

INSTYTUT BUDOWNICTWA
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ
Raport serii PRE nr... 22/04...

**NOŚNOŚĆ ŻELBETOWYCH SŁUPÓW
WZMACNIANYCH TAŚMAMI I MATAMI
Z WŁÓKIEN WĘGLOWYCH**

Tomasz TRAPKO

Rozprawa Doktorska

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Mieczysław KAMIŃSKI

Słowa kluczowe:

słup; ściskanie; nośność; wzmacnianie; CFRP

Wrocław, 2004

Pracę dedykuję moim Najbliższym

1. WSTĘP.....	8
1.1. Geneza tematu.....	8
1.2. Przedmiot, cel i zakres pracy.....	10
2. AKTUALNY STAN WIEDZY – PRZEGLĄD LITERATURY.....	12
2.1. Przyczyny wzmocnienia konstrukcji żelbetowych.....	12
2.2. Klasyfikacja metod wzmocnienia konstrukcji inżynierskich.....	13
2.3. Tradycyjne metody wzmocnienia słupów żelbetowych.....	15
2.3.1 Wzmocnienie poprzez zwiększanie przekroju poprzecznego.....	15
2.3.2 Wzmocnienie poprzez zmianę schematu statycznego konstrukcji.....	17
2.4. Materiały kompozytowe – nowy sposób wzmocnienia konstrukcji inżynierskich.....	18
2.4.1. Wiadomości ogólne.....	18
2.4.2. Technologia wzmocnienia i zastosowanie.....	21
2.5. Przegląd badań elementów ściskanych wzmocnianych materiałami FRP.....	24
2.5.1. Badania próbek betonowych.....	24
2.5.2. Badania słupów żelbetowych.....	31
2.6. Podsumowanie.....	44
3. TEZY PRACY.....	47
4. BADANIA DOŚWIADCZALNE.....	48
4.1. Zakres badań.....	48
4.2. Badania doświadczalne – etap I.....	51
4.2.1. Cel badań. Program badań.....	51
4.2.2. Wykonanie i przygotowanie elementów badawczych.....	52
4.2.3. Cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe materiałów.....	55
a) Beton.....	55
4.2.4. Metodyka badań.....	56
4.2.5. Wyniki badań doświadczalnych w etapie I.....	57
a) Nośność graniczna słupów.....	58
b) Odkształcenia podłużne betonu.....	59
c) Odkształcenia podłużne taśm CFRP.....	59
4.2.6. Wnioski z badań doświadczalnych w etapie I.....	60
4.3. Badania doświadczalne – etap IIa.....	62
4.3.1. Cel badań. Program badań.....	62
4.3.2. Wykonanie i przygotowanie elementów badawczych.....	63
4.3.3. Cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe materiałów.....	65

a) Beton.....	65
b) Stal zbrojeniowa.....	66
c) Materiały CFRP.....	69
4.3.4. Metodyka badań.....	73
4.3.5. Wyniki badań doświadczalnych w etapie IIa.....	76
a) Nośność graniczna słupów.....	76
b) Odształcenia podłużne słupów.....	79
4.4. Badania doświadczalne – etap IIb.....	85
4.4.1. Cel badań. Program badań.....	85
4.4.2. Wykonanie i przygotowanie elementów badawczych.....	86
4.4.3. Cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe materiałów.....	88
a) Beton.....	88
b) Stal zbrojeniowa.....	89
c) Materiały CFRP.....	89
4.4.4. Metodyka badań.....	90
4.4.5. Wyniki badań doświadczalnych w etapie IIb.....	91
a) Nośność graniczna słupów.....	94
b) Odształcenia podłużne słupów.....	97
c) Współczynnik sprężystości betonu.....	100
d) Odształcenia poprzeczne słupów.....	101
e) Rozkład odkształceń na grubości elementu.....	103
4.4.6. Wnioski z badań doświadczalnych w etapach IIa i IIb.....	105
4.5. Badania doświadczalne – etap III.....	108
4.5.1. Cel badań. Program badań.....	108
4.5.2. Wykonanie i przygotowanie elementów badawczych.....	109
4.5.3. Cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe materiałów.....	112
a) Beton.....	112
b) Stal zbrojeniowa.....	115
c) Materiały CFRP.....	117
4.5.4. Metodyka badań.....	117
4.5.5. Wyniki badań doświadczalnych w etapie III.....	120
a) Nośność graniczna słupów.....	120
b) Odształcalność słupów poddanych ściskaniu osiowemu.....	125
c) Odształcalność słupów poddanych ściskaniu mimośrodowemu.....	129
4.5.6. Wnioski z badań doświadczalnych w etapie III.....	135
4.6. Podsumowanie. Wnioski z badań doświadczalnych.....	137

4.6.1. Intensywność wzmocnienia podłużnego.....	137
4.6.2. Wnioski końcowe z badań doświadczalnych.....	139
5. ANALIZY TEORETYCZNE.....	141
5.1. Wstęp.....	141
5.2. Nośność osiowo ściskanych słupów uzwojonych.....	141
5.2.1. Pierwsze badania doświadczalne i analizy teoretyczne.....	141
5.2.2. Zależność σ - ε dla betonu uzwojonego według teorii Mandera i innych.....	142
5.3. Modele teoretyczne do wymiarowania słupów wzmocnianych materiałami FRP.....	148
5.3.1. Model Wanga.....	148
5.3.2. Model Campione i Miraglia.....	152
5.3.3. Porównanie i ocena modeli.....	156
5.4. Propozycja własna modyfikacji modelu Campione i Miraglia.....	157
5.5. Podsumowanie.....	165
6. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE.....	167
BIBLIOGRAFIA.....	169
ZAŁĄCZNIK NR 1 – Wyniki badań obcych cytowanych w rozdziale II.....	174

Duże litery łacińskie:

- A_c – pole powierzchni przekroju betonu,
- A_L – pole powierzchni przekroju taśm kompozytowych,
- A_s – pole powierzchni przekroju zbrojenia podłużnego,
- A_w – pole powierzchni przekroju maty kompozytowej,
- D – średnica elementu o przekroju okrągłym,
- E_{cm} – wartość średnia modułu sprężystości betonu,
- E_L – moduł sprężystości taśmy kompozytowej,
- E_s – moduł sprężystości stali zbrojeniowej,
- E_w – moduł sprężystości maty kompozytowej,
- F_u – maksymalna siła rozciągająca w poprzecznym płaszczy kompozytowym,
- N_u – nośność graniczna,
- P_p – poziom obciążenia próbnego,

Małe litery łacińskie:

- e – mimośród siły podłużnej,
- f_{cc} – maksymalne naprężenia betonu w trójosiowym stanie naprężeń,
- f_{co} – maksymalne naprężenia betonu w jednoosiowym stanie naprężeń,
- f_{cm} – średnia wytrzymałość betonu na ściskanie,
- $f_{cm,cube}$ – średnia wytrzymałość kostkowa betonu na ściskanie,
- $f_{cm,cyl}$ – średnia wytrzymałość słupowa betonu na ściskanie,
- f_{ctm}^{spl} – średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przez rozłupywanie,
- $f_{L,m}$ – średnia wytrzymałość taśmy kompozytowej na rozciąganie,
- f_l – naprężenia poprzeczne powstające na styku betonu i uzwojenia,
- f_t – wytrzymałość stali zbrojeniowej na rozciąganie,
- f_{wm} – średnia wytrzymałość maty kompozytowej na rozciąganie,
- f_y – granica plastyczności stali zbrojeniowej,
- k_e – współczynnik efektywności uzwojenia przekroju rdzenia betonu,
- r – promień wyokraglenia naroży (sfazowanie naroży),
- t – grubość kompozytu,

Litery greckie:

- ε_{cc} – maksymalne odkształcenia betonu w trójosiowym stanie naprężeń,
- ε_{co} – maksymalne odkształcenia betonu w jednoosiowym stanie naprężeń,
- ε_{cv} – odkształcenia podłużne betonu,

- ε_{ch} – odkształcenia poprzeczne betonu,
- ε_{Lv} – odkształcenia podłużne taśmy kompozytowej,
- ε_{Lh} – odkształcenia poprzeczne taśmy kompozytowej,
- ε_{sv} – odkształcenia zbrojenia podłużnego,
- ε_{wv} – odkształcenia podłużne maty kompozytowej,
- ε_{wh} – odkształcenia poprzeczne maty kompozytowej,
- ν_c – współczynnik Poissona dla betonu,
- ν_L – współczynnik Poissona dla taśmy kompozytowej,
- ρ_L – intensywność wzmocnienia podłużnego ($\rho_L = A_L/A_c$),
- σ_c – naprężenia normalne w betonie,
- σ_L – naprężenia w taśmie kompozytowej,
- σ_s – naprężenia w stali zbrojeniowej,
- σ_w – naprężenia w macie kompozytowej.

1. WSTĘP

1.1. Geneza tematu

Od początku swojego istnienia Zakład Konstrukcji Betonowych Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej wychodził z założenia użytecznego charakteru swojej działalności. Głównym celem projektów badawczych i naukowych realizowanych przez Pracowników i Doktorantów Zakładu są korzyści wynikające z możliwości zastosowania w praktyce inżynierskiej efektów pracy naukowej. Niniejsza rozprawa wpisuje się w zakres działalności Zakładu i stanowi kontynuację całego cyklu dysertacji o charakterze użytecznym. Aktywność zawodowa kadry naukowej Zakładu pokazuje, że problem wzmacniania żelbetowych elementów konstrukcyjnych jest żywo obecny w specjalistycznych ekspertyzach. W związku z tym, coraz częściej i chętniej sięga się po nowe technologie napraw i wzmacniania żelbetowych elementów konstrukcyjnych.

Tematyka wzmacniania konstrukcji inżynierskich z wykorzystaniem materiałów kompozytowych, stanowi w ostatnich kilkunastu latach przedmiot zainteresowania wielu ośrodków naukowych na świecie, a w ostatnich kilku latach również w Polsce. Począwszy od pojawienia się tej technologii, prowadzone były badania doświadczalne – laboratoryjne i poligonowe oraz analizy teoretyczne mające na celu wykazanie skuteczności, doklejania zbrojenia kompozytowego, we wzmacnianiu elementów konstrukcyjnych. Na początku lat osiemdziesiątych minionego stulecia około 30 ośrodków naukowych na świecie pracowało nad programem propagowania stosowania materiałów kompozytowych w inżynierii budowlanej [24]. Obecnie, tylko w naszym kraju jest realizowanych kilka rozpraw doktorskich dotyczących tego tematu. Ze względu na liczne swoje zalety, materiały FRP (Fibre Reinforced Polymers – tworzywa sztuczne wzmocnione włóknami), znajdują coraz szersze zastosowanie przy wzmacnianiu elementów stalowych, drewnianych i żelbetowych. Obecnie do produkcji laminatów, mat, kształtek, prętów i kabli stosowane są trzy typy włókien – aramidowe (AFRP), szklane (GFRP) i węglowe (CFRP).

Materiały CFRP, dzięki swoim zaletom (m.in. wysokiej wytrzymałości na rozciąganie i wytrzymałości zmęczeniowej, odporności na korozję, łatwości i ekonomiczności aplikacji) znalazły najszersze zastosowanie w inżynierii budowlanej, jako doklejane zewnętrzne zbrojenie kompozytowe. Coraz powszechniej wykorzystywane są do wzmacniania elementów żelbetowych narażonych na wpływ zginania i ścinania. Firmy wprowadzające tę technologię

na rynek oraz współpracujące z nimi instytucje naukowe opracowały kompletne rozwiązania systemowe (zestawy materiałów kompozytowych, kleje, zaprawy klejowe, zaprawy do reprofilacji powierzchni), podały wytyczne zastosowania i wykonywania. Stworzone zostały także gotowe narzędzia dla konstruktorów w postaci programów komputerowych do projektowania wzmocnień elementów zginanych i ścinanych. Pomimo to, tematyka ta jest nośna poznawczo i żywo obecna w badaniach naukowych. W naszym kraju głównym ośrodkiem naukowym zajmującym się badaniami elementów żelbetowych wzmocnianych kompozytami węglowymi jest Katedra Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej, gdzie zespół pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Marii Kamińskiej prowadzi badania nośności na zginanie i ścinanie belek żelbetowych [19, 20, 21] oraz nośności ściskanych elementów żelbetowych [14, 15]. Ponadto, badaniami skręcanych elementów żelbetowych wzmocnianych matami z włókien węglowych zajmuje się zespół Katedry Inżynierii Budowlanej Politechniki Śląskiej w Gliwicach [11]. Ostatnio również w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej przeprowadzono badania wzmocnionych belek żelbetowych pod obciążeniem cyklicznym.

W ostatnich kilku latach zaczęto wykorzystywać maty kompozytowe do wzmocniania elementów ściskanych. Metoda ta, polegająca na opasaniu słupa zewnętrznym płaszczem kompozytowym, nawiązuje do klasycznego rozwiązania elementu żelbetowego, mającego uzwojenie w postaci wkładki o kształcie linii śrubowej obejmującej wkładki podłużne. Taki sposób zbrojenia zewnętrznego powoduje przyrost wytrzymałości betonu rdzenia, znajdującego się w trójosiowym stanie naprężeń, co bezpośrednio przekłada się na wzrost nośności elementu. Równolegle z rozpoczęciem badań naukowych, mających na celu poznanie i opisanie wpływu tego typu zbrojenia na cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe elementów ściskanych, wykonano wiele realizacji inżynierskich. Problematyka tematu i szerszy opis badań związanych ze wzmocnianiem słupów żelbetowych, poprzez doklejanie materiałów kompozytowych, zostanie przedstawiony w rozdziale drugim pracy. W tym miejscu należy jeszcze zwrócić uwagę na wyraźne początki światowego rozwoju badań nad wzmocnianiem elementów ściskanych, o których można mówić w przedziale ostatnich pięciu lat, w więc w okresie realizacji niniejszej rozprawy. Przeprowadzone w pracy badania i analizy wpisują się doskonale w zakres tej tematyki i starają się dać odpowiedź na pytanie, jak optymalnie kształtować podłużne i poprzeczne zbrojenie kompozytowe.

Badania doświadczalne w ramach niniejszej rozprawy, zostały przeprowadzone dzięki

finansowemu wsparciu projektu badawczego przez JM Rektora Politechniki Wrocławskiej oraz dzięki ofiarności darczyńców.

1.2. Przedmiot, cel i zakres pracy

Przedmiotem pracy są doświadczalne i teoretyczne badania ściskanych słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami i matami z włókien węglowych. Badaniami objęto elementy żelbetowe – modelowe i w skali naturalnej, wzmocnione odcinkami taśm z włókien węglowych o różnej intensywności wzmocnienia podłużnego oraz o różnym sposobie skonstruowania wzmocnienia poprzecznego. Prace doświadczalne podzielono na cztery etapy badawcze, w których słupy poddawano doraźnemu ściskaniu osiowemu i mimośrodowemu.

Celem pracy jest określenie: wpływu intensywności wzmocnienia podłużnego, sposobu kształtowania zewnętrznego zbrojenia poprzecznego, wpływu poszczególnych składników wzmocnienia (podłużne odcinki taśmy i poprzeczne obejmy z maty) na cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe ściskanych słupów żelbetowych oraz odpowiedź na pytanie, czy podłużne i poprzeczne zbrojenie kompozytowe współdziała z betonem i stałą w przenoszeniu naprężeń ściskających. Poznanie tych cech umożliwiło zmodyfikowanie dotychczas stosowanych modeli matematycznych opisujących zachowania się ściskanych elementów betonowych wzmocnionych zewnętrznym płaszczem FRP. Celem praktycznym pracy jest stworzenie algorytmu (programu) do obliczania nośności krępych słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami i matami z włókien węglowych.

Dla osiągnięcia postawionych celów, wykonano:

- przegląd aktualnego stanu wiedzy, w którym omówiono przyczyny oraz poddano klasyfikacji metody wzmocniania konstrukcji inżynierskich, opisano tradycyjne metody wzmocniania słupów żelbetowych, przedstawiono podstawowe informacje o materiałach FRP i ich wykorzystywaniu do wzmocniania elementów konstrukcyjnych oraz dokonano przeglądu badań doświadczalnych elementów ściskanych wzmocnianych materiałami kompozytowymi,
- badania doświadczalne, weryfikujące postawione tezy oraz obrazujące rzeczywiste zachowanie się słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami i matami z włókien węglowych pod działaniem doraźnego obciążenia osiowego i mimośrodowego; wykonano analizy doświadczalne wpływu wspomnianych wcześniej parametrów na cechy odkształcalnościowe i nośność elementów badawczych.

- analizy teoretyczne, w których omówiono i poddano ocenie znane modele obliczeniowe, dokonano weryfikacji tych metod oraz zaproponowano, na podstawie własnych wyników badań, konieczne modyfikacje w celu dostosowania ich do zdobytego stanu wiedzy; na tej podstawie stworzono algorytm do obliczania nośności elementów będących przedmiotem zainteresowania autora.

2. AKTUALNY STAN WIEDZY – PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. Przyczyny wzmocnienia konstrukcji żelbetowych

Z problemem wzmocnienia konstrukcji żelbetowych mamy do czynienia od momentu, kiedy w budowlach z betonu zachodzi konieczność zmiany ich pierwotnego przeznaczenia lub od momentu, kiedy ulegają one uszkodzeniom w wyniku degradacji betonu lub przeciążenia konstrukcji. Założenia projektowe, obciążenia działające na konstrukcje i jej zabezpieczenia przyjmowane na etapie projektowania wynikają z pierwotnego przeznaczenia budowli. Projektanci żelbetowych konstrukcji nośnych budowli, które powstały kilkadziesiąt lat temu nie byli w stanie przewidzieć, jakiemu przeznaczeniu będą służyć te obiekty i jakie czynniki będą oddziaływać na konstrukcję w okresie jej użytkowania. Niejednokrotnie elementy konstrukcji mogły ulec zniszczeniu lub nadwerżeniu. W efekcie pojawia się konieczność dostosowania konstrukcji do nowych warunków eksploatacji, co oznacza zwykle jej wzmocnienie lub naprawę.

Naprawa i wzmocnianie konstrukcji żelbetowych są dynamicznie rozwijającą się dziedziną inżynierii budowlanej. W ostatnich latach pojawia się coraz więcej nowych systemów napraw i wzmocnień żelbetowych konstrukcji nośnych budowli. Działania mające na celu zwiększenie nośności elementów konstrukcji tak, aby mogła ona przenosić obciążenia na poziomie wyższym od pierwotnie przyjmowanego nazywamy wzmocnianiem konstrukcji, natomiast zabiegi mające na celu doprowadzenia zniszczonych lub uszkodzonych elementów konstrukcji do takiego stanu, aby mogła ona przenosić obciążenia projektowe nazywamy naprawą. Mimo różnicy przyjęło się nazywać wzmocnianiem zarówno działania związane z typowym wzmocnianiem, jak i naprawą konstrukcji.

Konieczność wzmocnienia konstrukcji żelbetowych mogą powodować różne przypadki, które można podzielić następująco [38]:

- ogólnie zły stan techniczny obiektu, co pociąga za sobą konieczność przeprowadzenia działań mających na celu doprowadzenie budowli do stanu bezpiecznej eksploatacji, bez podnoszenia klasy nośności jej elementów konstrukcyjnych,
- ogólnie dobry stan techniczny obiektu, ale wymagane jest jego wzmocnienie ze względu na przewidywane zwiększenie poziomu obciążeń w stosunku do założeń projektowych,
- ogólnie niezadowolający lub wręcz zły stan techniczny obiektu, którego dalsza eksploatacja wymaga zarówno przeprowadzenia zabiegów remontowych, jak i

dostosowania elementów konstrukcyjnych do przenoszenia zwiększonych obciążeń,

- wzmocnienia wynikające z wszelkiego rodzaju zmian funkcji konstrukcji, które wiążą się z modyfikacją przeznaczenia obiektu i zwiększeniem poziomu obciążeń,
- wzmocnienia, których potrzeba wynika z różnego rodzaju przeróbek lub modernizacji istniejących budowli, polegających na zmianie schematów statycznych elementów konstrukcyjnych.

Przeważnie potrzebę wzmocniania konstrukcji żelbetowych budowli determinują jednocześnie zły stan techniczny obiektu, jak i zwiększony poziom różnego rodzaju obciążeń, które ma ten obiekt bezpiecznie przenosić, dlatego podejmując decyzję o wzmocnieniu należy przeanalizować wymagania eksploatacyjne stawiane konstrukcji, jej aktualny stan techniczny oraz koszt wzmocnienia w porównaniu z kosztem nowego obiektu.

Podsumowując, można wymienić główne przyczyny powodujące wzmocnianie konstrukcji [4, 34]:

- zwiększanie obciążeń użytkowych,
- zesterzenie materiałów i ich korozja (np. ubytki w przekroju stali zbrojeniowej),
- uszkodzenia mechaniczne konstrukcji,
- konieczność ograniczenia odkształceń,
- konieczność zmniejszenia naprężeń w zbrojeniu,
- konieczność zmniejszenia rozwartości rys,
- zmiany układu statycznego (np. usunięcie podpór),
- błędy projektowe i wykonawcze.

2.2. Klasyfikacja metod wzmocniania konstrukcji inżynierskich

Wzmocnianie konstrukcji żelbetowych stanowi jedną z trudniejszych i bardziej odpowiedzialnych dziedzin inżynierii budowlanej. Wymaga ono zawsze indywidualnego potraktowania przez doświadczonego konstruktora, który nie może zastosować gotowych schematów rozwiązań. Wzmocnianie konstrukcji wymaga przeprowadzenia szczegółowych analiz technicznych i ekonomicznych. Należy dokładnie poznać konstrukcję – jej stan techniczny, przyczyny zniszczenia, powody wzmocnienia, a także wymagania eksploatacyjne stawiane wzmocnianej konstrukcji. Należy również przeanalizować projekt techniczny obiektu, dokonać niezbędnych odkrywek i pomiarów inwentaryzacyjnych, a po zaproponowaniu sposobu wzmocnienia należy dokonać analizy kosztów w porównaniu z

kosztami nowego obiektu. Trudność tego zagadnienia polega na tym, że ekspertyza stanu technicznego obiektu zawiera wiele czynników niepewności i przybliżeń. Jednym z takich przybliżeń są schematy statyczne przyjmowane do obliczeń. Niejednokrotnie problem wzmocnienia dotyczy obiektów starych, powstałych na początku minionego stulecia, których projekty zaginęły lub zostały zniszczone. W takim przypadku pozostają jedynie: wizje lokalne, pomiary inwentaryzacyjne, odkrywki i ocena cech wytrzymałościowych materiałów poprzez metody nieniszczące lub pobranie próbek do badań laboratoryjnych. Wszystko to sprawia, że zastosowana metoda wzmocnienia powinna zapewniać zapas bezpieczeństwa i gwarantować niezawodność w czasie.

Specyfika wzmocnień konstrukcji żelbetowych wymaga przestrzegania ścisłych reżimów technologicznych z zachowaniem warunków bezpieczeństwa. Wzmocnienie należy wykonać dokładnie, starannie, zgodnie z projektem wzmocnienia i sztuką budowlaną. Należy mieć na uwadze, czemu służą prowadzone prace budowlane tak, aby nie przyniosły negatywnych skutków dla elementów konstrukcji lub całego obiektu.

Pomimo swojej specyfiki sposoby wzmocniania konstrukcji żelbetowych można podzielić na dwie zasadnicze grupy [4]:

- wzmocnienia poprzez wykonanie nowych elementów konstrukcyjnych pracujących bez współpracy z istniejącą konstrukcją
- wzmocnienia poprzez powiększanie nośności istniejącej konstrukcji.

Jako jedno z kryteriów podziału wzmocnień przez powiększanie nośności istniejących elementów konstrukcyjnych przyjęto [4]:

Wzmocnianie poprzez zwiększanie przekroju poprzecznego:

- zwiększanie przekroju poprzecznego elementów konstrukcji przez dodatkowe zbrojenie i obetonowanie,
- przyklejanie i jednoczesne mocowanie mechaniczne końców stalowych płaskowników, kształtowników i blach,
- przyklejanie taśm, kształtek i mat z włókien kompozytowych.

Wzmocnianie poprzez zmianę schematu statycznego:

- budowa dodatkowych sztywnych podpór (słupy, podpory skośne, wieszaki),
- budowa dodatkowych sprężystych podpór (belki, ramy, wieszaki, dźwigary, wiązary),
- budowa ściąągów wzmocniających,
- sprężanie konstrukcji.

Inny podział, który można zaproponować, a który obejmuje swoim zasięgiem wyżej

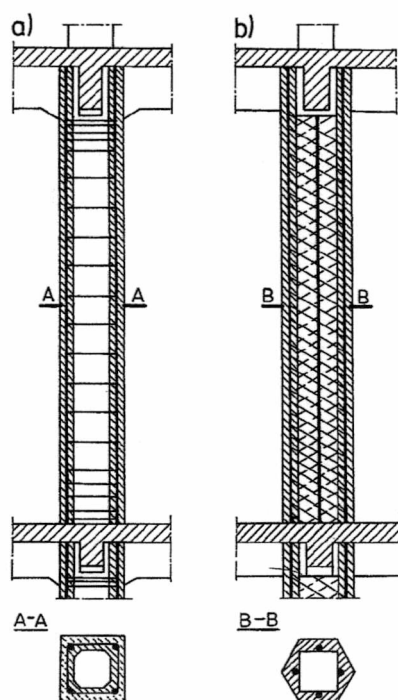
przedstawioną klasyfikację, to czy wzmocnienie następuje przez świadome wprowadzenie redystrybucji sił wewnętrznych w konstrukcji – metody aktywne, czy też dana metoda może powodować redystrybucję sił, ale nie jest głównym czynnikiem powodującym wzmocnienie – metody bierne [38].

2.3. Tradycyjne metody wzmocniania słupów żelbetowych

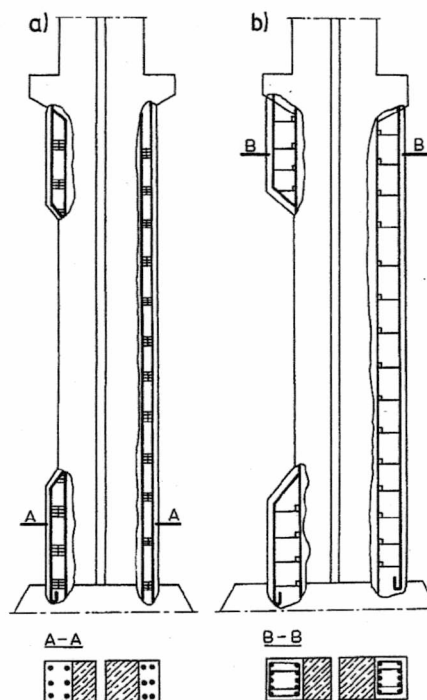
2.3.1. Wzmocnianie poprzez zwiększanie przekroju poprzecznego

Dodatkowe zbrojenie i obetonowanie

Na rysunkach 2.1 i 2.2 przedstawiono przykładowe rozwiązania, należące do grupy metod biernych (por. punkt 2.2 pracy), wzmocnień słupów żelbetowych obejmami żelbetowymi zbrojonymi prętami podłużnymi i strzemionami. Dodatkowe zbrojenie umieszczone wzdłuż osi słupa łączy się za pomocą zewnętrznych strzemion lub uzwojenia, które zagęszcza się w dolnej i górnej części wzmocnianego elementu. Tak przygotowany szkielet zbrojeniowy obetonowuje się w deskowaniu lub przez torkretowanie. Przy ograniczonym dostępie do słupa (np. przy dylatacjach lub ścianach) wykonuje się wzmocnienia, zwiększając przekrój z jednej lub dwóch stron (rys. 2.2).



Rys. 2.1. Wzmocnienie słupów obejmami [32]
a) ze strzemionami, b) z uzwojeniem



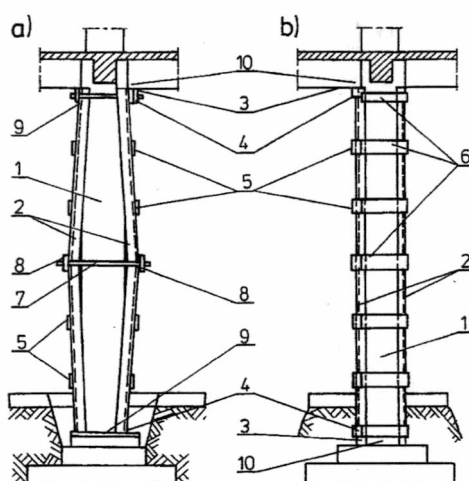
Rys. 2.2. Wzmocnienie słupów przy dylatacjach [32]

W przypadku konieczności znacznego podniesienia nośności słupa, stosuje się poszerzanie przekroju poprzecznego, a dodatkowe zbrojenie podłużne łączy się ze starym za pomocą przyspawanych strzemion (rys. 2.2).

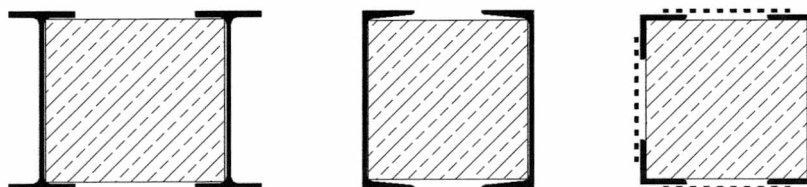
Przedstawione sposoby wzmocnienia można wykonywać na całej wysokości słupa lub odcinkowo pamiętając o przedłużaniu ich poza obszar uszkodzenia elementu.

Dodatkowe kształtowniki i płaskowniki stalowe

Znanym sposobem wzmocnienia słupów żelbetowych jest sprężanie dodatkowej konstrukcji stalowej. Istnieją dwa alternatywne rozwiązanie tego typu wzmocnień, a mianowicie konstrukcje dwustronne (rys. 2.3 i 2.4) przy wzmacnianiu słupów ściskanych osiowo lub mimośrodowo obciążonych momentami o zmiennym znaku oraz konstrukcje jednostronne (rys. 2.5) w celu zwiększania nośności słupów obciążonych mimośrodowo. Sposób ten należy do grupy metod aktywnych (por. punkt 2.2 pracy).



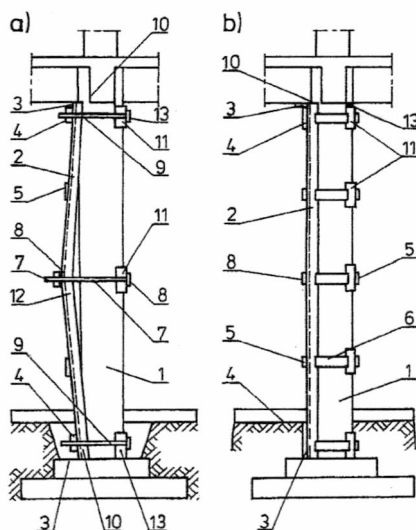
Rys. 2.3. Wzmocnienie słupa przez sprężanie dodatkowej dwustronnej konstrukcji stalowej [32]
a) konstrukcja wzmocniająca założona, lecz nie sprężona, b) konstrukcja wzmocniająca sprężona
1 – wzmocniany słup, 2 – konstrukcja wzmocniająca (np. kątowniki), 3 – kątowniki podporowe,
4 – płaskowniki oporowe, 5 – płaskowniki łączące rozpórki, 6 – płaskowniki przyspawane po sprężeniu, 7 – sworzeń ściągający, 8 – płaskownik pod sworzeń ściągający, 9 – montażowy sworzeń ściągający, 10 – skuta zewnętrzna warstwa betonu i kątownik podporowy oparty na zaprawie cementowej „na wcisk”



Rys. 2.4. Przekroje stosowanych konstrukcji sprężających wzmocniających słupy żelbetowe

Na rysunku 2.4 przedstawiono najczęściej stosowane przekroje profili sprężających. Montaż wzmocnienia (wstępne sprężenie) polega na wzajemnym ściągnięciu kształtowników

do słupa za pomocą specjalnych śrub montażowych, co powoduje powstanie znacznych naprężeń w kształtownikach. Dzięki wstępnemu sprężeniu część obciążenia przekazywanego na słup, przejmowana jest przez konstrukcję stalową, która odciąża podporę.



Rys. 2.5. Wzmocnienie słupa przez sprężanie dodatkowej jednostronnej konstrukcji stalowej [32]
a) konstrukcja wzmacniająca założona, lecz nie sprężona, b) konstrukcja wzmacniająca sprężona
oznaczenia 1 ÷ 10 jak na rysunku 2.3, 11 – kątownik do wykonania opasek na słupie, 12 – wycięte boczne półki kątowników, 13 – podkładka pod sworzeń montażowy.

Przyklejanie i mocowanie mechaniczne stalowych płaskowników i blach

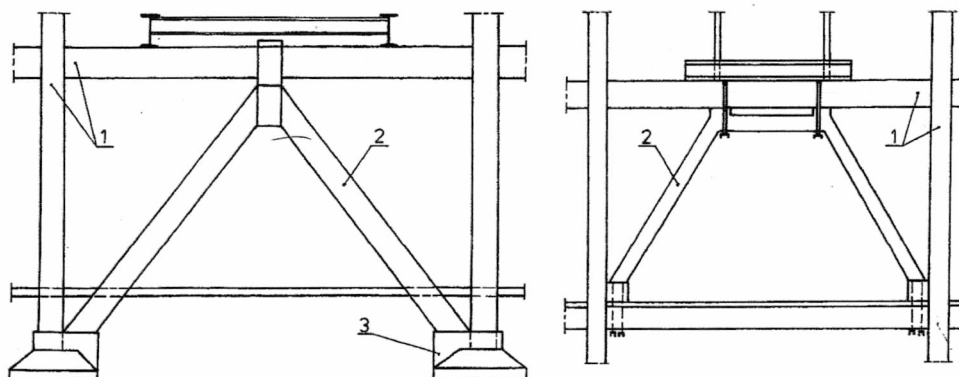
Metoda wzmacniania poprzez doklejanie i mocowanie mechaniczne stalowych płaskowników do betonu jest jedną z najbardziej znanych i najczęściej stosowanych metod przez projektantów wzmocnień [17]. Znalazła ona także zastosowanie przy wzmacnianiu ściskanych słupów żelbetowych.

Doklejanie stali do betonu wymaga właściwego przygotowania powierzchni betonowej, którą należy przemyć roztworem kwasu solnego, następnie spłukać wodą i osuszyć. Powierzchnia betonu powinna być czysta, odtłuszczona, szorstka, bez mleczka cementowego. Powierzchnie stalowe przed klejeniem oczyszcza się szczotkami stalowymi i przemywa rozpuszczalnikami. Tak przygotowane obie powierzchnie smaruje się klejem i dociska do siebie. Jako spoiwa w takich połączeniach używa się klejów na bazie żywic epoksydowych.

2.3.2. Wzmacnianie poprzez zmianę schematu statycznego konstrukcji

Wzmacnianie dodatkowymi sztywnymi podporami, polega na odciążeniu uszkodzonych lub nadwerężonych słupów i dociążaniu innych elementów konstrukcyjnych. Na rysunku 2.6 pokazano przykładowe rozwiązania wzmocnień poprzez zmianę schematu statycznego

konstrukcji. Polegają one na zastosowaniu dodatkowych słupów stalowych lub zastrzałów przekazujących obciążenia bezpośrednio na fundament albo zastosowaniu podwieszenia stalowego lub żelbetowego.



Rys. 2.6. Schemat wzmocnień dodatkowymi zastrzałami [32]
1 – wzmocniana konstrukcja, 2 – dodatkowe zastrzały, 3 – opaska żelbetowa

Reasumując, poniżej podano najbardziej istotne wady i zalety tradycyjnych metod wzmocniania słupów żelbetowych, które charakteryzują opisane sposoby:

Wady: podatność na korozję, stosunkowo duży ciężar elementów wzmocniających, wysokie koszty robocizny i konserwacji, stosunkowo duże zużycie materiałów, czasochłonność wykonania, potrzeba budowy rusztowań i pomostów roboczych, problemy z manewrowaniem dłuższymi elementami, w przypadku wzmocniania poprzez przyklejanie stalowych płaskowników i blach konieczność stosowania zakotwień mechanicznych.

Zalety: stosunkowo niski koszt materiału, liczne zastosowania, wystarczająca wytrzymałość.

2.4. Materiały kompozytowe – nowy sposób wzmocniania konstrukcji inżynierskich

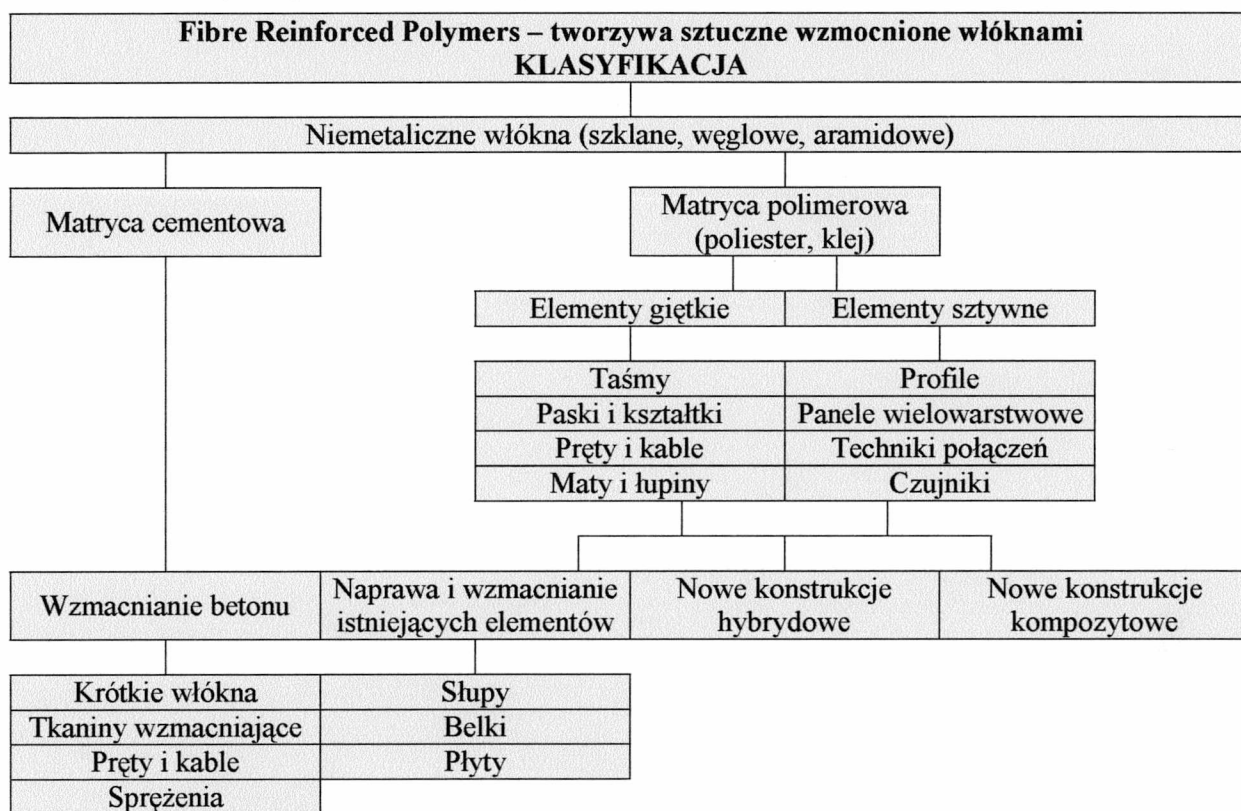
2.4.1. Wiadomości ogólne

Do najnowocześniejszych metod wzmocniania konstrukcji, należy stosowanie materiałów kompozytowych FRP (Fibre Reinforced Polymers). Laminaty kompozytowe składają się z włókien o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, zatopionych w matrycy. Obecnie stosowane są trzy typy włókien: szklane (GFRP), węglowe (CFRP) i aramidowe (AFRP). W pracy [24] dokonano ich oceny porównawczej pod względem zastosowania do wzmocniania konstrukcji mostowych. Jako kryteria oceny włókien zatopionych w matrycy,

przyjęto między innymi: wytrzymałość na rozciąganie, wytrzymałość na ściskanie, moduł sprężystości, wytrzymałość zmęczeniową, gęstość objętościową a także koszty aplikacji. Na podstawie przeprowadzonej analizy stworzono ranking materiałów FRP. Na pierwszym miejscu znalazły się kompozyty węglowe, a na kolejnych odpowiednio: aramidowe i szklane.

W tablicy 2.1 przedstawiono klasyfikację materiałów kompozytowych, pozwalającą na łatwy przegląd ich zastosowania w inżynierii budowlanej [24].

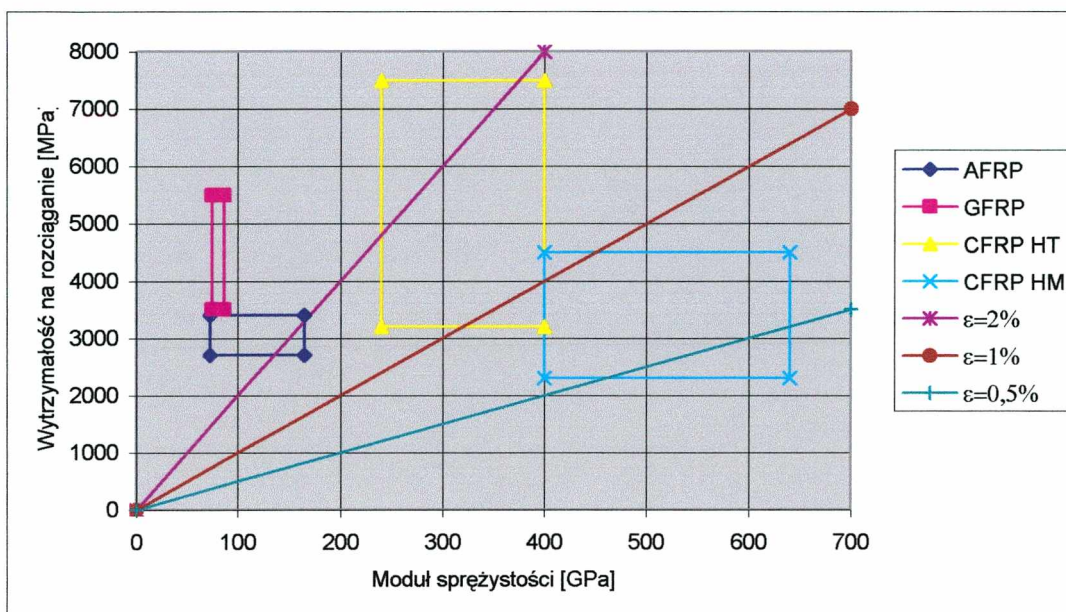
Tablica 2.1. Klasyfikacja materiałów kompozytowych FRP [24]



Generalnie wyróżnia się następujące typy włókien: N (normal – normalne), HT (high tensile – wysoka wytrzymałość na rozciąganie), HM (high modulus – wysoki moduł sprężystości). Na rysunku 2.7 i w tablicy 2.2 podano właściwości różnych typów włókien.

Tablica 2.2. Parametry techniczne różnych typów włókien [24, 51]

Lp.	Typ włókien	Wytrzymałość na rozciąganie	Moduł sprężystości	Odkształcenia graniczne przy zerwaniu	Gęstość	Średnica włókien
		[MPa]	[GPa]	[%]		
1	Aramidowe	2700 – 3400	73 – 165	2,5 – 4,0	1,4	12
2	Szklane – E	3500	75	3,0 – 5,0	2,6	3 – 13
3	Szklane – S	5500	87	4,5 – 5,0		
4	Węglowe – HT	3200 – 7500	240 – 400	1,0 – 1,6	1,7 – 1,9	6 – 7
5	Węglowe – HM	2300 – 4500	400 – 640	0,6		



Rys. 2.7. Porównanie właściwości różnych typów włókien [51]

W niniejszej pracy, rozważane są zagadnienia związane z wykorzystaniem kompozytów węglowych – taśm i mat CFRP do wzmacniania elementów ściskanych. W związku z tym, dalsza część rozdziału poświęcona zostanie omówieniu kompozytów węglowych. Szczegółowych informacji na temat materiałów kompozytowych sklasyfikowanych w tabelicy 2.1 dostarcza praca [24], w której podano również liczne przykłady ich zastosowania w praktyce inżynierskiej.

Taśmy CFRP zbudowane są w ten sposób, iż wszystkie wiązki włókien węglowych ułożone są jednokierunkowo, równoległe do długości taśmy. Taśmy produkowane są metodą przeciągania włókien węglowych, które następnie są zatapiane w żywicy epoksydowej. Żywica epoksydowa poddawana jest obróbce cieplnej (hartowaniu), dzięki której zostaje utwardzona tworząc w ten sposób spójną matrycę. Matryca z żywicy scala włókna węglowe w kierunku podłużnym taśmy i stanowi ochronę tych włókien przed oddziaływaniami zewnętrznymi. Położenie, przyporządkowanie oraz zawartość włókien węglowych w laminacie są w czasie procesu wytwarzania ściśle kontrolowane i wpływają na właściwości mechaniczne taśm. Taśmami kompozytowymi można wzmacniać wszelkiego rodzaju konstrukcje belkowe i płytowe poprzez doklejanie ich w strefach rozciąganych lub przypodporowych wzmacnianych elementów. Do przyklejania taśm służą epoksydowe zaprawy klejowe, które są uzupełnieniem opatentowanych systemów wzmocnień.

Maty CFRP są to jedno- lub wielokierunkowe arkusze z włókien węglowych tkane na osnowie poliestrowej. Stosowane są wszędzie tam gdzie użycie taśm węglowych jest znacznie utrudnione lub niemożliwe (duże powierzchnie, elementy o skomplikowanej geometrii). W

skład systemu wchodzi również epoksydowe żywice impregnujące oraz zaprawy do reprofilacji powierzchni.

O doborze odpowiedniego sposobu wzmacniania konstrukcji decyduje jego konkurencyjność w porównaniu z innymi technikami. Poniżej podano najważniejsze zalety i wady, charakteryzujące wzmacnianie z wykorzystaniem taśm i mat z włókien węglowych:

Zalety: odporność na działanie korozji (nie wymagają konserwacji), niewielki ciężar własny, niewielkie wymiary, ekonomiczna aplikacja, dowolne długości transportowe, łatwy transport materiałów, łatwość łączenia ze wzmacnianym elementem, bardzo dobre parametry wytrzymałościowe.

Wady: stosunkowo wysoki koszt materiałów, konieczność stosowania dodatkowej ochrony przeciwpożarowej, brak powszechności stosowania.

W tabelicy 2.3 zestawiono parametry techniczne taśm i mat z włókien węglowych zaczerpnięte z [46, 54], dostępnych na polskim rynku.

Tablica 2.3. Parametry techniczne taśm i mat CFRP [46, 54]

Cecha	Taśmy CFRP	Maty CFRP
Moduł sprężystości [GPa]	165 – 400	230 – 640
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	1800 – 2800	2600 – 4900
Odkształcenia przy zerwaniu [%]	0,45 – 1,70	0,40 – 2,10
Szerokość [mm]	50 – 150	300 i 600
Grubość [mm]	1,2 i 1,4	0,045 – 0,19

2.4.2. Technologia wzmacniania i zastosowanie

Pod względem podstawowej koncepcji, metoda wzmacniania za pomocą materiałów CFRP odpowiada metodzie przyklejania stalowych płaskowników do konstrukcji. Decydujący wpływ o skuteczności tego typu wzmocnień ma przestrzeganie reżimów technologicznych. Poniżej zwrócono uwagę na kilka zasad, których respektowanie służy celowi, jakim jest prawidłowe wykonanie wzmocnienia [51, 52].

Przygotowanie powierzchni betonu

Powierzchnia betonu, do którego przyklejane są taśmy i maty z włókien węglowych powinna być: czysta, odtłuszczona, szorstka, bez mleczka cementowego. Do przygotowania powierzchni betonu można stosować: piaskowanie, lancę wodną, groszkowanie, skuwanie lub szlifowanie. Zabiegi te mają na celu odspojenie wszystkich słabo związanych z podłożem cząstek betonu i kruszywa, a także usunięcie warstwy mleczka cementowego. Niezawodność klejenia materiałów CFRP uzyskuje się wtedy, gdy połączone zostaną one bezpośrednio z

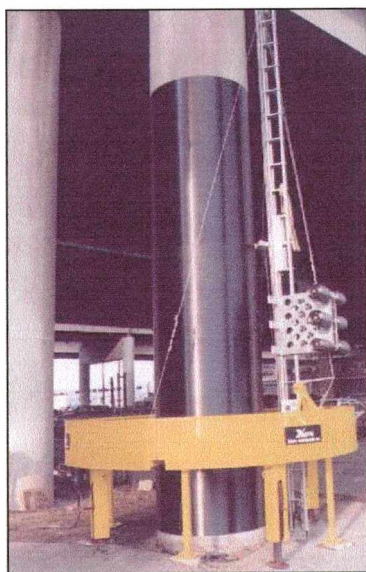
kruszywem. Wszelkie nierówności i ubytki reprofiluje się zaprawami naprawczymi. Beton powinien charakteryzować odpowiednimi właściwościami m.in. średnia wytrzymałość powierzchniowa na odrywanie powinna wynosić 2,0 MPa a minimalny wynik próby „pull-off” podłoża nie może być mniejszy od 1,5 MPa, klasa betonu $\geq B15$ a minimalny wiek betonu powinien wynosić 3 do 6 tygodni [46, 54].

Przygotowanie powierzchni taśm CFRP

Z reguły, taśmy są przygotowane fabrycznie do aktywacji i klejenia od strony niezadrukowanej (matowej). Wystarczy wówczas jedynie oczyścić i odtłuścić ich powierzchnię za pomocą rozpuszczalników. W przypadku aplikacji wielowarstwowych lub w miejscach krzyżowania się taśm, należy przeszlifować i oczyścić również drugą stronę taśmy (lśniąca). Czynności te mają na celu usunięcie z powierzchni taśmy pyłu węglowego.

Klejenie kompozytów

Do klejenia materiałów CFRP stosowane są dwuskładnikowe zaprawy klejowe (żywica i utwardzacz). Przy przygotowaniu kleju należy wrócić szczególną uwagę na to, aby nie został on zbyt napowietrzony w czasie mieszania jego składników. Zbyt duża zawartość pęcherzyków powietrza w mieszance klejowej obniża skuteczność sklejenia. Dobrze wymieszany klej należy wetrzeć szpachlą w przygotowaną powierzchnię betonu, zamykając i wyrównując wszelkie nierówności podłoża. Minimalna grubość nałożonego na beton kleju nie powinna być mniejsza niż 1 mm. Warstwa kleju (w kształcie daszku) powinna być również nałożona na taśmę. Klejenie polega na dociśnięciu kompozytu do powierzchni betonu i usunięciu powietrza spod spodu za pomocą specjalnych wałków z twardej gumy.



a) XXsys Robo Wrapper



b) automatyczne utwardzanie

Rys. 2.8. Systemy automatycznego wzmacniania słupów o przekroju okrągłym [55]

Szczególnie interesująca, ze względu na tematykę niniejszej rozprawy, jest metoda automatycznego wzmacniania słupów [55]. Na rysunku 2.8 przedstawiono dwa przykłady urządzeń do zmechanizowanego przyklejania i utwardzania maty CFRP na słupach o przekroju okrągłym.

Kontrola jakości

Jak już wspomniano o skuteczności wzmocnienia decyduje przestrzeganie reżimów jakościowych. Właściwie na wszystkich etapach aplikacji systemu konieczne są odpowiednie kontrole, których pozytywne wyniki gwarantują skuteczność metody. Na zakończenie, po związaniu kleju należy sprawdzić sklejenie poprzez opukanie taśmy w celu wykrycia ewentualnych pustek.

Ograniczenia w stosowaniu

Oprócz wymienionych kilku zasad, których przestrzeganie jest warunkiem efektywności metody, system wzmacniania z wykorzystaniem kompozytów węglowych posiada również kilka ograniczeń:

- materiały CFRP należy chronić przed bezpośrednim działaniem promieni słonecznych (np. przez zastosowanie powłok ochronnych),
- maksymalna, dopuszczalna temperatura użytkowania systemu bez dodatkowych zabezpieczeń przeciwpożarowych wynosi $+50^{\circ}\text{C}$ (np. temperatura przejścia w szklisko epoksydowej zaprawy klejowej do taśm, według danych producenta wynosi $+62^{\circ}\text{C}$) [23],
- temperatura aplikacji (otoczenia i podłoża) powinna wynosić $+10^{\circ}\text{C} \div +35^{\circ}\text{C}$,
- maksymalna wilgotność podłoża powinna wynosi 4%.

Zakres stosowania

Metoda wzmacniania żelbetowych elementów konstrukcyjnych przez doklejanie do nich materiałów kompozytowych – taśm, mat i kształtek z włókien węglowych jest nowością w światowej inżynierii budowlanej. Przeprowadzone obszerne testy, badania i analizy modelowe pozwoliły na zastosowanie tej metody w praktyce. Sprawdzenie systemu w teorii, badaniach laboratoryjnych i praktyce inżynierskiej na naturalnych obiektach pozwoliło na opracowanie algorytmów projektowania tego rodzaju wzmocnień oraz wytycznych technologicznych aplikacji. W chwili obecnej materiały kompozytowe są coraz bardziej powszechnie stosowane do wzmacniania elementów żelbetowych:

- zginanych – poprzez doklejanie taśm FRP w strefach rozciąganych belek i płyt,
- ścinanych – poprzez doklejanie taśm i mat FRP w strefach naprężeń głównych rozciągających.

2.5. Przegląd badań elementów ściskanych wzmacnianych materiałami FRP

W świetle powszechnie znanych trudności i ograniczeń w stosowaniu tradycyjnych metod wzmacniania oraz rosnącej ilości elementów konstrukcyjnych wymagających wzmocnień, zaczęto poszukiwać nowych, alternatywnych rozwiązań. Na podstawie licznych badań doświadczalnych stwierdzono doskonałą przydatność kompozytów węglowych do wzmacniania elementów żelbetowych narażonych na zginanie i ścinanie. Uzyskane wyniki i doświadczenia posłużyły opracowaniu algorytmów projektowania tego rodzaju wzmocnień oraz podaniu wytycznych technologicznych aplikacji. Wzmacnianie tego typu elementów nie jest przedmiotem niniejszej pracy, dlatego zrezygnowano z cytowania licznych publikacji i przytaczania przykładów zastosowań.

Od kilku lat prowadzone są również badania elementów ściskanych wzmacnianych materiałami kompozytowymi FRP. Mają one na celu poznanie wpływu tego typu wzmocnienia na cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe ściskanych elementów betonowych i żelbetowych. Na wiele postawionych pytań i problemów starają się odpowiedzieć ośrodki naukowe w kraju i za granicą. Prekursorami tego typu badań były zespoły Priestley'a (1992 r.) [40], Saadatmanesha (1994 r.) [44], Demersa i Neale (1994 r.) [7] oraz Pichera (1996 r.) [37]. W pracy omówiono szczegółowo wybrane badania elementów ściskanych wzmacnianych materiałami FRP, które uznano za najistotniejsze ze względu na ich zakres i tematykę [6, 7, 14, 28, 43]. Wiele kolejnych publikacji [1, 5, 9, 12, 13, 15, 30, 33, 35, 41, 47, 50, 53] potwierdza wyniki uzyskane przez innych badaczy oraz porusza wiele nowych, ciekawych zagadnień (por. tablica 2.10). Przeglądu publikacji dokonano z podziałem na badania próbek betonowych i badania słupów żelbetowych.

2.5.1. Badania próbek betonowych

Interesujące badania autorstwa Rochette i Labossière z Department of Civil Engineering z University of Sherbrooke w Kanadzie zaprezentowano w pracy [43]. Autorzy zajmowali się badaniami próbek betonowych o przekroju okrągłym i czworokątnym owiniętych płaszczem FRP. W artykule opisano wyniki badania próbek a także charakterystyk wytrzymałościowych zastosowanych materiałów kompozytowych. Do wykonania wzmocnień wykorzystano m.in. maty CFRP o następujących parametrach technicznych: wytrzymałość na rozciąganie – 1265 MPa, moduł sprężystości – 82,7 GPa, odkształcenia graniczne przy zerwaniu – 1,5%, grubość

– 0,30 mm i gęstość – 1,80 g/cm³.

Celem badań była ocena wpływu: sztywności wzmocnienia i kształtu przekroju poprzecznego na nośność osiowo ściskanych elementów modelowych. Sztywność wzmocnienia poprzecznego regulowano liczbą warstw maty doklejanej do próbek natomiast przekrój poprzeczny kształtowano przez zróżnicowanie promieni wyokrąglenia naroży. Badania podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie badano próbki betonowe o przekrojach okrągłym, kwadratowym i prostokątnym, które owinięto od 2. do 5. warstwami maty CFRP, natomiast w etapie drugim badano elementy o przekrojach okrągłych i kwadratowych wzmocnione 3., 6., 9. i 12. warstwami maty z włókien aramidowych.

Przedmiotem badań były następujące rodzaje próbek: o przekroju poprzecznym kwadratowym 152x152 mm i wysokości 500 mm, o przekroju poprzecznym prostokątnym 152x203 mm i wysokości 500 mm i o przekroju poprzecznym okrągłym Ø100 i wysokości 200 mm. Założono, że wszystkie elementy zostaną wykonane z betonu o średniej wytrzymałości walcowej na ściskanie f'_c około 40 MPa. W tablicy 2.4 zestawiono wszystkie próbki poddane badaniu w etapie pierwszym.

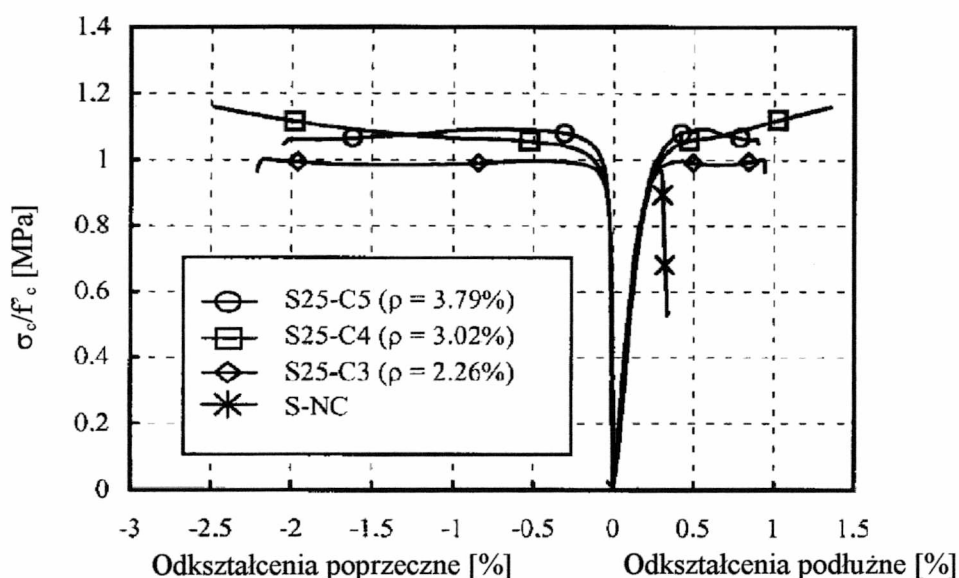
Tablica 2.4. Parametry badanych próbek [43]

Lp.	Oznaczenia próbek	ρ	f'_c
		[%]	[MPa]
1	S-NC	—	42,0
2	S-NC	—	42,0
3	S5-C3	2,35	42,0
4	S25-C3	2,26	42,0
5	S25-C3	2,26	42,0
6	S38-C3	2,25	42,0
7	S38-C3	2,25	42,0
8	C100-C2	2,41	42,0
9	C100-C2	2,41	42,0
10	C100-C2	2,41	42,0
11	S5-C5	3,93	43,9
12	S25-C4	3,02	43,9
13	S25-C5	3,79	43,9
14	S-NC	—	35,8
15	S-NC	—	35,8
16	S25-C4	3,02	35,8
17	S25-C5	3,79	35,8
18	S38-C4	3,00	35,8
19	S38-C5	3,76	35,8
20	R-NC	—	42,0
21	R25-C3	1,99	42,0
22	R38-C3	1,97	42,0
23	R5-C5	3,44	43,9
24	R25-C4	2,66	43,9

Identyfikacja oznaczenia próbek jest następująca: pierwsza litera oznacza kształt przekroju poprzecznego (Circular – okrągły, Square – kwadratowy, Rectangular – prostokątny), następnie podano promień wyokrąglenia naroży (5, 25 i 38 mm), kolejna litera informuje o rodzaju włókien w macie FRP (Carbon – węglowe) a ostatnia cyfra odpowiada liczbie warstw wzmocnienia. Intensywność wzmocnienia słupów charakteryzuje stopień wzmocnienia poprzecznego zdefiniowany jako $\rho = V_{\text{włókien}}/V_{\text{betonu}}$.

Próbki poddano próbie doraźnego ściskania osiowego w prasie hydraulicznej, ze stałym przyrostem odkształcenia. Podczas badania rejestrowano: odkształcenia podłużne elementów ε_z , odkształcenia poprzeczne elementów ε_t , odkształcenia kompozytu ε_f oraz poziom obciążenia. W tablicy Z1.1 w załączniku nr 1 przedstawiono wyniki badania wszystkich badanych próbek.

Na podstawie analizy wyników badań zawartych w tablicy Z1.1 stwierdzono, że najkorzystniejsze efekty wzmocnienia, w postaci przyrostu nośności, uzyskuje się dla próbek walcowych i próbek o przekroju kwadratowym. Jednakże, dla tego drugiego typu elementów przyrost nośności zależy od wartości promienia wyokrąglenia naroży i liczby warstw maty wzmacniającej. Dla próbki S38-C5 zanotowano przyrost nośności rzędu 92%. Należy wrócić uwagę na to, że dla próbek o przekroju prostokątnym uzyskano kilkukrotnie większe graniczne odkształcenia poprzeczne ε_t w stosunku do granicznych odkształceń podłużnych ε_z .



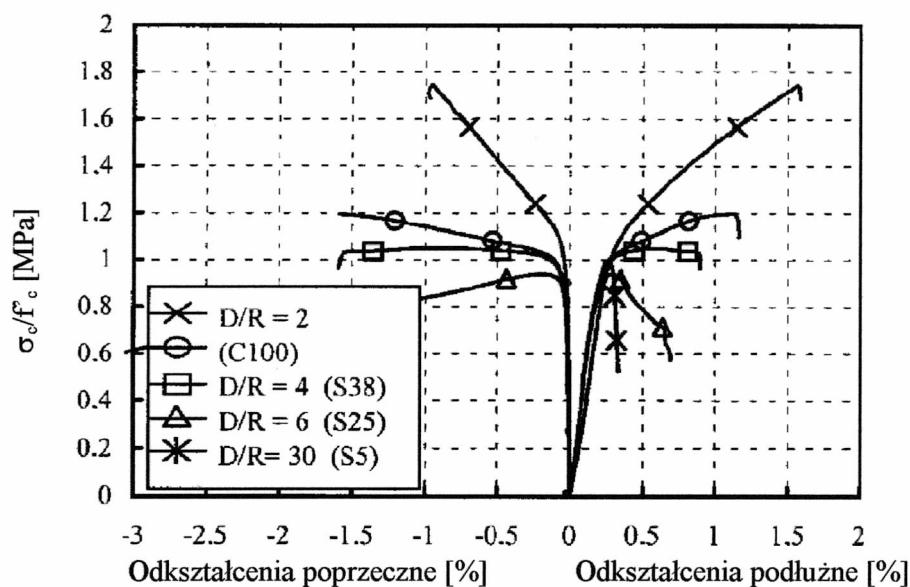
Rys. 2.9. Wykres zależności $\sigma/f_c - \varepsilon$ dla elementów o przekroju kwadratowym typu S25 [43]

Wyniki badania elementów o przekroju kwadratowym z wyokrąglonymi narożami o promieniu 25 mm i zróżnicowanej ilości warstw maty CFRP przedstawiono na rysunku 2.9 w postaci zależności $\sigma/f_c - \varepsilon$ dla elementów typu S25-C5, S25-C4 i S25-C3, porównując je z

wykresem średnich odkształceń podłużnych próbki bez wzmocnienia S-NC.

Jak widać na rysunku 2.9 wzrost sztywności wzmocnienia poprzecznego wywołuje lekkie polepszenie parametrów wytrzymałościowych i odkształcalnościowych badanych elementów. Przejście z fazy pracy sprężystej do fazy plastycznej następuje we wszystkich przypadkach prawie w tym samym punkcie. Jakkolwiek dodanie kolejnych warstw maty powoduje wzrost sztywności próbek, co widoczne jest na rysunku 2.9 w postaci podniesienia krzywych odkształceń w drugiej fazie pracy.

Element S25-C5 charakteryzował się ponadto innym sposobem skonstruowania wzmocnienia. Kolejne warstwy maty naklejono o różnej orientacji przebiegu włókien względem osi elementu, tzn. $+15^\circ$, -15° , $+15^\circ$, -15° , 0° , co zapisano w postaci oznaczenia $[\pm 15/0]$. Autorzy potwierdzają, że zgodnie z ich oczekiwaniami w początkowej fazie pracy zróżnicowanie orientacji włókien daje takie same efekty jak przy orientacji 0° . Jednak w drugiej fazie pracy zaobserwowano spadek wartości odkształceń po osiągnięciu maksymalnych naprężeń w betonie $f_{z,max}$. Rochette i Labossière stwierdzili, że zróżnicowanie orientacji włókien powoduje znaczący spadek sztywności w czasie próby obciążania, skutkiem czego jest zmniejszenie efektów wzmocnienia.



