

# 論文 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関する実験的研究

倉富 洋\*1・堺 純一\*2・田中 照久\*3・河本 裕行\*4

**要旨:**鉄骨鉄筋コンクリート断面から主筋とせん断補強筋を除き,薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材に,一定軸力下で多数回繰返し水平力を与え,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実験的に検討した。実験では柱材に定変位振幅で20回の繰返し水平力を与え,耐力低下もなく軸歪がほぼ一定値に収束する安定限界軸力が存在することを示した。実験結果を考察したところ,収束するときの軸歪が十字鉄骨内側のコンクリートの圧壊歪を越えなければ,軸力を負担できないような急激な耐力低下につながることはないものとし,このときの最大の軸力を安定限界軸力と定義した。

**キーワード:** 鋼・コンクリート合成柱, 横補強鋼管, 拘束効果, 高強度コンクリート, 安定限界軸力

## 1. 序

著者らは,鉄骨鉄筋コンクリート(以下SRCと略記)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(以下SCと略記)合成柱材の構造性能を評価するため,弾塑性変形性状について実験的及び解析的に研究を行っている<sup>1),2)</sup>。本柱材の特徴として,コンクリートを薄肉鋼管と十字鉄骨で横補強するため,拘束効果によって耐力及び変形性能が向上することから,高軸力下でも優れた耐震性能を示すことが挙げられる。更にこの拘束効果により高強度コンクリート特有の最大耐力発揮後の耐力低下域における急激な耐力低下を抑えられることから,高強度コンクリートの使用が容易になると考えられる。

脆性材料であるコンクリートを高軸力下で使用するならば,靱性低下には十分に留意しなければならない。著者らは本柱材が十分な変形性能を保持できる最大の軸力

を安定限界軸力と称し,解析的に検討した<sup>3)</sup>。本論文では文献3)を再考し,曲げ耐力の低下条件のみならず軸歪の累積にも着目した安定限界軸力の存在について実験的に究明し,その評価方法について検討することを目的とする。また,高軸力下での高強度コンクリートを用いたSC柱材の挙動を調べるため,60N/mm<sup>2</sup>級のコンクリートを使用した安定限界軸力についても考察する。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体を図-1に示す。柱断面は200x200(mm)でせん断スパン比2である。試験体を横拘束した薄肉鋼管には柱頭と柱脚部に10mmの隙間を設け,軸力と曲げモーメントを負担しないようにしている。

試験体一覧を表-1に示す。実験変数には,コンクリート強度の違いが安定限界軸力に及ぼす影響を調べるた

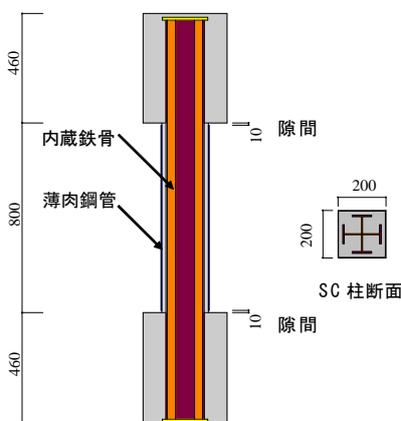


図-1 SC柱試験体

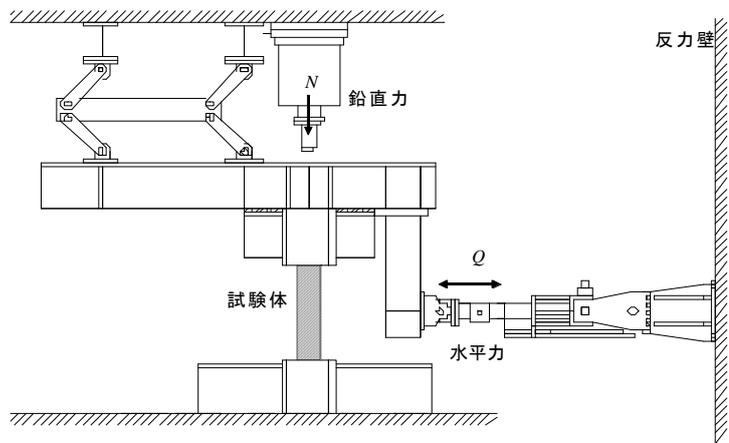


図-2 荷重装置

\*1 福岡大学 大学院工学研究科博士後期課程・工修 (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 工学部建築学科助手 (正会員)  
 \*4 福岡建設専門学校 講師・工修 (正会員)

