

dr inż. Marek Urbański¹,
prof. dr hab. inż. Elżbieta Szmigiera¹
prof. dr hab. inż. Piotr Woyciechowski¹

¹Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska

Zaawansowana charakterystyka przyczepności zbrojenia kompozytowego do zmodyfikowanego betonu

Advanced bond characteristics of composite reinforcement to modified concrete

Streszczenie

Streszczenie. W ostatnich latach idea zrównoważonego rozwoju stała się wiodącym czynnikiem wpływającym na rozwój technologii betonu. Zastosowanie dodatków w postaci zeolitu i metakaolinitu może wpłynąć korzystnie na właściwości betonu takie jak przyczepność a także wytrzymałość na ściskanie, właściwości reologiczne oraz trwałość. W tym celu zbadano i porównano przyczepność prętów kompozytowych GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) i BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer) oraz prętów stalowych w betonie z dodatkami zeolitu i metakaolinitu. Badaniu poddano 27 próbek sześciennych w teście bezpośredniego wyciągania – pull-out i ustalono zależności przyczepność-poślizg oraz mechanizmy zniszczenia. Krzywe naprężenie przyczepności – poślizg wyznaczyły niektóre podstawowe różnice między prętami stalowymi a prętami GFRP i BFRP. Stwierdzono, że we wszystkich wykonanych testach uzyskane naprężenia przyczepności spełniają warunki normowych średnich i maksymalnych naprężeń przyczepności. Badania pokazały, że niezależnie od rodzaju betonu sposób utraty przyczepności prętów GFRP i BFRP różnił się zasadniczo od sposobu niszczenia prętów stalowych z powodu interakcji powierzchni pręta podczas procesu wyciągania. Największe maksymalne naprężenia przyczepności $t_{max} = 24,12$ MPa odnotowano w przypadku prętów BFRP dla betonu z dodatkiem zeolitu. Natomiast w betonie z dodatkiem metakaolinitu, maksymalne naprężenia przyczepności były także największe w przypadku prętów BFRP i wynosiły $t_{max} = 21,77$ MPa. Dodatek zeolitu do betonu zmniejszał ponad pięciokrotnie poślizg przy maksymalnym naprężeniu przyczepności, w przypadku prętów GFRP oraz ponad dwukrotnie dla prętów BFRP. Wykazano, że dodatek metakaolinitu w mniejszym stopniu wpływał na redukcję poślizgu prętów przy maksymalnej przyczepności. Dla prętów GFRP odnotowano 3,5-krotną redukcję a dla prętów BFRP ponad czterokrotną redukcję poślizgu w porównaniu ze zwykłym betonem. Najmniejszą redukcję poślizgu 19% zaobserwowano w przypadku prętów stalowych. Zastosowane dodatki mineralne charakteryzowały się dużą powierzchnią właściwą (zeolit 13500 cm²/g i metakaolinit 20 000 cm²/g) i wpłynęły na wyraźny wzrost wytrzymałości na rozciąganie betonu (18% i 10% odpowiednio). Wyniki badań jednak nie były tak jednoznaczne, co wskazuje, że oprócz powierzchni właściwej dodatku istotną rolę odgrywały także cechy technologiczne mieszanki betonowej oraz rodzaj interakcji w strefie kontaktu zaczyn- powierzchnia pręta. Wyjaśnienie tych kwestii powinno stanowić przedmiot dalszych badań.

Słowa kluczowe: Przyczepność, BFRP, GFRP, Test pull-out, Zeolit, Metakaolinit, Poślizg.

Abstract. In recent years, the idea of sustainable development has become a leading factor influencing the development of concrete technology. The use of additives in the form of zeolite and metakaolin can have a beneficial effect on concrete properties such as bond as well as compressive strength, rheological properties and durability. For this purpose, the bond strength of GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) and BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer) composite bars and steel bars in concrete with zeolite and metakaolin additives was tested and compared. 27 cubic samples were tested in the pull-out test and the bond-slip relationship and failure mechanisms were determined. The bond stress-slip curves outlined some basic differences between steel bars and GFRP and BFRP bars. It was found that in all performed tests the obtained bond stress meet the conditions of the standard average and maximum bond stress. The tests showed that, regardless of the type of concrete, the way the GFRP and BFRP bars lost their bond was fundamentally different from the way the steel bars failed due to the interaction of the bar surface during the pull-out test. The highest maximum bond stress $\tau_{\max} = 24.12$ MPa were recorded in the case of BFRP bars for concrete with the addition of zeolite. However, in concrete with the addition of metakaolin, the maximum bond stress were also the highest in the case of BFRP bars and amounted to $\tau_{\max} = 21.77$ MPa. The addition of zeolite to concrete reduced the slippage at maximum bond stress more than five times in the case of GFRP bars and more than twice for BFRP bars. It was shown that the addition of metakaolin had a lesser effect on the reduction of bar slippage at maximum bond stress. For GFRP bars, a 3.5 times reduction was noted, and for BFRP bars, a more than four times reduction in slip compared to plain concrete. The lowest slip reduction of 19% was observed for steel bars. The mineral additives used were characterized by a large specific surface area (zeolite 13,500 cm²/g and metakaolin 20,000 cm²/g) and significantly increased the tensile strength of concrete (18% and 10%, respectively). The test results, however, were not so clear, which indicates that in addition to the specific surface of the additive, the technological features of the concrete mix and the type of interaction in the contact zone between the matrix and the bar surface also played an important role. The clarification of these issues should be the subject of further research.

Keywords: Bond stress, BFRP, GFRP, Pull-out test, Zeolite, Metakaolin, Slip.

1. Wstęp

Innowacyjne działania w wyniku postępu technologicznego na przełomie wieków XX i XXI w zakresie materiałów budowlanych przyczyniły się do zmian w standardowych konstrukcjach betonowych, których prawidłowa praca wynika głównie ze zjawiska przyczepności między betonem a stalą zbrojeniową. Z uwagi na szeroką gamę innowacyjnych materiałów budowlanych, istnieje wiele możliwości zarówno modyfikacji składu tradycyjnego betonu jak i zastąpienie konwencjonalnej stali zbrojeniowej innymi materiałami kompozytowymi FRP (Fiber Reinforced Polymer)[1]. Zastosowanie prętów zbrojenia kompozytowego ma wiele zalet. Pręty kompozytowe są znacznie lżejsze niż pręty stalowe, co ułatwia ich transport oraz montaż. Ponadto, pręty kompozytowe są odporne na korozję oraz wykazują większą wytrzymałość na rozciąganie niż pręty stalowe, co wpływa na wydłużenie żywotności konstrukcji[2]. Jednakże zastosowanie prętów kompozytowych w konstrukcjach może być ograniczone, z uwagi na niską wartość parametrów sprężystości i brak wykazywania cech uplastycznienia, które są charakterystyczną cechą prętów stalowych. Wśród różnych rodzajów prętów FRP, pręty z polimeru wzmocnionego włóknem bazaltowym (BFRP) i polimeru wzmocnionego włóknem szklanym (GFRP) stały się obiecującą alternatywą dla tradycyjnego zbrojenia stalowego. Jednak zachowanie przyczepności prętów FRP w betonie pozostaje przedmiotem ciągłych badań [1].

