

コンクリート打込み時の鋼材の 初期応力度を考慮した合成部材の耐力評価

河村 佳英* 中田 裕喜* 岡本 大*
青木 千里** 池田 学**

Evaluation of Flexural-Load Capacity for Composite Member with Considering Initial Stress of Fabricated Steel at the Concrete Casting

Yoshihide KAWAMURA Yuki NAKATA Masaru OKAMOTO
Chisato AOKI Manabu IKEDA

The initial stress will be generated in members of steel-framed reinforced concrete (SRC) and concrete filled steel tube (CFT) during construction. However a method to consider the initial stress in the calculation of limited values of these members such as bending capacity has not yet been proposed. In this study, by comparing the calculated result with consideration of the initial stress and that without consideration of the initial stress, the influence of the initial stress on the flexural-load capacity of SRC members was evaluated. In addition, a calculation method of the flexural-load capacity was proposed with considering the initial stress generated by the concrete lateral pressure based on the investigation of constructed CFT members and trial calculations.

キーワード：SRC, CFT, 初期応力度, 曲げ耐力, 打込み高さ, 幅厚比

1. はじめに

複合構造物は、営業線直上および近接箇所のほか、施工条件の制約を受ける箇所において建設が有利である。

複合構造物を構成する代表的な部材として、鉄骨鉄筋コンクリート（以下、SRC）部材とコンクリート充填鋼管（以下、CFT）部材が挙げられる。これらの合成部材は、鋼とコンクリートを合成した断面で外力に対して一体となって抵抗する。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）¹⁾（以下、複合標準）において、SRC部材の架設時の鉄骨に発生する初期応力は、その影響を応力-ひずみ曲線に考慮しなければならないとされている。また、CFT部材は、コンクリート打込み時の側圧による応力や架設等による応力の影響を考慮することとされている。しかし、現状ではこれらの取扱いは明確になっていない。

そこで、本論文では、SRC部材における初期応力度を考慮した曲げ耐力算定手法を示した。また、曲げ耐力について、鉄骨の応力-ひずみ曲線に初期応力度の影響を考慮して算出した値とこれを考慮せずに算出した値を比較することにより、初期応力度の考慮の有無が曲げ耐

力に与える影響を検討した。さらに、CFT部材については側圧に関する測定事例の調査、および実構造物を想定した試算の結果から、コンクリート打込み時の側圧による初期応力度に関して耐力算定時等の取扱いを提案した。

2. SRC部材の曲げ耐力算定時における初期応力度の取扱い

2.1 検討概要

SRC部材の曲げ耐力は、鉄骨の両端部が十分に定着されていることを前提として、平面保持の仮定に基づき鉄骨を鉄筋に換算して鉄筋コンクリート部材と同様に耐力を算定する方法（RC方式）が一般に用いられる¹⁾。

一方、SRC部材の施工は、鉄骨の架設後、その周囲に鉄筋を配置しコンクリートを打込むことが多く、施工時には支保工を用いないことが多い。このため、施工時の鉄骨には、その自重に加えて、例えば鉄筋やコンクリート等の重量（以下、施工時死荷重という）により曲げ応力が生じる。

本章では、SRC部材の曲げ耐力算定時において、前記の施工時死荷重による曲げモーメントの影響を考慮する手法を示した。また、施工時死荷重により鉄骨に生じる初期応力度が曲げ耐力に与える影響を検討した。

