

dr hab. inż. Renata Kotynia, prof. PL¹⁾
ORCID: 0000-0002-7247-1229

Fakty i mity o wzmacnianiu konstrukcji żelbetowych na zginanie przy użyciu materiałów kompozytowych FRP

Facts and myths about reinforced concrete structures strengthened with FRP composite materials

DOI: 10.15199/33.2020.05.04

Streszczenie. W artykule przedstawiono konfrontację obowiązujących zasad projektowania wzmocnienia konstrukcji żelbetowych materiałami kompozytowymi FRP z podważającymi je tezami, które z uwagi na błędne założenia prowadzą do mylnych wniosków. Wyjaśnienie mechanizmów zniszczenia w kontekście zasad projektowych ma na celu uniknięcie upowszechniania błędnych teorii w środowisku inżynierów budownictwa.

Słowa kluczowe: wzmacnianie; konstrukcje betonowe; kompozyty CFRP; nośność.

Abstract. The paper presents confrontation of existing design guidelines of strengthening reinforced concrete structures using FRP materials with undermining theses, which due to incorrect assumptions lead to misleading solutions. Explanation of failure mechanisms in the context of design guidelines aims to avoid dissemination of confusing theories in the civil engineering community.

Keywords: strengthening; concrete structures; composite materials CFRP; strength.

Dotychczasowe metody projektowania konstrukcji żelbetowych wzmocnionych na zginanie za pomocą kompozytów polimerowych (*fiber reinforced polymer* – FRP), przyklejanych na powierzchni betonu (*externally bonded* – EB) lub wklejanych w betonową otulinę (*near surface mounted* – NSM), znalazły zastosowanie w wytycznych normowych [1, 4 ÷ 9, 14, 16]. Wydawałoby się, że zarówno metody projektowania tego typu wzmocnienia, jak i realizacja w przypadku wielu inwestycji na całym świecie nie powinny budzić wątpliwości. Opublikowano jednak prace [2, 3], których nie można bez komentarza bezkrytycznie przyjąć do wiadomości. W przypadku tych publikacji należy zadać podstawowe pytanie o prawdę i fałsz postawionych w nich założeń, które stały się podstawą do podważania obowiązujących zasad projektowania wzmocnienia konstrukcji żelbetowych na zginanie, przy użyciu kompozytów polimerowych, szczegółowo omówionych w [12].

Należy podkreślić, że **podstawą zasad projektowania wzmocnienia na zginanie jest analiza granicznych naprężeń stycznych**, które określają warunki przyczepności w odniesieniu do kilku parametrów zmiennych. Są to: moduł sprężystości kompozytu E_f ; grubość kompozytu t_f ; szerokość kompozytu w odniesieniu do współpracującej powierzchni betonu b_f/b oraz wytrzymałość betonu na ściskanie f_c . Wiadomo również, że wytyczne projektowe ujęte we wskazanych normach są bardzo zachowawcze i powinny być raczej stosowane w uproszczonej analizie oszacowania pola powierzchni kompozytu. Bardziej zaawansowane niemieckie wytyczne [6] zalecają dokładną metodę obliczania nośności elementów wzmocnionych przy użyciu materiałów kompozytowych

CFRP. Jest ona wykonywana na podstawie analizy stopniowego przekazywania siły rozciągającej z kompozytu na beton przez siły przyczepności między tymi materiałami na odcinkach betonu wydzielonych rysami od zginania. Ta metoda została w pełni zaadaptowana do projektowania wzmocnienia na zginanie w najnowszych wytycznych Fib [8].

Mechanizmy zniszczenia elementów wzmocnionych na zginanie

Dotychczasowe badania żelbetowych płyt i belek wzmocnionych na zginanie dowodzą, że **skuteczność wzmocnienia na zginanie elementów żelbetowych jest ograniczona stopniem obciążenia konstrukcji przed wzmocnieniem**. Powodem jest sposób zniszczenia wzmocnionego elementu, na skutek nagłego odspojenia kompozytu od powierzchni betonu, w bezpośrednim sąsiedztwie rys typowych w przypadku zginania [10, 13, 15]. Podstawowe mechanizmy zniszczenia elementów żelbetowych wzmocnionych na zginanie taśmami CFRP, opisane bardziej szczegółowo w publikacji [11], obejmują:

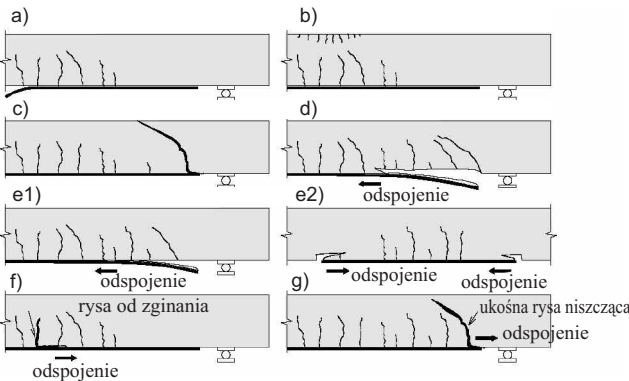
- zerwanie zbrojenia kompozytowego (*FRP rupture* – R) – rysunek 1a;
- zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej, czyli przypadek przezbrojonego przekroju (*concrete crushing* – CC) – rysunek 1b;
- zniszczenie na ścinanie w przypadku niedoboru zbrojenia poprzecznego (*shear failure* – S) – rysunek 1c;
- odspojenie końca taśmy wraz z betonową otuliną na skutek pionowego oddziaływania siły odrywającej taśmę od powierzchni betonu, w miejscu gdzie te naprężenia przekraczają wytrzymałość betonu na rozciąganie (*concrete cover separation* – CCS) – rysunek 1d;
- odspojenie zbrojenia FRP przy zbyt odległym położeniu końca od podpory, który gwałtownie się odspaja na odcinku

¹⁾ Politechnika Łódzka; Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska; renata.kotynia@p.lodz.pl

między rysami (*plate end interfacial debonding* – PEID) – rysunki 1e1 i 1e2;

- odspojenie kompozytu, po uplastycznieniu zbrojenia stalowego w miejscu rys od zginania, w miejscu maksymalnego momentu zginającego lub jednoczesnego działania dużego momentu zginania i sił poprzecznych (*intermediate crack induced interfacial debonding* – ICD). Proces odspojenia kompozytu postępuje od centralnej części belki w kierunku końca taśmy (rysunek 1f);

- odspojenie końca zbrojenia FRP na skutek ukośnego zarysowania belki, kiedy rysa przecnie zbrojenie kompozytowe przyklejone na spodzie elementu, co doprowadza do odspojenia taśmy od miejsca ukośnej rysy do końca taśmy (*critical diagonal crack debonding* – CDC). Ten proces rozwija się na styku kompozytu z betonem, w cieniłej warstwie betonowej otuliny tuż nad spoiną klejową (rysunek 1g).

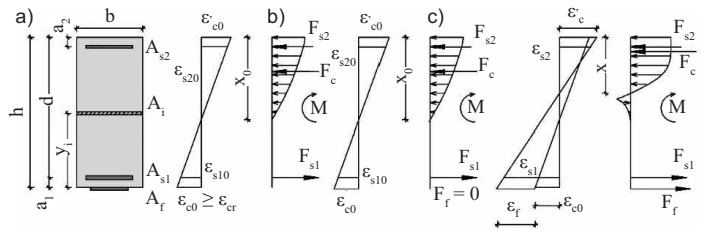


Rys. 1. Mechanizmy zniszczenia żelbetowych elementów wzmocnionych na zginanie materiałami kompozytowymi FRP: a) zerwanie kompozytu; b) zmiążdżenie betonu na ściskanie; c) utrata nośności na ścinanie; d) odspojenie końca taśmy; e1, e2) odspojenie końca taśmy; f) odspojenie taśmy w obszarze zginania; g) odspojenie końca taśmy od ukośnego ścinania [11, 15]

Fig. 1. Failure modes of RC members flexurally strengthened with FRP materials: a) FRP rupture; b) concrete crushing; c) shear failure; d) concrete cover separation; e1, e2) plate end interfacial debonding; f) intermediate flexural/shear crack-induced interfacial debonding; g) critical diagonal shear crack-induced debonding [11, 15]

Na podstawie podanych założeń, dotyczących mechanizmów zniszczenia elementów wzmocnionych na zginanie, powstały procedury projektowe [1, 4 ÷ 9, 14, 16], bazujące na analizie dwóch zasadniczych przypadków przyczepności kompozytu do podłoża betonowego, w dwóch odrębnych przekrojach na długości wzmocnianego elementu, tj. w obszarze zakotwienia końca zbrojenia kompozytowego (modele CCS, PEID, CDC) oraz w obszarze zginania (model ICD), odpowiadającym największym naprężeniom w zbrojeniu FRP.

W przypadku modelu zniszczenia w strefie największego momentu zginającego (ICD) zakłada się analizę stanu granicznego nośności zgodnie z klasyczną teorią zginanych elementów żelbetowych, opartą na hipotezie płaskich przekrojów (rysunek 2). Należy przy tym podkreślić, że nie występuje wówczas żadne oddziaływanie poprzeczne, które wywołałoby poprzeczny nacisk pomiędzy warstwami na wysokości przekroju. To potwierdza jednoosiowy stan naprężenia we włókna, proporcjonalny do odległości od osi obojętnej, niezależnie od tego, czy jest on po stronie rozciąganej, czy ściskanej.



