（S4）土木分野におけるCFT構造の現状と課題

池田　学[1]

[1]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所　構造物技術研究部　（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail:ikeda.manabu.14@rtri.or.jp

コンクリート充填鋼管（以下，CFT）構造は，鋼管の内部にコンクリートを充填したシンプルな構造で，鋼管とコンクリートの合成効果により高い耐力と変形性能を有する．また，鋼管がコンクリート打込み時の型枠代わりとなることから，施工性にも優れる．土木分野では，CFT部材の実用は比較的新しいものの，土木学会複合構造標準示方書に照査法が定められ，標準的な照査が可能となりつつある．

本稿では，CFT構造について，土木分野における適用の現状や構造の特徴，複合構造標準示方書における照査法の概要，最近の動向や今後の課題等について示す．

Key Words : *CFT, performance-based design, load-carrying capacity, deformation performance*

1. はじめに

CFT構造は，円形あるいは角形の鋼製閉断面（**図-1**）に材軸方向に沿って全体にわたりコンクリートを充填した構造である．非常にシンプルな構造であり，構造そのものの開発は1900年代初頭で，その歴史は非常に古い[1)2)]．建築分野では古くから実用されてきたが，土木分野においては，CFT構造として橋梁に実用されたのはここ30年程度と考えられ，比較的新しい部類である．

CFT 構造は，鋼管とコンクリートが力学的に一体となって外力に抵抗する構造であり，以下のような利点を有している．

- 鋼管とコンクリートの合成作用により断面寸法に比べて大きな耐荷力が得られる．
- 軸力と曲げモーメントが作用した場合に，充填コンクリートが鋼管の局部座屈の進行を遅らせることにより優れた曲げ変形性能が得られる．
- コンクリート打込み時に鋼管が型枠の役割を果たすため，狭隘な箇所での施工や急速施工を余儀なくされる施工環境の厳しい工事にも適用できる．

すなわち，大規模地震時にも強く，さらに現場の施工作業性にも優れた部材であるといえる．そのため，橋梁・高架橋の柱（**図-2**），アーチ橋のアーチリブ，トラス橋の弦材，杭基礎等に用いられている．

土木分野での検討は，当初は鋼製橋脚の耐震性向上や断面縮小のニーズから，内部にコンクリートを充填した構造について，1980年頃から，旧建設省（現国土交通省）土木研究所において，設計基準の作成のため一連の載荷試験による検討が行われた[1)3)]．ここでは，コンクリートを完全に充填した構造のみでなく，部分的に充填した構造についても実験的な研究が行われている．また，同時期に，旧阪神公団においても，載荷試験等による検討が行われ，設計・施工指針（案）としてまとめられている[4)]．鉄道においても，1990年代に，円形断面のCFT構造の設計法を定めるべき，載荷試験を中心とした検討が行われている[5)]．これらの検討を踏まえ，照査法が提案され，土木学会の各種設計指針，示方書等[6)-11)]に，CFT構造の照査法が取り入れられている．

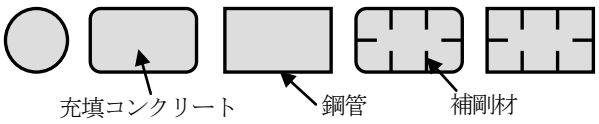


図-1　CFT部材の断面の例[11)]

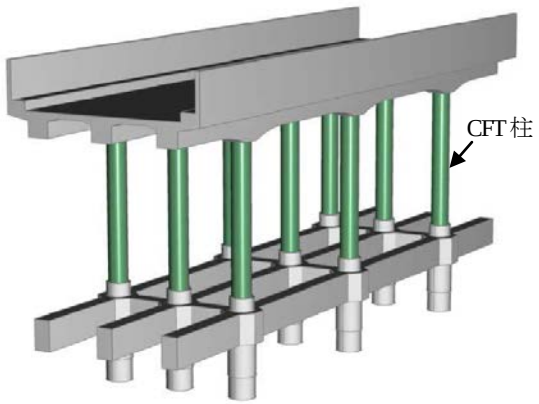


図-2　CFT部材の適用例[11)]
（ラーメン高架橋の柱への適用例）

本稿では，CFT構造について，土木分野における適用の現状や構造の特徴，技術基準の経緯や複合構造標準示方書における照査法の概要，最近の動向や今後の課題等について概説する．

なお，土木分野では，コンクリートを全体にわたり充填した構造をCFT部材として扱っており，コンクリートを鋼管内に部分的に充填した構造や鋼管の外周に被覆した構造は本稿の対象外とする．また，CFT部材単体を対象とし，接合部については本稿では触れないこととする．

