

Parametry wpływające na efektywność wzmocnień belek żelbetowych materiałami kompozytowymi w sposób czynny

Dr inż. Przemysław Bodzak, Politechnika Łódzka

1. Wprowadzenie

Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych materiałami CFRP jest jedną z popularniejszych technik stosowanych w celu zwiększenia nośności lub poprawy właściwości użytkowych (rysy, ugięcia), zarówno w przypadku elementów płytowych, jak i belkowych. Właściwości fizyczne kompozytów węglowych stosowanych w budownictwie, tj. duża wytrzymałość na rozciąganie przy istotnie mniejszym module sprężystości w porównaniu ze stałą zbrojeniową powodują, że w większości przypadków nie ma możliwości wykorzystania pełnej wytrzymałości na rozciąganie tych materiałów. Jedną z technik umożliwiających lepsze wykorzystanie właściwości fizycznych materiałów CFRP jest ich wstępne naprężenie przed przyklejeniem do powierzchni betonu. Pozwala to również, poprzez wprowadzenie dodatkowych sił, na zmniejszenie ugięć i szerokości rys.

Na podstawie dotychczasowych badań stwierdzono, że zniszczenie elementów wzmocnionych techniką EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) w sposób bierny może nastąpić, podobnie jak typowej konstrukcji żelbetowej, na trzy podstawowe sposoby, tj. na skutek zmiążdżenia betonu w strefie ściskanej, wyczerpania nośności taśmy lub na ścinanie. Wyczerpanie nośności taśmy, ze względu na jej odmienne od właściwości stali zbrojeniowej parametry fizyczne, tj. liniową sprężystość w całym zakresie obciążenia, następuje w wyniku zerwania, a nie uplastycznienia materiału. Zupełnie inną formą zniszczenia konstrukcji wzmocnionej materiałami kompozytowymi, nie spotykaną w typowych elementach żelbetowych jest oderwanie taśmy lub maty od powierzchni betonu, przy czym można wyróżnić trzy rejony (rys. 1), w których może nastąpić zniszczenie:

- w strefie zakotwienia:
 - na końcu taśmy z odspojeniem otuliny (typ 1a),
 - w strefie ostatniej rysy ukośnej (typ 1b),
- na odcinku działania momentu zginającego i siły poprzecznej w sąsiedztwie rysy ukośnej (typ 2),
- w strefie maksymalnego momentu zginającego w sąsiedztwie rysy prostopadłej do powierzchni elementu (typ 3).

Na podstawie dotychczasowych badań te trzy typy zniszczenia zostały szczegółowo opisane i opracowano stosowne procedury obliczeniowe właściwe w przypadku wzmocnień

biernych. Wzmocnienia czynne poza wprowadzeniem wstępnego naciągu taśmy nie różnią się niczym od wzmocnień biernych, z tego względu powinny obowiązywać zarówno podobne założenia, jak i procedury obliczeniowe.

2. Założenia projektowe dla wzmocnień biernych

Dla trzech wymienionych wcześniej stref zniszczenia, na podstawie wytycznych technicznych bądź przepisów normowych, można wyznaczyć maksymalne siły oraz odkształcenia kompozytu, a także minimalne długości zakotwienia taśmy lub maty CFRP. Wzory służące do obliczenia nośności elementów wzmocnionych wyznaczone wg norm SIA 166 [3], [4], fib Bulletin 14 [5], TR 55 (2012) [6], CNR-DT 200/2004 [7], ACI 440.2R-08 (2008) [8] przedstawiono poniżej.

Nośność zakotwienia taśmy

$$\text{SIA 166 } F_{b0,R} = 0,5 b_f \sqrt{E_f t_f f_{ctH}} \quad f_{ctH} \approx f_{ctm} \quad (1)$$

$$\text{fib Bulletin 14 } N_{ta,max} = a \cdot c_1 \cdot k_c \cdot k_b \cdot b_f \cdot \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctm}} \quad (2)$$

$$\text{TR55 } T_{k,max} = 0,5 \cdot k_b \cdot b_f \cdot \sqrt{E_{fd} \cdot t_f \cdot f_{ctk}} \quad (3)$$

$$\text{gdzie: } k_b = 1,06 \sqrt{\left(2 - \frac{b_f}{b}\right) / \left(1 + \frac{b_f}{400}\right)} \geq 1 \quad (4)$$

CNR-DT 200/2004

$$F_{fd} = b_f \sqrt{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot 0,03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}} \quad (5)$$

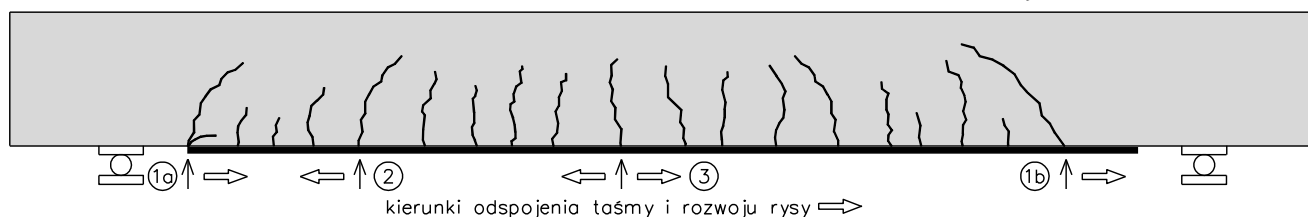
Aktywna długość zakotwienia

$$\text{SIA 166 } l_{b0} = \frac{3\pi}{16} \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{f_{ctH}}} \quad (6)$$

$$\text{fib Bulletin 14 } l_{b,max} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{c_2 \cdot f_{ctm}}} \quad (7)$$

$$\text{TR55 } l_{l,max} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{E_{fd} \cdot t_f}{f_{ctk}}} \quad (8)$$

$$\text{CNR-DT 200/2004 } l_e = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{ctm}}} \quad (9)$$



