

# Specyfika wzmacniania elementów ściskanych doklejanymi materiałami kompozytowymi CFRP

Dr inż. Tomasz Trapko, mgr inż. Wojciech Trapko, Politechnika Wrocławska

## 1. Wprowadzenie

Jak pokazują dotychczasowe doświadczenia, efekty stosowania materiałów kompozytowych do wzmacniania elementów ściskanych mogą być zarówno pozytywne, ale również negatywne. Jeżeli nie będzie się rozsądnie i z pełnym rozpoznaniem stosować kompozytów węglowych CFRP, można „stracić kontrolę” nad konstrukcją, a prognozowany stan odkształcenia i nośności nie będą odpowiadały rzeczywistości. W przypadku tej ciągle nowej metody, nie obowiązuje, często stosowana przez inżynierów konstruktorów, zasada: „więcej – znaczy lepiej”. Niepoparte odpowiednim rozpoznaniem tematu zaprojektowane wzmocnienie może nie spełnić swojego przeznaczenia – zarówno doraźnie, jak i w długim okresie czasu. Nie wystarczy zapoznać się z podstawowymi danymi technicznymi systemu zawartymi w kartach katalogowych i skorzystać z gotowych programów obliczeniowych oferowanych przez dysytrybutorów systemu. W pierwszej kolejności, koniecznym powinno stać się zapoznanie z zasadami współpracy betonu, stali, kleju i kompozytu. Zrozumienie specyfiki wzmacniania konstrukcji betonowych za pomocą doklejanym materiałów kompozytowych pozwoli na uzasadnione i ekonomiczne stosowanie tej technologii. W artykule przedstawiono kilka

własnych doświadczeń, które mogą być pomocne przy wyborze tego systemu do wzmacniania elementów ściskanych.

## 2. Nośność elementów ściskanych wzmacnianych materiałami CFRP

Powszechnie znana z literatury metoda owinięcia (doklejenia) kilku warstw maty CFRP wokół elementu betonowego, sprawdza się doskonale w elementach walcowych. Tego typu wzmocnienie powoduje powstanie w przekroju poprzecznym trójosiowego stanu naprężeń, a zewnętrzny kompozyt zachowuje się podobnie jak stalowa spirala w słupach uzwojonych. Z tą różnicą, że nie można mówić tu o płynięciu kompozytu, który zachowuje się cały czas sprężyste, w przeciwieństwie do uzwojenia stalowego. Dzięki tej metodzie, można podnieść kilkakrotnie doraźną nośność elementu o przekroju okrągłym. Problem pojawia się w momencie konieczności wzmocnienia słupa o przekroju czworokątnym. Efekt wzmocnienia tego typu elementów jest silnie związany z promieniem wyokrąglenia naroży. Im większy promień wyokrąglenia, tym większy stopień wzmocnienia. W większości wzmocnień inżynierskich, mamy do czynienia z elementami czworokątnymi, które o ile posiadają zredukowane krawędzie, to raczej w postaci niewielkiego sfazowania, a nie wyokrąglenia. Jednocześnie

trudno sobie wyobrazić, że w elemencie posiadającym skorodowaną otulinę, będziemy wstanie wykonać kilkudziesięciomilimetrowe wyokrąglenie naroży. Wtedy metoda ta staje się nieefektywna, a doklejenie nawet kilku warstw maty kompozytowej nie daje zadowalających rezultatów. Trudno bowiem mówić o trójosiowym stanie naprężeń w elemencie, w którym zniszczenie następuje na skutek koncentracji naprężeń w narożach elementu.

