

# Odształcalność ściskanych elementów betonowych wzmocnionych materiałami kompozytowymi FRCM

Tomasz Trapko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra Konstrukcji Betonowych, Instytut Budownictwa, Politechnika Wroclawska,  
e-mail: tomasz.trapko@pwr.wroc.pl

**Streszczenie:** W referacie przedstawiono wyniki badań doświadczalnych, ściskanych elementów betonowych wzmocnionych siatką kompozytową w technologii FRCM. (*Fibre Reinforced Cementitious Matrix*). W systemie tym zespolenie kompozytu z betonem realizowane jest za pomocą zaprawy mineralnej, co odróżnia go od systemów FRP (*Fibre Reinforced Polymers*), w których zespolenie odbywa się przy użyciu żywicy epoksydowej. We wprowadzeniu do tematu dokonano przeglądu wiedzy dotyczący odształcalności poprzecznej elementów owiniętych zewnętrznym kompozytem. W głównej części pracy przedstawiono badania, w których analizowano wpływ temperatury, liczby warstw siatki kompozytowej oraz długość zakładu końcowego na wartość i rozkład obwodowych odształceń granicznych.

**Słowa kluczowe:** FRCM, rozwarstwienie, odształcenie, naprężenie

## 1. Wprowadzenie

Zniszczenie elementów ściskanych, owiniętych matami kompozytowymi, następuje głównie na skutek zerwania ciągłości wzmocnienia na kierunku owinięcia [1-4]. W przypadku elementów wzmocnionych matami FRP wyczerpanie nośności następuje gwałtownie, poprzez rozerwanie płaszcza w przypadkowym przekroju. Z kolei zniszczenie elementów owiniętych siatką kompozytową w technologii FRCM inicjowane jest rozwarstwieniem połączenia siatki na zewnętrznym zakładzie [5, 6]. W obydwu przypadkach determinującą wielkością są graniczne odształcenia poprzeczne, których wartość zależy m.in. od typu włókien, rodzaju maty, liczby warstw wzmocnienia, kształtu przekroju poprzecznego i długości zakładu. Wiele badań pokazuje, że odształcenia przy zniszczeniu próbek owiniętych matami FRP nie osiągają wartości uzyskiwanej przy badaniu próbek kompozytu na rozciąganie [7-11]. Istnieją również badania, które w odniesieniu do próbek walcowych zaprzeczają tej tezie [12].

Już w pierwszych badaniach Rochette i Labossiere [8] zauważyli, że efektywność wzmocnienia zależy od kształtu owiniętego przekroju. Najkorzystniejsze efekty wzmocnienia, w postaci przyrostu nośności, uzyskali dla próbek walcowych i próbek o przekroju kwadratowym. Jednakże, dla tego drugiego typu elementów przyrost nośności zależał od wartości promienia wyokrąglenia naroży i liczby warstw maty wzmacniającej. Dla próbek kwadratowych o promieniu wyokrąglenia naroży 5 mm nie odnotowali oni wzrostu nośności, nawet przy pięciu warstwach poprzecznej maty. Dopiero dla próbek o promieniu wyokrąglenia naroży – 25 i 38 mm zaobserwowano wyraźny wzrost nośności. Dla próbek o przekroju prostokątnym niezależnie od liczby warstw maty i wartości promienia wyokrąglenia naroży nie odnotowano przyrostu nośności, pomimo że uzyskano kilkukrotnie większe graniczne odształcenia poprzeczne, w stosunku do granicznych odształceń podłużnych. W przekrojach czworokątnych uzyskuje się znacznie mniejsze wartości odształceń niszczących, niż w przekrojach okrągłych. Spowodowane jest to koncentracją naprężeń w narożach, jak również w pobliżu naroży z niedużym wyokrągleniem.