Rys. 1. Lokalizacja miejsc zniszczenia elementów wzmocnionych materiałami CFRP

Graniczne naprężenia ścinające

SIA 166 $\tau_{f,lim} = 2,5 \cdot \tau_c = 2,5 \cdot 0,3 \cdot \sqrt{f_{ck}}$ (10)

fib Bulletin 14 $\tau_b \leq f_{cb} ; f_{cb} = 1,8 \cdot f_{ctk}$ (11)

TR55 $\tau_{lim,c} = 0,8 f_{ctk}$ (12)

$\tau_{lim,y} = 4,5 f_{ctk}$ (13)

Maksymalne odkształcenia taśmy – w związku z brakiem kompatybilności na styku beton kompozyt

SIA 166 $\varepsilon_{f,lim,d} = 8‰$ (14)

ε_{fu} – wg karty materiałowej

fib Bulletin 14 $\varepsilon_{f,lim} = (6,5 - 8,5)‰$ (15)

CNR-DT 200/2004 $\varepsilon_{fd} = k_{cr} \sqrt{\frac{0,06 k_b \sqrt{f_{ck} f_{ctm}}}{E_f \cdot t_f}}$ (16)

TR55 $\varepsilon_{f,max} = 0,114 \frac{\tau_{sc}}{\sqrt{E_{fd} t_f}} \leq \varepsilon_{fd}$ (17)

ACI $\varepsilon_{fd} = 0,41 \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}}$ (18)

gdzie:

b_f – szerokość kompozytu,

t_f – grubość kompozytu,

A_f – pole powierzchni kompozytu,

E_{fd} – moduł sprężystości kompozytu.

W powyższych wzorach nośność, niezależnie od wybranej normy, zależy maksymalnie od czterech parametrów. Poszczególne wytyczne różnią się oczywiście dodatkowymi współczynnikami, jednak z reguły należy uwzględnić szerokość i grubość materiału CFRP, jego moduł sprężystości oraz wytrzymałość betonu. Nośność zakotwienia w przypadku zakotwień biernych jest proporcjonalna do iloczynu $b_f \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctm}}$ natomiast długość zakotwienia do ilorazu $\sqrt{E_t \cdot t_f / f_{ctm}}$.

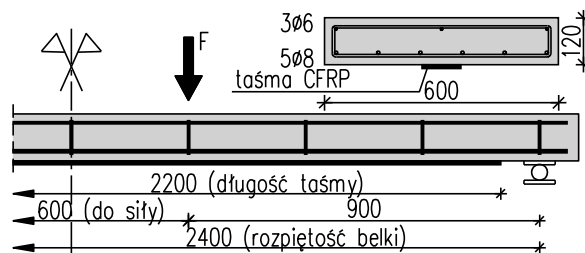
Odształcenie kompozytu ograniczane jest do określonej wartości maksymalnej (SIA 166, fib Bulletin 14) lub jest proporcjonalne do ilorazu $\sqrt{f_{ctm} / (E_f \cdot t_f)}$.

Na podstawie dotychczasowych badań elementów żelbetowych wzmocnionych wstępnie naprężonymi taśmami z włókien węglowych, tj. w sposób czynny zaobserwowano dwa podstawowe typy zniszczenia związane z materiałami CFRP – zerwanie taśmy lub jej odspojenie od powierzchni betonu. Ten drugi typ zniszczenia jest również charakterystyczny dla wzmocnień realizowanych w sposób bierny. Zakładając, że w przypadku elementów wzmocnionych taśmami wstępnie naprężonymi zależności dla wzmocnień biernych są również obowiązujące, przeprowadzono stosowną analizę.

3. Programy badań

Do analizy wybrano badania elementów żelbetowych wzmocnionych przy użyciu wstępnie naprężonych taśm CFRP klejonych do powierzchni betonu (EBR) zrealizowane w dwóch niezależnych ośrodkach: w Portugalii (ISISE) [1] i w Polsce (KBB) [2]. Pierwsza grupa badań [1] obejmowała dwie serie, na które ogółem składało się 6 elementów. W pierwszej serii zbadano 4

elementy ze wzmocnieniem wykonanym z wstępnie naprężonej taśmy CFRP o szerokości 50 mm, natomiast w drugiej serii szerokość taśmy użytej do wzmocnienia była większa i wynosiła 80 mm. Początkowe odkształcenia taśmy przed jej przyklejeniem do powierzchni betonu (wstępny naciąg $\varepsilon_{f,p0}$) w obu seriach były zbliżone i wynosiły około 4‰. Poszczególne elementy w serii II i III różniły się między sobą systemem kotwienia wzmocnienia kompozytowego. Zastosowano dwa systemy kotwienia – mechaniczny (MA) oraz przyczepnościowy ze stopniową redukcją siły sprężającej (GA). Dodatkowo jeden element serii II został wzmocniony przy użyciu taśmy CFRP klejonej tradycyjnie bez stosowania wstępnego naprężenia taśmy i zakotwień mechanicznych (EBR). Wszystkie elementy miały rozpiętość $L = 2,40$ m i prostokątny kształt przekroju poprzecznego o wymiarach $0,6 \times 0,12$ m ($b \times h$). Zbrojenie główne wykonano ze stali żebrowanej i stanowiły je odpowiednio 5 # 8 dółem oraz 3 # 6 górą – $\rho_L = 0,347\%$. Mimo iż wymiary przekroju poprzecznego były typowe dla płyt, zastosowano strzemiona z prętów gładkich $\varnothing 6$ w rozstawie 0,3 m. Wzmocnienie elementów wykonano z pojedynczej taśmy CFRP, o szerokości 50 mm lub 80 mm klejonej do dolnej powierzchni płyty. Elementy badano, stosując obciążenie monotoniczne w postaci dwóch sił skupionych ustawionych w odległości 0,9 m od podpór, co tworzyło strefę czystego zginania o długości 0,6 m – rysunek 1. Podstawowe informacje dotyczące badanych elementów oraz parametrów związanych ze zrealizowanym wzmocnieniem przedstawiono w tabeli 1 i 2.