2. CFT部材の適用と特徴

(1) CFT部材の適用

土木分野では，CFT部材は，主に橋脚・高架橋柱，アーチリブやトラス主構（斜材），基礎杭に適用されている．これらに共通しているのは，部材軸方向力と曲げモーメントを受ける部材であることである．すなわち，鋼部材，鉄筋コンクリート部材等の他の部材と比較して，大きい軸力と曲げモーメントの作用下においても，耐荷力および変形性能が優れていることから適用されていると考えられる．

ここでは，橋脚・高架橋柱とアーチリブへの適用における傾向を示す[12),13)]．

a）橋脚・高架橋柱

道路橋では，鋼製橋脚の主として耐震性向上の目的のために，コンクリート充填した構造が用いられる．すなわち，鋼製橋脚の補強としてコンクリートを充填していることに特徴がある．CFT構造の橋脚は，特に旧阪神公団の設計・施工指針（案）[4)]が出されて以降，数々の橋脚に適用されている[14)]．また，鋼製橋脚に，自動車等の衝突時の変形防止としてコンクリートを部分的に充填する場合に，この充填コンクリートを考慮して設計する場合がある．

鉄道橋では，CFT部材は，耐荷力や耐震性に優れ，急速施工や狭隘箇所での施工が可能であるため，主に営業線近接部や駅部の高架橋等の柱に多く用いられている（図-2）[15)]．CFT構造の柱は，15年程度前に，秋田新幹線の高架橋で初めて適用[16)]された．なお，鉄道構造物では，道路橋と異なり，円形断面のCFT柱が多く用いられている．

鉄道構造物にCFT柱が採用されるケースを整理すると，以下の通りである．

・急速施工（工期短縮）や狭隘箇所での施工が採用理由のほとんどである．すなわち，施工性の観点からCFT部材が多く採用されている．
・RC柱や鋼柱と比較して，小断面サイズで耐力を確保できるため，柱断面縮小のニーズから採用されている．
・柱断面サイズの制約下で，高架橋の柱間隔を大きくできることからCFT部材が採用されている．

b）アーチリブ

アーチリブにCFT構造を用いることの利点は，上記の耐荷力向上に加え，コンクリートアーチと比較して，自重（死荷重）減による長支間化が可能であることである．

道路橋では，架設時にアーチリブをCFT構造とする，合成鋼管巻き立て工法も採用された．1989 年に城址橋（新潟県）で初めて採用され，その後も使用されている[12)]．ただし，完成系ではアーチリブはSRC 構造となるため，設計はSRCあるいはRC構造として行われる．

鉄道橋では，CFT部材を用いることで断面サイズが縮小でき，施工性も優れ，長支間化が図れる以外にも，景観的にも優れた構造物が可能であることから用いられる．具体的には，CFT単弦アーチ橋（橋長49.7m）[17)]，CFT鋼管を有するバスケットハンドル型複合アーチ橋（橋長203m）[18)]，角形CFTをアーチリブに用いた下路PCランガー橋[19)]等の事例がある．

なお，アーチ橋ではないが，鉄道橋では，CFT構造を主桁（34.95＋36.0＋34.0mの3径間連続桁）に用いた事例がある[20)]．神戸新交通システムでは，主桁下フランジをCFT構造として事例[21)]もある．

(2) CFT部材の特徴

土木分野に用いられるCFT部材の諸元等について網羅的に整理したものはないため，ここでは，一事例として，鉄道の高架橋柱および橋脚に用いられたCFT構造の特徴を紹介する．対象は，後述する「鉄道複合標準」[22)]により設計された構造物17事例である．

a）柱径とせん断スパン

ラーメン高架橋および橋脚におけるCFT柱について，柱径（鋼管外径）とせん断スパンの関係を図-3に示す．図-3より，以下の傾向が見られる．

・CFT柱は，せん断スパンは概ね1～14m，柱径は概ね700～1500mmの範囲で適用されている．
・ラーメン高架橋のCFT柱は，せん断スパン比が概ねa/D=1～5となっており，橋脚のCFT柱はせん断スパン比a/Dは5よりも大きい．

b）鋼管の径厚比と部材の細長比

CFT柱について，鋼管の径厚比パラメータおよび部材の細長比パラメータの度数分布を図-4に示す．図-4より，以下の傾向が見られる．

・径厚比パラメータは概ね0.05～0.12の範囲にあり，径厚比は40～90程度である．橋脚の方が大断面ではある（図-3）が，経厚比は小さい傾向にある．

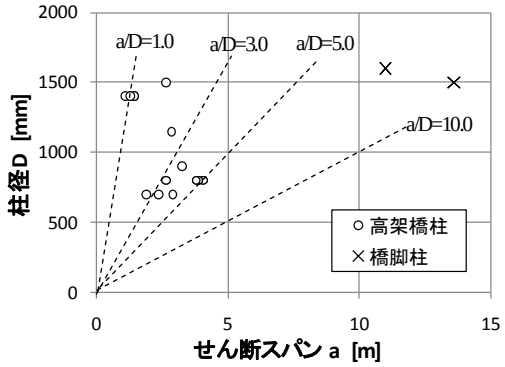


図-3 柱径（鋼管径）とせん断スパンの関係

・CFT柱の細長比パラメータは概ね0.1～0.5の範囲にあり，細長比は20～110程度である．橋脚の方が細長比が大きい傾向にある．

c）軸力比

CFT部材の軸力比は，高架橋の柱であれば全塑性軸力（鋼管とコンクリートの軸方向耐力の累加）に対して大きくても10%程度であり，地震時の軸力変動下でも30%程度以下であると思われる．最近では，地下構造物にも適用され，さらに大きい軸力を受ける部位で使用されるケースも増えている．

