

# 論文 寸法効果による影響を考慮した鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する実験的研究

倉富 洋\*1・堺 純一\*2・田中 照久\*1・池田 将啓\*3

**要旨**：十字鉄骨とコンクリートのみを使用した鋼・コンクリート合成柱材において、寸法効果によるコンクリート圧縮強度の低下が本柱材の曲げ耐力に及ぼす影響を調べるため、一定軸力を保持した状態で正負交番繰返し載荷実験を行なった。本実験では鉄骨せい500mmを有する試験体を製作し、既往の研究で実施した鉄骨せい190mmの実験結果と比較したところ、柱脚部において一般化累加強度で算出した曲げ耐力を發揮し、寸法効果による影響は見られなかった。また、既往の研究で得られた十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を考慮して弾塑性解析を行なうと、寸法効果の影響に拘らず、実験挙動を精度よく追跡できることを示した。

**キーワード**：鋼・コンクリート合成柱材， 十字鉄骨， 寸法効果， 弾塑性解析

## 1. 序

優れた耐震性能を保持しつつ省人化・省力化を目指した合成柱材の開発を意図して、著者らは十字鉄骨とコンクリートを用いた八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材（以下、SC柱材と略記）に関する研究を行なっている。既往の研究より、本SC柱材が高軸力下でも優れた変形性能を示すことを明らかにするとともに、柱梁接合部ディテールを検討し、弾塑性変形性状および耐力評価式を提案した<sup>1), 2)</sup>。

本研究では、断面寸法が大きくなるとコンクリートのシリンダー圧縮強度が發揮されにくくなる寸法効果による影響に着目して、本SC柱材の鉄骨によるコンクリートの拘束効果および計算耐力に対するせん断曲げ耐力比と変形性状について検討する。鋼コンクリート合成柱材においては寸法効果の影響が見られることが既往の研究からも示されている<sup>例えば3), 4)</sup>。本SC柱材においては、文献

1)の実験で使用した試験体は鉄骨せい190mmを有する比較的小さな断面寸法であり、実大断面とした際の寸法効果による影響を検討できていなかった。そのため、本実験では鉄骨せい500mmを有する試験体を製作した。また、文献5)では鉄骨せい190mmの本SC柱材に対して、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を考慮した弾塑性解析を実施し、比較的精度よく実験挙動を再現できることを示した。鉄骨せい500mmとした際において同様の解析手法を用いて、鉄骨によるコンクリートの拘束に及ぼす寸法効果の影響について解析的に検討した。

## 2. 実験計画

### 2.1 試験体

試験体詳細を図-1に示す。実大断面を想定して柱断面500x500mm、せん断スパン比3.0を有する試験体を4体製作した。以下に試験体の製作方法について概略説明す

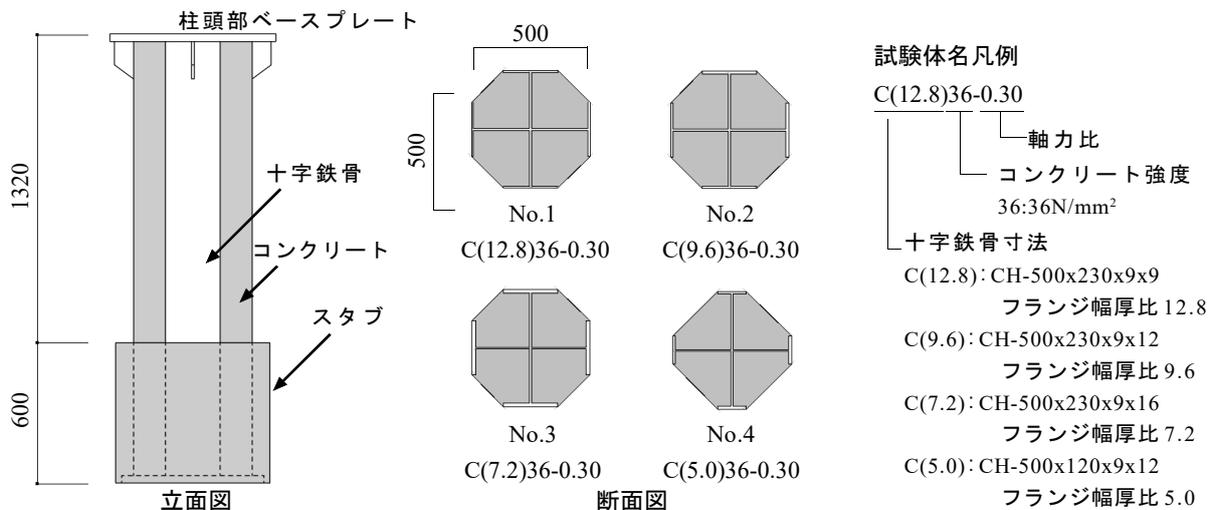


図-1 試験体詳細

\*1 福岡大学 工学部建築学科助教 博士(工学) (正会員)

