

Maria Włodarczyk

Nośność elementów ściskanych zbrojonych prętami FRP. Wyniki badań doświadczalnych

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.484

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule przedstawiono badania doświadczalne elementów ściskanych zbrojonych prętami FRP (Fibre Reinforced Polymer) i stalowymi. Celem badań było oszacowanie wpływu rodzaju zbrojenia na ich nośność. Podczas badań zaobserwowano, że zniszczenie następowało poprzez zmiążdżenie betonu ściskanego.

Słowa kluczowe: zbrojenie FRP, beton, stal, nośność, ściskanie, obciążenie osiowe

Wstęp

Współczesne obiekty budownictwa kubaturowego i infrastrukturalnego wykonywane są głównie jako konstrukcje betonowe żelbetowe lub sprężone. Podczas eksploatacji często narażone są na agresywne oddziaływanie środowiska powodujące ich destrukcję. Do najczęstszych przyczyn destrukcji zaliczana jest korozja zbrojenia, która następuje w wyniku karbonatyzacji otuliny betonowej [1, 2, 3]. Największy problem z korozją zbrojenia występuje w obiektach budownictwa infrastrukturalnego na co istotny wpływ mają powtarzające się cykle odmrażania i zamrażania oraz chlorki powstałe między innymi w wyniku stosowania środków do odładzania jezdni.

Procesy niekorzystnego oddziaływania środowiska na konstrukcję żelbetową wpływają na jej bezpieczeństwo i niezawodność oraz obniżają trwałość. W zależności od rodzaju konstrukcji (mosty, wiadukty, zbiorniki na cieczy itp.) oraz warunków eksploatacji występuje bezpośrednie i pośrednie zagrożenie korozyjne [4].

Zapewnienie odpowiedniej trwałości obiektom budowlanym stanowi dość istotny problem techniczny [5]. W związku z tym coraz częściej sytuacje obliczeniowe wymagają od projektantów stosowania alternatywnego rozwiązania dla zbrojenia stalowego. Jedną z takich możliwości jest zastosowanie prętów kompozytowych na bazie FRP (Fibre Reinforced Polymer). Mają one wiele pożądanych właściwości między innymi, takich jak: wysoka wytrzymałość na rozciąganie [6, 7], lekkość, duża odporność na korozję oraz objętość elektromagnetyczną.

W pewnych okolicznościach użycie prętów kompozytowych FRP, zamiast tradycyjnie zbrojenia stalowego, może się przyczynić do zwiększenia nośności i trwałości konstrukcji. Materiały kompozytowe FRP między innymi ze względu na znacznie dłuższą żywotność i wysoką wytrzymałość na rozciąganie stanowią obiecujący zamiennik stali zbrojeniowej w konstrukcjach betonowych.

Obecnie zastosowanie prętów FRP wykraczało poza etap eksperymentalny i stosuje się je w wielu konstrukcjach betonowych, takich jak konstrukcje z betonu sprężonego, fundamenty, nawierzchnie dróg, parkingi, mosty, wiadukty itp. Na rysunku 1 pokazano zastosowanie prętów GFRP (Glass Fibre Reinforced Polymer) i BFRP (Basalt Fibre Reinforced Polymer) w zabudowie chodnikowej mostu powstającego w ciągu drogi krajowej S51 na trasie Olsztyn Wschód – Olsztyn Południe (Rys. 1) [8].



Rys. 1. Zbrojenie CFRP i BFRP zabudowy chodnikowej mostu w ciągu drogi S1 Olsztyn Wschód – Olsztyn Południe [8]

Od kilkunastu lat prowadzone są badania nad właściwościami oraz możliwością zastosowania jako zbrojenia wewnętrznego elementów konstrukcyjnych prętów wykonanych z BFRP, GFRP, CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer), HFRP (Hybrid Fibre Reinforced Polymer), które mogą stanowić alternatywę do zbrojenia stalowego. Zdecydowana większość badań i analiz dotyczy elementów zginanych [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15], natomiast badań i analiz zachowania się elementów ze zbrojeniem kompozytowym elementów ściskanych było prowadzone niewiele [16, 17, 18].

