

Badanie przyczepności prętów kompozytowych GFRP oraz BFRP do betonu

Mgr inż. Piotr Szymczak, Politechnika Łódzka

1. Wprowadzenie

Na rynku wyrobów budowlanych rośnie zainteresowanie produkcją, dystrybucją i stosowaniem prętów kompozytowych GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) oraz BFRP (*Basalt Fiber Reinforced Polymer*). Ich popularność wzrasta ze względu na liczne zalety: niską korozyjność, brak przewodności elektrycznej, niewrażliwość na pole elektromagnetyczne, niską masę prętów. Trzeba dodać, że niski współczynnik sprężystości i brak cech plastycznych kompozytu ograniczają jednak jego zastosowania konstrukcyjne.

Przy produkcji prętów FRP stosowane są różne rodzaje wykończenia powierzchni: oplot z pasm włókien nasączonych żywicą, posypka kwarcowa, zagłębienia odcisnięte przez formę produkcyjną. To powoduje, że przyczepność prętów FRP jest bardzo zróżnicowana i każdorazowo musi być zdefiniowana i gwarantowana przez producenta.

Metody badania przyczepności prętów FRP do betonu nawiązują do metod badania prętów stalowych [3, 4, 7]. W relacjonowanych badaniach zastosowano normową metodę odnoszącą się do prętów stalowych [4].

2. Charakterystyka geometryczna i materiałowa prętów

Badaniu przyczepności poddano pręty GFRP o średnicach nominalnych 8,5 mm i 11 mm oraz pręty BFRP o średnicach nominalnych 7 mm i 9 mm, wytwarzane przez tego samego producenta. We wszystkich prętach zastosowano dwukierunkowo wypukły oplot pasmami włókien nasączonych żywicą, o kącie pochylenia pasm około 45° (rys. 1).



Rys. 1. Widok powierzchni prętów kompozytowych: a) GFRP (szkło), b) BFRP (bazalt)

Tabela 1. Cechy prętów kompozytowych

Cecha pręta kompozytowego	Włókna szklane		Włókna bazaltowe	
	8,5	11	7	9
Nominalna średnica [mm]	8,5	11	7	9
Dopuszczalne odchyłki w pomiarze średnicy ⁽¹⁾ [mm]	± 0,5			
Nominalne pole przekroju [mm ²]	56,75	95,05	38,49	63,63
Charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie ⁽²⁾ [MPa]	939	962	918	888
Moduł sprężystości [GPa]	46,8	49,1	52,8	56,3
Charakterystyczne odkształcenie graniczne [%]	20,1	19,6	17,4	15,8
Ciężar jednostkowy [g/m]	113	190	75	120

(1) odchyłka wywołana zastosowaniem oplotu oraz występowaniem dolin między jego żeberkami

(2) wartość określona zgodnie z ACI 440.1R [1] równa wartości średniej wytrzymałości przy rozciąganiu pomniejszonej o 3,4-krotność odchylenia standardowego.

Geometryczne i wytrzymałościowe cechy prętów kompozytowych, zastosowanych w tych badaniach, są przedstawione w tabeli 1.

3. Próbkki do badania przyczepności

Badania przyczepności prętów przeprowadzono metodą belkową jak dla prętów stalowych, zgodnie z załącznikiem C normy PN-EN 10080 [4]. Stalowe pomocnicze zbrojenie próbek wykonano ze stali St500 zgodnie z rysunkiem C.3 normy – Badanie belki typu A ($d < 16$ mm) – jest ono pokazane na rysunku 2. Długość odcinka przyczepności wynosiła w każdym przypadku $10d$ (d – nominalna średnica pręta), na pozostałej



Rys. 2. Widok stalowego pomocniczego zbrojenia próbek umieszczanego w obu jej częściach



Rys. 3. Próbkę na stanowisku badawczym



Rys. 4. Widok przegubu belki



Rys. 5. Zamocowanie przetwornika przemieszczeń liniowych przy czole próbki

długości pręta przyczepność wykluczano, stosując tulejki z tworzywa sztucznego o średnicy wewnętrznej 14,6 mm. Dla każdej ze średnic wykonano po 5 belek. Wszystkie wymiary próbek spełniały wymagania normowe.

