

# **Analiza efektywności wzmocnień żelbetowych elementów zginanych za pomocą wstępnie naprężonych kompozytów CFRP**

**Renata Kotynia<sup>1</sup>, Michał Staśkiewicz<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Katedra Budownictwa Betonowego, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, e-mail: renata.kotynia@p.lodz.pl, michal.staskiewicz@p.lodz.pl*

**Streszczenie:** Tematem pracy jest zagadnienie wzmocniania elementów żelbetowych na zginanie przy użyciu naprężonych kompozytów z włóknami węglowymi CFRP. Przedstawiono zasadnicze problemy związane z technologią wzmocniania i sposobami zakotwień kompozytów. Autorzy opracowali bazę danych doświadczalnych badań własnych i obcych, na podstawie której omówiono mechanizmy zniszczenia wzmocnionych elementów oraz przeprowadzono analizę efektywności wzmocnienia elementów w zależności od wybranych parametrów zmiennych. Zasadniczym celem analizy było określenie wpływu stopnia istniejącego zbrojenia stalowego, stopnia zbrojenia kompozytowego oraz poziomu wstępnego naprężenia taśm na stopień wzmocnienia elementów zarówno w stanie granicznym nośności, jaki i użyteczności.

**Słowa kluczowe:** wzmocnienie, zginanie, sprężenie, element żelbetowy, kompozyt, CFRP, efektywność, nośność.

## **1. Wprowadzenie**

Kompozyty polimerowe z włóknami węglowymi, bazaltowymi, szklanymi lub aramidowymi są od ponad 15 lat z powodzeniem stosowane do wzmocniania konstrukcji murowych, betonowych i żelbetowych. Ze względu na swoje właściwości mechaniczne (wysoką wytrzymałość na rozciąganie i wysoki moduł sprężystości podłużnej) najpowszechniej stosowane są kompozyty na bazie włókien węglowych, o skróconej nazwie CFRP (z ang. carbon fiber reinforced polymer). Do wzmocnienia zginanych konstrukcji żelbetowych używa się najczęściej sztywnych laminatów lub wiotkich mat, które przyklejone na powierzchni betonu pełnią funkcję zewnętrznego zbrojenia rozciąganego.

Wysoka efektywność wzmocniania elementów żelbetowych na zginanie przy użyciu kompozytów została potwierdzona licznymi krajowymi i zagranicznymi badaniami laboratoryjnymi oraz praktycznymi aplikacjami na istniejących obiektach. Badania doświadczalne wzmocnionych elementów wykazały jednak, że kompozyty przyklejone w stanie biernym nie pozwalają w pełni wykorzystać nośności włókien CFRP na rozciąganie. Przyczyną niespełna 40% efektywności wykorzystania włókien węglowych w żelbetowych elementach wzmocnionych na zginanie jest powszechnie znany mechanizm zniszczenia tych elementów polegający na utracie przyczepności kompozytu do betonu [1]. W celu zwiększenia stopnia wykorzystania wytrzymałości włókien na rozciąganie, opracowano metody wzmocnień przy użyciu wstępnie naprężonych materiałów kompozytowych. Taki sposób wzmocniania miał zwiększyć efektywność wzmocnienia na zginanie nie tylko w stanie granicznym zniszczenia, ale przede wszystkim miał poprawić warunki użyteczności wzmocnionych konstrukcji. Nadrzędnym celem pracy jest analiza własnych i obcych wyników badań doświadczalnych przeprowadzonych na żelbetowych elementach wzmocnionych na zginanie przy użyciu naprężonych kompozytów CFRP. Przedstawiona w pracy baza danych doświadczalnych pozwoliła autorom uściślić zagadnienie wzmocniania żelbetowych elementów na zginanie, wskazać problemy związane z aplikacją naprężonego kompozytu oraz określić granice efektywności tej techniki wzmocnień.