Rys. 2. Stan odkształceń i naprężeń przekroju w fazach: a) przed wzmocnieniem; b) podczas wzmocnienia; c) w stanie granicznym nośności wzmocnionego przekroju [11]

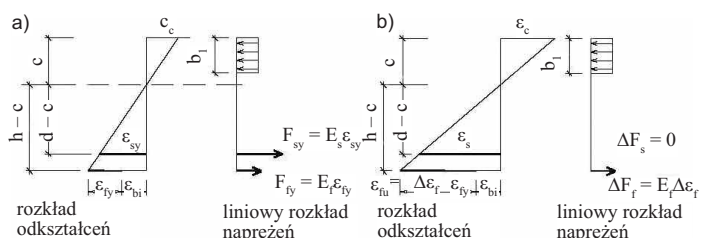
Fig. 2. Strain and stress pattern in phases: a) before strengthening; b) during strengthening; c) ultimate limit state of FRP strengthened cross section [11]

Błędne założenia

Błędne założenia postawione w publikacji [2] wyjaśnię na podstawie opublikowanych badań i zaleceń normowych.

Założenie 1: w świetle mechanizmów zniszczenia przedstawionych na rysunku 1, w kontekście pracy [2] nie można zgodzić się z opinią, że: w przypadku trzech podstawowych rodzajów zniszczenia wzory do wymiarowania elementów wzmocnionych materiałami CFRP opierają się na klasycznych teoriach związanych z konstrukcjami żelbetowymi i uwzględniają standardowe parametry wytrzymałościowe materiałów. Każdy z trzech omówionych w publikacji [2] przypadków zniszczenia (choć na rysunku 1 opisano ich więcej) odnosi się do innego stanu naprężenia na długości wzmocnianego elementu. **Nie jest więc prawdą, że w przypadku trzech rodzajów zniszczenia ogólne założenia projektowe są zbliżone i niezależnie od metody obliczeniowej sprowadzają się do ograniczenia naprężeń na styku taśmy i betonu.** Wobec tego **błędem jest postawione w artykule [2] założenie, odnoszące się do stanu odkształcenia** (rysunek 3), które wskazuje na jednolite zastosowanie hipotezy Bernoulliego zarówno w obszarze maksymalnego momentu, gdzie udział sił tnących nie ma znaczenia, jak i w obszarze przypodporowym, gdzie siła tnąca wywołuje ukośne zarysowanie, co wyklucza z zastosowania zasadę zachowania płaskiego przekroju. Należy jednocześnie wyjaśnić, że nie jest prawdziwą opinią o niezależnym analizowaniu zginania i ścinania. Wpływ sił poprzecznych jest uwzględniony przy zginaniu, w mechanizmie zniszczenia CCS (rysunek 1d), w postaci warunku: $V_{Ed} \leq V_{Rd} = \tau_{Rd} b d$.

Założenie 2: mimo, że w pracy [2] potwierdzono założenie, że w konstrukcjach wzmocnianych materiałami kompozytowymi warstwa kleju ma nieznaczną grubość w porównaniu z grubością otuliny betonowej i porównywalną do grubości samego kompozytu, to w dalszej jej części całkowicie zmieniono sens tego założenia, pisząc, że jednak na potrzeby ana-

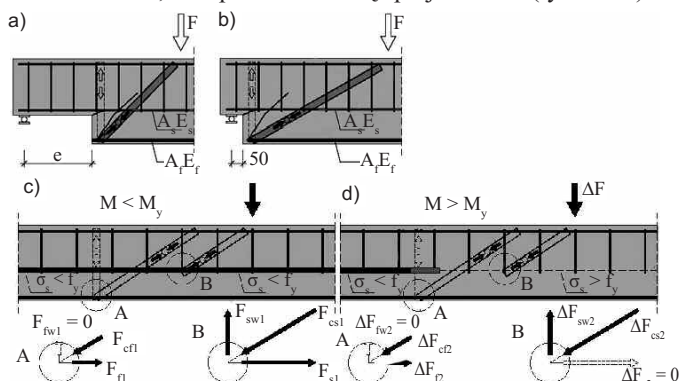


Rys. 3. Stan odkształcenia i naprężenia: a) $V_{Ed} < V_{Rd,c}$; b) $V_{Ed} > V_{Rd,c}$ [2]

