

Badanie na beleczkach zginanych zjawiska przyczepności materiałów kompozytowych klejonych do powierzchni elementu żelbetowego

Dr inż. Przemysław Bodzak, Politechnika Łódzka

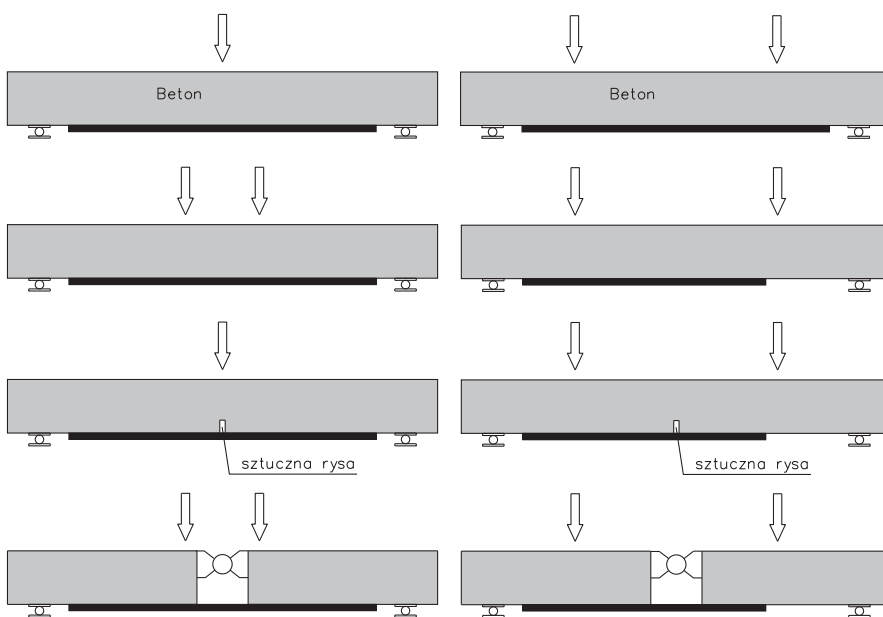
1. Wprowadzenie

W budownictwie podstawowe założenia projektowe pozostają niezmiennie od wielu lat. W projektowaniu konstrukcji żelbetowych obowiązuje zasada, wynikająca bezpośrednio z właściwości fizycznych zastosowanych materiałów, że beton powinien przejść siły ściskające, natomiast stal – rozciągające. By ta współpraca była możliwa, zbrojenie musi być poprawnie ukształtowane i właściwie zakotwione. W tym celu, wiele lat temu, gdy powszechnie stosowano stale gładkie, w strefie zakotwienia niezbędne było wykonanie haków lub odgięć poprawiających warunki zakotwienia. Wraz z rozwojem technologii produkcji wyrobów stalowych i wprowadzeniem do powszechnego użycia prętów żebranych zakotwienie zbrojenia zaczęto realizować poprzez proste odcinki prętów bez haków lub odgięć. Warunki przyczepności poszczególnych typów zbrojenia z uwzględnieniem zarówno lokalizacji zbrojenia, jak i kierunku betonowania określano na podstawie badań. Zostały one w pewnym

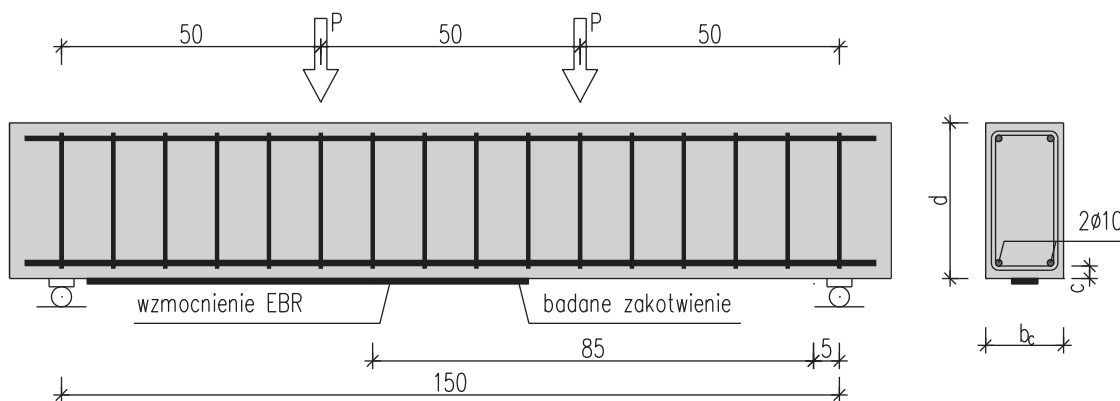
stopniu znormalizowane, by możliwe było porównanie wyników, a także ich analiza. Jednym z typów takich badań jest np. test przeprowadzony na beleczkach zginanych, którego znormalizowaną formułą było badanie RILEM RC5.

