



POLITECHNIKA
GDAŃSKA

MARCIN ABRAMSKI

DORAŻNA NOŚNOŚĆ SŁUPÓW
O PRZEKROJU KOŁOWYM
Z RUR FRP WYPEŁNIONYCH
BETONEM

BADANIA, TEORIA, OBLICZANIE

GDAŃSK 2019

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Janusz T. Cieśliński

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

REDAKTOR SERII

Zbigniew Krzemiński

RECENZENCI

Michał Knauff

Tomasz Trapko

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

PROJEKT OKŁADKI

Jolanta Cieślawska

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
www.pg.edu.pl/wydawnictwo/katalog
zamówienia prosimy kierować na adres wydaw@pg.edu.pl

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2019

ISBN 978-83-7348-774-1

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 9,1, ark. druku 9,63, 180/1054

Druk i oprawa: Volumina.pl Daniel Krzanowski
ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

Mojej małżonce Annie oraz dzieciom

Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	7
1. WPROWADZENIE	11
2. ZASTOSOWANIA SŁUPÓW Z RUR KOMPOZYTOWYCH WYPEŁNIONYCH BETONEM	14
2.1. Podstawowe możliwości zastosowań słupów CFFT.....	14
2.1.1. Degradacja korozyjna żelbetowych i stalowych konstrukcji wsporczych.....	14
2.1.2. Przykłady podstawowych zastosowań słupów CFFT	19
2.2. Inne możliwości zastosowań słupów CFFT	24
3. ZACHOWANIE BETONU SKRĘPOWANEGO W ŚCISKANYCH ELEMENTACH KONSTRUKCYJNYCH TYPU CFT. WYNIKI BADAŃ, PRZEPISY NORMOWE	32
3.1. Informacje podstawowe.....	32
3.2. Różnice w krępowaniu betonu przez płaszcz stalowy oraz płaszcz FRP w ujęciu eksperymentalnym.....	34
3.3. Różnice w krępowaniu betonu przez płaszcz stalowy, uzwojenie stalowe oraz płaszcz FRP w ujęciu normowym.....	39
3.3.1. Eurokod 4	40
3.3.2. Eurokod 2	41
3.3.3. Wytoczne projektowania ACI 440.2R	43
3.3.4. Porównanie trzech normatywów projektowania słupów pod kątem modelowania betonu skrępowanego	45
3.4. Zagadnienia specyficzne dla betonu skrępowanego płaszczem FRP.....	49
4. WPŁYW SMUKŁOŚCI NA NOŚNOŚĆ ELEMENTÓW ŚCISKANYCH	54
4.1. Mechanizm wyboczenia słupa	54
4.2. Metoda ogólna analizy efektów drugiego rzędu	56
4.3. Metody uproszczone analizy efektów drugiego rzędu	57
4.3.1. Założenia i podstawowe zależności	57
4.3.2. Metoda nominalnej krzywizny.....	58
4.3.3. Metoda nominalnej sztywności	61
5. BADANIA SŁUPÓW CFT Z RUR POLIMEROWYCH WZMACNIANYCH WŁÓKNEM SZKLANYM.....	65
5.1. Program badań.....	65
5.2. Własne badania materiałowe kompozytu wzmocnionego włóknem szklanym, będącego budulcem rur	66
5.2.1. Dane uzyskane od producenta	66

