

mgr inż. Maciej Pazdan^{1*)}

ORCID: 0000-0002-3959-6337

dr hab. inż. Tomasz Trapko, prof. uczelni¹⁾

ORCID: 0000-0002-6375-7145

dr inż. Michał Musiał¹⁾

ORCID: 0000-0001-6628-9749

The load-bearing capacity and deformability of eccentrically compressed concrete elements strengthened with PBO-FRCM composites

Nośność i odkształcalność ściskanych mimośrodowo elementów betonowych wzmocnionych kompozytami PBO-FRCM

DOI: 10.15199/33.2024.11.01

Abstract. The paper presents test results of eccentrically compressed concrete elements strengthened with PBO-FRCM. FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*) composites consist of high-strength PBO (*p-Phenylene Benzobis Oxazole*) fibers embedded in mineral matrix, which gives greater resistance to elevated temperatures compared to popular FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) composites with a polymer matrix. The tests were conducted on elements made of normal-strength concrete with a compressive strength of approximately 45 MPa, which is typical for currently constructed reinforced concrete structures. The strengthening of the tested elements consisted of one, two, or three layers of PBO mesh with an overlap length of 1/4 of the sample circumference. The samples were subjected to both axial and eccentric compression tests. This research provides the foundation for developing a model to calculate the interactive capacity (*axial force-bending moment*) of reinforced concrete sections, taking into account the external PBO-FRCM composite wrapping.

Keywords: strengthening; concrete; FRCM; eccentric compression.

Strengthening reinforced concrete structures with composite materials, especially FRP, has gained great popularity since the beginning of the 21st century. "Modern methods" of strengthening make it possible to increase the load-bearing capacity of structural elements (beams, slabs, columns, walls) without too much interference with their original dimensions due to the use of high-strength fibers such as carbon, aramid, glass or basalt fibers in composite materials. The main disadvantage of FRP composites is the low resistance to elevated temperatures, which is due to the use of a polymer matrix in them. A temperature of only about +30°C causes deterioration of the

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań mimośrodowo ściskanych elementów betonowych wzmocnionych kompozytami PBO-FRCM. Kompozyty FRCM (ang. *Fabric Reinforced Cementitious Matrix* – matryca cementowa zbrojona tkaniną) składają się z wysokowytrzymałych włókien PBO (*p-Phenylene Benzobis Oxazole*) zatopionych w matrycy mineralnej, przez co charakteryzują się większą odpornością na podwyższone temperatury w porównaniu z popularnymi kompozytami FRP (ang. *Fiber Reinforced Polymer* – polimer zbrojony włóknami) o matrycy polimerowej. Badania przeprowadzono na elementach wykonanych z betonu zwykłego o wytrzymałości na ściskanie ok. 45 MPa, typowego w przypadku obecnie wykonywanych konstrukcji żelbetowych. Wzmocnienie badanych elementów stanowiły jedna, dwie bądź trzy warstwy siatki PBO z zakładem o długości 1/4 obwodu próbki. Próbkę poddawano zarówno próbom ściskania osiowego, jak i mimośrodowego. Przedstawione badania są punktem wyjścia do sformułowania modelu, służącego do wyznaczania interakcyjnej nośności (siła osiowa – moment zginający) przekrojów żelbetowych, z uwzględnieniem zewnętrznego uzwojenia kompozytowego PBO-FRCM.

Słowa kluczowe: wzmocnianie; beton; FRCM; ściskanie mimośrodowe.

Wzmocnianie konstrukcji żelbetowych materiałami kompozytowymi, szczególnie FRP, zyskało dużą popularność od początku XXI w. „Nowoczesne metody” wzmocniania umożliwiają zwiększenie nośności elementów konstrukcyjnych (belek, płyt, słupów, ścian) bez zbytej ingerencji w ich pierwotne wymiary z powodu stosowania w materiałach kompozytowych wysokowytrzymałych włókien, takich jak: węglowe, aramidowe, szklane czy bazaltowe. Główną wadą kompozytów FRP jest mała odporność na podwyższoną temperaturę, która wynika ze stosowania w nich matrycy polimerowej. Już temperatura ok. +30°C powoduje pogorszenie parametrów mechanicznych kompozytu. Determinuje to potrzebę stosowania dodatkowych zabezpieczeń nie tylko ogniochronnych, ale również przeciwko ekspozycji na promieniowanie słoneczne.

¹⁾ Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

^{*)} Correspondence address: maciej.pazdan@pwr.edu.pl

mechanical parameters of the composite. This determines the need for additional protection not only for fire protection, but also against exposure to solar radiation. In FRCM composites, the matrix is a modified cement mortar, which makes them much less sensitive to elevated temperatures [1]. Photo 1 shows an example of the use of the PBO-FRCM composite. However, due to the granular structure of the matrix and its brittleness, the efficiency of using high-strength fibers in FRCM composites is much lower than in FRP composites. Consequently, the most common failure mechanism is delamination of the composite, rather than rupture of the fibers – no stresses equal to their tensile strength are reached in the fibers. An advantageous aspect of such a failure mechanism is its ductile nature, which is particularly desirable from the point of view of structural safety.

Strengthening of concrete compressed elements with PBO-FRCM composites is described in publications [3 ÷ 7], but they are limited to members made of concrete with a compressive strength of about 25 MPa and axial compression (not for columns [8, 9]). In the case of concrete of lower strength, the strengthening effect is more intensive, but nowadays concrete with strength of about 40 MPa and higher are used in reinforced concrete columns. This paper presents the results of tests conducted on concrete cylinders reinforced with PBO-FRCM composites, subjected to axial compression and eccentric compression.

Experimental research

As part of the experimental study, axial and eccentric compression tests were carried out on thirty-six cylindrical elements (3 elements per type) with a diameter $D = 150$ mm and a height $H = 300$ mm. The average compressive strength of the concrete used in the tests $f_{cm0} = 46,56$ MPa, and the average Young's modulus $E_{cm0} = 29,07$ GPa. The results of the compressive strength and Young's modulus tests are shown in Table 1.