建築構造物で用いられるCFT部材と一概に比較することは難しいが，大雑把な傾向としては，建築構造物より，大断面で，鋼管の径厚比は小さく（すなわち薄肉断面），軸力は小さいと考えられる．

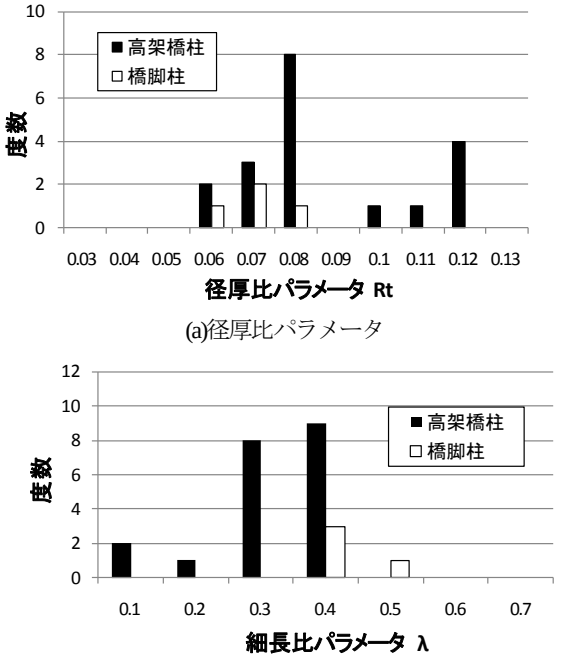
3. CFT部材の照査法の現状と課題

(1) 技術基準の経緯と現状

前述の通り，土木分野においては，コンクリートを充填した鋼製橋脚の実験的な検討が1980年頃から行われ，その後設計指針等がとりまとめられている．

旧阪神公団では，独自に載荷試験等を実施し，1986年に「合成柱（充てん方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針（案）」[4]が出されている．この指針（案）は，矩形断面のCFT構造を対象としている．今後限界状態設計法に移行することを想定して，いち早く限界状態設計法による照査法が提示されていることに特徴がある．

土木学会において，CFT構造の照査方法に関して最初に記載されたものは，1989年の「鋼コンクリート合成構造の設計ガイドライン」[6]である．その後，1997年に「鋼構造物設計指針　PARTB　合成構造物」[7]および「複合構造物設計・施工指針（案）」[8]



(a)径厚比パラメータ

(b)細長比パラメータ

図-4 経厚比パラメータと細長比パラメータ

が発刊された．これらは，矩形のみでなく，円形断面も対象に定められている．さらに，これらの指針をベースに，性能照査型体系である「複合構造物の性能照査指針(案)」[9]が発刊され，参考資料としてではあるが，円形断面を対象に，大規模地震に対する照査に用いる部材の非線形モデルが，取り入れられている．

その後，2009年には，この性能照査指針(案)を改訂し，「複合構造標準示方書」[10]が取りまとめられている．そして，2014年には，「複合構造標準示方書」[11]が改訂・制定され，［設計編］に加え，施工，維持管理に関する内容が新たに各編に取りまとめられている．

鉄道では，これらの土木学会等における動向を参考に，1998年に「鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物）」[22]（以下，「鉄道複合標準」）が発刊された．この「鉄道複合標準」は，複合構造物のうち，SRC構造とCFT構造を主として対象に，限界状態設計法が採用されている．鉄道では，CFT構造が取り入れられた最初の設計標準である．そして，最近「鉄道複合標準」について改訂作業が行われ，今年度中には改訂版が発刊される予定である．改訂版は，性能照査型体系の照査法が採用されている．