Rys. 2. Element badawczy ISISE – grupa I

Tabela 1. Elementy badawcze ISISE [1]

Element	A_f [mm × mm]	Kotwienie	$\varepsilon_{f,p0}$ [‰]	f_{cm} [MPa]	E_{cm} [GPa]
SL50_1.4_EBR	50 × 1,4	-	-	53,4	32,2
SL50_1.4_MA	50 × 1,4	MA	3,98	53,4	32,2
SL50_1.4_GA	50 × 1,4	GA	4,05	53,4	32,2
SL50_1.2_MA	50 × 1,2	MA	4,19	49,5	-
SL80_1.2_MA	80 × 1,2	MA	3,99	57,4	32,6
SL80_1.2_GA	80 × 1,2	GA	4,06	57,4	32,6

Tabela 2. Właściwości materiałów – badania ISISE

Materiał	Średnica [mm]	Wymiary [mm × mm]	E GPa	f_y MPa	f_u MPa
Stal	$\varnothing 6$		210	579	670
Stal	$\varnothing 8$		213	501	594
CFRP		50 × 1,2	168	-	2944
CFRP		50 × 1,4	155	-	2457
CFRP		80 × 1,2	165	-	2455

gdzie:

A_f – wymiary taśmy,

f_y – granica plastyczności zbrojenia,

f_u – wytrzymałość na rozciąganie.

Druga grupa badań (KBB) [2] obejmowała ogółem 5 elementów. Jako elementy badawcze wykonano belki (płyty) o przekroju poprzecznym $0,5 \times 0,22$ m i długości $L = 6,0$ m w osiach podpór (rys. 3). Podstawowe informacje dotyczące badanych elementów oraz parametrów związanych ze zrealizowanym wzmocnieniem przedstawiono w tabeli 3 i 4.

Tabela 3. Elementy badawcze KBB [2]

Belka	$2F_0$ (kN)	$2F_0/2F_{u0}$ (-)	kotwienie	$\epsilon_{t,p0}$ (‰)	f_{cm} (MPa)
P3	6,1	0,25	MA	5,20	35,3
P4	19,8	0,76	MA	4,75	46,7
P5	6,1	0,25	MA	4,60	33,8
P6	19,8	0,76	MA	4,40	44,0
P7	6,1	0,23	GA	5,10	50,3

gdzie:

F_0 – obciążenie wstępne w chwili wykonywania wzmocnienia,

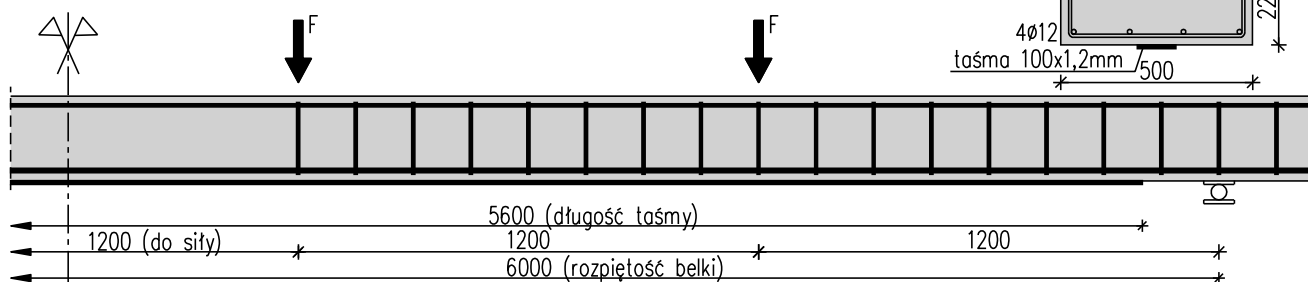
F_{u0} – teoretyczna nośność belki niewzmocnionej $2F_{u0} = 24$ kN (P3, P5), 26 kN (P4, P6, P7),

$\epsilon_{t,p0}$ – wstępne odkształcenia taśmy w chwili wzmocnienia.

Tabela 4. Właściwości materiałów – badania KBB

Materiał	Średnica [mm]	Wymiary mm × mm	E GPa	f_y MPa	f_u MPa
Stal	∅ 12		191	511,4	594,5
Stal	∅ 12		191	539,6	627,5
CFRP		100 × 1,2	173	-	2857

Zbrojenie główne składało się z prętów 4 # 12 – $\rho_L = 0,452\%$. Zastosowano również strzemiona wykonane z prętów # 8 w rozstawie 0,15 m. Podobnie jak w przypadku badań portugalskich, wzmocnienie realizowano przy użyciu jednej taśmy CFRP, jednak o stałych wymiarach ($b_t = 100$ mm, $t_t = 1,2$ mm). Również w tych badaniach zastosowano dwie techniki kotwienia – mechaniczne (MA) oraz przyczepnościowe ze stopniową redukcją siły sprężającej (GA). W tym ostatnim przypadku wstępnie naprężoną taśmę przyklejono w części środkowej elementu na długości 3,6 m, tj. pomiędzy siłami skupionymi. Po uzyskaniu przez klej pełnej wytrzymałości przyklejone zostały skrajne odcinki taśmy o długości 1,0 m w sposób bierny, tj. bez wstępnego naciągu.