Silva [9] przeprowadził badania na żelbetowych walcach i prostopadłościanach o wysokości 750 mm. Stosunek średnicy lub długości boku do wysokości wynosił około 1:5. Słupy prostopadłościennego podzielono na trzy grupy – z ostrymi krawędziami i wyokrągleniami naroży 20 mm i 38 mm. Elementy zostały wzmocnione dwoma

warstwami maty węglowej CFRP lub aramidowej AFRP. Dla słupów CFRP z ostrymi narożnikami, autor nie odnotował wzrostu nośności, ani poprawy plastyczności. Uzyskał porównywalne wartości naprężeń i odkształceń z elementami bez wzmocnienia. Z kolei dla słupów AFRP nastąpił wzrost nośności, bez jednoczesnej poprawy plastyczności. W wyniku koncentracji naprężeń w narożach następowało tam pęknięcie (rozerwanie) włókien. Mierzone odkształcenia były znacznie mniejsze od wartości granicznych dla samej maty. Odkształcenia mierzone dookoła obwodu wykazywały minimalną wartość w narożach, rosnącą w kierunku środka przekroju. Wyjątkiem były przekroje z ostrymi krawędziami, w których największe odkształcenia zaobserwowano w pobliżu naroży. Dopiero dla elementów z wyokrąglonymi narożami zaobserwowano wzrost nośności i odkształceń granicznych.

Wang i Wu [10] potwierdzili, że promień wyokrąglenia naroży ma duże znaczenie w ocenie poziomu wzmocnienia, który definiują jako graniczne wartości wytrzymałości  $f_{cc}$  i odkształceń  $\varepsilon_{cc}$  betonu w stanie trójosiowego ściskania. Autorzy zauważają, że stosunek  $f_{cc}/f_{co}$  jest wprost proporcjonalny do współczynnika wyokrąglenia naroży ( $2r/b$ ), a zależność liniowa występuje w pełnym zakresie współczynnika wyokrąglenia. Ponadto Autorzy stwierdzają, że plastyczność elementów zależy od promienia wyokrąglenia naroży, liczby warstw wzmocnienia i wytrzymałości betonu na ściskanie.

W innej pracy Wu i Wei [11] potwierdzają znany już wcześniej fakt, że zdecydowanie lepsze efekty wzmocnienia uzyskuje się dla próbek o przekroju kwadratowym, niż prostokątnym. Dla stosunku długości boków  $h/b$  większym niż 2, wpływ wzmocnienia staje się niezauważalny. Przy odpowiednich proporcjach przekroju poprzecznego i promieniu naroża, możliwe jest osiągnięcie wartości odkształceń rozciągających porównywalnych z uzyskiwanymi przy badaniu próbek kompozytu na rozciąganie. Autorzy zauważają również, że intensywność wzmocnienia poprzecznego (liczba warstw maty) wpływa korzystnie na efektywność wzmocnienia. Gdy zwiększa się współczynnik kształtu  $h/b$  maleją maksymalne odkształcenia FRP, odpowiadające maksymalnej sile. Jest to zgodne z tym, że zmniejsza się skuteczność wzmocnienia wraz ze wzrostem współczynnika kształtu.

Wu i Jiang [12] podają na podstawie literatury, że współczynnik wykorzystania maty FRP, definiowany jako stosunek średnich odkształceń obwodowych do odkształceń przy badaniu próbek na rozciąganie, wynosi 0,274–1,133. Stawiają oni jednocześnie tezę, że rozbieżności w ocenie stopnia wykorzystania maty FRP w badaniach płaskich próbek i w płaszczu FRP, spowodowane są przez różnice w sposobach pomiaru odkształceń. Zniszczenie elementów ściskanych wzmocnionych matami kompozytowymi następuje w przypadkowym przekroju i zbyt mała liczba punktów pomiarowych na płaszczu FRP powoduje, że pomijane jest to miejsce. Autorzy uważają, że krzywizna próbki i wieloosiowy stan naprężeń, tylko nieznacznie zmniejszają wydajność maty. W strefie poza zakładem maty, stosunek maksymalnych i średnich odkształceń obwodowych wynosi 0,9.

Poniżej przedstawiono wyniki badań, w których analizowano współczynnik wykorzystania wzmocnienia FRCM w ściskanych elementach betonowych. W systemach FRP kompozyt łączony jest z betonem za pomocą żywicy epoksydowej. Jak wiadomo, matryca epoksydowa jest wrażliwa na podwyższone temperatury, w których ulega uplastycznieniu i decyduje to o efektywności wzmocnienia. W systemie FRCM wylaminowano żywicę i siatkę kompozytowa łączona jest z betonem przy użyciu odpornej termicznie zaprawy mineralnej. Wcześniejsze analizy porównawcze pokazały, że obydwa systemy różnią się zasadniczo zarówno, co do efektywności, jak i jakości efektów wzmocnienia [5, 6].