Ten typ badania w zmodyfikowanej formie zaadaptowany został do badania przyczepności materiałów kompozytowych klejonych do powierzchni betonu. W praktyce projektowej materiały te w formie mat lub taśm, głównie CFRP stosuje się obecnie do wzmacniania konstrukcji żelbetowych, a współpraca tych materiałów z podłożem betonowym zapewniana jest jedynie poprzez przyczepność kleju zarówno do kompozytu, jak i do betonu. Jest to zarazem najbardziej newralgiczny element wzmocnionej konstrukcji, którego uszkodzenie powoduje całkowitą utratę zdolności do przenoszenia obciążeń. Z tego względu prowadzone były, i są nadal, badania mające na celu zarówno wskazanie czynników wpływających na nośność połączenia, jak i umożliwienie opracowania wytycznych projektowych stosowanych w codziennej praktyce inżynierskiej

[2–7]. Na potrzeby analizy zjawiska przyczepności kompozytów do betonu stosowane są właśnie badania na beleczkach zginanych (rys. 1). W badaniach tych matę lub taśmę FRP przykleja się do powierzchni betonu, a element obciąża monotonicznie aż do zniszczenia. Podstawowe modele badawcze to: zwykła beleczka żelbetowa, beleczka żelbetowa ze sztuczną rysą oraz beleczka z przegubem. Stosowane są dwa typy elementów bez stref czystego zginania i z nimi. Dodatkowo w przypadku typu drugiego taśma lub mata może być przyklejona na całej długości elementu (rys. 1a) lub kończyć się na odcinku czystego zginania (rys. 1b). Tak przygotowane modele pozwalają teoretycznie



Rys. 1. Modele elementów do badań zjawiska przyczepności kompozytu do betonu



Rys. 2. Schemat elementu w badaniach [8]

na zbadanie zjawiska przyczepności kompozytu do powierzchni betonu. Możliwe wydaje się też ewentualne określenie wpływu siły poprzecznej na naprężenia przyczepności w strefie zakotwienia.

2. Analiza

Do analizy wybrano dwa typy badań zrealizowanych na belczkach żelbetowych.

W obu przypadkach były to badania na elementach ze strefą czystego zginania. W grupie pierwszej taśma była klejona do podłoża betonowego na całej długości elementu. W grupie drugiej zastosowano belki z przegubem, a taśma po stronie badanego zakotwienia klejona była jedynie na odcinku o określonej długości.

Schemat zastosowanego w grupie pierwszej modelu badawczego wraz z układem zbrojenia przedstawiono na rysunku 2. Zbrojenie podstawowe wszystkich elementów było jednakowe, różnicowano natomiast typ oraz geometrię wzmocnienia zarówno co do materiału (kompozyt, stal), modułu Younga, a także szerokości i grubości warstwy doklejonego materiału. Szczegółowe informacje o elementach badawczych, a także wyniki badań przedstawia tabela 1.