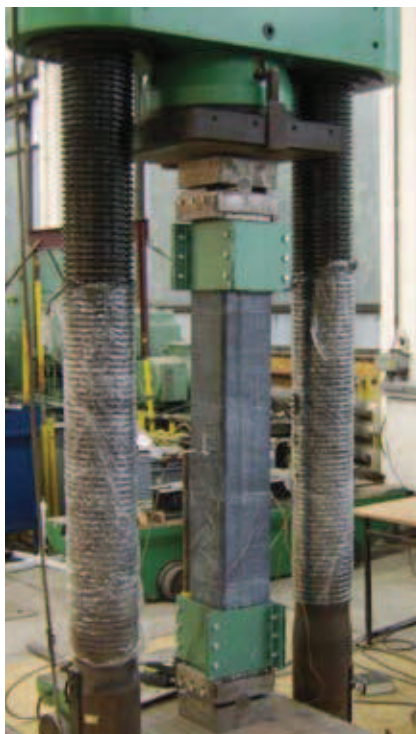
Model wymiarowania elementów ściskanych za pomocą mat CFRP wykorzystywany w komercyjnych programach obliczeniowych opiera się na propozycji Wang'a [16]. Zakłada on, że maksymalne odkształcenia podłużne w elementach ściskanych osiowo wzmocnionych płaszczem FRP osiągają wartość 10‰, a przy założeniu przez niego współczynnika Poissona  $\nu=0,50$ , maksymalne odkształcenia poprzeczne osiągają wartość 5‰. Przyjęcie, że maksymalne odkształcenia poprzeczne w płaszczu kompozytowym osiągają wartość 5‰, nie uwzględnia, że odkształcenia przy zniszczeniu maty doklejonej do betonu są zazwyczaj niższe od wartości uzyskiwanych podczas próby rozciągania materiałów FRP [12]. Ponadto, pominięty został w tym modelu wpływ koncentracji naprężeń w narożach elementów o przekroju czworokątnym. Na podstawie badań wykonanych przez Rochette i Labossière

[9], którzy dokonywali pomiarów odkształceń poprzecznych maty w narożach próbek czworokątnych stwierdzono, że w wyniku koncentracji naprężeń w pobliżu naroży mata nie osiąga swojej wytrzymałości na rozciąganie. W związku z tym, konieczne było wprowadzenie współczynnika poprawkowego. Współczynnik taki wyznaczyli Campione i Miraglia [1], redukując naprężenia poprzeczne powstające na styku betonu i uzwojenia zewnętrznego w przekrojach czworokątnych, o około 80%.

Kompozyt naklejony na beton, który pod wpływem obciążenia odkształca się w kierunku podłużnym i poprzecznym, współpracuje z betonem i „nadaża” za jego odkształceniami. Stąd odgórne przyjęcie i przeszacowanie współczynnika Poissona  $\nu=0,50$  nie uwzględnia tego, że mamy do czynienia z hybrydowym połączeniem betonowo-stalowo-kompozytowym.

Przeprowadzone analizy teoretyczne [5, 10] pokazują, że model Wang’a prowadzi do zawyżenia wytrzymałości betonu w trójosiowym stanie naprężenia, a różnice między wynikami obliczeń i doświadczeniami wahają się w granicach od 9 do 93%.

Jednym z rozwiązań problemu wzmacniania słupów czworokątnych z wykorzystaniem kompozytów węglowych jest stosowanie doklejanych podłużnych odcinków taśm CFRP, którym musi towarzyszyć obwodowe wzmacnienie z maty [3, 4, 10, 13]. Wzmacnianie samymi odcinkami taśm CFRP, których włókna są zorientowane równoległe do osi słupa jest niekorzystne, ze względu na przedwczesne odspojenie się kompozytu od betonu przy niewielkich wartościach granicznych odkształceń podłużnych. Wzmacnienie poprzeczne ma jedynie za zadanie zapobiegać przedwczesnemu odspajaniu się podłużnego kompozytu do betonu. Nie wpływa ono zasadniczo na przyrost nośności elementu. Wzrost nośności nale-



**Rys. 1.** Słupy żelbetowe wzmocnione taśmami i matami CFRP – opaski i ciągły płaszcz

ży przypisać prawie wyłącznie podłużnemu wzmocnieniu CFRP, które usztywnia element i wpływa na przyrost odkształceń ściskania, aż do chwili zniszczenia. Nośność graniczna wzmacnianych słupów żelbetowych o przekroju czworokątnym zależy od intensywności wzmocnienia podłużnego taśmami CFRP, nie zależą od niej natomiast graniczne odkształcenia ściskania.

### 3. Skuteczność wzmocnienia pod wpływem podwyższonej temperatury

Jednym z głównych mankamentów systemu jest praktycznie brak odporności ogniowej żywicy epoksydowej, za pomocą której doklejane są materiały do betonu. Wzmacnienie tego typu, pomimo że posiada wiele zalet wytrzymałościowych, wymaga zabezpieczenia przed działaniem podwyższonych temperatur.