(2) 複合構造標準示方書（2014）の内容の紹介

「複合構造標準示方書（2014）」[11]（以下，複合示方書）［設計編］では，標準編と仕様編に区分され，仕様

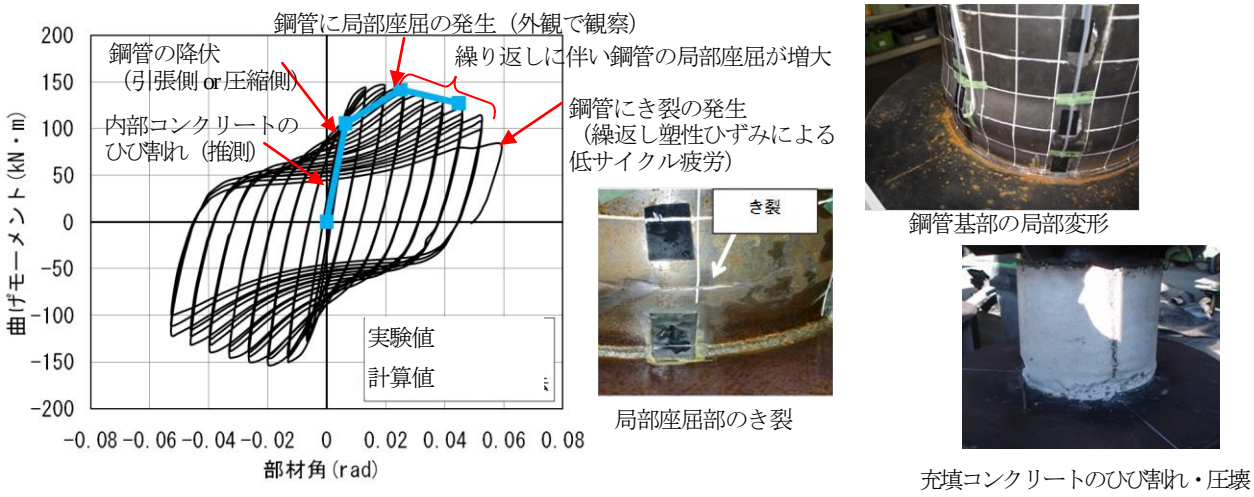


図-5　CFT部材の交番載荷試験における損傷状況

表-1　複合示方書［設計編］CFT部材編の構成

章	項目
1章　総則	適用の範囲，照査に関する一般事項，用語の定義，記号
2章　構造解析および応答値の算定	部材のモデル化，構造解析，設計応答値の算定
3章　性能照査における前提	耐久性に関する検討，構造細目，施工に関する検討
4章　安全性に関する照査	断面破壊に対する照査，疲労破壊に対する照査
5章　使用性に関する照査	使用性の照査の前提，快適性に対する照査，機能性に対する照査
6章　復旧性に関する照査	地震の影響や変動作用に対する修復性の照査，火災作用に対する修復性の照査，環境作用に対する修復性の照査

編の中に「コンクリート充填鋼管部材編」（以下，CFT部材編）があり，実務で標準と考えられる照査法が定められている．CFT部材編によることができない場合には，標準編に定める照査の考え方にもとづき，仕様編の「有限要素解析による性能照査編」によりFEM解析を用いることを推奨している．

CFT部材編の目次構成を**表-1**に示す．複合示方書では，構造物の要求性能として，持続性，安全性，使用性および復旧性を定めている．持続性は，構造計画段階で検討すべきものとして，それ以外についての照査方法を具体的に定めている．

ここでは紙面の都合上，CFT部材編のうち，部材のモデル化と照査の前提となる構造細目について概要を示す．

a）部材のモデル化

CFT部材は，鉛直荷重を受ける柱等の鉛直部材で多く適用される．そのため，断面諸元等は，地震時の照査で決定されることが多い．CFT部材を合理的に設計するためには，大規模地震動に対しては軽微な損傷は許容しつつ，塑性変形性能を有効に考慮することが重要となる．

CFT部材の交番載荷試験結果における曲げモーメントと部材角の関係と，試験体の損傷状況の関係を**図-5**に示す．これらをもとにCFT部材のモデル化や限界点を設定した．

CFT部材の曲げモーメントと部材角，曲げモーメントと曲率に関する非線形特性の算定方法はいくつか提案されているが，複合示方書では，円形断面の部材を対象に，**図-6**に示すトリリニア型の骨格曲線にモデル化する場合の方法について示す．また，最大曲げ耐力以降の耐力低下域において限界点の定め方について統一されたものはないが，鋼管の局部座屈が顕著になる時点として，最大曲げ耐力の90%を維持する点をとることとしている．

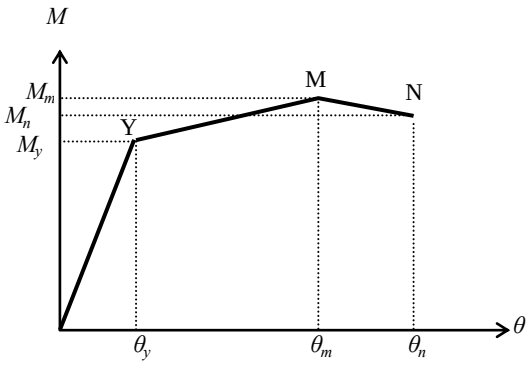
曲げモーメントは，CFT断面をファイバー要素に分割し，以下の仮定を用いて，いわゆるRC方式により算定する．

