

**Zalecenia dotyczące wzmocnienia
konstrukcji mostowych za pomocą
przyklejanego zbrojenia zewnętrznego**

**Zalecenia dotyczące wzmocnienia
konstrukcji mostowych za pomocą
przyklejanego zbrojenia zewnętrznego**

WARSZAWA 2006

Niniejsze zalecenia opracowano w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów
na zlecenie Generalnej dyirekcji Dróg Krajowych i Autostrad
Warszawa

Autor: dr hab. inż. Marek Łagoda
Recenzenci:
Prof. dr hab. inż. Kazimierz Furtak
Prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski

1. Wprowadzenie

Niniejsze Zalecenia stanowią nowelizację i ostatecznie zastępują wydane w 2002 r. przez GDDKiA „Zalecenia dotyczące wzmacniania konstrukcji mostowych przez przyklejanie zbrojenia zewnętrznego”. Zalecenia dotyczą wzmacniania konstrukcji mostów z betonu zbrojonego lub sprężonego przez przyklejanie płaskowników stalowych, taśm i mat kompozytowych do powierzchni zewnętrznej konstrukcji betonowej za pomocą zaprawy klejowej.

Wzmocnienie konstrukcji na zginanie następuje przez przyklejenie płaskowników stalowych lub taśm kompozytowych, przenoszących naprężenia rozciągające.

Wzmocnienie konstrukcji na ścinanie następuje przez przyklejenie płaskowników stalowych lub mat kompozytowych, jak również kształowników kompozytowych, (rzadziej taśm), przenoszących naprężenia ścinające oraz naprężenia główne rozciągające.

Obszar zastosowania przyklejanych elementów (jako zewnętrzne zbrojenie lub sprężysty pancierz) przy wzmacnianiu konstrukcji mostowych jest bardzo rozległy, a przyklejane materiały są bardzo efektywne w wielu przypadkach, a w szczególności:

1. w przypadku podniesienia nośności konstrukcji – jest to główny, najczęściej występujący powód wzmacniania;
2. konieczności zwiększenia trwałości i nośności eksploatowanych obiektów– z powodu degradacji zbrojenia wywołanej korozją, przeciążeniem czy innymi czynnikami;
3. konieczności zamknięcia rys lub zmniejszenia ich szerokości podczas pracy konstrukcji – przez doklejenie dodatkowego zbrojenia zewnętrznego po odciążeniu elementu wzmacnianego;
4. powodują zmniejszenia ugięć – przez zwiększenie sztywności na zginanie;
5. zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej – przez zmniejszenie amplitudy naprężeń przy obciążeniach zmiennych;
6. poprawy parametrów dynamicznych konstrukcji – przez wzrost częstotliwości drgań własnych konstrukcji;
7. zwiększenia możliwości przeniesienia koniecznych deformacji sprężystych – przez opasanie konstrukcji, np. na terenach szkód górniczych lub obszarach osuwiskowych czy tektonicznie czynnych.

Wyżej wymienione efekty mogą być dodatkowo zwiększone, gdy stosowane są do wzmacniania elementy kompozytowe wstępnie sprężone.

Zalecenia zostały opracowane w celu właściwego:

- doboru założeń projektowych,
- wykonania projektu (obliczeń statycznych i wytrzymałościowych),
- określenia warunków technologicznych i prawidłowej realizacji wzmocnienia,
- odbioru wzmocnionych konstrukcji.

Zalecenia należy stosować przy opracowywaniu dokumentacji technicznych, realizacji robót wykonawczych, kontroli jakości i odbiorach wzmocnianych konstrukcji mostowych.

2. Podstawowe określenia i oznaczenia

2.1. Określenia

Materiały kompozytowe FRP – (ang. *FRP - Fibre Reinforced Polymer*) są w ogólnym ujęciu tworzywami sztucznymi, zbrojonymi różnego rodzaju włóknami. Najczęściej spotykane kompozyty to:

- polimery zbrojone włóknami węglowymi (ang. *CFRP - Carbon Fibre Reinforced Polymer*),
- polimery zbrojone włóknami szklanymi (ang. *GFRP - Glass Fibre Reinforced Polymer*),
- polimery zbrojone włóknami aramidowymi (ang. *AFRP - Aramid Fibre Reinforced Polymer*).

Taśmy FRP – cienkie kompozytowe elementy wstępnie zbrojone włóknami węglowymi, szklanymi lub aramidowymi w kierunku podłużnym.

Maty FRP – płyty z jednokierunkowo ułożonych włókien (rzadziej z wielokierunkowo tkanych) węglowych, szklanych lub aramidowych utrzymanych najczęściej w osnowie bawełnianej.

Matryca – polimer, najczęściej żywica epoksydowa utwardzana aminami lub anhydrydami, który zbrojony włóknami tworzy kompozyt FRP.

Delaminacja – utrata przyczepności przyklejonego elementu do elementu wzmacnianego, odspojenie taśmy od betonu.

2.2. Podstawowe oznaczenia

Wielkie litery łacińskie:

A_{c0} - pole powierzchni „nieowiniętej FRP” strefy betonu,

A_{cf} - pole powierzchni przekroju betonu w strefie wpływu zewnętrznego owinięcia FRP,

A_{cfs} - pole powierzchni przekroju betonu w strefie wpływu zewnętrznego owinięcia FRP i zbrojenia strzemionami stalowymi,

$A_{c,eff}$ - efektywny przekrój betonu przy rozciąganiu,

A_{sv}^s - przekrój poprzeczny strzemion lub prętów odgiętych,

A_s^i - przekrój poprzeczny stali prętów prostych (dolnego zbrojenia),

D_c - siła przenoszona przez beton,

E - moduł Younga,

E_L - moduł Younga elementu doklejonego,

E_f - moduł Young’a FRP w kierunku ułożenia włókien,

E_{fib} - moduł Young’a włókien,

E_m - moduł Young’a matrycy,

G - moduł Kirchhoffa,

I - moment bezwładności,

I_c - moment bezwładności przekształconego przekroju zarysowanego,

I_{02} - moment bezwładności w stanie zarysowania przed wzmocnieniem,

K - stały współczynnik zależny od sztywności doklejonego elementu i wartości granicznej przemieszczenia względnego,

N_c i N_s - są siłami częściowymi, przenoszonymi przez przekrój betonowy i podłużne zbrojenie,

N_{c0} - siła przenoszona przez „nieowiniętą FRP” strefę betonu,

$N_{cc,cf}$ - siła przenoszona przez przekrój betonu w strefie wpływu zewnętrznego owinięcia FRP,

$N_{cc,fs}$ - siła przenoszona przez przekrój betonu w strefie wpływu zewnętrznego owinięcia FRP i zbrojenia strzemionami stalowymi,

$P_L^{(0)}$ - siła sprężająca taśmy,

$P_L^{(1)}$ - siła w taśmie kompozytowej wywołana obciążeniem,

P_L - całkowita siła w taśmie,

R_t - wytrzymałość na ścinanie zaprawy klejowej,

T_s - siła rozciągająca w stali przed sprężeniem taśm,

T_i - sumaryczna siła rozciągająca w sprowadzonym „zbrojeniu” po sprężeniu,

V_{fib} - ułamkowa zawartość włókien w kompozycie,

V_m - ułamkowa zawartość matrycy w kompozycie,

$V_{x=0}$, $M_{x=0}$ - są kolejno siłą ścinającą i momentem zginającym, działającym w przekroju, odpowiadającym końcowi doklejonego kompozytu FRP,

V_v - całkowita obliczeniowa siła poprzeczna na 1m szerokości płyty,

Z_s - siła przenoszona przez doklejony kompozyt,

Z_s - siła przenoszona przez zbrojenie stalowe,

Małe litery łacińskie:

a_1 - ugięcie w stanie niezarysowanym,

a_2 - ugięcie w stanie zarysowanym,

b - szerokość,

b_c - szerokość belki,

b_L - szerokość elementu doklejonego [mm],

f_{ck} - charakterystyczna wytrzymałość (klasa) betonu,

f_{cd} - obliczeniowa wytrzymałość betonu,

f_{cm} - powierzchniowa wytrzymałość betonu na rozciąganie,

f_{c0} - naprężenia ściskające „nieowiniętej FRP” strefy betonu,
 $f_{cc,f}$ - naprężenia ściskane betonu w strefie wpływu zewnętrznego owinięcia FRP,
 $f_{cc,fs}$ - naprężenia ściskane betonu w strefie wpływu zewnętrznego owinięcia FRP i zbrojenia strzemionami stalowymi
 f_f - wytrzymałość na rozciąganie FRP w kierunku ułożenia włókien,
 f_{fb} - wytrzymałość na rozciąganie włókien,
 f_{Lu} - wytrzymałość kompozytu (naprężenie odpowiadające ε_{Lu}),
 f_m - wytrzymałość na rozciąganie matrycy.
 f_s - naprężenia ściskające w zbrojeniu podłużnym,
 f_{syk} - charakterystyczna granica plastyczności stali,
 f_{syd} - obliczeniowa granica plastyczności stali,
 f_v - wytrzymałość betonu na ścinanie,
 f'_{yd} - granica plastyczności stali strzemion lub prętów odgiętych,
 f_{yd} - granica plastyczności stali prętów prostych (dolnego zbrojenia),
 k_L - współczynnik korelacji odkształceń dla kompozytu,
 k_M - współczynnik uzależniony od typu obciążenia,
 k_s - współczynnik korelacji odkształceń dla stali,
 l - długość,
 s - grubość,
 s_{rm} - średnie odległości między rysami,
 s_k - odstęp między wzmacniającymi przyklejonymi elementami (taśmami kompozytowymi),
 t - grubość doklejonego elementu,
 t_a - grubość skleiny,
 u_s, u_f - parametry związane z przyczepnością stali i kompozytu,
 z_s - ramię sił wewnętrznych przed sprężeniem taśm,
 z_i - ramię sił wewnętrznych po sprężeniu taśm,
 z_m - średnia wartość ramienia sił wewnętrznych,
Litery greckie:
 β - współczynnik określający zależność między wartościami średnimi i charakterystycznymi szerokości rys,
 ε_0 - odkształcenia początkowe,
 ε_2 - odkształcenia w stali zbrojeniowej w stanie pełnego zarysowania,
 ε_c - odkształcenia w betonie,
 ε_{parab} - odkształcenia w betonie na końcu zakresu krzywoliniowego (parabolicznego),
 ε_{cu} - odkształcenia graniczne w betonie,
 ε_g - odkształcenie graniczne stali przyjęte w projekcie wzmocnienia,
 ε_L - końcowe odkształcenie taśmy kompozytowej,
 $\varepsilon_{L,lim}$ - odkształcenia graniczne w kompozycie (w zależności od rodzaju i materiału kompozytu),
 ε_{Lu} - odkształcenie niszczące kompozyt,
 $\varepsilon_L^{(0)}$ - początkowe odkształcenie taśmy kompozytowej,
 $\varepsilon_L^{(1)}$ - odkształcenie taśmy kompozytowej od obciążenia,
 $\varepsilon_{rm,r}$ - średnie odkształcenia stali zbrojeniowej z uwzględnieniem otaczającego betonu,
 ε_s - odkształcenia w stali,
 ε_{sy} - odkształcenia w stali zbrojeniowej odpowiadające umownej granicy plastyczności,
 ε_{su} - odkształcenia graniczne w stali zbrojeniowej,
 ζ_b - współczynnik rozkładu uwzględniając sztywność przy rozciąganiu,
 ζ - współczynnik uwzględniający sztywność przy rozciąganiu,
 η_B - stopień wzmocnienia, - stosunek nośności przekroju przed wzmocnieniem do nośności przekroju po wzmocnieniu,
 τ_{CA} - średnie naprężenia ścinające w strefie ściskanej betonu,
 τ_K - obliczeniowa wartość naprężenia ścinającego,
 τ_{sm} - średnie naprężenie ścinające w stali,
 τ_{fm} - średnie naprężenie ścinające w doklejonym FRP,

3. Materiały stalowe i kompozytowe FRP przydatne przy wzmacnianiu konstrukcji mostowych

3.1. Uwagi ogólne dotyczące FRP

Wybór materiałów dla różnych systemów wzmacniania jest bardzo istotnym procesem. Każdy system jest unikalny ale zakłada, że włókna i żywica stanowiące kompozyt pracują razem. Mamy dwa główne typy wzmacniających systemów FRP: pierwszy oparty na elementach taśmowych, drugi na matach.

Rodzaje kompozytów zależne są od poszczególnych producentów i dostawców oraz różnią się kształtem, typem włókien, matrycami, klejami, itp. Dobór odpowiedniego systemu zależy od rodzaju konstrukcji wzmacnianej. Przykładowo taśmy są szczególnie korzystne do wzmacniania na siły rozciągające konstrukcji płytowych i belkowych o prostych powierzchniach, podczas gdy maty kompozytowe są wiotkie i mogą być używane szczególnie do wzmacniania na ścinanie płaskich oraz wypukłych powierzchni. W przypadkach, kiedy w jednym miejscu ma być wzmocnionych wiele słupów, wiele czynności się często powtarza, to wówczas wprowadza się automatyzację i „mokry” system owijania matami może być bardziej pożądanym.

3.2. Kleje

Kleje mają na celu połączenie elementu wzmacniającego z konstrukcją wzmacnianą. Muszą, przez przenoszenie naprężeń ścinających i rozciągających, zapewnić częściom składowym wzmocnionej konstrukcji współpracę w przenoszeniu obciążeń. Najbardziej typowym klejem, stosowanym od wielu lat do wzmacniania konstrukcji mostowych, jest zaprawa klejowa, wykonana na bazie żywicy epoksydowej, powstała w wyniku mieszania żywicy (polimer) z utwardzaczem. Zależnie od warunków stosowania, klej może zawierać wypełniacze i dodatki powodujące przyspieszenie lub opóźnienie początków procesu wiązania, modelujące konsystencję i modyfikujące właściwości mechaniczne i fizyczne.

Z użyciem klejów związane są dwa różne pojęcia czasowe. Pierwsze nazywane czasem użytkowym kleju (w literaturze anglojęzycznej; pot life) i drugie nazywane czasem otwartym (ang.: open time). Czas użytkowy oznacza okres, w którym można pracować z klejem po wymieszaniu żywicy i utwardzacza przed tym, zanim zaczyna twardnieć w naczyniu służącym do mieszania; dla klejów epoksydowych może zawierać się między kilku sekundami do kilku lat. Otwarty czas to okres, w którym klej osiąga ostateczne właściwości adhezyjne i kohezyjne.

Typowe własności klejów epoksydowych, stosowanych do wzmacniania mostów, w porównaniu do typowych dla budownictwa mostowego jakości betonu i stali przedstawia tabela 3.1.

Tabela 3.1.

Wybrane właściwości klejów epoksydowych, betonów i stali stosowanych w budownictwie mostowym

Własność (w 20 °C)	Klej epoksydowy	Beton	Stal
Gęstość (kg/m ³)	1100 - 1700	2350	7800
Moduł sprężystości Younga (GPa)	0,5 - 20	20 - 50	205
Moduł sprężystości Kirchhoffa (GPa)	0,2 - 8	8 - 21	80
Współczynnik Poissona	0,3 - 0,4	0,2	0,3
Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	9 - 65	1 - 4	200 - 600
Wytrzymałość na ścinanie (MPa)	10 - 30	2 - 5	200 - 600
Wytrzymałość na ściskanie (MPa)	55 - 110	25 - 150	200 - 600
Odkształcenia rozciągające przy zerwaniu (%)	0,5 - 5	0,015	25
Przybliżona praca łamania (Jm ⁻²)	200 - 1000	100	10 ⁵ - 10 ⁶
Współczynnik rozszerzalności cieplnej (10 ⁶ /°C)	25 - 100	11 - 13	10 - 15
Nasiąkliwość wody: 7dni - 25°C (% w/w)	0,1 - 3	5	0

Kleje epoksydowe są bardzo korzystne dla wzmocnienia konstrukcji mostowych z wielu względów, a w szczególności z uwagi na następujące cechy:

- wysokie właściwości wytrzymałościowe,
- niski skurcz (zwłaszcza w porównaniu z poliestrowymi, akrylowymi i winylowymi),
- niską miarę pęcznienia,
- możliwość uzyskiwania odmian tiksotropowych (dla stosowania np. do powierzchni pionowych),
- zdolność do wyrównywania nieregularnych powierzchni klejonych.

3.3. Matryce

Matrycą dla powstania kompozytu, tj. dla konstrukcyjnego połączenia włókien w jeden element najczęściej bywają żywice epoksydowe, utwardzane aminami lub anhydrydami. Funkcją matrycy jest ochrona włókien przeciw uszkodzeniom mechanicznym (otarcie) lub środowiskowej korozji, związanie włókien razem i rozkład równomierny obciążenia na wszystkie włókna. Matryca ma bardzo istotny wpływ na poszczególne własności mechaniczne, takie jak: moduł sprężystości, wytrzymałość na rozciąganie, ścinanie i ściskanie.

3.4. Włókna

Włókna są bardzo efektywnymi i przydatnymi materiałami dla zbrojenia matryc. Materiały kompozytowe zawdzięczają swoją wytrzymałość i sztywność przede wszystkim zawartości włókien i ich rodzajowi.

Włókna mają średnice w granicach 5-20 μm . Kompozyty taśmowe zbrojone są zazwyczaj jednokierunkowo (wzdłużnie), rzadziej dwukierunkowo (o kierunkach wzdłuż taśmy i prostopadle). Wszystkie rodzaje włókien charakteryzują się wysokimi wartościami odkształceń sprężystych, jednak bez zakresu plastycznego.

Dla wzmocnienia konstrukcji inżynierskich używane są głównie trzy rodzaje włókien, mianowicie włókna szklane, aramidowe i węglowe. W zależności od rodzajów włókien własności fizyczne i mechaniczne są różne.

Włókna szklane w formie włókien ciągłych do zbrojenia kompozytów są sklasyfikowane do trzech typów: „E”, „S” różniące się modułami Younga i alkalio-odporne „AR”.

Struktura włókien aramidowych jest anizotropowa, mają one wyższą wytrzymałość na rozciąganie i większą sztywność w kierunku podłużnym niż włókna szklane. Średnica włókna aramidowego w przybliżeniu wynosi 12 μm . Włókna aramidowe podczas rozciągania zachowują się sprężysto aż do momentu zniszczenia, natomiast przy ścisaniu charakter ich pracy jest nieliniowy. Odznaczają się dobrą twardością, małą wrażliwością na uszkodzenia i zmęczenie.

Surowcem dla produkcji włókien węglowych są materiały bazujące na smołach pochodnych ropy naftowej lub polyacrylonitrilu (PAN). Średnice typowych włókien produkowanych na bazie materiałów smołowych mieszczą się w granicach 9-18 μm , zaś produkowanych na bazie PAN 5-8 μm . Struktura włókien węglowych zależy od orientacji kryształów; wyższy stopień „uwęglenia”, to większa sztywność (będąca wynikiem wzrastania kryształów). Włókna pochodzące z przeróbki smołowej mają ogólne zastosowanie i charakteryzują się wysokim stosunkiem wytrzymałości do sprężystości, natomiast pochodzące z materiałów na bazie PAN charakteryzują się wysoką wytrzymałością i wysoką sprężystością.

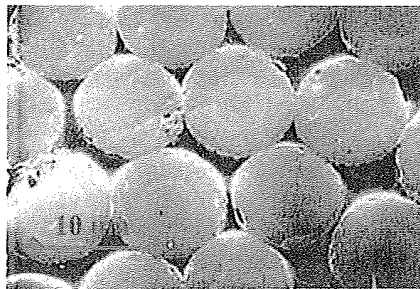
W tabeli 3.2 przedstawiono typowe właściwości różnych typów włókien. W tabelicy tej przedstawiono wartości wynikające ze statycznego działania sił na włókna, na które nie mają wpływu warunki zewnętrzne, np. wiatr, temperatura, ciśnienie itp. Projektowe wartości dla różnych FRP muszą uwzględniać wiele aspektów, a przede wszystkim rodzaj matrycy, redukcję dla obciążeń długotrwałych, warunki środowiskowe itd. Te wartości podaje i gwarantuje producent kompozytów.

Tabela 3.2.

Właściwości różnych włókien dla FRP						
Materiał		Moduł sprężystości [GPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Odkształcenia gr przy rozciąganiu [%]	Gęstość [g/cm ³]	Współcz. rozsz. term. [10 ⁻⁶ /°K]
Włókna C	Wysokiej wytrzymałości	215-235	3500-4800	1,4-2,0	1,7-1,9	Osiowo 0,1÷1,3 radialnie 18
	Ultra wysokiej wytrzymałości	215-235	3500-6000	1,5-2,3		
	Wysoko modułowe	350-500	2500-3100	0,5-0,9		
	Ultra wysoko modułowe	500-700	2100-2400	0,2-0,4		
Włókna G	„E” „AR”	70	1900-3000	3,0-4,5	2,6	5-6
	„S”	85-90	3500-4800	4,5-5,5		
Włókna A	Nisko modułowe	70-80	3500-4100	4,3-5,0	1,4	-3,5
	Wysoko modułowe	115-130	3500-4000	2,5-3,5		

3.5. Materiały kompozytowe

Materiały kompozytowe w skrócie nazywane FRP składają się z dużej liczby małych, ciągłych, ukierunkowanych, niemetalowych włókien o wysokich właściwościach wytrzymałościowych, zawartych w matrycy żywicznej (rys. 3.1). W zależności od typu włókien nazywane są: AFRP (bazujące na włóknach aramidowych), CFRP (z włóknami węglowymi) lub GFRP (z włóknami szklanymi). Najczęściej zawartość włókien w FRP zawiera się w granicach 50-75% dla taśm i 25-35% dla arkuszy.



Rys. 3.1. Przekrój poprzeczny taśmy

Podstawowe mechaniczne właściwości materiałów FRP mogą być szacowane na podstawie znanych właściwości składowych materiałów (włókna, matryca) i ich zawartości, wykorzystując proste wzory:

$$E_f = E_{fib}V_{fib} + E_mV_m \quad (3.1)$$

$$f_t \approx f_{fib}V_{fib} + f_mV_m \quad (3.2)$$

gdzie:

- E_f = moduł Young'a FRP w kierunku ułożenia włókien,
- E_{fib} = moduł Young'a włókien,
- E_m = moduł Young'a matrycy,
- V_{fib} = ułamek zawartość włókien w kompozycie,
- V_m = ułamek zawartość matrycy w kompozycie,
- f_t = wytrzymałość na rozciąganie FRP w kierunku ułożenia włókien,
- f_{fib} = wytrzymałość na rozciąganie włókien,
- f_m = wytrzymałość na rozciąganie matrycy.