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

** 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

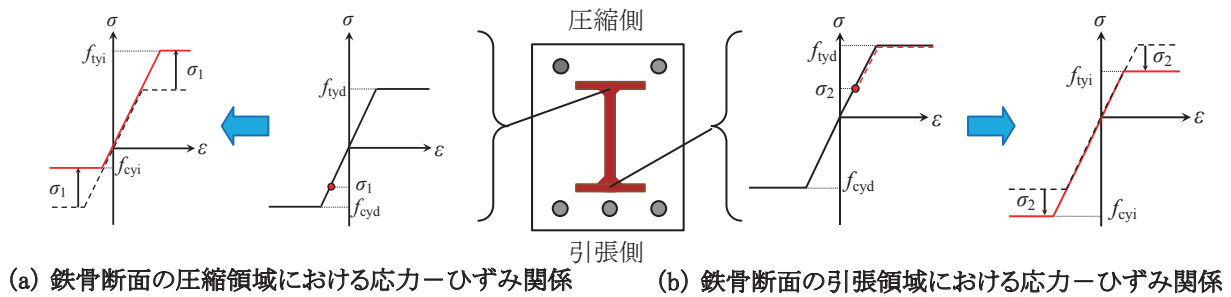


図1 合成後断面の初期応力度を考慮した応力 - ひずみ関係

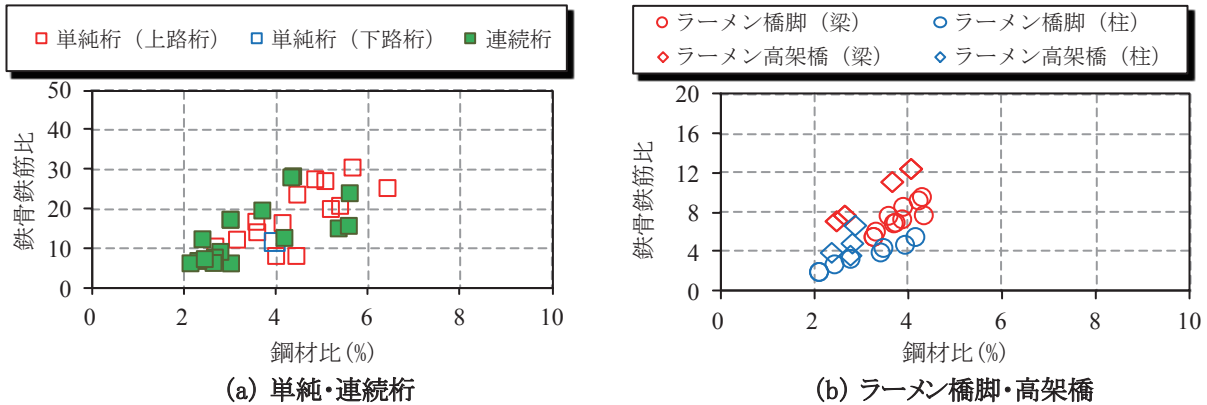


図2 鋼材比と鉄骨鉄筋比

2.2 鉄骨の初期応力度の考慮方法

SRC 部材の鉄骨には、施工時、および合成後において施工方法に応じた段階的な応力が発生する。合成後の曲げ耐力は、施工時の初期応力度を考慮するか否かにより、その算定方法が異なる。本検討では、初期応力度を考慮する場合としない場合について、以下に示す手法により曲げ耐力を算定した。

式 (1) に施工時死荷重による初期応力度を考慮する場合の曲げ耐力算定式を示す。

$$M_{ui} = M_1 + M_2 \quad (1)$$

ここで、 M_{ui} ：施工時死荷重による初期応力度を考慮した合成部材の曲げ耐力、 M_1 ：施工時死荷重による作用曲げモーメント、 M_2 ：合成後断面の初期応力度を考慮した曲げ耐力である。

施工時死荷重による曲げモーメント M_1 が作用するため、鉄骨には弾性範囲内の初期応力度が発生する。合成後の鉄骨は、上記の応力状態を保持したまま合成部材として想定する作用に抵抗する。すなわち、 M_2 は初期応力度の影響を考慮した合成後断面の曲げ耐力 M_{ui} から、施工時死荷重による作用曲げモーメント M_1 を減じたものとなる。

図 1 に、合成後断面の初期応力度を考慮した応力 - ひずみ関係の考え方を示す。(a) は鉄骨断面の圧縮領域における応力 - ひずみ関係、(b) は鉄骨断面の引張領域における応力 - ひずみ関係を示す。ここでは、施工時死

