

(64) 内蔵鉄骨形状の異なるCES柱の構造性能に関する実験的研究

藤本 利昭¹・大崎 広貴²

¹正会員 日本大学教授 生産工学部建築工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

E-mail: fujimoto.toshiaki@nihon-u.ac.jp

²正会員 株式会社安藤・間 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)

E-mail: osaki.hirotaka@ad-hzm.co.jp

CES構造は、内蔵鉄骨と繊維補強コンクリート（FRC）で構成される合成構造で、これまで継続的に研究が行われている。本研究では、内蔵鉄骨に同一断面の鋼材を用い、H形鋼を強軸および弱軸曲げ方向に内蔵した試験体、交差型H形鋼を内蔵した試験体、T形断面を内蔵し、曲げ方向が異なる試験体の正負漸増繰返し載荷を行い、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。その結果、内蔵鉄骨形状の違いに関わらず、大変形時においてもコンクリートの大きな剥落はないこと、内蔵鉄骨形状がH形断面の強軸方向、交差型H形断面、T形断面の試験体の履歴曲線は最大耐力以降も大きな耐力の低下が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。

Key Words : Composite Structure, Concrete Encased Steel Structure, Structural Performance,

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。CES構造に関する研究は、これまで継続的に行われているが、CES柱に関しては、内蔵鉄骨に単一のH形鋼を強軸方向に用いた研究や、交差型H形鋼を用いた研究¹⁾³⁾に限られている。更にそれぞれの実験は、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、単一のH形鋼を強軸および弱軸曲げ方向に

内蔵したCES柱、交差型H形鋼を内蔵したCES柱、実際のSRC構造で用いられるようなH形鋼とカットTで構成されるT形断面の鉄骨を内蔵したCES柱試験体の正負漸増繰返し載荷を行い、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の影響を検討し、構造設計の基礎資料を得ることを目的とした。

2. 実験概要

(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、 $b \times D = 200 \times 200 \text{mm}$ （ここで、 b ：断面幅、 D ：断面せい）とした。実験変数は内蔵鉄骨の形状である。

表-1 試験体一覧

試験体	内蔵鉄骨 (SS400)	繊維補強コンクリート	軸力
No.1	H形断面：H-150×75×5×7（強軸方向）	$b \times D = 200 \text{mm} \times 200 \text{mm}$ ($F_c = 27 \text{N/mm}^2$)	$N = 0.20F_c \times b \times D$ (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）+T-122.5×75×5×7		
No.5	T形断面：H-150×75×5×7（強軸方向）+T-122.5×75×5×7		

試験体No.1, No.2は内蔵鉄骨を単一のH形鋼とし、載荷方向に対し試験体No.1は強軸方向、試験体No.2は弱軸方向に配置した。試験体No.3は内蔵鉄骨を交差型H形鋼とし、試験体No.4, No.5は内蔵鉄骨がH形鋼とカットTを組み合わせたT形断面であり、試験体No.4はH形鋼が弱軸方向、試験体No.5はH形鋼が強軸方向になるよう計画した。試験区間の長さ L は断面せい D の4倍 ($L=4D$) の $L=800\text{mm}$ であり、せん断スパン比 (a/D , a : せん断スパン) は2.0である。

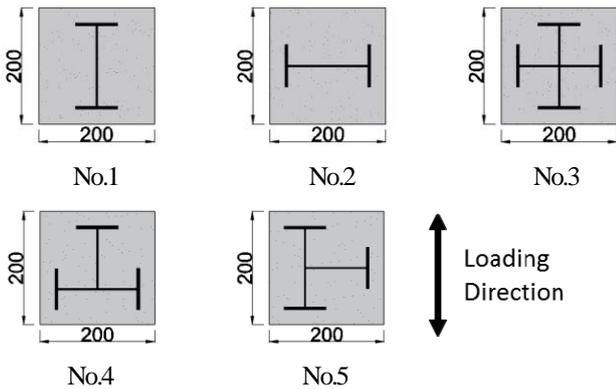


図-1 試験体断面形状一覧

(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0.66mm、長さが30mmのビニロンファイバー (RF4000) で、普通コンクリートに体積混入率で1.0%を混入した。