Oczywistym jest, że musi być spełniony warunek:

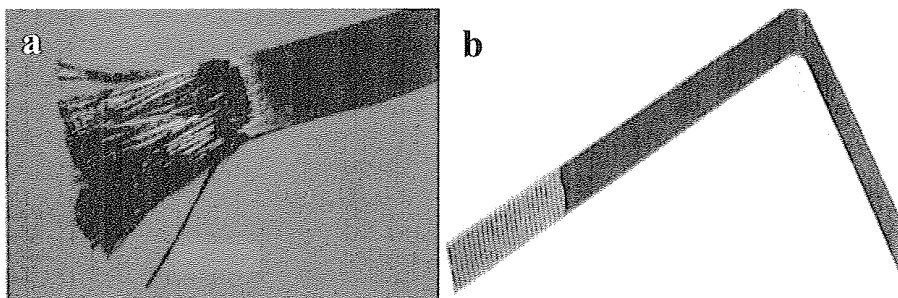
$$V_{\text{fib}} + V_{\text{m}} = 1$$

Jednak powinno być regułą, aby właściwości mechaniczne kompozytów były określane na podstawie badań, które uwzględniają nie tylko procentową zawartość włókien w matrycy, ale również aspekty mikro-strukturalne, a przede wszystkim budowę i średnicę włókien, ich ułożenie, właściwości międzypowierzchniowe itp. Dane te zawarte są w odpowiednich aprobatkach technicznych lub kartach technicznych materiału.

Dla typowych kompozytów FRP, produkowanych w formie prefabrykowanych taśm, podaje się własności mechaniczne, które mogą być używane w obliczeniach w oparciu o całkowity przekrój poprzeczny. Czasami kompozyt jest wykonywany in situ, np. poprzez przyklejanie mat. Wówczas w powstałym w warunkach niestabilnych przekroju poprzecznym stosunek włókno/matryca nie jest wartością stałą i pewną. W tych przypadkach, aby nie zaniżyć projektowych zapasów bezpieczeństwa, w obliczeniach należy brać pod uwagę jedynie przekrój włókien i odpowiednie dla włókien właściwości mechaniczne.

Z powodu faktu, że sztywność i wytrzymałość włókien (E_{fib} i f_{fib}) są dużo większe niż sztywność i wytrzymałość matrycy (E_{m} i f_{m}), własności kompozytu FRP (E_{f} i f_{f}) są przede wszystkim uzależnione od właściwości włókien i ich przekroju poprzecznego.

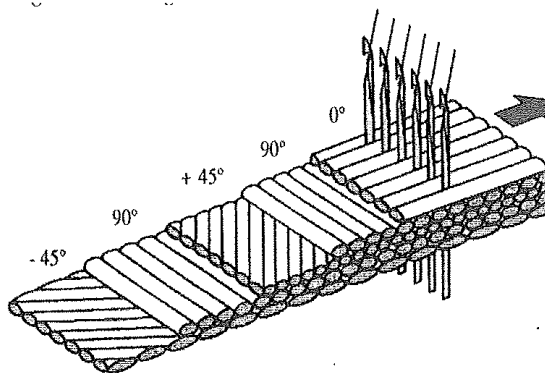
Najbardziej przydatnymi formami kompozytów do wzmacniania konstrukcji mostowych są taśmy, tzw. L-kształtki (rys. 3.2), arkusze i łupiny (rys. 3.3) oraz maty.



Rys. 3.2. a) Taśmy oraz b) L-kształtki

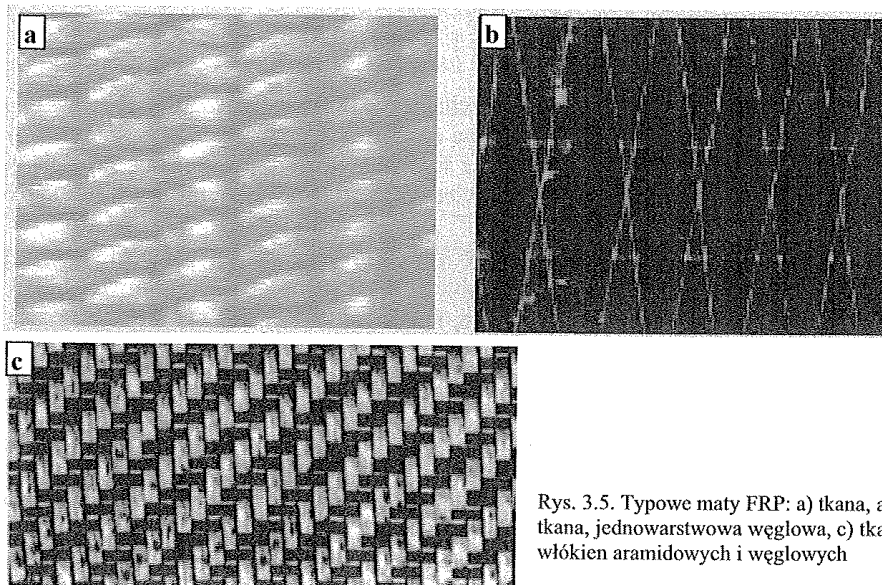


Rys. 3.3. Łupiny FRP



Rys. 3.4. Wielowarstwowa, wielokierunkowa, nie tkana mata

Maty mogą być jedno i wiele warstwowe, jedno i wiele kierunkowe, tkane i nie tkane, składające się z jednego lub kilku rodzajów włókien. Na rys. 3.4 pokazano możliwości układania włókien w matach wielowarstwowych, zaś na rys. 3.5 przykłady typowych mat.



W Polsce najpopularniejsze są taśmy i maty. Ich charakterystyczne właściwości pokazano w tabeli 3.3.

Parametry dostępnych w Polsce taśm i mat kompozytowych

Tabela 3.3.

	Szerokość [mm]	Grubość [mm]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Odkształcenia przy zerwaniu [%]	E [GPa]
Taśmy CFRP	50; 60; 80; 90; 100; 120; 150	1,2; 1,4	2800	1,8	150
			2800	1,7	165
			3200	1,8	200
			2400	1,2	210
			1600	1,8	230
			3900	1,5	280
			1300	0,45	300
			1800	0,45	400
			2800	0,4	640
Maty C	300; 600; 670	0,065±0,3	3800	1,2 ÷ 1,55	240
Maty C			2650	0,4	640
Maty E			3400	4,5	73
Maty AR			3000	4,3	65
Maty A			2900	2,5	120

3.6. Płaskowniki stalowe

Do wzmacniania konstrukcji poprzez zewnętrzne przyklejenie płaskowników stalowych można używać praktycznie wszystkich gatunków stali konstrukcyjnej. Zaleca się jednak, aby stosować płaskowniki raczej cienkie o grubościach od 8 mm do 20 mm. Blachy grubsze, z uwagi na swoją sztywność, wymagają znacznie większych sił docisku i nie tak dokładnie przylegają do klejonej powierzchni betonu jak blachy cienkie.

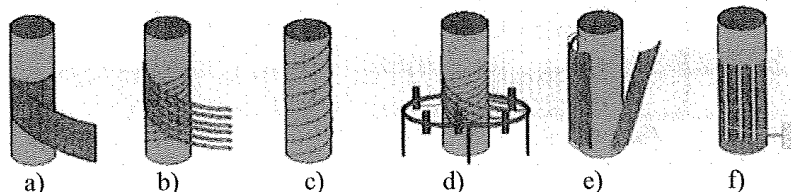
3.7. Kotwy

Płaskowniki stalowe, przyklejane do konstrukcji betonowej, powinny być kotwione we wzmacnianym elemencie na końcach oraz w punktach pośrednich. Do tego służą kotwy stalowe w postaci osadzonych w betonie prętów stalowych z nagwintowanym końcem. Z uwagi na znaczne siły przenoszone przez nie, kotwy powinny być wykonane ze stali o podwyższonej wytrzymałości. Technologia osadzania kotew powinna być przedstawiona w projekcie technicznym. W przypadku gdy beton konstrukcji wzmacnianej jest klasy C 30/37 lub wyższej dopuszcza się stosowanie kotew rozprężnych.

4. Systemy wzmacniania konstrukcji zewnętrznie przyklejonymi materiałami

4.1. Uwagi ogólne

W zależności od użytych rodzajów kompozytów, ich aplikacja dla wzmacniania konstrukcji wymaga stosowania różnych systemów technologicznych. Generalnie można wyodrębnić dwa główne systemy. Jeden jest związany z wykorzystaniem arkuszy lub mat, drugi zaś z elementami sztywnymi takimi jak taśmy lub kształtki. Prace związane z przyklejaniem kompozytów należą do robót wykonywanych ręcznie. Jedyne w przypadku owijania słupów tkaninami można zastosować mechanizację prac. Automatyczna technika została rozwinięta w Japonii we wczesnych latach 90-tych i nieco później w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej. Konstruowane są nawet specjalne roboty służące do tego celu. Na rys. 4.1 pokazano różne metody wzmacniania słupów.



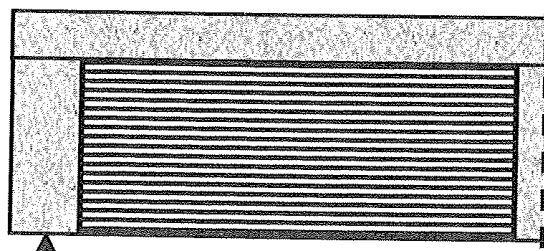
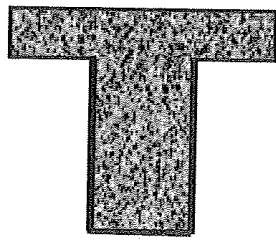
Rys. 4.1. Wzmacnianie słupów z wykorzystaniem FRP; a) owijanie „bandażowanie” matami, b) uzwojenie włóknami, c) wykorzystanie taśm, d) automatyczne uzwojenie, e) naklejanie lupin, f) wgłębne wkładanie taśm

System wzmacniania oparty na przyklejaniu materiałów kompozytowych FRP należy do wydajnych i prostych technik, lecz wymaga ścisłego przestrzegania reżymu technologicznego i staranności. W celu lepszej wydajności, producenci rozwijają specjalne, pomocnicze techniki, zazwyczaj chronione patentami. Przykładem mogą tu być systemy grzewcze skleiny w celu przyspieszenia uzyskiwania pełnych wartości wytrzymałościowych zaprawy klejowej lub techniki sprężania taśm.

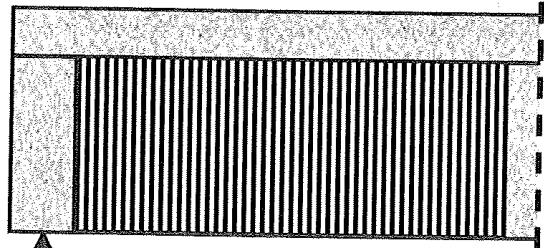
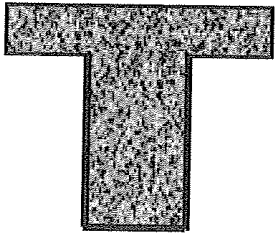
4.2. Aplikacja mat i arkuszy

W tkaninach, tzn. arkuszach lub matach z reguły układ włókien jest jednokierunkowy i włókna częściowo lub w pełni pokrywają płaszczyznę elementu konstrukcyjnego. Aplikacja na powierzchni betonowej zwykle wymaga nasycenia betonu powłoką gruntującą (primerem) i potem stosowania kleju. Mogą być stosowane dwie różne techniki: czysta, sucha tkanina może być nakładana bezpośrednio na klej, który był równomiernie rozprowadzony na powierzchni betonu, lub tkanina może być nasączana klejem w saturatorze maszynowym i w stanie mokrym dociskana do powierzchni wzmacnianej.

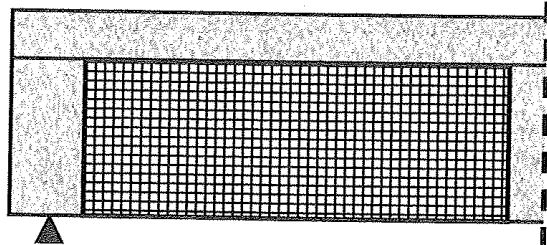
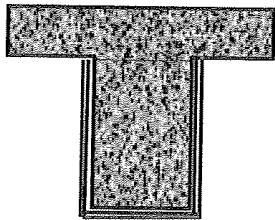
W przypadku tkanin wielokierunkowych, gdzie włókna ułożone są przynajmniej w dwóch kierunkach, zaleca się stosować nasączanie klejem przed ułożeniem na powierzchni betonowej. Po naklejeniu, każdą tkaninę można powlekać jeszcze dodatkowo klejem, czasami posypując piaskiem kwarcowym, tworząc dość gruby laminat na powierzchni wzmacnianego elementu. Na rys. 4.2 pokazano najczęściej stosowne możliwości klejenia mat do środków belek i do pobocznic słupów.



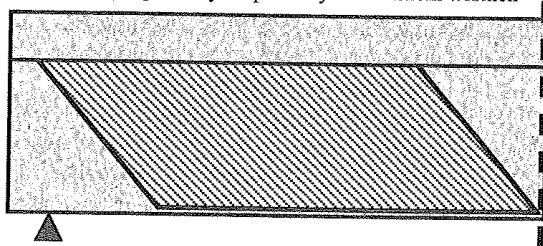
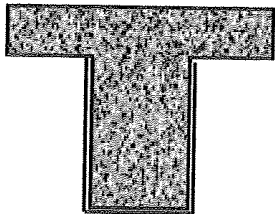
Rys. 4.2.a) Maty z poziomym ułożeniem włókien



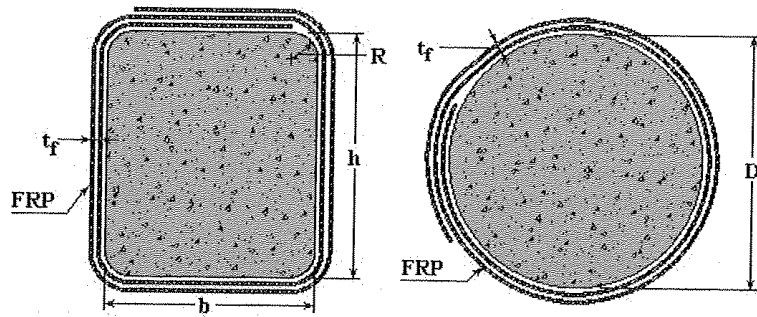
Rys. 4.2.b) Maty z pionowym ułożeniem włókien



Rys. 4.2.c) Maty z poziomym i pionowym ułożeniem włókien



Rys. 4.2.d) Maty z ukośnym ułożeniem włókien

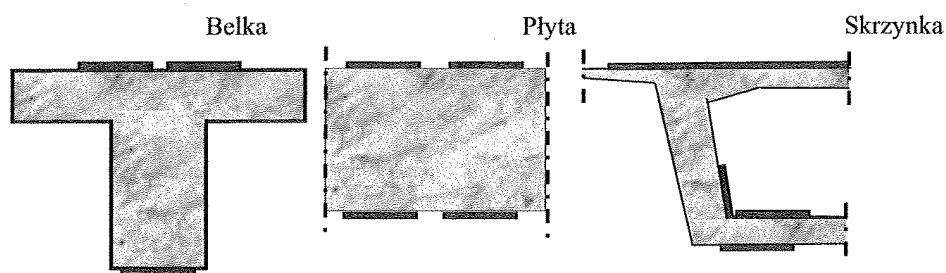


Rys. 4.2.e) Możliwości wzmocnienia słupów za pomocą mat

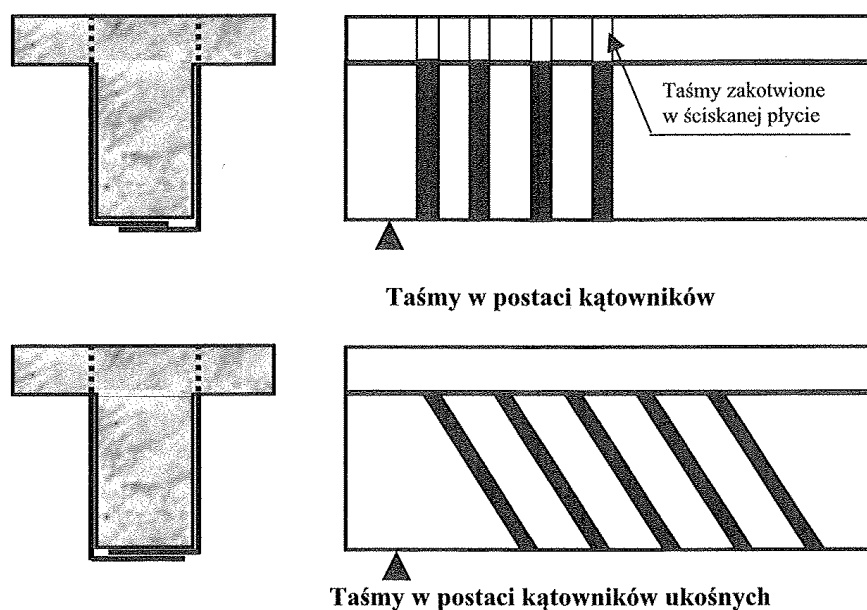
4.3. Elementy prefabrykowane

Prefabrykaty kompozytowe, produkowane w formie prostych taśm, powłok lub łupin oraz kątowników są instalowane „na sucho”, bezpośrednio na powierzchniach betonowych przy użyciu kleju. Długie, proste taśmy transportowane są w formie zwiniętej, co pozwala na dostarczenie ich w ograniczonych, zamkniętych przestrzeniach (np. wewnątrz przekrojów skrzynkowych). Na rys. 4.3 przedstawiono przykładowe możliwości wzmocniania elementów zginanych, natomiast na rys. 4.4 możliwości wzmocniania na ścinanie przez przyklejone elementy prefabrykowane z kompozytów.

FRP mogą być aplikowane w betonowych wycięciach i wówczas stanowią szczególny przypadek EBR - metody uzupełniania zbrojenia konstrukcji betonowych. Rozcięcia są wykonywane w betonowej konstrukcji do głębokości mniejszej niż betonowa otulina stali zbrojeniowej.



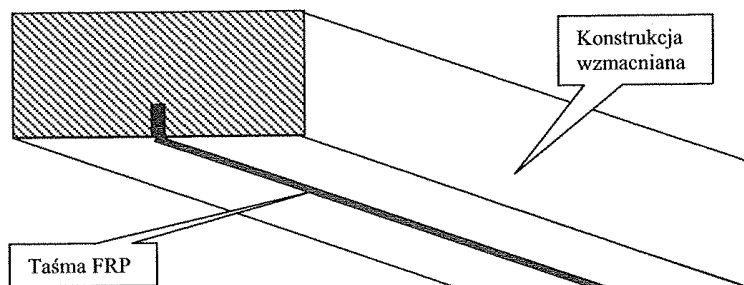
Rys. 4.3. Możliwe miejsca doklejenia taśm FRP w różnych konstrukcjach betonowych



Rys. 4.4. Wzmocnienie na ścinanie za pomocą kształtek prefabrykowanych

Technologia ta, pokazana na rys. 4.5, jest szczególnie przydatna w przypadku elementów czasowo ściskanych i tam, gdzie chcemy ochronić kompozyt przed zniszczeniem mechanicznym podczas eksploatacji konstrukcji wzmocnionej. Tak zastosowany materiał CFRP może być bardziej skuteczny niż klejony na zewnątrz powierzchni wzmocnianej konstrukcji betonowej.

Taśmy przyklejane pełnią rolę dodatkowego zbrojenia konstrukcji betonowej. Wyjąwszy niewłaściwe przygotowanie i wykonanie połączeń, zniszczenie połączenia „beton - klej - kompozyt” na ogół dokonuje się w betonie. Każde połączenie jest ogniwem łańcucha o różnej nośności i niezawodności.



Rys. 4.5. Taśma FRP wklejana wewnątrz wzmocnianej konstrukcji betonowej

W połączeniach kompozytu z betonem za pomocą kleju najsłabszym ogniwem bywa zazwyczaj beton. Ponieważ nie można przekraczać równocześnie wartości granicznych odkształceń istniejących stalowych wkładek zbrojeniowych, w doklejonych taśmach praktycznie nie osiągamy odkształceń powyżej wartości 0,4%. Uzyskiwany efekt jest z tego powodu niepełny. Tymczasem taśmy kompozytowe charakteryzują się bardzo dużym zakresem liniowych odkształceń sprężystych, przekraczających wartości 1,5%. Dopuszczalne wydłużenie przyklejonego elementu kompozytowego jest parametrem decydującym o sposobie jego wykorzystania oraz o opłacalności stosowania tego typu wzmocnienia. Stąd starania, by zastosować taśmy w postaci sprężonej, które dodatkowo powodują zamknięcie rys lub zmniejszenie ich szerokości podczas pracy konstrukcji.

4.4. Możliwości wzmocnienia konstrukcji kompozytami wstępnie sprężonymi

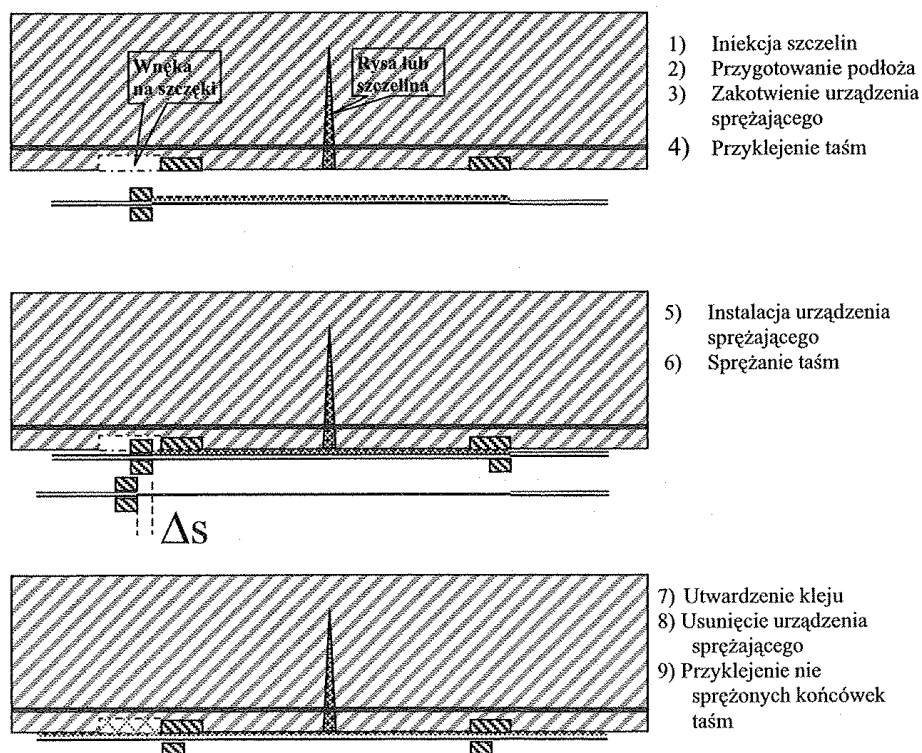
4.4.1. Wzmocnianie ustrojów nośnych sprężonymi taśmami CFRP

Biorąc pod uwagę właściwości fizyczne różnych rodzajów włókien oraz analizując pracę konstrukcji betonowych, do wzmocnienia tychże najbardziej przydatne są taśmy kompozytowe z włóknami węglowymi.