荷重の影響を鉄骨の応力 - ひずみ関係に反映させることにより、初期応力度の影響を考慮した。上記荷重により鉄骨に生じる初期応力度は、圧縮領域において σ_1 、引張領域において σ_2 とする。なお、応力度および強度は、引張を正、圧縮を負とする。

式 (2) ~ (5) に鉄骨断面の圧縮領域と引張領域における設計降伏強度の算定式を示す。

(1) 鉄骨断面の圧縮領域

$$\text{設計圧縮降伏強度 } |f_{cyi}| = |f_{cyd} - \sigma_1| \quad (2)$$

$$\text{設計引張降伏強度 } f_{lyi} = f_{lyd} - \sigma_1 \quad (3)$$

(2) 鉄骨断面の引張領域

$$\text{設計圧縮降伏強度 } |f_{cyl}| = |f_{cyl} - \sigma_2| \quad (4)$$

$$\text{設計引張降伏強度 } f_{lyi} = f_{lyd} - \sigma_2 \quad (5)$$

ここで、 f_{cyl} ：鋼材の初期応力度を考慮した設計圧縮降伏強度、 f_{lyi} ：鋼材の初期応力度を考慮した設計引張降伏強度、 f_{cyd} ：鋼材の設計圧縮降伏強度、 f_{lyd} ：鋼材の設計引張降伏強度である。

一方で、初期応力度を考慮しない場合の曲げ耐力 M_{uno} は、鉄骨の応力度を 0 とした状態から施工時死荷重も含めた全作用に対して合成後断面が抵抗するものとみなし、曲げ耐力を算定した。

なお、本検討では、施工時死荷重は分布荷重として取り扱い、その荷重は全て鉄骨が受け持つと仮定した。

2.3 鉄骨の初期応力度が曲げ耐力に及ぼす影響

実際のSRC構造物について、鉄骨の初期応力度が曲げ耐力に及ぼす影響を検討した。検討対象としたSRC構造物は単純桁、連続桁、ラーメン高架橋、およびラーメン橋脚である。主な検討断面は、支間・径間中央、支点上、および柱の上下端であり、検討数は、合計66断面である。

図2に検討対象としたSRC実構造物の鉄骨鉄筋比と鋼材比を示す。鋼材比は約2~6%、鉄骨鉄筋比は、SRC桁で約5~30、ラーメン橋脚・高架橋で約2~12である。

図3に施工時の鉄骨について、引張側フランジの初期応力度が引張降伏強度に占める割合を示す。スパンの長大化とともに引張降伏強度に対する施工時の初期応力度の割合は、増大することがわかる。この割合は、桁では20~60%であり、ラーメン高架橋および橋脚では、最大でも20%以下であった。

図4に部材長に対する M_{uno} と M_{ui} の比を示す。 M_{uno} と M_{ui} の比は0.97~1.04であった。図3に示す範囲では、いずれの構造形式についても、初期応力度の考慮が曲げ耐力に与える影響は、ほとんど見られないことがわかった。

一方で、コンクリートと一体化される前の鉄骨については、施工時における安全性の検討がなされる。この検討を満足する範囲において、鉄骨の初期応力度が最も大きくなるのは、鉄骨の圧縮側フランジに曲げ座屈耐力相当の応力が発生する場合と考えられる。そこで、図2(a)に示す諸元の桁を対象に、曲げ座屈耐力時における鉄骨の初期応力度を考慮した曲げ耐力の比(M_{uno} と M_{ui})を比較した。なお、曲げ座屈耐力時における初期応力度が鉄骨の引張降伏強度に占める割合は、最大で80%を超える。

図5に曲げ座屈耐力時における曲げ耐力の比(M_{uno}/M_{ui})を示す。引張降伏強度に対する引張側フランジの発生応力の割合は、10%程度から80%を超える範囲に分布している。この範囲においても、 M_{uno} と M_{ui} の比は0.98~1.02であり、初期応力度の考慮が曲げ耐力に与える影響は無視できるほど小さいことがわかった。

