

## (4) 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の定式化

倉富 洋<sup>1</sup>・堺 純一<sup>2</sup>・田中 照久<sup>3</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 福岡大学助手 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

鉄骨鉄筋コンクリート断面から主筋及びせん断補強筋を省略し、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解析を行い、安定限界軸力について解析的に検討を行った。解析変数には内蔵鉄骨比、鉄骨降伏点、コンクリート強度、鋼管の幅厚比、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、安定限界軸力比に影響を与えるのはコンクリート強度と鋼管の幅厚比であることを明らかとした。更に、材料強度及び鋼管の幅厚比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値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, Width-to-thickness ratio*

### 1. 序

本研究では、鉄骨鉄筋コンクリート（以下SRCと略記）断面から主筋及びせん断補強筋を取り除き薄肉鋼管で横補強を行うことで、SRC造と同等以上の耐震性能を保持し、かつ施工の簡素化を目指した鋼コンクリート（以下SCと略記）合成構造の開発を行っている。本柱材の鋼管には柱頭及び柱脚に隙間を設け、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が特徴である。

これまでの研究から、本SC柱材は幅厚比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極めて安定した挙動を示すことが分かっている<sup>1)2)</sup>。本SC柱材が高軸力でも優れた性能を示すことに着目し、著者らは文献3)にて一定軸力と定変位振幅で繰返し水平力を受ける本SC柱材の載荷実験を行い、安定限界軸力について検討した。その結果、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た。また、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。更に、薄肉鋼管及び十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を考慮

して本SC柱材の弾塑性解析を行った結果、安定限界軸力の実験挙動を精度よく追跡できることを確認した<sup>3)</sup>。

本研究では、文献3)で行った実験と同様の載荷条件で、一定軸力下で多数回の繰返し水平力を与える弾塑性解析を行った。これまで安定限界軸力の解析的研究としてSRC柱材では津田等<sup>4)</sup>や松井等<sup>5)</sup>の論文があるが、本論では、本SC柱材を対象とした安定限界軸力についてパラメトリックスタディを行い、安定限界軸力に影響を及ぼす影響因子を明らかとし、定量的に評価できる評価式を提案することを目的とする。

安定限界軸力式の提案にあたり、まず定変位振幅で繰返し水平力を受ける本SC柱材の中心軸歪が一定値に収束し、かつ収束する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ないという明確な定義に基づき、安定限界軸力に影響を及ぼすと考えられる内蔵十字鉄骨比、鉄骨降伏点、コンクリート強度、鋼管の幅厚比、部材角を解析変数にとり、軸力比を変化させることによって各条件ごとの安定限界軸力を算出し、安定限界軸力に影響を及ぼす因子を明らかにする。次いで、一定軸力として安定限界軸力を載荷し、中心軸歪が一定値に収束したときの鉄骨とコンクリートの負担軸力をそれぞれ算定することにより、各部材角毎に定式化を行う。

## 2. 安定限界軸力の解析的研究

### (1) 解析モデル

図-1(a)に示す断面を持つ本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)、(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>9)</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) 材料の応力-歪関係

鋼材の応力-歪関係は図-2に示すモデルを、コンクリートの応力-歪関係は崎野・孫モデル<sup>7)</sup>をそれぞれ使用した。ただし、コンクリートの構成則は本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、繰返し則は渡辺らのモデル<sup>8)</sup>を用いた(図-3参照)。材料の応力-歪関係についての詳細は文献1)を参照されたい。

### (3) 安定限界軸力の定義

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-1に示す。断面寸法は $B \times D = 800 \times 800$ ( $B$ ：断