5.2.2. Zawartość włókien w kompozycie	67
5.2.3. Struktura ścianki rur.....	68
5.2.4. Grubość ścianki rur	70
5.2.5. Kąt nawoju włókien szklanych	71
5.2.6. Wytrzymałość kompozytu rur na ściskanie wzdłużne	72
5.2.7. Moduł sprężystości i odkształcenia graniczne kompozytu rur przy ścisaniu wzdłużnym	76
5.2.8. Wytrzymałość kompozytu rur na rozciąganie wzdłużne	82
5.2.9. Moduł sprężystości i odkształcenia graniczne kompozytu rur przy rozciąganiu wzdłużnym	84
5.2.10. Wytrzymałość kompozytu rur na rozciąganie obwodowe	88
5.2.11. Moduł sprężystości i odkształcenia graniczne kompozytu rur przy rozciąganiu obwodowym.....	94
5.3. Badania betonu wypełniającego słupy	99
5.4. Badania eksperymentalne słupów	102
5.4.1. Przebieg badań	102
5.4.2. Wyniki badań słupów	105
6. NOŚNOŚĆ GRANICZNA SŁUPÓW CFT – TEORIA I PROGRAM KOMPUTEROWY	114
6.1. Uwagi wstępne	114
6.2. Teoria nośności granicznej słupów CFT	116
6.2.1. Założenia teorii	116
6.2.2. Ograniczenie skróceń podłużnych betonu w przekroju poprzecznym słupa w modelu betonu według <i>Eurokodu 2</i>	121
6.2.3. Ograniczenie odkształceń podłużnych płaszcza w przekroju poprzecznym słupa	124
6.3. Program komputerowy do obliczania siły granicznej	127
6.3.1. Algorytm programu	127
6.3.2. Opis korzystania z programu	131
7. PORÓWNANIE WYNIKÓW OBLICZEŃ NOŚNOŚCI GRANICZNEJ SŁUPÓW CFFT WEDŁUG ZAPROPONOWANEJ METODY Z WYNIKAMI DOŚWIADCZEŃ	137
8. PODSUMOWANIE.....	145
8.1. Wnioski	145
8.2. Kierunki dalszych badań	146
PODZIĘKOWANIE.....	147
BIBLIOGRAFIA	148
Streszczenie w języku polskim	153
Streszczenie w języku angielskim.....	154

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

Oznaczenia

A_c	–	pole przekroju poprzecznego rdzenia betonowego słupa CFT
A_{s1}	–	pole przekroju poprzecznego zbrojenia rozciąganego
A_{s2}	–	pole przekroju poprzecznego zbrojenia ściskanego
d	–	wysokość użyteczna przekroju poprzecznego słupa
D	–	średnica zewnętrzna słupa CFST lub CFFT równa średnicy zewnętrznej rury
D_{core}	–	średnica betonowego rdzenia słupa CFT
e_0	–	mimośród statyczny obciążenia, wynikający z analizy pierwszego rzędu
e_2	–	mimośród drugiego rzędu
e_R	–	graniczny mimośród siły ściskającej (tj. powodujący utratę nośności słupa)
e_{tot}	–	całkowity mimośród obciążenia, zawierający efekty oddziaływań statycznych oraz efekty drugiego rzędu
E	–	moduł sprężystości
E_c	–	moduł sprężystości betonu przy ściskaniu
E_{cm}	–	sieczny moduł sprężystości betonu przy ściskaniu w rozumieniu <i>Eurokodu 2</i>
$E_{FRP,c}$	–	moduł sprężystości kompozytu FRP przy ściskaniu wzdłużnym
$E_{FRP,circ}$	–	moduł sprężystości kompozytu FRP przy rozciąganiu obwodowym
$E_{FRP,t}$	–	moduł sprężystości kompozytu FRP przy rozciąganiu wzdłużnym
E_s	–	moduł sprężystości stali zbrojeniowej
E_{tube}	–	moduł sprężystości materiału rury (stalowej lub FRP) przy ściskaniu
f_c	–	jednoosiowa wytrzymałość betonu na ściskanie
f_{cc}	–	zwiększona wytrzymałość betonu na ściskanie z tytułu stanu trójosiowego ściskania
f_{ck}	–	wartość charakterystyczna wytrzymałości betonu na ściskanie
$f_{ck,c}$	–	wartość charakterystyczna zwiększonej wytrzymałości betonu na ściskanie z tytułu stanu trójosiowego ściskania
f_{cm}	–	wytrzymałość średnia betonu na ściskanie
$f_{FRP,c}$	–	wytrzymałość kompozytu rury FRP na ściskanie wzdłużne, określana na próbkach w formie krótkich odcinków rury
$f_{FRP,circ}$	–	wytrzymałość kompozytu rury FRP na rozciąganie obwodowe, określana na próbkach w kształcie pierścieni wyciętych z rury (<i>split disk tests</i>)
$f_{FRP,circ,mean}$	–	średnia arytmetyczna uzyskana z badań wytrzymałości kompozytu rury FRP na rozciąganie obwodowe na próbkach w kształcie pierścieni wyciętych z rury
$f_{FRP,t}$	–	wytrzymałość kompozytu rury FRP na rozciąganie wzdłużne, określana na płaskich próbkach w kształcie pasków (<i>coupon tests</i>)
f_{tube}	–	wytrzymałość obwodowa na rozciąganie płaszcz zewnętrznego słupa lub cylindra betonowego

