

CES 柱の構造性能

安藤建設（株） ○藤本利昭 大阪大・工 倉本 洋
豊橋技術科学大・工 松井智哉

1. はじめに

筆者らは、鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）構造における耐震性の特長を生かし、より施工性に優れた建築構造システムを開発することを目的として、内蔵鉄骨と繊維補強コンクリート（FRC）のみで構成される合成構造（Concrete Encased Steel Structure：以下、CES 構造と呼称）に関する研究開発を継続的に行っている^{1)~4)}。

本論文では、CES 合成構造システムの構造性能評価法の開発に資する基礎資料を整備することを目的として、文献 4)に示した CES 柱に関する実験データを対象に文献 3)に示した SRC 柱、普通コンクリートを用いた CES 柱と比較することにより、CES 柱の優位性を明示すると共に、CES 柱の破壊性状（損傷性状）、終局曲げ耐力等の構造性能について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

検討対象とした試験体は、被覆コンクリートに FRC を用いて一体打設した CES 柱 2 体（試験体 VF1 および VF2）⁴⁾と、性能比較用試験体として実験された通常の SRC 柱（試験体 SRC）、被覆コンクリートに普通コンクリートを用いた CES 柱（試験体 SC）の 2 体³⁾の合計 4 体とした。試験体の一覧を表 1 に、試験体形状および寸法を図 1 に示す。

試験体 SC、VF1 および VF2 は、柱断面、内蔵鉄骨ともに同一形状とし、被覆コンクリートのみが異なる試験体である。試験体 SC は被覆コンクリートに普通コンクリートを、試験体 VF1 および VF2 は繊維直径 0.66mm、長さ 30mm のビニロンファイバー（RF4000）をそれぞれ体積混入率で 1.0%および 2.0%混入した FRC を使用している。

表 1 試験体諸元

Specimen		SRC	SC	VF1	VF2
補強繊維	種類	-		ビニロンファイバー RF4000	
	混入量	-		1.00%	2.00%
柱断面寸法		400 mm × 400 mm			
コンクリート	圧縮強度 σ_B (MPa)	35.5	37.3	52.3	55.5
	ヤング率 E_c (GPa)	24.1	26.1	26.2	26.3
鉄骨	断面 (H-)	250×125×6×9	300×150×6.5×9		
	フランジ降伏強度 σ_{fy} (MPa)	300	323	337	
	ウェブ降伏強度 σ_{wy} (MPa)	347	412	364	
鉄筋	主筋(SD295)	12-D13	-		
	帯筋(SD295)	2-D6@50	-		
載荷軸力	N (kN)	1100			
軸耐力	N_o (kN)*	7186	8125	9994	10414
軸力比	N/N_o	0.15	0.14	0.11	0.11

* : $N_o = N_{cu} + sN_{cu} = f_u \cdot \sigma_B \cdot cA + s\sigma_y \cdot sA$, N_o : CES 柱の終局軸圧縮耐力, cN_{cu} : コンクリート部分の終局圧縮耐力, sN_{cu} : 鉄骨部分の終局圧縮耐力, f_u : 鉄骨比に応じて定まるコンクリート強度に対する低減係数($f_u = 0.85 - 2.5s\rho_c$, ρ_c : 圧縮側鉄骨比($=s_a c/bD$, $s_a c$: 圧縮側鉄骨フランジの断面積)), cA : コンクリート部分の断面積, $s\sigma_y$: 鉄骨の降伏応力度, sA : 鉄骨部分の断面積。

Structural Performance of CES Columns

Toshiaki FUJIMOTO, Hiroshi Kuramoto and Tomoya MatsuiA

試験体 SRC は、これら 3 体と終局曲げ耐力がほぼ等しくなるよう計画したものであり、鉄骨断面を小さくし、四隅に鉄筋を配している。なお、試験体のせん断スパン比はすべて $M/QD=2$ である。

2.2 載荷方法

図 2 に載荷装置を示す。試験体は全て一定軸力 ($N=1100\text{kN}$) の下で正負逆対称曲げせん断加力とした。水平力載荷は柱上下端の相対水平変位 δ と柱長さ h で与えられる相対部材角 $R (= \delta/h)$ による変形制御とし、 $R=0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.03$ および 0.04rad を 2 サイクルずつ繰り返した後、 $R=0.05\text{rad}$ まで載荷を行った。

2.3 破壊状況および復元力特性

試験体の荷重—変形関係を図 3 に、最終破壊形状を写真 1 に示す。

(1) 試験体 SRC³⁾

試験体 SRC は、部材角 $R=0.015\text{rad}$ において柱頭柱脚部のコンクリートの圧壊が始まり、横補強筋の降伏に伴い最大耐力に達した。破壊は柱頭柱脚部に集中し、かぶりコンクリートが剥落した。また $R=0.04\text{rad}$ において主筋が座屈した。