(3) 実験方法

図-2に試験装置を示す。実験は、軸力載荷フレーム内に試験体軸方向を水平にセットした状態で5000kN構造物試験機に設置して載荷を行った。載荷は、軸力載荷フレーム内の油圧ジャッキにより軸方向力 $N=216\text{kN}$ ($=0.20F_c \cdot b \cdot D$) を加力した後、軸方向力を一定に保持した状態で5000kN構造物試験機により正負逆対称曲げせん断力を加えた。

せん断力の載荷ルールは、部材角 θ ($=\delta/L$, δ : 鉛直

変位) による変位制御とし、 $\theta=0.0025, 0.005\text{rad}$.を各1サイクル、 $\theta=0.01, 0.015, 0.02\text{rad}$.を各2サイクル載荷した後、 $\theta=0.03\text{rad}$.を1サイクル載荷した。

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, No.3	ウェブ	4.78	377	521	177224
	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

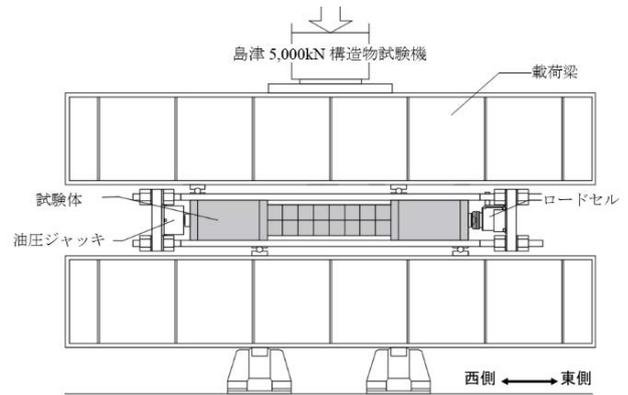


図-2 試験装置

3. 実験結果および考察

(1) 破壊状況と履歴特性

表-4に実験結果一覧、図-3にせん断力-部材角関係 ($Q-\theta$ 関係)、図-4に最終破壊形状を示す。なお、図-3中の□印は鉄骨フランジの降伏時を、▽印は最大せん断力時を示している。ここで、鉄骨フランジの降伏は、試

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_y ($\times 10^2 \text{rad}$)	降伏耐力 Q_y (kN)	部材角 θ_u ($\times 10^2 \text{rad}$)	最大耐力 Q_{uev} (kN)	部材角 θ_u ($\times 10^2 \text{rad}$)	最大耐力 Q_{uev} (kN)
No.1	0.85	116.8	2.02	154.6	-1.98	-149.9
No.2	1.19	49.6	2.68	56.9	-3.10	-56.3
No.3	0.78	106.8	2.04	169.0	-1.92	-170.9
No.4	0.58	92.5	2.77	143.5	-2.56	-144.5
No.5	0.86	122.1	2.60	157.2	-2.51	-158.0
No.6	0.67	87.5	2.89	120.9	-2.53	-122.5

験体材端部の圧縮縁および引張縁となる内蔵鉄骨フランジ（試験体No.1, 3, 5：フランジ面，試験体No.2：フランジ側面，試験体No.4：フランジ面および側面）に貼付したひずみゲージの値により判断した。また図中の点線は、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」⁴⁾（以下、SRC規準）の考え方に基づく一般化累加耐力式によって評価した終局曲げ耐力を示している。なお図中の点線では、荷重装置の特性による $P-\delta$ 効果の影響を考慮した値となっている。また、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しているが、試験体No.5は内蔵鉄骨が左右非対称断面であるため左右の破壊形状が異なった形状を示したことから、両側面の最終破壊形状を示している。

全試験体の破壊進展状況は、試験体端部被りコンクリートの曲げひび割れ発生、試験体端部フランジの降伏の順に進展し、試験体No.2, No.3, No.4, No.5では、コンクリートの被り厚さが薄いフランジ付近に沿ったせん断付着ひび割れが発生し、特に試験体No.2ではそのひび割れの拡幅が顕著であった。また試験体No.1では、せん断付着ひび割れは発生せず、部材端部での曲げひび割れの拡幅が顕著であった。しかしながら、内蔵鉄骨形状に関わらず、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認められなかった。これはFRCの繊維による補強効果と考えられる。

