

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420563

研究課題名(和文) 繊維補強コンクリートを用いた鋼コンクリート合成構造部材の耐震性能評価に関する研究

研究課題名(英文) Study on Seismic Performance of CES Members using Fiber Reinforced Concrete

研究代表者

藤本 利昭 (FUJIMOTO, Toshiaki)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号：30612080

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：CES構造は、内蔵鉄骨と繊維補強コンクリートで構成される合成構造である。本研究では、単一H形鋼を強軸・弱軸方向に内蔵したCES部材、交差型H形鋼を内蔵したCES部材、T形断面を内蔵し曲げ方向が異なるCES部材の正負漸増繰返し載荷を行い、構造性能への影響を検討した。その結果、鉄骨形状や軸力に関わらず、コンクリートの剥落はなく、優れたエネルギー能力を有し、終局曲げ耐力は一般化累加耐力式によって精度よく評価できることを明らかにした。またH形断面の弱軸方向の試験体では最大耐力が低く、エネルギー吸収の小さい履歴曲線を示すことを明らかにした。更にCES部材の復元力特性を表す復元力特性モデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：Concrete Encased Steel (CES) structural system consisting of fiber reinforced concrete (FRC) and encased steels is a new composite structural system, and is being conducted continuous and comprehensive studies to make it practical. In this study, the effects of the steel shape on the flexural behavior of CES members are experimentally studied. The selected test parameters are sectional shapes of built-in steel. This paper discusses how to evaluate the structural performance of CES members. It is revealed based on the test results that the AIJ design formulas for SRC structures can be applied for evaluating the ultimate flexural of CES members. Hysteresis models for CES columns are also applied and verified their validity for the practical use through comparing them with the test results.

研究分野：建築構造

キーワード：建築構造・材料 合成構造 耐震工学

1. 研究開始当初の背景

(1) 鉄骨鉄筋コンクリート構造(以下, SRC 構造)は, 鉄骨構造と鉄筋コンクリート構造(以下, RC 構造)を合成した構造システムであり, 優れた耐震性能を有する構造形式である。しかしながら, 施工性に関しては鉄骨工事と鉄筋工事の両方を要するため, 構造設計や施工が非常に複雑となり, それに伴う建設コストの上昇, 工期の長期化といった問題点が生じ, 建設数は減少の一途をたどっている。しかし, 1995 年の兵庫県南部地震において明らかにされたように, SRC 造建築物では柱脚部及び内蔵鉄骨の継手部の耐力不足等, 施工の困難さに起因する被害が少なからず見られたものの, 総合的な耐震性能は他の構造と比べても優れたものである。そこで, SRC 構造の構造特性を生かしつつ施工を合理化するため, 鉄筋を用いることなく, 繊維補強コンクリート(FRC)と内蔵鉄骨のみで構成される合成構造(Concrete Encased Steel: 以下, CES 構造)(図 1 参照)の開発研究を継続的に行ってきた。しかしながら, 本構造の実用化には, 構造特性の評価およびより精度の高い設計法・評価法の確立が必要であり, 本研究課題としている。

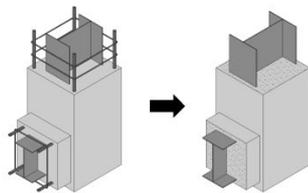


図 1 CES 構造システム

(2) これまでの CES 柱⁽¹⁾⁻⁽³⁾, CES 柱梁接合部⁽⁴⁾および 2 層 2 スパンフレーム⁽⁵⁾を対象とした研究により, 鉄筋を省略しても繊維補強コンクリートを用いることによって大変形時においてもコンクリートの損傷・剥落を抑制することが可能であること, CES 構造が SRC 構造と同等の優れた復元力特性および履歴特性を示し, 高い耐震性能を有することが確認され, これらの構造性能に関して概ね把握するに至っている。そして, 2007 年度～2010 年度に設置された日本建築学会「CES 構造性能評価小委員会」, 2011 年度より設置された日本建築学会「CES 構造性能評価指針検討小委員会」において, 上記の研究に基づいて CES 構造の性能評価指針の作成が進められており, これら委員会の幹事としてその活動に携わっている。しかしながら, これまで行われてきた研究では, 内蔵鉄骨の形状が H 形断面の強軸方向と交差型 H 形断面に限られており, H 形鋼の弱軸方向や, 実際の設計で多く用いられる可能性のある T 形断面の内蔵鉄骨に関する実験が行われていないことから, より汎用性のある構造とするためには, 実験による検証が必要とされている。以上のことから, 本研究では, 高度な耐震安全