2.4 コンクリート打込み時の初期応力度の取扱いに関する提案とその適用範囲

以上の結果から、鋼材比が約2~6%であり、一般的な鉄骨鉄筋比を有するSRC部材では、鉄骨に発生する初期応力度が曲げ耐力に与える影響は、無視できる程度であることがわかった。

よって、SRC部材の曲げ耐力は、施工時の鉄骨に生じる初期応力度の影響を考慮せず、施工時死荷重を含む全作用に対して鉄骨の初期応力度を0とした合成後の断面を用いて照査してよいと考えられる。

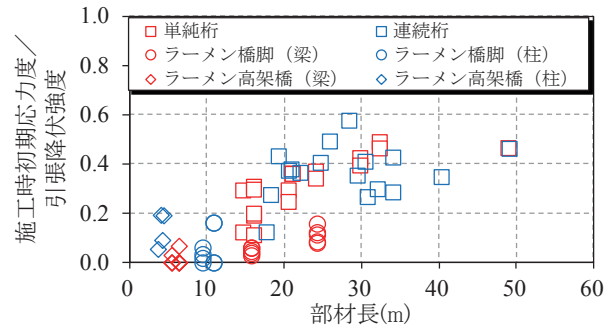
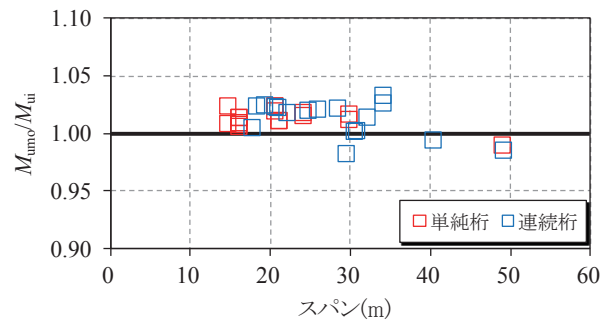
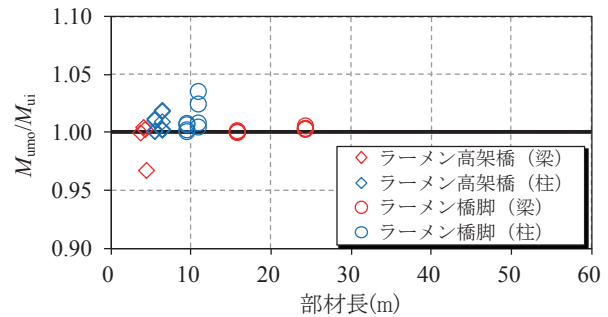


図3 施工時の初期応力度が鉄骨の降伏強度に占める割合



(a) 単純桁, 連続桁



(b) ラーメン高架橋, 橋脚

図4 部材長に対する曲げ耐力の比 (M_{uno}/M_{ui}) の関係

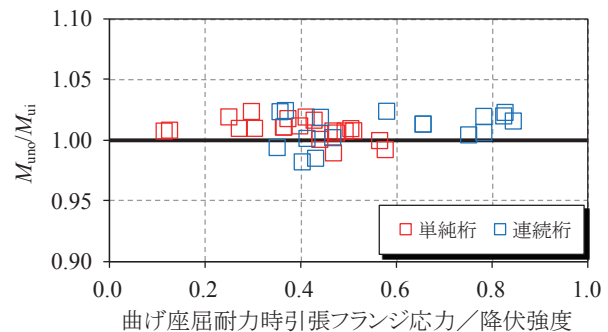


図5 曲げ座屈耐力時における曲げ耐力の比 (M_{uno}/M_{ui})

3. CFT 部材の初期応力度の取扱い

3.1 検討概要

複合標準¹⁾「6章 終局限界状態に関する検討」において、コンクリート打込み時の側圧による応力や架設等による応力の影響を考慮するため、設計断面耐力算定時の鋼管の設計局部座屈強度からコンクリート打込み時の側圧による初期応力として設計圧縮降伏強度の10%を控除するよう規定している。また、「10章 コンクリート硬化前の安全性の検討」では、コンクリート打込み時の側圧に対し、鋼管の部材軸方向および周方向の変位をそれぞれ制限しており、応力については制限値を定めていない。