- 維ひずみは，部材断面中立軸からの距離に比例する．
- コンクリートの引張応力は無視する．
- コンクリートの応力ーひずみ関係には，文献23),24)等を参考に，鋼管による拘束効果（コンファインド効果）を考慮する．
- 鋼管の応力ーひずみ関係は，引張側は降伏後のひずみ硬化の影響を考慮し，圧縮側は局部座屈後の圧縮強度を定める．
- 軸力は鋼管およびコンクリートに均等に載荷され，軸力による鋼管とコンクリートの軸ひずみは同じとする．

降伏曲げモーメントM_yは，水平力作用方向に対して45度位置での引張側鋼管が降伏ひずみに達するときとして算定する．また，最大曲げモーメントM_mは，コンクリートの終局ひずみを設定して算定する．

部材角は，例えばM点については，**図-7**に示すような曲率分布を仮定して算定する．特徴的な点は以下のと尾である．

- く体変形（$\delta_{mb}+\delta_{mp}$）と，接合部からの鋼管の伸び



M_y：鋼管引張降伏時の曲げモーメント
M_m：最大曲げモーメント
M_n：最大曲げモーメントの90%
θ_y：降伏時の部材角
θ_m：鋼管の局部座屈発生点の部材角（最大曲げ耐力時に相当）
θ_n：鋼管の局部座屈が顕著になる時点の部材角（M_mの90%を維持する最大変形時に相当）

図-6　CFT部材のモデル化[11)]

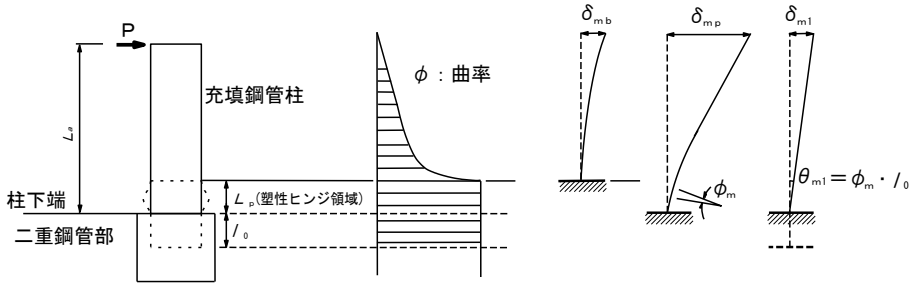
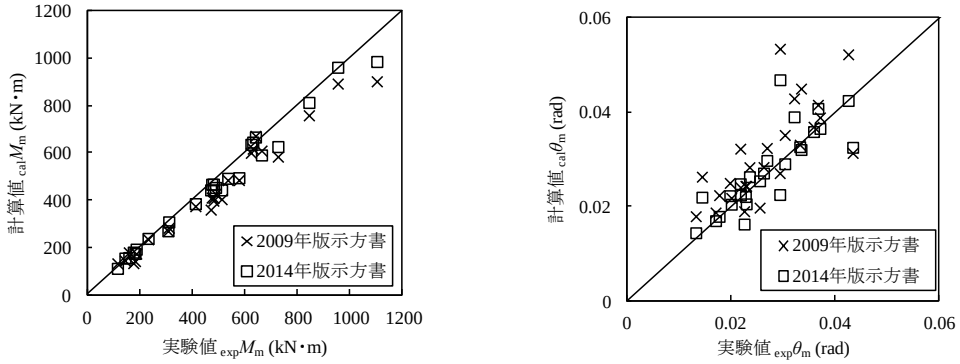


図-7　M点における曲率分布の仮定[11)]



(a)最大曲げモーメント　　**(b)最大曲げモーメント時の部材角**

図-8　計算値と試験値の比較[11)]

出しによる変形δ_{m1}を累加して算定する

・く体変形（$\delta_{mb}+\delta_{mp}$）は，塑性ヒンジ部（δ_{mp}）と塑性ヒンジ部以外（δ_{mb}）に分けて算定する．塑性ヒンジ部以外は，**図-7**の曲率分布をもとに算定する．また，塑性ヒンジ部は，この部分の回転角を載荷試験結果に基づき求めた算定式により算定する．

M点の曲げモーメントM_mと部材角θ_mについて，複合示方書の算定式による計算値と試験値の比較を**図-8**に示す．2009年版と比較して，算定方法の見直しを図ったが，算定精度が向上していることがわかる．

b）照査の前提となる構造細目

CFT部材編で対象とする部材は，

・鋼管とコンクリートは一体性が保たれている．

・鋼管とコンクリートがともに軸方向力を負担する．

を満足している必要がある．

CFT部材は，鋼管と充填コンクリートが力学的に一体となって外力に抵抗する構造である．そのためには，コンクリートの充填が良好で，コンクリートの鋼管からの抜出しを拘束し，鋼管とコンクリートの一体性を確保する構造とする必要がある．コンクリートの鋼管からの抜け出しを防止する構造としては，鋼管内壁に頭付きスタッドを溶植する構造，柱の両端に強固なダイヤフラムで拘束する構造，この他，突起付き鋼管の使用や鋼管端部にずれ止めの丸鋼あるいは帯板を溶接する構造が考えられている．実構造では，鋼管内面全体にわたってずれ止