$Q-\theta$ 関係に関しては、曲げひび割れ、鉄骨の降伏ならびにコンクリートの破壊の進展に伴って剛性が低下した後、最大耐力に達した以降も急激な耐力低下はなく、安定したエネルギー吸収の大きな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、終局曲げ耐力に相当する耐力を発揮せず、大きく下回る耐力となったが、部材角 $\theta=0.03\text{rad}$.まで耐力低下はみられなかった。

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, T形断面の試験体No.4, No.5についてそれぞれを比較すると、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。一方試験体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、荷重方向に関わらずどちらもエネルギー吸収の大きな履歴曲線を示した。

表-4より、弱軸方向のH形鋼を内蔵した試験体No.2の最大耐力は、強軸方向のH形鋼を内蔵した試験体No.1の最大耐力の1/3程度の値であったが、弱軸方向のH形鋼にカットTを追加した試験体No.4の最大耐力は、試験体No.2に比べ大きく上昇し、試験体No.1と同程度の最大耐力を示した。また、強軸方向のH形鋼を内蔵した試験体No.1、強軸方向のH形鋼にカットTを追加した試験体No.5、強軸方向のH形鋼に弱軸方向のH形鋼を追加した交差型

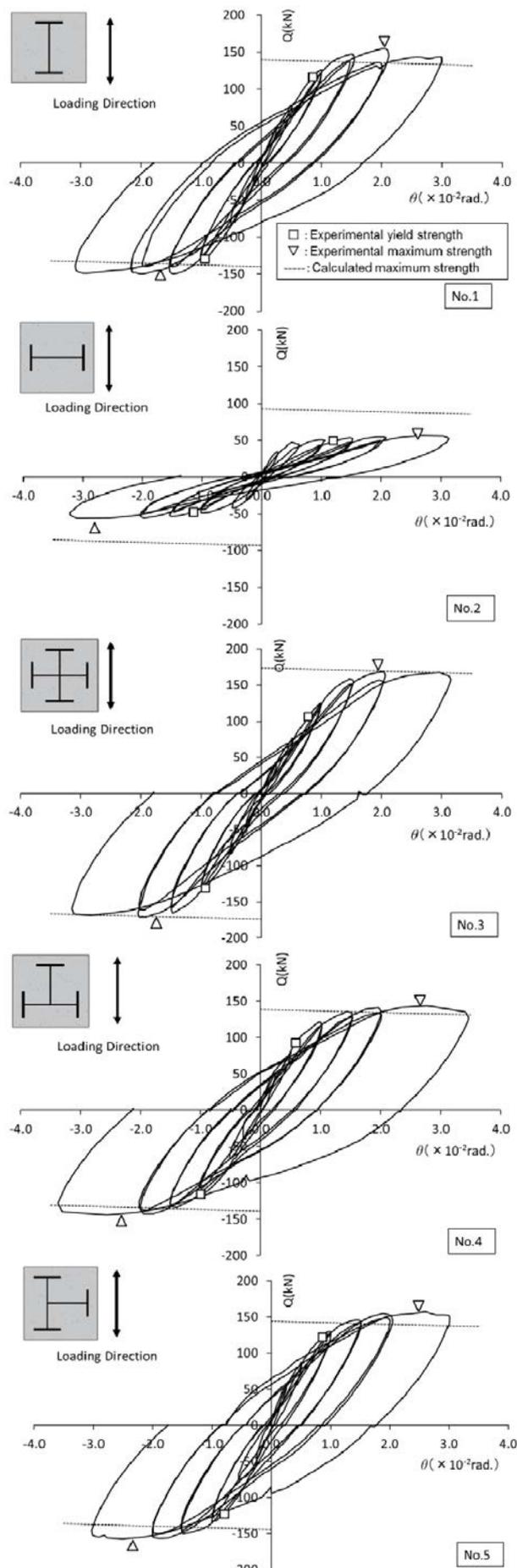


図-3 せん断力-部材角関係 ($Q_c-\theta$ 関係)

