

Charakterystyka przyczepności prętów GFRP i BFRP do betonu z dodatkiem zeolitu i metakaolinitu

Bond characteristics of GFRP and BFRP bars to concrete with the additive of zeolite and metakaolin

dr inż. Marek Urbański (ORCID: 0000-0002-3568-6888), prof. dr hab. inż. Piotr Woyciechowski (ORCID: 0000-0002-8127-7559), prof. dr hab. inż. Elżbieta Szmigiera (ORCID: 0000-0001-9084-2372), dr inż. Grzegorz Adamczewski (ORCID: 0000-0001-8994-8639), inż. Edyta Sosnowska, Politechnika Warszawska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.1324

Streszczenie: Porównano zależności przyczepność-poślizg oraz mechanizmy zniszczenia dla betonu z dodatkami zeolitu i metakaolinitu w obecności prętów GFRP, BFRP i stalowych. Przyczepność prętów GFRP do betonu z dodatkiem metakaolinitu była o 50% większa niż do betonu zwykłego, natomiast przyczepność do betonu z zeolitem podobna. W przypadku prętów BFRP stwierdzono wzrost przyczepności o 7% dla betonu z metakaolinitem. Pręty BFRP miały większą przyczepność w stosunku do zbrojenia stalowego. Zmiana przyczepności prętów GFRP i BFRP była stopniowa, a poślizg był kilkukrotnie większy niż prętów stalowych.

Słowa kluczowe: przyczepność, BFRP, GFRP, test belkowy, zeolit, metakaolinit, poślizg.

Abstract: Bond stress-slip relationship and failure mechanisms for concrete with additions of zeolite and metakaolin in the presence of GFRP, BFRP and steel bars were compared. The bond strength of GFRP bars to concrete with the addition of metakaolin was 50% higher than to ordinary concrete, while the bond strength to concrete with zeolite was similar. In the case of BFRP bars, an increase in bond strength by 7% was found for concrete with metakaolin. BFRP bars had greater bond strength to steel reinforcement. The change in the bond stress of the GFRP and BFRP bars was gradual and the slip was several times greater than that of the steel bars.

Keywords: bond strength, BFRP, GFRP, beam test, zeolite, metakaolin, slip.

1. Wprowadzenie

Korozja prętów stalowych w konstrukcjach żelbetowych stanowi poważny problem w konstrukcjach budowlanych i infrastrukturalnych [1]. Zmniejszona trwałość powoduje znaczne straty ekonomiczne i prowadzi do ryzyka utraty bezpieczeństwa. Obecny koszt naprawy i utrzymania infrastruktury na całym świecie szacuje się na ponad 100 mld euro [2]. Korozja zbrojenia stalowego konstrukcji betonowych na skutek karbonizacji otuliny betonowej oraz zniszczenia spowodowane cyklami zamarzania – rozmrażania są najczęstszymi przyczynami uszkodzeń konstrukcji betonowych podczas ich eksploatacji [3]. Problem dotyczy głównie nawierzchni drogowych, mostów, wiaduktów, tuneli oraz garaży podziemnych [4]. Koszty wynikające z korozji dróg i mostów amerykański przemysł i agencje rządowe szacują na 276 miliardów dolarów rocznie (około 3,1% PKB), według badania przeprowadzonego przez CC Technologies dla Federalnej Administracji Autostrad [5]. Korzystną odpowiedzią na to zapotrzebowanie są polimery wzmocnione włóknami (FRP) jako kompozyt do alternatywnego zbrojenia niemetalicznego [6].

Zastosowanie prętów z polimeru wzmocnionego włóknami (FRP) jako zbrojenia w konstrukcjach betonowych zyskało w ostatnich latach coraz większą uwagę, ze względu na ich wysoki stosunek wytrzymałości do masy i doskonałą odporność na korozję. 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.

Najszerzej stosowanymi kompozytami konstrukcyjnymi FRP są pręty wykonane z włókien szklanych (GFRP) z uwagi na cenę. W dalszej kolejności stosowane są pręty na bazie włókien bazaltowych. 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 [7–11]. Oba rodzaje prętów wykazują różne właściwości

mechaniczne w zależności od składników. Projektowanie elementów FRP-RC różni się od konwencjonalnych środków i pręty powinny być stosowane do odpowiednich przypadków [1, 12, 13].

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 uźebrowania, 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 [14, 15, 16]. Substytut cementu w postaci zeolitu lub metakaolinitu bez wysokotemperaturowej kalcynacji lub spiekania, może zmniejszyć emisję CO₂ o około 70% podczas produkcji i użytkowania [17].

Zeolity są glinokrzemianami o porowatej budowie, zawierającymi 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 [18]. Zastąpienie cementu metakaolinitem polepsza wytrzymałość na ściskanie o 10%, a na rozciąganie przy zginaniu o 50%. 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.

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.