f_y	– wytrzymałość stali konstrukcyjnej lub stali zbrojeniowej (przyjmowana do projektowania na poziomie granicy plastyczności z odpowiednimi współczynnikami bezpieczeństwa)
h	– wysokość przekroju poprzecznego słupa
I	– moment bezwładności przekroju poprzecznego na zginanie
I_c	– moment bezwładności przekroju poprzecznego rdzenia betonowego słupa CFT na zginanie
I_{tube}	– moment bezwładności przekroju poprzecznego rury słupa CFT na zginanie
l	– długość (wysokość) słupa
M_{0Ed}	– obliczeniowa wartość momentu zginającego, wynikająca z analizy pierwszego rzędu
M_{Ed}	– obliczeniowa wartość całkowitego momentu zginającego, uwzględniająca efekty drugiego rzędu
M_R	– graniczny moment zginający w ściskanym słupie, tj. powodujący utratę jego nośności
N	– siła normalna ściskająca słup
N_R	– nośność ściskanego słupa
P	– siła podłużna
P_E	– siła krytyczna w słupie ze względu na wyboczenie
r	– promień krzywizny słupa po deformacji
r_0	– promień krzywizny słupa ściskanego na dużym mimośrodku w stanie granicznym
s_c	– szerokość elementarnego paska podziału kołowego przekroju poprzecznego rdzenia betonowego słupa CFT
s_t	– szerokość elementarnego paska podziału kołowego przekroju poprzecznego rury stalowej lub kompozytowej słupa CFT
S	– długość wycinka okręgu
t	– grubość ścianki rury
x	– współrzędna długości (wysokości) słupa
y	– ugięcie słupa
ε	– odkształcenia
ε_{au}	– odkształcenia graniczne w stali
ε_c	– skrócenia betonu odpowiadające wytrzymałości betonu f_c , także: odkształcenia w betonie
$\varepsilon_{c,max}$	– maksymalne odkształcenia podłużne (skrócenia) betonu rdzenia słupa CFT w chwili wyczerpania jego nośności, osiągnane w skrajnych włóknach tegoż rdzenia po stronie bardziej ściskanej
$\varepsilon_{c,min}$	– minimalne odkształcenia podłużne betonu rdzenia słupa CFT w chwili wyczerpania jego nośności, osiągnane w skrajnych włóknach tegoż rdzenia po stronie mniej ściskanej lub rozciąganej
ε_{c2}	– skrócenia betonu odpowiadające wytrzymałości betonu f_c , według przepisów <i>Eurokodu 2</i>

$\varepsilon_{c2,c}$	–	skrócenia betonu pracującego w stanie trójosiowego ściskania, doznawane przez beton w chwili osiągnięcia naprężeń równych wytrzymałości f_{cc} , według przepisów <i>Eurokodu 2</i>
ε_{cu}	–	graniczne skrócenia betonu w stanie jednoosiowego ściskania
$\varepsilon_{cu,c}$	–	graniczne skrócenia betonu w stanie trójosiowego ściskania
$\varepsilon_{cu2,c}$	–	graniczne skrócenia betonu w stanie trójosiowego ściskania, według przepisów <i>Eurokodu 2</i>
$\varepsilon_{FRP,eff,circ}$	–	efektywne obwodowe wydłużenia graniczne kompozytu FRP w ściskanym elemencie CCCSFW lub CFFT
$\varepsilon_{FRP,u}$	–	podłużne wydłużenia niszczące kompozyt FRP
$\varepsilon_{FRP,u,c}$	–	podłużne skrócenia niszczące kompozyt FRP w ściskanym elemencie CFFT
$\varepsilon_{FRP,u,circ}$	–	obwodowe wydłużenia niszczące kompozyt FRP w teście rozciągania obwodowego (tzw. <i>split disk test</i>), jak również w ściskanym elemencie CFFT
$\varepsilon_{FRP,u,t}$	–	podłużne wydłużenia niszczące kompozyt FRP w mimośrodowo ściskanym elemencie CFFT
$\varepsilon_{tube,max}$	–	odkształcenia podłużne materiału rury słupa CFT w jego skrajnych włóknach po stronie bardziej ściskanej w chwili wyczerpania nośności słupa
$\varepsilon_{tube,min}$	–	odkształcenia podłużne materiału rury słupa CFT w jego skrajnych włóknach po stronie mniej ściskanej (lub rozciąganej) w chwili wyczerpania nośności słupa
ε_u	–	odkształcenia graniczne (w dowolnym materiale)
ε_y	–	odkształcenia plastyczne w zbrojeniu
ε_{vol}	–	odkształcenia objętościowe
θ	–	kąt nawoju włókien w rurze FRP
κ	–	krzywizna linii ugięcia słupa
κ_ε	–	współczynnik efektywności wytrzymałości obwodowej płaszcza FRP
ν	–	współczynnik Poissona
ρ_f	–	gęstość włókien wzmocnienia kompozytu
ρ_m	–	gęstość matrycy żywicznej kompozytu
σ	–	naprężenia
σ_2	–	parcie boczne (<i>lateral</i>) betonu skrępowanego na płaszczyznę zewnętrzną w chwili wyczerpania nośności słupa CFT
σ_c	–	naprężenia w betonie
τ	–	czas
v_G	–	zawartość masowa włókien szklanych w kompozycie
v_V	–	zawartość objętościowa włókien szklanych w kompozycie
φ	–	kąt środkowy wycinka okręgu

