

Krzysztof OSTROWSKI¹

Roman KINASZ²

Jerzy CIEŚLIK³

Daniel WAŁACH⁴

Bartłomiej AHMIDA⁵

NOŚNOŚĆ ELEMENTÓW OSIOWO ŚCISKANYCH NA PRZYKŁADZIE KOLUMN Z BETONU I FIBROBETONU WYSOKOWARTOŚCIOWEGO WZMOCNIONYCH WŁÓKNAMI WĘGLOWYMI

W artykule przedstawiono wpływ stosowania mat z włókien węglowych CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) na wytrzymałość kolumn wykonanych z betonu oraz fibrobetonu wysokowartościowego określoną w próbie jednoosiowego ściskania. Fibrobeton zaliczany jest do grupy betonów specjalnych, który charakteryzuje się specjalnymi właściwościami oprócz wytrzymałości [1]. Poprzez użycie CFRP możemy zwiększyć wytrzymałość kolumn z betonu wysokowartościowego, co zostało wykazane w pracy i jest zgodne z badaniami innych autorów [2, 3]. Należy podkreślić, że efektywność wzmocnienia konstrukcji zależy od kilku parametrów takich jak: rodzaj betonu i tkaniny wzmacniającej, liczby warstw wzmocnienia, ich sztywności oraz warunków obciążania [4]. Z uwagi na coraz szersze zastosowanie betonu wysokowartościowego ze zbrojeniem rozproszonym w elementach nośnych, w celach porównawczych zaprezentowano również wyniki dla fibrobetonu wysokowartościowego wzmocnianego matami CFRP.

Słowa kluczowe: słup zespolony, beton wysokowartościowy, stalowe zbrojenie rozproszone, włókna węglowe, naprężenie-odkształcenie

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Krzysztof Ostrowski, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 126172169; kostrow@agh.edu.pl

² Roman Kinasz, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 126172101; rkinasz@agh.edu.pl

³ Jerzy Cieślik, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 126173536; jerzy@agh.edu.pl

⁴ Daniel Wałach, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 126174768; walach@agh.edu.pl

⁵ Bartłomiej Ahmida, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; bartlomiej.ahmida@gmail.com

1. Wprowadzenie

Beton wysokowartościowy (BWW) jest coraz powszechniej stosowany w budownictwie z uwagi na bardzo dobre parametry wytrzymałościowe, wysoką odporność na czynniki atmosferyczne oraz ścieranie [5]. Dodatkowa obecność zbrojenia rozproszonego w jego strukturze może wpływać na redukcję zarysowań oraz polepszenie właściwości wytrzymałościowych [6, 7], co jest związane z quasi-plastycznością kompozytu [8]. W ostatnim czasie możemy zaobserwować znaczący wzrost stosowania materiałów kompozytowych we wzmacnianiu elementów betonowych. Jest to spowodowane wieloma zaletami tych materiałów, do których możemy zaliczyć wysoką wytrzymałość mechaniczną i moduł Younga, odporność na oddziaływanie środowiska agresywnego, a także wysoki stosunek wytrzymałości do masy oraz dobre właściwości zmęczeniowe [9, 10]. Do niedawna jedną z najpowszechniejszych metod wzmacniania kolumn betonowych było stosowanie płaszczy stalowych wokół nich. Jednakże głównymi wadami tego rozwiązania są niska odporność stali na korozję, wysoki koszt wykonania oraz duży ciężar finalny konstrukcji [11]. W rezultacie stosowanie mat z włókien węglowych do wzmacniania konstrukcji jest alternatywnym i zarazem bardzo efektywnym rozwiązaniem [12].

W związku z powyższym podjęto próbę określenia wpływu wzmocnienia włóknami węglowymi kolumn wykonanych z betonu i fibrobetonu wysokowartościowego na ich nośność i odkształcalność.

2. Badania własne

2.1. Próbkki i materiały

Przyjęto, że badania zostaną przeprowadzone na czterech grupach próbek: z betonu wysokowartościowego (BWW), z fibrobetonu wysokowartościowego (FBWW), z betonu wysokowartościowego wzmacnianego matami z włókien węglowych (MBWW) oraz z fibrobetonu wysokowartościowego wzmacnianego matami z włókien węglowych (MFBWW). W ramach każdej z grup przygotowano po trzy nietypowe próbki walcowe o wysokości $h = 400$ mm i średnicy $\phi = 150$ mm.