Fig. 3. Strain and stress pattern: a) $V_{Ed} < V_{Rd,c}$; b) $V_{Ed} > V_{Rd,c}$ [2]

lize dokonano niewielkiej modyfikacji w celu upodobnienia tego rozwiązania do klasycznej konstrukcji żelbetowej i wypuklenia pewnych zjawisk. Takie założenie całkowicie przeczy podstawowej zasadzie pracy cienkich kompozytów, które tym skuteczniej współpracują ze wzmacnianym przekrojem, im mają mniejszą grubość. Dotyczy to przede wszystkim warstwy szczerpej w postaci zaprawy klejowej, która zazwyczaj ma grubość mniejszą niż 1 mm, przy grubości kompozytu nie większej niż 1,4 mm. Konsekwencją tej zasadniczej zmiany jest błędna hipoteza, która zdaniem autora pracy [2] miała służyć bardziej przejrzystemu zobrazowaniu przedstawionego schematu sił; zbrojenie kompozytowe wrysowano wewnątrz przekroju jako dodatkową warstwę zbrojenia, a warstwa kleju została znacznie pogrubiona, aby przez efekt skali opisywane zjawiska były bardziej czytelne.

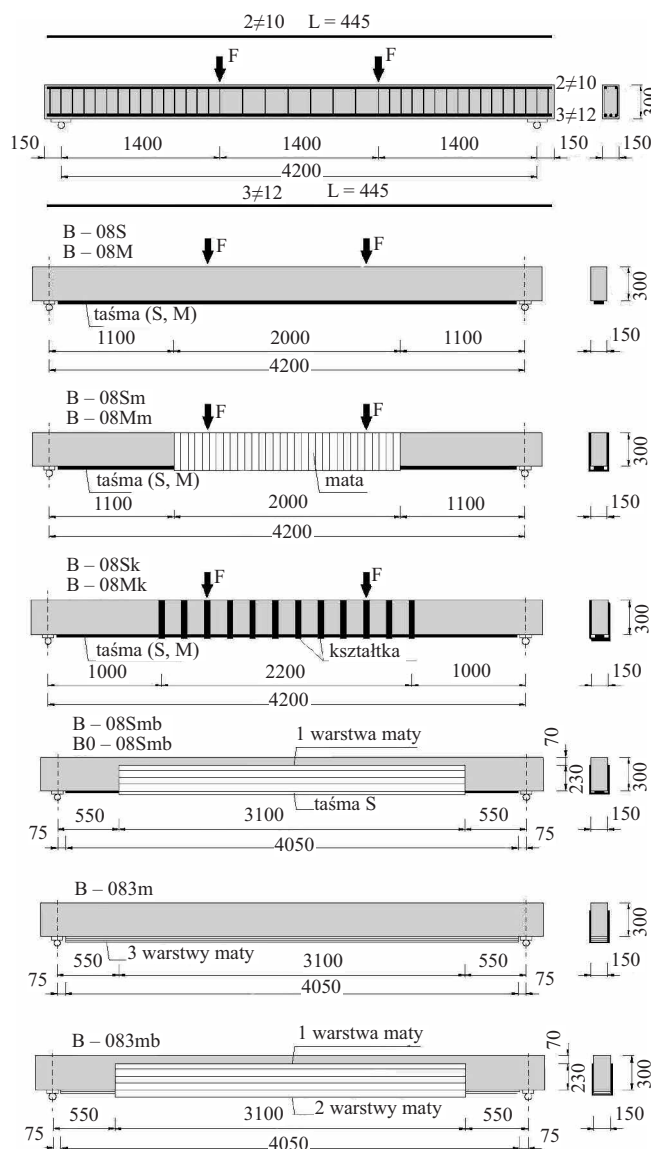
Na podstawie wcześniejszych założeń ich autor podważa poprawność modeli zniszczenia proponowanych w literaturze oraz wytycznych projektowych, twierdząc, że nie są właściwym opisem obserwowanych zjawisk fizycznych i rzeczywistym obrazem zachowania się takich konstrukcji. W ten sposób sprowadza znacznie różniące się modele zniszczenia w miejscu maksymalnego momentu (ICD) oraz w strefie przypodporowej (CCS, PEID, CDC) do jednego przypadku. W konsekwencji prowadzi to do zaskakująco odważnego podsumowania: *dotychczasowa analiza i wytyczne projektowe, nadmierne uproszczenia i bezkrytycznie kopiujące schematy z tradycyjnych konstrukcji żelbetowych zmieniają sens obserwowanych zjawisk fizycznych*. Tak skrajna teoria, która u podstaw jest nieprawdziwa, nie powinna być upowszechniana, bo wprowadza w błąd projektantów (rysunek 4).