表-1 試験体一覧

試験体名	シリンダー強度 $\sigma_{cB}$ (N/mm <sup>2</sup> )	軸力比 $n$	載荷軸力 $N$ (kN)	内蔵十字鉄骨	薄肉鋼管		備考
					板厚(mm)	幅厚比	
CH-30-0.45	27.9	0.45	909	CH-160x80x4.5x6	2.3	87	
CH-30-0.55	29.3	0.55	1137				
CH-30-0.70	27.9	0.70	1412				CH-30-0.45の実験終了後、再び載荷
CH-60-0.40	54.2	0.40	1156				
CH-60-0.50	54.8	0.50	1456				
CH-60-0.50(2)	54.2	0.50	1444				CH-60-0.40の実験終了後、再び載荷
CH-60-0.55	54.8	0.55	1590				
CH-60-0.65	54.2	0.65	1872				CH-60-0.50(2)の実験終了後、再び載荷

表-2 鋼材の機械的性質

部材名	$t$ (mm)	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{lmg.}$ (%)	$Y.R.$
薄肉鋼管	2.3	335	485	$2.01 \times 10^5$	33.7	0.69
十字鉄骨	4.5	322	452	$2.02 \times 10^5$	32.4	0.71
	6	349	473	$2.00 \times 10^5$	37.1	0.74

$t$ : 板厚  $\sigma_y$ : 降伏点  $\sigma_u$ : 引張強さ  $E$ : ヤング係数  $E_{lmg.}$ : 伸び率  $Y.R.$ : 降伏比

め、軸力比 $n (=N/N_{sc})$ 、 $N$ : 作用軸力、 $N_{sc}$ : SC柱断面の圧縮耐力、 $N_{sc} = A_c \cdot \sigma_{cB} + A_s \cdot \sigma_y$ 、 $A_c$ : コンクリート断面積、 $\sigma_{cB}$ : コンクリート圧縮強度、 $A_s$ : 鉄骨断面積、 $\sigma_y$ : 鉄骨降伏点)とコンクリート強度をとった。既往の研究から、鋼管及び十字鉄骨で拘束されたコンクリートは無拘束状態に比べて耐力低下が抑えられることが分かっている<sup>2)</sup>。高強度コンクリートの使用が容易になるという本柱材の特徴を考慮し、普通コンクリートとの挙動を比較するため、60N/mm<sup>2</sup>級の高強度コンクリートを実験変数に選んだ。

内蔵鉄骨はSS400材で、ウェブに4.5mm厚、フランジに6mm厚の鋼板より切り出した鋼片を溶接して十字形鋼を製作している。また、薄肉鋼管は2.3mm厚のSS400材を使用し、断面の4隅を溶接することにより製作した。表-2に鋼材の機械的性質を示す。なお、コンクリートは最大骨材径13mmで、縦打ちで打設した。

## 2.2 載荷方法

載荷装置を図-2に示す。載荷は、2000kNの鉛直ジャッキによって所定の軸力を載荷した後、500kNの水平力載荷装置で正負交番繰返し水平力を載荷した。載荷形式は、文献4)、5)を基に部材角 $R=1.0\%$ 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CH-

30-0.70及びCH-60-0.50(2)は、それぞれCH-30-0.45、CH-60-0.40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。CH-60-0.65については、CH-60-0.50(2)の実験終了後に同様の手順で所定の軸力を載荷し、再び実験を行った。

測定は、歪ゲージを加力方向の強軸側鉄骨フランジ及び、鋼管の上下に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中心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。