Dwie powszechnie stosowane metody eksperymentalne do badania przyczepności prętów FRP w betonie to test pull out i test belki [21, 22]. W teście belkowym zestaw dwóch belek ze zbrojeniem poddawany jest obciążeniu zginającemu. Przyczepność prętów FRP w betonie jest oceniana przez pomiar poślizgu, który jest względnym przemieszczeniem między prętem a betonem, w wyniku obciążenia.

Testy belkowe zapewniają bardziej realistyczną reprezentację przyczepności prętów FRP w rzeczywistych konstrukcjach, ponieważ uwzględniają wpływ naprężeń ścisających betonu i krzywizny prętów [23, 24]. Badania wykazały, że na właściwości przyczepności prętów FRP w betonie ma wpływ kilka czynników, w tym wytrzymałość betonu, chropowatość powierzchni prętów FRP, obróbka powierzchni prętów FRP oraz średnica prętów [25, 26]. Wytrzymałość betonu wpływa głównie na tryb zniszczenia styku przyczepności. Achillides et al. [24] zaobserwowali, że gdy wytrzymałość betonu przekracza 30 MPa, zniszczenie przyczepności występuje częściowo w prętach FRP, a częściowo w betonie. Z drugiej strony, gdy wytrzymałość betonu jest mniejsza niż 15 MPa, w betonie pojawia się styk zniszczenia przyczepności. Kotynia et al. w zmodyfikowanym teście belkowym zauważyli, że zniszczenie było najczęściej spowodowane pękaniem żeber wzdłuż prętów GFRP. Destrukcja postępowała wraz ze stopniowym niszczeniem żeber na powierzchni pręta wzdłuż długości przyczepności [25]. Lee i in. [26] zaobserwowali, że w przypadku zwykłego betonu i prętów FRP, granica zniszczenia przyczepności występuje między betonem a żywicą, podczas gdy w przypadku betonu o wysokiej wytrzymałości i prętów FRP, ta granica zniszczenia pojawia się między włóknami a żywicą.

2. Program badań

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). Belki użyte w teście belkowym wykonano z cementu portlandzkiego popiołowego CEM II/B-V 42,5R. Gęstość mieszanek betonowych podczas badań wynosiła 2270 kg/m³, 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

Źródło: opracowanie własne

W celu pomiaru parametrów wytrzymałościowych betonu wykonano próbki sześciennie o wymiarze 150 mm i walcowe o wymiarach 150x300 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)		
	średnia	SD	COV	średnia	SD	COV	średnia	SD	COV
$f_{c,cube}$	46,36	1,01	2,19	48,37	0,98	2,02	49,55	0,93	1,87
f_{ct}	2,70	0,35	12,84	3,22	0,33	10,39	2,96	0,43	14,68
E_c	30017	340	1,13	31958	1138	3,56	36614	1339	3,66

Źródło: opracowanie własne

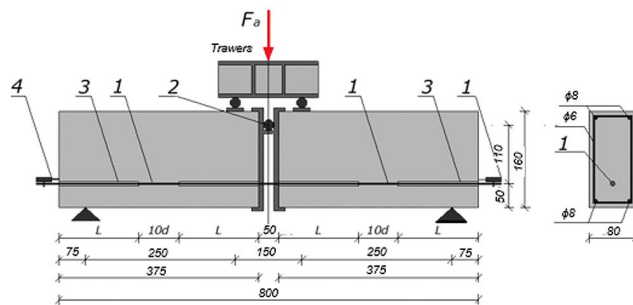
Charakterystyki wytrzymałościowe prętów stalowych GFRP i BFRP, a mianowicie wytrzymałość na rozciąganie f_y , granicę plastyczności dla prętów stalowych f_y , moduł sprężystości podłużnej E_L , a także odchylenie standardowe SD i współczynnik zmienności COV przedstawiono w tabeli 3.

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

Źródło: opracowanie własne

Badanie przyczepności za pomocą testu belkowego wykonano, wykorzystując wskazówki normy PN-EN 10080 [26]. Metoda badania przyczepności w teście belkowym ma na celu ustalenie przyczepności pręta zbrojeniowego do betonu.



Rys. 1. Zestaw do testu belkowego przyczepności zbrojenia do betonu: 1 – badany pręt, 2 – stalowy przegub Ø30 mm, 3 – rurka PVC, 4 – czujnik pomiaru poślizgu; źródło: opracowanie własne

Zestaw do badań składał się z dwóch betonowych belek, każda z nich o wymiarach 80x160x375 mm, połączonych w strefie rozciągania przez poddany testowi pręt FRP lub stalowy, a w strefie ściskanej przez wciśnięty pomiędzy niestalowy przegub, w postaci walca o średnicy 30 mm (rys. 1). Przyczepność pomiędzy prętem zbrojeniowym i betonem była określana w środkowej części belek o długości 10d, gdzie d jest średnicą pręta. Natomiast pozostała część pręta znajdowała się w rurkach PVC i była pozbawiona przyczepności z betonem belki. Test przyczepności przeprowadzono pod obciążeniem dwoma siłami skupionymi. Podczas badania mierzone były przemieszczenia badanych prętów na końcach belek, co pokazano na rysunku 1.

