

内蔵鉄骨形状の異なる CES 柱の構造性能に関する研究

日大生産工(院) ○大崎 広貴

日大生産工 藤本 利昭

1 はじめに

CES 構造とは、Concrete Encased Steel 構造の略で、鉄骨鉄筋コンクリート（Steel Reinforced Concrete；以下，SRC）構造の鉄筋コンクリート（Reinforced Concrete；以下，RC）部を繊維補強コンクリート（Fiber Reinforced Concrete；以下，FRC）に置き換えた新しい建築合成構造システムである。

これまでの研究¹⁾³⁾では、内蔵鉄骨にH形鋼および交差型H形鋼を用いた柱に関する研究が行われているが、H形鋼を用いたCES柱に関する研究は強軸方向に限られていること、また個々の実験は軸力比、使用材料、断面寸法等の実験条件が異なることから直接比較することが困難である。

そこで本研究では、内蔵鉄骨に同一材料、同一断面の鋼材を用いた単一H形鋼を内蔵したCES部材の強軸および弱軸曲げ、ならびに交差型H形鋼、T形断面を内蔵したCES部材の正負漸増繰返し载荷を行い、内蔵鉄骨の形状の違いによる曲げ耐力、復元力特性等の構造性能への影響を検討した。

2 実験概要

2.1 試験体

試験体一覧を表1に、試験体断面を図1に示す。全試験体の柱断面は、 $b \times D = 200 \times 200 \text{ mm}$ とした。実験変数は内蔵鉄骨の形状である。試験体No.1は内蔵鉄骨をH形鋼の強軸方向、試験体No.2はH形鋼の弱軸方向、試験体No.3は交差型H形鋼、試験体No.4はH形鋼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はH形鋼の強軸方向とカットTを組み合わせたT形断面とした。

2.2 使用材料

表2に鋼材、表3にFRCの材料試験結果をそれぞれ示す。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 0.66 mm 、長さが 30 mm

のビニロンファイバー（RF4000）で、体積混入率を 1.0% とした。

表1 試験体一覧

	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（強軸方向）	216kN
No.2		H形断面：H-150×75×5×7（弱軸方向）	
No.3		交差型H形断面：2H-150×75×5×7	
No.4		T形断面：H-150×75×5×7（弱軸方向） +カットT T-122.5×75×5×7	
No.5		T形断面：H-150×75×5×7（強軸方向） +カットT T-122.5×75×5×7	

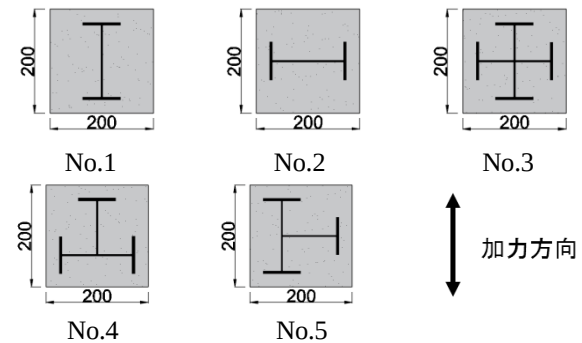


図1 試験体断面

表2 鋼材の材料試験結果

試験体	種類	板厚 t mm	降伏強度 σ_y N/mm ²	引張強度 σ_t N/mm ²	ヤング係数 E_s N/mm ²
No.1 No.2	ウェブ	4.78	377	521	177224
No.3	フランジ	7.00	332	492	185974
No.4 No.5	ウェブ	4.57	300	436	207803
	フランジ	6.46	303	433	201779

表3 FRCの材料試験結果

試験体	圧縮強度 σ_B N/mm ²	ヤング係数 E_c N/mm ²	引張強度 σ_t N/mm ²	材齢 日
No.1 No.2 No.3	37.2	30461	9.31	452
No.4 No.5	36.8	29359	9.08	103

Study on Structural Performance of CES Columns with Different Built-in Steel

Hirotaka OSAKI and Toshiaki FUJIMOTO

2.3 荷重方法

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万能試験機に設置した。荷重方法は試験体に油圧ジャッキで一定軸方向力216kN ($N = 0.20F_c \cdot b \cdot D$) を加力した後、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 θ による変位制御とし、 $\theta = 1/400, 1/200\text{rad.}$ を各1サイクル、 $1/100, 1/67, 1/50\text{rad.}$ を各2サイクル荷重した後、 $1/33\text{rad.}$ を1サイクル荷重した。