Skróty

- CCCSFW – słup betonowy o kołowym przekroju poprzecznym, wzmocniony obwodowo płaszczem z kompozytu polimerowego zbrojonego włóknami (*circular concrete column strengthened with (fibre-reinforced polymer) wrapping*)
- CFFT – wypełniona betonem rura z kompozytu polimerowego zbrojonego włóknami (*concrete-filled (fibre-reinforced polymer) tube*)
- CFRP – kompozyt polimerowy zbrojony włóknami węglowymi (*carbon fibre-reinforced polymer*)
- CFST – rura stalowa wypełniona betonem (*concrete-filled steel tube*)
- CFT – rura wypełniona betonem (*concrete-filled tube*)
- FRP – kompozyt polimerowy zbrojony włóknami (*fibre-reinforced polymer*)
- GFRP – kompozyt polimerowy zbrojony włóknami szklanymi (*glass fibre-reinforced polymer*)

Rozdział 1

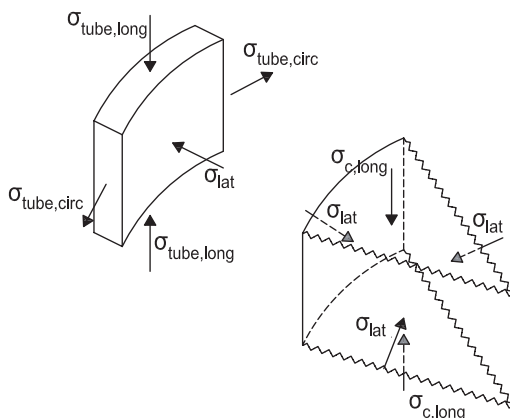
WPROWADZENIE

W niniejszej monografii autor stawia sobie za cel zaproponowanie metody wyznaczania doraźnej nośności słupów typu CFFT (*concrete-filled (fibre-reinforced polymer) tube*). Słupy te są realizowane przez wypełnienie betonem rur wykonanych z tworzyw polimerowych zbrojonych włóknami. W literaturze, nie tylko anglojęzycznej, tworzywa te przyjęło się określać skrótowcem FRP (*fibre-reinforced-polymer*). Słupy CFFT odznaczają się prostotą wykonania oraz licznymi zaletami eksploatacyjnymi i mogą w niedalekiej przyszłości znaleźć szerokie zastosowanie w budownictwie. Projektowanie słupów typu CFFT nie doczekało się w żadnym kraju znormalizowania na poziomie całego państwa. W związku z tym, wykorzystując analogię słupów CFFT do trzech wymienionych poniżej kategorii słupów, autor podjął badania teoretyczne, eksperymentalne i numeryczne w zakresie doraźnej nośności słupów CFFT.