性と耐損傷性を有し, 施工性の優れた CES 部材の構造性能の把握と性能評価法の構築に取り組む。

(3) 本研究では, 施工性の改善と要求される耐震性能を満たすことができる CES 部材の構造性能の把握と性能評価法の構築を目的として, 以下の具体的項目について検討する。

CES 部材の構造実験を実施し, 加力方向(地震力の作用方向)の違いが構造性能に及ぼす影響について検討する。また, その耐力性能, 変形性能, 損傷性能等の基礎的な耐震性能を検証する。

T 形状の鉄骨を内蔵した CES 部材の構造実験を実施し, 内蔵鉄骨形状の違いが構造性能に及ぼす影響について検討する。また, その耐力性能, 変形性能, 損傷性能等の基礎的な耐震性能を検証する。

の分析結果に基づいて CES 部材の終局耐力および変形性能の評価手法の提案を行う。また, CES 構造は従来にない新しい構造システムであるので, 性能評価指針には建築基準法の「限界耐力計算」を採用することが想定されている。そのため, 構造性能評価に必須である静的非線形荷重増分解析に用いる復元力特性モデルの提案を行っていく。

(4) 本構造は, 従来の SRC 構造と比較して鉄筋を省略して鉄骨と繊維補強コンクリートから構成される非常に単純で, 明快な構造システムである。そのため鉄筋工事を省略でき, 施工性の改善に伴う工期の短縮と低コスト化を可能とするものである。また, 高い耐震性が期待できることから, 地震時の安全性および被害低減効果, 建物の長寿命化が期待でき, 施工者およびユーザーが享受する利点は大きいことに社会的意義がある。以下に研究対象としている CES 構造の特色を列挙する。

本構造は, 断面の中心に鉄骨を内蔵しているため, 高い水平耐力・軸耐力・靱性が得られる。

本構造は, 繊維補強コンクリートにより内蔵鉄骨を被覆しているため, 内蔵鉄骨の座屈を拘束し, 高い水平耐力・軸耐力・靱性が得られる。

本構造は, 建物全体を鉄骨部材, SRC 部材など, 他の構造部材との組み合わせにより構成することが可能であり, 汎用性が高い。以上のとおり, 本構造は新規性と実用性を併せ持つ独創的な構造であり, その構造性能を定量的な評価法を提案することは, SRC 構造およびコンクリート充填鋼管構造(CFT 構造)に次ぐ新たな合成構造システムとして新たな地位を確立することが期待される。

2. 研究の目的

(1) 本研究では, 施工の省力化と高い耐震性を有する新しい耐震構造部材の設計法の確

立を目指し、鉄骨と繊維補強コンクリートで構成される CES 構造部材の開発に取り組む。そのため次の課題について検討する。

様々な形状の鉄骨を内蔵した CES 柱・梁部材の構造実験を実施し、内蔵鉄骨の形状の違いが部材の構造性能に及ぼす影響を明らかにする。

構造実験結果に基づいた CES 柱・梁部材の強度及び変形能力の評価法を提案するとともに、部材の復元力特性を検討し、設計に用いるモデルを作成・提案する。

3. 研究の方法

(1) 本研究は、施工の省力化と高い耐震性を有する新しい耐震構造要素の提案を目指し、鉄骨と繊維補強コンクリートで構成される CES 柱・梁部材の構造性能評価法の確立を目的としたものである。本研究では、CES 部材の構造実験を実施することにより、CES 部材の構造性能を検討するとともに、耐力性能、変形性能、履歴特性を検証し、CES 部材の応力伝達メカニズムについて明らかにする。更に実験の結果に基づいて構造性能評価法の提案を行う。

これらの課題に従って、「地震力の荷重方向が異なる CES 部材の構造実験による検証」、「内蔵鉄骨形状が異なる CES 部材の構造実験による検証」、「CES 部材の性能評価法の提案」の3項目について実施する。