\*2 福岡大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

\*3 福岡大学大学院 工学研究科博士課程前期

る。本実験で使用した十字鉄骨は、9mm、12mm、16mmの鋼板（SS400材）を溶接して製作した。また、柱頭部には載荷治具との接続用の厚さ32mmのベースプレートを設け、柱鉄骨フランジとは完全溶け込み溶接、柱鉄骨ウェブとは隅肉溶接で接合した。コンクリートは呼び強度30N/mm<sup>2</sup>で、早強ポルトランドセメントと最大寸法20mmの骨材を用い、縦打ちで打設した。

寸法効果による影響およびフランジ幅厚比の違いが柱材の挙動に及ぼす影響を調べるため、表-1に示す試験体を選定した。本SC柱材の十字鉄骨は曲げせん断抵抗だけでなく、コンクリートの拘束効果の役割も兼ねるため、フランジ幅厚比の違いが挙動に及ぼす影響を検討する。表-1中に、建築物の構造関係技術基準解説書<sup>6)</sup>に基づいた、フランジおよびウェブの部材種別を示す。同表中の試験体No.5およびNo.6は文献1)で実施した鉄骨せい190mmの試験体条件であり、これらの試験体に用いたコンクリートの最大骨材径は13mmである。また、表-2に5号試験片を使用した鋼材の機械的性質を示す。

## 2.2 載荷方法

載荷装置を図-2に示す。載荷は5000kN試験機を用いて所定の軸力を作用させ、一定に保持した状態で1000kNの水平ジャッキで正負交番繰返し水平力を載荷した。載荷治具と試験体はPC鋼棒で締め上げて支持ビームと一体化させた。載荷形式は、部材角2.0%までは0.5%ずつ漸増させ、部材角2.0%から4.0%まで1.0%ずつ漸増させ

るものとした。各変位振幅とも2サイクルずつ繰り返した。ここで、部材角は水平ジャッキ加力位置における水平変位を柱材長 $L$ で除した値である。水平力は水平ジャッキに取り付けたロードセルにて計測した。変形は、柱脚のスタブ部分に変位計フレームを設置し、柱材の水平変位および軸縮みを測定した。