Concrete curing was carried out at a temperature of about 20°C on a grate above the water surface, for 28 days. After the curing process was completed, the strain gauges were arranged on the surface of the concrete. Twenty-seven elements were then reinforced and strain gauges were also glued to the surface of the composite. Figure 1 shows the location of the strain gauges.



Photo 1. Example of the application of PBO-FRCM composite – eccentric compression strengthening [2]

Fot. 1. Przykład zastosowania kompozytu PBO-FRCM – wzmacnianie na ściskanie mimośrodowe [2]

W kompozytach FRCM matrycę stanowi modyfikowana zaprawa cementowa, dzięki której są one znacznie mniej wrażliwe na działanie podwyższonej temperatury [1]. Na fotografii 1 przedstawiono przykład zastosowania kompozytu PBO-FRCM. Z powodu ziarnistej struktury matrycy oraz jej kruchości efektywność wykorzystania wysokowytrzymałych włókien w kompozytach FRCM jest jednak znacznie mniejsza niż w kompozytach FRP. W związku z tym najczęstszym mechanizmem zniszczenia jest rozwarstwienie kompozytu, a nie rozerwanie włókien – we włóknach nie powstają naprężenia równe ich wytrzymałości na rozciąganie. Korzystnym aspektem takiego mechanizmu zniszczenia jest jego ciągliwy charakter, co jest szczególnie pożądane z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji.

Wzmacniania betonowych elementów ścisanych kompozytami PBO-FRCM dotyczą publikacje [3 ÷ 7], ale ograniczono się w nich do elementów wykonanych z betonu o wytrzymałości na ściskanie ok. 25 MPa i do ściskania osiowego (nie w przypadku słupów [8, 9]). W przypadku betonów o mniejszej wytrzymałości efekt wzmocnienia jest intensywniejszy, ale obecnie w słupach żelbetonowych stosuje się betony o wytrzymałości ok. 40 MPa i większej.

W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych na betonowych walcach wzmocnionych kompozytami PBO-FRCM, poddanych ścisaniu osiowemu oraz mimośrodoowemu.

Badania doświadczalne

W ramach badań doświadczalnych przeprowadzono próby ścisania osiowego i mimośrodoowego na trzydziestu sześciu elementach walcowych (3 elementy na każdy typ) o średnicy $D = 150$ mm oraz wysokości $H = 300$ mm. Średnia wytrzymałość na ściskanie betonu użytego w badaniach wyniosła $f_{cm0} = 46,56$ MPa, a średni moduł Younga $E_{cm0} = 29,07$ GPa.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie oraz modułu Younga przedstawiono w tabeli 1.

Pielęgnacja betonu przebiegała w temperaturze ok. 20°C, na ruszcie nad powierzchnią wody, przez 28 dni. Po zakończeniu procesu pielęgnacji przystąpiono do montażu tensometrów elektrooporowych na powierzchni betonu. Następnie wzmocniono dwadzieścia siedem elementów oraz naklejono tensometry również na powierzchnię kompozytu. Na rysunku 1 przedstawiono rozmieszczenie tensometrów.

Table 1. Results of compressive strength and Young's modulus tests

Tabela 1. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie oraz modułu Younga

Characteristics/ Charakterystyka	Compressive strength f_{c0} [MPa]/ Wytrzymałość na ściskanie f_{c0} [MPa]	Secant Young's modulus E_c [GPa]/ Średni moduł Younga E_c [GPa]
Measurement/ Pomiar:		
1	47,18	28,90
2	48,58	29,40
3	43,91	28,92
Average of three measurements/ Średnia z trzech pomiarów	46,56	29,07
σ^1	2,40	0,28
V^2 [%]	5,1	1,0

¹⁾ σ – standard deviation/odchylenie standardowe;

²⁾ V – coefficient of variation/współczynnik zmienności

The PBO-FRCM system used in the study consisted of: two directional PBO mesh and modified cementitious mortar. The parameters of the components of the PBO-FRCM system used in the study are shown in Tables 2 and 3, and Photo 2 shows the arrangement of the PBO-FRCM composite on the test piece.

Eccentric compression was carried out with a force applied at the core boundary of the concrete section (eccentricity No. 1, $e = D/8$) and a force applied at twice the eccentricity of eccentricity No. 1 (eccentricity No. 2, $e = D/4$). To apply eccentric compression, rigid steel caps with a hinge were used. Photo 3 shows the specimen in eccentric compression.

Among the specimens were 9 reference specimens (3 elements for axial compression and 3 elements for each eccentricity of force application). The reinforcement was one, two or three layers of PBO mesh with an end overlap of 1/4 of the specimen circumference. Table 4 describes the types of specimens.

Experimental results

The load capacity/strength, deformability and ductility of the test pieces were analyzed. In order to compare the ductility of the samples, the ductility index C

was introduced, which was determined based on formulas (1) and (2) (formula proposed by the authors). Table 5 summarizes the test results. The absence of some results (.,-,) is due to the failure of the strain gauges before the end of the test. Due to the incorrect failure mechanism, the results for samples W2M02 and W1M11 were rejected.

$$U_T = \int_0^{\epsilon_{cc}} N(\epsilon_v) d\epsilon_v \quad (1)$$

$$C = \frac{U_{Tcc} \cdot N_{c0m}^2}{U_{T0m} \cdot N_{cc}^2} \quad (2)$$

where:

- U_T – failure energy;
- U_{Tcc} – failure energy at maximum force for strengthened specimens;
- U_{T0m} – average failure energy at maximum force for unstrengthened specimens;

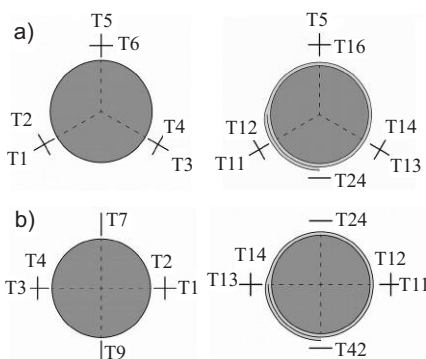


Fig. 1. Strain gauges configuration (planar): a) for axially loaded specimens; b) for eccentrically loaded specimens – maximum compression zone at T1/T2/T11/T12