(2) 既往の研究により、CES 柱は SRC 柱と同等の優れた耐震性能を有することが明らかになっているが、内蔵鉄骨に H 形断面の強軸方向や交差型 H 形断面を用いた柱部材に関する研究に限られており、内蔵鉄骨が H 形断面の弱軸方向や T 形断面の柱部材に関する研究は行われていない。そこで本研究では、CES 柱の内蔵鉄骨に H 形断面の強軸および弱軸曲げ、ならびに交差型 H 形断面、T 形断面を適用した CES 柱の正負漸増繰返し荷重を行い、内蔵鉄骨形状の違いによる構造性能への影響を検討した。更に実験結果に基づき、内蔵鉄骨形状の異なる CES 柱の終局曲げ耐力、等価粘性減衰定数および復元力モデルの比較検討を行った。

(3) 試験体一覧を表 1 に示す。全試験体の断面は、 $b \times D = 200 \times 200 \text{mm}$ とした。内蔵鉄骨形状は、試験体 No.1 が H 形断面の強軸方向、試験体 No.2 が H 形断面の弱軸方向、試験体 No.3 が交差型 H 形断面、試験体 No.4 が H 形断面の弱軸方向とカット T を組み合わせた T 形断面、試験体 No.5 が H 形断面の強軸方向とカット T を組み合わせた T 形断面とした。内蔵鉄骨には SS400 材を用いた。FRC の設計基準強度は $F_c = 27 \text{N/mm}^2$ とした。FRC に使用した繊維は、直径が 0.66mm、長さが 30mm のピニロンファイバー (RF4000) で、体積混入率を 1.0%とした。図 2 に試験装置を示す。試験体は、部材軸方向を水平にした状態で

5000kN 構造物試験機に設置した。荷重方法は、油圧ジャッキにより試験体に一定軸方向力 216kN ($N = 0.20b \cdot D \cdot F_c$) を加力した後、5000kN 構造物試験機により荷重梁を介して正負逆対称曲げせん断加力を荷重した。せん断力の荷重ルールは、部材角 による変位制御とし、 $= 0.0025, 0.005 \text{rad.}$ を各 1 サイクル、 $0.01, 0.015, 0.02 \text{rad.}$ を各 2 サイクル荷重した後、 0.03rad. を 1 サイクル荷重した。

表 1 試験体一覧

| 試験体番号 | 柱断面 | 内蔵鉄骨 | 軸力 |
|-------|-------------------------------|--------------------------------|-------|
| No.1 | $b \times D = 200 \times 200$ | H形断面: H-150×75×5×7 (強軸曲げ) | 216kN |
| No.2 | | H形断面: H-150×75×5×7 (弱軸曲げ) | |
| No.3 | | 交差型断面: 2H-150×75×5×7 | |
| No.4 | | T形断面: H-150×75×5×7 (弱軸曲げ)+カットT | |
| No.5 | | T形断面: H-150×75×5×7 (弱軸曲げ)+カットT | |
| No.6 | | H形断面: H-150×75×5×7 (強軸曲げ) | --- |

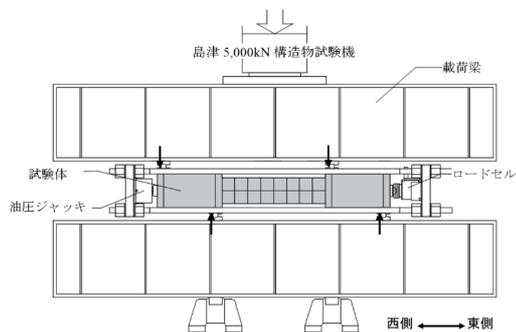


図 2 試験装置

4. 研究成果

(1) 図 3 に最終破壊形状、図 4 にせん断力-部材角関係 (Q- θ 関係) を示す。図 3 に示した最終破壊形状は図 4 中に示す試験体断面の左側面の破壊形状を示している。なお、図 4 の印は最大せん断力を、印は鉄骨フランジの降伏時を示している。

