

## (25) 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研究

倉富 洋<sup>1</sup>・堺 純一<sup>2</sup>・田中 照久<sup>3</sup>・瀧上 大貴<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 福岡大学助教 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail:ykuratomi@fukuoka-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 福岡大学教授 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail:sakaij@fukuoka-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 福岡大学助教 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail:sttanaka@fukuoka-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 福岡大学大学院生 工学研究科建設工学専攻 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail:td160418@cis.fukuoka-u.ac.jp

十字鉄骨とコンクリートのみを使用した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を把握するため、解析的検討を行なった。解析手法に関する妥当性について検討するため、既往の実験結果との比較を行ない、概ね精度よく追跡できることを確認した。次いで、本合成柱材が高軸力下でも安定した挙動を示すことに着目し、解析変数に鉄骨比、鉄骨降伏点、コンクリート強度、部材角をとり、軸力比を変化させて安定限界軸力について調べた。解析結果より、コンクリートと鋼材の材料強度の違いによる影響を考慮した安定限界軸力式を提案したところ、解析結果で求めた安定限界軸力を精度よく評価できることを示した。

**Key Words:** *Steel concrete column, Elastic-plastic behavior, Stability limit axial load, Cruciform steel*

### 1. 序

著者らは、鉄骨鉄筋コンクリート柱材から主筋およびせん断補強筋を除き、薄肉鋼管で横補強を行った鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状および安定限界軸力について実験および解析的に検討し、高軸力下でも安定した履歴性状を示すことを明らかとした<sup>1)</sup>。優れた耐震性能を有する要因として、薄肉鋼管によって横補強することでかぶりコンクリートの存在を無くしたことと、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果の向上が大きく発揮されたためだと考察した。そこで、著者らは更なる施工の簡素化と耐震性能の向上をめざし、十字鉄骨とコンクリートのみを使用し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）について研究を進めている。既往の研究から中心圧縮実験および地震時応力を想定した曲げせん断実験を行ない、本SC柱材が優れた構造性能を示すことを実験的に明らかとしている<sup>2)</sup>。

本研究の目的は以下の二点である。まず、本SC柱材

の一定軸力と繰返し水平力を受ける弾塑性実験を追跡できる解析手法を提案し、その妥当性について検証する。解析に当たっては、中心圧縮実験によって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たモデルを用いた。次いで、本SC柱材が高軸力下でも優れた耐震性能を発揮することに着目し、安定した挙動を示す限界の軸力である安定限界軸力について検討する。安定限界軸力に関する検討は、文献4)で示されており、繰返し水平力に伴う曲げ耐力の低下も軸縮みの進行もなくなる軸力が存在することを明らかとしている。また、同文献では柱材の中心軸歪が一定値に収束し、収束するときの歪が十字鉄骨で拘束されたコンクリートの圧壊歪を超えていなければ安定状態と見做し、そのときの最大の軸力を安定限界軸力と定義した。本研究でも同様な定義のもと、本SC柱材の安定限界軸力について解析的に検討し、影響因子ならびに評価式について明らかとする。評価式の構築に関しては、大変形時においても安定した挙動を確保できるよう、部材角2.0%までを適用範囲とした式を提案する。

## 2. 解析的検討

### (1) 解析モデル

図-1(a)に示す断面を持つSC柱材の弾塑性解析を行うため、解析モデルを図-1(b)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断面のモーメント-曲率関係は平面保持の仮定のもとで断面区分法により求めた。弾塑性ヒンジ部での曲率 $\phi$ と柱部材角 $R$ の間に式(1)、式(2)が成立つと仮定している。式(2)の $\alpha$ は、せん断スパン比と軸力比をパラメータとしたSRC柱材の載荷実験と弾塑性解析を比較して、実験と解析の初期剛性を合わせることで求められた式<sup>5)</sup>である。

$$R = \alpha \cdot L \cdot \phi \quad (1)$$

$$\alpha = 0.1 + 1.3 \frac{D}{L} \quad (2)$$

ここで、 $L$ : 柱材長、 $D$ : 断面せいである。

### (2) 鋼材の応力-歪関係

鋼材の応力-歪関係は図-2に示すモデルを用いた。鋼材の骨格曲線は、弾性域をヤング係数 $E=2.05 \times 10^5$  (N/mm<sup>2</sup>)を勾配とした線形関係で、降伏後はヤング係数 $E$ の1/100