Rys. 1. Schemat rozmieszczenia tensometrów elektrooporowych (w kładzie): a) próbki ściskane osiowo; b) próbki ściskane mimośrodowo – strefa ściskana w miejscu T1/T2/T11/T12

Table 2. Parameters of PBO fibers and mesh [10]

Tabela 2. Parametry włókien PBO i siatki [10]

Parameter/Parametr	Value/Wartość
Tensile strength of fibers [GPa]/Wytrzymałość na rozciąganie włókien [GPa]	5,80
Young's modulus of fibers [GPa]/Moduł Younga włókien [GPa]	270
Ultimate elongation of fibers [%]/Wydłużenie przy zerwaniu włókien [%]	2,5
Density of fibers [g/cm ³]/Gęstość włókien [g/cm ³]	1,56
Decomposition temperature of fibers [°C]/Temperatura topnienia włókien [°C]	650
Weight of fibers in warp [g/m ²]/Gramatura włókien w osnowie [g/m ²]	70
Weight of fibers in weft [g/m ²]/Gramatura włókien w wątku [g/m ²]	18
Equivalent thickness of mesh in warp [mm]/Grubość obliczeniowa w kierunku osnowy [mm]	0,045
Equivalent thickness of mesh in weft [mm]/Grubość obliczeniowa w kierunku wątku [mm]	0,012

Table 3. Parameters of inorganic mortar [10]

Tabela 3. Parametry zaprawy nieorganicznej [10]

Parameter/Parametry	Value/Wartość
Density [kg/m ³]/Gęstość [kg/m ³]	ok. 1800
Compressive strength after 28 days [MPa]/Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach [MPa]	≥ 40
Flexural tensile strength after 28 days [MPa]/Wytrzymałość na rozciąganie przy zginaniu po 28 dniach [MPa]	≥ 4
Young's modulus after 28 days [GPa]/Moduł Younga po 28 dniach [GPa]	≥ 15
Consumption per 1 mm layer thickness [kg/m ²]/Wydajność przy grubości warstwy 1 mm [kg/m ²]	1,41

W badaniach wykorzystano system PBO-FRCM, na który składają się: dwukierunkowa siatka oraz modyfikowana zaprawa cementowa. Parametry komponentów systemu PBO-FRCM użytego w badaniach przedstawiono w tabelach 2 oraz 3, a na fotografii 2 montaż kompozytu PBO-FRCM na elemencie badawczym.

Ściskanie mimośrodowe przeprowadzono z użyciem siły przyłożonej na granicy rdzenia przekroju betonowego (mimośród nr 1, $e = D/8$) oraz siły przyłożonej na dwukrotnie większym mimośrodku niż mimośród nr 1 (mimośród nr 2, $e = D/4$). Do realizacji ściskania mimośrodowego użyto sztywnych nakładek stalowych z przegubem. Na fotografii 3 przedstawiono próbkę w trakcie ściskania mimośrodowego.

Wśród próbek znajdowało się 9 próbek referencyjnych (3 elementy do ściskania osiowego oraz po 3 elementy na każdy mimośród przyłożenia siły). Wzmocnienie stanowiły jedna, dwie bądź trzy warstwy siatki PBO z zakładem końcowym o długości 1/4 obwodu próbki. W tabeli 4 opisano typy próbek.

Wyniki badań

Analizowano nośność/wytrzymałość, odkształcalność oraz ciągliwość elementów badawczych. W celu porównania ciągliwości próbek wprowadzono wskaźnik ciągliwości C , który

określono na podstawie wzorów (1) oraz (2) (wzór sformułowany przez autorów). W tabeli 5 zestawiono wyniki badań. Brak niektórych wyników (.,-,) spowodowany jest zniszczeniem tensometrów przed końcem badania. Ze względu na nieprawidłowy mechanizm zniszczenia odrzucono wyniki próbek W2M02 oraz W1M11.

$$U_T = \int_0^{\epsilon_{cc}} N(\epsilon_v) d\epsilon_v \quad (1)$$

$$C = \frac{U_{Tcc} \cdot N_{c0m}^2}{U_{T0m} \cdot N_{cc}^2} \quad (2)$$

gdzie:

- U_T – energia zniszczenia;
- U_{Tcc} – energia zniszczenia próbek wzmocnionych przy maksymalnej sile;
- U_{T0m} – średnia energia zniszczenia próbek niewzmocnionych przy maksymalnej sile;

N – compressive force;
 N_{cc} – failure force for strengthened specimens;
 N_{com} – average failure force for unstrengthened specimens;
 ε_v – vertical strain (in extreme compression fibers for eccentrically compressed elements);
 ε_{cc} – vertical strain (in extreme compression fibers in the case of eccentrically compressed elements) at maximum force;
 C – ductility index.

Figure 2 shows the force/stress-strain relationship for axially and eccentrically compressed specimens. The strains ε_v for eccentrically compressed specimens are for the extreme compression fibers. Black lines represent unstrengthened elements, and red lines represent strengthened elements.

The line types refer to the specimens: no. 1 – continuous line, no. 2 – dotted line, no. 3 – dash-dot line.

For each type of test, a greater number of layers of PBO mesh resulted in an increase in bearing capacity and longitudinal deformability at maximum force. The parameter that determines the intensity of strengthening reinforcement is the reinforcement ratio ρ_f (3).

$$\rho_f = \frac{4 \cdot n \cdot t_f}{D} \quad (3)$$

where:

n – number of layers of PBO mesh;
 t_f – equivalent thickness of mesh in warp;
 D – diameter of the sample.