しかし、上記の取扱いは根拠が明確でなく、また、建築学会のコンクリート充填鋼管構造設計施工指針²⁾（以下、CFT指針）では、コンクリート打込み時の側圧の影響は考慮しなくてよいとされており、複合標準での取扱いは過大となっている可能性がある。

そこで、CFT部材のコンクリート打込み時の側圧の影響について把握するため、初めに既往の文献等から測定事例の調査を行った。続いて、実構造物の断面諸元を用いて側圧による鋼管の応力および変形量を算出し、CFT部材の初期応力度の取扱いについて検討した。

3.2 コンクリート打込み時の側圧の影響に関する既往の測定事例の調査

CFT部材に関する既往の文献^{2)~10)}から、コンクリート打込み時の側圧により鋼管に発生する応力の測定結果を調査した。土木分野では測定事例がないため、建築分野での測定事例について調査した。なお、測定事例におけるCFT部材の特徴は以下の通りである。

- ①断面形状：一般的に土木分野では円形断面が用いられる。しかし、建築分野では矩形断面が一般的であるため、測定事例はすべて矩形断面である。
- ②打込み高さ：鉄道構造物では一般に5～10m程度、高い場合でも20m以内であるが、建築分野では30mを超える事例もあり、測定事例は5～30mである。測定事例を調査した結果、以下のことがわかった。

(1) 施工方法による違い

鉄道構造物では落とし込みによる打設が一般的だが、建築分野では圧入による打設が一般的である。落とし込み工法の場合、鋼管に作用する側圧は液圧よりも小さい^{2) 3) 4)}が、圧入工法の場合、液圧と同等もしくは液圧より10%程度大きい側圧が鋼管に作用するとされている^{2) 3) 4)}。

(2) 鋼管応力の経時変化

充填コンクリートの側圧による鋼管応力はコンクリートの硬化に伴い低下し、側圧の50～75%程度まで低下する事例がある⁶⁾。この傾向は、周方向よりも部材軸方向の方が大きい⁷⁾。

(3) 部材軸方向応力と周方向応力との違い

コンクリート打込み時の側圧によって鋼管の軸方向に発生する応力は、降伏強度に対して十分に小さい⁷⁾。

また、周方向応力は、部材軸方向応力と比べて大きい⁷⁾が、降伏強度に対しては余裕がある^{例え7)}。

3.3 実構造物を想定した試算の実施

3.3.1 試算の断面諸元と前提条件

矩形断面と円形断面のCFT部材を対象とし、実構造物の断面諸元を用いて鋼管に発生する応力と鋼管のたわみ量を試算し、比較した。断面は矩形4体と円形14体を用い、矩形断面の諸元は、鋼管降伏強度355N/mm²、打込み高さ16～19m、断面幅1.5～3.0mであり、円形断面の諸元は、鋼管降伏強度235～450N/mm²、打込み高さ4.2～12.4m、鋼管径0.7～2.0mである。

以下に、試算の前提条件を示す。

- ①計算は、複合標準¹⁾およびCFT指針²⁾の算定式、仮定条件を用いて行う。(3.3.2参照)
- ②打込み高さは柱長と同じであると仮定し、着目断面は柱基部とする。
- ③コンクリート打込み時の側圧は液圧の三角形分布とする(図6)。
- ④経時変化については、考慮しない。

なお、3.2(1)より、鉄道構造物で一般に用いられる落とし込み工法では、鋼管に作用する側圧は液圧よりも小さい傾向にあり、また、3.2(2)より、鋼管応力は経時変化に伴い低下する傾向にある。そのため、本計算では、応力度は大きい値となり、安全側の評価と考えられる。