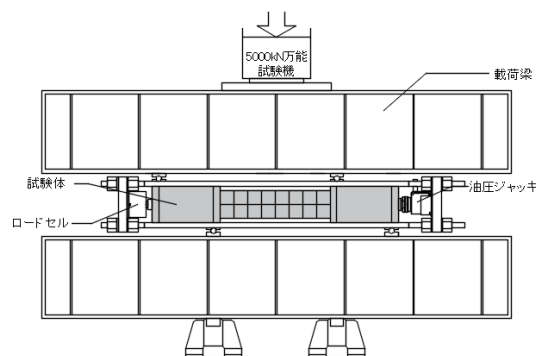


図2 試験装置

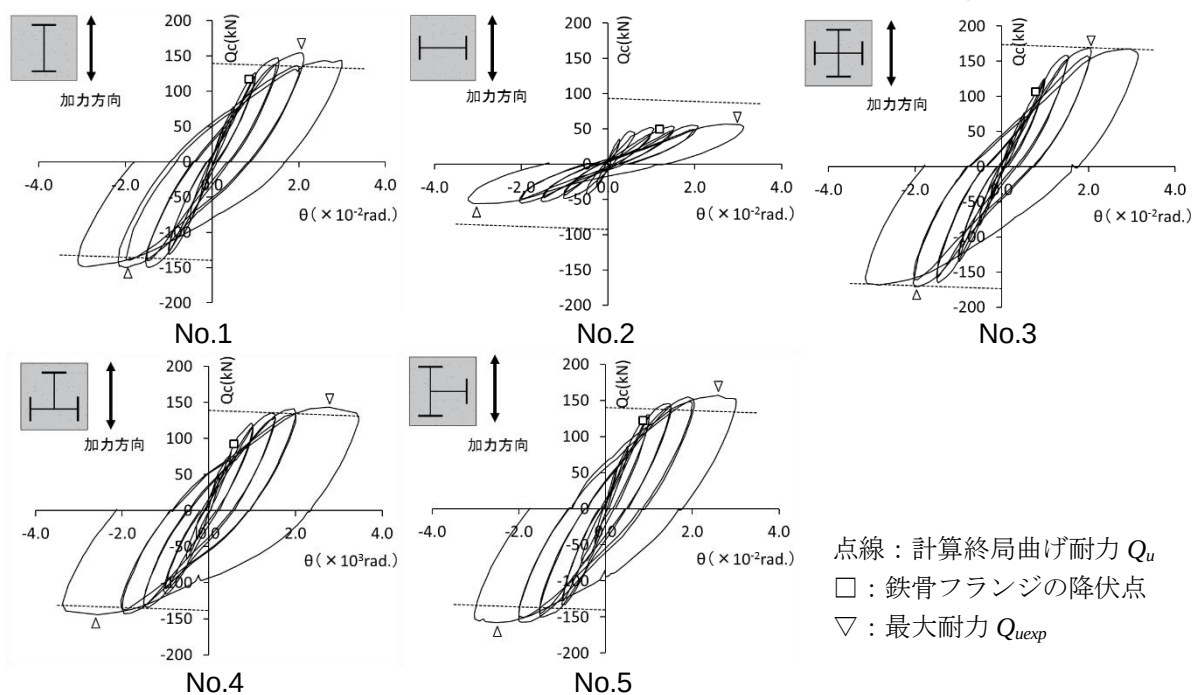


図3 せん断力-部材角関係 ($Q_c-\theta$ 関係)