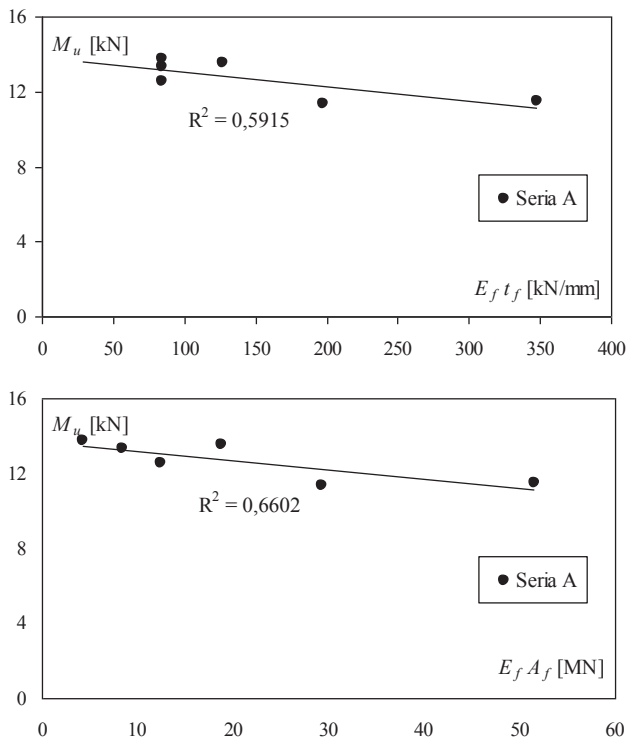
Autorzy tych badań, na podstawie uzyskanych wyników wskazali na istotną zależność związaną z geometrią materiału kompozytowego i oddziaływującą na nośność połączenia. Zauważono, że wraz ze wzrostem grubości materiału doklejonego siła niszcząca zmniejsza się proporcjonalnie (rys. 3a). Oznacza to, że zwiększenie grubości, czyli sztywności poprzecznej prowadzi do szybszego odspojenia się doklejonej warstwy zbrojenia stalowego lub kompozytowego. Analizując przedstawione w [8] wyniki badań, można jednak zauważyć, że zmiana materiału i wynikający z niej wzrost grubości nie oznaczają jedynie zwiększenia sztywności poprzecznej. W przypadku płaskownika stalowego zwiększeniu uległa nie tylko grubość, ale także moduł sprężystości zastosowanego materiału. Jeżeli analizujemy dwa elementy GS-A (mata szklana) oraz SP-A (płaskownik stalowy), to dla tego drugiego rola doklejonej warstwy zbrojenia jest zdecydowanie istotniejsza, jeżeli porównamy sztywności zbrojenia wewnętrznego $EA = 29830$ kN i zewnętrznego $EA = 51505$ kN.

W elemencie GS-A prawie ośmiokrotnie mniejsza sztywność maty szklanej ($EA = 4227$ kN) w stosunku do sztywności zbrojenia wewnętrznego ($EA = 31400$ kN) powoduje, że siła przenoszona przez to zbrojenie jest znikoma. Z tego

Tablica 1. Informacje o elementach badawczych wg [8]

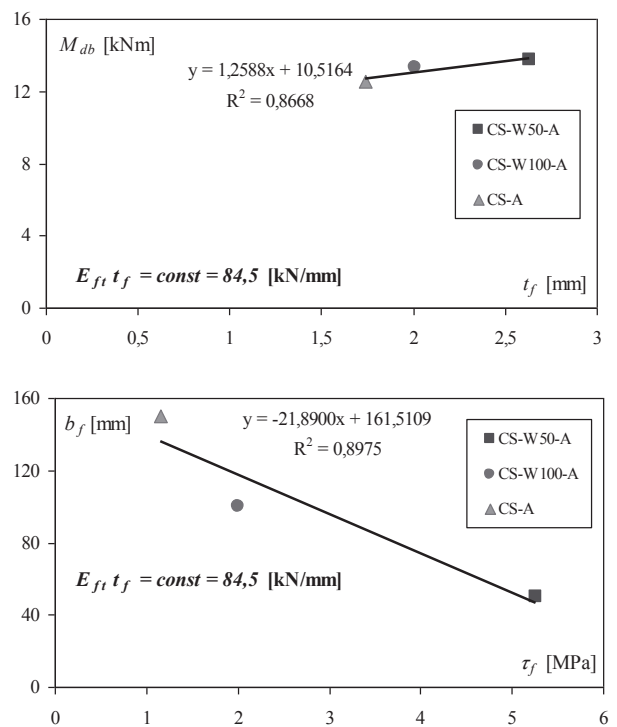
Lp	Oznaczenie	Materiału wzmocnienia	Otulina [mm]	b_f [mm]	n	t_f [mm]	f_c [MPa]	M_{db} [kNm]	$E_f t_f$ [kN]	$E_f A_f$ [kN/mm]	$M_{s,cal}$ [kNm]	$M_{f,cal}$ [kNm]
1	CS-A	CFRP	30	148	2	1,74	30,7	12,53	84,5	12503	17,12	38,02
2	CS-L1-A	CFRP	30	148	1	1,01	36,4	16,95	42,2	6252	17,09	32,99
3	CS-L3-A	CFRP	30	148	3	2,63	32,9	13,53	126,7	18755	17,22	44,82
4	CS-W50-A	CFRP	30	50	2	2,01	39,5	13,75	84,5	4227	17,46	31,09
5	CS-W100-A	CFRP	30	100	2	1,95	37,8	13,3	84,5	8448	17,05	36,73
6	CP-A	CFRP	30	148	1	1,2	37	11,35	198	29304	17,41	54,84
7	SP-A	Stal	30	148	-	2,0	35,4	11,48	348	51504	17,03	39,84
8	GS-A	GFRP	30	148	1	1,67	38,9	19,1	28,6	4229	17,02	30,53
9	CS-C10-A	CFRP	10	148	2	1,86	27,3	18,85	84,5	12503	18,58	38,09
10	CS-C50-A	CFRP	50	148	2	1,85	38,8	11,9	84,5	12503	15,31	40,99