Od wielu lat projektowanie i wymiarowanie słupów typu CFST (*concrete-filled steel tube*) jest znormalizowane. Europejskim dokumentem normalizującym jest *Eurokod 4* [64]. Konstrukcje tego typu stosuje się w budownictwie od kilkudziesięciu lat dość powszechnie, zwłaszcza w krajach o wysokiej aktywności sejsmicznej oraz w krajach wysoko rozwiniętych. Charakterystyczną zaletą tych słupów stanowi wzrost wytrzymałości betonu wypełniającego rurę pod wpływem nacisku bocznego σ_{lat} , wywieranego nań przez płaszczyznę stalową (rys. 1.1). Wzrost ten jest uwarunkowany m.in. odpowiednio niską smukłością słupa CFST oraz niedużym mimośrodem siły ściskającej. Analogicznie do słupów CFFT i CFST pracują żelbetowe słupy uzwojone, które – odpowiednio zaprojektowane – zdolne są przenosić znaczne obciążenia dzięki wytworzeniu się w betonowym rdzeniu stanu przestrzennego ściskania. Stosowanie tych słupów w budownictwie ma długą tradycję, a ich projektowanie zostało znormalizowane np. w Polskiej Normie [57] z 2002 roku. Trzecią kategorię słupów, wykazującą analogie do słupów CFFT, stanowią klasyczne słupy żelbetowe o przekroju kołowym, wzmocnione naklejanymi od zewnątrz płaszczyznami z materiałów kompozytowych FRP. Te nowoczesne sposoby wzmocnienia doczekały się już opracowania wytycznych projektowania w niektórych krajach, np. w USA [8].

Zasady projektowania słupów CFFT nie mogą być takie same jak zasady projektowania słupów CFST, podane np. w *Eurokodzie 4* [64]. Wynika to z wielu przyczyn.

Pierwszą z nich jest fakt, że wytrzymałość konkretnego materiału FRP na ściskanie – inaczej niż w przypadku stali – na ogół znacznie się różni od jego wytrzymałości na rozciąganie. Fakt ten ma znaczenie w przypadku słupów CFFT ściskanych na dużych mimośrodkach, w których naprężenia generowane w przekroju poprzecznym po jednej stronie słupa są ściskające, a po przeciwnej – rozciągające. Dopuszczalne wartości naprężeń po stronie ściskanej będą na ogół znacznie się różnić od dopuszczalnych wartości naprężeń po stronie rozciąganej.



Rys. 1.1. Idea pracy słupów CFT obciążonych osiowym ściskaniem. Ściskające naprężenia pionowe są przenoszone przez płaszcz ($\sigma_{\text{tube,long}}$) i rdzeń betonowy ($\sigma_{\text{c,long}}$). W płaszczu generowane są rozciągające naprężenia obwodowe ($\sigma_{\text{tube,circ}}$), a na styku płaszczka i rdzenia oraz w samym rdzeniu – naciski poziome (σ_{lat})

Poza tą oczywistą różnicą wytrzymałości stali i FRP w drugiej kolejności należy wymienić różnicę charakterystyk naprężenie–odkształcenie obydwu materiałów. Stal jest materiałem sprężysto-plastycznym, podczas gdy tworzywa FRP z zasady pracują tylko sprężysto. Nie dochodzi w nich do uplastycznienia, a sposób niszczenia jest gwałtowny, kruchy. Uwzględnienie tego faktu w projektowaniu słupów CFST ma fundamentalne znaczenie dla bezpieczeństwa konstrukcji: konieczne jest stosowanie wyższych współczynników bezpieczeństwa niż dla słupów CFST. Na niekorzyść materiałów FRP, które można zastosować jako płaszcz słupów, przemawia fakt, że ich odkształcalność, zależna od matrycy, rodzaju, typu, zawartości włókien w kompozycie, jest często dużo niższa niż odkształcalność stali, dopuszczona na przykład w normie europejskiej *Eurokod 3* [63] (w rozdziale 3.2.2 te same normy) do poziomu aż 15% przy zniszczeniu.

Trzecią odmienną cechą słupów typów CFST i CFPT jest praca betonu skrępowanego, tj. pracującego wewnątrz płaszczka w stanie trójosiowego ściskania. Płaszcz słupów CFT ściskanych osiowo lub na niewielkich mimośrodkach zostaje mianowicie poddany ściskaniu w kierunku podłużnym i jednocześnie rozciąganiu w kierunku obwodowym. Rozciąganie to jest generowane przez napierający na płaszcz, ściskany beton rdzenia. W przypadku słupów smukłych o wyczerpaniu nośności słupa decyduje zazwyczaj podłużne ściskanie, a nie obwodowe rozciąganie płaszczka. Jednak dla krępych słupów ściskanych osiowo o nośności może decydować wytrzymałość obwodowa płaszczka na rozciąganie. Materiały FRP, np. stosowane w postaci cienkich płaszczy naklejanych zewnętrznie na słup, wykazują pod tym względem przewagę w stosunku do stali. Istotne jest jednak to, że beton rdzenia zachowuje się odmiennie w zależności od tego, czy płaszcz wykonany jest ze stali czy z materiału FRP. Tematyka ta będzie rozważana w rozdziale trzecim niniejszej pracy.

