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

AN EXPERIMENTAL STUDY ON STABILITY LIMIT AXIAL LOAD OF STEEL AND CONCRETE COMPOSITE COLUMNS SUBJECTED TO A LARGE NUMBER OF CYCLIC HORIZONTAL LOADS

倉 富 洋*, 堺 純一**, 田中照久***, 河本裕行****

*Yo KURATOMI, Junichi SAKAI, Teruhisa TANAKA
and Hiroyuki KAWAMOTO*

In order to investigate stability limit axial load of steel and concrete (SC) composite columns, an experimental work of SC column was carried out under constant axial load and cyclic horizontal load. The experimental results indicated that the stable axial load exists, which is almost observed neither flexural strength degradation nor increase of axial strain. From the experimental results it can be thought SC column showed stable behavior if axial strain at centroid of column section accumulated by cyclic loading did not exceed strain at the compressive strength of concrete confined by encased cruciform steel. In this paper the maximum value of axial load which SC column shows stable behavior was defined as stability limit axial load, and the stability limit axial load was discussed.

Keywords: Steel concrete column, Axial load ratio, Steel ratio, Loading test, Elastic-plastic analysis

鉄骨コンクリート柱, 軸力比, 鉄骨比, 載荷実験, 弾塑性解析

1. 序

著者らは鉄骨鉄筋コンクリート(以下SRCと略記)断面から鉄筋を省略し, 薄肉鋼管で横補強することで施工の簡素化を目指した鋼コンクリート(以下SCと略記)合成構造の弾塑性変形性状を調べ, 構造性能の把握及び定量的な評価法の提案を行っている^{1)~4)}。本柱材の特徴として, 1) 本柱材の鋼管は柱頭及び柱脚に隙間を設けることを想定しており, 軸力と曲げを負担しないため薄肉の鋼管を使用できること, 2) 被りコンクリートをなくし, コンクリートを内蔵十字鉄骨と薄肉鋼管で横拘束することで, コンクリートの耐力及び靱性を向上させることができること, が挙げられる。これまでの研究から, SC柱材は壁厚比100程度の非常に薄い鋼管で横補強することによって, 高軸力下でも安定した挙動を示すことが分かっている^{1)~3)}。

近年の建築物では, 空間の自由度を確保するため, 柱断面の縮小化やスパン拡大が構造的に求められている。しかしながら, 例えば高層建築物の低層部等の大きな軸力を受ける柱材に要求される性能として, 軸力を保持した状態で十分な変形能力を有する必要がある。一般的に柱材は負担軸力が大きくなると変形能力が低下するが, SC柱材は高軸力下でも優れた変形能力を示すため, 上述した意匠上の要求にも応えられる柱材であるといえる。そこでSC柱材が高軸力下でも優れた耐震性能を示すことに着目し, 合理的な断面設計を行い, かつ建物の鉛直荷重を保持し層崩壊を生じさせないような設計手法を構築するため, 本柱材が安定した挙動を示す限界の軸力を明らか

にすることは重要な課題である。本研究では, 本柱材が安定した挙動を示す軸力の最大値を安定限界軸力と呼称し, その定義について研鑽を重ねている^{3)~5)}。文献4)における安定限界軸力の定義では耐力低下に主眼をおいて解析的に検討したが, 柱材の構造性能を評価する上で, 軸歪の累積はコンクリートの破壊を招くため, 耐力のみならず軸歪も厳密に考慮すべきであると考えた。文献6)~9)で鉄筋コンクリート(以下RCと略記)柱材, SRC柱材の安定限界軸力について実験及び解析的に調べられているが, 本柱材は内蔵鉄骨に十字鉄骨を用い, 薄肉鋼管によって横補強している点でRC柱材やSRC柱材とは異なる構造性能を示すことから, 本柱材の安定限界軸力を検討する必要がある。また, 高層建築物の低層部での側柱では大きな変動軸力を受けるが, 変動軸力の最大の圧縮軸力を一定軸力として載荷した繰返し水平力を受ける柱材の方が変動軸力を受ける柱材と比べ軸歪の累積は大きい^{10), 11)}ため, 本論では一定軸力下を対象とする。

本論では, 安定限界軸力に影響を与えると考えられる内蔵十字鉄骨比, コンクリート強度, 軸力比の違いが定変位振幅で繰返し水平力を受けるSC柱材の挙動に及ぼす影響を実験的に調べ, 安定限界軸力について検討することを目的とする。実験の変位振幅はSRC規準¹²⁾で規定されている制限軸力と比較するために部材角1.0%を主とし, 水平変形量を大きくした部材角2.0%についても検討した。また, 著者らが提案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解析手法³⁾を用いて弾塑性解析を行い, 本実験結果と比較検討した。

本論文は文献5)に加筆, 修正を加えたものである。

* 福岡大学大学院工学研究科 博士後期課程・工修

** 福岡大学工学部建築学科 教授・博士(工学)

*** 福岡大学工学部建築学科 助手

**** 福岡建設専門学校 講師・工修

Graduate Student, Graduate School of Eng., Fukuoka Univ., M. Eng.

Prof., Fac. of Eng., Fukuoka Univ., Dr. Eng.

Assoc. Research, Fac. of Eng., Dept. of Architecture, Fukuoka Univ., B. Eng.