試験体の破壊進展状況は、コンクリートの曲げひび割れ発生、試験体端部のフランジの降伏の順に進行し、試験体 No.2, No.3, No.4, No.5 では、かぶりの薄いフランジ付近に沿ったせん断付着ひび割れが発生、試験体 No.1, No.6 では曲げひび割れ幅の拡幅が確認された。しかし、内蔵鉄骨形状の違いに関わらず、変形角 $= 0.03 \text{rad.}$ においてもコンクリートの大きな剥落は確認されなかった。

Q- θ 関係に関しては、曲げひび割れ、鉄骨の降伏やコンクリートの破壊の進展に伴って剛性低下した後、最大耐力に達した以降も大きな耐力低下がなく、安定した紡錘形状の履歴曲線を示した。しかし、内蔵鉄骨形状が H 形断面の弱軸方向の試験体 No.2 の履歴曲線は、後述する終局曲げ耐力に相当する耐力を發揮せず、大きく下回る耐力で推移した。また、内蔵鉄骨が同断面で荷重方向の異なる H 形断面の試験体 No.1, No.2 および T 形断面の試験体 No.4, No.5 で比較すると、試験体 No.1 と No.2 では、部材角の漸増に伴い耐力

の差が大きく生じた。一方 No.4 と No.5 では、No.4 の耐力が若干下回る値で推移したが、載荷方向に関わらずどちらも大きな履歴曲線を示した。

(2) 表 2 に終局曲げ耐力の実験値および計算値を示す。終局曲げ耐力は「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（以下、SRC 規準）」⁽⁶⁾による一般化累加耐力式によって計算した。

最大曲げ耐力と計算終局曲げ耐力を比較すると内蔵鉄骨形状が H 形断面の強軸方向、交差型 H 形断面、T 形断面の試験体 No.1 No.3, No.4, No.5, No.6 は 1.00 ~ 1.23 倍であり、一般化累加耐力式により精度よく耐力を評価できることが確認された。一方、内蔵鉄骨が H 形断面の弱軸方向の試験体 No.2 は 0.68 倍となり、計算終局曲げ耐力より小さい値を示した。ただし、コンクリート部および鉄骨部それぞれの終局曲げ耐力を上回ることも確認した。

(3) 図 5 に等価粘性減衰定数 h_{eq} 部材角関係を示す。H 形断面の強軸方向の試験体 No.1, 交差型 H 形断面の試験体 No.3, T 形断面の試験体 No.4, No.5, No.6 の等価粘性減

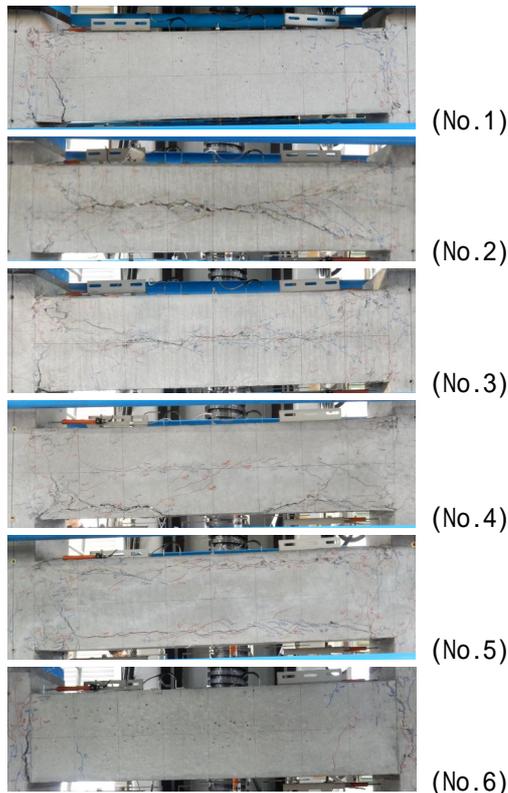


図 3 最終破壊形状

表 2 終局曲げ耐力

| 試験体 | 最大曲げ耐力 eMu (kN·m) | | 計算終局曲げ耐力 cMu (kN·m) | eMu/cMu | |
|------|---------------------|------|-----------------------|-----------|------|
| | 正側 | 負側 | | 正側 | 負側 |
| No.1 | 64.2 | 62.1 | 55.9 | 1.15 | 1.11 |
| No.2 | 25.2 | 25.2 | 37.2 | 0.68 | 0.68 |
| No.3 | 69.7 | 70.0 | 69.6 | 1.00 | 1.01 |
| No.4 | 59.9 | 60.1 | 55.4 | 1.08 | 1.08 |
| No.5 | 65.2 | 65.5 | 56.2 | 1.16 | 1.17 |
| No.6 | 55.1 | 54.4 | 44.7 | 1.23 | 1.22 |