面幅、 $D$ ：断面せい)とし、せん断スパン比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内蔵十字鉄骨比、鉄骨降伏点、コンクリート強度、鋼管の幅厚比、部材角をとった。鋼管はコンクリートを横拘束するためだけにあるものとし、鋼管の幅厚比が100前後となるような板厚を三種類選定し、降伏点は $235 \text{ N/mm}^2$ で統一している。SRC規準<sup>9)</sup>における制限軸力式は部材角1.0%程度の変形に対する変形性能の確保を保証しているが、本SC柱材は高軸力下でも変形性能に優れているため、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 $\epsilon_0$ 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している。なお、 $\epsilon_0$ は崎野・孫式及び文献1)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-4に解析における安定不安定の判別方法を、図-5に安定時及び不安定時の荷重変形関係を示す。図-4(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、軸力比の違いは曲げ耐力の低下率より軸歪の進行に大きく違いが現れていることが分かる。軸力比が大きくなるほど中心軸歪の進行も大きくなるが、本SC柱材はコンクリートの拘束力に優れているため、 $n=0.47$ を載荷したときのように中心軸歪が1.0%を超えても急激な耐力低下は見られず、最大曲げ耐力の8割前後を保持している。 $n=0.44$ 以下の解析では繰返し回数7回前後で中心軸歪の進行がなくなり、その後一定値に収束した。このときの中心軸歪は十字鉄骨で拘束されたコンクリートの圧壊歪 $\epsilon_0$ (図中点線)を超えておらず、また曲げ耐力の低下率もなくなっていることから、安定とみなすことができる。また、荷重変形関係においても図-5(a)に示す安定

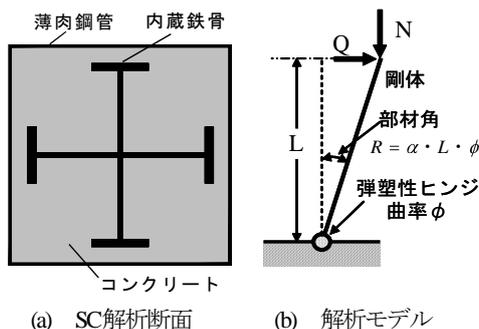


図-1 弾塑性解析

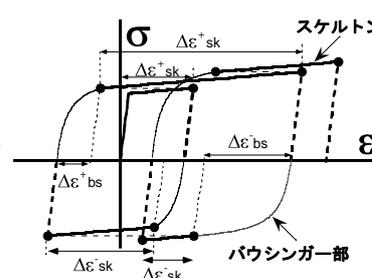


図-2 鋼材の応力-歪関係

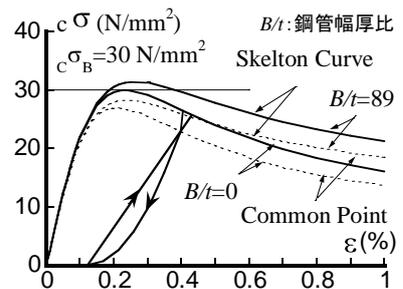


図-3 コンクリートの繰返し則

表-1 解析変数

内蔵鉄骨寸法	CH-644x199x10x16 (3.9%), CH-650x200x11x19 (4.5%)
	CH-656x201x12x22 (5.0%), CH-662x202x13x25 (5.6%)
	CH-668x203x14x28 (6.2%) ( )内は鉄骨比
$s\sigma_y$	235, 280, 330, 360, 400 (N/mm <sup>2</sup> )
$c\sigma_B$	30, 45, 60, 75, 90 (N/mm <sup>2</sup> )
薄肉鋼管板厚	6 (133), 9 (89), 12 (67) (mm) ( )内は鋼管幅厚比
部材角	1.0%, 1.5%, 2.0%
共通事項	解析断面: 800x800 (mm), せん断スパン比2
	薄肉鋼管降伏点: 235 (N/mm <sup>2</sup> )

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

限界軸力載荷時( $n=0.44$ )では紡錘形の履歴性状を示し、数回の繰返して定常ループとなり耐力及び剛性に低下は見られない。一方で、 $n=0.45$ の軸力を載荷すると、中心軸歪は徐々にではあるが進行を続けており、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る。 $n=0.45$ 以上の軸力を載荷すると曲げ耐力の低下が見られるが、これは、中心軸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しまい、コンクリートが耐力低下域に入ったためだと考えられる。中心軸歪が進行し続けた $n=0.47$ では耐力低下に加え、除荷剛性の低下も見られた(図5(c)参照)。以上より、この解析条件における安定限界軸力比 $n_l$ は $n=0.44$ とし、 $n=0.45$ 以上を不安定とする。 $n_l$ は安定限界軸力比を示し、式(4)に記すように、柱材の断面耐力 ${}_{sc}N_u$ を安定限界軸力 $N_l$ で除した値である。