Wstępne naprężenie taśm kompozytowych daje następujące korzyści:

- zmniejsza ugięcia poprzez swoiste „podniesienie wykonawcze”, spowodowane wstępnym sprężeniem konstrukcji betonowej;
- zamyka rysy w konstrukcjach zarysowanych;
- poprawia użyteczność i trwałość z powodu zmniejszenia zarysowań;
- podnosi nośność na ścinanie, ponieważ cały przekrój betonowy przenosi siły ścinające z uwagi na to, że beton jest nie zarysowany (istniejące rysy są zamykane przez sprężenie);
- mniejsze zużycie doklejanego materiału kompozytowego przy takim samym stopniu wzmocnienia jak taśmami nienaprzężonymi;
- z odpowiednim zakotwieniem sprężenie może powodować wzrost ostatecznej nośności na zginanie również przez uniknięcie działania sił rozwarstwiających na końcach taśm i konsekwentnie usunięcie przyczyn powodujących delaminację;
- w przypadku wzmocnienia taśmami sprężonymi oś obojętna zostaje na niższym poziomie niż w przekrojach z taśmami nienaprzężonymi, co powoduje podniesienie skuteczności wzmocnienia;
- sprężenie taśm znacząco wpływa, poprzez wstępne odciążenie, na zwiększenie zakresu obciążeń przenoszonych przez stal zbrojeniową.

Istota technologii wzmocnienia konstrukcji betonowej z zastosowaniem sprężonej taśmy kompozytowej pokazana jest na rys. 4.6.



Rys. 4.6. Schemat wzmocnienia konstrukcji sprężonymi taśmami

Roboty należy w typowym przypadku przeprowadzać w następującej kolejności:

1. Iniekcja szczelin,
2. Przygotowanie podłoża – dokładnie jak w przypadku klasycznym wzmocnienia taśmami kompozytowymi, a więc naprawa, reprofilacja itp.,
3. Montaż urządzenia kotwiącego w konstrukcji wzmocnianej,
4. Montaż taśm ,
5. Instalacja urządzenia sprężającego,
6. Sprężenie taśm,
7. Utwardzenie kleju,
8. Usunięcie urządzenia sprężającego,
9. Doklejenie nie sprężonych końcówek taśm .

4.4.2. Wzmocnianie słupów sprężonymi elementami FRP

Istnieją możliwości zwiększenia efektywności wzmocnienia konstrukcji słupowych materiałami FRP z zastosowaniem wstępnego sprężenia kompozytów. Najbardziej odpowiednimi materiałami do wzmocnienia słupów z ich wstępnym sprężeniem są kompozyty aramidowe lub szklane. Wynika to z odpowiedniego doboru modułu sprężystości włókien, pozwalający przy zadanym naprężeniu na otrzymywanie mniejszych odkształceń.

System wstępnego naciągu kompozytu FRP wymaga zawsze stosowania zakotwień na obu jego końcach. Jest to bardzo trudne w przypadku łamliwych, bardzo kruchych włókien węglowych i szklanych, natomiast nieco łatwiejsze, gdy mamy do czynienia z wytrzymałymi, ciągliwymi włóknami aramidowymi. Różnica między naciąganiem taśm CFRP (w postaci włókien węglowych, zatopionych w łączącej je matrycy), a naciąganiem suchych taśm aramidowych, polega również na tym, że siła naciągu przenoszona jest na włókna węglowe z wyrównującym pośrednictwem matrycy, co nie ma miejsca w przypadku pasków utworzonych z równoległych włókien aramidowych.

5. ANALIZA I OBLICZANIE WZMOCNIENI

5.1. Zginanie

5.1.1. Uwagi ogólne

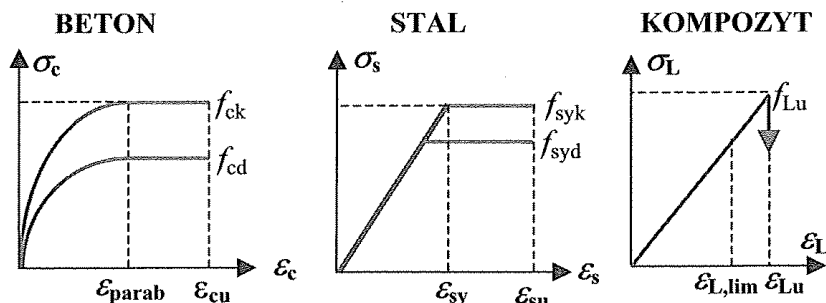
W budownictwie mostowym za pomocą taśm kompozytowych FRP przyklejanych do stref rozciąganych mogą być wzmacniane zginane elementy konstrukcyjne takie jak belki, płyty, słupy itp. Kierunek włókien musi być równoległy do naprężeń rozciągających. Metoda obliczeń odnosi się do stanu granicznego nośności oraz stanu granicznego użytkowości.

Przy projektowaniu wzmocnienia elementu zginanego zakłada się w stanie granicznym nośności pełną współpracę istniejącego zbrojenia z przyklejonym kompozytem. Dla określenia odkształceń panujących w zbrojeniu istniejącym w fazie przyklejania kompozytów można przyjąć, że przekrój żelbetowy (nie wzmocniony) pracuje w stanie granicznym zarysowania. W ten sposób określa się punkt czasowy, w którym zaczyna się współpraca zbrojenia istniejącego z przyklejanym. Dla tych konstrukcji, w których nie dopuszcza się zarysowania, np. dla ustrojów sprężonych, należy przyjmować rzeczywisty stan konstrukcji w momencie wzmocniania.

W każdym przypadku konieczne jest znalezienie odkształcenia początkowego ε_o , które istnieje w czasie, gdy do współpracy zostaje włączone wzmocnienie w postaci doklejonego elementu. Odkształcenie to jest wywołane działaniem momentu (początkowego) zginającego M_o , działającego na przekrój poprzeczny w fazie wzmocniania (np. wywołanego ciężarem własnym konstrukcji, częścią obciążeń stałych, itp.). Oblicza się je z równowagi sił wewnętrznych w przekroju.

5.1.2. Parametry materiałowe

Do analizy obliczeniowej przyjmuje się odkształcenia wynikające z założeń podanych na rys. 5.1.



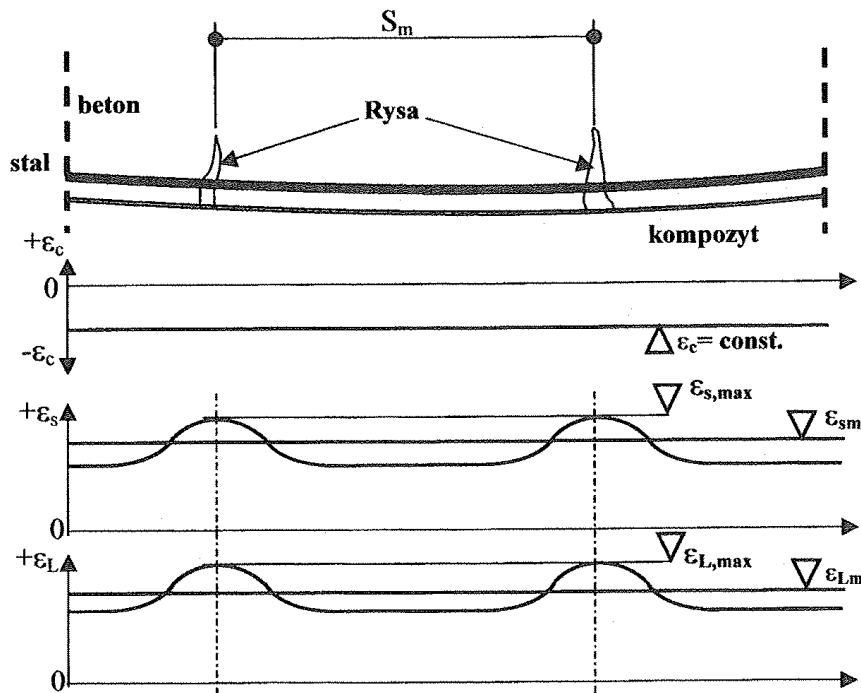
Rys. 5.1. Zależności σ - ε dla betonu, stali zbrojeniowej i kompozytu

Dane określone na rys. 5.1 oraz potrzebne do analizy oznaczają:

- f_{ck} – charakterystyczna wytrzymałość (klasa) betonu,
- f_{cd} – obliczeniowa wytrzymałość betonu,
- f_{ctm} – powierzchniowa wytrzymałość betonu na rozciąganie,
- ε_{parab} – odkształcenia w betonie na końcu zakresu krzywoliniowego (parabolicznego), $\varepsilon_{parab} = 0.2\%$,
- ε_{cu} – odkształcenia graniczne w betonie, $\varepsilon_{cu} = 0.35\%$,
- f_{syk} – charakterystyczna granica plastyczności stali,
- f_{syd} – obliczeniowa granica plastyczności stali,
- ε_{sy} – odkształcenia w stali zbrojeniowej odpowiadające umownej granicy plastyczności, $\varepsilon_{sy} = 0.2\%$,
- ε_{su} – odkształcenia graniczne w stali zbrojeniowej,
- ε_g – odkształcenie graniczne stali przyjęte w projekcie wzmocnienia,
- k_s – współczynnik korelacji odkształceń dla stali wg rys.5.2

dla $\sigma_{s,max} \geq f_{sy} \Rightarrow k_s = \varepsilon_{sm} / \varepsilon_{s,max} \approx 0.9 \div 1.0$, dla $\sigma_{s,max} < f_{sy} \Rightarrow k_s \approx 0.8 \div 0.9$,
 f_{Lu} - wytrzymałość kompozytu (naprężenie odpowiadające ε_{Lu}),
 ε_{Lim} - odkształcenia graniczne w kompozycie (w zależności od rodzaju i materiału kompozytu),
 ε_{Lu} - odkształcenie niszczące kompozyt,
 k_L - współczynnik korelacji odkształceń dla kompozytu wg rys.6.2 $k_L = \varepsilon_{Lm} / \varepsilon_{L,max} \approx 0.65 \div 0.8$ dla
 $\sigma_{L,max} = f_{Lu}$.

Zarysowanie betonu powoduje występowanie różnicy odkształceń w prętach zbrojeniowych (rozciąganych) oraz w doklejonym elemencie. W miejscu występowania rysy następuje zerwanie współpracy zbrojenia stalowego i doklejonego elementu z betonem. W tych przekrojach dochodzi do koncentracji naprężeń w stali i w kompozycie. Ponieważ w obliczeniach przyjmowane są odkształcenia na jednym poziomie z pominięciem koncentracji, konieczny jest pewien współczynnik „wygładzający” rozkład odkształceń (a więc i naprężeń) na długości konstrukcji. Współczynnik ten nazwano współczynnikiem „korelacji odkształceń”, a jego istotę pokazano na rys. 5.2.



Rys. 5.2. Odkształcenia w belce zarysowanej – współczynnik korelacji $k = \varepsilon_m / \varepsilon_{max}$

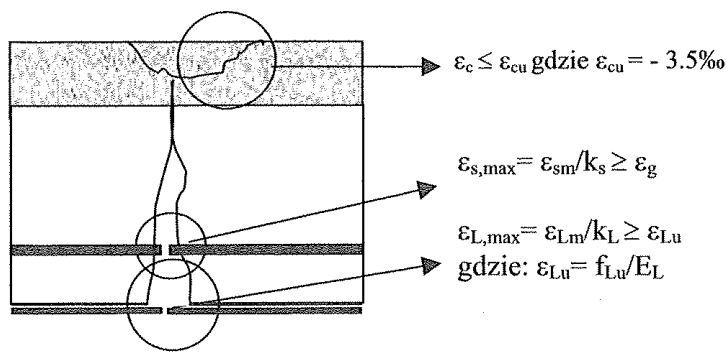
Dla przypadku, w którym taśma kompozytowa skutecznie spręża konstrukcję wzmocnianą, zamykając w niej zarysowania, k_L – współczynnik korelacji odkształceń dla kompozytu zmierza do jedności.

5.1.3. Modele zniszczenia

Przy analizie odkształceń rozpatruje się różne możliwe rodzaje zniszczenia wzmocnionej konstrukcji zginanej. Na rys. 5.3 przedstawiono różne modele zniszczenia konstrukcji, w których zakładano możliwość:

- zerwania kompozytu podczas uplastycznienia stali i przed zniszczeniem betonu,
- zerwania kompozytu przed uplastycznieniem stali i przed zniszczeniem betonu,
- zerwania kompozytu po uplastycznieniu stali i przed zniszczeniem betonu,
- zniszczenia betonu podczas uplastycznienia stali i przed zerwaniem kompozytu,
- zniszczenia betonu przed uplastycznieniem stali i przed zerwaniem kompozytu,

- zniszczenia betonu po zerwaniu stali i przed zerwaniem kompozytu.
- zerwania kompozytu i stali oraz zarysowanie betonu.



Rys. 5.3. Modele zniszczenia konstrukcji

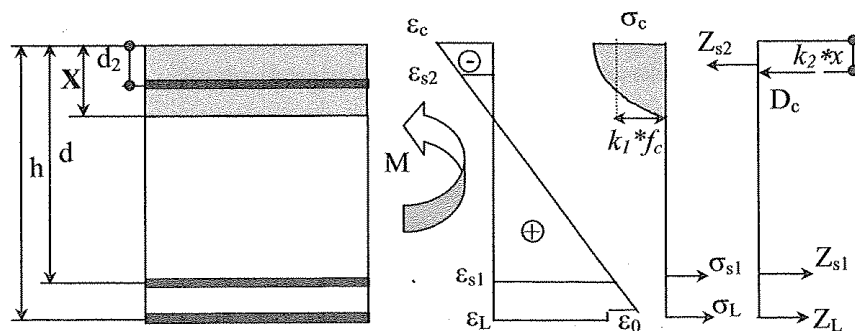
Projektując wzmocnienie, należy starać się doprowadzić do zniszczenia w postaci zerwania kompozytu podczas płynięcia stali i przed zniszczeniem betonu. Jest to optymalny model zniszczenia konstrukcji, możliwy do osiągnięcia tylko w przypadku taśmy sprężonej. Spowodowane jest to faktem, że stal istniejąca i beton przed wzmocnieniem mają niewielkie już (bądź żadne) rezerwy odkształceń sprężystych, natomiast sprężenie taśmy kompozytowej rezerwy te zwiększa przy pozostawieniu niezbędnych zapasów bezpieczeństwa dla kompozytu.

Najczęściej obliczenia oparte są na założeniu, że może nastąpić jeden z dwóch dopuszczalnych rodzajów zniszczenia:

- zniszczenie betonu w strefie ściskanej przekroju,
- uplastycznienie stali, gdy wzmocnienie kompozytowe osiągnie odkształcenie graniczne ϵ_{Lu} (jest to najprostszy sposób, pozwalający określić tę formę zniszczenia we wzmocnionym przekroju zginanym).

5.1.4. Stan graniczny nośności

Związki między odkształceniami i siłami pokazano na rysunku 5.4. W celu uproszczenia obliczeń, można zastąpić krzywoliniowy rozkład naprężeń w strefie ściskanej betonu rozkładem prostokątnym o szerokości $k_1 f_c$, z położeniem środka ciężkości w odległości $k_2 x$ (licząc od skrajnych włókien ściskanych betonu). Ogólnie można przyjąć, że $k_1 = 0.8$ zaś $k_2 = 0.4$.



Rys. 5.4. Rozkład odkształceń i sił wewnętrznych

Jednakże, zakładając uplastycznienie stali i zniszczenie taśmy FRP, należy liczyć się z możliwością przedwczesnego wystąpienia zjawiska utraty przyczepności taśmy do betonu, co uniemożliwi zaistnienie tak opisanego modelu zniszczenia. Dlatego wprowadza się ograniczenie strefy ściskanej betonu. Wówczas można określić zależności:

$$\varepsilon_L = k_L \varepsilon_{Lu} = \frac{k_L f_{Lu}}{E_L}, \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_{sy} \leq \varepsilon_{s,\max} = \frac{\varepsilon_s}{k_s} \langle \varepsilon_g, \quad (5.2)$$

$$\varepsilon_c \geq \varepsilon_c, \quad (5.3)$$

natomiast współczynniki k_1 i k_2 zostają uzależnione od maksymalnego odkształcenia betonu ściskanego ε_c . W zakresie $-0,2\% \geq \varepsilon_c \geq -0,35\%$ współczynniki te wynoszą:

$$k_1 = 1 + \frac{1}{1500\varepsilon_c}, \quad (5.4)$$

$$k_2 = 1 - \frac{0.5 - (3 * 10^6 \varepsilon_c^2)^{-1}}{1 + (1500\varepsilon_c)^{-1}} \quad (5.5)$$

i

$$\sigma_c = f_c. \quad (5.6)$$

lub:

$$k_1 = 1 + \frac{1}{1500\varepsilon_c}, \quad (5.7)$$

$$k_2 = \frac{1000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c + 4) + 2}{2000\varepsilon_c(3000\varepsilon_c + 2)}. \quad (5.8)$$

W zakresie $\varepsilon_c \geq -0,2\%$ współczynniki te wynoszą:

$$k_1 = -\frac{1000}{6}(500\varepsilon_c^2 + 3\varepsilon_c), \quad (5.9)$$

$$k_2 = 1 - \frac{750\varepsilon_c + 4}{2(500\varepsilon_c + 3)} \quad (5.10) \quad i$$

$$\sigma_c = -1000\varepsilon_c(250\varepsilon_c + 1)f_c. \quad (5.11)$$

lub:

$$k_1 = -1000\varepsilon_c \left(0.5 + \frac{1000}{12} \varepsilon_c \right), \quad (5.12)$$

$$k_2 = \frac{8 + 1000\varepsilon_c}{4(6 + 1000\varepsilon_c)}. \quad (5.13)$$

Dla obliczeń szacunkowych dopuszcza się uproszczenie, przyjmując $k_1 = 0.67$, $k_2 = 0.45$ i zasięg strefy ściskanej równy $0.9x$.

Z równowagi sił i odkształceń w przekroju uzyskujemy:

$$Z_{S1} + Z_L - Z_{S2} - D_c = 0, \quad (5.14)$$

$$f_{sy}A_{s1} + f_{Lu}A_L - f_{sy}A_{s2} - k_1 b x f_c = 0, \quad (5.15)$$

Siła przenoszona przez beton ściskany:

$$D_c = k_1 b x f_c, \quad (5.16)$$

Siła w rozciągającym zbrojeniu stalowym:

$$Z_{s1} = \sigma_{s1} A_{s1} = f_{sy} A_{s1}, \quad (5.17)$$

Siła w ściskającym zbrojeniu stalowym:

$$Z_{s2} = \sigma_{s2} A_{s2} = f_{sy} A_{s2}, \quad (5.18)$$

Siła w doklejonym kompozycie:

$$Z_L = \sigma_L A_L = f_{LU} A_L. \quad (5.19)$$

oraz:

$$\begin{aligned} \varepsilon_c &= -\varepsilon_L \frac{x}{h-x} + \varepsilon_{c0}, \\ \varepsilon_{s1} &= \varepsilon_L \frac{d-x}{h-x} + \varepsilon_{s10}, \\ \varepsilon_{s2} &= \varepsilon_c \frac{x-d_2}{x} + \varepsilon_{s20}. \end{aligned} \quad (5.20)$$

ε_{c0} , ε_{s10} i ε_{s20} – odkształcenia wywołane naprężeniami w betonie i w stali zbrojeniowej lub sprężającej przed wzmocnieniem, z uwzględnieniem efektu siły sprężającej w taśmie kompozytowej.

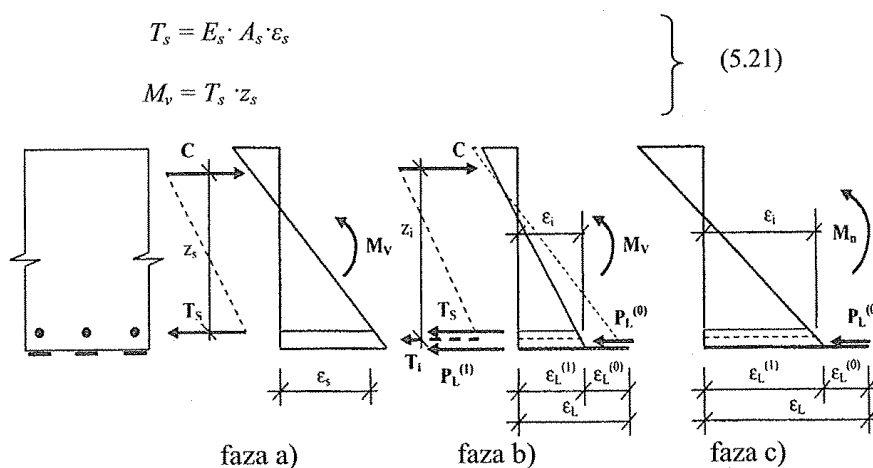
W przypadku wzmocniania konstrukcji z zastosowaniem taśm kompozytowych wstępnie naprężonych konieczne jest analizowanie stanu równowagi z uwzględnieniem trzech podstawowych faz pracy konstrukcji, a mianowicie:

- przed naprężeniem taśm,
- po naprężeniu taśm oraz
- po całkowitym obciążeniu konstrukcji wzmocnionej (po zwiększeniu obciążenia).