gdzie: b_f , t_f – szerokość, grubość wzmocnienia; f_c – wytrzymałość betonu; M_{db} – moment zginający przy odspojeniu; E_f – moduł sprężystości, $M_{s,cal}$, $M_{f,cal}$ – nośność obliczeniowa przekroju niewzmocnionego oraz wzmocnionego



Rys. 3. Zależność pomiędzy nośnością i: a) sztywnością poprzeczną ($E_s t_s$, $E_f t_f$), b) sztywnością osiową ($E_s A_s$, $E_f A_f$)

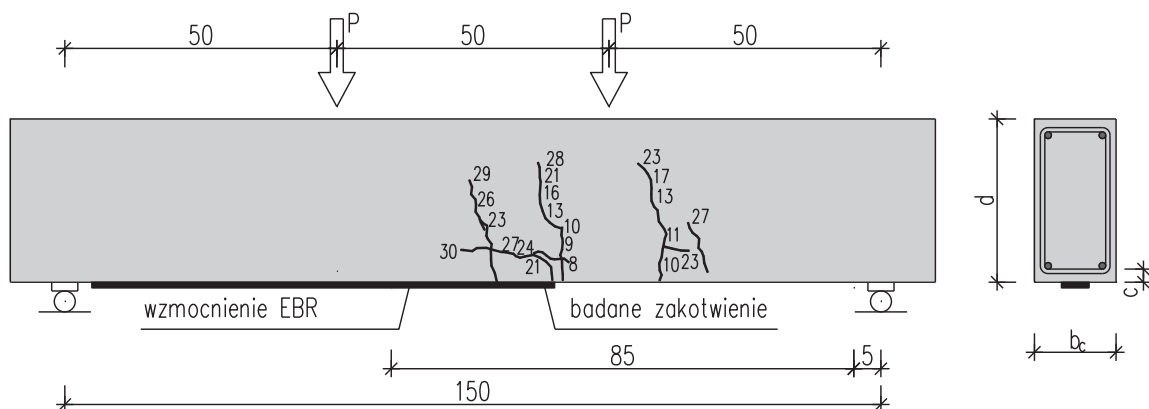
względnie również naprężenia styczne muszą być automatycznie zdecydowanie mniejsze niż w elemencie SP-A. Element z doklejoną warstwą zbrojenia w postaci płaskownika stalowego musi się zniszczyć wcześniej, gdyż ta warstwa nie tylko przenosi ponad 10-krotnie większe siły niż mata szklana ($EA = 51505$ kN i 4227 kN odpowiednio), ale również większe siły niż podstawowe zbrojenie wewnętrzne znajdujące się w elemencie. Brak w tym jakiegokolwiek wpływu większej lub mniejszej podatności na odkształcenia poprzeczne umożliwiającej teoretycznie łatwiejsze dopasowanie się maty szklanej do deformacji elementu. Jedynym problemem w takiej sytuacji jest brak jakiegokolwiek zbrojenia poprzecznego, które zapobiegłoby pełnemu odspojeniu doklejonej warstwy zbrojenia.



Rys. 4. Zależność pomiędzy: a) nośnością i grubością kompozytu t_f , b) szerokością kompozytu i naprężeniami stycznymi przy odspojeniu τ_f

W omawianych badaniach w trzech elementach zastosowano zbrojenie zewnętrzne o jednakowej sztywności poprzecznej $E_f t_f$, jednak o różnej szerokości b_f . W takiej grupie elementów wynik analizy jest zupełnie odmienny niż w przypadku wyżej opisanym. Wraz ze wzrostem grubości warstwy zbrojenia zewnętrznego obciążenie niszczące rośnie, czyli jednocześnie wzrastają styczne naprężenia przyczepności, ponieważ szerokość materiału doklejonego zmniejsza się (rys. 4). To spostrzeżenie przeczy ogólnie znanym wnioskom z analizy nośności elementów wzmacnianych techniką EBR.