Wytrzymałość betonu na ściskanie f_{cm} wynosiła 31,9 MPa i została określona po 28 dniach na 6 próbkach walcowych o średnicy 150 mm oraz wysokości, po wyrównującym oszlifowaniu, 293 mm (± 3 mm). Wytrzymałość na rozciąganie f_{ctm} określono metodą rozłupywania na kostkach o boku 150 mm. Parametr ten określono dla 3 próbek w dniu rozpoczęcia badań przyczepności oraz 3 w dniu ich zakończenia, uzyskując odpowiednio wartości 2,50 MPa oraz 2,80 MPa.

4. Opis badania

Stanowisko badawcze wykonano zgodnie z normą PN-EN 10080 [4]. Widok próbki w stanowisku oraz detal przegubu zastosowanego w badaniu przedstawiają rysunki 3 i 4.

Przemieszczenia pręta kompozytowego względem betonu rejestrowano przy obu końcach próbki, za pomocą przetworników przemieszczeń liniowych o dokładności odczytu 0,01 mm. Przetworniki były umieszczone w uchwytach, przymocowanych do czołowych płaszczyzn próbki (rys. 5).

Siła obciążająca próbkę była oceniana na podstawie wskazań czujnika ciśnieniowego, umieszczonego w układzie hydraulicznym maszyny wytrzymałościowej klasy 1.0, o zakresie 200 kN. Wszystkie odczyty były zapisywane za pomocą komputerowego systemu akwizycji danych.

Przy każdym badaniu próbkę początkowo obciążano siłami przykładowymi skokowo, w celu sprawdzenia poprawności ustawienia, a potem przechodzono na obciążenie i zapis ciągły – odczyty były wtedy zapisywane co 1 sekundę. Badanie uznawano za zakończone, gdy występował gwałtowny przyrost przemieszczenia na jednym z czujników i towarzyszący mu spadek siły obciążającej.

5. Wyniki badania

Przykładowe wykresy zależności siła – przemieszczenie przedstawiono na rysunku 6. Symbole „z” oraz „nz” oznaczają odpowiednio tę połowę próbki, w której doszło do utraty przyczepności (zniszczenia), oraz w której do tego nie doszło. Warto podkreślić, że we wszystkich przypadkach wskazania obydwu czujników były zbliżone, różnice pojawiały się dopiero w fazie utraty przyczepności przy jednej z podpór. Świadczy to o stabilności zjawiska przyczepności badanych prętów kompozytowych do betonu.

W tabeli 2 są podane średnie wartości sił przyłożonych do próbki, określone przy poślizgu (przemieszczeniu pręta względem betonu) wynoszącym odpowiednio 0,01 mm, 0,1 mm i 1,0 mm, występującym w części próbki, w której doszło do utraty przyczepności (z). Zestawiono również odpowiadające im naprężenia rozciągające w prętach kompozytowych, określone ze wzoru:

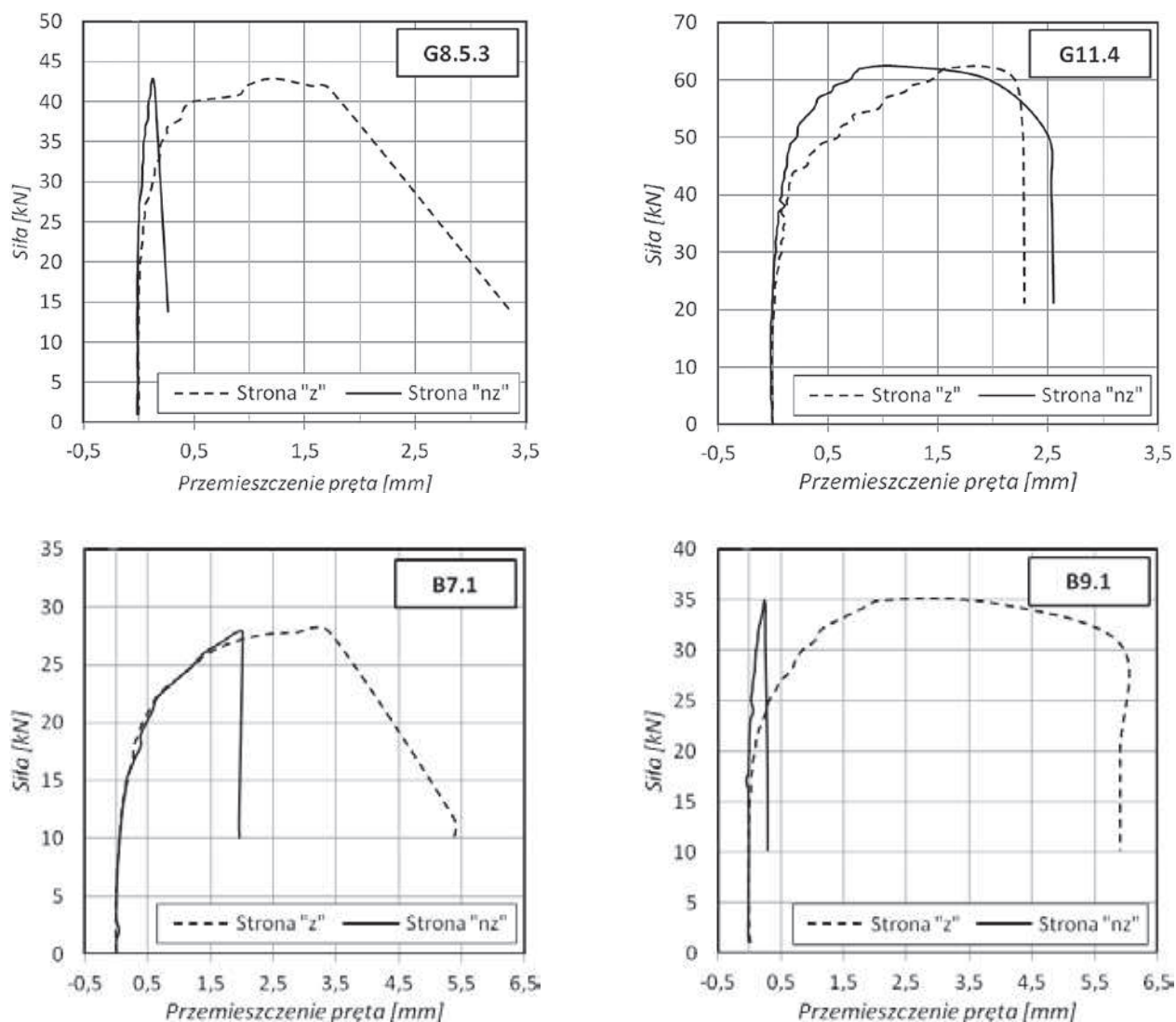
$$\sigma = \frac{1,25 \times F_a}{A_p} \times 10^3 \quad (1)$$

gdzie:

σ – naprężenie rozciągające w pręcie kompozytowym [MPa],

F_a – całkowita siła przyłożona do próbki [kN],

A_p – nominalne pole przekroju pręta [mm²].



Rys. 6. Przykładowe wykresy zależności siła obciążająca próbkę – poślizg pręta (przeszczenie wykazane przez przetwornik)

W tabeli 3 są podane średnie wartości naprężeń przyczepności, określone dla części próbki, w której doszło do utraty przyczepności (z), określone ze wzoru:

$$\tau = \frac{\sigma}{40} \quad (2)$$

gdzie:

τ – naprężenie przyczepności pręta kompozytowego [MPa],
 σ – naprężenie rozciągające w pręcie kompozytowym [MPa].

