

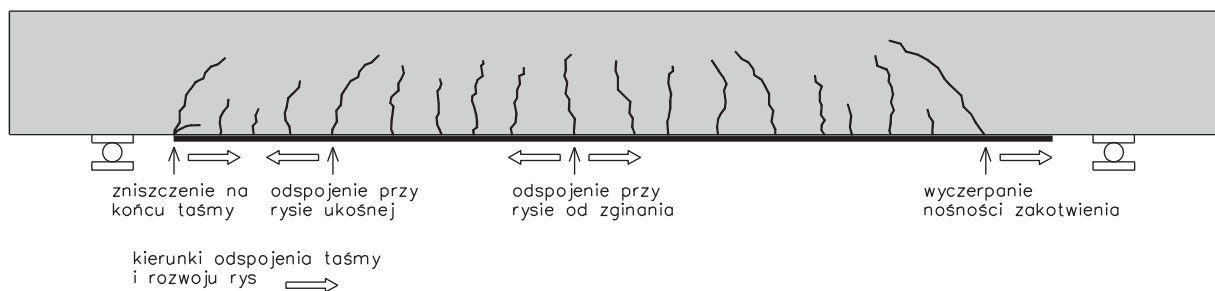
Analiza wzmocnień typu NSM materiałami FRP w świetle badań eksperymentalnych

Dr inż. Przemysław Bodzak, Politechnika Łódzka

1. Wprowadzenie

Na podstawie dotychczasowych badań doświadczalnych oraz wielu analiz obliczeniowych wskazano główne czynniki oddziałujące na nośność elementów żelbetowych wzmocnionych materiałami kompozytowymi FRP (*Fibre Reinforced Plastic*) klejonymi do powierzchni elementu – metodą EBR (*Externally Bonded Reinforcement*). Podobnie jak w zwykłych konstrukcjach żelbetowych zidentyfikowano trzy podstawowe typy zniszczenia związane z wyczerpaniem nośności materiałów zastosowanych w elemencie, tj. zerwanie kompozytu, zmiążdżenie betonu w strefie ściskanej oraz klasyczne

taśmy kompozytowe wklejane są w szczeliny nacięte w otulinie betonowej. Wzmocnienie NSM ma wiele zalet, do których zaliczyć należy przede wszystkim lepszą efektywność zakotwienia, jak i dobrą ochronę przed uszkodzeniem. Na podstawie dotychczasowych badań stwierdzono, że wzrost nośności po wzmocnieniu zarówno metodą EBR, jak i NSM może dochodzić nawet do 200%. Przy czym zależy on głównie od stopnia zbrojenia stalowego i kompozytowego. Wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia stalowego maleje efektywność wzmocnienia wykonanego obiema metodami. Jednym z parametrów zarówno skuteczności, jak i efektywności wzmocnienia jest stopień wykorzystania wytrzyma-



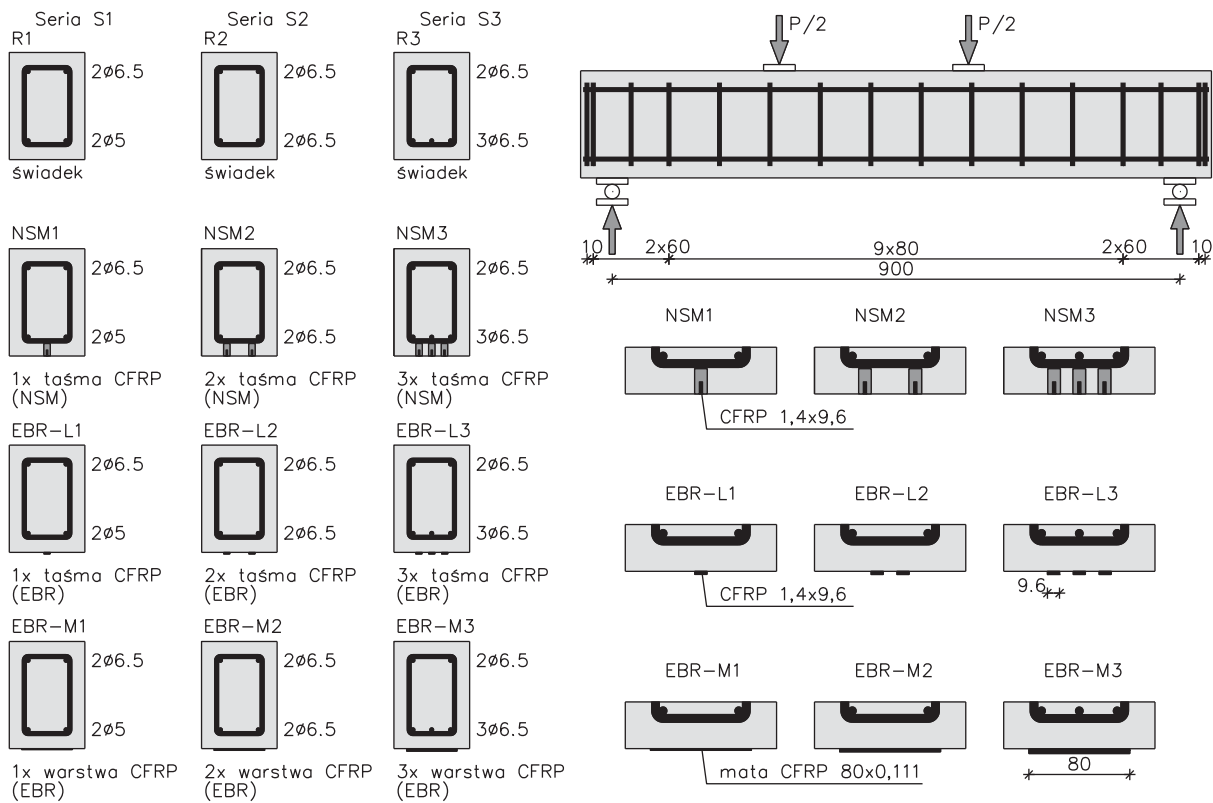
Rys. 1. Lokalizacja miejsc zniszczenia elementów wzmocnionych materiałami CFRP [1]