W referacie przedstawione zostały badania, w których analizowano wpływ temperatury, liczby warstw siatki kompozytowej oraz długość zakładu końcowego na wartość i rozkład obwodowych odkształceń granicznych w elementach ściskanych wzmocnionych FRCM. Zakres badań w kolejnych etapach był korygowany i ustalany na bieżąco, na podstawie wyników badań już wykonanych.

## 2. Badania doświadczalne

W pierwszym etapie badań, 6 próbek walcowych owinięto jedną, dwoma lub trzema warstwami wzmocnienia FRCM, po dwa elementy dla każdego typu. Elementy

wzmocniono i przebadano w temperaturze pokojowej +20°C [5, 6]. W kolejnym etapie, 6 elementów owinięto jedną warstwą wzmocnienia FRMC i poddano je wstępnej ekspozycji na podwyższone temperatury: +60°C, +120°C i +180°C. Po 48h próbki ostudzone do temperatury pokojowej i poddano je również próbie do zniszczenia [5, 6].

Na podstawie przeprowadzonych badań, w kolejnym etapie zaplanowano analizę wpływu długości końcowego zakładu wzmocnienia FRMC na wartość granicznych odształceń poprzecznych. Zerwanie zakładu równoznaczne jest z delaminacją połączenia. Wykonano 15 próbek walcowych, które wzmocniono jedną warstwą siatki. Względny zakład siatki przyjęto, jako stosunek długości zakładu do obwodu próbki ( $z/u$ ). W elementach grupy pierwszej i drugiej zastosowano zakład równy 70 mm dla których  $z/u=0,2$ .

Tabela 1. Program badań

Seria	Próbka <sup>(a)</sup>	Liczba warstw wzmocnienia FRMC	Temperatura [°C]	Liczba próbek
1	20M1	1	20	2
	20M2	2	20	2
	20M3	3	20	2
2	60M1	1	60	3
	120M1	1	120	3
	180M1	1	180	3
3	$z/u=0$	1	20	2
	$z/u=0,1$	1	20	2
	$z/u=0,2$	1	20	2
	$z/u=0,3$	1	20	2
	$z/u=0,4$	1	20	2

<sup>(a)</sup> Pierwsza litera w symbolu próbki, to temperatura do jakiej nagrzano próbkę

## 2.1. Przygotowanie elementów do badań

Badania przeprowadzono na próbkach walcowych  $\phi 113 \times 300$  mm. Wszystkie elementy danej serii wykonano w formach stalowych, z tego samego zarobu mieszanki betonowej, podczas jednego betonowania i wibrowania. Do wykonania betonu wykorzystano cement portlandzki CEM II 32,5R [13] i naturalne kruszywo płukane o frakcjach: piaskowej – 0-2 mm, żwirowej – 2-8 mm oraz 8-16 mm. Mieszanke betonową wykonano w warunkach laboratoryjnych. Po 48h rozformowano próbki i przechowywano je do czasu wzmocnienia w komorze na ruszcie z wodą, w temperaturze  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie dla serii 1 i 2 wyniosła  $f_{cm, cyl} = 22,6$  MPa, a dla serii 3  $f_{cm, cyl} = 29,5$  MPa.

Do wzmocnienia próbek zastosowano siatkę z włókien poliparafenilenbenzobisoxazolowych (PBO) Ruredil X Mesh Gold [14]. Właściwości siatki PBO określono zgodnie z normami ASTM D3039/D3039M:2008 [15] i ISO 527-5:1997 [16]. Porównanie parametrów siatki PBO z badań własnych i danych producenta podano w tablicy 2 [5].