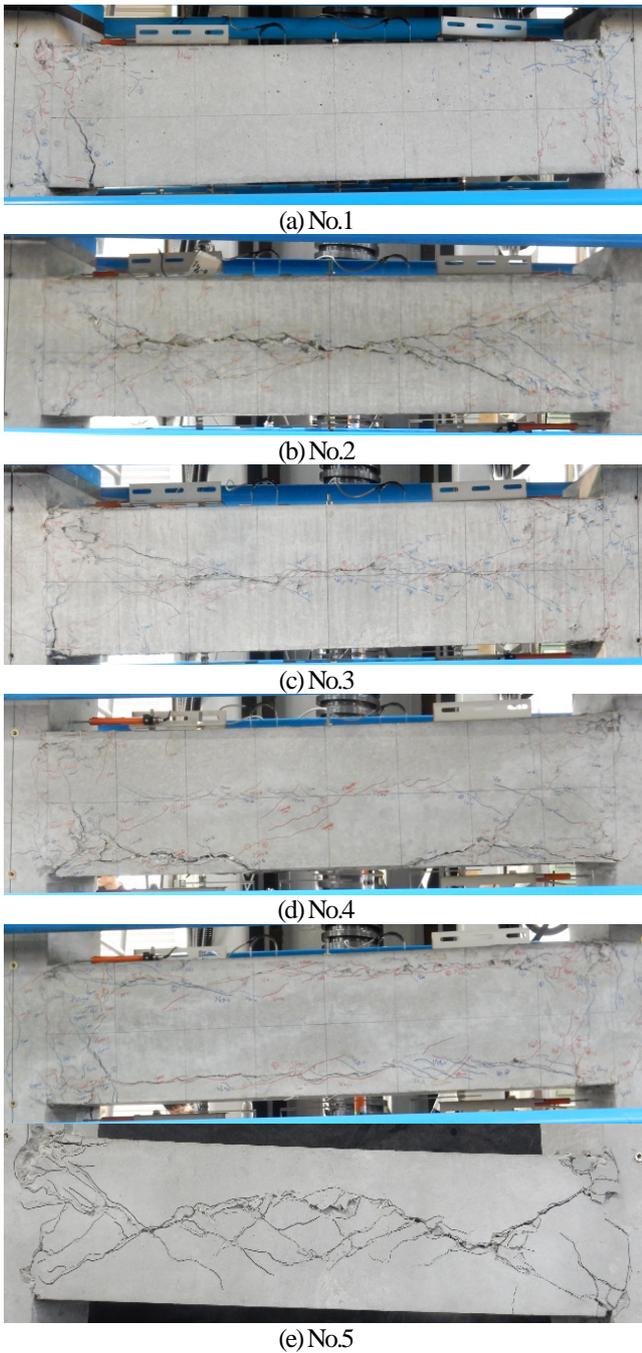


図-4 最終破壊形状 (部材角 $\theta = -0.03\text{rad}$.)

H形鋼の試験体No.3の順に内蔵鉄骨量が増加するほど最大耐力が高くなっている。

(2) 終局曲げ耐力の比較

図-5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。図中の実線で示した $N-M$ 相関曲線は, 前述のSRC規準⁴⁾による一般化累加耐力式による値であり, コンクリート部の $N-M$ 相関曲線 (点線), 鉄骨部の $N-M$ 相関曲線 (破線) も併せて示している。なお, 試験体No.4は, 鉄骨部が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