Rys. 3. Element badawczy KBB – grupa II

Dodatkowo w badaniach tych przyjęto wstępny stopień obciążenia przed wzmocnieniem jako kolejny czynnik różnicujący poszczególne elementy pomiędzy sobą. W pierwszym przypadku uznano ciężar własny jako obciążenie podstawowe działające na element przed przystąpieniem do wzmocnienia. Odpowiadało to obciążeniu siłami skupionymi o wartości $2F_p = 6,1$ kN, co stanowiło 25% obciążenia niszczącego dla elementu niewzmoczonego. Drugi przypadek to obciążenie wstępne na poziomie 75% obciążenia niszczącego, co odpowiadało sile $2F_p = 19,8$ kN. Wstępne odkształcenia taśmy CFRP, tj. przed jej przyklejeniem były zróżnicowane i wynosiły od 4,4‰ do 5,2‰. Elementy badano, stosując układ czterech sił obciążających ustawionych w odległościach 1,2 m, zarówno od końców elementu jak i pomiędzy nimi (rys. 3).

4. Wyniki badań

Wszystkie analizowane elementy zniszczyły się w wyniku odspojenia taśmy CFRP od powierzchni betonu. W żadnym przypadku nie zaobserwowano oznak wyczerpania nośności materiału kompozytowego.

Podstawowe wyniki badań zarówno materiałów (beton), jak i elementów należących do grupy pierwszej przedstawiono w tabeli 5, natomiast grupy drugiej w tabeli 6.

Zgodnie z informacjami przedstawionymi przez autorów badań i zawartymi w [1] zniszczenie w wyniku odspojenia taśmy było nagłe w przypadku elementów, w których taśma nie była dodatkowo kotwiona mechanicznie. Dotyczyło to zarówno płyty wzmocnionej taśmą bez wstępnego naciągu, jak i płyt wzmocnionych poprzez sprężenie z zastosowaniem kotwienia z redukcją siły sprężającej.

W obu seriach zniszczenie elementów wzmocnionych przy zastosowaniu kotwienia mechanicznego nastąpiło w wyniku odspojenia się taśmy od betonu na odcinkach, na których taśma klejona była do jego powierzchni. Po odspojeniu kompozytu, w wyniku działania znacznych sił w strefie kotwienia, następowało wysunięcie taśmy z zakotwienia.

5. Analiza wyników badań

Badania zrealizowane w obu ośrodkach, mimo iż dotyczyły tego samego zagadnienia, przeprowadzone były na elementach o różnych rozpiętościach i innym układzie sił obciążających.

Tabela 5. Zestawienie wyników badań ISISE

Element	ε_{ct} (‰)	w_u (mm)	F_u (kN)	$\Delta\varepsilon_f$ (‰)	Typ
SL50×1,4_EBR	1,64	20,47	35,06	4,64	O
SL50×1,4_GA	2,25	56,02	56,02	10,29	O
SL50×1,4_MA	2,25	34,39	61,76	11,97	Z
SL50×1,2_MA	2,53	73,23	59,09	12,53	Z
SL80×1,2_GA	2,88	30,61	66,21	8,96	O
SL80×1,2_MA	2,51	48,62	72,58	10,13	Z
SL80×1,2_MA	2,51	48,62	72,58	10,13	Z

gdzie:

O – odspojenie, wysunięcie taśmy z zakotwienia,
 Z – zmiążdżenie betonu w strefie siły skupionej.

Tabela 6. Zestawienie wyników badań KBB

Element	$2F_u$ (kN)	$\Delta\varepsilon_f$ (‰)	$\varepsilon_{f,max}$ (‰)	Typ
P3	52,6	9,30	14,50	O
P4	48,3	6,85	11,60	O
P5	46,8	6,90	11,50	Z
P6	45,1	5,00	9,90	W
P7	50,4	6,40	11,50	S

gdzie:

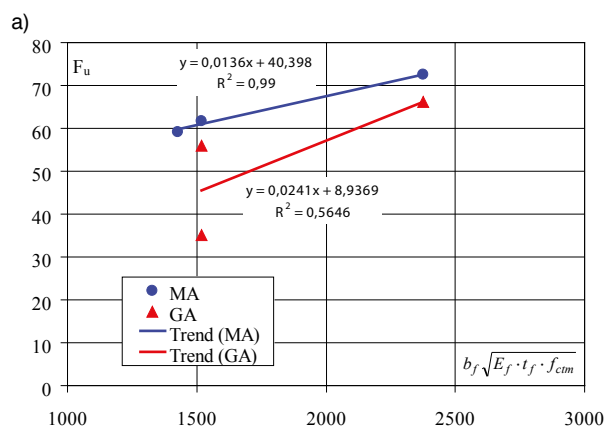
F_u – obciążenie niszczące belki wzmocnionej,
 $\Delta\varepsilon_f$ – przyrost odkształceń taśmy od chwili wzmocnienia do zniszczenia belki,

$\varepsilon_{f,max}$ – maksymalne odkształcenia taśmy w chwili zniszczenia belki,

W – wysunięcie taśmy z systemu kotwiącego,

S – odspojenie taśmy w strefie zmiany siły naprężającej.

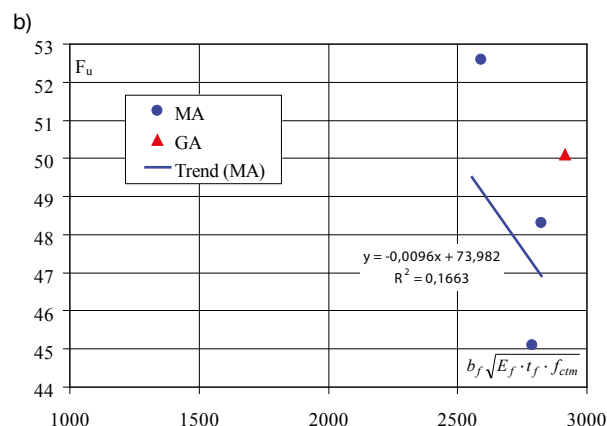
Kolejnym elementem różnicującym była taśma CFRP. W badaniach ISISE stosowano różne typy taśm, natomiast w badaniach KBB taśma była jednakowa. Inaczej przedstawia się zagadnienie wytrzymałości betonu zastosowanego do wykonania elementów. Badania portugalskie zredukowały wpływ tej zmiennej ze względu na zbliżoną wytrzymałość betonu we wszystkich elementach, natomiast w badaniach krajowych ten parametr mógł mieć istotny wpływ w związku ze znacznym zróżnicowaniem wytrzymałości betonu.