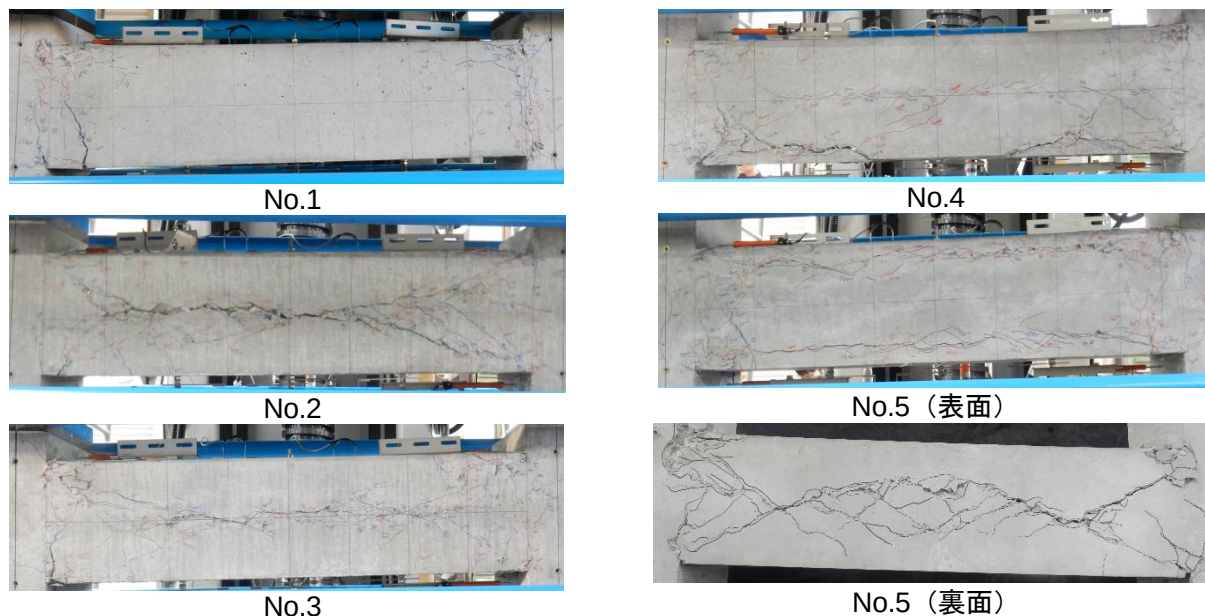


図4 最終破壊形状 (部材角 $\theta = -1/33\text{rad.}$)

3 実験結果

表4に実験結果一覧、図3にせん断力-部材角関係 ($Q_c-\theta$ 関係)、図4に最終破壊形状を示す。なお、図3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。また、図中の点線は終局曲げ耐力を示し、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」⁴⁾ の考え方に基づく一般化累加耐力式によって評価した。また、載荷装置の特性によるP-δ効果の影響を考慮したものを示している。図4に示した最終破壊形状は図1における左側側面の破壊形状を示す。また、No.5の断面は左右非対称断面で左右の破壊形状が異なった形状を示したため、左右両方の最終破壊形状を示した。

試験体No.1は、 $\theta=1/400\text{rad}$. サイクルに曲げひび割れが柱両端部に発生し、 $\theta=1/100\text{rad}$. サイクルに鉄骨フランジの降伏が確認された。ひび割れは柱端部に集中し、部材角の増大に伴い柱端部のひび割れの拡幅が著しくなった。

試験体No.2は、 $\theta=1/200\text{rad}$. サイクルに曲げひび割れが発生し、 $\theta=1/100\text{rad}$. サイクルに鉄骨フランジ面に沿って斜めひび割れが発生し、 $\theta=1/100(2)\text{rad}$. サイクルにこのひび割れが試験体全長進展した。また、 $\theta=1/67\text{rad}$. サイクルに鉄骨フランジの降伏が確認された。最終破壊形状の特徴として、鉄骨フランジに沿ったひび割れが集中した。

試験体No.3は、 $\theta=1/400\text{rad}$. サイクルに曲げひび割れが発生し、 $\theta=1/100\text{rad}$. サイクルに鉄骨フランジ面に沿って斜めひび割れが発生、 $\theta=1/100(2)\text{rad}$. サイクルにこのひび割れが試験体全体に進展した。また、 $\theta=1/100\text{rad}$. サイクルに鉄骨フランジの降伏が確認された。試験体No.1に比べ、多数の曲げひび割れ、せん断ひび割れが確認されたが、最大耐力は全試験体の中で最も大きく、履歴曲線は安定した挙動を示した。

試験体No.4は、 $\theta=1/200\text{rad}$. サイクルに曲げひび割れが発生し、 $\theta=1/100\text{rad}$. サイクルに鉄骨フランジに沿ったひび割れが発生した。また、 $\theta=1/100\text{rad}$. サイクルに鉄骨フランジの降伏が確認された。ひび割れは、柱端部の曲げひび割れと鉄骨のフランジ端部に沿ったひび割れの拡幅が著しかった。