Rys. 4. Schemat belki wzmacnionej przy: a) dużej odległości końca taśmy od podpory; b) małej odległości końca taśmy od podpory [3]; układ sił w belce wzmacnionej – strefa działania momentu i siły poprzecznej w przypadku: c) $M < M_y$ ($\sigma_s < f_y$); d) $M > M_y$ ($\sigma_s > f_y$) [2]
Fig. 4. Scheme of beam strengthened with: a) large distance of FRP strip from support; b) small distance of FRP strip from support, [3]; force pattern in strengthened beam – active bending moment and shear force distance in cases: c) $M < M_y$ ($\sigma_s < f_y$); d) $M > M_y$ ($\sigma_s > f_y$) [2]

Założenie 3: dotychczasowe zasady projektowania wzmacnienia podważa adaptacja metody kratownicowej do analizy zniszczenia ICD. Hipoteza ta zakłada, że model wzmacnionego elementu żelbetowego można zastąpić kratownicą, w której zewnętrzne zbrojenie kompozytowe nie jest połączone poprzecznym krzyżulcem rozciągającym, co przeczy podstawowej teorii pracy kompozytów. W nawiązaniu do tak postawionej tezy należy przywołać badania przeprowadzone w Katedrze Budownictwa Betonowego PŁ i opublikowane

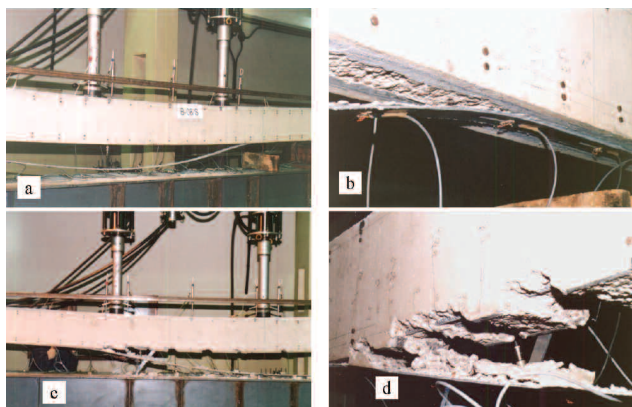
w [10], które wyraźnie potwierdzają brak skuteczności poprzecznego zbrojenia w postaci mat i kształtek typu L z włókien węglowych, zastosowanych w celu poprawy przyczepności taśm CFRP przyklejonych na dolnej powierzchni belek w obszarze czystego zginania. Badania przeprowadzono na dziesięciu jednoprzęsłowych, wolnopodpartych belkach żelbetowych o przekroju prostokątnym 150 x 300 mm i rozpiętości w osiach podpór 4200 mm (rysunek 5). Główne zbrojenie kompozytowe w postaci dwóch typów taśm CFRP (S i M – seria I) i mat (seria II) było przyklejone tylko do spodniej powierzchni belek. W celu porównania wpływu dodatkowego, poprzecznego zbrojenia kompozytowego na warunki przyczepności głównego zbrojenia kompozytowego CFRP zastosowano zewnętrzne zbrojenie kompozytowe o kierunku włókien prostopadłym do podłużnej osi belki (seria I) i równoległym do podłużnej osi belki (seria II) – rysunek 5.



Rys. 5. Sposób zbrojenia i wzmacnienia belek przy użyciu kompozytów CFRP [10]
Fig. 5. Reinforcement and CFRP strengthening configurations of RC beams [10]

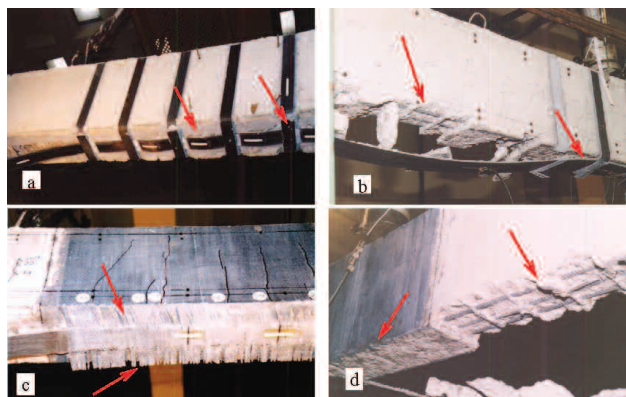
Wszystkie belki zniszczyły się na skutek odspojenia materiałów kompozytowych od powierzchni betonu. Proces odspajania dolnego zbrojenia CFRP (taśm i mat) zawsze rozpoczął się w obszarze czystego zginania i postępował w kierunku jednej z podpór. Taśma po zniszczeniu pozostawała odspojona na długim odcinku obejmującym obszar czystego zginania i strefę przypodporową (fotografia 1a i b). W belce wzmocnionej taśmą S (50 x 1,2 mm), płaszczyzna odspojenia przebiegała zarówno w warstwie kleju, jak i w cienkiej warstwie otuliny (fotografia 1a i b). Nieco inaczej odspoiła się taśma typu M (120 x 1,4 mm) – do odspojenia doszło w głębiej położonych warstwach otuliny betonowej, przy czym lokalnie wraz z taśmą wyrwały się duże kawałki betonu na granicy zbrojenia rozciągającego (fotografia 1c i d).