Na rys. 5.5 pokazano rozkład odkształceń i sił wewnętrznych w przekroju konstrukcji wzmocnionej wstępnie naprężonymi taśmami kompozytowymi. Podstawowe równania równowagi wyglądają następująco:

- przed naprężeniem

$$\begin{aligned} T_s &= E_s \cdot A_s \cdot \varepsilon_s \\ M_v &= T_s \cdot z_s \end{aligned} \quad (5.21)$$



Rys. 5.5. Wstępne naprężenie taśm – schemat sił i odkształceń

b) po naprężeniu taśm

$$\left. \begin{aligned} P_L &= P_L^{(0)} + P_L^{(1)} \\ P_L &= E_L \cdot A_L \cdot (\varepsilon_L^{(0)} + \varepsilon_L^{(1)}) \\ T_i &= E_s \cdot \left(A_s + \frac{E_L}{E_s} \cdot A_L \right) \cdot \varepsilon_i \\ M_v &= T_i \cdot z_i \end{aligned} \right\} \quad (5.22)$$

c) po obciążeniu

$$M_n > M_v \quad (5.23)$$

gdzie:

- T_s - siła rozciągająca w stali przed sprężeniem taśm,
- z_s - ramię sił wewnętrznych przed sprężeniem taśm,
- ε_s - odkształcenia w stali przed wzmocnieniem, przed sprężeniem taśm,
- $P_L^{(0)}$ - siła sprężająca taśmy,
- $P_L^{(1)}$ - siła w taśmie kompozytowej wywołana obciążeniem,
- P_L - całkowita siła w taśmie,
- $\varepsilon_L^{(0)}$ - początkowe odkształcenie taśmy kompozytowej,
- $\varepsilon_L^{(1)}$ - odkształcenie taśmy kompozytowej od obciążenia,
- ε_L - końcowe odkształcenie taśmy kompozytowej,
- T_i - sumaryczna siła rozciągająca w sprowadzonym „zbrojeniu” po sprężeniu,
- z_i - ramię sił wewnętrznych po sprężeniu taśm.

5.1.5. Stan graniczny użytkowości

5.1.5.1. Ograniczenia naprężeń

Dla granicznego stanu użytkowości analiza przekroju poprzecznego uwzględnia dwa przypadki obciążenia zmiennego: o wartościach wyjątkowych oraz o wartościach prawie stałych.

W przypadku obciążenia zmiennego o wartościach wyjątkowych obliczenia można przeprowadzać jak dla stanu granicznego nośności z następującymi modyfikacjami:

- obliczenia prowadzone są dla wartości charakterystycznych,
- naprężenia muszą spełniać następujące warunki: w stali - $f_{sl} \leq 0.8f_{yk}$ oraz dla betonu - $\sigma_c \leq 0.6f_{ck}$, gdzie naprężenia w betonie zdefiniowane są przez następującą zależność naprężeniowo – odkształceniową (dla $|\varepsilon_c| \leq 0.002$):

$$\sigma_c = \frac{\varepsilon_c \left(2 - \frac{\varepsilon_c}{0.002} \right)}{0.002} f_{ck} \quad (5.24)$$

Dla przypadku obciążenia zmiennego o wartościach prawie stałych obliczenia są przeprowadzone również jak dla stanu granicznego nośności, ale z nieco innymi modyfikacjami, tzn.:

- obliczenia prowadzone są dla wartości charakterystycznych,
- w określeniu ε_c uwzględnione jest pełzanie betonu przez wprowadzenie współczynnika pełzania φ ,
- naprężenia muszą spełniać następujące warunki: w stali - $f_{sl} \leq 0.8f_{yk}$ oraz dla betonu - $\sigma_c \leq 0.45f_{ck}$, przy odkształceniach wynoszących $\varepsilon_c/(1+\varphi)$.

5.1.5.2. Weryfikacja ugięć

Moduł sprężystości kompozytu FRP może być względnie niski, co w konsekwencji daje niską sztywność osiową $E_f A_f$. Ta sztywność jest często niewystarczająca dla ograniczenia krzywizny i

ugięcia wzmocnionej belki pod obciążeniem użytkowym, wobec czego w celu spełnienia warunków stanu granicznego użytkowalności może zachodzić potrzeba doklejenia większego elementu.

Wśród różnych metod obliczania ugięć można stosować analizę nieliniową opierając się na numerycznym całkowaniu krzywizny z uwzględnieniem sztywności przy rozciąganiu zarysowanego przekroju. Można zastosować uproszczoną metodą obliczeń tzw. metodą bilinearną. Według tej metody średnie ugięcia są obliczane z następujących zależności:

$$a = a_1(1 - \zeta_b) + a_2\zeta_b \quad (5.25)$$

gdzie:

a_1 – ugięcie w stanie niezarysowanym,

a_2 – ugięcie w stanie zarysowanym,

ζ_b – współczynnik rozkładu z uwzględnieniem sztywności przy rozciąganiu.

Współczynnik ten określono w zależności od momentu zginającego M_k i momentu rysującego M_{cr} w następujący sposób:

$$\zeta_b = 0 \quad M_k < M_{cr}, \quad (5.26)$$

$$\zeta_b = 1 - \beta_1\beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_k}\right)^{n/2} \quad M_k > M_{cr},$$

przy założeniu, że β_1 jest współczynnikiem określającym właściwości wzmocnienia natomiast β_2 jest współczynnikiem określającym typ obciążenia.

Można przyjąć (gdy nie jest stosowana dokładniejsza metoda) wykładnik potęgi $n = 2$. Dla wysokiej wytrzymałości betonu (powyżej klasy C50/55) dokładniejsze wyniki otrzymywane są z $n = 3$. Choć zjawisko przyczepności FRP różni się od przyczepności stali i betonu, to zachodzi dobra zgodność między doświadczalnymi i analitycznymi wynikami, jeśli β_1 i β_2 są przyjmowane $\beta_1 = 0.5$ dla gładkiej stali i $\beta_1 = 1$ dla stali żebrowanej; $\beta_2 = 0.5$ dla obciążeń długotrwałych i $\beta_2 = 1$ dla obciążeń krótkotrwałych. Ugięcia w stanie niezarysowanym a_1 i w stanie zarysowanym a_2 mogą być określane drogą klasycznej analizy sprężystej, przy przyjęciu sztywności giętych w stanie niezarysowanym $E_c I_1$ i w stanie zarysowanym $E_c I_2$. Przyjmując, że przy aplikacji FRP występuje początkowy moment M_0 , możemy zapisać, że:

$$a_1 = k_M l^2 \frac{M_k}{E_c I_1}, \quad (5.27)$$

$$a_2 = k_M l^2 \left(\frac{M_0}{E_c I_2} + \frac{M_k - M_0}{E_c I_2} \right) \quad (5.28)$$

$$M_k > M_0,$$

gdzie:

k_M – współczynnik uzależniony od typu obciążenia,

I_2 – moment bezwładności w stanie zarysowania przed wzmocnieniem.

5.1.5.3. Weryfikacja szerokości rys

W celu ochrony wewnętrznej stali i gwarancji funkcjonalności elementu, powinny być ograniczane szerokości powstających zarysowań. Dla belek z betonu zbrojonego, wzmocnionych systemem EBR, nowe rysy pojawią się w strefach między istniejącymi rysami. Stąd otrzymujemy gęstsze zarysowanie i mniejsze rozwarłośc rys, co często czyni weryfikację szerokości zarysowań jako niekonieczną.

Przyjmując zarysowanie za proces już ustabilizowany, charakterystyczna wartość szerokości rysy w_k jest obliczana jako:

$$w_k = \beta s_{rm} \varepsilon_{m,r} = \beta s_{rm} \zeta \varepsilon_2, \quad (5.29)$$

gdzie:

β – współczynnik określający zależność między wartościami średnimi i charakterystycznymi szerokości rys (przyjmowany najczęściej $\beta=1.7$),
 s_{rm} – średnie odległości między rysami,
 $\varepsilon_{rm,r}$ – średnie odkształcenia stali zbrojeniowej z uwzględnieniem otaczającego betonu,
 ζ – współczynnik uwzględniający sztywność przy rozciąganiu.
Współczynnik ζ określono w zależności od momentu zginającego M_k i momentu rysującego M_{cr} w następujący sposób:

$$\zeta = 0 \quad M_k < M_{cr}, \quad (5.30)$$

$$\zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_{cr}}{M_k} \right)^{\eta} \quad M_k > M_{cr},$$

ε_2 – odkształcenia w stali zbrojeniowej w stanie pełnego zarysowania.

Zakładając, że $\varepsilon_2 \approx \varepsilon_{s1} \approx \varepsilon_L + \varepsilon_0$ i $N_{rk} = N_{s1} + N_L$, ε_2 można przyjąć w postaci:

$$\varepsilon_2 = \frac{N_{rk} + E_L A_L \varepsilon_0}{E_s A_s + E_L A_L}, \quad (5.31)$$

gdzie:

$$N_{rk} = M_k / z_e,$$

z_e – ramię sił między wypadkową sił rozciągających ($N_{s1} + N_L$) i sił ściskających ($N_c + N_{s2}$).

Średnia odległość między rysami s_{rm} , biorąc pod uwagę skutek wewnętrznego i zewnętrznego zbrojenia, może być obliczana z równania:

$$s_{rm} = \frac{2 f_{ctm} A_{c,eff} E_s A_s}{\tau_{sm} u_s E_s A_s + \xi_b E_L A_L} = \frac{2 f_{ctm} A_{c,eff} \xi_b E_L A_L}{\tau_{fm} E_s A_s + \xi_b E_L A_L}, \quad (5.32)$$

gdzie:

$A_{c,eff}$ – efektywny przekrój betonu przy rozciąganiu, przyjmowany jako mniejsza wartość z:
 $2.5(h-d)b$ lub $(h-x)b/3$,

τ_{sm} – można przyjąć $= 1.8 f_{ctm}$ – średnie naprężenie ścinające w stali,

τ_{fm} – można przyjąć $= 1.25 f_{ctm}$ – średnie naprężenie ścinające w doklejonym FRP,

u_s, u_f – parametry związane z przyczepnością stali i kompozytu, między którymi, dla średniej średnicy d_s zbrojenia i grubości doklejonej taśmy t_L , zachodzi związek:

$$\xi_b = \frac{\tau_{fm} E_s A_s u_f}{\tau_{sm} E_L A_L u_s} = \frac{\tau_{fm} E_s d_s}{\tau_{sm} E_L A_L 4 t_L}. \quad (5.33)$$

5.1.5.4. Weryfikacja przyczepności doklejonego elementu przy zarysowaniu

Koncentracje naprężeń występują zwykle na końcu doklejonego elementu i w pobliżu rysy. W stanie obciążeń użytkowych, włączając obciążenia cykliczne oraz działania termiczne (zwłaszcza zamrażania i odmrażania), zachodzi konieczność sprawdzenia, czy maksymalne naprężenie ścinające na końcu doklejonego kompozytu FRP jest mniejsze niż $f_{c,k}$. Można przyjąć:

$$\tau_{fl} = \left[V_{x=0} + \left(\frac{G_a}{E_L t_L t_a} \right)^{1/2} M_{x=0} \right] \frac{t_L (h - x_e)}{I_c}, \quad (5.34)$$

gdzie:

G_a – jest modułem Kirchoffa kleju,

t_a – grubość skleiny,

$V_{x=0}$, $M_{x=0}$ – są kolejno siłą ścinającą i momentem zginającym, działającym w przekroju, odpowiadającym końcowi doklejonego kompozytu FRP,

I_c – jest momentem bezwładności przekształconego przekroju zarysowanego.

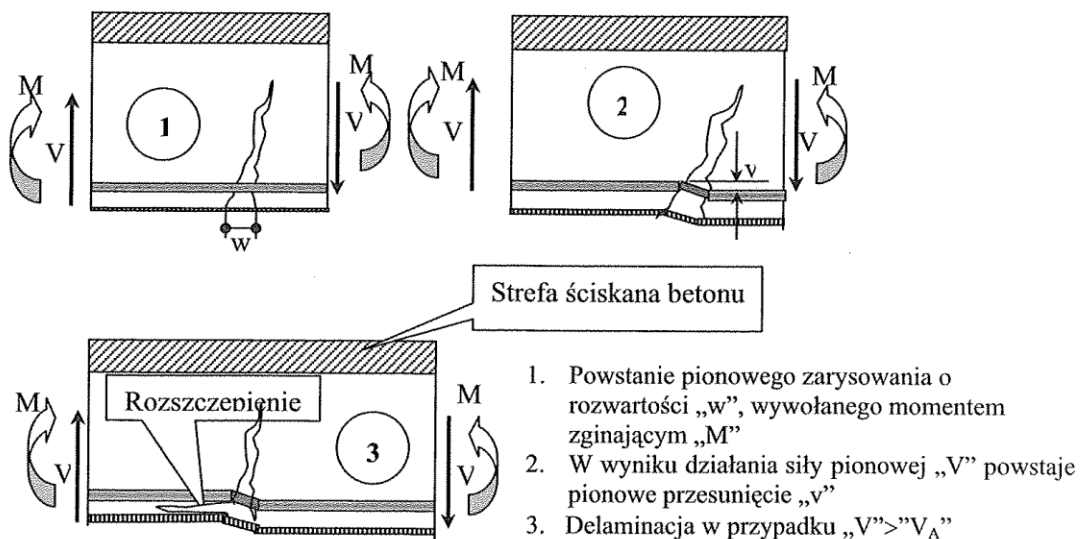
Miejscowa utrata przyczepności w pobliżu zarysowania może być dozwolona w stanie granicznym użyteczności, dopóki nie następuje odspojenie doklejonego kompozytu. Jednakże z uwagi na warunek długotrwałego połączenia kompozytu z betonem, ta miejscowa utrata przyczepności powinna być unikana w stanie granicznym użyteczności. Miejscowa utrata przyczepności występuje, jeśli poślizg jest większy niż s_{fo} , określone w następujący sposób:

$$s_{fo} = \frac{2G_F}{\tau_{\beta}} \quad (5.35)$$

We wzorze (5.35) można przyjąć: $G_F = c_F f_{ctm}$, $\tau_{\beta} = 1.8 f_{ctm}$ oraz $c_F = 0.202$, wówczas graniczny poślizg s_{fo} wynosi 0.224 mm, co odpowiada szerokości zarysowania $2s_{fo} = 0.45$ mm. Jeśli charakterystyczna wartość szerokości zarysowania pod obciążeniem użytkowym jest ograniczona do maksimum 0.30 mm (średnia szerokość 0.18 mm), to wówczas w stanie granicznym użyteczności nie występuje miejscowa utrata przyczepności.

5.1.6. Delaminacja

Przy projektowaniu wzmocnienia taśmami stalowymi lub z materiałów kompozytowych należy rozważyć przypadek odspojenia doklejonego elementu od konstrukcji wzmacnianej. Źłe jest, jeżeli nastąpi to przed uplastycznieniem stali, przed zerwaniem kompozytu i przed zniszczeniem betonu. Dlatego konieczne jest sprawdzenie wzmacnianej konstrukcji na tę okoliczność. Rys. 5.6 przedstawia rozwój delaminacji.

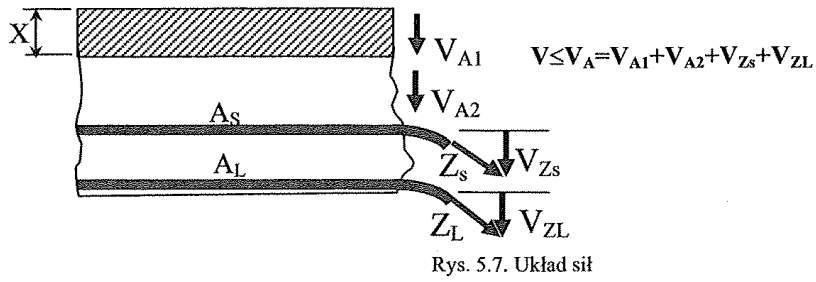


Rys. 5.6. Rozwój delaminacji

Siła poprzeczna V jest przenoszona przez: beton w strefie ściskanego betonu „ V_{A1} ”, zwarty obszar zarysowanego betonu „ V_{A2} ”, odkształconą stal zbrojeniową „ V_{zs} ” oraz przyklejony element „ V_{zL} ”. Warunkiem nie wystąpienia delaminacji jest:

$$V \leq V_A = V_{A1} + V_{A2} + V_{zs} + V_{zL} \quad (5.36)$$

Układ sił przenoszonych przez poszczególne elementy konstrukcji pokazuje rys. 5.7.



Rys. 5.7. Układ sił

Siła ścinająca przenoszona przez strefę ściskaną betonu wynosi:

$$V_{A1} = \tau_{CA} b x \quad (5.37)$$

gdzie:

τ_{CA} - średnie naprężenia ścinające w strefie ściskanej betonu (określone na drodze doświadczalnej) podczas działania siły V_{A1} , powodującej delaminację.

Siła ścinająca przenoszona przez część zarysowanego betonu jest określona przez:

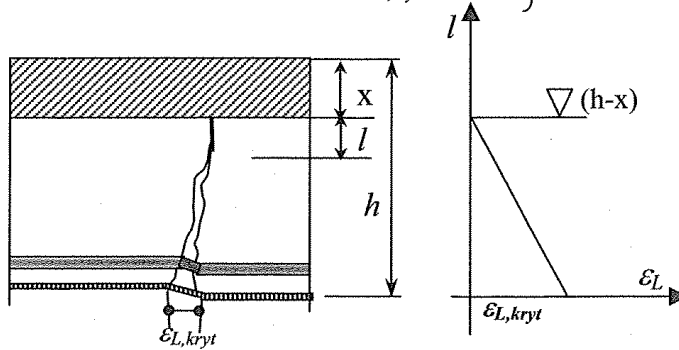
$$V_{A2} = \tau_{CA} b l \quad (5.38)$$

gdzie:

l - długość pęknięcia przenoszącego ścinanie $l = f(\varepsilon_L)$.

Określenie $l = f(\varepsilon_L)$ pokazuje rys. 5.8. Odkształcenie $\varepsilon_{L,kryt}$ jest to krytyczna wartość odkształceń w kompozycie, powodująca, że przestaje być przenoszone ścinanie. Wartości „ l ” można wyrazić następująco:

$$\left. \begin{aligned} l &= (h-x) \left(1 - \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_{L,kryt}} \right), & \text{dla } \varepsilon_L < \varepsilon_{L,kryt} \\ l &= 0 & \text{dla } \varepsilon_L \geq \varepsilon_{L,kryt} \end{aligned} \right\} \quad (5.39)$$



Rys. 5.8. Schemat ideowy określania wartości „ l ”

Wobec tego siła „ V_{A2} ” wynosi:

$$V_{A2} = \tau_{CA} b (h-x) \left(1 - \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_{L,kryt}} \right), \quad \text{ale } 1 - \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_{L,kryt}} \geq 0. \quad (5.40)$$

$\varepsilon_{L,kryt}$ - należy określić w wyniku doświadczeń.

Siły przenoszone przez stal i kompozyt można wyrazić w formie:

$$Z_S = \sigma_S A_S = \varepsilon_S E_S A_S, \quad Z_L = \sigma_L A_L = \varepsilon_L E_L A_L, \quad (5.41)$$

$$V_{Z_S} \approx \left(\frac{\nu}{w}\right) Z_S, \quad V_{Z_L} \approx \left(\frac{\nu}{w}\right) Z_L, \quad \varepsilon_S \approx \varepsilon_L \approx \sqrt{1 + \left(\frac{\nu}{w}\right)^2} - 1, \quad (5.42)$$

$$\begin{aligned} V_{Z_S} + V_{Z_L} &= \left(\frac{\nu}{w}\right) \varepsilon_S E_S A_S + \left(\frac{\nu}{w}\right) \varepsilon_L E_L A_L = \left(\frac{\nu}{w}\right) \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\nu}{w}\right)^2} - 1 \right] \{E_S A_S + E_L A_L\} = \\ &= \chi \{E_S A_S + E_L A_L\} \end{aligned} \quad (5.43)$$

gdzie:

$$\chi = \left(\frac{\nu}{w}\right) \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\nu}{w}\right)^2} - 1 \right] = const.$$

χ jest określone doświadczalnie. Przybliżone równania delaminacji ma postać:

$$\begin{aligned} V &\leq \tau_{CA} b \left[x + (h-x) \left(1 - \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_{L,kryt}} \right) \right] + \chi \{E_S A_S + E_L A_L\} \\ ale \left(1 - \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_{L,kryt}} \right) &\geq 0 \end{aligned} \quad (5.44)$$

W procesie projektowania można stosować do obliczeń konstrukcji mostowych: $\chi = 0.00101$ oraz $\varepsilon_{L,kryt} = 6.06 \text{ ‰}$.

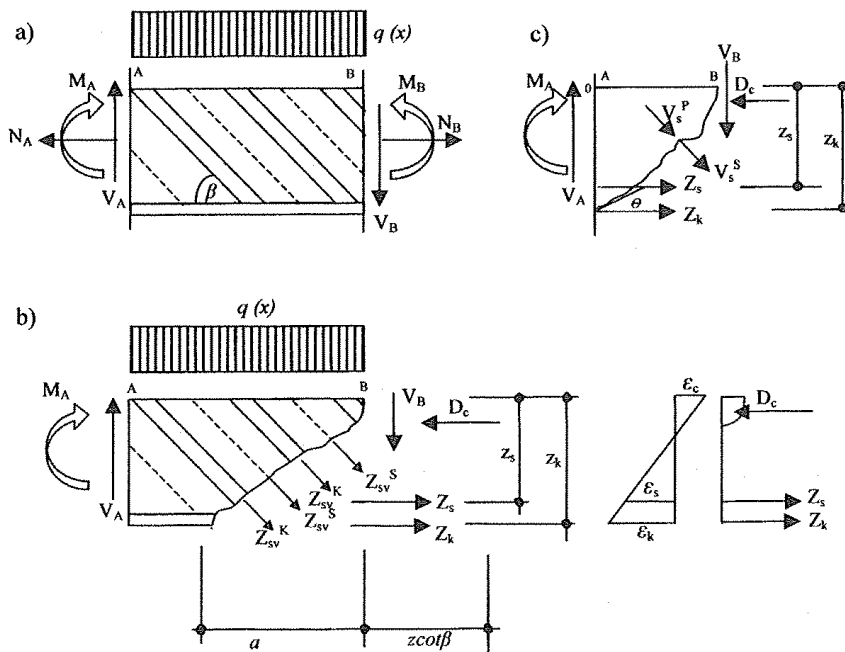
5.2. Ścinanie

5.2.1. Zależności ogólne

Przy analizie nośności na ścinanie przyjmuje się, że konstrukcja pracuje w zakresie sprężystym. Poza tym zakłada się pełną współpracę między belką betonową, przyklejonym elementem i klejem oraz, że płaskie przekroje pozostają płaskie podczas obciążenia (spełniona jest hipoteza Bernoulliego - Naviera) i że w pełnym zakresie jest stosowane prawo Hook'a.

Typowe metody wzmacniania belek betonowych na ścinanie przy zastosowaniu materiałów kompozytowych lub płaskowników stalowych pokazano na rys. 4.2 i 4.4. Mogą to być elementy przyklejone prostopadle lub pod kątem β do osi podłużnej wzmacnianej belki. Elementy wzmacniające, a zwłaszcza maty lub taśmy kompozytowe mogą „owijać” środnik belki lub być do niego przyklejone po obu stronach.

Rys. 5.9 pokazuje rozkład sił w analizowanym przekroju. Wzmocnienie polega na przyklejeniu zewnętrznego, dodatkowego zbrojenia w postaci elementów płaskich od spodu belki i po obu jej bokach. Mogą to być płaskowniki stalowe, kompozytowe lub maty z włókien.