## 3 実験結果と考察

### 3.1 荷重-変形関係

実験で得られた各試験体の水平力 $Q$ -部材角 $R$ 関係を図-3に、実験結果を表-3にそれぞれ示す。図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にて $M_{pc1}$ と表記)を發揮するとして(1)式で求めた塑性崩壊機構直線である。

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

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						
CH-30-0.45	75.1	-72.3	63.6	-61.8	62.7	56.5	1.18	1.30	1.00	1.11
CH-30-0.55	74.6	-84.9	65.4	-69.2	59.6	51.5	1.34	1.55	1.13	1.31
CH-30-0.70	70.5	-69.8	66.3	-67.5	46.5	34.5	1.51	2.03	1.44	1.94
CH-60-0.40	90.1	-97.5	74.2	-77.6	87.0	77.2	1.08	1.22	0.87	0.98
CH-60-0.50	95.9	-98.7	79.7	-78.8	84.9	72.0	1.15	1.35	0.93	1.10
CH-60-0.50(2)	79.1	-85.1	74.3	-76.5	84.3	71.6	0.97	1.15	0.89	1.05
CH-60-0.55	95.8	-100.7	85.0	-80.9	81.8	67.2	1.20	1.46	1.01	1.23
CH-60-0.65	79.9	-84.9	74.8	-80.6	72.2	53.4	1.14	1.54	1.08	1.45