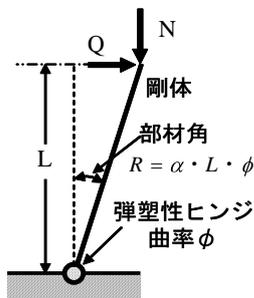


図-1 弾塑性解析

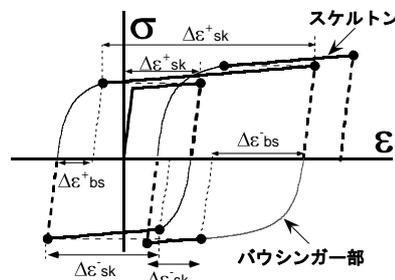


図-2 鋼材の応力-歪関係

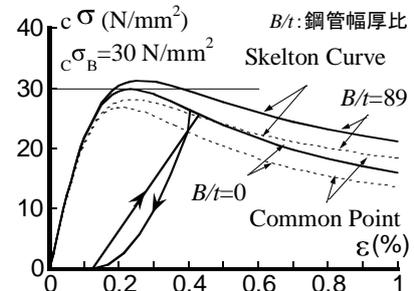


図-3 コンクリートの繰返し則

### (3) コンクリートの応力-歪関係

本SC柱材の中心圧縮実験から得られた成果を元に、文献8)で述べた十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を考慮したモデルを用いた。コンクリートの応力-歪関係は崎野・孫モデル<sup>9)</sup>を使用している。繰返し則は図-3に示すように渡辺らのモデル<sup>10)</sup>を用いた。

### (4) 実験挙動と解析結果の比較

著者らが行なった本SC柱材の曲げせん断実験の試験体と載荷装置を図-4および図-5に示す。載荷方法の詳細および実験結果については文献3)を参照されたい。表-1に示す10体の試験体に対して、前述した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った。

図-6に実験挙動と解析結果の比較を、表-2に実験結果と解析結果の初期剛性並びに最大曲げ耐力の比較をそれぞれ示す。初期剛性は部材角 $R=0.20\%$ 、 $R=0.50\%$ 時における割線剛性とし、最大曲げ耐力は $P\delta$ 効果を考慮した