Rys. 5.9. Analizowane przekroje odcinka A-B, rozkłady sił i oznaczenia:
a) rozpatrywany odcinek – między przekrojami A i B, b) rozkład sił i naprężeń, c) układ sił wypadkowych

Przyjmując oznaczenia jak na rys. 5.9 można zapisać:

$$V = - \int q(x) dx, \quad (5.45)$$

$$M = \int V dx = - \iint q(x) dx. \quad (5.46)$$

Posługując się zależnościami:

$$V_s^k = Z_{sv}^k \frac{a + z \cot \beta}{s_k}, \quad (5.47)$$

$$V_s^s = Z_{sv}^s \frac{a + z \cot \beta}{s_s}, \quad (5.48)$$

gdzie:

$$Z_{sv}^k = f_{yd}^k A_{sv}^k, \quad (5.49)$$

$$Z_{sv}^s = f_{yd}^s A_{sv}^s, \quad (5.50)$$

dla zbrojenia podłużnego:

$$Z_s = f_{yd} A_s, \quad (5.51)$$

i dla elementu podłużnego przyklejonego od spodu:

$$Z_k = f_{yd}^k A_k, \quad (5.52)$$

możemy przedstawić równania równowagi analizowanego przekroju:

$$\sum H = 0 : \quad Z_s + Z_k - D_c + (V_s^k + V_s^s) \cos \beta = 0, \quad (5.53)$$

$$\sum V = 0 : \quad q(x)a - V_A + V_b + (V_s^k + V_s^s) \sin \beta = 0, \quad (5.54)$$

$$\sum M_0 = 0 : \quad M_A + q(x)\frac{a^2}{2} + V_b a + (V_s^k + V_s^s)\left(\frac{a}{2} \sin \beta - \frac{z}{2} \cos \beta\right) - Z_s z_s - Z_k z_k. \quad (5.55)$$

Równania (5.53) ÷ (5.55) pozwalają wyznaczyć wartości potrzebnych sił V_s^k oraz F_k . Dla szczególnego przypadku, gdy $\beta = 90^\circ$, oraz $\Theta = 45^\circ$, otrzymujemy:

$$Z_s + Z_k - D_c = 0, \quad (5.56)$$

$$q(x)a - V_A + V_b + V_s^k + V_s^s = 0, \quad (5.57)$$

$$M_A + V_b a + (V_s^k + V_s^s)\frac{a}{2} - Z_s z_s - Z_k z_k = 0. \quad (5.58)$$

Wartości V_s^k oraz Z_k wynoszą więc:

$$V_s^k = V_A - q(x)a - V_b - V_s^s, \quad (5.59)$$

$$Z_k = \frac{1}{z_k} \left[M_A + \frac{a}{2} (V_A + V_b - q(x)a) - Z_s z_s \right]. \quad (5.60)$$

W przypadku dużych dźwigarów $z_s \approx z_k \approx a$, zatem otrzymujemy:

$$Z_k = \frac{M_A}{a} + \frac{1}{2} (V_A + V_b - q(x)a) - Z_s. \quad (5.61)$$

Ponadto można wyznaczyć potrzebne przekroje doklejanego zbrojenia z boku i od spodu belki:

$$A_{sv}^k = \frac{s_k}{f_{yd}^k} \left(\frac{V_A}{a} - q(x) - b_c f_v - \frac{f_{yd}^s A_{sv}^s}{s_s} \right), \quad (5.62)$$

$$A_k = \frac{1}{f_{yd}^k} \left(\frac{M_A}{a} + \frac{1}{2} (V_A + b_c f_v - q(x)a) - f_{yd} A_s \right), \quad (5.63)$$

gdzie:

f_v – wytrzymałość betonu na ścinanie,

b_c – szerokość belki,

f_{yd}^k – granica plastyczności stali strzemion lub prętów odgiętych,

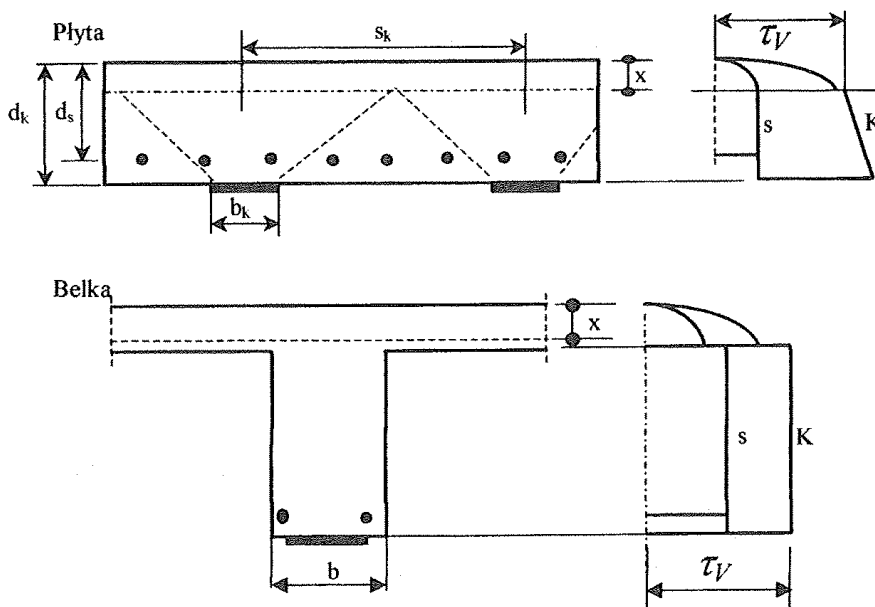
A_{sv}^s – przekrój poprzeczny strzemion lub prętów odgiętych,

f_{yd} – granica plastyczności stali prętów prostych (dolnego zbrojenia),

A_s – przekrój poprzeczny stali prętów prostych (dolnego zbrojenia).

5.2.2. Uproszczenia projektowe

W praktyce inżynierskiej, przy obliczaniu wzmocniania konstrukcji, można posługiwać się również pewnymi uproszczeniami. Obliczenia w analizowanych przekrojach oparte są na dozwolonych, określonych jako graniczne, wartościach naprężeń ścinających. Rozkład naprężeń ścinających τ_v we wzmocnionych elementach w stanie użytkowym pokazuje rys. 5.10



Rys. 5.10. Naprężenia ścinające we wzmocnionych elementach

Płyta

Wartości naprężeń ścinających w płytach możemy wyznaczać ze wzoru:

$$\tau_v = \frac{V_v}{\eta_B z_m} * \left[1 + (\eta_B - 1) \frac{s_k}{b_k + 2(d_k - x)} \right] \leq \tau, \quad (5.64)$$

gdzie:

- V_v – całkowita obliczeniowa siła poprzeczna na 1m szerokości płyty [kN/m],
- η_B – stopień wzmocnienia,
- s_k – odstęp między wzmocniającymi przyklejonymi elementami (taśmami kompozytowymi),
- z_m – średnia wartość ramienia sił wewnętrznych $z_m \approx 0,85d_k$,
- τ - dozwolona, przyjęta w projekcie wartość naprężenia ścinającego.

Belka

Natomiast analogiczne wartości naprężeń w belkach możemy określić, posługując się wzorem:

$$\tau_v = \frac{V_v}{bz_m} \leq \tau. \quad (5.65)$$

Analizując wartości sił poprzecznych można rozróżnić dwa przypadki:

Przypadek 1

Wartość siły V_{VS} przenoszona przez beton i istniejące zbrojenie (pręty podłużne, pręty odgięte, strzemiona) jest mniejsza od całkowitej siły poprzecznej V_V :

$$V_{VS} < V_V$$

Dodatkowe, doklejone zbrojenie (kształtkami lub matami kompozytowymi) należy wymiarować, na większą z sił:

$$V_{V_k} = V_V - V_{VS}, \quad (5.66)$$

$$V_{V_k} = \frac{\eta_B - 1}{\eta_B} V_V. \quad (5.67)$$

Przypadek 2

Wartość siły V_{VS} przenoszona przez beton i istniejące zbrojenie (pręty podłużne, pręty odgięte, strzemiona) jest większa lub równa całkowitej sile poprzecznej V_V , czyli $V_{VS} \geq V_V$.

Wówczas, dodatkowe, doklejone zbrojenie (kształtkami lub matami kompozytowymi) należy wymiarować na siły obliczone z równania (5.67).

Przy projektowaniu wzmocnienia materiałami FRP (matami), ich udział może być obliczony przez zastosowanie takich samych podstaw, jak w przypadku konwencjonalnego projektowania konstrukcji betonowych. Przyjmując, że płaszczyzna ścinania jest nachylona pod kątem β (najczęściej około 45°) do podłużnej osi belki, nośność na ścinanie doklejonego elementu FRP wynosi:

$$V_{V_k} = \frac{1}{\gamma_{mk}} A_k E_k \varepsilon_{ke} \sin \beta (1 + \cot \beta) \frac{d_f}{s_k}, \quad (5.68)$$

gdzie:

- A_k - przekrój zbrojenia FRP na ścinanie zgodnie z (5.69),
- ε_{ke} - efektywne (przyjmowane do projektu) odkształcenia FRP,
- d_f - efektywna wysokość zbrojenia FRP (patrz rys.5.11),
- γ_{mk} - częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla FRP,

$$A_k = 2t_f \omega_{fe}, \quad (5.69)$$

t_f - grubość FRP,

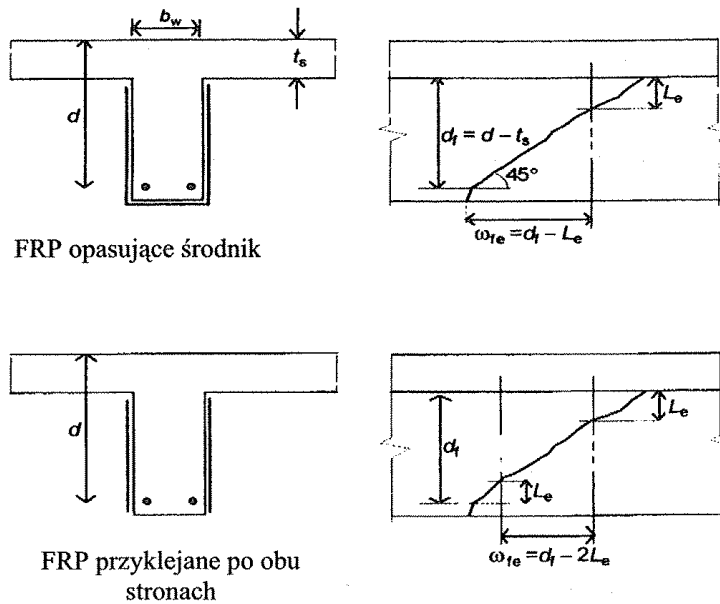
ω_{fe} - efektywna szerokość FRP, określana zgodnie z rys.5.11 i w zależności od efektywnej długości kotwienia określonej z:

$$L_e = 461.3 / (t_f E_k)^{0.58}. \quad (5.70)$$

Projektowanie wzmocnienia na ścinanie przez przyklejanie elementów kompozytowych (FRP), wymaga ustalenia granicznych wartości obliczeniowych odkształceń FRP. Zależy to od możliwości wystąpienia uszkodzeń w postaci ścięcia elementu wzmocnianego, ewentualnie zerwania doklejonego elementu FRP lub rozwarstwienie w płaszczyźnie skleiny.

Ogólnie zakłada się, że nośność na ścinanie żelbetowej belki jest funkcją sumy kumulacji pęknięć poszczególnych części składowych. Jasne jest, że jeśli szerokość ścinania (odległości między elementami przenoszącymi siły ścinające) staje się zbyt duża, współpraca tych elementów nie jest właściwa i znacząco zmniejsza się nośność na ścinanie konstrukcji. Dlatego właśnie muszą być ograniczane projektowe wartości odkształceń panujących w FRP. Sugeruje się przyjęcie wartości granicznej $\varepsilon_{ke} = 0.0023$. Jakkolwiek próby laboratoryjne, przeprowadzane na wzmocnianych belkach i kolumnach pokazują, że ta wartość odkształcenia granicznego jest bardzo ostrożna i że wartość $\varepsilon_{ke} =$

0.004 jest bardziej realistyczna. Również badania własne dają podstawę do zalecania wyższej wartości granicznej odkształceń, która jednak nie powinna przekraczać $\varepsilon_{ke} = 0.004$.



Rys. 5.11. Efektywne szerokości FRP

Z powodu koncentracji naprężeń w narożach, w niedokładnie przyklejonych obszarach, itd., mata FRP może ulegać zerwaniu przy odkształceniach daleko poniżej granicznej wartości. Odkształcenie niszczące jest funkcją osiowej sztywności FRP (zwłaszcza maty). To spostrzeżenie prowadzi (przyjmując $\rho_k E_k < 1.1 \text{ N/mm}^2$) do wyprowadzenia następującej zależności:

$$\varepsilon_{ke} = \varepsilon_{ku} \left[0.5622(\rho_k E_k)^2 - 1.2188(\rho_k E_k) + 0.778 \right], \quad (5.71)$$

gdzie:

- ε_{ku} - graniczna wartość odkształceń obliczeniowych FRP,
- ρ_k - stopień zbrojenia na ścinanie dla FRP, przy czym dla belek wzmocnionych taśmami FRP:

$$\rho_k = \frac{2t_f \omega_{fe}}{b_w s_k}, \quad (5.72)$$

zaś dla belek wzmocnionych matami FRP:

$$\rho_k = \frac{2t_f}{b_w}. \quad (5.73)$$

Równanie (5.68) i dalsze rozważania mają charakter empiryczny. Bazują one na wynikach badań, w których dominują testy niszczące małe belki, wzmocnione kompozytami, zbrojonymi włóknami węglowymi. Ekstrapolacja do dużych belek lub konstrukcji wzmocnionych innymi materiałami kompozytowymi powinna być stosowana z odpowiednią ostrożnością.

Obwodowe owinięcie elementu wzmocnianego matami kompozytowymi prawie całkowicie eliminuje niebezpieczeństwo powstawania rozwarstwienia lub innego uszkodzenia skleiny. Również duża powierzchniowa skleina, np. przy przyklejaniu mat na większych obszarach belek mostowych, jest mniej wrażliwa na skutki małych, lokalnych uszkodzeń. Tam, gdzie obwodowe owinięcie nie jest możliwe i przy mniejszych powierzchniach wzmocnianych, ryzyko rozwarstwienia lub innej wady skleiny jest wysokie. Szacunkowa wartość niszczonego odkształcenia FRP, zależne od uszkodzenia skleiny:

$$\varepsilon_{ke} = 0.0042 \frac{(0.835 f_{cu})^{2/3} \omega_{fe}}{(E_k t_f)^{0.58}} d_f, \quad (5.74)$$

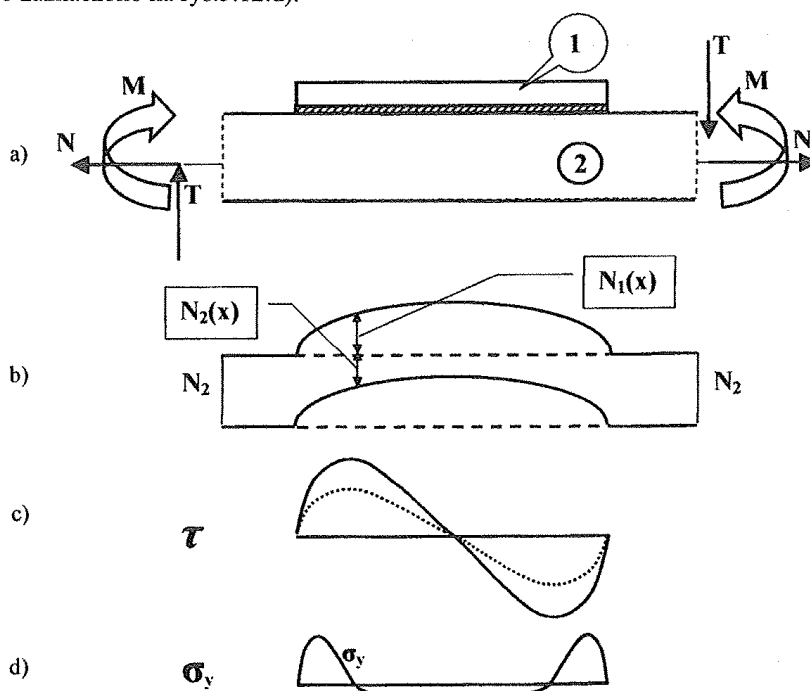
gdzie:

f_{cu} – wytrzymałość kostkowa betonu.

5.3. Strefa Zakotwienia

Przy analizie zagadnienia strefy zakotwienia przyklejonego elementu, konieczne jest rozważenie pracy połączenia klejowego, wspomagającego lub odciążającego, w którym element wzmocniany przekazuje na wzmocniającą część siły wewnętrznej.

Na rys. 5.12.a) przedstawiono model połączenia wspomagającego (odciążającego). Znaki sił mogą być inne niż na rysunku. Tutaj przekazywana siła wewnętrzna w elemencie wspomagającym ma wartości zerowe na końcach skleiny i wartość maksymalną w połowie długości (przy stałej sztywności), zaś w elemencie wspomaganym (odciążanym) siła wewnętrzna jest zredukowana o taką samą wartość (naprężenie). Ilustruje to rysunek 5.12.b). Naprężenia styczne mają rozkład w przybliżeniu antysymetryczny (zależnie od symetrii połączenia), również z redukcją, zależną od cech reologicznych kleju, co zaznaczono linią przerywaną (rys. 5.12.c). Natomiast naprężenia normalne (prostopadłe do powierzchni skleiny) na wykresie wykazują się symetrią z wyraźnymi koncentracjami na końcach, co zaznaczono na rys.5.12.d).



Rys. 5.12. Istota pracy połączenia wzmocniającego (odciążającego - opis w tekście)

Oddziaływania samo znoszące się takie, jak np. zmiany temperatury czy skurcz elementu wzmocnianego, wywołują efekty, które sumują się ze skutkami obciążeń zewnętrznych, zwiększając je lub redukując w zależności od sytuacji. W przypadku przyklejanych podłużnych elementów skurcz działa w zasadzie tylko jednokierunkowo, zmiany temperatury - dwukierunkowo. Skutki wpływu skurczu są ze względu na znak stałe, chociaż mogą być korzystne lub niekorzystne. Skutki zmian temperatury mogą być różne. Przyklejony płaskownik przy podgrzaniu może oderwać się od podłoża, ponieważ połączenie sztywnego elementu przyklejonego do betonu może przy zmianie temperatury ulec ścięciu. Szczególnie niebezpieczne jest intensywne podgrzewanie przyklejonego elementu metalowego lub kompozytowego. O nośności połączenia będą decydowały koncentracje naprężeń, występujące w strefie zakotwienia, której rola staje się pierwszoplanowa.

Postaciom zniszczenia połączeń klejowych można przyporządkować określone dla różnych stanów, decydujące wartości naprężeń:

1. Wytrzymałość kohezyną zaprawy klejowej R_1 ,
2. Wytrzymałość adhezyjną zaprawy klejowej R_2 ,
3. Wytrzymałość materiału elementu w strefie przyskleinowej R_3 ,
4. Wytrzymałość materiału elementu poza strefą skleiny R_4 .

Mechaniczna hipoteza przewyciężenia więzów adhezji w złożonym działaniu sił na powierzchni kontaktowej pozostała od czasów Coulomba przy swojej pierwotnie prostej formie:

$$\tau = \tau_0 + k\sigma, \quad (5.75)$$

gdzie:

τ_0 - adhezja właściwa,

σ - naprężenie normalne,

k - współczynnik proporcjonalności, który przy braku adhezji właściwej staje się prostym współczynnikiem tarcia.

Fizykalne hipotezy przewyciężenia więzów adhezji mają, niezależnie od stanu naprężeń na płaszczyźnie kontaktowej, bardziej złożony charakter. Istota przyczepności zależy od wielu aspektów. Adhezja tłumaczona jest w różny sposób:

- a) zjawiskami mechanicznego szczepiania,
- b) zjawiskami termodynamicznymi,
- c) siłami elektrostatycznymi, indukcyjnymi lub dyspersyjnymi,
- d) dyfuzją,
- e) siłami atomowymi i międzycząsteczkowymi,
- f) siłami chemicznymi.

Fizykalno - chemiczna analiza zjawiska przyczepności nie dostarczyła jeszcze uniwersalnej teorii. Pozostaje więc praktyka, polegająca na wykonywaniu prób przeprowadzanych zgodnie z ogólnie przyjętymi procedurami badawczymi.

Teoria połączeń była przedmiotem wielu przyczynków, dotyczących przeważnie połączenia nakładkowego, obciążonego siłami osiowymi. Można przedstawić w modelu uproszczonym zależność nośności od długości doklejonego elementu zakładając, że zniszczenie następuje w momencie osiągnięcia w miejscu koncentracji wartości naprężenia granicznego. Zależność tę dla połączenia klejowego można przedstawić w formie:

$$P_{\max} = R_1 b l \frac{\operatorname{tgh}\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2G}{tsE}}\right)}{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2G}{tsE}}}, \quad (5.76)$$

gdzie:

R_1 - wytrzymałość na ścinanie zaprawy klejowej,

G - moduł Kirchhoffa zaprawy klejowej,
 E - moduł Younga zaprawy klejowej,
 b - szerokość skleiny,
 l - długość skleiny,
 s - grubość skleiny,
 t - grubość doklejonego elementu.

Przy bardzo długiej skleinie maksymalna siła przenoszona przez połączenie pozostaje niezależna od jej długości i osiąga wartość zgodnie z wyrażeniem:

$$P_{\max} = \frac{2bR_t}{\sqrt{\frac{2G}{tsE}}} \quad (5.77)$$

Z tych dwóch zależności można określić długość zakotwienia, konieczną do przeniesienia maksymalnej siły:

$$l = \frac{1}{\operatorname{tgh}\left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2G}{tsE}}\right)} \quad (5.78)$$

W praktyce w połączeniach klejowych, zwłaszcza w połączeniach konstrukcji betonowych z kompozytowymi, mamy do czynienia ze zmiennością losową grubości skleiny. Trudno jest więc uwzględniać, zwłaszcza w praktyce projektowania inżynierskiego, np. wpływ odkształceń postaciowych na długość zakotwienia. Według nowszych opracowań, korzystając z bilinearnego opisu sił przyczepności i uniezależniając się od grubości skleiny, można określić wartość siły rozwarstwiającej w postaci wzoru:

$$T_k = b_L \sqrt{K \cdot t_L \cdot \tau_K \cdot l}, \quad (5.79)$$

gdzie:

K - stały współczynnik zależny od sztywności doklejonego elementu i wartości granicznej przemieszczenia względnego $K \approx E_L \cdot 0,000127$ [N/mm²],
 E_L - moduł Younga elementu doklejonego [N/mm²],
 b_L - szerokość elementu doklejonego [mm],
 t_L - grubość elementu doklejonego [mm],
 τ_K - obliczeniowa wartość naprężenia ścinającego: $\tau_K = f(f_{ctm})$ [N/mm²],
 f_{ctm} - powierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie betonu [N/mm²],
 l - długość [mm].