Najszerzej stosowanymi kompozytami konstrukcyjnymi FRP są pręty wykonane z włókien szklanych (GFRP) z uwagi na cenę. W dalszej kolejności, pręty na bazie włókien bazaltowych (BFRP). BFRP to stosunkowo nowy rodzaj prętów zbrojeniowych, który może stanowić ekonomiczną alternatywę dla prętów GFRP. Pręty BFRP złożone z włókien bazaltowych i osnowy epoksydowej były przedmiotem badań i wykazały doskonałą odporność na warunki środowiskowe. Dane literaturowe dla belek z prętami BFRP potwierdziły ich przydatność w tym zakresie [3, 4]. Oba rodzaje prętów wykazują różne właściwości mechaniczne w zależności od składników.

Jedną z kluczowych właściwości mechanicznych prętów zbrojeniowych jest ich przyczepność do betonu. Współdziałanie betonu i zbrojenia jest możliwe dzięki przyczepności – tj. zdolności do przenoszenia sił pomiędzy dwoma materiałami budowlanymi. Na poprawę przyczepności zbrojenia wpływa z jednej strony rodzaj użebrowania a z drugiej wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie betonu. Substytucja części cementu dodatkami mineralnymi w postaci zeolitu i/lub metakaolinitu wpływa na zwiększenie parametrów betonu a tym samym jego przyczepności.

Należy zaznaczyć że, zastosowanie dodatków mineralnych do betonu w postaci zeolitu i metakaolinitu znacząco wpływa na ograniczenie energochłonności konstrukcji z betonu zbrojonego. Jednocześnie jest czynnikiem, który znacząco oddziałuje na rzecz zrównoważonego rozwoju z uwagi na mało energochłonne składniki mineralne będące korzystną alternatywą części cementu. Produkcja każdej tony cementu portlandzkiego wymaga zużycia około 1,2 tony kamienia wapiennego, 0,11 tony standardowego węgla. Powoduje to wyemitowanie około 0,85-0,92 tony CO₂ oraz znaczną ilość NO_x [5, 6, 7]. Substytut cementu w postaci zeolitu lub metakaolinitu bez

wysokotemperaturowej kalcynacji lub spiekania, może zmniejszyć emisję CO₂ o około 70% podczas produkcji i użytkowania [8].

1. 1 Dodatki mineralne do betonu

W ostatnich latach idea zrównoważonego rozwoju stała się wiodącym czynnikiem wpływającym na rozwój technologii betonu. Coraz częściej podstawowe składniki betonu ulegają modyfikacji, polegającej na redukcji ilości cementu w mieszance betonowej. Zastosowanie dodatku na rzecz częściowej redukcji cementu, prowadzi do zmniejszenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery, generowanego na drodze produkcji cementu. Poza pozytywnym wpływem na środowisko naturalne, zastosowanie dodatków może wpłynąć korzystnie na właściwości betonu takie jak wytrzymałość na ściskanie, właściwości reologiczne oraz trwałość. Wśród nich bardzo obiecujące są dodatki w postaci zeolitu i metakaolinitu.

Zeolit jest niewątpliwie najczęściej stosowanym naturalnym dodatkiem pochodzenia wulkanicznego. zeolit stanowi niedrogi dodatek do betonu o bardzo szerokim potencjalne zastosowania [9]. Badania Czapika i Cebulskiego [10] dotyczące zeolitu jako dodatku do betonu, pozwoliły na określenie maksymalnej ilości zeolitu, jako częściowego zamiennika cementu w mieszance betonowej, która wynosi 40%. Wpływ na zachowanie betonu z zeolitem przebadano [11] pod względem zastosowania zeolitu jako częściowego zamiennika cementu w postaci proszku zeolitowego oraz częściowego zamiennika kruszywa drobnego w postaci piasku zeolitowego.

Zeolity to glinokrzemiany o porowatej budowie zawierające duże ilości reaktywnych SiO₂ i Al₂O₃. Wstępne badania potwierdziły korzystny wpływ modyfikatora w postaci zeolitu na wzrost wytrzymałości na ściskanie i zginanie, ale tylko przy udziale tego modyfikatora poniżej 15% masy cementu. Dodatek zeolitu ponadto zwiększa trwałość konwencjonalnego betonu nie tylko poprzez zmniejszenie przepuszczalności betonu, a przede wszystkim poprzez poprawę odporności na reakcję kruszywa alkalicznego.

Z kolei wysoka aktywność pucolanowa metakaolinitu powoduje, że z powodzeniem może pełnić rolę substytutu cementu i być stosowany jako dodatkowy składnik betonów poprawiający jego szczelność [12].

Na podstawie badań Güneyisi i in. można określić pozytywny wpływ metakaolinitu na zmniejszenie wrażliwości betonu na działanie gazów, co więcej zależność ta jest silnie powiązana ze stosunkiem w/s (woda/spoiwo) [13]. Badania Rutkowskiej oraz Pieńkosz [14], analizujące wpływ zawartości 0%, 10%, 15% metakaolinitu w betonie, wykazały iż wzrost metakaolinitu oddziałuje na zmniejszenie reaktywności dodatku z kruszywem w tzw. reakcji alkaliczno–krzemianowej, bez wpływu na zjawisko karbonatyzacji. Dodatek pucolanowy, czyli metakaolinit zużywa CH, który jest odpowiedzialny za zwolnienie postępu karbonatyzacji w betonie [15]. Zastosowanie metakaolinitu jako 10% dodatku do betonu, umożliwia redukcję sorpcyjności co udowodnił Razak i in. [16].

Zastąpienie cementu metakaolinitem polepsza wytrzymałość na ściskanie o 10%, a na rozciąganie przy zginaniu o 50%. Ramezianpour, Nas i in. potwierdzili że, dodatek zwiększa moduł sprężystości betonu i wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach. [17, 18]. Dodatkowo wpływ metakaolinitu jest we wszystkich przypadkach korzystniejszy w

odniesieniu do wytrzymałości na rozciąganie. [19, 20] Stosowanie metakaolinitu jako zamiennika części cementu w betonie ma ogromne znaczenie w budownictwie zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska w odniesieniu do konstrukcji budowlanych.

Dzięki zastosowanym dodatkom zeolitu i/lub metakaolinitu, następuje skuteczna redukcja zużywanego cementu bez znacznego wpływu na parametry wytrzymałościowe i odporność na czynniki środowiskowe.

1. 1 Badania przyczepności

Badania nad zachowaniem się przyczepności prętów z polimeru wzmocnionego włóknem szklanym (FRP) z betonem prowadzone są od kilkudziesięciu lat, z naciskiem na zrozumienie mechanizmów rządzących zachowaniem się połączenia FRP z betonem. Testy pull out są powszechnie stosowane w ocenie przyczepności stalowych prętów zbrojeniowych do betonu. Jednakże dobra przyczepność w testach pull out z dobrym skrępowaniem nie oznacza, że można uzyskać dobrą przyczepność w elemencie betonowym, gdzie odporność otuliny na rozłupanie określa graniczne obciążenie niszczące [21].

Badania Lutza wskazują na możliwość wystąpienia lokalnych naprężeń przyczepności, które osiągają ponad dwukrotnie większe wartości niż średnie naprężenie przyczepności. Lutz przeprowadził badania dotyczące zależności przyczepności od kąta klina betonu, wykazały że przy zniszczeniu kąt przyjmował wartości z zakresu 30° - 45° , a dla kąta mniejszego niż 30° osiągnięto bardzo słabą zależność między przyczepnością a poślizgiem [22]. Zastosowanie nieograniczonej otuliny, nie wpłynęło na otrzymanie nieograniczonej przyczepności., w tym przypadku o zniszczeniu przyczepności zadecydują czynniki związane ze zniszczeniem przy wrywaniu [23].