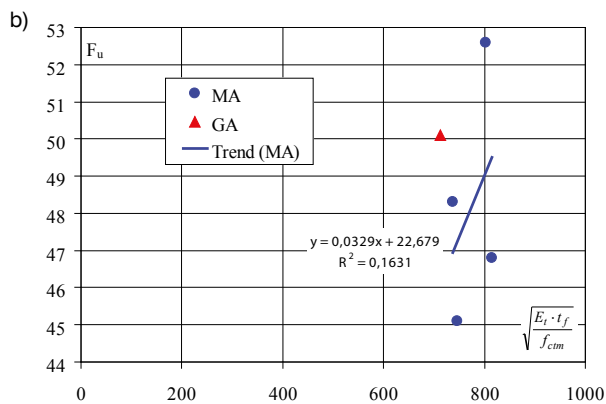
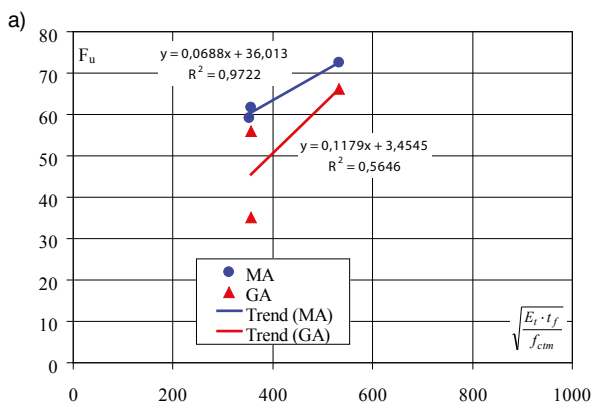
Z tych powodów analizę wyników badań przeprowadzono niezależnie dla obu grup. W ramach poszczególnych grup wydzielono również elementy o różnych typach zakotwienia taśmy. Wynik tego porównania przedstawiono na wykresach – rysunki 4, 5 oraz 6. Dla elementów grupy I (ISISE) głównymi materiałowymi parametrami zmiennymi były grubość i szerokość taśmy CFRP, natomiast dla elementów grupy II (KBB) te parametry materiałowe były wartościami stałymi, a różnice występowały jedynie w wytrzymałości betonu zastosowanego do wykonania elementów. W przypadku badań KBB wyniki pomiarów dla elementu P7 były każdorazowo uwzględniane w graficznym zobrazowaniu zależności, jednak ze względu na inny typ zakotwienia nie były one brane pod uwagę przy wyznaczaniu linii trendu.

Jak można łatwo zauważyć, dla analizowanych elementów grupy I (ISISE) bardzo dobrą korelację liniową (rys. 4a) uzyskano jedynie w przypadku zakotwienia mechanicznego (MA) dla wszystkich parametrów materiałowych uwzględnianych jednocześnie. Dla samej wytrzymałości betonu ta zależność nie jest już tak jednoznaczna, mimo że parametr ten nie był w tych badaniach wiodący. Natomiast dla elementów z zakotwieniem przyczepnościowym nie można wykazać powiązania siły niszczącej z właściwościami fizycznymi kompozytu oraz betonu. W przypadku elementów grupy II (KBB) jakkolwiek korelacja pomiędzy parametrami fizycznymi zastosowanych materiałów a siłami niszczącymi nie występuje – rysunek 4b. Dotyczy to zarówno zależności uwzględniających jedynie wytrzymałość betonu, jak i wszystkie parametry materiałowe (t_p , E_p oraz $f_{c,cube}$). Należy przy tym pamiętać, że wyłącznie wytrzymałość betonu była w tych elementach zróżnicowana, właściwości taśmy CFRP były takie same w całym badaniach tej grupy. Właśnie z tego względu wydzielono wytrzymałość betonu jako oddzielny parametr powiązany z siłą niszczącą – rysunek 6.

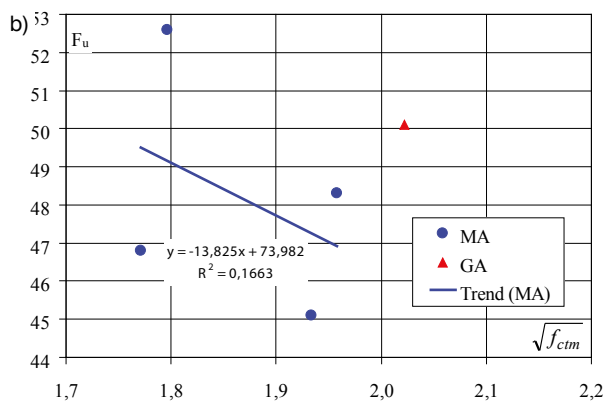
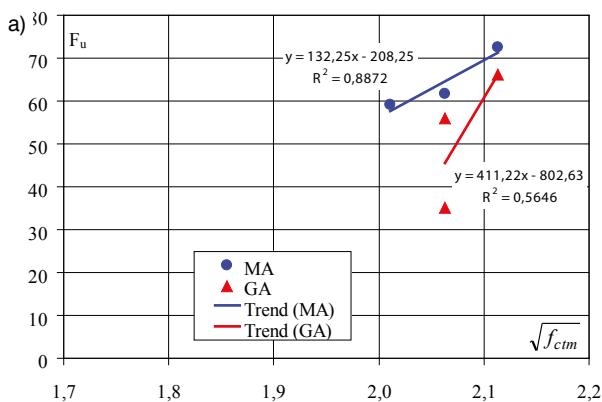
Zgodnie z założeniami teoretycznymi dotyczącymi zagadnienia odspojenia taśmy, poza parametrami fizycznymi zastosowanych materiałów, kolejnym ważnym czynnikiem determinującym nośność elementu wzmocnionego materiałami CFRP jest odkształcenie taśmy lub maty w chwili zniszczenia. Ponieważ w analizowanych badaniach stosowano wstępne