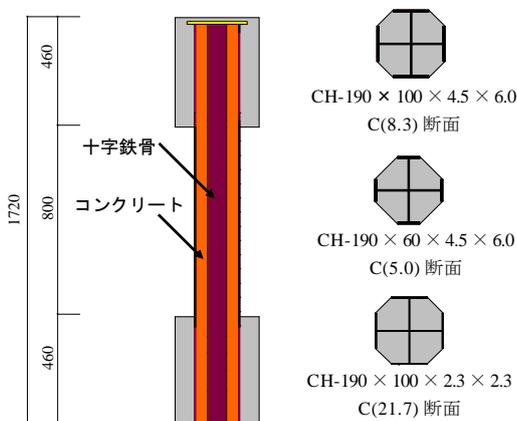


図-4 八角形SC柱試験体<sup>3)</sup>

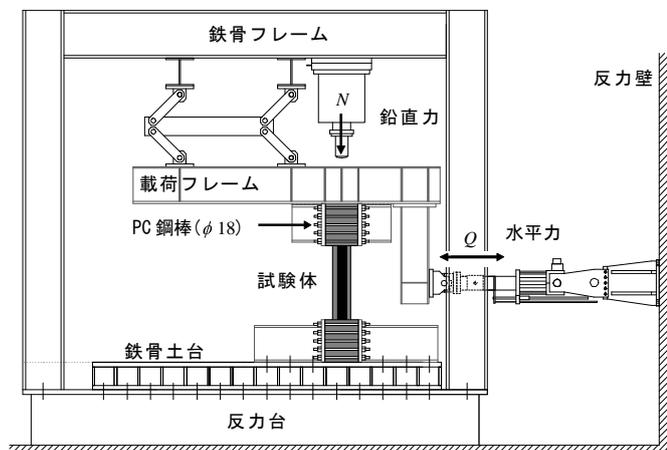


図-5 載荷装置



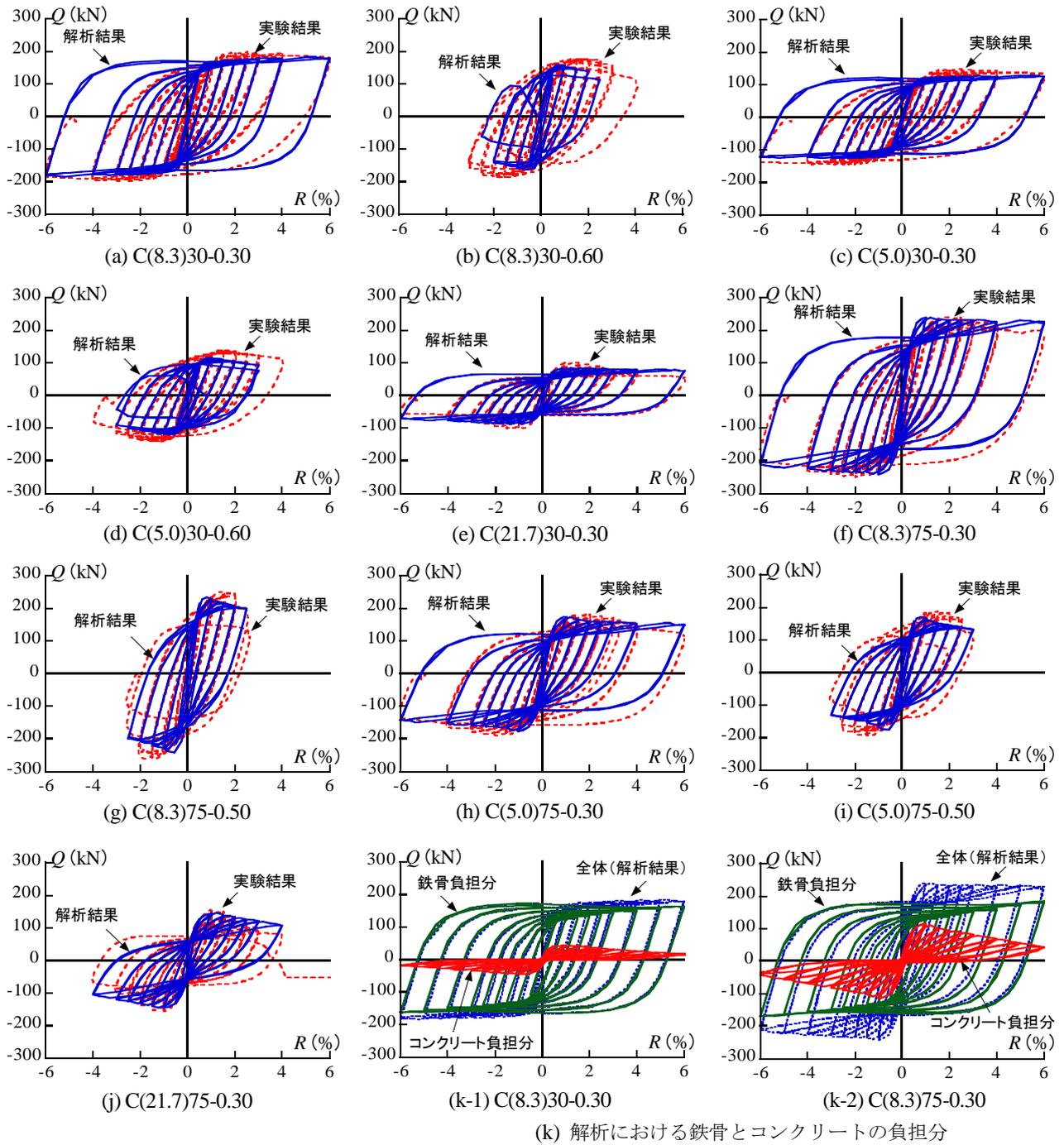


図-6 弾塑性挙動の実験結果と解析結果の比較

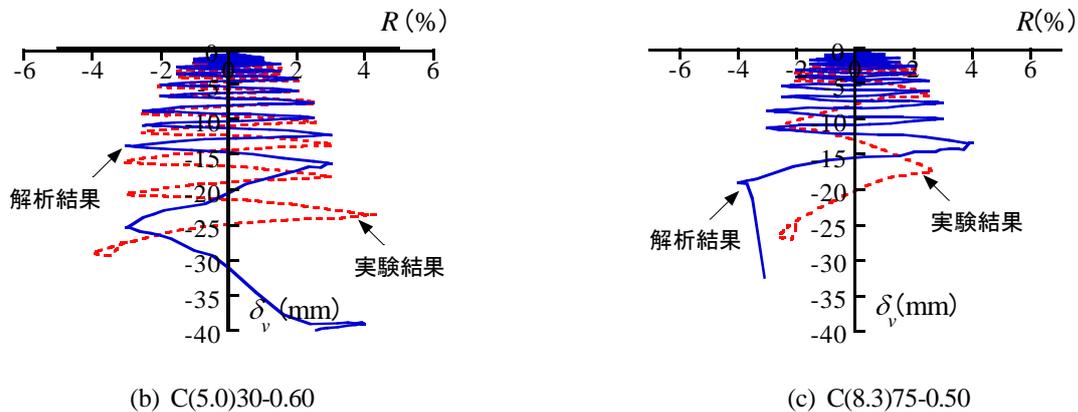


図-7 中心軸縮み挙動の実験結果と解析結果の比較

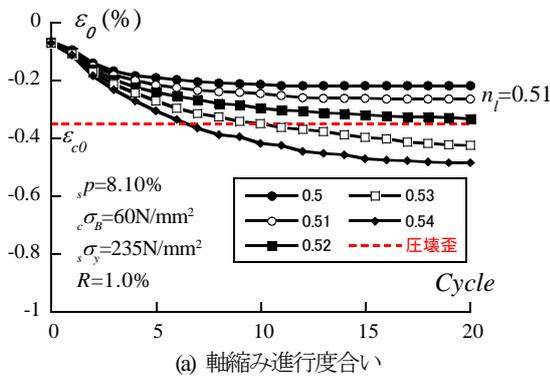
### 3. 安定限界軸力

#### (1) 定義

本SC柱材の安定限界軸力に影響を及ぼす影響因子を明らかとし、各条件における安定限界軸力を算定するため、弾塑性解析を行った。解析は、前節で述べた解析モデルを用い、一定軸力下で20回の繰返し水平力を定変位振幅で与えた。

解析変数を表-3に示す。断面寸法は鉄骨せい800mmを基本とし、せん断スパン比は2とした。解析変数には、本SC柱材の安定限界軸力に影響を及ぼすと考えられる十字鉄骨比、鉄骨降伏点、コンクリート強度、部材角をとった。本SC柱材は使用する鉄骨サイズによって断面積が決定するため、本解析では鉄骨せい800mmと基本として、フランジ厚およびウェブ厚を統一し、フランジ幅のみを変化させるサイズを選定した。コンクリート強度は $30\text{N/mm}^2 \sim 90\text{N/mm}^2$ 、鋼材降伏点は $235\text{N/mm}^2 \sim 400\text{N/mm}^2$ の範囲で、それぞれ選定した。また、SRC規準<sup>9)</sup>においては部材角 $2/100\text{rad}$ までの安定限界軸力について検討されている。本研究でもそれに倣い、本SC柱材の安定限界軸力の定式化にあたり、部材角1.0%のみならず1.5%、2.0%についても定式化を行うことを目的として部材角を解析変数に選んだ。