試験体No.5は、 $\theta=1/400\text{rad}$. サイクルに曲げひび割れが発生し、 $\theta=1/200\text{rad}$. サイクルに鉄骨フランジ端部に沿ったひび割れが発生した。また、 $\theta=1/100\text{rad}$. サイクルに鉄骨フランジの降伏が確認された。ひび割れは、曲げひび割れと柱断面の左側は、主に鉄骨フランジに沿ったひび割

れ、柱断面の右側は、鉄骨フランジ面に沿った斜めひび割れの拡幅が著しかった。

表4によると内蔵鉄骨がH形鋼の弱軸方向の試験体No.2では、No.1の最大耐力の1/3程度の値を示した。また、H形鋼の弱軸方向を用いたT形断面の試験体No.4とH形鋼の強軸方向を用いたT形断面の試験体No.5の最大耐力を比較するとNo.4がNo.5を若干下回る値を示した。

表4 実験結果一覧

試験体	部材降伏時		最大耐力時(正側)		最大耐力時(負側)	
	部材角 θ	降伏耐力(kN)	部材角 θ	最大耐力(kN)	部材角 θ	最大耐力(kN)
No.1	1/100	116.8	1/50	154.6	-1/50	-149.9
No.2	1/67	49.6	1/33	56.9	-1/33	-56.3
No.3	1/100	106.8	1/50	169.0	-1/50	-170.9
No.4	1/100	92.5	1/33	143.5	-1/33	-144.5
No.5	1/100	122.1	1/33	157.2	-1/33	-158.0

4 等価粘性減衰定数⁵⁾

図5に等価粘性減衰定数 h_{eq} - 部材角 θ 関係を示す。図5には各試験体のせん断力-部材角関係において、同一部材で加力が2回行われた部材角 $\theta=1/100, 1/67, 1/50\text{rad}$. の2サイクル目の等価粘性減衰定数 h_{eq} を示す。等価粘性減衰定数 h_{eq} は、以下の式にて求めた。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W_e}$$

ここで、 ΔW : 履歴ループの1サイクルの面積、 W_e : 等価ポテンシャルエネルギーを示す。

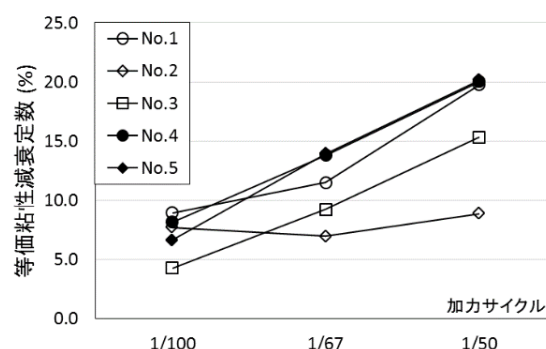


図5 等価粘性減衰定数

内蔵鉄骨がH形鋼の強軸方向の試験体No.1とT形断面の試験体No.4, No.5は、部材角 $\theta=1/50\text{rad}$. サイクルまでは、 $h_{eq}=6\sim 20\%$ 程度であり、 $\theta=1/67, 1/50\text{rad}$. は、同程度の値を示した。

また、内蔵鉄骨が交差型H形鋼の試験体No.3

は、No.1, No.4, No.5より小さい値を示した。

内蔵鉄骨がH形鋼の弱軸方向の試験体No.2は、 $h_{eq}=7.0\sim 8.9\%$ となり部材角が変わっても大きな変化はなかった。

5 終局曲げ耐力との比較

図6に軸方向力-終局曲げ耐力相関曲線(N - M 相関曲線)に実験より得られた最大耐力の正側を◇, 負側を□としてプロットして示す。また、点線をコンクリート部、破線を鉄骨部の曲げ耐力を示す。なお、試験体No.4は、曲げ方向により曲げ耐力が異なるため、 N - M 相関曲線はそれらの平均値を示している。また、表5に最大耐力と計算終局曲げ耐力を示す。

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形鋼の強軸方向、交差型H形鋼、T型断面の試験体No.1, No.3, No.4, No.5は1.00~1.17倍であり、一般化累加耐力式により精度よく耐力を評価していることが分かった。一方、内蔵鉄骨がH形鋼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。また、コンクリート部と鉄骨部の終局曲げ耐力より大きい値を示すことも確認した。

6 まとめ

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に関わらず、変形角 $\theta=1/33\text{rad}$.においてもコンクリートの大きな剥落は見られなく、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。