W tabeli 2 i 3 odniesiono również naprężenia maksymalne w prętach kompozytowych do ich charakterystycznej wytrzymałości na rozciąganie oraz naprężenia przyczepności $\tau_{0,01}$ do wytrzymałości betonu f_{ctm} . Jak można zauważyć, badane pręty GFRP wykazują nieco lepszą przyczepność niż pręty BFRP, a wzrost nominalnej średnicy skutkuje zmniejszeniem przyczepności.

Drugim parametrem, ocenianym w analizie przyczepności prętów stalowych do betonu, jest względne pole powierzchni

żebra f_R . W przypadku prętów FRP nie można jednoznacznie określić tej wielkości, gdyż powierzchnie żebra nie są ostre. Według PN-EN 1992-1-1 [5], załącznik C, przyczepność można uznać za wystarczającą – bez względu na wartość f_R – jeżeli naprężenia przyczepności, badane metodą CEB/RILEM, spełniają wymagania podane w tabeli 3 (dwie ostatnie kolumny). Z porównania doświadczalnych wartości τ i wartości wymaganych normą wynika, że w zasadzie warunki normowe są spełnione. Niedostateczną przyczepność wykazały jedynie pręty bazaltowe o średnicy 7 mm.

Przytoczone wyniki badania upoważniają do stwierdzenia, że przyczepność prętów kompozytowych nie odbiega znacząco od przyczepności prętów stalowych do betonu.

6. Podsumowanie

Wyniki badań prętów kompozytowych z krzyżowym oplotem wykazały, że zarówno pręty z włókien szklanych (GFRP), jak i włókien bazaltowych (BFRP) charakteryzują się bardzo dobrą

Tabela 2. Wyniki pomiarów naprężeń rozciągających w pręcie

Symbol próbki	Średnica nominalna [mm]	Średnia siła przyłożona do próbki [kN] przy poślizgu				Średnie naprężenie rozciągające [MPa] przy poślizgu				$\sigma_{\max}/f_{\text{luk}}$
		$F_{0,01}$	$F_{0,1}$	F_1	F_{\max}	$\sigma_{0,01}$	$\sigma_{0,1}$	σ_1	σ_{\max}	
G8.5	8,5	18,9	26,9	41,2	41,8	417,2	592,5	906,8	921,1	0,98
G11	11	23,3	36,1	51,5	54,7	306,4	475,3	677,5	719,1	0,75
B7	7	7,5	14,6	24,0	27,2	243,6	474,8	780,5	884,0	0,96
B9	9	13,8	18,8	28,2	32,2	348,4	438,1	639,9	708,2	0,80

Tabela 3. Wyniki badania naprężeń stycznych

Symbol próbki	Średnie naprężenie przyczepności [MPa] przy poślizgu				$\tau_{0,01}/f_{\text{ctm}}$		Wymagana wartość normowa [MPa]	
	$\tau_{0,01}$	$\tau_{0,1}$	τ_1	τ_{\max}	(1)	(2)	$\tau_{0,01}$	τ_{\max}
G8.5	10,4 (+3,3; -3,5)	14,8 (+2,8; -3,8)	22,7 (+0,7; -1,5)	23,0 (+0,6; -1,0)	4,17	3,72	6,84	11,47
G11	7,7 (+2,9; -1,9)	11,9 (+1,8; -1,3)	16,9 (+1,5; -1,3)	18,0 (+2,6; -1,9)	3,06	2,74	6,55	11,52
B7	6,1 (+8,1; -4,0)	11,9 (+4,9; -4,5)	19,5 (+1,7; -1,7)	22,1 (+1,5; -1,6)	2,44	2,17	7,02	11,43
B9	8,7 (+0,5; -0,4)	11,0 (+0,8; -0,7)	16,0 (+1,0; -1,2)	17,7 (+0,7; -0,9)	3,48	3,11	6,78	11,48

(1) wartość określona dla $f_{\text{ctm}}=2,50$ MPa

(2) wartość określona dla $f_{\text{ctm}}=2,80$ MPa

przyczepnością do betonu i spełniają wymagania stawiane prętom stalowym. Ta uwaga dotyczy przyczepności podstawowej – nie analizowano wpływu grubości betonowej otuliny ani rozstawu prętów. Dobrą przyczepność prętów wykazały również badania belek całkowicie lub częściowo zbrojonych prętami GFRP oraz BFRP [6].