Solyom i in. przedstawili szeroko zakrojone badania eksperymentalne pull-out dotyczące wpływu właściwości powierzchniowych na przyczepność prętów z (FRP) w betonie. Zbadano szeroką gamę dostępnych na rynku prętów FRP o różnych profilach powierzchni (łącznie 13 różnych konfiguracji powierzchni). Wytrzymałość betonu wpływa na przyczepność nawet wtedy, gdy jest ona wyższa niż granica podana w literaturze (około 30 MPa). Ponadto wyniki wytrzymałości przyczepności wszystkich prętów FRP były konsekwentnie wyższe niż w przypadku prętów stalowych [24].

Huang L. i in. w wyniku testów pull-out stwierdzili, że średnia przyczepność prętów zbrojeniowych FRP zmniejsza się wraz ze wzrostem średnicy pręta zbrojeniowego. Natomiast szybkość obciążania ma niewielki wpływ na przyczepność [25].

Malvar et al. badali właściwości przyczepności czterech różnych rodzajów prętów zbrojeniowych CFRP o różnych odkształceniach powierzchni zakotwionych w lekkim betonie. Uzyskane wyniki dla różnych poziomów ściskania krępującego wskazują, że może być konieczne zastosowanie minimalnej wysokości żeber (oplotu) o wartości

około 6% średnicy, a maksymalne rozstawy żeber powinny wynosić trzykrotność średnicy [26].

2. Procedura badania

2.1 Cel i zakres badań

Przedmiotem przeprowadzonych badań było określenie przyczepności prętów BFRP i GFRP w modyfikowanym betonie w porównaniu z przyczepnością prętów stalowych w betonie. Pręty stalowe są szeroko stosowane jako zbrojenie w konstrukcjach betonowych od wieku, a ich właściwości przyczepności są dobrze znane. Jednak pręty FRP mają inne właściwości mechaniczne i fizyczne niż pręty stalowe, co może powodować różne zachowanie przyczepności w betonie. Porównując efektywność przyczepności prętów BFRP i GFRP z właściwościami prętów stalowych, badanie to zapewniło wgląd w unikalną charakterystykę przyczepności prętów FRP do betonu oraz pozwoliło określić różnice i podobieństwa w stosunku do konwencjonalnej przyczepności prętów stalowych do betonu. Uzyskane z badań ustalenia będą stanowić cenne źródło informacji dla inżynierów i badaczy w zrozumieniu potencjalnych korzyści i ograniczeń stosowania prętów FRP jako zbrojenia w konstrukcjach betonowych.

Przeprowadzono badania przyczepności dla trzech rodzajów betonu z zastosowaniem zbrojenia kompozytowego BFRP i GFRP oraz stalowego będącego zbrojeniem referencyjnym w teście belkowym. Celem badań była ocena możliwości zastosowania niekonwencjonalnych modyfikatorów w formie dodatków mineralnych w celu zwiększenia przyczepności kompozytowego zbrojenia z prętów FRP w wybranych elementach betonowych stosowanych w obiektach infrastruktury budowlanej. Przeprowadzono dobór składników i opracowano optymalną recepturę betonów w celu zwiększenia przyczepności do prętów FRP. Wytypowano dwie zmodyfikowane mieszanki betonowe z udziałem 10% dodatku zeolitu (Z) i 10% dodatku metakaolinitu (K) w stosunku do zwykłej mieszanki betonowej (C).

Łącznie przebadano w testach przyczepności pull-out 27 próbek z prętami podobnej średnicy 12 mm. Wśród nich zbadano 9 próbek z prętami GFRP, w tym po 3 w zwykłym betonie, w betonie z dodatkiem zeolitu oraz w betonie z dodatkiem metakaolinitu. W analogiczny sposób przebadano dwie pozostałe grupy próbek, a mianowicie 9 próbek z prętami BFRP oraz w celu porównania wyników badań przyczepności 9 próbek z konwencjonalnym zbrojeniem stalowym.

Wszystkie próbki użyte w teście pull-out wykonano z cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/B-V 42,5R. Gęstość mieszanek betonowych podczas badań wynosiła 2270 kg/m^3 , natomiast stosunek w/c – 0,45. Konsystencja betonu klasy S3. Składy mieszanek betonowych przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1 Zestawienie składów mieszanek betonowych w kg/m³

Składnik	C (zwykła)	Z (+zeolit)	K (+metakaolinit)
Cement	360	324	324
Woda	162	162	162
Żwir 2/8	574	574	574
Żwir 2/16	631	631	631
Piasek 0/2	708	708	708
Zeolit	–	36	–
Metakaolinit	–	–	36

Przed właściwym badaniem pull-out ustalono parametry wytrzymałościowe betonu. Wykonano próbki sześciennie o wymiarze 150 mm i walcowe o wymiarach 150 × 300 mm. Przeprowadzono trzy rodzaje badań wytrzymałościowych, na podstawie których określono wytrzymałość na ściskanie $f_{c,cube}$ i rozciąganie betonu f_{ct} przez rozłupanie oraz moduł sprężystości E_c a także odchylenie standardowe SD i współczynnik zmienności COV (Tab. 2).

Tabela 2 Właściwości wytrzymałościowe betonu w MPa (COV w %)

Typ	C (zwykły)			Z (+zeolit)			K (+metakaolinit)		
	średni a	SD	COV	średnia	SD	COV	średni a	SD	COV
$f_{c,cube}$	46,36	1,0 1	2,19	48,37	0,98	2,02	49,55	0,93	1,87
f_{ct}	2,70	0,3 5	12,84	3,22	0,33	10,3 9	2,96	0,43	14,68
E_c	30017	340	1,13	31958	113 8	3,56	36614	1339	3,66

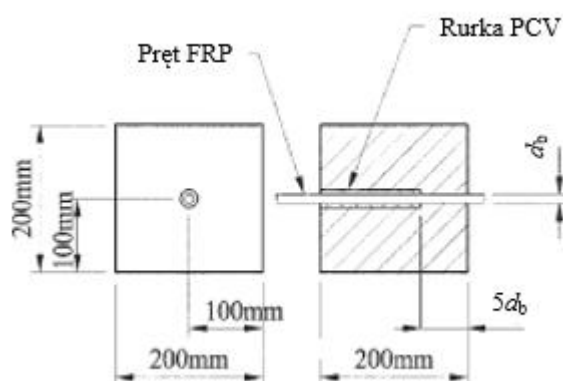
W tabeli 3 przedstawiono charakterystyki wytrzymałościowe prętów GFRP, stalowych i BFRP a mianowicie wytrzymałość na rozciąganie f_t , granicę plastyczności dla prętów stalowych f_y , moduł sprężystości podłużnej E_L , a także odchylenie standardowe SD i współczynnik zmienności COV.

Tabela 3. Właściwości wytrzymałościowe prętów w MPa (COV w %)

Typ	GFRP			Stal			BFRP		
	średnia	SD	COV	średnia	SD	COV	średnia	SD	COV
f_y	–	–	–	519,7	3,50	0,67	–	–	–
f_t	1033,3	30,49	2,95	615,8	3,64	0,59	1024,7	69,65	6,80
E_L	41892	3410	8,14	227293	25783	11,32	41470	3570	8,62

Do eksperymentalnego określenia zależności między przyczepnością a poślizgiem między prętem zbrojeniowym a betonem można zastosować próbkę pull-out z centrycznym rozmieszczeniem pręta zbrojeniowego (Rys.1). Ta metoda jest popularna, ponieważ zapewnia prosty sposób porównywania względnego zachowania przyczepności dla różnych prętów zbrojeniowych. Podstawowym wynikiem testu jest siła przyczepności próbki dla betonu o normalnej masie, co jest ważnym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę przy stosowaniu prętów FRP jako prętów zbrojeniowych

lub ciągnien. Badanie przyczepności wykonano wykorzystując wskazówki normy ACI 440.3R-12 [27]. Badane pręty obciążano z prędkością nie większą niż 20 kN/min (0,33 kN/s) lub przy prędkości biegu jałowego głowicy maszyny wytrzymałościowej nie większej niż 1,3 mm/min, (0,02 mm/s) w zależności od rodzaju zastosowanej maszyny wytrzymałościowej oraz środków przewidzianych do ustalania lub kontrolowania prędkości badania.