Lecturer, Fukuoka College of Civil. Eng. & Arch., M. Eng.

2. 実験概要

2.1 試験体

安定限界軸力を実験的に検討するため、柱断面 200mm x200mm(実測値 195mm x195mm)、せん断スパン比 2 を有する試験体(図 1 参照)を 8 体製作し、一定軸力下で正負交番繰返し水平力を載荷する柱材の実験を行った。試験体を横補強した鋼管は、コンクリートを拘束するためだけであるものとし、軸力と曲げモーメントを負担させないため柱頭と柱脚部に 10mm の隙間を設けた。また、上下スタブには D10 の主筋と D6 の横補強筋を用いた鉄筋籠を挿入して補強した。

試験体一覧を表 1 に示す。実験変数は内蔵十字鉄骨比 $sp(=A_s/A_c)$ 、 A_s : 内蔵十字鉄骨断面積、 A_c : SC 柱断面積、 $A_c=A_s+A_c$ 、 A_c : コンクリート断面積、 A_s : 鉄骨断面積、コンクリート強度、軸力比 $n(=N/N_u)$ 、 N : 作用軸力、 N_u : SC 柱断面の圧縮耐力、 $N_u=A_c \cdot \sigma_{Bc} + A_s \cdot \sigma_{ys}$ 、 σ_{Bc} : コンクリートの圧縮強度、 σ_{ys} : 鉄骨の降伏点、変位振幅(部材角 $R=1.0\%$, 2.0%)であ

図1 SC柱試験体

図2 載荷装置

図3 変位計取付図

表1 試験体一覧

試験体名	σ_{Bc} (N/mm ²)	軸力比 n	載荷軸力 N (kN)	内蔵十字鉄骨寸法 ()内は鉄骨比	振幅 R (%)	薄肉鋼管		備考
						板厚(mm)	幅厚比	
L30-0.45	27.9	0.45	909	CH-160x80x4.5x6 ($sp=8.1\%$)	1.0	2.3	87	
L30-0.55	29.3	0.55	1137					
L30-0.70*	27.9	0.70	1412					L30-0.45の実験終了後、再び載荷
L60-0.40	54.2	0.40	1156					
L60-0.50*	54.2	0.50	1444					L60-0.40の実験終了後、再び載荷
L60-0.55	54.8	0.55	1590					
L60-0.65*	54.2	0.65	1872	CH-140x50x2.3x2.3 ($sp=2.7\%$)	2.0	2.3	87	L60-0.50の実験終了後、再び載荷
S60-0.40	57.2	0.40	949					
S60-0.45	54.9	0.45	1031					
S60-0.50*	54.9	0.50	1146					S60-0.45の実験終了後、再び載荷
S60-0.55	55.4	0.55	1270	CH-160x80x4.5x6 ($sp=8.1\%$)	2.0	2.3	87	
S60-0.60*	57.2	0.60	1424					S60-0.40の実験終了後、再び載荷
L30-0.45 II	40.0	0.45	1062					
L30-0.65 II*	40.0	0.65	1540					L30-0.45 IIの実験終了後、再び載荷

* は再載荷した試験体、 σ_{Bc} はコンクリート強度をそれぞれを示す

表2 鋼材の機械的性質

部材名	t (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E (N/mm ²)	$E\text{Ing.}$ (%)	$Y.R.$
薄肉鋼管, 十字鉄骨	2.3	335	485	2.01×10^5	33.7	0.69
十字鉄骨	4.5	322	452	2.02×10^5	32.4	0.71
	6	349	473	2.00×10^5	37.1	0.74

t : 板厚 σ_y : 降伏点 σ_u : 引張強さ E : ヤング係数 $E\text{Ing.}$: 伸び率 $Y.R.$: 降伏比

試験体名凡例

L30-0.45

└─ 軸力比
└─ コンクリート強度
└─ 内蔵十字鉄骨寸法
L: 鉄骨比 8.1%
S: 鉄骨比 2.7%

載荷装置で正負交番繰返し水平力を載荷し、柱材が逆対称変形状態になるようにした。また、載荷フレームと試験体はPC 鋼棒で締め上げて一体化させた。載荷形式は、文献6), 8) を基に部材角 $R=1.0\%$ 及び $R=2.0\%$ の定変位振幅で20 回の正負交番繰返し水平力を与えた。また、試験体 L30-0.70* は L30-0.45 の実験終了後に一度軸力を抜き、再び所定の軸力を載荷して20 回の繰返し水平力を与えた。同様の手順で再載荷した試験体は表1 中に* マークで示している。詳細は表中の備考を参照されたい。測定は、歪ゲージを柱頭柱脚部の強軸鉄骨フランジ及び、鋼管に2 枚ずつ貼付し、鉄骨と鋼管の歪を測定した。また、柱材の水平変位及び材軸方向の軸縮みの変形は柱頭及び柱脚のスタブ部分に変位計フレームを設置し、測定した (図3 参照)。