Belki do badań spoczywały na dwóch obrotowych łożyskach rolkowych i były obciążane dwoma jednakowymi siłami przyłożonymi symetrycznie, względem środka rozpiętości. Wiek betonu badanej belki powinien mieścić się w zakresie od 21 do 35 dni. Obciążenie było realizowane w sposób ciągły. Badanie było kontynuowane, dopóki nie nastąpiła całkowita utrata przyczepności w obu belkach. Całkowita siła F_a przyłożona do zestawu belek oraz naprężenia przyczepności τ_b przy danej wartości poślizgu wynosiły:

$$F_a = \frac{2 \cdot A_n \cdot \sigma \cdot z}{a}; \tau_b = \frac{\sigma}{40} \quad (1)$$

gdzie: A_n oznacza nominalną powierzchnię przekroju poprzecznego pręta,

σ – naprężenia rozciągające w badanym pręcie, z jest odległością od środka przegubu do środka badanego pręta, a jest odległością ścinania. Naprężenia przyczepności obliczono dla czterech zmierzonych wartości poślizgu wg zaleceń normy PN-EN 10080 [27]: $\tau_{0,01}$ – naprężenie przyczepności przy poślizgu 0,01 mm, $\tau_{0,1}$ – naprężenie przyczepności przy poślizgu 0,1 mm, τ_1 – naprężenie przyczepności przy poślizgu 1 mm, oraz τ_{max} – naprężenie przyczepności przy maksymalnej sile.

2.1. Przygotowanie zestawów belkowych

Wykonano 27 zestawów belkowych do pomiaru przyczepności prętów GFRP i BFRP o średnicy nominalnej 12 mm, oraz dla porównania prętów stalowych, o średnicy nominalnej 12 mm.

Wymiary i zbrojenie wszystkich belek, z których składały się zestawy testowe były identyczne. Szczególną uwagę zwrócono na właściwe usytuowanie badanych prętów i odpowiednią długość końcówek prętów umożliwiającą zainstalowanie mierników laserowych IL065 do pomiaru poślizgu. Po zabetonowaniu zestawów belkowych pozostawiono elementy deskowania w celu uniknięcia naprężeń w prętach, które mogłyby powstać podczas przenoszenia elementu na stanowisko badawcze. Dodatkowo wykonano dwie obejmy z blachy stalowej o grubości 15 mm każda, które zapewniały przeniesienie siły ze stalowego sworznia na beton, dwóch połączonych badanym prętem belek. Obciążenie było przenoszane symetrycznie przez trawers na zestaw belkowy, w dwóch punktach odległych od siebie o 150 mm (rys. 2).



Rys. 2. Zbrojenie zestawu belek, szalunek i stanowisko do badania przyczepności prętów zbrojenia; źródło: opracowanie własne

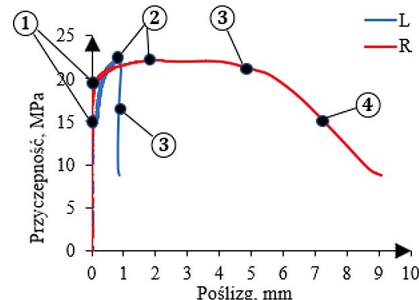
W celu pomiaru poślizgu na obu końcach badanych prętów zainstalowano CMOS multi – function analog laser sensor Keyence IL065 o zakresie pomiarowym 50 mm i dokładności pomiarowej 2 μm . Na końcach belek każdy z badanych prętów unieruchomiono względem osłonek PVC za pomocą specjalnej pianki montażowej, która jednocześnie umożliwiała ich osiowe przemieszczanie. Obciążenie było przekazywane przez siłownik o zakresie obciążenia 200 kN zamontowany przegubowo w urządzeniu wytrzymałościowym ZD20. W trakcie badania rejestrowano w sposób ciągły poślizg rozciąganego pręta na obu końcach zestawu belkowego. Wyniki były rejestrowane w sposób ciągły, przez cały okres badania. Obciążenie zwiększano monotonicznie w trakcie badania i było kontynuowane aż do osiągnięcia maksymalnego poślizgu.