The average increase in load-bearing capacity of axially compressed specimens reinforced with one, two or three layers of PBO mesh was respectively: 13, 27 and 35%, while in the case of the eccentricity $e = D/8 \rightarrow 22, 34$ and 44%, and the eccentricity $e = D/4 \rightarrow 25, 28$ and 50%. Figure 3 shows the dependence of the load-bearing capacity gain on the degree of reinforcing reinforcement ρ_f . It shows that in the tested specimens compressed both axially and eccentrically, the dependence of the load-bearing capacity increase on the ratio of circumferential reinforcement ρ_f (number of composite layers), for the analyzed range of ρ_f , is linear. This trend coincides with the results of axially compressed concrete with lower strength [3 ÷ 7]. For eccentricity $e = D/8$ and $e = D/4$,



Photo 2. Application of PBO-FRCM composite reinforcement

Fot. 2. Aplikacja wzmocnienia kompozytowego PBO-FRCM



Photo 3. Steel plates with hinges for eccentric loading

Fot. 3. Nakładki stalowe z przegubem do realizacji ściskania mimośrodowego

N – siła ściskająca;
 N_{cc} – siła niszcząca próbki wzmocnione;
 N_{com} – średnia siła niszcząca próbki niewzmocnione;
 ε_v – odkształcenia pionowe (w skrajnych włóknach ściskanych w przypadku elementów ściskanych mimośrodowo);
 ε_{cc} – odkształcenia pionowe (w skrajnych włóknach ściskanych w przypadku elementów ściskanych mimośrodowo) przy maksymalnej sile;
 C – wskaźnik ciągliwości.

Rysunek 2 przedstawia zależność siła/naprężenie-odkształcenie w przypadku próbek ściskanych osiowo oraz mimośrodowo. Odkształcenia ε_v dla

próbek ściskanych mimośrodowo dotyczą skrajnych włókien ściskanych. Linie czarne reprezentują elementy niewzmocnione, a linie czerwone – elementy wzmocnione. Typy linii dotyczą próbek: nr 1 – linia ciągła, nr 2 – linia kropkowana, nr 3 – linia kreska-kropka.

W przypadku każdego typu badania większa liczba warstw siatki PBO spowodowała przyrost nośności i odkształcalności podłużnej przy sile maksymalnej. Parametrem określającym intensywność zbrojenia wzmacniającego jest stopień zbrojenia ρ_f (3).

$$\rho_f = \frac{4 \cdot n \cdot t_f}{D} \quad (3)$$

gdzie:

n – liczba warstw siatki PBO;
 t_f – grubość obliczeniowa przekroju włókien siatki na kierunku osnowy;
 D – średnica próbki.

Średni przyrost nośności próbek ściskanych osiowo wzmocnionych jedną, dwoma bądź trzema warstwami siatki PBO wynosił odpowiednio: 13, 27 oraz 35%, z kolei w przypadku mimośrodowo $e = D/8 \rightarrow 22, 34$ oraz 44%, a mimośrodowo $e = D/4 \rightarrow 25, 28$ oraz 50%. Na rysunku 3 przedstawiono zależność przyrostu nośności od stopnia zbrojenia wzmacniającego ρ_f . Wynika z niego, że w przebadanych próbkach ściskanych zarówno osiowo, jak i mimośrodowo zależność przyrostu nośności od stopnia obwodowego zbrojenia wzmacniającego dla analizowanego zakresu ρ_f jest liniowa. Trend ten pokrywa się z wynikami betonów ściskanych osiowo o mniejszej wytrzymałości [3 ÷ 7]. W przypadku mimośrodków $e = D/8$ oraz $e = D/4$ względny przyrost nośności jest praktycznie taki sam,

Table 5. Test results
 Tabela 5. Zestawienie wyników

Element name/Nazwa elementu	N_{cc} [kN]	M_{cc} [kNm]	f_{cc} [MPa]	N_{cc}/N_{om} [-]	ϵ_{cc} [%]	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{com}$ [-]	C [-]
W0M01	833,69	0	47,18	Nd.	2,376	Nd.	Nd.
W0M02	858,51	0	48,58	Nd.	2,866	Nd.	Nd.
W0M03	776,01	0	43,91	Nd.	2,449	Nd.	Nd.
W1M01	933,25	0	52,81	1,13	2,549	0,994	0,85
W1M02	943,86	0	53,41	1,15	2,910	1,135	1,03
W1M03	900,07	0	50,93	1,09	2,800	1,092	1,03
W2M01	1079,66	0	61,10	1,31	2,917	1,138	0,87
W2M02	–	–	–	–	–	–	–
W2M03	1004,63	0	56,85	1,22	2,929	1,143	0,97
W3M01	1111,93	0	62,92	1,35	4,254	1,659	1,37
W3M02	1078,57	0	61,03	1,31	3,177	1,239	0,93
W3M03	1136,05	0	64,29	1,38	4,837	1,887	1,56
W0M11	614,83	11,53	Nd.	Nd.	3,318	Nd.	Nd.
W0M12	619,44	11,61	Nd.	Nd.	4,460	Nd.	Nd.
W0M13	612,25	11,48	Nd.	Nd.	3,435	Nd.	Nd.
W1M11	–	–	–	–	–	–	–
W1M12	785,24	14,72	Nd.	1,28	–	–	–
W1M13	714,12	13,39	Nd.	1,16	5,215	1,395	1,36
W2M11	793,12	14,87	Nd.	1,29	6,741	1,804	1,66
W2M12	826,70	15,50	Nd.	1,34	–	–	–
W2M13	847,38	15,89	Nd.	1,38	6,705	1,794	1,52
W3M11	911,07	17,08	Nd.	1,48	–	–	–
W3M12	861,15	16,15	Nd.	1,40	12,415	3,322	3,16
W3M13	885,62	16,61	Nd.	1,44	7,278	1,947	3,72
W0M21	361,67	13,56	Nd.	Nd.	4,041	Nd.	Nd.
W0M22	392,80	14,73	Nd.	Nd.	3,816	Nd.	Nd.
W0M23	372,97	13,99	Nd.	Nd.	3,523	Nd.	Nd.
W1M21	458,92	17,21	Nd.	1,22	6,620	1,745	1,73
W1M22	457,87	17,17	Nd.	1,22	3,964	1,045	0,88
W1M23	497,40	18,65	Nd.	1,32	–	–	–
W2M21	462,35	17,34	Nd.	1,23	5,538	1,460	1,35
W2M22	487,88	18,30	Nd.	1,30	4,851	1,279	1,10
W2M23	487,53	18,28	Nd.	1,30	6,249	1,647	1,49
W3M21	542,89	20,36	Nd.	1,44	10,030	2,644	2,33
W3M22	601,08	22,54	Nd.	1,60	8,053	2,123	1,56
W3M23	542,47	20,34	Nd.	1,44	11,575	3,051	2,79