W artykule omówiono badania elementów ściskanych zbrojonych prętami FRP i referencyjnymi prętami stalowymi. Badania te miały na celu ustalenie wartości siły niszczącej i sposobu zachowania się elementów ściskanych z wykorzystaniem zbrojenia niemetalicznego FRP.

1. Wyniki i analiza badań doświadczalnych

W celu możliwości określenia siły niszczącej elementów ściskanych poddanych oddziaływaniu siły osiowej przyjęto wzrost siły od zera aż do zniszczenia. Do badań przyjęto modele słupów o wymiarach przekroju poprzecznego 150 × 150 mm i wysokości 750 mm.

Badania ściskania zostały wykonane w prasie EU 1000. Stanowisko badawcze zostało pokazane na rysunku 2.



Rys. 2. Stanowisko badawcze do badania elementów ściskanych (prasa EU 1000)

1.1. Elementy badawcze i wyniki eksperymentu

Badania obejmowały 5 serii modeli słupów, po dwa w każdej serii, różniące się między sobą ilością i rodzajem zbrojenia. Dla wszystkich badanych elementów zastosowano beton tej samej klasy C35/45, o średniej wytrzymałości na ściskanie określonej na podstawie badań doświadczalnych: $f_c = 41,00 \text{ MPa}$.

Dla modeli słupów serii 1, elementy B1 i B2, użyto cztery pręty bazaltowe BFRP o średnicy 8 mm. Sumaryczny procent zbrojenia dla tych elementów wynosił $\rho = 0,89 \%$. Seria 2 obejmuje elementy SK1 i SK2 zbrojone czterema prętami szklanymi GFRP o średnicy 8 mm i procencie zbrojenia $\rho = 0,89 \%$, natomiast seria 3, elementy SK3 i SK4, dla których zastosowano cztery pręty GFRP $\phi 10$ ($\rho = 1,40 \%$). Dla modeli słupów serii 4 i 5 zastosowano pręty ze stali BSt500, różniące się pomiędzy seriami średnicą zbrojenia. I tak dla serii 4 (element ST1 i ST2) użyto cztery pręty $\phi 8$ o $\rho = 0,89 \%$, a dla serii 5 (element ST3 i ST4) zastosowano cztery pręty $\phi 10$ o $\rho = 1,40 \%$.

W tabelicy 1 zestawiono rodzaj i liczbę prętów zbrojenia wraz z podaniem ich wytrzymałości na rozciąganie.

Tab. 1. Zestawienie zbrojenia dla badanych elementów

Nazwa elementu	Rodzaj zbrojenia podłużnego	Średnica i liczba prętów zbrojenia podłużnego	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
B1	BFRP	4 ϕ 8	1100
B2	BFRP	4 ϕ 8	1100
SK1	GFRP	4 ϕ 8	1012
SK2	GFRP	4 ϕ 8	1012
SK3	GFRP	4 ϕ 10	1012
SK4	GFRP	4 ϕ 10	1012
ST1	Stal BSt500	4 ϕ 8	556
ST2	Stal BSt500	4 ϕ 8	556
ST3	Stal BSt500	4 ϕ 10	556
ST4	Stal BSt500	4 ϕ 10	556

Podczas badań doświadczalnych prowadzono obserwację zachowania się elementu w zależności od wielkości przykadanego obciążenia, oraz rejestrowano postać zniszczenia. Po osiągnięciu punktu granicznego, obciążenie było kontynuowane, w celu uzyskania pełnego przebiegu ścieżki równowagi statycznej, również w zakresie pokrytycznym, jeśli to było możliwe ze względu na właściwości zbrojenia kompozytowego FRP i stalowego.

Elementy ściskane, dla których zastawano zbrojenie FRP uległy zniszczeniu poprzez zmiażdżenie betonu przy ściskaniu. Obraz i postać zniszczenia obrazują zdjęcia (zdjęcia od Rys. 3 do Rys. 8). Natomiast zniszczenie dla elementów zbrojonych prętami stalowymi nastąpiło ze względu na wyboczenie prętów zbrojenia podłużnego, co w konsekwencji spowodowało zmiażdżenie betonu, co obserwujemy na zdjęciach (zdjęcia od Rys. 9 do Rys. 12).