## 3. 実験結果

### 3.1 水平力一部材角関係

図-3に水平力一部材角関係を示す。同図(e), (f)は文献1)にて実施した実験結果を示している。表-3に主要

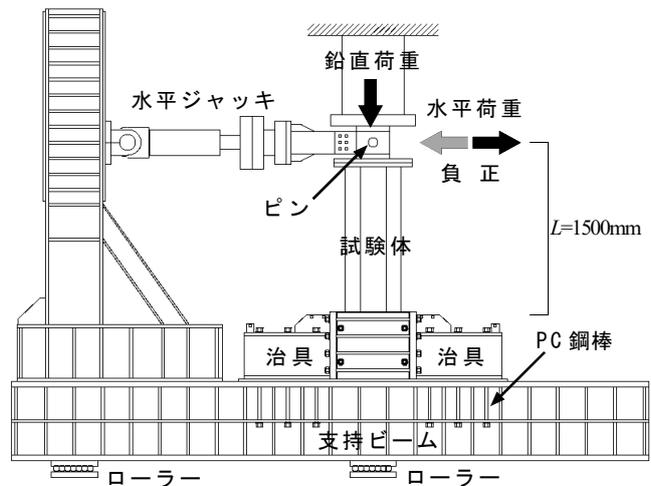


図-2 載荷方法

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	柱十字鉄骨	フランジ幅厚比	部材種別***		鉄骨比 (%)	載荷軸力** (kN)	$c\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	せん断スパン比
				フランジ	ウェブ				
1	SC(12.8)36-0.30	CH-500x230x9x9	12.8	FC	FA	7.9	3631	36.0	3.0
2	SC(9.6)36-0.30	CH-500x230x9x12	9.6	FB	FA	9.1	3977	36.5	3.0
3	SC(7.2)36-0.30	CH-500x230x9x16	7.2	FA	FA	10.8	4390	36.3	3.0
4	SC(5.0)36-0.30	CH-500x120x9x12	5.0	FA	FA	8.0	3111	36.3	3.0
5	SC(8.3)30-0.30*	CH-190x100x4.5x6	8.3	FB	FA	12.4	647	26.7	2.1
6	SC(5.0)30-0.30*	CH-190x60x4.5x6	5.0	FA	FA	10.9	522	27.6	2.1

\* 試験体No.5およびNo.6は文献1)で実施した試験体条件（コンクリートの最大骨材径13mm）

\*\* 軸力比 $n$ は0.3で共通。 $n=N/_{sc}N_u$ 、 $N$ :載荷軸力、 $_{sc}N_u$ :SC柱断面の圧縮耐力、 $_{sc}N_u = c\sigma_B + s\sigma_y A$ 、 $A$ :コンクリート断面積、 $c\sigma_B$ :コンクリートの圧縮強度、 $s\sigma_y$ :十字鉄骨断面積、 $s\sigma_y$ :鉄骨の降伏点

\*\*\* 部材種別の判別: フランジは $FA=0.322(E/_{sf}\sigma_y)^{1/2}$ 、 $FB=0.406(E/_{sf}\sigma_y)^{1/2}$ 、 $FC=0.525(E/_{sf}\sigma_y)^{1/2}$ 、ウェブは $FA=1.46(E/_{sw}\sigma_y)^{1/2}$ で計算。 $E$ :鋼材のヤング係数、 $_{sf}\sigma_y$ 、 $_{sw}\sigma_y$ :それぞれ、フランジおよびウェブの降伏応力度

表-2 鋼材の機械的性質

使用箇所	鋼種	$t$ (mm)	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$EIng.$ (%)	$Y.R.$
フランジ, ウェブ	SS400	9	261	428	$2.08 \times 10^5$	43.4	0.61
フランジ		12	293	469	$2.07 \times 10^5$	45.5	0.63
フランジ		16	317	463	$2.17 \times 10^5$	45.1	0.68

$t$ :板厚、 $\sigma_y$ :降伏点強度、 $\sigma_u$ :引張強さ、 $E$ :ヤング係数、 $EIng.$ :伸び率、 $Y.R.$ :降伏比、 $\epsilon_y$ :降伏ひずみ

な実験結果を記載した。図-3中の破線は鋼材の降伏応力度とコンクリート強度を用いて計算した一般化累加強度 $M_{pc}$  (表-3中 $M_{pc1}$ と表記)を柱脚部で発揮するとして式(1)で求めた塑性崩壊機構形成時の耐力である。同図中の実線はコンクリート強度を0.85倍して計算した一般化累加強度(表-3中 $M_{pc2}$ と表記)で求めたものである。

$$Q = \frac{M_{pc}}{L} \cdot N \cdot R \quad (1)$$

ここで、 $L$ :スタブフェイスから水平加力位置までの

距離、 $N$ :柱軸力、 $R$ :部材角である。

図-3より、全ての試験体で実験耐力は $M_{pc1}$ および $M_{pc2}$ で計算した塑性崩壊機構形成時の耐力を上回り、実験終了時まで紡錘形の履歴性状を描いていることがわかる。

写真-1に実験後の試験体を示す。全ての試験体において、部材角1.0%までに柱脚部付近の鉄骨間のコンクリートにひび割れが発生した。続いて、部材角2.0%までにコンクリートの剥落が観察された。また、試験体SC(9.6)36-0.30は部材角2.0%付近で鉄骨強軸フランジの