安定および不安定の定義は、柱材の中心軸歪が一定値に収束し、収束するときの歪が十字鉄骨で拘束されたコンクリートの圧壊歪 $\varepsilon_0$ を超えていなければ安定状態と



(a) 軸縮み進行度合い

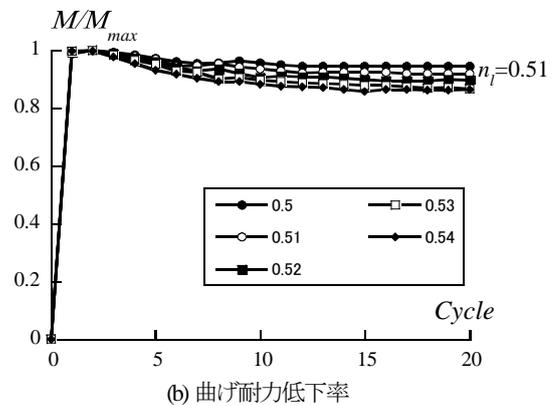
見做し、そのときの最大の軸力を安定限界軸力としている。なお、 $\varepsilon_0$ は崎野・孫式及び文献8)中の十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果に基づいて計算する。

図-8に安定限界軸力比の算定方法に関する解析結果の一例を示す。同図(a)は繰返しに伴う中心軸歪の進行度合いを示しており、縦軸には各除荷点における中心軸歪を、横軸には繰返し回数をとっている。また、同図(b)には繰返しに伴う曲げ耐力低下率を示しており、縦軸には各除荷点における $P\delta$ 効果を考慮した柱脚位置での抵抗モーメントを各解析条件における最大値で除した値をとっている。図より、中心軸歪が一定値に収束し、かつ圧壊歪を超えていない最大の軸力比は $n=0.51$ となり、本条件下での安定限界軸力比となる。この軸力比での20回目における曲げ耐力は最大曲げ耐力の9割程度を保持している。軸力比 $n=0.52$ 以上は安定条件の定義を満たしていないことから不安定と判別される。 $n_l$ は安定限界軸力比を示し、式(3)に記すように、柱材の断面耐力 $N_u$ を安定限界軸力 $N_l$ で除した値である。

$$n_l = \frac{N_l}{sc N_u} \quad (3)$$

$$sc N_u = c \sigma_B \cdot c A + s \sigma_y \cdot s A \quad (4)$$

ここで、 $c \sigma_B$ :コンクリートの圧縮強度、 $s \sigma_y$ :鉄骨降伏点、 $A$ 、 $s A$ :それぞれコンクリート及び鉄骨の断面積である。