Istotniejszym w takiej sytuacji zagadnieniem wydaje się być jednak określenie obciążenia lub momentu zginającego, przy którym następuje odspojenie kompozytu. W pracy [8]



Rys. 5. Obraz zarysowania elementu SP-A wg [8]

KONSTRUKCJE – ELEMENTY – MATERIAŁY

zamieszczono zdjęcie wykonane w końcowej fazie badania elementu SP-A (rys. 5). Na rysunku tym przedstawiono zarówno układ rys, jak i wartości obciążeń, przy których one powstały. Analizując ten obraz zarysowania, można bez trudu zauważyć, że mimo iż dla tego elementu obciążenie niszczące, tj. powodujące odspojenie warstwy doklejonego zbrojenia zewnętrznego miało miejsce wg autorów przy sile $F_u = 30$ kN, w rzeczywistości rozwarstwienie rozpoczęło się dużo wcześniej. Już przy sile około 21 kN pojawiła się rysa oddzielająca końcowy odcinek płaskownika od podłoża betonowego. Natomiast rozwarstwienie na znacznej długości (niebędące, jak wynika z obrazu zarysowania zniszczeniem w wyniku odspojenia wraz z otuliną) widoczne jest przy obciążeniu $F = 24$ kN. Oznacza to,

że przedstawiona jako wynik badania siła niszcząca może w wielu przypadkach być niezgodna ze stanem faktycznym, w tym z obrazem zarysowania opisującym stadium pracy konstrukcji. Należy jednak podkreślić, że bardziej istotny jest wpływ sztywności „osiowej” warstwy zbrojenia zewnętrznego EA niż jego sztywności „poprzecznej” E_v , jak to wskazano wcześniej. Nie można jednak na podstawie tego typu wyników analizować zagadnień związanych z przyczepnością zbrojenia doklejonego do betonu, jak to przeprowadzono np. w [6]. Druga grupa badań [1] obejmowała badania zrealizowane na zmodyfikowanych elementach stosowanych w procedurze RILEM służącej do badania przyczepności zbrojenia zwykłego.

Rys. 6. Schematy elementów z badań [1]

