

Tomasz TRAPKO*
Politechnika Wrocławska

MODELE TEORETYCZNE DO WYMIAROWANIA SŁUPÓW ŻELBETOWYCH WZMACNIANYCH MATERIAŁAMI FRP

Streszczenie. Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych stanowi jedną z trudniejszych i bardziej odpowiedzialnych dziedzin inżynierii budowlanej. W pracy przedstawiono problem projektowania słupów żelbetowych wzmacnianych taśmami i matami CFRP. W referacie opisano dwa modele teoretyczne opracowane przez Wanga oraz Camipone i Miraglia. Na podstawie własnych wyników badań zaproponowano rozszerzenie i modyfikację modelu, opracowanego przez Camipone i Miraglia.

THEORETICAL MODELS FOR DIMENSIONING OF RC COLUMNS STRENGTHENED WITH FRP COMPOSITE PRODUCTS

Summary. The strengthening of reinforced concrete structures is one of the most difficult and important tasks of civil engineering. The problem of designing the RC columns strengthened with CFRP composites has been presented in this paper. Two theoretical models elaborated by Wang and Camipone with Miraglia have been described. An expansion and modification of the model elaborated by Camipone and Miraglia has been proposed on the basis of own test results.

1. Wprowadzenie

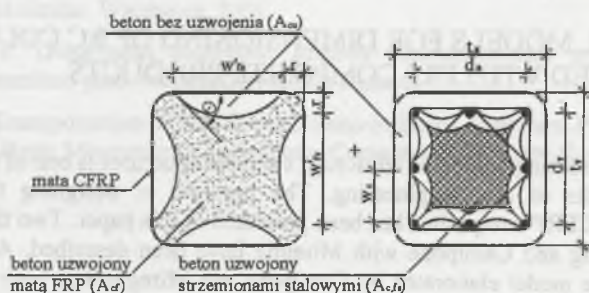
Począwszy od pierwszych badań eksperymentalnych ściskanych elementów betonowych i żelbetowych wzmacnianych materiałami CFRP prowadzone były prace teoretyczne nad stworzeniem modelu opisującego zachowanie się tego typu elementów. Głównie zajmowano się badaniami stanu wytrzymałości i nośności elementów o różnym przekroju poprzecznym uzwojonych jedynie zewnętrznie matami CFRP. W badaniach doświadczalnych [1, 4, 5, 7] zauważono wzrost nośności elementów o przekroju okrągłym i czworokątnym z wyokrąglonymi narożami i taki stan wiedzy został zawarty w opisanych poniżej dwóch

*Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński

modelach teoretycznych. W dotychczasowych pracach z tego tematu brakuje oceny wpływu dodatkowego wzmocnienia podłużnego taśmami CFRP. Na podstawie własnych badań doświadczalnych ściskanych słupów żelbetowych o przekroju czworokątnym wzmocnianych podłużnymi odcinkami taśm z włókien węglowych oraz poprzecznymi obejmami z maty z włókien węglowych, prowadzonych w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej [2, 6], podana zostanie propozycja modyfikacji jednego z modeli.

2. Model Wang

Jedną z propozycji wymiarowania ściskanych słupów żelbetowych wzmocnianych materiałami FRP opracował Wang Yung-Chih [7]. Podaną przez siebie procedurę opracował na podstawie własnych badań doświadczalnych prowadzonych w latach 1996-2000 w University of Canterbury. Model ten opiera się również na wynikach badań Priestleya i Seible'a [4]. Metoda została zweryfikowana doświadczalnie w Technical University of Gent.



Rys. 1. Podwójny efekt wzmocnienia w słupie o przekroju prostokątnym [7]

Fig. 1. Dual confinement effect on rectangular column [7]

Na rys. 1 przedstawiono przekrój poprzeczny przez prostokątny słup żelbetowy wzmocniony poprzecznie płaszczem FRP. Jak widać na rys. 1, w wyniku wzmocnienia zewnętrznym płaszczem FRP w przekroju poprzecznym powstają trzy charakterystyczne rdzenie betonu, tj.: nieograniczonego uzwojeniem zewnętrznym (A_{cu}), ograniczonego poprzez zewnętrzne wzmocnienie (A_{cf}) oraz ograniczonego zewnętrznym płaszczem FRP i wewnętrznymi strzemiunami stalowymi (A_{cfs}).