(2) 試験体 SC³⁾

試験体 SC は、部材角 $R=0.005\text{rad}$ でせん断ひび割れが生じ、 $R=0.01\text{rad}$ で柱頭柱脚部のフランジが降伏し始めると最大耐力に達し、せん断ひび割れが大きく開き若干耐力が低下した。試験体側面のかぶりコンクリートが剥落したが、大変形まで

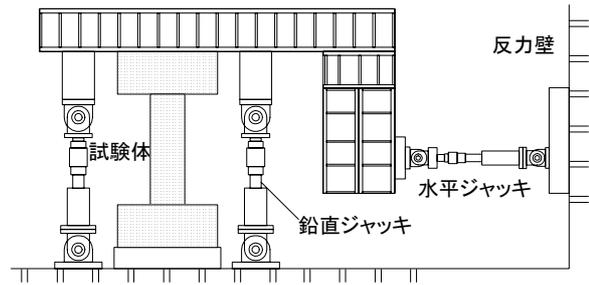


図2 載荷装置

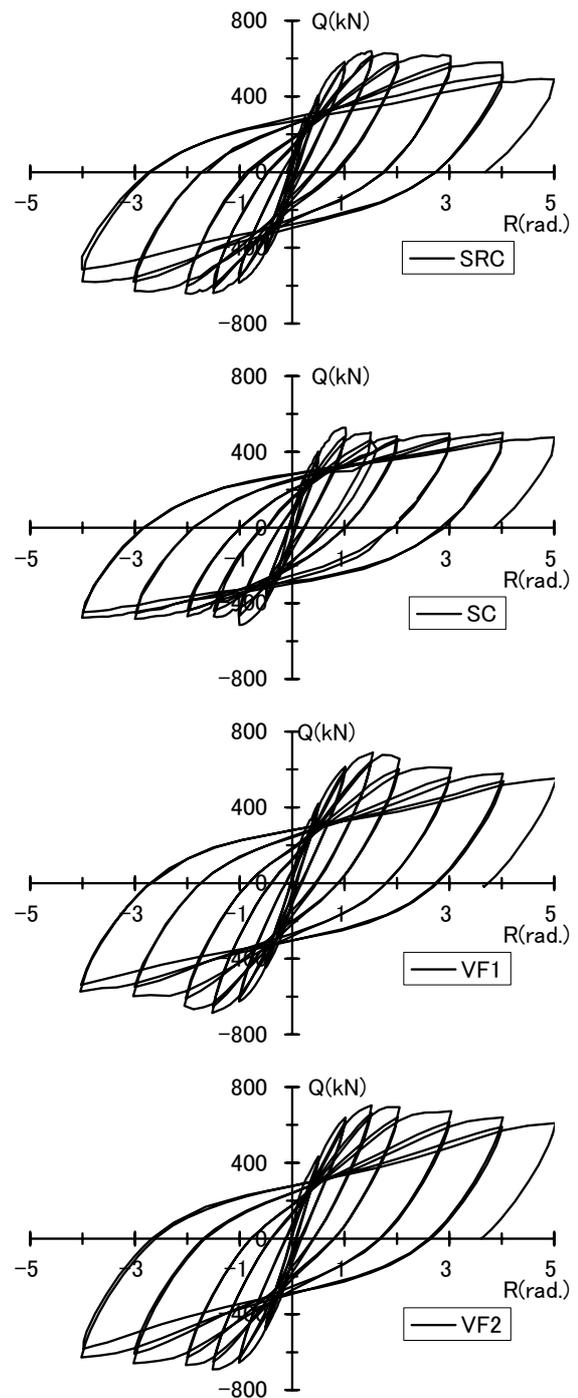


図3 荷重—変形関係

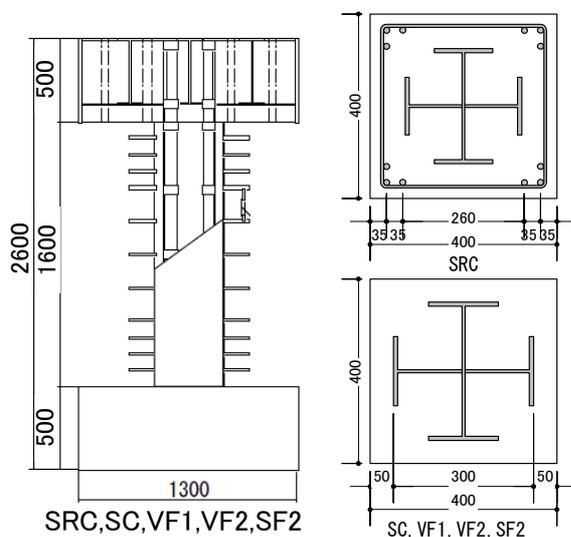


図1 試験体形状一覧

履歴面積の大きい紡錘型の荷重－変形関係を示した。

(3) 試験体 VF1 および VF2⁴⁾

試験体 VF1 は、 $R=0.003\text{rad}$ 程度の時点から柱頭および柱脚部で曲げひび割れが観察され、 $R=0.015\text{rad}$ で最大耐力に達した後に緩やかに耐力低下を生じた。水平変形の増大に伴い曲げせん断ひび割れ幅は拡大したが、せん断ひび割れは細かく分散する傾向が認められた。試験体 VF2 は VF1 とほぼ同様な荷重－変形関係を示したが、最大耐力以降の靱性が若干向上している。せん断ひび割れは試験体 VF1 よりもさらに細かく分散する傾向が認められた。これらの試験体では、試験体 SRC および SC に見られるような圧壊や大きなひび割れなどによるかぶりコンクリートの剥落は認められなかった。

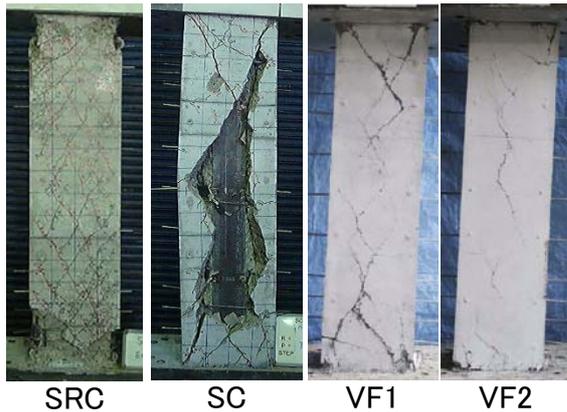


写真1 試験体の最終破壊形状

2.4 CES 柱の損傷度の比較