3. Wyniki badań i analiza

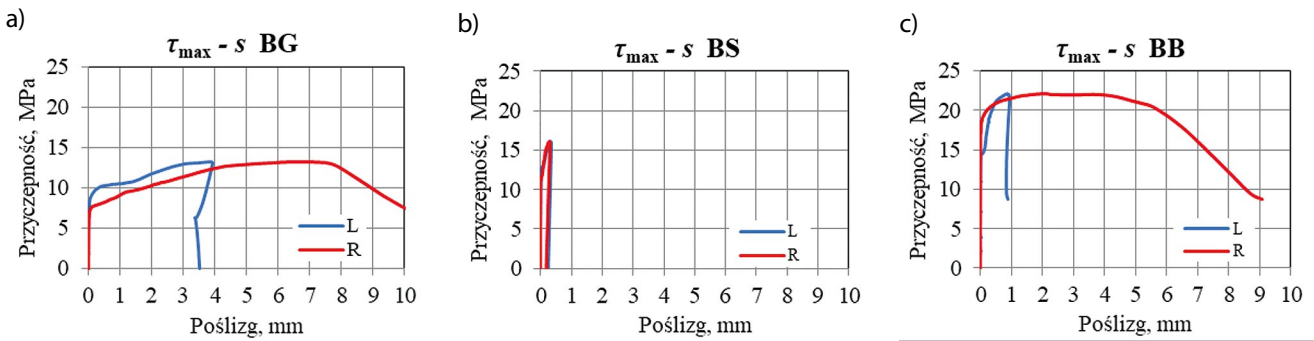
Współdziałanie betonu i zbrojenia jest możliwe dzięki przyczepności – tj. zdolności do przenoszenia sił, pomiędzy dwoma materiałami budowlanymi. Powstawanie rys w betonie jest konieczne, aby aktywować efekt przyczepności i aby zabetonowane zbrojenie (np. w postaci prętów FRP, stalowych) było użyteczne. Analizę przyczepności przeprowadzono dla prętów GFRP, stalowych i BFRP do betonu normalnego, z dodatkiem zeolitu i z dodatkiem metakaolinitu. Porównywano pręty GFRP i BFRP o uźbrowaniu w postaci oplotu, 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 [28] wystarczające naprężenia przyczepności są zapewnione, jeśli średnie naprężenia przyczepności $\tau_m \geq 6,42 \text{ MPa}$ i maksymalne naprężenia przyczepności $\tau_{\text{max}} \geq 10,51 \text{ MPa}$ dla średnicy prętów równej 12 mm. We wszystkich przeprowadzonych testach średnie i maksymalne naprężenia przyczepności były większe od odpowiadającym im normowym naprężeniom przyczepności.

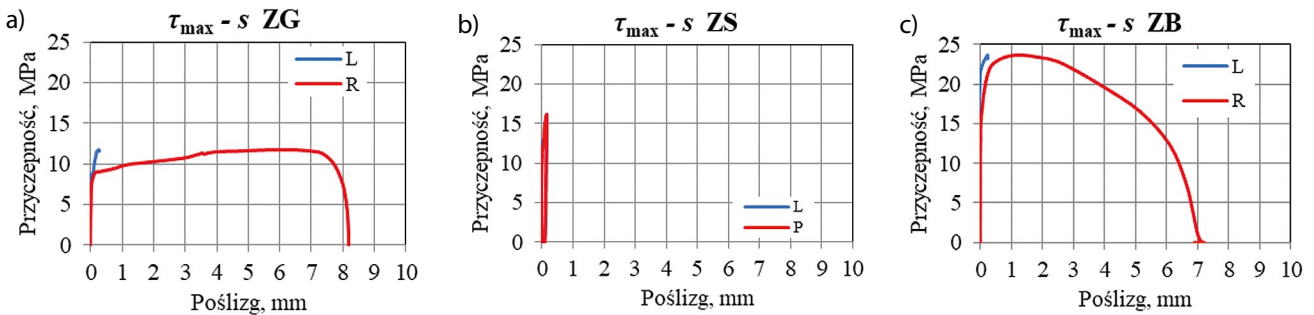
Rys. 3. Zależność naprężenia przyczepności – poślizg (L – prawa belka, R – lewa belka); źródło: opracowanie własne