Naprężenia w pręcie kompozytowym, odpowiadające utracie przyczepności pręta do betonu, są rzędu 75 do nawet 98% charakterystycznej wytrzymałości pręta na rozciąganie. Naprężenia przyczepności, odpowiadające przemieszczeniu pręta względem betonu równym 0,01 mm, wynosiły w porównaniu z wytrzymałością betonu na rozciąganie odpowiednio:

– pręty GFRP od 3,06 do 4,17 przy początkowej wartości f_{ctm} równej 2,50 MPa oraz od 2,74 do 3,72 przy końcowej wartości równej 2,8 MPa;

– pręty BFRP od 2,44 do 3,48 przy początkowej wartości f_{ctm} równej 2,50 MPa oraz od 2,17 do 3,11 przy końcowej wartości równej 2,8 MPa.

Wszystkie wartości naprężeń przedstawione w niniejszym artykule zostały obliczone dla średnicy nominalnej zgodnie z normą PN-EN 10080 [4], a nie dla średnicy ekwiwalentnej, jak to jest przyjmowane w normach dotyczących badań prętów kompozytowych [7]. Średnica nominalna oznacza przy tym wielkość podawaną przez producenta, a średnica ekwiwalentna średnicę wyznaczoną metodą hydrostatyczną, wobec czego na wynik wpływa także rodzaj wykończenia powierzchni pręta. Ten drugi sposób budzi zastrzeżenia w odniesieniu do prętów kompozytowych, mimo iż jest stosowany w normach dotyczących badań prętów kompozytowych [7], ponieważ włókna oplotu w bardzo małym stopniu wpływają na nośność pręta przy rozciąganiu.

Należy podkreślić, że przedstawione wyniki odnoszą się wyłącznie do badanych prętów. Inny sposób ukształtowania powierzchni prętów (oplot, posypka piaskowa, żebra) mogą w bardzo istotny sposób zredukować przyczepność kompozytowych prętów do betonu.

Przedstawione w niniejszym artykule badania posłużyły do wydania Aprobaty Technicznej Instytutu Badawczego Dróg i Mostów [2] dla prętów kompozytowych szklanych i bazaltowych.

Badania dofinansowane z funduszy projektu UE POIG „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”, POIG.01.01.02–10–106/09–00, za co autorzy serdecznie dziękują.

BIBLIOGRAFIA

[1] ACI 440.1R:2004 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars
 [2] AT/2014–02–3038 Aprobata Techniczna IBDiM Pręty kompozytowe z włókien do zbrojenia betonu, luty 2014
 [3] Kijania M., Metody wyznaczania wartości naprężenia przyczepności pomiędzy betonem a stalą zbrojeniową, Przegląd Budowlany 6/2015, czerwiec 2015, str. 38 – 42
 [4] PN-EN 10080:2007 Stal do zbrojenia betonu – Spajalna stal zbrojeniowa – Postanowienia ogólne
 [5] PN-EN 1992–1–1 Eurokod 2 – Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1–1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
 [6] Olbryk P., Szymczak P., Kamińska M. E., Flexural behavior of concrete beams reinforced with glass and basalt fibre-reinforced polymer (FRP), The 9th Central European Congress on Concrete Engineering, wrzesień 2013, str. 344 – 347
 [7] Szymczak P., Badanie fizycznych i wytrzymałościowych właściwości kompozytowych prętów zbrojeniowych w świetle norm, Przegląd Budowlany 6/2017, czerwiec 2017, str. 51– 55