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

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

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,  $A$ ,  $A$ : それぞれコンクリート及び鉄骨の断面積である。

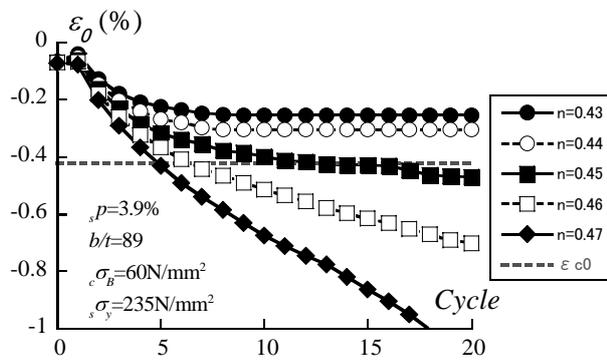
#### (4) 解析結果と考察

2.(3)節で示した安定限界軸力の定義に従い、表-1に示した解析変数に対して、各条件における安定限界軸力を算定した結果について考察する。表-2には各解析条件における安定限界軸力比の一例を、表-3には収束するときの中心軸歪をそれぞれ示す。また、表-2にはSRC規準で規定されている制限軸力式 ${}_{SRC}N_l$ (式(5))から算出した軸力比 ${}_{SRC}n_l$ (式(6))も併せて示している。なお、表-2, 表-3中の鉄骨降伏点は235N/mm<sup>2</sup>で統一している。

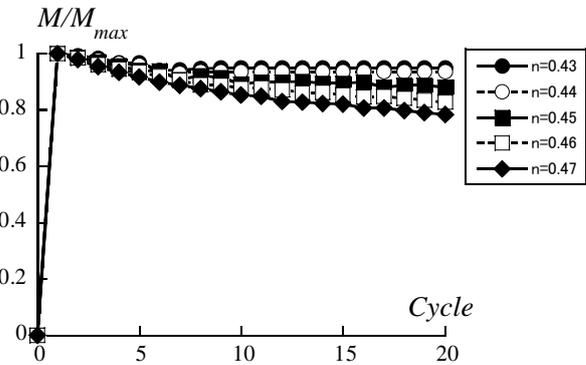
$${}_{SRC}N_l = \frac{1}{3}b \cdot D \cdot F_c + \frac{2}{3}sA_s f_c \quad (5)$$

$${}_{SRC}n_l = \frac{{}_{SRC}N_l}{{}_{sc}N_u} \quad (6)$$

ここで、 $b$ ,  $D$ : それぞれ、柱断面の幅とせい,  $F_c$ : コンクリート設計基準強度( $=c\sigma_B$ ),  $f_c$ : 鉄骨の短期許容圧縮強度( $=s\sigma_y$ )である。

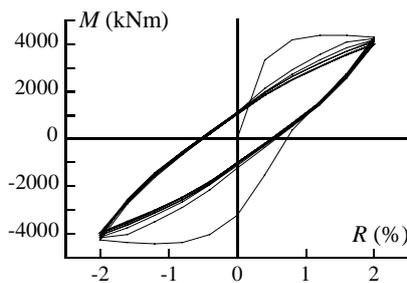


(a) 軸縮み進行度合い

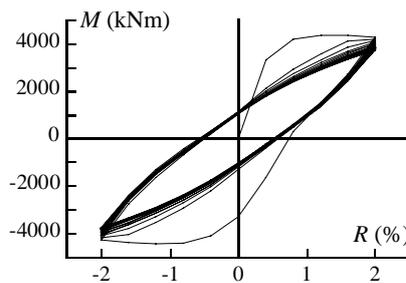


(b) 曲げ耐力低下率

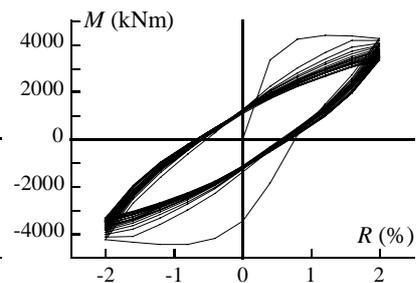
図-4 安定不安定の判別



(a)  $n=0.44$  (安定)