zniszczenie na ścinanie. Dodatkowo zaobserwowano jeszcze jeden specyficzny mechanizm zniszczenia, a mianowicie odklejenie kompozytu od powierzchni elementu. Może on zostać zainicjowany zarówno w strefie zakotwienia (koniec taśmy lub maty), jak i w znacznej odległości od jej końca, w sąsiedztwie rysy od ścinania lub zginania (strefa maksymalnych momentów zginających) – rysunek 1. Wydaje się on być jednocześnie najbardziej niebezpieczny, bo z reguły niepoprzedzony przez duże ugięcie elementu lub znaczne zarysowanie, jak to ma miejsce w typowych konstrukcjach żelbetowych zbrojonych tylko stalą. Dodatkowo delaminacja kompozytu jest zniszczeniem kruchym – a co najistotniejsze – typu postępującego, tzn. zainicjowana lokalnie propaguje wzdłuż połączenia i prowadzi do całkowitego oddzielenia zbrojenia kompozytowego i zniszczenia elementu.

W ostatnich kilkunastu latach ciekawą i obiecującą alternatywną metodą do zbrojenia zewnętrznego EBR stała się technika wzmocniania zbrojeniem przypowierzchniowym – NSM (*Near Surface Mounted Reinforcement*). W tej metodzie

łoci materiału kompozytowego rozumiany jako stosunek odkształcenia kompozytu przy zniszczeniu elementu do odkształceń maksymalnych przy zerwaniu. W takiej analizie wzmocnienia typu NSM wypadają zdecydowanie lepiej niż EBR, ze względu na zdecydowanie większe wartości odkształceń w chwili zniszczenia przy takim samym polu przekroju zastosowanego kompozytu. Wskazano, że wiąże się to z lepszymi warunkami zakotwienia i skuteczniejszym połączeniem materiału wklejonego w szczelinę, w przeciwieństwie do przyklejonego do powierzchni betonu. Na podstawie wyników badań i obrazu zniszczenia ten parametr został wyeksponowany w dotychczasowych analizach. W przeciwieństwie do takiego podejścia, w którym najistotniejszym czynnikiem determinującym nośność elementu po wzmocnieniu jest wartość stycznych naprężeń przyłączeniowych, w [2, 3] wskazano na zupełnie inne zjawiska i mechanizmy oddziałujące na nośność elementów po wzmocnieniu kompozytami techniką EBR. W artykule dokonano porównania efektywności wzmocnień typu EBR i NSM pod względem wpływu naprężeń przyłączeniowych na nośność.

KONSTRUKCJE – ELEMENTY – MATERIAŁY



Rys. 2. Schemat badawczy oraz układ zbrojenia stalowego i kompozytowego [4]

2. Badania elementów wzmocnionych

Pierwsza grupa badań [4] zawierała 3 serie składające się z czterech elementów każda: jeden referencyjny – R, drugi wzmocniony techniką NSM – NSM-L, trzeci wzmocniony techniką EBR z użyciem taśmy – EBR-L, czwarty wzmocniony techniką EBR z użyciem maty – EBR-M.

Wymiary elementów we wszystkich seriach były jednakowe, natomiast parametrem zmiennym był stopień zbrojenia stalowego i kompozytowego. Użyto jednej, dwóch, trzech taśm lub odpowiednio jednej, dwóch, trzech warstw maty. Zastosowano jednakowe taśmy o wymiarach 9,6×1,4 mm i module Younga $E_f = 158$ GPa lub pasy maty o szerokości 80 mm oraz grubości 0,111 mm i module Younga $E_f = 240$ GPa. Pole powierzchni przekroju jednej taśmy $A_{f-L} = 13,4$ mm² było prawie o 52% większe niż jednej maty $A_{f-M} = 8,88$ mm². Jednak ze względu na odwrotną proporcję wartości modułów sprężystości w każdej serii sprowadzone pole powierzchni taśmy lub maty (moc zbrojenia kompozytowego) było prawie

jednakowe. Dla serii 1 wynosiło odpowiednio $A_f E_f = 21,2$ kN (taśma) oraz $A_f E_f = 21,3$ kN (mata) i wzrastało proporcjonalnie w pozostałych seriach. Tak przygotowany program badawczy umożliwił zarówno analizę wpływu stopnia zbrojenia kompozytowego ρ_f oraz sprowadzonego całkowitego $\rho_{(s+f)equ}$ (1), jak i wartości stycznych naprężeń przyczepności (wpływu szerokości b_f), a także grubości materiału kompozytowego t_f na nośność elementu po wzmocnieniu, w zależności od zastosowanego materiału (taśma, mata) lub techniki wzmocnienia (EBR i NSM) – tabela 1, 2.