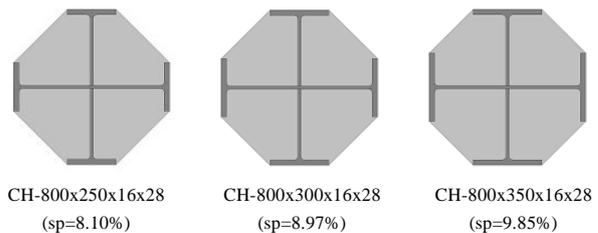
(b) 曲げ耐力低下率

図-8 安定不安定の判別

表-3 解析変数

十字鉄骨寸法	CH-800x250x16x28 (8.10%)
	CH-800x300x16x28 (8.97%)
	CH-800x350x16x28 (9.85%) ( )内は鉄骨比
$s \sigma_y$	235, 330, 400 (N/mm <sup>2</sup> )
$c \sigma_B$	30, 45, 60, 90 (N/mm <sup>2</sup> )
部材角	1.0%, 1.5%, 2.0%
せん断スパン比	2.0

$s \sigma_y$ :鉄骨降伏点、 $c \sigma_B$ :コンクリート圧縮強度



本SC柱材の解析断面図

(2) 解析結果

本SC柱材の安定限界軸力を算出した結果を表-4に示す。また、各影響因子について検討したグラフを図-9に併せて示す。ここで、分析および定式化に使用する諸記号を以下にまとめて表記する。

$${}_s p = \frac{{}_s A}{{}_{sc} A} \cdot 100 \quad (5)$$

$$f_s = \frac{{}_s \sigma_y}{295(\text{N/mm}^2)} \quad (6)$$

$$f_c = \frac{{}_c \sigma_B}{30(\text{N/mm}^2)} \quad (7)$$

ここで、 ${}_{sc} A$ :本SC柱材の断面積、 ${}_s A$ :鉄骨断面積、 ${}_c \sigma_B$ :コンクリートの圧縮強度、 ${}_s \sigma_y$ :鉄骨降伏点である。

まず、部材角 $R=1.0\%$ での安定限界軸力比は0.50前後で推移しており、比較的大きめの軸力比となっていることがわかる。部材角の増大とともに柱材に作用する応力状態は厳しくなるために安定限界軸力も低下するが、部材角 $R=2.0\%$ でも $n_l=0.40$ 程度を確保できる。図-9より、鉄骨降伏点が大きくなるほどに安定限界軸力比も大きくな

り、一方で鉄骨比が大きくなるにしたがって安定限界軸力比は小さくなる傾向にあることが窺える。また、僅かではあるが、コンクリート強度も大きくなるほどに安定限界軸力比は下がる。図-10に解析で得られた鉄骨とコンクリートの負担軸力を、図-11に負担曲げモーメントの一例をそれぞれ示す。本研究における鉄骨比の増加はコンクリート断面の増加にもつながるため、鉄骨比(ここではフランジ幅)が大きくなるとコンクリートの負担応力も増える傾向にある。ただし、鉄骨比はフランジ厚やウェブ厚の大小にも左右されるため、これらの影響については今後パラメータを増やして検討する予定である。

(3) 安定限界軸力の定式化

本SC柱材の安定限界軸力 ${}_{sc} N_l$ の評価式として、本SC柱材に強軸曲げと圧縮軸力が作用する場合には、強軸鉄骨フランジは曲げに抵抗し軸力を負担できないことを考慮して、式(8)で評価する。

$${}_{sc} N_l = {}_{sc} \alpha \cdot b \cdot D \cdot {}_c \sigma_B + {}_{sc} \beta \cdot ({}_s A - {}_s A_{sf}) {}_s \sigma_y \quad (8)$$