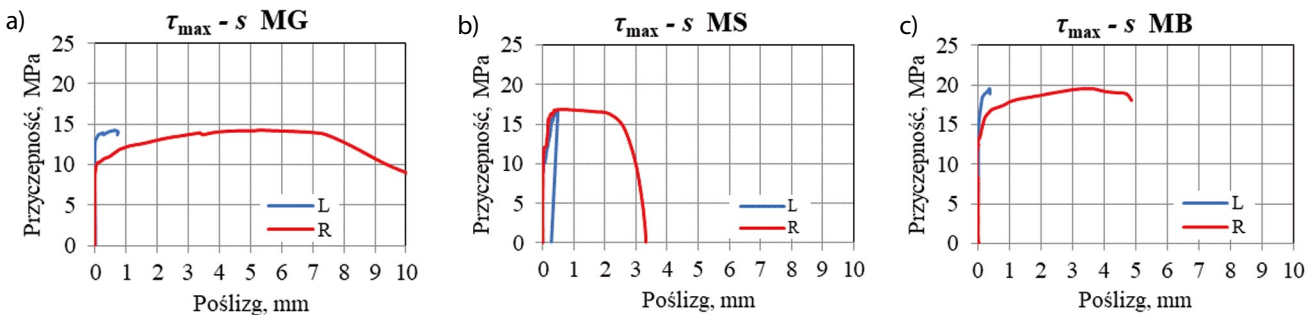
Utrata przyczepności nie następuje jednocześnie w obu belkach zestawu testowego ze względu na niejednorodność betonu. Dlatego przebieg poślizgu w jednej z belek zestawu występuje z nieznacznym opóźnieniem. Krzywa naprężenia przyczepności – poślizg składa się w przybliżeniu z czterech zakresów. Przebieg krzywej przedstawiono w sposób poglądowy na rysunku 3. W obydwu belkach pierwszy zakres ① wykazywał wzrost liniowy, dla którego poślizg był niezauważalny. W drugim zakresie ② przyrost był nieliniowy aż do osiągnięcia maksymalnego naprężenia przyczepności przy zauważalnym nieliniowym wzroście poślizgu w obydwu testowanych belkach. Nieliniowość oznacza, że uszkodzenie występowało na styku między betonem i prętem z uwagi na zjawisko mechanicznego blokowania. W trzecim zakresie ③ zachowanie przyczepności w obu belkach jest odmienne. W jednej z belek, po osiągnięciu maksymalnego naprężenia przyczepności krzywa gwałtownie opadała, wskazując na utratę w niej przyczepności. Natomiast w drugiej belce naprężenia przyczepności utrzymywały się na poziomie nieznacznie odbiegającym od maksymalnego naprężenia przyczepności przy narastającym poślizgu o kilkukrotnie większym zakresie niż w zakresie ②. Spowodowane jest to aktywowaniem oddziaływania tarcia. W zakresie ④, którego zakres był większy od zakresu ③, następowało łagodne 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 4, 5, 6 pokazano przykładowe zależności naprężeń przyczepności τ_{max} na poślizg s odpowiednio od lewej strony do prawej dla prętów GFRP, stalowego i BFRP.



Rys. 4. Zależności naprężenia przyczepności – poślizg dla betonu zwykłego: BG – pręt GFRP (L – lewa belka, poślizg wystąpił wcześniej niż w prawej belce – R); BS – pręt stalowy (L – lewa belka, poślizg wystąpił później niż w prawej belce – R) c) BB – pręt BFRP (L – lewa belka, poślizg wystąpił wcześniej niż w prawej belce – R); źródło: opracowanie własne



Rys. 5. Zależność naprężenie przyczepności – poślizg dla betonu z dodatkiem zeolitu: a) ZG – pręt GFRP (L – lewa belka, poślizg wystąpił wcześniej niż w prawej belce – R), b) ZS – pręt stalowy (L – lewa belka, poślizg wystąpił później niż w prawej belce – R) c) ZB – pręt BFRP (L – lewa belka, poślizg wystąpił wcześniej niż w prawej belce – R); źródło: opracowanie własne

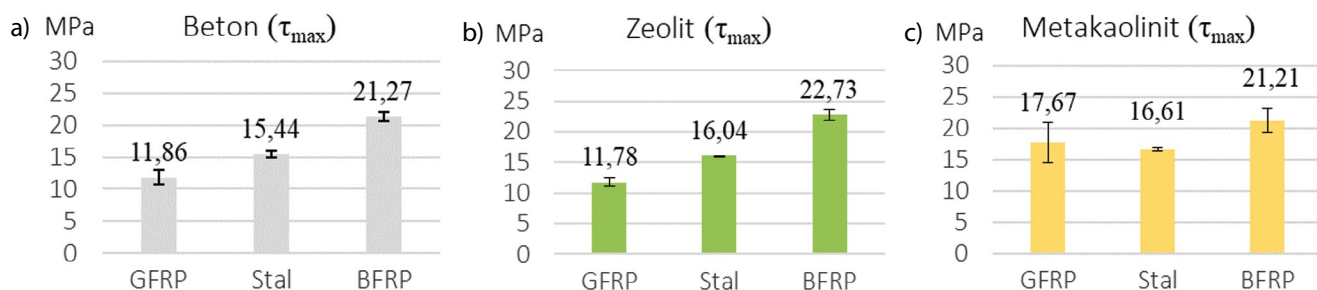


Rys. 6. Zależność naprężenie przyczepności – poślizg dla betonu z dodatkiem metakaolinitu: a) dla pręta GFRP (L – lewa belka, poślizg wystąpił wcześniej niż w prawej belce – R), b) dla pręta stalowego (L – lewa belka, wystąpił później niż w prawej belce – R) c) dla pręta GFRP (L – lewa belka, poślizg wystąpił wcześniej niż w prawej belce – R); źródło: opracowanie własne