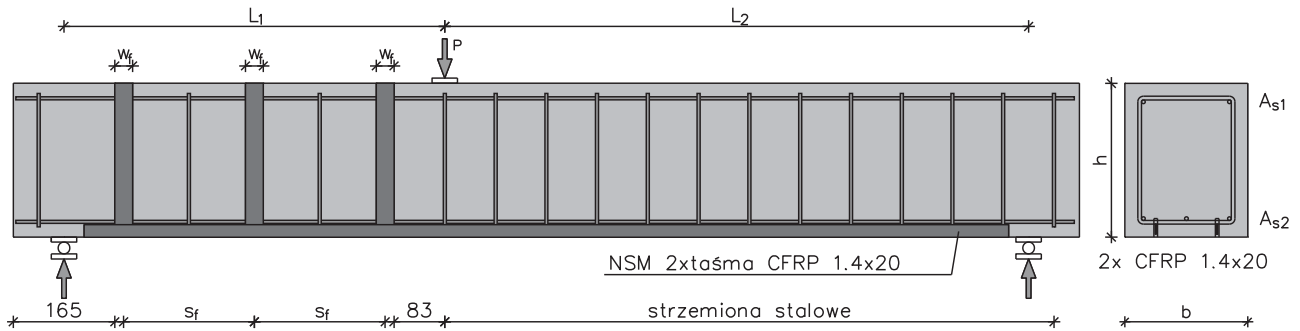
$$\rho_{(s+f)equ} = \frac{A_s E_s + \sum A_f E_f}{E_s} \times \frac{1}{bd} \quad (1)$$

Tabela 1. Parametry zbrojenia elementów [4]

Seria	A_s [mm ²]	ρ_s [%]	n	A_{f-L} [mm ²]	A_{f-M} [mm ²]	$\rho_{(s+f)equ}$ [%]
1	0,39	0,21	1	13,4	8,88	0,27
2	0,66	0,36	2	26,8	17,76	0,48
3	0,99	0,55	3	40,2	26,64	0,73

Tabela 2. Podstawowe wyniki badań

Oznaczenie elementu	Seria 1			Seria 2			Seria 3		
	F_u [kN]	typ zniszczenia	F_u/F_{Ref} [%]	F_u [kN]	typ zniszczenia	F_u/F_{Ref} [%]	F_u [kN]	typ zniszczenia	F_u/F_{Ref} [%]
R	36,6	SY	–	48,5	SY	–	71,8	SY	–
NSN	79,9	IC	121	93,3	IC	92	96,6	IC	35
EBR-L	38,6	IC	8	83,5	IC	72	86,6	IC	20
EBR-M	43,0	R	21	79,5	R	64	87,3	IC	22



Rys. 3. Schemat badawczy oraz układ zbrojenia stalowego i kompozytowego [5]

Druga grupa badań [5] to elementy wzmocnione jedynie techniką NSM. Wszystkie belki były zawsze wzmocnione dwiema taśmami o stałym polu przekroju poprzecznego 1,4×20 mm. Ze względu na większą wysokość taśmy niż grubość otuliny betonowej jej wprowadzenie w nacięcia wymagało przecięcia strzemion. Z tego powodu w każdej serii wykonane zostały dwie belki referencyjne bez wzmocnienia: jedna typowa VR, druga z przeciętymi strzemiionami VE. Nacięcia wykonano w miejscach przewidzianych do wklejenia taśmy (bez jej wklejenia) by sprawdzić, jaki jest wpływ rozcięcia zbrojenia poprzecznego na nośność elementu. Trzeci element w serii VL wzmocniono standardowo techniką NSM, rozcinając strzemia jak w elemencie VE i wklejając taśmę. W przypadku czwartego elementu VLM, oprócz wzmocnienia na zginanie (również z przecięciem strzemion), zastosowano dodatkowe wzmocnienie na ścinanie przy jednej z podpór wykonane z trzech pasków maty klejonych do powierzchni belki. Parametrem zmiennym dla poszczególnych serii była wysokość belki, przy zachowaniu stałego stopienia zbrojenia stalowego i smukłości ścinania – tabele 3, 4.

Tabela 3. Geometria elementów [5]

Seria	L_1 [mm]	L_2 [mm]	h [mm]	b [mm]	h [mm]	ρ_s [%]	$\rho_{(s+f)equ}$
1	550	950	250	200	250	0,37	0,41
2	750	1150	320	200	320	0,37	0,40
3	900	1300	380	200	380	0,36	0,42

Tabela 4. Podstawowe wyniki badań [5]

Seria	1			2			3		
	F_u [kN]	$\epsilon_{f,NSM}$ [‰]	$\epsilon_{f,w}$ [‰]	F_u [kN]	$\epsilon_{f,NSM}$ [‰]	$\epsilon_{f,w}$ [‰]	F_u [kN]	$\epsilon_{f,NSM}$ [‰]	$\epsilon_{f,w}$ [‰]
VR	67	-	-	88	-	-	116	-	-
VE	69	-	-	89	-	-	103	-	-
VL	96	6,4	-	137	9,6	-	148	7,7	-
VLM	121	10,0	7,5	156	12,3	4,0	157	10,1	9,5

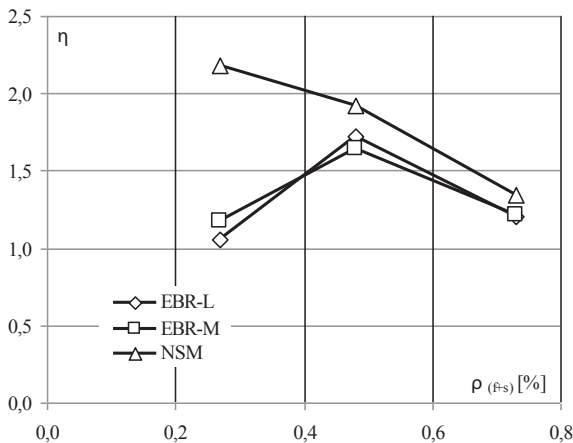
$\epsilon_{f,NSM}$ – odkształcenie taśmy w chwili zniszczenia