Tabela 2. Parametry siatki PBO

Cecha	Dane producenta	Badania własne
Grubość i szerokość siatki [mm]	0,0455 x 1000	—
Obciążenie niszczące [kN/m]	264	240
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	5800	5270
Moduł sprężystości [MPa]	270 000	—
Odształcenia przy zerwaniu [%]	2,15	—

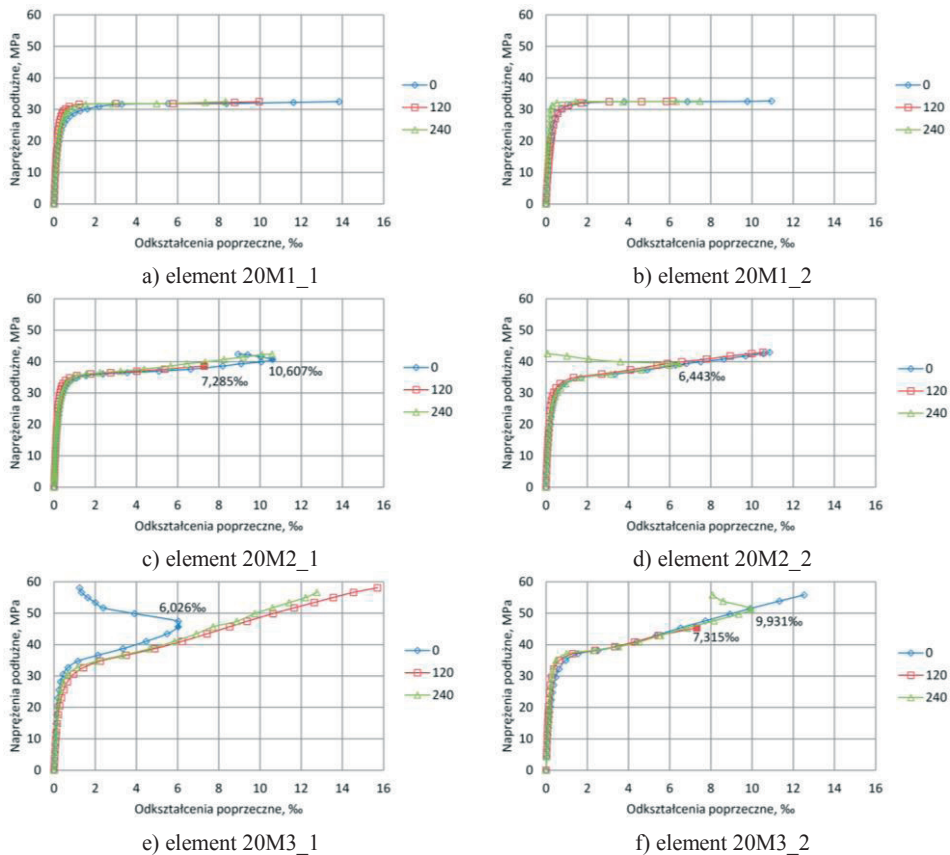
## 2.2. Metodologia badań

Po wzmocnieniu próbek odpowiednią liczbą warstw kompozytu, naklejono w połowie ich wysokości tensometry do pomiaru odształceń poprzecznych. Wszystkie elementy badawcze zostały zaopatrzone w stalowe kapsle czołowe w celu zapewnienia równoległości płaszczyzn docisku oraz osiowości obciążenia. Na obydwu końcach próbek umieszczono nakładki, dzięki czemu uzyskano schemat obciążenia przegubowo-przegubowy. Próbę do zniszczenia przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej o zakresie 0-1000 kN (Rys. 1). Odczytu wartości odształceń i siły dokonywano automatycznie, co 1 sekundę.