W zwykłym betonie poślizg prętów przy maksymalnym naprężeniu przyczepności dla GFRP wynosił (1,33–3,84) 2,20 mm i był większy od poślizgu dla stali (0,31–0,40) 0,35 mm oraz dla BFRP (0,23–0,85) 0,61 mm. Charakterystyka krzywej naprężenia przyczepności – poślizg (jak w wyniku z rysunku 4) różniła się zdecydowanie dla prętów GFRP i BFRP w stosunku do prętów stalowych. W porównaniu do prętów stalowych zakres ② przyczepności dla prętów GFRP i BFRP był kilkakrotnie większy. Zakres ③ (po przekroczeniu pikę naprężeń przyczepności) był dla prętów GFRP i BFRP o rząd wielkości większy niż w przypadku prętów stalowych. W prętach BFRP zaobserwowano wyraźne plateau będące wynikiem sukcesywnego utrzymującego się oddziaływania kolejnych oplotów pręta oraz wpływu mniejszego skoku uźebrowania

oplotu. Zakres ④ w obu przypadkach prętów GFRP i BFRP charakteryzuje się stopniowym w zasadzie liniowym spadkiem przyczepności.

W betonie z dodatkiem zeolitu średni poślizg prętów przy maksymalnym naprężeniu przyczepności dla GFRP wynosił (0,25–1,77) 0,82 mm i był większy od średniego poślizgu dla stali – (0,04–0,16) 0,11 mm oraz BFRP – (0,24–0,49) 0,37 mm (rys. 5). Dodatek zeolitu spowodował znaczące ograniczenie zakresu ② nieliniowego przyrostu naprężeń przyczepności w przypadku prętów GFRP i BFRP. W zakresie ③ zaobserwowano zanik plateau, szczególnie widoczny dla prętów GFRP. W zakresie ④ wykres jest nieliniowy i pokazuje znaczny spadek przyczepności zwłaszcza w przypadku prętów GFRP.



Rys. 7. Przepiętność prętów GFRP, stali i BFRP zależna od rodzaju betonu; źródło: opracowanie własne

W betonie z dodatkiem metakaolinitu średni poślizg prętów przy maksymalnym naprężeniu przyczepności dla GFRP wynosił (0,62–1,32) 0,83 mm i był większy od średniego poślizgu dla stali (0,24–0,46) 0,35 mm oraz większy od poślizgu BFRP (0,36–1,21) 0,67 mm (rys. 6). W porównaniu z betonem zwykłym nastąpiło znaczące zawężenie zakresu ② w przypadku prętów GFRP i BFRP. Zależność naprężeń przyczepności – poślizg w zakresie ③ była podobna. Maksymalne naprężenia przyczepności prętów GFRP, stali i BFRP dla betonu normalnego, betonu z dodatkiem zeolitu i betonu z dodatkiem metakaolinitu pokazano na rysunku 7.

Dla betonu normalnego maksymalne naprężenia przyczepności τ_{\max} dla prętów GFRP wynosiły 11,86 MPa i były mniejsze od przyczepności pozostałych rodzajów prętów. Dla prętów stalowych $\tau_{\max} = 15,44$ MPa i były większe od prętów GFRP o 30,2%. Największe naprężenia przyczepności odnotowano dla prętów BFRP, które wynosiły 21,27 MPa i były większe od prętów GFRP o 79,3%, a od prętów stalowych o 37,8%. Należy zaznaczyć, że pręty stalowe ulegały uplastycznieniu, co powodowało zahamowanie poślizgu z uwagi na plastyczne odkształcenia środkowego odcinka pręta (rys. 7). W przypadku betonu z dodatkiem zeolitu maksymalne naprężenia przyczepności τ_{\max} dla prętów GFRP wynosiły 11,78 MPa i były mniejsze od pozostałych rodzajów prętów. Dla prętów stalowych $\tau_{\max} = 16,04$ MPa i były większe od prętów GFRP o 36,2%. Największe naprężenia przyczepności odnotowano dla prętów BFRP, które wynosiły $\tau_{\max} = 20,64$ MPa i były większe od prętów GFRP o 75,2% i od prętów stalowych o 28,7% (rys. 8). W obecności betonu z dodatkiem metakaolinitu maksymalne naprężenia przyczepności dla prętów GFRP wynosiły 17,67 i były mniejsze od pozostałych rodzajów prętów. Dla prętów stalowych $\tau_{\max} = 16,61$ MPa i były mniejsze od prętów GFRP o 6%. Największe naprężenia przyczepności odnotowano dla prętów BFRP, które wynosiły $\tau_{\max} = 21,21$ MPa i były większe od przyczepności prętów GFRP o 20,0% i dla prętów stalowych o 27,7% (rys. 7).

W przypadku prętów GFRP dodatek zeolitu i metakaolinitu do betonu spowodował ponad dwukrotne zmniejszenie poślizgu przy wystąpieniu maksymalnych naprężeń przyczepności, w porównaniu ze zwykłym betonem. Natomiast dla prętów BFRP i stalowych zaobserwowano prawie dwukrotne zmniejszenie poślizgu przy wystąpieniu maksymalnych naprężeń przyczepności, tylko w próbkach z dodatkiem zeolitu. Obecność metakaolinitu w betonie próbek

z udziałem prętów BFRP i stalowych praktycznie nie wpłynęła na wartości poślizgu.