Rys. 2.10. Wykres zależności $\sigma/f_c - \epsilon$ dla elementów o różnym promieniu wyokrąglenia naroży [43]

Rysunek 2.10 prezentuje wykres zależność $\sigma/f_c - \epsilon$ dla trzech próbek o przekroju kwadratowym wzmocnionych trzema warstwami maty CFRP. Każdy z elementów posiadał inny promień wyokrąglenia naroży (5, 25 i 38 mm). Dla lepszej czytelności wykresu wprowadzono bezwymiarowy parametr D/R , czyli stosunek wymiaru przekroju poprzecznego elementu do promienia wyokrąglenia. Dodano również krzywą dla próbki walcowej. Jak

widać na rysunku 2.10 efekt wzmocnienia wzrasta stopniowo wraz ze wzrostem promienia wyokrąglenia naroży.

Szczególnie interesujące badania próbek betonowych wzmocnianych materiałami kompozytowymi CFRP wykonali Kamińska i Ignatowski z Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej [14]. Wyjątkowość tych badań polega na ich zakresie i postawionych problemach badawczych. Uzyskane wyniki zostały wykorzystane w kolejnych badaniach dotyczących wzmocniania smukłych słupów żelbetowych [15] (por. tablica 2.10).

Przedmiotem badań były próbki walcowe $\varnothing 150$ i wysokości 300 mm (W) i dwa rodzaje próbek prostopadłościennych: o przekroju kwadratowym 100x100 mm i wysokości 200 mm (K) oraz o przekroju prostokątnym 105x200 mm i wysokości 200 mm (P). Naroża próbek prostopadłościennych wyokrąglono promieniem 10 mm. W sumie autorzy przebadali 32. próbki. Szczegółowy program badań przedstawiono w tablicach 2.5 i 2.6.

Tablica 2.5. Program badania próbek o przekroju okrągłym i kwadratowym [14]

Lp.	Oznaczenia próbek	Zbrojenie poprzeczne – liczba warstw maty	Zbrojenie podłużne	Problem badawczy	
1	W-01	—	—	Wpływ stopnia zbrojenia poprzecznego w odniesieniu do próbek o przekroju kołowym	
2	W-02	—	—		
3	W-1m1	1	—		
4	W-1m2	1	—		
5	W-2m1	2	—		
6	W-2m2	2	—		
7	W-2m3	2	—		
8	W-3m	3	—		
9	K-01	—	—	Jak wyżej w odniesieniu do próbek o przekroju kwadratowym	
10	K-02	—	—		
11	K-2m1	2	—		
12	K-2m2	2	—		
13	W-2mp1	—	2 warstwy maty	Współdziałanie zbrojenia podłużnego w przenoszeniu obciążenia ściskającego	
14	W-2mp2	—	2 warstwy maty		
15	K-t1	—	4 taśmy		
16	K-t2	—	4 taśmy		
17	K-t2m1	2	4 taśmy		
18	K-t2m2	2	4 taśmy	$\sigma_p = 12,8 \text{ MPa}$ $\sigma_p = 15,0 \text{ MPa}$	Wpływ wstępnego obciążenia próbki przed wzmocnieniem
19	W-F2m1	2	—		
20	W-F2m2	2	—		
21	K-F2m1	2	—		
22	K-F2m2	2	—		
23	K-Ft2m1	2	4 taśmy		
24	K-Ft2m2	2	4 taśmy		

σ_p – poziom naprężenia wstępnego

Tablica 2.6. Program badania próbek o przekroju prostokątnym [14]

Lp.	Oznaczenia próbek	Zbrojenie poprzeczne – liczba warstw maty	Mimośród obciążenia [mm]	Problem badawczy
1	P-01	—	30	Wpływ stopnia zbrojenia poprzecznego, wpływ kształtu przekroju, wpływ mimośrodu obciążenia
2	P-02	—	—	
3	P-1m1	1	30	
4	P-1m2	1	—	
5	P-2m1	2	30	
6	P-2m2	2	—	
7	P-3m1	2	30	
8	P-3m2	3	—	

Do wykonania wzmocnień wykorzystano dwa rodzaje kompozytów węglowych – maty i kształtki, których parametry techniczne zestawiono w tablicy 2.7.

Tablica 2.7. Parametry techniczne mat i kształtek CFRP [14]

Cecha	Maty CFRP	Kształtki CFRP
Moduł sprężystości [GPa]	230	132
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	3500	2295
Odkształcenia przy zerwaniu [%]	15	17,3
Grubość [mm]	0,13	—
Przekrój poprzeczny [mm]	—	1,4x40

W praktyce inżynierskiej wzmocnianie odbywa się pod obciążeniem, a elementy konstrukcyjne są jedynie odciążone na czas aplikacji systemu. W związku z tym, szczególnie interesujące są badania, które autorzy przeprowadzili na próbkach wstępnie obciążonych w pełzarkach.

Wszystkie próbki poddano próbie ściskania do zniszczenia ze stałym przyrostem odkształceń. W czasie badania rejestrowano odkształcenia podłużne i poprzeczne za pomocą tensometrów elektrooporowych, naklejonych na powierzchni płaszcza CFRP (lub betonu w próbkach bez wzmocnienia) oraz poziom obciążenia.

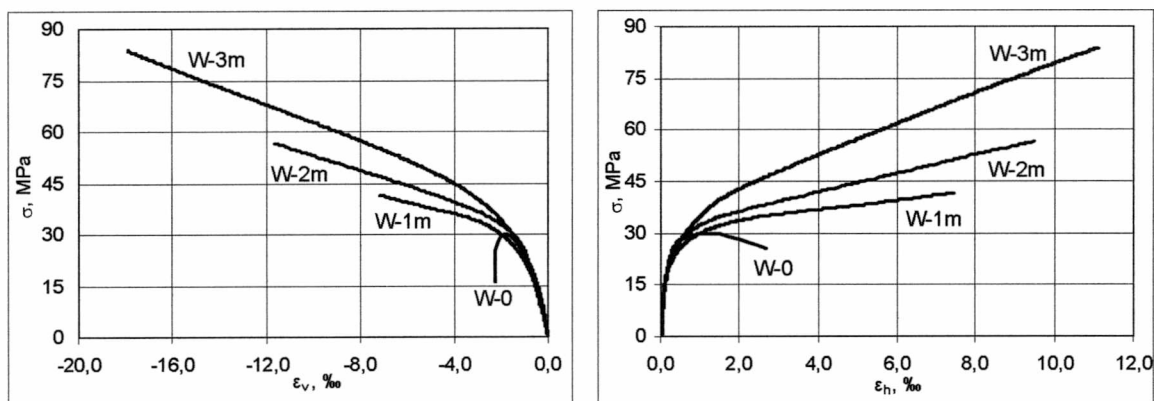
W celu odpowiedzi na postawione problemy badawcze, zawarte w tablicach 2.5 i 2.6 autorzy opracowali szereg wykresów zależności pomiędzy naprężeniami ściskającymi (względnie obciążeniami) a podłużnymi i poprzecznymi odkształceniami betonu. W niniejszej pracy zostaną zacytowane tylko niektóre przykłady, natomiast pełne wyniki zamieszczono w tablicach Z1.2 i Z1.3 w załączniku nr 1.

Na rysunku 2.11 przedstawiono obrazy zniszczenia próbki walcowej W-1m2 i próbki prostopadłościowej o przekroju kwadratowym K-Ft2m2. Autorzy zaobserwowali, że zniszczenie elementów następowało w wyniku gwałtownego rozerwanie płaszcza CFRP i zniszczenia betonu.



Rys. 2.11. Próbkę W-1m2 i K-Ft2m2 po zniszczeniu [14]

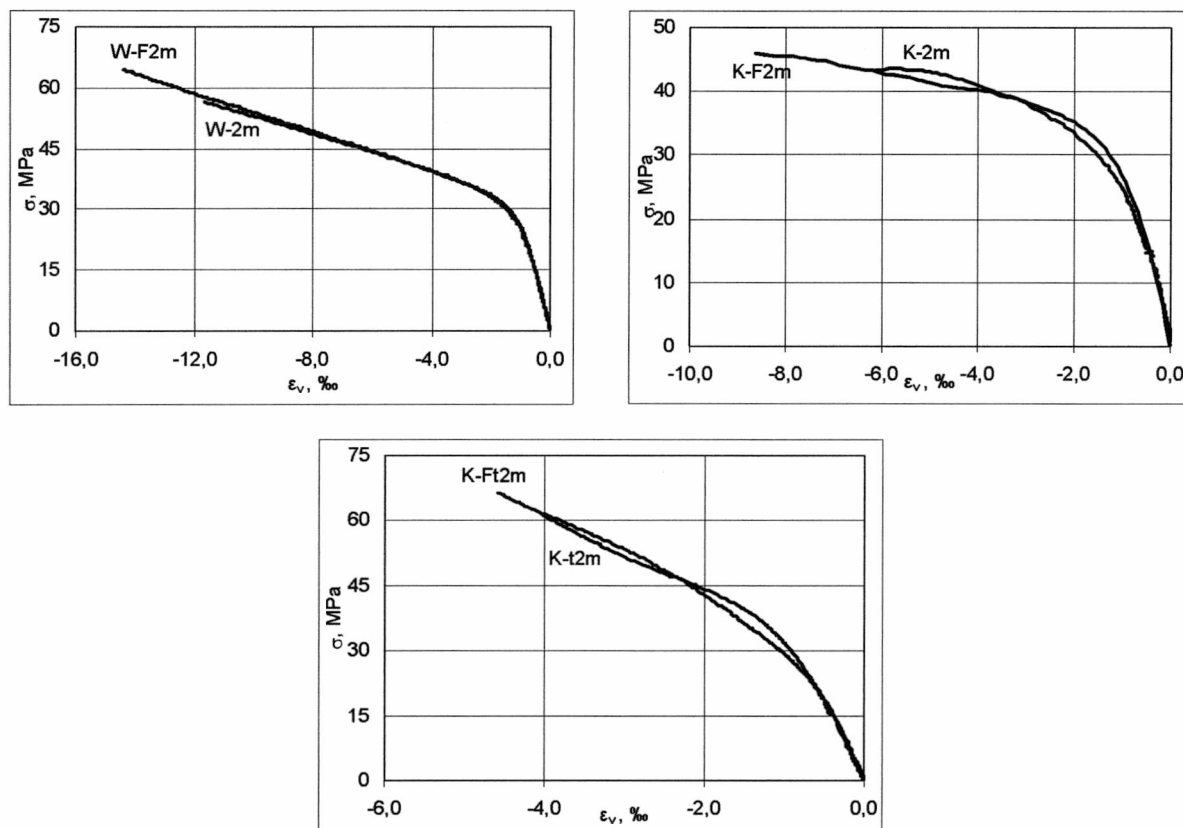
Wpływ stopnia zbrojenia poprzecznego na cechy odkształcalnościowe i nośność można prześledzić na rysunku 2.12, gdzie przedstawiono zależności $\sigma - \epsilon$ dla wybranych próbek walcowych.



Rys. 2.12. Wykresy zależności $\sigma - \epsilon$ próbek walcowych przy różnej liczbie warstw maty [14]

Na rysunku 2.12 widać, że wraz ze wzrostem intensywności wzmocnienia poprzecznego, któremu odpowiada liczba warstw maty CFRP, wzrasta nośność badanych próbek. Dla próbek typu „W”, owiniętych trzema warstwami maty, autorzy zaobserwowali przyrost nośności rzędu 89% w stosunku do elementów kontrolnych. Innym, istotnym parametrem wpływającym na stopień wzmocnienia jest kształt przekroju poprzecznego. Dla próbek typu „K-2m” zanotowano przyrost nośności rzędu 35%. Analiza wyników badań opublikowanych w pracy [14] pokazuje również wyraźną poprawę właściwości plastycznych próbek typu „W” i „K”. Dla próbek typu „P” obciążonych osiowo, autorzy zauważyli, że maksymalne odkształcenia podłużne przekroju nie zależą od intensywności wzmocnienia poprzecznego, a po ich przekroczeniu następuje wyraźny spadek naprężeń aż do osiągnięcia wartości granicznych.

Jak już wspomniano szczególnie interesujące są badania próbek wzmacnianych pod obciążeniem, których wyniki przedstawiono na rysunku 2.13 w postaci zależności pomiędzy naprężeniami ściskającymi σ i średnimi odkształceniami podłużnymi betonu ε_v .



Rys. 2.13. Wykresy zależności $\sigma - \varepsilon_v$ dla próbek typu „W” i „K” wzmacnianych pod obciążeniem w porównaniu z próbkami wzmacnianymi bez obciążenia wstępnego [14]

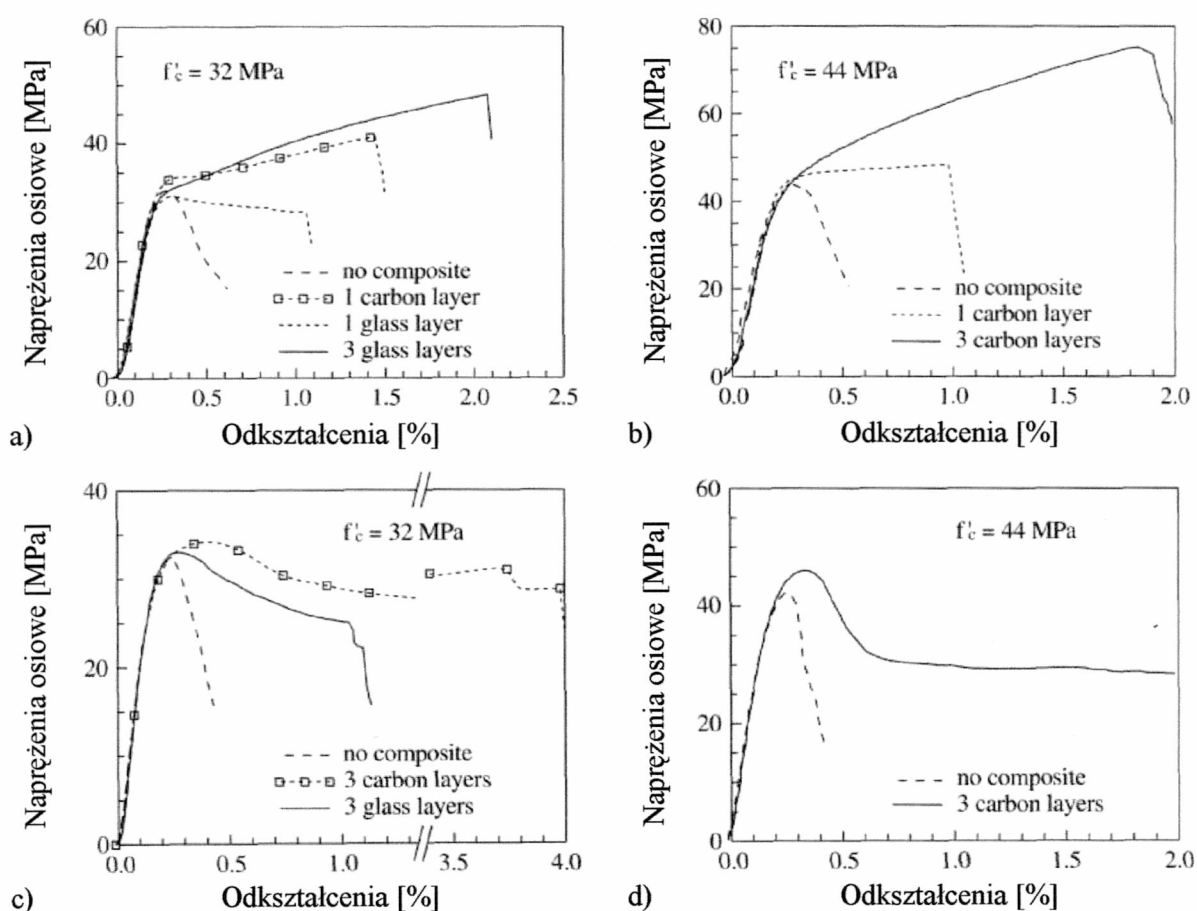
Jak widać na rysunku 2.13 wzmacnianie próbek betonowych pod obciążeniem w niewielkim stopniu wpłynęło na wzrost nośności i odkształceń granicznych elementów. Autorzy proponują, aby w praktyce inżynierskiej pomijać wpływ obciążeń wstępnych, na rzecz bezpieczeństwa wzmacnianej konstrukcji.

2.5.2. Badania słupów żelbetowych

Jednymi z prekursorów badań doświadczalnych słupów żelbetowych wzmacnianych materiałami CFRP byli Demers i Neale z Department of Civil Engineering z University of Sherbrooke w Kanadzie. W 1994 r. przeprowadzili oni wstępne badania próbek o przekroju okrągłym i kwadratowym wzmocnionych matami z włókien węglowych CFRP i włókien szklanych GFRP [7]. Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie wynosiła 32 i 44 MPa. Na rysunku 2.14 przedstawiono wykresy zależności porównujących wartości odkształceń

podłużnych elementów badawczych w funkcji naprężeń osiowych.

Już w pierwszych badaniach autorzy zauważyli znaczący wzrost właściwości plastycznych i nośności próbek wzmocnionych materiałami kompozytowymi. Owiniecie próbek trzema warstwami maty GFRP spowodowało wzrost nośności rzędu 50% a jedną warstwą maty CFRP wzrost rzędu 35% (rys. 2.14-a), natomiast zastosowanie płaszcza z maty z włókien węglowych składającego się z trzech warstw powodowało przyrost nośności rzędu 70% (rys. 2.14-b). Wyniki uzyskane dla próbek o przekroju kwadratowym pokazują porównywalny wzrost właściwości plastycznych w stosunku do próbek o przekroju okrągłym (rys. 2.14-c i 2.14-d).



Rys. 2.14. Wykresy zależności $\sigma - \varepsilon$ dla elementów wzmocnionych matami GFRP i CFRP [7]

a i b – o przekroju okrągłym, c i d – o przekroju kwadratowym
(no composite – bez wzmocnienia, carbon layer – liczba warstwa maty CFRP,
glass layer – liczba warstwa maty GFRP)

Po kilku latach autorzy przystąpili do realizacji kolejnych badań. Opracowali oni program badań, w którym parametry zmienności były determinowane przez znaczące czynniki wpływające na konieczność wzmocnienia lub naprawy istniejących słupów żelbetowych. Przeanalizowali oni stan techniczny trzydziestoletnich i starszych słupów

żelbetowych i stwierdzili, że są one zasadniczo w dobrej kondycji, ale wymagają wzmocnienia z powodu przeciążenia, błędów projektowych lub z powodu zniszczenia (np. korozji stali). W wyniku tej analizy autorzy przyjęli następujące parametry zmienności do opracowania programu badań:

Wytrzymałość betonu na ściskanie f'_c

Przyjęto $f'_c=25$ i 40 MPa.

Stopień zbrojenia podłużnego stali $\rho_g=0,01 \div 0,04$

Przyjęto dwa warianty zbrojenia podłużnego: 5#15M (średnicy $d_b=16,0$ mm) i 5#25M (średnicy $d_b=25,2$ mm), co daje stopień zbrojenia 0,014 i 0,035 (oznaczenia stali według normy CSA. 1994. Design of concrete structures. Standard A23.3-94. Canadian Standards Association).

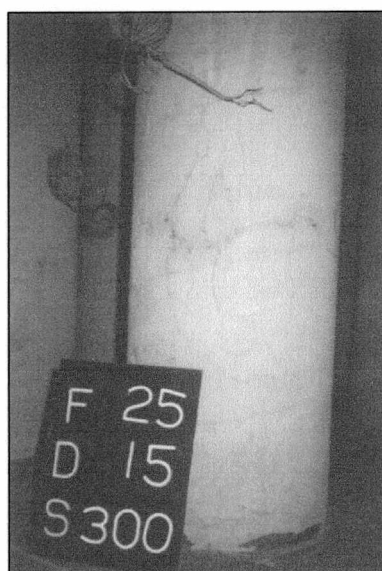
Stopień zbrojenia poprzecznego strzemionami

Przyjęto pręty #10M (średnicy $d_t=11,3$ mm) w dwóch wariantach rozstawów wzdłuż osi słupów – $s=300$ i 150 mm (oznaczenia stali jak poprzednio).

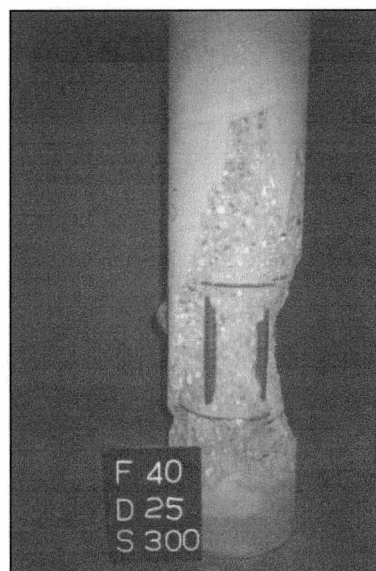
Korozja prętów zbrojenia podłużnego

Symulując przypadek odpadnięcia otuliny betonowej i korozji stali przyjęto redukcję średnicy zbrojenia podłużnego i poprzecznego o około 5 mm. Zastosowano pręty zbrojenia podłużnego średnicy $d_b=19,5$ i $d_b=11,3$ mm oraz strzemiona średnicy $d_t=6,4$ mm.

Zniszczenie betonu



a) D25-2



b) D40-4

Rys. 2.15. Obraz zniszczenia elementów serii „D” przed wzmocnieniem [6]

Parametr ten realizowano poprzez wstępne obciążanie słupów żelbetowych bez wzmocnienia, aż do momentu osiągnięcia naprężeń w betonie równych wytrzymałości na

ściskanie f'_c . Następnie elementy odciążano i poddawano wzmocnieniu. Na rysunku 2.15 pokazano przykłady zniszczonych elementów przed wzmocnieniem. Po prawej stronie przedstawiono słup D25-2 z widocznymi rysami (rys. 2.15-a), natomiast po lewej stronie pokazano skrajny przypadek zniszczenia elementu D40-4 (rys. 2.15-b), który następnie został naprawiony i wzmocniony.

W badaniach nie uwzględniono dwóch innych parametrów zmienności, tzn. kształtu przekroju poprzecznego i rodzaju materiału kompozytowego. Przedmiotem badań było 16 słupów żelbetowych o przekroju okrągłym $\varnothing 300$ mm i wysokości 1200 mm, wzmocnionych trzema warstwami maty CFRP. Liczba warstw płaszcza CFRP została dobrana na podstawie pierwszych badań autorów [7]. Do wykonania wzmocnień wykorzystano maty z włókien węglowych o następujących parametrach technicznych: wytrzymałość na rozciąganie – 1270 MPa, moduł sprężystości – 84 GPa, odkształcenia graniczne przy zerwaniu – 1,5%, grubość – 0,30 mm.

Na podstawie wymienionych powyżej parametrów autorzy opracowali program badań, który zaprezentowano w tabelicy 2.8.

Tabela 2.8. Program badania słupów [6]

Lp.	Oznaczenia próbek	f'_c	d_b	d_t	Korozja stali	s	Zniszczenie
		[MPa]	[mm]	[mm]		[mm]	
1	D25-1	25	11,3	6,4	Tak	150	Tak
2	D25-2	25	16,0	11,3	Nie	300	Tak
3	D25-3	25	19,5	6,4	Tak	150	Tak
4	D25-4	25	25,2	11,3	Nie	300	Tak
5	D40-1	40	11,3	6,4	Tak	150	Tak
6	D40-2	40	16,0	11,3	Nie	300	Tak
7	D40-3	40	19,5	6,4	Tak	150	Tak
8	D40-4	40	25,2	11,3	Nie	300	Tak
9	U25-1	25	11,3	6,4	Tak	150	Nie
10	U25-2	25	16,0	11,3	Nie	300	Nie
11	U25-3	25	19,5	6,4	Tak	150	Nie
12	U25-4	25	25,2	11,3	Nie	300	Nie
13	U40-1	40	11,3	6,4	Tak	150	Nie
14	U40-2	40	16,0	11,3	Nie	300	Nie
15	U40-3	40	19,5	6,4	Tak	150	Nie
16	U40-4	40	25,2	11,3	Nie	300	Nie

Słupy poddano próbie doraźnego ściskania osiowego po upływie dwóch tygodni od momentu wzmocnienia. Podczas badania rejestrowano: odkształcenia podłużne betonu ε_c , odkształcenia podłużne prętów zbrojeniowych ε_s , odkształcenia obwodowe maty kompozytowej ε_f oraz poziom obciążenia. Naprężenia podłużne w betonie wyznaczano na podstawie zależności:

$$f_c = \frac{P - E_s \varepsilon_s A_s}{A_g - A_s}, \quad (E_s \varepsilon_s \leq f_y), \quad (2.1)$$

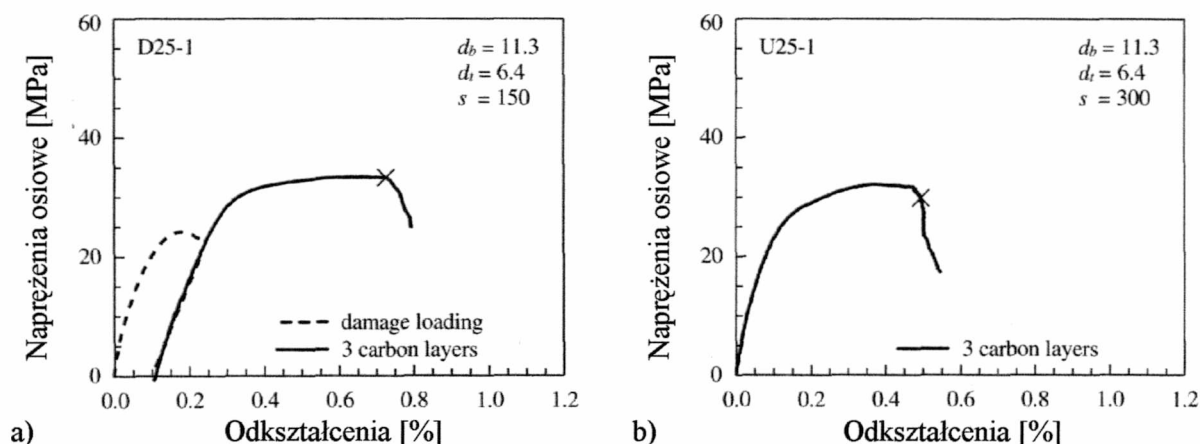
gdzie:

P – obciążenie [kN],

A_s i f_y – odpowiednio: powierzchnia i granica plastyczności stali zbrojeniowej,

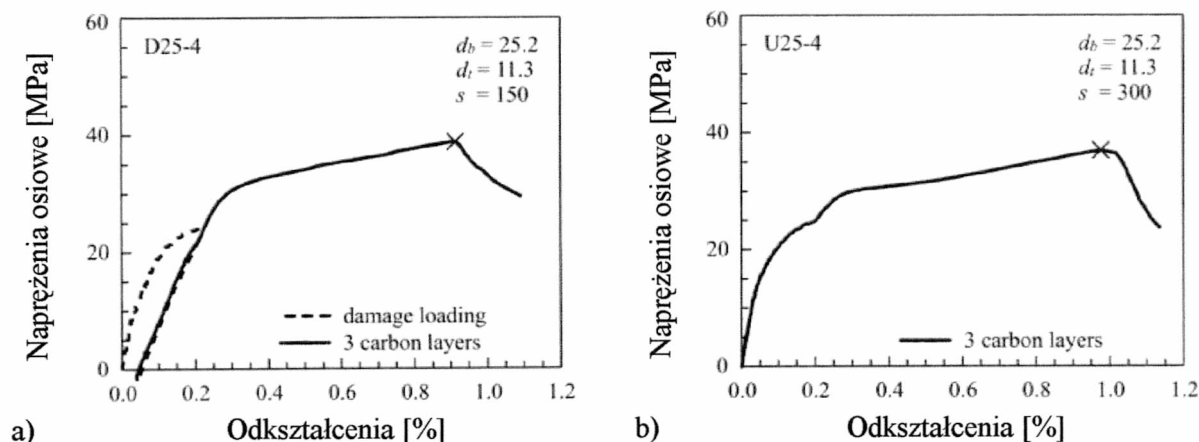
A_g – powierzchnia przekroju poprzecznego betonu.

W celu poznania cech odkształcalnościowych elementów badawczych autorzy opracowali zależności między podłużnymi naprężeniami w betonie i odkształceniami podłużnymi betonu. Wykresy zależności $f_c - \varepsilon_c$ dla wybranych elementów przedstawiono na rysunkach 2.16 ÷ 2.18. Symbolem „X” na wykresach oznaczono punkt odpowiadający osiągnięciu wytrzymałości na rozciąganie zewnętrznego zbrojenia kompozytowego. W przypadku elementów serii „D” linia przerywana odnosi się do pierwszego cyklu obciążeń do zniszczenia, natomiast linia ciągła odpowiada próbie ściskania po wzmocnieniu słupów. Dla lepszej czytelności, wykresy serii „D” i „U” pogrupowano w pary odpowiadające elementom o podobnych parametrach (różnicę stanowi rozstaw strzemion).

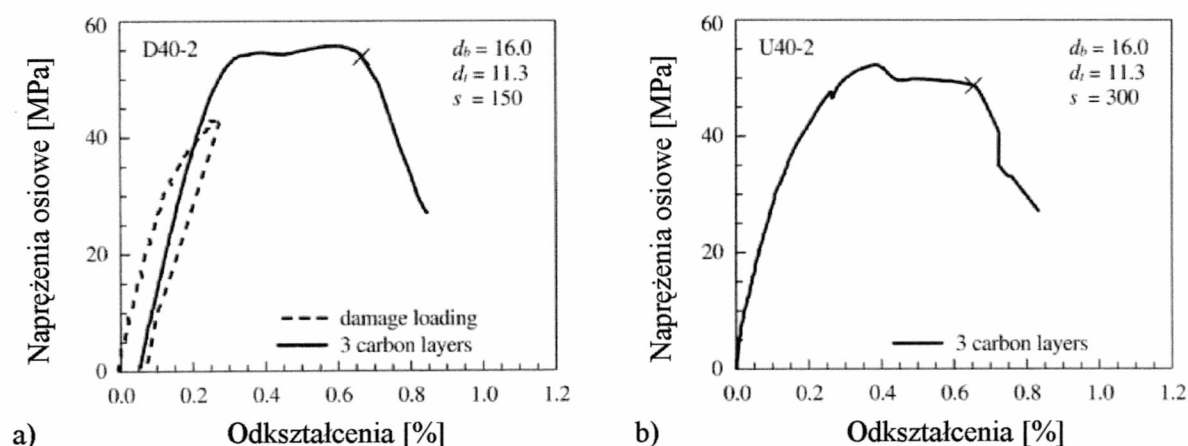


Rys. 2.16. Wykresy zależności $f_c - \varepsilon_c$ dla elementów badawczych a) D25-1 i b) U25-1 [6]
(damage loading – obciążenie niszczące, 3 carbon layers – trzy warstwy maty CFRP)

W tablicy Z1.4 w załączniku nr 1 podano maksymalne naprężenia osiowe f'_{co} i odpowiadające im odkształcenia podłużne betonu ε'_{co} elementów serii „D” przed wzmocnieniem. Na podstawie doświadczalnych parametrów wytrzymałościowych materiałów autorzy określili teoretyczne wartości sił niszczących P_n i porównali je z siłami P_u uzyskanymi z doświadczeń. Na podstawie wstępnego cyklu obciążeń przedstawionych na wykresach linią przerywaną (rys. 2.16 ÷ 2.18) wyznaczono moduły sprężystości betonu w czasie obciążania E_c i przy odciążaniu (po zniszczeniu) E_{cr} .



Rys. 2.17. Wykresy zależności $f_c - \epsilon_c$ dla elementów badawczych a) D25-4 i b) U25-4 [6]



Rys. 2.18. Wykresy zależności $f_c - \epsilon_c$ dla elementów badawczych a) D40-2 i b) U40-2 [6]

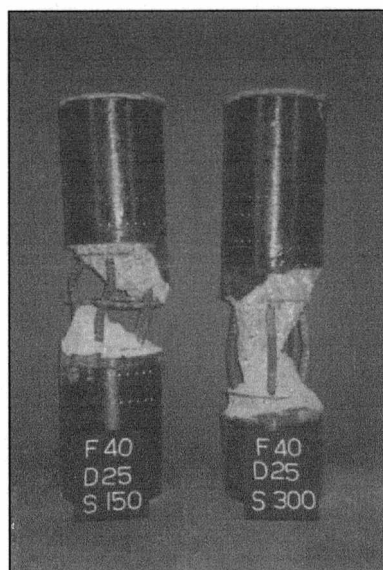
Po zrealizowaniu próby symulacji zniszczenia, elementy serii „D” zostały wzmocnione zgodnie z założeniami opisanymi powyżej i poddane powtórnej próbie ściskania. Jak widać na rysunkach 2.16 ÷ 2.18 wyniki badań pokazują znaczący wpływ wzmocnienia matami kompozytowymi na wzrost nośności słupów i poprawę ich właściwości plastycznych w porównaniu z elementami bez wzmocnienia (linia przerywana).

Komplet wyników badań słupów żelbetowych wzmocnianych zewnętrznym płaszczem z mat CFRP, wykonanych przez Demersa i Neale przedstawiono w tablicy Z1.5 w załączniku nr 1.

Porównując wartości f'_{cc} , P_{uc} , i ϵ'_{cc} zawarte w tablicy Z1.5 dla słupów serii „D” z opowiadającymi im wartościami f'_{co} , P_u , i ϵ'_{co} z tablicy Z1.4 widać, że naprawa i wzmocnienie poprzez owinięcie płaszczem CFRP zniszczonych elementów powoduje wzrost ich nośności i odkształceń podłużnych. Średnie maksymalne naprężenia podłużne w betonie dla elementów typu D25 i D40 wynoszą odpowiednio 35,2 i 53,0 MPa, co daje przyrost rzędu 47,3 i 21,2 % w stosunku do maksymalnych naprężeń osiowych f'_{co} słupów bez wzmocnienia.

Wyniki te pokazują, że relatywnie większy przyrost nośności uzyskano dla elementów wykonanych ze słabszego betonu. Natomiast średnie maksymalne naprężenia podłużne w betonie dla elementów typu U25 i U40 wynoszą odpowiednio 35,4 i 52,7 MPa, co odpowiada wynikom uzyskanym dla słupów typu D25 i D40. Wynika stąd, że zdolność obu typów słupów (serie „D” i „U”) do przenoszenia obciążeń jest zbliżona pod warunkiem, że są wzmocnione identycznym zewnętrznym płaszczem CFRP. Efekt wzmocnienia jest również widoczny przy porównaniu pomierzonych wartości sił niszczących P_{uc} i prognozowanej wartości nośności słupów bez wzmocnienia P_n zestawionych w tablicy Z1.5. Wyniki badań pokazują również, że moduł sprężystości E_{cc} słupów wstępnie obciążanych jest mniejszy od wartości uzyskanych dla elementów wzmocnionych obciążanych po raz pierwszy. Natomiast wartości E_{cc} uzyskane dla słupów serii „U” (tablica Z1.5) są porównywalne z wartościami E_c dla elementów serii „D” (tablica Z1.4). Wynika stąd, że zewnętrzne uzwojenie matą kompozytową nie wpływa w istotny sposób na moduł sprężystości betonu.

Na rysunku 2.19 pokazano typowe przykłady obrazu zniszczenia badanych elementów. Zniszczenie następowało w sposób gwałtowny poprzez rozerwanie płaszcza CFRP, a beton w obszarze zniszczenia był całkowicie zmiażdżony i rozdrobniony. Widoczne na rysunku 2.19 uplastycznienie prętów zbrojenia podłużnego następowało zawsze po rozerwaniu maty z włókien węglowych.



Rys. 2.19. Obraz zniszczenia słupów wzmocnionych – po lewej U40-4 i po prawej D40-4 [6]

Reasumując autorzy stwierdzają, że zastosowanie mat z włókien węglowych jako zewnętrznego uzwojenia słupów żelbetowych ma znaczący wpływ na wzrost nośności tego typu elementów. Wcześniejsze badania Demersa i Neale z 1994 r. pokazały, że efektywność

wzmocnienia, uzależniona jest od intensywności zbrojenia kompozytowego (liczby warstw maty) oraz rodzaju włókien. Efekty wstępnego cyklu obciążenia (zniszczenia) betonu zaobserwowano jedynie w zmniejszeniu wartości modułu sprężystości betonu w słupach po wzmocnieniu. W związku z tym autorzy proponują zastosowanie dodatkowego usztywnienia podłużnego słupów owijanych jednokierunkowymi matami kompozytowymi. W badaniach nie zauważono bezpośredniego wpływu korozji stali zbrojeniowej, na intensywność wzmocnienia, którą symulowano poprzez zmniejszenie przekroju poprzecznego prętów.

Kolejnym istotnym czynnikiem wpływającym na skuteczność wzmocniania słupów żelbetowych materiałami FRP jest mimośród siły podłużnej. Wpływ tego parametru w swoich badaniach rozważali Li i Hadi z Faculty of Engineering z University of Wollongong w Australii [28]. Autorzy zwracają uwagę na to, że w praktyce inżynierskiej bardzo rzadko występuje idealne ściskanie osiowe i prawie zawsze pojawiają się mimośrodowość niezamierzone, których wpływ należy uwzględniać w projektowaniu. W związku z tym postanowili zweryfikować dotychczasowe wyniki badań, dotyczące ściskania osiowego, prezentowane między innymi przez Demersa i Neale [6, 7].

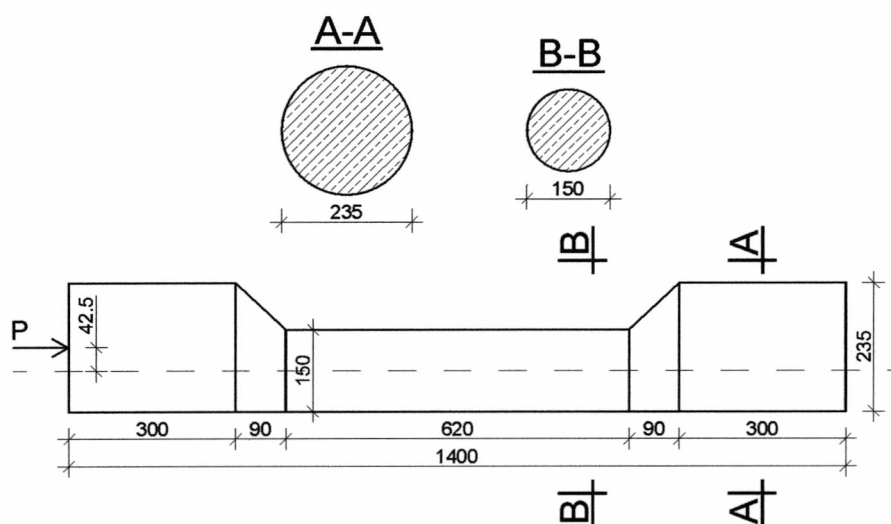
Celem badań była ocena skuteczności zastosowania materiałów kompozytowych do wzmocniania mimośrodowo ściskanych słupów żelbetowych oraz ocena efektywności tego typu zbrojenia zewnętrznego. Do opracowania programu badań założono, że o skuteczności wzmocnienia decydują: rodzaj włókien tworzących materiał FRP, stopień kompozytowego zbrojenia poprzecznego oraz kształt przekroju poprzecznego. W związku z tym, że wpływ ostatniego parametru jest stosunkowo dobrze opisany w literaturze autorzy przyjęli w swoich badaniach tylko elementy o przekroju okrągłym. Jako parametry zmienności założono:

- sposób zbrojenia: wewnętrzne – stalowe i zewnętrzne – kompozytowe,
- liczbę warstw maty FRP: jedna, dwie i trzy,
- rodzaj włókien: węglowe – CFRP i szklane – GFRP,

Przedmiotem badań było 7 słupów o przekrojach okrągłych: $\varnothing 235$ mm w głowicy podporowej i $\varnothing 150$ mm w odcinku pomiarowym. Całkowita wysokość elementów wynosiła 1400 mm, natomiast wysokość odcinka pomiarowego wynosiła 620 mm (rys. 2.20). Pięć elementów wykonano jako betonowe, natomiast pozostałe dwa jako żelbetowe. Zbrojenie podłużne wykonano w postaci sześciu prętów RW10 (według oznaczeń australijskich: $\varnothing 10$ mm Ribbed Wire, $f_y=500$ MPa). W części głowicowej zastosowano dodatkowe zbrojenie w postaci trzech prętów RW8 ($\varnothing 8$ mm Ribbed Wire, $f_y=500$ MPa). Zbrojenie poprzeczne

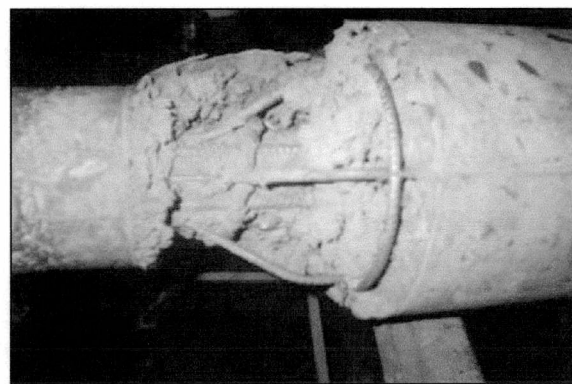
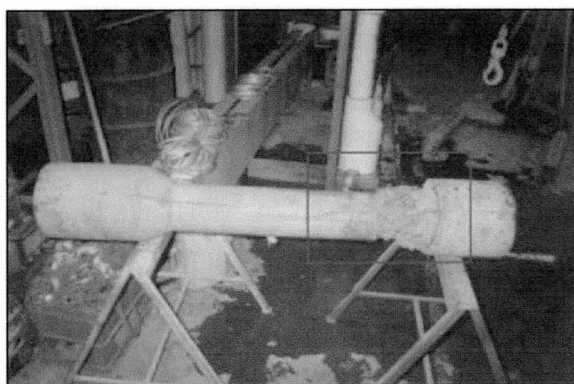
wykonano jako uzwojenie z pręta RW8 o skoku spirali, co 60 mm. Elementy wykonano w dwóch seriach z betonu o wytrzymałości na ściskanie 103,1 i 95,9 MPa.

Obciążenie mimośrodowe realizowano za pomocą przegubu wałkowego umieszczonego tylko w górnej części słupa, natomiast powierzchnia dolnej głowicy podporowej przylegała do stalowej płyty. Wszystkie elementy obciążano z mimośrodem 42,5 mm (rys. 2.20).



Rys. 2.20. Elementy badawcze [28]

Pięć elementów betonowych wzmocniono matami z włókien węglowych lub szklanych w następującej konfiguracji: jedno- i trzywarstwowo matą CFRP oraz jedno-, trzy- i pięciowarstwowo matą GFRP. Jeden element żelbetowy wzmocniono trzema warstwami maty GFRP, natomiast drugi element żelbetowy miały pozostać bez wzmocnienia, jako kontrolny do porównania skuteczności zbrojenia wewnętrznego i zewnętrznego. Jednak po wykonaniu próbek okazało się, że w wyniku złego zawibrowania betonu element ten wymaga naprawy (rys. 2.21). Słup C1-1 wzmocniono w częściach głowicowych trzema warstwami maty CFRP. Szczegółowy program badań przedstawiono w tabelicy 2.9.



Rys. 2.21. Słup C1-1 [28]

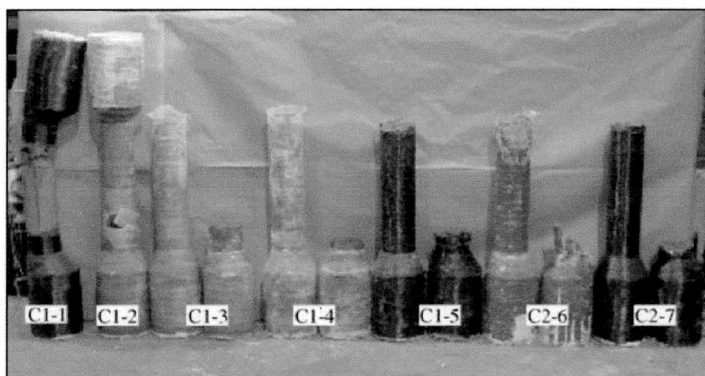
Tablica 2.9. Program badania słupów wzmocnianych matami CFRP i GFRP [28]

Lp.	Oznaczenia próbek	Średnica [mm]		Wysokość [mm]	Zbrojenie wewnętrzne	Rodzaj wzmocnienia
		Głowica	Środek			
1	C1-1	235	150	1400	Tak	3 warstwy CFRP*
2	C1-2	235	150	1400	Tak	3 warstwy GFRP
3	C1-3	235	150	1400	Nie	3 warstwy GFRP
4	C1-4	235	150	1400	Nie	5 warstw GFRP
5	C1-5	235	150	1400	Nie	3 warstwy CFRP
6	C2-6	235	150	1400	Nie	1 warstwa GFRP
7	C2-7	235	150	1400	Nie	1 warstwa CFRP

* wzmocnione tylko głowice

Wszystkie słupy poddano próbie doraźnego ściskania mimośrodowego do zniszczenia, w czasie której rejestrowano wyboczenie elementów oraz poziom obciążenia.

Zniszczenia słupów następowało w wyniku gwałtownego rozerwania włókien maty, które poprzedzone było odgłosami pęknięcia płaszcza kompozytowego. Wszystkie elementy betonowe ze wzmocnieniem zniszczyły się w poniżej miejsca zmiany przekroju w górnej części słupa, w obszarze występowania maksymalnego momentu zginającego (rys. 2.22).



Rys. 2.22. Obraz zniszczenia elementów badawczych [28]

Wyniki badań, które zamieszczono w tablicy Z1.6 w załączniku nr 1 wykazują większą efektywność wzmocniania mimośrodowo ściskanych słupów żelbetowych matami CFRP w porównaniu z matami GFRP. Dla przykładu dla słupów C1-5 (3 warstwy maty CFRP) i C2-7 (1 warstwa maty CFRP) uzyskano przyrost nośności rzędu 7,4 i 7,2 % w porównaniu, odpowiednio ze słupami C1-4 (5 warstw maty GFRP) i C1-3 (3 warstwy maty GFRP).

Autorzy potwierdzają wniosek innych badaczy, że wraz ze wzrostem liczby warstw maty kompozytowej, wzrasta nośność badanych słupów. Dla przykładu dla elementu C1-5 (3 warstwy maty CFRP) zaobserwowano przyrost nośności rzędu 23% w porównaniu ze słupem C2-7 (1 warstwa maty CFRP).

Kolejnym ważnym porównaniem jest wpływ zbrojenia wewnętrznego (stalowego) i zbrojenia zewnętrznego (kompozytowego) na nośność badanych słupów. Zastosowanie

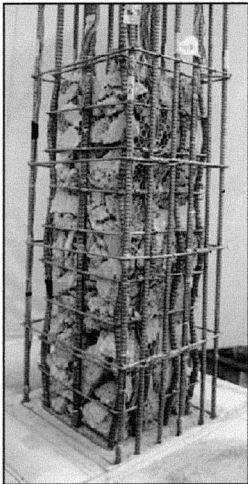
wzmocnienia w postaci trzech warstw maty z włókien węglowych jest tak samo efektywne jak stalowe zbrojenie wewnętrzne. Różnica pomiędzy siłami niszczącymi słupów C1-5 (791,5 kN) i C1-1 (836,4 kN) wynosi zaledwie 5%. Zupełnie inaczej jest dla elementów wzmocnionych matą z włókien szklanych, gdzie dla słupów C1-3 (3 warstwy maty GFRP) i C1-4 (5 warstw maty GFRP) zaobserwowano spadek nośności odpowiednio rzędu 28 i 12% w porównaniu z elementem C1-1.

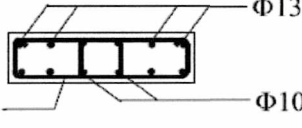
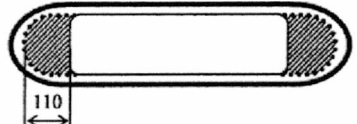
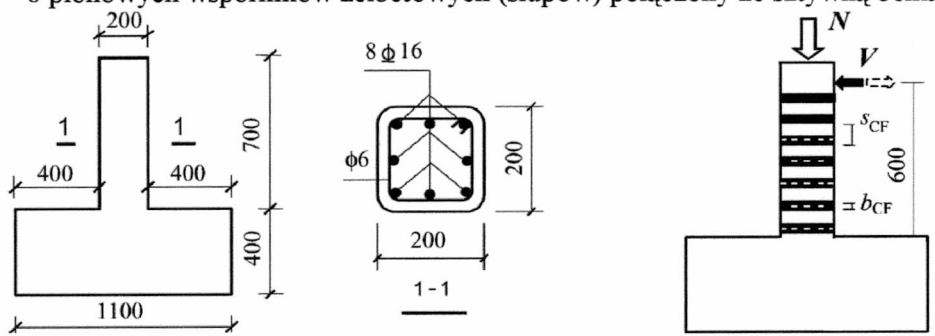
Reasumując autorzy stwierdzają, że w przypadku słupów owiniętych zewnętrznym płaszczem FRP poddanych ścisłaniu mimośrodowemu zanikają wyraźnie korzystne efekty wzmocnienia obserwowane dla elementów ściskanych osiowo. Jednakże, tego typu wzmocnienia może okazywać się bardziej zadawalające wraz ze wzrostem sztywności wzmocnienia zewnętrznego w kierunku podłużnym. Autorzy potwierdzają, że jednym z ważniejszych parametrów wpływających na skuteczność wzmocnienia jest liczba warstw maty kompozytowej. Ponadto wnioskuje, że zewnętrzne zbrojenia kompozytowe może poprawiać charakter pracy elementów betonowych poddanych ścisłaniu mimośrodowemu, jeżeli zostanie zastosowane w strefie rozciąganej.

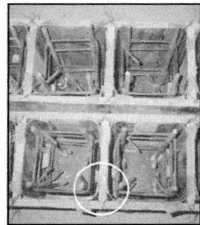
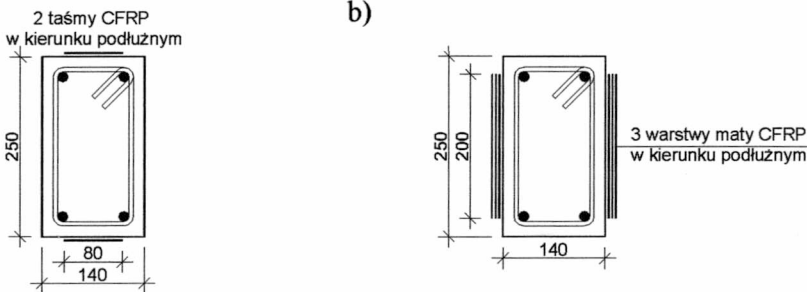
Na zakończenie przeglądu badań doświadczalnych elementów ściskanych wzmocnianych materiałami kompozytowymi FRP, w tablicy 2.10 zestawiono ważniejsze prace dotyczące tego tematu. Wiele z tych publikacji pochodzi z okresu realizacji niniejszej rozprawy, dlatego nie mogły one mieć wpływu na postawione tezy pracy (por. rozdział 3) i przeprowadzone przez autora badania doświadczalne (por. rozdział 4).

Tablica 2.10. Przegląd badań elementów ściskanych wzmocnianych materiałami FRP

Lp.	Autorzy	Problem badawczy/Przedmiot badań
1	Mirmiran A., Shahawy M., [33], 1997 r.	<u>Problem badawczy:</u> Wpływ wytrzymałości betonu na ścisłanie i stopnia poprzecznego zbrojenia kompozytowego (liczby warstw maty FRP).
		<u>Przedmiot badań:</u> 30 próbek betonowych walcowych; średnica $\varnothing 152,5$ mm; wysokość 305 mm. 6 próbek kontrolnych i 24 próbki wzmocnione 6., 10., i 14. warstwami maty GFRP.
2	Audenaert K., [1], 1999 r.	<u>Problem badawczy:</u> Wpływ doklejenia płaszcza kompozytowego do betonu. Parametr ten realizowano poprzez klasyczne doklejenie płaszcza FRP do betonu (b) i przyklejenie płaszcza FRP do betonu owiniętego folią (nb).
		<u>Przedmiot badań:</u> 7 próbek o przekroju okrągłym; średnica $\varnothing 150$ mm; wysokość 300 mm. 2 próbki wzmocnione 1. warstwą maty CFRP-HM (b), 1 próbka wzmocniona 1. warstwą maty CFRP-HM (nb), 2 próbki wzmocnione 1. warstwą maty CFRP-HT (b), 1 próbka wzmocniona 1. warstwą maty CFRP-HT (nb). (HT – high tensile – wysoka wytrzymałość na rozciąganie, HM – high modulus – wysoki moduł sprężystości)

3	Purba K.B., Mufti A.A., [41], 1999 r.	<u>Problem badawczy:</u> Zachowanie się osiowo ściskanych słupów żelbetowych wzmocnionych płaszczem z maty CFRP. <u>Przedmiot badań:</u> 3 słupy o przekroju okrągłym; średnica $\varnothing 190,6$ mm; wysokość 787,9 mm. 1 słup kontrolny i 2 słupy wzmocnione 2. warstwami maty CFRP.
4	Fukuyama K., Higashibata Y., Miyauchi Y., [9], 2000 r.	<u>Problem badawczy:</u> Naprawa i wzmacnianie uszkodzonych (zniszczonych) słupów żelbetowych obciążonych siłą podłużną i cyklicznym obciążeniem poprzecznym o zmiennym znaku. <u>Przedmiot badań:</u> 8 słupów żelbetowych połączonych ze sztywnymi belkami podporowymi. Element C3  <u>Parametry wyjściowe elementów:</u> Przekrój poprzeczny: 350x350 mm; wysokość $h=900$ mm; zbrojenie: podłużne 10$\varnothing$16 i poprzeczne: $\varnothing 6$ co 100 mm. <u>Elementy:</u> (w nawiasach podano wymiary elementów po wzmocnieniu) C1 – kontrolny, C2 – zniszczenie betonu; wzmocnienie: zgrzewany kosz stalowy + obetonowanie (450x450); C3 – zniszczenie betonu i wyboczenie prętów zbrojenia podłużnego; wzmocnienie – dodatkowe pręty podłużne + obetonowanie + płaszcz stalowy (450x450), C4 – zniszczenie betonu; wzmocnienie: obetonowanie (350x350); C5 – zniszczenie betonu; wzmocnienie: obetonowanie betonem ekspansywnym (350x350), C6 – bez zniszczenia; wzmocnienie: płaszcz stalowy (350x350), C7 – bez zniszczenia; wzmocnienie: owinięcie matą CFRP (350x350), C29 – bez zniszczenia; wzmocnienie: panele CFRP (410x410).
5	Harries K.A., Carey S.A., [12], 2003 r.	<u>Problem badawczy:</u> Wpływ doklejenia płaszcza kompozytowego do betonu, kształtu przekroju poprzecznego oraz sztywności wzmocnienia poprzecznego. Parametr ten realizowano poprzez klasyczne doklejenie płaszcza FRP do betonu (b) i przyklejenie płaszcza FRP do betonu owiniętego folią (nb). <u>Przedmiot badań:</u> 8 próbek o przekroju okrągłym; średnica $\varnothing 152$ mm; wysokość 305 mm. 2 próbki kontrolne; 2 próbki wzmocnione 3. warstwami maty GFRP (b), 1 próbka wzmocniona 3. warstwami maty GFRP (nb), 2 próbki wzmocnione 9. warstwami maty GFRP (b), 1 próbka wzmocniona 9. warstwami maty GFRP (nb). <u>Przedmiot badań:</u> 6 próbek o przekroju kwadratowym 152x152 mm; promień wyokrąglenia naroży $r=11$ i 25 mm; wysokość 305 mm. 2 próbki bez wzmocnienia, 2 próbki wzmocnione 3. warstwami maty GFRP ($r=11$ i 25 mm), 2 próbki wzmocnione 9. warstwami maty GFRP ($r=11$ i 25 mm).

6	Harries K.A., Kharel G., [13], 2003 r.	<u>Problem badawczy:</u> Wpływ sztywności wzmocnienia poprzecznego na zależność pomiędzy odkształceniami poprzecznymi i podłużnymi. <u>Przedmiot badań:</u> 11 próbek o przekroju okrągłym; średnica $\varnothing 152$ mm; wysokość 305 mm. 1 próbka kontrolna; 7 próbek wzmocnionych 1., 2., 3., 6., 9., 12. i 15. warstwami maty GFRP; 3 próbki wzmocnione 1., 2., i 3. warstwami maty CFRP.
7	Maalej M., Tanwongsva S., Paramasivam P., [30], 2003 r.	<u>Problem badawczy:</u> Kształtowanie wzmocnienia zewnętrznego słupów żelbetowych o przekroju prostokątnym. <u>Przedmiot badań:</u> 5 słupów żelbetowych. Przekrój poprzeczny: 115x420 mm; promień wyokrąglenia naroży: $r=30$ mm; wysokość 150 mm; zbrojenie: podłużne $8\varnothing 13$ i $4\varnothing 10$ i poprzeczne: $\varnothing 6$ mm. a)  b)  c)  2 podłużne warstwy maty GFRP 1 podłużna warstwy maty GFRP — 2 poprzeczne warstwy maty GFRP ■ beton wysokiej wytrzymałości <u>Przedmiot badań:</u> 1 słup kontrolny (rys. a); 2 słupy wzmocnione 2. podłużnymi i 2. poprzecznymi warstwami maty GFRP (rys. b); 2 słupy wzmocnione betonem o wysokiej wytrzymałości + 1. podłużną warstwą maty GFRP + 2. poprzecznymi warstwami maty GFRP (rys. c).
8	Ye L.P., Zhang K., Zhao S.H., Feng P., [53], 2003 r.	<u>Problem badawczy:</u> Wpływ obciążenia podłużnego oraz cyklicznego obciążenia poprzecznego o zmiennym znaku – symulacja oddziaływań sejsmicznych. <u>Przedmiot badań:</u> 8 pionowych wsporników żelbetowych (słupów) połączone ze sztywną belką.  Przekrój poprzeczny: 200x200 mm; promień wyokrąglenia naroży: $r=20$ mm; wysokość: 700 mm; zbrojenie: podłużne $8\varnothing 16$ i poprzeczne: $\varnothing 6$ co 200 mm; $b_{CF}=0, 15, 20, 25, 35, 45$ mm i pełne owinięcie; $s_{CF}=60$ mm; materiał: mata CFRP. Pierwsza grupa elementów: $b_{CF}=0, 15, 25, 35$ mm i pełne owinięcie; $s_{CF}=60$ mm; słupy obciążane po wzmocnieniu. Druga grupa elementów: $b_{CF}=20$ mm; $s_{CF}=60$ mm; słup wzmocniony pod obciążeniem. Trzecia grupa elementów: $b_{CF}=20$ i 45mm; $s_{CF}=60$ mm; słupy obciążane do granicy plastyczności prętów zbrojenia podłużnego i następnie wzmocnione.

9	Tastani S.P., Pantazopoulou S.J., [47], 2004 r.	<u>Problem badawczy:</u> Naprawa i wzmacnianie skorodowanych słupów żelbetowych.	
		<u>Przedmiot badań:</u> 21 elementów żelbetowych; przekrój poprzeczny: 200x200 mm; promień wyokrąglenia naroży: $r=30$ mm; wysokość 320 mm; otulina: 20 mm; zbrojenie: podłużne 4$\varnothing$12, poprzeczne: $\varnothing$5 i 8 mm. Elementy zostały poddane korozji elektrochemicznej, później zostały obciążone do zniszczenia i w następnej kolejności poddano je wzmocnieniu. Opcja 1: po usunięciu skorodowanego betonu próbki naprawiono zaprawą o wysokiej wytrzymałości; opcja 2: bez usuwania uszkodzonego betonu próbki wzmocniono 2. lub 4. warstwami maty CFRP lub GFRP; opcja 3: po usunięciu skorodowanego betonu próbki naprawiono zaprawą o wysokiej wytrzymałości a następnie wzmocniono 2. lub 4. warstwami maty CFRP lub GFRP.	
10	Ignatowski P., Kamińska M.E., [15], 2004 r.	<u>Problem badawczy:</u> Wpływ smukłości na mechanizm odkształcalności i zniszczenia wzmocnionych smukłych słupów żelbetowych.	
		<u>Przedmiot badań:</u> 2 słupy żelbetowe; przekrój poprzeczny: 140x250 mm; promień wyokrąglenia naroży: $r=10$ mm; wysokość 3000 mm; zbrojenie: podłużne 4$\varnothing$14, poprzeczne: $\varnothing$6 mm co 140 mm w przęśle i co 70 mm przy podporach.	
		a) Element S-t/2m (rys. a): wzmocniony w kierunku podłużnym 2. taśmami CFRP przyklejonymi na obu krótszych bokach przekroju poprzecznego oraz w kierunku poprzecznym 2. warstwami maty CFRP.	
		b) Element S-m/2m (rys. b): wzmocniony w kierunku podłużnym 3. warstwami maty CFRP przyklejonymi na obu dłuższych bokach przekroju poprzecznego oraz w kierunku poprzecznym 2. warstwami maty CFRP.	

2.6. Podsumowanie

Analiza aktualnego stanu wiedzy, zaprezentowanego w oparciu o cytowane publikacje, wykazuje, że problematyka wzmacniania elementów ściskanych z wykorzystaniem materiałów kompozytowych znalazła, w ostatnich latach, bogate odzwierciedlenie w badaniach doświadczalnych. W przedstawionych pracach analizowano wiele parametrów, wpływających na cechy odkształcalnościowe i nośność tego typu elementów, takich jak:

- stopień poprzecznego zbrojenia kompozytowego (inaczej: sztywność wzmocnienia lub liczba warstw maty FRP) [7, 12, 13, 14, 28, 33, 43],

- rodzaj materiału kompozytowego (AFRP, GFRP lub CFRP) [7, 13, 28, 43],
- kształt przekroju poprzecznego elementów [7, 12, 14, 43],
- wytrzymałość betonu na ściskanie [6, 7, 33],
- wstępne obciążanie elementów przed wzmocnieniem [6, 14, 53],
- współdziałanie podłużnego zbrojenia kompozytowego w przenoszeniu naprężeń ściskających [14],
- mimośród siły podłużnej [14, 28],
- smukłość [15],
- wstępne zniszczenie lub skorodowanie elementów żelbetowych przed aplikacją systemu wzmacniającego [6, 9, 47, 53],
- cykliczne obciążenia poprzeczne o zmiennym znaku [9, 53],
- wpływ doklejenia – nie doklejenia płaszcza kompozytowego do betonu [1, 12].

Rezultaty przedstawionych wyników badań pokazują, że metoda wzmocniania ściskanych elementów żelbetowych poprzez doklejenie do nich materiałów kompozytowych wpływa na przyrost ich nośności granicznej, a także na poprawę właściwości plastycznych. Jednak warunkiem koniecznym, gwarantującym skuteczność metody jest przestrzeganie reżimów technologicznych i jakościowych aplikacji systemu.

Wykazano, że o stopniu wzmocnienia elementów decydują przede wszystkim: liczba warstw zbrojenia uzwajającego, kształt przekroju poprzecznego oraz rodzaj maty kompozytowej. Najkorzystniejsze rezultaty wzmocnienia obserwowano dla próbek walcowych owiniętych kilkakrotnie matą CFRP, spowodowane to było tym, że uzwojenie zewnętrzne powodowało powstawanie w przekroju poprzecznym próbek trójosiowego stanu naprężeń i ograniczenie przyrostu odkształceń poprzecznych. Mniejsze efekty uzyskano dla elementów o przekrojach czworokątnych – kwadratowym i prostokątnym. Jednakże, dla tego pierwszego typu elementów wykazano, że przyrost nośności zależy od wartości promienia wyokrąglenia naroży. Wraz ze zbliżaniem się do przekroju okrągłego, korzyści ze wzmocnienia są coraz bardziej widoczne. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że w praktyce inżynierskiej, trudność polega na wykonaniu dużych promieni wyokrąglenia naroży we wzmocnianych słupach o przekrojach czworokątnych. Niejednokrotnie możliwe jest jedynie niewielkie sfazowanie krawędzi.

Już w pierwszych swoich badaniach Demers i Neale [7] wykazali lepszą przydatność kompozytów węglowych w porównaniu z pozostałymi rodzajami materiałów FRP. O ich szerszej możliwości zastosowania świadczą również parametry wytrzymałościowe

materiałów CFRP prezentowane w niniejszym rozdziale.

Badania próbek wstępnie obciążonych (zniszczonych) przed wzmocnieniem pokazały, że jedyne efekty wstępnego obciążania są widoczne w zmniejszeniu wartości modułu sprężystości betonu w słupach po wzmocnieniu. Nie ma ono istotnego wpływu na szybkość przyrostu odkształceń, a w niewielkim stopniu powoduje przyrost nośności i odkształceń granicznych. Wynika stąd, że konieczne jest opracowanie rozwiązania mającego na celu zwiększenia sztywności podłużnej zniszczonych elementów poddawanych wzmocnieniu.