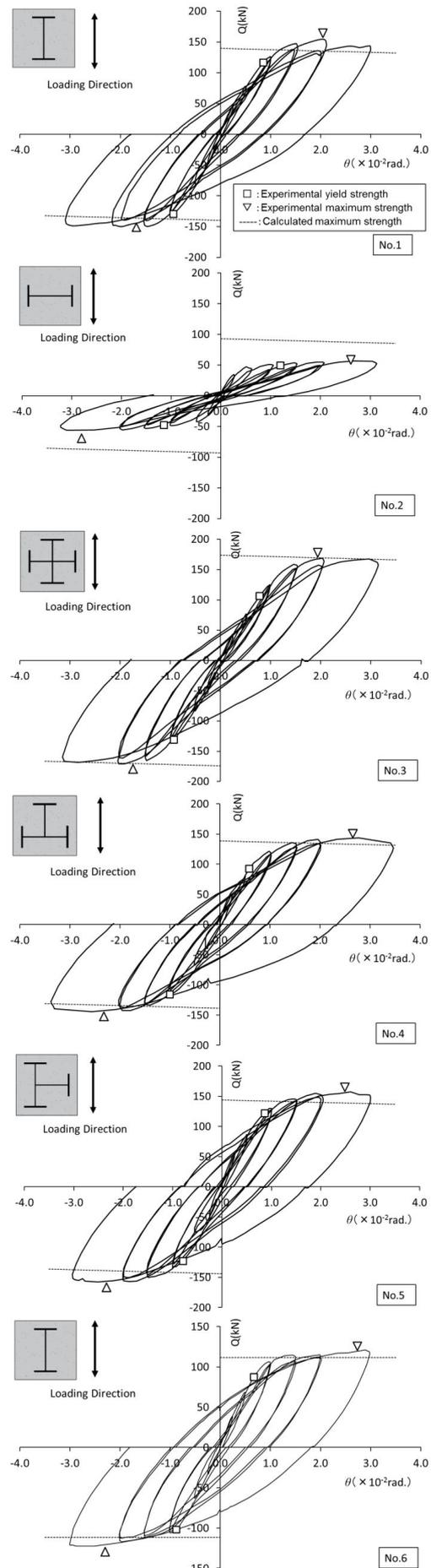


図 4 せん断力-部材角関係 (Q-θ 関係)

衰定数は同サイクルで若干の差異がみられるが、部材角の進展とともに漸増し、優れたエネルギー能力を有していることが確認された。

一方で H 形断面の弱軸方向の試験体 No.2 は、 $h_{eq} = 7.0 \sim 8.9\%$ であり部材角の進展に関わらず大きな変化は確認されなかった。

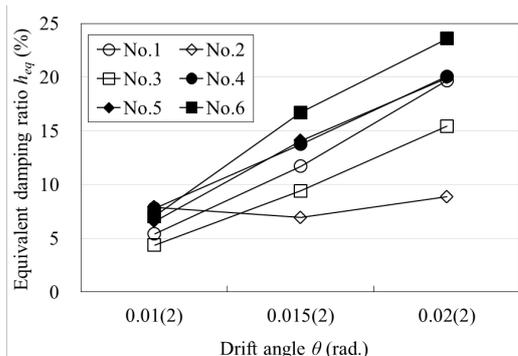


図5 等価粘性減衰定数

(4) 実験結果より CES 柱の挙動は、材端に曲げひび割れを発生し、その後鉄骨が降伏し、最大耐力に達した後に若干の耐力が低下するという経過を辿ることがわかっている。そこで CES 柱の復元力特性モデルを、図6に示すように第一折れ点を曲げひび割れ発生点 Q_c 、第二折れ点を終局曲げ耐力点 Q_u とする Tri-linear にモデル化した。モデル化に際して、曲げひび割れ耐力 Q_c は RC 規準⁽⁷⁾に従って算出し、終局曲げ耐力 Q_u は SRC 規準による一般化累加耐力としている。初期剛性 K_e は曲げとせん断を考慮した弾性剛性を用いている。なお、降伏後の剛性は弾性剛性 K_e の $1/1000$ とし、剛性低下率 γ の値は、既往の研究⁽⁸⁾⁽⁹⁾では、H 形断面では 0.5 、交差型 H 形断面では 0.3 が提案されている。