3.3.2 鋼管応力度の算定式

鋼管の応力とたわみ量の計算は、以下の通りとする。

- ①矩形断面：部材軸方向については横補剛材またはダイアフラム間で支持された両端固定梁、周方向については腹板間または縦補剛材間で支持された両端固定梁と仮定する(図7)。
- ②円形断面：内圧を受ける円筒殻と仮定し、以下の算定式を用いる。

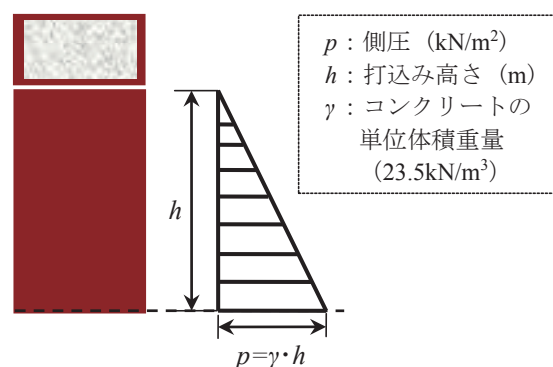


図6 側圧の考え方

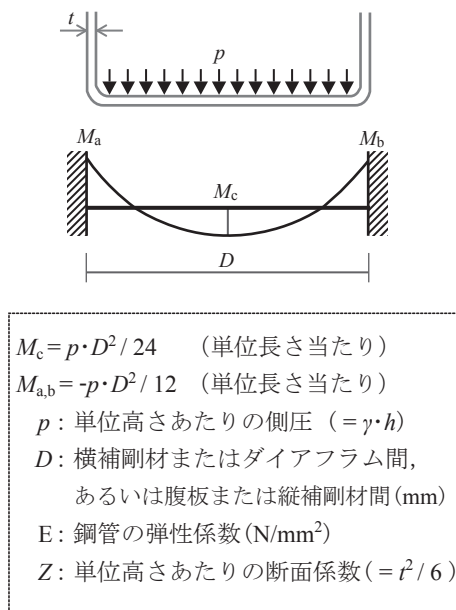


図7 矩形断面のCFT部材の算定方法概念図²⁾

(軸方向応力度)

$$\sigma = p \times R / (2t) \quad (6)$$

(周方向応力度)¹¹⁾

$$\sigma = p \times R / t \quad (7)$$

(周方向変位)¹¹⁾

$$\Delta R = R^2 \times p / (t \times E) \quad (8)$$

ここで、 p ：側圧 ($=\gamma \times h$)、 R ：鋼管半径、 t ：鋼管厚、 E ：鋼管の弾性係数、 ΔR ：半径増加量である。

本検討では、鋼管径に対して鋼管厚の小さい薄肉鋼管として計算する。なお、今回検討対象とした構造物では、上記の仮定により算出した値と鋼管厚を考慮する厚肉鋼管と仮定した計算値が、概ね同じ値となることを確認している。

3.4 試算結果

3.4.1 矩形断面

図8に矩形断面のCFT部材の試算結果を示す。

図8(a)に、打込み高さに対する鋼管に作用する軸方向および周方向応力と降伏強度の割合を示す。軸方向応力は最大で鋼管の降伏強度の10%程度であるが、周方向応力は最大で鋼管の降伏強度の50%程度となることからわかる。周方向応力が軸方向応力より大きくなるのは、3.2(3)で示す傾向と同様である。

図8(b)は、鋼管変位と制限値の比に対する鋼管応力と降伏強度の比を示している。ここで、鋼管変位の制限値は、複合標準¹⁾に示すたわみの制限値を用い、部材軸方向は $D/2000$ 、周方向は $D/600$ とした(D は図7参照)。部材軸方向応力および変位は共に制限値に対して十分な余裕があること、周方向変位は制限値の90%程度となる可能性があり変位の方が応力よりも厳しい結果となることがわかる。

図8(c)に、鋼管の幅厚比と鋼管応力の関係を示す。断面幅が大きくなるとともに、周方向応力は大きくなる傾向がある。なお、軸方向応力は、周方向応力と比べて、幅厚比による顕著な影響は見られない。