Badania elementów poddanych ścisnaniu mimośrodowemu nie dają jednoznacznej odpowiedzi na pytanie o skuteczności wzmocnienia płaszczem FRP. Na przykład w pracy [14] autorzy wnioskują, że efektywność wzmocnienia elementów o przekroju prostokątnym zależy od liczby warstw poprzecznej maty kompozytowej i jest wyraźnie korzystniejsza niż w przypadku obciążenia osiowego.

Wstępne badania eksperymentalne smukłych słupów żelbetowych wzmocnionych podłużnym i poprzecznym zbrojeniem kompozytowym wykazują poprawę właściwości plastycznych słupów i możliwość znaczących przyrostów wartości przemieszczeń i odkształceń przekrojów poprzecznych elementów w fazie zniszczenia.

W przedstawionym przeglądzie literatury brakuje dokładnej analizy współdziałania podłużnego wzmocnienia kompozytowego w przenoszeniu naprężeń ściskających, jedynie w pracy [14] w niewielkim stopniu poruszono ten problem. Należy dokładnie przeanalizować wpływ intensywności podłużnego zbrojenia kompozytowego, sposobu konstruowania wzmocnienia poprzecznego (całkowite owinięcie lub opaski z maty) a także wpływu poszczególnych składników wzmocnienia (podłużnego i poprzecznego) na cechy odkształcalnościowe i nośność tego typu elementów. Należy także ocenić czy podłużne wzmocnienie zewnętrzne współdziała z betonem i stalą w przenoszeniu naprężeń ściskających. Brakuje wreszcie dokładnej odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób kształtować zewnętrzne wzmocnienie kompozytowe w przypadku mimośrodowo ściskanych słupów żelbetowych a także, jaka jest skuteczność tego typu wzmocnień.

Poszukiwanie poprawnych rozwiązań tych problemów pod względem teoretycznym, konstrukcyjnym i ekonomicznym, stanowi jedno z zasadniczych zagadnień współczesnej inżynierii budowlanej. Stworzyłoby to również, możliwość szerszego zastosowania materiałów kompozytów do wzmacniania ściskanych słupów żelbetowych i popularyzacji tego systemu wśród inżynierów konstruktorów.

3. TEZY PRACY

Na podstawie zaprezentowanego przeglądu aktualnego stanu wiedzy postawiono następujące tezy:

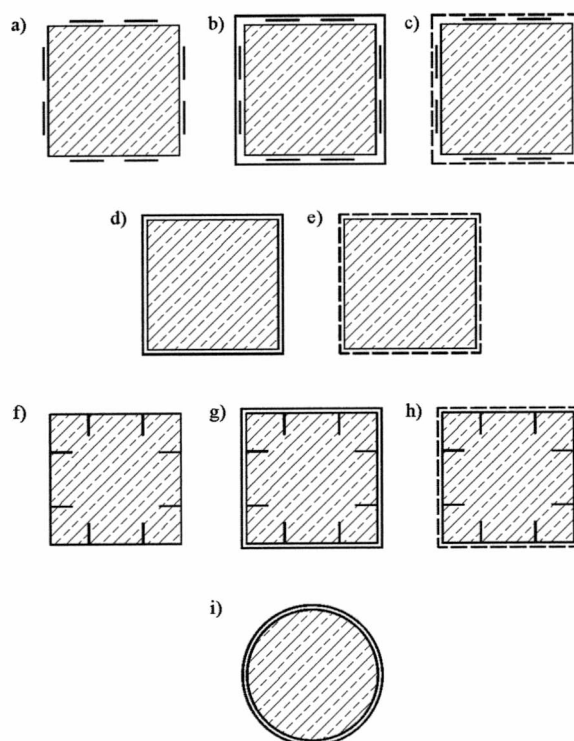
1. Istnieje możliwość wskazania najczęściej występującego mechanizmu zniszczenia ściskanych słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami i matami z włókien węglowych, a na tej podstawie określenia wartości granicznych odkształceń podłużnych przekroju.
2. Wzmacnianie ściskanych słupów żelbetowych podłużnymi odcinkami taśm z włókien węglowych powoduje ograniczenie przyrostu ich odkształceń podłużnych, co w konsekwencji prowadzi do wzrostu ich nośności granicznej, która zależy od intensywności wzmocnienia podłużnego.
3. Istnieje możliwość modyfikacji znanych modeli obliczeniowych, w celu opracowania jednolitego algorytmu do obliczania nośności krępych, osiowo ściskanych słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami i matami CFRP.

W celu potwierdzenia tez pracy doktorskiej zrealizowano program badań przedstawiony w punkcie 1.2 niniejszej rozprawy.

4. BADANIA DOŚWIADCZALNE

4.1. Zakres badań

Wzrost zainteresowania, łatwość aplikacji i konkurencyjność wzmocnień, elementów poddanych zginaniu i ścinaniu, z zastosowaniem materiałów CFRP pozwoliła na wysunięcie kolejnej propozycji wykorzystania kompozytów węglowych do wzmacniania elementów ściskanych. W roku 2001 w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej podjęto badania mające na celu wykazanie skuteczności wzmocniania ściskanych słupów żelbetowych podłużnymi odcinkami taśm z włókien węglowych oraz poprzecznymi obejmami (opaskami) z maty z włókien węglowych. Celem podjętych badań było również określenie zależności między intensywnością wzmocnienia podłużnego a nośnością elementu, poznanie wpływu mimośrodowej siły podłużnej na cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe oraz opis mechanizmu zniszczenia tego typu elementów.



Rys. 4.1. Proponowane rozwiązania wzmocniania elementów ściskanych z wykorzystaniem kompozytów węglowych (oznaczenia w tekście)

Założenia metody wzmocniania elementów ściskanych z wykorzystaniem kompozytów węglowych wywodzą się ze znanego sposobu przyklejania i mocowania blach stalowych, płaskowników i obejm. Metody te należą do grupy wzmocnień poprzez zwiększanie

przekroju poprzecznego elementu. W planowaniu badań doświadczalnych rozważane były następujące rozwiązania wzmocnień: poprzez przyklejanie zewnętrzne podłużnych taśm (rys. 4.1-a), poprzez przyklejanie zewnętrzne podłużnych taśm i poprzecznych obejm z maty (rys. 4.1-b), poprzez przyklejanie zewnętrzne podłużnych taśm i owinięcie ciągle poprzeczną matą (rys. 4.1-c), poprzez przyklejanie poprzecznych obejm z maty (rys. 4.1-d, 4.1-i), poprzez owinięcie ciągle poprzeczną matą (rys. 4.1-e), poprzez wklejanie wewnętrzne podłużnych taśm (rys. 4.1-f), poprzez wklejanie wewnętrzne podłużnych taśm i przyklejanie zewnętrzne poprzecznych obejm z maty (rys. 4.1-g), poprzez wklejanie wewnętrzne podłużnych taśm i owinięcie ciągle poprzeczną matą (rys. 4.1-h).

Przystępując do realizacji rozprawy temat ten był nowością w skali światowej a na wiele postawionych pytań i problemów starały się w tamtym czasie odpowiedzieć ośrodki naukowe w kraju i za granicą. Brakowało wystarczającej literatury i publikacji dotyczących wykorzystania kompozytów węglowych do wzmacniania elementów ściskanych. Badania doświadczalne realizowane w latach 2001-2004 podzielone zostały na cztery etapy, w których poszukiwano potwierdzeń postawionych w rozprawie tez. Czerpiąc doświadczenia z poprzednich etapów badań planowano następne.

Etap I

Pierwszy etap badań doświadczalnych potraktowano, jako rozpoznanie tematu i obejmował on 3 elementy. Doraźnemu ściskaniu osiowemu poddano jeden element bez wzmocnienia (kontrolny), jeden element wzmocniony poprzez wklejanie wewnętrzne podłużnych taśm oraz jeden element wzmocniony poprzez przyklejanie zewnętrzne podłużnych taśm. Badania te opisano w punkcie 4.2 pracy.

Etap IIa

W etapie tym doraźnemu ściskaniu osiowemu poddano 12 modelowych elementów żelbetowych w dwóch seriach. Pierwsza seria składała się z pięciu słupów o różnej intensywności wzmocnienia podłużnymi taśmami z włókien węglowych, druga seria składała się natomiast z pięciu słupów o różnej intensywności wzmocnienia podłużnymi taśmami z włókien węglowych oraz wzmocnionych zewnętrznymi obejmami z maty z włókien węglowych. Dodatkowo zbadano dwa elementy bez wzmocnienia (kontrolne). Badania te opisano w punkcie 4.3 pracy.

Etap IIb

Etap IIb stanowił kontynuację badań rozpoczętych w etapie IIa. Program badań doświadczalnych objął 7 modelowych elementów żelbetowych wzmocnionych kompozytami

węglowymi i dwa elementy kontrolne bez wzmocnienia. Słupy różniły się sposobem skonstruowania wzmocnienia zewnętrznego: poprzez przyklejanie zewnętrzne podłużnych taśm, poprzez przyklejanie poprzecznych obejm z maty oraz poprzez przyklejanie zewnętrzne podłużnych taśm i poprzecznych obejm z maty. Badania te opisano w punkcie 4.4 pracy.

Etap III

Wykazany w etapach IIa i IIb przyrost nośności słupów, uzyskany dzięki zastosowaniu dodatkowego wzmocnienia zewnętrznego podłużnego i poprzecznego, wymagał potwierdzenia na elementach w skali naturalnej. Dodatkowo analizowano w tym etapie wpływ mimośrodowej siły podłużnej na skuteczność wzmocnienia. W tym celu badaniami objęto 3 elementy wzmocnione poprzez przyklejanie zewnętrzne podłużnych taśm i poprzecznych obejm z maty, 3 elementy wzmocnione poprzez przyklejanie zewnętrzne podłużnych taśm i zewnętrznego płaszcza z maty oraz 3 elementy kontrolne bez wzmocnienia. Słupy poddano doraźnemu ścisaniu osiowemu i mimośrodowemu. Badania te opisano w punkcie 4.5 pracy.

Na każdym etapie badań słupów, wykonywano również badania cech wytrzymałościowych i odkształcalnościowych betonu, stali i materiałów CFRP.

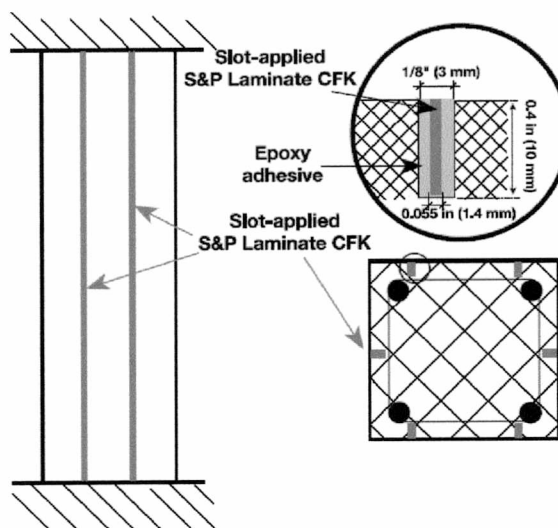
Wyniki badań w postaci obszernej cyfrowej dokumentacji zdjęciowej (ok. 1000 zdjęć) i filmowej, zapisów pomiarów w postaci elektronicznej, wykresów, zestawień i tabel są w posiadaniu autora. W pracy przedstawiono tylko wyniki niezbędne do określenia istotnych cech odkształcalnościowych i wytrzymałościowych badanych elementów.

4.2. Badania doświadczalne – etap I

4.2.1. Cel badań. Program badań

Wstępne badania eksperymentalne przeprowadzone w 2001 r., wykonano w celu rozpoznania tematu i określenia wpływu sposobu wzmocnienia podłużnego na nośność i odkształcalność elementów. Sposób wzmocnienia słupów zaczerpnięto z propozycji, zawartych w opracowaniu, jednego z producentów systemu wzmocnień [8] (rys. 4.2).

W praktyce firmy produkujące i wdrażające systemy wmacniania z wykorzystaniem kompozytów węglowych rozpoczęły w tamtym czasie wykonywanie wzmocnień słupów żelbetowych taśmami i matami z włókien węglowych, jednak nie potwierdzone one zostały odpowiednimi badaniami doświadczalnymi wykazującymi przydatność tego typu wzmocnień. Postanowiono, więc zweryfikować zaproponowane poniżej rozwiązania.

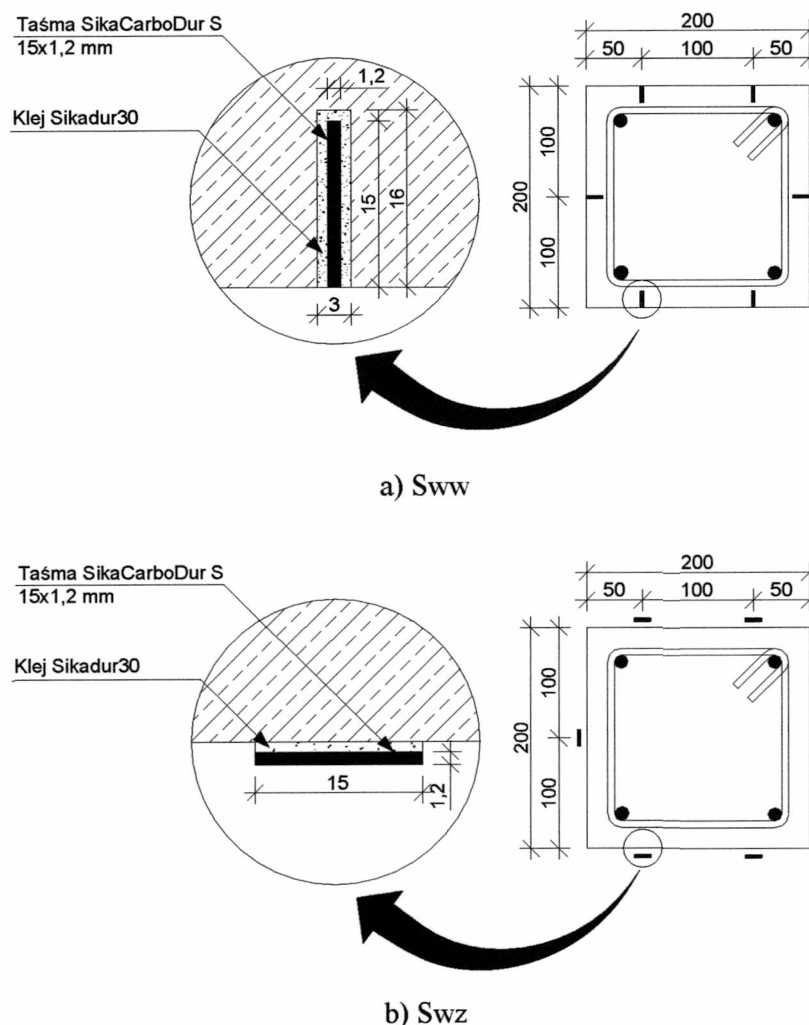


Rys. 4.2. Propozycja producenta materiałów CFRP aplikacji systemu wzmocnień w słupach żelbetowych [8]

W tym celu przeprowadzono badania trzech słupów: jeden element bez wzmocnienia – S_{bw} (jako słup kontrolny), jeden element ze wzmocnieniem wewnętrznym – S_{ww} oraz jeden element ze wzmocnieniem zewnętrznym – S_{wz}. Elementy różniły się sposobem skonstruowania wzmocnienia podłużnego poprzez wklejanie wewnętrzne podłużnych taśm – S_{ww} oraz poprzez przyklejanie zewnętrzne podłużnych taśm – S_{wz} (rys. 4.3).

Wzmocnienie obydwu elementów wykonano w postaci sześciu podłużnych odcinków taśm z włókien węglowych o przekroju poprzecznym 15x1,2 mm i długości 1500 mm. Taśmy wklejono (rys. 4.3-a) lub przyklejono (rys. 4.3-b) w tych samych miejscach na przekroju

poprzecznym elementów na całej ich wysokości.

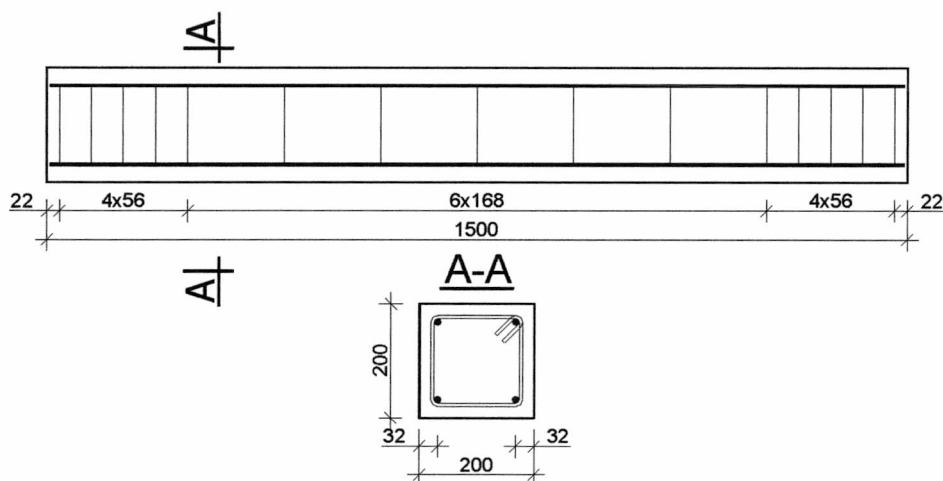


Rys. 4.3. Elementy do badań wstępnych

4.2.2. Wykonanie i przygotowanie elementów badawczych

Elementy badawcze

Badania przeprowadzono na modelach słupów o przekroju poprzecznym 200x200 mm i wysokości 1500 mm. Zbrojenie podłużne wykonano w postaci czterech prętów o średnicy $\varnothing 12$ ze stali A-II, gatunku 18G2, zbrojenie poprzeczne w postaci strzemion o średnicy $\varnothing 6$ ze stali A-I, gatunku St3SX. Zgodnie z zaleceniami [42] dla elementów prefabrykowanych rozstaw strzemion zagęszczono, przy końcach elementu do 1/3 normowego rozstawu na odcinku równym, długości szerszego boku przekroju poprzecznego słupa (rys. 4.4). Jako zakotwienie strzemion zastosowano haki półokrągłe. Strzemiona powiązano do prętów podłużnych obracając kolejne strzemie o 90° w stosunku do poprzedniego.



Rys. 4.4. Sposób zbrojenia elementów badawczych w etapie I

Wykonanie elementów badawczych

Elementy wykonano na zamówienie w P.P.H.U „WROBET” we Wrocławiu, według przekazanego wykonawcy rysunku konstrukcyjnego. Mieszanka betonowa pochodziła z wytwórni betonu towarowego „Dyckerhoff Beton Polska” we Wrocławiu. Zamówiony został beton klasy B30 o konsystencji plastycznej. Wytwórca mieszanki betonowej odmówił autorowi pracy, przekazania receptury betonu, zastępując się tajemnicą handlową.

Konsystencję mieszanki betonowej określano trzykrotnie podczas betonowania za pomocą stożka opadowego [N10]. Opad stożka wahał się w granicach 5,0 cm, co odpowiada według normy [N6] konsystencji K3 natomiast według normy [N11] konsystencji S2.

Betonowanie elementów odbywało się w pozycji poziomej z jednego zarobu mieszanki, w formie stalowej wykonanej na stole wibracyjnym. Beton w formie zagęszczano poprzez wibrowanie przez około 1 minuty. Przez miesiąc elementy przechowywano w stałych warunkach termiczno-wilgotnościowych, następnie rozformowano je i przetransportowano do Laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.

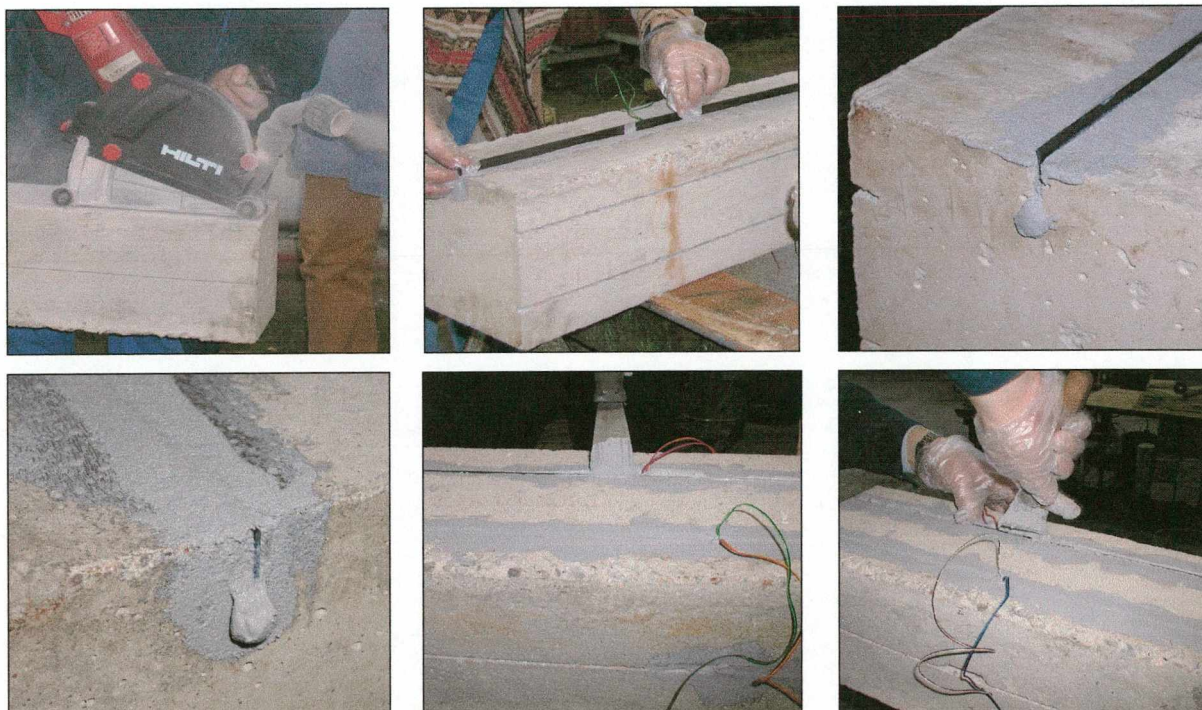
Wzmocnienie elementów badawczych

Do wykonania wzmocnień wykorzystano materiały systemu Sika CarboDur [46]:

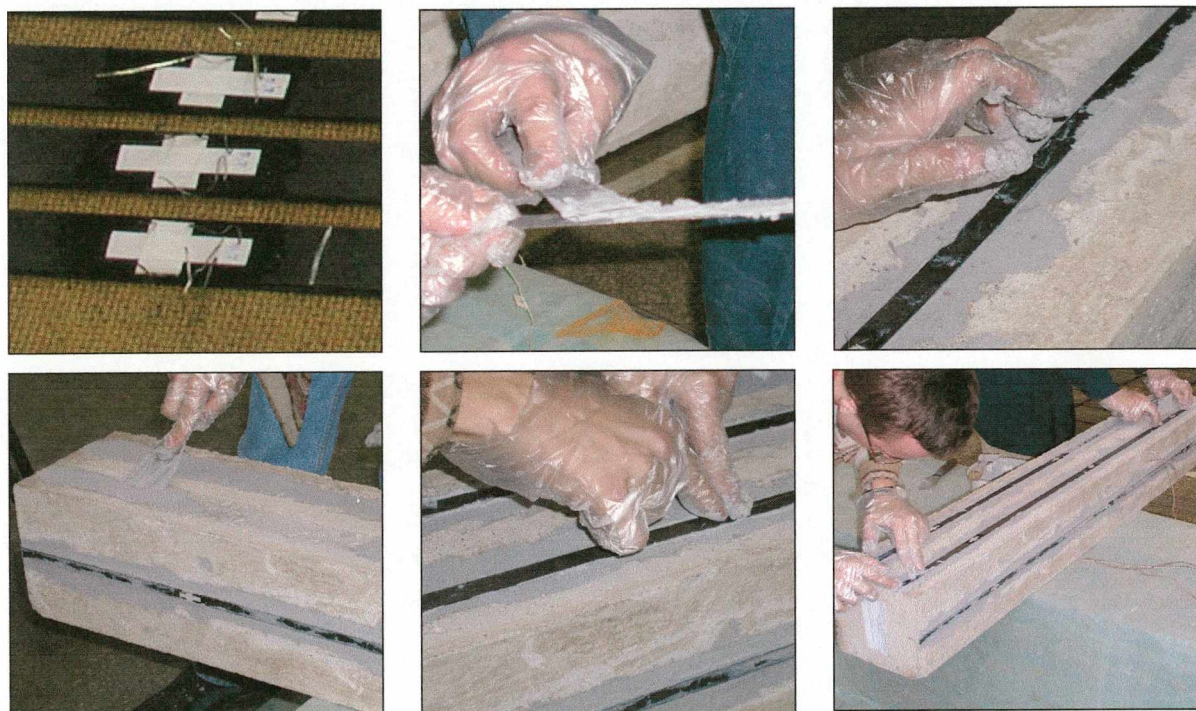
- taśmy Sika CarboDur typu S o grubości $t=1,2$ mm i szerokości 15 mm (odcinki docinano z taśm typu S512),
- klej do taśm – Sikadur 30,
- preparat do czyszczenia i aktywacji kompozytów węglowych – Sika Colma Reiniger.

Autor pracy i pracownik techniczny laboratorium zostali przeszkoleni przez doradcę technicznego firmy Sika Poland. Pierwsze aplikacje systemu były wykonywane pod jego nadzorem a po zdobyciu odpowiedniego doświadczenia pozostałe prace prowadzone były

samodzielnie.



Rys. 4.5. Przygotowanie elementu Sww



Rys. 4.6. Przygotowanie elementu Swz

W elemencie Sww wykonano nacięcia o wymiarach 3x16 mm za pomocą tarczy do cięcia betonu i specjalnej przystawki z regulacją głębokości szczeliny. Po oczyszczeniu nacięć wklejono w powstałe rowki przygotowane odcinki taśmy z naklejonymi tensometrami elektrooporowymi (rys. 4.5). Podłoże elementu Swz przygotowano zgodnie zaleceniami

technologicznymi opisanymi w rozdziale drugim pracy a następnie przyklejono odcinki taśmy z naklejonymi tensometrami elektrooporowymi (rys. 4.6).

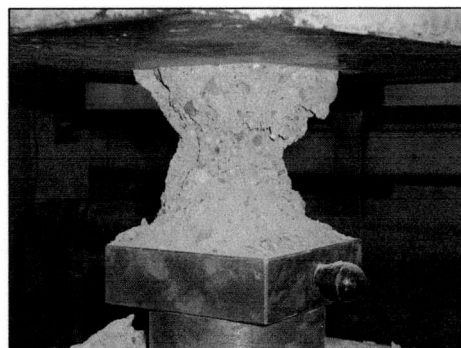
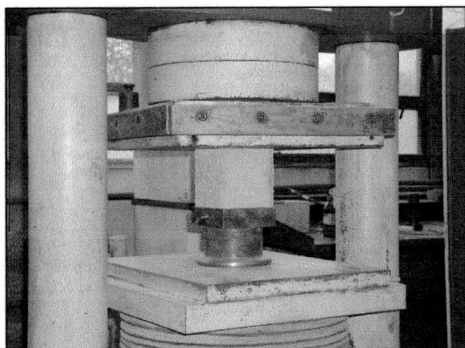
4.2.3. Cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe materiałów

a) Beton

W czasie betonowania elementów badawczych w wytwórni prefabrykatów, wykonano z tego samego zarobu sześć próbek sześciennych 150x150x150 mm do określenia wytrzymałości betonu na ściskanie. Próbkę wibrowano razem ze słupami na stole wibracyjnym przez około 1 minuty. Kostki przechowywano razem z elementami badawczymi w stałych warunkach termiczno-wilgotnościowych.

W przeddzień badania słupów określono średnią wytrzymałość betonu na ściskanie f_{cm} (zgniatanie sześciu próbek sześciennych o krawędzi 150 mm). Każdy z trzech wymiarów próbki mierzono czterokrotnie i przyjmowano wartość średnią.

Badania próbek przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej EDB 400 produkcji NRD (VEB Lipsk) o zakresie 0 ÷ 400 kN (rys. 4.7). Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie przedstawiono w tablicy 4.1



Rys. 4.7. Badanie kostek sześciennych w maszynie wytrzymałościowej EDB 400

Tablica 4.1. Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie elementów w etapie I

Lp.	Nr próbki	Bok [mm]		Pole przekroju	Wysokość średnia H	Masa	Siła niszcząca	f_{ci}	f_{cm}
		Średnia A	Średnia B	[cm ²]	[mm]	[kg]	[kN]	[MPa]	[MPa]
1	1/I	150,41	150,11	225,78	152,77	7,80	800,0	35,43	35,83
2	2/I	150,13	150,10	225,34	151,04	7,65	790,0	35,06	
3	3/I	150,95	150,77	227,58	150,19	7,70	810,0	35,59	
4	4/I	151,47	150,34	227,72	151,54	7,80	810,0	35,57	
5	5/I	149,75	150,41	225,24	151,71	7,70	880,0	39,07	
6	6/I	151,82	150,07	227,84	151,49	7,80	780,0	34,23	

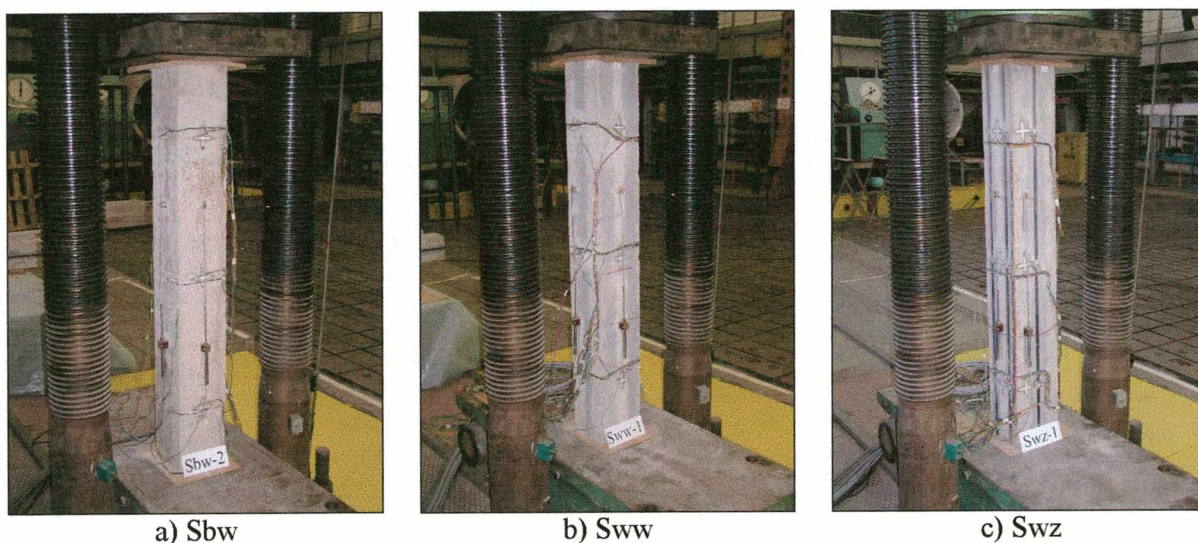
Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie została ustalona z odchyleniem standardowym $s=1,669$ MPa [36]. Odpowiada to klasie betonu w chwili badania około B30 według [N8] lub C25/30 według [N11].

Z uwagi na wstępny, rozpoznawczy charakter badań doświadczalnych słupów wzmocnianych materiałami CFRP pominięto przeprowadzenie badania cech odkształcalnościowych i wytrzymałościowych pozostałych materiałów. Wytrzymałość betonu na ściskanie uznano za decydujący parametr w ocenie nośności elementów.

4.2.4. Metodyka badań

Stanowisko badawcze

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono w Laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej na maszynie wytrzymałościowej DRMB 600 produkcji NRD (VEB Lipsk) o zakresie $0 \div 6000$ kN (rys. 4.8).



Rys. 4.8. Elementy na stanowisku badawczym

Aparatura pomiarowa

Dla każdego poziomego obciążenia rejestrowano następujące wielkości:

- odkształcenia podłużne i poprzeczne betonu,
- odkształcenia podłużne i poprzeczne taśm z włókien węglowych,
- odkształcenia prętów zbrojenia podłużnego.

Odkształcenia podłużne i poprzeczne betonu mierzono na powierzchni betonu za pomocą krzyżowych rozet tensometrycznych z tensometrów elektrooporowych typu RL=300/50. Rozety rozmieszczono w połowie wysokości i w odległościach 250 mm od

obydwu krawędzi elementu na wszystkich jego czterech ścianach. Odkształcenia podłużne betonu można było również wyznaczyć na podstawie odczytów indukcyjnych czujników przemieszczeń liniowych o zakresie ± 10 mm i dokładności 0,001 mm. Pomiaru dokonywano na bazie 50 cm (rys. 4.8). Czujniki indukcyjne mocowano, równoległe do tensometrów elektrooporowych, bezpośrednio do łapek przyklejonych do betonu klejem na bazie żywicy epoksydowej.

Odkształcenia podłużne i poprzeczne betonu taśm z włókien węglowych mierzono za pomocą krzyżowych rozet tensometrycznych. Do pomiaru odkształceń podłużnych użyto tensometrów elektrooporowych typu RL=120/20 natomiast do pomiaru odkształceń poprzecznych użyto tensometrów elektrooporowych typu RL=120/10 (rys. 4.6). Rozmieszczono je na tych samych poziomach, co rozety na betonie na wszystkich sześciu odcinkach taśm.

Odkształcenia zbrojenia podłużnego mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych typu RL=120/20. Tensometry naklejono i zabezpieczono, na każdym z prętów w środku jego wysokości, przed zabetonowaniem elementów badawczych.

Do analizy cech odkształcalnościowych posłużono się średnią arytmetyczną z odczytów właściwych tensometrów na poszczególnych poziomach wysokości elementu.

Do rejestracji wyników pomiarów używano komputera PC IBM 486 DX oraz wielokanałowego systemu pomiarowego UPM 100 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik. Czujniki indukcyjne wymagały jeszcze zastosowania dodatkowego przyrządu pomiarowego z falą nośną do czujników transformatorowych CFT 510.

Procedury badawcze

Program obciążania elementów został opisany w punkcie 4.3.4 pracy przy prezentacji etapu IIa badań doświadczalnych.

4.2.5. Wyniki badań doświadczalnych w etapie I

W ramach etapu I badań doświadczalnych wykonano (rys. 4.4, 4.5, 4.6) i poddano doraźnym próbom wytrzymałościowym 2 słupy wzmocnione taśmami CFRP oraz jeden element kontrolny bez wzmocnienia. Elementy wzmocnione różniły się sposobem skonstruowania wzmocnienia: ze wzmocnieniem wewnętrznym poprzez wklejanie wewnętrzne podłużnych taśm (S_{ww}) oraz ze wzmocnieniem zewnętrznym poprzez przyklejanie zewnętrzne podłużnych taśm (S_{wz}). Szczegółowe informacje o wykonaniu

słupów podano w punkcie 4.2.2 pracy.

Podczas obciążania każdego słupa skokowo zmieniającą się siłą mierzono:

- odkształcenia podłużne ε_{cv} i poprzeczne betonu ε_{ch} ,
- odkształcenia podłużne ε_{Lv} i poprzeczne ε_{Lh} taśm z włókien węglowych,
- odkształcenia prętów zbrojenia podłużnego ε_{sv} .

a) Nośność graniczna słupów

W tabelicy 4.2 podano zestawienie nośności granicznych badanych słupów N_u , maksymalnych średnich odkształceń podłużnych betonu $\varepsilon_{cvm,lim}$ i taśm z włókien węglowych $\varepsilon_{Lvm,lim}$ dla badanych elementów.

Tabela 4.2. Wyniki badania nośności granicznej słupów

Lp.	Oznaczenie słupa	N_u [kN]	$\varepsilon_{cvm,lim}$ [%]	$\varepsilon_{Lvm,lim}$ [%]
1	Sbw	1572	1,83	—
2	Sww	1830	2,28	2,32
3	Swz	1640	1,95	1,98

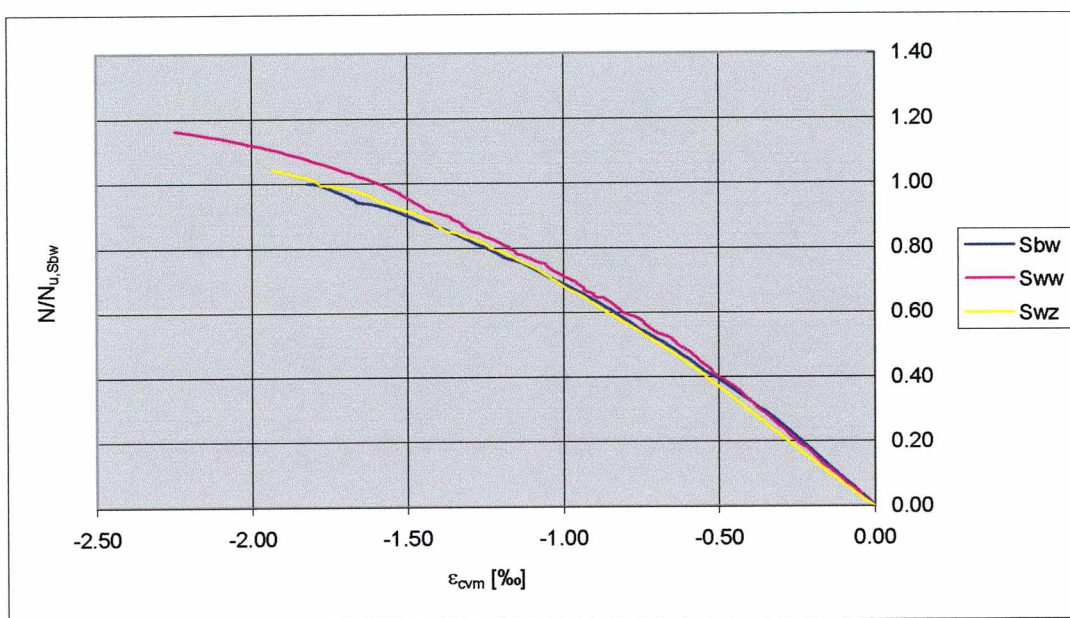
Przyrost nośności rzędu 16% zaobserwowano dla słupa wzmocnionego wewnętrznie Sww, natomiast element wzmocniony zewnętrznie Swz, przy tym samym stopniu wzmocnienia podłużnego wykazywał jedynie około 4% przyrostu nośności w stosunku do słupa bez wzmocnienia. Taki wynik należy uznać za przypadkowy i mieszczący się w granicy błędu pomiarów.

Uzyskana porównywalność granicznych odkształceń podłużnych betonu $\varepsilon_{cvm,lim}$ w elementach Sbw i Swz świadczy o braku wpływu tego typu wzmocnienia na cechy odkształcalnościowe słupa wzmocnionego zewnętrznie. Wzrost granicznych odkształceń podłużnych betonu $\varepsilon_{cvm,lim}$ dla elementy Sww spowodowany jest wklejeniem wzmocnienia w beton, które pracuje jako zbrojenie wewnętrzne. Z powodu bocznego ograniczenia, wzmocnienie takie nie ulega wyboczeniu przy ściskaniu, jak to się dzieje w przypadku aplikacji zewnętrznej.

Wydaje się uzasadnione stwierdzenie, że zwiększenie intensywności wzmocnienia wewnętrznego wpłynęłoby na wzrost nośności tego typu elementów. Wiąże się to jednak z wykonaniem większej liczby nacięć podłużnych w istniejącym elemencie. Spowodowałoby to osłabienie słupa a w konsekwencji mogłoby spowodować całkowite odpadnięcie otuliny.

b) Odształcenia podłużne betonu

Na rysunku 4.9 przedstawiono zależność pomiędzy $N/N_{u,Sbw}$ i średnimi odkształceniami podłużnymi betonu ϵ_{cvm} dla siódmego cyklu obciążenia w przekroju środkowym ($N_{u,Sbw}$ – nośność graniczna elementu bez wzmocnienia).



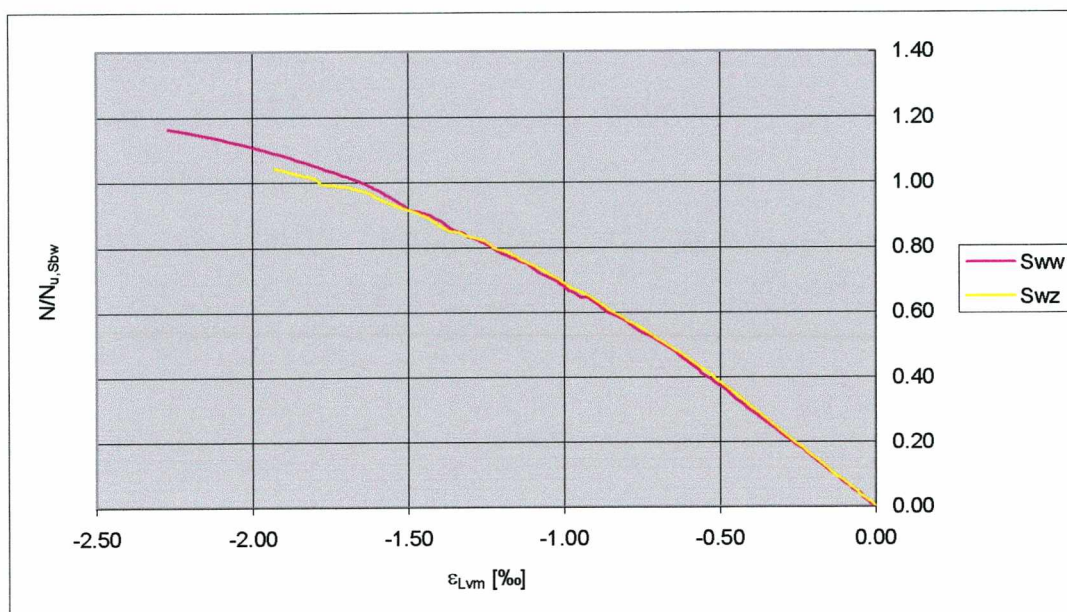
Rys. 4.9. Wykres zależności $N/N_{u,Sbw}$ - ϵ_{cvm} dla słupów: bez wzmocnienia (Sbw), ze wzmocnieniem wewnętrznym (Sww) i ze wzmocnieniem wewnętrznym (Swz).

Jak widać na rysunku 4.9 zastosowane wzmocnienie nie ma żadnego wpływu na przebieg ścieżki odkształceń podłużnych betonu ϵ_{cvm} , poza zwiększeniem wartości odkształceń granicznych $\epsilon_{cvm,lim}$, co zostało omówione powyżej. Elementy doznają jednakowych przyrostów odkształceń podłużnych ϵ_{cvm} przy jednakowych przyrostach siły podłużnej.

c) Odształcenia podłużne taśm CFRP

Na rysunku 4.10 przedstawiono zależność pomiędzy $N/N_{u,Sbw}$ i średnimi odkształceniami podłużnymi taśm z włókien węglowych ϵ_{Lvm} dla siódmego cyklu obciążenia w przekroju środkowym ($N_{u,Sbw}$ – nośność graniczna elementu bez wzmocnienia).

Jak widać na rysunkach 4.9 i 4.10 ścieżki średnich odkształceń podłużnych betonu ϵ_{cvm} i średnich odkształceń podłużnych taśm z włókien węglowych ϵ_{Lvm} są jednakowe. Świadczy to o współpracy tych dwóch materiałów i braku poślizgu na styku betonu i taśmy zbrojącej.



Rys. 4.10. Wykres zależności $N/N_{u, Sbw}$ - ϵ_{Lvm} dla słupów: ze wzmocnieniem wewnętrznym (Sww) i ze wzmocnieniem wewnętrznym (Swz)

4.2.6. Wnioski z badań doświadczalnych w etapie I

Na podstawie przeprowadzonych badań wstępnych wyciągnięto następujące wnioski, które mają bardziej charakter jakościowy niż ilościowy:

- 1) Zaproponowane w [8] wzmocnianie słupów żelbetowych w postaci wklejanych i przyklejanych podłużnych odcinków taśm z włókien węglowych jest niedostateczne. Zastosowana intensywność wzmocnienia nie ma zasadniczego wpływu na nośność graniczną i cechy odkształcalnościowe elementów. W związku z tym należy krytycznie ocenić niektóre aplikacje, prezentowane w materiałach informacyjnych producentów systemów wzmocnień [45].
- 2) W przypadku elementów o przekrojach prostokątnych lub kwadratowych należy poszukiwać rozwiązań polegających na zwiększaniu intensywności wzmocnienia (zbrojenia) podłużnego, odcinkami taśm z włókien węglowych. Wzmocnieniu zewnętrznemu powinno towarzyszyć zbrojenie obwodowe zapobiegające odspajaniu się zbrojenia zewnętrznego. Zwiększanie intensywności wzmocnienia wewnętrznego pociąga za sobą decyzję o świadomym osłabianiu elementu (np. poprzez przecinanie stalowych strzemion), co należy uznać za niekorzystne i niebezpieczne.

Kolejne etapy badań doświadczalnych poświęcone były realizacji wniosku 2 a mianowicie poszukiwaniu rozwiązania polegającego na zwiększaniu intensywności wzmocnienia podłużnego odcinkami taśm z włókien węglowych.

4.3. Badania doświadczalne – etap IIa

4.3.1. Cel badań. Program badań

W celu określenia wpływu intensywności wzmocnienia podłużnego, ściskanych słupów żelbetowych, odcinkami taśm z włókien węglowych oraz poprzecznymi obejmami z maty z włókien węglowych na nośność i odkształcalność tego typu elementów, poddanych doraźnemu ściskaniu osiowemu, przeprowadzono dwie serie badań doświadczalnych. Pierwsza seria oznaczona literą „a” składała się z pięciu elementów o różnej intensywności wzmocnienia podłużnymi odcinkami taśm z włókien węglowych, druga seria oznaczona literą „b” składała się z pięciu elementów o różnej intensywności wzmocnienia podłużnymi odcinkami taśm z włókien węglowych oraz owiniętych zewnętrznymi obejmami z maty z włókien węglowych (rys. 4.11). Obejmy zewnętrzne rozmieszczono na tych samych poziomach, co strzemiona stalowe (rys. 4.12).

	S6a	S5a	S4a	S3a	S2a
Ilość elementów	1	1	1	1	1
Przekrój taśm [mm]	120x1,4 - 2 szt. 60x1,4 - 2 szt.	90x1,4 - 2 szt. 60x1,4 - 2 szt.	60x1,4 - 4 szt.	60x1,4 - 2 szt. 30x1,4 - 2 szt.	30x1,4 - 4 szt.
Powierzchnia taśm [cm ²]	5,04	4,20	3,36	2,52	1,68
Intensywność wzmocnienia [%]	4,20	3,50	2,80	2,10	1,40
	S6b	S5b	S4b	S3b	S2b
Ilość elementów	1	1	1	1	1
Przekrój obejm [mm]	25x0,13	25x0,13	25x0,13	25x0,13	25x0,13

Rys. 4.11. Elementy serii „a” i „b”

Podane na rysunku wymiary przekroju poprzecznego obejm z maty z włókien węglowych odnoszą się do nominalnej grubości kompozytu, bez uwzględnienia grubości

kleju.

Intensywność wzmocnienia słupów charakteryzuje stopień wzmocnienia ρ_L wyrażający stosunek pola powierzchni taśmy z włókien węglowych A_L do pola powierzchni przekroju betonu w elemencie A_c .

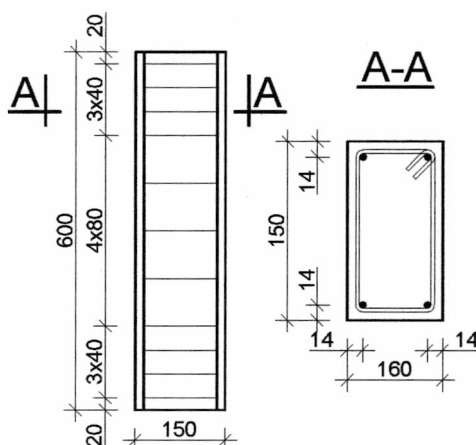
$$\rho_L = \frac{A_L}{A_c} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

Dodatkowo zbadano dwa elementy bez wzmocnienia (jako słupki kontrolne – S1a i S1b) w celu określenia ich rzeczywistej nośności i odkształcalności oraz mechanizmu zniszczenia.

4.3.2. Wykonanie i przygotowanie elementów badawczych

Elementy badawcze

Przedmiotem badań były modele słupów w skali około 1:5 o przekroju poprzecznym 80x150 mm i wysokości 600 mm. Zbrojenie podłużne wykonano w postaci czterech prętów o średnicy $\varnothing 8$ ze stali A-II, gatunku 18G2, zbrojenie poprzeczne w postaci strzemion o średnicy $\varnothing 3$ ze stali A-I, gatunku St3SX. Rozstaw strzemion zagęszczono przy końcach elementu do 40 mm na odcinku 150 mm równym, długości dłuższego boku przekroju poprzecznego słupa (rys. 4.12). Jako zakotwienie strzemion zastosowano haki półokrągłe. Strzemiona powiązano do prętów podłużnych obracając kolejne strzemie o 90° w stosunku do poprzedniego.



Rys. 4.12. Sposób zbrojenia elementów badawczych w etapie II

Skład mieszanki betonowej do wykonania elementów badawczych

Do wykonania betonu wykorzystano cement portlandzki PN-EN 197-1 CEM I 32,5R z Cementowni Góraždze i naturalne kruszywo płukane o frakcjach: piaskowej – $0 \div 2$ mm, zwirowej – $5 \div 10$ mm oraz $8 \div 16$ mm z kopalni kruszywa w Mietkowie koło Wrocławia.

Dobór składników na 1 m^3 mieszanki betonowej w oparciu o [16], dla projektowanego betonu B30 i założonej konsystencji plastycznej podano w tablicy 4.3.

Tablica 4.3. Skład mieszanki betonowej [kg/m^3]

Cement portlandzki	400
Żwir $5 \div 10$ mm	600
Żwir $8 \div 16$ mm	600
Piasek $0 \div 2$ mm	700
Woda	200
Wskaźnik c/w	2,00

Mieszanke betonową przygotowywano w betoniarce wolnospadowej o pojemności 100 dm^3 w Laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej. Składniki mieszanki odmierzano wagowo. Czas mieszania wynosił około 10 minut. Dla obydwu serii badawczych wykonano identyczne mieszanki betonowe w kilku zarobach.

Konsystencję mieszanki betonowej określano każdorazowo za pomocą stożka opadowego [N10]. Opad stożka dla obydwu serii elementów wahał się od 4,0 do 5,0 cm, co odpowiada według normy [N6] konsystencji K3 natomiast według normy [N11] konsystencji S1 na granicy konsystencji S2.

Wykonanie elementów badawczych

Elementy wykonywano w formach stalowych betonując je w pozycji poziomej wzdłuż szerszego boku elementu. Beton w formach zagęszczano na stole wibracyjnym przez około 1 minuty. Po dwóch dniach wyciągano elementy z formy i przechowywano je w stałych warunkach termiczno-wilgotnościowych.

Wzmocnienie elementów badawczych

Do wykonania wzmocnień wykorzystano materiały systemu Sika CarboDur [46]:

- taśmy Sika CarboDur typu M1214 o grubości $t=1,4$ mm i szerokości dostosowywanej do pożądanej intensywności wzmocnienia ρ_L ,
- klej do taśm – Sikadur 30,
- preparat do czyszczenia i aktywacji kompozytów węglowych – Sika Colma Reiniger,
- matę SikaWrap Hex 230C,
- impregnat epoksydowy do mat – Sikadur 330.

Wzmocnienia wykonano przestrzegając wszystkich reżimów technologicznych opisanych w rozdziale drugim niniejszej pracy. Między innymi sprawdzono sposób sklejenia taśmy z elementem przez opukanie taśmy w celu wykrycia pustek powietrza pod kompozytem. Sprawdzone w ten sposób połączenie uznano za prawidłowe.

4.3.3. Cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe materiałów

a) Beton

Podczas betonowania elementów badawczych wykonano z jednego z zarobów sześć próbek sześciennych 150x150x150 mm do określenia wytrzymałości betonu na ściskanie. Próbki wibrowano razem ze słupkami na stole wibracyjnym przez około 1 minuty. Po dwóch dniach rozformowano próbki i przechowywano je razem z elementami badawczymi w stałych warunkach termiczno-wilgotnościowych.

W przeddzień badania słupów określono średnią wytrzymałość betonu na ściskanie f_{cm} (zgniatanie sześciu próbek sześciennych o krawędzi 150 mm). Każdy z trzech wymiarów próbki mierzono czterokrotnie i przyjmowano wartość średnią.

Badania próbek przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej EDB 400 produkcji NRD (VEB Lipsk) o zakresie 0 ÷ 400 kN (rys. 4.13). Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie przedstawiono w tablicy 4.4.



Rys. 4.13. Maszyna wytrzymałościowa EDB 400

Tablica 4.4. Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie elementów w etapie IIa

Lp.	Nr próbki	Bok [mm]		Pole przekroju	Wysokość średnia H	Masa	Siła niszcząca	f_{ci}	f_{cm}
		Średnia A	Średnia B	[cm ²]	[mm]	[kg]	[kN]	[MPa]	[MPa]
1	1/IIa	149.08	149.38	222.70	149.45	7,50	890,0	39,96	40,84
2	2/IIa	150.66	149.52	225.26	149.71	7,60	820,0	36,40	
3	3/IIa	150.05	149.62	224.50	149.58	7,60	950,0	42,32	
4	4/IIa	148.51	149.60	222.16	149.45	7,50	960,0	43,21	
5	5/IIa	149.46	149.46	223.38	149.34	7,55	890,0	39,84	
6	6/IIa	148.40	149.30	221.55	149.39	7,50	960,0	43,33	

Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie została ustalona z odchyleniem standardowym $s=2,663$ MPa [36]. Odpowiada to klasie betonu w chwili badania około B30 według [N8] lub C25/30 według [N11].

Na podstawie wzorów empirycznych (tablica 4.5) ustalono dodatkowo następujące cechy wytrzymałościowe i odkształcalnościowe betonu:

- wytrzymałość betonu na rozciąganie przez rozłupywanie f_{ctm}^{spl} według [10],
- moduł odkształcenia betonu E_{cm} według [N8],
- wytrzymałość słupową betonu na ściskanie $f_{cm,cyl}$ według [N2].

Tablica 4.5. Dodatkowe cechy wytrzymałościowe i odkształcalnościowe betonu

Autor/Źródło	Wzór	[MPa]
Godycki-Ćwirko [10]	$f_{ct}^{spl} = 0,475 \cdot \sqrt{f_{c,cube\ 20}}$	2,96
	$f_{ct}^{spl} = 0,278 \cdot \sqrt[3]{(f_{c,cube\ 20})^2}$	3,19
PN-B-03264:2002 [N8]	$E_{cm} = 9500 \cdot \sqrt[3]{(f_{ck} + 8)}$	31 710
Eurocode 2 [N2]	$f_{cm,cyl} = 0,82 f_{cm,cube}$ dla $f_{cm,cube} > 15$ MPa	33,49

b) Stal zbrojeniowa

Zbrojenie podłużne słupów zostało wykonane ze stali zbrojonej klasy A-II, gatunku 18G2 [N8] o średnicy 8 mm. Dla wybranych losowo próbek stali określono:

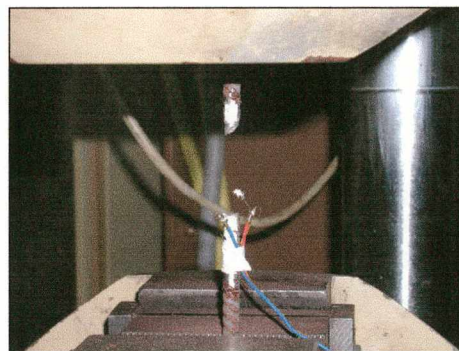
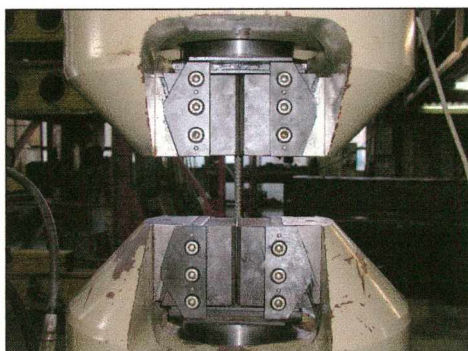
- średnicę nominalną,
- granicę plastyczności,
- wytrzymałość na rozciąganie,
- wydłużenie próbki po rozerwaniu,
- moduł sprężystości stali.

Badania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej UFP 400 produkcji NRD (VEB Lipsk) o zakresie $0 \div 400$ kN (rys. 4.14). Do próby rozciągania zastosowano tzw.

próbki długie według [N7] o długości bazy pomiarowej $L_0=10d_0$, czyli 80 mm. Granicę plastyczności określano na sześciu próbkach rejestrując siłę rozciągającą i wydłużenie na bazie pomiarowej (rys. 4.15). Do wyznaczenia modułu sprężystości przygotowano dwie próbki z naklejonymi tensometrami elektrooporowymi RL=120/20. Tensometry naklejono w połowie długości bazy pomiarowej (rys. 4.15). Próbki pochodziły z jednej partii stali, wykorzystanej do wykonania elementów badawczych. Pomiaru wydłużenia próbek, odkształceń i siły rozciągającej dokonywano, co 0,2 sekundy. Do rejestracji wyników użyto komputera PC IBM 486 DX oraz wzmacniacza Spider-8 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik i oprogramowania Catman 2.0.



Rys. 4.14. Maszyna wytrzymałościowa UFP 400 oraz aparatura pomiarowo-rejestrująca wyniki



Rys. 4.15. Określenie granicy plastyczności i moduły sprężystości prętów $\varnothing 8$ mm (18G2)

Moduł sprężystości stali został wyznaczony, zgodnie z zaleceniami normy [N7], w przedziale naprężeń $(0,1 \div 0,9)f_y$.

Wyniki badań cech wytrzymałościowych i odkształcalnościowych prętów $\varnothing 8$ mm przedstawiono w tablicy 4.6.

Tablica 4.6. Wyniki badania cech wytrzymałościowych i odkształcalnościowych prętów $\varnothing 8$ mm

Lp.	Nr próbki	d_0 [mm]	d_n [mm]	S_0 [mm ²]	L_0 [mm]	ΔL [mm]	A_{10}^* [%]	f_y [MPa]	f_t [MPa]	E_s [MPa]
1	1/I	8	8,29	53,93	80	19,06	23,83	389,1	596,1	—
2	2/I		8,28	53,82		19,63	24,54	431,6	623,5	—
3	3/I		8,26	53,59		19,48	24,35	421,0	612,4	—
4	4/I		8,27	53,77		19,14	23,93	366,7	569,3	—
5	5/II		7,97	49,91		—	—	380,0	569,9	201 430
6	6/II		7,98	50,06		—	—	371,2	569,4	202 320
Średnie:		8,18	52,51	80	19,33	24,16	393,3	590,1	201 875	

$$* A_{10} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\%$$

W tablicy 4.6 przyjęto następujące oznaczenia:

d_0 – średnica pręta [mm],

d_n – średnica nominalna (obliczeniowa) ze wzoru [mm]:

$$d_n = 12,74 \cdot \sqrt{\frac{G}{l}}, \quad (4.2)$$

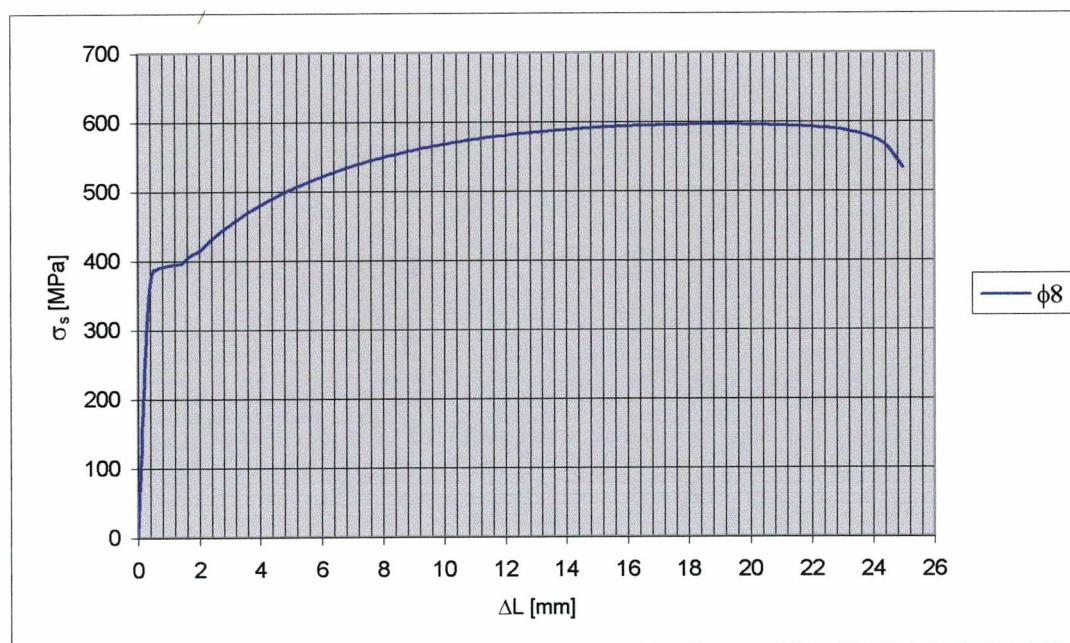
G – masa próbki [g],

l – długość całkowita próbki [mm],

S_0 – początkowa powierzchnia przekroju pręta [mm²],

L_0 – początkowa długość pomiarowa próbki [mm],

ΔL – bezwzględne wydłużenie próbki po rozerwaniu [mm].



Rys. 4.16. Wykres zależności σ_s - ΔL dla stali zbrojeniowej gatunku 18G2 (próbka 1/I)

Na rysunku 4.16 przedstawiono przykładową zależność $\sigma_s - \Delta L$ (próbka 1/I) dla stali zbrojeniowej $\varnothing 8$ mm gatunku 18G2 zastosowanej w elementach badawczych.

c) Materiały CFRP

Do wykonania wzmocnień elementów badawczych użyto, w tym etapie badań, materiałów kompozytowych systemu Sika CarboDur – taśmy Sika CarboDur M i maty SikaWrap Hex 230C.

Procedury badawcze cech wytrzymałościowych taśm i maty z włókien węglowych regulują normy [N1, N3]. Próbki do badania wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości maty CFRP wykonano, zgodnie z zaleceniami przekazanymi przez Federalny Instytut Badań i Testowania Materiałów EMPA w Szwajcarii, w następujący sposób:

- z rolki maty wycięto arkusz o wymiarach 300x700 mm (pamiętając o zachowaniu prostokątności wszystkich krawędzi),
- na czystym bacie stołu ułożono wycięty arkusz, na który naniesiono, za pomocą specjalnego wałka, impregnat epoksydowy Sikadur 330,
- po trzech dniach, z tak przygotowanego arkusza maty, wycięto próbki o wymiarach 250x15 mm (pamiętając o zachowaniu prostokątności wszystkich krawędzi),
- na końcach próbek przyklejono po dwie podkładki aluminiowe o wymiarach 50x15 mm, umożliwiające zamocowanie ich w szczękach maszyny wytrzymałościowej,
- odkształcenia podłużne i poprzeczne mierzono za pomocą, umieszczonej w połowie długości próbki, krzyżowej rozety tensometrycznej z tensometrów elektrooporowych typu RL=120/10.

Próbki o identycznych wymiarach, zaopatrzone w podkładki aluminiowe i rozety tensometryczne wycięto z taśmy CFRP. Szerokość i grubość próbki mierzono trzykrotnie i przyjmowano wartość średnią.

Wszystkie próbki badano w maszynie wytrzymałościowej UFP produkcji NRD (VEB Lipsk) o zakresie $0 \div 400$ kN (rys. 4.17 i 4.19). Do rejestracji wyników używano komputera PC IBM 486 DX oraz wielokanałowego systemu pomiarowego UPM 100 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik.

Moduł sprężystości taśm i mat z włókien węglowych został wyznaczony w przedziale naprężeń $(0,1 \div 0,3)\sigma$.



a) próbka w szczękach maszyny



b) próbka po zniszczeniu

Rys. 4.17. Badanie parametrów maty CFRP

Rysunek 4.17-a przedstawia próbkę maty z włókien węglowych podczas próby rozciągania, natomiast rysunek 4.17-b próbkę po zniszczeniu. Zniszczenie próbek następowało w wyniku rozerwania i było każdorazowo sygnalizowane odgłosami pęknięcia matrycy klejowej i włókien węglowych.