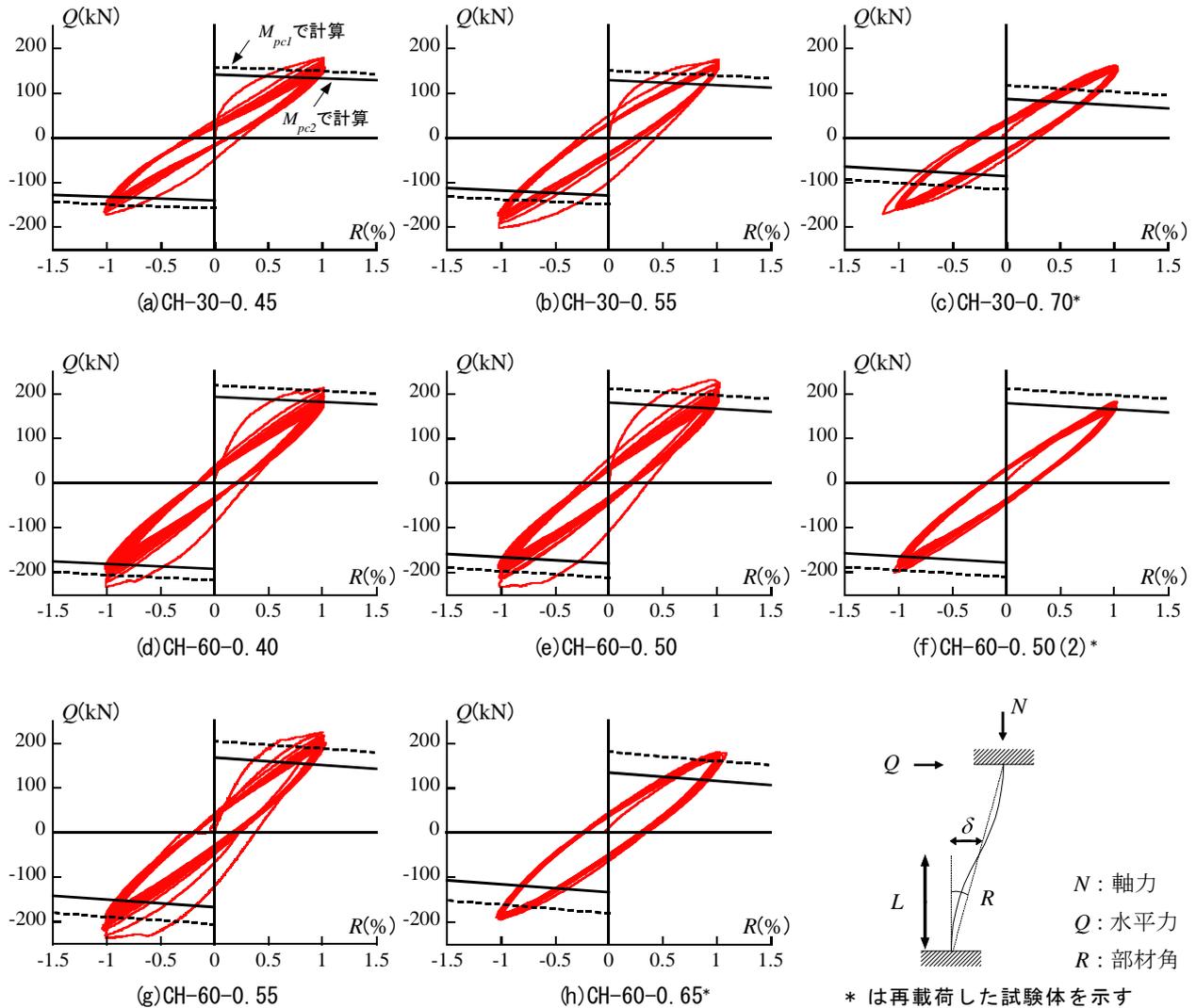


図-3 水平力 $Q$ -部材角 $R$ 関係

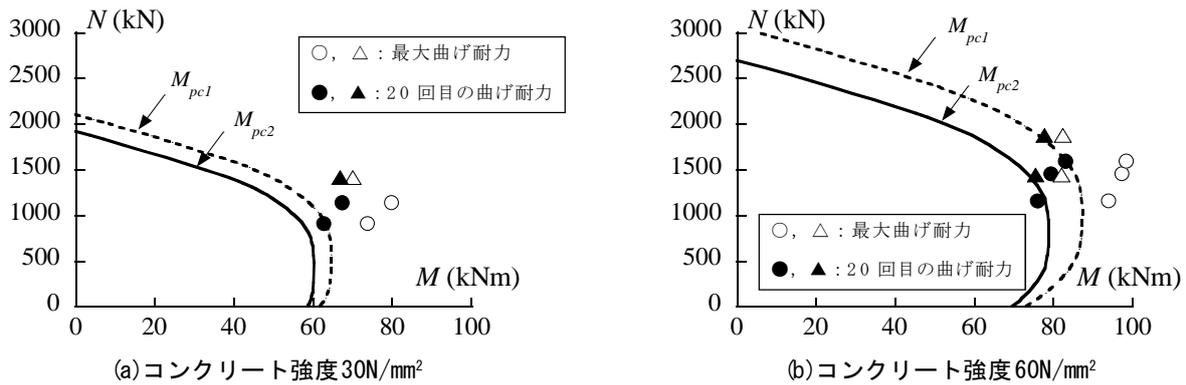


図-4 実験曲げ耐力と一般化累加強度

ここで、 $L$ :スタブから反曲点までの距離、 $N$ :柱軸力、 $\delta$ :反曲点での水平変位である。また、同図中の実線はSRC規準<sup>6)</sup>によるコンクリート低減係数 $\gamma_U$ を用いて計算した一般化累加強度(表-3にて $M_{pc2}$ と表記)を示す。

全試験体において、繰返しに伴う耐力低下はみられるものの、急激な耐力低下を起すことなく荷重を終了した。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ものの、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。

図-3中の(f)CH-60-0.50(2)を除いて、最大耐力は $M_{pc1}$ で求めた計算耐力を発揮しているが、部材角 $R=1.0\%$ 程度の変形で鉄骨が全塑性状態に達したとは考えにくい。全塑性モーメント $M_{pc1}$ を求める際にはシリンダー強度 $\sigma_B$ を使用しているが、十字鉄骨及び薄肉鋼管によるコンク