CES 柱の損傷度を文献 5)の方法に準じ、各限界状態に応じたコンクリートの残留ひび割れや圧縮破壊等の損傷状況および地震後に必要となる補修の規模を考慮して評価した。図 4 に残留ひび割れ幅の推移を、図 5 に部材の損傷度の定義を示す。損傷度は損傷度 I (継続使用可能)、損傷度 II (容易に修復可能)、損傷度 III (修復可能) および損傷度 IV (地震応答時応力および地震終了時鉛直荷重による応力を安定して維持) の 4 段階とし、それぞれ部材の限界状態に応じて評価した。各試験体の損傷度を表 2 に示す。

普通コンクリートを用いた試験体 SC は、部材角 $R=0.01\text{rad}$ においてせん断の残留ひび割れ幅が拡大し 1mm を超えたため損傷度 III と評価されるのに対し、CES 柱の各試験体は FRC を用いたことによる損傷制御効果によりひび割れが分散し、残留ひび割れ幅の拡大も緩やかで損傷度 III に達した部材角は $R=0.02\text{rad}$ である。また CES 柱試験体と試験体 SRC とでは残留ひび割れ幅の拡大傾向が異なり、試験体 SRC では曲げ残留ひび割れ幅が、CES 柱試験体ではせん断残留ひび割れ幅が

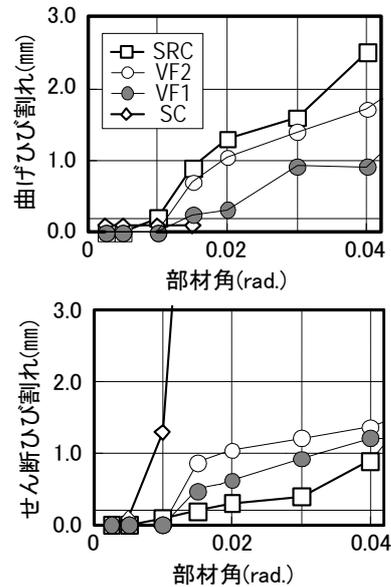


図4 残留ひび割れ幅の推移

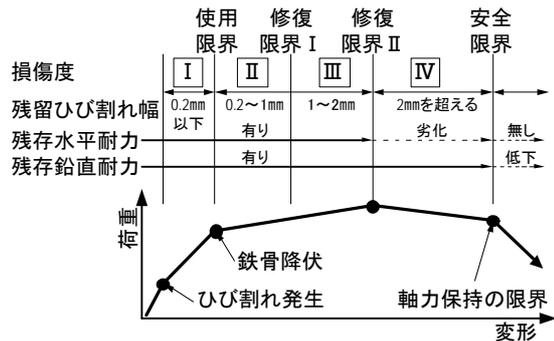


図5 損傷度概要⁵⁾

表2 柱の損傷度

部材角 (rad.)	SRC	SC	VF1	VF2
0.005	I	I	I	I
0.01		III		
0.015	II	IV	II	II
0.02	III		III	
0.03	III		III	
0.04	IV		IV	III
0.05	IV			