Rys. 3. Element B1 – obraz i postać zniszczenia przy sile niszczącej $N_n = 550,00 \text{ kN}$



Rys. 4. Element B2 – obraz i postać zniszczenia przy sile niszczącej $N_n = 727,20 \text{ kN}$



Rys. 5. Element SK1 – obraz i postać zniszczenia przy sile niszczącej $N_n = 680,00 \text{ kN}$



Rys. 6. Element SK2 – obraz i postać zniszczenia przy sile niszczącej $N_n = 699,10 \text{ kN}$



Rys. 7. Element SK3 – obraz i postać zniszczenia przy sile niszczącej $N_n = 690,00 \text{ kN}$



Rys. 8. Element SK4 – obraz i postać zniszczenia przy sile niszczącej $N_n = 733,20$ kN



Rys. 9. Element ST1 – obraz i postać zniszczenia przy sile niszczącej $N_n = 740,00$ kN



Rys. 10. Element ST2 – obraz i postać zniszczenia przy sile niszczącej $N_n = 630,00$ kN



Rys. 11. Element ST3 – obraz i postać zniszczenia przy sile niszczącej $N_n = 570,00$ kN



Rys. 12. Element ST4 – obraz i postać zniszczenia przy sile niszczącej $N_n = 580,00$ kN

1.2. Analiza wyników i wnioski

W praktyce inżynierskiej realizacja ściskanego obciążenia osiowego jest niemożliwa do realizacji. Zawsze wystąpią tzw. mimośrodowo niezamierzone [19]. W związku z tym nośność przekroju określamy traktując go jako mimośrodowo ściskany.

Nośność przekrojów mimośrodowo ściskanych można określić za pomocą krzywych interakcji N - M (siła-moment), które ograniczają obszar bezpiecznych kombinacji sił przekrojowych. Dla przekroju prostokątnego o wymiarach b i h krzywe te zapisujemy przy pomocy równania (1):

$$\begin{cases} N_{Rd} = A_{cc}\sigma_c + \sum_{i=1}^{n=2} A_{si}\sigma_{si} \\ M_{Rd} = A_{cc}\sigma_c z_c + \sum_{i=1}^{n=2} A_{si}\sigma_{si} (0,5h - d_i) \end{cases} \quad (1)$$

w którym N_{Rd} jest siłą podłużną ściskającą, M_{Rd} jest momentem zginającym, A_{cc} jest polem powierzchni strefy ściskanej betonu, d_i jest odległością środka ciężkości zbrojenia ściskanego bądź rozciąganego odpowiednio od skrajnych włókien ściskanych lub rozciąganych, z_c jest ramieniem sił wewnętrznych, σ_c jest naprężeniem w betonie odpowiadającym wytrzymałości betonu na ściskanie, σ_{si} jest naprężeniem w przyjętym zbrojeniu. Dla zbrojenia stalowego w stanie granicznym nośności naprężenia σ_{si} odpowiadają wielkość granicy plastyczności stali. Natomiast dla zbrojenia wykonanego z prętów FRP przy określaniu nośności pomijamy jego wpływ w strefach ściskanych przekroju [6, 7]. Dla przekrojów ściskanych osiowo i obciążeniem przyłożonym na bardzo małych mimośrodkach nośność przekroju określamy w odniesieniu do samego przekroju betonu.

Stosując równanie (1) dla wszystkich badanych elementów obliczono wielkości teoretycznych sił niszczących a następnie porównano z wielkościami sił uzyskanych w wyniku eksperymentu.

Przy obliczaniu wielkości sił teoretycznych N_{Rd} dla elementów ze zbrojeniem stalowym BSt500, BFRP i GFRP uwzględniono założenia i wytyczne stosowane w zależności od rodzaju zbrojenia. Informacje te są zawarte między innymi w przytoczonych pozycjach literaturowych [19, 20, 21, 22, 23].

Dla wszystkich zbadanych elementów w tabelicy 2 zestawiono obliczone wartości sił N_{Rd} , uzyskane w wyniku eksperymentu siły niszczące N_n oraz stosunek obydwu sił. Następnie wyniki te po-

służyły do analizy zachowania się elementów zbrojonych prętami kompozytowymi na bazie FRP w stanie granicznym nośności.