Rys.1 Schemat próbki pull-out do badania przyczepności

Próbka do badań została wykonana w postaci sześciennego kostki betonowej o boku 200 mm. Przyczepność między prętem zbrojeniowym i betonem była wyznaczana na odcinku o długości $5d$ licząc od nieobciążonej krawędzi próbki betonowej. Pozostała część pręta znajdowała się w osłonie w postaci rurki PVC i była pozbawiona przyczepności do betonu próbki. Urządzenia do pomiaru przemieszczenia (poślizgu) zostały zamontowane zarówno na swobodnym, jak i obciążonym końcu prętów FRP powinny być urządzeniami do pomiaru przemieszczenia, odczytującymi z dokładnością co najmniej do 0,01 mm. Zalecane są trzy czujniki LVDT w odstępach co 120 stopni na obciążonym końcu lub jeden miernik koncentryczny. Podczas badania mierzone są przemieszczenia prętów zarówno na swobodnym jak i obciążonym końcu próbek. Próbkę do badań umieszcza się na specjalnym wsporniku maszyny wytrzymałościowej. Po stronie nieobciążonej pręt powinien wystawać z betonowej powierzchni na wystarczającą długość, aby możliwe było przejście pręta przez bloki kotwiące i wspornik maszyny wytrzymałościowej oraz w celu zapewnienia odpowiedniej długości uchwytów czujników podczas przyłożenia obciążenia. Wiek betonu badanej belki powinien mieścić się w zakresie od 21 do 35 dni. Obciążenie powinno być realizowane w sposób ciągły. Badanie należy kontynuować, dopóki nie nastąpi całkowita utrata przyczepności w obu belkach. Średnie naprężenie przyczepności należy obliczyć zgodnie z równaniem (1) a dane dotyczące naprężenia przyczepności w funkcji poślizgu τ_b zarówno przy przemieszczeniu końca swobodnego, jak i końca obciążonego dla każdej próbki powinny być podane na wykresie.

$$\tau_b = \frac{F}{C_b \cdot l} \quad (1)$$

gdzie F jest obciążeniem w kN, C_b jest obwodem pręta wyznaczonym na podstawie jego ekwiwalentnej średnicy wyznaczonej zgodnie z procedurą ASTM D7205/D7205M [28]. Natomiast l jest odcinkiem pręta na której występuje przyczepność.

Poślizg na obciążonym końcu pręta należy obliczyć jako odczyt z miernika przemieszczenia pomniejszony o wydłużenie S_c pręta FRP na długości L_c między końcem odcinka przyczepności pręta a punktem mocowania urządzenia pomiarowego po stronie obciążonej pręta FRP, przy czym wydłużenie jest obliczane za pomocą równania (2).

$$S_c = \frac{F \cdot L_c}{E_L \cdot A} \quad (2)$$

gdzie E_L jest podłużnym modułem sprężystości pręta; A jest powierzchnią przekroju pręta obliczoną na podstawie ekwiwalentnej średnicy.

Naprężenia przyczepności obliczono dla czterech zmierzonych wartości poślizgu zgodnie z ACI 440.3R-12 [27] : $\tau_{0,05}$ – naprężenie przyczepności przy poślizgu 0,05 mm, $\tau_{0,1}$ – naprężenie przyczepności przy poślizgu 0,1 mm, $\tau_{0,25}$ – naprężenie przyczepności przy poślizgu 0,25 mm, oraz $\tau_{\max}$ – naprężenie przyczepności przy maksymalnej sile.

2.1. Przygotowanie próbek do testu pull-out

Wykonano 27 próbek w postaci sześcianów betonowych o wymiarze boku 200 mm do pomiaru przyczepności prętów GFRP, BFRP o średnicy nominalnej 12 mm, oraz dla porównania prętów stalowych o średnicy nominalnej 12 mm. Szczególną uwagę zwrócono na właściwe usytuowanie badanych prętów i odpowiednią długość końcówek prętów umożliwiającą zainstalowanie mierników laserowych IL065 do pomiaru poślizgu. W pierwszym kroku zastosowano specjalny system mocujący na obciążanym końcu rozciąganego pręta, tak aby nie nastąpiło przedwczesne zniszczenie materiału w strefie zakotwienia. Z uwagi na to, że pręty FRP są materiałem anizotropowym, wytrzymałość włókien w kierunku poprzecznym jest niewielka w porównaniu do wysokiej wytrzymałości w kierunku podłużnym pręta. W tym celu zaprojektowano stalową rurę o długości 250 mm. Długość rur kotwiących została ustalona na podstawie wcześniejszych badań próbnych. Na końcu rury kotwiącej zainstalowano stalową nasadkę z koncentrycznym otworem na badany pręt (Rys.2). Mocowanie pręta w stalowej rurze odbywało się przez wypełnienie wolnej przestrzeni między rurą a prętem specjalną zaprawą o wysokiej przyczepności. W drugim kroku niezakotwiony koniec pręta umieszczono w deskowaniu sześciennej próbki, tak aby z szalunku wystawał odcinek wystarczający do zamocowania uchwytów miernika do pomiaru poślizgu swobodnego (nieobciążonego) końca pręta. Wewnątrz deskowania pręt na odcinku $5d_b$ licząc od strony nieobciążonej pręt był pozbawiony osłony z rurki PVC w celu umożliwienia przyczepności do betonu. Pozostałą część pręta umieszczono w rurce PVC z uwagi na umożliwienie swobodnego odkształcenia podczas obciążania. Po zabetonowaniu próbek pozostawiono elementy deskowania w celu uniknięcia naprężeń w prętach, które mogłyby powstać podczas przenoszenia elementu na stanowisko badawcze. Test pull out polegał na jednostronnym rozciąganiu pręta zakotwionego w betonie, z drugiej strony pręt był nieobciążony (Rys. 3).



a)



b)

Rys. 2. Wykonanie próbek: a) Zakotwienie końców prętów, b) próbki po zabetonowaniu



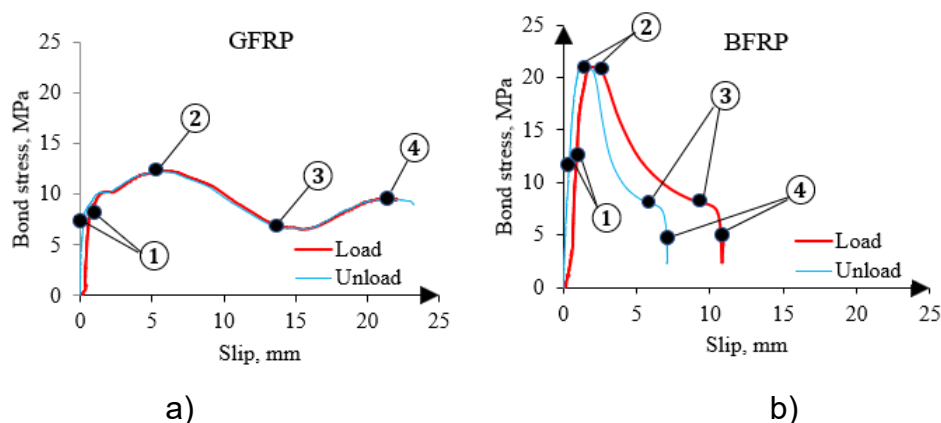
Rys. 3. Stanowisko do badania pull-out przyczepności prętów do betonu

W celu pomiaru poślizgu na obu końcach badanych prętów zainstalowano CMOS multi - function analog laser sensor Keyence IL065 o zakresie pomiarowym 50 mm i dokładności pomiarowej 2 μm . Obciążenie było przekazywane przez siłownik o zakresie obciążenia 200 kN zamontowany przegubowo w urządzeniu wytrzymałościowym Walter + bai AG. W trakcie badania rejestrowano w sposób ciągły poślizg rozciąganego pręta na obu końcach próbki. Wyniki były rejestrowane w sposób ciągły, przez cały okres badania. Obciążenie zwiększało się monotonicznie w trakcie badania i było kontynuowane aż do osiągnięcia maksymalnego poślizgu.