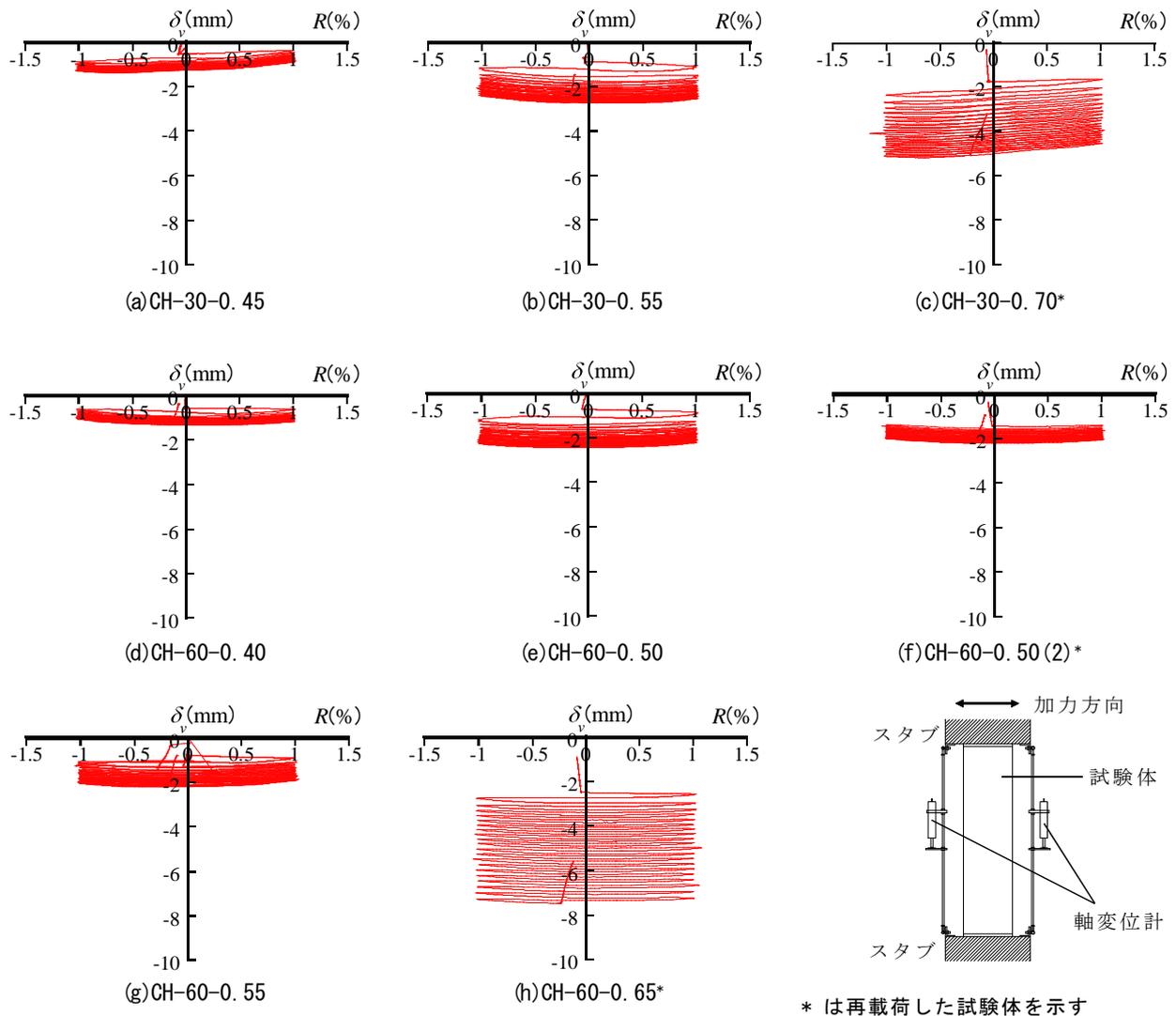


図-5 軸縮み  $\delta_v$ -部材角  $R$ 関係

リートの拘束効果によってコンクリートの最大強度が上昇したためだと考えられる。(h)CH-60-0.65は $n=0.40, 0.50$ を各20回繰返し荷重を与えた後に $n=0.65$ の高軸力下で再度実験を行い、計60回の繰返し水平力を与えたにもかかわらず、軸力を保持し安定した履歴性状を示した。また、(h)CH-60-0.65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。表-3より、軸力が大きくなるほど計算耐力に対する実験耐力の割合が増しているが、これは柱断面の圧縮領域が大きくなることでコンクリートが圧縮力を負担し、コンクリートの拘束効果により柱材の曲げ抵抗力が増加するためだと考えられる。