3. 実験結果と考察

実験結果を表3 に示す。また、実験で得られた水平力 Q - 部材角 R 関係を図4.1 及び図4.2 (以下図4 と略) に、軸縮み δ_v - 部材角 R 関係を図5.1 及び図5.2 (以下図5 と略) に、それぞれ示す。再載荷した試験体については、20 回繰返し水平力を与えた前載荷終了後に軸力を抜き再度所定の軸力を載荷したところ、振幅 $R=1.0\%$ の試験体では残留変形量が部材角 $R=0.02\%$ 程度と小さい値であったため、残留変形を原点に戻すことをせずに再載荷を行った。変位振幅 $R=2.0\%$ を含め、再載荷した試験体の図4, 図5 の原点は前載荷の原点を表す。図3 中の点線は鋼材及びコンクリートの材料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) を柱頭、柱脚部でそれぞれ發揮するとして式(1) で求めた塑性崩壊機構形成時の耐力である。また、同図中の実線はSRC 規準¹²⁾ によるコンクリートの低減係数 γ_U を用い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。

$$Q = \frac{M_{pc}}{L} - \frac{N\delta}{L} \quad (1)$$

ここで、 L : スタブフェイスから反曲点 (材長の中間点を想定) までの距離、 N : 柱軸力、 δ : 反曲点での水平変位である。

図6 に繰返しに伴う曲げ耐力低下率を示す。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試験体の最大曲げモーメントで除した値を、横軸には繰返し回数 $Cycle$ 関係を示す。図中の点線は十字鉄骨内側の鉄骨で拘束されたコンクリートの

圧壊歪 ε_{c0} に変形域と弾性域を考慮した材長 (詳細は5.4 項の式(4) 及び図10(b) 参照) を掛けて軸変形量に変換した δ_{c0} を示す。試験体の条件によって δ_{c0} の値は異なるが、図中には最も小さい値を記している。なお、十字鉄骨で拘束されたコンクリートの強度上昇率 K は文献3) より算出し、この値を用いて ε_{c0} を崎野孫式¹³⁾ から求めている。

3.1 崩壊性状

内蔵鉄骨比の小さいS60-0.60* や $R=2.0\%$ の振幅を与えた L30-0.65 II * はそれぞれ繰返し回数19 回目、7 回目の押し載荷にて柱頭部の横補強鋼管がスタブに接触し、鋼管溶接部が破断した (写真1(b) 参照)。その後、鋼管がコンクリートを拘束できず、急激な耐力低下が見られたため実験を終了した。写真1(c) に柱頭部をダイヤモンドカッターで切断した断面を示す。十字鉄骨の外側のコンクリートにひび割れが見られたが、十字鉄骨内のコンクリートにひび割れは見られなかった。その他の試験体は繰返しに伴う耐力低下及び軸縮みの進行は見られたが、軸力が保持できないような急激な耐力低下を起こすことなく載荷を終了した (写真1(a) 参照)。鋼管とスタブの隙間10mm 区間でコンクリートの軽微なひび割れが生じたが、鋼管の局部座屈や破断といった不安定現象は見られず、柱部分は健全であった。また、S60-0.60*, L30-0.65 II * を除いて20 回の繰返しで曲げ耐力の低下はほぼなくなり、一定値を保持した。

3.2 軸力比の違いによる影響

図5 より、軸力比が大きくなるほど軸縮みが大きくなっている

写真1 実験終了後の試験体

表3 実験結果

試験体名	実験耐力				計算耐力					
	最大曲げ耐力 M_{max} (kNm)		20回目の曲げ耐力 M_{20} (kNm)		M_{pc1} (kNm)	M_{pc2} (kNm)	$\frac{M_{max}}{M_{pc1}}$	$\frac{M_{max}}{M_{pc2}}$	$\frac{M_{20}}{M_{pc1}}$	$\frac{M_{20}}{M_{pc2}}$
	正	負	正	負						
L30-0.45	75.1	-72.3	63.6	-61.8	62.7	56.5	1.18	1.30	1.00	1.11
L30-0.55	74.6	-80.9	65.4	-69.2	59.6	51.5	1.30	1.51	1.13	1.31
L30-0.70*	70.5	-69.8	66.3	-67.5	46.5	34.5	1.51	2.03	1.44	1.94
L60-0.40	90.1	-97.5	74.2	-77.6	87.0	77.2	1.08	1.22	0.87	0.98
L60-0.50*	79.1	-85.1	74.3	-76.5	84.3	71.6	0.97	1.15	0.89	1.05
L60-0.55	95.8	-100.7	85.0	-80.9	81.8	67.2	1.20	1.46	1.01	1.23
L60-0.65*	79.9	-84.9	74.8	-80.6	72.2	53.4	1.14	1.54	1.08	1.45
S60-0.40	71.9	-72.8	57.4	-59.4	63.2	54.8	1.14	1.32	0.92	1.07
S60-0.45	68.1	-77.6	56.7	-62.6	61.1	53.0	1.19	1.37	0.98	1.13
S60-0.50*	58.8	-67.1	55.8	-59.8	61.1	53.0	1.03	1.19	0.95	1.09
S60-0.55	78.6	-78.1	56.0	-59.7	61.5	53.4	1.27	1.47	0.94	1.08
S60-0.60*	69.1	-71.4	無	無	63.2	54.8	1.11	1.28	無	無
L30-0.45 II	86.3	-88.0	70.7	-71.7	74.4	66.6	1.17	1.31	0.96	1.07
L30-0.65 II *	75.9	-75.9	無	無	65.1	52.9	1.17	1.43	無	無