Dla prętów GFRP maksymalne naprężenia przyczepności nie uległy zmianie w betonie z dodatkiem zeolitu. Natomiast w obecności metakaolinitu zaobserwowano bardzo duży wzrost naprężeń przyczepności o 49%, w porównaniu do betonu zwykłego. W przypadku prętów stalowych nastąpił wzrost przyczepności o 4 i 8% do betonu z dodatkiem zeolitu i metakaolinitu odpowiednio, w porównaniu do betonu zwykłego. Przechytność prętów BFRP wzrosła w obecności dodatku zeolitu do betonu o 7% i nie uległa zmianie w przypadku metakaolinitu, w porównaniu ze zwykłym betonem. W przypadku prętów BFRP mimo większego rozstawu oplotu w stosunku do żeber w stalowym pręcie, przechytność była większa niż dla prętów stalowych. Utrata przechytności w przypadku prętów GFRP i BFRP spowodowana była pełnym odkształceniem żeber w postaci oplotu. Można stwierdzić, że w mechanizmie przechytności 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 przechytności jest determinowany głównie przez mechaniczne zazębnienie wywoływane przez oplot prętów kompozytowych.

4. Podsumowanie

Niniejsze badania miały na celu określenie przechytności prętów BFRP i GFRP w betonie modyfikowanym za pomocą testów belkowych. Przeanalizowany i porównany został wpływ właściwości betonu i charakterystyki prętów na zachowanie się przechytności prętów FRP. Wyniki tych badań dostarczą cennych informacji do projektowania i wdrażania konstrukcji z betonu zbrojonego FRP oraz przyczynią się do opracowania ulepszonych modeli przechytności prętów FRP w betonie. Wnioski odnoszą się do określonych zakresów wytrzymałości betonu na ściskanie oraz średnic prętów kompozytowych, a także dotyczą prętów z oplotem w postaci rowingu.

- We wszystkich testach stwierdzono spełnienie warunków normowych średnich i maksymalnych naprężeń przechytności.
- Dla badanych rodzajów prętów maksymalne naprężenia przechytności τ_{\max} oraz średnie naprężenia przechytności τ_m wyznaczone dla poślizgu 0,01; 0,1; i 1 mm zapewniały

wystarczającą przyczepność i były większe od wymaganych według EN 1992-1-1.

- Największe maksymalne naprężenia przyczepności $\tau_{\max} = 22,73$ MPa odnotowano w przypadku prętów BFRP dla betonu z dodatkiem zeolitu, które były większe o 75,2 i 28,7%, w porównaniu do prętów GFRP i stalowych odpowiednio. Natomiast w obecności w betonie dodatku metakaolinitu maksymalne naprężenia przyczepności prętów BFRP wynosiły $\tau_{\max} = 21,21$ MPa i były większe o 27,7 i 20,0%, w porównaniu do prętów stalowych i GFRP odpowiednio.

- Największe średnie naprężenia przyczepności do betonu z dodatkiem zeolitu odnotowano dla prętów BFRP – $\tau_m = 18,72$ MPa, które były większe o 47 i 154% w porównaniu do prętów stalowych i GFRP odpowiednio. Natomiast w obecności w betonie dodatku metakaolinitu średnie naprężenia przyczepności prętów BFRP wynosiły $\tau_m = 15,82$ MPa i były większe o 24,2 i 16,2%, w porównaniu do prętów stalowych i GFRP odpowiednio.

- Dodatki (zeolitu i metakaolinitu) do betonu zmniejszają ponad dwuipółkrotnie poślizg przy maksymalnym naprężeniu przyczepności w przypadku prętów GFRP. Dla prętów BFRP i stalowych zmniejszony poślizg zaobserwowano w obecności betonu z dodatkiem zeolitu.

- Diametralnie odmienne zachowanie w przypadku prętów GFRP i BFRP zaobserwowano po osiągnięciu pików naprężeń. Przyczepność po stronie „opóźnionego poślizgu” zmniejszała się stopniowo i utrzymywała się na poziomie ponad 80%, przy poślizgu kilkukrotnie większym od poślizgu przy maksymalnym naprężeniu przyczepności.

Przyczepność prętów FRP w konstrukcjach z betonu jest przedmiotem wielu badań i analiz. Przyczyną zainteresowania tym zagadnieniem jest, między innymi, duża różnorodność produkowanego zbrojenia niemetalicznego, związana ze składem, rodzajem i zawartością włókien, czy sposobem wykończenia powierzchni prętów. Wymienione czynniki, poza tymi, które są już znane i rozpoznane w przypadku konstrukcji ze zbrojeniem stalowym, mają duży wpływ na przyczepność prętów FRP do betonu. Jednocześnie wpływ ten jest trudny do jakościowej i ilościowej oceny, bez przeprowadzenia badań doświadczalnych.