Notice: $D/8 = 18,75$ mm; $D/4 = 37,50$ mm; M_{cc} – bending moment at failure force; f_{cc} – compressive strength of confined concrete; ϵ_{com} – as ϵ_{cc} , but for unstrengthened specimens/Uwaga: $D/8 = 18,75$ mm; $D/4 = 37,50$ mm; M_{cc} – moment zginający przy sile niszczącej; f_{cc} – wytrzymałość na ściskanie betonu skrepowanego; ϵ_{com} – jak ϵ_{cc} , ale w przypadku próbek niewzmocnionych

the relative increase in load-bearing capacity is practically the same, while for axial compression it is about 10 pp smaller. This relationship has been discussed, among others, by the authors of the article [11], who showed that the eccentricity of force application affects the distribution of confining stress in the section and the unevenness of concrete confinement in the two main directions, resulting in an increase in the strength of concrete in the compressed zone.

In the case of longitudinal deformability at maximum force, it was shown that its increase depending on the ratio of streng-

a w przypadku ściskania osiowego o ok. 10 pp. mniejszy. Zależność ta została omówiona m.in. przez autorów artykułu [11], którzy wykazali, że mimośród przyłożenia siły wpływa na rozkład naprężeń krępujących w przekroju oraz nierównomierność skrepowania betonu na dwóch głównych kierunkach, co w konsekwencji powoduje wzrost wytrzymałości betonu w strefie ściskanej.

W przypadku odkształcalności podłużnej przy maksymalnej sile wykazano, że jej przyrost w zależności od stopnia zbrojenia wzmacniającego nie jest liniowy (rysunek 4). Zależność ta

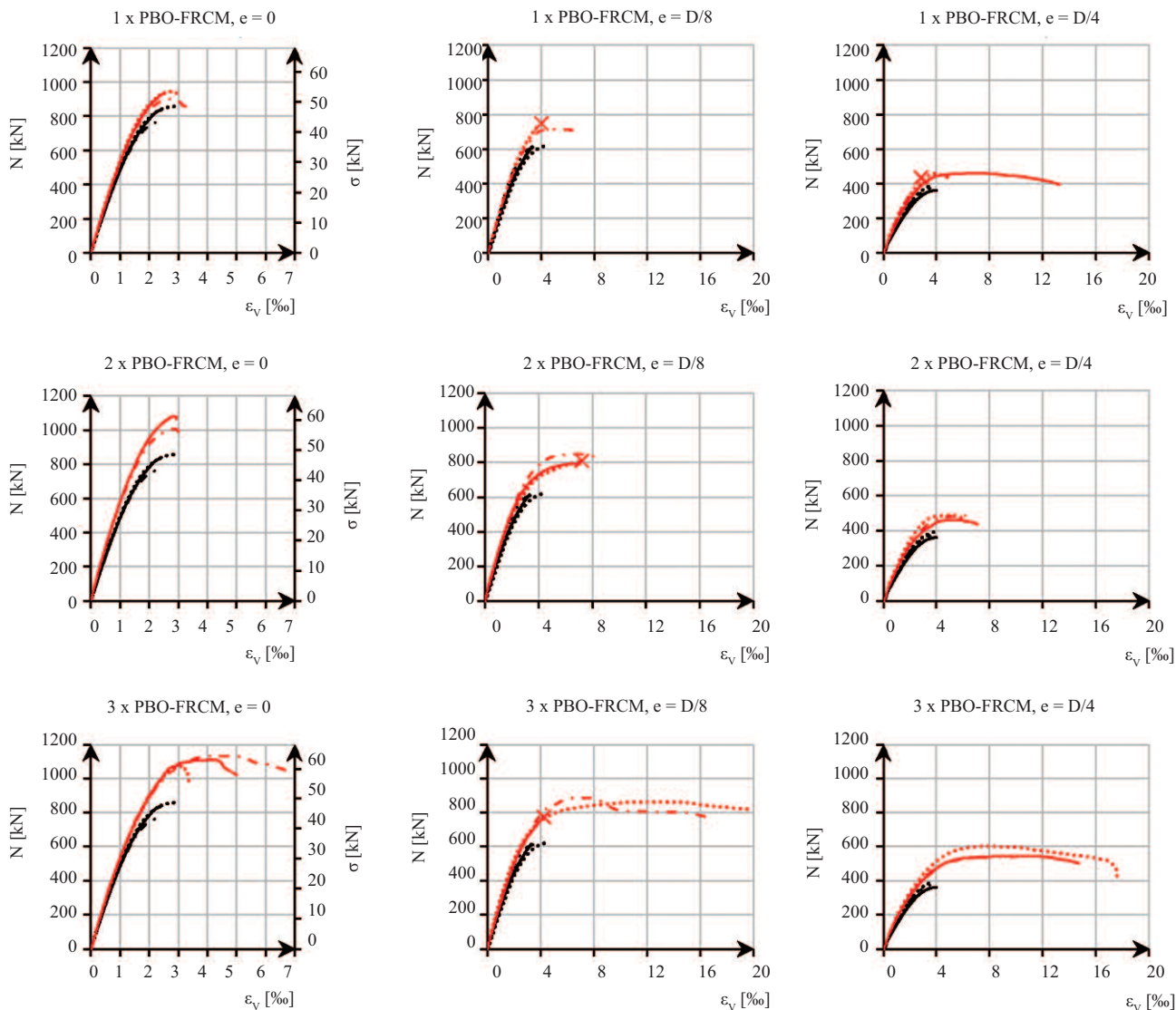


Fig. 2. Force/stress-strain relationships for axially and eccentrically compressed specimens – description in the article

Rys. 2. Zależności siła/napięcie-odkształcenie w przypadku próbek ściskanych osiowo oraz mimośrodkowo – opis w artykule

thening reinforcement is not linear (Figure 4). This relationship is closely related to the strength of unconfined concrete, as was shown for axial compression in [3]. The average increase in longitudinal strain at maximum force in axially compressed elements for one, two and three layers of PBO mesh was, respectively: 7, 14 and 60%. For eccentrically compressed specimens, the results were: 40; 80; 163% – for $e = D/8$ and 40; 46; 161% – for $e = D/4$. The higher deformability of the compressed zone in eccentrically compressed elements is also due to the unevenness of concrete confinement [11].