W badaniach własnych [14] stwierdzono, że degradacja żywicy rozpoczyna się już w temperaturze  $+30^{\circ}\text{C}$ . Oczywiście nie chodzi tutaj o całkowitą delaminację połączenia,

ale o początkowy stan, w którym prognozowanie stanu odkształcenia w elemencie staje się niemożliwe. W informacjach technicznych mówi się o możliwości użytkowania systemu i jego odporności w temperaturze do  $+50^{\circ}\text{C}$ . W badaniach [2] zauważono, że w temperaturze powyżej  $+100^{\circ}\text{C}$ , nośność elementów walcowych wzmocnionych matą CFRP spada o około 33%. W badaniach własnych [14] stwierdzono natomiast, że już w temperaturze  $+60^{\circ}\text{C}$ , nośność próbek walcowych owiniętych jedną warstwą maty CFRP spada o około 13%. Pomimo, że poprawiają się właściwości odkształcalnościowe elementów, to nie idzie za tym poprawa parametrów wytrzymałościowych. Z tego typu warunkami, kiedy temperatura w nasłonecznionych miejscach osiąga wartość powyżej  $+50^{\circ}\text{C}$  mamy do czynienia także w naszym kraju, co powinno być brane pod uwagę przy decydowaniu się na tego typu wzmocnienia (np. przez stosowanie zabezpieczeń i powłok ochronnych). Rozwiązaniem tego problemu wydają się być włókna kompozy-



**Rys. 2.**  
Badania reologiczne próbek wzmocnionych materiałami CFRP

towe osadzone na zaprawie mineralnej FRCM (Fibre Reinforced Cementitious Matrix). Dzięki zastąpieniu żywicy epoksydowej zaprawą mineralną, powinno się wyeliminować problem wrażliwości systemu na podwyższone temperatury. Badania takie są obecnie realizowane przez autorów.

#### 4. Prognozowanie stanu odkształceń w czasie

Prognozowanie stanu odkształcenia w czasie dla elementów betonowych, oparte na prostych modelach reologicznych, jest powszechnie znane. Na podstawie wytycznych i nomogramów zawartych w normach [7, 8] można prognozować wartość  $\varphi(\infty, t_0)$  – końcowego współczynnika pełzania (charakterystyki pełzania). Zjawisko pełzania, istotne przy ocenie deformacji ściskanych elementów wzmocnionych i wyznaczaniu dodatkowych oddziaływań na konstrukcję spowodowanych jej odkształceniem jest praktycznie pomijane w przedmiotowej literaturze.

Badania własne pokazują, że doklejenie materiałów kompozytowych CFRP do ściskanych elementów betonowych, oprócz doraźnych korzyści polegających na podniesieniu ich nośności, wpływają także na ich cechy reologiczne [11].

Wartość współczynnika  $\varphi(\infty, t_0)$

dla elementów bez wzmocnienia (dla czystego betonu) jest około 30÷40% większa w porównaniu z elementami wzmocnionymi samą matą. Dla elementów betonowych współczynnik  $\varphi(\infty, t_0)$  jest około 70÷80% większy w porównaniu z elementami wzmocnionymi jednocześnie taśmami i matami CFRP. Należy jednak zauważyć, że w obydwu typach wzmocnienia wartość charakterystyki pełzania nie zależy zasadniczo ani od liczby warstw maty, ani od intensywności wzmocnienia podłużnego taśmami CFRP. Zaprezentowane zagadnienie pokazuje, jak istotne znaczenie ma znajomość zjawisk reologicznych w tego typu elementach przy prognozowaniu efektów II-go rzędu, spowodowanych odkształceniem osi podłużnej elementu.

#### 5. Obciążenia wielokrotnie zmienne

W badaniach własnych przeanalizowano wpływ obciążeń wielokrotnie zmiennych na stan odkształcenia elementów ściskanych wzmocnianych taśmami i matami CFRP. Otrzymane wyniki badań pokazują, że o ile dla obciążenia doraźnego widać pozytywne efekty zwiększania intensywności wzmocnienia poprzecznego, to dla obciążeń zmiennych jest to wręcz niekorzystne.

W przypadku elementów wzmocnionych więcej niż jedną warstwą mat CFRP, poddanych obciążeniu wielokrotnie zmiennemu, zauważono rozbieżność krzywych  $\sigma \div \varepsilon$  dla obciążenia monotonicznego i cyklicznego, co świadczy o delaminacji na styku beton – żywica epoksydowa – mata CFRP [15]. Po przeanalizowaniu odkształceń podłużnych stwierdzono, że na pewnym poziomie wyężenia nie obserwuje się przyrostu odkształceń przy kolejnych cyklach wyężenia elementu. Świadczy to o tym, że nastąpił poślizg w warstwie skleiny, pomimo że rdzeń betonowy nadal otoczony jest uzwojeniem kompozytowym. Zbyt duża sztywność wzmocnienia powoduje, że skleina nie odkształca się równomiernie z betonem w cyklu obciążenie – odciążenie przy wyężeniu większym niż 40% siły niszczącej. W betonie powstają wewnętrzne pęknięcia, które nie są widoczne gołym okiem, gdyż element jest owinięty zewnętrznym płaszczem kompozytowym. W badaniach własnych, dopiero po przecięciu wyężonej próbki, stwierdzono włoskowate pęknięcia betonu.