W belkach wzmocnionych dodatkowymi poprzecznymi kształtkami typu L (B-08Sk, B-08Mk) doszło do poślizgu między taśmą główną a naklejonymi na niej kształtkami. Taśma główna odspajając się wzdłuż belki w kierunku podpory, pociągała za sobą kształtki (fotografia 2a). Widoczny był przy tym wyraźny prześwit między taśmą a powierzchnią betonu na odcinkach między kształtkami. W miarę wzrostu obciążenia dochodziło do stopniowego odspojenia kształtek na odcinku czystego zginania, a następnie do raptownego odspojenia skrajnych kształtek, które doprowadziło do całkowitego odspojenia dolnej taśmy w kierunku podpory. Na powierzchni odspojonych kształtek zaobserwowano wiele pęknięć równoległych do ich włókien. Jest to bezsprzeczny dowód wpływu jedynie podłużnych sił rozciągających na odcinku stałego momentu zginającego i braku możliwości przeniesienia tych naprężeń przez kształtki, które ulegały deformacji na skutek sił rozciągających działających prostopadle do ich włókien. Szerokość dolnej taśmy miała wyraźny wpływ na obraz płaszczyzny odspojenia. Spostrzeżenia dotyczące mechanizmu zniszczenia, zaobserwowane w belkach z dodatkowymi kształtkami, potwierdziły się w belkach wzmocnionych jednocześnie taśmą dolną i dodatkowymi matami o układzie włókien prostopadłym do podłużnej osi belek (B-08Sm i B-08Mm). Mimo, że mata naklejona na całym odcinku zginania nie dała możliwości obserwacji rozwoju zarysowania belki B-08Sm, to widoczne były charakterystyczne



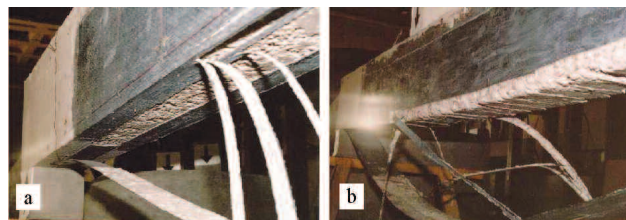
Fot. 1. Mechanizmy zniszczenia belek wzmocnionych taśmami: a-b) B-08S; c-d) B-08M [10]
Fot. R. Kotynia
Photo 1. Failure modes of beams strengthened with laminates: a-b) B-08S; c-d) B-08M [10]

pionowe pęknięcia wzdłuż jej włókien, a przy obciążeniu bliskim niszczącemu nastąpiło wyraźne pochylenie się włókien maty na spodniej powierzchni belki, wzdłuż jej osi (fotografia 2c) i zerwanie włókien maty na krawędzi belki. Doprowadziło to do całkowitego odspojenia spodniej taśmy, a płaszczyzna odspojenia zmieniła swoje położenie i na pozostałym odcinku przebiegała na granicy zbrojenia zwykłego (fotografia 2b i d). Szerokość taśmy miała wpływ na obraz płaszczyzny odspojenia, podobnie jak w belkach bez dodatkowych poprzecznych wzmocnień B-08S i B-08M.



Fot. 2. Mechanizmy zniszczenia belek: a) B-08Sk; b) B-08Mk; c) B-08Sm; d) B-08Mm [10]
Fot. R. Kotynia
Photo 2. Failure modes of beams strengthened with laminates: a) B-08Sk; b) B-08Mk; c) B-08Sm; d) B-08Mm [10]