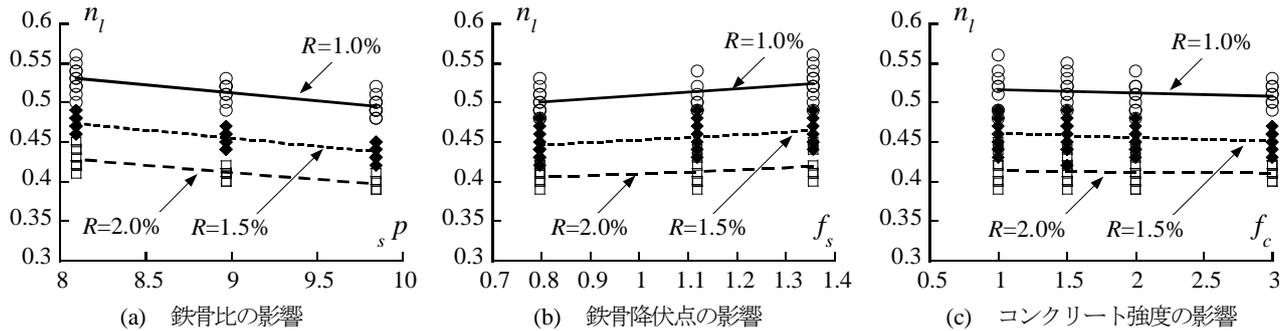


図-9 安定限界軸力比に及ぼす影響因子

表-4 各条件における安定限界軸力比

		十字鉄骨サイズ								
		CH-800x250x16x28 ( ${}_s p=8.10\%$ )			CH-800x300x16x28 ( ${}_s p=8.97\%$ )			CH-800x350x16x28 ( ${}_s p=9.85\%$ )		
		${}_s \sigma_y$			${}_s \sigma_y$			${}_s \sigma_y$		
$R$ (%)	${}_c \sigma_B$	235	330	400	235	330	400	235	330	400
1.0	30	0.53	0.54	0.56	0.51	0.52	0.52	0.48	0.49	0.49
	45	0.52	0.54	0.55	0.51	0.51	0.53	0.49	0.50	0.52
	60	0.51	0.52	0.54	0.49	0.51	0.52	0.48	0.49	0.50
	90	0.50	0.52	0.53	0.50	0.51	0.52	0.49	0.50	0.51
1.5	30	0.48	0.49	0.49	0.44	0.46	0.47	0.43	0.44	0.45
	45	0.47	0.48	0.49	0.45	0.46	0.47	0.42	0.44	0.44
	60	0.46	0.47	0.48	0.44	0.45	0.46	0.43	0.44	0.45
	90	0.46	0.46	0.47	0.44	0.45	0.46	0.44	0.43	0.45
2.0	30	0.42	0.44	0.45	0.41	0.40	0.42	0.39	0.40	0.40
	45	0.42	0.43	0.44	0.40	0.41	0.42	0.39	0.40	0.40
	60	0.41	0.43	0.44	0.40	0.41	0.42	0.39	0.39	0.40
	90	0.42	0.42	0.42	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40	0.41

ここで、 $\alpha$ : コンクリート断面の圧縮耐力に対するコンクリート断面が負担する軸力の割合、 $\beta$ : 強軸フランジを除く鉄骨断面の圧縮耐力に対する鉄骨断面が負担する軸力の割合、 $b$ ,  $D$ : それぞれ、コンクリートの幅とせい、 $A_s$ ,  $A_y$ : それぞれ、鉄骨断面積と強軸フランジの断面積、 $\sigma_c$ : コンクリートの圧縮強度、 $\sigma_y$ : 鉄骨降伏点である。

定量的な評価手法として、解析により式(8)中の $\alpha$ と $\beta$ の値を算出し、これらの変数に対して重回帰分析を行うことで影響因子を組み込んだ定式化を行い、安定限界軸力式を提案する。定式化に使用する $\alpha$ と $\beta$ は中心軸歪が収束する20回目の値をとった。

各種影響因子がコンクリート断面の圧縮耐力に対するコンクリート断面の負担軸力の割合 $\alpha$ に及ぼす影響について検討した結果を図-12に示す。同図より、鉄骨比と鉄骨降伏点よりもコンクリート強度の方が大きな影響を及ぼしていることが分かる。この結果をもとに $\alpha$ について回帰分析を行ない、コンクリート強度と部材角の影響を考慮した式(9)で評価する。