$\epsilon_{f,w}$ – odkształcenie maty w chwili zniszczenia

3. Analiza

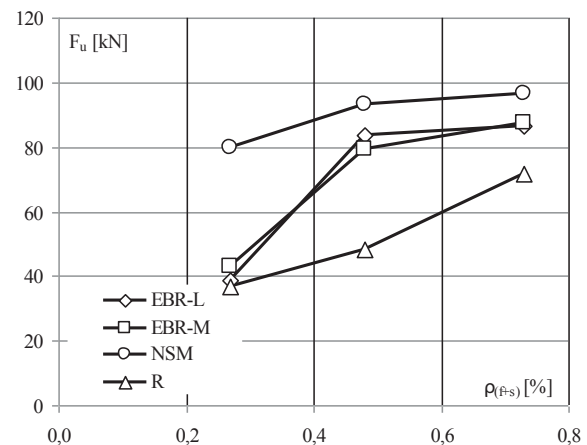
W grupie pierwszej [4], w ramach każdej z serii badań, mimo różnych wymiarów taśmy i maty elementy zostały wzmocnione przy użyciu materiału kompozytowego o jednakowej mocy $E_f A_f$. Dzięki takiemu zabiegowi możliwe jest porównanie nie tylko wpływu typu wzmocnienia EBR lub NSM, ale również sztywności poprzecznej $E_{f,t}$ oraz szerokości kompozytu b_f na nośność elementu. Porównując siły niszczące po wzmocnieniu typu EBR, można zauważyć, że przy stałej mocy zbrojenia kompozytowego $E_f A_f$ nośności elementów są zbliżone mimo zdecydowanie odmiennych wymiarów kompozytu, tj. taśmy lub maty odpowiednio o wymiarach $b_f \times t_f$ – 9,6×1,4 mm lub 80×0,111 mm.

We wszystkich elementach doszło do uplastycznienia zbrojenia, co oznacza, że w chwili zniszczenia siła przenoszona przez zbrojenie stalowe była stała i jednakowa w każdej z serii przy wzmocnieniu typu EBR. Przy porównywalnych obciążeniach niszczących momenty zginające były też podobne, czyli siły w zbrojeniu kompozytowym również musiały być zbliżone. W serii 1 dla elementów wzmocnianych matą lub taśmą stosunek szerokości powierzchni przyklejenia kompozytu wynosił $80/9,3 = 8,33$. To ponad ośmiokrotne zmniejszenie strefy złącza przy wzmocnianiu taśmą i jednocześnie zwiększenie zarówno grubości kompozytu, jak i wartości naprężeń stycznych nie spowodowało istotnych różnic w siłach niszczących. Dla pozostałych dwóch serii stosunek szerokości powierzchni przyklejenia wynosił odpowiednio 4,16 oraz 2,78. Natomiast grubości kompozytu miały się odpowiednio: jak 1 do 12,6; 6,3 oraz 3,15. Również w przypadku elementów w tych seriach różnice w wartościach sił niszczących nie były znaczące – rysunek 4. Należy zauważyć, że w serii 3 element wzmocniony taśmą zniszczył się przy większej sile niż element wzmocniony matą. Wynika z tego niezbitnie, że nie tylko pole powierzchni styku między kompozytem i podłożem betonowym (powierzchnia przyklejenia) nie miało istotnego znaczenia, również grubość materiału kompozytowego nie wpłynęła na wartość siły niszczącej. Spostrzeżenie to pokazuje, że założenia obliczeniowe [6–9] stosowane w dotychczasowej analizie nie są poprawne. Sztywność poprzeczna nie jest tak istotna, jak do tej pory sądzono, gdy analizujemy elementy wzmocnione



Rys. 4. Zależność siły niszczącej od zastępczej powierzchni zbrojenia głównego

techniką EBR, co wykazano w [3]. W pracy tej wskazano również, że nośność powiązana jest w większym stopniu z granicą plastyczności zbrojenia niż wartością naprężeń stycznych, czy odkształceń taśmy. Siła niszcząca zależy w takiej sytuacji głównie od wartości obciążenia, przy którym następuje uplastycznienie zbrojenia. Przy stałej mocy zbrojenia kompozytowego $E_f A_f$ nie jest ważne, jaka jest szerokość i grubość kompozytu. Decydujący jest natomiast wpływ siły poprzecznej, a ta niezależnie od proporcji wymiarów przekroju zbrojenia kompozytowego będzie w podobny sposób na nie oddziaływała i powodowała delaminację. Zjawisko to przypomina w swoim obrazie mechanizm związany z efektem klockującym w zwykłych konstrukcjach żelbetowych. Przy porównaniu elementów z pierwszej grupy badań, wzmocnionych techniką EBR i NSM, widoczna jest różnica w obciążeniach niszczących dla obu typów wzmocnień. Szczególnie w przypadku serii 1 jest to ewidentne, gdy efektywność wzmocnienia typu EBR wyniosła około 10%, natomiast dla NSM aż 118%. W pozostałych seriach ten drugi typ wzmocnienia odznaczał się też większą nośnością, jednak wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia kompozytowego ta dysproporcja zdecydowanie zmalała. Przy zastosowaniu dwóch, a także trzech taśm różnica pomiędzy nośnością elementów wzmocnionych techniką EBR i NSM była zauważalna, jednak wynosiła maksymalnie 12%. Również w stosunku do mocy zbrojenia kompozytowego $E_f A_f$ przyrost nośności po wzmocnieniu był dużo mniejszy w serii 2 oraz 3 – rysunek 5. Oznacza to, że wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia (stalowego i kompozytowego) oczywiście następuje wzrost nośności elementu, jednak w serii 3 głównie w wyniku zwiększenia nośności elementu niewzmocnionego poprzez zwiększenie wartości obciążenia powodującego uplastycznienie zbrojenia (z 48,5 kN do 71,8 kN), natomiast proporcjonalne zwiększenie zbrojenia kompozytowego nie skutkuje adekwatnym wzrostem nośności elementu (z 93,3 kN do 96,6 kN). Ten wniosek jest zgodny z wieloma