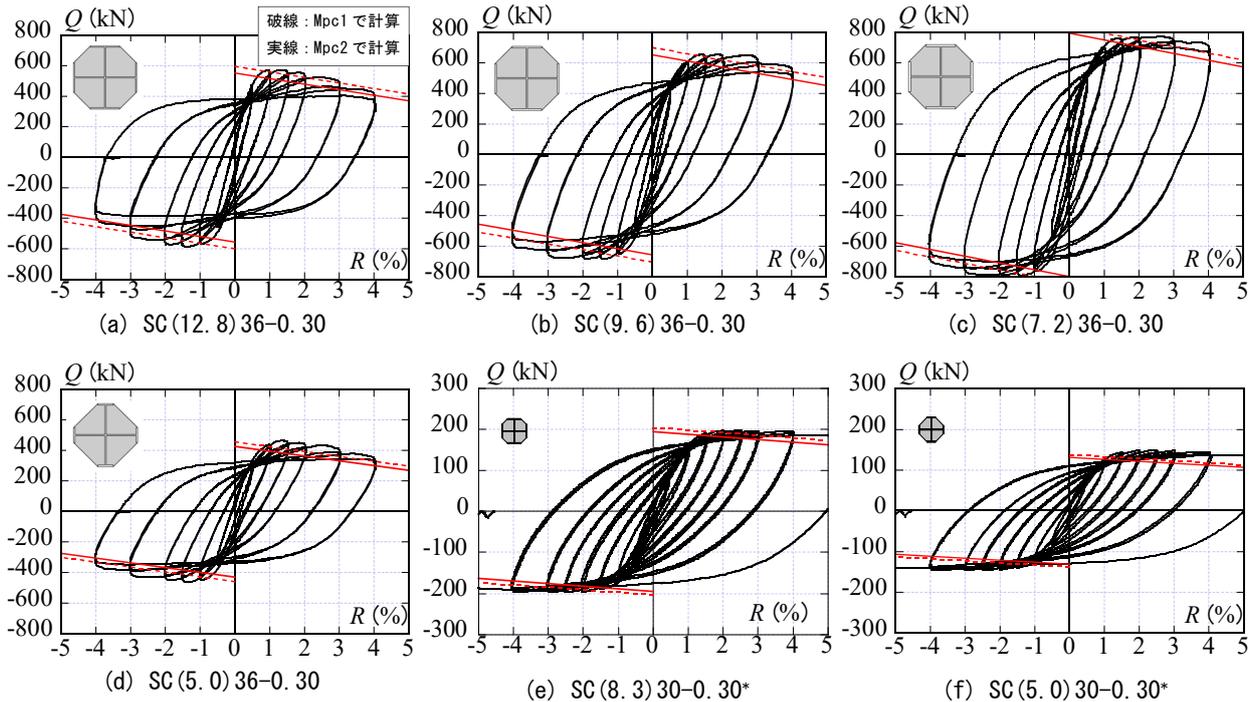


図-3 水平力-部材角関係

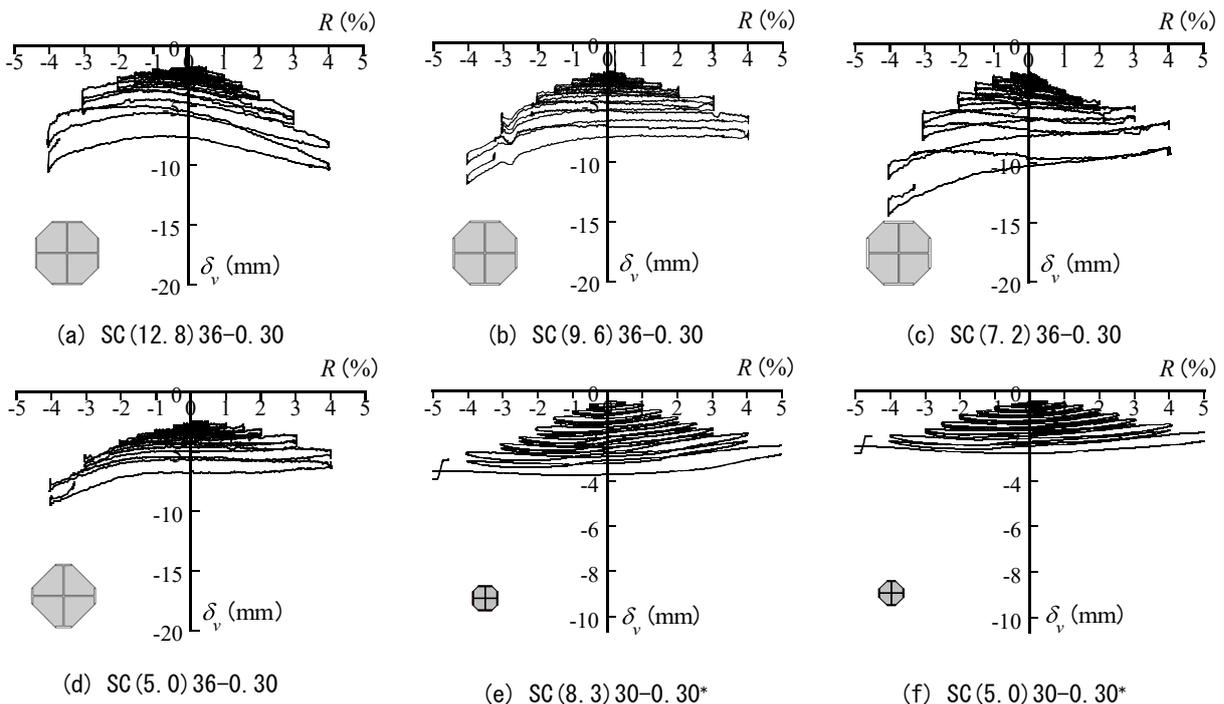


図-4 軸縮み-部材角関係

柱脚部付近における局部座屈が観察され、試験体 SC(7.2)36-0.30 および試験体 SC(5.0)36-0.30 では部材角 3.0%で観察された。

### 3.3 フランジ幅厚比の違いによる影響

前述した破壊過程でも述べたように、フランジ幅厚比が大きいほど早期に鉄骨フランジの局部座屈が観察されたが、局部座屈を生じたのちも耐力低下はほとんど見られていない。また、試験体 SC(5.0)36-0.30 のようにフランジ幅を細くしても、計算耐力と比較すると  $M_{max}/M_{pc1}$  で 1.13 倍、 $M_{max}/M_{pc2}$  で 1.22 倍 (表-3 参照) 発揮している。本 SC 柱材においてフランジの局部座屈が発生しても耐力低下が見られなかった要因は、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を十分に発揮しており、かつ鉄骨ウェブがコンクリートで拘束されているため、合成効果が期待できるためだと考えられる。また、試験体 SC(12.8)36-0.30 および試験体 SC(9.6)36-0.30 の鉄骨フランジの構造ランクは、それぞれ FC および FB ランクであるが、いずれの構造ランクでも安定した履歴性状を示した。

図-4 に中心軸位置における軸縮み-部材角関係を示す。いずれの試験体でも明瞭な差異は見られず、概ね同様の縮み量が計測された。部材角 3.0% 以降で軸縮みが増大しているが、これは鉄骨フランジが柱脚部で局部座屈を生じ、付随してコンクリートの剥落が多く見られたためである。部材角 4.0% 時においても軸縮みは 15mm 以下 (軸ひずみにして 1.0%) に抑えられており、脆性的な挙動につながることはなかった。