Tablica 4.7. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie maty CFRP

Lp.	Nr próbki	Szerokość x grubość (z klejem) [mm]		Grubość nominalna maty [mm]	Pole powierzchni [cm ²]	Siła niszcząca [kN]	f_{wi} [MPa]	f_{wm} [MPa]
		Średnia A	Średnia B					
1	1/I	14,53	1,40	0,13	0,0189	5,10	2699,36	2936,6
2	2/I	15,00	1,33		0,0195	6,20	3179,49	
3	3/I	15,00	1,27		0,0195	6,70	3435,90	
4	4/I	14,97	1,30		0,0195	5,35	2749,70	
5	5/I	15,20	1,17		0,0198	6,10	3087,04	
6	6/I	14,90	1,40		0,0194	4,91	2529,69	
7	7/I	14,90	1,43		0,0194	6,20	3200,83	
8	1/II	15,10	1,20		0,0196	5,15	2623,54	
9	2/II	15,00	1,30		0,0195	5,51	2825,64	
10	3/II	15,03	1,07		0,0195	5,93	3034,28	

Tablica 4.8. Wyniki badania cech odkształcalnościowych maty CFRP

Lp.	Nr próbki	Pole powierzchni	Siła niszcząca	Napężenia przy zerwaniu	Odkształcenia przy zerwaniu		E _{w_m}
					ε _{wv}	ε _{wh}	
		[cm ²]	[kN]	[MPa]	[‰]	[‰]	[MPa]
8	1/II	0,0196	5,15	2623,54	10,07	3,29	253 697
9	2/II	0,0195	5,51	2825,64	10,31	4,09	243 895
10	3/II	0,0195	5,93	3034,28	12,87	3,41	215 160
Średnie:					11,08	3,60	237 600

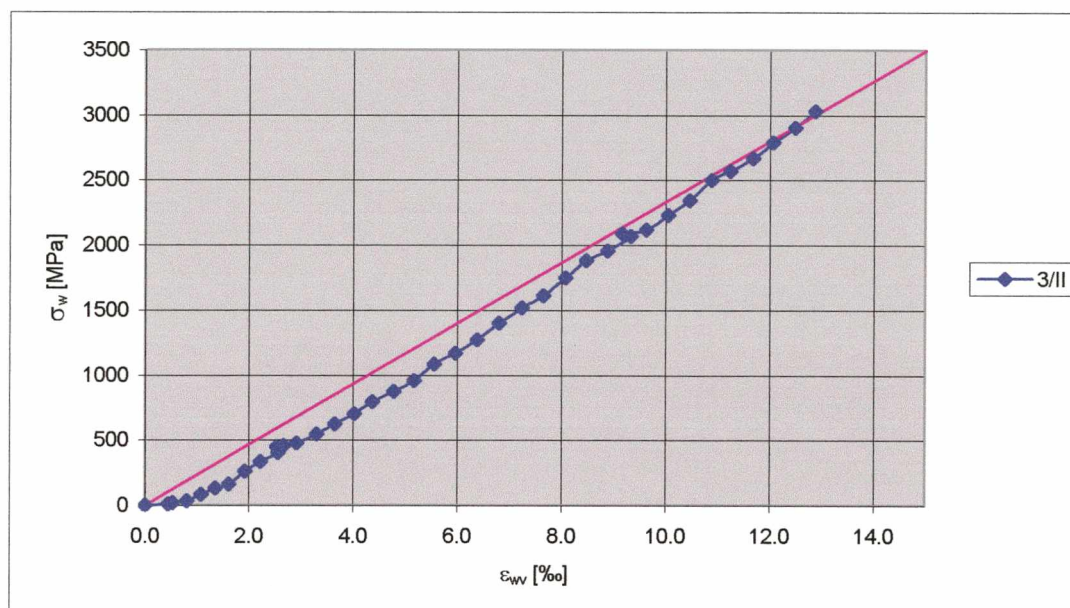
W tablicach 4.7 i 4.8 przedstawiono odpowiednio: wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie maty CFRP oraz wyniki badania cech odkształcalnościowych maty CFRP.

Natomiast tablicy 4.9 podano porównanie danych technicznych maty SikaWrap Hex 230C z badań własnych i podawanych przez producenta materiału.

Tablica 4.9. Charakterystyki wytrzymałościowe maty CFRP

Cecha	SikaWrap Hex-230C	
	Badania własne	Dane producenta
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	2936,6	3500
Odkształcenia przy zerwaniu [%]	11,08	15
Odkształcenia poprzeczne przy zerwaniu [%]	3,60	—
Moduł sprężystości [MPa]	237 600	230 000

Na rysunku 4.18 przedstawiono przykładową zależność $\sigma_w - \varepsilon_{wv}$ (próbka 3/II) dla maty CFRP uzyskaną z badań własnych w porównaniu z zależnością podawaną przez producenta.



Rys. 4.18. Wykres zależności $\sigma_w - \varepsilon_{wv}$ dla maty CFRP (próbka 3/II)



a) próbka w szczękach maszyny



b) próbka po zniszczeniu

Rys. 4.19. Badanie parametrów taśmy CFRP

Rysunek 4.19-a przedstawia próbkę taśmy z włókien węglowych podczas próby rozciągania, natomiast rysunek 4.19-b próbkę po zniszczeniu. Zniszczenie próbek następowało w wyniku pęknięcia pojedynczych włókienek węglowych, co trwało kilka sekund i następnie następowało rozszczepienie próbki. Każdorazowo proces ten był sygnalizowany odgłosami pęknięcia włókienek węglowych.

W tablicach 4.10 i 4.11 przedstawiono odpowiednio: wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie taśmy CFRP oraz wyniki badania cech odkształcalnościowych taśmy CFRP. Natomiast tablicy 4.12 podano porównanie danych technicznych taśmy Sika CarboDur M z badań własnych i podawanych przez producenta materiału.

Tablica 4.10. Wyniki badania wytrzymałości na rozciąganie taśmy CFRP

Lp.	Nr próbki	Szerokość x grubość (z klejem) [mm]		Pole powierzchni [cm ²]	Siła niszcząca [kN]	f_{Li}	f_{Lm}
		Średnia A	Średnia B			[MPa]	[MPa]
1	1/I	15,07	1,40	0,2109	80,00	3792,67	3467,5
2	2/I	15,13	1,40	0,2119	72,80	3436,12	
3	3/I	14,93	1,40	0,2091	79,20	3788,27	
4	4/I	15,27	1,40	0,2137	78,80	3686,84	
5	5/I	15,30	1,40	0,2142	68,00	3174,60	
6	1/II	15,40	1,40	0,2156	52,00	2504,64 *	
7	2/II	14,60	1,40	0,2044	63,00	3082,19	
8	3/II	14,70	1,40	0,2058	68,15	3311,47	

* - odrzucono wynik badania

Tablica 4.11. Wyniki badania cech odkształcalnościowych taśmy CFRP

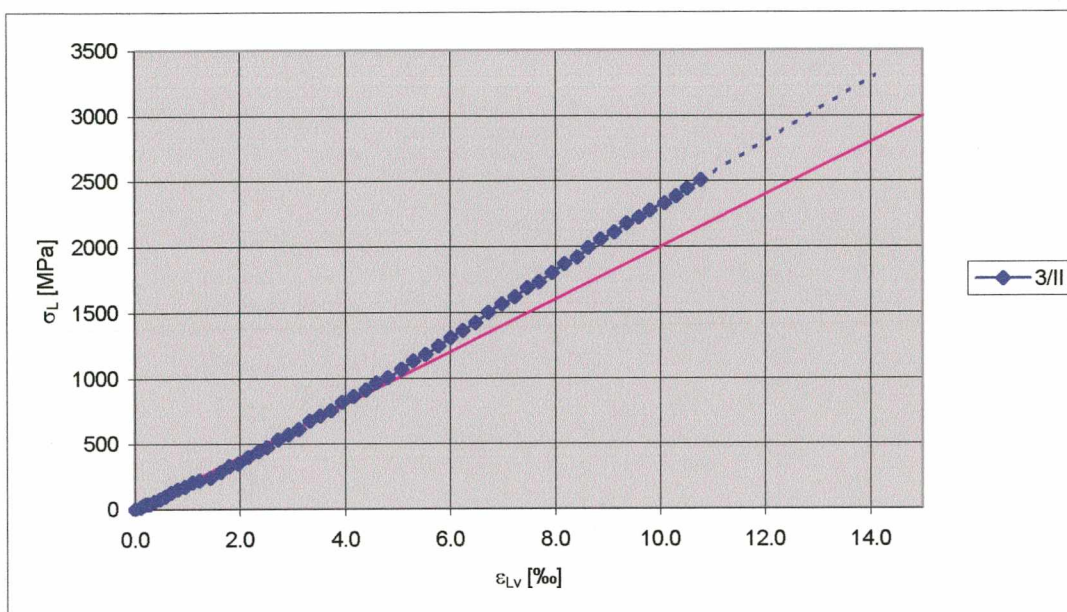
Lp.	Nr próbki	Pole powierzchni	Siła niszcząca	Naprężenia przy zerwaniu	Odkształcenia przy zerwaniu		E _{Lm}
					ε _{Lv}	ε _{Lh}	
		[cm ²]	[kN]	[MPa]	[‰]	[‰]	[MPa]
8	1/II	0,2156	54,00	2504,64 *	—	—	—
9	2/II	0,2044	63,00	3082,19	13,25	3,83	234 165
10	3/II	0,2058	68,15	3311,47	14,10	3,33	222 290
Średnie:					12,01	3,58	228 227

* - odrzucono wynik badania

Tablica 4.12. Charakterystyki wytrzymałościowe taśmy CFRP

Cecha	Sika CarboDur M	
	Badania własne	Dane producenta
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	3467,7	> 2400
Odkształcenia podłużne przy zerwaniu [%]	13,68	> 12
Odkształcenia poprzeczne przy zerwaniu [%]	3,58	—
Moduł sprężystości [MPa]	228 227	> 210 000

Na rysunku 4.20 przedstawiono przykładową zależność $\sigma_L - \epsilon_{Lv}$ (próbka 3/II) dla taśmy CFRP uzyskaną z badań własnych w porównaniu z zależnością podawaną przez producenta.



Rys. 4.20. Wykres zależność σ_L - ε_{LV} dla taśmy CFRP (próbka 3/II)

W czasie badania, w próbce 3/II nastąpiło zerwania tensometru elektrooporowego spowodowane pękaniem zewnętrznych (powierzchniowych) włókien węglowych. W związku z tym linią przerywaną na wykresie zależności σ_L - ε_{LV} (rys. 4.20) zaznaczono prognozowaną ścieżkę odkształcenia podłużnego, zachowując zasadę liniowo-sprężystej pracy aż do zniszczenia.

4.3.4. Metodyka badań

Stanowisko badawcze

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono w Laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej na maszynie wytrzymałościowej ZD 100 produkcji NRD (VEB Lipsk) o zakresie $0 \div 1000$ kN (rys. 4.21 i 4.22).

W pobliżu miejsca przyłożenia obciążenia powstają naprężenia miejscowe, które w znacznym stopniu zmieniają rozkład naprężeń i ich wartości. Zgodnie z zasadą De Saint Venanta [18], sposób przyłożenia obciążenia ma jedynie miejscowy wpływ na stan naprężeń. Dla obciążonych osiowo prętów pryzmatycznych w przekrojach usytuowanych w odległości równej szerokości dłuższego boku pręta rozkład naprężeń jest już, praktycznie rzecz biorąc, równomierny. W związku z tym, strefy przypodporowe słupków zabezpieczono dodatkowymi obejmami stalowymi w celu wyeliminowania przypadku zniszczenia ze względu na miejscowy docisk tłoków prasy (rys. 4.21 i 4.22).



a) S4a



b) S6a

Rys. 4.21. Elementy serii „a”



a) S4b



b) S5b

Rys. 4.22. Elementy serii „b”

Aparatura pomiarowa

Odkształcenia podłużne elementów mierzono za pomocą umieszczonych na każdym ich boku, indukcyjnych czujników przemieszczeń liniowych o zakresie ± 10 mm i dokładności 0,001 mm. Dla elementów serii „a” pomiaru dokonywano na bazie 30 cm, natomiast dla elementów serii „b” na bazie 20 cm. Czujniki indukcyjne mocowano bezpośrednio do łapek, przyklejonych do betonu lub taśmy klejem na bazie żywicy epoksydowej.

Do rejestracji wyników pomiarów używano komputera PC IBM 486 DX oraz wielokanałowego systemu pomiarowego UPM 100 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik i przyrządu pomiarowego z falą nośną do czujników transformatorowych CFT 510.

Procedury badawcze

Program obciążania elementów podporządkowany został postawionemu w pracy celowi badań, tj. poznaniu rzeczywistych cech odkształcalnościowych i wytrzymałościowych słupów żelbetowych wzmocnionych taśmami i matami z włókien węglowych pod doraźnym

obciążeniem osiowym. Na potrzeby niniejszej rozprawy opracowano na podstawie [25, N4] dwie procedury badawcze próby sprężystości i próby do zniszczenia:

- ustalono poziom obciążenia próbnego P_p , które podczas próby sprężystości przyjęto równy ok. 1/3 nośności przekroju poprzecznego ściskanego słupa żelbetowego wyznaczoną dla doświadczalnych parametrów wytrzymałościowych materiałów,
- wyznaczono wartość obciążenia równą $0,8P_p$,
- do poziomu $0,8P_p$ podzielono je stosując 20-sto procentowe przyrosty obciążenia próbnego,
- pozostałe $0,2P_p$ obciążenia próbnego podzielono stosując 5-cio procentowe przyrosty,
- po wyzerowaniu urządzeń pomiarowych dokonano początkowych odczytów czujników indukcyjnych,
- badane elementy poddano doraźnemu ściskaniu osiowemu,
- obciążenie przykładano zgodnie ze schematem w tablicy 4.13:

Tablica 4.13. Schemat przykładanego obciążenia w próbie sprężystości

0	→	$0,8P_p$	→	P_p	→	$0,8P_p$	→	0
	co 20% P_p		co 5% P_p		co 5% P_p		co 20% P_p	

- przyrost obciążenia realizowano w sposób ciągły; czas utrzymania obciążenia determinowany był czasem potrzebnym do wykonania odczytów na przyrządach pomiarowych i wynosił kilka sekund,
- po każdorazowym przyłożeniu kolejnego poziomu obciążenia dokonywano odczytów czujników indukcyjnych,
- próbę sprężystości powtórzono sześć razy w celu ustabilizowania się odkształceń trwałych (plastycznych),
- po przeprowadzeniu próby sprężystości obciążano element stopniowo w sposób ciągły do zniszczenia zgodnie ze schematem w tablicy 4.14:

Tablica 4.14. Schemat przykładanego obciążenia w próbie do zniszczenia

0	→	$0,80P_p$	→	niszczenie
	co 20% P_p		co 5% P_p	

- podobnie jak dla próby sprężystości przyrost obciążenia realizowano w sposób ciągły utrzymując obciążenie w celu wykonania odczytów na przyrządach pomiarowych; dla każdego poziomu obciążenia dokonywano odczytów czujników indukcyjnych.

4.3.5. Wyniki badań doświadczalnych w etapie IIa

W ramach etapu IIa badań doświadczalnych wykonano (rys. 4.12) i poddano doraźnym próbom wytrzymałościowym dziesięć słupów wzmacnianych materiałami CFRP w dwóch seriach i dwa elementy kontrolne bez wzmocnienia. Elementy dwóch serii badawczych różniły się intensywnością wzmocnienia podłużnego i obecnością wzmocnienia poprzecznego. Szczegółowe informacje o wykonaniu słupów podano w punkcie 4.3.2 pracy.

Podczas obciążania każdego słupa skokowo zmieniającą się siłą mierzono odkształcenia podłużne przekroju ε_{vm} . Do analizy wyników przyjmowano średnią wartość z odczytów czujników umieszczonych na każdym boku elementu.

Po przebadaniu wszystkich elementów obydwu serii, na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że nośność słupów grupy S2 i S3 o intensywności wzmocnienia podłużnego 1,40% i 2,10% nie dała zadowalających rezultatów, dlatego elementy te nie są brane pod uwagę w analizie wyników. Potwierdza to wniosek z etapu I badań doświadczalnych, że o nośności granicznej będzie decydować intensywność podłużnego wzmocnienia zewnętrznego ρ_L (wzór 4.1).

a) Nośność graniczna słupów

Celem badań niszczących było określenie:

- nośności granicznej badanych słupów N_u (co odpowiada sile niszczącej zarejestrowanej podczas ich ściskania; $N_{u,S1}$ oznaczona średnią nośność graniczną dwóch słupków kontrolnych – S1a i S1b),
- maksymalnych, rejestrowanych odkształceń podłużnych elementów $\varepsilon_{vm,lim}$,
- mechanizmu (obrazu) zniszczenia słupów.

W tablicy 4.15 podano zestawienie uzyskanych wyników badań. W przypadku elementów, w których zniszczenie nastąpiło wskutek ścięcia betonu, opisano kąt ścięcia betonu ω , mierzony między płaszczyzną podstawy słupa a płaszczyzną ścięcia.

Tablica 4.15. Wyniki badania nośności granicznej słupów w etapie IIa

Lp.	Oznaczenie słupa	N_u [kN]	$\varepsilon_{vm,lim}$ [%]	Mechanizm (obraz) zniszczenia
1	S1a	457	2,44	Ścięcie betonu ($\omega=75^\circ$) od góry do środka elementu (rys. 4.23-a).
2	S1b	500	2,35	Ścięcie betonu ($\omega=75^\circ$) w środkowej części.

3	S4a	475	2,08	Całkowite lub częściowe odspojenie taśm z betonem i klejem od elementu (rys. 4.24-a).
4	S4b	595	2,79	Rozerwanie obejm w górnej części na krawędziach elementu w obszarze zmiążdżenia betonu; odspojenie obejm z otuliną; zgniecenie i pęknięcia taśm wzdłuż włókien (rys. 4.26-a).
5	S5a	595	1,85	Częściowe odspojenie taśmy z otuliną w obszarze zmiążdżenia betonu w górnej części elementu; pęknięcie taśm wzdłuż włókien (rys. 4.24-b).
6	S5b	657	2,77	Rozerwanie obejm w górnej części na krawędziach elementu w obszarze zmiążdżenia betonu; odspojenie obejm z otuliną; zgniecenie i pęknięcia taśm wzdłuż włókien (rys. 4.26-b).
7	S6a	596	2,05	Odspojenie taśmy z otuliną grubości 20 mm w obszarze zmiążdżenia betonu w dolnej części elementu; (rys. 4.24-c).
8	S6b	712	2,66	Rozerwanie obejm w górnej części na krawędziach elementu w obszarze zmiążdżenia betonu; odspojenie obejm z otuliną; pęknięcia taśm wzdłuż włókien (rys. 4.26-c).

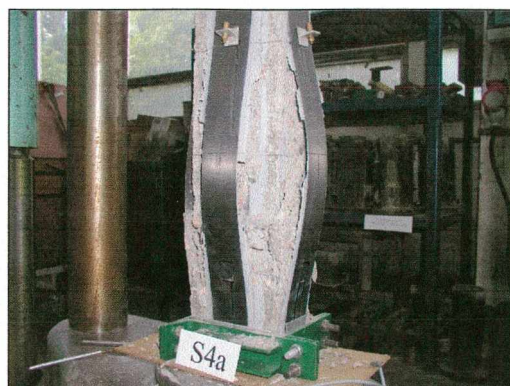


a) S1a

Rys. 4.23. Obraz zniszczenia elementu kontrolnego w etapie IIa

Obserwacja mechanizmu zniszczenia a także późniejsza inwentaryzacja elementów pozwoliła stwierdzić, że zniszczenie elementów serii „a” nastąpiło wskutek odspojenia się taśmy na pewnym odcinku, czemu towarzyszyło zmiążdżenie betonu i uplastycznienie stali zbrojeniowej (rys. 4.24). Podczas oględzin elementów po zniszczeniu stwierdzono odspojone odcinki taśmy z otuliną betonową grubości 5÷10 mm. Taśma odspajała się z betonem w obszarze zniszczenia betonu, tam gdzie beton nie ulegał zmiążdżeniu następował wtórny efekt odspojenia samej taśmy lub taśmy z klejem, a beton pozostawał niezniszczony. Zaobserwowano, że odspojenie taśmy następowało w trojaki sposób:

- odspojenie taśmy z klejem i betonem (rys. 4.24-a),
- odspojenie taśmy z klejem,
- odspojenie samej taśmy (rys. 4.24-b i c).



a) S4a

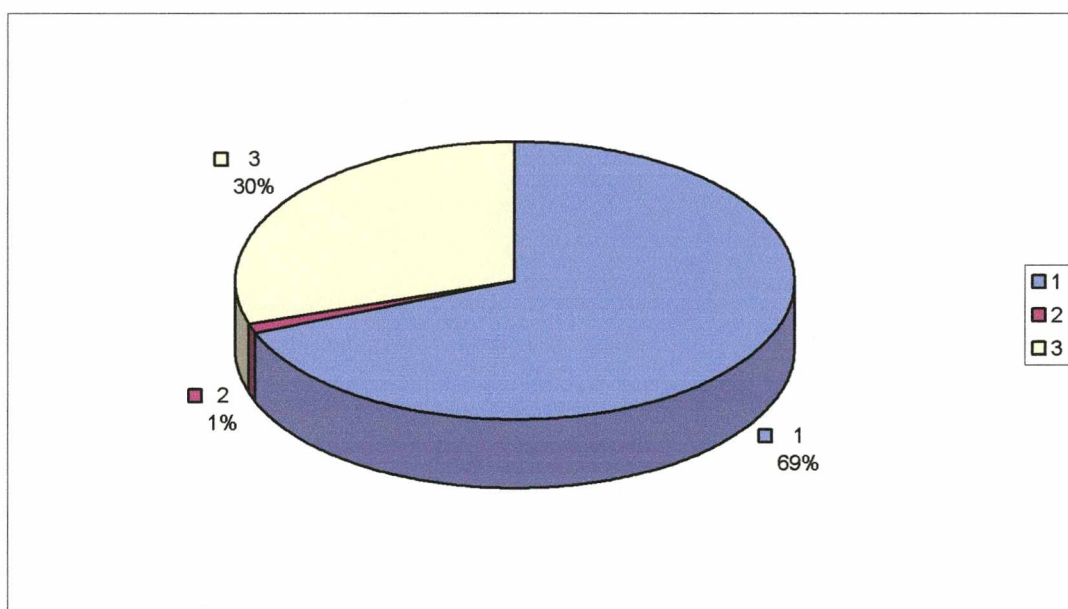


b) S5a



c) S6a

Rys. 4.24. Obraz zniszczenia elementów serii „a”



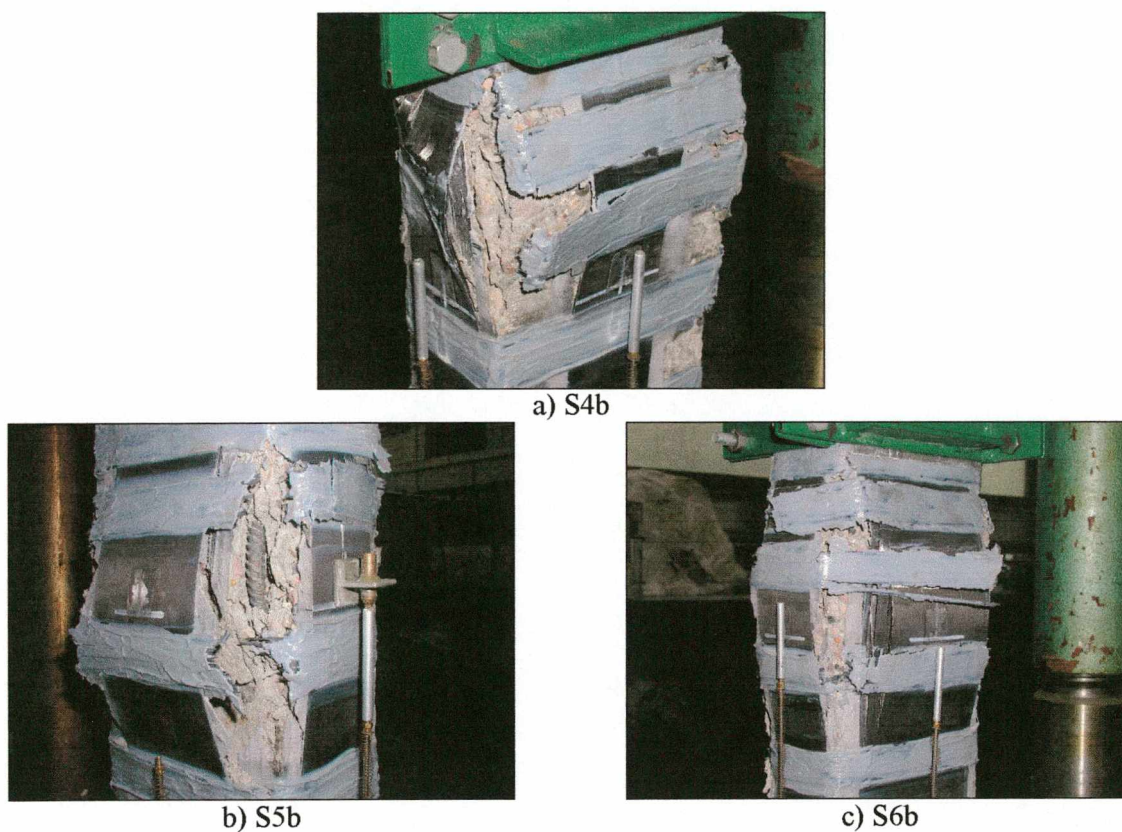
Rys. 4.25. Procentowy udział sposobów odspojenia taśmy w elementach serii „a”.

1 – odspojenie taśmy z klejem i betonem, 2 – odspojenie taśmy z klejem, 3 – odspojenie samej taśmy.

Na rysunku 4.25 przedstawiono zależność procentowego udziału poszczególnych sposobów odspojenia taśmy w elementach serii „a”. Jak widać w przypadku elementów

ściskanych wzmacnianych samymi taśmami z włókien węglowych najsłabsze ogniwa wzmocnienia występują na styku taśmy z klejem oraz kompozytu z otuliną betonową. Znikomy procentowy udział odspojenia taśmy z klejem, świadczy o prawidłowym przygotowaniu podłoża betonowego i aplikacji systemu wzmocnień.

Zniszczenie elementów serii „b” następowało wskutek zerwania kilku obejm, czemu towarzyszyło natychmiastowe odspojenie i zgniecenie taśmy, zniszczenie betonu oraz uplastycznienia stali zbrojeniowej (rys. 4.26). Rozerwanie obejm poprzedzone było zawsze odgłosami pękania włókienek węglowych. Podobne efekty akustyczne zaobserwowano podczas próby wytrzymałości na rozciąganie maty z włókien węglowych zatopionej w żywicy epoksydowej.



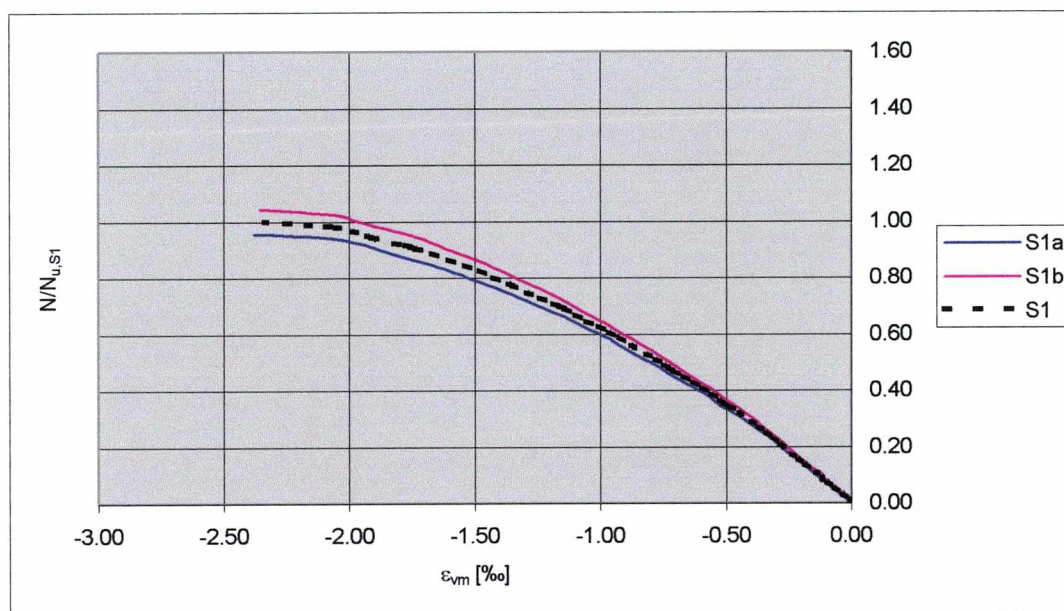
Rys. 4.26. Obraz zniszczenia elementów serii „b”

b) Odkształcenia podłużne słupów

W celu poznania wpływu intensywności wzmocnienia zewnętrznego podłużnymi odcinkami taśm z włókien węglowych oraz wzmocnienia poprzecznymi obejmami z maty z włókien węglowych na doraźne cechy odkształcalnościowe w ściskanych słupach żelbetowych wzmacnianych materiałami CFRP w rozdziale przedstawiono, wykresy zależności porównujących średnie wartości odkształceń podłużnych ε_{vm} elementów

badawczych w funkcji stosunku przykładanego obciążenia N do średniej nośności granicznej słupków kontrolnych $N_{u,S1}$ (dla siódmego cyklu obciążenia). Wartości średnich odkształceń podłużnych ε_{vm} elementów wyznaczano na podstawie odczytów z czterech czujników indukcyjnych.

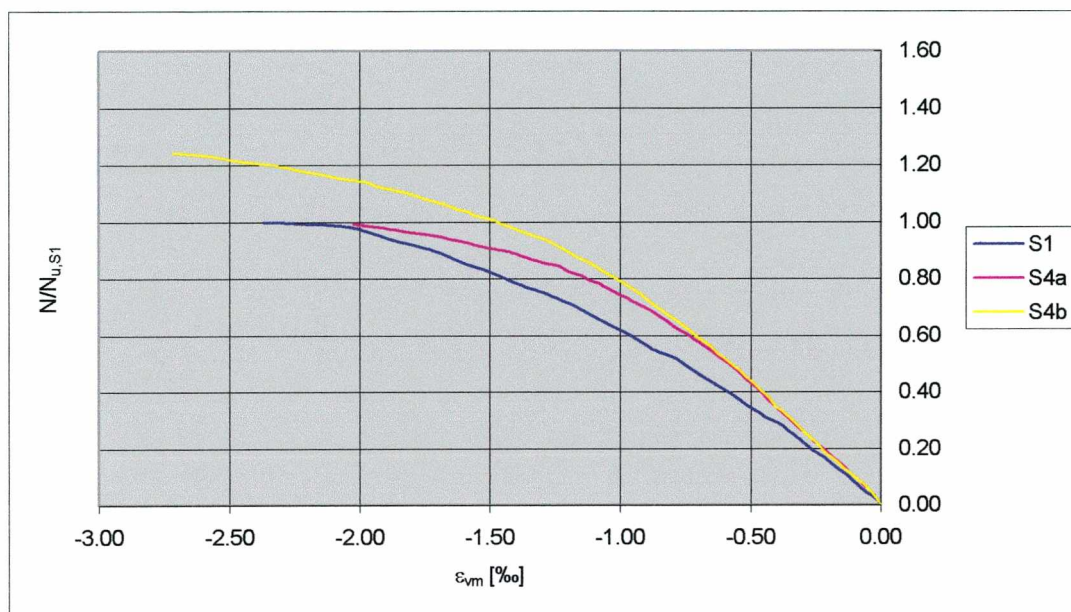
Sposób uzyskania średnich odkształceń podłużnych ε_{vm} dla dwóch słupków kontrolnych typu S1 przedstawiono na rysunku 4.27 w formie zależności $N/N_{u,S1} - \varepsilon_{vm}$ (linia przerywana). Jak widać uzyskano zbliżone wartości wyników odkształceń podłużnych dla elementów bez wzmocnienia typu S1a i S1b.



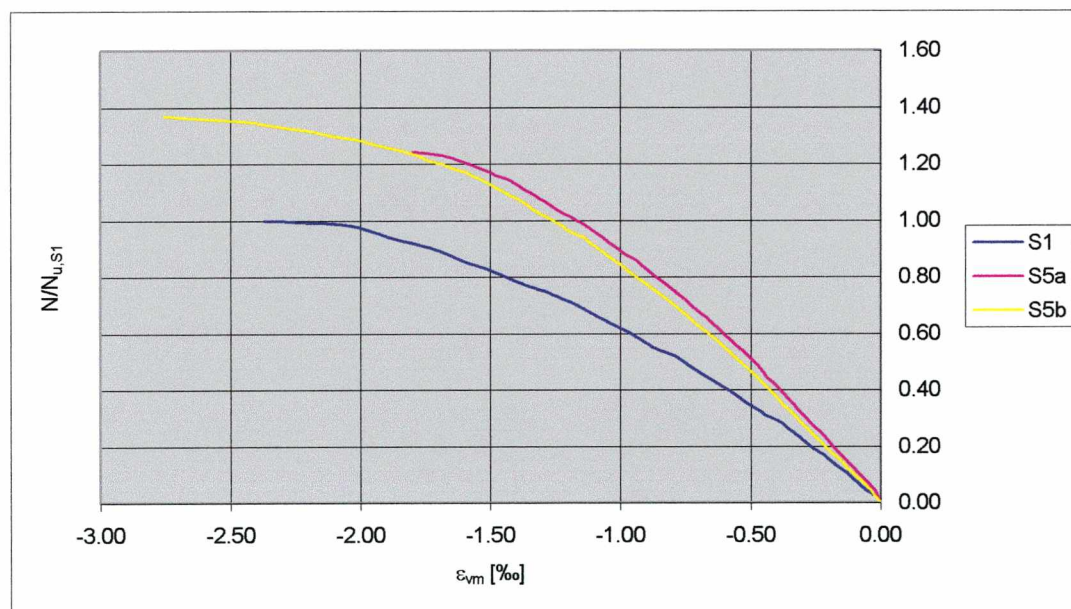
Rys. 4.27. Wykres zależności $N/N_{u,S1} - \varepsilon_{vm}$ dla słupków kontrolnych typu S1

Wykresy zależności średnich odkształceń podłużnych ε_{vm} od stosunku $N/N_{u,S1}$ dla elementów typu S4, S5 i S6 przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4.28, 4.29 i 4.30. We wszystkich przypadkach porównując je z wykresem średnich odkształceń podłużnych ε_{vm} słupków kontrolnych S1. Analogiczne wykresy dla serii oznaczonej literą „a” i literą „b” przedstawiono na rysunkach 4.31 i 4.32.

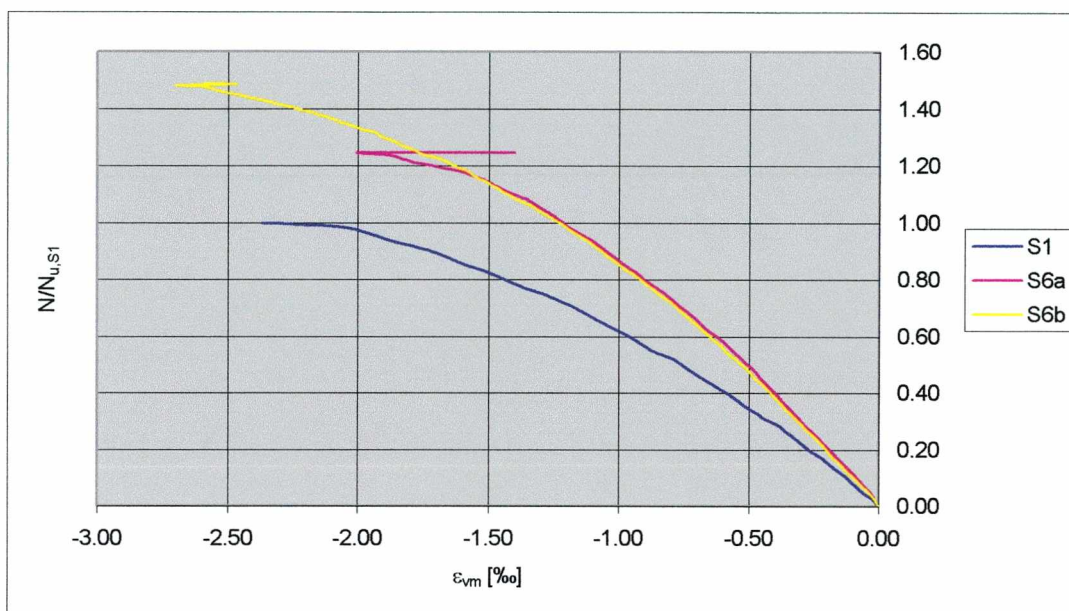
Jak widać na rysunkach 4.28 ÷ 4.32 zastosowanie wzmocnienia przez doklejenie podłużnych odcinków taśmy z włókien węglowych (o odpowiedniej intensywności) powoduje zmniejszenie przyrostów odkształceń podłużnych ε_{vm} elementów wzmocnionych w stosunku do słupków kontrolnych przy jednakowych przyrostach siły podłużnej. Średnie odkształcenia podłużne ε_{vm} elementów wzmocnionych na poziomie średniej nośności granicznej elementów kontrolnych S1 są o około 50% mniejsze od średnich odkształceń podłużnych słupków bez wzmocnienia.



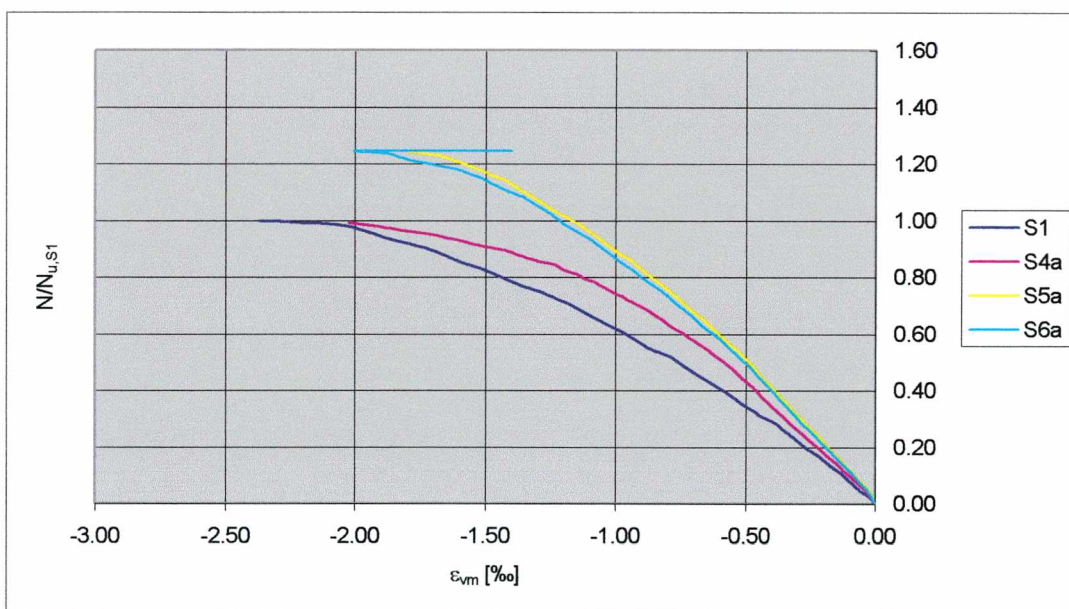
Rys. 4.28. Wykres zależności $N/N_{u,S1} - \epsilon_{vm}$ dla słupów: S1, S4a, S4b



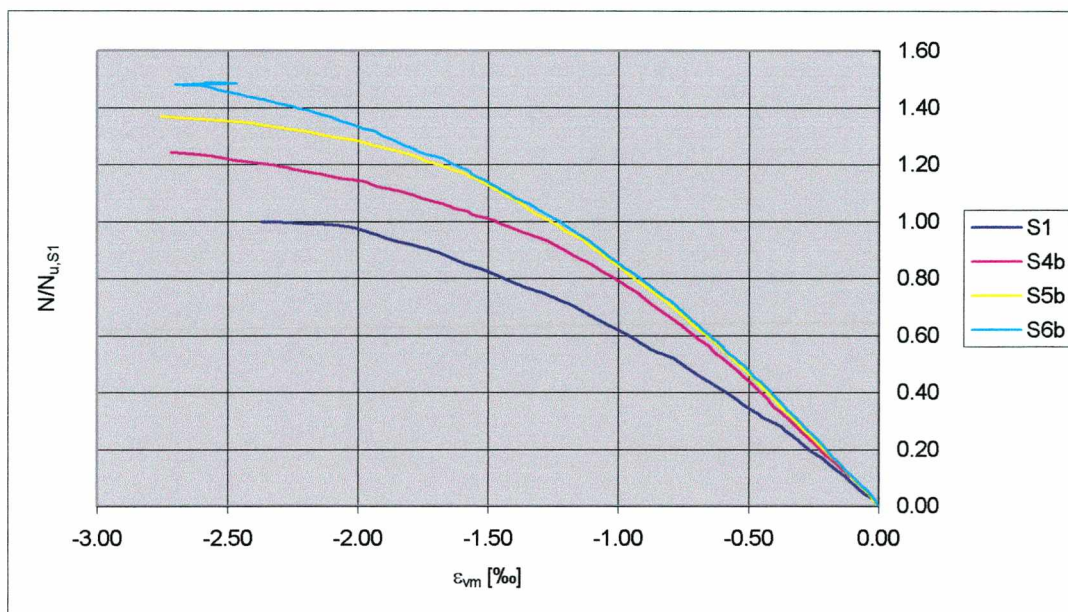
Rys. 4.29. Wykres zależności $N/N_{u,S1} - \epsilon_{vm}$ dla słupów: S1, S5a, S5b



Rys. 4.30. Wykres zależności $N/N_{u,S1} - \epsilon_{vm}$ dla słupów: S1, S6a, S6b



Rys. 4.31. Wykres zależności $N/N_{u,S1} - \epsilon_{vm}$ dla słupów: S1, S4a, S5a, S6a



Rys. 4.32. Wykres zależności $N/N_{u,S1}$ - ϵ_{vm} dla słupów: S1, S4b, S5b, S6b

Zastosowanie wzmocnienia poprzez doklejenie samych podłużnych odcinków taśmy z włókien węglowych powoduje przyrost nośności graniczną N_u tego typu elementów. Dla słupków typu S5a i S6a zaobserwowano przyrost nośności rzędu 24% w stosunku do elementów kontrolnych. Wzrostowi nośności granicznej N_u towarzyszy zmniejszenie granicznych odkształceń podłużnych $\epsilon_{vm,lim}$ w stosunku do elementów bez wzmocnienia, co należy raczej uznać za niekorzystne (rys. 4.31).

Widoczna na rysunku 4.28 rozbieżność krzywych odkształceń podłużnych ϵ_{vm} elementów S4a i S4b, powyżej wartości około 0,75‰, spowodowana jest rozpoczęciem procesu destrukcji zespolenia taśmy z betonem. Świadczy o tym mechanizm (obraz) zniszczenia elementu typu S4a, który opisano w tablicy 4.15. Efektem tego był brak przyrostu nośności granicznej N_u elementu S4a. Siła niszcząca osiągnęła wartość na poziomie nośności granicznej słupków S1a i S1b.

Zastosowanie dodatkowego wzmocnienia poprzecznego w postaci obejm z maty z włókien węglowych zapobiega gwałtownemu odpajaniu się taśmy od elementu. Nie ma ono wpływu na przebieg ścieżki odkształceń, powoduje jednak jej wydłużenie i wzrost granicznych odkształceń podłużnych $\epsilon_{vm,lim}$ w stosunku do elementów bez wzmocnienia (rys. 4.32). Dodatkowe opaski z maty CFRP powodują przyrost nośności granicznej N_u . Zaobserwowano przyrost nośności rzędu 24% dla elementu S4b, rzędu 37% dla elementu S5b i rzędu 49% dla elementu S6b w stosunku do słupków kontrolnych.

Podczas badania elementów S6a i S6b udało się wychwycić proces niszczenia

połączenia podłużnych odcinków taśmy CFRP z betonem, co widać na rysunkach 4.30, 4.31 i 4.32 w postaci zaburzeń na wykresach odkształceń podłużnych ε_{vm} elementów.

Ważnym spostrzeżeniem jest to, że intensywność wzmocnienia podłużnego nie ma wpływu na wartość odkształceń granicznych elementów wzmocnionych, natomiast ma wpływ na szybkość przyrostu odkształceń podłużnych i dochodzenia do ich wartości granicznej. Potwierdza to wniosek z etapu I badań, że o wartości nośności granicznej N_u decyduje intensywność wzmocnienia (zbrojenia) podłużnego, któremu powinno towarzyszyć wzmocnienie poprzeczne.

Dla analizowanych intensywności wzmocnienia zdefiniowanych zależnością (4.1), przedstawionych na rysunku 4.11 wykazano, że wpływ wzmocnienia podłużnymi odcinkami taśm CFRP zauważalny jest powyżej $\rho_L=2,8\%$. Wniosek ten posłuży, w dalszej części pracy, do określenia szukanej zależności między intensywnością wzmocnienia a przyrostem nośności elementów ściskanych wzmocnianych kompozytami węglowymi.

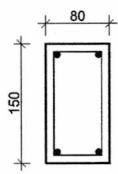
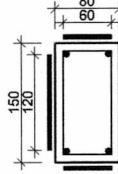
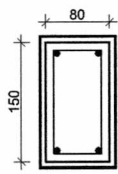
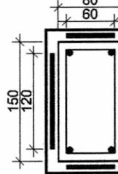
4.4. Badania doświadczalne – etap IIb

4.4.1. Cel badań. Program badań

Etap IIb badań doświadczalnych stanowił kontynuację prac badawczych rozpoczętych w poprzednim etapie IIa. Jednym z celów badań była ocena zgodności odkształceń betonu, prętów zbrojenia podłużnego, taśmy i maty z włókien węglowych oraz odpowiedź na pytanie czy podłużne i poprzeczne wzmocnienie współdziała z betonem i stalą w przenoszeniu naprężeń ściskających. Analizowano również wpływ poszczególnych składników wzmocnienia (podłużne odcinki taśmy i poprzeczne obejmy z maty) na nośność i odkształcalność tego typu elementów, poddanych doraźnemu ściskaniu osiowemu. Ponadto kontynuowano rozpoczęte prace nad określeniem wpływu intensywności wzmocnienia podłużnego, któremu towarzyszy wzmocnienie poprzeczne, na nośność słupów żelbetowych wzmocnianych materiałami CFRP.

W celu realizacji zamierzonych celów przeprowadzono badania na modelach słupów żelbetowych, różniących się sposobem skonstruowania wzmocnienia zewnętrznego. Wykonano i przebadano (rys. 4.33):

- dwa elementy bez wzmocnienia (jako słupy kontrolne) – Sb,
- dwa elementy wzmocnione samymi podłużnymi odcinkami taśm z włókien węglowych o intensywność wzmocnienia 4,20% – St,
- dwa elementy wzmocnione samymi obejmami z maty z włókien węglowych – Sm,
- trzy elementy wzmocnione podłużnymi odcinkami taśmy z włókien węglowych o intensywność wzmocnienia 4,20% oraz obejmami z maty z włókien węglowych – St+m.

	Sb	St	Sm	St+m
				
Ilość elementów	2	2	2	3
Przekrój taśm [mm]	—	120x1,4 - 2 szt. 60x1,4 - 2 szt.	—	120x1,4 - 2 szt. 60x1,4 - 2 szt.
Powierzchnia taśm [cm ²]	—	5,04	—	5,04
Intensywność wzmocnienia [%]	—	4,20	—	4,20
Przekrój obejm [mm]	—	—	25x0,13	25x0,13

Rys. 4.33. Elementy do badań w etapie IIb

Intensywność wzmocnienia słupów charakteryzuje stopień wzmocnienia ρ_L wyrażony zależnością (4.1). Podobnie jak poprzednio podane na rysunku wymiary przekroju poprzecznego obejm z maty z włókien węglowych odnoszą się do nominalnej grubości kompozytu, bez uwzględnienia grubości kleju.

4.4.2. Wykonanie i przygotowanie elementów badawczych

Elementy badawcze

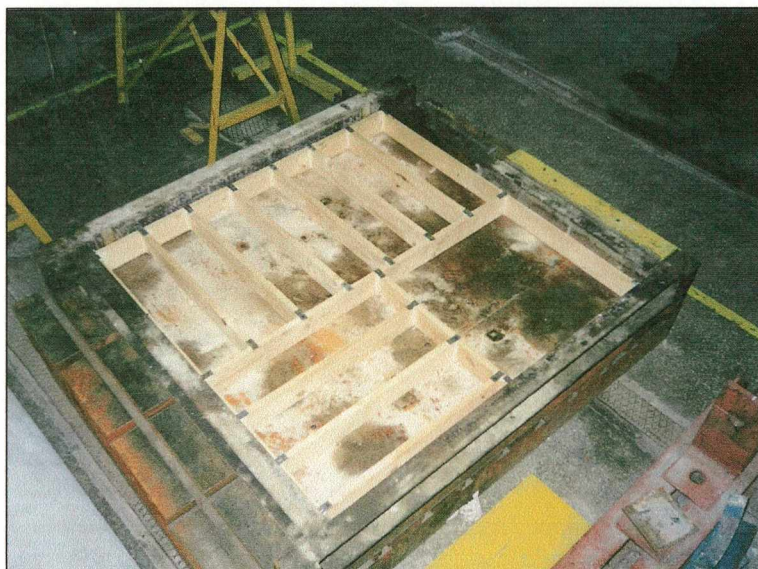
Przedmiotem badań były modele słupów w skali około 1:5, skonstruowane identycznie, jak w etapie IIa. Szczegółowe informacje o wymiarach i sposobie zbrojenia elementów podano w punkcie 4.3.2 pracy.

Skład mieszanki betonowej do wykonania elementów badawczych

Mieszanke betonową wykonano z tych samych materiałów, z których przygotowano beton w etapie IIa. Cement portlandzki i kruszywo pochodziły z tej samej dostawy materiału. Skład mieszanki betonowej oraz sposób wykonania był identyczny jak poprzednio, co opisano w punkcie 4.3.2 pracy. Ze względu na duże zawilgocenie kruszywa ograniczono ilość wody zarobowej w celu uzyskania konsystencji plastycznej mieszanki betonowej.

Konsystencję mieszanki betonowej określano trzykrotnie podczas betonowania za pomocą stożka opadowego [N10]. Opad stożka dla całej partii wahał się w granicach 5,0 cm, co odpowiada według normy [N6] konsystencji K3 natomiast według normy [N11] konsystencji S2.

Wykonanie elementów badawczych



Rys. 4.34. Forma do wykonania elementów badawczych w etapie IIb

Przed zabetonowaniem elementów na prętach podłużnych szkieletów zbrojeniowych przyklejono i zabezpieczono (w połowie ich długości) po jednym tensometrze do pomiaru odkształceń podłużnych stali (rys. 4.35-a). Wszystkie elementy wykonywano jednocześnie w formie stalowej z drewnianymi przegródkami (rys. 4.34). Betonowanie odbyło się, z jednego zarobu mieszanki betonowej, w pozycji poziomej wzdłuż szerszego boku elementów. Beton w formie zagęszczano na stole wibracyjnym przez około 1 minuty. Po dwóch dniach wyciągano elementy z formy i przechowywano je w stałych warunkach termiczno-wilgotnościowych.

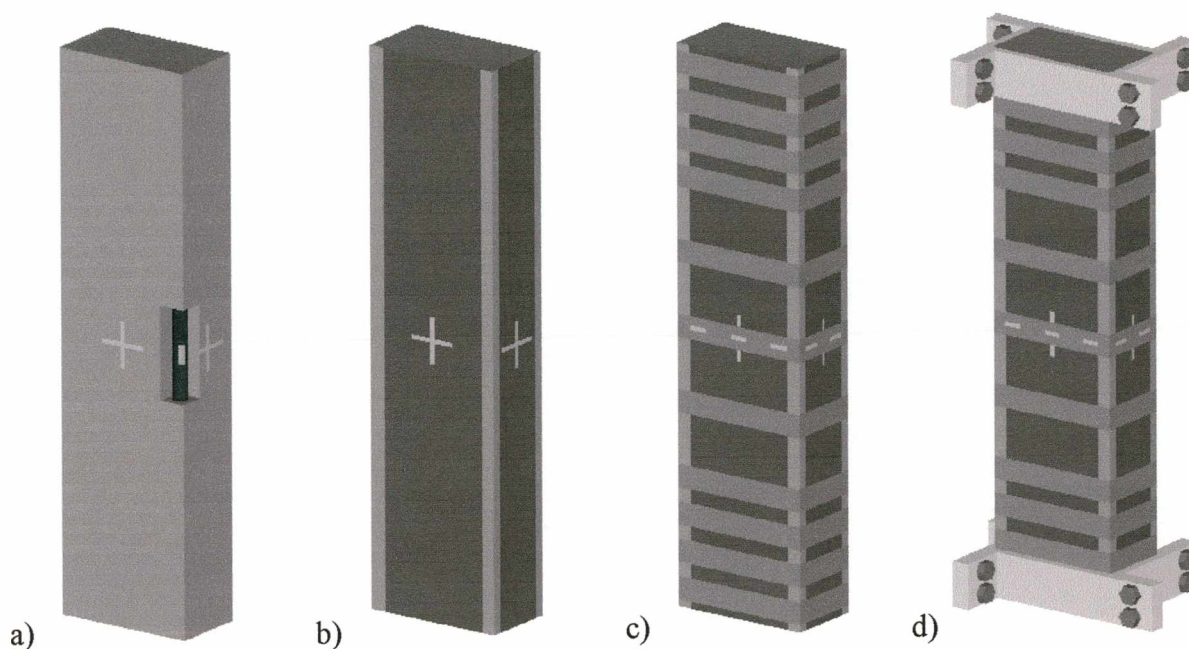
Wzmocnienie elementów badawczych

Tak samo jak w etapie IIa do wykonania wzmocnień wykorzystano materiały systemu Sika CarboDur [46] tj. taśmy Sika CarboDur typu M1214, klej do taśm Sikadur 30, matę SikaWrap Hex 230C oraz impregnat epoksydowy do mat Sikadur 330. Materiały pochodziły z tej samej partii, co poprzednio.

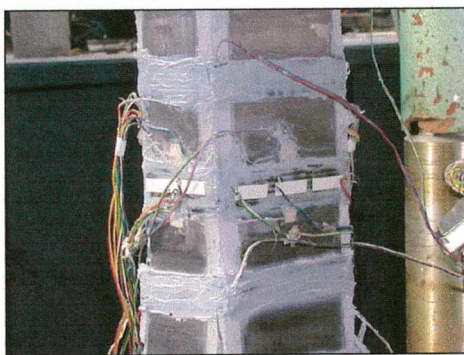
Proces przygotowania i wzmocnienia elementów odbywał się wieloetapowo i wymagał nakładów czasowych i dokładności. Przykładowo, elementy badawcze typu St+m wykonano w następujący sposób:

- oczyszczono odpowiednio powierzchnię betonu elementów żelbetowych, zgodnie z zaleceniami, które opisano w rozdziale drugim pracy,
- następnie naklejono na betonie krzyżowe rozety tensometryczne, które rozmieszczono w przekroju środkowym elementu na wszystkich jego czterech ściankach (rys. 4.35-a),
- po wyprowadzeniu przewodów przyklejono podłużne odcinki taśm z włókien węglowych,
- następnie naklejono krzyżowe rozety tensometryczne do pomiaru odkształceń podłużnych i poprzecznych taśm CFRP, które rozmieszczono na tych samych poziomach, co rozety na betonie i stali, na wszystkich czterech odcinkach taśmy (rys. 4.35-b),
- w następnej kolejności przyklejono zewnętrzne obejmy z maty CFRP, które rozmieszczono na tych samych poziomach, co strzemiona stalowe (rys. 4.35-c),
- następnie na opasce w przekroju środkowym naklejono tensometry do pomiaru odkształceń poprzecznych (rys. 4.36),
- na zakończenie, przed badaniem, strefy przypodporowe słupków zabezpieczono dodatkowymi obejmami stalowymi (rys. 4.35-d), których potrzebę stosowania opisano już w punkcie 4.3.4 pracy.

Przygotowanie pozostałych elementów wzmocnionych typu St i Sm było podobne i różniło się pominięciem niektórych etapów.



Rys. 4.35. Sposób przygotowania elementów badawczych typu St+m (opis w tekście)



Rys. 4.36. Rozmieszczenie tensometrów w przekroju środkowym elementu St+m-3

4.4.3. Cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe materiałów

a) Beton

W trakcie betonowania elementów badawczych wykonano z tego samego zarobu cztery próbki sześciennie 150x150x150 mm oraz dwie próbki walcowe $\varnothing 113 \times 350$ mm. Próbkę wibrowano razem ze słupkami na stole wibracyjnym przez około 1 minuty. Po dwóch dniach rozformowano próbki i przechowywano je razem z elementami badawczymi w stałych warunkach termiczno-wilgotnościowych.

W przeddzień badania słupów określono:

- średnią wytrzymałość betonu na ściskanie $f_{cm, cube}$ (zgniatanie czterech próbek sześciennych o krawędzi 150 mm),
- średni moduł odkształcenia betonu E_{cm} wyznaczony jako wartość stosunku przyrostu

naprężeń do przyrostu odkształceń w przedziale naprężeń $0,1 \div 0,3$ średniej wytrzymałości słupowej na ściskanie $f_{c,cyl}$ [25] (sześciokrotne obciążanie i odciążanie próbek walcowych o średnicy 113 mm i wysokości 350 mm).

Każdy z trzech wymiarów próbki mierzono czterokrotnie i przyjmowano wartość średnią. Badania próbek przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej EDB 400 produkcji NRD (VEB Lipsk) o zakresie $0 \div 400$ kN (rys. 4.13). Wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie przedstawiono w tablicy 4.16.

Tablica 4.16. Wyniki badania wytrzymałości kostkowej betonu na ściskanie elementów w etapie IIb

Lp.	Nr próbki	Bok [mm]		Pole przekroju	Wysokość średnia H	Masa	Siła niszcząca	f_{ci}	$f_{cm,cube}$
		Średnia A	Średnia B	[cm ²]	[mm]	[kg]	[kN]	[MPa]	[MPa]
1	1/IIb	149,43	149,85	223,93	150,15	7,40	1030,0	46,00	51,25
2	2/IIb	149,83	149,92	224,62	149,85	7,50	1230,0	54,76	
3	3/IIb	149,03	149,80	223,24	149,78	7,50	1190,0	53,31	
4	4/IIb	149,51	149,67	223,76	149,63	7,45	1140,0	50,95	

Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie została ustalona z odchyleniem standardowym $s=3,840$ MPa [36]. Odpowiada to klasie betonu w chwili badania około B45 według [N8] lub C35/45 według [N11].

Średni moduł odkształcenia betonu E_{cm} określono na podstawie zależności pomiędzy podłużnymi naprężeniami w betonie σ_{cv} i średnimi odkształceniami podłużnymi betonu ε_{cvm} (średnia z czterech tensometrów) dla siódmego cyklu obciążenia. Przedział naprężeń do wyznaczenia zależności przyjęto równy $(0,1 \div 0,3)f_{c,cyl}$. Moduł sprężystości betonu wyniósł $E_{cm}=29\ 095$ MPa.

b) Stal zbrojeniowa

Podobnie jak w poprzednim etapie zbrojenie podłużne słupów zostało wykonane ze stali zbrojonej klasy A-II gatunku 18G2 [N8] o średnicy 8 mm. Stal pochodziła z tej samej partii materiału. Cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe stali opisano w punkcie 4.3.3 pracy.

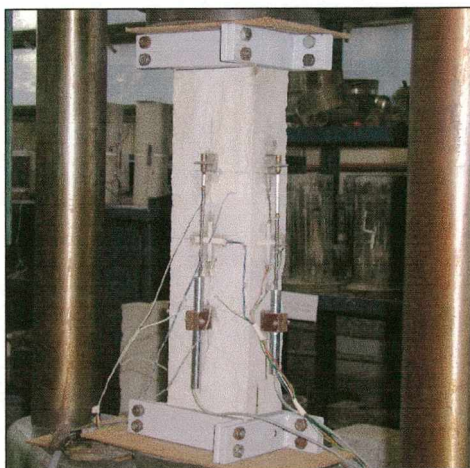
c) Materiały CFRP

Szczegółowe informacje na temat badania parametrów technicznych taśm i mat z włókien węglowych podano w punkcie 4.3.3 pracy.

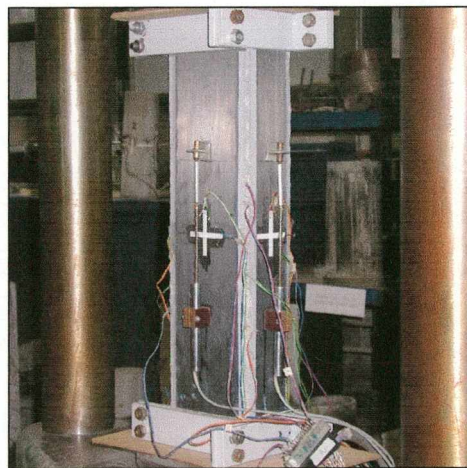
4.4.4. Metodyka badań

Stanowisko badawcze

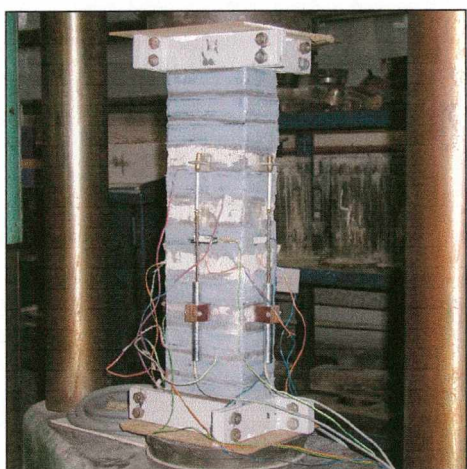
Badania wytrzymałościowe przeprowadzono w Laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej na maszynie wytrzymałościowej ZD 100 produkcji NRD (VEB Lipsk) o zakresie $0 \div 1000$ kN (rys. 4.37).



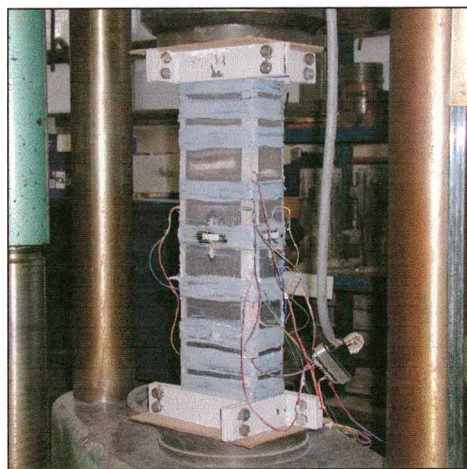
a) Sb-1



b) St-1



c) Sm-2



d) St+m-2

Rys. 4.37. Elementy na stanowisku badawczym

Aparatura pomiarowa

Dla każdego poziomego obciążenia rejestrowano następujące wielkości:

- odkształcenia podłużne i poprzeczne betonu,
- odkształcenia podłużne i poprzeczne taśm z włókien węglowych,
- odkształcenia maty z włókien węglowych,
- odkształcenia prętów zbrojenia podłużnego.

Odkształcenia podłużne i poprzeczne betonu mierzono na powierzchni betonu za

pomocą krzyżowych rozet tensometrycznych z tensometrów elektrooporowych typu RL=300/50. Rozety rozmieszczono w połowie wysokości na wszystkich jego czterech ściankach. Dla części elementów odkształcenia podłużne betonu mierzone były również za pomocą indukcyjnych czujników przemieszczeń liniowych o zakresie ± 10 mm i dokładności 0,001 mm. Pomiaru dokonywano na bazie 20 cm (rys. 4.37). Czujniki indukcyjne mocowano, równolegle do tensometrów elektrooporowych, bezpośrednio do łapek przyklejonych do betonu lub taśmy klejem na bazie żywicy epoksydowej. Na pewnym etapie badań zrezygnowano z czujników indukcyjnych ze względu na gwałtowny proces zniszczenia elementów i możliwość ich uszkodzenia.

Odkształcenia podłużne i poprzeczne taśm z włókien węglowych mierzono na powierzchni taśmy za pomocą krzyżowych rozet tensometrycznych. Do pomiaru odkształceń podłużnych użyto tensometrów elektrooporowych typu RL=300/50. Rozmieszczono je na tych samych poziomach, co rozety na betonie na wszystkich odcinkach taśm.

Odkształcenia maty z włókien węglowych mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych typu RL=120/20. W przekroju środkowym elementów naklejono po jednym tensometrze na każdym jego boku. Jedynie dla słupa St+m-3 naklejono dziesięć tensometrów na obwodzie obejmującej środkowej (rys. 4.36).

Odkształcenia zbrojenia podłużnego mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych typu RL=120/20. Tensometry naklejono i zabezpieczono, na każdym z prętów w środku jego wysokości, przed zabetonowaniem elementów badawczych.

Do analizy cech odkształcalnościowych posłużono się średnią arytmetyczną z odczytów właściwych tensometrów.