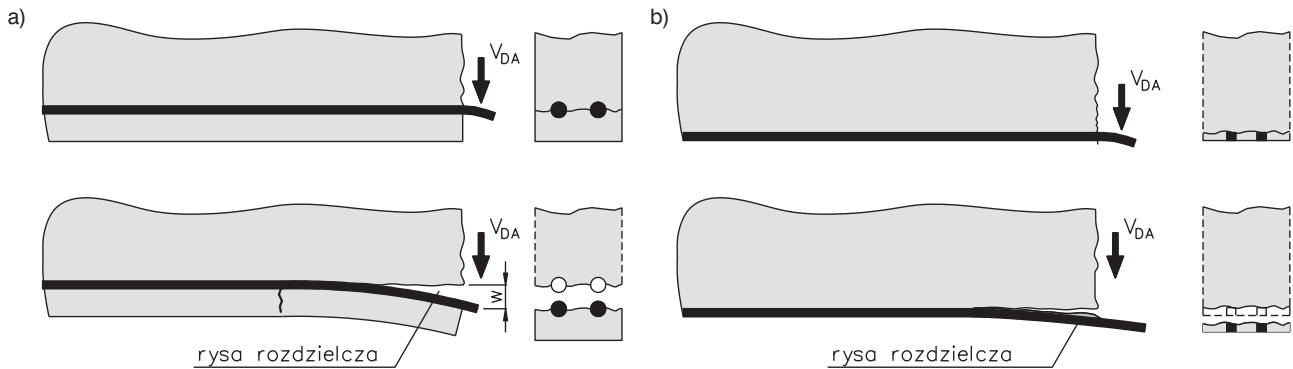
Rys. 5. Efektywność wzmocnienia w zależności od zastępczej powierzchni zbrojenia głównego

dotychczasowymi spostrzeżeniami. Wraz ze wzrostem stopnia zbrojenia stalowego maleje efektywność wzmocnienia kompozytowego zarówno typu EBR, jak i NSM.

W analizowanych badaniach zwiększano nie tylko stopień zbrojenia stalowego, ale też proporcjonalnie stopień (moc) zbrojenia kompozytowego. Porównując siły niszczące w elementach niewzmocnionych ρ , możemy zauważyć, że nośność elementu jest zależna od stopnia zbrojenia stalowego – por. rysunek 4. W elementach wzmocnionych kompozytami takiej zależności już nie obserwujemy. Wzrost zastępczego stopnia zbrojenia $\rho_{(s+f)equ}$ nie powoduje proporcjonalnego wzrostu sił niszczących. Zjawisko takie znane jest z badań dotyczących ścinania. Wzrost stopnia zbrojenia powoduje wzrost nośności, ale nie wprost proporcjonalny i jedynie do pewnej wartości maksymalnej. Znalazło to swoje odzwierciedlenie m.in. w [10] we wzorze na nośność na ścinanie przekroju bez zbrojenia poprzecznego (2):

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_l \sigma_{cp} \right] b_w d \quad (2)$$

Kolejnym elementem znanym z analizy zjawiska ścinania w elementach bez zbrojenia poprzecznego jest wpływ stopnia zbrojenia na nośność. Wzrost stopnia zbrojenia podłużnego powyżej 2% nie wywołuje żadnych korzystnych efektów. Podobny efekt widoczny jest w tych badaniach, jeżeli analizujemy zbrojenie zastępcze $\rho_{(s+f)equ}$ wyznaczone wg (1), a nie oddzielnie zbrojenia stalowego lub kompozytowego. W serii 3 dla $\rho_{(s+f)equ} = 0,73\%$ efektywność wzmocnienia przy zastosowaniu techniki NSM wynosiła tylko 35% i zmalała z 93% dla serii 2. Ponadto przyrost nośności (seria 2 i 3) przy zwiększeniu zastępczego stopnia zbrojenia o 52% wyniósł jedynie 3–10%. Należy przyjąć, że w tej sytuacji inne czynniki niezwiązane jedynie ze zginaniem mają decydujące znaczenie. Można zauważyć, że zwiększenie obciążenia powoduje nie tylko zwiększenie momentu zginającego działającego na element, ale również siły tnącej. Elementy



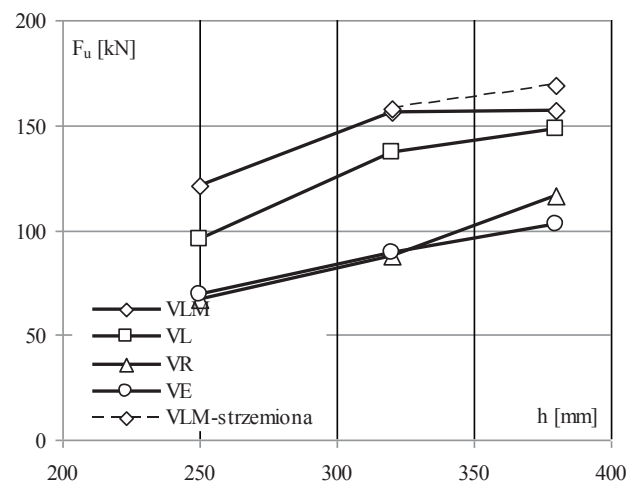
Rys. 6. Powstanie rysy rozdzielczej w wyniku działania siły klockującej w elementach: a) żelbetowych, b) wzmocnionych techniką NSM