それぞれ大きくなっているが、総合的な損傷度においては CES 柱は SRC 柱と同等以上の性能を有するものと評価できる。なお、CES 柱の各試験体は実験の最終サイクルである部材角 $R=0.05\text{rad}$ まで耐力低下が僅かであり、また軸力保持能力も有していることから、安全限界変形として $R=0.05\text{rad}$ 程度と設定しても充分安全側の評価である。

3. CES 柱の終局耐力評価

3.1 終局曲げ耐力

CES 柱の終局曲げ耐力は、「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」⁶⁾ (以下、SRC 規準) の考え方にに基づき、以下に示す一般化累加耐力式によって評価した。

$$N_u = {}_cN_u + {}_sN_u, \quad M_u = {}_cM_u + {}_sM_u \quad (1)$$

ここで、 N_u : 部材の終局圧縮耐力、 ${}_cN_u$: コンクリート部分の終局圧縮耐力、 ${}_sN_u$: 鉄骨部分の終局圧縮耐力、 M_u : 部材の終局曲げ耐力、 ${}_cM_u$: コンクリート部分の終局曲げ耐力、 ${}_sM_u$: 鉄骨部分の終局曲げ耐力である。

表 3 に実験における最大荷重 Q_{uexp} と式(1)による計算終局曲げ耐力 Q_{bu} を比較して示す。

FRC を用いた CES 柱試験体 (VF1, VF2) の最大荷重 Q_{uexp} と終局曲げ耐力計算値 Q_{bu} との比 Q_{uexp}/Q_{bu} は 1.07 であり、一般化累加式により精度良く耐力を評価できることがわかる。また、試験体 SRC に関しては、 $Q_{uexp}/Q_{bu}=1.21$ と若干安全側の評価となっている。一方、普通コンクリートを用いた試験体 SC は $Q_{uexp}/Q_{bu}=0.93$ であり、実験値は計算耐力を下回っている。2.3 節で示したの破壊性状を考慮すると、試験体 SRC および CES 柱の各試験体は曲げ破壊を生じたが、試験体 SC では被覆コンクリートの損傷が激しく、曲げ耐力に到達する以前にせん断破壊が生じたものと推察される。以上のように、SC 試験体がせん断破壊し、ほぼ同一断面である CES 柱試験体 (VF1 および VF2) が曲げ破壊したことから、FRC を用いた CES 柱試験体のせん断耐力は普通コンクリートを用いた試験体 SC に比べ大きくなっているも

のと考えられる。

表 3 終局曲げ耐力の比較(単位:kN)

Specimen	SRC	SC	VF1	VF2
Q_{uexp}	638	527	689	703
Q_{bu}	527	566	645	660
Q_{uexp}/Q_{bu}	1.21	0.93	1.07	1.07

Q_{uexp} : 最大荷重, Q_{bu} : 計算終局曲げ耐力

4. まとめ

実験結果に基づき、繊維補強コンクリートを用いた CES 柱の構造性能を検討した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 繊維補強コンクリートを使用することにより、CES 柱の損傷抑制効果を向上させることができ、 $R=0.05\text{rad}$ の大変形においてもかぶりコンクリートの剥落は認められない。
- 2) CES 柱はその損傷抑制効果により、 $R=0.05\text{rad}$ の大変形に至るまで水平耐力および軸方向力の保持能力に優れている。
- 3) CES 柱の終局曲げ耐力は、かぶりコンクリートを含めた圧縮域のコンクリートが有効に働くため、一般化累加強度理論式によって精度良く評価できる。

謝辞

本研究は、本研究は建築研究開発コンソーシアムの共同研究「鉄骨コンクリート構造システムに関する研究開発」(委員長: 倉本洋・大阪大学教授) の一環として実施されたものである。関係各位に記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 倉本洋: 今伝えたいトピックス CES 合成構造システム, 建築雑誌, Vol.120, No.1535, pp.34-35, 2005.7.
- 2) 倉本洋: 新合成構造システム: CES, 2006 年度日本建築学会大会 (関東) 構造部門 (SCCS) パネルディスカッション「New Composite Structures -CES 構造システムの実用化を目指して-」資料, 日本建築学会, pp.11-14, 2006.9.
- 3) 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集, 第 22 巻, 第 3 号, pp.1075-1080, 2000.6.
- 4) 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, pp.271-276, 2002.6.
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案), 2004.
- 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, 2001.