Tabela 1 przedstawia skład mieszanki betonowej. Materiały, z których wykonano mieszankę betonową były następujące: cement portlandzki CEM I 42,5R, kruszywo grube - diabaz (ϕ 2-8), kruszywo drobne - piasek drobny (ϕ 0-2), dodatek do betonu zawierający mikrokrzemionkę SikaFume HR/TU, superplastyfikatory Sikament FM6. Połowa próbek zawierała stalowe mikrobrojenie rozproszone w ilości 1,5% objętościowo. Stosunek wodno-cementowy wynosił 0,4.

W rezultacie po 3 próbki z betonu i fibrobetonu wysokowartościowego zostały przebadane w celach porównawczych, pozostałe 6 kolumn wzmocnionych CFRP przebadano w celu determinacji wpływu mat na wytrzymałość.

Tabela 1. Skład mieszanki betonowej

Table 1. Proportions of concrete mixture

Mieszanka	Cement [kg/m ³]	Piasek [kg/m ³]	Kruszywo [kg/m ³]	Sika Fume [kg/m ³]	Superplastyfikator [kg/m ³]	Woda [kg/m ³]	Włókna stalowe [% obj.]
BWW	500	650	1000	60	10	200	-
FBWW	500	650	1000	60	10	200	1,5

2.2. Przygotowanie i pielęgnacja próbek

Kolumny betonowe dojrzewały w kąpielii wodnej przez okres 28 dni, po czym wysychały przez 7 dni. Następnie część z nich została oklejona matami z włókien węglowych Sikawrap301c przy użyciu żywicy epoksydowej Sikadur330. Proces twardnienia żywicy następował w temperaturze 20°C i trwał kolejne 7 dni, co pozwoliło na osiągnięcie pełnej wytrzymałości kompozytu. W celu zapewnienia odpowiedniego kontaktu pomiędzy kompozytem, a powierzchnią betonu, została ona wypiaszkowana i oczyszczona. Wilgotność powierzchni próbek wynosiła ok. 5%. Każda ze wzmacnianych próbek została owinięta jednokrotnie w sposób ciągły z zakładem 150 mm. Wiek kolumn w momencie badań wynosił 6 tygodni. Parametry wytrzymałościowe mat z włókien węglowych i żywicy epoksydowej zestawiono w tabelach 2 i 3.

Tabela 2. Charakterystyczne parametry tkaniny Sikawrap301c [13]

Table 2. Characteristic parameters of Sikawrap301c [13]

Ciężar powierzchniowy	304 g/m ² ± 10 g/m ²
Obliczeniowa grubość maty	0,167 mm (zredukowana grubość włókien węglowych)
Gęstość włókien	1,82 g/cm ³
Właściwości włókien (wartości w kierunku wzdłuż włókien wg PN-EN ISO 10618)	Minimalny moduł sprężystości E 230 000 MPa
	Minimalna wytrzymałość na rozciąganie 4 900 MPa
	Wydłużenie przy zerwaniu 1,7%

Tabela 3. Charakterystyczne parametry żywicy epoksydowej Sikadur330 [13]

Table 3. Characteristic parameters of epoxy resin Sikadur330 [13]

Gęstość	~ 1,3 ± 0,1 kg/dm ³ (Składniki A + B w + 23 °C)
Wytrzymałość na rozciąganie	30 MPa (po 7 dniach w + 23 °C) (PN-EN ISO 527-3)
Przyczepność do podłoża	Przełom w betonie (> 4 MPa) (PN-EN ISO 4624) na wypiaszkowanym podłożu betonowym: > 1 dzień
Moduł sprężystości E	Zginanie: 3 800 MPa (przy + 23 °C/ 7 dni) (PN-EN 1465)
	Rozciąganie: 4 500 MPa (przy + 23 °C/ 7 dni) (PN-EN ISO 527-3)
Wydłużenie przy zerwaniu	0,9% (po 7 dniach w + 23 °C) (PN-EN ISO 527-3)

2.3. Technika pomiarowa i badania wytrzymałościowe

Kolumny betonowe zostały przebadane w teście jednoosiowego ściskania na serwo-sterowalnej sztywnej maszynie wytrzymałościowej MTS 815. Badania wykonano w pokojowej temperaturze 20°C i wilgotności 60%, ze stałym przyrostem odkształcenia kolumn rzędu $5 \times 10^{-5} [\text{s}^{-1}]$. Siła osiowa została zdeterminowana przy użyciu przetwornika siły. Przemieszczenia poprzeczne i osiowe określono dla całych kolumn przy użyciu czujników indukcyjnych LVDT (rys. 1).