Trudno więc zgodzić się z hipotezą niektórych badaczy [6], że obciążenia cykliczne wywołują odkształcenia, które odpowiadają krzywej naprężenia – odkształcenia dla betonu w ramach tego samego monotonicznego obciążenia.

## 6. Podsumowanie

Przedstawionych kilka własnych spostrzeżeń z badań doświadczalnych i analiz teoretycznych ma za zadanie pomóc inżynierom konstruktorom w głębszym poznaniu systemu CFRP. Te i wiele innych informacji ciągle trudno znaleźć w polskich czasopismach branżowych, a także w niedostępnych powszechnie w kraju zagranicznych materiałach konferencyjnych. Opisana specyfika wzmacniania elementów ściskanych doklejanymi materiałami kompozytowymi CFRP jest tylko niewielkim wycinkiem zgromadzonych doświadczeń.

### BIBLIOGRAFIA

[1] Campione G., Miraglia N., Strength and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP, *Cement and Concrete Composites*, No. 25, 2003, 31–41  
 [2] Issa C., The effect of elevated temperatures on CFRP wrapped concrete cylinders. *Proceedings of the 8th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*. Ed.

by T.C. Triantafillou. Patras, Greece, July 16–18, 2007. Patras: University of Patras

[3] Kamiński M., Trapko T., Experimental behaviour of reinforced concrete column models strengthened by CFRP materials. *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 12, No. 2, 2006

[4] Kamiński M., Trapko T., O efektywności zbrojenia materiałami kompozytowymi CFRP mimośrodowo ściskanych słupów żelbetowych. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 1/2006

[5] Kamiński M., Trapko T., Bywalski Cz., Weryfikacja i modyfikacja modeli teoretycznych do wymiarowania elementów ściskanych wzmacnianych materiałami FRP. W: *Materiały kompozytowe w budownictwie mostowym*. Referat z konferencji naukowo-technicznej, Łódź 2006, s. 33–40

[6] Lam L., Teng J. G., Cheung C. H., Xiao Y., 2006. FRP-Confined Concrete under Axial Cyclic Compression. *Cement and Concrete Composites*, 25(10), 949–958

[7] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone – Obliczenia statyczne i projektowanie

[8] PN-EN 1992-1-1:2008 Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków

[9] Rochette P., Labossière P., Axial testing of rectangular column models confined with composites, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 4, No. 3, August 2000, 129–136

[10] Trapko T., Nośność żelbetowych słupów

wzmacnianych taśmami i matami z włókien węglowych. Rozprawa doktorska. Raport serii PRE 22/04, Politechnika Wroclawska, Instytut Budownictwa, 2004, s. 177

[11] Trapko T., Musiał M., Trapko W., The influence of transverse CFRP strengthening on rheological strains of compressed concrete elements. *Proceedings of the Second Asia-Pacific Conference on FRP in Structures*. APFIS 2009. Seoul, Korea, December 9–11, Ed. by J. Sim. Hanyang University, Korea, 2009

[12] Trapko T., Identyfikacja parametrów wytrzymałościowych kompozytów węglowych CFRP. *Materiały Budowlane*. 2010, nr 7, s. 29–31

[13] Trapko T., Musiał M., Strains of eccentrically compressed RC columns strengthened with CFRP sheets and strips. *Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 4, No.7, 2010

[14] Trapko T., Wpływ temperatury na trwałość i skuteczność wzmocnienia betonu kompozytami CFRP. *Inżynieria i Budownictwo*. 2010, R. 66, nr 10, s. 561–564

[15] Trapko W., Nośność elementów betonowych wzmacnianych materiałami CFRP, podanych obciążeniu wielokrotnie zmiennemu. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, 2010, s. 184

[16] 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

# DOBRE NOCLEGI dla Twoich pracowników

Do Państwa dyspozycji:

- HOSTELE SŁUŻEWIEC i TO-TU
- HOTELE ATOS i ARAMIS



noclegi pracownicze  
w Warszawie już od

30 zł/osobę

www.puhit.pl

zakwaterowanie@puhit.pl

Rezerwacja: 22 20 76 550