serii 1 oraz 2 nawet po wzmocnieniu charakteryzowały się niskim stopniem zbrojenia 0,27 oraz 0,48. Na podstawie dotychczasowych obserwacji ścinanie nie powinno przy takim stopniu zbrojenia mieć istotnego znaczenia. Jednak w serii 3 stopień zbrojenia wynosił 0,73, co oznacza, że zniszczenie może nastąpić nie tylko na zginanie, ale również na ścinanie. Przy czym w przypadku elementów wzmocnionych kompozytami nie powinno się bezpośrednio przenosić obserwacji i wniosków z badań elementów żelbetowych. Oddziaływanie sił poprzecznych może być jeszcze bardziej istotne ze względu na zdecydowanie większe odkształcenia zbrojenia kompozytowego w porównaniu do zbrojenia stalowego. Analizę teoretyczną wpływu sił poprzecznych na elementy wzmocnione kompozytami klejonymi do powierzchni betonu EBR przedstawiono w [2, 3]. Jak wykazano, zniszczenie na ścinanie takich konstrukcji nie zawsze musi objawiać się w postaci klasycznej rysy ukośnej rozdzielającej przekrój na dwie części. Może to być również zniszczenie w wyniku powstania rysy w poziomej oddzielającej zbrojenie od przekroju żelbetowego. Rysa taka powstaje w wyniku działania sił klockujących przenoszonych przez zbrojenie podłużne – rysunek 6.

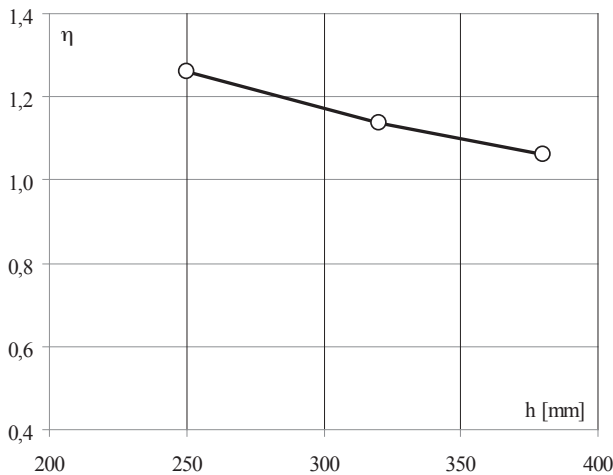
Druga grupa badań [5] pozwala na wskazanie innego, istotnego czynnika wpływającego na nośność elementu po wzmocnieniu na zginanie. Jest to zbrojenie poprzeczne, zarówno znajdujące się w elemencie, jak i naklejone na jego powierzchnię. Pierwsze spostrzeżenie niepowiązane bezpośrednio z nośnością po wzmocnieniu dotyczy wpływu strzemion wewnętrznych na nośność. Dla elementów o wysokości 250 mm oraz 320 mm rozcięcie na spodzie belki dolnych odcinków strzemion nie miało wpływu na nośność (serie VR oraz VE). Oznacza to, że w tych elementach zbrojenie poprzeczne było zbędne. Jednak już w elemencie o wysokości 380 mm rozcięcie strzemion spowodowało zmniejszenie nośności o 13% w porównaniu do elementu świadka. Obserwacja ta jest zgodna z ogólnymi założeniami dotyczącymi nośności na ścinanie w elementach bez zbrojenia poprzecznego – por. wzór (1). Wraz ze wzrostem wysokości elementu maleje nośność na ścinanie i przy takim samym stopniu zbrojenia podłużnego konieczne może stać

się zastosowanie zbrojenia poprzecznego. To spostrzeżenie pokazuje również, że wnioski przedstawione w [10], dotyczące wpływu przecinania strzemion są nie w pełni właściwe. Należy uznać, że w badaniach opisanych w [10] zbrojenie poprzeczne było zbędne, co potwierdza również obraz zarysowania. Jedynie z tego powodu jego przecięcie nie wpłynęło na nośność elementów po wzmocnieniu. Jeżeli zbrojenie poprzeczne jest wymagane, nacięcia służące do wklejenia taśm kompozytowych nie mogą uszkadzać strzemion znajdujących się w przekroju.

Kolejnym czynnikiem w sposób bezpośredni oddziałującym na nośność elementu, czyli na obciążenie, przy którym następuje wyrwanie zbrojenia kompozytowego z przekroju, mogą być zewnętrzne strzemiona kompozytowe. Porównując wartości sił niszczących uzyskanych w ramach badań serii VL oraz VLM, można zauważyć, że niezależnie od wysokości elementu zastosowanie tego typu zbrojenia zwiększyło nośność i opóźniło proces wyrwania z otuliny betonowej zbrojenia kompozytowego wklejonego w nacięte szczeliny. Przy czym ten dodatkowy przyrost nośności nie był stały i małał zdecydowanie wraz ze wzrostem wysokości elementu. Jak wykazano wcześniej, dla belek o wysokości 250 mm oraz 320 mm, wewnętrzne zbrojenie strzemionami stalowymi