Do rejestracji wyników pomiarów używano komputera PC IBM 486 DX oraz wielokanałowego systemu pomiarowego UPM 100 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik i przyrządu pomiarowego z falą nośną do czujników transformatorowych CFT 510.

Procedury badawcze

Program obciążania elementów został opisany w punkcie 4.3.4 pracy przy prezentacji etapu IIa badań doświadczalnych.

4.4.5. Wyniki badań doświadczalnych w etapie IIb

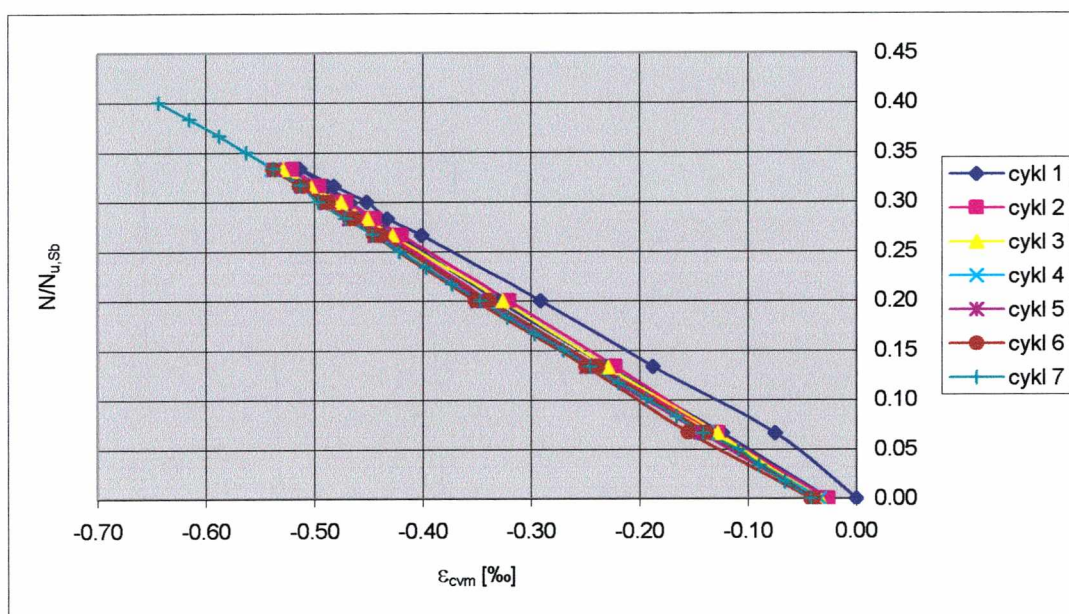
W ramach etapu IIb badań doświadczalnych wykonano (rys. 4.33) i przebadano siedem słupków wzmacnianych materiałami CFRP i dwa elementy kontrolne bez wzmocnienia.

Słupy różniły się sposobem skonstruowania wzmocnienia zewnętrznego. Szczegółowe informacje o wykonaniu słupów podano w punkcie 4.4.2 pracy.

Podczas obciążania każdego słupa skokowo zmieniającą się siłą mierzono:

- odkształcenia podłużne ε_{cv} i poprzeczne betonu ε_{ch} ,
- odkształcenia podłużne ε_{Lv} i poprzeczne ε_{Lh} taśm z włókien węglowych,
- odkształcenia maty z włókien węglowych ε_{wh} ,
- odkształcenia prętów zbrojenia podłużnego ε_{sv} .

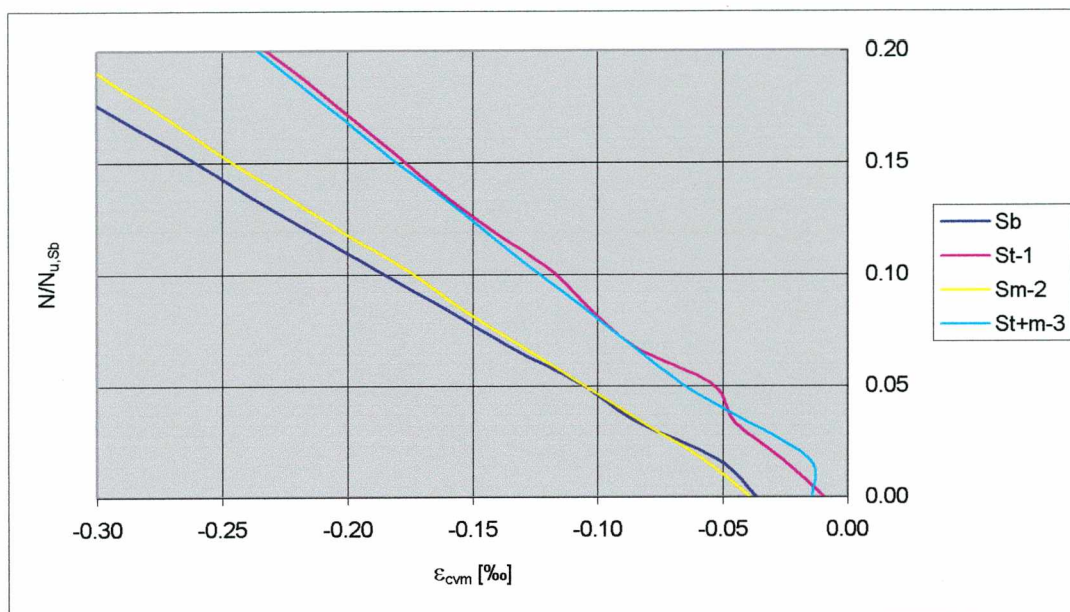
Realizację programu obciążania badanych elementów, opisanego w punkcie 4.3.4 (próba sprężystości i próba do zniszczenia) można prześledzić na rysunku 4.38, na którym przedstawiono zależność $N/N_{u,Sb} - \varepsilon_{cvm}$ uzyskaną z badań dla słupa Sb-2. Dla wszystkich elementów zrealizowano ten sam program obciążania, składający się z sześciu cykli obciążeń wstępnych i siódmego cyklu obciążenia słupa do zniszczenia.



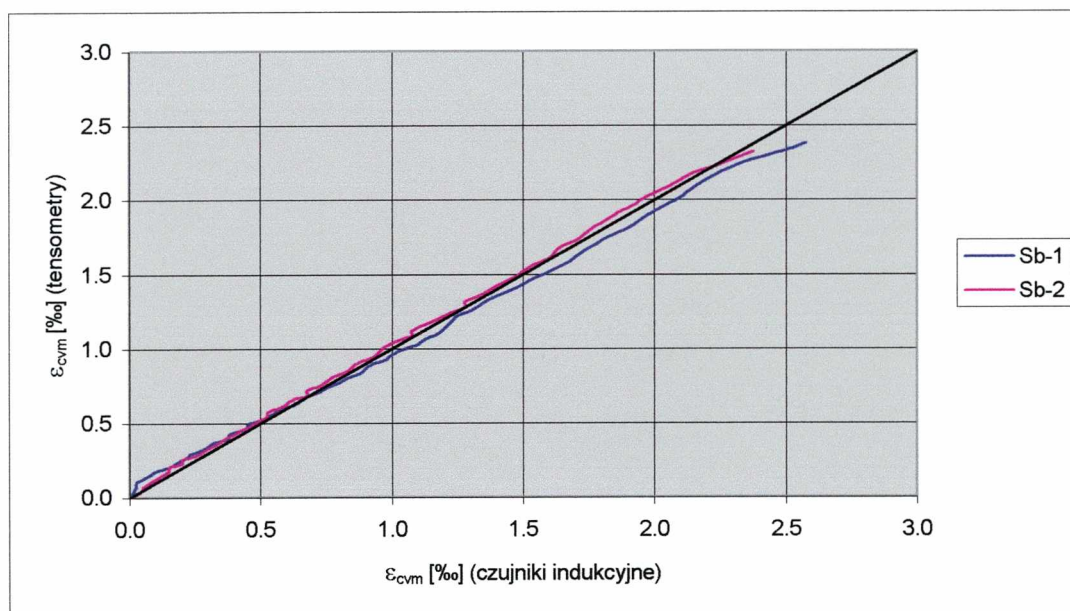
Rys. 4.38. Zależność $N/N_{u,Sb} - \varepsilon_{cvm}$ uzyskaną z badań dla słupa Sb-2
(sześć cykli obciążeń wstępnych i początek siódmego cyklu do zniszczenia)

Dzięki takiemu sposobowi obciążania elementów możliwa była rejestracja odkształceń plastycznych (trwałych) materiałów po sześciu cyklach obciążeń wstępnych. Na rysunku 4.39 przedstawiono odkształcenia plastyczne betonu, po sześciu cyklach obciążeń wstępnych, na wykresie zależności $N/N_{u,Sb} - \varepsilon_{cvm}$ dla słupów: Sb, St-1, Sm-2, St+m-3 (powiększenie początkowej strefy ścieżek odkształceń). Jak widać na rysunku 4.39 zastosowanie wzmocnienia poprzez doklejenie podłużnych odcinków taśmy CRFP ($\rho_L=4,20\%$) powoduje ograniczenie odkształceń plastycznych rzędu 60% w stosunku do analogicznych elementów

bez wzmocnienia podłużnego.



Rys. 4.39. Zależność $N/N_{u,Sb}$ - $\epsilon_{cv,m}$ dla słupów: Sb, St-1, Sm-2, St+m-3.
Odształcenia plastyczne betonu po sześciu cyklach obciążeń wstępnych



Rys. 4.40. Porównanie wartości wyników średnich odkształceń podłużnych betonu $\epsilon_{cv,m}$ otrzymanych z tensometrów elektrooporowych oraz czujników indukcyjnych dla słupów typu Sb-1 i Sb-2

Odształcenia podłużne betonu ϵ_{cv} mierzono na powierzchni betonu w kierunku wysokości słupa za pomocą czterech tensometrów elektrooporowych (rys. 4.35-a), przyjmując do analizy średnią wartość z odczytów tych tensometrów. Odształcenia podłużne betonu ϵ_{cv} wyznaczano również na podstawie odczytów czterech czujników indukcyjnych. Otrzymane różnice pomiędzy wartościami odkształceń podłużnych betonu, wyznaczanymi za

pomocą tych dwóch metod pomiarowych, są niewielkie. Na rysunku 4.40 przedstawiono wykres porównawczy pomiędzy wartościami odkształceń podłużnych betonu otrzymanymi z tensometrów elektrooporowych i czujników indukcyjnych dla elementów typu Sb-1 i Sb-2.

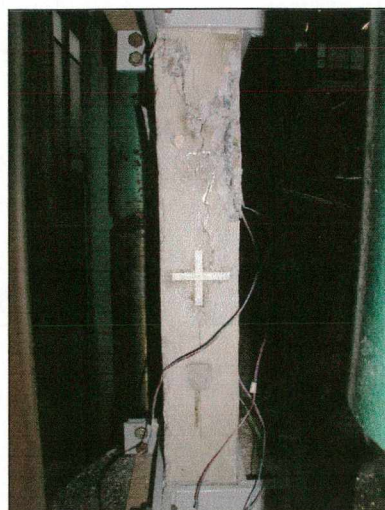
a) Nośność graniczna słupów

Wyniki badania sił niszczących dla słupów N_u , odkształceń plastycznych betonu i taśm CFRP, maksymalnych, rejestrowanych odkształceń podłużnych betonu i taśm dla poszczególnych elementów oraz opis mechanizmu (obrazu) zniszczenia słupów zaprezentowano w tablicy 4.17. Opis kąta ω przyjęto identycznie jak w tablicy 4.15.

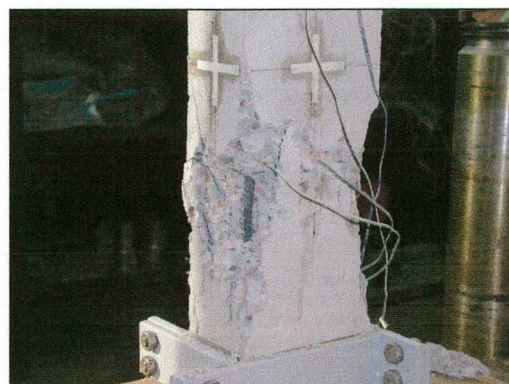
Tablica 4.17. Wyniki badania nośności granicznej słupów w etapie IIb

Lp.	Oznaczenie słupa	N_u [kN]	ε_{cvm}^{pl} [‰]	ε_{Lvm}^{pl} [‰]	Mechanizm (obraz) zniszczenia
			$\varepsilon_{cvm,lim}$ [‰]	$\varepsilon_{Lvm,lim}$ [‰]	
1	Sb-1	581	0,031 2,413	— —	Ścięcie betonu ($\omega=65^\circ$) od góry do środka elementu (rys. 4.41-a).
2	Sb-2	600	0,043 2,367	— —	Zgniecenie betonu w dolnej części elementu (rys. 4.41-b).
3	St-1	665	0,010 1,612	0,007 1,558	Odspojenie taśmy z otuliną w obszarze zmiażdżenia betonu w górnej części elementu; pęknięcia taśm wzdłuż włókien (rys. 4.42-a).
4	St-2	600*	— 1,451	— 1,456	Odspojenie taśmy z otuliną w obszarze zmiażdżenia betonu w dolnej części elementu; pęknięcia taśm wzdłuż włókien (rys. 4.42-b).
5	Sm-1	590*	— 2,176	— —	Rozerwanie obejm na krawędziach elementu; odspojenie obejm z otuliną; zmiażdżenie betonu w środkowej części (rys. 4.43-a).
6	Sm-2	686	0,039 2,172	— —	Ścięcie betonu ($\omega=70^\circ$) i rozerwanie obejm na krawędziach elementu w środkowej części (rys. 4.43-b).
7	St+m-1	833	0,012 2,342	0,011 2,298	Rozerwanie obejm na krawędziach i zmiażdżenie betonu w dolnej części elementu; odspojenie z otuliną taśmy w obszarze zniszczenia (rys. 4.44-a).
8	St+m-2	942	0,013 2,247	0,014 2,374	Rozerwanie obejm w dolnej części na krawędziach elementu w obszarze zmiażdżenia betonu; odspojenie jednej z taśm z betonem grubości 20mm; zgniecenia i pęknięcia taśm wzdłuż włókien (rys. 4.44-b).
9	St+m-3	863	0,014 2,283	0,014 2,244	Rozerwanie obejm w dolnej części na krawędziach elementu w obszarze zmiażdżenia betonu; odspojenie obejm z otuliną; zgniecenia i pęknięcia taśm wzdłuż włókien (rys. 4.44-c).

* - z powodu trudności z osiowaniem elementów wykonano tylko próbę do zniszczenia; badanie należy uznać za niewiarygodne.



a) Sb-1



b) Sb-2

Rys. 4.41. Obraz zniszczenia elementów kontrolnych w etapie IIb

Obserwacja mechanizmu zniszczenia potwierdziła, że zniszczenie elementów wzmocnionych poprzez doklejenie samych podłużnych odcinków taśmy z włókien węglowych następowało na skutek odspojenia się taśmy na pewnym odcinku, czemu towarzyszyło zmiążdżenie betonu i uplastycznienie stali zbrojeniowej. Podobnie jak poprzednio zaobserwowano wtórny efekt odspojenia samej taśmy lub taśmy z klejem w obszarach, gdzie beton pozostawał nienaruszony (rys. 4.42).



a) St-1



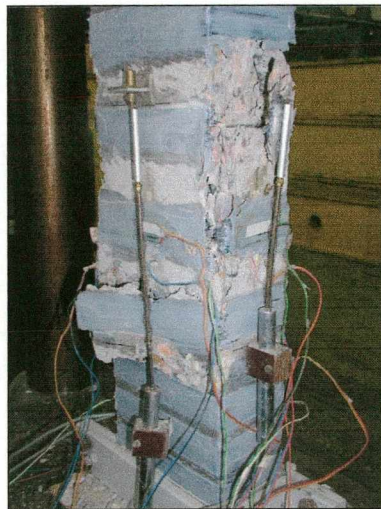
b) St-2

Rys. 4.42. Obraz zniszczenia elementów St-1 i St-2

Zniszczenie elementów wzmocnionych samymi obejmami z maty z włókien węglowych oraz słupków kontrolnych następowało na skutek ścięcia lub zmiążdżenia betonu (rys. 4.43). Wynika stąd, że zastosowanie nieciągłego wzmocnienia poprzecznego w postaci opasek z maty CFRP nie wpływa na mechanizm (obraz) zniszczenia tego typu elementów. Zachowują się one jak typowe elementy żelbetowe.



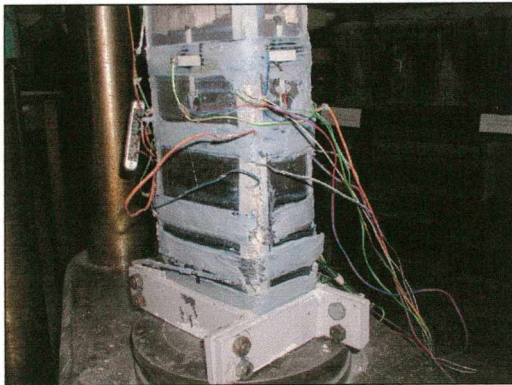
a) Sm-1



b) Sm-2

Rys. 4.43. Obraz zniszczenia elementów Sm-1 i Sm-2

Potwierdziło się również spostrzeżenie z etapu IIa badań, że zniszczenie elementów wzmocnionych podłużnymi odcinkami taśmy z włókien węglowych oraz obejmami z maty z włókien węglowych następowało wskutek jednoczesnego zerwania kilku opasek i zniszczenia betonu, czemu towarzyszyło odspojenie i zgniecenie taśmy oraz uplastycznienie stali zbrojeniowej (rys. 4.44).



a) St+m-1



b) St+m-2



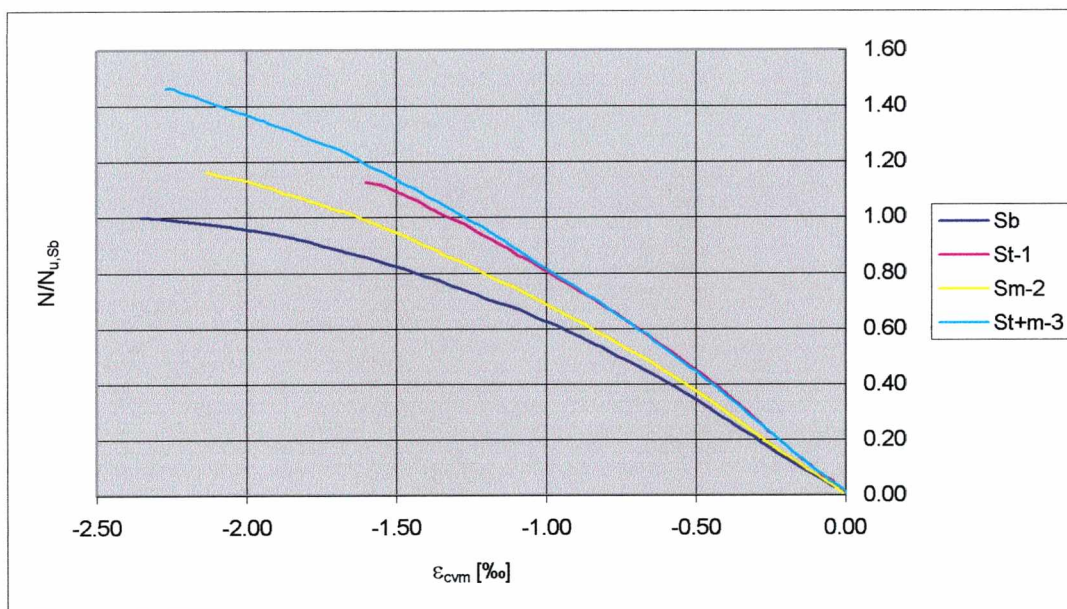
c) St+m-3

Rys. 4.44. Obraz zniszczenia elementów St+m-1, St+m-2 i St+m-3

b) Odształcenia podłużne słupów

W celu poznania wpływu poszczególnych składników wzmocnienia (podłużne odcinki taśmy i poprzeczne obejmę z maty) na cechy odkształcalnościowe betonu w słupach żelbetowych wzmocnianych materiałami CFRP, poddanych doraźnemu ścisaniu osiowemu, w rozdziale przedstawiono wykres zależności porównującej średnie wartości odkształceń podłużnych betonu ϵ_{cvm} elementów badawczych w funkcji stosunku przykładanego obciążenia N do średniej nośności granicznej słupków kontrolnych $N_{u,Sb}$ dla siódmego cyklu obciążenia (odkształcenia ϵ_{cvm}^{pl} po sześciu cyklach i odkształcenia $\epsilon_{cvm,lim}$ dla siódmego cyklu, dla wszystkich elementów badawczych tego etapu podano w tablicy 4.17).

Wykres zależności $N/N_{u,S1} - \epsilon_{cvm}$ dla elementów typu St-1, Sm-2 i St+m-3 przedstawiono na rysunku 4.45 porównując je z wykresem średnich odkształceń podłużnych betonu ϵ_{cvm} słupków bez wzmocnienia S1.



Rys. 4.45. Wykres zależności $N/N_{u,Sb} - \epsilon_{cvm}$ dla słupów: Sb, St-1, Sm-2 i St+m-3

Jak widać na rysunku 4.45 wartość odkształceń podłużnych betonu ϵ_{cvm} zależy od sposobu skonstruowania wzmocnienia. Potwierdził się wniosek z poprzedniego etapu badań, że wzmocnianie przez doklejenie samych podłużnych odcinków taśmy CFRP powoduje zmniejszenie przyrostu odkształceń podłużnych betonu ϵ_{cvm} w stosunku do słupków kontrolnych przy jednakowych przyrostach siły podłużnej. Na poziomie średniej nośności granicznej elementów kontrolnych $N_{u,Sb}$ odkształcenia ϵ_{cvm} są około 45% mniejsze od średnich odkształceń podłużnych betonu słupków bez wzmocnienia. Zaobserwowano ten sam

niekorzystny efekt zmniejszenia granicznych odkształceń podłużnych betonu $\varepsilon_{cv,lim}$ w stosunku do elementów kontrolnych. Maksymalne pomierzone odkształcenia ε_{cv} dla elementu St-1 wynoszą około 1,6‰. Zmiana szybkości przyrostu odkształceń podłużnych betonu ε_{cv} powoduje wzrost nośności granicznej N_u elementu St-1 rzędu 13%.

Zastosowanie dodatkowego wzmocnienia poprzecznego w postaci obejm z maty CFRP w słupie St+m-3 powoduje, co zauważono już wcześniej w etapie IIa, wzrost granicznych odkształceń podłużnych betonu $\varepsilon_{cv,lim}$ do około 2,3‰ w stosunku do elementu St-1. Przyklejenie poprzecznych opasek z maty nie wpływa na szybkość przyrostu odkształceń podłużnych betonu w elemencie St+m-3. Krzywe na rysunku 4.45 dla elementów St-1 i St+m-3 pokrywają się w pewnym zakresie wyężenia elementów do poziomu granicznych odkształceń podłużnych betonu $\varepsilon_{cv,lim}$ słupa St-1. Jednoczesne współdziałanie wzmocnienia podłużnego i poprzecznego powoduje przyrost nośności granicznej N_u . Zaobserwowano przyrost nośności rzędu 46% dla elementu St+m-3 w stosunku do słupków kontrolnych.

Wyraźnie mniejsze efekty wzmocnienia daje zastosowanie samych opasek kompozytowych, tak jak w elemencie Sm-2. Takie wzmocnienie, jako pewna forma uzwojenia elementu o przekroju prostokątnym, spowodowało przyrost nośności granicznej rzędu 16%. Maksymalne pomierzone odkształcenia $\varepsilon_{cv,lim}$ dla elementu Sm-2 wynoszą około 2,2‰. Pomimo zmniejszenia przyrostu odkształceń podłużnych betonu ε_{cv} nie uzyskano wyraźnego przyrostu nośności. Fakt ten należy tłumaczyć brakiem efektywności uzwojenia zewnętrznego matą kompozytową elementów o poprzecznym przekroju prostokątnym bez wyokrąglonych naroży.

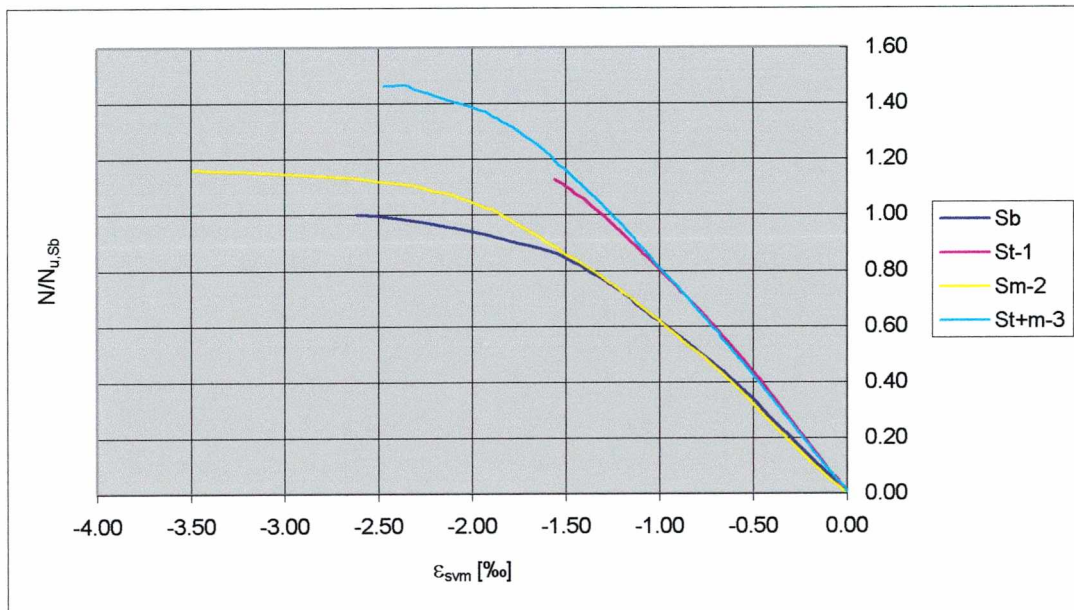
Należy zauważyć, że przyrost nośności elementu St+m-3 (46%) jest większy niż wynikałoby to z zsumowania przyrostów nośności elementu wzmocnionego samymi podłużnymi taśmami St-1 (13%) i elementu wzmocnionego samymi obejmami z maty Sm-2 (16%).

Wyniki pomiarów odkształceń prętów zbrojenia podłużnego ε_{sv} przedstawiono na wykresie w postaci zależności tych odkształceń od stosunku przykładanego obciążenia N do średniej nośności granicznej słupków kontrolnych $N_{u,sb}$. Na rysunku 4.46 pokazano wykresy zależności $N/N_{u,sb} - \varepsilon_{sv}$ dla wybranych elementów badawczych.

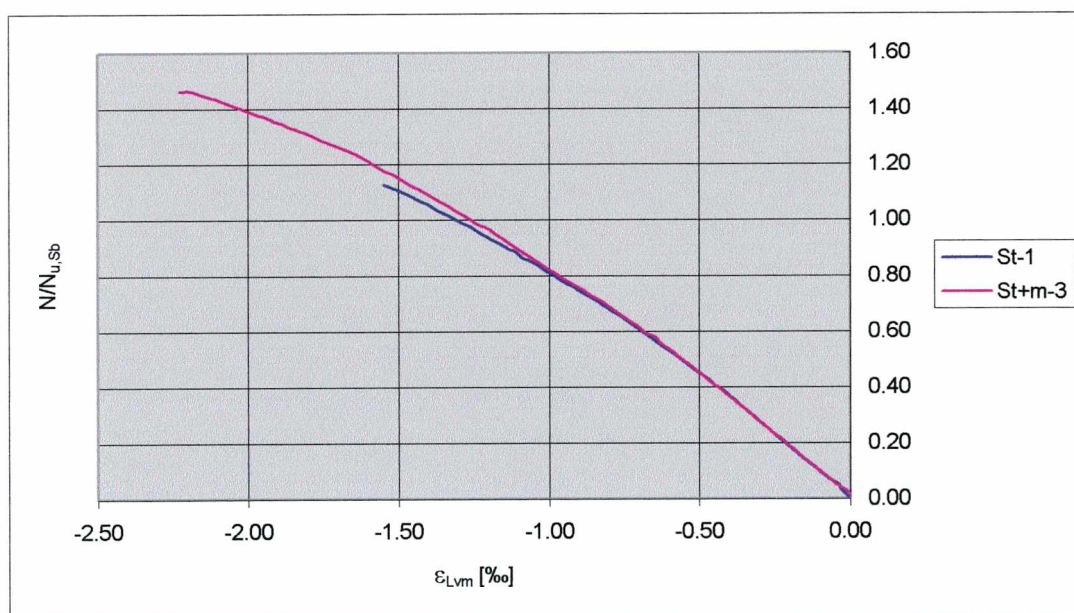
Na podstawie rysunku 4.46 stwierdzono, że odkształcenia prętów zbrojenia podłużnego ε_{sv} (podobnie jak odkształceń podłużnych betonu ε_{cv}) zależą od sposobu skonstruowania wzmocnienia zewnętrznego. Dodatkowe wzmocnienie podłużne powoduje zmniejszenie przyrostu odkształceń ε_{sv} , które na poziomie średniej nośności granicznej elementów

kontrolnych S_b są około 50% mniejsze od średnich odkształceń prętów zbrojenia podłużnego słupków bez wzmocnienia.

Gwałtowny przyrost odkształceń prętów zbrojenia podłużnego ε_{svm} elementu Sm-2 spowodowany jest wyraźnym uplastycznieniem stali zbrojeniowej przed wyczerpaniem nośności słupa. Dla wszystkich krzywych na rysunku 4.46 można wyróżnić liniowo-sprężystą fazę pracy do poziomu około $0,8(N/N_{u,Sb})$ a następnie przejście w zależność nieliniową.



Rys. 4.46. Wykres zależności $N/N_{u,Sb}$ - ε_{svm} dla słupów: S_b , $St-1$, $Sm-2$ i $St+m-3$



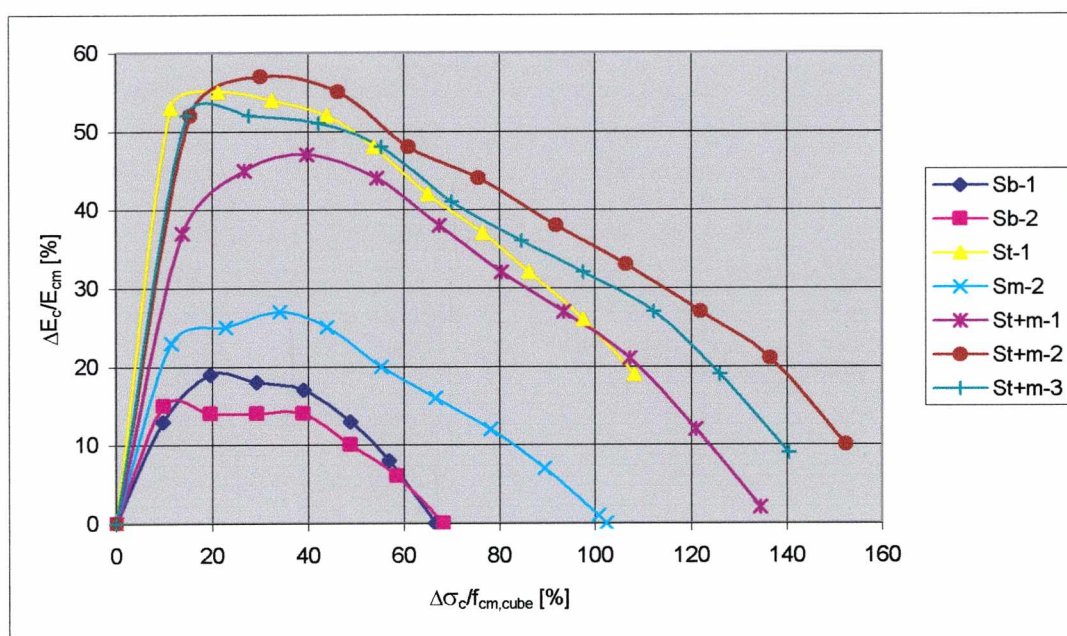
Rys. 4.47. Wykres zależności $N/N_{u,Sb}$ - ε_{Lvm} dla słupów: $St-1$ i $St+m-3$

Na rysunku 4.47 przedstawiono zależność między $N/N_{u,Sb}$ i średnimi odkształceniami

podłużnymi taśmami z włókien węglowych ε_{Lvm} dla elementów St-1 i St+m-3. Jak widać na rysunku 4.47 obydwie krzywe wykazują relację liniowo-sprężystą niezależnie od stopnia wyłączenia.

c) Współczynnik sprężystości betonu

Na podstawie wyników pomiarów odkształceń podłużnych betonu ε_{cvm} możliwe było określenie dla poszczególnych elementów badawczych zmiany wartości średniego modułu sprężystości betonu w zależności od stopnia jego wyłączenia. Wartości chwilowych współczynników sprężystości E_{ci} wyznaczono, co $0,1\sigma_{uc, Si}$ jako wartości stosunku naprężeń do odkształceń w betonie dla poszczególnych elementów. Wyniki obliczeń w postaci względnej zmiany współczynnika sprężystości betonu elementów badawczych $\Delta E_c = (E_{ci} - E_{cm})$ w stosunku do współczynnika sprężystości betonu próbek $E_{cm} = 29095$ MPa w zależności od stosunku $\sigma_{ci}/f_{cm, cube}$ wyłączenia betonu elementów badawczych σ_{ci} do średniej wytrzymałości kostkowej betonu na ściskanie $f_{cm, cube} = 51,25$ MPa przedstawiono na rysunku 4.48.



Rys. 4.48. Względna zmiana $\Delta E_c/E_{cm}$ współczynnika sprężystości betonu elementów badawczych ΔE_c w stosunku do współczynnika sprężystości betonu E_{cm} w zależności od stosunku $\sigma_c/f_{cm, cube}$ wyłączenia betonu elementów badawczych σ_c do średniej wytrzymałości kostkowej betonu na ściskanie $f_{cm, cube}$

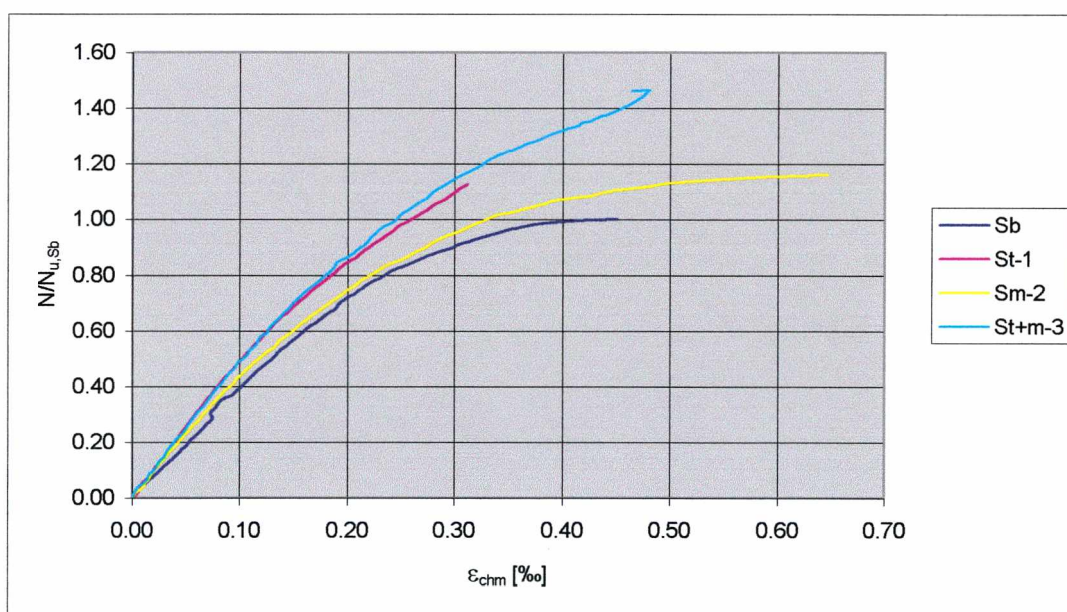
Rysunek 4.48 potwierdza zasadę, że moduł sprężystości betonu jest wielkością zmienną i zależy od stopnia wyłączenia przekroju. Maksimum dla poszczególnych krzywych na rysunku 4.48 oznacza moment przejścia z fazy pracy betonu liniowo-sprężystej na

nieliniową. Wraz ze wzrostem naprężeń w betonie maleje moduł sprężystości. W elementach kontrolnych dla $\sigma_c = 0,67f_{cm,cube}$ a w elemencie Sm-2 dla $\sigma_c = 1,02f_{cm,cube}$ moduł E_c maleje poniżej wartości modułu sprężystości betonu próbek E_{cm} . Wzmacnianie przez doklejenie podłużnych odcinków taśmy CFRP powoduje wyraźny wzrost chwilowych modułów sprężystości, które w momencie zniszczenia są większe od E_{cm} określanego na próbkach walcowych $\varnothing 113 \times 350$ mm. W elemencie St-1 naprężenia graniczne w betonie σ_{uc} są o około 8% większe od $f_{cm,cube}$, natomiast w elementach typu St+m σ_{uc} są średnio o około 40% większe od $f_{cm,cube}$.

d) Odształcenia poprzeczne słupów

Wyniki pomiarów odkształceń poprzecznych mierzonych na powierzchni betonu, taśmy i opaski kompozytowej pokazano w formie graficznej na wykresach, przedstawiających ich wartości od stosunku $N/N_{u,Sb}$ dla siódmego cyklu obciążenia.

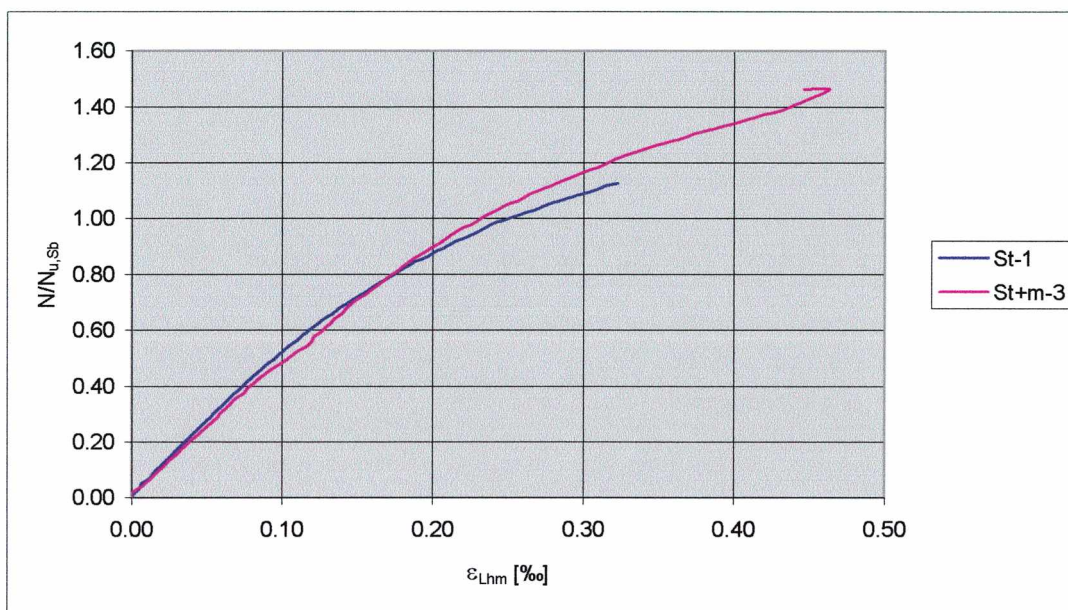
Jak widać na rysunku 4.49, który przedstawia zależność między $N/N_{u,Sb}$ - ϵ_{chm} dla elementów badawczych, wartość średnich odkształceń poprzecznych betonu również zależy od sposobu skonstruowania wzmocnienia zewnętrznego.



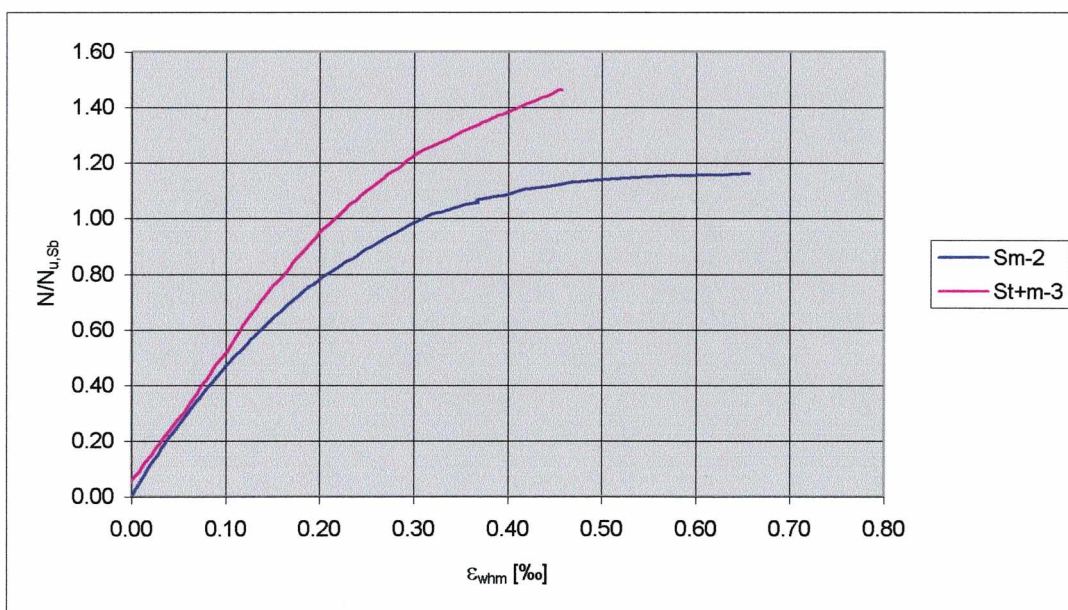
Rys. 4.49. Wykres zależności $N/N_{u,Sb}$ - ϵ_{chm} dla słupów: Sb, St-1, Sm-2 i St+m-3

Dla elementów St-1 i St+m-3 zasadniczy wpływ na szybkość przyrostu odkształceń poprzecznych ma obecność podłużnego zbrojenia kompozytowego. Dodatkowe opaski z maty CFRP, jak w słupku St+m-3 spowodowały jedynie opóźnienie procesu odpajania kompozytu

usytuowanego wzdłuż słupa, co widać na rysunku 4.50, który przedstawia wykres zależności $N/N_{u,S1} - \varepsilon_{Lhm}$ dla elementów typu St-1 i St+m-3. Taki stan rzeczy należy tłumaczyć niewielką szerokością opaski (por. rys. 4.33) i jej małym wpływem na odkształcalność poprzeczną.



Rys. 4.50. Wykres zależności $N/N_{u,Sb} - \varepsilon_{Lhm}$ dla słupów: St-1 i St+m-3



Rys. 4.51. Wykres zależności $N/N_{u,Sb} - \varepsilon_{whm}$ dla słupów: Sm-2 i St+m-3

Inaczej jest w przypadku elementu Sm-2, gdzie wzmocnienia poprzeczne w postaci obejm z maty jest jedynym występującym. Na rysunkach 4.49 i 4.51 widać, że zastosowanie opasek kompozytowych daje wyraźne większe odkształcenia graniczne $\varepsilon_{chm,lim}$ i $\varepsilon_{whm,lim}$, niż

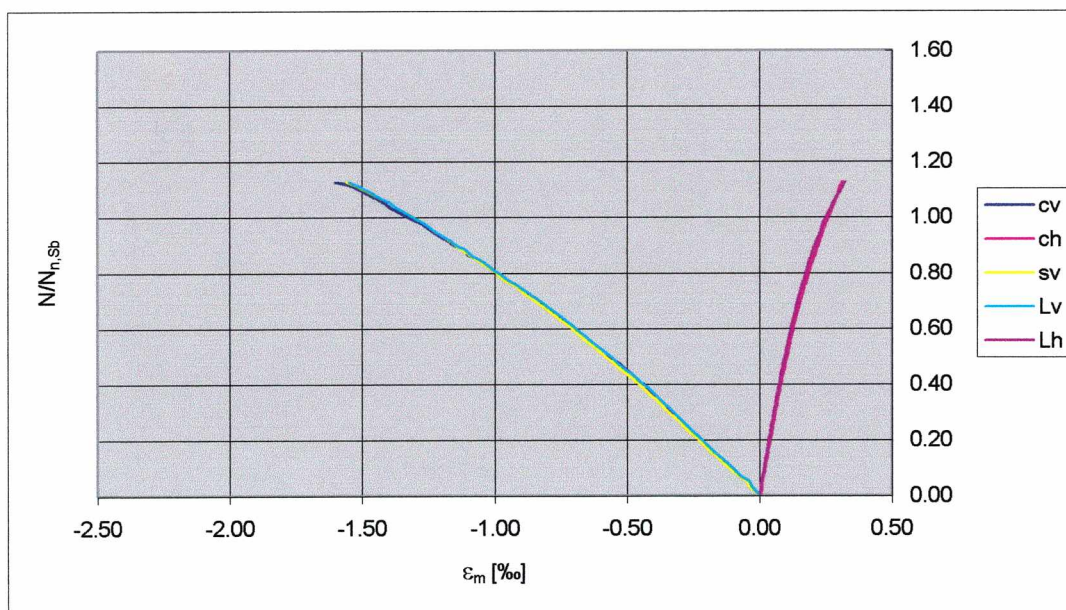
ma to miejsce przy jednoczesnej aplikacji wzmocnienia podłużnego i poprzecznego. Niestety, z powodu nieciągłości takiego sposobu wzmocnienia (forma strzemion zewnętrznych), a także kształtu przekroju poprzecznego elementu, nie przekłada się to na istotny wzrost nośności granicznej N_u .

e) Rozkłady odkształceń na grubości elementu

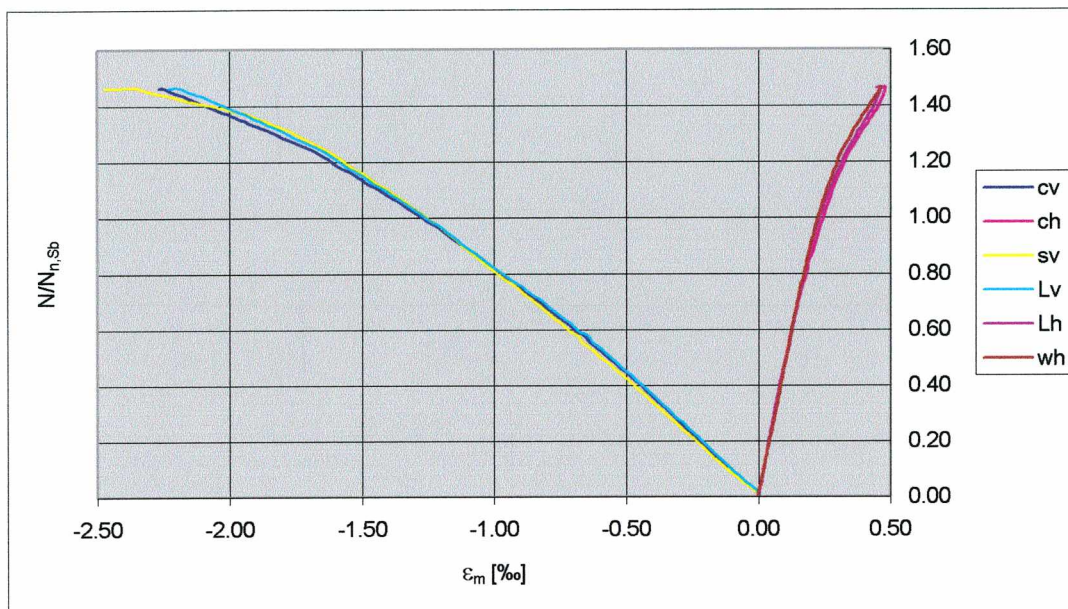
W celu oceny równości odkształceń betonu, prętów zbrojenia podłużnego, taśm i maty z włókien węglowych i odpowiedzi na pytanie czy wzmocnienie zewnętrzne współdziała z betonem i stałą w przenoszeniu naprężeń ściskających, dokonywano pomiarów odkształceń za pomocą tensometrów elektrooporowych, których sposób rozmieszczenia opisano w punkcie 4.4.2 pracy.

Zastosowana metoda rozmieszczania tensometrów elektrooporowych w przekroju środkowym na materiałach stanowiących element kompozytowy pozwoliła na pomiar odkształceń podłużnych i poprzecznych dla kolejnych poziomów obciążenia w próbie sprężystości i w próbie do zniszczenia.

Wykres zależności $N/N_{u,S1} - \varepsilon_m$ dla elementów typu St-1 i St+m-3 przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4.52 i 4.53.

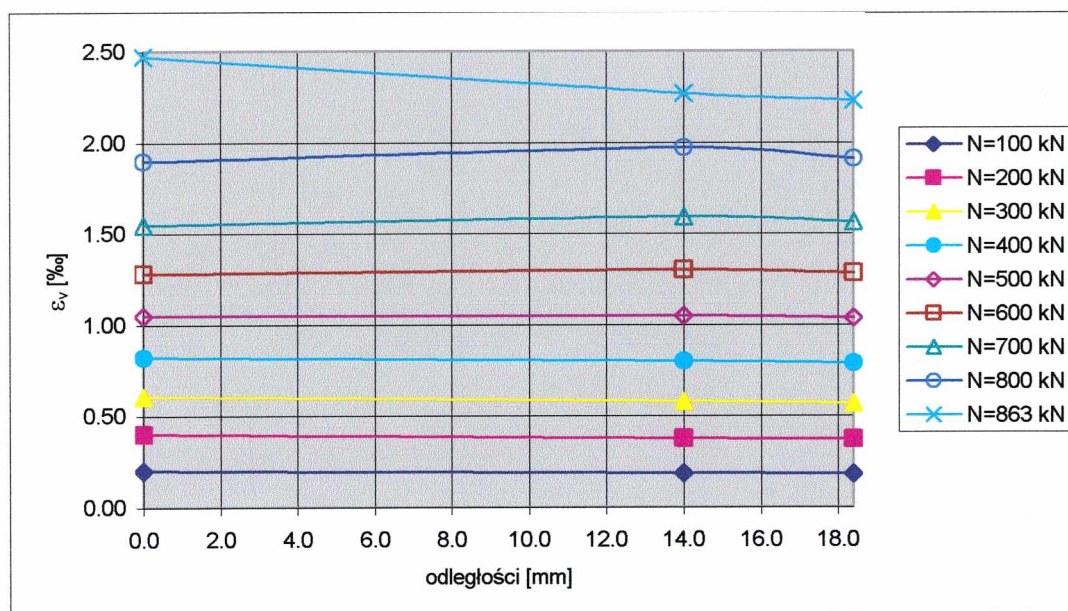


Rys. 4.52. Wykres zależności $N/N_{u,Sb} - \varepsilon_m$ dla słupa St-1
(w legendzie opisano indeksy poszczególnych odkształceń: cv – odkształcenia podłużne betonu, ch – odkształcenia poprzeczne betonu, sv – odkształcenia prętów zbrojenia podłużnego, Lv – odkształcenia podłużne taśm CFRP i Lh – odkształcenia poprzeczne taśm CFRP)



Rys. 4.53. Wykres zależności $N/N_{u,Sb} - \varepsilon_m$ dla słupa St+m-3
(w legendzie opisano indeksy poszczególnych odkształceń: cv, ch, sv, Lv, Lh – jak na rysunku 4.52,
wh – odkształcenia poprzeczne maty CFRP)

Wyniki pomiarów odkształceń podłużnych na stali, betonie i taśmach oraz odkształceń poprzecznych na betonie, taśmach i macie dla kilku poziomów obciążenia elementu St+m-3 pokazano na rysunkach 4.54 i 4.55.



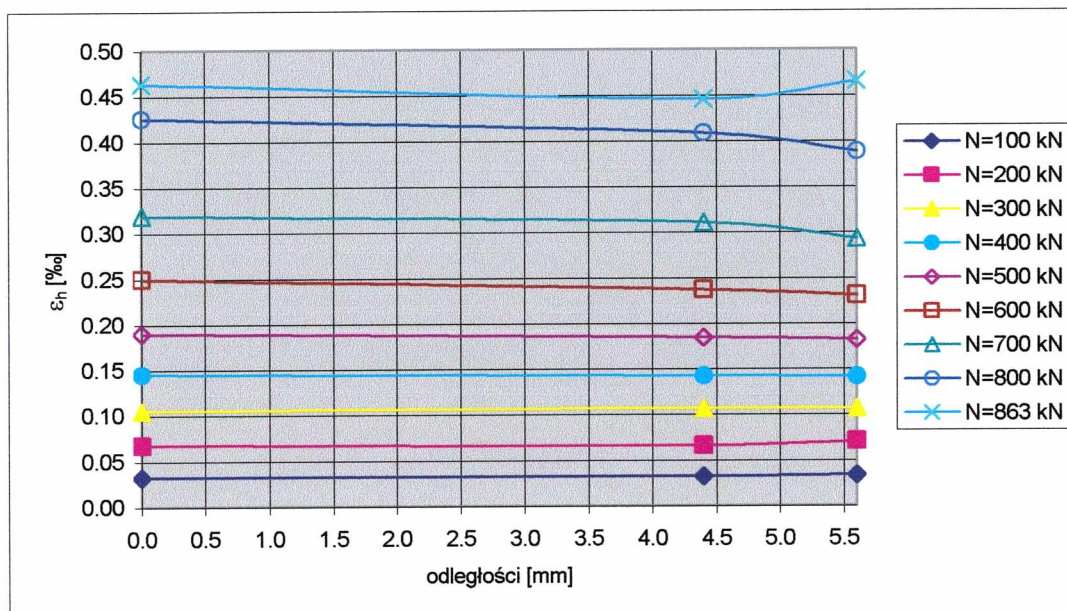
Rys. 4.54. Rozkład odkształceń podłużnych na stali, betonie i taśmie dla elementu St+m-3
(0,0 – stal, 14,0 – beton, 18,4 – taśma)

Na rysunkach 4.52 ÷ 4.55 widać, że pod działaniem siły osiowej, zarówno przekrój betonowy A_c , przekrój zbrojenia A_s , przekrój taśm z włókien węglowych A_L , jak i przekrój maty z włókien węglowych A_w ulegają jednakowemu odkształceniu podłużnemu (4.3) i

poprzecznemu (4.4):

$$\varepsilon_{sv} = \varepsilon_{cv} = \varepsilon_{Lv} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{ch} = \varepsilon_{Lh} = \varepsilon_{wh} \quad (4.4)$$



Rys. 4.55. Rozkład odkształceń poprzecznych na betonie, taśmie i macie dla elementu St+m-3 (0.0 – beton, 4.4 – taśma, 5.6 – mata)

4.4.6. Wnioski z badań doświadczalnych w etapach IIa i IIb

Po przeprowadzeniu badań doświadczalnych w etapach IIa i IIb zdefiniowano następujące wnioski:

- 1) Słupy wzmocnione jedynie podłużnymi odcinkami taśm CFRP niszczyły się poprzez gwałtowne odspojenie się taśmy, któremu towarzyszyło zmiążdżenie betonu i uplastycznienie prętów zbrojenia podłużnego w obszarze odspojenia kompozytu. Zaobserwowane odklejanie się taśmy poza obszarem zmiążdżenia betonu było wtórnym efektem mechanizmu zniszczenia (rys. 4.24 i 4.42).
- 2) Słupy wzmocnione podłużnymi odcinkami taśm i poprzecznymi obejmami z maty CFRP niszczyły się poprzez rozerwanie kilku obejm kompozytowych w narożach elementów, czemu towarzyszyło natychmiastowe odspojenie i zgniecenie taśmy, zmiążdżenie betonu oraz uplastycznienia prętów zbrojenia podłużnego. Poza obszarami zniszczenia sklejenie

kompozytów z betonem pozostawało nienaruszone (rys. 4.26 i 4.44).

- 3) Zwiększanie intensywności wzmocnienia podłużnego ρ_L (wzór 4.1), powoduje przyrost nośności granicznej słupów pod warunkiem, że towarzyszy mu kompozytowe zbrojenie obwodowe. Maksymalny średni przyrost nośności rzędu 49% zaobserwowano dla elementów o $\rho_L=4,2\%$. Elementy bez kompozytowego zbrojenia poprzecznego wykazują mniejszy przyrost nośności w stosunku do analogicznych elementów ze wzmocnieniem poprzecznym. Przyrost nośności tych elementów charakteryzuje się dużym rozrzutem wyników dla jednakowych wartości ρ_L (tablica 4.15 i 4.17).
- 4) Obecność podłużnych odcinków taśm CFRP, których włókna zorientowane są równolegle do osi słupa, powoduje zmniejszenie szybkości przyrostu odkształceń podłużnych ε_v w stosunku do elementów kontrolnych przy jednakowych przyrostach siły podłużnej. Doklejanie dodatkowe poprzecznych opasek z maty nie wpływa na przebieg ścieżki odkształceń (rys. 4.28÷4.30 i 4.45) a jedynie opóźnia moment odspojenia się podłużnego kompozytu od betonu.
- 5) Zastosowanie wzmocnienia w postaci samych podłużnych odcinków taśm CFRP nie jest skuteczne, gdyż prowadzi do zbyt wczesnego odspojenia się taśmy do elementu. Co prawda, taki sposób wzmocniania powoduje przyrost nośności granicznej, ale równocześnie prowadzi do niekorzystnego efektu zmniejszenia wartości granicznych odkształceń podłużnych $\varepsilon_{v,lim}$, które w porównaniu z elementami kontrolnymi (rys. 4.31 i 4.45) osiągają zaledwie wartość $1,6\div 2,0\%$.
- 6) Dla czworokątnych słupów wzmocnianych podłużnymi odcinkami taśm i poprzecznymi obejmami z maty CFRP intensywność wzmocnienia podłużnego ρ_L (wzór 4.1) nie ma wpływu na wartość podłużnych odkształceń granicznych, ma za to wpływ na szybkość ich przyrostu i dochodzenie do wartości granicznych. Dla elementów o $\rho_L=2,8\div 4,2\%$ średnie graniczne odkształcenia podłużne $\varepsilon_{vm,lim}$ wynoszą około $2,3\%$ (rys. 4.32 i 4.45).
- 7) Zastosowanie wzmocniania podłużnego poprzez doklejenie odcinków taśmy CFRP zwiększa sztywność podłużną słupów, co w konsekwencji powoduje przyrost modułu sprężystości betonu E_c . Dla słupów o intensywności wzmocnienia $\rho_L=4,2\%$ moduł

sprężystości betonu E_c jest średnio około 35% większy od analogicznych wartości dla elementów bez wzmocnienia na tym samym poziomie wyężenia betonu, równym około $0,3 f_{cm,cube}$ (rys. 4.48).

- 8) Odształcenia podłużne: betonu, prętów zbrojenia podłużnego i taśmy oraz odształcenia poprzeczne: betonu, taśmy i maty dla danego poziomu obciążenia są stałe. Świadczy to o tym, że podłużne i poprzeczne zbrojenie kompozytowe współdziała z betonem i stalą w przenoszeniu naprężeń ściskających (rys. 4.54 i 4.55).

4.5. Badania doświadczalne – etap III

4.5.1. Cel badań. Program badań

W ramach etapu III badań doświadczalnych dokonano weryfikacji, na elementach w skali naturalnej, dotychczasowych własnych badań dotyczących elementów wzmocnianych taśmami i matami CFRP, poddanych doraźnemu ścisnieniu osiowemu. Jednym z celów przeprowadzonej weryfikacji była ocena wpływu zastosowanej intensywności wzmocnienia podłużnego oraz sposobu skonstruowania wzmocnienia poprzecznego na nośność tego typu elementów. W badaniach zastosowano maksymalną, możliwą intensywność wzmocnienia podłużnego przy założeniu jednowarstwowego zbrojenia zewnętrznego.

Dodatkowo przedmiotem analizy był wpływ mimośrodów siły podłużnej na cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe oraz skuteczność wzmocnienia mimośrodowo ściskanych słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami i matami z włókien węglowych. Założono przeprowadzenie badań z mimośrodkami siły podłużnej w granicach rdzenia przekroju: $h/12$ i $h/6$.

Z uwagi na kosztowny charakter prowadzonych prac w badaniach wykorzystano materiały systemów wzmocnień kompozytami węglowymi przekazane przez firmy Sika Poland oraz S&P Reinforcement.

W celu realizacji zamierzonych celów wykonano i przebadano sześć elementów wzmocnionych materiałami CFRP oraz trzy elementy kontrolne bez wzmocnienia. Do opracowania programu badań przyjęto:

Parametry zmienności:

- mimośród siły: A_1 – ścisnienie osiowe, A_2 – $h/12$, A_3 – $h/6$,
- wzmocnienie poprzeczne: B_1 – obejmę poprzeczne (SikaWrap Hex 230C),
 B_2 – jednokrotne ciągle owinięcie (S&P C Sheet 240),

Parametry stałe:

- moduł sprężystości taśm: C_1 – 210 GPa (Sika CarboDur typu M),
 C_2 – 200 GPa (S&P CFK-Lamellen 200/2000),
- intensywność wzmocnienia: D_1 – 2,53%.

Intensywność wzmocnienia słupów charakteryzuje, podobnie jak poprzednio, stopień wzmocnienia ρ_L wyrażony zależnością (4.1).

Na podstawie tych parametrów zaprojektowano dwa typy elementów wzmocnionych,

które poddano doraźnemu ściskaniu osiowemu i mimośrodowemu zgodnie z zestawieniem zawartym w tablicy 4.18.

Element typu A: intensywność wzmocnienia – 2,53%, taśmy Sika CarboDur M, obejmmy poprzeczne z maty SikaWrap Hex 230C.

Element typu B: intensywność wzmocnienia – 2,53%, taśmy S&P CFK-Lamellen 200/2000, jednokrotne całkowite owinięcie matą S&P C Sheet 240.

Tablica 4.18. Program badań w etapie III

Mimośród	Ściskanie osiowe	Mimośród h/12	Mimośród h/6
Typ elementu	A	A	A
	B	B	B

4.5.2. Wykonanie i przygotowanie elementów badawczych

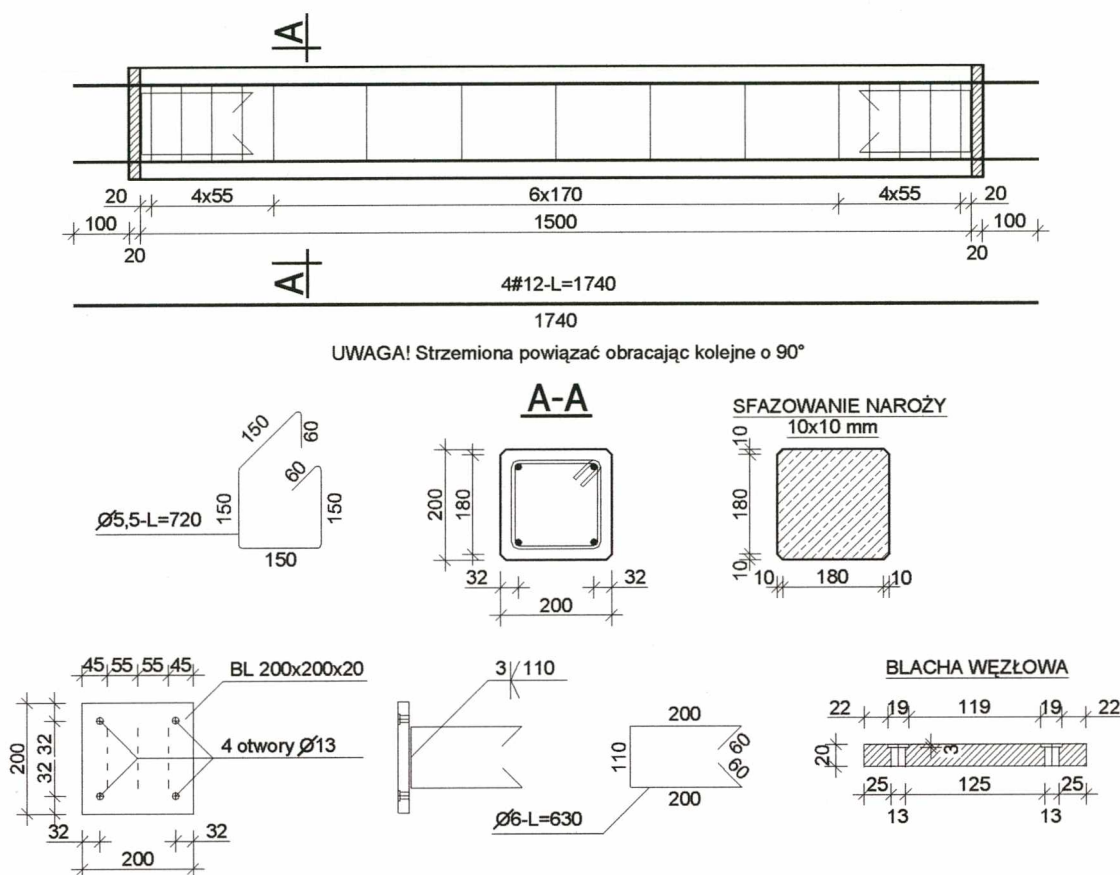
Elementy badawcze

Badania przeprowadzono na modelach słupów o przekroju poprzecznym 200x200 mm i wysokości 1500 mm. Zbrojenie podłużne wykonano w postaci czterech prętów o średnicy $\varnothing 12$ ze stali A-IIIIN, gatunku RB500W, zbrojenie poprzeczne w postaci strzemion o średnicy $\varnothing 5,5$ ze stali A-I, gatunku St0S (rys. 4.56). Zgodnie z zaleceniami [42] dla elementów prefabrykowanych rozstaw strzemion zagęszczono, przy końcach elementu do 1/3 normowego rozstawu na odcinku równym, długości szerszego boku przekroju poprzecznego słupa. Jako zakotwienie strzemion zastosowano haki półokrągłe. Strzemiona powiązano do prętów podłużnych obracając kolejne strzemie o 90° w stosunku do poprzedniego (rys. 4.56).