Rys. 1. Element 20M2\_1 na stanowisku badawczym

### 3. Wyniki badań

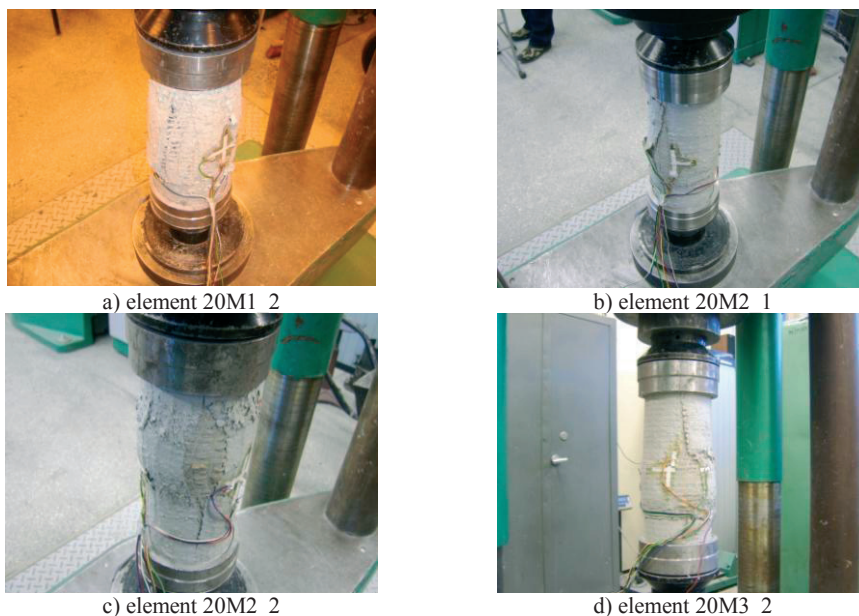
Rys. 2. Zależności  $\sigma-\epsilon_h$  dla elementów serii 1

Dzięki układowi tensometrów, co  $120^\circ$  po obwodzie próbek FRCC, udało się zarejestrować poziom odkształceń inicjujących rozwarstwienie siatki (*debonding*). Na kolejnych wykresach (rys. 2) przedstawiono odkształcenia poprzeczne elementów FRCC w funkcji naprężeń dla tensometrów w pozycjach  $-0^\circ$ ,  $120^\circ$  i  $240^\circ$ . Zniszczenie elementów FRCC rozpoczynało się zawsze na zewnętrznym zakładzie siatki, gdzie następował poślizg pomiędzy warstwami kompozytu i rozwarstwienie płaszcza kompozytowego.

W żadnej zniszczonej próbce nie stwierdzono rozerwania włókien, a jedynie rozwarstwienie siatki PBO i deformację spowodowaną zmiażdżeniem rdzenia betonowego.

W konsekwencji powodowało to, że pomierzone wartości odształceń poprzecznych nie osiągnęły wartości granicznych (por. tablica 2), przy których następuje rozerwanie włókien PBO.

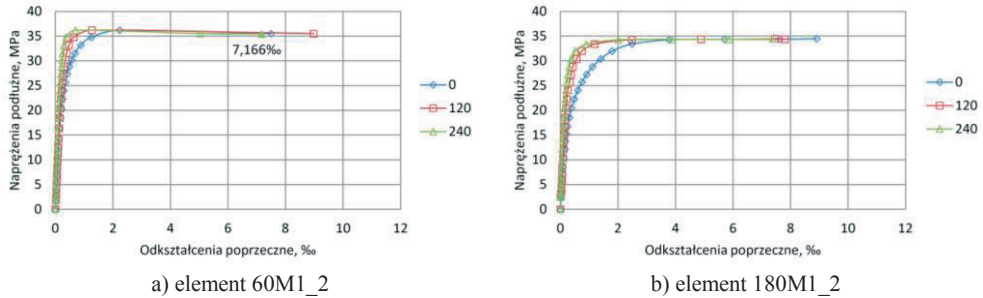
Każdy z przedstawionych na rysunku 2 wykresów obrazuje de facto mechanizm zniszczenia. Dla przykładu: zniszczenie elementu 20M1\_2 (rys. 2-b) nastąpiło przez rozwarstwienie płaszcza pomiędzy rozetami w pozycji  $0^\circ$  i  $120^\circ$ , co widoczne jest w postaci nagłego przyrostu odształceń poziomych na pozycji  $0^\circ$ . Obrazuje to również mechanizm zniszczenia pokazany na rysunku 3-a. Chwila zerwania połączenia na zakładzie siatki został dokładnie zarejestrowany dla elementów 20M2\_1 i 20M3\_2. W obydwu przypadkach nastąpiło zerwanie tensometru poziomego na pozycji  $120^\circ$ , odpowiednio przy odształceniach  $\varepsilon_h=7,285\%$  dla 20M2\_1 (rys. 3-b) i  $\varepsilon_h=7,315\%$  dla 20M3\_2 (rys. 3-d). W elemencie 20M2\_2 tensometr poziomy na pozycji  $240^\circ$  nie przecinał zakładu, dlatego zarejestrowano poziom odształceń inicjujących zerwanie więzi na złączu  $\varepsilon_h=6,443\%$ , a następnie spadek wartości odształceń spowodowany poślizgiem. Odształcenia te nie osiągnęły wartości, przy której następowało zerwanie połączenia, co jest oczywiste, ponieważ tensometr na pozycji  $240^\circ$  nie znajdował się w przekroju krytycznym, którym jest krawędź zakładu. Przesunięcie warstw siatki widoczne na rysunku 3-c wyniosło około 30 mm.