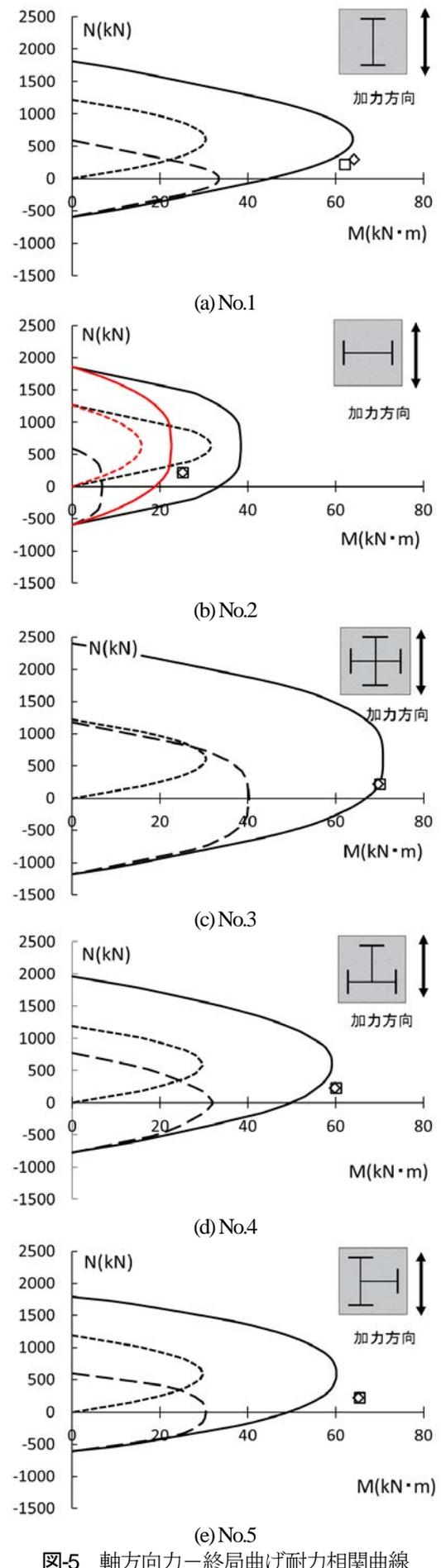


図-5 軸方向力-終局曲げ耐力相関曲線

を示している。

また、表-5に実験より得られた最大曲げモーメント M_u とSRC規準による計算終局曲げ耐力 M_{uc} を示す。

最大曲げ耐力と計算終局曲げ耐力との比は内蔵鉄骨形状がH形断面の強軸方向の試験体No.1, 交差型H形断面のNo.3, T形断面のNo.4, No.5は1.00~1.23倍であり、一般化累加耐力式により精度よくCES部材の曲げ耐力を評価できることが分かった。

一方、内蔵鉄骨がH形断面の弱軸方向の試験体No. 2は実験値が計算値の0.68倍となり、計算終局曲げ耐力より小さい値を示した。そこで、試験体No.2の耐力について若干考察する。

図-4(b)に示したように、試験体No.2では、フランジ付近に沿ったせん断付着ひび割れによる損傷が顕著であり、実験においてもコンクリート断面が内蔵鉄骨により2分割されるような挙動を示していた。

そこでコンクリートが重ね梁の様に、内蔵鉄骨により断面せい方向に2分割されたものと考え、コンクリートの終局耐力の評価を試みた。その結果が図-5(b)の赤線で示したものであり、表-5には計算値を示している。本検討結果からは、実験値と計算値との対応は良く、概ね評価できているものと考えられる。

表-5 終局曲げ耐力

試験体	最大曲げ耐力 M_u (kN・m)		計算終局曲げ耐力 M_{uc} (kN・m)	M_{uc}/M_u	
	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 (21.7)*	0.68 (1.16)*	0.68 (1.16)*
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

※：()内の数値は、FRCを2分割として評価した値

(3) 等価粘性減衰定数

図-6に等価粘性減衰定数 h_{eq} と部材角 θ との関係を示す。図-6には各試験体の Q_c - θ 関係において、同一部材角で加力が2回行われた部材角 $\theta = 0.01, 0.015, 0.02$ rad.の2サイクル目の等価粘性減衰定数 h_{eq} を比較している。なお、等価粘性減衰定数 h_{eq} は、以下の式により求めた⁵⁾。

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

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である。

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を比較すると、 h_{eq} は部材角 $\theta = 0.01$ rad.において6~9%、 $\theta = 0.015$ rad.で11~14%、 $\theta = 0.02$ rad.で約

