

RENATA KOTYNIAKatedra Budownictwa Betonowego
Politechniki Łódzkiej

ANALIZA EFEKTYWNOŚCI WZMACNIANIA STREF PRZYPODPOROWYCH BELEK ŻELBETOWYCH WYKONANEGO ZA POMOCĄ WKLEJANIA MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

Opiniodawca: **prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski**

Praca dotyczy wzmacniania stref przypodporowych belek żelbetowych materiałami kompozytowymi CFRP, wklejanymi w bruzdy wykonane w betonowej otulinie tych elementów. Przedstawiono szczegółowy stan wiedzy w dziedzinie doświadczalnych badań elementów wzmocnionych na ścinanie tą metodą oraz przeprowadzono analizę efektów wzmocnienia w aspekcie wielu parametrów zmiennych.

1. Wprowadzenie

Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych metodą przyklejania materiałów kompozytowych fiber reinforced polymer (FRP) na powierzchni betonu, tzw. externally bonded reinforcement (EBR), jest coraz częściej stosowaną techniką podnoszenia nośności konstrukcji na zginanie i ścinanie. Gdy wzmacniany element narażony jest na działanie agresywnych warunków środowiskowych (substancji rozmrażających, chemicznych, wody morskiej) lub pola magnetycznego, właściwe jest użycie materiałów kompozytowych z włóknami węglowymi (CFRP) odpornych na te wpływy. Dodatkową zaletą tego typu zbrojenia jest niewielki ciężar, który znacząco skraca czas wykonania wzmocnienia. Wymiary taśm i mat CFRP pozwalają na krzyżowanie się w jednej płaszczyźnie zbrojenia prowadzonego w dowolnych kierunkach, na aplikację dowolnych długości wzmocnienia, oraz zapewniają niezmienność wyglądu elementu żelbetowego po wzmocnieniu.

Doświadczalne badania żelbetowych belek wzmacnianych na zginanie metodą EBR wykazały, że choć nośność kompozytów CFRP nie może być wykorzystana, to oczywiście obserwuje się zwiększenie sztywności i nośności wzmocnionych elementów. Powodem niskiej (zaledwie 35%) efektywności wzmocnienia metodą EBR jest sposób zniszczenia wzmocnionego elementu, na skutek nagłego odspojenia kompozytu od powierzchni betonu [1].

W celu zwiększenia tej efektywności zaproponowano technologię wklejania materiałów kompozytowych w betonową otulinę elementu żelbetowego, znaną pod nazwą near surface mounted reinforcement (NSMR), której główną zaletą jest zwiększenie powierzchni styku wklejanego kompozytu z betonem, co znacząco opóźnia odspojenie tego zbrojenia od powierzchni betonu. Do tego typu wzmocnień używane są kompozyty w postaci taśm o szerokości $10 \div 20$ mm i grubości $1,4 \div 2,0$ mm oraz pręty o przekroju okrągłym lub kwadratowym.

Nieliczne, opublikowane jak dotąd wyniki badań żelbetowych belek wzmocnionych na zginanie metodą NSMR, potwierdziły wzrost stopnia wykorzystania wytrzymałości na rozciąganie materiału kompozytowego z 35% (w metodzie EBR) do 85% (w metodzie NSM) [2, 3], a tym samym znacznie wyższą efektywność tej metody w porównaniu z dotychczas stosowanym wzmocnianiem zewnętrznym [4].

Podobnie jest, jeżeli wzmacnia się żelbetowe belki ze względu na tzw. ścinanie, a właściwie na główne naprężenia rozciągające. W takim wypadku, o efektywności wzmocnienia decyduje sposób ukształtowania zewnętrznego zbrojenia kompozytowego. Może ono być przyklejone jedynie na bocznych powierzchniach elementu, na wysokości tylko środka lub zakotwione w półce przekroju teowego. W pierwszym wypadku, stopień wykorzystania materiałów CFRP jest najmniejszy, gdyż do zniszczenia dochodzi na skutek odspojenia kompozytu [5]. Jeżeli zewnętrzne zbrojenie poprzeczne zostanie wykonane jako zamknięte, to może nawet dojść do jego zerwania, co oznacza pełne wykorzystanie nośności kompozytu. Innym sposobem zwiększenia efektywności wzmocnienia na ścinanie jest wklejanie zbrojenia kompozytowego w bruzdy wykonane w betonowej otulinie bocznych powierzchni belek (metoda NSMR).

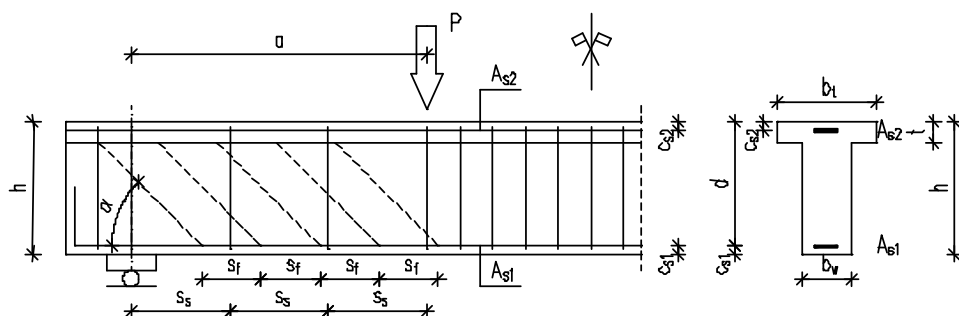
2. Badania doświadczalne

Badania żelbetowych belek wzmocnionych na ścinanie metodą NSM przeprowadzono jak dotąd zaledwie w trzech ośrodkach na świecie:

- University of Missouri-Rolla – A. Nanni, L. De Lorenzis, L. Rizzo [6], [8],
- University of Minho – J.A.O. Barros, S.J.E. Dias [7, 9, 10, 11],
- Politechnika Łódzka, Katedra Budownictwa Betonowego – R. Kotynia [12].

Analizowano w nich sposoby zniszczenia elementów, przyrost nośności i odkształcalność elementów wzmocnionych na ścinanie w zależności od następujących parametrów zmiennych: stopnia istniejącego stalowego zbrojenia poprzecznego ρ_s i podłużnego ρ_{sL} , stopnia zbrojenia kompozytowego ρ_f , jego rozstawu s_f , przekroju poprzecznego A_f , kąta nachylenia zbrojenia kompozytowego do podłużnej osi belki α , wymiarów i kształtu elementów żelbetowych (prostokątne, teowe), smukłości ścinania a/d oraz wytrzymałości betonu na ściskanie. Zestawienie dotychczasowych badań doświadczalnych belek żelbetowych o przekroju prostokątnym i teowym, wzmocnionych na ścinanie, zamieszczono w tabelach 1÷4.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat belki wzmocnionej na ścinanie z opisem wszystkich parametrów zmiennych uwzględnionych w badaniach. We wszystkich badanych belkach smukłość ścinania a/d wahała między 2,5 i 3,0.



Rys. 1. Schemat belki żelbetowej wzmocnionej na ścinanie metodą NSM

Fig. 1. Scheme of NSM shear strengthened RC beam

Z uwagi na niewielkie przekroje belek prostokątnych (200 x 200 mm [6] i 150 x 150 mm [7]), efekt skali zadecydował o tym, że analiza efektywności wzmocnienia na ścinanie była mało wiarygodna. Ponadto, z powodu niskiego stopnia zbrojenia podłużnego, elementy o przekroju 150 x 300 mm (patrz tabela 1), uległy zniszczeniu na zginanie. Dlatego w dalszej części pracy analizowane będą jedynie belki o przekroju teowym, które zniszczyły się wskutek ścinania.

W tabelach 2 i 4, zamieszczono porównanie obliczeniowych nośności belek na zginanie z nośnościami tych belek na ścinanie, co w kilku wypadkach potwierdza mechanizm ich zniszczenia ze względu na zginanie. Dla każdej z belek podano również stopień wzmocnienia, wyrażony stosunkiem nośności ścinania belki wzmocnionej i niewzmocnionej, który wahał się od 22% [6] do 125% [7] dla belek prostokątnych oraz od 11% [11] do 106% [8] dla belek teowych.

Tabela 1. Charakterystyka belek o przekroju prostokątnym

Table 1. Characteristic of beams with rectangular cross section

Belki prostokątne	A_{s1} mm ²	ρ_{s1} %	b_w / h	d_s / s_s	d_f / s_f $b_f / t_f / s_f$	α_f °	c_{s1} / c_{s2} mm	A_f mm ²	E_f	f_c
			mm	mm	mm				MPa	MPa
[6] De Lorenzis (2009), a/d=3,0 System wzmocnienia typu NSM: pręty CFRP o średnicy d _f =7,5mm i taśmy CFRP 16x2,0mm										
C	1520	4,39	200 / 201	6 / 160	-	-	37 / 31	-	-	29,3
NB90-73-a					Ø7,5 / 73	90		44	146	
NB90-73-b					Ø7,5 / 73	90				
NB90-45-b					Ø7,5 / 45	90				
NB45-146-a					Ø7,5 / 146	45				
NB45-73-a					Ø7,5 / 73	45				
NS90-73-a					16 / 2 / 73	90		32	227	
NS45-146-a					16 / 2 / 146	45				

Tabela 1. (cd.)

Table 1. (continuation)

Belki prostokątne	A _{s1} mm ²	ρ _{s1} %	b _w / h	d _s / s _s	d _f / s _f b _f / t _f / s _f	α _f °	c _{s1} / c _{s2} mm	A _f mm ²	E _f	f _c			
			mm	mm	mm				MPa	MPa			
[7] Barros (2006), a/d=2,53 System wzmocnienia typu NSM: taśmy CFRP 10x1,4 mm													
A10 R	314	0,75	150 / 300	-	-	-	20 / 18	14	166	49,2			
A10 S				6 / 300	-	-							
A10 VL				-	10 / 1,4 / 200	90							
A10 IL					10 / 1,4 / 300	90							
A12 R	452	1,08		6 / 150	-	-				20 / 18	14	166	56,2
A12 S				-	10 / 1,4 / 100	90							
A12 VL					10 / 1,4 / 150	45							
A12 IL				150 / 150	6 / 150	-							
B10 R	-	10 / 1,4 / 100	45										
B10 S		10 / 1,4 / 150	45										
B10 VL	452	1,08	6 / 75		-	-							
B10 IL			-		10 / 1,4 / 50	60							
B12 R					10 / 1,4 / 75	60							
B12 S													
B12 VL													
B12 IL													

A_{s1} – pole przekroju zbrojenia podłużnego, ρ_{s1} – stopień zbrojenia podłużnego, d_f – średnica pręta kompozytowego, b_f , t_f , s_f – szerokość, grubość i rozstaw zbrojenia kompozytowego, A_f – pole przekroju zbrojenia kompozytowego, α_f – kąt nachylenia zbrojenia kompozytowego do podłużnej osi belki, E_f – moduł sprężystości zbrojenia kompozytowego, b_w ,h_w – szerokość i wysokość przekroju belki, c_{s1}/c_{s2} – położenie osi zbrojenia podłużnego rozciąganego i ściskanego, odpowiednio względem rozciąganej i ściskanej krawędzi przekroju belki, f_c – wytrzymałość betonu na ściskanie

Tabela 2. Wyniki doświadczalnych badań belek o przekroju prostokątnym

Table 2. Test results of beams with rectangular cross section

Belki prostokątne	V_{flex}	V_{test}	$V_{f, test}$	V_{test} / V_{test0}	Θ_{test}	Typ zniszczenia
	kN	kN	kN			
[6] De Lorenzis (2009), a/d=3,0 System wzmocnienia typu NSM: pręty CFRP o średnicy $d_f=7,5$ mm i taśmy CFRP 16x2,0mm						
C	248,25	122,20	-	1,00	36	Ścinanie
NB90-73-a		176,40	54,20	1,44	50	Ścinanie
NB90-73-b		148,60	26,40	1,22	50	Ścinanie
NB90-45-b		150,80	28,60	1,23	50	Odspojenie bocznej otuliny
NB45-146-a		161,30	39,10	1,32	41	Ścinanie
NB45-73-a		150,20	28,00	1,23	50	Odspojenie bocznej otuliny,
NS90-73-a		172,70	50,50	1,41	50	Ścinanie
NS45-146-a		154,90	32,70	1,27	41	Odspojenie bocznej otuliny, zginanie

[7] Barros (2006), a/d=2,53 System wzmocnienia typu NSM: taśmy CFRP 10x1,4mm							
A10 R	61,19	50,20	-	1,00	Brak rejestracji rys	Ścinanie	
A10 S		84,68		1,69		Zginanie	
A10 VL		79,32		29,12		1,58	Zginanie
A10 IL		78,95		28,75		1,57	Zginanie
A12 R	108,62	58,25	-	1,00		Ścinanie	
A12 S		107,52		1,85		Ścinanie	
A12 VL		117,56		59,31		2,02	Zginanie
A12 IL		131,19		72,94		2,25	Zginanie
B10 R	56,82	37,01	-	1,00		Ścinanie	
B10 S		60,32		1,63		Zginanie	
B10 VL		65,61		28,60		1,77	Zginanie
B10 IL		60,22		23,21		1,63	Zginanie
B12 R	99,92	37,85	-	1,00		Ścinanie	
B12 S		79,55		2,10		Ścinanie	
B12 VL		69,60		31,75		1,84	Ścinanie
B12 IL		74,25		36,40		1,96	Ścinanie
V _{flex} – nośność belki na zginanie, V _{test} , V _{test0} – doświadczalna nośność na ścinanie, odpowiednio belki wzmocnionej i niewzmocnionej V _{f,test} – udział zbrojenia kompozytowego w nośności na ścinanie, Θ _{test} – kąt nachylenia rysy niszczącej							

Tabela 3. Charakterystyka belek o przekroju teowym

Table 3. Characteristic of beams with T- cross section

Belki teowe	A_{s1} mm ²	ρ_{s1} %	$b_w / h / b_t$ / h_t	d_s / s_s	d_f / s_f $b_f / t_f / s_f$	α_f °	c_{s1} / c_{s2} mm	A_f mm ²	E_f	f_c
			mm	mm	mm				MPa	MPa
[8] De Lorenzis (2001), a/d = 3,0 System wzmocnienia typu NSM: pręty CFRP o średnicy d _f =9,5mm										
BV	1293	2,38	153/407 / 281 /102	-	-	-	50,8/0	-	-	31,0
B90-7					Ø9,5 / 178	90		70,85	104,8	
B90-5					Ø9,5 / 127	90				
B90-5A					Ø9,5 / 127	90				
B45-7					Ø9,5 / 178	45				
B45-5					Ø9,5 / 127	45				
BSV				9,5 / 356	-	-	50,8/40	-	-	
BS90-7A					Ø9,5 / 178	90		70,85	104,8	
[9] Barros (2008), a/d = 2,53 System wzmocnienia typu NSM: taśmy CFRP 10x1,4mm										
2S-R	1874	2,92	180/400 / 450/100	6 / 300	-	-	44 / 24	-	-	31,1
2S-3LV					10 / 1,4 / 267	90		14	166	
2S-5LV					10 / 1,4 / 160	90				
2S-8LV					10 / 1,4 / 100	90				
2S-3LI45					10 / 1,4 / 367	45				
2S-5LI45					10 / 1,4 / 220	45				
2S-8LI45					10 / 1,4 / 138	45				
2S-3LI60					10 / 1,4 / 325	60				
2S-5LI60					10 / 1,4 / 195	60				
2S-7LI60					10 / 1,4 / 139	60				

Table 3. (continuation)

[10] Barros (2007), a/d = 2,50 System wzmocnienia typu NSM: taśmy CFRP 10x1,4mm												
2S-R'	1809	2,79	180/400 / 450/100	6 / 300	-	-	40 / 25	-	-	18,6		
2S-7LV					10 / 1,4 / 114	90		14	166			
2S-4LI45					10 / 1,4 / 275	45						
2S-7LI45					10 / 1,4 / 157	45						
2S-4LI60					10 / 1,4 / 243	60						
2S-6LI60					10 / 1,4 / 162	60						
4S-R			6 / 180	-	-	14	166					
4S-7LV				10 / 1,4 / 114	90							
4S-4LI45				10 / 1,4 / 275	45							
4S-7LI45				10 / 1,4 / 157	45							
4S-4LI60				10 / 1,4 / 243	60							
4S-6LI60				10 / 1,4 / 162	60							
					mm	mm	mm			MPa	MPa	
[11] Barros (2009), a/d = 2,50 System wzmocnienia typu NSM: taśmy CFRP 10x1,4 mm												
2S-R''	1809	2,79	180/400 / 450/100	6 / 300	-	-	40 / 25	-	-	39,7		
2S-4LV					10 / 1,4 / 180	90		14	171			
2S-7LV					10 / 1,4 / 114	90						
2S-10LV					10 / 1,4 / 80	90						
2S-4LI45					10 / 1,4 / 275	45						
2S-7LI45					10 / 1,4 / 157	45						
2S-10LI45					10 / 1,4 / 110	45						
2S-4LI60					10 / 1,4 / 243	60						
2S-6LI60					10 / 1,4 / 162	60						
2S-9LI60					10 / 1,4 / 108	60						
[12] Kotynia (2007), a/d = 2,54 System wzmocnienia typu NSM: taśmy CFRP 15x1,4mm i 15x2,4mm												
BI-1	1256	2,66	150/360 / 286/60	6 / 200	-	-	45	45 / 25	-	-	39,5	
BI-2/3A					15 / 1,4 / 210	21			170	39,0		
BI-2/3B					15 / 2,4 / 360					36	163	39,0
BI-3/5A					15 / 2,4 / 210					36	163	38,5
BI-3/5B					15 / 1,4 / 120					21	170	38,5
BI-4/7A					15 / 1,4 / 80					21	170	40,0
BI-4/7B					15 / 2,4 / 140					36	163	40,0
BI-s4/5A					15 / 1,4 / 120					21	170	41,9
BI-s4/5B					15 / 2,4 / 140					36	163	41,9
s – belki ze strzemionami stalowymi przeciętymi podczas aplikacji kompozytów												

Tabela 4. Wyniki doświadczalnych badań belek o przekroju teowym

Table 4. Test results of beams with T-cross section

Belki teowe	V_{flex}	V_{tot}	V_f	V_{tot}/V_{tot0}	Θ	Typ zniszczenia
	(kN)			(-)	(°)	
[8] De Lorenzis (2001), $a/d = 3,0$ System wzmacnienia typu NSM: pręty CFRP o średnicy $d_f=9,5mm$						
BV	165,60	90,29	-	1,00	-	Ścinanie
B90-7		115,20	24,91	1,28	45	Ścinanie
B90-5		127,66	37,37	1,41	48	Ścinanie
B90-5A		185,70	95,41	2,06	45	Odspojenie bocznej otuliny
B45-7		165,47	75,18	1,83	43	Ścinanie
B45-5		177,92	87,63	1,97	41	Odspojenie bocznej otuliny,
BSV		153,23	0,00	1,00	45	Ścinanie
BS90-7A		206,83	53,60	1,35	55	Odspojenie bocznej otuliny, zginanie
[9] Barros (2008), $a/d = 2,53$ System wzmacnienia typu NSM: taśmy CFRP 10x1,4mm						
2S-R	296,61	189,00	-	1,00	35	Ścinanie
2S-3LV		189,60	0,60	1,00	38	Ścinanie
2S-5LV		214,20	25,20	1,47	43	Ścinanie
2S-8LV		237,60	48,60	1,63	42	Ścinanie
2S-3LI45		196,80	7,80	1,35	43	Ścinanie
2S-5LI45		230,40	41,40	1,58	38	Ścinanie
2S-8LI45		229,20	40,20	1,57	45	Ścinanie
2S-3LI60		224,40	35,40	1,54	41	Ścinanie
2S-5LI60		235,20	46,20	1,61	43	Ścinanie
2S-7LI60	243,60	54,60	1,67	42	Ścinanie	
[10] Barros (2007), $a/d = 2,50$ System wzmacnienia typu NSM: taśmy CFRP 10x1,4mm						
2S-R'	455,85	135,90	-	1,00	39	Ścinanie
2S-7LV		164,22	28,32	1,21	40	Ścinanie
2S-4LI45		169,80	33,90	1,25	40	Ścinanie
2S-7LI45		183,90	48,00	1,35	49	Ścinanie
2S-4LI60		168,96	33,06	1,24	38	Ścinanie
2S-6LI60		178,62	42,72	1,31	56	Ścinanie
4S-R		182,28	-	1,00	40	Ścinanie
4S-7LV		189,18	6,90	1,04	40	Ścinanie
4S-4LI45		208,32	26,04	1,14	43	Ścinanie
4S-7LI45		213,84	31,56	1,17	41	Ścinanie
4S-4LI60		207,36	25,08	1,14	47	Ścinanie
4S-6LI60		217,38	35,10	1,19	41	Ścinanie
[11] Barros (2009), $a/d = 2,50$ System wzmacnienia typu NSM: taśmy CFRP 10x1,4mm						
2S-R''	471,62	182,28	-	1,00	38	Ścinanie
2S-4LV		202,44	20,16	1,11	41	Ścinanie
2S-7LV		224,46	42,18	1,23	45	Ścinanie
2S-10LV		238,50	56,22	1,31	43	Ścinanie
2S-4LI45		235,68	53,40	1,29	50	Ścinanie
2S-7LI45		253,02	70,74	1,39	38	Ścinanie
2S-10LI45		267,90	85,62	1,47	40	Ścinanie
2S-4LI60		231,84	49,56	1,27	35	Ścinanie
2S-6LI60		236,64	54,36	1,30	42	Ścinanie
2S-9LI60		247,62	65,34	1,36	42	Ścinanie

Tabela 4. (cd.)

Table 4. (continuation)

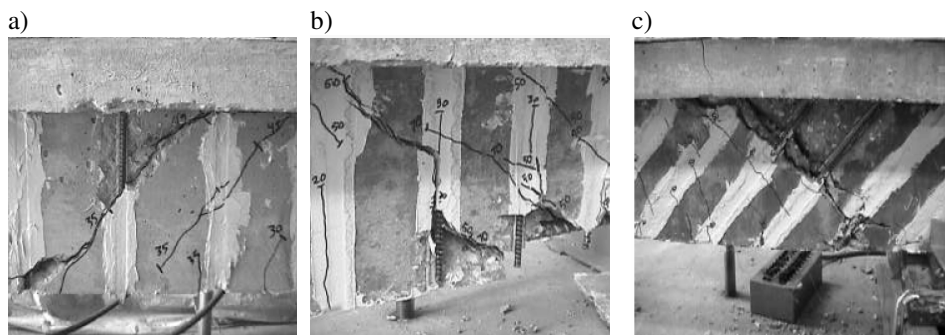
Belki teowe	V_{flex}	V_{tot}	V_f	V_{tot}/V_{tot0}	Θ (°)	Typ zniszczenia
[12] Kotynia (2007), a/d=2,54 System wzmocnienia typu NSM: taśmy CFRP 15x1,4mm i 15x2,4mm						
BI-1	215,87	125,46	-	1,00	39,5	Ścinanie
BI-2/3A		208,25	82,79	1,66	42	Ścinanie
BI-2/3B		176,59	51,13	1,41	42	Ścinanie
BI-3/5A		212,60	87,14	1,69	43	Ścinanie
BI-3/5B		234,10	108,64	1,87	48	Zginanie
BI-4/7A		216,52	91,06	1,73	50	Zginanie
BI-4/7B		216,52	91,06	1,73	49	Zginanie
BI-s4/5A		220,93	95,47	1,76	43	Zginanie
BI-s4/5B		220,93	95,47	1,76	43	Zginanie

3. Wyniki badań

3.1. Mechanizmy zniszczenia

Badania elementów wzmocnionych klejonymi prętami CFRP, potwierdziły występowanie trzech podstawowych mechanizmów zniszczenia na ścinanie. Belki niszczyły się na ogół na skutek odspojenia prętów CFRP [8]. To odspojenie poprzedzone było utratą przyczepności prętów do zaprawy klejowej i ukośnym zarysowaniem otaczającego je betonu (rys. 2, 3).

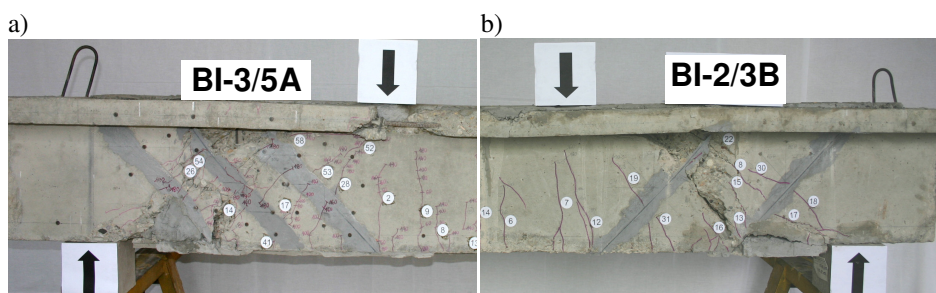
Tego sposobu zniszczenia można uniknąć zmniejszając rozstaw prętów kompozytowych, klejąc je pod kątem do podłużnej osi elementu [8, 12] (rys. 2c i 3a,b) lub kotwiąc ich końce w półce przekroju teowego [8], co znacząco poprawia warunki zakotwienia pręta przeciętego ukośną rysą.



Rys. 2. Widok zniszczonych belek teowych [8]

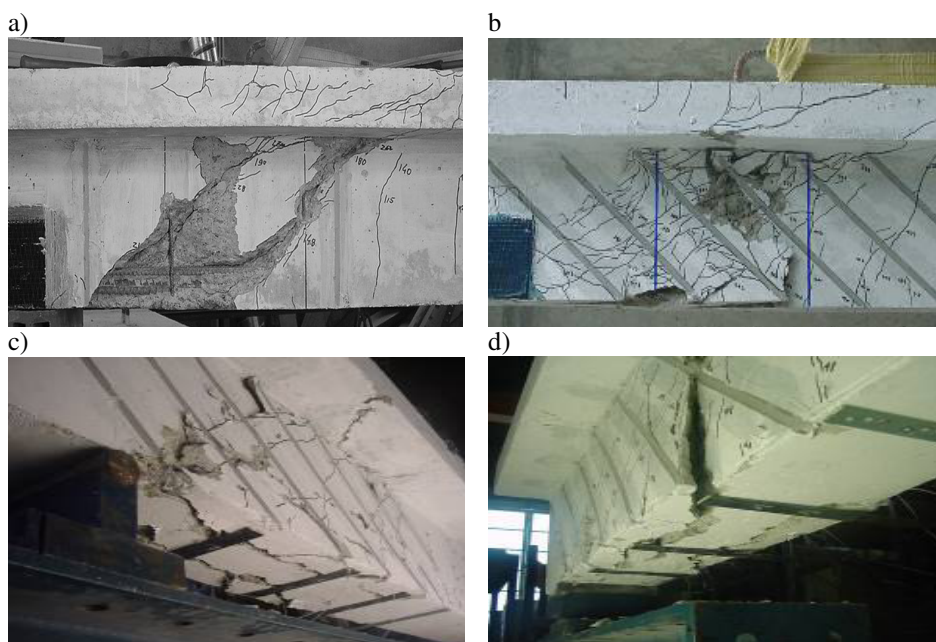
Fig. 2. View of T-section beams after failure [8]

Drugi mechanizm zniszczenia wystąpił w przypodporowej strefie belek o niskim stopniu poprzecznego zbrojenia stalowego i kompozytowego. Na skutek dużego rozstawu poprzecznego zbrojenia, ukośna (w środkowej części wysokości belki) rysa niszcząca w bezpośrednim sąsiedztwie podpory zmieniła swoje pochylenie na prawie poziome, biegnące wzdłuż rozciąganego zbrojenia podłużnego. Doprowadziło to do odspojenia betonowej otuliny wzdłuż tego zbrojenia [9, 12] (rys. 3b, 4a).



Rys. 3. Widok zniszczonych belek teowych [12]

Fig. 3. View of T-section beams after failure [12]



Rys. 4. Widok zniszczonych belek teowych [9, 10]

Fig. 4. View of T-section beams after failure [9, 10]

Trzeci sposób zniszczenia, typowy dla belek wzmocnionych taśmami CFRP w bardzo małym rozstawie, charakteryzowało obustronne odspojenie grupy wklejonych prętów wraz z otaczającą betonową otuliną od rdzenia belki ograniczonego stalowymi strzemionami [9, 10]. Taki sposób zniszczenia wskazuje na negatywny wpływ zmniejszenia rozstawu wklejonego zbrojenia kompozytowego, poniżej granicznego (minimalnego) rozstawu, przy którym dochodzi do nieoczekiwanego odspojenia obu bocznych warstw betonowej otuliny wraz z grupą wklejonych prętów (rys. 4b, c, d).

Ostatni, czwarty, teoretycznie możliwy mechanizm zniszczenia w wypadku obustronnego zakotwienia wklejonego zbrojenia kompozytowego, nie obserwowany jak dotąd w badaniach doświadczalnych, to zerwanie tego zbrojenia w miejscu przecięcia ukośną rysą niszczącą.

3.2. Odształcalność graniczna zbrojenia kompozytowego

Odształcenia graniczne wklejonego zbrojenia kompozytowego przy jego odspojeniu określono na podstawie pomiarów tensometrycznych, wykonywanych bezpośrednio na powierzchni tego zbrojenia [8, 10], lub za pośrednictwem czujników indukcyjnych, mierzących odształcenia betonu w bezpośrednim sąsiedztwie wklejonych taśm [12]. Należy zwrócić uwagę, że takie pomiary obarczone są pewnym błędem, gdyż nie zawsze możliwe jest wykonanie pomiaru odształceń kompozytu dokładnie w miejscu przecięcia go ukośną rysą niszczącą. Na podstawie zebranych wyników pomiarów, określono graniczne odształcenia prętów CFRP o przekroju okrągłym w zakresie $2,25 \div 2,86\%$ [8], o przekroju prostokątnym $15 \times 1,4$ mm i $15 \times 2,4$ mm w zakresie $3,0 \div 4,5\%$ [12] oraz o przekroju prostokątnym $10 \times 1,4$ mm w zakresie $4,0 \div 6\%$ [10].

3.3. Udział zbrojenia kompozytowego w nośności ścinania

Badania wykazały korzystny wpływ stopnia zbrojenia kompozytowego ρ_f (1) na sprowadzoną nośność tego zbrojenia $V_f / b_w d$, co potwierdzają wykresy pokazane na rysunku 5. Podział wykresów na serie różniące się kątami nachylenia wklejonego zbrojenia, rodzaj tego zbrojenia i stopnie zbrojenia stalowego, pozwala wyodrębnić wpływ każdego z parametrów na nośność zbrojenia kompozytowego. Wyniki potwierdzają silniejszy wpływ stopnia poprzecznego zbrojenia stalowego na tę nośność, niż wpływ kąta nachylenia kompozytów. Z analizy wpływu stopnia nachylenia wklejonego zbrojenia można stwierdzić, że najbardziej efektywne okazało się wzmocnienie pod kątem 45° , co jest szczególnie widoczne w belkach bez poprzecznego zbrojenia stalowego, wzmocnionych prętami CFRP.

Ponieważ nośność ścinania należy rozważać z jednoczesnym uwzględnieniem stopnia zbrojenia stalowego $\rho_s E_s$ i kompozytowego $\rho_f E_f$, dlatego w dalszej analizie nośności zostanie uwzględniony całkowity stopień zbrojenia poprzecznego ρ_{tot} (3).

$$\rho_f = \frac{2A_f}{b_w s_f \sin \alpha} \quad (1)$$

$$\rho_s = \frac{2A_s}{b_w s_s} \quad (2)$$

$$\rho_{tot} = \rho_f E_f / E_s + \rho_s \quad (3)$$

gdzie: b_w – szerokość przekroju belki,

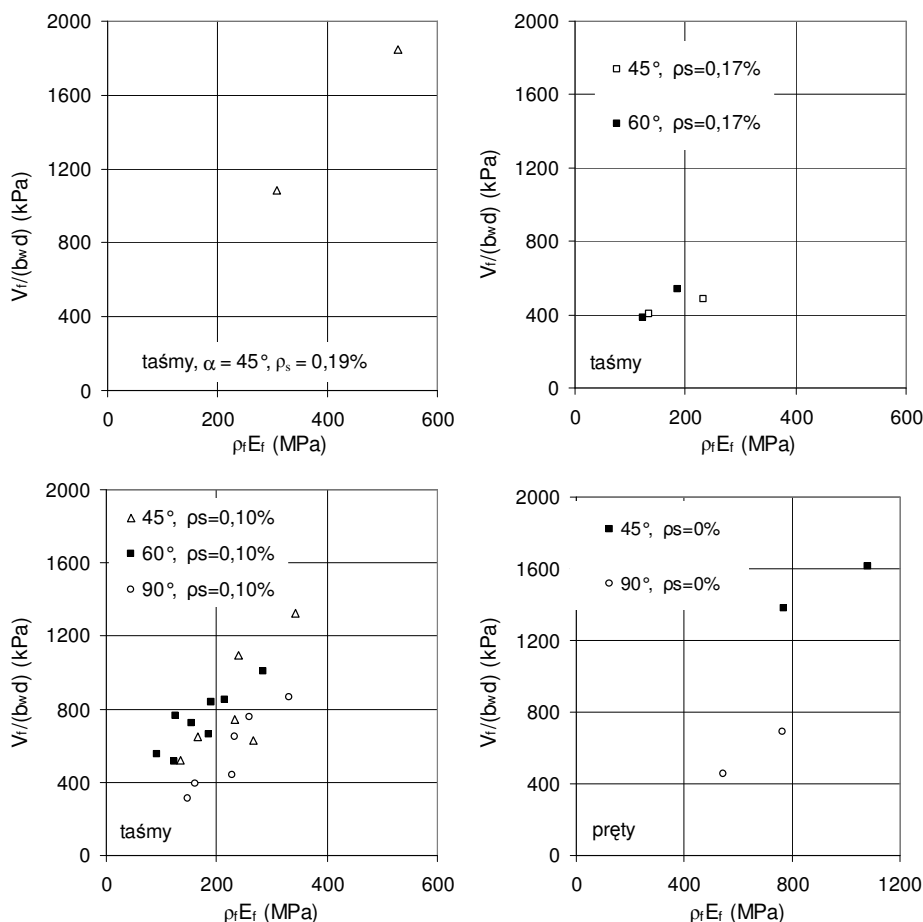
s_f, s_s – rozstaw porzecznego zbrojenia kompozytowego i stalowego,

A_f, A_s – pole przekroju zbrojenia kompozytowego i stalowego,

α_f – kąt nachylenia zbrojenia kompozytowego do podłużnej osi belki,

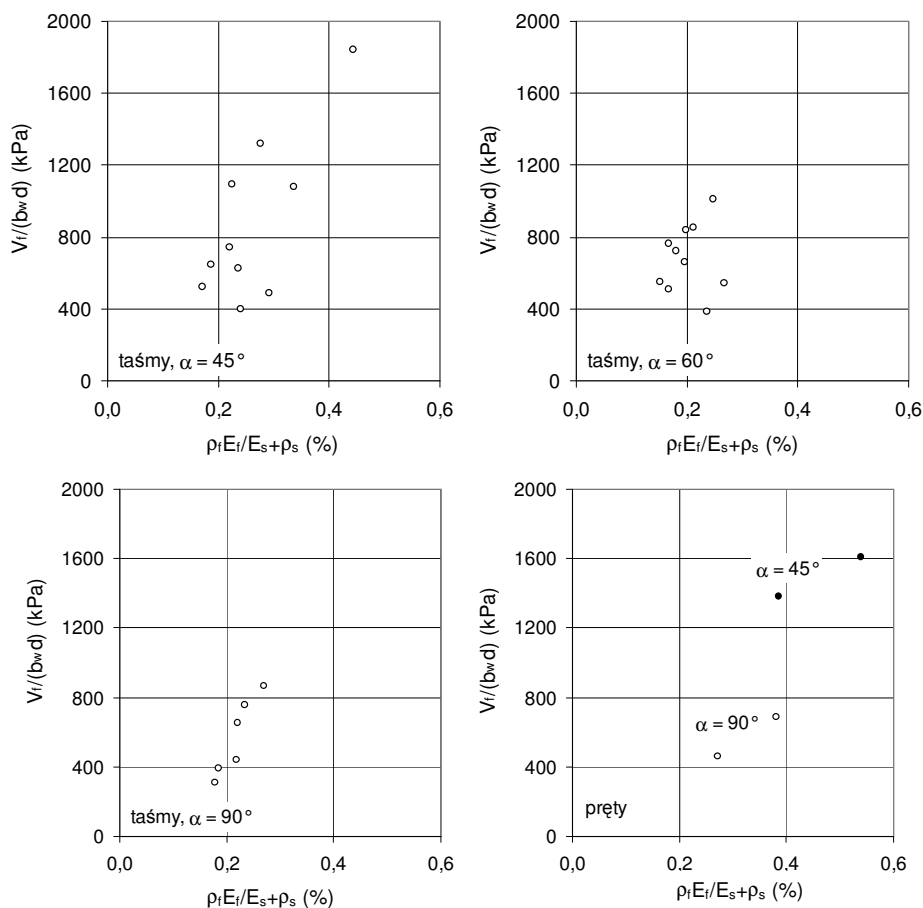
E_f, E_s – moduł sprężystości zbrojenia kompozytowego i stalowego.

Wraz ze wzrostem całkowitego stopnia zbrojenia poprzecznego ρ_{tot} , rośnie nośność przekroju na ścinanie (porównaj rys. 6).



Rys. 5. Wpływ stopnia zbrojenia kompozytowego na jego sprowadzoną nośność

Fig. 5. Influence of the composite ratio on the reduced CFRP shear contribution



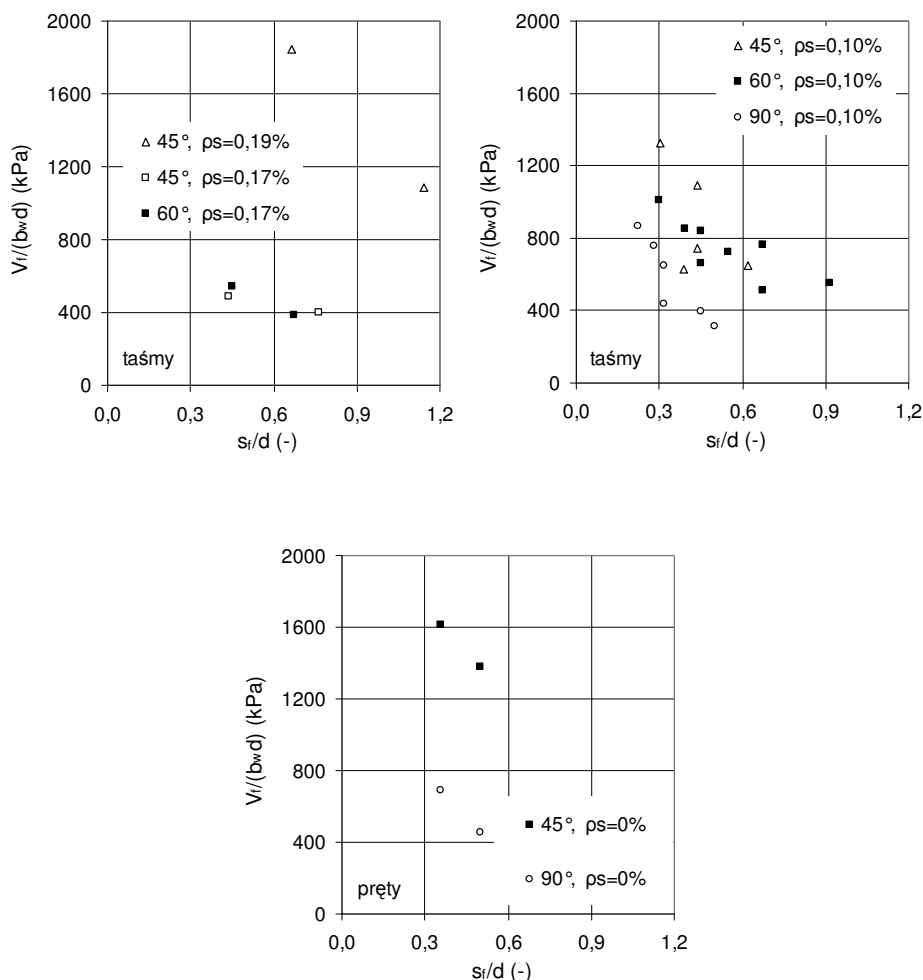
Rys. 6. Wpływ całkowitego stopnia zbrojenia poprzecznego na sprowadzoną nośność zbrojenia CFRP

Fig. 6. Influence of the total transversal ratio on the reduced CFRP shear contribution

Wyniki badań potwierdzają oczywisty spadek siły przenoszonej przez zbrojenie kompozytowe wraz ze wzrostem poziomego rozstawu tego zbrojenia (patrz rys. 7).

Wytrzymałość betonu belek o przekroju teowym wahała się od 31 MPa [8] do 40 MPa [12], jedynie w badaniach [10] była znacznie niższa, bo zaledwie 18,6 MPa. Analiza wyników badań [10, 11], dotyczących dwóch serii belek o tym samym stopniu poprzecznego zbrojenia stalowego ($\varnothing 6$ co 300 mm), wzmocnionych w ten sam sposób taśmami CFRP, ale różniących się wytrzymałością betonu na ściskanie ($f_c = 18,6$ MPa [10], $f_c = 39,7$ MPa [11]), wykazała oczywisty wpływ tej wytrzymałości na siłę poprzeczną przenoszoną przez zbrojenie kompozytowe (porównaj rys. 8 i tabela 5), jak i nośność belek na ścinanie. Wzrost wytrzymałości betonu na ściskanie z 18,6 MPa do 39,7 MPa spowodował wzrost nośności

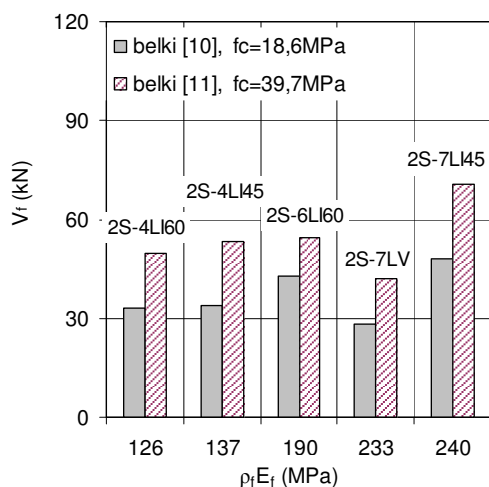
zbrojenia kompozytowego w zakresie 47,4%÷57,5%. Jedynie w belce 2S-6LI60 ten wzrost wyniósł zaledwie 27%.



Rys. 7. Wpływ rozstawu zbrojenia CFRP na jego sprowadzoną nośność

Fig. 7. Influence of the CFRP spacing on the reduced shear CFRP contribution

Niewielkie różnice w stopniu zbrojenia kompozytowego między odpowiadającymi sobie belkami obu serii (tabela 3), wynikają z zastosowania taśm różniących się nieznacznie modułem sprężystości $E_{f,[10]} = 166$ GPa, $E_{f,[11]} = 171$ GPa).



Rys. 8. Wpływ wytrzymałości betonu na nośność zbrojenia kompozytowego

Fig. 8. Influence of the concrete strength on the CFRP shear contribution

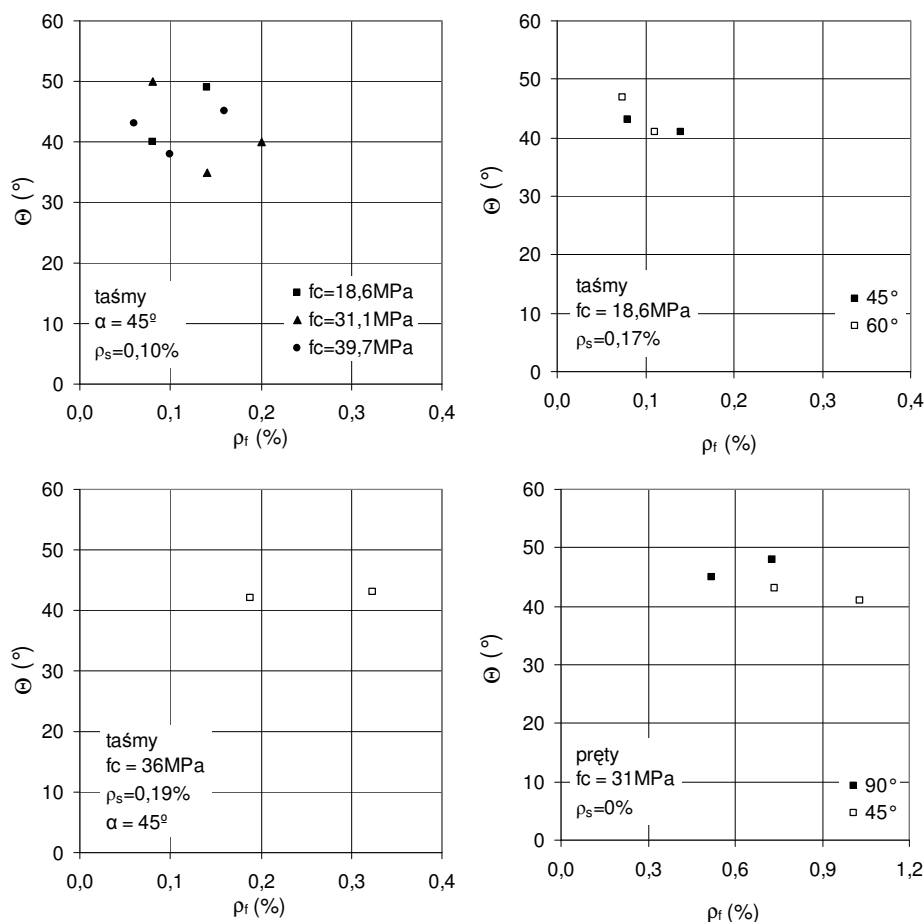
Tabela 5. Porównanie nośności ścinania dwóch serii belek [10], [11]

Table 5. Comparison of shear capacity of two series beams [10], [11]

Seria	Belka	f _c (MPa)	ρ _s E _s (MPa)	ρ _f E _f (MPa)	V _c (KN)	V _s (KN)	V _f (KN)	V _{f[10]} / V _{f[11]} (-)
[10]	2S-4LI60	18,6	209,33	123,18	88,2	47,7	33,06	1,50
[11]		39,7		126,36	124,2	58,1	49,56	
[10]	2S-4LI45	18,6		133,33	88,2	47,7	33,90	1,58
[11]		39,7		136,77	124,2	58,1	53,40	
[10]	2S-6LI60	18,6		184,78	88,2	47,7	42,72	1,27
[11]		39,7		189,55	124,2	58,1	54,36	
[10]	2S-7LV	18,6		227,33	88,2	47,7	28,32	1,49
[11]		39,7		233,20	124,2	58,1	42,18	
[10]	2S-7LI45	18,6		233,53	88,2	47,7	48,00	1,47
[11]		39,7		239,56	124,2	58,1	70,74	
V _{f[10]} ; V _{f[11]} – nośność zbrojenia kompozytowego belek dwóch serii opisanych w [10] i [11]								

Analizę kątów nachylenia ukośnych rys niszczących w belkach wykonano na podstawie dokumentacji zdjęciowej zamieszczonej w literaturze, co z uwagi na niewystarczającą jakość niektórych fotografii było kłopotliwe. Ukośna rysa niszcząca we wzmocnionych elementach kształtowała się pod kątem od 38° do 56° .

Wartości kątów θ dla wszystkich zbadanych belek o przekroju teowym zamieszczono w tabeli 4, a na rysunku 9 pokazano wartości tych kątów w funkcji stopnia zbrojenia kompozytowego, z podziałem na serie różniące się stopniem zbrojenia stalowego, kątem wklejonego zbrojenia i wytrzymałością betonu na ściskanie.



Rys. 9. Wpływ stopnia zbrojenia kompozytowego na kąt nachylenia rysy niszczącej

Fig. 9. The influence of the CFRP ratio on inclination of the diagonal shear crack

3.4. Efektywność wzmocnienia

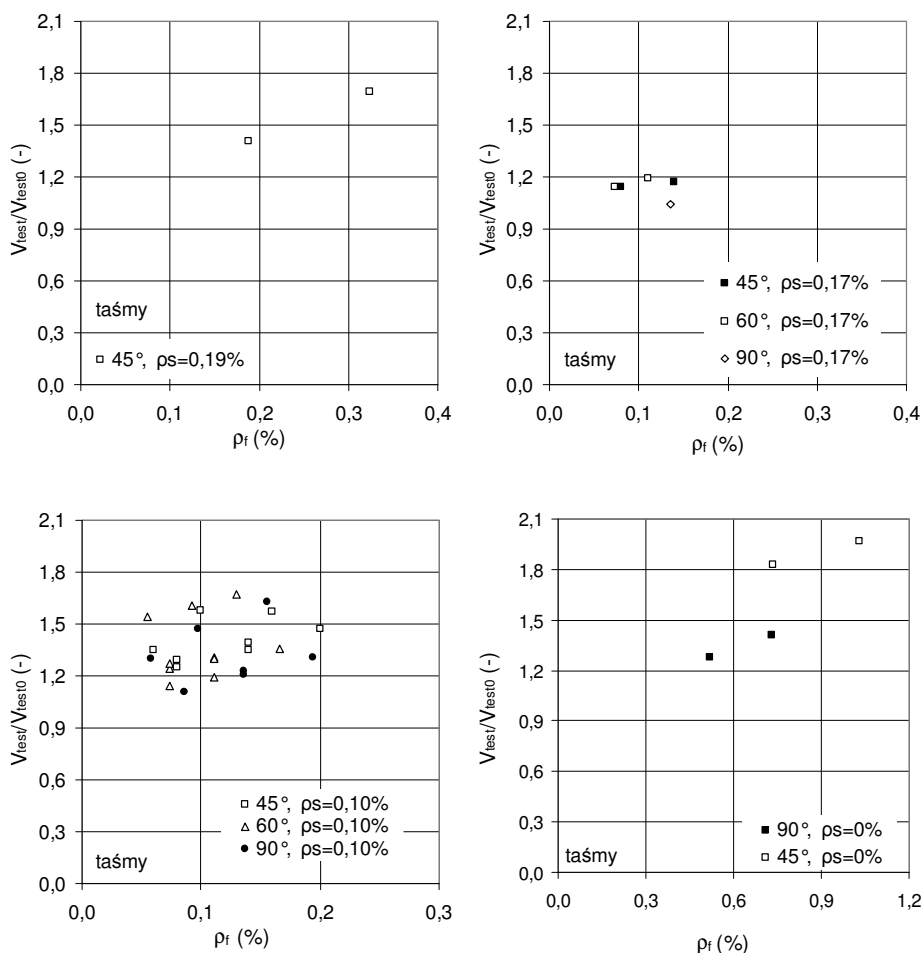
Miarą efektywności wzmocnienia na ścinanie jest stosunek nośności elementu wzmocnionego i niewzmocnionego (4)

$$\eta = V_{test}/V_{test0} \quad (4)$$

Tę efektywność można zwiększać zmniejszając rozstaw wklejonego zbrojenia, zwiększając jego pole powierzchni, wklejając pręty nachylone pod kątem do podłużnej osi elementu oraz kotwiąc zbrojenie kompozytowe w półce przekroju teowego. Efekt wzmocnienia zależy przy tym od stopnia stalowego zbrojenia poprzecznego ρ_s (rys. 10) i stopnia zbrojenia kompozytowego ρ_f , który w belkach z wklejonymi taśmami wahał się w przedziale 4÷69%. Wykres zależności efektywności wzmocnienia od stopnia zbrojenia kompozytowego przedstawia rysunek 10.

Elementy o niższym stopniu zbrojenia stalowego ($\rho_s = 0,10\%$), wykazały wyższy stopień wzmocnienia ($\eta = 11\div 69\%$), niż elementy silniej poprzecznie zbrojone stalą ($\rho_s = 0,17\%$), dla których efektywność wzmocnienia wahała się w granicach zaledwie 4÷19%. Wyjątek od tej zasady zaobserwowano w elementach BI-2/3 B i BI-3/5A o bardzo wysokim stopniu zbrojenia kompozytowego ($\rho_f = 0,323\%$) i efektywności wzmocnienia na średnim poziomie 67%. Wyniki tej właśnie serii belek [12] pozwoliły na sprecyzowanie innego, bardzo istotnego, a niepublikowanego jak dotąd, wniosku, dotyczącego efektywności wzmocnienia metodą NSM. Mianowicie, o stopniu wzmocnienia bardziej decyduje głębokość wklejonego zbrojenia (tzn. jego szerokość), niż pole powierzchni jego przekroju. Potwierdziły to szczególnie wyniki badań łódzkich [12], w których zastosowano taśmy o szerokości 15 mm, wklejonych zatem głębiej niż w belkach innych serii. Jest to oczywiste, gdyż w tym wypadku przyczepność kompozytu do betonu jest wyższa, niż w wypadku wąskich taśm o odpowiednio większej grubości. Zbyt jednak głębokie osadzenie zbrojenia kompozytowego w betonowej otulinie pociąga za sobą niebezpieczeństwo przecięcia stalowych strzemion, zatem o głębokości wklejenia każdorazowo powinna decydować grubość istniejącej betonowej otuliny.

Badania wzmocnionych belek wykazały korzystny wpływ nachylenia wklejonego zbrojenia do podłużnej osi elementu na nośność ścinania, która w belkach [8], ze zbrojeniem o przekroju okrągłym, wklejonym pod kątem 45°, wzrosła średnio o 56% w porównaniu z belkami wzmocnionymi pionowymi prętami (porównaj rys. 10 i tabela 4). W belkach wzmocnionych taśmami o tym samym rozstawie i przekroju prostokątnym 10 mm x 1,4 mm, wklejonymi pod kątem 60°, zarejestrowano średnio 10% wzrost nośności ścinania, w porównaniu z elementami, które wzmocniono ukośnymi taśmami pod kątem 45°. Słabszy wpływ nachylenia laminatów o przekroju prostokątnym w porównaniu z prętami o przekroju okrągłym na nośność ścinania, jest wywołany pięciokrotnie niższym polem przekroju tych pierwszych w porównaniu z drugimi.

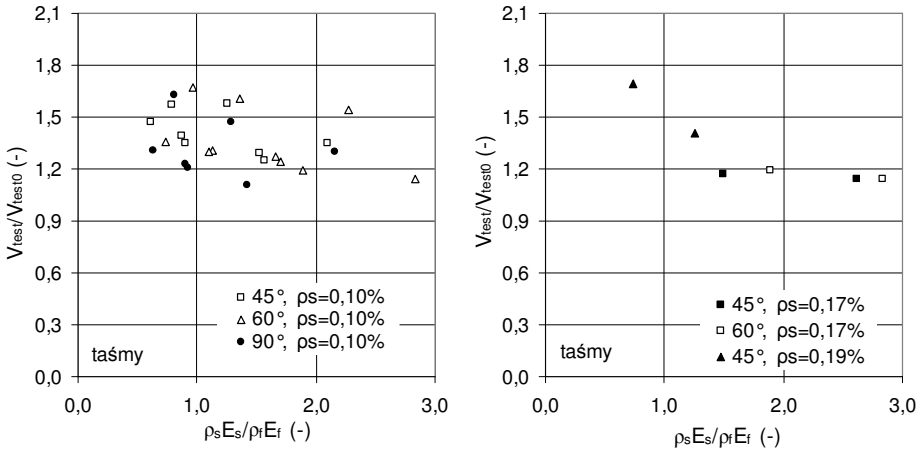


Rys. 10. Wpływ stopnia zbrojenia kompozytowego na efektywność wzmacnienia

Fig. 10. The influence of the CFRP ratio on the strengthening effectiveness

Najwyższą efektywność wzmacnienia, rzędu 106% (w belce bez poprzecznego zbrojenia stalowego), uzyskano kotwiąc wklejone zbrojenie w półce przekroju teowego (tabela 4).

Z porównania wpływu stosunku $\rho_s E_s / \rho_f E_f$ na efektywność wzmacnienia, na ogół wynika, że wzrost tego parametru obniża stopień wzmacnienia (rys. 11).



Rys. 11. Wpływ $\rho_s E_s / \rho_f E_f$ na efektywność wzmocnienia

Fig. 11. The influence of $\rho_s E_s / \rho_f E_f$ ratio on the strengthening effectiveness

Na podstawie analizy wyników badań doświadczalnych potwierdzono wpływ następujących parametrów zmiennych na wartość siły porzeczej przenoszonej przez zbrojenie kompozytowe: rozstaw podłużny zbrojenia kompozytowego s_f , kąt jego nachylenia α_f , stopień zbrojenia stalowego ρ_s , stopień zbrojenia kompozytowego ρ_f oraz wytrzymałość betonu na ściskanie f_c .

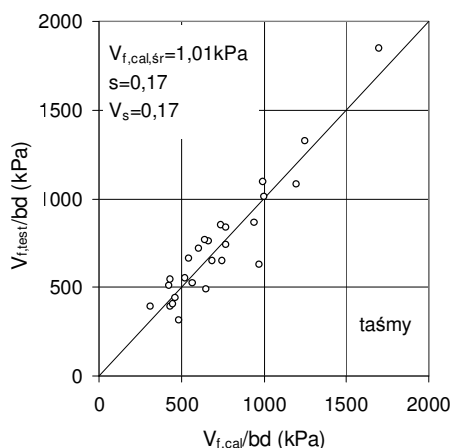
Zależność sprowadzonej nośności poprzecznego zbrojenia kompozytowego V_f/bd od wymienionych parametrów zmiennych określono wielomianem (5), a porównanie wartości doświadczalnych i obliczonych na podstawie zaproponowanej funkcji przedstawiono na rysunku 12. Wielomian zapisano jako sumę wyrazów wyrażonych iloczynami określonej stałej (współczynnika) i odpowiadającego jej parametru zmiennego. Wartości współczynników określają wagę każdego z analizowanych parametrów zmiennych.

$$\frac{V_{f,cal}}{bd} = 239X_1 - 331,5X_2 + 2,829X_3 - 0,8382X_4 + 9,774X_5 + 260,5 \quad (5)$$

gdzie: $X_1 = \frac{s_f}{d}$, $X_2 = \alpha \frac{\pi}{180}$, $X_3 = \rho_f E_f$, $X_4 = \rho_s E_s$, $X_5 = f_c$

Obliczeniowej analizie (rys. 12) poddano jedynie wyniki badań belek teowych wzmocnionych taśmami kompozytowymi, ponieważ w wypadku belek wzmocnionych prętami (4 belki), rozbieżność wyników badań była zaskakująco duża w porównaniu z małą różnorodnością parametrów zmiennych.

Jak widać na rysunku 12, zgodność wyników doświadczalnych i obliczeniowych jest bardzo dobra (wartość średnia $\bar{V}_{f,cal,5r} = 1,01 kPa$, odchylenie standardowe $s = 0,17$, współczynnik zmienności $V_s = 0,17$).



Rys. 12. Porównanie doświadczalnych i obliczeniowych wg (5) wartości sprowadzonej nośności taśm CFRP

Fig. 12. Comparison of test and calculated reduced CFRP shear contribution

4. Wnioski

Na podstawie analizy wyników doświadczalnych badań belek wzmocnionych na ścinanie metodą NSMR można wysnuć następujące wnioski:

- technologia wzmacniania na ścinanie przy użyciu materiałów kompozytowych wklejanych w głąb betonowej otuliny jest bardziej efektywna, niż wzmacnianie przy użyciu taśm lub mat przyklejanych na powierzchni elementów żelbetowych,
- stopień wzmocnienia zależy przy tym najbardziej od rozstawu kompozytowych strzemion, ich położenia na długości odcinka ścinania i kąta ich nachylenia,
- w większości belek najbardziej efektywne okazało się pochylenie wklejonych materiałów kompozytowych pod kątem 45° ,
- największy przyrost efektywności wzmocnienia można osiągnąć przez wklejenie zbrojenia kompozytowego w półkę przekroju teowego,
- przecięcie stalowych strzemion przy wycinaniu bruzd nie wpłynęło na zmianę nośności wzmocnionego elementu,
- ukośna rysa niszcząca we wzmocnionych elementach kształtowała się pod kątem od 38° do 56° ,
- bardziej efektywne (z uwagi na nośność ścinania) okazało się zbrojenie kompozytowe w postaci taśm CFRP, niż prętów o przekroju kołowym,
- na podstawie pomiarów odkształceń betonu na odcinku ścinania lub odkształceń zbrojenia kompozytowego, określono graniczne wartości odkształceń przy odspojeniu taśm, które wahały się od 3‰ do 6‰ dla taśm i ponad 2‰ dla prętów CFRP,

- wzrost poziomego rozstawu kompozytowego zbrojenia powoduje spadek siły przenoszonej przez to zbrojenie, przy czym tempo tego spadku uwarunkowane jest kątem nachylenia tego zbrojenia i stopniem wewnętrznego zbrojenia stalowego,
- wytrzymałość betonu na ściskanie ma wpływ na nośność kompozytowego zbrojenia; jej wzrost z 18,6 MPa do 39,7 MPa spowodował wzrost nośności tego zbrojenia w zakresie 47,4%÷57,5%,
- efektywność wzmocnienia na ścinanie wahała się w granicach 4÷69% i zależała od wzajemnego stopnia zbrojenia kompozytowego i stalowego.

Zagadnienie wzmacniania stref przypodporowych żelbetowych belek przy użyciu metody NSM wymaga dalszych doświadczalnych badań w celu określenia:

- granicznych odkształceń kompozytu przy odspojeniu,
- wpływu stopnia zbrojenia podłużnego na nośność wzmocnionego przekroju,
- efektywności wzmocnienia na ścinanie elementów wstępnie zarysowanych,
- efektywności wzmocnienia belek ciągłych w obszarach pośrednich podpór,
- wpływu kotwienia zbrojenia kompozytowego na nośność ścinania.

LITERATURA

- [1] **Kotynia R., Kaminska, M.E.:** Ductility and failure mode of RC beams strengthened for flexure with CFRP. Report No. 13, Department of Concrete Structures, Technical University of Lodz, 2003, pp. 51.
- [2] **Barros J.A.O. and Fortes A.S.:** Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. *Cement & Concrete Composites*, 27, 2005, pp. 471-480.
- [3] **Kotynia R.:** Analysis of reinforced concrete beams strengthened with near surface mounted FRP reinforcement. *Archives of Civil Engineering*, LII 2, 2006, pp. 305-317.
- [4] **El-Hacha R. and Rizkalla S.:** Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Reinforcements for Flexural Strengthening of Concrete Structures. *ACI Structural Journal*, Vol. 101, No. 5, 2004, pp. 717-726.
- [5] **Chen J.F. and Teng J.G.:** Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding. *Construction and Building Materials* 17, 2003, pp. 27-41.
- [6] **Rizzo A. and De Lorenzis L.:** Behaviour and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement. *Construction and Building Materials*, 23, 2009, pp. 1555-1567.
- [7] **Barros J.A.O. and Dias S.J.E.:** Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams. *Journal Cement and Concrete Composites*, 28 (3), 2006, pp. 276-292.
- [8] **De Lorenzis L. and Nanni A.:** Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Near-Surface Mounted Fiber-Reinforced Polymer Rods. *ACI Structural Journal*, 98(1), 2001, pp. 60-68.
- [9] **Dias S.J.E. and Barros J.A.O.:** Shear strengthening of T cross section reinforced concrete beams by near surface mounted technique, *Journal of Composites for Construction*, 12(3), 2008, pp. 300-311.

- [10] **Dias S.J.E., Bianco V., Barros J.A.O. and Monti G.:** Low strength T-cross section RC beams shear-strengthened by NSM technique, Proc. of Materiali ed Approcci Innovativi per il Progetto in Zona Sismica e la Mitigazione della Vulnerabilità delle Strutture, 2007, CD.
- [11] **Dias S.J.E. and Barros J.A.O.:** Performance of reinforced concrete t beams strengthened in shear with NSM CFRP. Engineering Structures. In print.
- [12] **Kotynia R.:** Shear strengthening of RC beams with NSM CFRP laminates. Proc. of FRPRCS-8 Int. Symp. on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, Patras, Greece, 2007, CD.

ANALYSIS OF EFFECTIVENESS OF NSM FRP SHEAR STRENGTHENED BEAMS

Summary

The present work analyzes the effectiveness of the near-surface mounted (NSM) fiber reinforced polymers (FRP) technique for shear strengthening of reinforced concrete (RC) beams and provides the review of existing research in this area. Based on published test results, the paper provides a comparative study of the failure modes, FRP strain efficiency and shear strength enhancement. The influence of the following parameters: beams dimensions, internal shear steel reinforcement ratio, type, inclination and ratio of the NSM FRP reinforcement, FRP bars spacing and concrete strength is discussed in the paper.