めを取り付ける構造は，製作上困難であることから，それ以外の方法が用いられることが多い．

また，後者については，作用軸力を鋼管および充填コンクリートそれぞれの部分で均衡して分担させるため，鋼管の軸力分担率の範囲が0.2～0.9となることを求めている．すなわち，CFT部材の全断面塑性軸力に対する鋼管部分の全塑性軸力の割合の範囲を定め，鋼管とコンクリートの断面構成のバランスを求めている．

その他，CFT部材編を用いて照査する場合の前提条件として，

・環境作用による耐久性（鋼材の腐食等）を一定レベルに確保できること
・照査の前提となる構造細目（鋼板の最小板厚，鋼板とコンクリートの接触面，鋼板の継手，ダイアフラム等）
・施工における配慮事項（鋼管の製作，コンクリートの打込みにおける品質管理等）

等を定めている．

また，複合示方書［施工編］および［維持管理編］においても，CFT部材を対象に現時点で標準と考えられる手法が定められている．

(3) 今後の課題

今回の複合示方書の改訂作業，「複合構造物の耐荷メカニズム研究小委員会(H212)」における検討・議論を通して，CFT構造に関して解決すべき課題がいくつか挙げられた．ここでは，これらのうち，筆者が考えている主な課題を以下に列挙する．

a）繰り返し載荷に対する耐荷機構の解明

軸方向力と繰返し曲げモーメントを受けるCFT部材は，荷重－変位関係と，鋼管およびコンクリートの損傷状況との対応は概ね把握されつつある（**図-5**）．今後は，三次元有限要素解析等により，CFT部材の鋼管内部の充填コンクリートの損傷を含めた損傷状況や耐荷機構を明らかにしていく必要がある．そのためには，鋼管の局部座屈を含む繰返し弾塑性挙動，三軸応力下でのコンクリートの挙動（ひび割れを含む引張・圧縮の繰返し挙動），鋼管内面とコンクリートの付着の状態等について明らかにしていく必要があると考えられる．また，大変形域で繰返し曲げを受ける場合，鋼管の低サイクル疲労によりCFT部材としての限界状態となることが多く，鋼管の低サイクル疲労による評価方法についても検討が必要と考えられる．

複合示方書には，円形断面のCFT部材を対象に，ポストピークを含む塑性変形性能の算定法が示されているが，矩形断面についても同様な算定法の構築が望まれる．土木分野における矩形断面は，正方形のみでなく，ラーメン橋脚の柱等では長方形断面もある．また，大断面となる場合には鋼管に縦方向補剛材が配置される．鋼・合成構造標準示方書［耐震設計編］[25]には，部分充填を対象とした部材のモデル化が記載されているが，完全充填の場合にこれらすべてに対応した算定法がないため，今後の検討課題といえる．

また，復旧性の照査においては，損傷レベルは，損傷程度に応じた補修の難易度から定める必要があるが，CFT部材について，損傷に対する補修方法に関する検討は少なく[26]，今後検討すべき課題の一つと考えられる．

b）コンクリートのクリープに関する経時挙動

充填コンクリートのクリープ係数は，鋼管に密閉された空間のため，乾燥によるクリープが小さく，通常の屋外のコンクリートより小さくなることは確認されている．しかしながら，充填コンクリートのクリープに関する検討は少なく，複合示方書では，充填コンクリート用のクリープ係数の提案までは至っておらず，通常の鉄筋コンクリート部材等のコンクリートと同様としている．CFT部材の多様化に伴い，地中構造物等の軸力が高い部位にも適用される場合が増えていることから，充填コンクリートのクリープ係数の設定，さらにはCFT部材としてのクリープ挙動の評価方法について明らかにしていく必要がある．

c）充填コンクリートの品質確保のための検査方法

充填コンクリートの打込みは，土木分野では，鋼管上方からコンクリートを落し込む方法が多い．CFT構造は，コンクリートが完全に充填されていることが前提の構造である．そのため，充填性の確保が重要である．

完成後は，当然なことではあるが，鋼管内部の状態を直接目視で確認することができない．もし鋼管内面の腐食，コンクリートの劣化等の損傷が生じていても，維持管理の点検で発見することはほぼ不可能である． 現状では設計・施工段階で最大限配慮しているが，将来の維持管理において，確実に点検できるようにするため，鋼管内部の状況を確認できる非破壊検査手法の開発が望まれる．コンクリートの充填性の確認のための非破壊検査の開発は行われているものの，内部の損傷検知のための非破壊検査手法についての検討は少ない．