### 3.4 寸法効果の影響

図-3 (e), (f) に文献 1) で実施した鉄骨せい 190mm を有する試験体の実験挙動を示す。同程度の幅厚比を有している試験体 SC(9.6)36-0.30 と試験体 SC(8.3)30-0.30\* (図-3 (b), (e) 参照)、および試験体 SC(5.0)36-0.30 と試験体 SC(5.0)30-0.30\* (図-3 (d), (f) 参照) をそれぞれ比較すると、いずれもエネルギー吸収能力に優れた紡錘形の履歴性状を描いていることが分かる。また、図-5 には繰返しに伴う抵抗曲げモーメントの推移を示す。縦軸には各除荷点における  $PA$  効果を考慮した柱脚位置での抵抗モーメントを各試験体の最大曲げモーメントで除した値

を、横軸には各除荷点の部材角を一般化累加強度  $M_{pc2}$  を発揮するときの部材角  $R_{p2}$  で除した値を取っている。同図より、各々の試験体とも、断面寸法の違いに拘らずほぼ同様の挙動を示していることがわかる。図-6 に水平力載荷後の軸ひずみの推移を示す。軸ひずみは、それぞれ鉄骨せい 500mm の試験体は検長区間 1500mm で、鉄骨せい 190mm の試験体は検長区間 800mm で、軸縮み量を除した値である。いずれの試験体も、軸ひずみの累積は概ね同様の傾向を示していることが分かる。更に、崩壊形式においてもコンクリートの剥落およびフランジの局部座屈発生等、破壊性状は文献 1) の実験と同様の性状を示したことから、本実験条件下における断面寸法では寸法効果の影響はあまりないと云える。