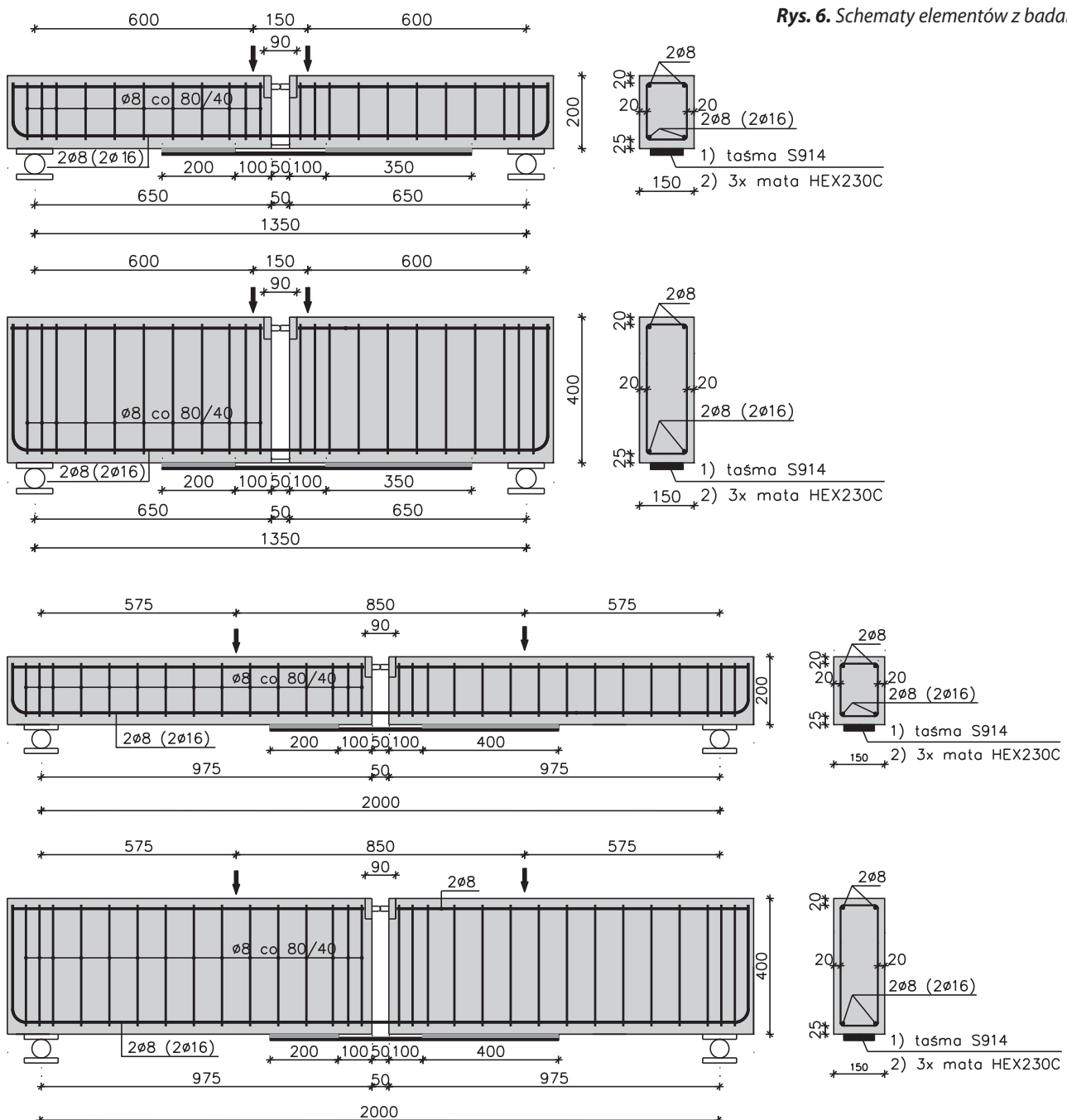
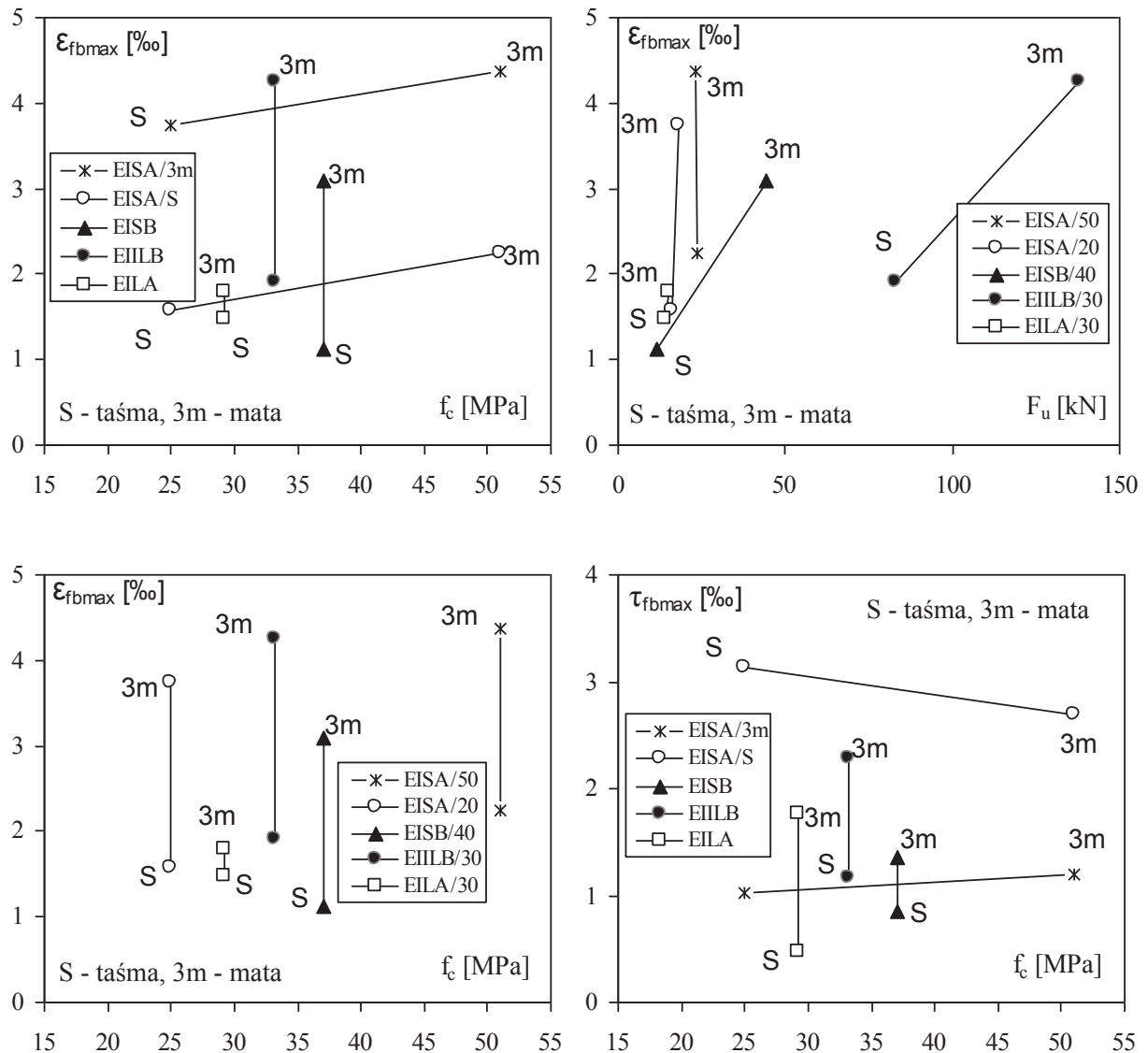