その他，本稿では省略したが，CFT部材では，接合部の構造が課題となることが多く，CFT構造に関する検討と合わせて，接合部についても検討が必要と考えられる．

4. CFT構造に関する最近の取り組み

CFT部材の耐力および変形性能の評価法に関する取り

組みと，新しい構造の開発に関する取り組みについて紹介する．

a）耐力および変形性能の評価法

外力を受けるCFT部材の弾塑性挙動を精度良く算定するためには，三次元有限要素解析（以下，FEM解析）が最も適している．後藤らは，円形断面のCFT部材[27]，矩形断面のCFT部材[28]について，FEM解析でポストピークを含む繰返し挙動を精度良く再現できることが示されている．また，文献27)では，一方向の繰返しのみでなく水平二方向の繰返し載荷や加振実験についても解析で再現性が検証されている．さらに，繰返し載荷時の鋼管の局部座屈の進展・抑制のメカニズムが解析により明らかにされている．

設計実務では，FEM解析を行うことは煩雑となり，骨組解析が一般に適用される．そのため，図-6のような非線形モデルが設定できるようにする必要がある．円形断面については，文献29）等で検討されており，複合示方書にも反映されている．ただし，非線形モデルの算定方法においては，コンクリートの応力ーひずみ関係における鋼管によるコンファインド効果の影響の考慮，また高強度材料や長柱等への適用はまだ十分に検証されていない．矩形断面については，コンクリートを充填した鋼製橋脚を対象に検討が行われ，文献25), 30)等に曲げ耐力や限界変形の算定法が示されている．これらのコンクリートが完全充填された部材への適用性や，ポストピークを含めたモデル化の方法についてはさらなる検証が必要と思われる．

b）新しい構造の開発

土木分野では，鋼管の中に，小径の鋼管あるいは鉄筋を挿入する構造が提案・開発されている．

鋼管の中に小径の鋼管を挿入した構造は，コンクリート充填二重鋼管（CFDT）部材と呼ばれ，内外の鋼管間にコンクリートを充填し，内鋼管の内側は中空とし軽量化を図っている．CFDT部材について，載荷試験や数値解析等で曲げ耐荷力等について検討が行われている[例えば31),32)]．内外鋼管とコンクリートの界面のずれを抑えるためずれ止めを配置した構造について，ずれ止めによる曲げ特性への影響についても検討が行われている[32)]．

また，鉄筋を鋼管内部に挿入する構造は，鉄筋コンクリート充填鋼管（RCFT）部材と呼ばれることがあり，主に建築分野で検討されている．さらに，軸方向鉄筋を高密度配筋にする構造も提案・実用化されている[例えば33)]．この構造は，力学的な機構を考えるとCFT構造とは言えないが，CFT構造として設計した場合に鋼管厚が著しく大きくなり鋼管の成形が困難や高コストとなるときに，鋼管は薄肉断面として，型枠代わりおよびせん断補強として，耐力上必要な鋼材を軸方向鉄筋で確保しようというものである．

5. まとめ

土木分野におけるCFT部材の現状と課題について示した．CFT構造は，鋼管と充填コンクリートで構成される非常にシンプルな構造である．シンプルな構造ながらも，鋼管と充填コンクリートが，両者の欠点を補いながら，材料自身の長所を発揮できる構造である．

本稿に示すように，CFT構造は，力学的な機構や経時的な挙動等に関してまだ十分に明らかになっていない点がある．今後，CFT部材を土木分野の構造物により積極的に適用されるためには，建築分野での成果も参考にしながら，さらなる検討が望まれる．

本稿は，筆者の乏しい知識をもとにまとめたものであり，勘違いや抜け等があると思われるが，ぜひご指摘頂ければ幸いである．本稿が，今後のCFT構造の発展のために参考になれば幸いである．

謝辞：本稿の一部は，鉄道における「複合構造物設計標準に関する委員会」にて情報提供を頂いた．また，「土木学会複合構造物の耐荷メカニズム研究小委員会(H212)」において議論頂いた．ここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 前田幸雄：複合構造に関する研究の発展の歴史と動向，土木学会論文集，第 344 号，I-1，pp.13-25，1984.4
2) 池田尚治：鋼コンクリート合成構造の発展の動向と展望，土木学会論文集，第 414 号，V-12，pp.15-22，1990.2
3) 建設省土木研究所：コンクリート充填鋼管の耐荷力（その 1）～（その 3），土木研究所資料，第 1728 号，第 2724 号，第 3472 号
4) 阪神高速公団：合成柱（充てん方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針（案），1986.3
5) 村田清満，山田正人，池田学，瀧口将志，渡邊忠朋，木下雅敬：コンクリート充填円形鋼管柱の変形性能の再評価, 土木学会論文集,No.640,I-50,2000.1
6) 土木学会：鋼コンクリート合成構造の設計ガイドライン，構造工学シリーズ 3，1989.1
7) 土木学会：鋼構造物設計指針　PARTB　合成構造物，鋼構造シリーズ⑨B，1997.9
8) 土木学会：複合構造物設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー90，1997.10
9) 土木学会：複合構造物の性能照査指針（案），構造工学シリーズ 11，2002.10
10) 土木学会：2009 年制定　複合構造標準示方書，丸善，2009.12
11) 土木学会：2014 年制定　複合構造標準示方書［原則編］［設計編］［施工編］［維持管理編］，丸善，