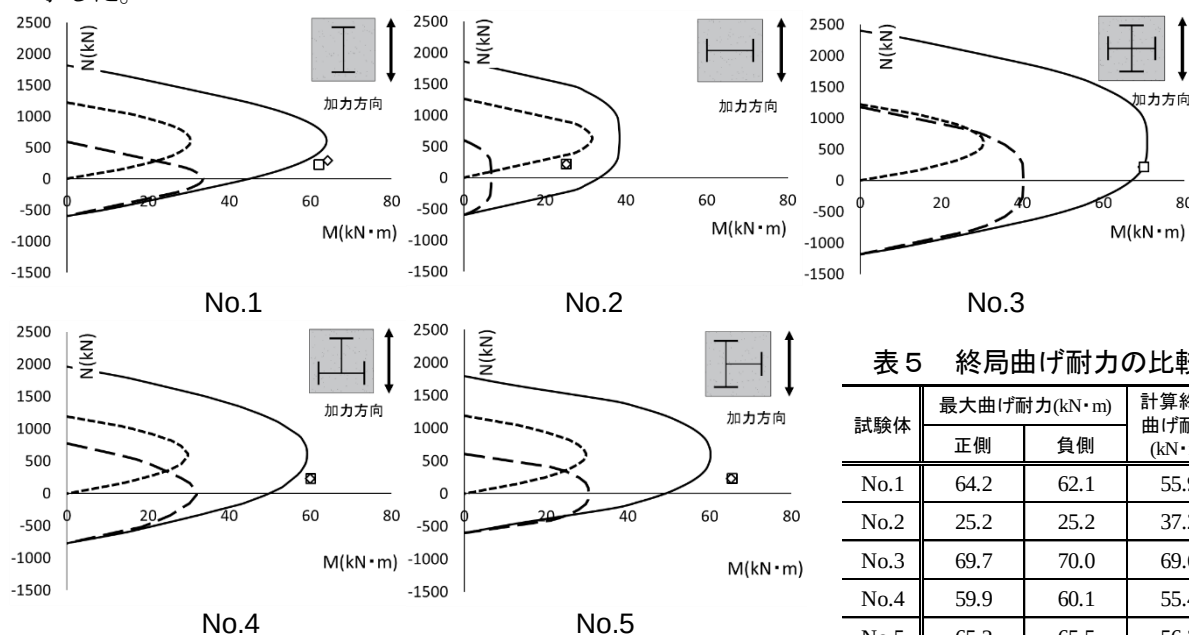


図6 軸方向力-終局曲げ耐力相関曲線 (N - M 相関曲線)

- ・H形鋼の強軸方向、交差型H形鋼、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ことがわかった。

- ・H形鋼の弱軸方向の試験体では終局曲げ耐力は計算終局曲げ耐力より小さい値を示し、今後検討する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、平成26-28年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C), 課題番号30612080, 代表者: 藤本利昭), 平成26-29年度文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(A), 課題番号2624908, 代表者: 倉本洋)の助成を受けたものである。また本研究は、日本建築学会 鋼コンクリート合成構造運営委員会に設置されたCES構造性能評価指針検討小委員会(主査: 倉本洋 大阪大学教授)の活動の一環として実施したものである。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋宏行, 前田匡樹, 倉本洋: 高靱性型セメント材料を用いた鉄骨コンクリート構造柱の復元力特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1075-1080, 2000.7
- 2) 松井智哉, 溝淵博己, 藤本利昭, 倉本洋: シアスパン比が異なるCES柱の静的載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.1165-1170, 2009.7
- 3) 藤本利昭, 倉本洋, 松井智哉: 交差H型鉄骨断面鉄骨を内蔵したCES柱の構造性能, 第8回複合構造の活用に関するシンポジウム講演集, Paper No.4 (CD-ROM), 2010.7
- 4) 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
- 5) 柴田明德: 最新耐震構造解析(第3版), 森北出版株式会社, pp45-46, 2014

表5 終局曲げ耐力の比較

試験体	最大曲げ耐力(kN・m)		計算終局曲げ耐力(kN・m)
	正側	負側	
No.1	64.2	62.1	55.9
No.2	25.2	25.2	37.2
No.3	69.7	70.0	69.6
No.4	59.9	60.1	55.4
No.5	65.2	65.5	56.2