図4.1 水平力 Q - 部材角 R 関係 (振幅 $R=1.0\%$, つづく)

* は再荷した試験体を示す

図5.1 軸縮み δ_v - 部材角 R 関係 (振幅 $R=1.0\%$, つづく)

* は再荷した試験体を示す

図4.2 水平力 Q - 部材角 R 関係 (振幅 $R=2.0\%$, つづき)

図5.2 軸縮み δ_v - 部材角 R 関係 (振幅 $R=2.0\%$, つづき)

が、水平力-部材角関係はエネルギー吸収能力に優れた紡錘形の履歴ループを示していることが分かる(図4参照)。これは、本柱材がSRC柱材と比較して被りコンクリートがなく、またコンクリート充填鋼管構造と比較して鉄骨フランジが局部座屈しにくいことより、耐力低下が小さくなるためだと考えられる。図6(a)に軸力比の違いによる曲げ耐力低下率を示すが、再載荷した試験体は耐力の低下が小さいことがわかる。これは、1サイクル目ではコンクリート及び鉄骨が無損傷状態であるため水平耐力及び剛性が大きく発揮され、その後繰返し回数の増加により定常ループとなる(例えば図4(d)参照)。しかしながら、再載荷した試験体ではコンクリートが損傷を受け、鉄骨が塑性化した状態で載荷を行うため、1サイクル目から定常ループとなり(例えば図4(e)参照)、耐力低下があまり見られなくなるためだと考えられる。このことを考慮すると、軸力比は曲げ耐力低下率に然程明確な違いを与えず、曲げ耐力の低下より軸縮みの進行に大きな影響を及ぼすことがわかる。また、図6(a)より、部材角 $R=1.0\%$ の振幅では軸力比 $n=0.55$ で軸縮みの進行が見られなくなったが、部材角 $R=2.0\%$ の振幅を与えると、 $n=0.45$ でも軸縮みが進行し続け、 $n=0.65$ では軸縮みが急激に発散した。このことから、変位振幅の違いは柱材の軸縮み挙動に影響を及ぼすことが分かる。なお、

変位振幅の違いが柱材の挙動に及ぼす影響については、弾塑性解析を行うことで定量的に検討する予定である。

3.3 内蔵十字鉄骨比の違いによる影響

図6(b)に、鉄骨比の違い(L60とS60の比較)が曲げ耐力低下率に及ぼす影響を示す。軸力比 $n=0.40$ ではあまり違いが見られないが、 $n=0.55$ 以上になると鉄骨比が小さいほど耐力低下が大きくなることが分かる。図7に示すように、軸力比 $n=0.55$ において、Lシリーズは十字鉄骨によって拘束されたコンクリートの圧壊歪に達するまで余裕があるが、Sシリーズでは超えている。このことから、軸力比が大きくなるほど、鉄骨比の違いは曲げ耐力の低下及び軸歪の進行に影響することがわかる。L30-0.70*、L60-0.65*では軸歪が大きく進行しても耐力を保持している(図7(a), (b)参照)が、S60-0.60*は急激な耐力低下が確認できる(図6(b)参照)。これは、鉄骨本来の曲げ性能の違いも当然影響しているが、Sシリーズのような断面が小さい十字鉄骨を使用すると鉄骨によるコンクリートの拘束領域が減少するため、コンクリートが多数回の繰返しによる軸歪の累積に耐えきれず急激な耐力低下につながったものと考えられる。よって、コンクリートの拘束効果が十分に発揮できるような鉄骨量を内蔵することが、高軸力下でも安定した挙動を示す重要な要素であるとい

(a) 軸力比の違いによる影響

(b) 鉄骨比の違いによる影響

(c) コンクリートの違いによる影響

図6 曲げ耐力低下率

(a) L30 シリーズ

(b) L60 シリーズ

(c) S60 シリーズ

図7 各除荷点における軸縮み δ_v - Cycle 関係

える。この適切な鉄骨量については、今後の検討課題である。

3.4 コンクリート強度の違いによる影響

図6(c)に、コンクリート強度の違いが曲げ耐力低下率に及ぼす影響を示す。何れの軸力比においても、コンクリート強度に拘らず耐力低下に差異は見られず、図5からも軸縮み量の違いはあまり見られない。通常、RC柱材やSRC柱材に軸力比 $n=0.50$ を超えるような高軸力下で繰返し水平力を与えると、被りコンクリートが剥落し急激な耐力低下及び歪の発散につながる(例えば6, 8)。一方で本柱材は、コンクリートを薄肉鋼管と内蔵十字鉄骨で拘束することにより、脆性材料であるコンクリートの靱性を大きく向上させることが可能となる。それ故、最大耐力発揮後の耐力低下が大きくなる高強度コンクリートを高軸力下で使用しても優れた変形性能を示すものと考えられる。