## 4. 軸力と曲げせん断を受ける柱材の弾塑性解析

### 4.1 解析方法



(a) SC(12.8)36-0.30



(b) SC(9.6)36-0.30



(c) SC(7.2)36-0.30



(d) SC(5.0)36-0.30

写真-1 実験後の試験体

表-3 主要な実験結果一覧

試験体名	実験耐力								計算耐力		$\frac{M_{max}}{M_{pc1}}$		$\frac{M_{max}}{M_{pc2}}$	
	$Q_{max}$ (kN)		$R_{max}$ (%)		$M_{max}$ (kNm)		$R_{max}$ (%)		$M_{pc1}$	$M_{pc2}$	正	負	正	負
	正	負	正	負	正	負	正	負	(kNm)	(kNm)				
SC(12.8)36-0.30	578	-585	1.36	-1.41	942	-960	1.40	-1.93	894	830	1.05	1.07	1.13	1.16
SC(9.6)36-0.30	659	-683	1.88	-1.41	1143	-1173	2.78	-2.85	1056	991	1.08	1.11	1.15	1.18
SC(7.2)36-0.30	776	-790	2.58	-1.34	1360	-1360	3.80	-2.84	1263	1196	1.08	1.08	1.14	1.14
SC(5.0)36-0.30	467	-462	1.37	-1.36	775	-775	2.72	-2.82	689	641	1.12	1.12	1.21	1.21
SC(8.3)30-0.30*	199	-196	2.51	-2.51	88	-89	3.98	-5.96	81	78	1.09	1.10	1.13	1.14
SC(5.0)30-0.30*	148	-146	2.50	-2.46	66	-67	5.99	-5.96	55	53	1.20	1.22	1.25	1.26

軸力と曲げせん断を受ける本SC柱材の弾塑性解析を行うため、解析モデルを図-7に示すような弾塑性ヒンジ部と剛体からなるものと考え、柱材の変形を弾塑性ヒンジ部に集中させ、その点での断面のモーメント-曲率関係を求め、力の釣合を満足させることにより、柱の挙動を解析した。弾塑性ヒンジ部での曲率 $\phi$ と柱部材角 $R$ の間に式(2)が成立つと仮定している。式(3)中の $\alpha$ はSRC柱材の実験と解析の初期剛性を合わせることで求められた式である<sup>7)</sup>。

$$R = \alpha \cdot L \cdot \phi \quad (2)$$

$$\alpha = 0.1 + 1.3 \frac{D}{L} \quad (3)$$

ここで、 $D$ ：断面せいである。

解析に使用した鋼材およびコンクリートの応力-歪関係モデルを、図-8、図-9にそれぞれ示す。コンクリートの応力-歪関係は崎野・孫モデルを使用し、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を考慮している。なお、解析手法の詳細は文献5)を参照されたい。

#### 4.2 実験挙動と解析結果の比較

図-10に実験結果と解析結果の比較を示す。同図(e)のみやや乖離が見られているが、フランジ幅厚比の違いに拘らず、いずれの試験体も精度よく実験挙動を追跡できていることが分かる。なお、190mm試験体において大きな乖離が見られたのは同図(e)の試験体のみであった<sup>9)</sup>。最大耐力は実験挙動の方が大きく発現される傾向にある。大変形時になると実験耐力は徐々に低下する一方で、解析における水平抵抗力の低下はあまり見られない。これは本解析では鉄骨フランジの局部座屈の影響を

考慮していないためである。また、除荷剛性ならびに絨形膨らみは鉄骨せい500mmの実験挙動をよく評価できている。

十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果は、崎野・孫式を基にして、式(4)、式(5)で考慮している<sup>9)</sup>。

$$\sigma_{cB} = \sigma_c + k' \cdot \sigma_r \quad (4)$$

$$k' = \frac{2.3}{\sigma_r^{0.65}} \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_{cB}$ ：十字鉄骨で拘束されたコンクリート強度、 $\sigma_c$ ：無拘束コンクリート強度、 $k'$ ：有効拘束係数、 $\sigma_r$ ：鉄骨フランジに作用するコンクリートの側圧である。

図-11に有効拘束係数-側圧関係を示す。図中のプロットは本試験体条件で計算した値である。式(5)は鉄骨せい200mmの断面を有する本SC柱材の中心圧縮実験により得られた結果であるが、この評価式を用いた本解析手法でも本実験条件下において寸法効果の影響を考慮することなく、鉄骨せい500mmの実験挙動を追跡可能であると考えられる。