Rys. 1. Maszyna wytrzymałościowa MTS użyta do badań oraz sposób pomiaru podłużnych i poprzecznych przemieszczeń kolumn.

Fig. 1. MTS testing system for uniaxial compression tests and measurements of axial and radial column displacements.

3. Wyniki badań

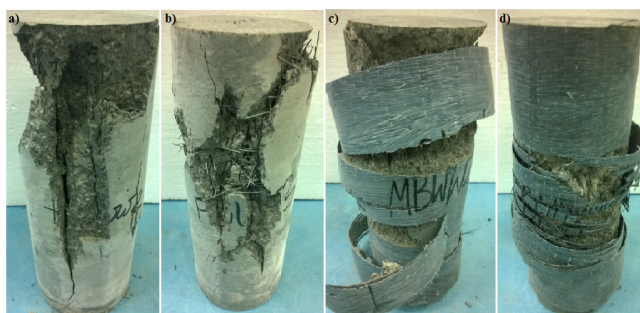
Wyniki badań zostały zestawione w tabeli 4. Naprężenia maksymalne określono dla przekrojów poprzecznych poszczególnych kolumn z pominięciem grubości mat CFRP. Moduł sprężystości kolumn został wyznaczony w zakresie od 15% do 33% wartości maksymalnych naprężeń [14] bez wcześniejszych cykli

Tabela 4. Podsumowanie wyników badań prowadzonych na nietypowych próbkach walcowych

Table 4. Summary of the experimental results conducted on non-standard cylindrical samples

Grupa próbek	Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Odchylenie standardowe średniej z próby [MPa]	Średnie odkształcenia osiowe podczas zniszczenia [%]	Średni moduł sprężystości E [GPa]
BWW	64,24	6,23	4,28	15,29
FBWW	68,38	2,77	6,02	14,18
MBWW	86,08	4,28	5,62	19,04
MFBWW	96,29	1,58	10,99	19,27

obciążania i odciążania próbek, dlatego też uzyskane wyniki mają charakter jakościowy. Fotografie zamieszczone na rys. 2 przedstawiają zniszczenie charakterystyczne dla każdej z analizowanych grup próbek. Możemy zauważyć, iż kolumny zniszczyły się w sposób analogiczny do próbek badanych w warunkach normowych [15], o czym świadczy powstanie stożków na granicy trójosiowego i jednoosiowego stanu naprężenia. Zniszczenie mat CFRP nastąpiło w najsłabszym miejscu próbki z wyzwoleniem ogromnej ilości energii. Wykresy a) - d) zestawione na rys. 3 przedstawiają zależność naprężenie-odkształcenie odpowiednio dla kolumn BWW, FBWW, MBWW oraz MFBWW. Średnia wytrzymałość kolumn BWW wynosi 64,24 MPa przy średnich odkształceniach osiowych równych 4,28‰. Dla kolumn FBWW wartości te są odpowiednio większe o 6% i 41%. Stosowanie mat CFRP w kolumnach MBWW spowodowało 34% wzrost uśrednionych wytrzymałości i 31% wzrost odkształceń w porównaniu do BWW. W przypadku kolumn MFBWW wytrzymałość na ściskanie była o 41% wyższa niż FBWW, a odkształcenia przy których nastąpiło zniszczenie były aż o 83% wyższe. Stosowanie mat CFRP spowodowało średni wzrost modułu sprężystości kolumn o 30%.



Rys. 2. Typowe zniszczenie kolumn: BWW (a), FBWW (b), MBWW (c), MFBWW (d)

Fig. 2. Typical failure modes of BWW (a), FBWW (b), MBWW (c), MFBWW (d)

żystej, co zostało również zaobserwowane w podobnych badaniach [2, 3], w przeciwieństwie do wzmacnianych tym samym sposobem kolumn z betonu zwykłego, które pracują w zakresie sprężysto-plastycznym ze wzmocnieniem. Ponadto nie zaobserwowano charakterystycznego momentu rozpoczęcia pracy włókien węglowych, który objawia się innym nachyleniem wykresu naprężenie-odkształcenie, zgodnie z wynikami badań opisanymi w pracy [16].