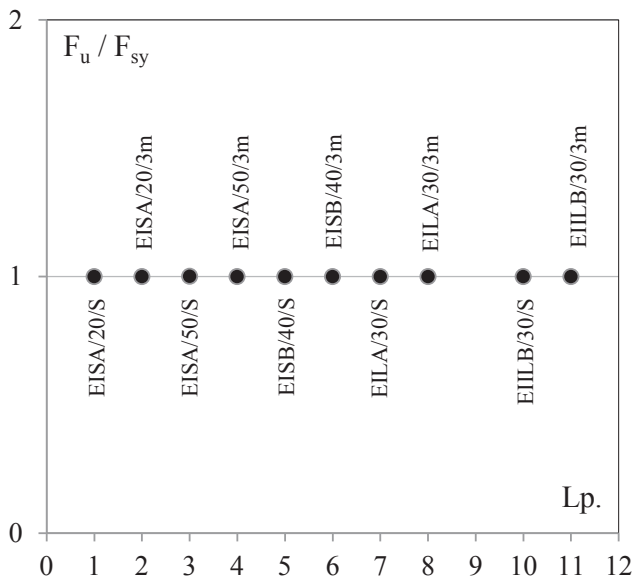
Tabela 2. Informacje o elementach badawczych wg [1]

Lp.	Grupa	Zbrojenie	Oznaczenia	f_c [MPa]	L_b [mm]	F_{sy} [kN]	F_u [kN]	ϵ_{sy} [‰]	ϵ_{fbmax} [‰]
1	EIS	2#8	EISA/20/S	25,0	120	16,22	16,22	1,84	1,57
2			EISA/20/3m	25,0	200	18,30	18,30	3,18	3,74
3			EISA/50/S	51,0	200	23,46	23,45	2,55	2,25
4			EISA/50/3m	51,0	200	23,07	23,07	2,52	4,37
5	EIS	2#16	ESIB/40/S	37,0	200	11,48	11,48	0,73	1,13
6			EISB/40/3m	37,0	200	44,08	44,08	2,89	3,09
7	EIL	2#8	EILA/30/S	29,2	200	14,05	14,05	1,34	1,47
8			EILA/30/3m	29,2	210	15,05	15,05	2,02	1,79
9		2#16	EILB/30/Ss	29,2	211	-	11,00	-	1,42
10	EIIL	2#16	EIILB/30/S	33,2	200	82,91	82,91	1,19	1,91
11			EIILB/30/3m	33,2	200	137,81	137,81	2,93	4,26

gdzie: F_{sy} – obciążenie przy uplastycznieniu zbrojenia; F_u – obciążenie niszczące, ϵ_{sy} , ϵ_{fbmax} – odkształcenie stali oraz kompozytu



Rys. 7. Zależności pomiędzy wytrzymałością betonu a odkształceniami kompozytu oraz naprężeniami przyczepności przy zniszczeniu wg [1]



Rys. 8. Zależność pomiędzy nośnością i uplastycznieniem zbrojenia głównego

W elemencie takim po jednej stronie taśma lub mata klejona była na całej długości styku, natomiast po przeciwnej stronie odcinek przyczepności miał długość maksymalną $L_b \approx 200$ mm. W tej grupie badań stosowano elementy o dwóch wysokościach $h = 200$ mm oraz 400 mm, a także dwóch długościach $l = 1350$ mm oraz 2000 mm. W elementach dłuższych taśma kotwiona była na odcinku czystego zginania, natomiast w elementach krótszych – w strefie przypodporowej, czyli poddana była działaniu momentu zginającego i siły poprzecznej (rys. 6).

Elementy w tej grupie badań różniły się między sobą ponadto zbrojeniem podłużnym (2 # 8 lub 2 # 16) wytrzymałością betonu ($f_{c,cube} = 20\text{--}50$ MPa) oraz typem materiału kompozytowego (taśma S914, mata HEX230C). Szczegółowe informacje zarówno o elementach, jak i wynikach badań przedstawiono w tabeli 2.