#### 5. 結論

八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材の寸法効果の影響について検討するため、一定軸力下における繰返し載荷実験を行なったところ、以下の知見を得た。

- 1) フランジ幅厚比の違いに拘らず、いずれの試験体も安定した履歴性状を示し、一般化累加強度を用いた計算耐力を発揮した。また、文献1)で実施した鉄骨せい190mmの試験体と同様な履歴性状ならびに破壊性状を

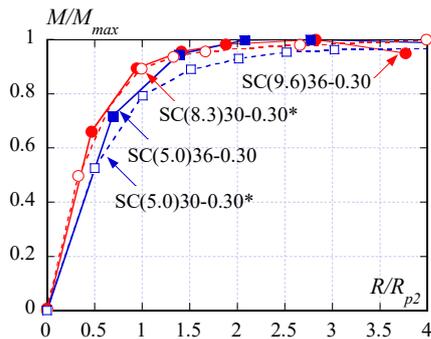


図-5 抵抗曲げモーメントの推移

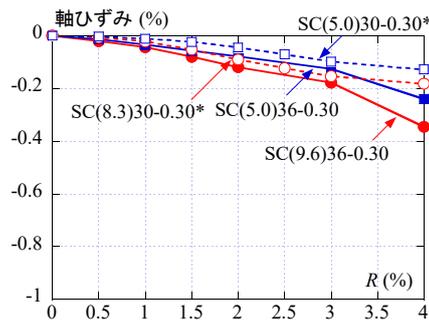


図-6 軸ひずみの推移

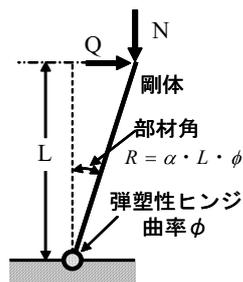


図-7 解析モデル

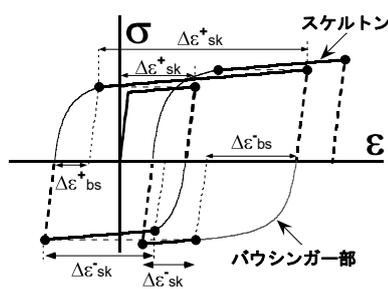


図-8 鋼材の応力-歪関係

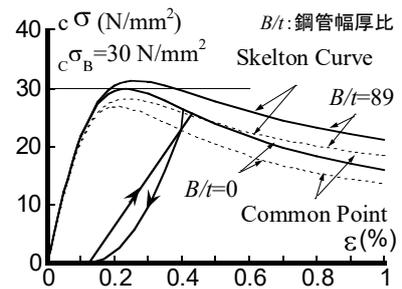


図-9 コンクリートの繰返し則

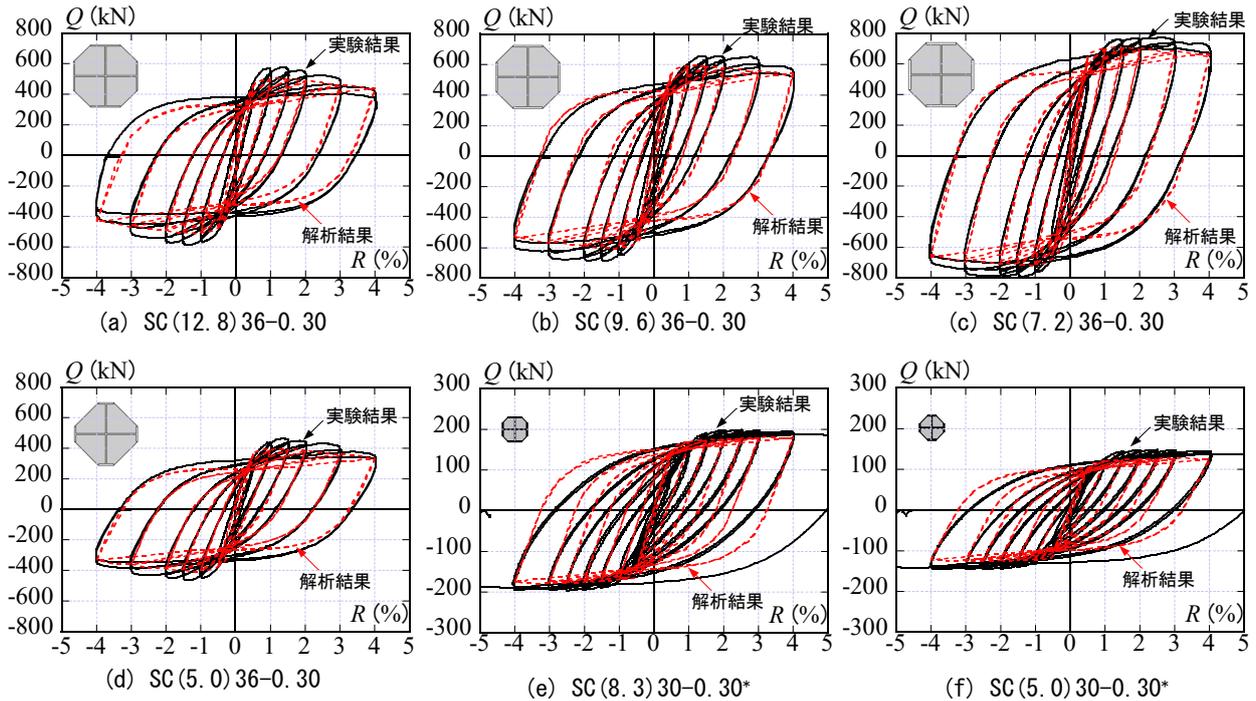


図-10 実験結果と解析結果の比較

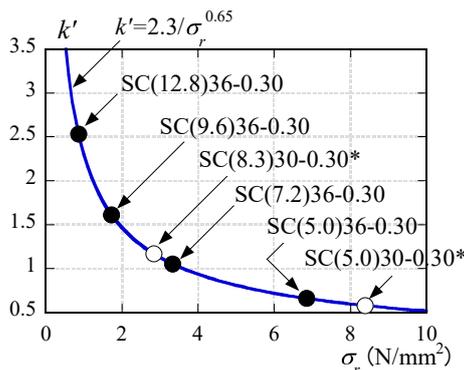


図-11 有効拘束係数-側圧関係

示したことから、本実験条件下において、鉄骨せい190mmから500mmを有する断面形状では曲げ耐力における寸法効果による影響は見られない。

- 2) 鉄骨フランジにFCランクを使用しても、安定した塑性変形能力を示した。また、フランジ幅を細くしても、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果によって安定した履歴性状を示す。
- 3) 十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を考慮した弾塑性解析を行なうと、鉄骨せい500mmの試験体でも実験挙動を精度良く評価できた。