(b)  $n=0.45$  (不安定)



(c)  $n=0.47$  (不安定)

図-5 安定, 不安定時の挙動

SRC 規準の制限軸力式は部材角 1.0% 程度の変形を対象とした制限式となっているが、表-2 の値を比較すると、本 SC 柱材の安定限界軸力比は SRC 規準によって計算した制限軸力式を大きく上回っていることが分かる。条件によっては部材角 2.0% においても制限式を満足しており、SRC 規準の制限軸力式で安定限界軸力比を評価しようとする、かなり安全側となることが窺える。また、安定限界軸力比の値を見ると、鋼管の幅厚比が小さくなるほど安定限界軸力比の値は大きくなっており、鋼管の幅厚比は安定限界軸力比に大きく影響を及ぼすものと考えられる。

表-3 より、ほとんどの条件で中心軸歪は -0.50% 以下に抑えられていることが分かる。これは、十字鉄骨によって拘束されたコンクリートの圧壊歪が  $30\text{N/mm}^2$  のときに -0.50% 程度となるためである。コンクリート強度が大きくなるほど圧壊歪が小さくなっているが、これは高強度コンクリートになるほど変形性能が低下するため安定限界軸力比が小さくなることによるものと、表-3 に示すように十字鉄骨で拘束された圧壊歪は高強度コンクリートになるほど強度上昇率が低く計算されるため、圧壊歪の値(安定限界軸力比を定義する上で収束する軸歪の上限となる値)が小さくなるためだと考えられる。また、表-2 から分かるように鋼管の幅厚比が小さくなると安定限界軸力比が大きくなるため、柱材が負担する軸力

の上昇に伴い収束するときの軸歪の値は大きくなっている。このことから、柱材の軸歪は軸力比の大きさに多大な影響を受けることが分かる。軸歪の累積は柱材の構造性能を低下させる要因となるため、コンクリートの圧壊による層崩壊を防ぐことは勿論のこと、修復可能性や二次部材への損傷抑制も含めて軸歪量の制限を設けることは必要であり、大地震時においても繰り返しに伴う中心軸歪の累積量がコンクリートの圧壊歪を超えない範囲に抑えることは合理的であるものと考えられる。

#### (5) 各種影響因子が安定限界軸力比に及ぼす影響

安定限界軸力比に影響を及ぼす影響因子について検討した結果を図-6 に示す。同図の縦軸には安定限界軸力比  $n_f$  を、横軸には影響因子をとっている。

同図 (a) に内蔵鉄骨比と鉄骨降伏点の違いが安定限界軸力比に及ぼす影響を示す。ここでは、コンクリート強度  $c\sigma_B=30\text{N/mm}^2$ 、鋼管の幅厚比 89 で統一している。図より、内蔵鉄骨比の違いによる影響は見られず、横ばいで推移していることが分かる。また、鉄骨降伏点の違いもほとんど影響は見られない。内蔵鉄骨比はコンクリートの拘束効果に影響を与えるが、しっかりと拘束できる条件を満たせば、影響は見られないものと考えられる。