Tab. 2. Wartości teoretycznej siły niszczącej N_{Rd} i uzyskanej z badań doświadczalnych N_n

Nazwa elementu	Siła niszcząca teoretyczna N_{Rd} [kN]	Siła niszcząca uzyskana z badań doświadczalnych N_n [kN]	$\frac{N_n}{N_{Rd}}$
B1	922,50	550,00	0,60
B2	922,50	727,20	0,79
SK1	922,50	680,00	0,74
SK2	922,50	699,10	0,76
SK3	922,50	690,00	0,75
SK4	922,50	733,20	0,79
ST1	893,03	740,00	0,83
ST2	893,03	630,00	0,71
ST3	942,27	570,00	0,60
ST4	942,27	580,00	0,62

Analizując wyniki zamieszczone w tabeli 2 można zaobserwować, że różnice pomiędzy oszacowaną siłą teoretyczną N_{Rd} a uzyskaną z badań doświadczalnych N_n wynoszą od około 60% (Elementy B1, ST3 i ST4) do około 80% (Elementy B2, SK4 i ST1). Jedną z najniższych nośności na ściskanie zarejestrowanych podczas badań doświadczalnych osiągnęły dwa elementy. Element B1 (zbrojenie 4φ8, BFRP), dla którego wartość siły niszczącej wynosi $N_n = 550,00$ kN i referencyjny element ST3 (zbrojenie 4φ10, stal BSt500), dla którego $N_n = 570,00$ kN.

Dla modeli słupów zbrojonych prętami kompozytowymi na bazie FRP najmniejszą siłą niszczącą osiągnął element B1, która wynosi $N_n = 550,00$ kN, a największą element SK4 (zbrojenie GFRP, 4φ8) - $N_n = 733,20$ kN. Na tym etapie badań doświadczalnych nie można jednoznacznie wskazać przyczyn uzyskania takiej a nie innej wielkości siły niszczącej.

Porównując wyniki uzyskane dla prętów stalowych i prętów FRP (przy tych samych średnicach) możemy zaobserwować, że zastosowanie prętów BFRP i GFRP nie wpłynęło na obniżenie nośności elementów ściskanych osiowo w porównaniu z elementami zbrojonymi prętami stalowymi.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań modeli słupów możemy zaobserwować, że pręty kompozytowe BFRP i GFRP w elementach obciążonych osiowo można zastosować jako zamiennik zbrojenia stalowego. Zastosowanie prętów na bazie FRP wskazuje podobnie jak prętów stalowych na korzystny wpływ na nośność elementów ściskanych.

Stosowanie zbrojenia wykonanego z prętów kompozytowych na bazie FRP jako alternatywy do zbrojenia stalowego w elementach ściskanych wymaga indywidualnego podejścia oraz doświadczania w praktyce inżynierskiej, jak również prowadzenia dalszych badań doświadczalnych.

Bibliografia:

- Protchenko K., Włodarczyk M., Szmigiera E., Investigation of behaviour of reinforced concrete elements strengthened with FRP. "Science Direct, Precidia Engineering, Elsevier", 2015, doi 10.1016/j.proeng.2015.07.132, s. 679-686.
- Protchenko K., Włodarczyk M., Szmigiera E., Analysis of interface between FRP strip and concrete in structural systems. "Theoretical Foundations of Civil Engineering. Structural Me-