Model ten został opracowany dla elementów krępych bez uwzględnienia wpływu smukłości na nośność elementu. Opierając się również na własnych badaniach doświadczalnych, Wang przyjął następujące założenia do opisu modelu:

- 1) maksymalne odkształcenia podłużne w elementach ściskanych osiowo wzmocnionych płaszczem FRP osiągają wartość 10%,
- 2) przy założeniu współczynnika Poissona $\nu=0,50$ maksymalne odkształcenia poprzeczne osiągają wartość 5%,
- 3) składowa nośności przekroju pochodząca od betonu N_{cn} jest sumą sił przenoszonych przez trzy przekroje betonowych rdzeni pokazanych na rys. 1,
- 4) wytrzymałość na ściskanie betonu nieobjętego płaszczem FRPP osiąga wartość $f_{co}=0,3f_c$.

Przyjmując powyższe założenia, wzór na nośność przekroju poprzecznego ściskanego słupa żelbetowego wzmocnionego zewnętrznym płaszczem FRP wg teorii Wanga ma postać:

$$N_n = N_{cn} + N_{sn} \quad (1)$$

$$N_{sn} = f_{ys} \cdot A_s \quad (2)$$

$$N_{cn} = 0,3 \cdot f'_c \cdot A_{cu} + f'_{cc,f} \cdot A_{cf} + f'_{cc,fs} \cdot A_{c,fs} \quad (3)$$

gdzie:

A_{cu} i f_c – odpowiednio: powierzchnia i wytrzymałość na ściskanie przekroju rdzenia betonu nieobjętego płaszczem FRP (walcowa wytrzymałość betonu na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia),

A_{cf} i $f'_{cc,f}$ – odpowiednio: powierzchnia i wytrzymałość na ściskanie przekroju rdzenia betonu objętego płaszczem FRP,

$A_{c,fs}$ i $f'_{cc,fs}$ – odpowiednio: powierzchnia i wytrzymałość na ściskanie przekroju rdzenia betonu objętego płaszczem FRP i strzemionami stalowymi,

A_s i f_{ys} – odpowiednio: powierzchnia i granica plastyczności stali zbrojeniowej.

Występująca we wzorze (3) składowa nośności przekroju rdzenia betonu objętego zewnętrznym płaszczem FRP i wewnętrznymi strzemionami stalowymi może zostać pominięta, ponieważ daje ona znikomą wartość wzrostu nośności.

Powierzchnię przekroju rdzenia betonowego nieobjętego płaszczem FRP można obliczyć, korzystając z zależności:

$$A_{cu} = A_{cc,f} - A_{e,f} \quad (4)$$

gdzie:

$A_{cc,f}$ – powierzchnia rdzenia betonu objętego płaszczem FRP,

$A_{e,f}$ – efektywna powierzchnia rdzenia betonu objętego płaszczem FRP.

Dla przekroju prostokątnego:

$$A_{cc,r} = t_x \cdot t_y - A_s - (4 - \pi) \cdot r^2 \quad (5)$$

$$A_{cf} = t_x \cdot t_y - \frac{W'_{fx}{}^2 + W'_{fy}{}^2}{3} \tan \Theta - A_s - (4 - \pi) \cdot r^2 \quad (6)$$

gdzie:

t_x i t_y – wymiary przekroju poprzecznego elementu,

r – promień wyokrąglenia naroży,

Θ – kąt nachylenia stycznych do parabol (według rys. 1.); $\Theta = 45^\circ$.