3.5 曲げ耐力

図8に軸力 N -曲げモーメント M 相関曲線を示す。図中○は PA 効果を考慮した最大曲げ耐力の正負平均、●は載荷20回目の曲げ耐力の正負平均である。また、△、▲は一度軸力を抜き圧縮軸力を大きくして再び実験を行った試験体を示す。ほとんどの試験体で最大曲げ耐力は M_{pc1} を発揮し、20回繰返し水平力を与えた後でも M_{pc2} を超えていることが分かる。コンクリート強度 30N/mm^2 の試験体は応力歪関係においてコンクリートの耐力低下が緩やかになるため、柱の曲げ耐力は20回載荷後でも M_{pc1} を上回っている。一方で 60N/mm^2 の試験体では耐力低下は 30N/mm^2 に比較してやや大きい、ほとんどの試験体で M_{pc2} を下回ることにはなかった。 $S60-0.65^*$ は19回目の載荷で急激な耐力低下が生じ実験を終了しているため、20回目の曲げ耐力は示していない。このことは、鉄骨比が小さい断面($sp=2.7\%$)を $n=0.60$ のような高軸力下で使用すべきでないことを示唆している。また、図7中△、▲で示した試験体は耐力低下が他の試験体に比べて小さいことから、20回の繰返し水平力を与えた後に再び同数回の水平力を受けても抵抗モーメントの低下が抑えられることがわかる。

以上より、多数回繰返し水平力を受ける本柱材の最大曲げ耐力は M_{pc1} で、20回目の曲げ耐力はコンクリートが繰返し水平力によって損傷を受けることを考慮し、コンクリート強度の低減係数 γ_U を用いた M_{pc2} で概ね評価できる。

4. 安定限界軸力比

図9に実験結果より各除荷点における軸縮みの増分値 $\Delta\delta$ (mm)について検討した結果の一例を示す。繰返しに伴う増分値は $L60-0.65^*$ 、 $S60-0.60^*$ を除いて極めて僅かなものであり、その値は繰返し回数を増すごとに収束へ向かう傾向にある。増分値 $\Delta\delta=0.05\text{mm}$ 以下になると、図7の δ_v はほぼ横ばいになっていることがわかる。よって、増

分値自体が極めて微小であることと、増分が回数を重ねるごとに減少傾向にあることを考慮して、増分値が 0.05mm 以下になった時点で0とみなし歪の進行は収束したものと考えた。

中心軸歪が発散しない限り、急激な曲げ耐力の低下につながらないことは過去の研究^{6)~9)}からも明らかとなっているため、安定限界軸力比を定義するに従って、中心軸歪の進行が重要な要素であると考えられる。本柱材はコンクリートの拘束力に優れているため、コンクリートが圧壊歪に達した後も軸歪が収束することがあると考えられる(例えば、図9中の $L30-0.70^*$ や $S60-0.55$ 、 $L30-0.45$ IIの増分値は減少傾向にあり、繰返し回数を増やすと収束したとみなせる可能性がある。また、5章で述べる弾塑性解析を行うと、中心軸歪がコンクリートの圧壊歪を超えて収束する軸力が存在することを確認している)。しかしながら、軸歪がコンクリートの圧壊歪を超えて収束する場合、そのときの軸歪量が過度に大きくなる可能性があること及び、平石らの研究⁷⁾によると大きな地震力を受けた柱材の軸歪が一度コンクリートの圧壊歪を超えると、再度中小規模の地震力を受けた場合でも柱材が脆性的な挙動を示す危険性があることが報告されている。そこで本柱材の安定限界軸力比の定義として、収束する軸歪 ϵ_v が十字鉄骨で拘束されたコンクリートの圧壊歪 ϵ_{c0} を超えていなければコンクリートが耐力低下域に入らず、軸力を保持でききような急激な耐力低下につながることはないものとして、このときの最大の軸力を安定限界軸力とした。ここで、十字鉄骨で拘束されたコンクリートの圧壊歪を基準としたのは、十字鉄骨外の鋼管で拘束されたコンクリートが圧壊歪に達しても、往々にして圧縮応力を受ける十字鉄骨内側のコンクリートが健全であれば軸力を保持でき、本柱材が安定した挙動を示したためである。

表4に増分値 $\Delta\delta$ が 0.05mm 以下となるCycle数とそのときの収束軸縮み量 δ_v を示す。図9よりLシリーズの試験体は軸力比 $n=0.55$ 以下で、Sシリーズは $n=0.50$ 以下で増分値 $\Delta\delta=0.05\text{mm}$ 以下となるときの軸変形 δ_v は圧壊軸縮み δ_{c0} を超えていないため、安定であると判断した。一方で、 $L30-0.70^*$ 及び $S60-0.55$ では増分値は減少傾向にあるものの、 $\Delta\delta=0.05\text{mm}$ 以下となることはなく、また $L60-0.65^*$ と $S60-0.60^*$ 、 $L30-0.45$ IIでは増分値が増加傾向にあり、収束していない。よって、これらの試験体は不安定と判断した。

以上より、本論の定義に基づいた変位振幅 $R=1.0\%$ での各条件下における安定限界軸力比は、L30、L60シリーズは共に $n=0.55$ 程度、S60シリーズは $n=0.45$ 程度であった。また、表4中に現行のSRC規準⁹⁾に規定されている制限軸力(コンクリートの圧縮耐力の1/3と鉄骨の圧縮耐力の2/3の和)を柱材の断面耐力で除した値を示している。L30、L60、S60の三条件とも安定限界軸力比は制限軸力を超えていること