Rys. 4. Zależność siły niszczącej od iloczynu $b_f \sqrt{E_f \cdot t_f \cdot f_{ctm}}$ w badaniach a) ISISE, b) KBB



Rys. 5. Zależność siły niszczącej od iloczynu $\sqrt{\frac{E_t \cdot t_f}{f_{ctm}}}$ w badaniach a) ISISE, b) KBB



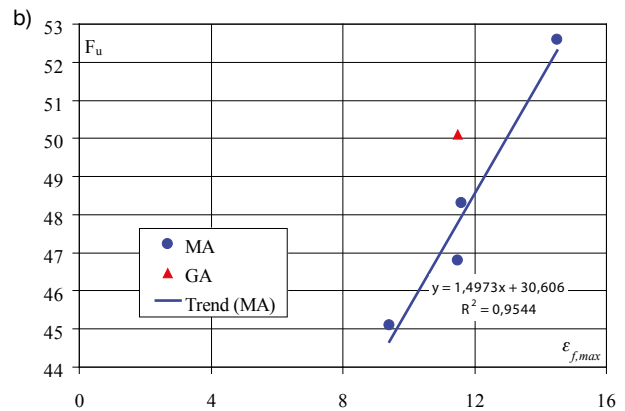
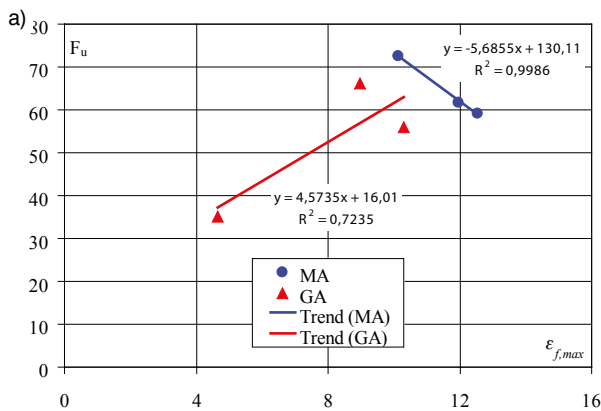
Rys. 6. Zależność siły niszczącej od $\sqrt{f_{ctm}}$ wytrzymałości betonu w badaniach a) ISISE, b) KBB

naprężenie taśmy przed jej przyklejeniu do powierzchni betonu, oprócz wartości odkształceń maksymalnych w analizie istotny może być również przyrost odkształceń kompozytu pod wpływem obciążeń zewnętrznych. Z tego względu na rysunkach 7, 8 przedstawiono w sposób graficzny zależności pomiędzy analizowanym odkształceniem taśmy maksymalnym lub przyrostem ($\epsilon_{f,max}$, $\Delta\epsilon_i$) a siłą niszczącą F_u . Dla zakotwień mechanicznych uzyskano bardzo dobrą korelację liniową zarówno pomiędzy odkształceniem maksymalnym taśmy CFRP w chwili zniszczenia, jak i przyrostem odkształceń taśmy CFRP a siłą niszczącą. Jednak w przypadku badań ISISE wraz ze wzrostem odkształceń kompozytu nośność elementu maleje, natomiast w badaniach KBB sytuacja jest całkowicie odwrotna. Zupełnie odmienne zależności, a raczej ich brak występują w przypadku zakotwień przyczepnościowych. Na podstawie wyników badań ISISE nie można zaobserwować jakichkolwiek związków pomiędzy odkształceniami taśmy a siłami niszczącymi.

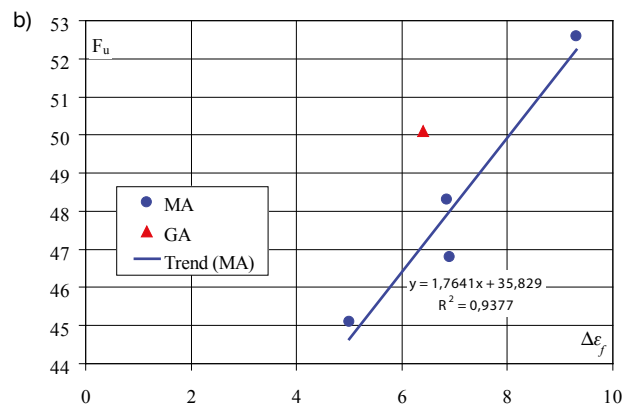
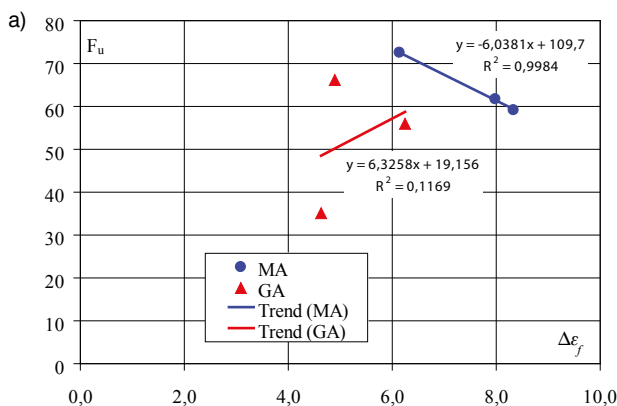
Kolejny parametr występujący jedynie w badaniach elementów grupy II (KBB), czyli różny stopień wstępnego obciążenia nie wydaje się istotny w przypadku elementów wzmacnianych w sposób czynny (por. rys. 9). Początkowe obciążenie elementu nie wpłynęło w sposób zauważalny na jego nośność po wykonaniu wzmocnienia.