図-4に軸力 $N$ -曲げモーメント $M$ 関連曲線を示す。図中○は実験の材端の $P\Delta$ 効果を考慮した最大曲げ耐力の正負平均、●は荷重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 $M_{pc1}$ を發揮し、20回繰返し水平力を与え

た後も $M_{pc2}$ を超えていることが分かる。コンクリート強度 $30\text{N/mm}^2$ は応力歪関係においてコンクリートの耐力低下がかなり緩やかになるので、柱の曲げ耐力は20回荷重後でも $M_{pc1}$ を上回っている。一方で $60\text{N/mm}^2$ の試験体では耐力低下は $30\text{N/mm}^2$ の試験体に比較して大きい、ほとんどの試験体で $M_{pc2}$ を下回ることにはなかった。また、図-4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。

このことから、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 $\gamma_U$ を用いた $M_{pc2}$ で概ね評価できる。

### 3.2 軸縮み-部材角関係

各試験体の軸縮み $\delta_v$ -部材角 $R$ 関係を図-5に示す。コンクリート強度の違いに拘らず、軸力比が大きくなるほ

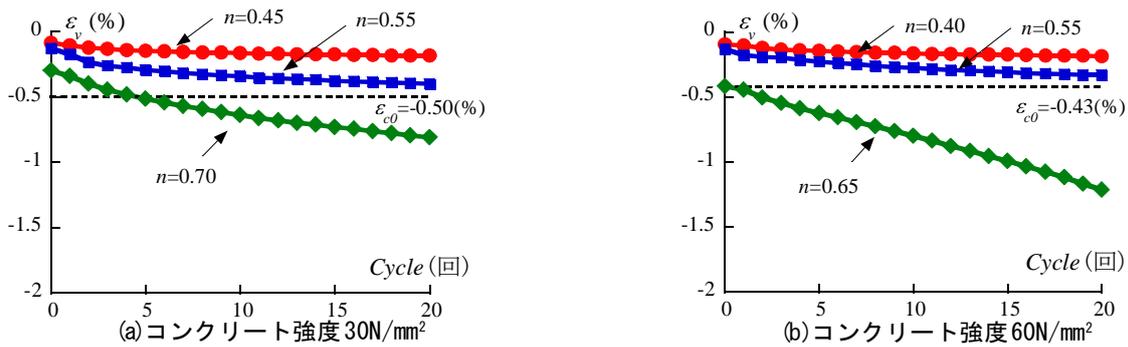


図-6 各除荷点における軸歪  $\varepsilon_v$ -Cycle関係

ど軸縮みが大きくなっていることがわかる。また、定変位振幅で多数回繰返し水平力を与えると最初の2,3回までは軸縮みが大きく出るが、その後は緩やかに軸縮みが進行する特徴を持つ。(b)CH-30-0.55と(g)CH-60-0.55を比較すると、高強度コンクリートを使用しても軸縮みは普通強度コンクリート使用時と同程度となっていることがわかる。(h)CH-60-0.65は軸縮みが7mm程度まで進行した。本試験体は軸力比は異なるが60回の繰返し水平力を載荷した状態でも荷重変形関係が紡錘形の履歴ループを示し、軸力保持不能に至る急激な歪の発散は見られていない(図-3(g)及び、図-5(g)参照)。