Rys. 3. Obraz zniszczenia elementów serii 1

Podczas przygotowywania elementów do badań nie spodziewano się, że inicjacja mechanizmu zniszczenia następować będzie na zewnętrznym zakładzie. Dzięki przypadkowemu naklejeniu tensometrów poziomych na zakładzie udało się zarejestrować moment zerwania połączenia i wartość odształceń przy których to następuje – około 7,3%.

Z uwagi na podobny przebieg, na kolejnych wykresach pokazano ścieżki odształceń poprzecznych tylko dla dwóch wybranych elementów 60M1\_2 i 180M1\_2, które poddano wstępnej obróbce termicznej. Rysunek 4 przedstawia odształcenia poprzeczne w funkcji naprężeń dla poszczególnych tensometrów, na pozycjach  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  i  $240^\circ$ , po obwodzie próbek. Na każdej ze ścieżek  $\sigma$ - $\varepsilon_h$  można zauważyć charakterystyczny punkt, który odpowiada maksymalnym naprężeniom ściskania po osiągnięciu których następuje wyczerpanie nośności. Dla przykładu zniszczenie elementu 60M1\_2 nastąpiło w wyniku zerwania połączenia na zakładzie siatki przy odształceniach  $\varepsilon_h=7,166\%$  na tensometrze poziomym w pozycji  $240^\circ$  (rys. 5-a).

Rys. 4. Zależności  $\sigma$ - $\epsilon_h$  dla elementów serii 2

a) element 60M1\_2



b) element 180M1\_2

Rys. 5. Obraz zniszczenia elementów serii 2

Charakterystyczny jest przyrost odkształceń mierzonych na tensometrze w pozycji 0 dla próbki 180M1\_2. W tym przypadku widać postępującą utratę przyczepności pomiędzy uzwojeniem, a zakładem. Tensometr w pozycji 0° znajdował się na zakładce, ale jego baza pomiarowa nie przecinała linii zakładu, a w momencie rozwarstwienia połączenia nastąpiło odklejenie tensometru (rys. 5-b).

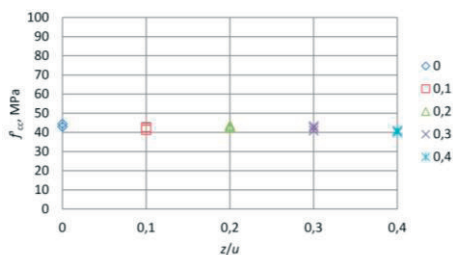
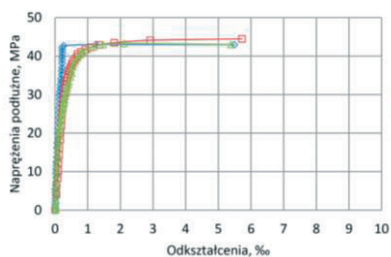
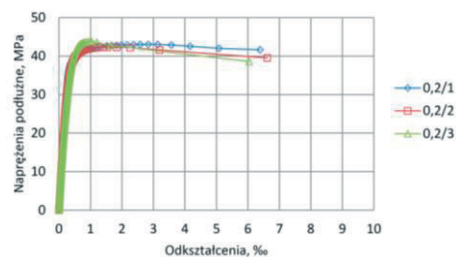
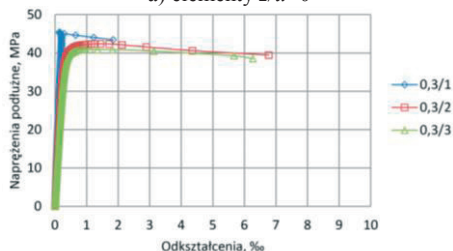
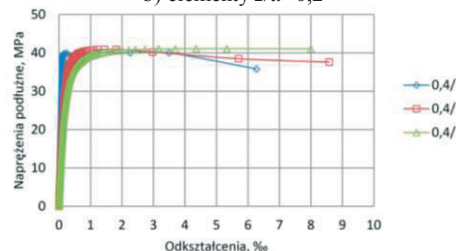
Decydująca o jakości wzmocnienia FRCM okazała się nośność połączenia na długości zakładu. Na podstawie tej obserwacji w kolejnym etapie przeanalizowano wpływ długości zakotwienia siatki na nośność i wartość granicznych odkształceń poprzecznych (por. tabela 1). Potwierdził się wcześniej zaobserwowany mechanizm zniszczenia, przez delaminację wzmocnienia na zewnętrznym zakładzie. Ten typ zniszczenia można zakwalifikować, według kryteriów podanych przez Karbhari i Howie [17], do modelu *seam debond* – *rozerwanie szwu*. Należy on do grupy, w której odpowiedzialna za wyczerpanie nośności jest matryca, a nie włókna kompozytowe.