3.4.2 円形断面

図9に、矩形断面と同様に、円形断面のCFT部材の試算結果を示す。

図9(a)より、鋼管に発生する軸方向および周方向応力は、降伏強度の4%未満であり、極めて小さい。

図9(b)より、周方向応力および変位は制限値に対して十分な余裕があることがわかる。ここで、鋼管変位の制限値は、複合標準¹⁾に示すたわみの制限値を用い、 $0.1t$ とした。なお、軸方向変位については、本検討で参照した技術基準類には記載がなく、鋼管に発生する部材軸方向変位は小さいと推測されるため、省略する。

図9(c)より、鋼管外径の増大に伴い、鋼管応力が大きくなる傾向があるが、その影響は小さいことがわかる。

3.5 コンクリート打込み時の初期応力度の設計における取扱いの提案と留意点

上記の結果より、コンクリート打込み時の側圧による初期応力度の取扱いについて、以下の通り提案する。

① CFT部材の側圧による初期応力度の考え方

(a) 矩形断面：複合標準¹⁾と同様に、鋼管の降伏強度の10%を初期応力度として、設計局座屈強度から控除して設計断面耐力を算定する。

(b) 円形断面：コンクリート打込み時の側圧の影響は少ないため、これを考慮しない。

② 施工時の検討

(a) 矩形断面：部材軸方向・周方向共に、複合標準¹⁾通りの側圧による鋼管のたわみの確認に加え、応力については、鋼管の降伏強度以下であることを確認することが望ましい。

(b) 円形断面：側圧により鋼管に発生する応力・たわみは小さいため、側圧による検討は省略する。

③ 適用範囲

上記は、標準的なCFT部材を対象とし、打込み高さが20m以内であることが前提条件である。

4. まとめ

SRCおよびCFT部材を対象に、施工時における初期応力度を考慮した耐力評価について、以下の知見を得た。

(1) SRC部材の曲げ耐力は、鋼材比が2～6%、かつ一般的な鉄骨鉄筋比を有する場合、施工時の鉄骨に生じる初期応力度の影響を考慮せず、鉄骨の初期応力度を0とした合成後の断面を用いて算定してよいと考えられる。