図8 実験曲げ耐力と一般化累加強度

図9 繰返しによる軸縮みの増分

表4 安定限界軸力比

試験体名	軸力比	$\Delta\delta=0.05\text{mm}$ となる Cycle数(回)	収束軸縮み $\delta_v(\text{mm})$	圧縮軸縮み $\delta_{co}(\text{mm})$	判定	SRC標準の 制限軸力比
L30-0.45	0.45	4	-0.86	-3.09	安定	0.50
L30-0.55	0.55	9	-2.01	-3.12	安定	
L30-0.70*	0.70	無	無	-3.15	不安定	
L60-0.40	0.40	4	-0.87	-2.70	安定	0.45
L60-0.50*	0.50	8	-1.60	-2.73	安定	
L60-0.55	0.55	10	-1.67	-2.75	安定	
L60-0.65*	0.65	無	無	-2.78	不安定	0.38
S60-0.40	0.40	4	-0.89	-2.65	安定	
S60-0.45	0.45	5	-0.95	-2.66	安定	
S60-0.50*	0.50	3	-1.54	-2.68	安定	0.47
S60-0.55	0.55	無	無	-2.70	不安定	
S60-0.60*	0.60	無	無	-2.72	不安定	
L30-0.45 II	0.45	無	無	-2.86	不安定	0.47
L30-0.65 II *	0.65	無	無	-2.92	不安定	

網掛けは各シリーズの安定限界軸力比を示す

から、SC 柱材の安定限界軸力はSRC 標準の制限軸力によって評価可能である。なお、変位振幅 $R=2.0\%$ は評価できていないため、振幅の違いを考慮した安定限界軸力を定量的に検討した評価式については、今後弾塑性解析を行った上で、別途報告する予定である。

5. 弾塑性解析

5.1 解析モデル

SC 柱材の弾塑性解析を行うため、解析モデルを図10(a)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 ϕ 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 α 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¹⁴⁾。なお、式(2)、(3)を用いることで、断面曲率と部材角の関係においてせん断スパン比の違いによる影響を考慮している。また、文献2)や14)において、せん断スパン比2～6、軸力比0～0.6の範囲で部材角4.0%までの繰返し载荷した実験結果を、本仮定のもとで求めた解析結果で追跡できることを明らかにしている。

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

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

ここで、 D ：断面せいである。

5.2 鉄骨の応力-歪関係

鋼材の応力-歪関係は図11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 $E=2.05 \times 10^5 (\text{N/mm}^2)$ を勾配とした線形関係で、降伏後はヤング係数 E の1/100の勾配を持たせるバイリニア型モデルとした。繰返しに伴う除荷後の挙動は、バウシinger部の構成則に加藤らの双曲線のモデル¹⁵⁾を用い、バウシinger部の終点の歪は山田らの提案式¹⁶⁾を用いた。ここで、図中の $\Delta\epsilon_{sk}$ ：鋼材の塑性歪の増分、 $\Delta\epsilon_{bs}$ ：鋼材のバウシinger部における塑性歪の増分である。

5.3 コンクリートの応力-歪関係

コンクリートの応力-歪関係は崎野孫モデル¹³⁾を使用した。ただし、コンクリートの構成則はSC 柱材の中心圧縮実験から得られた成果を元に、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を考慮し、十字鉄骨の内側と外側に分割して求めている。なお、繰返し時は渡辺らのモデル¹⁷⁾を用いた(図12参照)。材料の応力-歪関係についての詳細は文献3)を参照されたい。

本実験では60N/mm²級の高強度コンクリート及び鉄骨比2.7%の小さな十字鉄骨を内蔵している。そこで、文献3)で示した解析手法が適用可能であるかを検証するために中心圧縮実験を行い、上述した条件下におけるSC 断面のコンクリートの構成則について検討した。

試験体は表1で示したL60とS60シリーズの各一体ずつで、実験時のコンクリート強度は53.7N/mm²、材長は600mmである。载荷装置を図13に示す。文献3)と同様に、载荷方法は鋼管及び内蔵鉄骨に圧縮力を負担させないようにしてコンクリートのみを圧縮した。圧縮力は5000kN 万能試験機で载荷し、軸変形は加圧板間の全体変形600mmを4箇所に設置した変位計で測定した。

実験結果と解析結果の比較を図14に示す。L60は文献3)で示した解析手法とよく対応している。鉄骨の負担軸力を降伏後は一定として全体荷重からコンクリートの負担軸力を算出しているが、変位4mm以降での耐力上昇は鉄骨の歪硬化によるものだと考えられる。一方で、S60は危険側の評価となっている。この理由として、S60は内蔵十字鉄骨比が2.7%と小さいことから、十字鉄骨外の鋼管で拘束されたコンクリートは鉄骨ウェブによる効果を受けられず、鋼管のみで拘束された状態にあると考えることができる(図15参照)。そこで、十字鉄骨外側のコンクリートを鋼管のみによる拘束で、十字鉄骨内側のコンクリートは文献3)で示した拘束効果を考慮して解析を行うと精度よく評価した。よって、S60シリーズの弾塑性解析では上述した構成則に従い解析を行う。