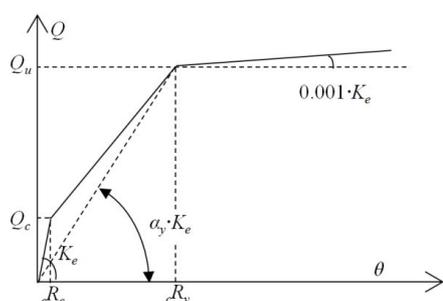


図6 CES 柱の復元力特性モデル

図7に、実験結果の包絡線と復元力特性モデルを比較して示す。図7より、曲げひび割れ発生点 Q_c (R_c, Q_c) までの実験結果と復元力特性モデルとの対応は良く、初期剛性がほぼ一致していることが確認できる。内蔵鉄骨形状が H 形断面の強軸方向の試験体 No.1, No.6 では、既往の研究で提案されている剛性低下率 $\gamma = 0.5$ で評価すると剛性が過大評価する結果となり、 $\gamma = 0.4$ とすると実験結果と良い対応を示した。交差型 H 形断面の試験体

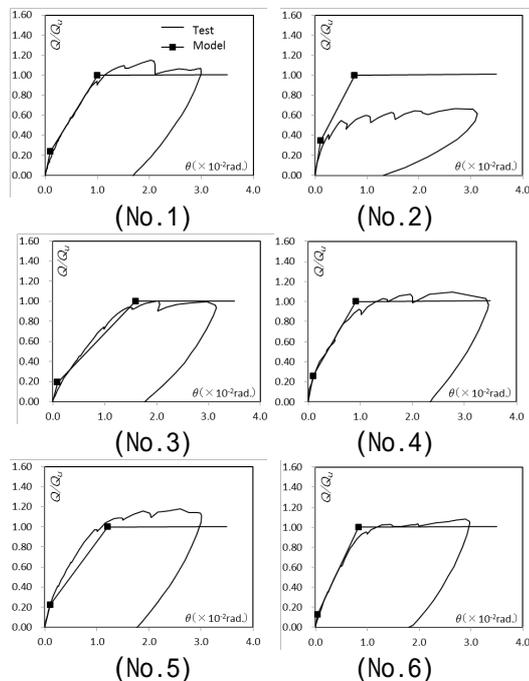


図7 復元力特性モデルと実験結果との比較

No.3 では、既往の研究で提案されている $\gamma = 0.3$ で評価すると実験結果と良い対応を示した。T 形断面の試験体 No.4 および No.5 では、剛性低下率 $\gamma = 0.4$ とすると実験結果と良い対応を示した。しかし、H 形断面の弱軸方向の試験体 No.2 は、終局曲げ耐力に到達しない実験結果を示したことから、剛性低下率に関わりなく剛性を過大評価する結果を示した。

このことより H 形断面の弱軸方向を除く試験体では、内蔵鉄骨形状が交差型 H 形断面の試験体は $\gamma = 0.3$ 、H 形断面および T 形断面の試験体は $\gamma = 0.4$ の復元力特性モデルが実験結果と概ね良い対応を示したことを確認した。

(5) 以上の検討から、本研究によって得られた知見を以下にまとめる。

- ・内蔵鉄骨形状の違いや軸力の有無に関わらず、部材角 $\theta = 0.03 \text{ rad}$. においてもコンクリートの大きな剥落は確認されなかった。
- ・内蔵鉄骨形状が H 形断面の強軸方向、交差型 H 形断面、T 形断面の試験体の履歴曲線は最大耐力以降も大きな耐力の低下がなく安定した挙動を示した。
- ・H 形鋼を内蔵した試験体では、内蔵鉄骨の曲げ方向により耐力・履歴特性共に大きく異なる結果となった。
- ・内蔵鉄骨形状が T 形断面の試験体では、内蔵鉄骨の曲げ方向による耐力・履歴特性の差異は僅かであった。
- ・内蔵鉄骨形状が H 形断面の強軸方向、交差型 H 形断面、T 形断面の試験体の終局曲げ耐力は、一般化累加耐力式によって精度よく評価できる。
- ・H 形断面の弱軸方向の試験体では最大耐力が合成断面としての終局曲げ耐力に到達しない。