また、部材角が大きくなるほど応力状態が厳しくなるため、安定限界軸力比が低下する傾向が見られる。これ

表-2 安定限界軸力比の解析結果とSRC規準の制限軸力式で計算した軸力比

		R (%)									SRC規準による制限軸力比		
		1.0			1.5			2.0			$src n_f$		
		sP (%)			sP (%)			sP (%)			sP (%)		
$c\sigma_B$	b/t	3.9	5.0	6.2	3.9	5.0	6.2	3.9	5.0	6.2	3.9	5.0	6.2
30	133	0.57	0.57	0.58	0.51	0.50	0.50	0.45	0.46	0.46	0.41	0.43	0.44
	89	0.60	0.61	0.60	0.54	0.54	0.52	0.47	0.47	0.48			
	67	0.64	0.63	0.63	0.57	0.55	0.54	0.51	0.49	0.49			
60	133	0.53	0.53	0.54	0.45	0.47	0.48	0.39	0.41	0.41	0.38	0.39	0.40
	89	0.55	0.55	0.57	0.50	0.50	0.49	0.44	0.43	0.44			
	67	0.58	0.59	0.59	0.52	0.52	0.52	0.46	0.46	0.46			
90	133	0.50	0.50	0.51	0.41	0.42	0.41	0.35	0.36	0.36	0.36	0.37	0.38
	89	0.53	0.53	0.53	0.46	0.46	0.46	0.40	0.41	0.41			
	67	0.55	0.55	0.56	0.48	0.49	0.49	0.44	0.44	0.44			

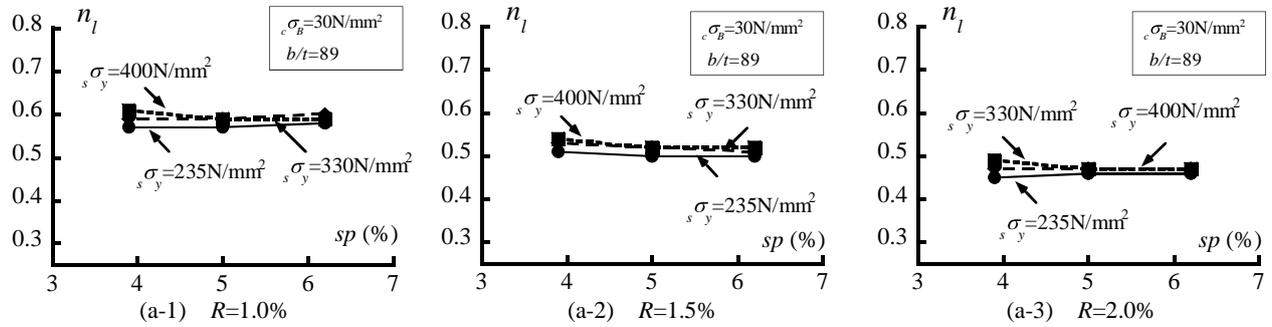
表-3 安定限界軸力載荷時の収束するときの中心軸歪と十字鉄骨で拘束されたコンクリートの圧壊歪

		R (%)									十字鉄骨で拘束されたコンクリートの圧壊歪(%)		
		1.0			1.5			2.0			sP (%)		
		sP (%)			sP (%)			sP (%)			sP (%)		
$c\sigma_B$	b/t	3.9	5.0	6.2	3.9	5.0	6.2	3.9	5.0	6.2	3.9	5.0	6.2
30	133	-0.292	-0.306	-0.411	-0.329	-0.302	-0.345	-0.289	-0.389	-0.408	-0.489	-0.498	-0.505
	89	-0.325	-0.409	-0.390	-0.371	-0.424	-0.350	-0.298	-0.348	-0.422			
	67	-0.417	-0.415	-0.443	-0.448	-0.359	-0.371	-0.427	-0.352	-0.388			
60	133	-0.281	-0.285	-0.341	-0.228	-0.303	-0.400	-0.172	-0.274	-0.250	-0.420	-0.425	-0.429
	89	-0.292	-0.283	-0.395	-0.390	-0.403	-0.312	-0.309	-0.266	-0.334			
	67	-0.357	-0.414	-0.426	-0.408	-0.412	-0.393	-0.343	-0.339	-0.377			
90	133	-0.266	-0.240	-0.266	-0.182	-0.239	-0.167	-0.149	-0.181	-0.173	-0.405	-0.409	-0.412
	89	-0.285	-0.286	-0.266	-0.300	-0.293	-0.264	-0.216	-0.316	-0.252			
	67	-0.290	-0.289	-0.325	-0.285	-0.358	-0.325	-0.370	-0.375	-0.350			