$$\alpha = 0.707 - 0.069R - 0.0375f_c \quad (9)$$

各種影響因子が内蔵鉄骨断面の圧縮耐力に対する鉄骨断面の負担軸力の割合 $\beta$ に及ぼす影響について検討

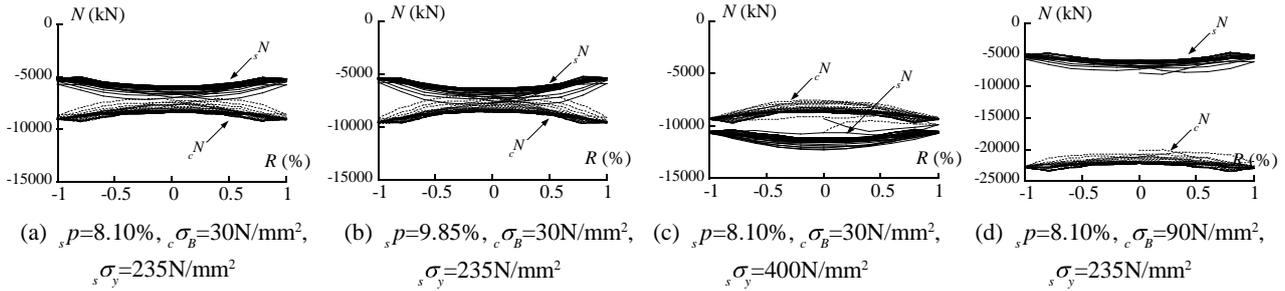


図-10 鉄骨とコンクリートの負担軸力

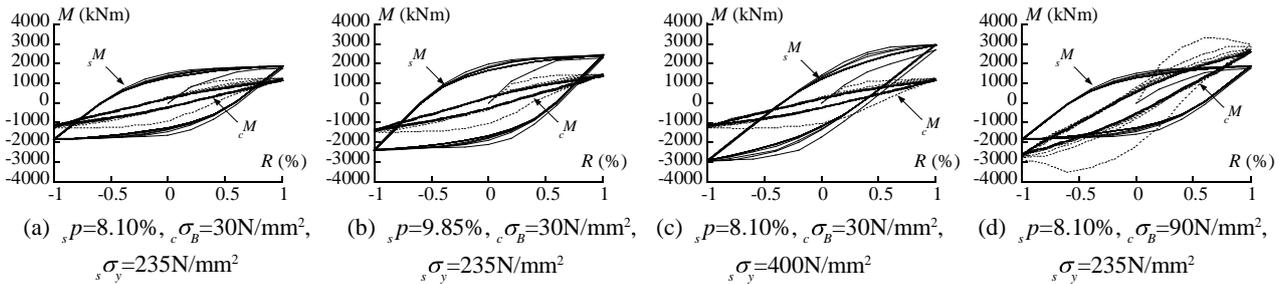


図-11 鉄骨とコンクリートの負担曲げモーメント

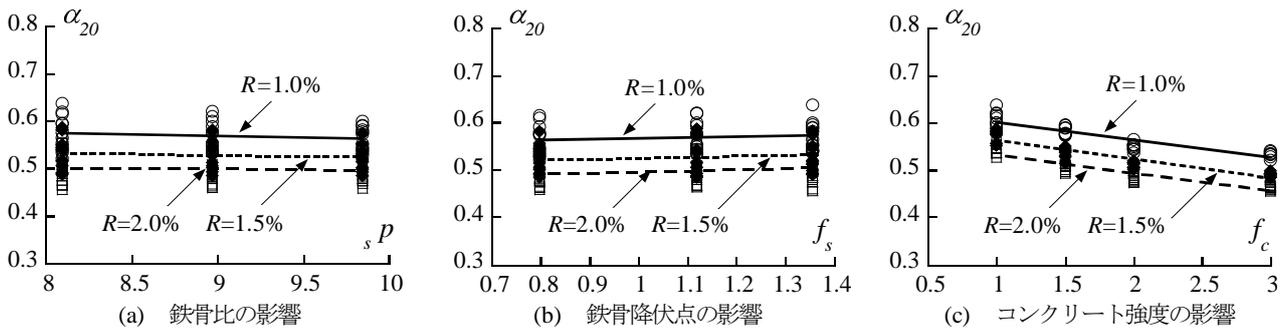


図-12  $\alpha$ に及ぼす影響因子

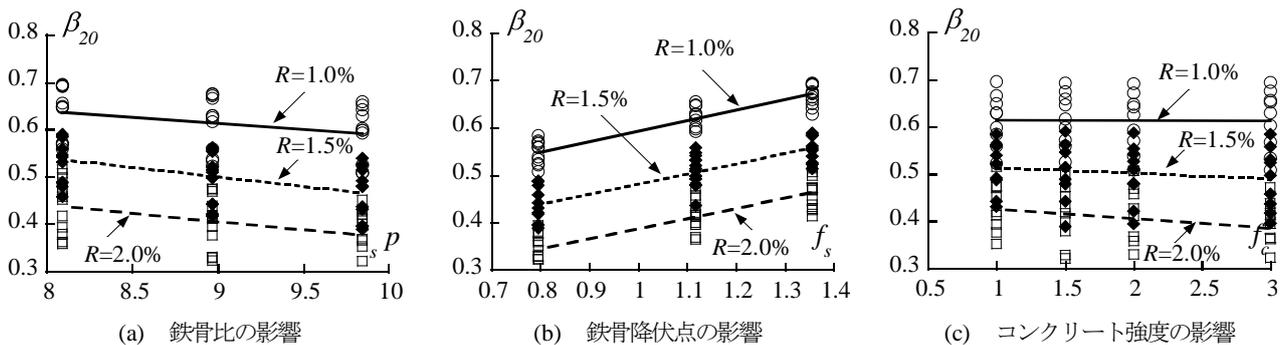


図-13  $\beta$ に及ぼす影響因子

した結果、鉄骨比と鉄骨降伏点が影響を及ぼしていることが図-13より示された。回帰分析を進めていくにつれ、鉄骨降伏点の影響が支配的となることがわかったため、評価式の簡便さも考慮して鉄骨比の影響を考慮しない式(10)で評価する。

$${}_{sc}\beta = 0.567 - 0.20R + (0.23 - 0.0070R)f_s \quad (10)$$

図-14に解析で得られた安定限界軸力比と評価式から算出した安定限界軸力比を示す。提案した安定限界軸力式は、部材角の違いに拘らず解析値を精度よく評価している。

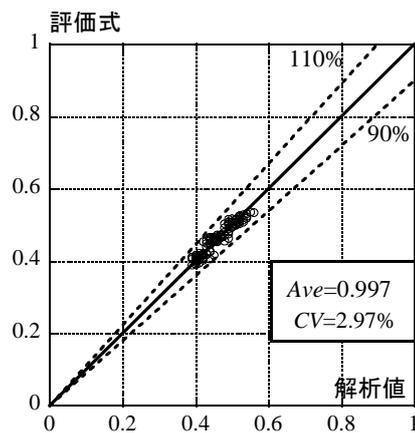


図-14 解析値と安定限界軸力式の比較

#### 4. 結論

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の弾塑性解析を行い、解析手法の妥当性ならびに安定限界軸力について考察したところ、以下のことを明らかとした。

- 1) 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ったところ、実験挙動を精度よく追跡できることを確認した。
- 2) 本SC柱材の安定限界軸力比は鉄骨比、鉄骨降伏点、コンクリート強度、部材角の影響を受ける。部材角1.0%～2.0%の範囲内において、安定限界軸力は式(8)～式(10)を用いることで解析で得られた安定限界軸力比を精度よく評価できる。

#### 参考文献

- 1) 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 河本裕行: 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性性状に関する研究, 構造工学論文集, Vol.57, pp.527-534, 2011.3
- 2) 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 河本裕行: 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の復元力特性-骨格曲線の定式化-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.673, pp.491-498, 2012.3
- 3) 倉富洋, 堺純一, 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
- 4) 倉富洋, 堺純一, 田中照久, 他: 多数回繰返し水平力を受ける鋼・コンクリート合成柱材の安定限界軸力の実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.686, pp.875-884, 2013.4