Zasady projektowania słupów CFPT nie mogą być także identyczne z zasadami projektowania żelbetowych słupów uzwojonych, podanymi np. w Polskiej Normie [57]. Jak wykazano w pracach [2] i [3], zastosowanie tych zasad do wyznaczania nośności granicznej

słupów CFST daje prawidłowe wyniki dla słupów CFST o cienkościennych płaszczach. Model ten nie sprawdza się już jednak dla słupów CFST o płaszczach grubościennych [5]. Nie wiadomo, czy nadawałby się do projektowania słupów o płaszczach z kompozytów FRP. *Eurokod 2* [62] nie podaje precyzyjnie przepisów dotyczących projektowania słupów uzwojonych. W ich projektowaniu można by natomiast wykorzystać przepisy podane w punkcie 3.1.9 wspomnianej normy, opisującym model matematyczny betonu skrępowanego (tj. ściskanego przy ograniczeniu odkształceń poprzecznych).

Do projektowania słupów CFFT nie można również bezpośrednio zastosować wytycznych projektowania słupów żelbetowych o przekroju kołowym, poddanych wzmocnieniu naklejanymi od zewnątrz płaszczami z materiałów kompozytowych FRP. Dla tej grupy słupów proponuje się w niniejszej pracy skrótowe oznaczenie CCCSFW (*circular concrete column strengthened with (fibre-reinforced polymer) wrapping*). Wytyczne projektowania słupów CCCSFW stworzono m.in. w USA [8]. Otóż słupy CFFT wykazują istotną różnicę w sposobie przenoszenia obciążeń w stosunku do słupów CCCSFW: ich płaszcz pracuje w kierunku podłużnym, podlega zatem ściskaniu, a gdy siła ściskająca oddziałuje na znacznym mimośrodzie – także rozciąganiu. Fakt ten może stanowić zaletę słupów CFFT, lecz nie musi. Jeżeli mianowicie kompozyt jest kruchy lub mało wytrzymały w kierunku podłużnym, to nawet jego wysoka wytrzymałość w kierunku obwodowym nie może być brana pod uwagę przy projektowaniu słupa, ponieważ nie zostanie wykorzystana w chwili osiągnięcia nośności tegoż słupa.

Reasumując, należy stwierdzić, że projektowanie słupów CFFT może zawierać elementy zaczerpnięte z metod projektowania słupów CFST, żelbetowych słupów uzwojonych oraz słupów CCCSFW, wymaga jednak odrębnego podejścia. Propozycję zasad projektowania słupów CFFT sformułowano w dalszej części pracy.

Jak zaznaczono w tytule niniejszej monografii, nie dotyczy ona zagadnień nośności długotrwałej słupów CFFT, a jedynie ich nośności doraźnej. W przyszłości należałoby w badaniach słupów uwzględnić zjawiska reologiczne, zarówno dla betonu, jak i dla kompozytu. Swoim zakresem praca obejmuje słupy wykorzystywane w konstrukcjach kubaturowych (np. budynki, hale), jak również słupy i słupopale konstrukcji mostowych oraz hydrotechnicznych (np. pirsy, nabrzeża, mola). W opracowaniu nie uwzględnia się słupów poddanych działaniu znacznych sił tnących, dlatego z rozważań wyklucza się stosowane niekiedy wspólnie słupy ukośne przenoszące duże obciążenia pionowe. Powyższe wykluczenie nie dotyczy stężeń poprzecznych dźwigarów kratowych czy łukowych, często stosowanych wspólnie w wersji CFST w chińskim budownictwie mostowym [3, 21]. Stężenia te nie są bowiem poddane działaniu znacznych sił tnących, o ile tylko połączone są z dźwigarami pod kątem prostym. Same dźwigary łukowe wykonane z rur FRP wypełnionych betonem nie są analizowane w niniejszej pracy, ponieważ pomija się w niej wstępną krzywiznę elementu ściskanego, oczywiście poza imperfekcjami.