3. Stosowanie włókien stalowych w kolumnach z betonu wysokowartościowego wzmacnianych tkaniną CFRP powoduje, że elementy te wydają się pracować w zakresie quasi-sprężysto-plastycznym. Odkształcenia maksymalne są 157% wyższe niż w przypadku kolumn BWB.

Literatura

- [1] Ostrowski K.: Wpływ zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość betonu zwykłego. II Ogólnopolska Studencka Konferencja Budowlana, Poznań, 2015.
- [2] Berthet J.F., Ferrier E., Hamelin P.: Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: experimental study. *Construction and Building Materials*, 2005.
- [3] Chikh N., Gahmous M., Benzaid R.: Structural Performance of High Strength Concrete Columns Confined with CFRP Sheets. *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, 2012.
- [4] Bogdanovic A., *Strengthening Circular Concrete Columns Using FRP Sheets-Applications. Composite Materials in Civil Engineering*, 2002.
- [5] Wałach D., Dybeł P., Jaskowska-Lemańska J.: Diagnostyka konstrukcji budownictwa transportowego wykonanych z betonów wysokowartościowych, *Logistyka*, 2014.
- [6] Smarzewski P., Poręba J., Rentflejsz A.: Badania doświadczalne tarcz żelbetowych z betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien. *Budownictwo i Architektura*, 2012.
- [7] Kinash R., Bilozir V. *Deformational calculation method of bearing capability of fiber-concrete steel bending elements*. Technical Transactions, Architecture, Politechnika Krakowska, 2014.
- [8] Katzer J.: Wpływ włókien stalowych na właściwości wybranych kompozytów cementowych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008.
- [9] Mayer P., Kaczmar J., Właściwości i zastosowania włókien węglowych i szklanych. *Tworzywa Sztuczne i Chemia*, nr 6, 2008.
- [10] Shehata I., Carneiro L., Shehata L., Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets. *Materials and Structures*, Volume 35, 2002.
- [11] Karbhari M., Douglas A.E., Effects of Short-Term Environmental Exposure on Axial Strengthening Capacity of Composite Jacketed Concrete. *American Society for Testing and Materials*, 1995.
- [12] Mirmiran A., Yuan W., Chen X., Design for Slenderness in Concrete Columns Internally Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. *ACI Structural Journal*, 2002.

- [13] www.sika.com {dostęp 18.05.2014 r.}.
- [14] EN 12390-13:2013, Testing hardened concrete, Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression.
- [15] PN-EN 12390-3:2011, Badania betonu - Częć 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
- [16] Ostrowski K., Kinasz R., Cieřlik J., Wałach D.: The influence of CFRP sheets on strength of short columns produced from normal strength concrete and fibre reinforced concrete [in press]. Technical Transaction, Civil Engineering, 2016.

Podziękowania

Autorzy pragną podziękować Panu mgr inż. Markowi Kawalec z firmy SIKA Poland za przekazanie materiałów kompozytowych do badań oraz za zapewnione wsparcie techniczne.

Artykuł opracowano w ramach pracy statutowej WGiG AGH w Krakowie nr 11.11.100.197.

BEARING CAPACITY OF CONCRETE COLUMNS PRODUCED FROM HIGH PERFORMANCE CONCRETE AND HIGH PERFORMANCE FIBRE REINFORCED CONCRETE CONFINED BY CFRP SHEETS UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

S u m m a r y

This article presents the influence of Carbon Fibre Reinforced Polymer sheets (CFRP) on the strength of high performance concrete (HPC) and high performance fibre reinforced concrete (HPFRC) columns determined in uniaxial compression. Fibre reinforced concrete (FRC) belongs to a special concrete group which is characterized by special properties without strength [1]. By using CFRP we can increase strength of columns produced by HPC what is shown in the article and is in line with literature [2, 3]. The confinement effectiveness of externally bonded Fibre Reinforced Polymer (FRP) sheets depends on different parameters, such as the type of concrete and FRP, thickness of the FRP jackets (number of layers), stiffness of FRP and loading conditions [4]. Due to the increasing usage of HPC with steel microfibres in load-carrying concrete elements, for comparative purposes authors have presented a study of HPFRC columns.

Keywords: composite column, high performance concrete, steel microfibers, carbon fibre reinforced polymer material, stress-strain

DOI:10.7862/rb.2016.214

Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.