3. Wyniki badań i analiza

Współdziałanie betonu i zbrojenia jest możliwe dzięki przyczepności – tj. zdolności do przenoszenia sił pomiędzy dwoma materiałami budowlanymi. Powstawanie rys w betonie jest konieczne, aby aktywować efekt przyczepności i aby zabetonowane zbrojenie np. w postaci prętów FRP, stalowych) było użyteczne. Analizę przyczepności przeprowadzono dla prętów GFRP, stalowych i BFRP do betonu normalnego, z dodatkiem zeolitu i dodatkiem metakaolinitu. Porównywano pręty GFRP i BFRP o uźebrowaniu w postaci opłotu, z żebrowanymi prętami stalowymi o zbliżonej średnicy ekwiwalentnej. Ponieważ pręty kompozytowe różniły się średnicą ekwiwalentną, z uwagi na uwarunkowania technologiczne, postanowiono porównać przyczepność z zastosowaniem współczynnika średnicy ekwiwalentnej do nominalnej. Z uwagi na

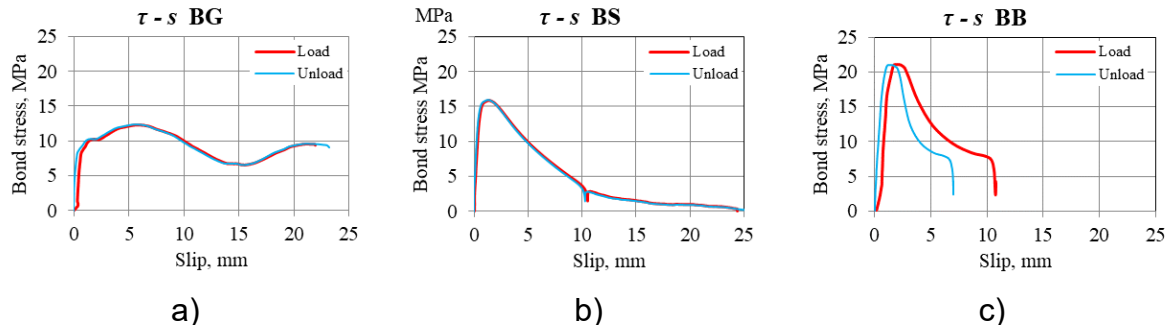
zbliżone średnice prętów naprężenia przyczepności można ocenić z dobrą dokładnością. Zgodnie z EN 1992-1 [29] wystarczające naprężenia przyczepności są zapewnione, jeśli średnie naprężenia przyczepności $\tau_m \geq 6,42$ MPa i maksymalne naprężenia przyczepności $\tau_{max} \geq 10,51$ MPa dla średnicy prętów równej 12 mm. We wszystkich przeprowadzonych testach średnie i maksymalne naprężenia przyczepności były większe od odpowiadającym im normowym naprężeniom przyczepności.



Rys. 4 Zależność naprężenia przyczepności – poślizg dla pręta a) GFRP i b) BFRP

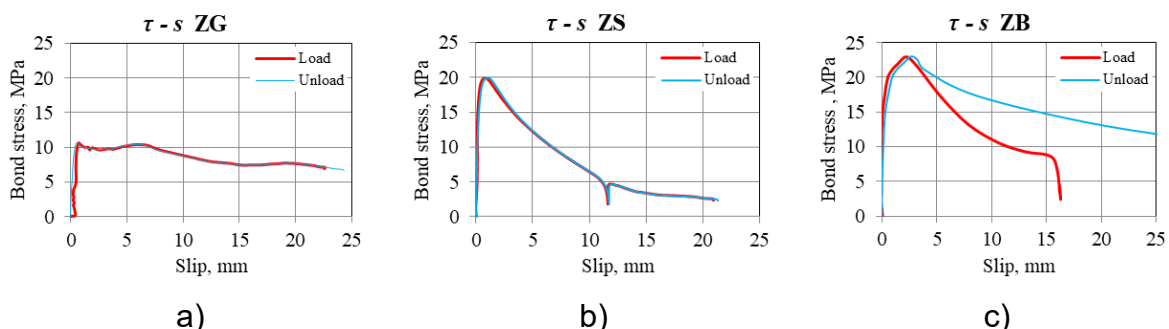
Utrata przyczepności nie następuje jednocześnie na obciążonym i swobodnym końcu betonowej próbki ze względu na jednostronne obciążenie pręta. Dlatego przebieg poślizgu wciąganej swobodnego końca próbki występuje z nieznacznym opóźnieniem. Krzywa naprężenia przyczepności - poślizg w teście pull-out składa się w przybliżeniu z czterech zakresów (Rys.4). Zakres ① charakteryzował się liniowym wzrostem dla którego poślizg był niezauważalny. Można uznać, że zakres ten reprezentuje tarcie i chemiczną adhezję przy niższych wartościach obciążeń. W drugim zakresie ② przyrost był nieliniowy aż do osiągnięcia maksymalnego naprężenia przyczepności przy zauważalnym nieliniowym wzroście poślizgu na obu końcach badanych próbek. Nieliniowy charakter wykresu wskazuje na stopniowe uszkodzenie na styku między betonem i prętem z uwagi na zjawisko mechanicznego blokowania oraz efektu zaklinowania. Przy znacznie mniejszych wartościach poślizgu dochodzi do wielokrotnej interakcji pomiędzy procesami adhezji chemicznej, tarcia i efektem zaklinowania. W trzecim zakresie ③ po osiągnięciu maksymalnej przyczepności, następuje spadek przyczepności przy wzrastającym poślizgu. Zakres ③ fizycznie reprezentuje stan w którym beton między żebrami pręta zaczyna się kruszyć. Zachowanie przyczepności w prętach GFRP i BFRP jest odmienne od zachowania prętów stalowych. W próbkach GFRP, po osiągnięciu maksymalnego naprężenia przyczepności krzywa łagodnie opadała do około 50% wartości maksymalnej a następnie w zakresie ④ wzrastała do wartości około 75% maksymalnej przyczepności z uwagi na mechaniczne blokowanie otaczającego pręt betonu. W próbkach BFRP w zakresie ③ krzywa przyczepność – poślizg opada nieliniowo przy spadku o połowę przyczepności w porównaniu do wartości maksymalnej naprężeń. W zakresie ④, następowało zmniejszenie naprężeń przyczepności w sposób ciągły z uwagi na to, że kolejne żebra wchodziły w obszar styku przyczepności co prowadziło do akumulacji uszkodzeń i przyspieszenia spadku naprężeń przyczepności.