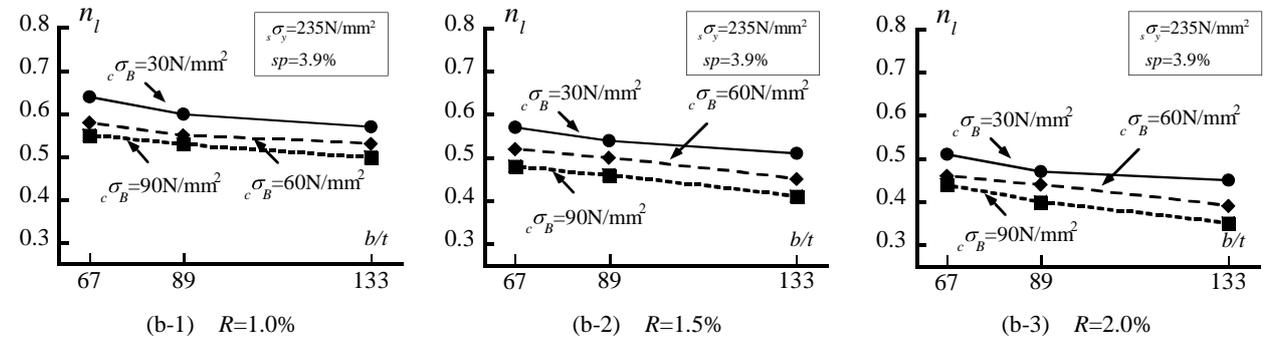
は内蔵鉄骨比と鉄骨降伏点の違いだけでなく、以下に詳述するコンクリート強度、鋼管の幅厚比の違いでも見られる現象である。

図-6(b)にコンクリート強度と鋼管の幅厚比の違いが及ぼす影響について示す。ここでは、内蔵鉄骨比3.9%、鉄骨降伏点 $\sigma_y=235\text{N/mm}^2$ で統一している。図より、コンクリート強度が高くなるほど安定限界軸力比が低下してい

ることが分かる。これは、高強度コンクリートになるほど最大耐力発揮後の耐力低下が大きくなり、曲げ耐力の低下とともに軸歪が進行するためだと考えられる。収束するときの軸歪量を見ると、安定限界軸力比が小さくなるために軸歪が抑えられ、高強度コンクリートになるほど小さくなっていることが分かる(表-3参照)。また図-7に示すように、コンクリート強度が低いと不安定状態