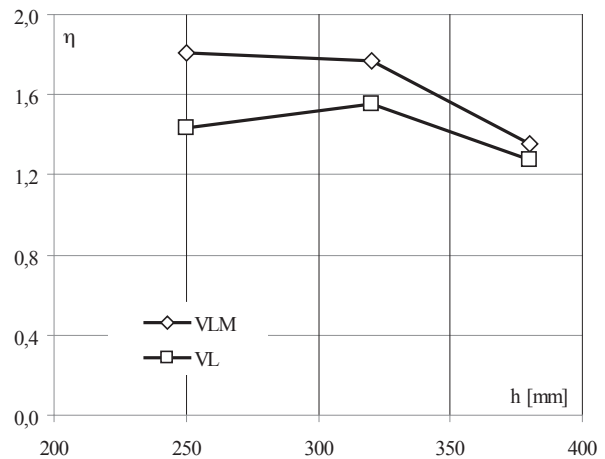
Rys. 7. Zależność siły niszczącej od wysokości przekroju



Rys. 8. Wpływ zastosowania dodatkowych strzemion kompozytowych w zależności od wysokości przekroju F_u VLM w porównaniu do F_u VL

nie było przed wzmocnieniem niezbędne. Jednak już po wzmocnieniu widać wyraźnie, że rola strzemion staje się istotna i to nie tylko tych wewnętrznych. Również, a nawet zwłaszcza zewnętrznych, wykonanych z maty kompozytovej. Te zewnętrzne strzemiona obejmujące dodatkową, zastosowaną w celu zwiększenia nośności na zginanie, dolną warstwę zbrojenia podłużnego. Składają się na nią dwie taśmy CFRP wklejone w otulinę betonową i nieobjęte strzemionami stalowymi. Największa efektywność zewnętrznych strzemion kompozytowych rozumiana jako wzrost nośności elementów wzmocnionych na zginanie bez oraz z dodatkowymi strzemionami kompozytowymi dotyczyła najniższego elementu i wynosiła aż 30%. Dla belki o wysokości 320 mm wzrost nośności był już mniejszy w porównaniu do elementu o wysokości 250 mm, natomiast dla elementu o wysokości 380 mm zastosowanie zewnętrznych strzemion nie wpłynęło w sposób istotny na nośność (przyrost jedynie o 5%) – rysunek 8. Należy zauważyć, że w tym ostatnim przypadku rozcięcie strzemion stalowych spowodowało zmniejszenie siły niszczącej o 13 kN. Oznacza to, że zewnętrzne strzemiona zastąpiły też w pewnym stopniu uszkodzone wewnętrzne zbrojenie poprzeczne. Z tego względu ich wpływ mógł zostać zredukowany. Przyjmując, że właśnie o 13 kN zmniejszyła się nośność elementu, teoretycznie obciążenie niszczące byłoby równe $F_u = 157 + 13 = 170$ kN (przerwana linia na rysunku 7).

Dla elementów przed wzmocnieniem wzrost wysokości oznaczał proporcjonalny przyrost nośności. Jednak po wzmocnieniu taka relacja nie została już zachowana i wzrostowi wysokości elementu towarzyszyło zmniejszenie efektywności wzmocnienia. Dla elementów o wysokości 320 mm było ono nieznaczne, jednak przy wysokości 380 mm efektywność wzmocnienia zmalała do 35% oraz 26% w zależności od tego, czy zastosowano czy też nie – dodatkowe zewnętrzne zbrojenie na ścinanie w postaci mat kompozytowych.



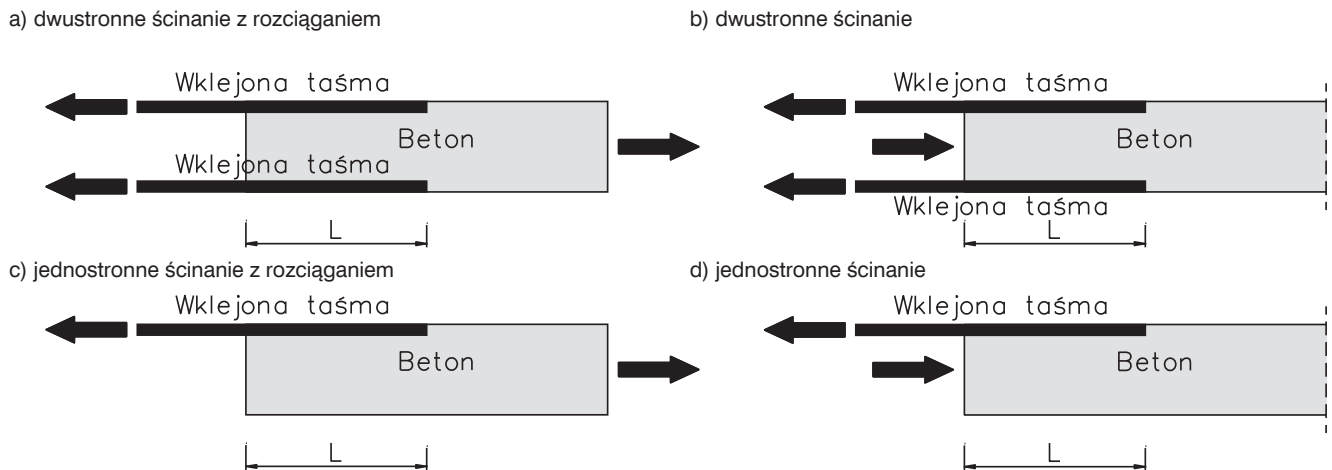
Rys. 9. Efektywność wzmocnienia dla elementów bez (VL) oraz z (VLM) dodatkowymi strzemionami kompozytowymi

W analizowanej grupie elementów wpływ zewnętrznego zbrojenia na ścinanie nie powinien być w jakimkolwiek stopniu zauważalny, ponieważ stopień zbrojenia elementów zarówno podstawowy, jak i zastępczy był mniejszy niż 0,5%. Z tego względu nośność przekroju nie powinna być powiązana z wartościami naprężeń ścinających [11, 12]. Mimo takiego założenia, zbrojenie zewnętrzne w postaci strzemion kompozytowych zwiększało nośność elementów. Z tego względu można stwierdzić, że niezależnie od stopnia zbrojenia podłużnego po wzmocnieniu materiałami kompozytowymi uwidacznia się wpływ ścinania i w bezpośredni sposób przekłada się na wartości obciążeń niszczących.