5.4 実験挙動と解析結果の比較

図16、図17及び表5に実験挙動と解析結果の比較を示す。解析では断面の中心軸歪 ϵ_0 を計算しているが、式(2)で考えた αL は図10(b)に示すように変形域長さと捉えることもできると考えられるので、その値を用いて変形域と弾性域(図10(b)参照)の変形を考慮して式(4)

により軸縮み δ_v に変換している。なお、軸方向変形については図10(b)に示すモデルを考え、図10(b)中の弾性域は軸方向に対して弾性であり、変形域は ε_0 が材長方向に一様に分布すると考えた領域である。また、再載荷した試験体の解析は実験条件と同様に20回の繰返し水平力を載荷した後、一度軸力を抜いて所定の軸力を載荷して再び繰返し水平力を与える解析を行った。ここで、残留変形点は変位振幅 $R=1.0\%$ の試験体では残留部材角が0%に近かったことを考慮して、解析では部材角0%から再載荷を行った。 $R=2.0\%$ の試験体は水平力0kNから再載荷を行っている。

$$\delta_v = 2 \left(\alpha L \varepsilon_0 + \frac{N(L - \alpha L)}{E_s A + E_c A} \right) \quad (4)$$

$$E = 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{24} \right)^2 \times \left(\frac{c \sigma_B}{60} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (5)$$

図10 弾塑性解析

図11 鋼材の応力-歪関係

図12 コンクリートの繰返し則

図13 荷重装置

(a) L60 シリーズ

(b) S60 シリーズ

図14 中心圧縮実験結果と解析結果の比較

図15 十字鉄骨外の鋼管で拘束されたコンクリートの拘束効果

表5 実験結果と解析結果の比較

試験体名	実験結果					解析結果					実験結果/解析結果				
	exQ _{max} (kN)	exQ ₂₀ (kN)	exK _{0.2} (kN)	exK _{0.5} (kN)	exδ _{v20} (mm)	anQ _{max} (kN)	anQ ₂₀ (kN)	anK _{0.2} (kN)	anK _{0.5} (kN)	anδ _{v20} (mm)	exQ _{max} / anQ _{max}	exQ ₂₀ / anQ ₂₀	exK _{0.2} / anK _{0.2}	exK _{0.5} / anK _{0.5}	exδ _{v20} / anδ _{v20}
L30-0.45	178.6	150.0	35759	24407	-1.11	144.6	141.4	32101	21718	-0.84	1.24	1.06	1.11	1.12	1.31
L30-0.55	175.2	152.1	38186	23758	-2.39	145.0	140.4	32603	21200	-2.02	1.21	1.08	1.17	1.12	1.18
L30-0.70*	162.0	151.6	18355	16497	-4.86	126.7	無	16547	17466	無	1.28	無	1.11	0.94	無
L60-0.40	213.7	174.0	51968	33699	-1.13	196.2	189.8	45813	30433	-0.65	1.09	0.92	1.13	1.11	1.73
L60-0.50*	183.3	171.2	21650	19428	-2.04	194.3	190.7	23094	20947	-1.28	0.94	0.90	0.94	0.93	1.59
L60-0.55	223.6	196.1	52927	28097	-2.00	191.5	179.8	46427	29731	-2.33	1.17	1.09	1.14	0.95	0.86
L60-0.65*	181.1	168.2	20408	18216	-7.28	174.2	無	23768	26034	無	1.04	無	0.86	0.70	無
S60-0.40	170.3	134.0	42109	25868	-1.15	129.9	126.7	38074	22853	-0.56	1.31	1.06	1.11	1.13	2.04
S60-0.45	159.8	131.5	42822	26811	-1.31	126.3	122.3	37395	22620	-0.81	1.27	1.08	1.15	1.19	1.61
S60-0.50*	137.6	128.0	20896	16642	-2.09	128.6	121.7	27000	18426	-1.28	1.07	1.05	0.77	0.90	1.64
S60-0.55	183.8	127.3	42062	28643	-3.19	121.9	101.9	36956	22766	-4.92	1.51	1.25	1.14	1.26	0.65
S60-0.60*	158.6	無	24543	20786	無	119.4	無	30981	21281	無	1.33	無	0.79	0.98	無
L30-0.45 II	205.1	166.2	42094	27420	-5.93	165.0	161.7	38698	25923	-6.66	1.24	1.03	1.09	1.06	0.89
L30-0.65 II *	174.3	無	13030	11621	無	148.8	無	13699	12191	無	1.17	無	0.95	0.95	無

Q_{max} : 最大水平耐力, Q₂₀ : 20回目の水平耐力, K_{0.2} : R=0.2%時の割線剛性, K_{0.5} : R=0.5%時の割線剛性, δ_{v20} : 20回目の軸縮み, ex : 実験結果, an : 解析結果

図 16.1 水平力 Q - 部材角 R 関係の比較 (振幅 $R=1.0\%$, つづく)

* は再載荷した試験体を示す

図 17.1 軸縮み δ_v - Cycle 関係 (振幅 $R=1.0\%$, つづく)

* は再載荷した試験体を示す

図 16.2 水平力 Q - 部材角 R 関係の比較 (振幅 $R=2.0\%$, つづき)

図 17.2 軸縮み δ_v - Cycle 関係の比較 (振幅 $R=2.0\%$, つづき)