2015.5
12) 土木学会：鋼・コンクリート複合橋梁の最近の進歩，2001.11
13) 土木学会：最新複合構造の現状と分析－性能照査型設計法に向けて－，複合構造レポート 02，2008.7
14) 土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計 (2) 応用編：設計編，構造工学シリーズ 9-B，1999.9
15) 池田学；鉄道構造物における SRC 部材および CFT 部材に関する新技術の動向，コンクリート工学，Vol.52, No.1，pp.102-107，2014.1
16) 大槻茂雄，川瀬千佳，高橋裕行，前沢二郎：日本初の CFT 構造を用いた鉄道高架橋の設計・施工，コンクリート工学，1998.6
17) 佐藤清一，丸山孝，伊藤昭夫，駿河正敬：除沢川橋梁－PRC 補剛桁を用いた交差型コンクリート充填鋼管単弦アーチ橋－，橋梁と基礎，2002.8
18) 白神亮，鈴木啓之，東隆介，大郷貴之，長沼清，森井慶行：JR 吾妻線第三吾妻橋りょうの施工，橋梁と基礎，2010.12
19) 井上崇，佐藤清一：第一新田川橋梁－PC 複合ランガー橋－，橋梁と基礎，2002.8
20) 保坂鐵矢，杉本一朗：鉄道における最近の鋼・コンクリート複合橋梁，橋梁と基礎，2000.7
21) 山本龍哉，江上武史，橋本靖智，大西悦郎，矢木誠一郎，大南亮一：コンクリート充填鋼管（CFT）を用いた桁橋（CFT ガーダー）に関する提案と基礎的検討，第 4 回複合構造に関するシンポジウム講演論文集，pp.243-248，1999.11
22) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物），丸善，1998.8
23) Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.114, No.8, pp.1804-1826, 1988.
24) Mander, J.B. and Priestley, M. J. N.: Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.114, No.8, pp.1827-1849, 1988.
25) 土木学会：2008 年制定 鋼・合成構造標準示方書［耐震設計］，2008.2
26) 池田学，萬代能久，斉藤雅充，吉田直人：コンクリート充填鋼管部材の補修方法に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.1213-1218，2013.7
27) 後藤芳顯，関一優，海老澤健正，呂西林：地震動下のコンクリート充填円形断面鋼製橋脚における局部座屈の進展抑制機構と耐震性向上，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.69, No.1, pp.101-120, 2013.
28) 後藤芳顯，水野貢介，Ghosh Prosenjit KUMAR，藤井雄介：充填コンクリートとの相互作用を考慮した矩形断面鋼製橋脚の繰り返し挙動の FEM 解析，土木学会論文集 A，Vol.66, No.4, pp.816-835，2010.12.
29) 斉藤雅充，池田学，萬代能久：円形断面コンクリート充填鋼管部材の最大耐力時における変形性能算定法の検討，第 10 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，2013.11
30) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.4.
31) 杉浦邦征，林堂靖史，橋本国太郎，大島義信，河野広隆：コンクリート充填中空式 2 重鋼管構造橋脚の耐震性に関する研究，構造工学論文集，Vol.55A，pp.670-679，2009.3
32) 清水優，石川敏之，服部篤史，河野広隆：鋼管－コンクリート界面に設けたずれ止めがコンクリート充填二重鋼管部材の曲げ特性に与える影響，コンクリート工学論文集，第 25 巻，pp.45-55，2014
33) 小林 薫，小林 寿子：高密度配筋 RC 柱の交番載荷実験結果に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.37-42，2010

RESCENT DEVELOPMENTS AND CHALLENGES OF CFT STRUCTURES IN CIVIL ENGINEERING

Manabu IKEDA

The concrete-filled steel tubular (CFT) structure has high load-carrying capacity and high ductility due to the composite effect of the steel tube and the filler concrete. The CFT structure has excellent workability comparing with other structures such as the reinforced concrete structure because the steel tube can function as a formwork for the concrete casting. Although the time of the application of the CFT members in the civil engineering field is relatively recent, various studies have been carried out and the method of performance verification was stipulated in the Standard Specifications for Hybrid Structures published by Japan Society of Civil Engineers. This paper describes the structural features of the CFT structure, its current situation of the application in the civil engineering field, an outline of the performance verification, recent trends and current issues.