W analizie wyników przedstawionej w [1] starano się wskazać zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami wprowadzonych do badań a obciążeniami powodującymi odspojenie kompozytu. Porównywano wpływ większości zmiennych na obciążenie niszczące (rys. 7). Jak można zauważyć, brak istotnych zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami zmiennymi brany pod uwagę w pracy [1] a obciążeniem niszczącym, tj. przy których nastąpiło odspojenie kompozytu. Zarówno wytrzymałość betonu w elementach badawczych, jak i stopień zbrojenia, a także typ kompozytu nie wpływają w sposób pozwalający na uzyskanie korelacji pomiędzy siłami niszczącymi a wartościami naprężeń przyczepności oraz odkształceń kompozytu przy odspojeniu.

W analizie przedstawionej w [3] pominięto jeden istotny parametr, a mianowicie wpływ granicy plastyczności stali na nośność elementów. Porównując wartości sił niszczących z siłami, przy których nastąpiło uplastycznienie zbrojenia (rys. 8),

można zauważyć, że niezależnie od lokalizacji zakotwienia kompozytu (strefa czystego zginania, strefa przypodporowa) we wszystkich elementach odspojenie kompozytu następowało wraz z osiągnięciem granicy plastyczności w stali zbrojeniowej.

Zjawisko to było również niezależne od wysokości elementu, jego zbrojenia, a także typu kompozytu (taśma, mata). Oznacza to, że pozostałe parametry analizowane w [1] nie mają istotnego wpływu na wartości stycznych naprężeń przyczepności.

3. Podsumowanie

W elementach wzmacnianych kompozytami klejonymi do powierzchni betonu badanie zjawiska przyczepności na próbkach zginanych nie zostało dotychczas znormalizowane. Na podstawie przeprowadzonej analizy badań [8], w których kompozyt klejono w całej długości wykazano, że bez jednoznacznego i jednolitego określenia obciążenia niszczącego niemożliwa jest analiza tego typu badań, a wyniki nie pozwalają na wykonanie opracowań statystycznych. Proponowane na ich podstawie modele obliczeniowe są z tego względu niepoprawne.

W badaniach przyczepności, w których odcinek badawczy, na jakim przyklejono kompozyt, ograniczony był do stałej długości, najistotniejszy okazał się wpływ wewnętrznego zbrojenia stalowego i jego granicy plastyczności i to niezależnie od pozostałych parametrów, takich jak wytrzymałość betonu, typ kompozytu, a także geometria elementu, które uwzględniono w programie badań. W pracy [1] próbowano analizować wpływ wytrzymałości betonu, wartości odkształceń i naprężeń stycznych, jednak nie wykazano istotnych zależności pomiędzy tymi parametrami a siłą niszczącą.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kotynia R., Przyczepność zbrojenia kompozytowego do betonu w żelbetowych elementach wzmocnionych za pomocą materiałów kompozytowych CFRP, Badania doświadczalne elementów i konstrukcji żelbetowych, Zeszyt Nr 16, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Wydziału Budownictwa i Architektury Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2008
- [2] Lu X. Z., Ye L. P., Teng J. G., Jiang J. J., Meso-Scale Finite Element Model for FRP Sheets/Plates Bonded to Concrete, Engineering Structures, tom 27, 4/2005, str. 564–75
- [3] Lu X. Z., Ye L. P., Teng J. G., Jiang J. J., Bond-Slip Models for FRP Sheets/Plates Bonded to Concrete, Engineering Structures, tom 27, 6/2005, str. 920–937
- [4] Teng J. G., Chen J. F., Mechanics of Debonding in FRP-Plated RC Beams, Proceedings of ICE: Structures and Buildings, tom 162, 5/2009, str. 335–45
- [5] Teng J. G., Smith S. T., Chen J. F., Intermediate Crack-Induced Debonding in RC Beams and Slabs, Construction and Building Materials, tom 17, 6-7/2003, str. 447–62
- [6] Teng J. G., Yao J., Plate End Debonding in FRP-Plated RC Beams-II: Strength Model, Engineering Structures, tom 29, 10/2007, str. 2472–86
- [7] Yao J., Teng J. G., Chen J. F., Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints Composites: Part B 36 (2005) 99–113
- [8] Yao J., Teng J. G., Plate End Debonding in FRP-Plated RC Beams-I: Experiments, Engineering Structures, tom 29, 10/2007, str. 2472–86