Do określenia wytrzymałości betonu rdzenia w trójosiowym stanie naprężenia Wang wykorzystał teorię Mandera, Priestleya i Parka [3]. Dla przekroju prostokątnego propozycja ta wyraża się wzorem szczegółowym w postaci:

$$f'_{cc} = k_c \cdot f'_c \quad (7)$$

gdzie:

f'_{cc} – wytrzymałość betonu w trójosiowym stanie naprężenia,

f'_c – walcowa wytrzymałość betonu na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia,

k_c – współczynnik wzmocnienia wytrzymałości,

dla przekroju prostokątnego – $k_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2$

$$\alpha_1 = 1.25 \cdot [1.8 \cdot \sqrt{1 + 7.94 \cdot \frac{F_1}{f'_c}} - 1.6 \cdot \frac{F_1}{f'_c} - 1] \quad (8)$$

$$\alpha_2 = [1.4 \cdot \frac{f_1}{F_1} - 0.6 \left(\frac{f_1}{F_1}\right)^2 - 0.8] \cdot \sqrt{\frac{F_1}{f'_c}} + 1 \quad (9)$$

gdzie:

F_1 – maksymalne naprężenie poprzeczne wywierane na betonowy rdzeń przez zewnętrzny płaszcz FRP,

f_1 – minimalne naprężenie poprzeczne wywierane na betonowy rdzeń przez zewnętrzny płaszcz FRP.

Zależności na naprężenie poprzeczne wywierane na betonowy rdzeń przez zewnętrzny sprężysty płaszcz dla przekroju prostokątnego w kierunku osi x i y wyrażają się następującymi wzorami:

$$f_{l,fx} = \rho_{fx} \cdot f_f = 2 \cdot \frac{t_f}{t_x} \quad \text{oraz} \quad f_{l,fy} = \rho_{fy} \cdot f_f = 2 \cdot \frac{t_f}{t_x} \quad (10+11)$$

gdzie:

f_f – wytrzymałość na rozciąganie maty FRP,

ρ_{fx} i ρ_{fy} – intensywności wzmocnienia,

t_f – nominalna grubość płaszczka FRP,

t_x i t_y – wymiary przekroju poprzecznego słupa.

Według teorii Wanga, która zakłada maksymalne odkształcenia poprzeczne o wartość 5%, wytrzymałość maty FRP na rozciąganie wynosi $0,005E_f$, gdzie E_f jest modułem sprężystości maty z włókien FRP.

3. Model Campione i Miraglia

Model według propozycji Campione i Miraglia [1] opracowany został na podstawie własnych badań autorów oraz wyników eksperymentów innych badaczy. Do weryfikacji modelu wykorzystane zostały między innymi obszernie badania Rochette i Labossière [5].

Wzór na nośność przekroju poprzecznego ściskanego słupa żelbetowego wzmocnionego zewnętrznym płaszczem FRP według tej teorii składa się z trzech członów: nośności przekroju w jednoosiowym stanie naprężenia, nośności podłużnych prętów zbrojeniowych oraz części wynikającej ze wzmocnienia nośności przekroju poprzecznym wzmocnieniem i występowania trójosiowego stanu naprężenia

$$N_u = f'_c \cdot A_c + f_y \cdot A_a + k_1 \cdot k_e \cdot f_1 \cdot A_c \quad (12)$$

gdzie:

f'_c – walcowa wytrzymałość betonu na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężenia,

A_c – powierzchnia betonu objętego płaszczem FRP,

A_a i f_y – odpowiednio: powierzchnia i granica plastyczności stali zbrojeniowej,

k_e – współczynnik efektywności owinięcia betonu płaszczem FRP,

k_1 – współczynnik wzmocnienia wytrzymałości zależny od właściwości materiałowych betonu oraz wielkości naprężeń bocznych, wg [1] $k_1=2,0$,

f_1 – naprężenie poprzeczne wywierane na betonowy rdzeń przez zewnętrzny płaszcz FRP.