### 3.3 中心軸歪-繰返し回数関係

各除荷点の軸歪 $\varepsilon_v$ -繰返し回数Cycle関係を図-6に示す。なお、軸変形量から歪への変換は柱材の変形区域を考慮して(2)、(3)式にて算定した。 $\alpha$ 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>2)</sup>。

$$\varepsilon_v = \frac{\delta_v}{\alpha L} \quad (2)$$

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

ここで、 $D$ :断面せいである。コンクリート強度 $\sigma_B=30\text{N/mm}^2$ 級では軸力比 $n=0.45$ 、 $\sigma_B=60\text{N/mm}^2$ 級では軸力比 $n=0.40$ での軸歪の増分は極めて僅かなものになった。図-6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 $\varepsilon_{c0}$ を示す。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2)より算出し、この値を用いて $\varepsilon_{c0}$ を崎野孫式<sup>4)</sup>から求めている。コンクリート強度 $\sigma_B=30\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_B=60\text{N/mm}^2$ 双方とも軸力比 $n=0.55$ では軸歪は徐々に増加しているが、20回の繰返し水平力を与えた時点ではまだ圧壊歪に達していないことがわかる。一方で軸力比 $n=0.65$ や $n=0.70$ といった極めて大きな軸力下では軸歪は徐々に進行していったが、軸力を保持できないような急激な歪の発散はなかった。

通常、鉄筋コンクリート構造やSRC構造の柱に軸力比 $n=0.5$ を超えるような高軸力下で水平力を与えると、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4)、5)。しかしながら本柱材は、コンクリー

トを薄肉鋼管と内蔵十字鉄骨により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であるため、上述した高軸力でも曲げ耐力を保持できるものと考えられる。

## 4 安低限界軸力比

実験結果より軸歪の増分値 $\Delta\varepsilon$ (%)について検討したところ、繰返しに伴う増分値は(f)CH-60-0.65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ことが分かった(図-7参照)。増分値が0.01(%)以下になると、図-6の $\varepsilon_v$ 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0.01(%)以下になった時点で歪の進行は収束したとみなせるものと考えた。

表-4に増分値 $\Delta\varepsilon$ (%)が0.01(%)となるCycle数とそのときの中心軸歪を示す。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<sup>4)</sup>からも明らかとなっているため、安定限界軸力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。よって、安定限界軸力を判定する上で、曲げ耐力の低下ではなく歪の進行度合いによって安定不安定を判断する。そこで安定限界軸力の定義として、収束する歪 $\varepsilon_v$ が十字鉄骨で拘束されたコンクリートの圧壊歪 $\varepsilon_{c0}$ 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、軸力を保持できない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する。

図-7より軸力比 $n=0.55$ 以下の試験体は20回目の歪の増分値 $\Delta\varepsilon$ (%)が0.002(%)程度と極めて微小な増分となっていることがわかる。これらの試験体は、増分値 $\Delta\varepsilon$ (%)=0.01となるときの軸歪 $\varepsilon_v$ は圧壊歪 $\varepsilon_{c0}$ を超えていないため、安定であると判断した。なお、CH-30-0.45の試験体は30回繰返し水平力を与えており、30回目での軸歪の増分値は0.001(%)未満となりほぼ0に近い増分であることを確認している。一方で、CH-30-0.70では増分値は減少傾向にあるものの、増分値が0.01(%)に達することな