Podziękowanie

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.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Garbacz A., Urbański M., Łapko, A., BFRP bars as an alternative reinforcement of concrete structures – Compatibility and adhesion issues, *Advanced Materials Research*, tom 1129, 2015, str. 233–241
- [2] ACI 440.3R-04: Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures, ACI, 2004
- [3] Wang X., Wang, Z., Cheng F., Shear behavior of basalt fiber reinforced polymer (FRP) and hybrid FRP, *Construction and Building Materials* 24(09) 2014, str. 781–789
- [4] Radomski W., *Bridge Rehabilitation*, London, Imperial College Press, 2002
- [5] ASTM D7617/D7617M – 11 Standard Test Method for Transverse Shear Strength of Fiber-reinforced Polymer Matrix Composite Bars, American Society of Testing and Materials: West Conshohocken, PA, 2011
- [6] *The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering*, ed. Manoochehr Zoghi, CRC Press, 2014
- [7] Szmigiera E., Protchenko, K., Urbański M., Garbacz, Mechanical Properties of Hybrid FRP Bars and Nano-Hybrid FRP Bars, *Archives of Civil Engineering* 65(1)2019, str. 97–110
- [8] Protchenko K., Szmigiera E., Urbański M., Garbacz A., Development of Innovative HFRP Bars, *MATEC Web of Conf.*, Washington, 2018
- [9] Urbanski M., Compressive Strength of Modified FRP Hybrid Bars, *Materials* 13(8)2020 str. 1898
- [10] Szmigiera E., Urbański M., Protchenko K., Strength Performance of Concrete Beams Reinforced with BFRP Bars, *International Congress on Polymers in Concrete (ICPIC 2018)*, *Polymers for Resilient and Sustainable Concrete Infrastructure*. Ed. Mahmoud M. Reda Taha, Girum Urgessa, Moneeb Genedy (ed.), Springer AG, Ch. 87, 2018, str. 667–674
- [11] Shobeiri V., Bennett B., Xie T., Visintin P., A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymer concrete, *Journal of Cleaner Production*, 2021
- [12] Groves M. C. E., Sasonow A., Uhde EnviNOX® technology for NOX and N2O abatement: a contribution to reducing emissions from nitric acid plants, *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 2010
- [13] Elizondo-Martínez E. J., Andrés-Valeri V. C., Jato-Espino D., Rodríguez-Hernández J., Review of porous concrete as multifunctional and sustainable pavement, *Journal of Building Engineering* 27, 2020
- [14] Naqi A., Jang J., Recent Progress in Green Cement Technology Utilizing Low-Carbon Emission Fuels and Raw Materials: A Review, *Sustainability* 11/2019
- [15] Rashad A. M., Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview, *Construction and Building Materials* 41, 2012, str. 303–318
- [16] 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*, 152, 2018, str. 196–210
- [17] 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* 4/2019, str. 89–102
- [18] Hao Q., Wang Y., Zheng H., Jinping O., Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete, *Construction and Building Materials* 23, 2/2009, str. 865–871
- [19] Weichen X., Qiaowen Z., Yu Y., Zhiqing F., Bond behavior of sand-coated deformed glass fiber reinforced polymer rebars 33(10)2014, str. 895–910
- [20] Zemour N., Asadian A., Ahmed E. A., Khayat K. H., Benmokrane B., Experimental study on the bond behavior of GFRP bars in normal and self-consolidating concrete, *Construction of Building Materials*, 189, 2018, str. 869–881
- [21] Hossain K. M. A., Ametrano D., Lachemi M., Bond strength of standard and high-modulus GFRP bars in high-strength concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26, 2014, str. 449–456
- [22] Zhang P., Zhang S., Gao D., Dong F., Liu Y., Zhao J., Sheikh S. A., Influence of rib parameters on mechanical properties and bond behavior in concrete of fiber-reinforced polymer rebar, *Advances in Structural Engineering* 24, 196–208 pp., 2021
- [23] Hao Q., Wang Y., He Z., Ou J., Bond strength of glass fiber reinforced polymer ribbed rebars in normal strength concrete, *Construction and Building Materials* 23, 2009, str. 865–871
- [24] Achillides Z., Pilakoutas K., Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions, *Journal of Composites for Construction* 8 (2)2004, str. 173–181
- [25] Kotynia R., Szczech D., Kaszubska M., Bond behavior of GRFP bars to concrete in beam test. *Procedia Engineering* 193, 2017, str. 401–408
- [26] Lee J. Y., Kim T. Y., Kim T. J., Yi C. K., Park J. S., You Y. C., Park Y. H., Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete, *Composites Part B: Engineering* 39, 2008, str. 258–270
- [27] PN-EN 10080: Stal do zbrojenia betonu, Spajalna stal zbrojeniowa, *Postanowienia ogólne*, PKN, Warszawa, 2007
- [28] PN-EN 1992-1-1: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, PKN, Warszawa, 2008