(a) 内蔵鉄骨比と鉄骨降伏点の違いによる影響



(b) 鋼管の幅厚比とコンクリート強度の違い

図-6 各種影響因子が安定限界軸力比に及ぼす影響

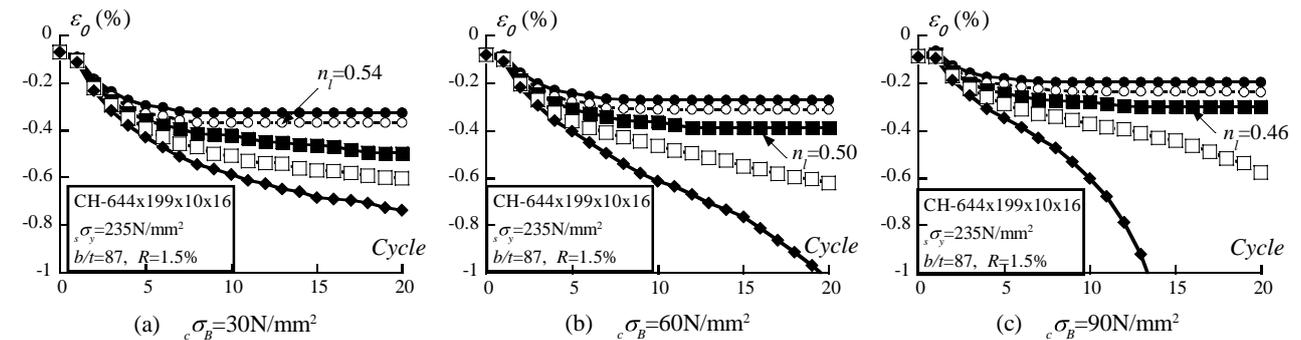


図-7 中心軸歪-繰返し回数関係

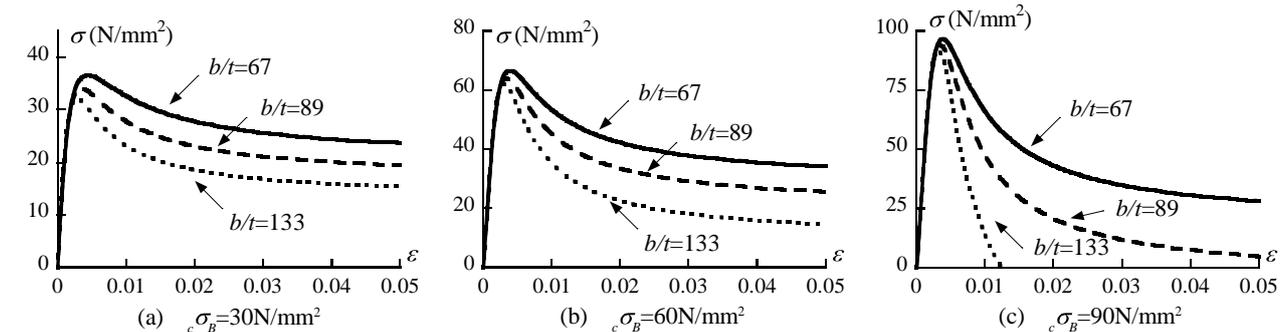


図-8 鋼管で拘束されたコンクリートの応力歪関係

でも緩やかに軸歪が進行していくのに対し、高強度コンクリートでは不安定時に急激な軸歪の発散が見られるため、高強度コンクリート使用時ではより安全側に断面設計を行うことが望ましい。また、鋼管の幅厚比が小さくなるほど安定限界軸力が大きくとれることが分かる。図-8にコンクリートの応力-歪関係を示しているが、鋼管の幅厚比が小さいとコンクリートの拘束効果がより発揮され、コンクリートの強度と靱性を向上させることができるためである。

### 3. 安定限界軸力式の提案

表-2示したように、本SC柱材の安定限界軸力比をSRC規準による制限軸力式で評価しようとする、特に部材角 $R=1.0\%$ ではかなり安全側の評価となることがわかった。SRC規準の制限軸力式は部材角 $R=1.0\%$ の変形を対象としており、また式中のコンクリートと鉄骨の断面圧縮耐力に掛けられている係数は経験的なものであり、理論的な根拠が明確に記されているとは言い難い点がある。SRC柱材と比較して、本SC柱材は十字鉄骨を内蔵しており、鋼管でコンクリートを横拘束していることから、安定限界軸力には十字鉄骨比や鋼管の幅厚比による影響も大きく現れる。これらの影響を考慮すると、SRC規準で規定されている制限軸力式を直接本SC柱材の安定限界軸力式として評価することは合理的ではなく、本SC柱材の構造性能の特徴を生かした新たな安定限界軸力式を検討することは意味があるものと考えられる。

本SC柱材の安定限界軸力 $N_{sc}$ 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(7)で評価する。

$$N_{sc} = \alpha \cdot b \cdot D \cdot \sigma_B + \beta \cdot (A_s - A_{sf}) \cdot \sigma_y \quad (7)$$

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、 $A_s, A_{sf}$ :それぞれ、鉄骨断面積と強軸フランジの断面

積、 $\sigma_B$ :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(7)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。

図-9に繰返し载荷に伴うコンクリートと鉄骨の負担軸力の推移を示す。高強度コンクリートになるほど安定限界軸力比が低くなることにより、断面が負担する圧縮力が断面耐力に対して小さくなるためコンクリートの負担軸力は小さくなる。一方で、鉄骨降伏点が大きくなっても安定限界軸力比は変わらないため、鉄骨の負担軸力は大きくなっている。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。定式化にあたり、以下に諸記号をまとめて示す。

$$s p = \frac{s A}{b \cdot D} \cdot 100 \quad (8)$$

$$f_s = \frac{s \sigma_y}{295(\text{N/mm}^2)} \quad (9)$$

$$f_c = \frac{c \sigma_B}{30(\text{N/mm}^2)} \quad (10)$$

$$b_t = \frac{b/t}{100} \quad (11)$$

ここで、 $b, D$ :それぞれ、コンクリートの幅とせい、 $A_s$ :鉄骨断面積、 $\sigma_B$ :コンクリートの圧縮強度、 $\sigma_y$ :鉄骨降伏点、 $t$ :鋼管板厚である。