Powyższa formuła nie uwzględnia wpływu klasy betonu na maksymalną wartość przenoszonych naprężeń ścinających, lecz powierzchniową wytrzymałość na rozciąganie betonu.

Wzór na wartość charakterystyczną siły rozwarstwiającej skleinę można też przedstawić w postaci:

$$T_k = T_{k,\max} \cdot \frac{l_v}{l_{t,k}} \cdot \left(2 - \frac{l_v}{l_{t,k}}\right), \quad (5.80)$$

gdzie:

$T_{k,\max}$ - maksymalna siła rozwarstwiająca,

$$T_{k,\max} = 0,35 \cdot \left(1 + \frac{\sigma_n}{f_{ctm}}\right) \cdot b_L \cdot k_b \cdot k_c \cdot \sqrt{f_{ctm} \cdot E_L \cdot t_L} \quad [\text{N}], \quad (5.81)$$

$l_{t,k}$ - długość zakotwienia odpowiadająca maksymalnej wartości $T_{k,\max}$

$$l_{i,k} = \sqrt{\frac{E_L t_L}{4 f_{ctm}}} \quad [\text{mm}], \quad (5.82)$$

σ_n - naprężenia normalne do skleiny $[\text{N/mm}^2]$,
 k_b - współczynnik uwzględniający geometrię [-],
 k_c - współczynnik uwzględniający usytuowanie betonu [-],
 $k_c = 1$ dla osłoniętych powierzchni betonu,
 $k_c = 0,87 \div 0,90$ dla nieosłoniętych powierzchni betonu,

$$k_b = 1,06 \cdot \sqrt{\frac{2 - \frac{b_L}{b}}{1 + \frac{b_L}{400}}} \quad [-], \quad (5.83)$$

b - szerokość belek lub rozstaw taśm w płytach [mm],
 l_v - długość zespolenia.

Można uprościć współczynnik występujący w równaniu (5.81) i wówczas wzór na maksymalną siłę rozwarstwiająca przyjmuje postać:

$$T_{k,\max} = 0,50 \cdot b_L \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ctm} \cdot E_L \cdot t_L}, \quad (6.84)$$

lub:

$$T_{k,\max} = 0,50 \cdot b_L \cdot k_b \cdot k_c \cdot \sqrt{f_{ctm} E_L \cdot t_L}. \quad (6.85)$$

Mniejsza wartość $T_k < T_{k,\max}$ daje długość zakotwienia l_i :

$$l_i = l_{i,k} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{T_k}{T_{k,\max}}} \right). \quad (6.86)$$

W praktyce przenoszona siła rozwarstwiająca T_k musi spełniać warunki:

- dla płyt pełnych: $T_k \geq 1,2 F_{LE}$,
- dla belek: $T_k \geq F_{LE}$,

gdzie:

F_{LE} – wartość siły w elemencie doklejonym (kompozycie) w punkcie E , tzn. w punkcie zakotwienia wg rys. 5.13.

Natomiast zgodnie z zaleceniami EN 1992-1 (Eurokod EC 2 Konstrukcje betonowe) należy założyć rozkład naprężeń ścinających w postaci paraboli 3-go stopnia z wartością charakterystyczną $\tau_{\max,k}$. Dla obliczania charakterystycznej siły rozwarstwiającej $T_{R,k}$ (przenoszonej z betonu na koniec doklejonego elementu) można posłużyć się równaniem:

$$T_{R,k} = 16,5 b_L t_L^{0,5} \tau_{\max,k}^{1,33}, \quad (5.87)$$

gdzie:

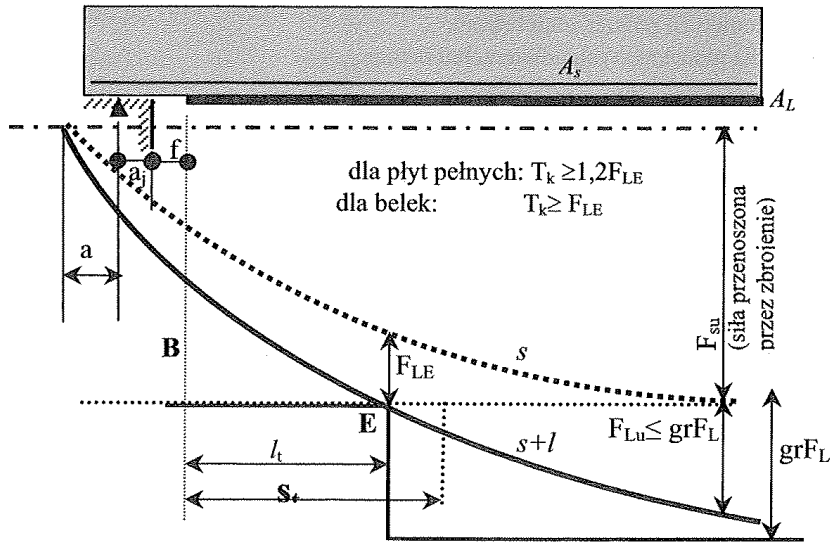
$\tau_{\max,k}$ - wartość charakterystyczna.

Zaś po przekształceniu uzyskujemy:

$$req. \tau_{max,k} = \{T_{R,k} / (16,5b_L t_L^{0,5})\}^{0,75} . \quad (5.88)$$

Odpowiadająca długość zakotwienia wynosi:

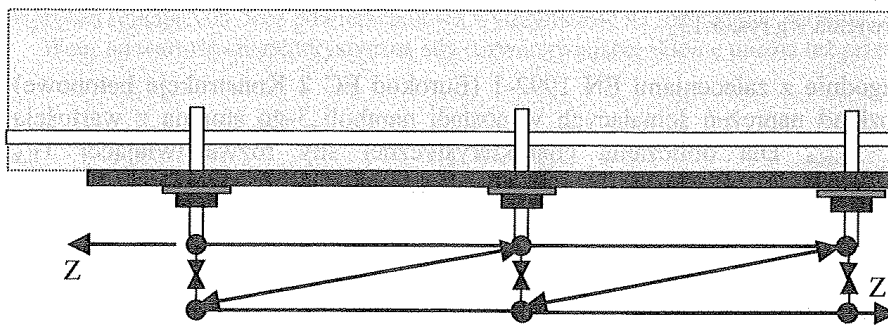
$$l_{t,k} = 32,7 t_L^{0,375} (T_{R,k} / b_L)^{0,25} . \quad (5.89)$$



F_{Lu} (siła przenoszona przez taśmę); grF_{Lu} (graniczna siła przenoszona przez taśmę);
 a odpowiada (przy zginaniu w płaszczyźnie pionowej) wartości średniej wysokości użytecznej przekroju $a = 0,5(d+h)$;
 $l_t \leq l_{tmax}$ $l_t \leq s_t$ (zakres możliwości zbrojenia)

Rys. 5.13. Rozkład sił rozciągających i strefa zakotwienia

W przypadku kotwienia przyklejonych elementów, zwłaszcza płaskowników stalowych (ale również kompozytowych), w konstrukcji betonowej działa siła normalna, wywołująca powstawanie naprężeń normalnych „ σ_N ” ściskających w betonie. Naprężenia te powodują (praktycznie liniowy) wzrost wytrzymałości na ścinanie betonu. Na rysunku 5.14 pokazano model „kratownicowy” przebiegu sił, zaś tabela 5.1 przedstawia charakterystyczne wartości maksymalnych naprężeń ścinających $\tau_{max,k}$ w funkcji σ_N . Model „kratownicowy” pokazuje, że kotwy przez panującą w nich siłę rozciągającą ściskają beton i tworzą pewnego rodzaju współpracę między przyklejonym elementem stalowym lub kompozytowym i istniejącym zbrojeniem wewnętrznym.



Rys. 5.14. Model kratownicowy kierunków sił

Tabela 5.1.

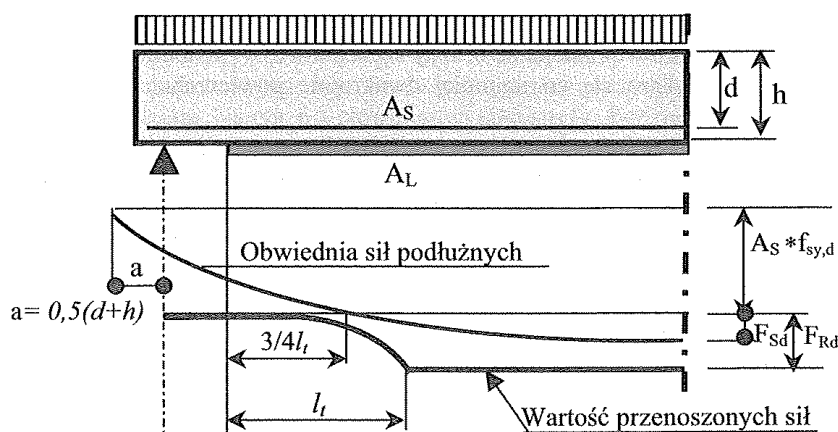
Charakterystyczne wartości maksymalnych naprężeń $\tau_{max,k}$ [MPa] w zależności od klasy betonu i naprężeń ściskających σ_N

σ_N [MPa]	0	1,0	2,0	3,0	4,0
Beton					
C20/25	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0
C30/37	8,5	11,5	14,5	17,5	20,0
C35/45	11,0	14,0	17,0	20,0	23,0
C45/55	12,5	15,5	18,5	21,5	24,5

Doklejony płaskownik stalowy musi być zakończony w odległości nie mniejszej niż $\frac{3}{4} l_t$ od przekroju odpowiadającego przecięciu obwiedni sił rozciągających z linią określającą wielkości sił przenoszonych przez zbrojenie wewnętrzne A_s (rys. 5.15). Obliczeniowa nośność zakotwienia T_{Rd} nie powinna być mniejsza od obliczeniowej nośności płaskownika F_{Sd} tj. od największej obliczeniowej wewnętrznej siły rozciągającej płaskownik stalowy:

$$T_{Rd} \geq F_{Sd} , \quad (5.90)$$

$$T_{Rd} = T_{Rk} / \gamma_Q = T_{Rk} / 1,50. \quad (5.91)$$



Rys. 5.15. Rozkład sił podłużnych w płaskowniku i zbrojeniu wewnętrznym

Dalsze badania doprowadziły do określenia wpływu wartości naprężeń normalnych na długość zakotwienia, co przedstawia równanie:

$$\sigma_{L,k^a} = \sigma_{L,k^a \max} \frac{l_v}{l_{t,k}} \left(2 - \frac{l_v}{l_{t,k}} \right), \quad (5.92)$$

gdzie:

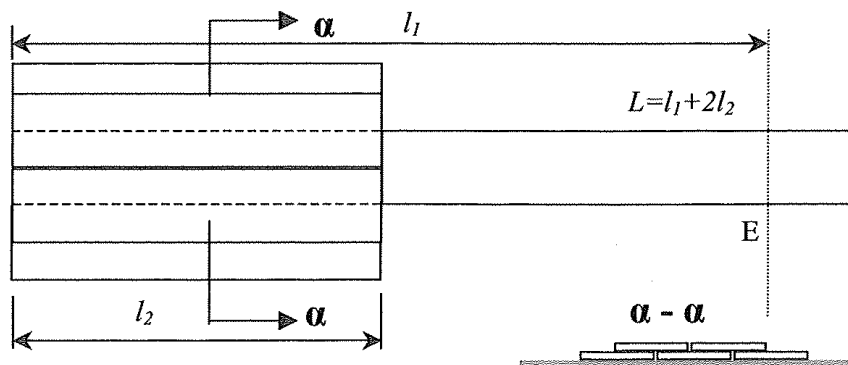
$\sigma_{L,k^a \max}$ - maksymalne naprężenia normalne doprowadzające do zarysowania betonu [N/mm²],

$l_{t,k}$ - długość zakotwienia odpowiadająca maksymalnej wartości $T_{k,max}$,

$$l_{t,k} = \sqrt{\frac{E_L \cdot f_{ctm} \cdot f_{ck}}{t_L}} \quad [\text{mm}], \quad (5.93)$$

f_{ck} - charakterystyczna wytrzymałość kostkowa betonu [N/mm²].

Często się zdarza, że brakuje miejsca dla odpowiednio długiego zakotwienia. Wówczas można uzyskać skrócenie koniecznej strefy przez dodatkowe mechaniczne kotwienie, lub wywołanie dodatkowych naprężeń normalnych do skleiny. Istnieje możliwość zastosowanie równoległej rozbudowy powierzchni kotwiącej (rys. 5.16).



Rys. 5.16. Zwiększenie długości zakotwienia przy pomocy doklejonych elementów taśm

W licznych przypadkach zachodzi potrzeba poprawy stopnia (efektywności) zespolenia doklejonego zbrojenia i to nie tylko na końcach taśm, ale również w innych przekrojach np. w strefie nad podporami. Mechaniczne wspomaganie nie zawsze jest możliwe lub efektywne. Nowym rozwiązaniem jest wpuszczenie taśm w prostopadłe bruzdy szczelinowe, wypełnione zaprawą klejową. Stosując takie rozwiązanie, zwiększa się co najmniej dwukrotnie powierzchnia przenosząca siły rozwarstwiające.

Taśma wpuszczona w bruzdę współpracuje z całą pewnością z betonem o lepszych parametrach niż na powierzchni. Uszkodzenia powierzchni betonu w sensie ich nierówności są prostopadłe do skleiny, a więc praktycznie bez znaczenia dla przenoszenia obciążeń. Również prace przygotowawcze są zdecydowanie mniej kosztowne, niepotrzebne jest bowiem wykonywanie piaskowania i reprofiliacji powierzchni.

Zniszczenie następuje nie tylko wskutek tworzących się zarysowań kohezyjnych kleju w płaszczach równoległych do powierzchni taśmy, ale także dodatkowo wskutek powstawania odkształceń względnych między taśmą i betonem, które pojawiają się dopiero po przekroczeniu sił tarcia. Wielkość przenoszonej siły rozwarstwiającej jest prawie niezależna od jakości betonu, a zwłaszcza od jego powierzchniowej wytrzymałości na rozciąganie f_{ctm} , a wpływają na nią znacznie wytrzymałość kleju, długość skleiny i odległość osi taśmy od krawędzi betonu.

6. Wzmacnianie słupów z zastosowaniem taśm FRP oraz mat aramidowych, węglowych i szklanych

6.1. Określenie zachowania się betonu w słupach owiniętych materiałami FRP

6.1.1. Oddziaływanie pancerza kompozytowego

Owinięty materiał kompozytowy działa na beton słupa ściskanego jak pancerz, ograniczający możliwość rozszerzania się betonu na boki. W kompozycie powstają wówczas naprężenia rozciągające w kierunku obwodowym. Owinięcie kompozytowe prowadzi do zwiększenia wartości odkształceń granicznych w betonie. Nie zachodzi tu analogia do słupów w postaci rur stalowych, wypełnionych betonem, ponieważ zakres odkształceń sprężystych stali jest niższy niż betonu.

Ograniczenie betonu stalą nie może podnieść odkształceń betonu z uwagi na wcześniejsze uplastycznienie stali. Inaczej jest w przypadku FRP. Kompozyty charakteryzują się znacznie wyższymi odkształceniami sprężystymi (nawet 5%), których przekroczenie powoduje zniszczenie betonu.

6.1.2. Naprężenia i odkształcenia opasanego betonu

Zmienne właściwości rozszerzania nieopasanego i zewnętrznie opasanego betonu istotnie się różnią. Osiowo ściskany, nieopasany beton charakteryzuje się początkowym współczynnikiem Poissona od 0,15 do 0,22 i doświadczalnie potwierdzona redukcja objętości występuje przy poziomie naprężeń nie przekraczających 90 % wartości maksymalnych. Później beton wykazuje powiększenie objętości i jest to rezultat gwałtownego wzrostu stosunku odkształceń bocznych do osiowych.

Natomiast zniszczenie opasanego betonu może być wywołane rozerwaniem się opaski FRP. Warunki graniczne opasanego betonu często charakteryzowane są przez wytrzymałość na ściskanie i graniczne osiowe odkształcenia, które to wartości są ściśle powiązane z granicznymi odkształceniami rozciągającymi lub wytrzymałością na rozciąganie w kierunku obwodowym opasującego kompozytu FRP.

6.2. Zagadnienia związane ze wzmacnianiem słupów prostokątnych i kołowych

Wyniki badań laboratoryjnych i analiz teoretycznych pozwoliły określić jedynie ogólne, przybliżone podstawy wzmacniania prostokątnych słupów betonowych przy zastosowaniu materiałów kompozytowych. Na ściskany wzmocniony przekrój betonowy oddziałuje z jednej strony zewnętrzne, przyklejone owinięcie matą FRP i z drugiej strony wewnętrzne zbrojenie strzemionami stalowymi. Na rys. 6.1 pokazano przekrój prostokątnego słupa, zbrojonego i wzmocnionego przez owinięcie matą FRP. W przekroju poprzecznym słupa prostokątnego można wyodrębnić tę część przekroju, na którą opasanie FRP nie działa. Na rys. 6.1 określono to jako strefy „bez owinięcia FRP”.

Osiowe obciążenie zbrojonego, krótkiego (bez możliwości wyboczenia) słupa wywołuje:

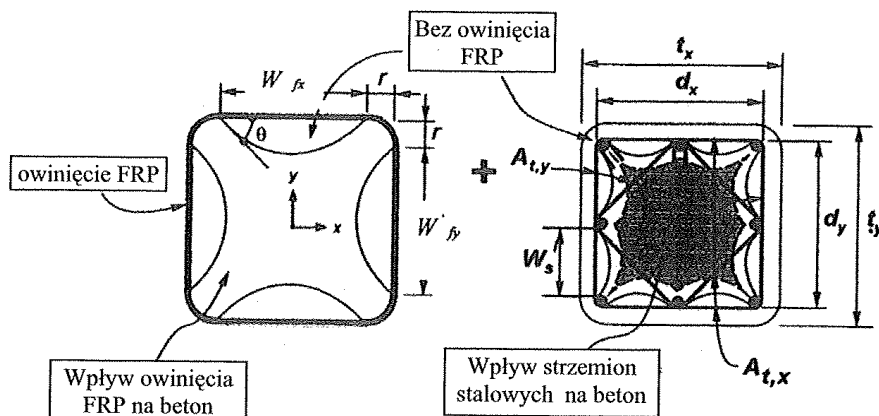
$$N = N_c + N_s \quad (6.1)$$

$$N_s = f_s A_s \quad (6.2)$$

$$N_c = N_{c0} + N_{cc,f} + N_{cc,fs} = f_{c0} A_{c0} + f_{cc,f} A_{cf} + f_{cc,fs} A_{c,fs} \quad (6.3)$$

gdzie:

- N_c i N_s są siłami częściowymi, przenoszonymi przez przekrój betonowy i podłużne zbrojenie,
- A_s – pole przekroju zbrojenia podłużnego,
- f_s – naprężenia ściskające w zbrojeniu podłużnym ($f_s \leq f_{sy}$),
- N_{c0} - siła przenoszona przez „nieowiniętą FRP” strefę betonu,
- A_{c0} - pole powierzchni „nieowiniętej FRP” strefy betonu,
- f_{c0} - naprężenia ściskające „nieowiniętej FRP” strefy betonu,
- $N_{cc,f}$ – siła przenoszona przez przekrój betonu w strefie wpływu zewnętrznego owinięcia FRP,
- A_{cf} - pole powierzchni przekroju betonu w strefie wpływu zewnętrznego owinięcia FRP,
- $f_{cc,f}$ - naprężenia ściskane betonu w strefie wpływu zewnętrznego owinięcia FRP,
- $N_{cc,fs}$ - siła przenoszona przez przekrój betonu w strefie wpływu zewnętrznego owinięcia FRP i zbrojenia strzemionami stalowymi,
- $A_{c,fs}$ - pole powierzchni przekroju betonu w strefie wpływu zewnętrznego owinięcia FRP i zbrojenia strzemionami stalowymi,
- $f_{cc,fs}$ - naprężenia ściskane betonu w strefie wpływu zewnętrznego owinięcia FRP i zbrojenia strzemionami stalowymi.



Rys. 6.1. Przekr6j zbrojonego i wzmocnionego mat6, prostok6tnego s6upa

Osiow6 no6no6c na 6ciskanie N_n mo6na przedstawi6 w postaci:

$$N_n = N_{cn} + N_{sn} \quad (6.4)$$

przyjmuj6c:

N_{cn} – charakterystyczna no6no6c na 6ciskanie betonu przy osi6gni6ciu poziomu zniszczenia,
 N_{sn} – no6no6c na 6ciskanie zbrojenia pionowego przy osi6gni6ciu poziomu zniszczenia.

Do6wiadczenia pokazuj6, 6e zniszczenie centrycznie obci6żonego s6upa jest osi6gane przy odksz6t6czeniach jednostkowych $\epsilon = 1\%$. Przy bardzo ostro6nym przy6j6ciu liczby Poissona $\nu = 0,5$ odksz6t6czenia w przekroju przy zniszczeniu wynos6 5 %.

Nominalna no6no6c na 6ciskanie betonu N_{cn} zale6y od r66nych napr6e6n w trzech strefach wplywu okre6lonych na rys. 6.1. Przy poziomie odksz6t6c6n r66wnym 1% przy 6cisnaniu beton niewzmocniony osi6ga maksymaln6 wytrzyma6o6c na 6ciskanie f'_c . Nast6pnie traci t6 warto6c do poziomu $0,3 f'_c$.

St6d, po uwzgl6dgni6ciu $f_{c0} = 0,3 f'_c$ r66wnania otrzymuj6 post6c:

$$N_{sn} = f_{sy} A_s \quad (6.5)$$

$$N_{cn} = 0,3 f'_c A_{cu} + f'_{cc,f} A_{cf} + f'_{cc,fs} A_{c,fs} \quad (6.6)$$

gdzie:

$f'_{cc,f}$ - wytrzyma6o6c na 6ciskanie betonu w strefie wplywu zewn6trznego owini6cia FRP,

$f'_{cc,fs}$ - wytrzyma6o6c na 6ciskanie betonu w strefie wplywu zbrojenia strzemionami wewn6trznymi i owini6cia FRP,

$A_{cu}/A_{cf}/A_{c,fs}$ - powierzchni6, kt6re odpowiadaj6 strefom wplywu

f_{sy} - granica plastyczn66ci zbrojenia podl6żnego,

A_s - pole przekroju zbrojenia podl6żnego.