## 2. Sposoby wzmocnień czynnych

Istnieje kilka sposobów naprężania materiałów kompozytowych przy wzmacnianiu elementów żelbetowych na zginanie. Szczegółowy przegląd technik naprężania przedstawiono w publikacjach [2], [3], [4] oraz [5]. Jednym z pierwszych sposobów wprowadzania naprężenia w taśmie kompozytowej było „odwrotne” wygięcie wzmacnianego elementu, tak aby doprowadzić do zmniejszenia ugięć w przęśle i odkształceń betonu w rozciąganej strefie przekroju. Do powierzchni betonu przyklejano taśmę lub matę i po zwolnieniu odwrotnego wygięcia elementu kompozyt przejmował siły rozciągające odpowiadające części ciężaru własnego tego elementu. Jednak z uwagi na problemy wykonawcze związane z wprowadzaniem znacznych sił do wzmacnianej konstrukcji i tymczasową redukcją obciążeń stałych, metoda ta nie zyskała powszechnego uznania. Dopiero zastosowanie zewnętrznego systemu sprężającego, mocowanego do powierzchni betonu na końcach kompozytu, umożliwiło kontrolowane wprowadzanie siły sprężającej w kompozycie. Siłę sprężającą wprowadza się w do taśmy przy użyciu siłownika hydraulicznego montowanego do stalowej ramy systemu sprężająco-kotwiącego, przesuwanego element kotwiący koniec naprężanej taśmy. Po osiągnięciu przez klej pełnej wytrzymałości, system sprężający jest demontowany, a zakotwienie realizowane jest przy użyciu stalowych blach kotwiących, które pozostają zamontowane na obiekcie.

Systemy sprężająco-kotwiące tego typu są obecnie najpowszechniej stosowane. Ich odmiany znane są pod nazwami: system S&P Clever Reinforcement, autorski system M. Łagody, Leoba CarboDur II, Neoxe Prestressing System, Sika Stress-Head, system BBR-Stahlton.

Nieco odmienny sposób naciągu wiotkich mat przyklejanych w kilku warstwach na powierzchni wzmacnianego elementu zaproponowali Wight i Erki [6]. System polegał na naciągu każdej warstwy maty odrębnie na stalowym wałku mocowanym po sprężeniu do stalowej ramki obejmującej cały betonowy przekrój. Taka propozycja miała jedynie charakter badawczy i z uwagi na rozbudowany system kotwienia wałków nie znalazła zastosowania praktycznego. Inne sposoby kotwienia naprężonych kompozytów polimerowych przy użyciu zewnętrznych mat przyklejanych na ich końcach zaproponował Kim z zespołem [7]. Celem takiego sposobu kotwienia było stosowanie jednolitego rozwiązania materiałowego (w całości kompozytowego, bez elementów stalowych). Badania wykazały jednak małą skuteczność tego sposobu kotwienia, dlatego nie znalazły dalszych zastosowań i nie są zalecane do powszechnej aplikacji.

Pierwsze jak dotąd bezknotowe rozwiązanie aplikacji naprężonych kompozytów do wzmacniania zginanych elementów żelbetowych zaproponował Meier [8]. Metoda gradientowa polega na stopniowej redukcji siły sprężającej w kompozycie na długości zakotwienia. Warunkiem prawidłowego wykonania wzmocnienia tą metodą jest zastosowanie urządzenia nagrzewającego, które pozwala przyspieszyć proces wiązania kleju na kolejnych odcinkach taśmy, o stopniowo zredukowanej sile sprężającej.

Tabela 1. Zestawienie wybranych elementów badawczych i ich parametrów.