Na rysunkach 6 przedstawiono graficzne porównanie wytrzymałości betonu w stanie trójosiowego ściskania  $f'_{cc}$  w zależności od względnej długości zakładu ( $z/u$ ). Zaskakujące, a zarazem powtarzalne w danej grupie są wartości  $f'_{cc}$ , które nie zależą od długości zakładu. Pokazuje to, że w niewielkim stopniu wykorzystana została wytrzymałość siatki PBO.

Badania wykonano jeszcze przed ukazaniem się pracy Wu i Jiang'a [12], którzy w krytyczny sposób ocenili niemiarodajne pomiary odkształceń elementów owiniętych FRP. Ich obserwacje potwierdziły się w prezentowanych badaniach. Pomiar odkształceń, tylko w połowie wysokości próbek, okazał się niewystarczający i w kilku próbkach nie zarejestrowano poziomu odkształceń dalaminacji. Widoczne to jest na przykładowych wykresach – rys. 8-a próbka 0/1, rys. 8-c próbka 0,3/1 i rys. 8-d próbka 0,4/1. Na zdjęciu (rys. 7) widać, że rozerwanie szwu nie następowało w połowie wysokości elementu.

Badania Wu i Jiang'a [12] pokazały, że rozkład odkształceń poprzecznych po obwodzie próbek wzmocnionych FRP jest nierównomierny. Przy jednej warstwie maty odkształcenia w strefie zakładu mogą być nawet dwukrotnie mniejsze, niż poza tą strefą. Jednocześnie wartość tych odkształceń wzrasta z oddaleniem się od końca zakładu. Pomijane jest to w rozważeniach teoretycznych, gdzie zakłada się, że wszystkie warstwy mają taki sam udział w przenoszeniu naprężeń poprzecznych. Mając to na uwadze można stwierdzić, że decydujące o nośności zakładu wzmocnienia FRCM są najmniejsze odkształcenia poprzeczne po obwodzie przekroju, a wraz ze wzrostem długości zakładu

(*overlapping zone*) wzrastają naprężenia delaminacji (rys. 8). Współczynnik wykorzystanie kompozytu FRCM, w strefie końca zakładu, waha się w granicach 0,28-0,44 w zależności od jego długości. Jednocześnie analizując wartości odształceń poprzecznych, poza strefą zakładu (rys. 2) widać, że współczynnik wykorzystanie siatki PBO wynosi 0,55-0,80.

Rys. 6. Wytrzymałość  $f_{cc}$  w zależności od ( $z/u$ )Rys. 7. Obraz zniszczenia elementów typu  $z/u=0,4$ a) elementy  $z/u=0$ b) elementy  $z/u=0,2$ c) elementy  $z/u=0,3$ d) elementy  $z/u=0,4$ Rys. 8. Zależności  $\sigma-\epsilon_n$  dla elementów serii 3

#### 4. Podsumowanie

W referacie analizowano pracę ściskanych elementów betonowych wzmocnionych siatką PBO na zaprawie mineralnej (FRCM). Na podstawie badań i analiz wyników można stwierdzić, że

- 1) Wyczerpanie nośności sygnalizowane jest przyrostem odkształceń obwodowych w strefie zakładu, co prowadzi do delaminacji połączenia i rozwarstwienia szwu,
- 2) Sygnalizowany i powolny przyrost odkształceń niszczących, umożliwia redystrybucję sił wewnętrznych w układach konstrukcyjnych i włączenie się do współpracy innych, mniej wyężonych elementów,
- 3) Wartość granicznych odkształceń obwodowych zależy od długości zakładu, a decydujące o delaminacji jest najmniejsze odkształcenia na długości zakładu. Jednocześnie należy zauważyć, że rozkład odkształceń na długości zakładu jest nieliniowy, co pokazują m.in. analizy MES zaprezentowane w pracy [3].
- 4) Stosunek maksymalnych do średnich odkształceń obwodowych wynosi od 0,77 do 0,99. Jest on najniższy dla wzmocnienia pojedynczego i wzrasta ze wzrostem liczby

warstw kompozytu. Jest to spostrzeżenie zgodne z wnioskami zawartymi w pracy [12] dla wzmocnień FRP.

## Literatura

- 1 Lam L., Teng, J.G. Strength models for fiber-reinforced plastic-confined concrete. *Journal of Structural Engineering* – ASCE, 128 (5), (2012) 612-623.
- 2 Teng J.G., Lam L. Behaviour and modelling of fiber reinforced polymer confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, 130 (11), (2004) 1713-1723.
- 3 Chen J.F., Ai J., Stratford T.J. FRP strains in FRP wrapped columns: a parametric study. In: *Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-8)*, Patras 2007. [na CD, referat nr 6-10].
- 4 Chen J.F., Li S.Q., Bisby L.A., Ai J. FRP rupture strains in the split-disk test. *Composites: Part B*, 42 (4), (2011) 962-972.
- 5 Trapko T. Fibre Reinforced Cementitious Matrix confined concrete elements. *Materials & Design*, 44, (2013) 382-391.
- 6 Trapko T. Stress-strain model for FRCM confined concrete elements. *Composites: Part B*, 45 (1), (2013) 1351-1359.
- 7 Mirmiran A., Shahawy M., Samaan M., El Echary H. Effect of column parameters on FRP-confined concrete. *ASCE Journal of Composites for Construction*, 2 (4), (1998) 175-85.
- 8 Rochette P., Labossiere P. Axial testing of rectangular column models confined with composites. *J Compo Constr*, 4 (3), (2000) 129-36.
- 9 Silva M.A.G. Behavior of square and circular columns strengthened with aramidic or carbon fibers. *Construction and Building Materials*, 25 (3), (2011) 3222-3228.
- 10 Wang L-M., Wu Y-F. Effect of corner radius on the performance of CFRP-confined square concrete columns: Test. *Engineering Structures*, 30 (2), (2008) 493-505.
- 11 Wu Y-F., Wei Y-Y. Effect of cross-sectional aspect ratio on the strength of CFRP-confined rectangular concrete columns. *Engineering Structures*, 32 (1), (2010) 32-45.
- 12 Wu Y-F., Jiang J-F. Effective strain of FRP for confined circular concrete columns. *Composite Structures*, 95 (1), 2013 479-491.
- 13 PN-EN 197-1:2012. Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.
- 14 Aprobata Techniczna Instytutu Badawczego Dróg i Mostów nr AT/2011-02-2701/1.
- 15 ASTM D3039/D3039M:2008. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials.
- 16 ISO 527-5:1997. Plastic – Determination of tensile properties, Part 5: Test conditions for unidirectional fibre – reinforced plastic components.
- 17 Karbhari V.M., Howie I. Effect of composite wrap architecture on strengthening of concrete due to confinement: II-Strain and damage effects. *Journal of reinforced plastics and composites*, 16 (11), (1997) 1039-1063.

## The deformability of compressed concrete elements strengthened with FRCM composite materials

Tomasz Trapko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Division of Concrete Structures, Institute of Building Engineering, Wrocław University of Technology, e-mail: tomasz.trapko@pwr.wroc.pl*

**Abstract:** In the paper the results of experimental studies performed on compressed concrete elements strengthened with composite fabric of FRCM (*Fibre Reinforced Cementitious Matrix*) technology are presented. In the studies the influence of temperature, the number of composite fabric layers and the length of ending overlap on the value and distribution of circumferential limit strains was analyzed.

**Keywords:** FRCM, debonding, strain, stress.