Failure of all axially compressed specimens was initiated in the area of

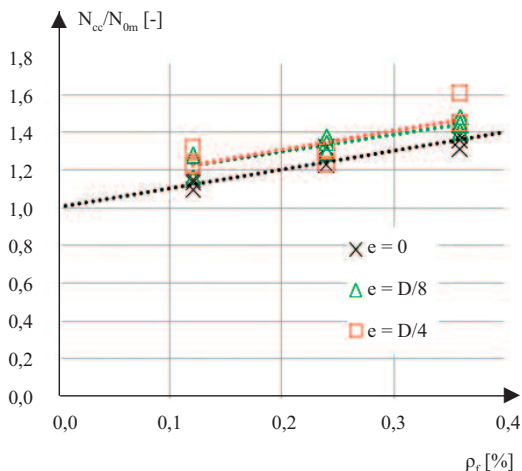


Fig. 3. Increase in capacity as a function of strengthening reinforcement ratio (ρ_r)

Rys. 3. Przyrost nośności w zależności od stopnia zbrojenia wzmacniającego (ρ_r)

jest ściśle powiązana z wytrzymałością betonu nieskrępowanego, co zostało wykazane w przypadku ściskania osiowego w [3]. Średni przyrost odkształceń podłużnych przy maksymalnej sile w elementach ściskanych osiowo dla jednej, dwóch oraz trzech warstw siatki PBO wyniósł kolejno: 7, 14 oraz 60%. W przypadku próbek ściskanych mimośrodkowo uzyskano: 40; 80; 163% – dla $e = D/8$ oraz 46; 161% – dla $e = D/4$. Większa odkształcalność strefy ściskanej w elementach ściskanych mimośrodkowo również wynika z nierównomierności skrzepowania betonu [11].

Zniszczenie wszystkich próbek ściskanych osiowo zostało zainicjowa-

the end mesh overlap. As the compressive force increased in the test specimens, the mineral matrix was cracked, with the dominant crack appearing at the end of the overlap. Only in the case of specimens strengthened with three layers of composite, a "mixed" failure mechanism was achieved, involving delamination of the overlap and partial rupture of the PBO fibers. Unlike axially compressed elements, the failure of eccentrically compressed elements did not result from delamination of the composite at the mesh overlap, which is most likely due to the fact that the end of the PBO mesh was beyond the extreme compression fibers as much as 3/4 of the circumferential length. This was mainly characterized by the crushing of the concrete in the compression zone, where there was always a secondary rupture of the horizontal fibers of the PBO mesh, caused by the dilation of the crushing concrete. On the other hand, in the tensile zone, the vertical fibers were ruptured (as a secondary effect caused by the formation of sharp edges and significant curvature of the specimen – the longitudinal strains in the tensile zone did not reach the elongation limit for PBO fibers) or pulled out due to slippage. Photo 4 shows an example of failure of axially compressed elements, and Photo 5 – of eccentrically compressed elements.

The test elements were analyzed for ductility based on the proposed comparative ductility index C , which takes into account the failure energy and load-bearing capacity of the element. It was shown that in the case of axially compressed elements, ductility after the application of strengthening in the form of one or two layers of PBO mesh slightly increased

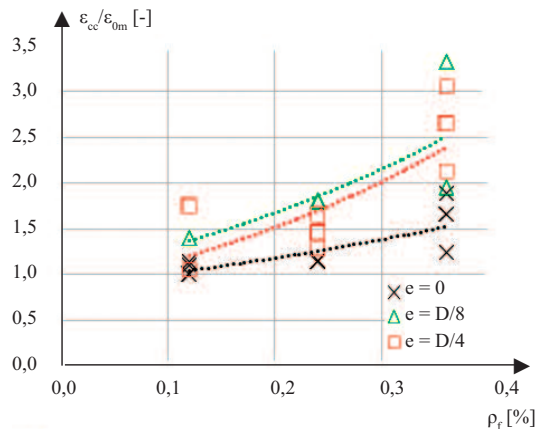


Fig. 4. Increase in strain at maximum force as a function of strengthening reinforcement ratio (ρ_f)

Rys. 4. Przyrost odkształceń przy maksymalnej sile w zależności od stopnia zbrojenia wzmacniającego (ρ_f)

wane w obszarze końcowego zakładu siatki. W miarę wzrostu siły ścisniającej w badanych elementach matryca mineralna ulegała zarysowaniu, a dominująca rysa pojawiała się na końcu zakładu. Jedynie w przypadku próbek wzmocnionych trzema warstwami kompozytu uzyskano „mieszany” mechanizm zniszczenia, polegający na rozwarstwieniu zakładu końcowego i częściowym rozerwaniu włókien PBO. W przeciwieństwie do elementów ściskanych osiowo, zniszczenie próbek ściskanych mimośrodowo nie było wynikiem rozwarstwienia kompozytu na zakładzie siatki PBO, co spowodowane jest najprawdopodobniej tym, że koniec siatki PBO został nawinięty na element badawczy poza skrajne włókna ściskane aż na 3/4 długości obwodu. Charakteryzowało się ono przede wszystkim zmiażdżeniem betonu w strefie ściskanej, w której zawsze dochodziło do wtórnego rozerwania włókien poziomych siatki PBO, spowodowanego dyatacją miazdzonego betonu. Z kolei w strefie rozciąganej włókna pionowe ulegały rozerwaniu (jako efekt wtórny spowodowany powstaniem ostrych krawędzi i znacznego zakrzywienia próbki – odkształcenia podłużne w strefie rozciąganej nie osiągały granicznego wydłużenia dla włókien PBO) bądź wyciągnięciu spowodowanym poślizgiem. Na fotografii 4 przedstawiono przykładowy obraz zniszczenia elementów ściskanych osiowo, a na fotografii 5 elementów ściskanych mimośrodowo.