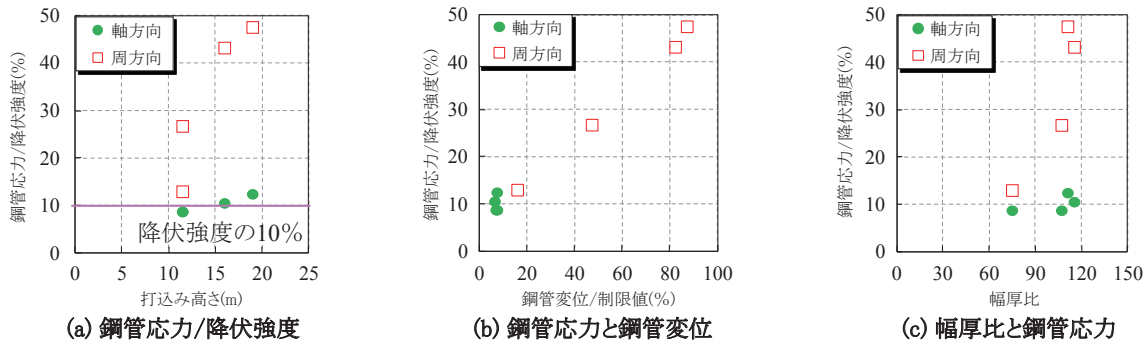


図8 矩形断面のCFT部材の試算結果

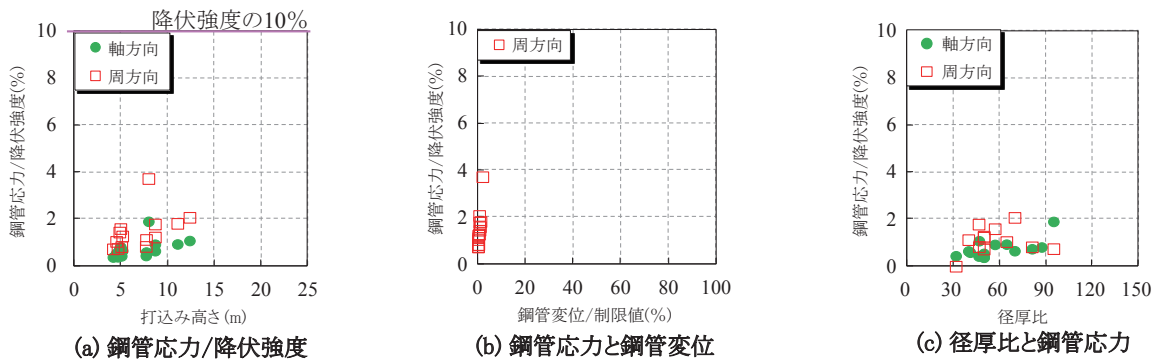


図9 円形断面のCFT部材の試算結果

- (2) CFT部材の曲げ耐力は、打込み高さが20m以内の標準的な部材の側圧による初期応力度について、矩形断面では、複合標準¹⁾と同様に、鋼管の降伏強度の10%を設計局部座屈強度から控除して算定する。円形断面では、側圧により鋼管に発生する応力・たわみは小さいため、これを考慮しない。
- (3) CFT部材の施工時の検討において、打込み高さが20m以内の標準的な部材は、矩形断面では部材軸方向・周方向共に、複合標準¹⁾と同様に側圧による鋼管のたわみの確認に加え、応力についても鋼管の降伏強度以下であることを確認することが望ましい。円形断面では、側圧により鋼管に発生する応力・たわみは小さいため、側圧による検討は省略する。

謝辞

本稿の内容は、「複合構造物設計標準に関する委員会」において審議頂いた。審議にあられた上田多門委員長（北海道大学教授）および中島章典幹事長（宇都宮大学教授）をはじめ委員・幹事等の関係者各位のご尽力に対して、ここに謝意を表する。

文献

1) 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，2002
 2) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，

2008
 3) 芝池達司，梶山毅，平弘毅，住学，高田一，中山光男：CFT工法の合理化に関する実大モデル柱施工実験（その1 実験概要および使用コンクリートの品質），日本建築学会大会学術講演梗概集，2001
 4) 梶山毅，芝池達司，平弘毅，住学，高田一，中山光男：CFT工法の合理化に関する実大モデル柱施工実験（その2 実験結果），日本建築学会大会学術講演梗概集，2001
 5) 梅本宗宏，寺井靖人，篠崎徹，板谷俊郎，佐治昭，松永茂実，八十島治典，倉林清：高強度コンクリートを用いたCFT柱の実大施工実験，戸田建設，技術報告書
 6) 井ノ上弘行，高田信宏，中西啓二，香田伸次：角型CFT柱の実大施工実験その2 鋼管の挙動について，日本建築学会大会学術講演梗概集，1999
 7) 黒岩秀介，後藤和正，山本佳城，並木哲，安田聡，成原弘之，松本修一：Fc150およびFc100を用いたCFTの実大施工実験（その3：施工時に鋼管に生じるひずみ），日本建築学会大会学術講演梗概集，2010
 8) 宮原貴昭，菅一雅，青木浩幸，松崎浩，大森達弥：誘導管の有無によるCFT柱圧入時角形鋼管挙動の相違，日本建築学会大会学術講演梗概集，2002
 9) 大内一之，渡邊秀仁，寺井靖人，端直人，梅本宗宏：鉄筋を内蔵したCFT柱の実大施工実験（その2 施工時および硬化後の性状），日本建築学会大会学術講演梗概集，2005
 10) 柳田淳一，加藤証一郎：高流動コンクリートを用いたCFT柱圧入施工実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，2001
 11) 土木学会：構造力学公式集，1986