20%とほぼ同程度であり、部材角の増大に伴い h_{eq} も増大する傾向が認められた。

交差型H形鋼を内蔵した試験体No.3は、試験体No.1, No.4, No.5に比べ h_{eq} は小さい値を示した。履歴曲線からは、このような差異は明確に認められないが、試験体No.3は他の試験体に比べ耐力が高いため、このような差が生じたものと考えられる。

一方、弱軸方向のH形鋼を内蔵した試験体No.2の h_{eq} は、部材角 $\theta = 0.01$ rad.においては試験体No.1, No.4およびNo.5と同程度であったが、部材角が $\theta = 0.015$ rad., $\theta = 0.02$ rad.と増大しても変化は僅かで、7.0~8.9%の値に留まった。

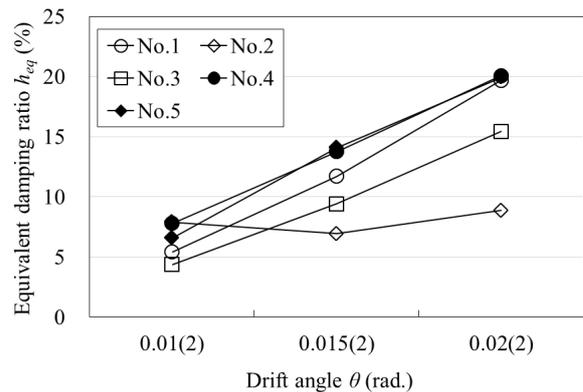


図-6 等価粘性減衰定数

(4) 復元力特性モデル

前述の実験結果より、CES柱の挙動は材端に曲げひび割れが発生し、その後鉄骨が降伏し、最大耐力に達した後に若干耐力が低下するという経過を辿ることがわかっている。このような特性を基に、CES柱の復元力特性は、図-7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にモデル化されている^{3,6)}。モデル化に際しては、曲げひび割れ耐力 Q_c は日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」⁷⁾(RC規準)に従って算出し、終局曲げ耐力 Q_u はSRC規準⁴⁾による一般化累加耐力が用いられている。初期剛性 K_e は曲げ変形とせん断変形を考慮した弾性