#### 謝辞

本研究は平成30年度科学研究費助成事業・基盤研究(c) (課題番号18K04452, 研究代表: 塚純一) の助成を受けた。また、試験体の製作および載荷実験にあたり、福岡大学教育技術職員の石橋宏一郎氏と大野敦弘氏および、吉村威吹氏をはじめとする同大学塚研究室の卒研生にお

世話になった。ここに記して、感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 倉富洋, 塚純一, 田中照久, 川原健輔: 十字鉄骨とコンクリートで構成された合成柱材の弾塑性変形性状に関する実験的研究, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.60B, pp.65-71, 2014.3
- 2) 倉富洋, 塚純一, 田中照久, 瀧上大貴: 鋼・コンクリート合成柱材と鉄骨梁で構成された骨組の弾塑性変形性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1117-1122, 2018.7
- 3) 崎野健治, 山口達也, 中原浩之, 向井昭義: コンクリート充填円形鋼管短柱の中心圧縮耐力, 構造工学論文集, Vol.48B, pp.231-236, 2002.3
- 4) 藤本利昭, 小松博, 櫻田智之, 帥橋憲貴, 三橋博巳: 薄肉鋼管で補強した鉄骨コンクリート合成柱の軸圧縮性状, 日本建築学会技術報告集, Vol.18, No.39, pp.565-570, 2012.6
- 5) 倉富洋, 塚純一, 田中照久, 川原健輔: 八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1039-1045, 2014.7
- 6) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会: 2015年版建築物の構造技術関係技術基準解説書, 2015
- 7) 塚純一, 松井千秋: 鉄骨鉄筋コンクリート柱材の復元力特性に関する研究-単一H形鋼を内蔵したSRC柱の骨格曲線の定式化-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.534, pp.183-190, 2000.8