Elementy badawcze przeanalizowano pod względem ciągliwości na podstawie wyprowadzonego porównawczego wskaźnika ciągliwości C , który uwzględnia energię zniszczenia i nośność elementu. Wykazano, że w przypadku elementów ściskanych osiowo ciągliwość po zastosowaniu wzmocnienia w postaci jednej bądź dwóch warstw siatki PBO nieznacznie

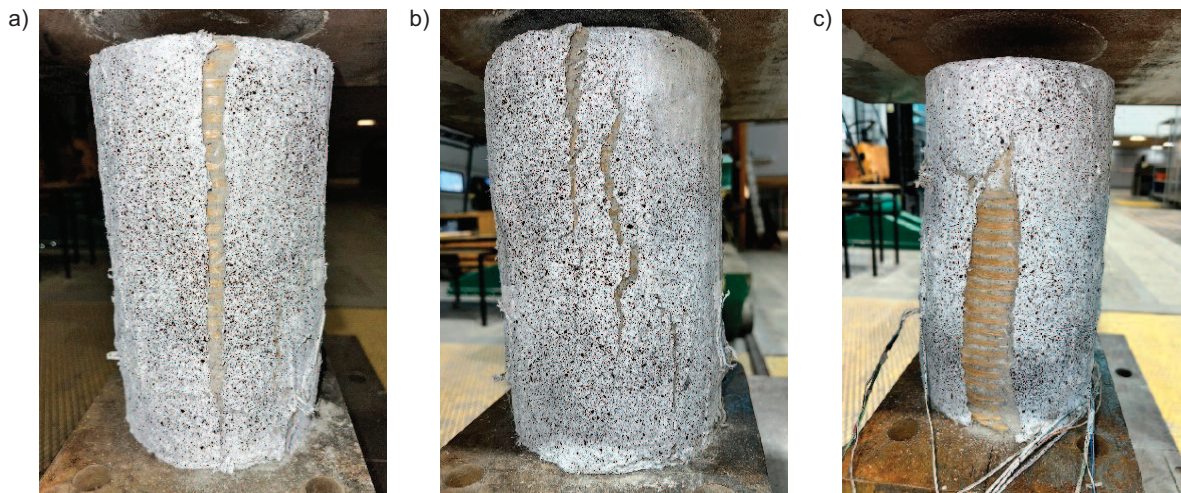


Photo 4. Failures of axially compressed reinforced specimens: a) one layer of PBO-FRCM; b) two layers of PBO-FRCM; c) three layers of PBO-FRCM

Fot. 4. Zniszczenia wzmocnionych próbek ściskanych osiowo: a) jedna warstwa PBO-FRCM; b) dwie warstwy PBO-FRCM; c) trzy warstwy PBO-FRCM

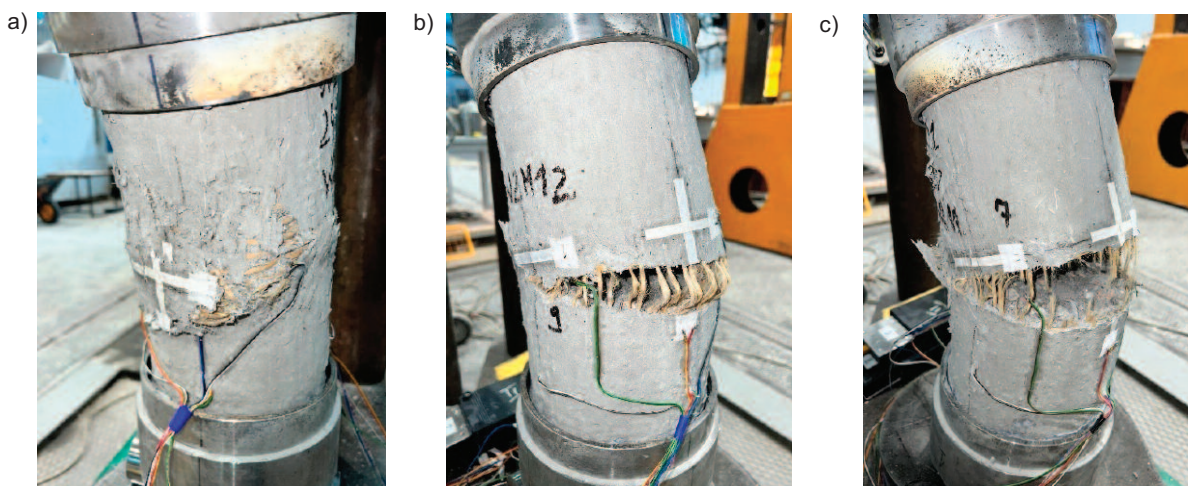


Photo 5. Failures of eccentrically compressed reinforced specimens: a) concrete crushing in the compression zone; b) fibers slip in the tension zone; c) secondary fibers rupture in the tension zone

Fot. 5. Zniszczenia wzmocnionych próbek ściskanych mimośrodowo: a) zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej; b) poślizg włókien w strefie rozciąganej; c) wtórne rozerwanie włókien w strefie rozciąganej

or even decreased. The average C_m index of specimens strengthened with one layer of the composite was 0.97, and for two layers it was 0.92. A significant increase in ductility, on the other hand, was obtained for specimens strengthened with three layers of PBO mesh. The average value of the C_m index was 1.29, despite the decrease in ductility for one element. In the case of eccentrically compressed elements, the application of strengthening in practically every case resulted in an increase in ductility (except for one specimen – W1M22). For one, two and three layers of PBO mesh, the following average ductility indices C_m were obtained successively: 1.36, 1.59 and 3.44 – for $e = D/8$, and 1.31, 1.31 and 2.23 – for $e = D/4$. In the case of three layers of the composite, ductility was increased significantly more than with one or two layers.