Belki serii II zniszczyły się w podobny sposób, jak belki serii I, przy czym obecność dodatkowych mat o równoległym układzie włókien do podłużnej osi belek potwierdziła znacznie większą skuteczność równoległego układu włókien bocznych do kierunku naprężeń głównych. Zniszczenie belki B-083m, wzmocnionej trzema warstwami mat CFRP na spodniej powierzchni belki, przebiegało gwałtownie bez wcześniejszej sygnalizacji. Zastosowanie mat przyklejonych na spodniej i bocznych powierzchniach belek (B-08Smb i B-083mb), o równoległym układzie włókien do osi belek opóźniło proces odspojenia dolnej ich warstwy (w belce B-083mb) oraz taśmy (w belce B-08Smb), a także złagodziło przebieg ich odspojenia. Zaobserwowano bardzo dobrą współpracę taśmy dolnej z dodatkowymi matami o równoległym układzie włókien w belce B-08Smb. Odspajająca się dolna taśma współpracowała z przyklejoną na niej matą, która stopniowo przejmowała naprężenia rozciągające i przekazywała je na obszar belki położony powyżej dolnej jej powierzchni (fotografia 3a i b). Badanie belki B-083mb, wzmocnionej dwiema warstwami mat dolnych i jedną warstwą podłużnej maty obwodowej



Fot. 3. Mechanizmy zniszczenia belek: a) B-08Smb; b) B-083mb [10]
Fot. R. Kotynia
Photo 3. Failure modes of beams: a) B-08Smb; b) B-083mb [10]

potwierdziło współpracę dolnych i bocznych warstw maty, które odspoiły się na wysokości belki znacznie przekraczającej poziom głównego zbrojenia stalowego. Jest to **dowód korzystnego układu podłużnych włókien mat obwodowych**.

Parametry zbrojenia CFRP wpływające na jego przyczepność

Na podstawie wartości sił niszczących i średnich odkształceń taśm/mat CFRP, zarejestrowanych na odcinku czystego zginania w chwili zniszczenia elementów, wyraźnie widać **wpływ modułu sprężystości E_f , grubości t_f , oraz szerokości b_f dolnego zbrojenia CFRP na jego przyczepność**. Nie można jednak bezpośrednio porównywać belek wzmocnionych taśmą typu S, M z belkami wzmocnionymi trzema warstwami mat, ponieważ różnią się one wszystkimi trzema parametrami. Należy ponadto zwrócić uwagę na fakt, że sztywność taśmy najbardziej decyduje o warunkach jej przyczepności, co potwierdzają wyniki odkształceń odspojenia taśmy typu M o największej osiowej sztywności ($E_f A_f = 37$ MN), która mimo przeszło dwukrotnie większej powierzchni przyczepności, w porównaniu z taśmą typu S o osiowej sztywności ($E_f A_f = 10$ MN), odspoiła się przy najmniejszym odkształceniu $\epsilon_{p, test} = 5,06\%$ (tabela). Mimo, że taśma S była 2,4 razy węższa niż taśma M, to w chwili odspojenia osiągnęła odkształcenie przyczepności $\epsilon_{p, test} = 6,17\%$, które jest o 22% większe niż taśmy typu M. **Wpływ sztywności na przyczepność** jest szczególnie widoczny w przypadku wiotkich mat CFRP, które odspoiły się przy odkształceniu $\epsilon_{p, test} = 6,81\%$, tj. 35% większym w porównaniu z taśmą M.

Zestawienie sił niszczących i średnich odkształceń materiałów CFRP [10]

Summary of ultimate loads and average strains of CFRP materials [10]

Seria	Typ belki	$2F_u$ [kN]	$F_u/F_{u,0}$ [-]	$\epsilon_{p, test}$ [%]	ϵ_{pu} [%]		$\epsilon_{p, test}/\epsilon_{pu}$	
					taśma	mata	taśma	mata
I	B-08M	140	1,00	5,06			0,41	
	B-08Mk	150	1,07	5,65	12,4		0,46	
	B-08Mm	152	1,09	5,48			0,44	
	B-08S	94	1,00	6,17		-	0,36	
	B-08Sk	102	1,09	8,64	17		0,51	
	B-08Sm	102	1,09	6,6			0,39	
II	B-083m	92	1,00	6,81				0,45
	B-083mb	123	1,34	8,42		15		0,56
	B-08Smb	114	1,24	7,68			0,45	0,51
					17			
	BO-08Smb*	110	1,20					

Oznaczenia w tabeli: $2F_u$ – obciążenie niszczące w belkach wzmocnionych; $2F_{u,0}$ – obciążenie niszczące w belkach niewzmocnionych; $F_u/F_{u,0}$ – stopień wzmocnienia; $\epsilon_{p, test}$ – maksymalne odkształcenie dolnego zbrojenia CFRP zarejestrowane w badaniu; $\epsilon_{p, u}$ – graniczne odkształcenie dolnego zbrojenia CFRP na rozciąganie; $\epsilon_{p, test}/\epsilon_{p, u}$ – stopień wykorzystania wytrzymałości kompozytu na rozciąganie