Dla betonu normalnego, betonu z dodatkiem zeolitu i betonu z dodatkiem metakaolinitu na wykresach 5, 6, 7 pokazano wpływ naprężeń przyczepności $\tau_{\max}$ na poślizg s odpowiednio od lewej strony do prawej dla prętów GFRP, stalowego i BFRP.



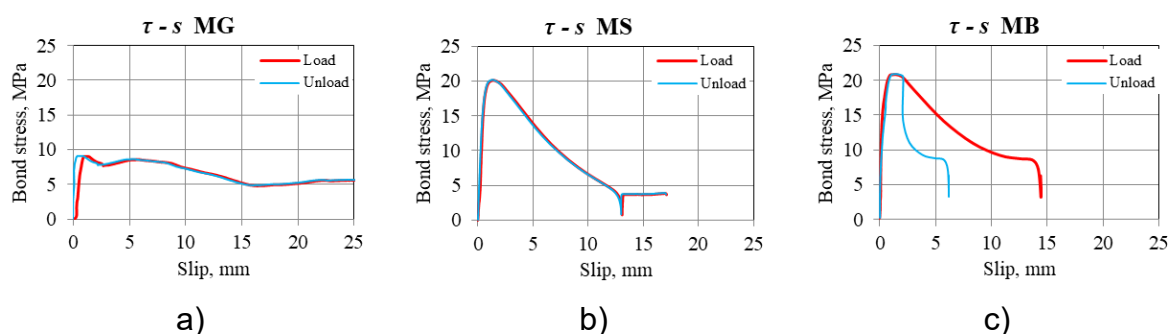
Rys. 5. Zależności naprężenia przyczepności – poślizg prętów dla betonu zwykłego: a) BG – pręt GFRP; b) BS – pręt stalowy c) BB – pręt BFRP (Load – poślizg obciążonego końca pręta, Unload – poślizg swobodnego końca pręta)

W zwykłym betonie uśredniony poślizg prętów przy maksymalnym naprężeniu przyczepności dla prętów GFRP wynosił 6,47 mm i był większy od poślizgu dla prętów stalowych 1,32 mm oraz dla prętów BFRP 4,58 mm. Charakterystyka krzywej naprężenia przyczepności – poślizg (jak w wyniku z Rys. 5) różniła się zdecydowanie dla prętów GFRP i BFRP w porównaniu z prętami stalowymi. W porównaniu do prętów stalowych zakres ② przyczepności dla prętów GFRP był 4 krotnie, natomiast dla prętów BFRP dwukrotnie większy. Zakres ③ (po przekroczeniu pików naprężeń przyczepności) był dla prętów GFRP podobny. Jednakże po osiągnięciu lokalnego minimum stanowiącego 55% wartości pików, przyczepność ponownie zaczęła rosnąć aż do osiągnięcia wtórnego pików przyczepności stanowiącego 78% pierwszego pików. Powodem takiego zachowania jest prawdopodobnie akumulacja naprężeń matrycy betonowej między kolejnymi żebrami pręta GFRP, która powoduje nasilenie mechanicznej blokady skutkujące ponownym efektem zaklinowania pręta. W przypadku prętów BFRP zakres ③ charakteryzuje się nieliniowym zmniejszeniem do 36% wartości pików przyczepności przy podobnym zakresie poślizgu jak w przypadku prętów stalowych. Zakres ④ w przypadku prętów BFRP charakteryzuje się gwałtownym spadkiem rezyduальной przyczepności w przeciwieństwie do prętów stalowych, które w tym zakresie wykazywały stopniowy, w zasadzie liniowy spadek przyczepności.



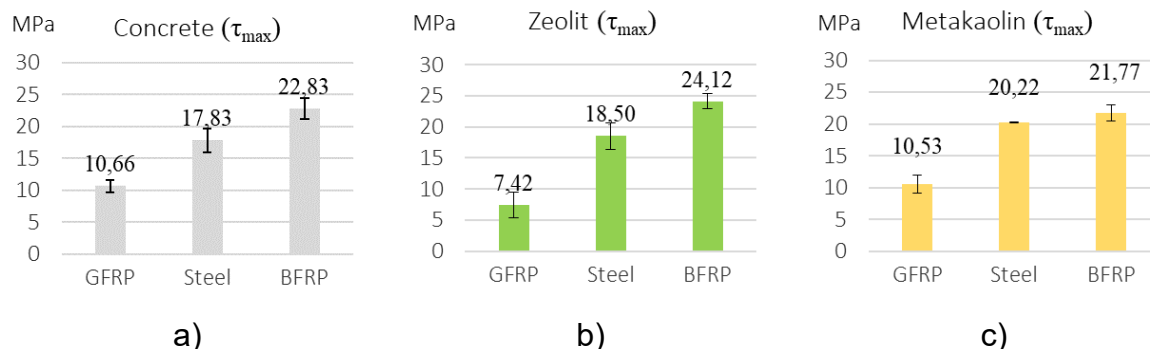
Rys. 6. Zależności naprężenia przyczepności – poślizg prętów dla betonu z dodatkiem zeolitu: a) BG – pręt GFRP; b) BS – pręt stalowy c) BB – pręt BFRP (Load – poślizg obciążonego końca pręta, Unload – poślizg swobodnego końca pręta)

W betonie z dodatkiem zeolitu średni poślizg prętów przy maksymalnym naprężeniu przyczepności dla GFRP wynosił 1,3 mm i był większy od średniego poślizgu dla stali – 1,05 mm oraz BFRP – 1,87 mm (Rys. 6). Dodatek zeolitu spowodował znaczące kilkukrotne ograniczenie zakresu ② nieliniowego przyrostu naprężeń przyczepności w przypadku prętów GFRP. Natomiast w prętach BFRP zakres ② zmniejszył się o połowę. W zakresie ③ w przypadku prętów GFRP zaobserwowano wyraźne plateau będące wynikiem sukcesywnego utrzymującego się oddziaływania kolejnych oplotów pręta. W przypadku prętów BFRP zakres ③ charakteryzuje się nieliniowym spadkiem do 36% wartości piku przyczepności przy podobnym zakresie poślizgu, podobnie jak w przypadku prętów stalowych. Należy zauważyć, że przyczepność mierzona po nieobciążonej stronie pręta charakteryzowała się znacznie mniejszym spadkiem (56%). Dla prętów GFRP w zakresie ④ wykres jest nieliniowy i pokazuje utrzymującą się przyczepność rezydualną o znacznej 66% wartości piku przyczepności. Zdecydowanie mniejszy wzrost przyczepności w zakresie ④ (23%) zaobserwowano dla prętów stalowych. Natomiast zachowanie przyczepności w zakresie prętów BFRP w zakresie ④ było podobne jak w przypadku betonu zwykłego.



