Wartości poślizgu prętów w zależności od przyłożonego obciążenia przedstawiono na rysunku 3. Destrukcyjny wpływ cyklicznego zamrażania i rozmarzania na trwałość strefy kontaktowej beton – pręt kompozytowy stwierdzono, porównując wartość poślizgu prętów FRP na poszczególnych poziomach obciążenia belek. Serie typu BFRP FT charakteryzowały się większym poślizgiem prętów (średnio o 51%) niż serie typu BFRP REF. Analogicznie, serie HFRP FT charakteryzowały się średnio o 48% większym poślizgiem prętów niż serie HFRP REF.

Wartości naprężeń przyczepności wszystkich serii prętów przy poślizgu 0,01, 0,1 i 1,0 mm były zbliżone. W przedziale  $0 \div 20\%$  maksymalnego obciążenia nie odnotowano dużych wartości poślizgu prętów. Natomiast po osiągnięciu 20% wyężenia zaobserwowano gwałtowne zwiększenie wartości poślizgu wraz ze wzrostem obciążenia. Powyżej 40% maksymalnego obciążenia wykres przyrostu wartości poślizgu prętów charakteryzował się liniowym przebiegiem aż do momentu zniszczenia próbek. Nie zaobserwowano fazy plastycznej pracy prętów.

Docelowym kryterium zniszczenia wszystkich badanych elementów było zerwanie prętów kompozytowych. W żadnej z prób nie osiągnięto całkowitego wyślizgnięcia się zbrojenia z belek



Rys. 3. Średnie wartości poślizgu prętów [mm] w zależności od wartości naprężeń przyczepności [MPa] w przypadku prętów o średnicy: a) 4 mm; b) 6 mm; c) 8 mm

Fig. 3. Average values of bar slips [mm] depending on the value of adhesion stress [MPa] for bars with diameters of: a) 4 mm; b) 6 mm; c) 8 mm

betonowych. Maksymalne osiągnięte poziomy naprężeń w prętach były, w przybliżeniu, zgodne z przewidywanymi wartościami wytrzymałości na rozciąganie. Belki serii FT ulegały zniszczeniu średnio przy sile o 10% mniejszej niż belki z serii REF. Wynika z tego, że największy wpływ na zmniejszenie trwałości elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi ma degradacja styku beton – kompozyt. Ponadto badania potwierdziły zbliżone wartości poślizgu prętów BFRP i HFRP w betonie. Wygląd zewnętrzny obu rodzajów prętów był niemal identyczny, dlatego też trudno było je odróżnić nieuzbrojonym okiem. Nawet poddanie próbek ekspozycji na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie nie pozwala dostrzec różnicy w stopniu ich degradacji.

## Wnioski

Podczas eksperymentu określono właściwości fizyczne prętów kompozytowych z włókien bazaltowych (BFRP) oraz z włókien bazaltowych i węglowych (HFRP), w warunkach zmiennej temperatury od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+20^{\circ}\text{C}$ . Pręty HFRP charakteryzują się mniejszymi współczynnikami rozszerzalności termicznej LCTE i TCTE odpowiednio o 6,7% i 11,4% w porównaniu z prętami BFRP. Miała na to wpływ zawartość 25% włókien węglowych w prętach hybrydowych. Uzyskane na podstawie badań wartości współczynników TCTE prętów FRP są trzykrotnie większe od wartości TCTE odpowiadających prętom stalowym opisanym w m.in. [1].

Dokonano oceny i porównania efektywności zakotwienia w betonie prętów BFRP i HFRP kondycjonowanych w stałej temperaturze  $+20^{\circ}\text{C}$  oraz cyklicznie zamrażanych i rozmrażanych w temperaturze od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+20^{\circ}\text{C}$ .

Duży wpływ na zmniejszenie trwałości elementów betonowych zbrojonych prętami kompozytowymi ma degradacja styku beton – pręt kompozytowy. Jest to efekt m.in. znacznej różnicy wartości współczynników rozszerzalności termicznej betonu ( $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) i prętów FRP ( $1,4 \div 37,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ). Pręty zbrojeniowe poddane wpływowi cyklicznego zamrażania i rozmrażania wykazywały średnio o 50% większe wartości poślizgu od utrzymywanych stale w dodatniej temperaturze. Świadczy to o spadku efektywności zakotwienia elementów eksploatowanych długotrwale w warunkach cyklicznie zmiennej (dodatniej i ujemnej) temperatury. W związku z tym należy rozważyć zwiększenie o 50% wymaganej długości zakotwienia elementów eksploatowanych na oddziaływanie środowiska XF3 wg [10] w porównaniu z elementami osłoniętymi od niekorzystnej temperatury.

Pod względem efektywności zakotwienia, trwałości, wyglądu lub stopnia degradacji powierzchni prętów nie stwierdzono istotnej różnicy pomiędzy zbrojeniem BFRP i HFRP.

## Literatura

[1] Mossakowski P. Reinforcing bars of polymer composites used in concrete engineering structures. Roads and Bridges – Drogi i Mosty. 2006; 1: 35 – 52.

[2] Belarbi A, Wang H. Bond durability of FRP bars embedded in fiber-reinforced concrete. J. Compos. Constr. 2002; 16 (4): 371–380.

[3] Masmoudi R, Zaidi A, Gérard P. Transverse thermal expansion of FRP bars embedded in concrete. J. Compos. Constr. 9 (5): 377–387.

[4] Aydin F. Experimental investigation of thermal expansion and concrete strength effects on FRP bars behavior embedded in concrete. Construction and Building Materials. 2018; 163: 1 – 8.

[5] Elgabbas F, Ahmed E, Benmokrane B. Development and characterization of basalt FRP reinforcing bars for concrete structures. Paper presented at the 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering International Institute for FRP in Construction. 2014; Vancouver, Canada, August 20–22.

[6] Pavalan V, Sivagamasundari R. Thermal Expansion Coefficient Of Basalt Fibre Reinforced Polymer Bars, International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM). 2019; Vol-05, Issue-01: 414 – 418.

[7] RILEM Recommendation RC5, 1982, Bond test for reinforcement steel. 1. Beam test.

[8] PN-EN 206+A1:2016-12 Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity.

[9] PN-B-06265:2018-10 Concrete – Specification, performance, production and conformity – National Annex to PN-EN 206+A1:2016-12.

[10] PN-EN 10080:2007 Stal do zbrojenia betonu – Spawalna stal zbrojeniowa – Postanowienia ogólne.

Pracę wykonano w Politechnice Białostockiej w ramach realizacji projektu badawczego finansowanego ze środków NCBiR pt. Innowacyjne hybrydowe zbrojenie kompozytowe FRP do konstrukcji infrastrukturalnych o podwyższonej trwałości, numer projektu PBS3/A2/20/2015 (ID 245084).

Przyjęto do druku: 17.07.2023 r.