Elementy badawcze zaopatrzono w stalowe płyty czołowe w celu zapewnienia równoległości płaszczyzn docisku. Przez blachy czołowe przeprowadzono, przyspawane do nich pręty zbrojenia podłużnego, które obcinano przed badaniem. Taki sposób skonstruowania końców słupów miał na celu zapewnienie równomiernego obciążania przekrojów poprzecznych betonu i stali oraz zapobieżenie „wciskaniu” prętów zbrojenia podłużnego w beton (rys. 4.57).

Dzięki zastosowaniu zewnętrznego wzmocnienia poprzecznego w postaci owinięcia matą kompozytową, uzyskuje się wzrost nośności słupów w stosunku do zwykłych słupów żelbetowych, co opisano w rozdziale drugim pracy. Wzrost ten spowodowany jest zastosowaniem wzmocnienia uzwajającego, które powoduje powstanie trójosiowego stanu naprężenia w uzwojonym rdzeniu betonowym. Wzrostu nośności przekrojów czworokątnych, szczególnie z ostrymi krawędziami, owiniętych nawet kilkakrotnie jest niewielki. Dopiero dla

przekrojów kwadratowych z wyokrąglonymi narożami, kiedy zbliżamy się do przekroju kołowego, efekty są największe. W związku z tym w elementach badawczych zastosowano sfazowanie (10x10 mm) krawędzi przekrojów poprzecznych (rys. 4.56). Sfazowanie krawędzi odpowiada najczęściej stosowanej metodzie w praktyce inżynierskiej.



Rys. 4.56. Sposób skonstruowania elementów badawczych w etapie III



Rys. 4.57. Gotowe elementy badawcze w etapie III

Skład mieszanki betonowej do wykonania elementów badawczych

Elementy wykonano na zamówienie w Betoniarni „BETARD” w Długołęce koło Wrocławiu. Mieszanka betonowa pochodziła z węzła betoniarskiego firmy. Zamówiony został beton klasy B30 o konsystencji plastycznej na granicy półciekłej.

Do wykonania betonu wykorzystano cement portlandzki PN-EN 197-1 CEM I 42,5R z Cementowni Góraždze i naturalne kruszywo płukane o frakcjach: piaskowej – $0 \div 2$ mm, żwirowej – $2 \div 8$ mm oraz $2 \div 16$ mm.

Dobór składników na 1 m^3 mieszanki betonowej w oparciu o recepturę roboczą przekazaną przez Laboratorium Zakładowe Betoniarni „BETARD”, dla projektowanego betonu B30 i założonej konsystencji podano w tablicy 4.19.

Tablica 4.19. Skład mieszanki betonowej [kg/m^3]

Cement portlandzki	360
Popiół lotny – 20% m.c.	72
Piasek $0 \div 2$ mm	524
Żwir $2 \div 8$ mm	989
Żwir $2 \div 16$ mm	495
FM6 – 0,5% m.c.	1,9 l
Woda	87 l – do projektowanej konsystencji

Mieszanke betonową przygotowywano w węźle betoniarskim Betoniarni „BETARD”. Składniki mieszanki odmierzano wagowo. Betonowanie elementów badawczych i próbek do określenia cech odkształcalnościowych i wytrzymałościowych betonu odbyło się z jednego zarobu mieszanki betonowej.

Konsystencję mieszanki betonowej określano trzykrotnie podczas betonowania za pomocą stożka opadowego [N10]. Opad stożka dla całej partii wahał się w granicach 5,0 cm, co odpowiada według normy [N6] konsystencji K3 natomiast według normy [N11] konsystencji S2.

Wykonanie elementów badawczych

Podobnie jak w etapie IIb na prętach podłużnych szkieletów zbrojeniowych przyklejono i zabezpieczono (w połowie ich długości) po jednym tensometrze do pomiaru odkształceń podłużnych stali.

Elementy wykonywano jednocześnie w formie na stole wibracyjnym w warunkach poligonowych. Przegródki i zewnętrzne burty podłużne wykonano ze sklejki budowlanej natomiast jako burty czołowe wykorzystano blachy węzłowe przyspawane do prętów zbrojeniowych. Betonowanie elementów odbywało się w pozycji poziomej z jednego zarobu

mieszanki. Beton w formie zagęszczano za pomocą wibratorów wglębnych. Po wykonaniu elementów przechowywano je pod przykryciem foliowym, w miarę stałych warunkach termiczno-wilgotnościowych. Po miesiącu rozformowano elementy i przetransportowano do Laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej

Wzmocnienie elementów badawczych

Do wykonania wzmocnień elementów typu A wykorzystano, podobnie jak w poprzednich dwóch etapach badań, materiały systemu Sika CarboDur [46] tj. taśmy Sika CarboDur typu M1214 i M614, klej do taśm Sikadur 30, matę SikaWrap Hex 230C oraz impregnat epoksydowy do mat Sikadur 330. Elementy typu B wzmocniono z wykorzystaniem zestawu wyrobów firmy S&P Reinforcement [54] tj. taśmy S&P CFK-Lamellen 200/2000 o wymiarach 100/1.4 i 80/1.4, klej do taśm Resin 220, matę S&P C Sheet 240 (200 g/m²) oraz klej do mat Resin 55.

Proces przygotowania i wzmocnienia elementów odbywał się identycznie jak w etapie IIb, co opisano w punkcie 4.4.2 pracy.

4.5.3. Cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe materiałów

a) Beton

Dla całej partii mieszanki betonowej wykonano z tego samego zarobu sześć próbek sześciennych 150x150x150 mm, sześć próbek walcowych Ø160x160 mm oraz sześć słupków walcowych Ø113x350 mm. Próbkę wibrowano razem z elementami badawczymi za pomocą wibratora wglębnego. Próbkę przechowywano razem ze słupami w tych samych warunkach termiczno-wilgotnościowych.

W przeddzień badania słupów określono:

- średnią wytrzymałość betonu na ściskanie f_{cm} (zgniatanie sześciu próbek sześciennych o krawędzi 150 mm),
- średnią wytrzymałość betonu na rozciąganie f_{ctm}^{spl} metodą brazylijską (rozłupywanie sześciu walców o średnicy i wysokości 160 mm),
- średni moduł odkształcenia betonu E_{cm} określony jako wartość stosunku przyrostu naprężeń do przyrostu odkształceń w przedziale naprężeń 0,1 ÷ 0,3 wytrzymałości słupowej na ściskanie $f_{c,cyl}$ [25],
- średnią wytrzymałość słupową betonu na ściskanie $f_{cm,cyl}$ (zgniatanie przy siódmym cyklu

obciążenia próbek stosowanych do wyznaczania modułu sprężystości betonu)

Każdy z trzech wymiarów próbki mierzono czterokrotnie i przyjmowano wartość średnią. Badania próbek przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej WALTER+BAI o zakresie $0 \div 3000$ kN (rys. 4.58 i 4.59). Wyniki badania wytrzymałości kostkowej betonu na ściskanie przedstawiono w tablicy 4.20 (rys. 4.59-a).



Rys. 4.58. Maszyna wytrzymałościowa WALTER+BAI



a) kostka 150x150x150 mm



b) wałek Ø160x160



c) wałek Ø113x350

Rys. 4.59. Badanie cech odkształcalnościowych i wytrzymałościowych betonu

Tablica 4.20. Wyniki badania wytrzymałości kostkowej betonu na ściskanie elementów w etapie III

Lp.	Nr próbki	Bok [mm]		Pole przekroju [cm ²]	Wysokość średnia H [mm]	Masa [kg]	Siła niszcząca [kN]	f_{ci} [MPa]	f_{cm} [MPa]
		Średnia A	Średnia B						
1	021	149,53	150,12	224,47	150,87	7,90	1430,0	63,71	61,23
2	016	151,08	150,71	227,69	150,28	7,80	1390,0	61,05	
3	019	151,92	154,30	234,40	150,24	8,05	1630,0	69,54	
4	018	147,30	147,54	217,32	147,15	7,70	1320,0	60,74	
5	017	151,91	150,85	229,16	150,44	7,90	1340,0	58,48	
6	020	152,92	150,43	230,04	150,81	7,95	1240,0	53,90	

Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie została ustalona z odchyleniem standardowym $s=5,252$ MPa [36]. Odpowiada to klasie betonu w chwili badania około B50

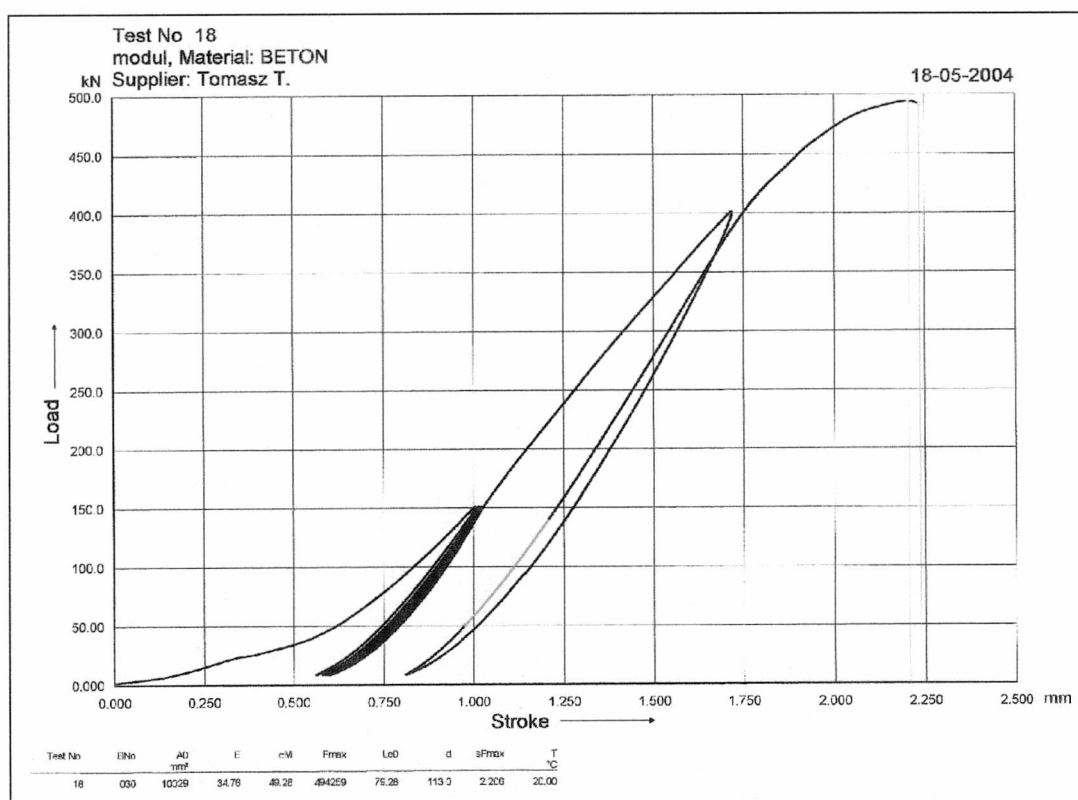
według [N8] lub C40/50 według [N11].

W tablicy 4.21 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości betonu na rozciąganie przez rozłupywanie tzw. metodą brazylijską (rys. 4.59-b).

Tablica 4.21. Wyniki badania wytrzymałości betonu na rozciąganie w etapie III

Lp.	Nr próbki	Średnica [mm]		Pole przekroju	Wysokość średnia H	Masa	Siła niszcząca	f_{cti}	f_{ctm}
		Średnia A	Średnia B	[cm ²]	[mm]	[kg]	[kN]	[MPa]	[MPa]
1	022	159,61	159,20	159,40	160,72	7,35	146,7	3,65	3,36
2	023	160,18	160,32	160,25	163,00	7,45	159,9	3,90	
3	026	159,45	160,29	159,87	162,15	7,45	153,0	3,76	
4	027	160,30	160,40	160,35	161,22	7,50	124,8	3,07	
5	024	160,08	160,36	160,22	161,65	7,50	97,91	2,41	
6	025	159,54	160,10	159,82	161,62	7,45	137,7	3,40	

Średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie została ustalona z odchyleniem standardowym $s=0,552$ MPa [36].



Rys. 4.60. Wykres zależności N - ΔL (skrót) dla próbki Ø113x350 mm

Średni moduł odkształcenia betonu E_{cm} określono na podstawie zależności pomiędzy podłużnymi naprężeniami w betonie σ_{cv} i średnimi odkształceniami podłużnymi betonu ϵ_{cvm} dla siódmego cyklu obciążenia. Słupki walcowe o średnicy 113 mm i wysokości 350 mm poddano próbie sprężystości składającej się z pięciu cykli obciążeń wstępnych do poziomu

0,3 $f_{c,cyl}$ i jednego cyklu do poziomu 0,8 $f_{c,cyl}$. Następnie wykonano siódmy cykl do zniszczenia, przy którym wyznaczono moduł sprężystości betonu w przedziale naprężeń (0,1 ÷ 0,3) $f_{c,cyl}$. Do pomiaru odkształceń zastosowano ekstensometr elektroniczny firmy Hottinger o bazie pomiarowej 50 mm (rys. 4.59-c). Na rysunku 4.60 przedstawiono przykładową zależność $N - \Delta L$ uzyskaną za pomocą oprogramowania maszyny wytrzymałościowej.

W tablicy 4.22 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości słupowej na ściskanie oraz modułu sprężystości betonu (rys. 4.59-c).

Tablica 4.22. Wyniki badania wytrzymałości słupowej na ściskanie i modułu sprężystości betonu

Lp.	Nr próbki	Średnica [mm]		Pole przekroju	Wysokość średnia H	Masa	Siła niszcząca	$f_{c,cyl}$	E_{cm}
		Średnia A	Średnia B	[cm ²]	[mm]	[kg]	[kN]	[MPa]	[GPa]
1	033	113,01	113,07	113,04	346,41	8,15	503,5	50,17	—
2	029	112,77	113,08	112,92	350,35	8,10	431,1	43,04	—
3	032	113,06	113,23	113,14	350,28	8,10	444,5	44,21	34,29
4	030	113,24	113,45	113,34	350,75	8,25	494,3	48,99	34,76
5	031	113,05	113,32	113,18	350,94	8,20	557,1	55,37	32,70
6	028	113,17	113,03	113,10	350,74	8,10	499,0	49,67	35,06
Średnia								48,58	34,20

Średnia wytrzymałość słupowa betonu na ściskanie została ustalona z odchyleniem standardowym $s=4,467$ MPa, natomiast średni moduł sprężystości betonu został ustalony z odchyleniem standardowym $s=1,051$ GPa [36].

Stosunek średniej wytrzymałości słupowej betonu na ściskanie $f_{cm,cyl}$ określonej na walcach $\varnothing 113 \times 350$ mm i średniej wytrzymałości kostkowej betonu na ściskanie $f_{cm,cube}$ określonej na próbkach sześciennych o krawędzi 150 mm wynosi około 0,793. Wartość stosunku $f_{cm,cyl}/f_{cm,cube}$ np. według [N2] powinien być przyjmowany 0,77 dla $f_{cm,cube} \leq 15$ N/mm² i 0,82 dla $f_{cm,cube} > 15$ N/mm².

b) Stal zbrojeniowa

Zbrojenie podłużne słupów zostało wykonane ze stali żebrowanej klasy A-IIIN, gatunku RB500W [N8] o średnicy 12 mm. Dla wybranych losowo próbek stali określono:

- średnicę nominalną,
- granicę plastyczności,
- wytrzymałość na rozciąganie,
- wydłużenie próbki po rozerwaniu,
- moduł sprężystości stali.

Podobnie jak w etapie IIa badań doświadczalnych, statyczną próbę rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej UFP 400 produkcji NRD (VEB Lipsk) o zakresie $0 \div 400$ kN (rys. 4.14). Do badania zastosowano tzw. próbki długie według [N7] o długości bazy pomiarowej $L_0=10d_0$, czyli 120 mm. Granicę plastyczności określano na sześciu próbkach rejestrując siłę rozciągającą i wydłużenie na bazie pomiarowej (rys. 4.61). Do wyznaczenia modułu sprężystości przygotowano dwie próbki z naklejonymi tensometrami elektrooporowymi RL=120/20. Tensometry naklejono w połowie długości bazy pomiarowej. Próbkę stali do badań zostały przekazane przez wykonawcę elementów badawczych. Pomiaru wydłużenia próbek, odkształceń i siły rozciągającej dokonywano, co 0,2 sekundy. Do rejestracji wyników użyto komputera PC IBM 486 DX oraz wzmacniacz Spider-8 firmy Hottinger Baldwin Masstechnik i oprogramowania Catman 2.0.



Rys. 4.61. Określenie granicy plastyczności prętów $\varnothing 12$ mm (RB500W)

Moduł sprężystości stali został wyznaczony, zgodnie z zaleceniami normy [N7], w przedziale naprężeń $(0,1 \div 0,9)f_y$.

Wyniki badań cech wytrzymałościowych i odkształcalnościowych prętów $\varnothing 12$ mm przedstawiono w tablicy 4.23.

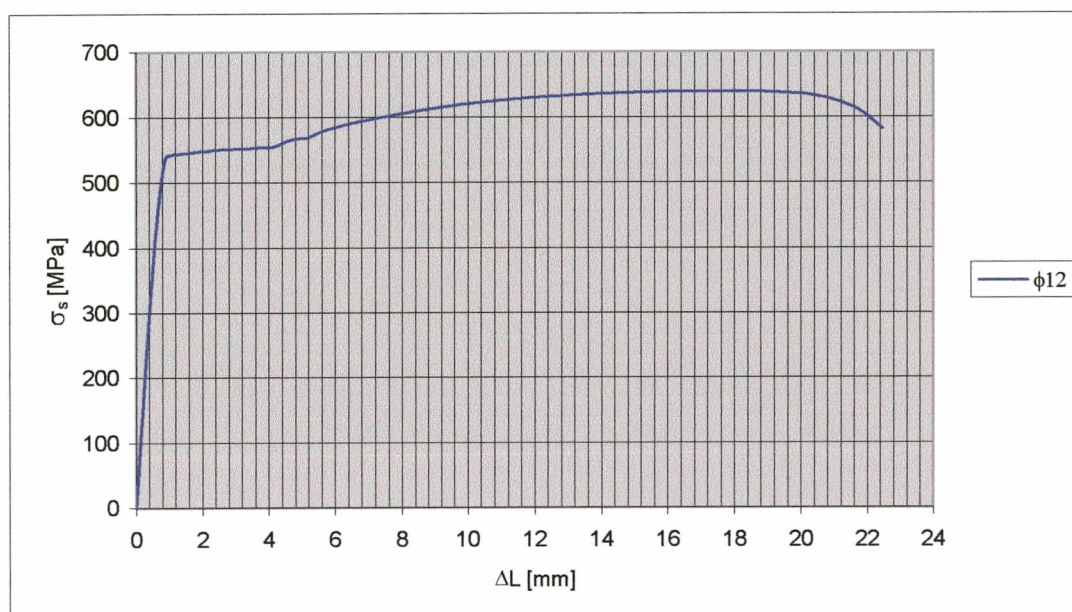
Tablica 4.23. Wyniki badania cech wytrzymałościowych i odkształcalnościowych prętów $\varnothing 12$ mm

Lp.	Nr próbki	d_0 [mm]	d_n [mm]	S_0 [mm ²]	L_0 [mm]	ΔL [mm]	A_{10}^* [%]	f_y [MPa]	f_t [MPa]	E_s [MPa]
1	1/I	12	12,09	114,72	120	17,00	14,17	546,8	642,0	—
2	2/I		12,01	113,19		17,91	14,93	541,4	638,9	—
3	3/I		12,03	113,64		17,00	14,17	548,8	640,9	—
4	4/I		12,16	116,22		17,18	14,32	552,3	652,1	—
5	5/II		12,19	116,71		—	—	556,0	640,5	201 620
6	6/II		12,19	116,77		—	—	559,4	651,4	203 150
Średnie:		12,11	115,21	120	17,27	14,39	550,8	644,3	202 385	

$$* A_{10} = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\%$$

Oznaczenia w tablicy 4.23 przyjęto identycznie jak w tablicy 4.6 w punkcie 4.3.3.

Na rysunku 4.62 przedstawiono przykładową zależność $\sigma_s - \Delta L$ (próbka 2/I) dla stali zbrojeniowej $\varnothing 12$ mm gatunku RB500W zastosowanej w elementach badawczych.



Rys. 4.62. Wykres zależności $\sigma_s - \Delta L$ dla stali zbrojeniowej gatunku RB500W (próbka 2/I)

c) Materiały CFRP

Do wykonania wzmocnień elementów badawczych użyto w tym etapie badań, materiałów kompozytowych systemu Sika CarboDur – taśmy Sika CarboDur M i maty SikaWrap Hex 230C oraz zestawu wyrobów kompozytowych firmy S&P Reinforcement – taśmy S&P CFK-Lamellen 200/2000 i maty S&P C Sheet 240 (200 g/m^2).

Procedury badawcze cech odkształcalnościowych i wytrzymałościowych materiałów kompozytowych, a także wyniki badań własnych taśm i mat systemu Sika CarboDur przedstawiono w punkcie 4.3.3 pracy.

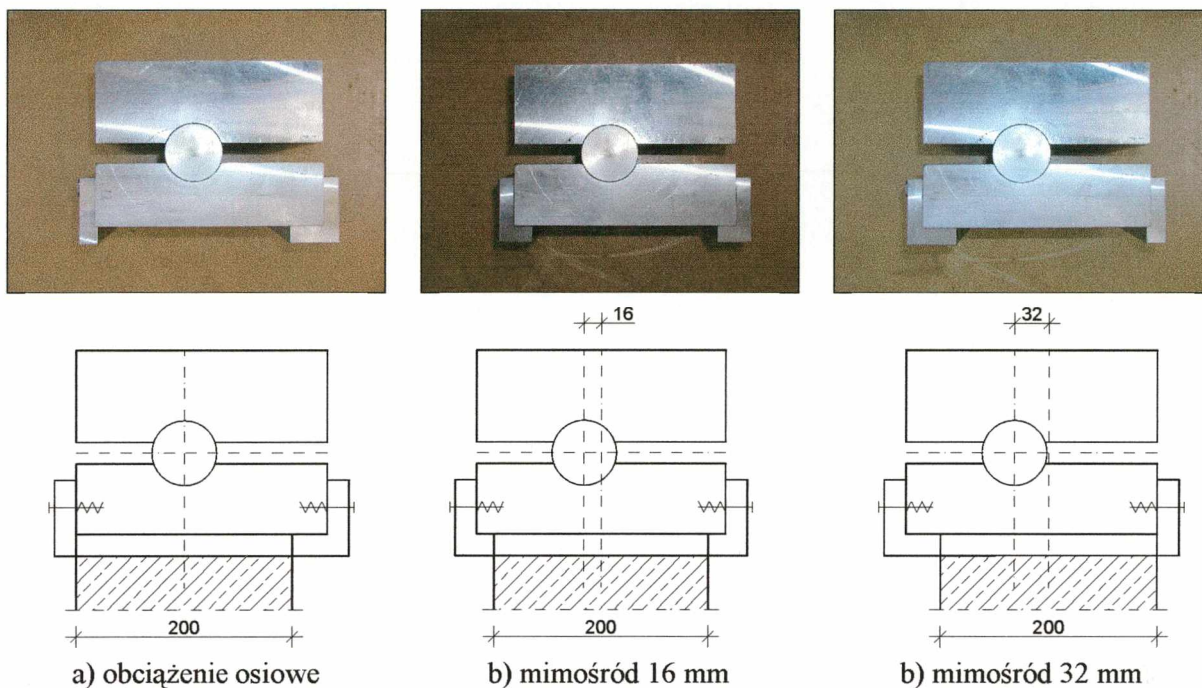
4.5.4. Metodyka badań

Stanowisko badawcze

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono w Laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej na maszynie wytrzymałościowej DRMB 600 produkcji NRD (VEB Lipsk) o zakresie $0 \div 6000 \text{ kN}$ (rys. 4.64 i 4.65).

Specjalnie na potrzeby tego etapu badań zaprojektowano i wykonano łożysko wałkowe do obciążeń mimośrodowych. Dzięki przestawnym ogranicznikom bocznym możliwe było

ustawienie obciążenia w osi elementu (rys. 4.63-a), na mimośrodku $h/12=16$ mm (rys. 4.63-b) oraz na granicy rdzenia przekroju $h/6=32$ mm (rys. 4.63-c).



Rys. 4.63. Łożysko do obciążeń mimośrodowych

Strefy przypodporowe słupów zabezpieczono skręcanymi stalowymi kołnierzami o wysokości 200 mm służącymi do wzmocnienia stref przypodporowych. Konieczność stosowania tych obejm opisano już w punkcie 4.3.4 pracy.

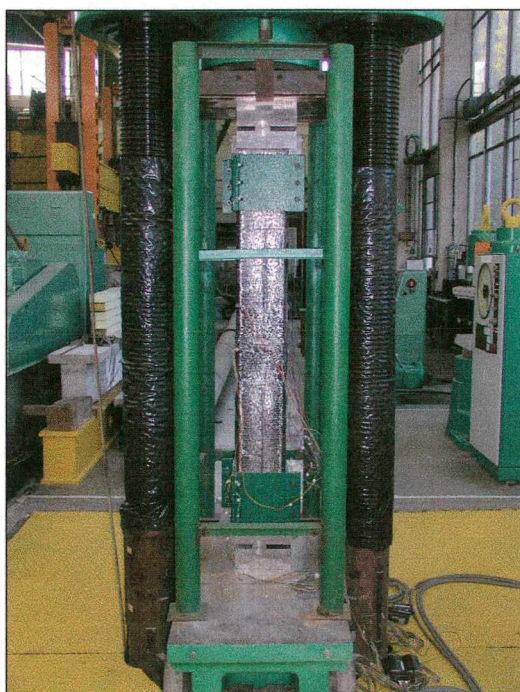


a) SwzA_0



b) SwzA_32

Rys. 4.64. Elementy typu A na stanowisku badawczym



a) SwzB_0



b) SwzB_16

Rys. 4.65. Elementy typu B na stanowisku badawczym

Aparatura pomiarowa

Dla każdego poziomu obciążenia rejestrowano następujące wielkości:

- odkształcenia podłużne i poprzeczne betonu,
- odkształcenia podłużne i poprzeczne taśm z włókien węglowych,
- odkształcenia maty z włókien węglowych,
- odkształcenia prętów zbrojenia podłużnego.

Odkształcenia podłużne i poprzeczne betonu mierzono za pomocą, rozmieszczonych w połowie wysokości słupa na wszystkich jego czterech ściankach, krzyżowych rozet tensometrycznych z tensometrów elektrooporowych typu RL=300/50.

Odkształcenia podłużne i poprzeczne taśmy z włókien węglowych mierzono na powierzchni taśmy za pomocą krzyżowych rozet tensometrycznych. Do pomiaru odkształceń podłużnych użyto tensometrów elektrooporowych typu RL=300/50. Rozmieszczono je na tych samych poziomach, co rozety na betonie na wszystkich ściankach słupa.

Odkształcenia maty z włókien węglowych mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych typu RL=300/50. W przekroju środkowym elementów naklejono po jednym tensometrze na każdym jego boku.

Odkształcenia zbrojenia podłużnego mierzono za pomocą tensometrów elektrooporowych typu RL=120/20. Tensometry naklejono i zabezpieczono, na każdym z prętów w środku jego wysokości, przed zabetonowaniem elementów badawczych.

Do rejestracji wyników pomiarów używano komputera PC IBM 486 DX oraz wielokanałowego systemu pomiarowego UPM 100 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik.

Procedury badawcze

Dla elementów bez wzmocnienia typu Sbw_0, Sbw_16 i Sbw_32 oraz słupów wzmocnionych typu SwzA_0 i SwzB_0, które poddano doraźnemu obciążeniu osiowemu zrealizowano próbę sprężystości i próbę do zniszczenia zgodnie ze schematami przykładania obciążenia podanymi w tablicach 4.13 i 4.14 w punkcie 4.3.4 pracy. Ze względu na możliwość uszkodzenia tensometrów naklejonych wielowarstwowo w elementach poddanych cyklicznemu ściskaniu mimośrodowemu, dla słupów typu SwzA_16, SwzA_32, SwzB_16, SwzB_32 zrealizowano tylko próbę do zniszczenia.

4.5.5. Wyniki badań doświadczalnych w etapie III

W ramach etapu III badań doświadczalnych wykonano i poddano doraźnym próbom wytrzymałościowym sześć słupów wzmocnianych materiałami CFRP i trzy elementy kontrolne bez wzmocnienia. Słupy różniły się sposobem skonstruowania wzmocnienia zewnętrznego oraz sposobem obciążenia (mimośrodowo siłą podłużną). Szczegółowe informacje o wykonaniu słupów podano w punktach 4.5.1 i 4.5.2 pracy.

Podczas obciążania każdego słupa skokowo zmieniającą się siłą mierzono:

- odkształcenia podłużne ε_{cv} i poprzeczne betonu ε_{ch} ,
- odkształcenia podłużne ε_{Lv} i poprzeczne ε_{Lh} taśm z włókien węglowych,
- odkształcenia maty z włókien węglowych ε_{wh} ,
- odkształcenia prętów zbrojenia podłużnego ε_{sv} .

a) Nośność graniczna słupów

Celem badań niszczących było określenie:

- nośności granicznej badanych słupów N_u , co odpowiada sile niszczącej zarejestrowanej podczas ich ściskania,
- maksymalnych, rejestrowanych odkształceń podłużnych betonu $\varepsilon_{cv2,lim}$ i taśmy $\varepsilon_{cL2,lim}$ po stronie bardziej ściskanej (indeks „2”) przekroju poprzecznego,
- mechanizmu (obrazu) zniszczenia słupów.

Zestawienie wymienionych wielkości przedstawiono w tablicy 4.24. Opis kąta ω

przyjęto identycznie jak w tablicy 4.15.

Tablica 4.24. Wyniki badania nośności granicznej słupów w etapie III

Lp.	Oznaczenie słupa	N_u [kN]	$\epsilon_{cv2,lim}$ [‰]	$\epsilon_{Lv2,lim}$ [‰]	Mechanizm (obraz) zniszczenia
1	Sbw_0	2241	2,15	—	Ścięcie betonu ($\omega=65^\circ$) w dolnej połowie słupa (rys. 4.66-a).
2	Sbw_16	1720	2,99	—	Zgniecenie betonu w środkowej części (rys. 4.66-b).
3	Sbw_32	1400	2,50	—	Zgniecenie betonu w środkowej części (rys. 4.66-c).
4	SwzA_0	2852	2,19	2,15	Rozerwanie obejm na krawędziach i zmiżdżenie betonu w dolnej części elementu; zgniecenia, odspojenia i pęknięcia taśm wzdłuż włókien (rys. 4.67-a).
5	SwzA_16	2234	—*	2,15	Rozerwanie obejm na krawędziach i zmiżdżenie betonu w górnej części elementu po stronie bardziej ściskanej; zgniecenia, odspojenia i pęknięcia taśm wzdłuż włókien (rys. 4.67-b).
6	SwzA_32	1999	2,33	2,51	Rozerwanie obejm na krawędziach i zmiżdżenie betonu w górnej części elementu po stronie bardziej ściskanej; zgniecenia, odspojenia i pęknięcia taśm wzdłuż włókien (rys. 4.67-c).
7	SwzB_0	2801	2,40	2,40	Rozerwanie płaszcza z maty na krawędziach słupa i zmiżdżenie betonu w dolnej części elementu; zgniecenia i odspojenie z otuliną taśmy w obszarze zniszczenia (rys. 4.68-a).
8	SwzB_16	2483	4,35	—*	Rozerwanie płaszcza z maty na krawędziach słupa i zmiżdżenie betonu w dolnej części elementu po stronie bardziej ściskanej; zgniecenia i odspojenie z otuliną taśmy w obszarze zniszczenia (rys. 4.68-b); po stronie mniej ściskanej pojawiły się pęknięcia pojedynczych włókienek węglowych maty.
9	SwzB_32	2097	2,81	2,85	Rozerwanie płaszcza z maty na krawędziach słupa i zmiżdżenie betonu w dolnej części elementu po stronie bardziej ściskanej; zgniecenia i odspojenie z otuliną taśmy w obszarze zniszczenia (rys. 4.68-c).

* - na pewnym etapie obciążania elementów następowało uszkodzenie tensometrów, stąd braki danych



a) Sbw_0



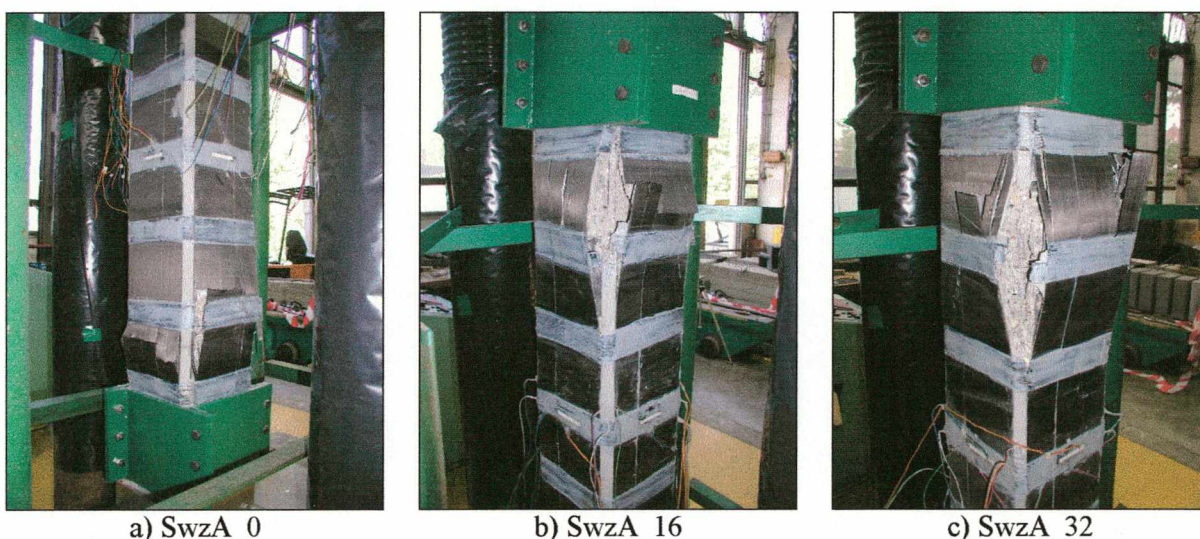
b) Sbw_16



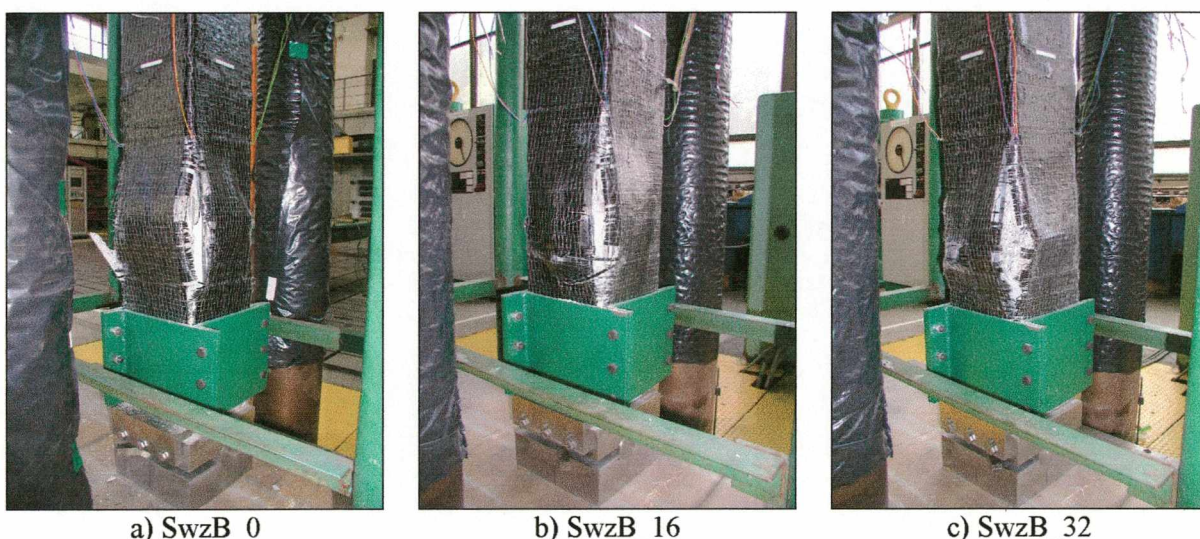
c) Sbw_32

Rys. 4.66. Obraz zniszczenia elementów kontrolnych w etapie III

Wszystkie elementy badawcze niszczyły się w ten sam sposób, przez rozerwanie włókien maty wzmocnienia poprzecznego na krawędziach słupów. Zerwanie obejm i płaszcza z CFRP poprzedzone było zawsze odgłosami pękania włókien węglowych. W obszarach zniszczenia słupów beton uległ zmiążdżeniu i rozdrobnieniu, a taśmy z włókiem węglowych zostały zgniecione (rys. 4.67 i 4.68). Podczas inwentaryzacji elementów po zniszczeniu stwierdzono odspojone odcinki taśmy z pełną otuliną betonową. Świadczy to o prawidłowym przygotowaniu podłoża betonowego i wykonaniu wzmocnienia.



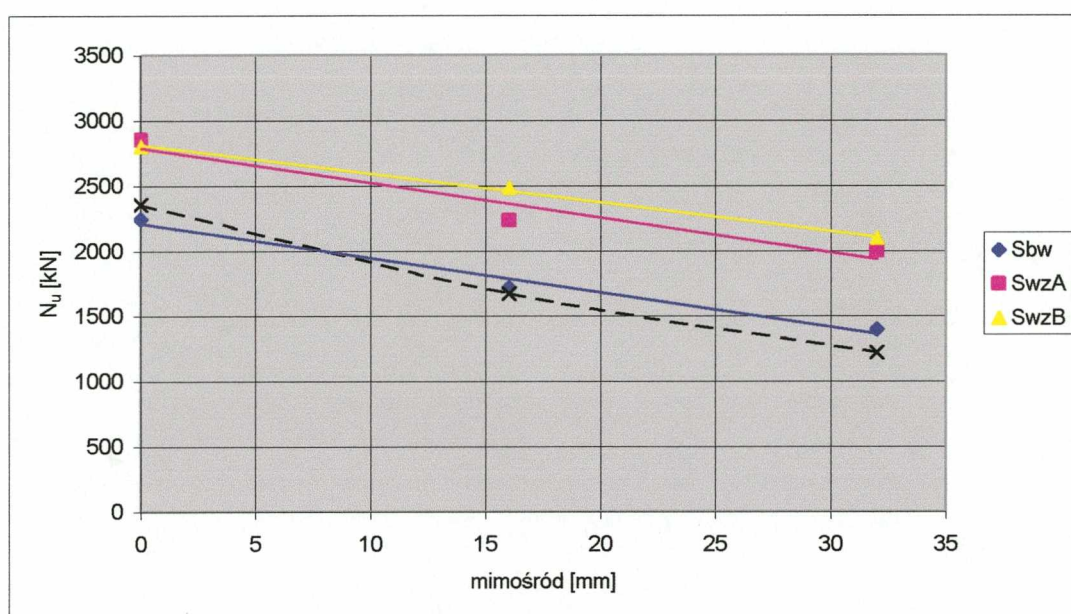
Rys. 4.67. Obraz zniszczenia elementów typu A w etapie III



Rys. 4.68. Obraz zniszczenia elementów typu B w etapie III

Zmianę nośności N_u słupów wzmocnianych materiałami CFRP w zależności od mimośrodowej siły podłużnej pokazano na rysunku 4.69. Z rysunku 4.69 wynika, że zastosowanie wzmocnienia przez doklejenie podłużnych odcinków taśmy z włókien węglowych o intensywności $\rho_L=2,53\%$ (wzór 4.1) i poprzecznych obejm z maty z włókien

węglowych w elementach typu A, powoduje równomierny przyrost nośności granicznej N_u , niezależnie od wielkości mimośrodów siły podłużnej, w stosunku do elementów kontrolnych. Zastosowanie ciągłego wzmocnienia poprzecznego w postaci płaszcza CFRP w elementach typu B powoduje kilku procentowy przyrost nośności dla słupów ściskanych mimośrodowo w stosunku do elementów typu A. Wzrost ten jest jednak o wiele mniejszy niż wynikający z obecności samego podłużnego zbrojenia kompozytowego. Linia przerywaną zaznaczono teoretyczną nośność przekroju poprzecznego ściskanego słupa żelbetowego wyznaczoną dla doświadczalnych parametrów wytrzymałościowych materiałów. Nośność teoretyczna prawie pokrywa się z nośnością uzyskaną w czasie badań dla elementów typu Sbw.



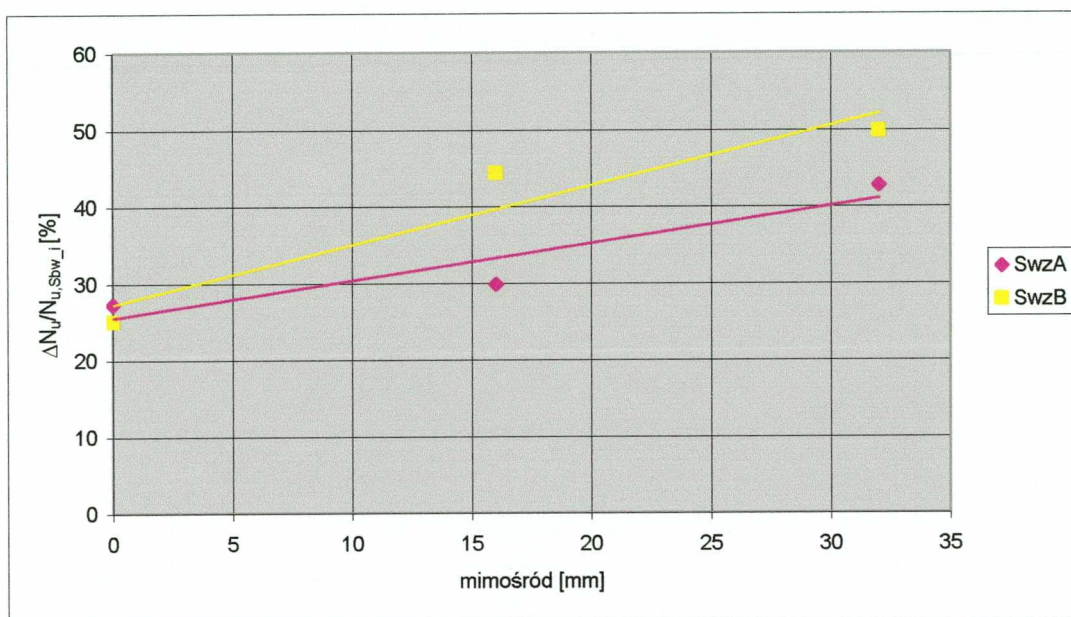
Rys. 4.69. Nośność słupów wzmacnianych materiałami CFRP w zależności od mimośrodu

Na rysunku 4.70 przedstawiono względny $(\Delta N_u / N_{u,Sbw_i})$ przyrost nośności słupów wzmacnianych taśmami i matami CFRP $\Delta N_u = N_{u,Swz_i} - N_{u,Sbw_i}$ w stosunku do nośności odpowiednich słupów kontrolnych N_{u,Sbw_i} , w zależności od wartości mimośrodu siły podłużnej (indeks „i” odpowiada kolejnym mimośrodom). Z rysunku 4.70 wynika, że wraz ze wzrostem mimośrodu siły podłużnej zwiększa się przyrost nośności granicznej N_{u,Swz_i} w stosunku do nośności N_{u,Sbw_i} analogicznych elementów bez wzmocnienia. W tabelicy 4.25 zestawiono zaobserwowane względne przyrosty nośności granicznej ΔN_u .

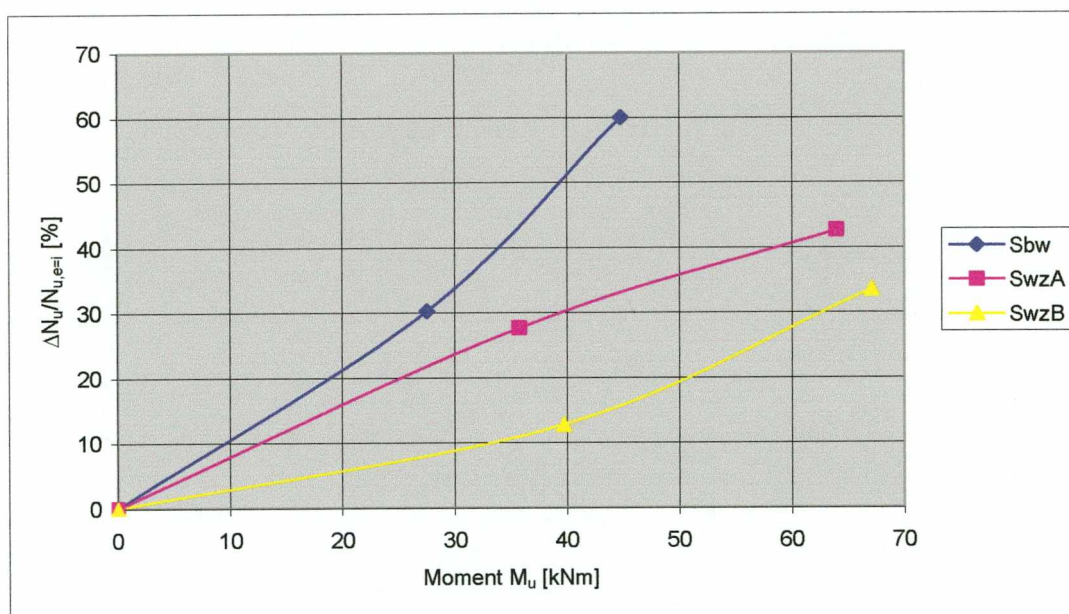
Tablica 4.25. Względne przyrosty nośności [%]

Mimośród [mm]	SwzA	SwzB
0	27,3	25,0
16	29,9	44,4
32	42,8	49,8

Potwierdzono, że dla elementów o czworokątnym przekroju poprzecznym bez znaczącego wyokrąglonych naroży (według [52] minimalny promień wyoblania powinien wynosić 25 mm), poddanych ścisłaniu osiowemu sposób skonstruowania poprzecznego wzmocnienia zewnętrznego nie ma wpływu na wzrost nośności granicznej.



Rys. 4.70. Względny przyrost nośności słupów wzmocnionych materiałami CFRP w stosunku do nośności słupów kontrolnych w zależności od mimośródowości



Rys. 4.71. Względny spadek nośności słupów wzmocnionych materiałami CFRP w stosunku do nośności słupów obciążonych mimośródowo w zależności od momentu zginającego

Na rysunku 4.71 przedstawiono względny ($\Delta N_u/N_{u,e=1}$) spadek nośności słupów żelbetowych i wzmocnionych materiałami CFRP $\Delta N_u = N_{u,e=0} - N_{u,e=1}$ w stosunku do nośności

odpowiednich słupów obciążonych mimośrodowo $N_{u,e=i}$, w zależności od wartości momentu zginającego (indeks „i” odpowiada mimośrodom 16 i 32 mm), natomiast w tablicy 4.26 zestawiono względne spadki nośności w zależności od wartości momentu M_u .

Tablica 4.26. Względny spadek nośności w zależności od wartości momentu M_u

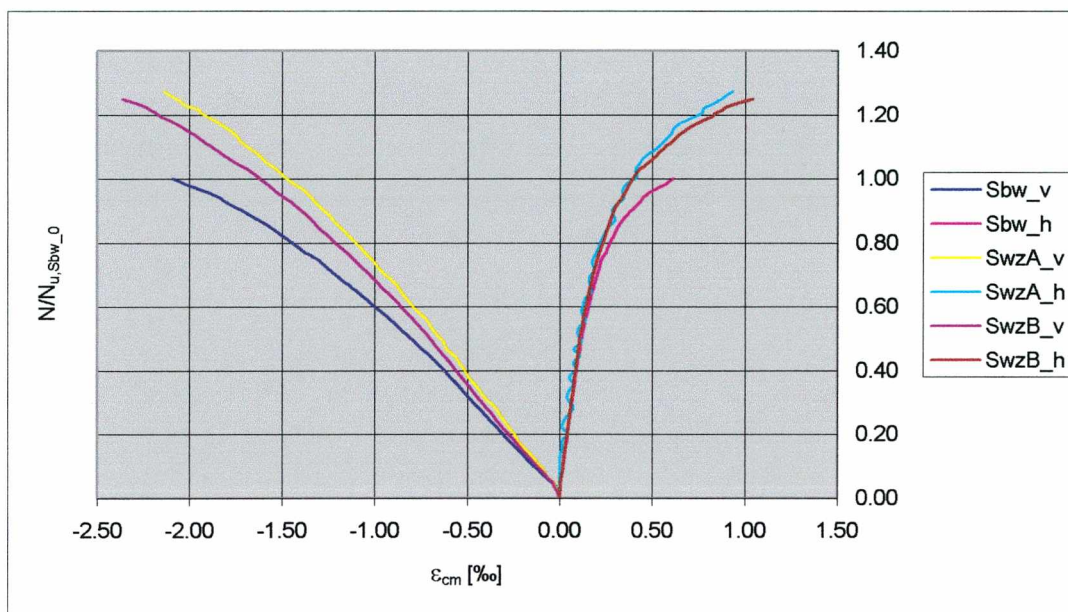
Lp.	Element	Mimośród [mm]	Siła niszcząca N_u [kN]	Moment M_u [kNm]	$\Delta N_u/N_{u,e=i}$ [%]
1	Sbw_0	0	2241	0.00	0.00
2	Sbw_16	16	1720	27.52	30.29
3	Sbw_32	32	1400	44.80	60.07
4	SwzA_0	0	2852	0.00	0.00
5	SwzA_16	16	2234	35.74	27.66
6	SwzA_32	32	1999	63.97	42.67
7	SwzB_0	0	2801	0.00	0.00
8	SwzB_16	16	2483	39.73	12.81
9	SwzB_32	32	2097	67.10	33.57

Na podstawie analizy rysunku 4.71 i tablicy 4.26 stwierdzono, że w przypadku krępych elementów obciążonych mimośrodowo (w granicach rdzenia) nośność słupów wzmocnionych zależy od sposobu skonstruowania kompozytowego zbrojenia poprzecznego. Dla elementów typu B, gdzie zastosowano ciągłe wzmocnienie w postaci płaszcza CFRP, intensywność spadku nośności (kąt nachylenia krzywej do poziomu) jest najmniejszy.

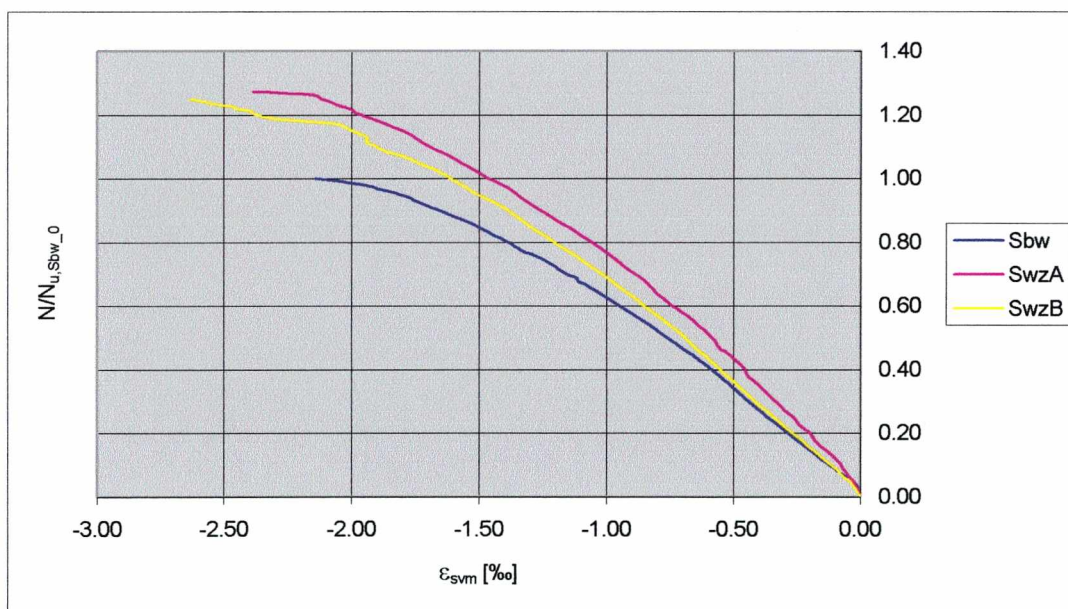
b) Odkształcalność słupów poddanych ścisnaniu osiowemu

W celu weryfikacji, na elementach w skali naturalnej, dotychczasowych własnych wniosków z badań doświadczalnych, dotyczących słupów żelbetowych wzmocnianych materiałami CFRP, poddanych doraźnemu ścisnaniu osiowemu, na rysunkach 4.72, 4.73 i 4.74 przedstawiono wykresy zależności średnich odkształceń betonu, taśm z włókien węglowych i prętów zbrojenia podłużnego w funkcji stosunku przykładanego obciążenia N do średniej nośności granicznej słupów kontrolnych N_{u,Sbw_0} dla siódmego cyklu obciążenia.

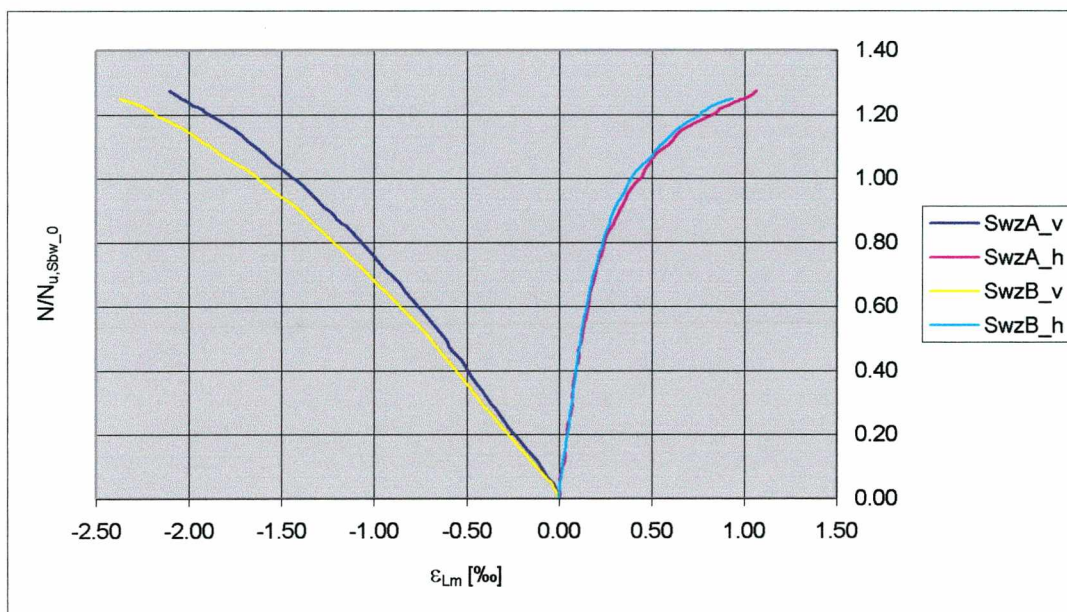
Na rysunku 4.72 podano wykres zależności $N/N_{u,Sbw_0} - \varepsilon_{cm}$ dla średnich odkształceń podłużnych ε_{cvm} i poprzecznych ε_{chm} betonu elementów badawczych, natomiast na rysunku 4.73 pokazano wykres zależności $N/N_{u,Sbw_0} - \varepsilon_{sm}$ dla średnich odkształceń prętów zbrojenia podłużnego ε_{svm} , porównując je każdorazowa z wykresami średnich odkształceń słupa bez wzmocnienia Sbw_0. Wykres zależności $N/N_{u,Sbw_0} - \varepsilon_{Lm}$ dla średnich odkształceń podłużnych ε_{Lvm} i poprzecznych ε_{Lhm} taśm z włókien węglowych przedstawiono na rysunku 4.74.



Rys. 4.72. Wykres zależności $N/N_{u,Sbw_0} - \epsilon_{cm}$ dla słupów: Sbw_0, SwzA_0 i SwzB_0
(w legendzie opisano indeksy poszczególnych odkształceń)



Rys. 4.73. Wykres zależności $N/N_{u,Sbw_0} - \epsilon_{svm}$ dla słupów: Sbw_0, SwzA_0 i SwzB_0



Rys. 4.74. Wykres zależności $N/N_{u,Sbw_0}$ - ϵ_{Lm} dla słupów: SwzA_0 i SwzB_0
(w legendzie opisano indeksy poszczególnych odkształceń)

Nie powinno się wprost porównać cech odkształcalnościowych elementów typu A i B, gdyż należy pamiętać, że wzmocnienia słupów wykonano z wykorzystaniem różnych zestawów materiałów CFRP, a także o tym, że elementy różniły się sposobem skonstruowania wzmocnienia poprzecznego. Na potrzeby pracy dokonano kilku porównań, jednak bez wskazania, który z systemów wydaje się być lepszy.

Potwierdzono, że dla elementów poddanych doraźnemu ścisaniu osiowemu zastosowanie wzmocnienia przez doklejenie podłużnych odcinków taśmy z włókien węglowych powoduje zmniejszenie przyrostu odkształceń podłużnych ϵ_{cvm} i ϵ_{svm} elementów wzmocnionych w stosunku do słupa kontrolnego przy jednakowych przyrostach siły podłużnej. Na poziomie nośności granicznej słupa bez wzmocnienia N_{u,Sbw_0} odkształcenia ϵ_{cvm} i ϵ_{svm} są mniejsze o około 30% dla słupa SwzA_0 i o około 23% dla słupa SwzB_0 od średnich odkształceń podłużnych elementu Sbw_0. Szybkość przyrostu odkształceń podłużnych ϵ_{cvm} i ϵ_{svm} zależy od intensywności wzmocnienia ρ_L zdefiniowanej zależnością (4.1). Zmiana szybkości przyrostu odkształceń podłużnych betonu powoduje przyrost nośności granicznej N_u , natomiast nie ma wpływu, co zauważono już wcześniej, na wartość odkształceń granicznych ściskania w porównaniu z elementami bez wzmocnienia. Maksymalne pomierzone odkształcenie podłużne betonu ϵ_{cvm} wynoszą odpowiednio dla elementów: Sbw_0 – 2,15‰, SwzA_0 – 2,19‰ i SwzB_0 – 2,40‰. Beton i stalowe zbrojenie wewnętrzne przenoszą właściwie tyle samo, co słup żelbetowy, a więc zaobserwowany przyrost nośności elementów wzmocnianych materiałami CFRP należy przypisać prawie

wyłącznie podłużnemu zbrojeniu kompozytowemu.

Jak widać na rysunkach 4.72 ÷ 4.74 ścieżki odkształceń podłużnych i poprzecznych materiałów stanowiących element kompozytowy, poddany doraźnemu ścisnieniu osiowemu, mają zbliżony przebieg, co świadczy o równości odkształceń zapisanych zależnościami (4.3 i 4.4) w punkcie 4.4.5 pracy.

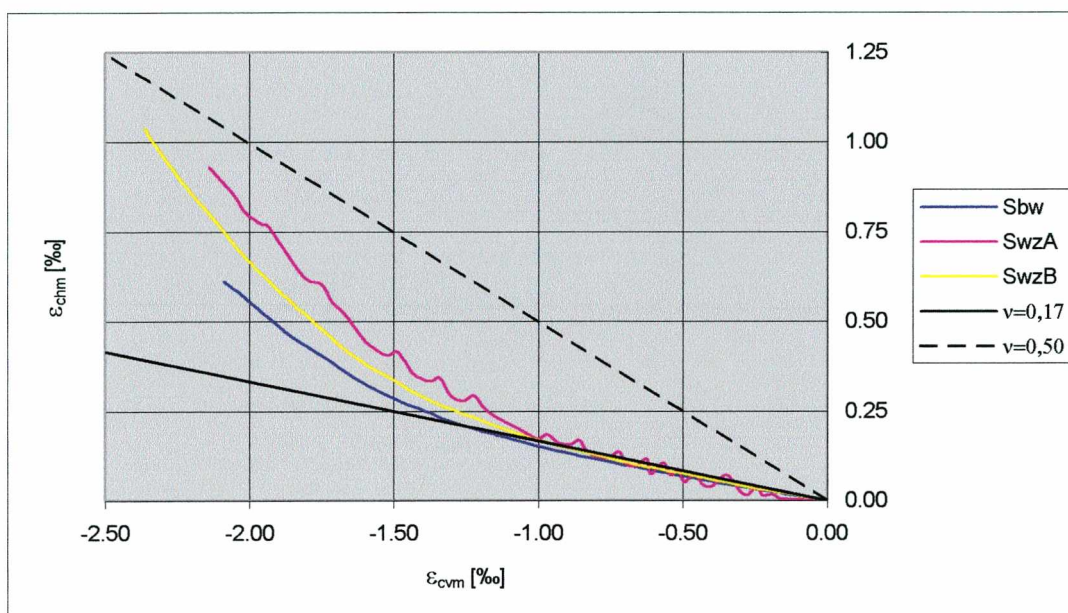
Z porównania krzywych ścieżek odkształceń poprzecznych betonu ε_{chm} (rys. 4.72) i taśm ε_{Lhm} (rys. 4.74) elementów typu A i B wynika, że sposób skonstruowania wzmocnienia poprzecznego (opaski lub płaszczy CFRP) nie ma wpływu na ich przebieg. Jest to oczywiste, ponieważ w przekroju środkowym, gdzie mierzono odkształcenia, naklejono szeroką opaskę z maty (element typu A) lub ciągły arkusz maty (element typu B) i wpływ sposobu wzmocnienia poprzecznego w tym miejscu był jednakowy. Jednak zwiększenie szerokości obejm kompozytowych lub zastosowanie ciągłego płaszcza CFRP powoduje wzrost poprzecznych odkształceń graniczny przekroju $\varepsilon_{h,lim}$. Do podobnych wniosków, że wartość odkształceń poprzecznych zależy od stopnia uzwojenia kompozytowego, doszli autorzy pracy [14] na podstawie własnych badań próbek betonowych wzmocnianych kompozytami CFRP.

Współczynnik Poissona

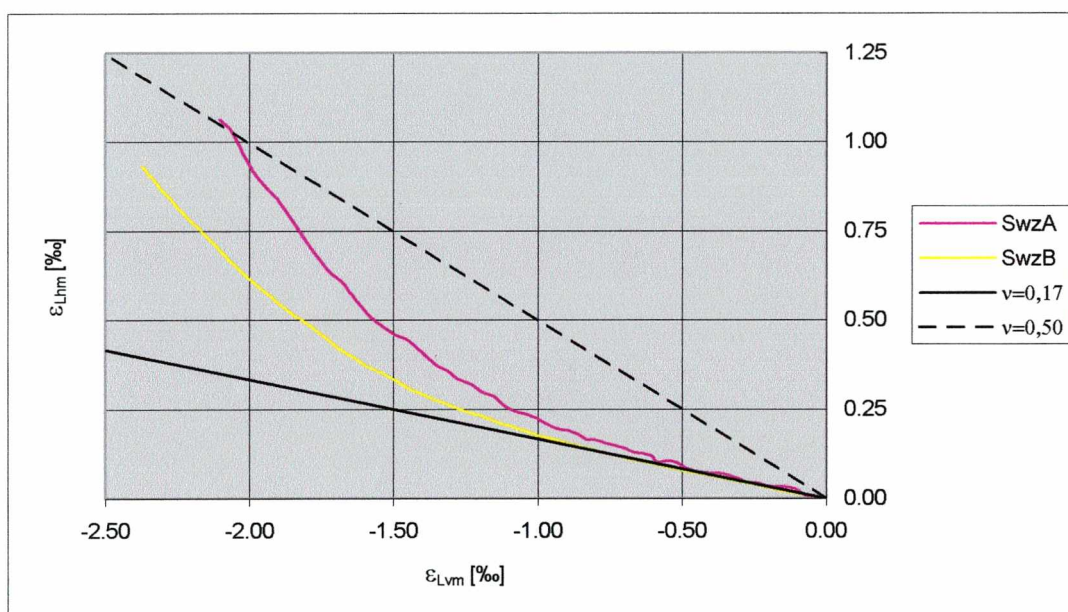
Wartość współczynnika odkształcenia poprzecznego betonu ν_c , definiowanego jako stosunek odkształceń poprzecznych ε_{ch} do odkształceń podłużnych ε_{cv} , zwanego współczynnikiem Poissona, dla zwykłych konstrukcji z betonu jest zmienny. Zależy on od stanu naprężeń w betonie, stopnia jego wyężenia, składu strukturalnego betonu oraz jego wieku. Według PN-84 [N5] przyjmowano $\nu_c=1/6$, natomiast normy Eurokod 2 [N2] oraz PN-2002 [N8] zalecają przyjmować $\nu_c=0,20$. Na rysunku 4.75 pokazano zależność pomiędzy odkształceniami podłużnymi ε_{cvm} i odkształceniami poprzecznymi ε_{chm} betonu dla elementów badawczych Sbw_0, SwzA_0 i SwzB_0.