Wytyczne obliczeniowe dotyczące elementów wzmocnionych kompozytami techniką NSM bazują na analizie wartości maksymalnych naprężeń stycznych generowanych na połączeniu wklejona mata-podłoże betonowe. Badania takich połączeń [13] prowadzone są na wydzielonych próbkach obciążanych siłami osiowymi – rysunek 10. Złącze niepoddawane jest jakimkolwiek siłom prostopadłym do powierzchni elementu żelbetowego. Jest to zatem badanie niepełne, pomijające istotne oddziaływania występujące w rzeczywistej konstrukcji żelbetowej. Z tego względu wyniki takich badań nie powinny stanowić podstawy do przygotowywania i kalibracji modeli obliczeniowych.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że w konstrukcjach żelbetowych wzmocnionych na zginanie metodą NSM istotnym czynnikiem decydującym o nośności jest działanie sił poprzecznych. Mimo że wzmocnienie realizowane jest „na zginanie” i teoretyczna nośność na ścinanie jest zapewniona, widoczny jest wpływ naprężeń ścinających działających w przekroju żelbetowym. W przeciwieństwie do dotychczasowej praktyki projektowej stosowanej dla



Rys. 10. Modele badawcze dla określenia maksymalnych naprężeń przyczepności kompozytu w strefie zakotwienia [11]

typowych elementów żelbetowych o małym stopniu zbrojenia podłużnego nie można pominąć wpływu sił poprzecznych na nośność przekroju. Wynika to z innej charakterystyki zbrojenia stalowego i kompozytowego. W elementach wzmocnionych kompozytami uplastycznienie zbrojenia głównego jest jednym z etapów pracy konstrukcji, który z reguły nie występuje w tradycyjnych konstrukcjach żelbetowych. Wzrost nośności połączenia można uzyskać poprzez zastosowanie zewnętrznego zbrojenia poprzecznego, obejmującego dodatkowo zbrojenie podłużne wprowadzone w celu wzmocnienia na zginanie. Dotychczasowe wytyczne projektowe pomijają zupełnie wpływ sił poprzecznych na nośność elementów wzmocnionych techniką NSM. Projektowanie takich elementów sprowadza się jedynie do obliczeń efektywności zakotwienia lub wartości naprężeń przyczepności, z uwzględnieniem parametrów powiązanych tylko i wyłącznie z naprężeniami stycznymi na styku kompozyt-podłoże betonowe oraz sztywnością poprzeczną kompozytu, co należy uznać za niepoprawne. Badania zjawiska przyczepności wykonywane na wydzielonych ciałach próbnych mogą być w pewnym stopniu przydatne, gdy analizujemy zagadnienia związane z zakotwieniem, jednak modele te nie są zgodne z warunkami pracy kompozytu w rzeczywistej konstrukcji. Z tego względu wnioski i wytyczne poczynione na podstawie takich obserwacji mają ograniczone znaczenie praktyczne.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Teng J. G., Smith S. T., Yao J., Chen J. F., Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs, *Construction and Building Materials* 17/2003
- [2] Bodzak P., Wzmocnienia elementów materiałami kompozytowymi w świetle zasad zbrojenia konstrukcji żelbetowych, *Inżynieria i Budownictwo* 1/2019
- [3] Bodzak P., Zniszczenie w konstrukcjach wzmocnianych kompozytami – efekt przyczepności czy ścinania, *Inżynieria i Budownictwo* 2/2019
- [4] Fortes A. S., Barros J. A., Padartaz I. J., Estudio comparativo de tres tecnicas de reforco a flexao com CFRP 45° Congresso Brasileiro do Concreto 16 a 20 de agosto de 2003
- [5] Barros J., Costa I., Flexural and shear strengthening of RC beams with composite materials – influence of cutting steel stirrups to install CFRP strips FRPRCS-9 Sydney, Australia 13–15 czerwca 2009
- [6] SIA 166 Klebebewehrungen. Schweizerischer Ingenieur-und Architektenverein SIA, 2004
- [7] fib Bulletin 14, Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. International Federation for Structural Concrete (fib), Switzerland, 2001
- [8] CNR Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures, CNR-DT 200/2013. CNR – Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome, Italy, 2013
- [9] ACI ACI440.2R-17 (2017), Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, American Concrete Institute
- [10] Kotynia R., Analysis of the flexural response of NSM FRP-strengthened concrete beams. Proceedings of the 8th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-8). Patras, Greece, 2007
- [11] Kani G. N. J., The Riddle of Shear Failure and its Solution, *ACI Journal*, tom 61, 1964, [4]
- [12] Kani G. N. J., Basic facts concerning shear failure, *ACI Journal*, tom 63, 1966
- [13] Yao J., Teng J. G., Chen J. F., Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints *Composites: Part B* 36 (2005) 99–113

XI Konferencja SKB 2019
STOWARZYSZENIE KOSZTORYSANTÓW BUDOWLANYCH

**KONIUNKTURA I JEJ WPŁYW
NA CENY ROBÓT BUDOWLANYCH**

WARSZAWA
21-22.03.2019

Hotel Lord
Al. Krakowska 218