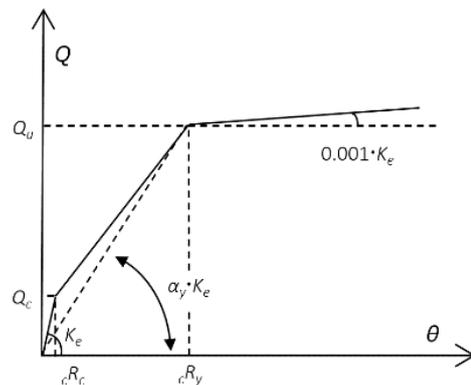


図-7 CES柱の復元力モデル

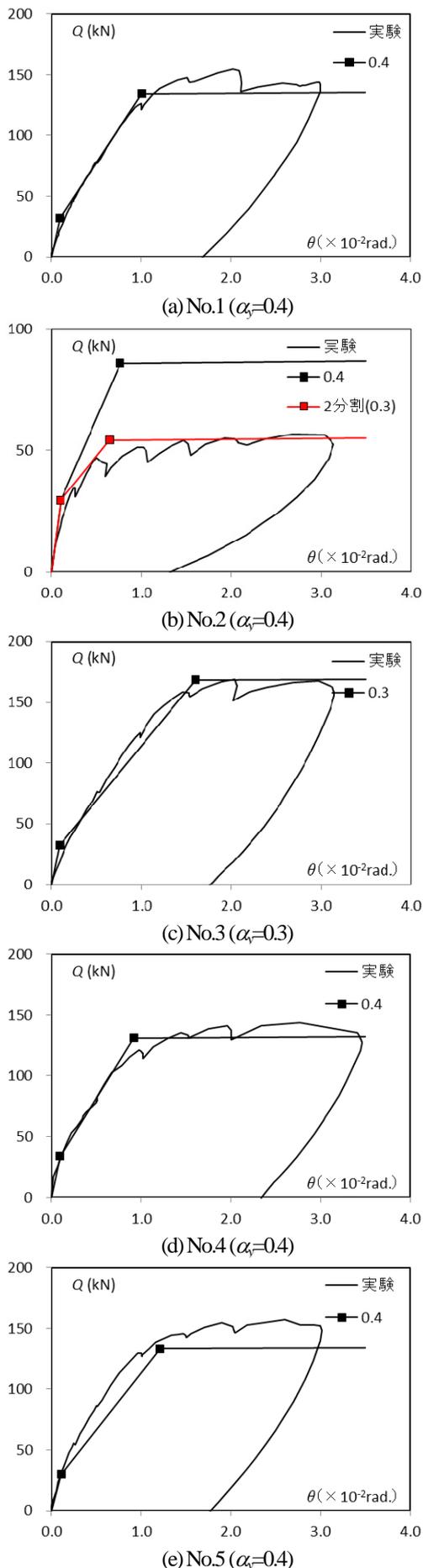


図-8 復元力特性モデルと実験結果との比較

剛性が用いられる。なお、降伏後の第三剛性は弾性剛性 K_e の $1/1000$ とし、第二剛性を決定する剛性低下率 α_y の値は、交差型H形断面では 0.3^3 という値が示されているが、単一のH形断面では $0.175 \sim 0.322$ 程度の値になることが報告がされている⁹。

図-8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-8では、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、内蔵鉄骨の形状に関わらず、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では、図(a)に示す通り $\alpha_y=0.4$ 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No.3では、図(c)に示す通り、既往の研究で提案されている $\alpha_y=0.3$ 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 $\alpha_y=0.4$ とすると実験結果と良い対応を示した (図(d), (e))。

一方、H形断面の弱軸方向の試験体No.2は、実験値が計算終局曲げ耐力に到達しなかったことから、図(b)に示すように剛性低下率に関わらず第二剛性と耐力を過大評価する結果となった。そこで前述の検討結果を基に、コンクリート断面を2分割して終局耐力を評価した場合、図中の赤線で示すように $\alpha_y=0.3$ とすることで実験結果と良い対応を示した。

これらのことから、H形断面の弱軸方向試験体では検討の余地が残されているが、内蔵鉄骨形状が交差型H形断面の試験体は $\alpha_y=0.3$ 、H形断面およびT形断面の試験体は $\alpha_y=0.4$ とした復元力特性モデルが実験結果と概ね良い対応を示すといえる。

4. 結論

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 $\theta = 0.03 \text{ rad}$ においても繊維補強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優れたエネルギー能力を有していること、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明らかとなった。
- ・復元力特性モデルは、内蔵鉄骨形状が交差型H形断面の試験体は剛性低下率 α_y を 0.3 、H形断面およびT形断面の試験体は 0.4 としたTri-linearモデルで実験結果を概ね評価できることを示した。
- ・H形断面の弱軸方向の試験体では、最大耐力が終局曲

げ耐力に到達せず、エネルギー吸収の小さい履歴曲線を示すことが明らかとなった。

- H形断面の弱軸方向の試験体の終局曲げ耐力および復元力特性モデルについては、せん断付着ひび割れを考慮し、コンクリート断面を分割する評価方法を提示した。ただし試験体が1体のみであることから、今後更なる検討が必要である。

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26420563，代表者：藤本利昭）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) 足立智弘，倉本洋，川崎清彦：繊維補強コンクリートを用

いた鉄骨コンクリート合成構造柱の構造性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，第24巻，第2号，2002.6，pp.271-276

- 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.2，2009.7，pp.1165-1170
- 3) 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講演集，土木学会／日本建築学会，2009.11，Paper No.4 (CD-ROM)
- 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) 柴田明徳：最新耐震構造解析（第3版），森北出版株式会社，2014，pp.45-46
- 6) 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，2013.11，pp.2019-2026
- 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

EXPERIMENTAL STUDY ON STRUCTURAL PERFORMANCE OF CES MEMBERS WITH DIFFERENT BUILT-IN STEEL

Toshiaki FUJIMOTO and Hirotaka OSAKI

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.