Conclusions

The conducted analysis of concrete compression members reinforced with PBO-FRCM composite, made of plain concrete with a compressive strength of 45 MPa, shows that in the case of members made of concrete with relatively high compressive strength, the use of too small ratio of strengthening reinforcement may prove ineffective. While the dependence of the load-bearing capacity increase on the ratio of strengthening reinforcement in the presented studies is linear, the obtained deformability and ductility of elements reinforced with three layers of PBO mesh are significantly higher compared to their counterparts with one and two layers of reinforcement, whose ductility after strengthening practically did not change (in the case of axially compressed elements). Comparing the results obtained with the studies described in [3 ÷ 7], it can be concluded that the compressive strength of concrete determines the ratio of strengthening reinforcement (confinement stiffness) at which the effect of strengthening is satisfactory, from the point of view of ductility. When strengthening a structure, its safety is

zwiększyła się lub nawet spadła. Średni wskaźnik C_m próbek wzmocnionych jedną warstwą kompozytu wyniósł 0,97, a w przypadku dwóch warstw 0,92. Znaczny wzrost ciągliwości uzyskano z kolei w przypadku próbek wzmocnionych trzema warstwami siatki PBO. Średnia wartość wskaźnika C_m wyniosła 1,29, pomimo spadku ciągliwości dla jednego elementu. W przypadku elementów ściskanych mimośrodowo zastosowanie wzmocnienia praktycznie w każdym przypadku spowodowało wzrost ciągliwości (z wyjątkiem jednej próbki – W1M22). Dla jednej, dwóch oraz trzech warstw siatki PBO uzyskano kolejno następujące średnie wskaźniki ciągliwości C_m : 1,36, 1,59 oraz 3,44 – dla $e = D/8$, oraz 1,31, 1,31 oraz 2,23 – dla $e = D/4$. W przypadku trzech warstw kompozytu ciągliwość została zwiększona znacznie bardziej niż przy jednej bądź dwóch warstwach.

Podsumowanie

Z przeprowadzonych analiz pracy betonowych elementów ściskanych wzmocnionych kompozytem PBO-FRCM, wykonanych z betonu zwykłego o wytrzymałości na ściskanie na poziomie 45 MPa, wynika, że w przypadku elementów wykonanych z betonów o stosunkowo dużej wytrzymałości na ściskanie, stosowanie zbyt małego stopnia zbrojenia wzmacniającego może okazać się nieefektywne. O ile zależność przyrostu nośności od stopnia zbrojenia wzmacniającego w przedstawionych badaniach jest liniowa, o tyle uzyskana odkształcalność oraz ciągliwość elementów wzmocnionych trzema warstwami siatki PBO są znacznie większe w porównaniu z ich odpowiednikami z jedną i dwoma warstwami wzmocnienia, w przypadku których ciągliwość po wzmocnieniu praktycznie nie uległa zmianie (elementy ściskane osiowo). Zestawiając uzyskane rezultaty z badaniami opisanymi w [3 ÷ 7] można stwierdzić, że wytrzymałość na ściskanie betonu determinuje stopień zbrojenia wzmacniającego (sztywność uzwojenia), przy którym efekt wzmocnienia jest satysfakcjonujący, z punktu widzenia ciągliwości. Przy wzmacnianiu konstrukcji bardzo ważne jest

very important. Brittle elements do not signal an impending failure or disaster, but are subject to sudden destruction. The use of too few layers of PBO-FRCM strengthening does not ensure a satisfactory level of ductility of compressed elements. This is particularly highlighted in the case of higher concrete strength (in tests, about 45 MPa), which is characteristic of currently designed/constructed reinforced concrete columns.

Praca została dofinansowana z projektu Minigrantów dla doktorantów Politechniki Wrocławskiej.

*Received: 29.07.2024
Revised: 03.09. 2024
Published: 25.11.2024*

jej bezpieczeństwo. Kruche elementy nie sygnalizują nadchodzącej awarii bądź katastrofy, lecz ulegają nagłemu zniszczeniu. Stosowanie zbyt małej liczby warstw wzmocnienia PBO-FRCM nie zapewnia satysfakcjonującego poziomu ciągliwości elementów ściskanych. Uwydatnia się to szczególnie w przypadku większej wytrzymałości betonu (w badaniach ok. 45 MPa), która jest charakterystyczna dla obecnie projektowanych/wykonywanych słupów żelbetowych.

Praca została dofinansowana z projektu Minigrantów dla doktorantów Politechniki Wrocławskiej.

*Artykuł wpłynął do redakcji: 29.07.2024 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 03.09. 2024 r.
Opublikowano: 25.11.2024 r.*

Literature

[1] Ombres L. Structural performances of thermally conditioned PBO FRCM confined concrete cylinders. *Composite Structures*. 2017; <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.026>.

[2] www.ruregold.com/product/pbo-mesh-70-18/ (dostęp 08.2024).

[3] Ombres L. Concrete confinement with a cement based high strength composite material. *Composite Structures*. 2014; <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.03>.

[4] Trapko T. Fibre reinforced cementitious matrix confined concrete elements. *Materials & Design*. 2013; <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.024>.

[5] Faleschini F, Zanini MA, Hofer L, Pellegrino C. Experimental behavior of reinforced concrete columns confined with carbon-FRCM composites. *Construction and Building Materials*. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118296>.

[6] Tello N, Abed F, ElRefai A, El-Maaddawy T, Alhoubi Y. Experimental investigation of pre-damaged circular RC columns strengthened with fabric-

-reinforced cementitious matrix (FRCM). *Structural Concrete*. 2023; <https://doi.org/10.1002/suco.02200333>.

[7] Alhoubi Y, El Refai A, Abed F, El-Maaddawy T, Tello N. Strengthening pre-damaged RC square columns with fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM): Experimental investigation. *Composite Structures*. 2022; <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115784>.

[8] Trapko T. Behaviour of fibre reinforced cementitious matrix strengthened concrete columns under eccentric compression loading. *Materials & Design*. 2014; <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.008>.

[9] Ombres L, Verre S. Structural behaviour of fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) strengthened concrete columns under eccentric loading. *Composites Part B: Engineering*. 2015; <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.042>.

[10] Karta techniczna PBO-MESH 70/18. 2024

[11] Lin G, Teng JG. Three-dimensional finite-element analysis of FRP-confined circular concrete columns under eccentric loading. *Journal of Composites for Construction*. 2017; [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000772](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000772).