Jak widać na rysunku 4.75 współczynnik odkształcenia poprzecznego betonu ν_c dla elementu kontrolnego Sbw_0 i elementów wzmocnionych SwzA_0 i SwzB_0 wzrasta wraz z naprężeniami σ_c od wartości około 1/6 do około 1/2 w chwili zniszczenia.

Na rysunku 4.76 podano natomiast zależność pomiędzy odkształceniami podłużnymi ε_{Lvm} i odkształceniami poprzecznymi ε_{Lhm} taśm CFRP dla elementów badawczych SwzA_0 i SwzB_0. Zgodnie z zasadą równości odkształceń, wykazaną dla elementów ściskanych osiowo (por. zależność 4.3 i 4.4), współczynnik Poissona taśm ν_L również wzrasta wraz z naprężeniami σ_L od wartości około 1/6 do około 1/2 w chwili zniszczenia.



Rys. 4.75. Wykres zależności ϵ_{cvm} - ϵ_{chm} dla słupów: Sbw, SwzA_0 i SwzB_0



Rys. 4.76. Wykres zależności ϵ_{Lvm} - ϵ_{Lhm} dla słupów: SwzA_0 i SwzB_0

c) Odkształcalność słupów poddanych ścisaniu mimośrodowemu

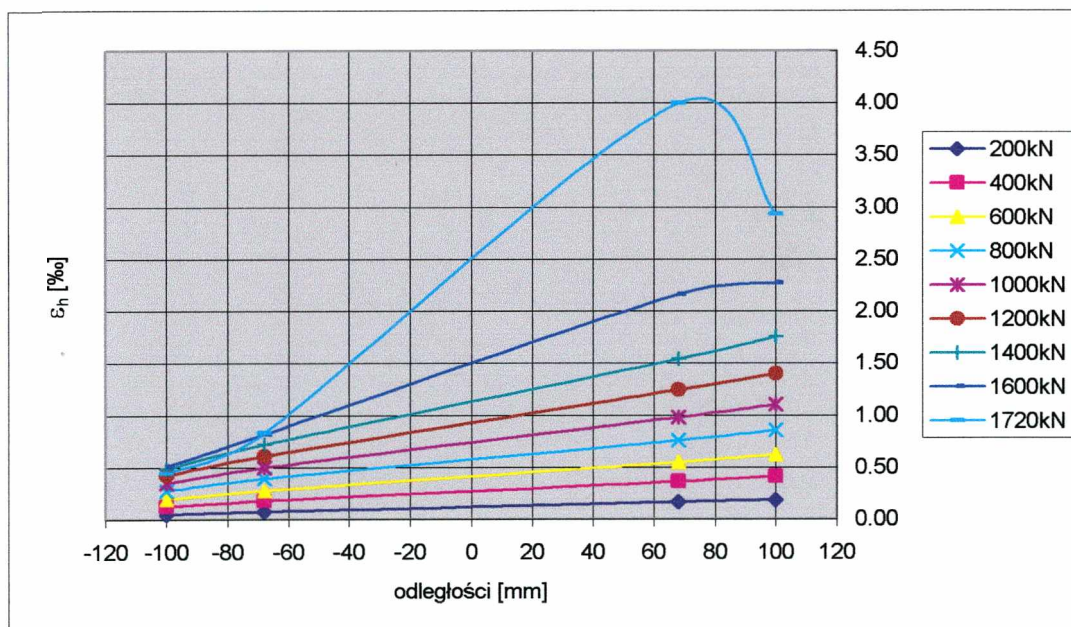
Wyniki pomiarów odkształceń podłużnych, w przekrojach ściskanych wzmacnianych taśmami i matami z włókien węglowych, pokazano na wykresach przedstawiających ich rozkład w miarę wzrostu siły N . Na rysunkach 4.77 ÷ 4.79 pokazano rozkłady odkształceń podłużnych stali, betonu i taśmy w kilku poziomach obciążenia i nośności granicznej N_u dla elementów Sbw_16, SwzA_16 i SwzB_16. Na rysunkach 4.81 ÷ 4.83 podano natomiast analogiczne rozkłady dla elementów Sbw_32, SwzA_32 i SwzB_32. Porównanie rozkładów

granicznych odkształceń podłużnych w przekrojach środkowych słupów ściskanych z mimośrodem 16 mm i 32 mm przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4.80 i 4.84.

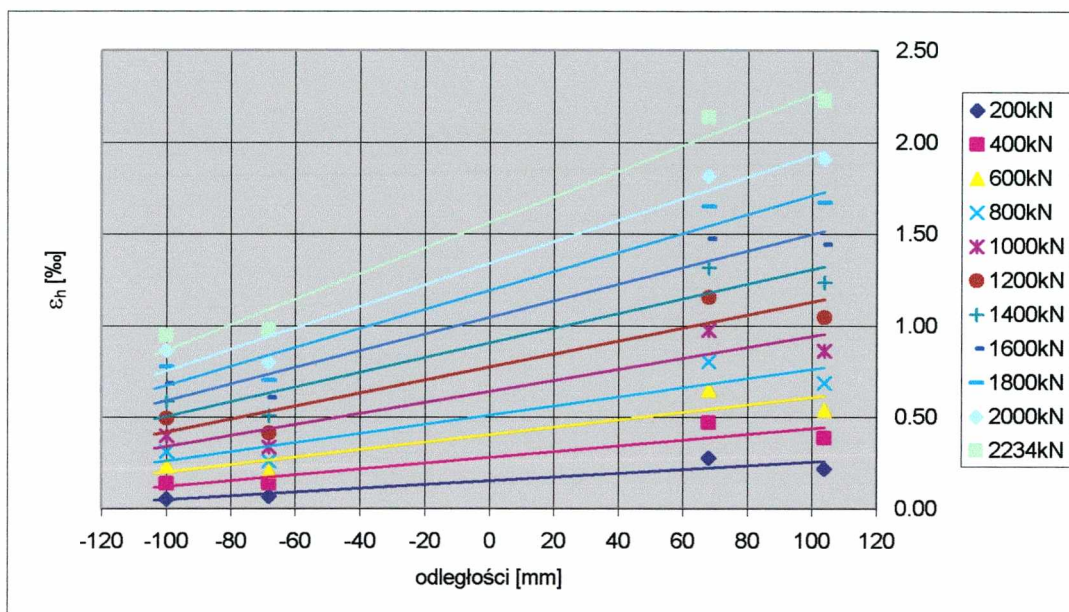
Taki pomiar odkształceń był możliwy dzięki warstwowemu rozmieszczeniu tensometrów elektrooporowych w przekroju środkowym, co opisano w punkcie 4.4.2 pracy. Braki pewnych wartości na rozkładach odkształceń spowodowane są tym, że w trakcie badania następowało uszkodzenie tensometrów naklejonych pod taśmą lub matą.

Jak widać na rysunkach 4.77 i 4.81 przy małej wartości siły obciążającej cały przekrój żelbetowy, na który działa obciążenie jest ściskany. Pracuje on jak przekrój jednorodny, w którym naprężenia rozkładają się liniowo. Wraz ze wzrostem obciążenia następuje przegrupowanie naprężeń w przekroju i wykres odkształceń przybiera kształt wypukły. Spadek odkształceń na krawędzi bardziej ściskanej spowodowany jest pewną swobodą odkształceń włókien skrajnych. Beton zaczyna wchodzić w obszar plastyczny i po osiągnięciu granicy wytrzymałości na ściskanie następuje jego zmiążdżenie, co zaobserwowano i opisano w tabelicy 4.24.

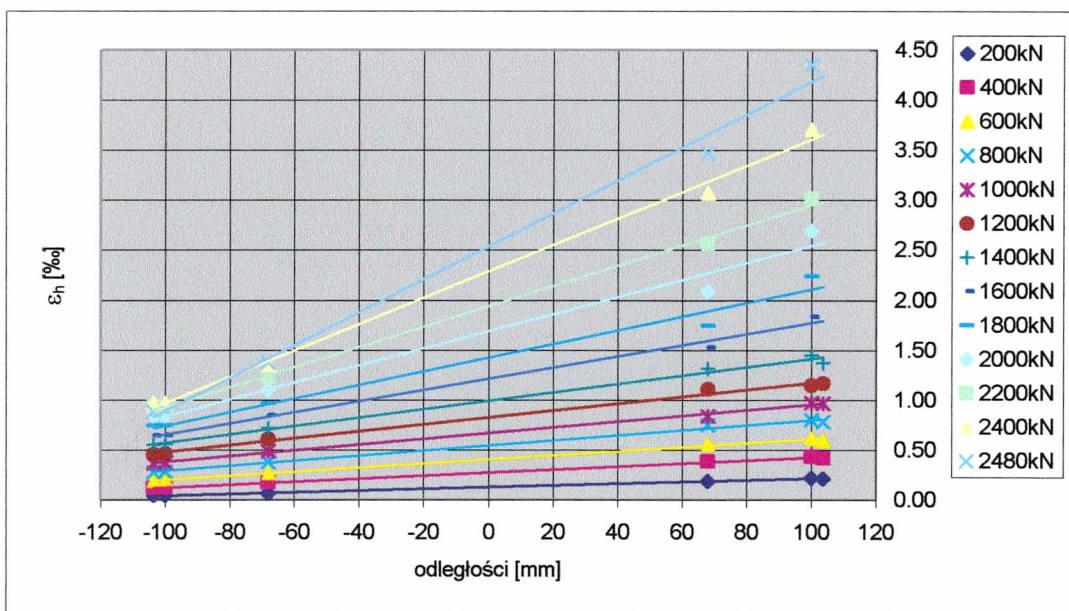
Jeżeli siła N znajduje się w odległości od osi słupa równej promieniowi rdzenia, jak ma to miejsce w elemencie Sbw_32 , to w początkowej fazie obciążania na krawędzi mniej ściskanej przekroju słupa występują odkształcenia $\varepsilon_v=0$ (rys. 4.81). Gdy siła N rośnie w przekroju poprzecznym pojawiają się naprężenia rozciągające, których zasięg jest stosunkowo niewielki. W fazie zniszczenia słupa w strefie rozciąganej przekroju nastąpiło rozwarcie się (pęknięcie) betonu.



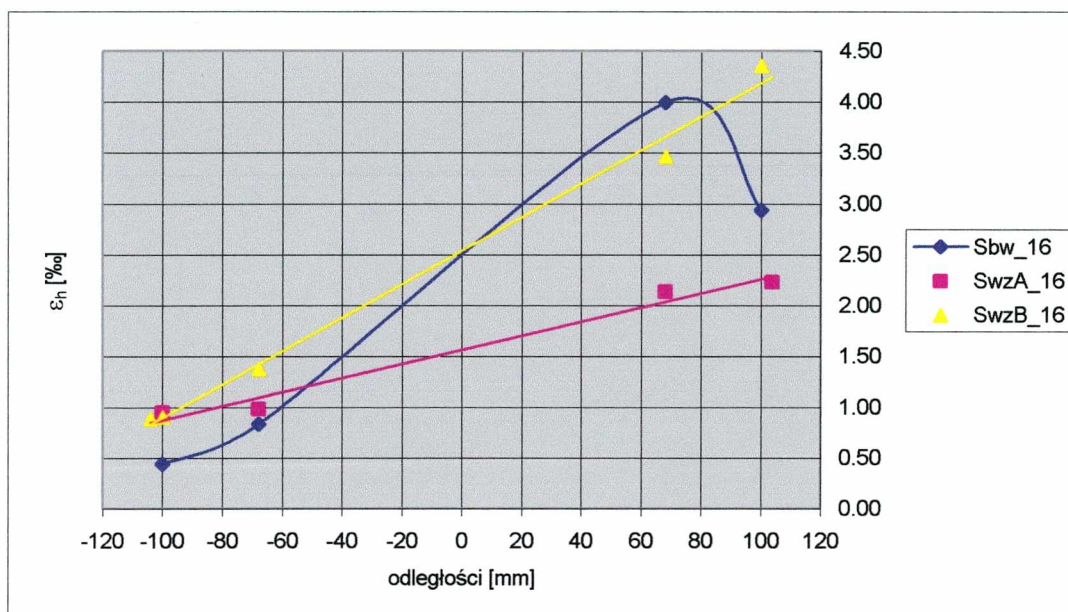
Rys. 4.77. Rozkład odkształceń podłużnych w przekroju środkowym słupa Sbw_16



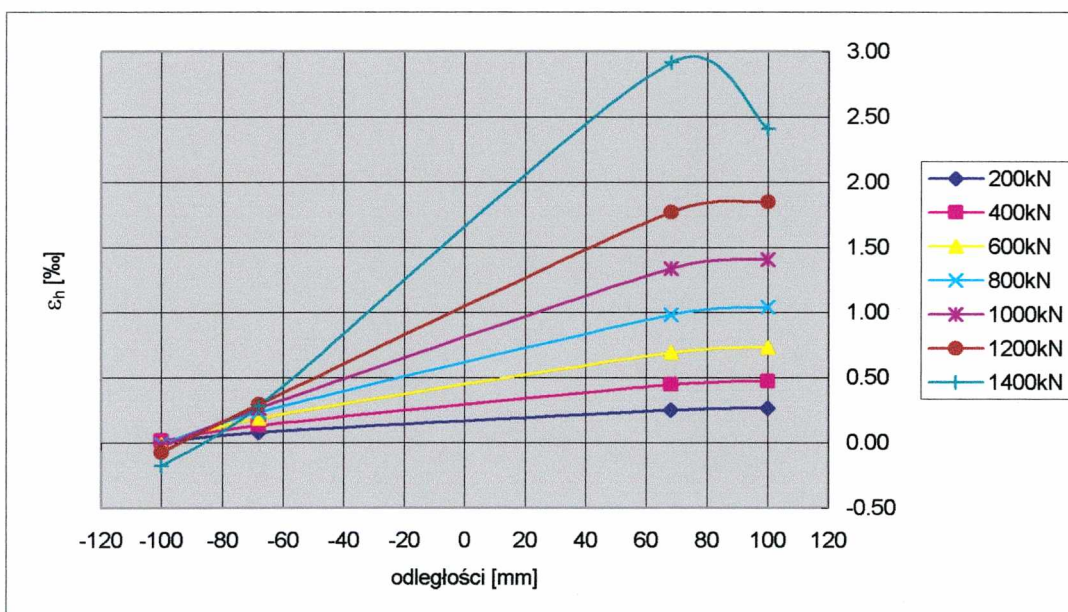
Rys. 4.78. Rozkład odkształceń podłużnych w przekroju środkowym słupa SwzA_16



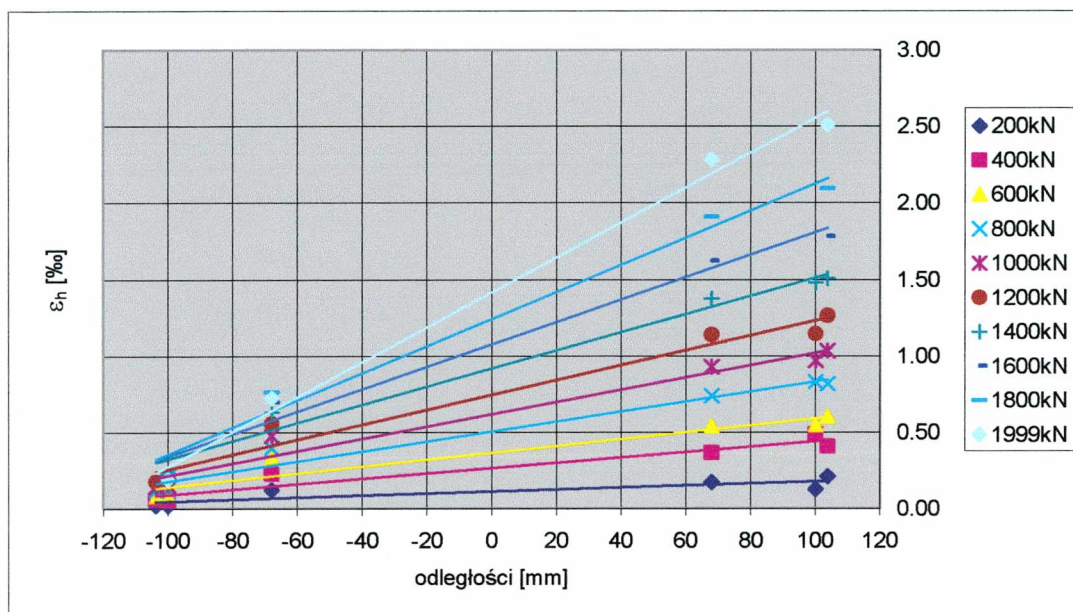
Rys. 4.79. Rozkład odkształceń podłużnych w przekroju środkowym słupa SwzB_16



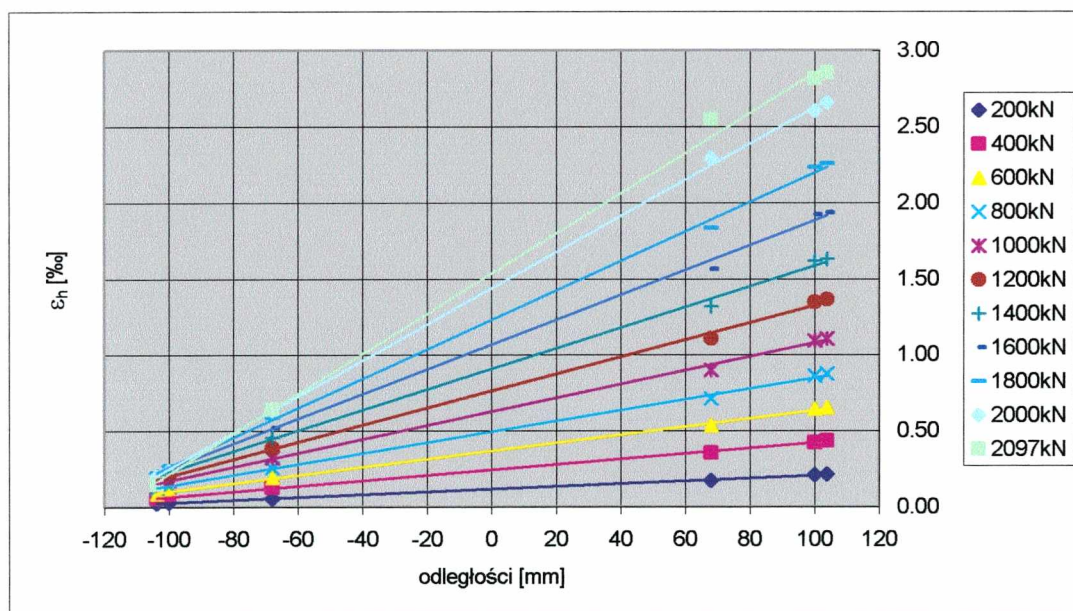
Rys. 4.80. Porównanie rozkładów granicznych odkształceń podłużnych w przekroju środkowym słupów Sbw_16, SwzA_16 i SwzB_16



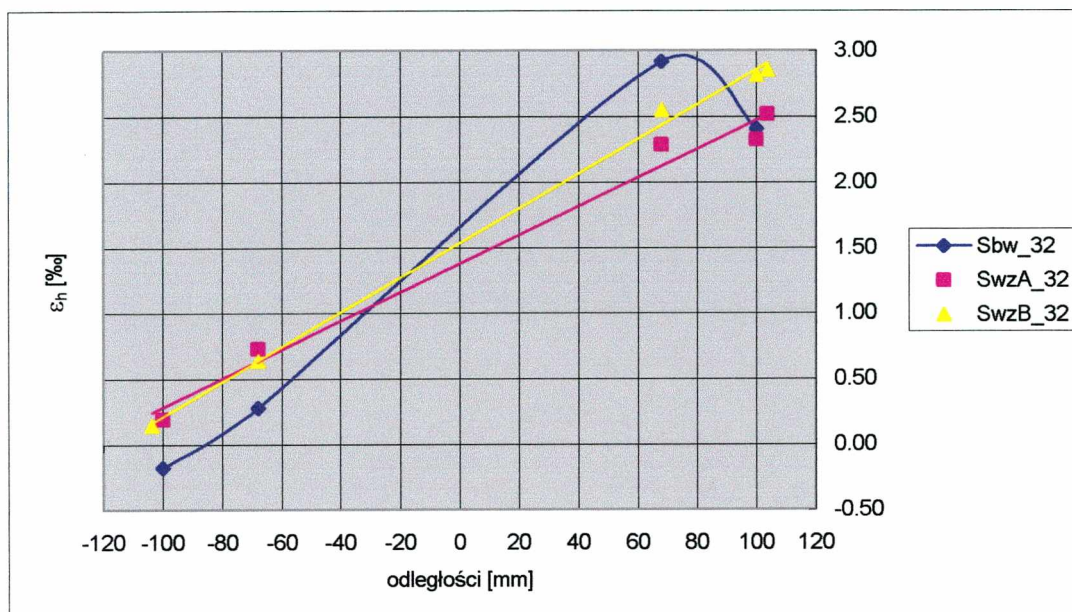
Rys. 4.81. Rozkład odkształceń podłużnych w przekroju środkowym słupa Sbw_32



Rys. 4.82. Rozkład odkształceń podłużnych w przekroju środkowym słupa SwzA_32



Rys. 4.83. Rozkład odkształceń podłużnych w przekroju środkowym słupa SwzB_32



Rys. 4.84. Porównanie rozkładów granicznych odkształceń podłużnych w przekroju środkowym słupów Sbw_32, SwzA_32 i SwzB_32

Jak widać na rysunkach 4.78 (SwzA_16), 4.79 (SwzB_16), 4.82 (SwzA_32) i 4.83 (SwzB_32) zastosowanie wzmocnienia zewnętrznego w postaci podłużnego zbrojenia i poprzecznego uzwojenia kompozytowego spowodowało zwiększenie sztywności elementów. Dzięki dodatkowemu zastosowaniu zewnętrznego zbrojenia kompozytowego ograniczono swobodę odkształceń skrajnych włókien, co objawia się liniowym rozkładem naprężeń w przekroju poprzecznym. Można założyć, że przekrój pracuje jako homogeniczny.

Dla elementów ściskanych z mimośrodem na krawędzi rdzenia ($e=32$ mm) nie wystąpiło tak wyraźne przegrupowanie naprężeń wraz ze wzrostem obciążenia, jak miało to miejsce dla elementu bez wzmocnienia, a więc w przekroju poprzecznym nie pojawiły się naprężenia rozciągające. Wartość odkształceń krawędziowych po stronie mniej ściskanej dla elementów mimośrodowo ściskanych równomiernie wzrasta wraz ze wzrostem obciążenia – dla elementów typu SwzA_16 i SwzB_16 do wartości 0,95‰, natomiast dla elementów typu SwzA_32 i SwzB_32 do wartości 0,20‰.

Wyraźnie większa wartość granicznych odkształceń podłużnych $\varepsilon_{cv2,lim}$ (po stronie bardziej ściskanej) w elemencie SwzB_16 równa 4,35‰ jest wynikiem jednostkowym i trudno na tej podstawie wysuwać jednoznaczne wnioski. Należy pamiętać, że słupy SwzA_16 i SwzB_16 zostały wzmocnione przy użyciu różnych zestawów materiałów kompozytowych.

Jak widać na rysunkach 4.80 i 4.84 nośność słupów żelbetowych została wyczerpana po osiągnięciu granicy plastyczności w zbrojeniu bardziej ściskanym, a chwilę potem beton osiągnął swoją wytrzymałość na ściskanie. Dla elementu Sbw_16 przy $\varepsilon_{sv2}=3,02‰$

naprężenia w stali osiągają wartość $\sigma_s=612$ MPa, natomiast dla słupa Sbw_32 $\varepsilon_{sv2}=2,92\%$ naprężenia $\sigma_s=590$ MPa. Granica plastyczności prętów zbrojenia podłużnego $f_y=550,8$ MPa (por. punkt. 4.5.3-b). Ograniczenie szybkości przyrostu odkształceń podłużnych spowodowane dodatkowym zbrojeniem kompozytowym sprawiło, że pręty zbrojeniowe nie osiągają granicy plastyczności. Natychmiast po rozerwaniu poprzecznego wzmocnienia kompozytowego beton ściskany w pobliżu krawędzi bliżej siły zostaje zmiażdżony.

4.5.6. Wnioski z badań doświadczalnych w etapie III

Po przeprowadzeniu badań doświadczalnych w etapie III zdefiniowano następujące wnioski:

- 1) Zniszczenie mimośrodowo ściskanych słupów żelbetowych, o przekroju czworokątnym, wzmocnianych taśmami i matami z włókien węglowych następuje na skutek rozerwania włókien maty wzmocnienia poprzecznego w narożach elementów. Natychmiast, w obszarze rozerwania opaski lub płaszcza kompozytowego, następowało zmiażdżenie betonu i zgniecenie podłużnej taśmy wzmacniającej (rys. 4.67 i 4.68).
- 2) Efektywność wzmocnienia (względny przyrost nośności) słupów o przekroju czworokątnym zależy od wartości mimośrodu siły podłużnej i od sposobu skonstruowania wzmocnienia poprzecznego (rys. 4.70). Sposób skonstruowania poprzecznego wzmocnienia zewnętrznego nie ma wpływu na przyrost nośności granicznej słupów ściskanych osiowo. Elementy wzmocnione opaskami (typ A) i płaszczem kompozytowym (typ B) charakteryzują się zbliżonym przyrostem nośności granicznej, który wynosi odpowiednio: 25 i 27%. W przypadku elementów ściskanych mimośrodowo, ciągłe wzmocnienie poprzeczne jest bardziej efektywne od wzmocnienia w postaci opasek. Skuteczność ciągłego wzmocnienia poprzecznego wzrasta, wraz ze wzrostem mimośrodu siły podłużnej. Dla elementu typu B przy $e=16\text{mm}$ zaobserwowano przyrost nośności rzędu 44%, natomiast przy $e=32\text{mm}$ przyrost nośności rzędu 50% w stosunku do nośności analogicznych słupów bez wzmocnienia.
- 3) Intensywność spadku nośności mimośrodowo ściskanych słupów żelbetowych, o przekroju czworokątnym, wzmocnionych taśmami i matami CFRP zależy od sposobu

skonstruowania wzmocnienia poprzecznego Dla słupów wzmocnionych ciągłym płaszczem kompozytowym spadek nośności, z tytułu wzrostu momentu zginającego następuje wolniej niż w przypadku elementów ze wzmocnieniem w postaci obejm (rys. 4.71 i tablica 4.26).

W przypadku elementów wzmocnianych taśmami i matami z włókien węglowych poddanych doraźnemu ścisaniu osiowemu potwierdzono, następujące wnioski dotyczące cech odkształcalnościowych, zdefiniowane w punkcie 4.4.6 pracy:

- 4) Wzmocniane poprzez doklejanie podłużnych odcinków taśm z włókien węglowych powoduje zmniejszenie szybkości przyrostu odkształceń podłużnych ε_v do wartości granicznej $\varepsilon_{v,lim}$ w stosunku do elementów kontrolnych przy jednakowych przyrostach siły podłużnej. Szybkość przyrostu odkształceń podłużnych zależy od intensywności wzmocnienia podłużnego ρ_L (wzór 4.1). Zmiana szybkości przyrostu odkształceń podłużnych przekłada się bezpośrednio na przyrost nośności granicznej N_u .
- 5) Wartość granicznych odkształceń podłużnych betonu w ściskanych osiowo słupach czworokątnych nie zależy od intensywności wzmocnienia podłużnego ρ_L (wzór 4.1). Dla elementów o $\rho_L=2,53\%$ graniczne odkształcenia podłużne betonu $\varepsilon_{cv,lim}\approx 2,30\%$ (por. punkt 4.4.6, wniosek 6).
- 6) Obowiązuje zasada równości odkształceń: $\varepsilon_{sv}=\varepsilon_{cv}=\varepsilon_{Lv}$ oraz $\varepsilon_{ch}=\varepsilon_{Lh}=\varepsilon_{wh}$.
- 7) Wartość współczynników Poissona ν_c i ν_L nie jest wielkością stałą i zmienia się wraz ze wzrostem naprężeń w przekroju od wartości 1/6 do około 1/2 w chwili zniszczenia.

Ponadto wyciągnięto następujący wniosek dotyczący cech odkształcalnościowych słupów ściskanych mimośrodowo:

- 8) Podłużne wzmocnienie kompozytowe powoduje ograniczenie swobody odkształceń krawędziowych i redystrybucji sił wewnętrznych w przekroju poprzecznym, co objawia się prostoliniowym rozkładem odkształceń, aż do zniszczenia (rys. 4.78, 4.79, 4.82 i 4.83).

4.6. Podsumowanie. Wnioski z badań doświadczalnych

4.6.1. Intensywność wzmocnienia podłużnego

Jednym z głównych założeń przeprowadzonych badań doświadczalnych było określenie wpływu intensywności wzmocnienia podłużnego, ściskanych słupów żelbetowych, odcinkami taśm z włókien węglowych przy jednoczesnym wzmocnieniu poprzecznym matą z włókien węglowych na ich nośność graniczną. W celu potwierdzenia drugiej tezy pracy (por. rozdział trzeci pracy) wykonano trzyetapowe badania doświadczalne, w których analizowano wpływ intensywności wzmocnienia ρ_L (wzór 4.1, punkt 4.3.1 pracy) na nośność elementów wzmocnianych materiałami CFRP.

W ramach etapu IIa przebadano po jednym elemencie modelowym o intensywności wzmocnienia ρ_L w zakresie $1,40 \div 4,20\%$, co $0,70\%$. Wykonano dwie serie badań, w których analizowano również wpływ wzmocnienia poprzecznego w postaci opasek z maty kompozytowej na nośność i cechy odkształcalnościowe elementów badawczych. Badania zostały opisane w punkcie 4.3 pracy.

Etap IIb stanowił kontynuację poprzednich badań. Realizowano program badań mających na celu między innymi ocenę sposobu kształtowania wzmocnienia zewnętrznego (podłużnego i poprzecznego) w oparciu o badane cechy słupów. W etapie tym jeszcze raz przebadano trzy elementy wzmocnione podłużnymi taśmami o intensywności $\rho_L=4,20\%$ któremu towarzyszyło zbrojenie obwodowe, co opisano w punkcie 4.4 pracy.

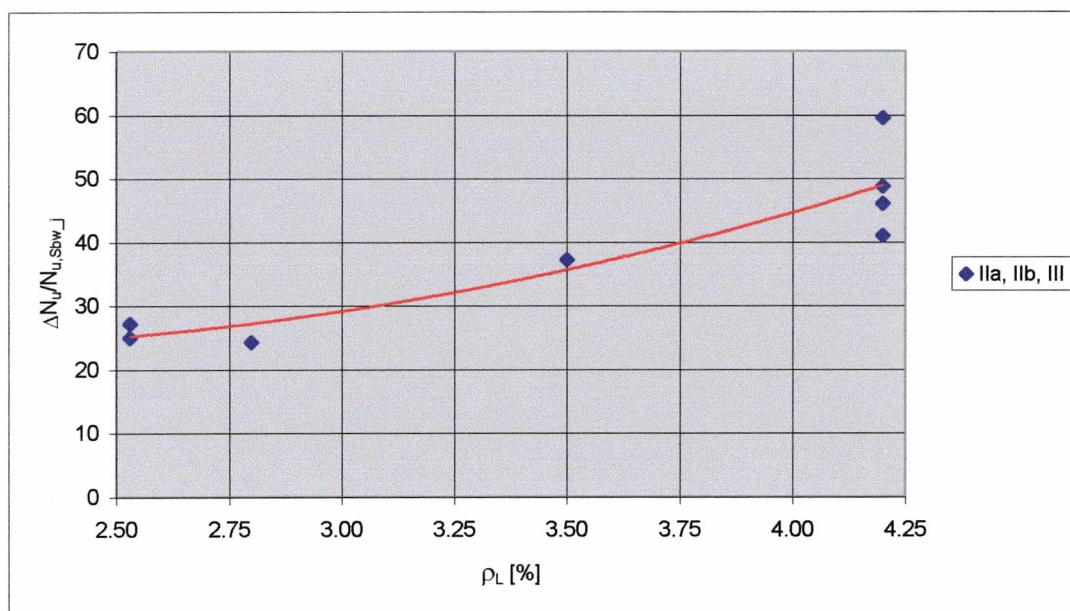
W etapie III wykonano badania elementów w skali naturalnej, których celem była między innymi weryfikacja dotychczasowych spostrzeżeń dotyczących słupów poddanych doraźnemu ściskaniu osiowemu. Słupy wzmocniono stosując maksymalną, możliwą intensywność wzmocnienia podłużnego przy założeniu jednowarstwowego zbrojenia zewnętrznego tzn. $\rho_L=2,53\%$. Prace badawcze wykonano na dwóch typach elementów, które różniły się sposobem skonstruowania wzmocnienia poprzecznego. Zaprezentowana w punkcie 4.5 pracy analiza wyników badań pokazała, że rodzaj zbrojenia poprzecznego (obejmy lub jednokrotne ciągłe owinięcie matą) nie ma zasadniczego wpływu na cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe ściskanych osiowo słupów żelbetowych o przekroju czworokątnym, wzmocnianych materiałami CFRP.

W tablicy 4.27 zestawiono względne ($\Delta N_u/N_{u,Sbw_j}$) przyrosty nośności słupów wzmocnianych taśmami i matami CFRP $\Delta N_u = N_{u,Swz_j} - N_{u,Sbw_j}$ w stosunku do nośności

odpowiednich słupów kontrolnych N_{u,Sbw_j} , w zależności od intensywności wzmocnienia podłużnego ρ_L (indeks „j” odpowiada kolejnych etapom badań). Zaprezentowane w tabeli 4.27 względne ($\Delta N_u/N_{u,Sbw_j}$) przyrosty nośności w zależności od intensywności wzmocnienia ρ_L przedstawiono w formie graficznej na rysunku 4.85. Linia czerwoną zaznaczono prognozowany wpływ intensywności wzmocnienia podłużnego na nośność osiowo ściskanych słupów żelbetowych będących przedmiotem badań.

Tablica 4.27. Względne przyrosty nośności w zależności od intensywności wzmocnienia ρ_L

Lp.	Etap badań	Elementy kontrolne		Elementy wzmocnione			$\Delta N_u/N_{u,Sbw_j}$ [%]
		Oznaczenie	N_u [kN]	Oznaczenie	ρ_L [%]	N_u [kN]	
1	IIa	S1	478,5	S4b	2,80	595	24,35
2				S5b	3,50	657	37,30
3				S6b	4,20	712	48,80
4	IIb	Sb	590,5	St+m-1	4,20	833	41,07
5				St+m-2	4,20	942	59,53
6				St+m-3	4,20	863	46,15
7	III	Sbw_0	2241	SwzA_0	2,53	2852	27,26
8				SwzB_0	2,53	2801	24,99



Rys. 4.85. Względny przyrost nośności słupów wzmocnianych materiałami CFRP w stosunku do nośności słupów kontrolnych w zależności intensywności wzmocnienia podłużnego

Na podstawie analizy tablicy 4.27 i rysunku 4.85 stwierdzono, że w rozpatrywanym przedziale intensywności wzmocnienia podłużnego $\rho_L=2,53 \div 4,20\%$, wraz ze przyrostem ρ_L wzrasta nośność graniczna N_u osiowo ściskanych słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami i matami z włókien węglowych w stosunku do nośności elementów kontrolnych. Względny przyrost nośności słupów ma charakter krzywoliniowy (paraboliczny). W pracy stosowano jednowarstwowe przyklejanie taśm CFRP, w związku z czym maksymalna

intensywność wzmocnienia podłużnego uzależniona była od wymiarów przekroju poprzecznego elementu oraz grubości taśm CFRP, co zapisano w postaci zależności:

$$\rho_L = \frac{A_L}{A_c} \leq \frac{(2 \cdot (a - 2r) + 2 \cdot (b - 2r)) \cdot t}{(a \cdot b) - (4 - \pi) \cdot r^2}, \quad (4.5)$$

gdzie:

- a i b – wymiar przekroju poprzecznego elementu,
- r – promień wyokrąglenia naroży (sfazowanie naroży),
- t – nominalna grubość taśmy CFRP (obecnie dostępne t=1,2 lub 1,4 mm).

W celu osiągnięcia większej intensywności wzmocnienia podłużnego ρ_L , należałoby zastosować wielowarstwowe wzmocnianie poprzez przyklejanie zewnętrzne podłużnych taśm lub zamawiać u producentów kompozyty o większej grubości, zwiększając w ten sposób pole powierzchni taśm z włókien węglowych A_L . Badania tego typu nie były przedmiotem analizy zaprezentowanej w pracy.

Należy zauważyć, że podłużne zewnętrzne wzmocnienie kompozytowe nie jest skuteczne, jeżeli nie towarzyszy mu wzmocnienie poprzeczne. W pracy wykazano, że o skuteczności wzmocnienia ściskanych osiowo elementów żelbetowych o przekroju czworokątnym nie decyduje sposób skonstruowania wzmocnienia poprzecznego, ale intensywności wzmocnienia podłużnego.

4.6.1. Wnioski końcowe z badań doświadczalnych

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań doświadczalnych ściskanych słupów żelbetowych wzmacnianych taśmami i matami z włókien węglowych. W związku z tym, że szczegółowe wnioski zawarto w treści poszczególnych podrozdziałów (por. punkty 4.2.6, 4.4.6 i 4.5.6), poniżej przedstawiono wnioski wynikające ze zdobytych doświadczeń i podsumowujące jeden z głównych celów pracy, jakim było określenie wpływu intensywności podłużnego na nośność elementów badawczych.

- 1) O skuteczności metody wzmacniania elementów żelbetowych poprzez doklejanie materiałów kompozytowych decyduje przestrzeganie reżimów technologicznych i jakościowych gwarantujących efektywność metody.

- 2) Nośność graniczna wzmocnianych słupów żelbetowych o przekroju czworokątnym zależy od intensywności wzmocnienia podłużnego taśmami z włókien węglowych ρ_L (wzór 4.1), pod warunkiem jednak, że towarzyszy mu obwodowe wzmocnienie kompozytowe (rys. 4.85 i tablica 4.27).

5. ANALIZY TEORETYCZNE

5.1. Wstęp

Celem analiz teoretycznych jest próba stworzenia algorytmu do wymiarowania słupów żelbetowych wzmocnianych za pomocą taśm i mat z włókien węglowych. W tym celu wykorzystane zostały znane metody obliczeń teoretycznych [5, 50], które opierają się na opisie zależności stanu naprężeń i odkształceń od doraźnego obciążenia osiowego słupów uzwojonych wewnętrzną spiralą stalową [31].

Metoda wzmocniania słupów żelbetowych poprzez owijanie zewnętrznym płaszczem kompozytowym, pod względem swojej podstawowej koncepcji, odpowiada stosowaniu w słupach krępych uzwojenia jako wewnętrznego zbrojenia poprzecznego. Uzwojenie powoduje powstanie w przekroju poprzecznym ściskanych elementów, trójosiowego stanu naprężeń i ograniczenie przyrostu odkształceń poprzecznych. Zasadnicza różnica pomiędzy elementami uzwojonymi wewnętrzną spiralą stalową i zewnętrznym płaszczem FRP, polega na tym, że w tym drugim przypadku wzmocnieniu podlega cały przekrój poprzeczny a materiał kompozytowy wykazuje sprężysty charakter pracy, aż do zniszczenia. Natomiast w przypadku uzwojenia stalowego, ograniczone jest ono do rdzenia przekroju poprzecznego a stal, po osiągnięciu granicy plastyczności wykazuje przyrost odkształceń przy stałym poziomie naprężeń.

Zaprezentowane modele teoretyczne poddane zostały krytycznej ocenie pod względem ich przydatności do obliczania nośności elementów ściskanych o przekroju czworokątnym, wzmocnianych taśmami i matami CFRP, będących przedmiotem zainteresowań autora. Na podstawie własnych badań doświadczalnych zaproponowana została modyfikacja jednego z modeli teoretycznych.

5.1. Nośność osiowo ściskanych słupów uzwojonych

5.2.1. Pierwsze badania doświadczalne i analizy teoretyczne

Począwszy od pierwszych badań doświadczalnych Considère (1902 r.), poprzez rozległe badania Kuryłły (1952 r.), Rüsch i Stöckla (1969 r.), Stöckla i Menne (1975 r.) [27] i wielu innych badaczy, prowadzone były analizy teoretyczne mające na celu stworzenie

modelu opisującego zachowanie się słupów uzwojonych spiralą stalową. Kolejni badacze czerpali z doświadczeń poprzedników w planowaniu swoich eksperymentów, dzięki czemu związki empiryczne uwzględniały coraz więcej czynników determinujących stan wyężenia i nośność słupów uzwojonych.

We wspomnianych badaniach zauważono, że osiowo ściskany element żelbetowy posiadający zbrojenie poprzeczne w postaci ciągłego uzwojenia wzdłuż osi elementu, może przenieść znacznie większe obciążenia niż element, w którym zbrojenie poprzeczne stanowią strzemiona. Taki stan rzeczy przypisywano uzwojeniu, które wywierając parcie boczne na betonowy rdzeń, powoduje jego pracę w trójosiowym stanie naprężeń, co zwiększa wytrzymałość betonu rdzenia.

W celu stworzenia modelu opisującego zachowanie uzwojonych słupów żelbetowych, konieczna była modyfikacja zależności pomiędzy naprężeniami a odkształceniami w jednoosiowym stanie naprężeń tak, aby dostosować ją do przypadku pracy betonu w złożonym stanie naprężeń, o czym będzie mowa w kolejnym punkcie pracy.

5.2.2. Zależność σ - ϵ dla betonu uzwojonego według teorii Mandera i innych

Modelem wyjściowym do opisu wytrzymałości betonu rdzenia elementów uzwojonych zewnętrznym wzmocnieniem kompozytowym jest propozycja Mandera, Priestley'a i Parka [31] opracowana dla zwykłych elementów uzwojonych. Przyjęto, że przyrost nośności słupów uzwojonych w stosunku do elementów ze zbrojeniem poprzecznym w postaci strzemion związany jest z pracą betonu w trójosiowym stanie naprężeń, co zapisano w postaci zależności:

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 \cdot f_1, \quad (5.1)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \cdot \left(1 + k_2 \cdot \frac{f_1}{f'_{co}}\right), \quad (5.2)$$

gdzie:

f'_{cc} i ϵ_{cc} – odpowiednio: maksymalne naprężenia i odkształcenia betonu w trójosiowym stanie naprężeń,

f'_{co} i ϵ_{co} – odpowiednio: maksymalne naprężenia i odkształcenia betonu w jednoosiowym stanie naprężeń,

f_1 – naprężenia poprzeczne powstające na styku betonu i uzwojenia,

E_c – początkowy moduł sprężystości betonu,
 E_{sec} – sieczny moduł sprężystości betonu uzwojonego,
 pozostałe symbole wyjaśniono przy wzorach (5.1) i (5.2).

Wzór (5.1) jest prawdziwy dla przypadku, gdy na całą powierzchnię boczną rdzenia betonowego wywierane jest równomierne naprężenie poprzeczne. Uwzględnienie nieciągłości przyłożenia obciążenia bocznego dokonano przez wprowadzenie współczynnika efektywności uzwojenia betonu k_e :

$$f'_l = k_e \cdot f'_l, \quad (5.9)$$

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}}, \quad (5.10)$$

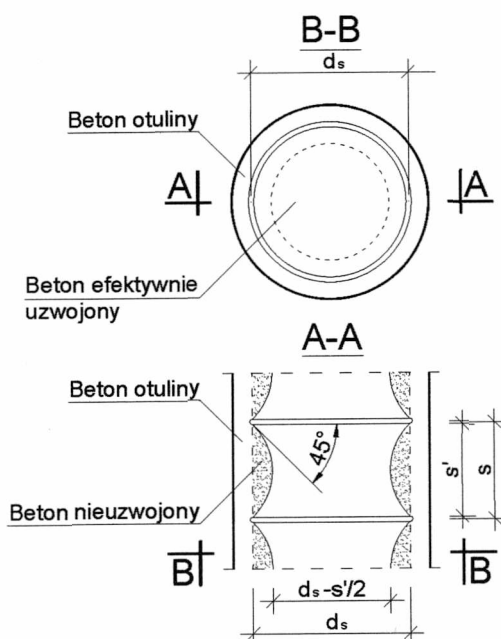
gdzie:

A_{cc} – przekrój rdzenia betonowego pomniejszona o powierzchnię zbrojenia podłużnego,

A_e – efektywna powierzchnia rdzenia betonu.

Przekrój okrągły

W celu określenia średnicy efektywnego rdzenia betonu ograniczonego uzwojeniem przyjęto, że naprężenia w kierunku pionowym pomiędzy zwojami tworzą parabole, których styczne nachylone są pod kątem 45° do poziomu, co pokazano na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Efektywna powierzchnia rdzenia betonu o przekroju okrągłym [31]

W związku z tym, zależność na współczynnik k_e przyjmuje postać:

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot \left(d_s - \frac{s'}{2}\right)^2}{\frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 \cdot (1 - \rho_{cc})} = \frac{\frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 \cdot \left(1 - \frac{s'}{2 \cdot d_s}\right)^2}{\frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 \cdot (1 - \rho_{cc})} = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2 \cdot d_s}\right)^2}{1 - \rho_{cc}}. \quad (5.11)$$

Ostatecznie można przyjmować:

$$k_e = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2 \cdot d_s}\right)^2}{1 - \rho_{cc}}, \quad (5.12)$$

gdzie:

ρ_{cc} – stopień zbrojenia podłużnego,

pozostałe symbole wyjaśniono na rysunku 5.2.

Naprężenia poprzeczne powstające na styku betonu i uzwojenia wyznaczono z równowagi sił w połowie przekroju poprzecznego elementu uzwojonego. Maksymalne naprężenia poprzeczne f_l wyznaczono zakładając, że naprężenia w uzwojeniu osiągną granicę plastyczności, co zapisano w postaci:

$$2 \cdot f_{yh} \cdot A_{sp} = f_l \cdot s \cdot d_s, \quad (5.13)$$

$$f_l = \frac{2 \cdot f_{yh} \cdot A_{sp}}{s \cdot d_s}, \quad (5.14)$$

gdzie:

f_{yh} – granica plastyczności stali uzwojenia,

A_{sp} – powierzchnia prętów uzwojenia,

pozostałe symbole wyjaśniono na rysunku 5.2.

Podstawiając do wzoru (5.14) zależność (5.15) na stopień zbrojenia poprzecznego ρ_s , otrzymano:

$$\rho_s = \frac{A_{sp} \cdot \pi \cdot d_s}{\frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 \cdot s} = \frac{4 \cdot A_{sp}}{d_s \cdot s}, \quad (5.15)$$

$$f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_s \cdot f_{yh} \quad (5.16)$$

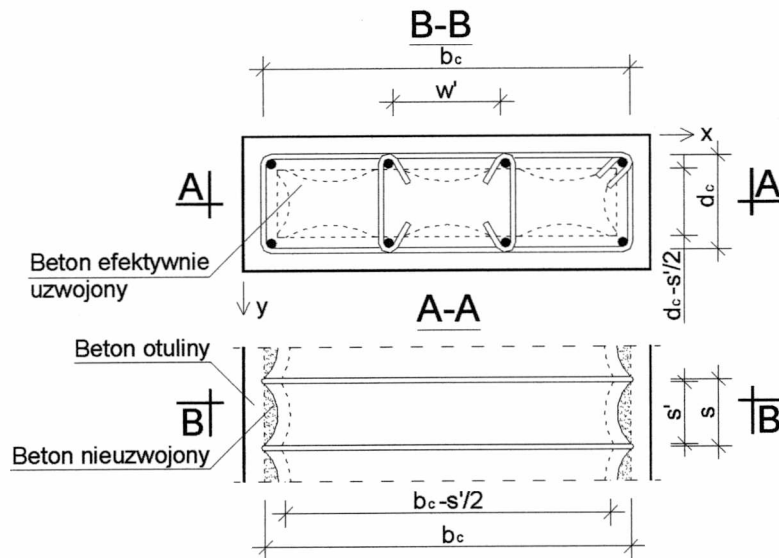
Ostatecznie wzór (5.9) na efektywne naprężenia poprzeczne f'_l powstające na styku

betonu i uzwojenia przyjmuje postać:

$$f'_1 = \frac{1}{2} \cdot k_e \cdot \rho_s \cdot f_{yh} \quad (5.17)$$

Przekrój prostokątny

W przypadku przekroju prostokątnego założono, że obszary betonu nieuzwojonego występują pionowo pomiędzy warstwami zbrojenia poprzecznego (strzemionami) i poziomo pomiędzy prętami zbrojenia podłużnego. Podobnie jak dla przekroju okrągłego, obszary te ograniczone są parabolami, których styczne nachylone są pod kątem 45° , co pokazano na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Efektywna powierzchnia rdzenia betonu o przekroju prostokątnym [31]

Efektywną powierzchnię rdzenia betonowego A_e obliczono poprzez odjęcie od powierzchni poprzecznej rdzenia obszarów objętych parabolami, które ograniczają powierzchnię betonu nieuzwojonego, co zapisano wzorem:

$$A_e = \left(b_c \cdot d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6} \right) \cdot \left(1 - \frac{s'}{2 \cdot b_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{s'}{2 \cdot d_c} \right) \quad (5.18)$$

Ostatecznie wzór na współczynnik k_e przyjmuje postać:

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6 \cdot b_c \cdot d_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{s'}{2 \cdot b_c} \right) \cdot \left(1 - \frac{s'}{2 \cdot d_c} \right)}{(1 - \rho_{cc})} \quad (5.19)$$

W celu określenia wartości naprężeń poprzecznych powstające na styku betonu i strzemion wprowadzono zależności na stopień zbrojenia poprzecznego w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach ρ_x i ρ_y :

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{d_c \cdot s}, \quad (5.20)$$

$$\rho_y = \frac{A_{sy}}{b_c \cdot s}, \quad (5.21)$$

gdzie:

A_{sx} i A_{sy} – odpowiednio: powierzchnia prętów zbrojenia poprzecznego w kierunku x i y.

Podobnie jak poprzednio, korzystając z równowagi sił w przekroju poprzecznym wyznaczono naprężenia poprzeczne w kierunku osi x i y, co zapisano wzorami:

$$f_{lx} = \frac{A_{sx}}{d_c \cdot s} \cdot f_{yh} = \rho_x \cdot f_{yh}, \quad (5.22)$$

$$f_{ly} = \frac{A_{sy}}{b_c \cdot s} \cdot f_{yh} = \rho_y \cdot f_{yh}, \quad (5.23)$$

gdzie:

f_{yh} – granica plastyczności prętów zbrojenia poprzecznego,

Ostatecznie wzory na efektywne naprężenia poprzeczne f'_{lx} i f'_{ly} powstające na styku betonu i strzemion przyjmują postać:

$$f'_{lx} = k_e \cdot \rho_x \cdot f_{yh}, \quad (5.24)$$

$$f'_{ly} = k_e \cdot \rho_y \cdot f_{yh}. \quad (5.25)$$

Do opisu wytrzymałości betonu w trójosiowym stanie naprężeń przyjęto zmodyfikowany model zniszczenia podany przez Willama i Warnke'a (1975 r.) [31] dla wieloosiowego stanu naprężeń. Obliczeniowa powierzchnia graniczna bazuje na badaniach trójosiowego stanu naprężeń wykonanych przez Schickerta i Winklera (1977 r.) [31].

Ogólne rozwiązanie kryterium zniszczenia w wieloosiowym stanie naprężeń dla dwóch naprężeń poprzecznych f'_{11} i f'_{12} przedstawiono na rysunku 5.4.

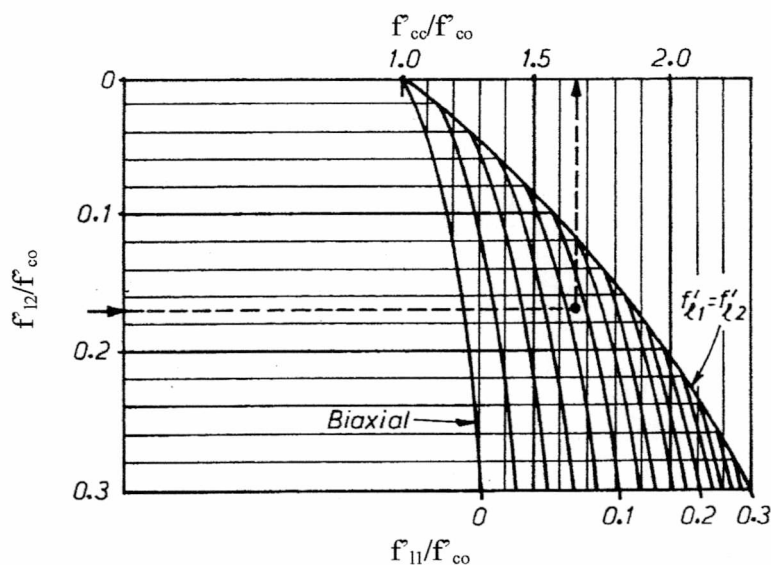
Wytrzymałość betonu w trójosiowym stanie ściskania dla rdzenia z równomiernymi naprężeniami bocznymi f'_1 , wywieranymi przez uzwojenie spiralne lub okrągłe strzemiona,

została opisana wzorem:

$$f'_{cc} = f'_{co} \cdot \left(-1,254 + 2,254 \cdot \sqrt{1 + \frac{7,94 \cdot f'_1}{f'_{co}}} - 2 \cdot \frac{f'_1}{f'_{co}} \right), \quad (5.26)$$

gdzie:

f'_{co} – wytrzymałość betonu w jednoosiowym stanie naprężeń.



Rys. 5.4. Zależność pomiędzy naprężeniami bocznymi a wytrzymałością betonu w trójosiowym stanie naprężeń [31]

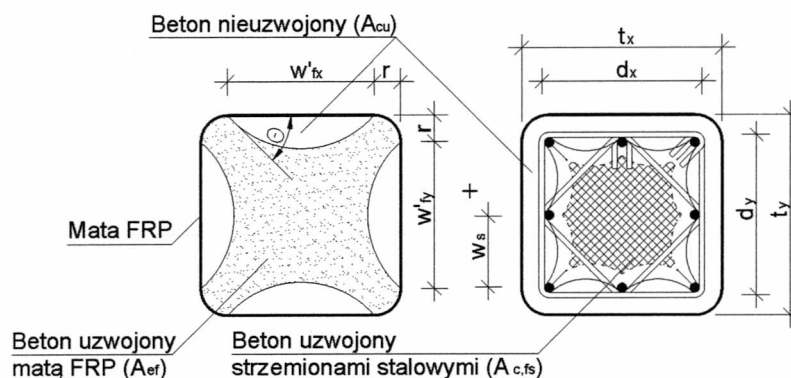
W pracy dokonano dokładnego przedstawienia metody zaproponowanej przez Mandera i innych, ponieważ przy omawianiu modeli teoretycznych do wymiarowania elementów ściskanych wzmacnianych materiałami kompozytowymi, a także przy własnej propozycji modyfikacji jednego z algorytmów, stosowane będą odwołania do podanych zależności.

5.3. Modele teoretyczne do wymiarowania słupów wzmacnianych materiałami FRP

5.3.1. Model Wanga

Jedną z propozycji wymiarowania ściskanych słupów żelbetowych wzmacnianych materiałami FRP opracował Wang Yung-Chih [50]. Podaną przez siebie procedurę opracował na podstawie własnych badań doświadczalnych przeprowadzonych w latach 1996-2000 w University of Canterbury w Nowej Zelandii. Model ten opiera się również na wynikach badań Priestley'a i Seible'a [40]. Metoda została zweryfikowana doświadczalnie w Technical

University of Gent w Belgii.



Rys. 5.5. Podwójny efekt wzmocnienia w słupie o przekroju prostokątnym [50]

Na rysunku 5.5 przedstawiono przekrój poprzeczny przez czworokątny słup żelbetowy wzmocniony poprzecznie płaszczem FRP. Jak widać na rysunku 5.5 w wyniku wzmocnienia zewnętrznym płaszczem FRP w przekroju poprzecznym powstają trzy charakterystyczne rdzenie betonu tj.: nieobjętego uzwojeniem zewnętrznym (A_{cu}), objętego poprzez zewnętrzne wzmocnienie (A_{cf}) oraz objętego zewnętrznym płaszczem FRP i wewnętrznymi strzemionami stalowymi ($A_{c,fs}$).

Wang przyjął ogólny wzór na nośność przekroju poprzecznego ściskanego słupa żelbetowego wzmocnionego zewnętrznym płaszczem FRP w następującej postaci:

$$N = N_c + N_s, \quad (5.27)$$

$$N_s = f_s \cdot A_s, \quad (5.28)$$

$$N_c = N_{c0} + N_{cc,f} + N_{cc,fs} = f_{co} \cdot A_{cu} + f_{cc,f} \cdot A_{cf} + f_{cc,fs} \cdot A_{c,fs}, \quad (5.29)$$

gdzie:

N_c – siła podłużna przenoszona przez przekrój poprzeczny betonu,

N_s – siła podłużna przenoszona przez przekrój poprzeczny stali,

Model ten został opracowany dla elementów krępych bez uwzględnienia wpływu smukłości na nośność elementu. Opierając się na badaniach doświadczalnych, własnych i obcych, Wang przyjął następujące założenia do opisanego modelu:

- maksymalne odkształcenia podłużne w elementach ściskanych osiowo wzmocnionych płaszczem FRP osiągają wartość 10‰,
- przy założeniu współczynnika Poissona $\nu=0,50$ maksymalne odkształcenia poprzeczne osiągają wartość 5‰,
- składowa nośności przekroju pochodząca od betonu N_{cn} jest sumą sił przenoszonych przez

trzy przekroje betonowych rdzeni pokazane na rysunku 5.5,

- wytrzymałość na ściskanie betonu nieobjętego płaszczem FRP osiąga wartość $f_{co}=0,3f_c$.

Przyjmując powyższe założenia wzór na nośność przekroju poprzecznego osiowo ściskanego słupa żelbetowego wzmocnionego zewnętrznym płaszczem FRP według teorii Wanga ma postać:

$$N_n = N_{cn} + N_{sn}, \quad (5.30)$$

$$N_{sn} = f_{ys} \cdot A_s, \quad (5.31)$$

$$N_{cn} = 0,3 \cdot f'_c \cdot A_{cu} + f'_{cc,f} \cdot A_{cf} + f'_{cc,fs} \cdot A_{c,fs}, \quad (5.32)$$

gdzie:

A_{cu} i f'_c – odpowiednio: powierzchnia i wytrzymałość na ściskanie przekroju rdzenia betonu nieobjętego płaszczem FRP (walcowa wytrzymałość betonu na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężeń),

A_{cf} i $f'_{cc,f}$ – odpowiednio: powierzchnia i wytrzymałość na ściskanie przekroju rdzenia betonu objętego płaszczem FRP,

$A_{c,fs}$ i $f'_{cc,fs}$ – odpowiednio: powierzchnia i wytrzymałość na ściskanie przekroju rdzenia betonu objętego płaszczem FRP i strzemionami stalowymi,

A_s i f_{ys} – odpowiednio: powierzchnia i granica plastyczności stali zbrojeniowej.

Występująca we wzorze (5.32) składowa od nośności przekroju rdzenia betonu objętego zewnętrznym płaszczem FRP i wewnętrznymi strzemionami stalowymi może zostać pominięta, ponieważ daje ona znikomą wartość wzrostu nośności.

Powierzchnię przekroju rdzenia betonowego nieobjętego płaszczem FRP można obliczyć, korzystając z zależności:

$$A_{cu} = A_{cc,f} - A_{e,f}, \quad (5.33)$$

gdzie:

$A_{cc,f}$ – powierzchnia rdzenia betonu objętego płaszczem FRP,

$A_{e,f}$ – efektywna powierzchnia rdzenia betonu objętego płaszczem FRP.

Dla przekroju prostokątnego:

$$A_{cc,f} = t_x \cdot t_y - A_s - (4 - \pi) \cdot r^2, \quad (5.34)$$

$$A_{ef} = t_x \cdot t_y - \frac{w'_{fx}{}^2 + w'_{fy}{}^2}{3} \tan \Theta - A_s - (4 - \pi) \cdot r^2. \quad (5.35)$$

Pod warunkiem, że:

$$w'_{fx} < 2 \cdot w'_{fy} \text{ – jeżeli } w'_{fx} > w'_{fy}, \quad (5.36)$$

$$w'_{fy} < 2 \cdot w'_{fx} \text{ – jeżeli } w'_{fy} > w'_{fx}, \quad (5.37)$$

gdzie:

t_x i t_y – wymiary przekroju poprzecznego elementu,

r – promień wyokrąglenia naroży,

θ – kąt nachylenia stycznych do paraboli; według rysunku 5.5 kąt θ należy przyjmować równy 45° .

Dla przekroju okrągłego:

$$A_{cc,f} = A_{ef} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} - A_s, \quad (5.38)$$

gdzie:

D – średnica przekroju poprzecznego elementu.

Do określenia wytrzymałości betonu rdzenia w trójosiowym stanie naprężeń Wang wykorzystał zaprezentowaną w punkcie 5.2.2 teorię Mandera, Priestley'a i Parka [31]. Dla przekroju prostokątnego propozycja ta wyraża się wzorem szczegółowym w postaci:

$$f'_{cc} = k_c \cdot f'_c, \quad (5.39)$$

gdzie:

f'_{cc} – wytrzymałość betonu w trójosiowym stanie naprężeń,

f'_c – walcowa wytrzymałość betonu na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężeń,

k_c – współczynnik wzmocnienia wytrzymałości,

dla przekroju prostokątnego – $k_c = \alpha_1 \cdot \alpha_2$.

$$\alpha_1 = 1.25 \cdot \left[1.8 \cdot \sqrt{1 + 7.94 \cdot \frac{F_1}{f'_c}} - 1.6 \cdot \frac{F_1}{f'_c} - 1 \right], \quad (5.40)$$

$$\alpha_2 = \left[1.4 \cdot \frac{f_1}{F_1} - 0.6 \cdot \left(\frac{f_1}{F_1} \right)^2 - 0.8 \right] \cdot \sqrt{\frac{F_1}{f'_c}} + 1, \quad (5.41)$$

gdzie:

F_l – maksymalne naprężenie poprzeczne wywierane na betonowy rdzeń przez zewnętrzny płaszcz FRP,

f_l – minimalne naprężenie poprzeczne wywierane na betonowy rdzeń przez zewnętrzny płaszcz FRP.

Zależności na naprężenia poprzeczne wywierane na betonowy rdzeń, przez zewnętrzny sprężysty płaszcz, dla przekroju prostokątnego w kierunku osi x i y wyrażają się następującymi wzorami (por. ze wzorami 5.22 i 5.23):

$$f_{l,fx} = \rho_{fx} \cdot f_f = 2 \cdot \frac{t_f}{t_y}, \quad (5.42)$$

$$f_{l,fy} = \rho_{fy} \cdot f_f = 2 \cdot \frac{t_f}{t_x}. \quad (5.43)$$

gdzie:

f_f – wytrzymałość na rozciąganie maty FRP,

ρ_{fx} i ρ_{fy} – intensywności wzmocnienia,

t_f – nominalna grubość płaszcza FRP,

t_x i t_y – wymiary przekroju poprzecznego słupa.

Natomiast dla przekroju okrągłego zależność na naprężenie poprzeczne wywierane na betonowy rdzeń, przez zewnętrzny sprężysty płaszcz ma postać:

$$f_{l,f} = \rho_f \cdot f_f = 4 \cdot \frac{t_f}{D}. \quad (5.44)$$

Według teorii Wanga, która zakłada maksymalne odkształcenia poprzeczne o wartość 5‰, wytrzymałość maty FRP na rozciąganie wynosi $0,005E_f$. Gdzie E_f jest modułem sprężystości maty z włókiem FRP.

5.3.2. Model Campione i Miraglia

Model według propozycji Campione i Miraglia [5] opracowany został na podstawie własnych badań autorów oraz wyników eksperymentów innych badaczy. Do weryfikacji modelu wykorzystane zostały między innymi obszerne badania Rochette i Labossière [43], które zostały przytoczone w rozdziale drugim.