Innym czynnikiem mogącym mieć wpływ na wartości sił niszczących, a nieuwzględnianym w dotychczasowej analizie, jest wstępny naciąg taśmy wprowadzony podczas wzmocnienia elementów. W obu grupach elementów był on każdorazowo inny, co wynikało z nieznacznie różnego początkowego naprężenia kompozytu i ewentualnych strat w zakotwieniu. Wstępną siłą sprężającą wyznaczono dla każdego elementu indywidualnie na podstawie odkształcenia kompozytu zmierzzonego podczas wykonywania wzmocnienia oraz parametrów fizycznych materiałów kompozytowych.

Zależności w formie graficznej pomiędzy siłą sprężającą a obciążeniem niszczącym przedstawiono na rysunku 10. Dla grupy pierwszej występują bez mała idealne zależności liniowe pomiędzy $F_{t,p0}$ a F_u w ramach obu typów elementów, tzn. z zakotwieniem mechanicznym (MA), jak i przyczepnościowym (GA), w których zastosowano redukcję siły sprężającej. W tym ostatnim przypadku w analizie uwzględniono również element wzmocniony klasycznie, w sposób bierny. Dla tego elementu uzyskano pełną zgodność siły niszczącej, w zależności od sprężenia początkowego ($F_{t,p0} = 0$ kN) w obrębie całej grupy. Podobna analiza przeprowadzona w ramach drugiej grupy badawczej pokazała, że również w tym przypadku występuje bardzo dobra korelacja liniowa pomiędzy siłą sprężającą a obciążeniem niszczącym. Przy wyznaczaniu linii trendu



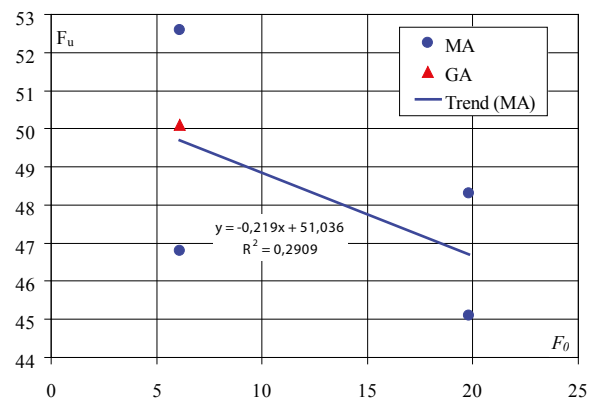
Rys. 7. Zależność siły niszczącej od $\epsilon_{f,max}$ w badaniach: a) ISISE, b) KBB



Rys. 8. Zależność siły niszczącej od $\Delta\epsilon_f$ w badaniach: a) ISISE, b) KBB

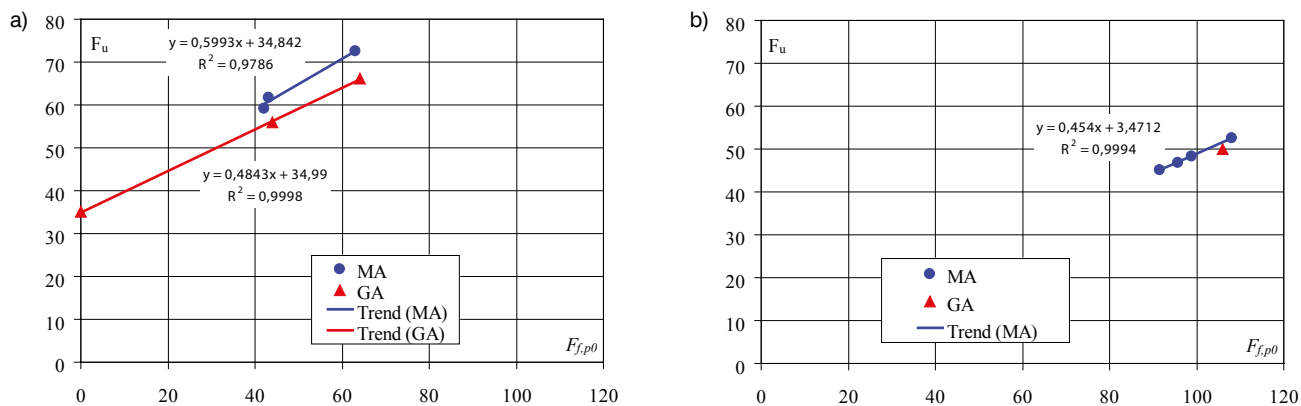
wydzielono element P7, który jako jedyny był wzmocniony przy wykorzystaniu zakotwień przyczepnościowych ze stopniową redukcją siły sprężającej. Jak wynika z przedstawionej analizy, dodatkowym, istotnym czynnikiem wpływającym na nośność elementu po wzmocnieniu jest wstępna siła w taśmie, wprowadzona przed jej przyklejeniu do powierzchni betonu. Nie są natomiast tak istotne, jak wskazywali to niektórzy autorzy, odkształcenia taśmy zarówno początkowe w momencie jej przyklejenia do powierzchni elementu, jak również końcowe w chwili zniszczenia, czy też przyrost odkształceń w kompozycie po wykonaniu wzmocnienia.