Wz6r na pole powierzchni wplywu owini6cia FRP przyjmuje si6 w postaci:

$$A_{cu} = A_{cc,f} - A_{e,f} \quad (6.7)$$

gdzie:

$A_{cc,f}$ - ca6kowita strefa betonu owini6ta FRP,

$A_{e,f}$ - strefa betonu, na kt6r6 ma wplyw owini6cie FRP.

W przypadku przekroju prostok6tnego, mo6emy przyj6c:

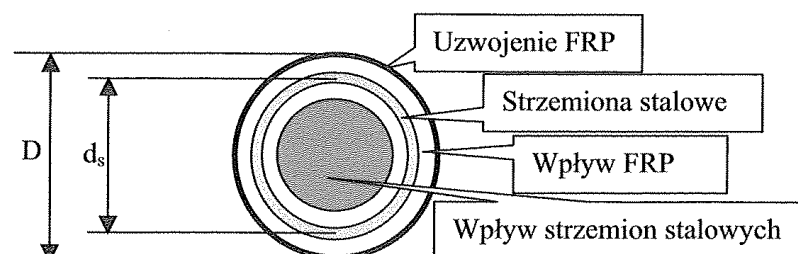
$$A_{cc,f} = t_x t_y - A_s - (4 - \pi) r^2, \quad (6.8)$$

$$A_{e,f} = t_x t_y - \frac{W_{fx}^2 + W_{fy}^2}{3} \tan \theta - A_s - (4 - \pi) r^2. \quad (6.9)$$

Powyższe formuły mogą być stosowane do przekrojów prostokątnych, których stosunek długości boków nie przekracza 2:1.

Dla słupów o przekroju kołowym, przyjmując oznaczenia jak na rys. 6.2. mamy:

$$A_{cc,f} = A_{e,f} = \frac{\pi D^2}{4} - A_s. \quad (6.10)$$



Rys. 6.2. Przekrój zbrojonego i uzwojonego FRP, kołowego słupa betonowego

Jest oczywiste, że $A_{cc,f} = A_{e,f}$, a więc $A_{cu} = 0$. Wpływ przyklejonego uzwojenia (owinięcia) słupów materiałami FRP jest w przypadku wzmacniania przekrojów kołowych zawsze większy niż dla wzmacnianych przekrojów prostokątnych.

Obliczanie wytrzymałości na ściskanie uzwojonego przekroju betonowego f'_{cc} można przeprowadzić w następujący sposób:

$$f'_{cc} = k_c f'_c, \quad (6.11)$$

gdzie:

f'_c - wytrzymałość walcowa na ściskanie betonu,

k_c - współczynnik podnoszący wytrzymałość na ściskanie.

Współczynnik k_c jest zależny od dwuwymiarowego stanu naprężeń, wywołanego uzwojeniem FRP. Współczynnik ten można wyznaczyć:

$$k_c = \alpha_1 \alpha_2 \quad (6.12)$$

przy czym:

α_1 - współczynnik zwiększający, wywołany istnieniem w betonie trójwymiarowego stanu naprężeń,

α_2 - współczynnik zmniejszający z uwagi ukierunkowania siły dla stanu dwuwymiarowego.

Współczynniki określone mogą być za pomocą wzorów:

$$\alpha_1 = 1,25 \left[1,8 \sqrt{1 + 7,94 \frac{F_l}{f'_c}} - 1,6 \frac{F_l}{f'_c} - 1 \right], \quad (6.13)$$

$$\alpha_2 = \left[1,4 \frac{f_l}{F_l} - 0,6 \left(\frac{f_l}{F_l} \right)^2 - 0,8 \right] \sqrt{\frac{F_l}{f'_c}} + 1, \quad (6.14)$$

gdzie:

F_l oraz odpowiednio f_l - maksymalne i minimalne naprężenia boczne w uzwojeniu.

Sposób określenia bocznych naprężeń w uzwojeniu (owinięciu przyklejonym kompozytem FRP) jest inny dla przekrojów prostokątnych, a inny dla przekrojów kołowych.

Dla przekrojów prostokątnych boczne naprężenia wywołane przez kompozyt FRP w kierunku x i y są następujące:

$$f_{l,fx} = \rho_{fx} f_f, \quad (5.15)$$

$$f_{l,fy} = \rho_{fy} f_f, \quad (6.16)$$

gdzie:

f_f - miarodajne naprężenia w kompozycie FRP,
 ρ_{fx} i odpowiednio ρ_{fy} - stosunek zbrojenia:

$$\rho_{fx} = 2 \frac{t_j}{t_y}, \quad (6.17)$$

$$\rho_{fy} = 2 \frac{t_j}{t_x}, \quad (6.18)$$

przyjmując:

t_j - nominalna grubość (teoretyczna) opasania kompozytowego FRP,

t_x, t_y - wymiary zewnętrzne podpory.

Miarodajne naprężenia w kompozycie FRP przy osiowych odkształceniach 1% ($v = 0,5$) można określić następująco:

$$f_f = 0,005 E_f / \gamma_{mE}, \quad (6.19)$$

gdzie:

E_f - moduł Younga kompozytu FRP,

γ_{mE} - częściowy współczynnik równy 1,1 ÷ 1,2 dla mat FRP jednokierunkowych i 1,5 ÷ 1,8 dla mat FRP tkanych.

Dla słupów o przekroju kołowym boczne naprężenia f_{lf} uzwojenia, wywołane przez przyklejenie owiniętego kompozytu FRP można określić:

$$f_{lf} = \rho_j f_f, \quad (6.20)$$

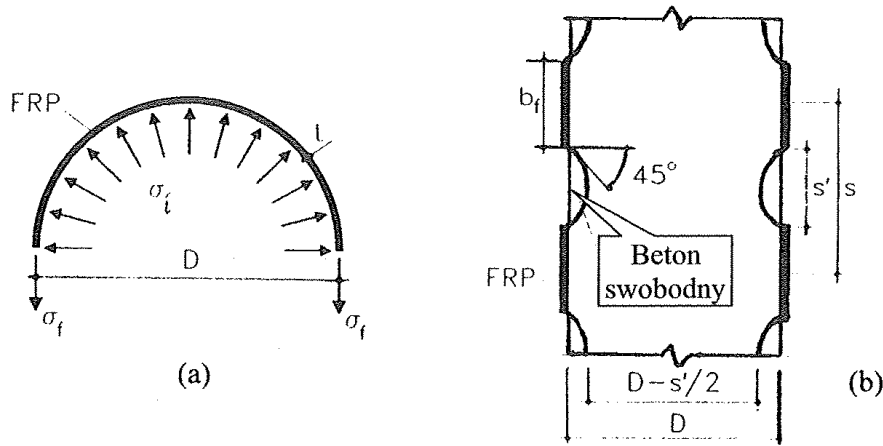
gdzie :

$$\rho_j = \rho_j = 4 \frac{t_j}{D}. \quad (6.21)$$

Dla określenia miarodajnych wartości nośności przy ściskaniu zawsze należy uwzględnić różne częściowe współczynniki bezpieczeństwa.

6. 3. Efektywność bocznego ciśnienia opasania kompozytowego FRP

W przypadku słupów betonowych, obciążonych osiowo najczęstszym przykładem jest opasanie matą kompozytową FRP, w której włókna są ułożone równolegle, tworząc uzbrojenie obwodowe całej powierzchni betonu. Boczne ciśnienie opasania przedstawia rys. 6.3a. Przyjęcie równomiernego rozciągania w FRP powoduje, że na rdzeń betonowy działa boczne, równomierne ciśnienie.



Rys. 6.3. Ciśnienie wywołane przez opasanie FRP: a) przekrój poprzeczny, b) przekrój podłużny

Boczne, wywołane opasaniem ciśnienie σ_l , może być wyrażone jako funkcja istniejącego w FRP naprężenia σ_j , co można zapisać w postaci:

$$\sigma_l = K_{conf} \varepsilon_l, \text{ gdzie } K_{conf} = \frac{1}{2} \rho_j E_j. \quad (6.22)$$

K_{conf} określa sztywność opasania FRP, a ε_l , to obwodowe odkształcenia betonu, równe odkształceniom ε_j w opasaniu FRP. W związku z tym boczne, wywołane opasaniem ciśnienie σ_l , jest obliczane na bazie istniejącego w FRP naprężenia σ_j , wynoszącego $\sigma_j = E_j \varepsilon_j \leq f_j$. Maksymalne boczne ciśnienie przyjmuje się jako:

$$f_l = \frac{1}{2} \rho_j E_j \varepsilon_{ju}. \quad (6.23)$$

Jeśli słup betonowy jest owinięty częściowo (rys. 6.3b), wówczas mniejsza jest skuteczność uwzględniana zarówno dla opasanej jak i dla nieopasanej strefy. W tym przypadku, sztywność opasania, wywołującego boczne ciśnienie, wymaga wprowadzenia współczynnika efektywności $k_e \leq 1$:

$$K_{conf} = \frac{1}{2} k_e \rho_j E_j. \quad (6.24)$$

Jak ilustruje to rys. 6.3.b, wpływ opasania na strefę swobodną słupa przyjmuje się jako ograniczoną parabolą z początkowym nachyleniem pod kątem 45°. Między dwiema strefami owiniętymi FRP, obszar efektywnego działania opasania na rdzeń betonowy wynosi:

$$A_e = \frac{\pi}{4} \left(D - \frac{s'}{2} \right)^2, \quad (6.25)$$

gdzie $s' = s - b_f$ jest czystą przerwą między opasaniem FRP. Wówczas współczynnik efektywności k_e jest zależny od stosunku A_e/A_c , w którym $A_c = A_g - A_s$ i przyjmowany jest jako:

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2D}\right)^2}{1 - \rho_{sg}} \approx \left(1 - \frac{s'}{2D}\right)^2, \quad z \quad \rho_{sg} = \frac{A_s}{A_g}, \quad (6.26)$$

przy czym:

A_s – przekrój podłużnego, stalowego zbrojenia,

A_g – przekrój netto betonu.

Jeżeli włókna (maty) są zastosowane spiralnie, to zachodzi mniejsza efektywność powstrzymywania betonu przed jego bocznym rozszerzaniem się. Przyjmując równomierną siłę N_f w kompozycie FRP, opasujące ciśnienie dla przypadku spiralnego owinięcia można wyrazić następująco:

$$\sigma_{i,h} = \frac{N_f}{b_f R}, \quad (6.27)$$

gdzie R jest zakrzywieniem spirali, przyjmowanym jako:

$$R \approx \frac{k^2 + r^2}{r}, \quad (6.28)$$

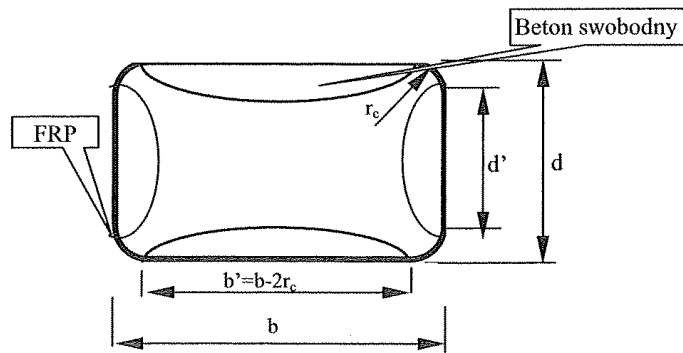
w którym $k = p/2\pi$, „ p ” jest skokiem, a „ r ” promieniem spirali. Podobnie ciśnienie opasania na jednostkę szerokości, wyrażone dla kołowego owinięcia FRP, można przyjąć jako:

$$\sigma_{i,c} = \frac{N_f}{b_f r}. \quad (6.29)$$

Opierając się na równaniach (6.27) – (6.29), współczynnik efektywności k_e można określić jako:

$$k_e = \frac{\sigma_{i,h}}{\sigma_{i,c}} = \left[1 + \left(\frac{p}{\pi D}\right)^2\right]^{-1}. \quad (6.30)$$

Dla słupów o kwadratowym lub prostokątnym przekroju poprzecznym część rdzenia betonowego, w której działa pełne ciśnienie boczne, jest ograniczona parabolicznymi łukami przy każdym boku przekroju (rys. 6.4).



Rys. 6.4. Rdzeń betonowy dla przekroju niekołowego, w którym działa pełne ciśnienie boczne

Biorąc sumę różnych parabol, całkowite pole obszaru, w którym znajduje się swobodny beton, wynosi:

$$A_u = \sum_{j=1}^4 \frac{(w'_j)^2}{6} = \frac{b'^2 + d'^2}{3}, \quad (6.31)$$

gdzie w'_j jest czystą odległością między zaokrąglonymi rogami. Wówczas współczynnik efektywności k_e jest zależny od stosunku $(A_c - A_u)/A_c$ i przyjmowany jest jako:

$$k_e = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3A_g(1 - \rho_{sg})}. \quad (6.32)$$

Podobnie do równania dla przekroju kołowego, boczne ciśnienia wywołwane opasaniem FRP dla kwadratowych lub prostokątnych przekrojów, wynoszą:

$$\sigma_{lx} = K_{confx} \varepsilon_{ju}, \quad z \quad K_{confx} = \rho_{jx} k_e E_j \quad \text{oraz} \quad (6.33)$$

$$\sigma_{ly} = K_{confy} \varepsilon_{ju}, \quad z \quad K_{confy} = \rho_{jy} k_e E_j,$$

gdzie współczynniki ρ_{jx} i ρ_{jy} reprezentują geometryczne współczynniki rozdziału działania opasania na kierunki x i y, które można przyjąć jako:

$$\rho_{jx} = \frac{2b_j t_j}{sd} \quad \text{oraz} \quad \rho_{jy} = \frac{2b_j t_j}{sb}. \quad (6.34)$$

7. WARUNKI OGÓLNE I TECHNOLOGICZNE

7.1. Wymagania ogólne

Projektowanie wzmocnienia, kierowanie robotami wzmocniającymi oraz nadzór nad nimi mogą wykonywać osoby przeszkolone na specjalistycznych kursach przeprowadzanych przez IBDiM.

Wzmocnianie konstrukcji może być wykonywane na podstawie dokumentacji technicznej przez firmy budowlane, posiadające odpowiednio przeszkolony personel.

Do wzmocniania mogą być użyte materiały, określone w aktualnych normach polskich lub mające ważne aprobaty techniczne, wydane przez IBDiM.

Projekt wzmocnienia i warunki wykonywania wzmocnienia powinny być całkowicie zgodne z aprobatami technicznymi.

Zaleca się wykonywanie wzmocnienia przy maksymalnie możliwym odciążeniu konstrukcji.

7.2. Warunki stosowania wzmocnienia

Bezwzględnie należy opracować projekt uwzględniający właściwości połączeń klejowych w zakresie technologicznym, konstrukcyjnym i obliczeniowym z analizą statyczną i wytrzymałościową uwzględniającą obciążenia mostu w czasie wzmocnienia i po wzmocnieniu.

Decyzja o wyborze sposobu wzmocnienia powinna być podjęta na podstawie rozważenia koncepcji wzmocnienia według przynajmniej dwóch wariantów (technologicznych np. I wariant przez przyklejanie dodatkowego zbrojenia i II wariant przez sprężenie konstrukcji). Należy wziąć pod uwagę kryteria techniczne, ekonomiczne, funkcjonalne, technologiczne i środowiskowe.

Przed przystąpieniem do projektowania wzmocnienia należy określić stan techniczny obiektu a zwłaszcza określić klasę i właściwości betonu każdego wzmocnianego elementu.

Przystąpienie do projektowania wzmocnienia powinno także poprzedzić określenie gatunku stali, położenia i stanu technicznego uzbrojenia wewnętrznego, określenie głębokości i stopnia karbonatyzacji betonu oraz położenie, przebieg i rozwartości rys.

7.3. Wymagania dotyczące konstrukcji wzmocnianych (betonowych)

W przypadku wzmocniania materiałami kompozytowymi beton powinien odpowiadać co najmniej klasie C20/25.

W przypadku wzmocniania płaskownikami stalowymi beton powinien odpowiadać co najmniej klasie C17,5/20.

W przypadku wzmocniania taśmami kompozytowymi powierzchniowa wytrzymałość betonu na rozciąganie powinna spełniać warunek $f_{ctm} \geq 1,5$ Mpa, zaś przy wzmocnianiu matami $f_{ctm} \geq 1,0$ Mpa. Wielkość f_{ctm} należy określać (np. metodą „pull – off”) w każdym wzmocnianym elemencie w co najmniej 5 punktach w strefach zakotwień przyklejanego zbrojenia zewnętrznego.

W żadnym przypadku nie można kleić zbrojenia wzmocniającego bezpośrednio na odsłonięte pręty zbrojeniowe. Minimalna dopuszczona grubość otuliny wynosi 10,0 mm.

Powierzchnia betonu przed przyklejeniem elementu wzmocniającego musi być pozbawiona powłok ochronnych, czysta, wolna od zapyleń i zatłuszczeń.

Wartość pH betonu powinna wynosić powyżej 9. Głębokość karbonatyzacji nie może być większa od grubości otuliny zbrojenia.

W zależności od rodzaju użytej zaprawy klejowej należy przed przyklejeniem zbrojenia zewnętrznego zapewnić odpowiednią wilgotność podłoża betonowego.

7.4. Wymagania dotyczące elementów stalowych

Płaskowniki stalowe, płyty dociskowe, kotwiące itp. należy wykonywać ze stali: S235 lub S355.

Kotwy śrubowe należy wykonywać ze stali o klasie wytrzymałości: 4.6; 5.6; 8.8; lub 10.9.

Czystość powierzchni stalowych, przeznaczonych do zabezpieczenia antykorozyjnego powinna być zgodna z wymaganiami określonego środka antykorozyjnego.

Czystość powierzchni stalowych, przeznaczonych do przyklejenia powinna być zgodna z wymaganiami określonej zaprawy klejowej.

Połączenia spawane elementów stalowych mogą być wykonywane jedynie przez zakłady lub przedsiębiorstwa posiadające ważne dopuszczenie Komisji Kwalifikacyjnej Ministerstwa.

Roboty spawalnicze na przyklejonych elementach stalowych są niedopuszczalne.

Płaskowniki i inne elementy stalowe po wzmocnieniu należy zabezpieczyć przed korozją zgodnie z zasadami podanymi w „Zaleceniach do wykonania i odbioru antykorozyjnych zabezpieczeń konstrukcji stalowych drogowych obiektów mostowych.”

7.5. Wymagania dotyczące materiałów kompozytowych

Dla wyrównania nierówności (reprofilacji) i wypełniania ubytków w elementach betonowych należy stosować specjalistyczne materiały kompatybilne z klejem, dopuszczone aktualnymi aprobatami technicznymi IBDiM.

Materiały muszą spełniać wymagania określone w aprobaty technicznych.

7.6 Wykonanie

7.6.1. Przygotowanie podłoża betonowego przed klejeniem

Powierzchnia betonu, na której będą przyklejone płaskowniki stalowe lub taśmy kompozytowe powinna być oczyszczona i specjalnie przygotowana.

Najbardziej odpowiednim sposobem przygotowania powierzchni betonu jest oczyszczenie strumieniowo - ściernie (piaskowanie). Zapewnia ono nie tylko odspojenie wszystkich słabo związanych z podłożem cząstek betonu lub kruszywa, ale także poprzez wytwarzanie lokalnych nierówności o głębokości 0,5 - 1,0 mm, daje właściwą szorstkość powierzchni. Tak przygotowana powierzchnia zapewnia doskonałą przyczepność z zaprawą klejową. Ostre piaskowanie powierzchni betonu umożliwia także właściwą jego ocenę np. łatwiej uwidaczniają się rysy i spękania które należy zainiektować przed przyklejeniem elementów wzmocniających.

Bardzo istotne jest końcowe wyrównanie i zatarcie zewnętrznej warstwy zaprawy naprawczej. Przy niewłaściwej pielęgnacji i złym zatarciu powstaje na powierzchni warstewka słabo związanego drobnego piasku, która powoduje, że wytrzymałość powierzchniowa betonu na rozciąganie f_{ctm} jest prawie zerowa. W takich przypadkach należy powierzchnię przeszlifować aż do całkowitego usunięcia warstwy piasku i uzyskania zadowalających wyników badania f_{ctm} .

Ostatnim zabiegiem, wykonywanym bezpośrednio przed klejeniem powinno być dokładne oczyszczenie całej powierzchni betonu oraz jej odkurzenie, a w razie potrzeby, odtłuszczenie.

W celu dokładnego przyklejenia taśmy w projektowanym miejscu pomocne jest wcześniejsze naniesienie odpowiednich znaków na betonie, pozwalających na dokładną lokalizację położenia taśmy.

7.6.2. Naprawa betonu wzmacnianych elementów mostu

Przed przystąpieniem do klejenia elementów wzmacniających należy wykonać naprawę uszkodzonych części konstrukcji.

W miejscach gdzie beton jest znacznie skorodowany, należy go usunąć zgodnie z ogólnie przyjętymi zasadami naprawy elementów żelbetowych.

Po usunięciu zniszczonego betonu, a przed naprawą, powierzchnia konstrukcji wzmacnianej powinna być oczyszczona przez piaskowanie.

Następnie należy oczyścić odsłonięte zbrojenie, wykonać jego zabezpieczenie, warstwę szepną oraz wypełnienie ubytków betonu i odtworzenie odpowiedniej otuliny zbrojenia. Prace te muszą zostać wykonane co najmniej na 1 dzień przed klejeniem, aby materiały zastosowane do naprawy, nabrały odpowiedniej wytrzymałości. W przypadku stwierdzenia znacznych (nie przewidzianych w projekcie) ubytków zbrojenia należy powiadomić o tym jednostkę projektową.

Wszystkie rysy w betonie powinny być zamknięte lub zainiektowane.

7.6.3. Reprofilacja betonu wzmacnianych elementów mostu

Powierzchnia kontaktowa betonu przygotowana do klejenia musi być równa. Dopuszcza się nierówność mniejszą od 3,0 mm na długości 1,0 m.

Powierzchnia kontaktowa betonu przygotowana do klejenia musi być wolna od lokalnych ubytków.

Tam gdzie nie są spełnione powyższe warunki przed przyklejeniem płaskowników stalowych lub taśm kompozytowych w projektowanych miejscach, w celu uzyskania właściwego podłoża do klejenia należy wykonać reprofilację powierzchni betonu.

Reprofilację wykonuje się stosując odpowiednią warstwę wyrównawczą o grubości do 30 mm i szerokości około 5 cm większej od szerokości płaskowników stalowych lub taśm kompozytowych, przewidzianych do przyklejenia na danym odcinku.

7.6.4. Przygotowanie zaprawy klejowej

Zaprawę klejową należy wykonać zgodnie z zaleceniami producenta lub zgodnie z projektem technologicznym. Temperatura powietrza (jeśli zalecenia producenta nie nakazują inaczej) powinna być wyższa od +5°C i wyższa o 3°C od temperatury punktu rosy.

