ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: BUDOWNICTWO z. 101 Nr kol. 1595

Tomasz WAŚNIEWSKI*
Politechnika Łódzka

WSTĘPNE BADANIA NOŚNOŚCI NA ŚCINANIE ŻELBETOWYCH BELEK WZMACNIANYCH MATERIAŁAMI CFRP

Streszczenie. Badaniu poddano cztery belki wzmocnione na ścinanie za pomocą taśm i mat z materiałów CFRP. Celem badań było określenie efektywności zbrojenia kompozytowego przy różnych sposobach jego zakotwienia. Wykazano, że o nośności strzemion CFRP decyduje przede wszystkim jego zakotwienie.

PRELIMINARY SHEAR LOAD CAPACITY TESTS OF STRENGTHENED RC BEAMS WITH CFRP COMPOSITES

Summary. Four beam strengthened by CFRP strips for shear are presented. The aim of this study are to investigate effectivity of CFRP strips on the shear capacity of strengthened RC beams. The test results indicate that the anchorage of composite stirrups influences on the beam shear load capacity.

1. Wprowadzenie

Problem wzmacniania belek żelbetowych na tzw. „ścinanie" za pomocą taśm i kształtek z włókien węglowych CFRP jest bardzo złożony, a efekt wzmocnienia zależy od wielu czynników.

Głównym czynnikiem decydującym o skuteczności zewnętrznego zbrojenia kompozytowego CFRP jest jego ilość i sposób ukształtowania na powierzchni belki. Jeżeli taśmy zostaną naklejone jedynie na bocznych powierzchniach belki, co jest najprostsze ze względów technologicznych, do zniszczenia dochodzi na skutek odspojenia taśm od betonu. Stopień wykorzystania zbrojenia CFRP w tym przypadku jest bardzo mały, rzędu kilkunastu

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Maria E. Kamińska.

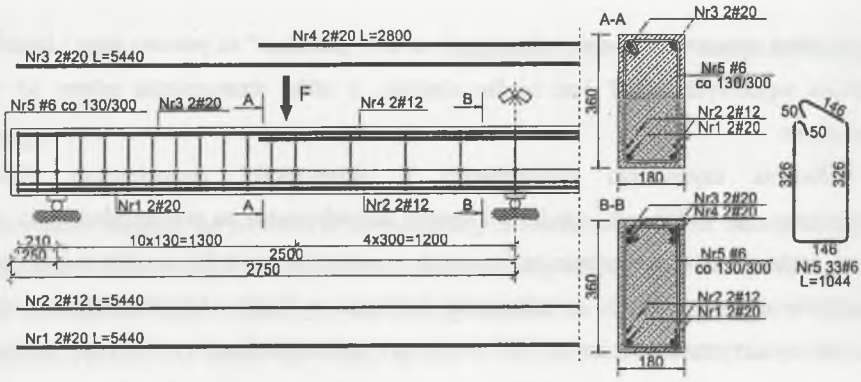
procent. Jeżeli zewnętrzne strzemiona z włókien węglowych w postaci taśm, kształtek lub mat obejmą cały przekrój i zostanie zapewnione odpowiednie ich zakotwienie, to stopień wykorzystania wytrzymałości materiału CFRP znacznie wzrasta. W niektórych przypadkach może nawet dojść do zerwania taśm [1-3].

W laboratorium Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej, w ramach projektu badawczego 8 T07E 006 21 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych, przeprowadzono badania, które miały służyć ustaleniu, przy jakich odkształceniach następuje odspojenie zewnętrznego zbrojenia poprzecznego od powierzchni betonu i jaki jest mechanizm tego procesu. Badaniom poddano belki dwuprzęsłowe, wzmocnione na ścinanie zewnętrznym zbrojeniem CFRP przy podporze środkowej, a więc w obszarze działania znacznego momentu zginającego i dużej siły tnącej.

Opisane poniżej badania stanowią uzupełnienie wyżej wymienionych. Badaniu poddano niezniszczone przęsła belek ciągłych przy zmienionym schemacie statycznym układu. Celem badań było określenie efektywności zbrojenia zewnętrznego przy różnych sposobach jego zakotwienia i porównanie wyników z uzyskanymi wcześniej. Analizie poddano także odkształcenia zbrojenia CFRP oraz odkształcenia główne i postaciowe betonu, co jest omawiane w innym referacie zamieszczonym w tym tomie.

2. Opis badań

Przedmiotem badań opisanych w [6] było 5 pięcioprzęsłowych belek żelbetowych o wymiarach i zbrojeniu jak na rys. 1.



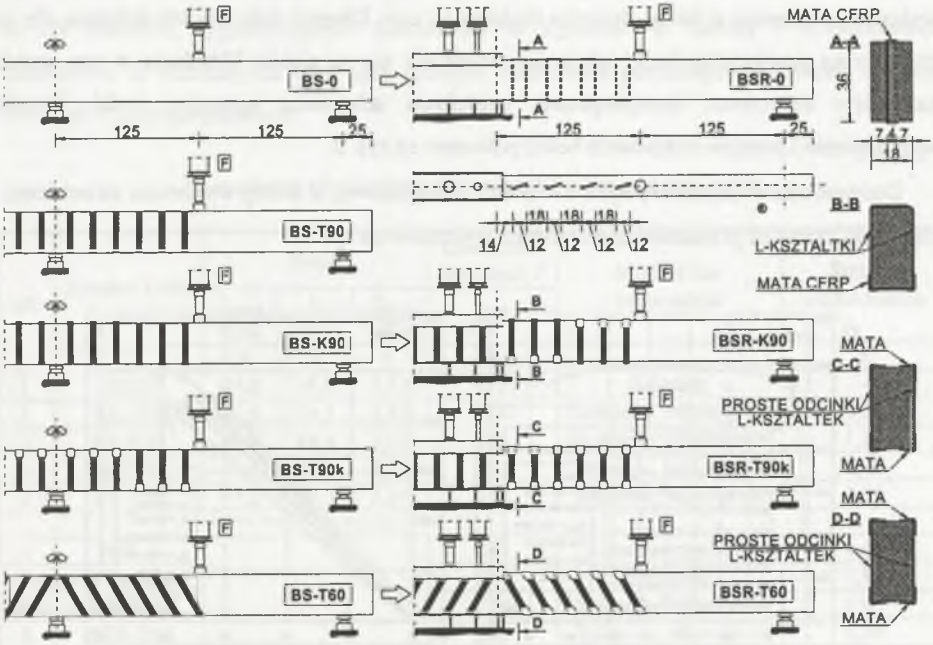
Rys. 1. Wymiary i zbrojenie belek
Fig. 1. Dimensions and reinforcement of beams

Geometria i zbrojenie belek zostały tak dobrane, aby do zniszczenia dochodziło na skutek wyczerpania nośności krzyżulców rozciąganych przy podporze środkowej.

Zbrojenie poprzeczne w sąsiedztwie tej podpory przyjęto zatem zaledwie 2x #6 co 300 mm (ρ_w = 0,001), i te właśnie strefy wzmacniano zewnętrznymi strzemionami z włókien węglowych. Jedną belkę pozostawiono niewzmocnioną jako belkę porównawczą.

Wszystkie wzmocnione belki zniszczyły się w ten sam sposób przez nagłe odspojenie zewnętrznych strzemion CFRP. Temu odspojeniu towarzyszył gwałtowny rozwój rysy ukośnej i zmiażdżenie betonu na jej końcu. Następowało to losowo tylko z jednej strony podpory, drugie przęsło było zarysowane, ale strzemiona nie były odspojone od powierzchni betonu. Te właśnie przęsła belek obciążano ponownie, zmieniając schemat statyczny z belki dwuprzęsłowej na jednoprzęsłową, przy niezmienionym rozkładzie sił wewnętrznych. Uzyskano to poprzez zamocowanie belki w miejscu pierwotnej podpory pośredniej.

W badaniu belek dwuprzęsłowych zbrojenie zewnętrzne z włókien węglowych było wykonane z kształtek Sika®CarboShear (belka BS-K90) lub prostych odcinków ramion tych kształtek (pozostałe belki). Układano je prostopadle lub pod kątem 60° do podłużnej osi belki, w rozstawie 200 mm (rys. 2).



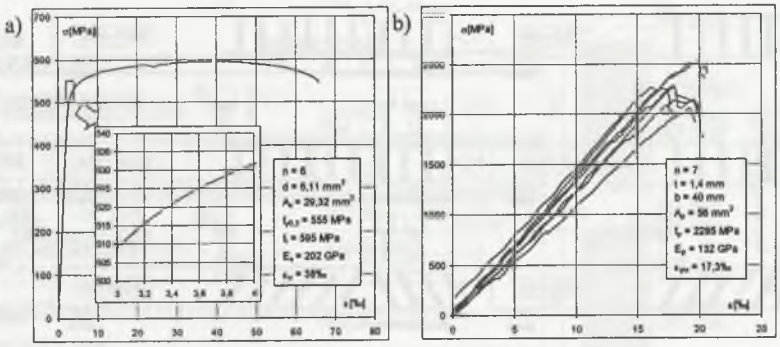
Rys. 2. Sposoby wzmocnienia i przyjęte oznaczenia – belki dwu- i jednoprzęsłowe
Fig. 2. Modes of strengthening and beam symbols – double and single span beams

Strzemiona kompozytowe były przyklejane tylko na bocznych powierzchniach belek (BS-T90 i BS-T60) lub dodatkowo kotwione, ale tylko w obszarze stref rozciąganych przekroju belki, nakładającymi się ramionami samych kształtek (BS-K90, długość zakładu 140 mm) lub za pomocą maty SikaWrap®Hex-230C (BS-T90k, mata o szerokości 300 mm, złożona sześciokrotnie, zakłady po 60 mm na kształtce i powierzchni belek).

Jako jednoprzęsłowe zbadano cztery belki, dokonując w trzech z nich modyfikacji istniejącego zbrojenia CFRP, tzn. dodatkowo kotwiąc je za pomocą maty SikaWrap®Hex-230C. W belkach BSR-T90k i BSR-T60 taśmy zakotwiono punktowo na wszystkich końcach strzemion (mata o szerokości 300 mm, złożona sześciokrotnie, zakłady po 60 mm na kształtce i powierzchni belek). W belce BSR-K90 zrealizowano zakotwienie przez całą szerokość belki za pomocą tak samo ułożonej maty, łączącej końce przeciwległych strzemion. Uzyskano w ten sposób zbrojenie poprzeczne ciągłe na obwodzie belki. W miejscach zakotwień krawędzie belek wcześniej zaokrąglano za pomocą dodatkowej warstwy kleju SikaDur®330.

W inny sposób przeprowadzono wzmocnienie belki BSR-0 (pierwotnie belka porównawcza). W elemencie tym wykonano zbrojenie wewnętrzne z maty SikaWrap®Hex-230C. Nasączoną klejem matę o szerokości 150 mm zwinięto w rulon i przeciągnięto przez wykonane wcześniej w belce otwory o średnicy 12 mm. Długość rulonów tak dobrano, aby po zagięciu na powierzchni belki ich końce nakładały się na siebie. Uzyskano w ten sposób zamknięte strzemiona kompozytowe, częściowo schowane wewnątrz belki. Sposób wzmocnienia i przyjęte oznaczenia belek pokazano na rys. 2.

Doświadczalne charakterystyki σ - ε stali zbrojeniowej, z której wykonano strzemiona, i materiału kształtek przedstawiono w formie wykresów na rys. 3.



Rys. 3. Doświadczalne charakterystyki σ - ε: a) stal strzemion, b) kształtki CFRP
Fig. 3. Experimental σ - ε relationships: a) steel of stirrups, b) CFRP strips

3. Mechanizmy zniszczenia belek

W badaniach belek dwuprzęsłowych [6] wszystkie wzmocnione belki zniszczyły się w ten sam sposób przez nagłe odspojenie zewnętrznych strzemion CFRP. Temu odspojeniu towarzyszył gwałtowny rozwój rysy ukośnej, zmiażdżenie betonu na jej końcu w strefie ściskanej i zerwanie wewnętrznych stalowych strzemion. Takie zniszczenie w [4] określono jako ścinająco – ściskające.

W ponownym badaniu niezniszczonych przęseł, ze zmodyfikowanym zbrojeniem kompozytowym, mechanizm zniszczenia nie uległ zmianie w przypadku dwóch belek: BSR-T60 i BSR-T90k. Odspojenie punktowo zakotwionych strzemion było gwałtowne, następowało wyrywanie zakotwień wraz z otuliną (rys.4). Belka BSR-K90, o ciągłym na obwodzie kompozytowym zbrojeniu poprzecznym, zniszczyła się na zginanie, a kompozytowe strzemiona pozostały nienaruszone.

Mechanizm zniszczenia belki BSR-0 nie był jednoznaczny, ponieważ szerokie rysy ukośne pojawiły się jednocześnie w strefie wzmacnianej strzemionami wewnętrznymi CFRP oraz w strefie silnego zbrojenia stalowego, czemu towarzyszyło także dużo rys prostopadłych do osi elementu, sygnalizujących zniszczenie na zginanie. W tablicy 1 przedstawiono zestawienie sił niszczących oraz opis sposobu zniszczenia poszczególnych belek zarówno dwu-, jak i jednoprzęsłowych.

Tablica 1

Zestawienie sił niszczących i sposobów zniszczenia belek

Lp.	Symbol belki	Beton			Obciążenie niszczące F	Mechanizm zniszczenia	Stopień wzmocnienia
		$f_{c,cube}$	f_c	$f_{ct,sp}$	kN		
		MPa	MPa	MPa			
	1	3	4	5	6	7	8
1	BS-0	45,8	39,0	3,13	175	Ścinanie	-
2	BS-T90	42,0	39,5	3,36	210	Ścinanie, odspojenie	1,20
3	BS-K90	49,2	44,9	3,83	216	Ścinanie, odspojenie	1,23
4	BS-T90k	40,4	38,3	3,13	204	Ścinanie, odspojenie	1,16
5	BS-T60	47,2	39,3	3,24	238	Ścinanie, odspojenie	1,36
6	BSR-0				287	Ścinanie, zginanie	1,64
7	BSR-K90				317	Zginanie	1,81
8	BSR-T90k				258	Ścinanie, odspojenie	1,47
9	BSR-T60				295	Ścinanie, odspojenie	1,68

Rys. 4. Widok odspojonych taśm i zakotwień belek BSR-T60 i BSR-T90k
Fig. 4. View of debonded strips and anchorages of BSR-T60 and BSR-T90k beams

4. Analiza obliczeniowa

Wyniki badania potwierdziły zasadę obliczeń przyjętą w raporcie *fib* [5], potwierdzoną w [6], że nośność elementu przy wzmacnianiu na ścinanie można określić jako sumę nośności betonu, zbrojenia stalowego i zbrojenia kompozytowego:

$$V_R = V_C + V_w + V_f \tag{1}$$

przy czym tak określone V_R nie może przekroczyć nośności krzyżulca ściskanego.

Poniżej określono obliczeniowo odkształcenia zbrojenia kompozytowego, przyjmując kąt nachylenia krzyżulców rozciąganych $\theta = 45°$, zgodnie z zaleceniem raportu [5] i wynikami badań. Możemy założyć na podstawie opracowania [6], że siła poprzeczna przenoszona przez beton wynosi około 62,1kN. Siły poprzeczne przenoszone odpowiednio przez strzemiona stalowe i kompozytowe możemy wyrazić, tak jak to uczyniono w [6] jako:

$$V_w = \frac{A_{sw}}{s_s} 0,9 d \sigma_s = \frac{2 \cdot 29,3 \cdot 10^{-6}}{0,30} \cdot 0,9 \cdot 0,32 \sigma_s \cdot 10^3 = 0,056 \sigma_s \tag{2}$$

$$V_f = \frac{A_p}{s_p} 0,9 d E_p \varepsilon_p = \frac{2 \cdot 56 \cdot 10^{-6}}{0,20} \cdot 0,9 \cdot 0,32 \cdot 132 \cdot 10^6 \varepsilon_p \cdot 10^{-3} = 21,29 \varepsilon_p \tag{3}$$

Odkształcenia efektywne obliczeniowe, jednakowe dla zbrojenia stalowego i kompozytowego, należy dobrać metodą iteracyjną ze względu na nieliniową charakterystykę σ_s - ε_s stali strzemion. We wzorach (2) i (3) σ_s należy wyrażać w MPa, a ε_p w ‰.

W odniesieniu do belki BSR-T90k, zakładając odkształcenia stali i strzemion $\varepsilon_p = \varepsilon_s =$ 3,4‰, przy których naprężenia w strzemionach stalowych σ_s = 520MPa, (por. rys 3a) otrzymuje się

$V_{w+f} = 0,056\sigma_s + 21,29\varepsilon_p = 0,056 \cdot 520 + 21,29 \cdot 3,4 = 101,5kN$, co odpowiada wielkości

$$V_{w+f,test} = F_{test} - R_{test} - V_{c,test} = 258 - 94 - 62,1 = 101,9kN$$

W przypadku belki BSR-T60 musimy uwzględnić pochylenie strzemion pod kątem α = 60°,więc

$$V_f = 21,29\varepsilon_p(\cot\Theta + \cot\alpha)\sin\alpha = 21,29 \cdot 1,366\varepsilon_p = 29,08\varepsilon_p$$

a zatem przy takich samych założonych odkształceniach jak wyżej

$V_{w+f} = 0,056\sigma_s + 29,08\varepsilon_p = 29,1 + 29,08 \cdot 3,4 = 128,0kN$, co odpowiada wielkości

$$V_{w+f,test} = F_{test} - R_{test} - V_{c,test} = 295 - 105 - 62,1 = 127,9kN$$

W belce BSR-0 doświadczalna siła ścinająca wynosiła:

$$V_{w+f,test} = F_{test} - R_{test} - V_{c,test} = 287 - 93 - 62,1 = 131,9kN$$

Założono odkształcenia w strzemionach stalowych i kompozytowych $\varepsilon_p = \varepsilon_m$ = 12‰, odpowiadające wynikom pomiarów, zatem naprężenia wynoszą odpowiednio σ_s = 570MPa i σ_m = 2760MPa (E_m=230GPa). Przy polu przekroju maty $A_f = 0,15 \cdot 0,00013 = 1,95 \cdot 10^{-5}m^2$ otrzymujemy

$$V_{w+f} = 0,056 \cdot 570 + \frac{0,00013 \cdot 0,3}{0,3} \cdot 0,9 \cdot 0,32 \cdot 2760 \cdot 10^3 = 135,2kN \approx V_{w+f,test} = 131,9kN$$

5. Uwagi końcowe

W badaniu [6] udowodniono, iż kotwienie strzemion CFRP jedynie w strefie rozciąganej nie jest efektywne. Korzystniejsze okazało się kotwienie strzemion CFRP na obu końcach. W tym przypadku do zniszczenia dochodziło wprawdzie także przez odspojenie kompozytu od betonu w sposób bardzo gwałtowny, ale przy odkształceniach taśm około 30% większych w porównaniu do odkształceń strzemion niekotwionych. Powodowało to większy przyrost nośności belki ze względu na ścinanie.

Wykonanie strzemion CFRP jako ciągłych na obwodzie belki (BSR-K90) spowodowało znaczny wzrost nośności belki około 81%. Należy jednak zauważyć, że w tym przypadku belka zniszczyła się na zginanie i wynik nie odzwierciedla możliwości ciągłych strzemion kompozytowych, bo ich nośność nie mogła być wykorzystana.

W przypadku belki BSR-0, zbrojonej wewnętrznymi strzemionami z materiałów kompozytowych CFRP, wynik badania jest dyskusyjny, gdyż mechanizm zniszczenia nie został jasno określony, jednak skuteczność tego typu zbrojenia została potwierdzona.

Prowadzone badania mają charakter badań wstępnych. Kolejne badania elementów zbrojonych wewnętrznie strzemionami z mat CFRP pozwolą poznać dokładniej mechanizm zniszczenia i potwierdzić efektywność tego sposobu wzmocnienia. Metoda ta wydaje się być bardzo obiecująca ze względu na stosunkowo łatwy sposób aplikacji, zwłaszcza w przypadku belek teowych. Zbrojenie takie jest ponadto bardzo dobrze chronione przed ogniem i innymi czynnikami zewnętrznymi.

LITERATURA

1. Deniaud C., Cheng J.J.R.: Shear behavior of reinforced concrete T-beams with externally bonded fiber-reinforced polymer sheets. ACI Structural Journal. 2001/May-June 2001, p. 386-394.
2. Täljsten B.: Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets. Construction and Building Materials. 2003 Vol. 17, No. 1, p.15-26.
3. Chen J.F., Teng J.G.: Shear capacity of FRP – strengthened RC beams: FRP debonding. Construction and Building Materials. 2003 Vol. 17, No. 1, p.27-41.
4. Godycki – Ćwirko T.: Ścinanie w żelbecie. Arkady, Warszawa 1968.
5. FIB. Bulletin no 14, Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical Report, task group 9.3 FRP, July 2001, p.130.
6. Kamińska M.E., Kotynia R., Sowa Ł., Waśniewski T.: Efektywność wzmacniania belek żelbetowych na ścinanie materiałami kompozytowymi CFRP. XLIX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2003 (w druku).

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Krzysztof Dyduch

Abstract

The presented tests deal with shear load capacity of reinforced concrete beams with rectangular cross section. The beams were strengthened with CFRP composite strips and fabrics. Three different ways of the externally bonded CFRP strips and their anchorage were

assumed to strengthen beams for shear. One beam was strengthened with the internal CFRP fabrics and the others with externally bonded composite stirrups. The strips and fabrics were supplied by Sika®. The experimental programme consisted of four double span beams after shear failure in one span. After strengthening of the support region the other span of the beam was tested again. The aim of the study is to investigate the influence of CFRP strips anchorage on the shear capacity of strengthened beams. Failure modes of all beams are discussed. Comparison of experimental and analytical values of shear load capacities are presented.