Rys. 7. Zależności naprężenia przyczepności – poślizg prętów dla betonu z dodatkiem metakaolinitu: a) BG – pręt GFRP; b) BS – pręt stalowy c) BB – pręt BFRP (Load – poślizg obciążonego końca pręta, Unload – poślizg swobodnego końca pręta)

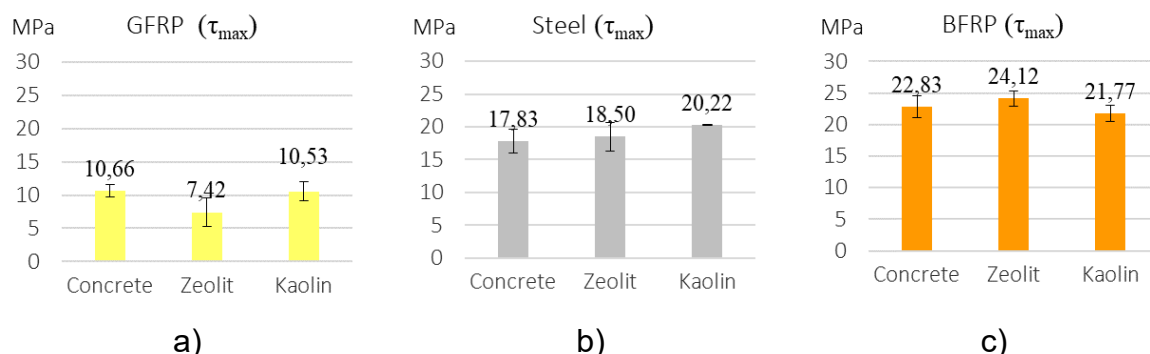
W betonie z dodatkiem metakaolinitu średni poślizg prętów przy maksymalnym naprężeniu przyczepności dla GFRP wynosił 1,87 mm i był większy od średniego poślizgu dla stali 1,24 mm oraz większy od poślizgu BFRP 1,07 mm (Rys. 7). W porównaniu z betonem zwykłym nastąpiło znaczące zawężenie zakresu ② zarówno w przypadku prętów GFRP jak i BFRP. Natomiast dla prętów GFRP w stosunku do betonu z dodatkiem zeolitu zakres ② był o połowę dłuższy. Przeciwnie, w przypadku prętów BFRP zakres ② był o połowę krótszy. W zakresie ③ (po przekroczeniu piku naprężeń przyczepności) w prętach GFRP zaobserwowano wyraźne plateau będące wynikiem sukcesywnego utrzymującego się oddziaływania kolejnych oplotów pręta. W przypadku prętów BFRP zaobserwowano zdecydowanie mniejszy spadek przyczepności (41%) w stosunku do wartości piku przyczepności, niż dla zwykłego betonu i betonu z dodatkiem zeolitu. Natomiast zachowanie przyczepności w zakresie ③ dla prętów stalowych było analogiczne jak dla poprzednich rodzajów betonu. W zakresie ④ rezydualna przyczepność prętów GFRP utrzymywała się na wysokim 56% poziomie piku naprężeń przyczepności. Przyczepność prętów BFRP w zakresie ④ malała gwałtownie, analogicznie jak w poprzednich rodzajach betonu. Natomiast przyczepność prętów stalowych w zakresie ④ wynosiła 18% piku przyczepności.



Rys. 8. Przyczepność prętów GFRP, stalowych i BFRP zależna od rodzaju betonu: a) bez dodatków, b) z dodatkiem zeolitu, c) z dodatkiem metakaolinitu

Dla betonu normalnego maksymalne naprężenia przyczepności $\tau_{\max}$ dla prętów GFRP wynosiły 10,66 MPa i były mniejsze od przyczepności pozostałych rodzajów prętów. Dla prętów stalowych $\tau_{\max} = 17,83$ MPa i były większe od przyczepności prętów GFRP o 67,3 % (Rys.8) . Największe naprężenia przyczepności odnotowano dla prętów BFRP, które wynosiły 22,83 MPa i były większe od przyczepności prętów GFRP o 114,2 % a od przyczepności prętów stalowych o 28,0 % . W przypadku betonu z dodatkiem zeolitu maksymalne naprężenia przyczepności $\tau_{\max}$ dla prętów GFRP wynosiły 7,42 MPa i były mniejsze od przyczepności pozostałych rodzajów prętów. Dla prętów stalowych $\tau_{\max} = 18,50$ MPa i były większe od przyczepności prętów GFRP o 149,3 % . Największe naprężenia przyczepności odnotowano dla prętów BFRP, które wynosiły $\tau_{\max} = 24,12$ MPa i były większe od przyczepności prętów GFRP o 225 % i od prętów stalowych o 30,4 % (Rys.9). W obecności betonu z dodatkiem metakaolinitu maksymalne naprężenia przyczepności dla prętów GFRP wynosiły 10,53 MPa i były mniejsze od przyczepności pozostałych rodzajów prętów. Dla prętów stalowych $\tau_{\max} = 20,22$ MPa i były większe od przyczepności prętów GFRP o 92 % . Największe naprężenia przyczepności odnotowano dla prętów BFRP, które wynosiły $\tau_{\max} = 21,77$ MPa i były większe od przyczepności prętów GFRP o 106,7% i większe od przyczepności prętów stalowych o 7,7 % (Rys.8).

Zmianę maksymalnych naprężenia przyczepności zależnych od wpływu dodatków zeolitu i metakaolinitu do betonu prętów GFRP, stali i BFRP pokazano na Rys. 9.



Rys. 9. Przyczepność prętów zależna od rodzaju betonu dla prętów : a) GFRP, b) stalowych i c) BFRP

W betonie z dodatkiem zeolitu maksymalne naprężenia przyczepności prętów GFRP uległy redukcji o 30,4 % w porównaniu z zwykłym betonem. Natomiast w obecności metakaolinitu zaobserwowano niewielki spadek naprężeń przyczepności o

1 % w porównaniu do betonu zwykłego. W przypadku prętów stalowych nastąpił wzrost przyczepności o 3,8 % i 13,4 % do betonu z dodatkiem zeolitu i metakaolinitu odpowiednio w porównaniu do betonu zwykłego. Przyczepność prętów BFRP wzrosła w obecności dodatku zeolitu do betonu o 5,7 % i zmalała o 4,7 % w przypadku metakaolinitu w porównaniu ze zwykłym betonem. W przypadku prętów BFRP mimo większego rozstawu oplotu w stosunku do żeber w stalowym pręcie, przyczepność jest większa niż dla prętów stalowych. Utrata przyczepności w przypadku prętów GFRP i BFRP spowodowana była pełnym odkształceniem żeber w postaci oplotu. Można stwierdzić, że w mechanizmie przyczepności dominuje deformacja oplotu. Uszkodzenia były inicjowane u nasady oplotu, a następnie propagowały na zewnątrz. Ostatecznie, powierzchnia ścinania pojawiała się na styku betonu i oplotu zarówno prętów GFRP i BFRP. Mechanizm przyczepności jest determinowany głównie przez mechaniczne zazębianie wywoływane przez oplot prętów kompozytowych.

4. Wnioski

Przeprowadzone badania miały na celu określenie przyczepności prętów BFRP i GFRP w betonie modyfikowanym za pomocą testów pull-out. Przeanalizowany i porównany został wpływ właściwości betonu i charakterystyki prętów na zachowanie się przyczepności.

1. We wszystkich testach stwierdzono spełnienie warunków standardowych średnich i maksymalnych naprężeń przyczepności.

2. Największe maksymalne naprężenia przyczepności $\tau_{\max} = 24,12$ MPa odnotowano w przypadku prętów BFRP dla betonu z dodatkiem zeolitu, które były większe odpowiednio o 225 % i 30,4 %, w porównaniu do prętów GFRP i stalowych. Natomiast w obecności w betonie dodatku metakaolinitu maksymalne naprężenia przyczepności prętów BFRP wynosiły $\tau_{\max} = 21,77$ MPa i były większe odpowiednio o 106,7 % i 7,7 %, w porównaniu do prętów GFRP i do prętów stalowych.