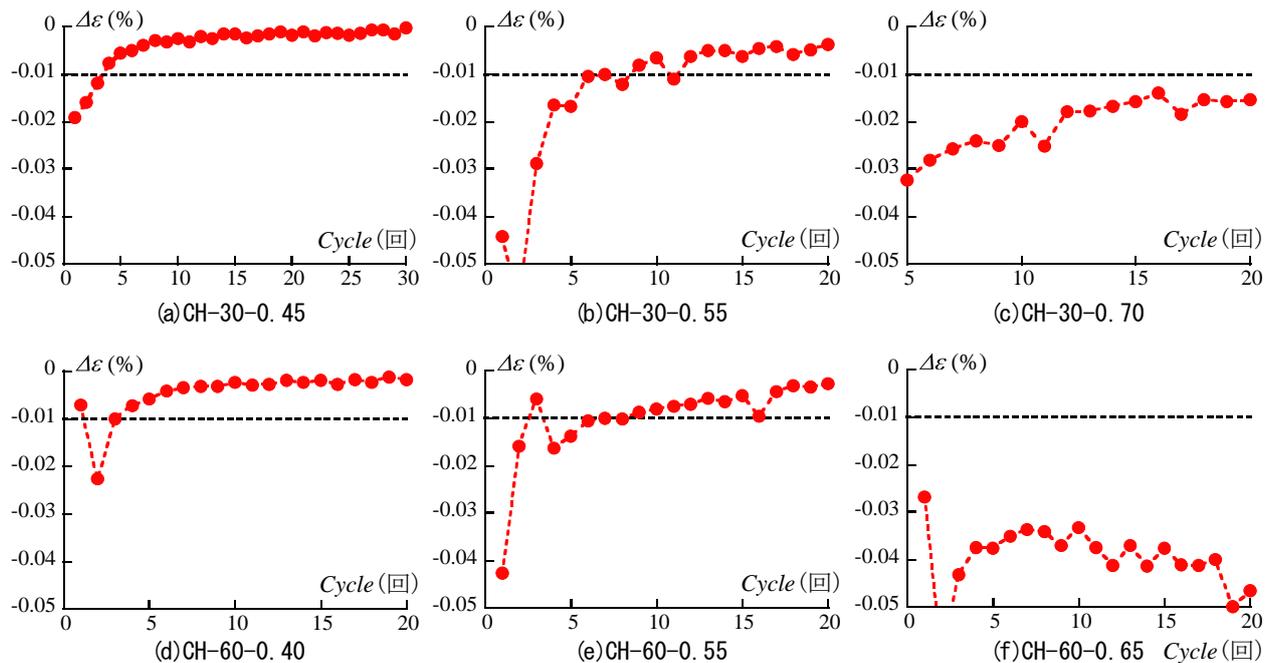


図-7 中心軸歪の増分値 - Cycle関係

く、軸歪 $\varepsilon_v$ も圧壊歪 $\varepsilon_{c0}$ を大きく上回った。またCH-60-0.65では、増分値は増加傾向にあり、圧壊歪 $\varepsilon_{c0}$ を超えると高強度コンクリート特有の靱性低下により歪の進行が大きくなるものと考えられる。以上より、CH-30-0.70、CH-60-0.65の試験体は不安定と判断した。

## 5. 結論

鋼・コンクリート合成柱材に一定軸力と繰り返し水平力を載荷する実験を行い、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、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ことを明らかとした。
- 2) 実験結果の考察より、収束する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) 本論で定義した安定限界軸力によると、コンクリート強度 $\sigma_B=30\text{N/mm}^2$ 、 $60\text{N/mm}^2$ を使用した場合、安定限界軸力比は双方とも $n=0.55$ であった。
- 4) 部材角 $R=1.0\%$ の変形における安定限界軸力の曲げ耐力について、最大耐力は材料強度を用いて計算した $M_{pc1}$ で、収束するときの曲げ耐力はコンクリートの低減係数 $\gamma_U$ を用いて計算した $M_{pc2}$ で概ね評価できる。

## 謝辞

試験体製作及び載荷実験にあたり、福岡大学工学部建築学科技師の平國久雄氏及び山本洋平氏をはじめとする平成23年度福岡大学堺研究室の大学院生及び卒業生にお世話になった。ここに記して、感謝の意を表します。

表-4 安定不安定の判定

試験体名	$\Delta\varepsilon(\%)=0.01$ となるCycle数(回)	収束歪 $\varepsilon_v(\%)$	圧壊歪 $\varepsilon_{c0}(\%)$	判定
CH-30-0.45	4	-0.14	-0.50	安定
CH-30-0.55	9	-0.34	-0.50	安定
CH-30-0.70	---	---	-0.50	不安定
CH-60-0.40	4	-0.15	-0.43	安定
CH-60-0.50	8	-0.31	-0.43	安定
CH-60-0.50(2)	4	-0.27	-0.43	安定
CH-60-0.55	9	-0.27	-0.43	安定
CH-60-0.65	---	---	-0.43	不安定

## 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性状に関する実験的研究, 構造工学論文集, 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
- 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
- 4) 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筋の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.3, pp.499-504, 1998
- 5) 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
- 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, 2001.1