Początek twardnienia zaprawy klejowej następuje bezpośrednio po zmieszaniu żywicy z utwardzaczem. Średni czas twardnienia (obróbki) przy temperaturze +30 °C wynosi zazwyczaj około 30 minut. Przy niższych temperaturach czas ten wydłuża się. Dlatego, każdorazowo należy przygotowywać taką porcję zaprawy klejowej, jaką można rozprowadzić w czasie jej wiązania przy danej temperaturze. Zastosowanie kontrolowanego podgrzewania taśm i mat CFRP, kleju i podłoża systemem elektrycznym oporowym, pozwala czas ten nie tylko zachować, ale i znacznie skrócić.

7.6.5. Przygotowanie płaskowników lub taśm i mat kompozytowych

Płaskowniki stalowe przed przyklejeniem należy dokładnie oczyścić i odtłuścić.

Taśmy kompozytowe należy pociąć na odpowiednie odcinki (**nie wolno ciąć taśmy wzdłuż !**), np. szlifierką kątową lub piłą do metalu, a następnie oczyścić specjalnym rozpuszczalnikiem, usuwając z jej powierzchni pył węglowy i inne zanieczyszczenia. Z wierzchniej powierzchni taśm, na które będą przyklejane kolejne taśmy, tworzące drugą warstwę, należy usunąć (zeszlifować) folię z nadrukami firmowymi. Prace przy oczyszczeniu materiałów kompozytowych z włókien węglowych, w czasie nakładania kleju oraz ich aplikacji należy wykonywać w czystych, gumowych rękawicach ochronnych.

Matę kompozytową należy odmierzyć i przyciąć do wymaganego wymiaru (**jedynie dotyczy to długości**) przy użyciu bardzo ostrych nożyc krawieckich. **Nie można zaginać maty!** Bezpośrednio przed aplikacją zaleca się oczyszczenie maty jasną, flanelową szmatką nasączoną firmowym środkiem czyszczącym. Przed przyklejeniem odczekać do odparowania materiału czyszczącego. Na macie nie może być zmarszczek ani zagięć.

7.6.6. Klejenie płaskowników stalowych

Przy klejeniu płaskowników stalowych zaprawę klejową nakłada się tylko na płaskownik.

Po przygotowaniu odpowiedniej ilości zaprawy klejowej można przystąpić do jej nakładania na przygotowaną powierzchnię płaskownika. Nakładanie zaprawy klejowej należy rozpocząć bezpośrednio po końcowym oczyszczeniu powierzchni przez odkurzenie i odtuszczenie. Zaprawę klejową należy nakładać kielnią lub szpachelką.

Średnia grubość nałożonej na płaskownik warstwy zaprawy klejowej powinna wynosić około 2mm.

Po nałożeniu zaprawy płaskowniki na całej ich długości należy docisnąć do betonu i jednocześnie wykonać sprężenie zakotwień.

Nadmiar zaprawy klejowej (wyciśniętej ze skleiny) należy usunąć szpachelką. Po przyklejeniu krawędzie płaskowników powinny być dokładnie sprawdzone, a ewentualne lokalne braki zaprawy klejowej powinny być od razu uzupełnione przez wciśnięcie jej szpachelką.

Docisk technologiczny może być zwolniony po stwardnieniu zaprawy klejowej.

7.6.7. Klejenie taśm kompozytowych

Po przygotowaniu odpowiedniej ilości zaprawy klejowej można przystąpić do jej nakładania na przygotowaną powierzchnię betonu (lub na powierzchnię zaprawy naprawczej).

Nakładanie zaprawy klejowej należy rozpocząć bezpośrednio po końcowym oczyszczeniu powierzchni przez szczotkowanie i odkurzenie.

Zaprawę klejową należy nakładać kielnią lub szpachelką na szerokości około 2 - 3 cm większej od szerokości klejonej taśmy. Nadmiar zaprawy klejowej należy zgarniać (można jej użyć ponownie). Średnia grubość nałożonej na beton warstwy zaprawy klejowej powinna wynosić około 1 mm.

Następnie należy przystąpić do nakładania zaprawy klejowej na wybrany odcinek taśmy. Przycięty na odpowiednią długość, oczyszczony i osuszony odcinek taśmy należy położyć na specjalnym stole, w środku którego powinna znajdować się prowadnica do nakładania zaprawy klejowej. Zaprawę nakłada się na taśmę umieszczoną jednym końcem w prowadnicy. Jednostajny przesuw taśmy pod ostrzem umocowanej w prowadnicy szpachelki powoduje równomierne rozkładanie zaprawy klejowej na całej powierzchni taśmy.

Nakładana warstwa zaprawy powinna mieć kształt "daszku" o grubości od 1 mm na krawędzi do 2,5 mm w środku. Uzyskuje się to, wycinając odpowiednio krawędź szpachelki zgarniającej. Po nałożeniu zaprawy klejowej na całym odcinku taśmy należy przystąpić do jej przyklejania do powierzchni betonu.

Gdy klejenie odbywa się w pozycji sufitowej, niezbędne jest, aby tę operację wykonywało jednocześnie kilku ludzi. Należy przewidzieć do obsługi klejenia minimum jedną osobę na każde 2 metry długości taśmy. Zapewnia to poprawność przyłożenia taśmy do betonu i właściwy czas jej przyklejania.

Po przyłożeniu taśmy do betonu każdy z pracowników obsługujących klejenie powinien za pomocą wałka z twardej gumy, osadzonego w sztywnej ręczce, mocno docisnąć taśmę do podłoża, powodując

wyciśnięcie nadmiaru zaprawy klejowej na boki. "Daszkowy" kształt warstwy zaprawy klejowej zapewnia całkowite usunięcie powietrza ze skleiny podczas dociskania jej wałkami. Nadmiar zaprawy klejowej należy usunąć szpachelką.

Po wstępnym stwardnieniu zaprawy klejowej, oraz bezpośrednio przed nałożeniem powłoki ochronnej taśmę należy przetrzeć specjalnym materiałem czyszczącym. W przypadku pokrywania taśm lub mat zaprawami mineralnymi, po wstępnym utwardzeniu kleju, należy nałożyć cienką warstwę kleju od zewnątrz, a następnie zasypać piaskiem kwarcowym. Jeżeli taśmy nie mają być pokryte żadną warstwą, z ewentualnych zabrudzeń klejem należy oczyścić je ze względów estetycznych.

Po przyklejeniu krawędzie taśmy powinny być dokładnie sprawdzone, a ewentualne lokalne braki zaprawy klejowej należy od razu uzupełnić przez wciśnięcie jej szpachelką. Jest to istotne szczególnie na końcowych odcinkach taśm.

7.6.8. Klejenie mat kompozytowych

Maty należy przyklejać na powierzchni betonu, oczyszczonej przez piaskowanie, odtłuszczonej i wolnej od innych zanieczyszczeń.

Nierówności powierzchni betonowej (w formie uskoku), przygotowanej do klejenia maty nie powinny być większe od 1 mm.

Podczas przyklejania mat CFRP w pierwszej kolejności należy na powierzchni elementu wzmacnianego rozprowadzić klej, na którym wałkiem należy przykleić odpowiedni arkusz maty. Po przyklejeniu maty należy na nią płaskim pędzlem nałożyć zewnętrzną warstwę kleju. Powinna być ona nałożona bezpośrednio po przyklejeniu maty przed polimeryzacją pierwszej warstwy kleju.

7.7. Badania kontrolne podczas wykonywania klejenia zbrojenia zewnętrznego

7.7.1. Założenia ogólne

Wszystkie materiały użyte do robót powinny być sprawdzone. Badania należy wykonać zgodnie z odpowiednimi aprobatami technicznymi i Szczegółowymi Specyfikacjami Technicznymi (SST).

7.7.2. Badania podłoża

Pierwsza grupa badań dotyczy jakości przygotowania powierzchni betonu. Po zakończeniu obróbki strumieniowo - ścierniej powierzchnia powinna być poddana gruntownym oględzinom wzrokowym, w poszukiwaniu słabo związanych cząstek, rys lub wtrąceń obcego materiału np. drewna.

Następny krok to przeprowadzenie badania wytrzymałości powierzchniowej betonu na rozciąganie f_{ctm} metodą „pull – off”.

W przypadku, gdy zbrojenie zewnętrzne jest klejone na podłożu naprawianym, należy dodatkowo przeprowadzić badanie sprawdzające jakość połączenia warstwy naprawczej ze starym betonem.

Kolejnym badaniem powierzchni jest kontrola jej płaskości. Wykonuje się ją zazwyczaj za pomocą metalowej łąty o minimalnej długości 1 m. Dopuszczalne maksymalne odchylenie powierzchni betonu od poziomu na długości 1 m wynosi 3 mm.

W czasie klejenia muszą panować odpowiednie warunki atmosferyczne. Konieczna jest stała kontrola (monitorowanie) temperatury i wilgotności powietrza. Jest to szczególnie ważne w przypadku wzmacniania obiektów nad rzekami lub akwenami wodnymi. Niezbędne jest wówczas określanie temperatury punktu rosy z częstotliwością 3 - 4 razy dziennie. Klejenie powinno być wstrzymane, gdy temperatura powietrza nie jest wyższa o minimum 3°C od temperatury punktu rosy. Temperatura powietrza (otoczenia) podczas klejenia i przez następne 72 godziny nie powinna być niższa niż +5°C. Klejenie dopuszcza się przy wilgotności względnej powietrza poniżej 80%, a wilgotność betonu powinna wynosić poniżej 4%.

Poprawność przygotowania powierzchni do klejenia powinna być potwierdzona protokolarnie.

7.7.3. Kontrola poprawności klejenia.

W celu stwierdzenia prawidłowości przyklejenia płaskowników stalowych lub taśm albo mat kompozytowych należy po ich przyklejeniu i stwardnieniu kleju poddać dokładnym oględzinom.

Możliwość wystąpienia pustek pod przyklejonym zbrojeniem sprawdza się przez ostukiwanie zbrojenia lekkim młotkiem. Każdorazowo, po znalezieniu takich niedoróbek należy rozważyć, czy nie istnieje konieczność dodatkowej iniekcji kleju. Zależy to od rozmiaru pustki oraz jej położenia. Decyzję o tym powinien podjąć nadzór autorski.

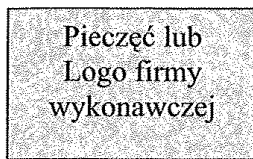
Dla sprawdzenia jakości i skuteczności przyklejenia taśm kompozytowych do powierzchni wzmocnianego elementu przykleja się małe odcinki taśm w miejscach o identycznie przygotowanym podłożu, lecz poza strefą wzmocnienia. Na przyklejonych odcinkach taśm wykonuje się standardowe próby „pull – off”. Jako wynik pozytywny traktuje się oderwanie próbki w betonie (zaprawie), nie w sklecinie. Na przełomie odebranej próbki nie dopuszcza się śladów kleju.

Końcowe badanie wizualne obejmuje także kontrolę równości powierzchni przyklejonych płaskowników i taśm kompozytowych. Nierówność płaskowników stalowych nie powinna przekraczać 1mm/30cm. Dla taśm kompozytowych stosuje się te same tolerancje jak przy sprawdzaniu płaskości powierzchni betonu.

Poprawność przyklejenia powinna być potwierdzona protokolarnie. Przykłady protokołów przedstawiono w załącznikach 1 – 4.

Załącznik 1

**KARTA ODBIORU PRZYGOTOWANIA POWIERZCHNI
BETONU***



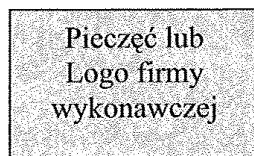
OBIEKT: *wiadukt drogowy w ciągu drogi Nr717 nad
linią PKP w miejscowości Sochaczew*

Termin rozpoczęcia.....godz.....		Termin zakończenia.....godz.....	
Miejsce wykonania	<i>Spód belki korytkowej nr 5 przęsła nr 7 wiaduktu</i>		
Rodzaj powierzchni	<i>Beton C30</i>		
Powierzchniowa wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	<i>Minimalna pomierzona wartość 1,95MPa, Średnia wartość 2,75 MPa</i>		
Równość powierzchni [mm/1m]	<i>Max.: 3,5 mm</i>		
Głębokość lokalnych ubytków [mm]	<i>Poniżej 2,0 mm</i>		
Metoda	<i>Piaskowanie (piaskiem grubym) i szlifowanie tarczami, bez reprofilacji</i>		
Odpylenie	<i>Dmuchanie sprężonym powietrzem</i>		
Zagruntowanie powierzchni betonu i ewent. (zbrojenia)	<i>Pomalowanie powierzchni żywicą epoksydową. Zbrojenie wewnętrzne nie odsłonięte</i>		
Uwagi: <i>Wytrzymałość powierzchniowa wystarczająca, równość powierzchni w granicach dopuszczalnych, powierzchnia przygotowana właściwie.</i>			
Podpisy:	Inspektor nadzoru		Wykonawca
Data: 14.08.2006	.....		.....

**/ tekst pisany kursywą i niebieską czcionką podano jako przykład*

Załącznik 2

KARTA ODBIORU PRZYKLEJENIA TAŚM LUB MAT KOMPOZYTOWYCH*



OBIEKT: *wiadukt drogowy w ciągu drogi Nr717 nad
linią PKP w miejscowości Sochaczew*

Termin rozpoczęcia.....godz.....		Termin zakończenia.....godz.....		
Miejsce wykonania	<i>Spód belki korytkowej nr 5 przęsła nr 7 wiaduktu</i>			
Rodzaj kompozytu	<i>Taśma Sika Carbo Dur M1214 Zaprawa klejowa Sikadur 30</i>			
Temperatura powietrza [°C]	godzina	8 ⁰⁰	14 ⁰⁰	19 ⁰⁰
	dzień			
	<i>15.08.2006</i>	<i>17,0 °C</i>	<i>20,0 °C</i>	<i>18,5 °C</i>
	<i>16.08.2006</i>	<i>14,8 °C</i>	<i>19,3 °C</i>	<i>17,8 °C</i>
	<i>17.08.2006</i>	<i>19,6 °C</i>	<i>24,2 °C</i>	<i>22,0 °C</i>
	<i>18.08.2006</i>	<i>20,0 °C</i>	<i>25,3 °C</i>	<i>21,0 °C</i>
Wilgotność betonu [%]	<i>(W czasie klejenia) 2,25%</i>			
Wilgotność względna powietrza [%]	<i>(W czasie klejenia) 55%</i>			
Temperatura punktu rosy [°C]	<i>(W czasie klejenia) 10 °C</i>			
Poprawność przyklejenia	Wyniki "pull-off" na taśmach próbnych		<i>Oderwanie próbki w betonie $f_{ctm}=2,2MPa$</i>	
	Występowanie pustek		<i>Brak</i>	
	Równość powierzchni kompozytu [mm/1m]		<i>2mm/1m</i>	
Uwagi: <i>Warunki klejenia i przyklejenie taśm prawidłowe</i>				
Podpisy:	Inspektor nadzoru		Wykonawca	
Data: <i>19.08.2006</i>	.....		.....

**/ tekst pisany kursywą i niebieską czcionką podano jako przykład*

Załącznik 3

KARTA ODBIORU PRZYKLEJENIA PŁASKOWNIKÓW STAŁOWYCH*

Pieczęć lub
Logo firmy
wykonawczej

OBIEKT: *wiadukt drogowy w ciągu drogi Nr717 nad
linią PKP w miejscowości Sochaczew*

Termin rozpoczęcia.....godz.....		Termin zakończenia.....godz.....		
Miejsce wykonania	<i>Spód belki korytkowej nr 5 przęsła nr 7 wiaduktu</i>			
Materiały	<i>Płaskownik 150x12x12000 - Stal S355J2G3</i>			
	<i>Kotwy M20 klasy 8.8</i>			
	<i>Zaprawa klejowa Ombran EH 20</i>			
Temperatura powietrza [°C]	godzina	8 ⁰⁰	14 ⁰⁰	19 ⁰⁰
	dzień			
	<i>15.08.2006</i>	<i>17,0 °C</i>	<i>20,0 °C</i>	<i>18,5 °C</i>
	<i>16.08.2006</i>	<i>14,8 °C</i>	<i>19,3 °C</i>	<i>17,8 °C</i>
	<i>17.08.2006</i>	<i>19,6 °C</i>	<i>24,2 °C</i>	<i>22,0 °C</i>
	<i>18.08.2006</i>	<i>20,0 °C</i>	<i>25,3 °C</i>	<i>21,0 °C</i>
Wilgotność betonu [%]	<i>(W czasie klejenia)3,25%</i>			
Wilgotność względna powietrza [%]	<i>(W czasie klejenia) 65%</i>			
Temperatura punktu rosy [°C]	<i>(W czasie klejenia)10 °C</i>			
Poprawność przyklejenia	Występowanie pustek	<i>Brak</i>		
	Prostoliniowość [mm/30cm]	<i><0,5mm/30cm</i>		
<i>Uwagi: Warunki klejenia i przyklejenie płaskowników prawidłowe</i>				
Podpisy:	Inspektor nadzoru		Wykonawca	
Data:	<i>19.08.2006</i>	.....	.....	.....

**/ tekst pisany kursywą i niebieską czcionką podano jako przykład*

Załącznik 4

KARTA ODBIORU WKLEJENIA KOTEW STALOWYCH*

Pieczęć lub
Logo firmy
wykonawczej

OBIEKT: *wiadukt drogowy w ciągu drogi Nr717 nad
linią PKP w miejscowości Sochaczew*

Termin rozpoczęcia.....godz.....		Termin zakończenia.....godz.....		
Miejsce wykonania	<i>Spód belki korytkowej nr 5 przęsła nr 7 wiaduktu</i>			
Materiały	<i>Kotwy M20 klasy 8.8</i>			
	<i>Zaprawa klejowa Ombran EH 20</i>			
Temperatura powietrza [°C]	godzina	8 ⁰⁰	14 ⁰⁰	19 ⁰⁰
	dzień			
	<i>16.08.2006</i>	<i>17,0 °C</i>	<i>22,0 °C</i>	<i>20,5 °C</i>
	<i>15.08.2006</i>	<i>15,8 °C</i>	<i>21,3 °C</i>	<i>19,8 °C</i>
	<i>13.08.2006</i>	<i>20,6 °C</i>	<i>24,2 °C</i>	<i>22,0 °C</i>
	<i>14.08.2006</i>	<i>21,0 °C</i>	<i>25,3 °C</i>	<i>21,0 °C</i>
Wilgotność betonu [%]	<i>(W czasie klejenia)3,25%</i>			
Wilgotność względna powietrza [%]	<i>(W czasie klejenia) 65%</i>			
Temperatura punktu rosy [°C]	<i>(W czasie klejenia)11 °C</i>			
Poprawność wklejenia	Oczyszczenie otworów	<i>Przedmuchiwanie sprężonym powietrzem i odtłuszczenie acetonem</i>		
	Głębokość otworów	<i>Powyżej o 4mm od zadanej w projekcie</i>		
Uwagi: <i>Warunki i wklejenie kotew prawidłowe</i>				
Podpisy:	Inspektor nadzoru		Wykonawca	
Data:	<i>16.08.2006</i>	.....	.....	.....

*/ tekst pisany kursywą i niebieską czcionką podano jako przykład

1. Wprowadzenie.....	3
2. Podstawowe określenia i oznaczenia.....	3
2.1. Określenia.....	3
2.2. Podstawowe oznaczenia.....	4
3. Materiały stalowe i kompozytowe FRP przydatne przy wzmacnianiu konstrukcji mostowych	6
3.1. Uwagi ogólne dotyczące FRP	6
3.2. Kleje	6
3.3. Matryce.....	7
3.4. Włókna	7
3.5. Materiały kompozytowe.....	8
3.6. Płaskowniki stalowe	10
3.7. Kotwy	11
4. Systemy wzmacniania konstrukcji zewnętrznie przyklejonymi materiałami.....	11
4.1. Uwagi ogólne	11
4.2. Aplikacja mat i arkuszy.....	11
4.3. Elementy prefabrykowane.....	13
4.4. Możliwości wzmacniania konstrukcji kompozytami wstępnie sprężonymi	14
4.4.1. Wzmacnianie ustrojów nośnych sprężonymi taśmami CFRP	14
4.4.2. Wzmacnianie słupów sprężonymi elementami FRP.....	15
5. ANALIZA I OBLICZANIE WZMOCNIEŃ	16
5.1. Zginanie.....	16
5.1.1. Uwagi ogólne	16
5.1.2. Parametry materiałowe.....	16
5.1.3. Modele zniszczenia.....	17
5.1.4. Stan graniczny nośności	18
5.1.5. Stan graniczny użyteczności	21
5.1.6. Delaminacja	24
5.2. Ścinanie	26
5.2.1. Zależności ogólne	26
5.2.2. Uproszczenia projektowe	29
5.3. Strefa Zakotwienia	32
6. Wzmacnianie słupów z zastosowaniem taśm FRP oraz mat aramidowych, węglowych i szklanych.....	38
6.1. Określenie zachowania się betonu w słupach owiniętych materiałami FRP	38
6.1.1. Oddziaływanie pancerza kompozytowego	38
6.1.2. Naprężenia i odkształcenia opasanego betonu	39
6.2. Zagadnienia związane ze wzmacnianiem słupów prostokątnych i kołowych	39
6.3. Efektywność bocznego ciśnienia opasania kompozytowego FRP.....	42
7. WARUNKI OGÓLNE I TECHNOLOGICZNE.....	45
7.1. Wymagania ogólne.....	45
7.2. Warunki stosowania wzmocnienia.....	45
7.3. Wymagania dotyczące konstrukcji wzmacnianych (betonowych)	46
7.4. Wymagania dotyczące elementów stalowych.....	46
7.5. Wymagania dotyczące materiałów kompozytowych.....	46
7.6. Wykonanie	46
7.6.1. Przygotowanie podłoża betonowego przed klejeniem.....	46
7.6.2. Naprawa betonu wzmacnianych elementów mostu.....	47
7.6.3. Reprofilacja betonu wzmacnianych elementów mostu.....	47
7.6.4. Przygotowanie zaprawy klejowej.....	47

7.6.5. Przygotowanie płaskowników lub taśm i mat kompozytowych	47
7.6.6. Klejenie płaskowników stalowych	48
7.6.7. Klejenie taśm kompozytowych	48
7.6.8. Klejenie mat kompozytowych.....	49
7.7. Badania kontrolne podczas wykonywania klejenia zbrojenia zewnętrznego	49
7.7.1. Założenia ogólne	49
7.7.2. Badania podłoża	49
7.7.3. Kontrola poprawności klejenia.....	50
Załącznik 1	51
Załącznik 2	52
Załącznik 3	53
Załącznik 4	54