Wzór na nośność przekroju poprzecznego ściskanego słupa żelbetowego wzmocnionego zewnętrznym płaszczem FRP według tej teorii składa się z trzech członów: nośności przekroju w jednoosiowym stanie naprężeń, nośności podłużnych prętów zbrojeniowych oraz części wynikającej ze wzmocnienia nośności przekroju poprzecznym wzmocnieniem i występowania trójosiowego stanu naprężeń:

$$N_u = f'_c \cdot A_c + f_y \cdot A_s + k_1 \cdot k_e \cdot f_l \cdot A_c, \quad (5.45)$$

gdzie:

f'_c – walcowa wytrzymałość betonu na ściskanie w jednoosiowym stanie naprężeń,

A_c – powierzchnia betonu objętego płaszczem FRP,

A_s i f_y – odpowiednio: powierzchnia i granica plastyczności prętów zbrojenia podłużnego,

k_e – współczynnik efektywności uzwojenia betonu płaszczem FRP,

k_1 – współczynnik wzmocnienia wytrzymałości zależny od właściwości materiałowych betonu oraz wielkości naprężeń bocznych,

f_l – naprężenie poprzeczne wywierane na betonowy rdzeń przez zewnętrzny płaszcz FRP.

Podobnie jak w poprzednim modelu przyjęto, że przyrost nośności słupów wzmocnionych poprzecznie w stosunku do elementów bez wzmocnienia, związany jest z pracą betonu w trójosiowym stanie naprężeń, co zapisano w postaci następującego wzoru ogólnego [31]:

$$f'_{cc} = f'_c + k_1 \cdot f'_l, \quad (5.46)$$

gdzie:

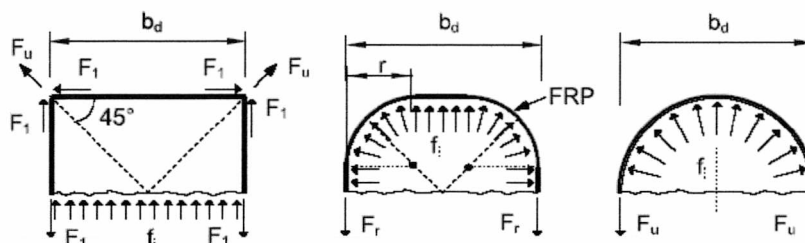
f'_{cc} – wytrzymałość betonu w trójosiowym stanie naprężeń,

f'_l – naprężenie poprzeczne powstające na styku betonu i uzwojenia uwzględniające nieciągłość przyłożenia obciążenia bocznego.

Autorzy proponują, aby współczynnik wzmocnienia wytrzymałości zależny od właściwości materiałowych betonu oraz wielkości naprężeń bocznych przyjmować $k_1=2.0$.

Na podstawie równowagi sił w przekroju poprzecznym, przedstawionych na rysunku 5.6, wyznaczono naprężenia poprzeczne powstające na styku betonu i uzwojenia zewnętrznego dla różnych przekrojów poprzecznych. Założono, że maksymalne naprężenia w

kompozycie osiągają wartość jego wytrzymałości na rozciąganie.



Rys. 5.6. Naprężenie poprzeczne dla różnych wzmocnionych przekrojów poprzecznych [5]

Przekrój okrągły
$$f_1 = \frac{2 \cdot t \cdot f_u}{b_d}, \quad (5.47)$$

Przekrój kwadratowy z wyokrąglonymi narożami
$$f_1 = \frac{2 \cdot t}{b_d} \cdot f_r = \frac{2 \cdot t}{b_d} \cdot f_u \left[\left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot k_i \right) \cdot \frac{2 \cdot r}{b_d} + k_i \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \right], \quad (5.48)$$

Przekrój kwadratowy
$$f_1 = \frac{\sqrt{2} \cdot t \cdot f_u}{b_d} \cdot k_i, \quad (5.49)$$

gdzie:

k_i – współczynnik poprawkowy otrzymany z analizy badań [43]; $k_i=0,2121$,

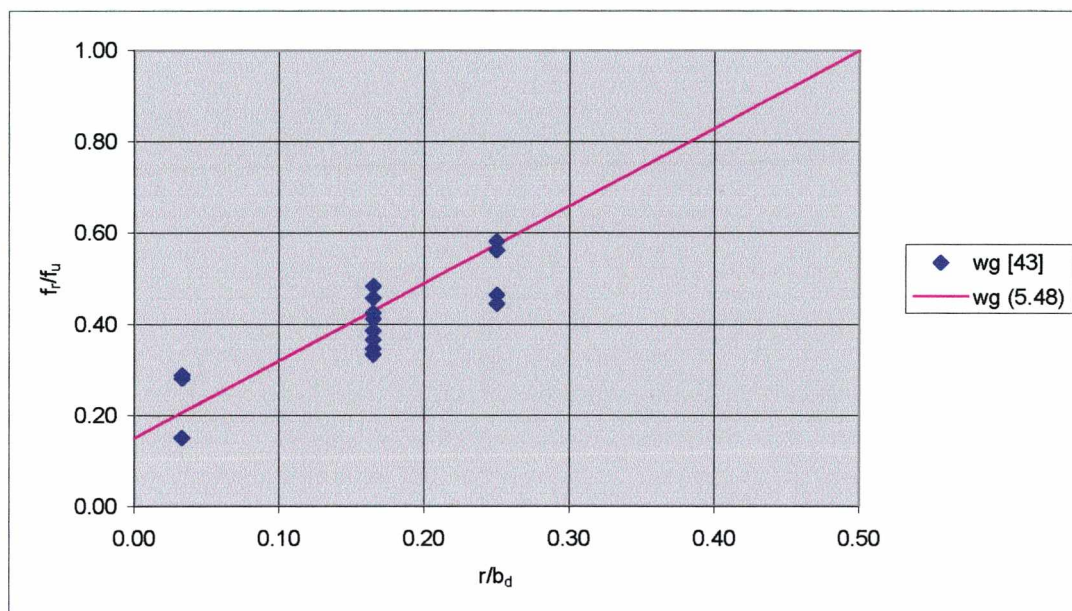
f_u – wytrzymałość na rozciąganie maty FRP,

t – nominalna grubość płaszcza FRP.

Zasada równowagi sił w przekroju poprzecznym, stosowana do wyznaczania naprężeń poprzecznych powstających na styku betonu i uzwojenia zewnętrznego zakłada, że zniszczenie przekroju nastąpi w chwili osiągnięcia przez płaszcz kompozytowy wytrzymałości na rozciąganie. Na podstawie badań wykonanych przez Rochette i Labossière [43], którzy dokonywali pomiarów odkształceń poprzecznych maty w narożach próbek czworokątnych stwierdzono, że w wyniku koncentracji naprężeń w pobliżu naroży mata nie osiąga swojej wytrzymałości na rozciąganie. W związku z tym konieczne było wprowadzenie współczynnika poprawkowego k_i .

Na rysunku 5.7 przedstawiono względny f_r/f_u przyrost naprężeń f_r w macie kompozytowej w stosunku do wytrzymałości maty na rozciąganie f_u w zależności od stosunku r/b_d promienia wyokrąglenia naroży do wymiaru przekroju poprzecznego elementu, na podstawie badań Rochette i Labossière [43] (program tych badań zamieszczono w tablicy 2.4, natomiast zestawienie wyników w załączniku nr 1 w tablicy Z1.1). Na rysunku 5.7 linią fioletową zaznaczono wyniki obliczeń teoretycznych otrzymane z równania (5.48) z uwzględnieniem, proponowanego przez Campione i Miraglia, współczynnika poprawkowego

$k_i=0,2121$. W tablicy 5.1 zestawiono komplet danych, które posłużyły do sporządzenia wykresu pokazanego na rysunku 5.7.



Rys. 5.7. Względny przyrost naprężeń w macie FRP w zależności od stosunku r/b_d [43]

Tablica 5.1. Względny przyrost naprężeń w macie FRP w zależności od stosunku r/b_d [43]

Lp.	Oznaczenia próbek	Badania doświadczalne						Obliczenia teoretyczne według wzoru (5.48)	
		b	r	r/b	$\varepsilon_{f,ult}$	f_r	f_r/f_u	f_r	f_r/f_u
		[mm]	[mm]		[%]	[MPa]		[MPa]	
1	S5-C3	152	5	0,033	0,23	190,21	0,150	260,46	0,206
2	S25-C3	152	25	0,164	0,56	463,12	0,366	543,43	0,430
3	S25-C3	152	25	0,164	0,63	521,01	0,412	543,53	0,430
4	S38-C3	152	38	0,250	0,71	587,17	0,464	727,36	0,575
5	S38-C3	152	38	0,250	1,61	—	—	727,36	0,575
6	S5-C5	152	5	0,033	0,44	363,88	0,288	260,46	0,206
7	S25-C4	152	25	0,164	0,59	487,93	0,386	543,43	0,430
8	S25-C5	152	25	0,164	0,51	421,77	0,333	543,53	0,430
9	S25-C4	152	25	0,164	0,70	578,90	0,458	543,53	0,430
10	S25-C5	152	25	0,164	0,65	537,55	0,425	543,53	0,430
11	S38-C4	152	38	0,250	0,89	736,03	0,582	727,36	0,575
12	S38-C5	152	38	0,250	0,86	711,22	0,562	727,36	0,575
13	R25-C3	152	25	0,164	0,74	611,98	0,484	543,53	0,430
14	R38-C3	152	38	0,250	0,68	562,36	0,445	727,36	0,575
15	R5-C5	152	5	0,033	0,43	355,61	0,281	260,46	0,206
16	R25-C4	152	25	0,164	0,53	438,31	0,346	543,53	0,430

gdzie:

$\varepsilon_{f,ult}$ – odkształcenia graniczne kompozytu, mierzone o narożach próbek.

Uwzględnienie nieciągłości przyłożenia obciążenia bocznego dokonano poprzez

wprowadzenie współczynnika k_e wyrażający stosunek efektywnego przekroju rdzenia do przekroju rdzenia betonowego pomniejszoną o powierzchnię zbrojenia podłużnego, co zapisano w następującej postaci:

$$f'_1 = k_e \cdot f_1, \quad (5.50)$$

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} = \frac{A_e}{A_c \cdot (1 - \rho_{cc})} = \frac{[b_d^2 - (4 - \pi) \cdot r^2] - \frac{2}{3} \cdot (b_d - 2 \cdot r)^2 - A_s}{b_d^2 - (4 - \pi) \cdot r^2 - A_s}, \quad (5.51)$$

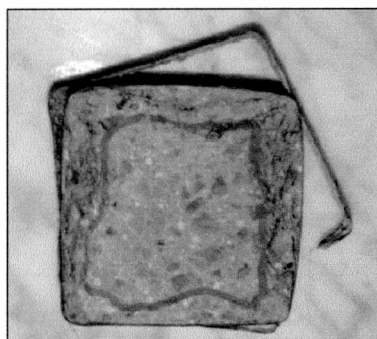
gdzie:

A_{cc} – przekrój rdzenia betonowego pomniejszona o powierzchnię zbrojenia podłużnego,

A_e – efektywna powierzchnia rdzenia betonu ograniczonego płaszczem FRP,

b_d – wymiar przekroju poprzecznego elementu kwadratowego (dla okręgu – średnica),

r – promień wyokrąglenia naroży.



Rys. 5.8. Efektywna powierzchnia rdzenia betonu uzwojonego płaszczem FRP [5]

5.3.3. Porównanie i ocena modeli

Zaprezentowane powyżej dwa modele teoretyczne do wymiarowania ściskanych elementów żelbetowych wzmocnianych zewnętrznym uzwojeniem z maty kompozytowej nie uwzględniają wpływu doklejenia podłużnych odcinków taśm FRP oraz sposobu skonstruowania wzmocnienia poprzecznego na nośność tego typu elementów.

Na podstawie przedstawionego w rozdziale drugim przeglądu badań doświadczalnych [m.in. 7, 14, 43], których celem była ocena wpływ stopnia zbrojenia poprzecznego na nośność elementów, wydaje się dużym uogólnieniem przyjęcie przez Wanga, że zniszczenie osiowo ściskanych próbek owiniętych płaszczem FRP jest osiągane przy odkształceniach podłużnych betonu równych $\varepsilon_c = 10\%$. Jednocześnie przyjęcie, że maksymalne odkształcenia poprzeczne w płaszczu kompozytowym osiągają wartość 5%, nie uwzględnia, że odkształcenia przy zniszczeniu maty doklejonej do betonu są zazwyczaj niższe od wartości uzyskiwanych

podczas próby rozciągania materiałów FRP. Ponadto, pominięty został w tym modelu wpływ koncentracji naprężeń w narożach elementów o przekroju czworokątnym.

W obu modelach założono, że wzmocnienie FRP jest owinięte i przyklejone na całej powierzchni bocznej słupa. W związku z tym, pominięto przypadek nieciągłości wzmocnienia poprzecznego matą, co jest przedmiotem zainteresowania autora. Jak wykazano w rozdziale czwartym, na podstawie własnych wyników badań, dla elementów czworokątnych bez znaczącego wyokrąglonych naroży, poddanym ściskaniu osiowemu sposób skonstruowania zewnętrznego wzmocnienia poprzecznego (opaski lub ciągły płaszcz) nie ma wpływu na wartość nośności granicznej.

5.4. Propozycja własna modyfikacji modelu Campione i Miraglia

Na podstawie własnych badań doświadczalnych opisanych w rozdziale czwartym zaproponowano wprowadzenie następujących modyfikacji w modelu Campione i Miraglia:

- dodanie do wzoru na nośność (5.45) członu wyrażającego wzrost nośności z uwagi na obecność podłużnych odcinków taśm z włókien węglowych,
- wprowadzenie ogólnych zależności na naprężenia poprzeczne powstające na styku betonu i uzwojenia zewnętrznego przekroju czworokątnego,
- wprowadzenie do wzoru na współczynnik efektywności uzwojenia betonu k_e (5.51) modyfikacji, uwzględniających nieciągłości wzmocnienia poprzecznego w postaci obejm zewnętrznych.

Modyfikacja wzoru na nośność

Zaprezentowane własne badania doświadczalne pokazują, że w przypadku elementów o przekroju czworokątnym wzmocnianych poprzez przyklejanie zewnętrzne podłużnych taśm z włókien węglowych następuje przyrost nośności, który należy przypisać prawie wyłącznie podłużnemu zbrojeniu kompozytowemu. Istotną rolę w tym przypadku spełniają poprzeczne opaski lub płaszcz kompozytowy, których zadanie polega na opóźnieniu procesu odspajania się kompozytu usytuowanego wzdłuż słupa. Im później to nastąpi, tym większy będzie przyrost nośności.

Jak już wcześniej wspomniano we wnioskach z badań doświadczalnych wartość przyrostu nośności elementów zależy od intensywności wzmocnienia podłużnego. W porównaniu ze słupami żelbetowymi bez wzmocnienia, przyrost średnich odkształceń

granicznych ściskania jest niewielki, a więc beton i pręty zbrojenia podłużnego przenoszą właściwie tyle samo, co słup żelbetowy. Wynika stąd, że graniczne odkształcenia podłużne badanych elementów w bardzo małym stopniu zależą od obecności podłużnego zbrojenia kompozytowego.

W wyniku przeprowadzonych analiz autor proponuje modyfikację wzoru określającą nośność N_u osiowo ściskanych słupów żelbetowych wzmacnianych taśmami i matami z włókien węglowych w postaci:

$$N_u = f'_c \cdot A_c + f_y \cdot A_s + k_l \cdot k_e \cdot f_l \cdot A_c + \underline{\underline{\epsilon_L \cdot E_L \cdot A_L}}, \quad (5.52)$$

gdzie:

ϵ_L - podłużne odkształcenia graniczne przekroju poprzecznego elementu wzmocnionego podłużnymi odcinkami taśm z włókien węglowych oraz poprzecznym zbrojeniem z maty z włókien węglowych,

E_L - moduł sprężystości taśm CFRP,

A_L - powierzchnia przekroju poprzecznego taśm CFRP.

W tabelicy 5.2 zestawiono wartości podłużnych odkształceń granicznych uzyskane podczas własnych badań doświadczalnych. Jak widać dla elementów wzmacnianych taśmami i matami CFRP wartości te mieszczą się w przedziale 2,19-2,79 ‰. Autor proponuje, aby do weryfikacji zaproponowanych zmian przyjąć stałą wartość podłużnych odkształceń granicznych przekroju poprzecznego, równą $\epsilon_v=2,20\text{‰}$.

Tablica 5.2. Podłużne odkształcenia graniczne przekroju

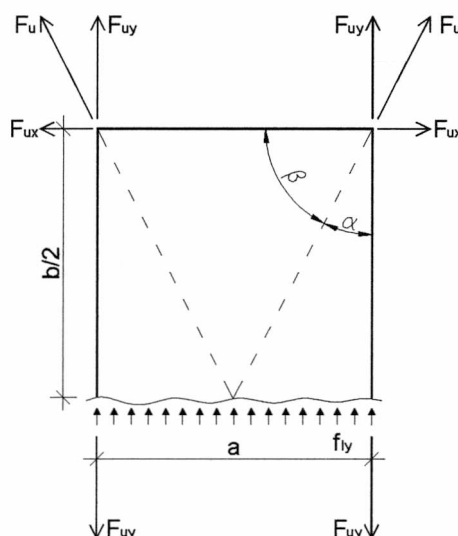
Lp.	Etap badań	Oznaczenie słupa	$\epsilon_{cvm,lim}^*$ [‰]	$\epsilon_{cvm,lim}^{**}$ [‰]
1	IIa	S1a	2,44	—
2		S1b	2,35	—
3		S4b	—	2,79
4		S5b	—	2,77
5		S6b	—	2,66
6	IIb	Sb-1	2,41	—
7		Sb-2	2,38	—
8		St+m-1	—	2,34
9		St+m-2	—	2,25
10		St+m-3	—	2,28
11	III	Sbw_0	2,15	—
12		SwzA_0	—	2,19
13		SwzB_0	—	2,40

* - elementy kontrolne

** - elementy wzmocnione

Naprężenia poprzeczne

Kolejną modyfikacją, proponowaną do uwzględnienia jest zastąpienie zależności (5.48) ogólnymi wzorami na naprężenia poprzeczne powstające na styku betonu i uzwojenia zewnętrznego przekroju czworokątnego – kwadratowego i prostokątnego.



Rys. 5.9. Schemat sił działających o przekroju czworokątnym

Siły rozciągające w zewnętrznym płaszczu kompozytowym F_u są wywołane parciem normalnym f_l , powstającym na styku betonu i maty opasającej, co zapisano w postaci równań równowagi sił w przekroju poprzecznym, pokazanym na rysunku 5.9:

$$F_{ux} = \frac{1}{2} \cdot f_{ly} \cdot a, \quad F_{ux} = F_u \cdot \cos\beta = f_u \cdot t \cdot \cos\beta, \quad (5.53)$$

$$F_{uy} = \frac{1}{2} \cdot f_{lx} \cdot b, \quad F_{uy} = F_u \cdot \cos\alpha = f_u \cdot t \cdot \cos\alpha, \quad (5.54)$$

gdzie:

f_{lx} i f_{ly} – odpowiednio: naprężenia poprzeczne w kierunku osi x i y

f_u – wytrzymałość na rozciąganie maty FRP,

t – nominalna grubość płaszcza FRP.

a i b – wymiary przekroju poprzecznego.

Po przyrównaniu odpowiednio: równań (5.53) i (5.54) otrzymano:

$$f_{ly} = \frac{2 \cdot f_u \cdot t \cdot \cos\beta}{a}, \quad (5.55)$$

$$f_{lx} = \frac{2 \cdot f_u \cdot t \cdot \cos\alpha}{b}. \quad (5.56)$$

W dalszej kolejności, po podstawieniu cosinusów kątów α i β oraz uwzględnieniu współczynnika poprawkowego k_i otrzymano:

$$f_{ly} = \frac{2 \cdot f_u \cdot t}{\sqrt{(a^2 + b^2)}} \cdot k_i, \quad (5.57)$$

$$f_{lx} = \frac{2 \cdot f_u \cdot t}{\sqrt{(a^2 + b^2)}} \cdot k_i. \quad (5.58)$$

Współczynnik efektywności uzwojenia betonu k_e

W dalszej kolejności autor proponuje wprowadzenie do wzoru na współczynnik efektywności uzwojenia betonu k_e następujących modyfikacji:

- uwzględnienie nieciągłości wzmocnienia poprzecznego w postaci obejm zewnętrznych,
- pomniejszenie przekroju rdzenia betonowego A_{cc} i efektywnej powierzchni rdzenia betonowego A_e o powierzchnię zbrojenia podłużnego,
- uwzględnienie promieni wyokrąglenia naroży w A_{cc} i A_e .

W tym celu wykorzystano zależności (5.18) i (5.51), dzięki czemu uzyskano ostatecznie wzór na stosunek efektywnego przekroju rdzenia A_e do przekroju rdzenia betonowego A_{cc} w następującej postaci:

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} = \frac{\left(a \cdot b - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6} - (4 - \pi) \cdot r^2 - A_s \right) \cdot \left(1 - \frac{s'}{2 \cdot a} \right) \cdot \left(1 - \frac{s'}{2 \cdot b} \right)}{(a \cdot b - (4 - \pi) \cdot r^2 - A_s)} \quad (5.59)$$

gdzie:

- a i b – wymiar przekroju poprzecznego,
- r – promień wyokrąglenia naroży,
- s' – rozstaw w świetle między opaskami z maty kompozytowej,
- A_s – powierzchnia prętów zbrojenia podłużnego.

Sprawdzenie zaproponowanych zmian

W celu zweryfikowania zaproponowanych modyfikacji, będących próbą stworzenia algorytmu do wymiarowania słupów żelbetowych wzmocnianych poprzez doklejanie zewnętrznego zbrojenia kompozytowego dokonano ich sprawdzenia. W pierwszej kolejności posługując się wynikami badań doświadczalnych Rochette i Labossière [43] (por. tablice 2.4 i Z1.1) oraz Kamińskiej i Ignatowskiego [14] (por. tablice 2.5, 2.6, 2.7, Z1.2 i Z1.3), które szczegółowo omówiono w rozdziale drugim, sprawdzono wartości wytrzymałości betonu w

trójosiowym stanie naprężeń. Obliczeń teoretycznych dokonano w oparciu o algorytm podany w punkcie 5.3.2 wraz z modyfikacjami w postaci zależności: (5.52), (5.57), (5.58) i (5.59) zaproponowanymi w punkcie 5.4 pracy. Procedura obliczeniowa została zapisana w arkuszu kalkulacyjnym, który po wprowadzeniu danych zestawionych w tabelicy 5.3, oblicza wytrzymałość betonu f'_{cc} oraz nośność graniczną elementów na ściskanie. Symbole występujące w tabelicy 5.3 wyjaśniono powyżej.

Tabela 5.3. Parametry badanych próbek według [14, 43]

Lp.	Oznaczenia próbek	Źródło	a [mm]	b [mm]	r [mm]	$f_{c, cyl}$ [MPa]	A_s [mm ²]	f_y [MPa]	A_L [mm ²]	E_L [GPa]	t [mm]	E_w [GPa]	f_u [MPa]	s' [mm]
1	S5-C3	[43]	152	152	5	42,0	—	—	—	—	0,90	82,7	1265	—
2	S25-C3		152	152	25	42,0	—	—	—	—	0,90	82,7	1265	—
3	S25-C3		152	152	25	42,0	—	—	—	—	0,90	82,7	1265	—
4	S38-C3		152	152	38	42,0	—	—	—	—	0,90	82,7	1265	—
5	S38-C3		152	152	38	42,0	—	—	—	—	0,90	82,7	1265	—
6	C100-C2		100	100	50	42,0	—	—	—	—	0,60	82,7	1265	—
7	C100-C2		100	100	50	42,0	—	—	—	—	0,60	82,7	1265	—
8	C100-C2		100	100	50	42,0	—	—	—	—	0,60	82,7	1265	—
9	S5-C5		152	152	5	43,9	—	—	—	—	1,50	82,7	1265	—
10	S25-C4		152	152	25	43,9	—	—	—	—	1,20	82,7	1265	—
11	S25-C5		152	152	25	43,9	—	—	—	—	1,50	82,7	1265	—
12	S25-C4		152	152	25	35,8	—	—	—	—	1,20	82,7	1265	—
13	S25-C5		152	152	25	35,8	—	—	—	—	1,50	82,7	1265	—
14	S38-C4		152	152	38	35,8	—	—	—	—	1,20	82,7	1265	—
15	S38-C5		152	152	38	35,8	—	—	—	—	1,50	82,7	1265	—
16	R25-C3		152	203	25	42,0	—	—	—	—	0,90	82,7	1265	—
17	R38-C3		152	203	38	42,0	—	—	—	—	0,90	82,7	1265	—
18	R5-C5		152	203	5	43,9	—	—	—	—	1,50	82,7	1265	—
19	R25-C4		152	203	25	43,9	—	—	—	—	1,20	82,7	1265	—
20	W-1m1	[14]	150	150	75	29,9	—	—	—	—	0,13	230	3500	—
21	W-1m2		150	150	75	29,9	—	—	—	—	0,13	230	3500	—
22	W-2m1		150	150	75	29,9	—	—	—	—	0,26	230	3500	—
23	W-2m2		150	150	75	29,9	—	—	—	—	0,26	230	3500	—
24	W-2m3		150	150	75	29,9	—	—	—	—	0,26	230	3500	—
25	W-3m		150	150	75	29,9	—	—	—	—	0,39	230	3500	—
26	K-2m1		100	100	10	32,3	—	—	—	—	0,26	230	3500	—
27	K-2m2		100	100	10	32,3	—	—	—	—	0,26	230	3500	—
28	P-1m2		105	200	10	28,1	—	—	—	—	0,13	230	3500	—
29	P-2m2		105	200	10	28,1	—	—	—	—	0,26	230	3500	—
30	P-3m2		105	200	10	28,1	—	—	—	—	0,39	230	3500	—

Porównanie wartości wytrzymałości betonu w trójosiowym stanie naprężeń f'_{cc} otrzymanych z obliczeń teoretycznych ze wzoru (5.46) z wartościami doświadczalnymi, prezentowanymi w pracach [14, 43], przedstawiono w tabelicy 5.4 oraz w formie graficznej na rysunku 5.10.

Tablica 5.4. Wyniki badań i obliczeń teoretycznych

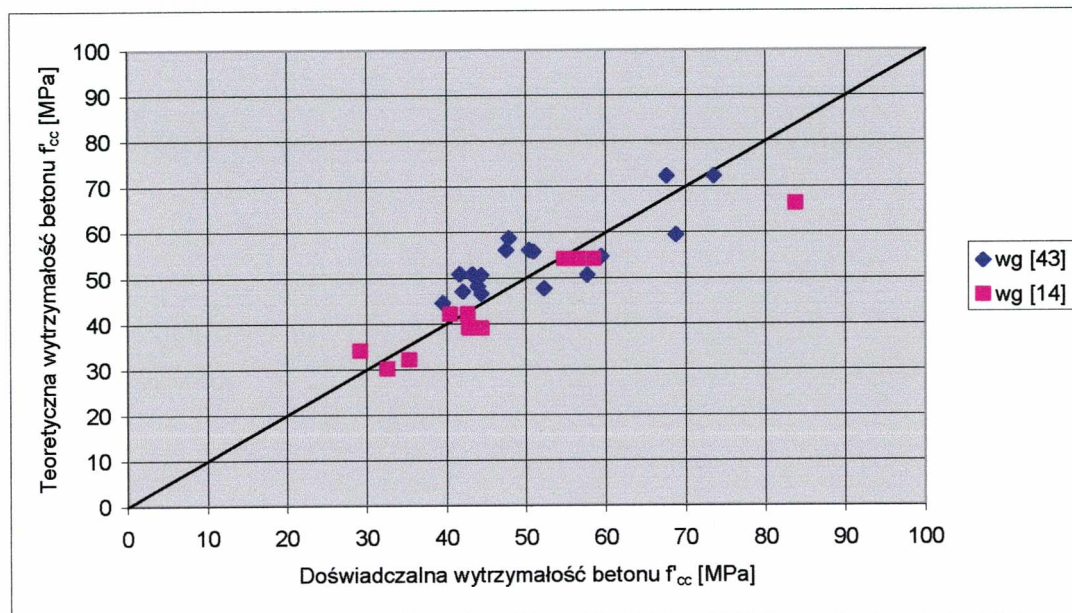
Lp.	Oznaczenia próbek	Źródło	Maksymalne naprężenia podłużne w betonie	
			Badania	Teoria
			[MPa]	[MPa]
1	S5-C3	[43]	39,48	44,58
2	S25-C3		41,58	50,91
3	S25-C3		43,26	50,91
4	S38-C3		47,46	56,19
5	S38-C3		50,40	56,19
6	C100-C2		73,50	72,36
7	C100-C2		73,50	72,36
8	C100-C2		67,62	72,36
9	S5-C5		43,90	48,19
10	S25-C4		50,92	55,79
11	S25-C5		47,85	58,76
12	S25-C4		52,27	47,69
13	S25-C5		57,64	50,66
14	S38-C4		59,43	54,72
15	S38-C5		68,74	59,46
16	R25-C3		42,00	47,06
17	R38-C3		43,68	49,91
18	R5-C5		44,34	46,62
19	R25-C4		44,34	50,65
20	W-1m1	[14]	42,60	42,03
21	W-1m2		40,40	42,03
22	W-2m1		58,50	54,17
23	W-2m2		54,80	54,17
24	W-2m3		56,50	54,17
25	W-3m		83,70	66,30
26	K-2m1		42,80	38,93
27	K-2m2		44,40	38,93
28	P-1m2		32,60	30,09
29	P-2m2		35,30	32,08
30	P-3m2		29,20	34,08

Weryfikacja potwierdziła dobrą zgodność zaproponowanego modelu z wynikami badań eksperymentalnych, szczególnie w badaniach Kamińskiej i Ignatowskiego [14] (fioletowe kwadraty), co pokazuje wykres korelacyjny teoretycznych i doświadczalnych wytrzymałości betonu w trójosiowym stanie naprężeń (rys. 5.10).

Dla próbek walcowych uzyskano najlepszą zgodność w granicach od 1,2 do 7,4 % (za wyjątkiem próbki W-3m, dla której różnica wynosi 20,8%). Natomiast w przypadku próbek czworokątnych różnice te są większe i wynoszą: dla przekrojów kwadratowych od 7,9 do 22,8% a dla przekrojów prostokątnych w granicach od 5,1 do 16,2 %.

Na podstawie analizy wyników obliczeń teoretycznych nie stwierdzono tendencji do zawyżania lub zaniżania wytrzymałości betonu w trójosiowym stanie naprężeń w porównaniu z wynikami doświadczalnymi, co należy uznać za pozytywne. W przypadku próbek o

przekroju czworokątnym jest uzasadnione wprowadzenie do wzorów na naprężenia poprzeczne współczynnika poprawkowego k_i , uwzględniającego koncentrację naprężeń w narożach elementów.



Rys. 5.10. Porównanie wyników teoretycznych wytrzymałości betonu w trójosiowym stanie naprężeń z wynikami doświadczalnymi dla próbek betonowych według badań [14, 43]

Kolejnym etapem weryfikacji algorytmu jest porównanie nośności obliczonych ze wzoru (5.52) i nośności uzyskanych na podstawie własnych badań doświadczalnych w etapach: IIa, IIb i III. Sprawdzeniu poddano słupy żelbetowe wzmocnione odcinkami taśmy CFRP o różnej intensywności wzmocnienia podłużnego i poprzecznymi opaskami z maty – S4b, S5b, S6b, St+m-1, St+m-2, St+m-3, SwzA_0 lub płaszczem z maty – SwzB_0.

Tablica 5.5. Parametry elementów badawczych według badań własnych

Lp.	Oznaczenia słupa	Etap badań	a [mm]	b [mm]	r [mm]	$f_{c, cyl}$ [MPa]	A_s [mm ²]	f_y [MPa]	$A_{L, 2}$ [mm ²]	E_L [GPa]	t [mm]	E_w [GPa]	f_u [MPa]	s' [mm]
1	S4b	IIa	150	80	0	33,5	201	393	336	228	0,13	238	2937	55
2	S5b		150	80	0	33,5	201	393	420	228	0,13	238	2937	55
3	S6b		150	80	0	33,5	201	393	504	228	0,13	238	2397	55
4	St+m-1	IIb	150	80	0	42,0	201	393	504	228	0,13	238	2937	55
5	St+m-2		150	80	0	42,0	201	393	504	228	0,13	238	2937	55
6	St+m-3		150	80	0	42,0	201	393	504	228	0,13	238	2937	55
7	SwzA_0	III	200	200	10	48,6	452	551	1008	228	0,13	238	2937	120
8	SwzB_0		200	200	10	48,6	452	551	1008	200	0,12	240	3800	—

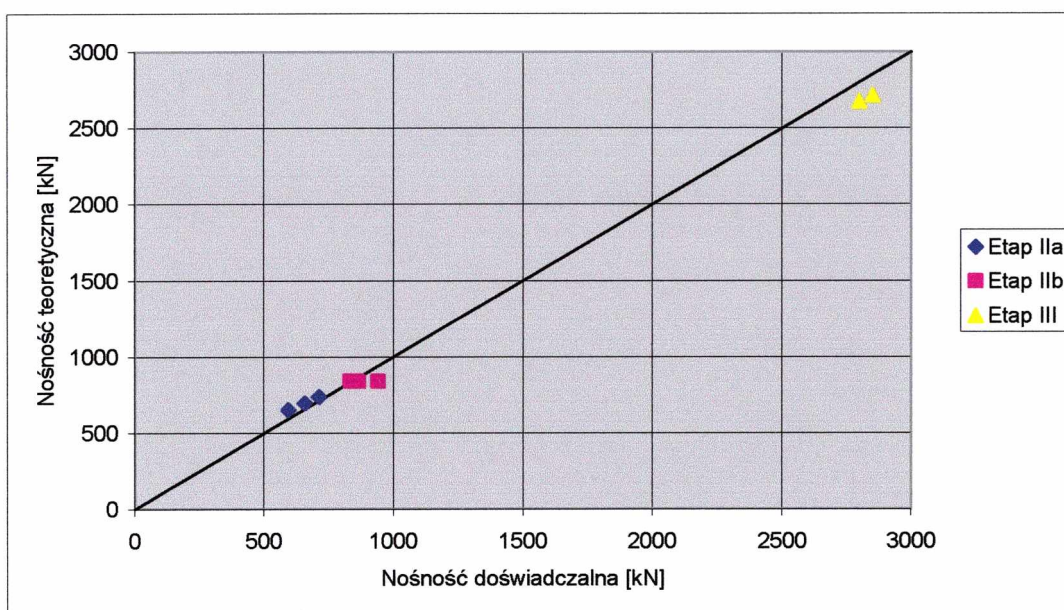
Podobnie jak poprzednio w tablicy 5.5 zestawiono blok danych wyjściowych do wykonania obliczeń teoretycznych. Jako parametry wytrzymałościowe materiałów przyjęto

średnie wartości doświadczalne zaczerpnięte z rozdziału czwartego pracy.

W tabelicy 5.6 oraz na rysunku 5.11 porównano wyniki dla elementów badawczych (etapy: IIa, IIb i III) obliczone na podstawie zmodyfikowanego modelu z wartościami otrzymanymi w czasie badań doświadczalnych.

Tabela 5.6. Wyniki badań i obliczeń teoretycznych

Lp.	Oznaczenia próbek	Etap badań	Nośność słupów żelbetowych wzmocnionych taśmami i matami CFRP	
			Badania	Teoria
			[kN]	[kN]
1	S4b	IIa	595,0	651,7
2	S5b		657,0	693,9
3	S6b		712,0	736,0
4	St+m-1	IIb	833,0	838,0
5	St+m-2		942,0	838,0
6	St+m-3		863,0	838,0
7	SwzA_0	III	2852,0	2714,4
8	SwzB_0		2801,0	2674,9



Rys. 5.11. Porównanie nośności doświadczalnej i obliczonej ze wzoru (5.52) dla elementów S4b, S5b, S6b, St+m-1, St+m-2, St+m-3, SwzA_0 i SwzB_0

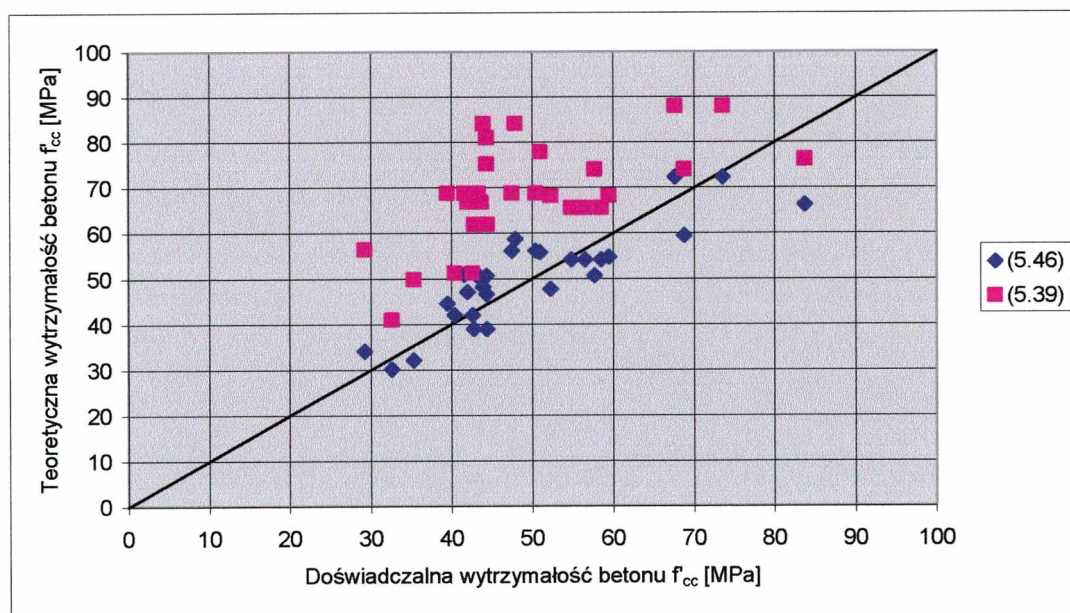
Jak widać na rysunku 5.11 proponowana modyfikacja modelu pozwala, w stopniu zadowalającym na przybliżenie obliczeń do rezultatów doświadczeń. We wzorze (5.52) zdecydowano się na wprowadzenie członu wyrażającego przyrost nośności, ze względu na obecność podłużnego zbrojenia kompozytowego, którego wartość uzależniono od stałej wartości granicznych odkształceń podłużnych. Autor uważa, że na obecnym etapie znajomości zagadnienia jest to doświadczalnie uzasadnione. Różnice pomiędzy wynikami

uzyskanymi doświadczalnie i teoretycznie wahają się w granicach od 0,6 do 11 %.

5.5. Podsumowanie

Analizy teoretyczne pokazały, że równolegle z badaniami doświadczalnymi prowadzone są prace mające na celu stworzenie modelu opisującego zachowanie się elementów ściskanych wzmacnianych materiałami kompozytowymi. W tym celu wykorzystywana jest zmodyfikowana zależność σ - ϵ opisana przez Manderę i innych dla betonu uzwojonego wewnętrzną spiralą stalową. Jak już wspomniano wcześniej model ten nie uwzględnia sprężystego charakteru pracy materiału kompozytowego, aż do chwili zniszczenia, co wymagało uściślenia.

Zaprezentowany przegląd dwóch modeli teoretycznych oraz ich krytyczna ocena miały na celu pokazanie zagadnień wymagających uzupełnienia lub modyfikacji w świetle tematyki poruszanej we własnych badaniach doświadczalnych autora. Zwrócono uwagę na uogólnienia występujące w modelu Wanga, które prowadzą do przeszacowania wytrzymałości betonu w trójosiowym stanie naprężeń. Oprócz wspomnianych już wcześniej uwag, istotną sprawą jest brak we wzorach na naprężenia poprzeczne powstających na styku betonu i uzwojenia (5.42 ÷ 5.44) odniesienia do kształtu przekroju poprzecznego elementów, przez uwzględnienie wpływu promienia wyokrąglenia naroży w próbkach czworokątnych.



Rys. 5.12. Porównanie wyników teoretycznych określonych ze wzorów (5.46) i (5.39) z wynikami doświadczalnymi dla próbek betonowych według badań [14, 43]

Na rysunku 5.12 pokazano wykres korelacyjny doświadczalnych i teoretycznych, obliczonych według wzorów (5.46) i (5.39), wytrzymałości betonu w trójosiowym stanie naprężeń f'_{cc} , dotyczący cytowanych wcześniej badań [14, 43]

Jak widać na rysunku 5.12 model Wanga (fioletowe kwadraty) prowadzi do zawyżenia wytrzymałości betonu w trójosiowym stanie naprężenia, a różnice między wynikami wahają się w granicach od 9 do 93 %. W związku z tym skupiono się na zaproponowaniu kilku modyfikacji tylko w modelu Campione i Miraglia, z których najistotniejsze to dodanie do wzoru (5.52) członu wyrażającego wzrost nośności z uwagi na obecność podłużnych odcinków taśm z włókien węglowych oraz wprowadzenie do wzoru na współczynnik efektywności uzwojenia betonu k_e (5.59) modyfikacji uwzględniających nieciągłości wzmocnienia poprzecznego. Wprowadzone zmiany zostały zweryfikowane na badaniach własnych autora i badaniach obcych zaczerpniętych z prac [14, 43].

Zadaniem autora udało się opracować podwaliny algorytmu do obliczania nośności ściskanych słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami i matami z włókien węglowych. Autor zdaje sobie sprawę, że podana procedura obliczeniowa wymaga szerszej weryfikacji doświadczalnej, którą ma nadzieję przeprowadzić w przyszłości.

6. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki doświadczalno-teoretycznych badań ściskanych słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami i matami z włókien węglowych. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury postawiono tezy rozprawy doktorskiej zawarte w rozdziale trzecim. W celu potwierdzenia niniejszych tez pracy zrealizowano badania doświadczalne opisane w rozdziale czwartym i analizy teoretyczne zaprezentowane w rozdziale piątym. Z uwagi na to, że wnioski szczegółowe i podsumowania zawarte zostały w treści poszczególnych rozdziałów, poniżej przedstawiono tylko te mające bezpośredni związek z tezami pracy.

- 1) W wyniku koncentracji naprężeń rozciągających w narożach poprzecznego wzmocnienia kompozytowego słupów o przekroju czworokątnym, następuje w tych miejscach rozerwanie włókien maty, co jest równoznaczne ze zniszczeniem elementu, któremu towarzyszy natychmiastowe zmiążdżenie betonu i zgniecenie podłużnej taśmy kompozytowej w obszarze zniszczenia.
- 2) Zastosowanie wzmocnienia w postaci doklejanych podłużnych odcinków taśm z włókien węglowych powoduje zmniejszenie szybkości przyrostu odkształceń podłużnych ε_v w stosunku do słupów kontrolnych przy jednakowych przyrostach siły podłużnej. Szybkość przyrostu odkształceń zależy od intensywności wzmocnienia podłużnego ρ_L (wzór 4.1), nie zależy natomiast od sposobu skonstruowania wzmocnienia poprzecznego.
- 3) Wartość granicznych odkształceń podłużnych $\varepsilon_{v,lim}$ słupów żelbetowych, o przekroju czworokątnym, wzmocnianych podłużnymi taśmami CFRP i owiniętych zewnętrznym zbrojeniem kompozytowym nie zależy od intensywności wzmocnienia podłużnego ρ_L (wzór 4.1). Dla celów projektowych można przyjąć, że nośność przekroju zostaje wyczerpana przy $\varepsilon_{v,lim}=2,20\text{‰}$.
- 4) Wzmacnianie samymi odcinkami taśm CFRP, których włókna są zorientowane równoległe do osi słupa jest niekorzystne, ze względu na przedwczesne odspojenie się kompozytu od betonu przy wartościach granicznych odkształceniach podłużnych $\varepsilon_{v,lim}=1,60\div 2,00\text{‰}$.

- 5) Nośność graniczna wzmacnianych słupów żelbetowych o przekroju czworokątnym zależy od intensywności wzmocnienia podłużnego taśmami z włókien węglowych ρ_L (wzór 4.1), pod warunkiem jednak, że towarzyszy mu obwodowe wzmocnienie kompozytowe (rys. 4.85 i tablica 4.27).
- 6) W wyniku przeprowadzonych analiz teoretycznych do określania nośności osiowo ściskanych, krępych słupów żelbetowych wzmacnianych taśmami i matami z włókien węglowych proponuje się wzór (5.52). Występujące w tym wzorze naprężenia poprzeczne f_t , powstające na styku betonu i uzwojenia zewnętrznego w przekroju czworokątnym, należy wyznaczać z uwzględnieniem współczynnika poprawkowego $k_t=0,2121$ [5], przyjmowanego ze względu na wpływ koncentracji naprężeń w pobliżu naroży słupa (por. wnioski 1). Ponadto, zaleca się przyjmowanie współczynnika efektywności uzwojenia betonu płaszczem kompozytowym k_e opisanego wzorem (5.59). Wyniki otrzymane na podstawie wzoru (5.52) wykazują dobrą zgodność z wynikami własnych badań doświadczalnych (rys. 5.11).
- 7) W oparciu o przeprowadzone badania i zdobyte doświadczenia autor uważa za słuszne rozszerzenie, w przyszłości badań o analizę następujących problemów:
- wpływ intensywności wzmocnienia podłużnego na nośność elementów ściskanych mimośrodowo,
 - wpływ nośności poprzecznych opasek na nośność słupów,
 - wpływ parametrów reologicznych,
 - efekt obciążeń cyklicznych (wielokrotnie zmiennych).

W prezentowanych wnioskach 1, 3 i 4 wykazano najczęściej występujący mechanizm zniszczenia ściskanych słupów żelbetowych wzmacnianych taśmami i matami z włókien węglowych i określono wartość granicznych odkształceń podłużnych dla tych elementów, przez co została potwierdzona pierwsza teza pracy. We wnioskach 2 i 5 zdefiniowano wpływ intensywności podłużnego wzmocnienia kompozytowego na nośność graniczną elementów, co potwierdza drugą tezę pracy. Trzecią tezę pracy uzasadnia wniosek 6 wskazujący na możliwość stworzenia jednolitej metody obliczania nośności krępych słupów żelbetowych wzmacnianych materiałami CFRP.

Bibliografia:

- [1] Audenaert K.: Inrijgen van betonkolommen met vezelcomposielaminaten, Faculteit Teogepaste Wetenschappen, Universiteit Gent, 1998-1999.
- [2] Budownictwo Betonowe t. II, Teoria betonu i żelbetu, Arkady, Warszawa 1964.
- [3] Budownictwo Betonowe t. VIII, Badanie materiałów, elementów i konstrukcji, Arkady, Warszawa 1970.
- [4] Budownictwo Betonowe t. X, Budowle miejskie, Arkady, Warszawa 1964.
- [5] Campione G., Miraglia N.: Strength and strain capacities of concrete compression members reinforced with FRP, *Cement and Concrete Composites*, No. 25, 2003, 31-41.
- [6] Demers M., Neale K.W.: Confinement of reinforced concrete columns with fibre-reinforced composites sheets – an experimental study, *Canadian Journal of Civil Engineering*, No. 26, April 1999, 226-241.
- [7] Demers M., Neale K.W.: Strengthening of existing concrete columns with unidirectional composite sheets, *Proceedings 4th International Conference on Short and Medium Span Bridges*, Edited by: Mufti A.A., Bakht B. and Jaeger L.G, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Canada, 1994, 895-905.
- [8] Design Guide Line for S&P FRP Systems. Materiały informacyjne firmy S&P Reinforcement, 2002.
- [9] Fukuyama K., Higashibata Y., Miyauchi Y.: Studies on repair and strengthening methods of damaged reinforced concrete columns, *Cement & Concrete Composites*, No. 22, 2000, 81-88.
- [10] Godycki-Ćwirko T.: *Mechanika betonu*, Arkady, Warszawa 1982.
- [11] Górski M.: Skręcanie wzmocnionych elementów żelbetowych, IV Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Gliwice – Wisła 2003, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, Z. 101, 127-134.
- [12] Harries K.A., Carey S.A.: Shape and “gap” effects on the behavior of variably confined concrete, *Cement and Concrete Research*, No. 33, 2003, 881-890.
- [13] Harries K.A., Kharel G.: Experimental investigation of the behavior of variably confined concrete, *Cement and Concrete Research*, No. 33, 2003, 873-880.
- [14] Ignatowski P., Kamińska M.E.: O ograniczeniu odkształceń betonu ściskanego kompozytami CFRP, *Inżynieria i Budownictwa*, Nr 4/2003, 204-208.
- [15] Ignatowski P., Kamińska M.E.: On the effect of confinement of slender reinforcement concrete columns with CFRP composites, *International Journal for Restoration*, Vol. 10, No. 1, 2004, 73-98.
- [16] Jamróży Z.: *Beton i jego technologie*, PWN, Warszawa 2003.
- [17] Jasieńko J., Olejnik A.: Analiza pracy zginanych konstrukcji żelbetowych wzmocnionych zbrojeniem doklejającym, Praca doktorska, Instytut Budownictwa Politechniki Wrocławskiej,

- Raport serii PRE nr 29/85 (na prawach rękopisu).
- [18] Jastrzębski P., Mutermilch J., Orłowski W.: Wytrzymałość materiałów. Arkady, Warszawa 1974.
 - [19] Kamińska M.E., Kotynia R., Sowa Ł., Waśniewski T.: Efektywność wzmocnienia belek żelbetowych na ścinanie materiałami kompozytowymi CFRP, XLIX Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2003, 49-56.
 - [20] Kamińska M.E., Kotynia R.: Doświadczalne badania żelbetowych belek wzmocnionych taśmami CFRP, Zeszyt nr 9, Wydawnictwo Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000.
 - [21] Kamińska M.E., Kotynia R.: Obliczanie nośności belek wzmocnionych taśmami CFRP, XLV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 1999, 87-94.
 - [22] Kamiński M., Trapko T.: Metodyka badań ściskanych elementów żelbetowych wzmocnianych taśmami i matami CFRP, Praca zbiorowa pod redakcją: Kamiński M., Kmita A., Łodo A., Michałek J. „Badanie materiałów budowlanych i konstrukcji inżynierskich”, rozdział 3.5; Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2004.
 - [23] Kamiński M., Wydra W.: Wzmacnianie konstrukcji żelbetowych za pomocą włókien węglowych z uwzględnieniem wymagań ochrony przeciwpożarowej, XIII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta, Ustroń 1998.
 - [24] Keller T.: Use of fibre reinforced polymers in bridge construction, Structural Engineering Documents, IABSE, No. 7, Switzerland, 2003.
 - [25] Kmita A., Kubiak J.: Badania konstrukcji betonowych. Przewodnik do ćwiczeń laboratoryjnych. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1993.
 - [26] Kobiak J., Stachurski W.: Konstrukcje żelbetowe, Arkady, Warszawa 1979.
 - [27] Korzeniowski P.: Żelbetowe słupy uzwojone. Badania i teoria, Monografie nr 15, Politechnika Gdańska, 2000.
 - [28] Li J., Hadi M.N.S.: Behaviour of externally confined high-strength concrete columns under eccentric loading, Composite Structures, No. 62, 2003, 145-153.
 - [29] Łapko A.: Projektowanie konstrukcji żelbetowych, Arkady, Warszawa 2000.
 - [30] Maalej M., Tanwongsva S., Paramasivam P.: Modelling of rectangular RC columns strengthened with FRP, Cement and Concrete Composites, No. 25, 2003, 263-276.
 - [31] Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R.: Theoretical stress – strain model for confined concrete, Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, August 1998, 1804-1826.
 - [32] Masłowski E., Spizewska D.: Wzmacnianie konstrukcji budowlanych, Arkady, Warszawa 2000.
 - [33] Mirmiran A., Shahawy M.: Behaviour of concrete columns confined by fibre composites, Journal of Structural Engineering, Vol. 123, No. 5, May 1997, 583-590.

- [34] Mitzel A., Stachurski W., Suwalski J.: Awarie konstrukcji betonowych i murowych, Arkady, Warszawa 1982.
- [35] Mortazavi A.A., Pilakoutas K., Son K.S.: RC column strengthening by lateral pre-tensioning of FRP, *Construction and Building Materials*, No. 17, 2003, 491–497.
- [36] Nagrodzka-Godycka K.: Badanie właściwości betonu i żelbetu w warunkach laboratoryjnych. Arkady, Warszawa 1999.
- [37] Picher F., Rochette P., Labossière P.: Confinement of concrete cylinders with CFRP, *Proceedings 1st International Conference Composites in Infrastructure*, Edited by: Saadatmanesh H. and Ehsani M.R., University of Arizona, Tucson, Arizona, 1996, 829-841.
- [38] Podstawowe informacje o systemach wzmacniania konstrukcji budowlanych i inżynierskich za pomocą materiałów kompozytowych, Materiały informacyjne firmy Sika Poland.
- [39] Popovics S.: Numerical approach to the complete stress-strain relation for concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 3, No. 5, 1973, 583-599.
- [40] Priestley M.J.N, Seible F., Fyfe E.: Column seismic retrofit using fiberglass/epoxy jackets, *Proceedings 1st International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Edited by: Neale K.W. and Labossière P., Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, Canada, 1992, 287-298.
- [41] Purba K.B., Mufti A.A.: Investigation of the behavior of circular concrete columns reinforced with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) jackets, *Canadian Journal of Civil Engineering*, No. 26, October 1999, 590-596.
- [42] Pyrak S.: Konstrukcje z betonu. Konstrukcje budowlane cz. 5, WSiP, Warszawa 2001.
- [43] Rochette P., Labossière P.: Axial testing of rectangular column models confined with composites, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 4, No. 3, August 2000, 129-136.
- [44] Saadatmanesh H., Ehsani M.R., Li M.W.: Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps, *ACI Structural Journal*, No. 91, 1994, 434-447.
- [45] Sus P.: Zastosowanie włókien węglowych do wzmacniania konstrukcji inżynierskich, *Budowlany Informator Techniczny*, Nr 3/2001, 20-23.
- [46] System materiałów Sika CarboDur do wzmacniania konstrukcji obiektów mostowych – Aprobata techniczna IBDiM nr AT/2003-04-0336.
- [47] Tastani S.P., Pantazopoulou S.J.: Experimental evaluation of FRP jackets in upgrading RC corroded columns with substandard detailing, *Engineering Structures*, No. 26, 2004, 817–829.
- [48] Trapko T.: Badanie nośności słupów żelbetowych wzmacnianych taśmami i matami z włókien węglowych, IV Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Gliwice – Wisła 2003, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, Z. 101, 425-432.
- [49] Trapko T.: Modele teoretyczne do wymiarowania słupów żelbetowych wzmacnianych

- materialami FRP, V Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Gliwice – Wisła 2004 (referat przyjęty do druku).
- [50] Wang Y. Ch.: Retrofit of reinforced concrete members using advanced composite materials, Research Report 2000-3, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, February 2000.
- [51] Wzmacnianie konstrukcji mostów przez przyklejanie kompozytowych elementów zewnętrznych, Materiały informacyjne firmy Sika Poland.
- [52] Wzmocnione kompozyty włókniste, Materiały informacyjne firmy S&P Reinforcement.
- [53] Ye L.P., Zhang K., Zhao S.H., Feng P.: Experimental study on seismic strengthening of RC columns with wrapped CFRP sheets, Construction and Building Materials, No. 17, 2003, 499–506.
- [54] Zestaw wyrobów do wzmacniania konstrukcji betonowych, żelbetowych, sprężonych i stalowych: taśmy S&P CFK-Lamellen, maty S&P C/G/A sheet, klej epoksydowy Resin 220, Resin 55 i Ombran EP-KL – Aprobata techniczna IBDiM nr AT/2000-04-0822.
- [55] <http://www.xsys.com/>

Normy:

- [N1] ASTM (1995), Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, D 3039/D 3039M, Annual book of ASTM Standards, Vol. 15.03, American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, USA.
- [N2] ENV 1992-1-1:1992 Eurocode 2, Design of Concrete Structures Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.
- [N3] International organization for standardization ISO, Plastic – Determination of tensile properties, Part 5: Test conditions for unidirectional fibre – reinforced plastic components, ISO 527-5, 1997.
- [N4] PN-73/B-06281 Prefabrykaty budowlane z betonu. Metody badań wytrzymałościowych.
- [N5] PN-84/B-03264 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [N6] PN-88/B-06250 Beton zwykły.
- [N7] PN-91/H-04310 Próba statyczna rozciągania metali.
- [N8] PN-B-03264:2002 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [N9] PN-EN 10002-1:1990 + AC1:1990 Metale. Próba rozciągania. Metoda badania w temperaturze otoczenia.
- [N10] PN-EN 12350-2:2002 Badania mieszanki betonowej. Metoda stożka opadowego.
- [N11] PN-EN 206-1:2002 Beton. Właściwości, produkcja, układanie i kryteria zgodności.

**NOŚNOŚĆ ŻELBETOWYCH SŁUPÓW
WZMACNIANYCH TAŚMAMI I MATAMI
Z WŁÓKIEN WĘGLOWYCH**

Tomasz TRAPKO

Załącznik nr 1 - Wyniki badań obcych cytowanych w rozdziale II

Tablica Z1.1. Wyniki badania próbek [43]

Lp.	Oznaczenia próbek	$f_{z,max}/f_c$	$f_{z,ult}/f_c$	$\varepsilon_{z,ult}$	$\varepsilon_{t,ult}$	$\varepsilon_{f,ult}$
				[%]	[%]	[%]
1	S-NC	0,99	—	—	—	—
2	S-NC	1,04	—	—	—	—
3	S5-C3	0,94	0,60	0,69	3,11	0,23
4	S25-C3	0,99	0,99	0,94	2,18	0,56
5	S25-C3	1,03	1,01	0,89	1,56	0,63
6	S38-C3	1,13	1,13	1,08	1,99	0,71
7	S38-C3	1,20	1,17	1,16	1,79	1,61
8	C100-C2	1,75	1,75	1,60	0,89	—
9	C100-C2	1,75	1,75	1,57	0,95	—
10	C100-C2	1,61	1,61	1,35	0,80	—
11	S5-C5	1,00	0,73	1,02	3,05	0,44
12	S25-C4	1,16	1,16	1,35	2,49	0,59
13	S25-C5	1,09	1,05	0,90	2,05	0,51
14	S-NC	0,97	—	—	—	—
15	S-NC	1,01	—	—	—	—
16	S25-C4	1,46	1,46	2,04	2,91	0,70
17	S25-C5	1,61	1,61	2,12	2,57	0,65
18	S38-C4	1,66	1,66	1,92	1,87	0,89
19	S38-C5	1,92	1,92	2,39	2,29	0,86
20	R-NC	1,00	—	—	—	—
21	R25-C3	1,00	0,70	0,79	2,88	0,74
22	R38-C3	1,04	1,00	0,85	2,04	0,68
23	R5-C5	1,01	0,62	0,98	2,17	0,43
24	R25-C4	1,01	0,96	0,93	3,10	0,53

NC – Not confined (bez wzmocnienia)

gdzie:

$f_{z,max}$ – maksymalne naprężenia podłużne w betonie,

$f_{z,ult}$ – graniczne naprężenia podłużne w betonie,

$\varepsilon_{z,ult}$ – graniczne odkształcenia podłużne elementów,

$\varepsilon_{t,ult}$ – graniczne odkształcenia poprzeczne elementów,

$\varepsilon_{f,ult}$ – odkształcenia graniczne kompozytu, mierzone w narożach próbek.

Tablica Z1.2. Wyniki badania próbek „W” i „K” [14]

Lp.	Oznaczenia próbek	Naprężenia [MPa]		Stopień wzmocnienia
		Wynik	Średnio	
1	W-01	29,4	29,9	—
2	W-02	30,4		
3	W-1m1	42,6	41,5	1,39
4	W-1m2	40,4		
5	W-2m1	58,5	56,6	1,89
6	W-2m2	54,8		
7	W-2m3	56,5		
8	W-F2m1	65,4	64,5	2,16
9	W-F2m2	63,6		
10	W-3m	83,7	—	2,80
11	W-2mp1	21,7	24,0	0,80
12	W-2mp2	26,3		
13	K-01	29,8	32,3	—
14	K-02	34,8		
15	K-2m1	42,8	43,6	1,35
16	K-2m2	44,4		
17	K-F2m1	47,2	46,0	1,42
18	K-F2m2	44,8		
19	K-t1	32,1	33,3	1,03
20	K-t2	34,5		
21	K-t2m1	59,7	61,3	1,90
22	K-t2m2	63,0		
23	K-Ft2m1	68,7	66,5	2,06
24	K-Ft2m2	64,3		

Tablica Z1.3. Wyniki badania próbek „P” [14]

Lp.	Oznaczenia próbek	Naprężenia lub siły	Stopień wzmocnienia
1	P-01	347,4 kN	—
2	P-1m1	402,0 kN	1,16
3	P-2m1	433,2 kN	1,25
4	P-3m1	471,3 kN	1,36
5	P-02	28,1 MPa	—
6	P-1m2	32,6 MPa	1,16
7	P-2m2	35,3 MPa	1,26
8	P-3m2	29,2 MPa	1,04

Tablica Z1.4. Wyniki badania słupów serii „D” bez wzmocnienia według [6]

Lp.	Oznaczenia próbek	f'_{co}	ε'_{co}	P_u	P_n	E_c	E_{cr}
		[MPa]	[%]	[kN]	[kN]	[GPa]	[GPa]
1	D25-1	24,2	0,18	1880	1870	30,6	21,3
2	D25-2	20,5	0,21	1830	2060	22,3	8,6
3	D25-3	26,8	0,20	2450	2250	33,8	14,4
4	D25-4	24,0	0,21	2640	2620	25,8	12,6
5	D40-1	43,1	0,26	3220	3270	33,8	15,8
6	D40-2	43,6	0,27	3440	3450	27,2	18,8
7	D40-3	41,8	0,25	3490	3620	32,7	18,8
8	D40-4	46,2	0,28	4150	3980	28,0	9,2

Tablica Z1.5. Wyniki badania słupów serii „D” i „U” ze wzmocnieniem według [6]

Lp.	Oznaczenia próbek	f'_{cc}	ε'_{cc}	P_{uc}	P_n	E_{cc}	ε_{cfu}	f_{cfu}	ε_{fu}
		[MPa]	[%]	[kN]	[kN]	[GPa]	[%]	[MPa]	[%]
1	D25-1	33,4	0,67	2550	2220	18,5	0,73	33,3	0,35
2	D25-2	31,3	0,77	2580	2410	12,9	0,77	31,3	0,39
3	D25-3	37,1	0,70	3170	2590	18,1	0,84	37,1	0,34
4	D25-4	38,8	0,91	3650	2960	14,8	0,91	38,8	0,44
5	D40-1	51,1	0,54	3790	3550	22,8	0,63	49,4	0,55
6	D40-2	55,7	0,59	4280	3720	27,2	0,67	53,8	0,48
7	D40-3	52,1	0,49	4210	3900	21,3	0,62	46,6	0,41
8	D40-4*	44,8	0,76	4045	4190	18,8	0,80	43,8	0,50
9	U25-1	32,2	0,38	2460	2220	30,6	0,49	29,8	0,37
10	U25-2	36,6	0,99	2950	2410	23,3	1,04	35,3	0,57
11	U25-3	35,8	0,66	3080	2590	26,5	0,69	33,6	0,43
12	U25-4	37,0	0,98	3520	2960	32,7	0,98	37,0	0,57
13	U40-1	50,1	0,55	3720	3550	31,6	0,72	47,1	0,61
14	U40-2	52,3	0,38	4040	3720	32,5	0,65	48,7	0,42
15	U40-3	54,8	0,42	4390	3900	30,6	0,68	46,5	0,63
16	U40-4	53,6	0,56	4650	4250	28,0	0,63	53,2	0,33

* - przypadek szczególny, gdyż 40% powierzchni przekroju poprzecznego zostało odtworzone

gdzie:

f'_{co} i ε'_{co} – odpowiednio: maksymalne naprężenia i odkształcenia osiowe w betonie,

P_n – teoretyczna wartości siły niszczącej,

P_u – doświadczalna wartość siły niszczącej,

E_c i E_{cr} – odpowiednio: moduł sprężystości przy obciążaniu i odciążaniu elementu,

f'_{cc} i ε'_{cc} – odpowiednio: maksymalne naprężenia i odkształcenia podłużne w betonie,

P_{uc} – pomierzona siła niszcząca,

P_n – prognozowana nośność słupów bez wzmocnienia,

E_{cc} – moduł sprężystości betonu w elementach wzmocnionych,

f_{cfu} i ε_{cfu} – odpowiednio: graniczne naprężenia i odkształcenia podłużne w betonie,

ε_{fu} – graniczne odkształcenia obwodowe maty CFRP.

Tablica Z1.6. Wyniki badania próbek według [28]

Lp.	Oznaczenie słupa	N_u [kN]	$f_{z,max}$ [MPa]	Odchylenie [mm]
1	C1-1	836,4	47,33	0,758
2	C1-2	525,5	29,74	1,983
3	C1-3	601,0	34,01	2,400
4	C1-4	736,8	41,69	1,450
5	C1-5	791,5	44,79	1,405
6	C2-6	669,0	37,86	1,771
7	C2-7	644,6	36,48	—

gdzie:

N_{ult} – maksymalna siła,

$f_{z,max}$ – maksymalne naprężenia podłużne w betonie,