3. Dodatek zeolitu do betonu zmniejsza ponad pięciokrotnie poślizg przy maksymalnym naprężeniu przyczepności w przypadku prętów GFRP oraz ponad dwukrotnie dla prętów BFRP. Najmniejszą redukcję poślizgu 19 % zaobserwowano w przypadku prętów stalowych. Natomiast dodatek metakaolinitu w mniejszym stopniu wpływa na redukcję poślizgu prętów przy maksymalnej przyczepności. Dla prętów GFRP odnotowano 3,5 krotną redukcję, dla prętów BFRP ponad 4 krotną a dla prętów stalowych nieznaczną 6 % w stosunku do zwykłego betonu.

Wyniki badań dostarczyły cennych informacji do projektowania i wdrażania konstrukcji z betonu zbrojonego FRP co przyczyni się do opracowania ulepszonych modeli przyczepności prętów FRP w betonie.

Podziękowania: Autorzy dziękują firmie Astra za dostarczenie do badań prętów GFRP i BFRP oraz dodatków do betonu, zeolitu i metakaolinitu. Badania były prowadzone w ramach Grantu 35.2022 RND PW.

Literatura

- [1] Garbacz, A.; Urbański, M.; Łapko, A.: BFRP bars as an alternative reinforcement of concrete structures-Compatibility and adhesion issues, Advanced Materials Research, vol. 1129, 233-241, (2015), <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1129.233>
- [2] Wang, X. Wang, Z. Wu , F. Cheng, „Shear behavior of basalt fiber reinforced polymer (FRP) and hybrid FRP,” Construction and Building Materials, vol. 24(09) pp. 781-789, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.104>
- [3] Łapko, A.; Urbański. M.: Experimental and theoretical analysis of concrete beams deflections reinforced with basalt rebar, Archives of Civil and Mechanical Engineering; Nr 15 (2015), ACME Elsevier, Wrocław 2015, 223 -230 pp. ISSN 1644-9665 <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2014.03.008>
- [4] Urbanski, M.; Łapko, A.; Suprynowicz, K.: Analysis of the Crack Propagation Process in BFRP Beams with Digital Image Correlation Method, Proceedings of the 26th Symposium on Experimental Mechanics of Solids, Jachranka, 22-25 10 2014, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.240.55>
- [5] Shobeiri, V.; Bennett, B.; Xie, T.; Visintin, P., A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymers concrete. J. Cleaner Prod. 2021, 297. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126669>
- [6] Groves, M. C. E.; Sasonow, A., Uhde EnviNOx® technology for NOX and N2O abatement: a contribution to reducing emissions from nitric acid plants. J. Integr. Environ. Sci., 2010, 7, 211-222. <https://doi.org/10.1080/19438151003621334>.
- [7] Elizondo-Martínez, E.-J.; Andrés-Valeri, V.-C.; Jato-Espino, D.; Rodríguez-Hernandez, J., Review of porous concrete as multifunctional and sustainable pavement. J. Build. Eng., 2020, 27, (C). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100967>.
- [8] Naqi, A.; Jang, J., Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review. Sustainability. 2019, 11, (2). <https://doi.org/10.3390/su11020537>.
- [9] Vejmelková E.; Dana Koňáková, D.; Kulovaná, T.; Keppert, M.; Žumár, J.; Rovnaníková P.; Keršner, Z.; Sedlmajer, M.; Černý, R.: „Engineering properties of concrete containing natural zeolite as supplementary cementitious material: Strength, toughness, durability, and hygrothermal performance”, Cem Concr Compos, t. 55, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.013>
- [10] Czapik P.; Cybulski M.: „The Properties Of Cement Mortar With Natural Zeolite and Silica Fume Additions”, Structure and Environment No. 2/2018, vol. 10, p. 105. <https://doi.org/10.30540/sae-2018-010>
- [11] Madhuri, P.V.; B. Kameswara Rao, B.; Chaitanya,A.: „Improved performance of concrete incorporated with natural zeolite powder as supplementary cementitious material”, Materials Today, Proceedings, Volume 47, Part 15, 2021, Pages 5369-5378, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.089>

- [12] Rashad, A. M.; Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview. *Construction and Building Materials*, 2012, 41, 303-318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>.
- [13] Güneyisi, E; Gesoğlu, M; Karaoğlu, S.; i Mermerdaş, K.: „Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes”, *Constr Build Mater*, Volume 34, September 2012, Pages 120-130, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.017>
- [14] Rutkowska, G.; Pienkosz, K.: „Wpływ metakaolinitu, jako częściowego zamiennika cementu, na wybrane właściwości betonu (ASTRA MK40)”, *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*, t. 13, nr 4, strony 31-42, 2014.
- [15] Shi, Z. et al. (2015). Durability of Portland Cement Blends Including Calcined Clay and Limestone: Interactions with Sulfate, Chloride and Carbonate Ions. In: Scrivener, K., Favier, A. (eds) *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. RILEM Bookseries, vol 10. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_17
- [16] Razak, H.A.; Chai, H.K.; Wong, H.S.: „Near surface characteristics of concrete containing supplementary cementing materials”, *Cem Concr Compos*, t. 26, nr 7, 2004. *Cement and Concrete Composites* 26(7):883-889, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.10.001>
- [17] Ramezaniapour, A.A.; Bahrami Jovein H.: „Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes”, *Constr Build Mater*, t. 30, 2012. Volume 30, May 2012, Pages 470-479, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.050>
- [18] Nas, M.; Kurbetci, S.: „Durability properties of concrete containing metakaolin”, *Advances in Concrete Construction*, Vol. 6, No. 2 (2018) 159-175, <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.2.15>
- [19] Sudagar A.; Andrejkovičová, S.; Patinhaa, C.; Velosa, A.; McAdam, A.; Ferreira da Silva, E.; Rocha, F.; A novel study on the influence of cork waste residue on metakaolin-zeolite based geopolymers. *Applied Clay Science*. 2018, 152, 196-210. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.013>
- [20] Bakera, A.T.; Alexander, M.G.; Use of metakaolin as a supplementary cementitious material in concrete, with a focus on durability properties. *RILEM Technical Letters* (2019) 4: 89-102. <http://dx.doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.94>
- [21] Achillides, Z., Pilakoutas, K., and Waldron, P. (1997a). “Modelling of FRP rebar bond behaviour.” *Proc., 3rd Int. Symp. on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, 14–16, Japan Concrete Society, Sapporo, Japan, 423–430 pp.
- [22] Lutz Leroy A.; Peter Gergely, P.: „Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete”, 1967. 711-721 pp., <http://dx.doi.org/10.14359/7600>
- [23] Thompson, K.M.; Jirsa, J. O. ; Breen, J. E.; Klingner, R. E.: „Anchorage behavior of headed reinforcement : literature review”, *Research Report 1855-1*, t. 7, nr 22, 2002.
- [24] Solyom, S.; György L.; Balázs, A: Bond of FRP bars with different surface characteristics. *Construction and Building Materials* 264 (2020) 119839, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119839>

- [25] Lihua Huang, Jian Chen, Jiting Qu, Qianqian Dai: Modeling for bond-constitutive relationships of FRP rebars to concrete matrix. Construction and Building Materials 263 (2020) 120654. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120654>
- [26] Malvar LJ, Cox JV, Bergeron Cochran K. Bond between carbon fiber reinforced polymer bars and concrete I: experimental study. J Compos Construct 2003;7(2):154–63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2003\)7:2\(154\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2003)7:2(154))
- [27] ACI 440.3R-12, Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures.
- [28] ASTM D7205 / D7205M - Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars. American Society of Testing and Materials: West Conshohocken, PA.2006, 12.
- [29] PN-EN 1992-1-1: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. PKN Warszawa, 2008.