- chanics, Momografie Wydziału Inżynierii Lądowej, red, Jemiolo S., Gajewski M., Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej", 2016, vol. 7, s. 111-120.
- ACI 440R-07, Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Reported by ACI Committee 440.
- Runkiewicz L., Wpływ korozji na zagrożenia i awaryjność obiektów budowlanych, „Przegląd Budowlany”, 2016, nr 12, s. 32-37.
- Garbacz A., Szmigiera E., Urbański M., Protchenko K., Kubas M., O badaniach hybrydowego zbrojenia FRP do konstrukcji infrastrukturalnych z betonu, „Inżynieria i Budownictwo”, 2017 nr 8, s. 63-68.
- Szumigala M., Pawłowski D., Zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych w konstrukcjach budowlanych, „Przegląd budowlany” 2014 nr 3, s. 47-50.
- Rduch A., Rduch Ł., Walentyński R., Właściwości i zastosowanie kompozytowych prętów zbrojeniowych, „Przegląd budowlany”, 2017 nr 11, s. 43-46.
- Trochymiak W., Private communication, Politechnika Warszawska.
- Garbacz A., Szmigiera E. Protchenko K., Urbański M., On mechanical characteristics of HFRP bars with various types of hybridization, "Polymers for Resilient and Sustainable Concrete Infrastructure/Reda Taha Mahmoud M., Girum Urgessa, Moneeb Genedy (red.), Springer", 2018, doi: 10.1007/978-3-319-78175-4 83, s. 653-658.
- Håkan Nordin, Björn Täljsten, Testing of hybrid FRP composite beams in bending, "Composite Part B: Engineering, Elsevier", vol. 35, 2004, doi.10.1016/j.compositesb.2003.08.010, s. 27-33.
- Neagow C.A., Gil L., Pérez M.A., Experimental study of GFRP concrete hybrid beams with low degree of shear connection, "Construction and Building Materials", Vol. 101, part 1, 2015, doi. 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.24, s. 141-151.
- Włodarczyk M., Markowski H., Analiza pracy zginania belki ze zbrojeniem niemetalicznym, „TTS”, 2016 nr 12, s. 1-6.
- Koai A., Bel S., Jurkiewicz B., Experimental Tests and analytical model of concrete GFRP hybrid beams under flexure, "Composite Structures", vol 180, 2017 doi: 10.1016/j.compstruct.2017.07.059, s. 192-210.
- Goldston M.W., Remennikov A., Neaz Sheikh M., Flexural behaviour of GFRP reinforced high strength and ultra high strength concrete beams, "Construction and Building Materials", vol. 131, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.094, s. 606-617
- Urbański M., Łapko A., Effectiveness of flexural basalt reinforcement application in RC beam structures, "Modern materials, insralations and construction technologies, Fic S. (red.) John Paul II State School of Higher Education", 2013, s. 113-123.
- Kusumawardanigsih Y., Hadi M.N.S., Comparative behaviour of hollow columns confined with FRP composites, Composite Structures, Cost 3987, Elsevier, 2010, doi 10.1016/j.compstruct.2010.05.020, s.9
- Hosny M. Soghair, Mahmoud H.Ahmed, Atif M.Abdel-Hafez, Ahmed Ibrahim H.Ramadan, F.E.A. of R.C columns confined by CFRP laminates under axial and lateral load, "Al-Azahar Engineering, Ninth International Conference", AEIC 2007, s. 53-64
- Bo Hu, Jian-guo Wang, Guo-qiang Li, Numerical simulation and strength models of FRP-wrapped reinforced concrete columns under eccentric loading, "Construction and Building Materials, Elsevier", 2010, doi 10.1016/j.compstruct.2010.12.036, s. 2751-2763.
- PN-EN 1992-1-1, Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, 2008.

20. Nanni, De Luca, Jawaheri Zadeh, & CRC Press. (2014). Reinforced concrete with FRP bars: Mechanics and design, Boca Raton [etc.]: CRC Press Taylor & Francis Group.
21. Jamel A. Mechanical property improvement of carbon fiber reinforced polymeric composites by filler dispersion: a review, The Journal of the Mississippi Academy of Sciences, July 2016
22. Nanni, De Luca, Jawaheri Zadeh, Reinforced concrete with FRP bars: Mechanics and design, Boca Raton [etc.]: CRC Press Taylor & Francis Group, 2014.
23. Wight, J., Reinforced concrete. Mechanics and design (7th ed., Global ed., Always Learning). Boston [etc.], Pearson 2016.

The strength capacity of compression members reinforced with FRP bars. The results of structural testing

The paper describes experimental testing on compression members reinforced with FRP and steel bars. The main objective of the work was to investigate the effect of reinforcement type on the strength capacity of elements. It was observed that in most of the cases the failure of the elements happened due to concrete crushing.

Keywords: reinforcement FRP, concrete, steel, load capacity, compression, axial load

Autor:

dr inż. **Maria Włodarczyk** – Politechnika Warszawska, e-mail: maria.wlodarczyk@il.pw.edu.pl