Zaprezentowane wyniki badań własnych wskazują, że **odkształcenia podłużne, przy których dochodzi do odspojenia kompozytu, zależą przede wszystkim od osiowej sztywności zastosowanego materiału kompozytowego**. Ponadto, porównując trzy typy zastosowanego zbrojenia kompozytowego (S: $E_f = 170$ GPa, $t_f = 1,2$ mm; M: $E_f = 220$ GPa, $t_f = 1,4$ mm; 3 warstwy maty: $E_f = 230$ GPa, $t_f = 0,7$ mm) wyraźnie widać, że o jego przyczepności najbardziej decyduje grubość kompozytu, a w mniejszym stopniu moduł sprężystości. Maty CFRP

o większym module E_f niż taśmy typu M, ale dwukrotnie mniejszej grubości, miały znacznie większe odkształcenie przyczepności niż taśmy. Wniosek ten jest więc najlepszym uzasadnieniem błędnego założenia postawionego w pracy [2], dotyczącego tzw. *niewielkiej modyfikacji* założeń pracy zbrojenia kompozytowego *w celu upodobnienia tego rozwiązania do klasycznej konstrukcji żelbetowej*. Jak uzasadniłam w badaniach własnych [10], **teza prezentowana w pracy [2] w żadnym stopniu nie spełnia warunków pracy cienkich kompozytów**, a tym samym wprowadza w błąd inżynierów budownictwa.

Drugi wniosek z badań własnych [10] wskazuje na małą skuteczność stosowania dodatkowego zbrojenia kompozytowego, o kierunku prostopadłym do kierunku podłużnego zbrojenia kompozytowego, proponowanego w pracy [2], jako skutecznego zabezpieczenia przed odspojeniem zbrojenia FRP.

Literatura

- [1] ACI 440.2R-08, 2008. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. MI, USA. 24.
- [2] Bodzak Paweł. 2019. „Wzmocnienia elementów materiałami kompozytowymi w świetle zasad zbrojenia konstrukcji żelbetowych”. *Inżynieria i Budownictwo* (1): 18 – 22.
- [3] Bodzak Paweł. 2019. „Zniszczenie w wyniku odspojenia otuliny w konstrukcjach żelbetowych wzmocnionych kompozytami”. *Inżynieria i Budownictwo* (3): 128 – 134.
- [4] CNR-DT 200, 2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structure. NRC, Roma.
- [5] CNR DT200/2013, 2013. Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati, Roma.
- [6] DAfStb-Guideline, 2014. Strengthening of concrete members with adhesively bonded reinforcement. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth, Berlin.
- [7] Fib Bulletin 14, 2001. Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures. Technical Report, Lusanne, Switzerland.
- [8] Fib Bulletin 90, 2019. Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. Technical Report.
- [9] JSCE. 2001. Recommendations for the upgrading of concrete structures with use of continuous fiber sheets. Journal of Concrete Engineering, Series 41, Japanese Society of Civil Engineers, Tokyo.
- [10] Kotynia Renata, Maria E. Kamińska. 2003. „Odkształcalność i sposób zniszczenia żelbetowych belek wzmocnionych na zginanie materiałami kompozytowymi CFRP, Badania doświadczalne elementów i konstrukcji żelbetowych”, Zeszyt Nr 13, Wyd. KBB PŁ.
- [11] Kotynia Renata. 2019. „FRP Composites for flexural strengthening of concrete structures theory, testing, design”. *Publisher Lodz University of Technology*, pp. 240. DOI:org/10.34658/9788372839961.
- [12] Mazzotti, C., Bilotta, A., Carloni, C., Ceroni, F., D'Antino, T., Nigro, E., Pellegrino C. 2016. “Bond between EBR FRP and concrete, in: Design procedures for the use of composites in strengthening of reinforced concrete structures”, Springer.p.39–96.Doi:10.1007/978-94-017-7336-2.
- [13] Oehlers, D.J., Liu, I., Seracino, R.2007. „A generic design approach for EB and NSM longitudinally plated RC beams”.*Construction and Building Materials*, 21(4): 697 – 708. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.06.018.
- [14] SIA 166, 2004. Klebebewehrungen (Externally bonded reinforcement). Zurich, Switzerland, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, SIA.
- [15] Smith, S.T., Teng, J.G.2002. „FRP-strengthened RC beams. I: Review of debonding strength models”. *Engineering Structures*, 24 (4): 385–95. DOI:10.1016/S0141-0296(01)00105-5.
- [16] Technical Report no 55, 2000. Design guidance for strengthening concrete structures using fiber composite materials. Concrete Society, London.

Przyjęto do druku: 14.04.2020 r.