Podobnie jak w poprzednim modelu przyjęto, że przyrost nośności słupów wzmocnionych poprzecznie w stosunku do elementów bez wzmocnienia związany jest z pracą betonu w trójosiowym stanie naprężenia, co zapisano w postaci następującego wzoru ogólnego [3]:

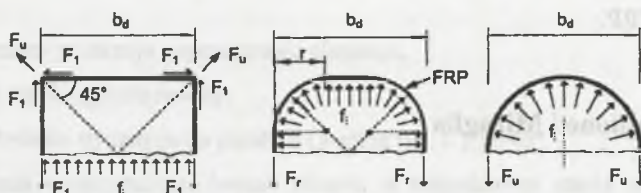
$$f'_{cc} = f'_c + k_1 \cdot f_1 \quad (13)$$

gdzie:

f'_{cc} – wytrzymałość betonu w trójosiowym stanie naprężenia,

f_1 – naprężenie poprzeczne powstające na styku betonu i uzwojenia uwzględniające nieciągłość przyłożenia obciążenia bocznego,

Na podstawie równowagi sił w przekroju poprzecznym (rys. 2) wyznaczono naprężenia poprzeczne powstające na styku betonu i uzwojenia zewnętrznego dla różnych przekrojów poprzecznych. Założono, że maksymalne naprężenia w kompozycie osiągają wartość jego wytrzymałości na rozciąganie.



Rys. 2. Naprężenie poprzeczne dla różnych wzmocnionych przekrojów poprzecznych [1]

Fig. 2. Lateral confining pressure for FRP – reinforced cross – section [1]

Przekrój okrągły

$$f_l = \frac{2 \cdot t \cdot f_u}{b_d} \quad (14)$$

Przekrój kwadratowy z
wyokrąglonymi narożami

$$f_l = \frac{2 \cdot t}{b_d} \cdot f_r = \frac{2 \cdot t}{b_d} \cdot f_u \left[\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot k_1 \right) \cdot \frac{2 \cdot r}{b_d} + k_1 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \right] \quad (15)$$

Przekrój kwadratowy

$$f_l = \frac{\sqrt{2} \cdot t \cdot f_u}{b_d} \cdot k_1 \quad (16)$$

gdzie:

k_1 – współczynnik poprawkowy otrzymany z badań [1]; $k_1 = 0,2121$.

Uwzględnienia nieciągłości przyłożenia obciążenia bocznego dokonano poprzez wprowadzenie współczynnika k_e wyrażającego stosunek efektywnego przekroju rdzenia do przekroju rdzenia betonowego pomniejszonego o powierzchnię zbrojenia podłużnego (wzór 18 jest prawdziwy dla przekroju okrągłego i kwadratowego), co zapisano w następującej postaci:

$$f'_l = k_e \cdot f_l \quad (17)$$

$$k_e = \frac{A_s}{A_{cc}} = \frac{A_e}{A_c \cdot (1 - \rho_{cc})} = \frac{[b_d^2 - (4 - \pi) \cdot r^2] - \frac{2}{3} \cdot (b_d - 2 \cdot r)^2 - A_s}{b_d^2 - (4 - \pi) \cdot r^2 - A_s} \quad (18)$$

gdzie:

A_{cc} – przekrój rdzenia betonowego pomniejszony o powierzchnię zbrojenia podłużnego,

A_e – efektywna powierzchnia rdzenia betonu ograniczonego płaszczem FRP,

b_d – wymiar przekroju poprzecznego elementu kwadratowego (dla okręgu – średnica),

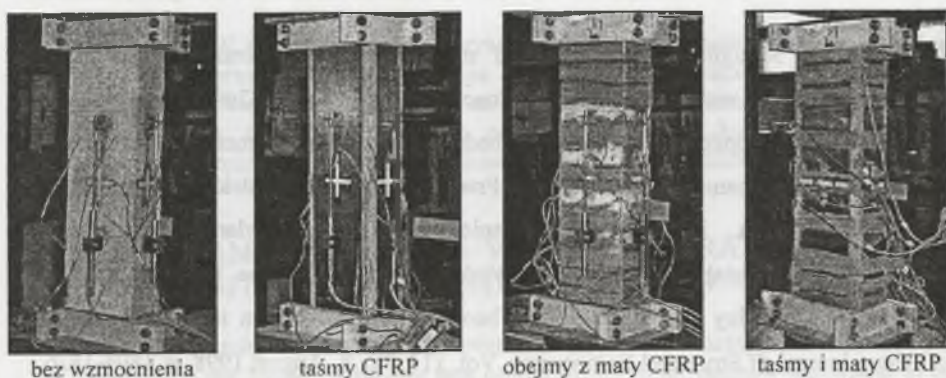
r – promień wyokrąglenia naroży.