Ref.	Nazwa	$b$ mm	$h$ mm	$f_{ck}$ MPa	$\rho_s$ %	$E_f$ GPa	$\rho_{feq}$ %	$\varepsilon_{fp}$ %	$\varepsilon_{f, test}$ ‰	Mechanizm zniszczenia	$\eta_u$ -	$\eta_{cr}$ -
[5]	PFCB1-2R	200	300		0,436	165	0,116	0,24	8,31	ICD	1,23	0,45
[5]	PFCB1-4R	200	300		0,436	165	0,116	0,50	6,88	ICD	1,56	1,33
[5]	PFCB1-6R	200	300		0,436	165	0,116	0,74	6,02	ICD	1,54	1,85
[5]	PFCB1-7R	200	300		0,436	165	0,116	0,81	4,90	R	1,69	2,35
[5]	PFCB2-5R	400	600		0,834	165	0,058	0,67	7,22	ICD	0,59	1,05
[6]	B	300	575	35	0,870	125	0,174	0,16		CCS	0,35	0,33
[6]	C	300	575	35	0,870	125	0,174	0,16		R	0,45	1,50
[6]	D	300	575	35	0,870	125	0,174	0,16		R	0,37	1,50
[7]	J-2	150	200	38	0,866	227	0,500	0,26		ED	0,87	
[7]	J-3	150	200	38	0,866	227	0,500	0,26		ED	1,37	
[7]	J-5	150	200	38	0,866	227	0,500	0,26		CCS	1,57	
[7]	J-6	150	200	38	0,866	227	0,500	0,26		CCS	1,82	
[7]	J-7	150	200	38	0,866	227	0,500	0,26		CCS	0,60	
[7]	J-8	150	200	38	0,866	227	0,500	0,26		ED	0,87	
[7]	J-9	150	200	38	0,866	227	0,500	0,26		CCS	0,40	
[7]	J-10	150	200	38	0,866	227	0,500	0,26		ED	1,17	
[8]	T3	1000	220		0,440		0,054	0,59	8,22	ED	0,63	0,65
[8]	T4	1000	220		0,440		0,055	0,65	9,17	R	0,66	0,65
[9]	RC-PrEA	300	500		0,514	166	0,064	0,60		A	0,79	1,95
[10]	B	203	279	43	0,781	228	0,059	4,62	10,50	R	0,31	2,78
[10]	C	203	279	43	0,781	228	0,059	0,25		CCS	0,28	3,36
[10]	D	203	279	43	0,781	228	0,059	0,25		CCS	0,27	3,28
[10]	E	203	279	43	0,781	228	0,059	0,25		R	0,22	
[10]	G	203	279	43	0,781	228	0,059	0,50		R	0,50	
[11]	B12 ASP	500	220	32	0,503	173	0,109	0,52	9,30	ICD	1,19	
[11]	B12 SP	500	220	29	0,503	173	0,109	0,46	6,90	CC	0,95	
[11]	B12 ASP E	500	220	43	0,503	173	0,109	0,48	6,85	ICD	0,86	
[11]	B12 SP E	500	220	41	0,503	173	0,109	0,44	5,00	A	0,73	
[11]	B12 A	500	220	45	0,503	173	0,109	0,51	6,40	ICD	0,95	
[11]	B16 ASP	500	220	25	0,894	173	0,109	0,48	8,00	ICD	0,69	
[11]	B16 ASP E	500	220	26	0,894	173	0,109	0,49	7,15	ICD	0,64	
[12]	RB 5	90	180	32	1,532	155	0,437	0,08		CC	0,60	
[12]	RB 10	90	180	32	1,532	155	0,437	0,16		CC	0,58	
[12]	RB 15	90	180	32	1,532	155	0,437	0,24		CC	0,58	
[12]	RB 20	90	180	32	1,532	155	0,437	0,32		CC	0,69	
[13]	4 P 1	100	100		1,010	111	0,518	0,29		SCD	2,34	
[13]	5 P 1	100	100		1,010	111	0,518	0,29		S	1,94	
[13]	6 P 1	100	100		1,010	111	0,518	0,58		R	2,40	
[13]	2 P 4.5	145	230		0,761	115	0,350	0,28		R	1,24	
[13]	3 P 4.5	145	230		1,141	115	0,350	0,28		CC / R	0,67	
[13]	4 P 4.5	145	230		1,141	115	0,350	0,36		R	0,72	
[13]	5 P 4.5	145	230		1,141	115	0,350	0,50		R	0,81	
[14]	B4 CFRP 3	250	500	38	1,040	171	0,101	0,30		CC	0,42	
[14]	B5 CFRP 4.5	250	500	40	1,040	171	0,101	0,45		CC	0,50	
[14]	B6 CRFP 6	250	500	35	1,040	171	0,101	0,60		CC	0,59	
[15]	E3	100	100		0,998	135	1,033	0,13		S	1,48	1,80
[15]	E4	100	100		0,998	135	1,033	0,20		CC	1,53	3,00
[15]	P3	130	230		1,179	135	0,390	0,26		SCD	0,62	0,73
[15]	P4	130	230		1,179	135	0,390	0,31		CCS	0,85	1,62

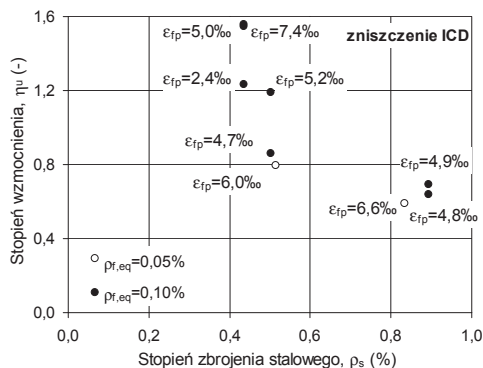
### 3. Analiza wyników badań doświadczalnych żelbetowych elementów wzmocnionych naprężonymi kompozytami

Analizę efektywności wzmocnień autorzy przeprowadzili na podstawie szczegółowej bazy danych wyników doświadczalnych badań elementów żelbetowych wzmocnionych na zginanie przy użyciu naprężonych kompozytów polimerowych z włóknami węglowymi. Baza danych obejmuje opublikowane wyniki elementów badawczych z opisem odpowiadających im parametrów zmiennych, do których należą: wymiary elementu ( $b$ ,  $h$ ), charakterystyka wytrzymałościowa betonu ( $f_{ck}$ ), stali ( $f_{yk}$ ,  $E_s$ ) i kompozytu ( $f_{fu}$ ,  $E_f$ ), pole powierzchni zbrojenia stalowego ( $A_s$ ) i kompozytowego ( $A_f$ ) wraz z odpowiadającymi im stopniami zbrojenia ( $\rho_s$ ,  $\rho_f$ ), sprowadzony stopień zbrojenia kompozytowego ( $\rho_{f,eq}$ ), odkształcenie wstępnie naprężonego kompozytu ( $\epsilon_{fp}$ ), odkształcenie kompozytu w chwili zniszczenia elementu ( $\epsilon_{f,rest}$ ), mechanizm zniszczenia wzmocnionego elementu, stopień wzmocnienia w odniesieniu do nośności ( $\eta_u = (M_u - M_{u0})/M_{u0}$ ) oraz zarysowania elementu ( $\eta_{cr} = (M_{cr} - M_{cr0})/M_{cr0}$ ) (gdzie:  $M_u$ ,  $M_{u0}$ ,  $M_{cr}$ ,  $M_{cr0}$  oznaczają odpowiednio momenty niszczące element wzmocniony i niewzmocniony oraz momenty odpowiadające zarysowaniu elementu wzmocnionego i niewzmocnionego). Baza danych obejmuje trzynaście publikacji naukowych, co odpowiada sześćdziesięciu trzem elementom badawczym. Z uwagi na ograniczenia objętości pracy, w Tabeli 1 zamieszczono jedynie wybrane wzmocnione elementy, które zostały ujęte w analizie. Na uwagę zasługuje fakt, że wszystkie analizowane elementy wzmocniono materiałami kompozytowymi z wykonanymi z włókien węglowych. Różnice między użytymi kompozytami polegają zasadniczo na typie materiału (L – laminat, S – mata) oraz na jego module sprężystości podłużnej ( $E_f$ ). Aby w analizie wzmocnionych elementów wyeliminować wpływ różnic modułów sprężystości, autorzy wprowadzono parametr sprowadzonego stopnia zbrojenia kompozytowego ( $\rho_{f,eq} = \rho_f \times (E_f/E_s)$ ), gdzie  $\rho_f$  oznacza stopień zbrojenia kompozytowego  $\rho_f = A_f / (bd_f)$ ;  $d_f$  – wysokość użyteczna przekroju do środka ciężkości zbrojenia kompozytowego).

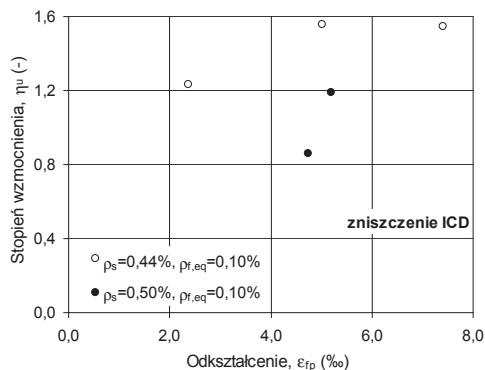
Podstawowy podział elementów poddanych analizie efektywności wzmocnienia narzuca mechanizm zniszczenia elementów, dlatego wyodrębniono trzy podstawowe grupy elementów. Dwie pierwsze obejmują elementy, które uległy zniszczeniu wskutek odspojenia zbrojenia kompozytowego (powszechnie określanego w publikacjach, jako *intermediate crack debonding* – ICD) oraz zerwania tego zbrojenia w środkowej części elementu (*rupture* – R). Trzecią grupę stanowią elementy, które zniszczyły się w sposób nietypowy dla zginania (np. w wyniku ścinania) oraz elementy, w których zbrojenie kompozytowe było wykorzystane w niedostatecznym stopniu, o czym świadczyło zniszczenie przez zmiążdżenie betonu w ścisłanej strefie przekroju (*concrete crushing* – CC) lub odspojenie nieskutecznie zakotwionych końców kompozytu (*end debonding* – ED, *concrete cover separation* – CCS, *anchorage failure* – A). Z uwagi na niską efektywność wzmocnienia elementów z trzeciej grupy, nie uwzględniono ich w dalszej analizie.

Aby wyodrębnić wpływ poszczególnych parametrów zmiennych na efekt wzmocnienia, zbiór badanych elementów został podzielony na grupy o podobnych cechach, różniących się tylko jednym parametrem. Przede wszystkim dokonano podziału elementów ze względu na sposób aplikacji naprężonego kompozytu, ponieważ ma to decydujący wpływ na sposób zniszczenia i obciążenie niszczące. W ten sposób wyodrębniono elementy z mechanicznie zakotwione przy użyciu stalowych płyt kotwiących oraz elementy bez takiego zakotwienia (w tym elementy z taśmami/matami CFRP kotwionymi przy użyciu obwodowych mat typu „U”, o włóknach ułożonych prostopadle do podłużnej osi elementu, obejmujących końce naprężonego kompozytu oraz elementy wzmocnione bezkotwowo metodą gradientową). Ze względu na małą liczbę badanych elementów oraz niską skuteczność zakotwień przy użyciu obwodowych mat, nie uwzględniono ich w analizie porównawczej.

W pierwszym zestawieniu analizie poddano wpływ stopnia zbrojenia stalowego ( $\rho_s$ ) na efektywność wzmocnienia określoną stopniem wzmocnienia w odniesieniu do jego nośności ( $\eta_u$ ). Wyniki badań podzielono na dwie grupy różniące się stopniem zbrojenia kompozytowego ( $\rho_{f,eq}$ ), wynoszącym odpowiednio 0,05% i 0,10% (rys. 1).



Rys. 1. Wpływ stopnia zbrojenia stalowego  $\rho_s$  na stopień wzmocnienia  $\eta_u$



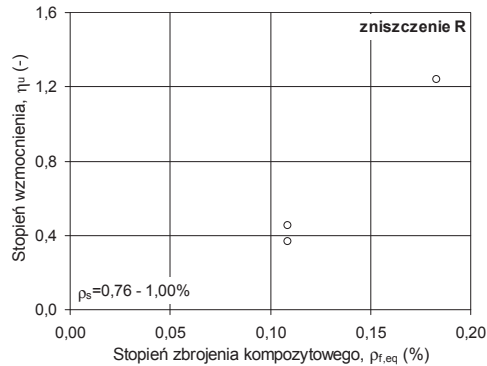
Rys. 2. Wpływ stopnia naprężenia wstępnego  $\epsilon_{fp}$  na stopień wzmocnienia  $\eta_u$

Wyniki badań potwierdzają opinię o spadku stopnia wzmocnienia elementu wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia stalowego. Słabiej zbrojone elementy żelbetowe ( $\rho_s=0,44\%$ ) wykazują większy stopień wzmocnienia ( $\eta_u=1,55$ ) niż elementy silniej zbrojone stalą, dla których stopień zbrojenia i wzmocnienia wynoszą odpowiednio  $\rho_s=0,50\%$  i  $\eta_u=0,86$  oraz  $\rho_s=0,83\%$  i  $\eta_u=0,59$ , przy takim samym stopniu zbrojenia kompozytowego  $\rho_{f,eq}=0,05\%$ . Podobna tendencja występuje w przypadku elementów nieco silniej wzmocnionych kompozytami CFRP ( $\rho_{f,eq}=0,10\%$ , patrz rys. 1). Dzieje się tak zarówno w przypadku wzmocnień z kotwionymi i niekotwionymi końcami naprężonych taśm/mat CFRP. Dwukrotny wzrost stopnia zbrojenia stalowego elementu (z  $\rho_s=0,44\%$  do  $\rho_s=0,89\%$ ) spowodował ponad dwukrotny spadek stopnia jego wzmocnienia (z  $\eta_u=1,55$  do  $\eta_u=0,59$ ). Różnice stopnia wzmocnienia elementów o takim samym stopniu zbrojenia stalowego i kompozytowego, widoczne na rysunku 1 są wynikiem różnych poziomów wstępnego naprężenia kompozytu ( $\epsilon_{fp}$ ) podczas wzmocniania. To z kolei potwierdza opinię o korzystnym wpływie stopnia naprężenia taśmy lub maty CFRP na stopień wzmocnienia elementu, co wyraźnie widać na rysunku 2, gdzie porównano elementy w dwóch seriach o tym samym stopniu zbrojenia kompozytowego  $\rho_{f,eq}=0,10\%$  i stopniach zbrojenia stalowego odpowiednio  $\rho_s=0,44\%$  i  $\rho_s=0,50\%$ . W obu seriach wzrost poziomu naprężenia kompozytu CFRP powodował wzrost stopnia wzmocnienia elementu.

Wyraźny wpływ poziomu naprężenia kompozytu na efektywność wzmocnienia został potwierdzony w elementach, które zniszczyły się na skutek odspojenia kompozytu od powierzchni belki (mechanizm zniszczenia ICD). Poziom naprężenia kompozytu nie ma wpływu na nośność elementów ze skutecznym zakotwieniem końców naprężonych taśm/mat CFRP, ponieważ o nośności tych elementów decyduje wytrzymałość włókien kompozytu na rozciąganie.

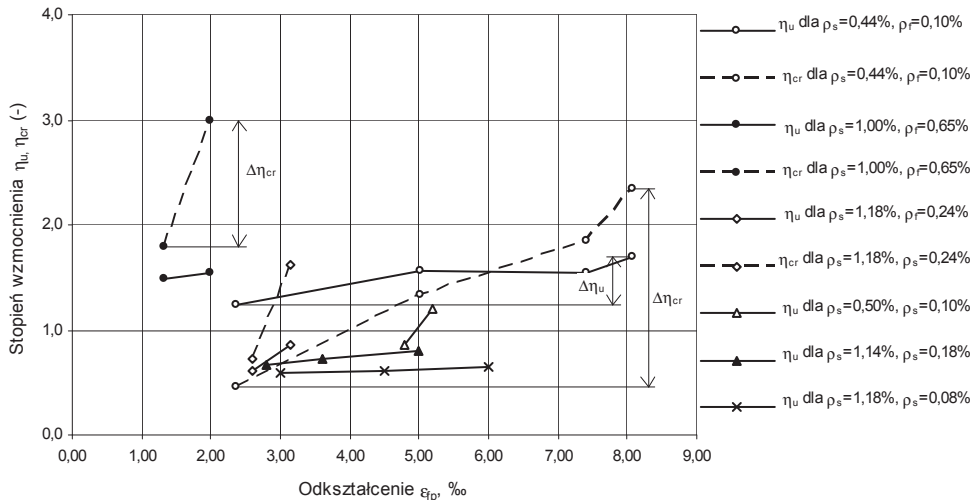
Wpływ sprowadzonego stopnia zbrojenia kompozytowego  $\rho_{f,eq}$  na efektywność wzmocnienia elementów, które zniszczyły się przez zerwanie tego zbrojenia został przedstawiony na rysunku 3. Wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia kompozytowego  $\rho_{f,eq}$ , obserwuje się wyraźny, niemal liniowy wzrost stopnia wzmocnienia elementu  $\eta_u$ .

Do analizy wpływu poziomu naprężenia kompozytu (określonego wartością jego wstępnego odkształcenia  $\epsilon_{fp}$ ) na efektywność wzmocnienia, autorzy wybrali grupy identycznych elementów, badanych w ramach tych samych serii elementów, różniących się jedynie poziomem wstępnych odkształceń w zbrojeniu CFRP. W zestawieniu uwzględniono zarówno stopień wzmocnienia z uwagi na nośność ( $\eta_u$ ), jak i zarysowanie elementu ( $\eta_{cr}$ ).



Rys. 3. Wpływ stopnia zbrojenia kompozytowego  $\rho_{f,eq}$  na stopień wzmocnienia  $\eta_u$

Graficzną formę tej analizy przedstawiono na rysunku 4, na którym linią ciągłą oznaczono wyniki dotyczące efektywności wzmocnienia w odniesieniu do obciążenia niszczącego, natomiast przerywaną linią wyniki odnoszące się do obciążenia rysującego. Z porównania nachylenia wykresów odpowiadających obu stanom (zniszczenia i zarysowania) dla danej grupy elementów, wyraźnie widać znacznie większy wpływ wstępnego naprężenia kompozytu CFRP na stan graniczny użyteczności niż na stan graniczny nośności. Potwierdza to nawet czterokrotnie większy przyrost stopnia wzmocnienia elementu przy zarysowaniu ( $\Delta\eta_{cr}$ ) niż ten osiągnięty przy zniszczeniu ( $\Delta\eta_u$ ) (porównaj rys. 4).



Rys. 4. Wpływ stopnia naprężenia wstępnego kompozytu  $\varepsilon_{fp}$  na stopień wzmocnienia  $\eta_u$  oraz  $\eta_{cr}$

Badania wzmocnionych elementów, które uległy zniszczeniu na skutek odspojenia od powierzchni betonu wykazały, że maksymalne odkształcenia kompozytu zarejestrowane w badaniach  $\varepsilon_{f,test}$  wahały się od 6,0 do 9,3‰ (tab.1). W celu osiągnięcia najwyższej efektywności wzmocnienia (odpowiadającej jednoczesnemu odspojeniu kompozytu i jego zerwaniu), taśmy/maty CFRP należy wstępnie naprężyć do poziomu odkształceń  $\varepsilon_{fp} = \varepsilon_{fu} - \varepsilon_{f,test}$  (gdzie  $\varepsilon_{fu}$  jest granicznym odkształceniem kompozytu na rozciąganie, a  $\varepsilon_{f,test}$  autorzy proponują przyjąć 7‰), oczywiście o ile pozwoli na to wytrzymałość betonu w ściskanej strefie przekroju.

Nieliczne jak dotąd doświadczalne badania wpływu wyteżenia elementu przed jego wzmocnieniem, wykazały bardzo wysoką skuteczność wzmocnień czynnych nawet przy silnym wyteżeniu elementów. Dla przykładu w badaniach [11], przy wyteżeniu wstępnym

elementu odpowiadającym 0,25% i 75% obciążenia niszczonego element niewzmocniony, stopień wzmocnienia wyniósł odpowiednio 1,19 i 0,86 dla elementów o stopniu zbrojenia zwykłego  $\rho_s=0,5\%$  oraz 0,69 i 0,64 dla elementów o stopniu zbrojenia zwykłego  $\rho_s=0,89\%$ . Podobne obserwacje potwierdzają wyniki badań belek [12], które przed wzmocnieniem obciążono doprowadzając zbrojenie rozciągane do uplastycznienia. Mimo tak silnego wyteżenia, osiągnięto stopnie wzmocnienia w zakresie od 0,58 do 0,68.

#### 4. Wnioski

Przedstawiona w pracy analiza potwierdza wysoką skuteczność wzmocniania żelbetowych elementów na zginanie przy użyciu wstępnie naprężonych kompozytów CFRP. Wyniki badań przywołane w pracy wykazały znaczący wpływ stopnia zbrojenia stalowego na efektywność wzmocnienia, która spada wraz ze wzrostem tego zbrojenia. Nie mniej jednak nawet przy wysokim stopniu zbrojenia zwykłego ( $\rho_s=0,89\%$ ), stopień wzmocnienia był satysfakcjonujący ( $\eta_u=0,59$ ), co już przy niskim stopniu zbrojenia ( $\rho_s=0,44\%$ ) dało bardzo wysoki stopień wzmocnienia ( $\eta_u=1,55$ ).

Na uwagę zasługuje istotny wpływ poziomu wstępnego naprężenia kompozytu CFRP na efektywność bezkrotkowego wzmocnienia. Parametr ten nie ma jednak wpływu na nośność elementów wzmocnionych skutecznie kotwionymi taśmami/matami, w których o zniszczeniu decyduje wytrzymałość zbrojenia kompozytowego na rozciąganie. W przeciwieństwie do stanu granicznego zniszczenia, poziom wstępnego naprężania kompozytu bardzo korzystnie wpływa na pracę wzmocnionego elementu w stanie granicznym użyteczności, co potwierdza ponad czterokrotnie większy przyrost stopnia wzmocnienia elementów przy ich zarysowaniu niż odpowiadający przyrost osiągnięty przy zniszczeniu.

Praktyczny aspekt podjętej w pracy analizy stanowi określenie wpływu wstępnego wyteżenia elementów przed wzmocnieniem na efektywność wzmocnienia czynnego. Wyniki badań jednoznacznie potwierdzają bardzo wysoką skuteczność takiego wzmocnienia nawet przy silnym wyteżeniu elementu przed wzmocnieniem odpowiadającym 75% obciążenia niszczonego element niewzmocniony.

#### Literatura

- 1 Kotynia R., Kamińska M.E. Odształcalność i sposób zniszczenia żelbetowych belek wzmocnionych na zginanie materiałami CFRP; Badania doświadczalne elementów i konstrukcji betonowych, Zeszyt 13, Wyd. Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej, Łódź 2003.
- 2 Łagoda M. Wzmocnianie konstrukcji mostowych kompozytami wstępnie sprężonymi. Konferencja Naukowo-Techniczna Konstrukcje Sprężone, Kraków, marzec 2012.
- 3 Kałuża M., Ajdukiewicz A. Przegląd metod zewnętrznego sprężania żelbetowych elementów materiałami kompozytowymi w aspekcie efektywności czynnego wzmocnienia. Konferencja Naukowo-Techniczna Konstrukcje Sprężone, Kraków, marzec 2012.
- 4 Siwowski T., Żółtowski P., Adamek-Misiołek A. The application of prestressed CFRP strip for bridge strengthening. Materiały konferencyjne CECOM 2012, Kraków, listopad 2012.
- 5 You Y.C., Choi K.S., Kim J.H. An experimental investigation on flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP strip using a durable anchorage system. Composites: Part B 43 (2012) 3026-3036.
- 6 Wight R., Green M., Erki M-A. Prestressed FRP sheets for poststrengthening reinforced concrete beams. Journal of Composites for Construction, Vol. 5 Issue 4 (2001) 214-220.
- 7 Kim Y., Wight R., Green M. Flexural strengthening of RC beams with prestressed sheets: using nonmetallic anchor system. J. of Composites for Construction, Vol. 12 Issue 1 (2008) 44-52.
- 8 Kotynia R., Walendziak R., Stoecklin I., Meier U., RC Slabs Strengthened with Prestressed and Gradually Anchored CFRP Strips under Monotonic and Cycling Loading, J. of Composites for Constructions (2011), Nr 4-5, 168-180.
- 9 Pellegrino C., Modena C. Flexural strengthening of real-scale RC and PRC beams with end-anchored pretensioned FRP laminates. ACI Structural Journal 106. 3 (2009) 319-328.

- 10 Yu P., Silva P., Nanni A. Flexural strength of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon fiber-reinforced polymer sheets – part II. ACI SJ, 105. 1 (2008) 11-20.
- 11 Kotynia R., Lasek K., Staśkiewicz M., Flexural behaviour of preloaded RC beams strengthened with prestressed CFRP laminates, J. of Composites for Constructions (2013), w recenzji.
- 12 Mukherjee A., Rai G. Performance of reinforced concrete beams externally prestressed with fiber composites. Construction and Building Materials. Vol. 23 Issue 2 (2009) 822-828.
- 13 Garden H., Hollaway L., An experimental study of the failure modes of reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon composite plates. Composites: Part B 29B (1998) 411-424.
- 14 Kałuża M., Ajdukiewicz A., Comparison of behaviour of concrete beams with passive and active strengthening by means of CFRP strips. Architecture Civil Eng. Environment 2 (2008) 51-64.
- 15 Quantrill R., Hollaway L., The flexural rehabilitation of reinforced concrete beams by the use of prestressed advanced composite plates. Composites Science and Technology 58 (1998) 1259-1275.

## Efficiency analysis of strengthening of RC structures with prestressed CFRP composites

Michał Staśkiewicz<sup>1</sup>, Renata Kotynia<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Concrete Structures, Faculty Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, Lodz University of Technology,  
e-mail: [michal.staskiewicz@p.lodz.pl](mailto:michal.staskiewicz@p.lodz.pl), [renata.kotynia@p.lodz.pl](mailto:renata.kotynia@p.lodz.pl)*

**Abstract:** The subject of the paper is the analysis of the efficiency of strengthening of RC structures for flexure with use of prestressed CFRP composites. Basic methods of application of the strengthening are described along with the issues connected with the prestressing and anchorage of the CFRP materials. The authors prepared a database of the results of experimental tests based on the published research, which was the basis for the analysis of failure modes of the strengthened members and its efficiency depending on the characteristics of members. The aim of the paper was to define the influence of steel reinforcement ratio, composite reinforcement ratio and initial CFRP prestressing strain on the efficiency of the applied strengthening in terms of load capacity and serviceability conditions.

**Keywords:** strengthening, flexure, reinforced concrete, prestressed, CFRP, composite, efficiency, load capacity