Porównując zależności $F_{f,p0} - F_u$, można zauważyć, że zakotwienia przyczepnościowe nie są tak efektywne jak zakotwienia mechaniczne. Różnica sił niszczących dla elementów grupy pierwszej wynosi około 10% przy zastosowaniu zakotwienia mechanicznego i przyczepnościowego natomiast dla grupy drugiej jest mniejsza i wynosi jedynie 3–4% dla obu typów zakotwienia. Dla grupy drugiej to porównanie może jednak być nie w pełni miarodajne, bo w tych badaniach zakotwienia przyczepnościowe zastosowane były tylko w jednym elemencie. Skuteczność wzmocnienia elementu materiałami klejonymi do powierzchni ze względu na warunki stanu granicznego nośności jest znacznie ograniczona. Ze względu na nagły charakter zniszczenia, zwłaszcza w przypadku zakotwień



Rys. 9. Zależność siły niszczącej od wstępnego obciążenia elementów KBB

przyczepnościowych, globalny współczynnik bezpieczeństwa po odspojeniu wzmocnienia powinien być zawsze większy od 1, szczególnie wtedy, gdy nie można wykonać odpowiednich zabezpieczeń wzmocnienia w sytuacjach wyjątkowych (wandalizm, pożar itp.). W takim przypadku dla elementów znacznie wyciężonych w chwili wzmocnienia przyrost nośności będzie niewielki, jeżeli chce się zachować właściwe współczynniki bezpieczeństwa w sytuacji wyjątkowej. Stopień wzmocnienia



Rys. 10. Zależność siły niszczącej od wstępnej siły sprężającej w badaniach: a) ISISE, b) KBB

możliwy do wykorzystania w rzeczywistym obiekcie jest zatem z reguły mniejszy od jedności, jeżeli założy się, że globalny współczynnik bezpieczeństwa konstrukcji oscyluje wokół wartości 2. Z tego względu podawanie możliwych do osiągnięcia stopni wzmocnienia większych niż 1 jest mylące, a rzeczywisty stopień wykorzystania właściwości fizycznych materiału CFRP będzie nieznaczny nawet, jeżeli zastosuje się wstępny naciąg taśmy lub maty. Jedynie, gdy głównym celem wzmocnienia jest ograniczenie ugięć i szerokości rys, to przy zastosowaniu czynnego systemu wzmocnień można obliczeniowo uzyskać większe wykorzystanie nośności kompozytu. W tym przypadku stopień wzmocnienia, rozumiany jako wzrost nośności, nie będzie znaczący mimo istotnej redukcji ugięć i szerokości rys w wyniku wstępnego naciągu taśmy, czyli zastosowania zewnętrznego sprężenia. W analizowanych badaniach np. belek P3-P7 z grupy KBB wartości pomierzonych ugięć już po wzmocnieniu przy obciążeniu rzędu 22 kN wynosiły około 30 mm, co można uznać za wartość maksymalną dla rozpiętości 6,0 m. Ten poziom obciążenia należy w tym przypadku za graniczny, co w odniesieniu do wstępnego obciążenia przed wzmocnieniem wynoszącego około 20 kN daje niewielki przyrost wynoszący tylko 10%.

6. Podsumowanie

Przedstawione analizy parametryczne wpływu, zarówno cech geometrycznych wzmocnienia – wymiarów taśmy (szerokość, grubość), jak i właściwości materiałowych – moduł sprężystości taśmy, wytrzymałość betonu pokazały, że nie zawsze są one istotne w przypadku elementów wzmocnianych taśmami wstępnie naprężonymi i klejonymi do powierzchni betonu. Powiązania cech materiałowych z nośnością elementu po wzmocnieniu oczywiście występują, jednak nie można uznać, że korelacje przedstawione w normach i wytycznych projektowych te zależności uwzględniają właściwie. Sama wartość początkowego odkształcenia taśmy nie wpływa na nośność elementu dopiero jako parametr pozwalający wyznaczyć wartość siły sprężającej staje się istotną zmienną. W przypadku elementów wzmocnianych w sposób czynny najistotniejszy wydaje się być stopień wstępnego naciągu taśmy przed jej przyklejeniem do powierzchni elementu żelbetowego i to niezależnie

od stosowanego systemu zakotwień. Na wartość siły niszczącej nie ma też wpływu początkowe obciążenie elementu występujące w chwili wzmocnienia. Siła niszcząca jest zawsze wprost proporcjonalna do wstępnego naciągu taśmy i to, jak wskazano powyżej, niezależnie od poziomu początkowego obciążenia przed wzmocnieniem elementu.

Ze względu na nagły charakter zniszczenia, zwłaszcza w przypadku zakotwień przyczepnościowych, skuteczność wzmocnienia elementu jest znacznie ograniczona, ponieważ dla stanu granicznego nośności po uszkodzeniu wzmocnienia globalny współczynnik bezpieczeństwa powinien być zawsze większy od 1. Oznacza to, że w sytuacji wyjątkowej nośność konstrukcji niewzmocnionej powinna być zapewniona. Jedynie, gdy głównym celem wzmocnienia jest ograniczenie ugięć i szerokości rys, to przy zastosowaniu czynnego systemu wzmocnień można obliczeniowo uzyskać większe wykorzystanie nośności kompozytu. W tym przypadku stopień wzmocnienia rozumiany jako wzrost nośności nie będzie znaczący, mimo istotnej redukcji ugięć i szerokości rys w wyniku wstępnego naciągu taśmy, czyli zastosowania zewnętrznego sprężenia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sena-Cruz J., Michelis J., Harmanci Y. E., Correia L., Flexural Strengthening of RC Slabs with Prestressed CFRP Strips Using Different Anchorage Systems *Polymers* 7/2015, str. 2100–2118
- [2] Kotynia R., Lasek K., Staśkiewicz M., Doświadczalne badania żelbetowych belek wzmocnionych na zginanie przy użyciu naprężonych taśm CFRP, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, zeszyt 59, 3/2012/III
- [3] SIA 166 (2004), *Klebebewehrungen*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA
- [4] SIA (2004), D 0209, *Dokumentation, Klebebewehrung, Einführung in die Norm SIA 166*
- [5] fib (2001), *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures – Bulletin 14*, International Federation for Structural Concrete (fib), Switzerland
- [6] CNR (2004), *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*, CNR-DT 200/2004, CNR – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome, Italy
- [7] TR55 (2012), *Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials*, Third Edition. Technical Report Nr 55 of the Concrete Society, UK
- [8] ACI (2008), *ACI440.2R-08, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*, American Concrete Institute