Zaprezentowane powyżej dwa modele teoretyczne do wymiarowania słupów żelbetowych wzmocnianych materiałami FRP nie uwzględniają wpływu doklejenia podłużnych odcinków

taśm FRP oraz sposobu skonstruowania wzmocnienia poprzecznego na nośność tego typu elementów. Przedmiotem zainteresowania autora pracy jest, jak optymalnie kształtować oba rodzaje wzmocnienia kompozytowego (podłużne i poprzeczne).

4. Propozycja własna modyfikacji modelu Campione i Miraglia

Na podstawie wyników własnych badań doświadczalnych opisanych w pracach [2, 6] (rys. 3) autor proponuje następujące modyfikacje w modelu Campione i Miraglia:



Rys. 3. Elementy na stanowisku badawczym [2]

Fig. 3. Elements during testing [2]

- dodanie do wzoru na nośność (12) członu wyrażającego wzrost nośności z uwagi na obecność podłużnych odcinków taśm z włókien węglowych: $(\epsilon_L \cdot E_L \cdot A_L)$,

gdzie:

ϵ_L – podłużne odkształcenia graniczne przekroju poprzecznego elementu wzmocnionego podłużnymi odcinkami taśm z włókien węglowych oraz poprzecznymi obejmami z maty z włókien węglowych; **proponuje się przyjmować $\epsilon_L=2,20\%$,**

E_L – moduł sprężystości taśmy CFRP,

A_L – powierzchnia przekroju poprzecznego taśmy CFRP,

- wprowadzenie ogólnych zależności na naprężenia poprzeczne powstające na styku betonu i uzwojenia zewnętrznego dla przekroju prostokątnego z wyokrąglonymi narożami,
- wprowadzenie do wzoru na współczynnik efektywności ograniczenia betonu k_c (18) modyfikacji uwzględniających nieciągłości wzmocnienia poprzecznego w postaci obejm zewnętrznych oraz kształtu przekroju poprzecznego.

Powyższe propozycje zostały uwzględnione w modelu, a otrzymane w ten sposób wartości nośności teoretyczne elementów będących przedmiotem badań autora odpowiadają wynikom eksperymentów. Należy jednak zaznaczyć, że zaproponowane modyfikacje wymagają jeszcze weryfikacji na modelach w skali naturalnej, która jest obecnie wykonywana, a więc nie można jeszcze podać, jaka jest zgodność obliczeń teoretycznych z wynikami eksperymentów.

LITERATURA

1. Campione G., Miraglia N.: Strength and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP. *Cement & Concrete Composites* 25 (2003), p. 31-41.
2. Kamiński M., Trapko T.: Metodyka badań ściskanych elementów żelbetowych wzmacnianych taśmami i matami CFRP. Praca zbiorowa pod redakcją: Kamiński M., Kmity A., Łodo A., Michałek J.: „Badanie materiałów budowlanych i konstrukcji inżynierskich”, rozdział 3.5; Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2004.
3. Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R.: Theoretical stress – strain model for confined concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, August 1998, p. 1804-1826.
4. Priestley M.J.N, Seible F., Fyfe E.: Column seismic retrofit using fiberglass/epoxy jackets, *Proceedings 1st International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, 1992, p. 287-298.
5. Rochette P., Labossière P.: Axial testing of rectangular column models confined with composites, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 4, No. 3, August 2000, p.129-136.
6. Trapko T.: Badanie nośności słupów żelbetowych wzmacnianych taśmami i matami z włókien węglowych. IV Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Gliwice – Wisła 2003, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, Z. 101, s. 425-43.
7. Wang Y. Ch.: Retrofit of Reinforced Concrete Members Using Advanced Composite Materials. Research Report 2000-3, Department of Civil Engineering. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, February 2000.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski