

Danuta SROKA, Małgorzata SIKORSKA*
Politechnika Gdańska

NOŚNOŚĆ KRÓTKICH WSPORNIKÓW ŻELBETOWYCH WZMOCNIONYCH MATAMI KOMPOZYTOWYMI

Streszczenie. Celem pracy było eksperymentalne określenie efektywności wzmocnienia wsporników słupa za pomocą mat CFRP przyklejanych do zewnętrznej powierzchni wspornika.

Program badawczy obejmował cztery prostokątne, symetryczne wsporniki słupa, różniące się smukłością ścinania. Pozwoliło to określić efektywność użycia maty CFRP w zależności od stosunku a_F/d . Oprócz badań wzmocnionych wsporników żelbetowych przeprowadzono badania towarzyszące, polegające na wyznaczeniu charakterystyk materiałowych wysokomodułowej maty węglowej oraz betonowych próbek walcowych w koszulkach z CFRP.

LOAD CARRYING CAPACITY OF CORBELS STRENGTHENED WITH CFRP SHEETS

Summary. The aim of the work was to experimental investigate an effectiveness of using CFRP as a strengthening to increase the load carrying capacity of the corbel.

Four symmetrical rectangular corbels with different shear span a_F to depth d ratio were tested to the failure. It allowed to determine the effectiveness of CFRP sheets as an external reinforcement to increase the capacity of corbels depending on the value a_F/d ratio. Apart from the principal experimental research, focused on strengthened reinforced corbels, the investigation concerns material characteristics of high modulus carbon sheets and concrete cylinders with CFRP jackets was carried out.

1. Wstęp

Wsporniki stanowią ważny element podstawowej konstrukcji wsporczej, jakimi są słupy. W praktyce często zdarzają się sytuacje, że zmiana funkcji technologicznej

* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Krystyna Nagrodzka-Godycka, prof. Politechniki Gdańskiej.

obiektu powoduje konieczność przeniesienia przez wspornik większych sił od tych, na które został zaprojektowany. Również błędy wykonawstwa lub projektowania mogą powodować już w początkowej fazie eksploatacji intensywny rozwój zarysowania wsporników żelbetowych. Powyższe sytuacje powodują konieczność wykonania wzmocnień.

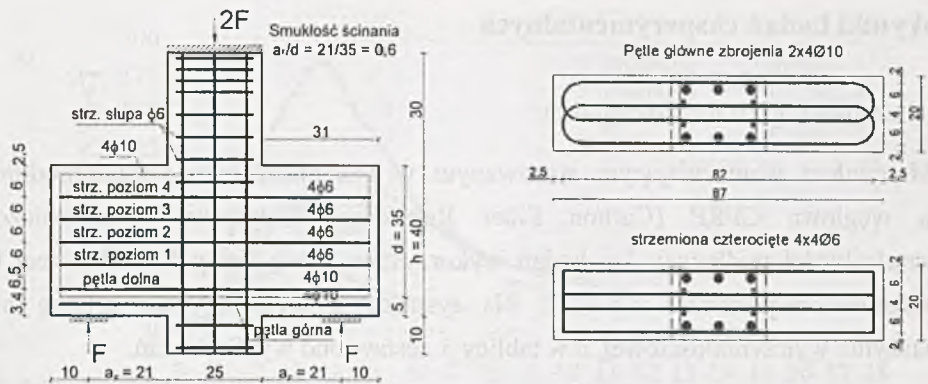
Najczęściej stosowane są wzmocnienia wsporników za pomocą prętów pasywnych wiotkich bądź też sprężających, przy czym te ostatnie wykazują największą efektywność [1]. Istnieje również możliwość wzmacniania wsporników żelbetowych sztywnymi profilami stalowymi [2].

W ostatnim czasie coraz częściej do wzmocnień stosuje się materiały kompozytowe. Do krótkich wsporników, z uwagi na ich geometrię, zastosowanie mają przede wszystkim maty. Wzmocnienia elementów konstrukcji – z uwagi na zginanie, ścianie czy ściskanie – doczekały się opracowanych metod obliczeniowych [3, 4, 5], częściowo zweryfikowanych badaniami eksperymentalnymi. W przypadku wsporników, z uwagi na ich złożony charakter pracy, skuteczność tych wzmocnień w aspekcie przyrostu nośności wspornika nie jest do końca poznana [6].

Opisane w niniejszej pracy badania miały na celu eksperymentalne sprawdzenie efektywności wzmocnień wsporników słupa o zmiennej smukłości ścinania za pomocą mat kompozytowych.

2. Program badań eksperymentalnych

Program badawczy obejmował cztery prostokątne, symetryczne wsporniki słupa, różniące się smukłością ścinania ($a_F/d = 1,0; 0,6; 0,3$ i $0,2$). Wewnętrzne zbrojenie głównie wsporników stanowiły dwa poziomy stalowych prętów w kształcie pętli (po dwie w każdym poziomie), łącznie ($2 \times 4\phi 10$, $f_y = 407$ MPa), oraz cztery poziomy strzemion czterociętych $\phi 6$ (łącznie $4 \times 4\phi 6$; $f_y = 418,7$ MPa) wraz z dwoma prętami konstrukcyjnymi ($2\phi 10$, $f_y = 413$ MPa). Zmiana smukłości ścinania osiągana była przez zmianę wysięgu wspornika a_F . Wysokość i szerokość wspornika miały stałą wartość, odpowiednio $h = 40$ cm, $b = 20$ cm. Beton wsporników w chwili badania elementów miał średnią wytrzymałość $f_c = 26,3$ MPa (wyniki badań przedstawiono w rozdziale 3.2). Geometrię, zbrojenie oraz sposób obciążania elementu Wp – II przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Geometria, zbrojenie i sposób obciążania badanych wsporników
 Fig. 1. Geometry of corbels, details of steel reinforcement and load applying location

Wsporniki były wstępnie obciążane do zarysowania siłą eksploatacyjną, wynoszącą ok. $0,6 F_{Vu, sw}$ gdzie $F_{Vu, sw}$ była wartością siły niszczonej określonej na tzw. wsporniku-świadku (bez wzmocnień matami). Siły niszczące wsporniki-świadki określone były we wcześniej przeprowadzonych badaniach. W tabeli 1 przedstawiono siły niszczące te wsporniki oraz wartości sił, do których obciążano wsporniki przeznaczone do wzmocnień.

Tabela 1

Wartości sił niszczących wsporniki bez wzmocnień i sił wstępnie obciążających
 wsporniki przed wzmocnieniami

Obciążenie [kN]	Wp-I-m	Wp-II-m	Wp-III-m	Wp-IV-m
Siła niszcząca $F_{Vu, sw}$	300	450	600	720
Siła eksploatacyjna $0,6 F_{Vu, sw}$	180	270	360	432

Zarysowane wsporniki wzmocniane były jedną warstwą wysokomodułowej maty węglowej (z zakładem wynoszącym 15 cm) o szerokości 30 cm. Została ona zastosowana w celu zmniejszenia rozwarcia rys uprzednio obciążonego i następnie odciążonego wspornika. Tak wzmocnione wsporniki ponownie obciążano aż do zniszczenia, kontrolując przy tym odkształcenia stali zbrojeniowej, betonu i maty. Jednocześnie w taki sam sposób oklejono betonowe walce $\phi 150/300$ mm w celu określenia wytrzymałości na ściskanie tzw. betonu skrupowanego (*confined concrete*) – betonu w koszulce CFRP (z ograniczeniem odkształceń poprzecznych za pomocą mat).

Przeprowadzono również badania na rozciąganie mat CFRP stosowanych do wzmocnień wsporników, przy czym badano próbki mat oryginalnych oraz mat nasączonych klejem stosowanym w badaniach.

3. Wyniki badań eksperymentalnych

3.1. Badanie CFRP na rozciąganie

Materiałem wzmacniającym stosowanym w badaniach była wysokomodułowa mata węglowa CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) o ograniczonej odkształcalności podłużnej. Do badań wykorzystano matę firmy S&P C sheet 640 o parametrach podanych tabeli 2. Na rysunku 2 przedstawiono próbkę maty w maszynie wytrzymałościowej, a w tablicy 3 zestawiono wyniki badań.

Tabela 2

Charakterystyka zastosowanej maty C sheet 640

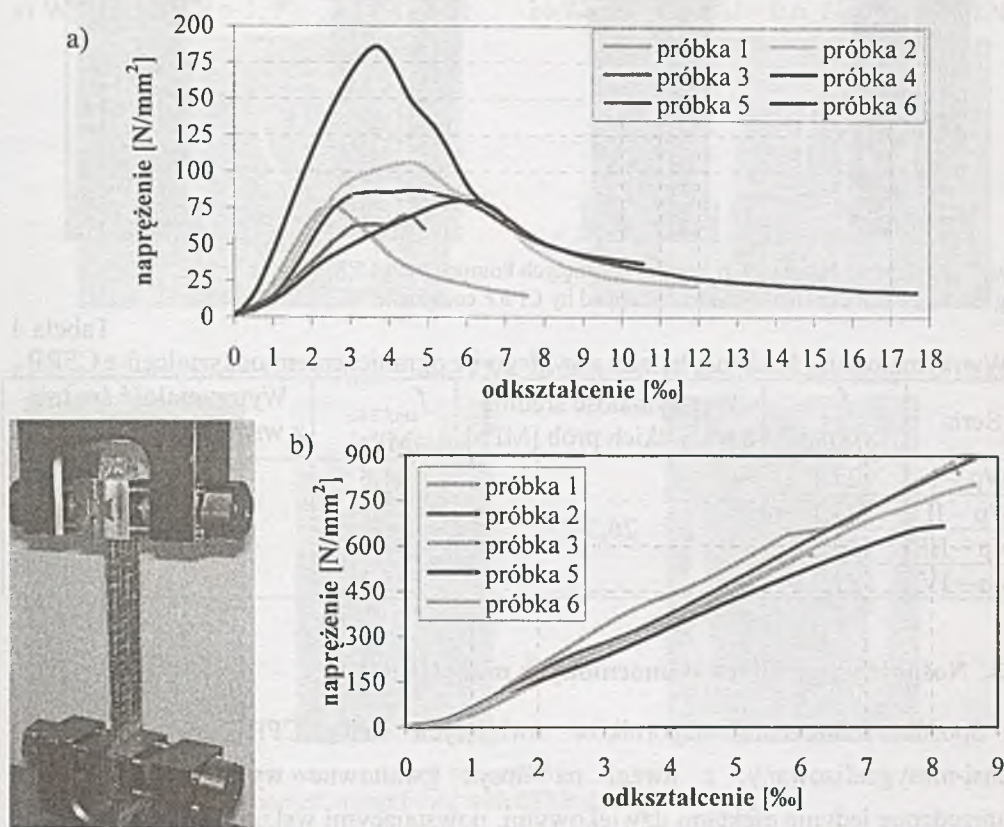
Moduł sprężystości	640	[kN/mm ²]
Wytrzymałość na rozciąganie	2650	[N/mm ²]
Masa włókien (kierunek główny)	400	[g/m ²]
Wydłużenie przy zniszczeniu	0,4	[%]
Grubość do wymiarowania (masa włókien/gęstość)	0,19	[mm]

Tabela 3

Wyniki badań maty C sheet 640 na rozciąganie

Rodzaj i szerokość próbki	Liczba próbek	Średnia z naprężeń maksymalnych [N/mm ²]	Średnie odkształcenia dla największych naprężeń [%]
bez kleju 50 mm	6	100,80	4,27
z klejem 50 mm	6	764,87	7,98
z klejem 100 mm	3	787,95	10,71
S&P	–	2650	4,0

Poddane rozciąganiu próbki maty z klejem niezależnie od szerokości niszczyły się w sposób gwałtowny. Zależność naprężenie-odkształcenie miała liniowy przebieg aż do zniszczenia na skutek zerwania włókien. W przypadku rozciągania maty bez kleju zniszczenie następowało wcześniej i nieco łagodniej, a przebieg zależności σ – ϵ był odmienny, co zostało uwidocznione na rysunku 2. W obu przypadkach zaobserwowano uszkodzenie się włókien w szczękach maszyny wytrzymałościowej, co powodowało uzyskanie badań z naprężeń znacznie mniejszych od podawanych przez producenta.



Rys. 2. Próbkę maty CFRP w maszynie wytrzymałościowej oraz zależność $\sigma(\epsilon)$ dla próbek maty szerokości 50 mm: a) bez kleju, b) z klejem

Fig. 2. CFRP specimen in testing machine and stress-strain curves for CFRP 50 mm width samples: a) without epoxy resin, b) with epoxy resin

3.2. Beton w koszulce CFRP

Owinięcie betonu matą CFRP spowodowało ograniczenie poprzecznych odkształceń betonowego walca. Średnia wytrzymałość betonu w koszulce CFRP wyniosła 39,6 MPa, co stanowiło wzrost nośności o 50,5% w stosunku do betonu bez ograniczeń odkształcalności. Tak znacznego efektu w zakresie zwiększenia wytrzymałości w przypadku wsporników nie należy oczekiwać. Wytrzymałość betonu na ściskanie dla wsporników o różnej smukłości ścinania zestawiono w tabeli 4.

Zastosowanie zakładu materiału kompozytowego o długości 150 mm okazało się wystarczające, bowiem nie zaobserwowano zjawiska delaminacji podczas badań walców na ściskanie.

Poniżej na rysunkach przedstawiono wygląd walcowych próbek betonowych w koszulce z CFRP po zniszczeniu.



Rys. 3. Niszczenie betonowych walców owiniętych kompozytem CFRP

Fig. 3. Failure of concrete cylinders wrapped by CFRP composite

Tabela 4

Wytrzymałość na ściskanie betonu zwykłego i z ograniczeniem odkształceń z CFRP

Seria	f_{cm} [MPa]	Wytrzymałość średnia z wszystkich prób [MPa]	$f_{cm,CFRP}$ [MPa]	Wytrzymałość średnia z wszystkich prób [MPa]
Wp – I	27,1	26,3	44,8	39,6
Wp – II	24,1		41,2	
Wp – III	26,3		37,1	
Wp – IV	27,7		35,2	

3.3. Nośność wsporników wzmocnionych matą CFRP

Sposób zniszczenia wsporników owiniętych matą CFRP określono jako quasi-niesygnalizowany, z uwagi na dosyć gwałtowne wyczerpanie nośności poprzedzone jedynie efektami dźwiękowymi, powstającymi wskutek odkształcania się laminatu z maty węglowej i żywicy epoksydowej. Zbliżające się zniszczenie poprzedzone było jedynie uplastycznieniem się stali zbrojenia głównego, co jest trudne do zaobserwowania w rzeczywistych warunkach pracy konstrukcji. Na rysunku 4 pokazano sposoby zniszczenia wzmocnionych elementów.

Dla większych wysięgów (wsporniki Wp – I – m $a_F/d = 1$ i Wp – II – m $a_F/d = 0,6$, włókna maty ułożone pionowo) zniszczenie powłoki kompozytowej występowało w strefie rozciąganej w postaci pionowego pęknięcia i ulegało zakrzywieniu zgodnie z nachyleniem myślowo wydzielonego krzyżulca ściskanego dopiero od połowy wysokości wspornika.

Zaobserwowano, że dla wsporników o małym wysięgu ($a_F/d \leq 0,3$, pozioma aplikacja maty CFRP) przebieg linii zniszczenia materiału kompozytowego najczęściej znajduje się w okolicy koncentracji naprężeń, czyli w pobliżu krawędzi wspornika, mimo tego że sama rysa niszcząca w betonie przebiegała wzdłuż betonowego krzyżulca ściskanego, widocznego na rysunku 4.

a) Wp-I-m ($a_F/d = 1, F_{Vu,exp} = 312 \text{ kN}$)



b) Wp-II-m ($a_F/d = 0,6, F_{Vu,exp} = 443 \text{ kN}$)



c) Wp-III-m ($a_F/d = 0,3, F_{Vu,exp} = 600 \text{ kN}$)

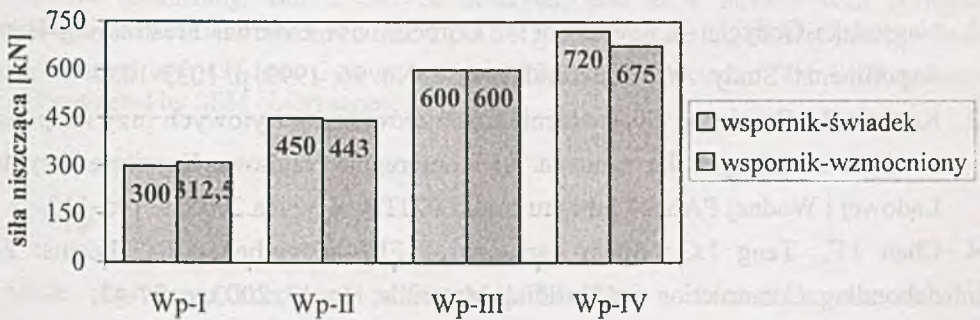


d) Wp-IV-m ($a_F/d = 0,2, F_{Vu,exp} = 375 \text{ kN}$)



Rys. 4. Sposób zniszczenia wzmocnionych wsporników

Fig. 4. Failure mode of corbels strengthened with CFRP sheets



Rys. 5. Efektywność wzmocnienia wsporników: zestawienie wyników eksperymentalnych wsporników-świadków i wsporników wzmocnionych matą CFRP

Fig. 5. Effectiveness of CFRP strengthening of corbels: experimental results comparison of corbels with and without CFRP sheets

Zwiększenie nośności o 4,16% w stosunku do nośności wspornika-świadka zaobserwowano jedynie dla elementu Wp – I – m ($a_F/d = 1,0$), gdzie charakter pracy wspornika powodował odkształcenia w betonie umożliwiające wcześniejsze włączenie się do współpracy zastosowanego kompozytu w stosunku do wsporników o mniejszej smukłości ścinania.

4. Wnioski

Badania wytrzymałościowe betonowych walców w koszulce z maty CFRP wykazały ponad 50% przyrost wytrzymałości na ściskanie w stosunku do zwykłych walców, co nie przekładało się jednak na wzrost nośności wzmocnionych wsporników.

Odształcenia podłużne betonowych walców owiniętych matą CFRP, odpowiadające maksymalnym naprężeniom, wyniosły w badaniach ok. 2,6‰ i były większe od takich samych walcowych próbek betonowych ($\varepsilon_c = 2,2\text{‰}$).

Zewnętrzne zbrojenie w postaci maty nie włączało się do współpracy w przenoszeniu obciążeń odpowiednio wcześniej i nie stanowiło wzmocnienia typu aktywnego (zwiększającego nośność).

Wyniki potwierdzają skuteczność takiego zabiegu w zakresie „biernej naprawy” wcześniej zarysowanego wspornika. Mata CFRP może również zabezpieczać taki wspornik przed korozją w środowisku agresywnym.

BIBLIOGRAFIA

1. Nagrodzka-Godycka K.: Wzmacnianie wsporników żelbetowych. Przegląd Budowlany, nr 5, 1997, s. 11-13.
2. Nagrodzka-Godycka K.: Behavior of Corbels with External Prestressing Bars – Experimental Study. ACI Structural Journal, No. 96, 1999, p. 1033-1039.
3. Kotynia R.: Graniczne odształcenia materiałów kompozytowych przy odspojeniu w ujęciu normowym dla zginania. LI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Łąkowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2005, s. 105-112.
4. Chen J.F., Teng J.G.: Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. Construction and Building Materials, No. 17, 2003, p. 27-41.
5. Lin H.J., Liao C.I.: Compressive strength of reinforced concrete column confined by composite material. Composite Structures, No. 65, 2004, p. 239-250.
6. Campione G., La Mendola L., Papia M.: Flexural behaviour of concrete corbels containing steel fibers or wrapped with FRP sheets. Materials and Structures No. 38, 2005, p. 617-625.