る。加えて、再載荷した試験体 ((e)L60-0.50* 及び (j)S50-0.50*) では実験値の方が軸縮み量が大きくなったが、これは初期歪に違いが見られることが原因である。一方で、圧壊歪を超えるような試験体では解析値の方が大きな値となっている。(l)S60-0.55 や (m)L30-0.45 II のように圧壊歪を超えるような軸力比では軸縮みが実験値を安全側に評価することを考慮すると、安定限界軸力比を本解析手法で評価することは可能であるものと考えられる。また、振幅 $R=2.0\%$ の試験体では安定限界軸力比を見つけ出すことはできなかったが、(m)L30-0.45 II の実験と解析の軸縮みの進行の比較を見ると精度よく追跡できていることが分かる。総じて、最大水平耐力は過大評価となる傾向が見られたが、20 回目の水平耐力の平均値は 1.05 と良好である。また、軸縮みの進行も概ね追跡できていることから本解析手法の精度は最大耐力や再載荷後の初期歪の整合性といった検討の余地もあるが、概ね良好である。

6. 結論

薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の安定限界軸力について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 軸力比を変化させて実験を行ったところ、中心軸歪の進行がなくなり、ほぼ一定値に収束する軸力が存在する。
- 2) 実験結果の考察より、収束する中心軸歪が十字鉄骨内側のコンクリートの圧壊歪を超えていなければ安定であるとし、このときの最大軸力を安定限界軸力と定義した。
- 3) 部材角 $R=1.0\%$ 及び 2.0% の変形における安定限界軸力の曲げ耐力について、最大曲げ耐力は材料強度を用いて計算した M_{pci} で、定変位振幅で多数回繰返し水平力を受ける過酷な条件下でも曲げ耐力はコンクリートの低減係数 γ_U を用いて計算した M_{pc2} を確保できる。
- 4) 本論で定義した安定限界軸力によると、鉄骨比が大きい断面でコンクリート強度 $\sigma_b=30\text{N/mm}^2$, 60N/mm^2 を使用した場合、安定限界軸力比は双方とも $n=0.55$ 程度であり、鉄骨比の小さい断面では

$n=0.50$ 程度であった。また、 $R=1.0\%$ で SC 柱材の安定限界軸力は SRC 規準で規定されている制限軸力で評価できることを示した。

- 5) 変位振幅 $R=2.0\%$ の実験では安定限界軸力を見つけることはできなかったが、実験挙動の軸縮みの進行を解析結果で精度よく評価できていることから、今後弾塑性解析を行うことで変位振幅の違いが柱材の安定限界軸力に及ぼす影響を定量的に検討する。
- 6) 本論で提案した解析手法は、実験結果における繰返しに伴う軸縮みの進行を精度よく追跡できている。

謝辞

本研究に関して、九州大学河野昭彦教授並びに北九州市立大学津田恵吾教授に貴重なご助言を頂いた。載荷実験実施にあたり研究当時福岡大学堺研究室の山本洋平氏（現竹中工務店）にご協力頂いた。また、平成 21 ～ 23 年度科学研究費補助金（基礎研究 (c)、研究代表者：堺純一）の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 堺純一，河本 裕行，松原佳毅：横補強鋼管を用いた鋼コンクリート合成柱材の弾塑性変形状に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.53，pp.383-388，2007.3
- 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，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
- 4) 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構造性能及び安定限界軸力に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No. 2，pp.1129-1134，2011.7
- 5) 倉富洋，堺純一，田中照久，河本裕行：鋼コンクリート合成柱材の安定限界軸力に関する実験的研究，日本建築学会九州支部研究報告，第 51 号，pp.725-728，2012.3
- 6) 崎野健治，田福勝，孫玉平，大庭央久：RC 柱の安定限界軸力比に及ぼす横補強の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.3，pp.499-504，1998
- 7) 平石久廣，稲井栄一，葉研地彰：繰返し載荷を受ける鉄筋コンクリート造柱の限界変形，日本建築学会構造系論文集，Vol.454，pp.127-138，1993.12
- 8) 松井千秋，江冠華，夏木美智子：SRC 柱材の安定限界軸力に関する実験的研究，日本建築学会九州支部研究報告，第 32 号，pp.225-228，1991.3
- 9) 松井千秋，津田恵吾，江冠華：繰返し曲げを受ける SRC 柱材の安定限界軸力に関する解析的研究，コンクリート工学論文集，第 3 巻 1 号，pp.45-55，1992.1
- 10) 土井希祐，片寄哲彦：変動軸力を受ける SRC 柱部材の静加力実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 III，pp.1089-1090，2000.9
- 11) 爰河知紀，寺井雅和，南宏一：変動軸力を受ける実大 SPRC 柱の弾塑性挙動に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系 (C-2)，pp.331-332，2002.8
- 12) 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
- 13) 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，Vol.461，pp.95-104，1994.7
- 14) 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
- 15) 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，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.937-938，1973.10
- 16) 山田哲，今枝知子，岡田健：パウンダー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
- 17) 鎌田圭次郎，大住和正，渡辺史夫，六車照：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，構造 II B，pp.505-506，1991.9

(2012 年 4 月 9 日原稿受理，2013 年 1 月 10 日採用決定)