・復元力特性モデルは、H 形断面の弱軸方向を除く試験体で、内蔵鉄骨形状が交差型 H 形断面の試験体は $\gamma=0.3$ 、H 形断面および T 形断面の試験体は $\gamma=0.4$ とした Tri-linear モデルで実験結果を概ね評価できる。

引用文献

- (1) 足立智弘, 倉本 洋, 川崎清彦, 柴山 豊: 高軸力を受ける繊維補強コンクリート - 鋼合成構造柱の構造性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第 25 巻, 第 2 号, pp.289-294, 2003.6.
- (2) 藤本利昭, 倉本洋, 松井智哉, 小松博: 繊維補強コンクリートの材料特性を考慮した CES 柱の終局耐力に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 658 号, 第 75 巻, 2010.12
- (3) 石鈞吉, 倉本洋, 藤本利昭, 松井智哉, 牧元祐太: H 型鉄骨内蔵 CES 柱の復元力特性のモデル化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 693 号, pp.2019-2026, 2013.11
- (4) 永田 諭, 松井智哉, 倉本 洋: 鉄骨コンクリート造柱梁接合部の構造性能に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1267-1272, 2006.7
- (5) 倉本 洋, 松井智哉, 今村岳大, 田口 孝: CES 合成構造平面架構の構造性能, 日本建築学会構造系論文集, No.629, pp.1103-1110, 2008.7
- (6) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2014
- (7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- (8) 藤本利昭, 倉本洋, 松井智哉: 交差 H 型断面鉄骨を内蔵した CES 柱の構造性能, 第 8 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 土木学会/日本建築学会, Paper No. 4, 2009.11
- (9) 石鈞吉, 倉本洋, 藤本利昭, 松井智哉, 牧元祐太: H 形鉄骨内蔵 CES 柱の復元力特性のモデル化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 693 号, pp.2019-2026, 2013.11

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

藤本 利昭, 六田 莉那子, 大崎 広貴, CES 部材に適用する繊維補強コンクリートの構造性能, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, 81 巻, 2016, 1945-1953
DOI
<http://doi.org/10.3130/aijs.81.1945>

[学会発表](計5件)

大崎 広貴, 藤本 利昭, 田畑 卓, 古谷 祐希, 鉄骨コンクリート柱 - 鉄骨梁接合部の構造性能に関する実験的研究 その 1

実験概要及び実験結果, 日本建築学会大会 学術講演会, 2016.8.24, 福岡大学 (福岡県福岡市)

田畑 卓, 古谷 祐希, 大崎 広貴, 藤本利昭, 鉄骨コンクリート柱 - 鉄骨梁接合部の構造性能に関する実験的研究 その 2 実験結果の検討, 日本建築学会大会学術講演会, 2016.8.24, 福岡大学 (福岡県福岡市)

大崎 広貴, 藤本 利昭, 田畑 卓, 古谷 祐希, SC 柱 - S 梁の構造性能, 日本建築学会 関東支部研究発表会, 2016.3.1, 日本大学理工学部 (東京都千代田区)

大崎 広貴, 藤本 利昭, CES 部材の構造性能に関する研究 その 5 中心圧縮実験, 日本建築学会大会学術講演会, 2015.9.4, 東海大学湘南キャンパス (神奈川県平塚市)

大崎 広貴, 荒牧 龍馬, 六田 莉那子, 藤本 利昭, CES 部材の圧縮性状に関する研究, 日本建築学会 関東支部研究報告会, 2015.3.2, 日本大学理工学部 (東京都千代田区)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 利昭 (FUJIMOTO, Toshiaki)
日本大学・生産工学部・教授
研究者番号: 30612080

(4) 研究協力者

大崎 広貴 (OSAKI, Hirotaka)