- 5) 堺純一, 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
- 6) 加藤勉, 秋山宏, 山内泰之: 鋼材の応力-ひずみ履歴曲線に関する実験則, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.937-938, 1973.10
- 7) 山田哲, 今枝知子, 岡田 健: バウシinger効果を考慮した構造用鋼材の簡潔な履歴モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第559号, pp.225-232, 2002.9
- 8) 倉富洋, 堺純一, 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, コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1039-1044, 2014.7
- 9) 崎野健治, 孫玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, pp.95-104, 1994.7
- 10) 鎌田圭次郎, 大住和正, 渡辺史夫, 六車 熙: 各種強度の鉄筋混使用によるRC断面曲げ性能の制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 構造II B, pp.505-506, 1991.9
- 11) 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, 2001.1

## A STUDY ON ELASTIC-PLASTIC BEHAVIOR OF STEEL AND CONCRETE COMPOSITE COLUMNS WITH OCTAGONAL CROSS SECTION

*Yo KURATOMI, Junichi SAKAI, Teruhisa TANAKA and Daiki FUCHIGAMI*

An analytical study was carried out under constant axial load and cyclic horizontal load to investigate elastic-plastic behavior of steel and concrete (SC) composite columns with octagonal cross section. The analysis results were able to pursue the experimental results of SC columns. A parametrical study was conducted to investigate of stability limit axial load of the SC columns subjected to axial load and cyclic horizontal load corresponding to a given constant rotation angle amplitude. The analytical parameters were cruciform steel section ratio, material strength of steel and concrete and rotation angle of column. Formulae on stability limit axial load of SC columns were proposed respective rotation angle on the basis of analytical results.