#### (1) コンクリートの負担軸力の割合に及ぼす影響因子

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、コンクリート強度と鋼管の幅厚比が影響を与え、内蔵鉄骨比と鉄骨降伏点は $\alpha$ に関連性がないことがわかった。この結果から、部材角毎にコンクリート強度と鋼管の幅厚比について更に分析した結果を図-10示す。高強度コンクリートになるほど、また鋼管の幅厚比が大きくなるほどコンクリートを拘束する効果が小さくなるため、コンクリートの負担軸力は小さくなる。また、部材角 $R=1.0\%$ における $\alpha$ の値は0.5~0.7程度であり、SRC規準の制限軸力式のコンクリートの圧縮耐力に対する係数1/3を大きく上回っている。これは、十

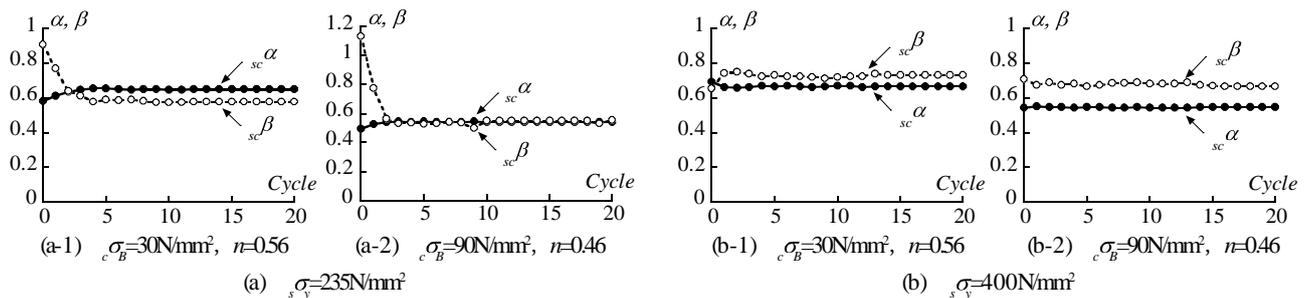


図-9 コンクリートと鉄骨の負担軸力の推移

字鉄骨及び薄肉鋼管によるコンクリートの拘束効果が大きく発揮されたためだと考えられる。

重回帰分析の結果、 $\alpha$ をコンクリート強度と鋼管の幅厚比を考慮した式（表-4中左欄参照）で評価する。

### (2) 内蔵鉄骨の負担軸力の割合に及ぼす影響因子

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した結果、コンクリート強度と鉄骨降伏点が影響を与え、内蔵鉄骨比と鋼管の幅厚比は $\beta$ に関連性がないことがわかった。この結果から、部材角毎にコンクリート強度と鉄骨降伏点について更に分析した結果を図11に示す。高強度コンクリートになるほどコンクリートがより圧縮力を負担するようになるため、鉄骨の負担軸力は低下する。また鉄骨降伏点が大きくなるほど鉄骨の負担できる圧縮力が増加するため、鉄骨の負担軸力は大きくなる。

重回帰分析の結果、 $\beta$ をコンクリート強度と鉄骨降伏点を考慮した式（表-4中右欄参照）で評価する。

### (3) 安定限界軸力式

式(7)に示した安定限界軸力式の、コンクリート及び鉄骨の圧縮軸力に対する係数 $\alpha$ 、 $\beta$ について定量的に検討した結果を表-4にまとめて示す。また、図-12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。また、文献3)の実験から得られた安定限界軸力と本評価式を比

較すると、L30では $n_f=0.57$ （実験値 $n_f=0.55$ ）、L60では $n_f=0.56$ （実験値 $n_f=0.55$ ）が得られ、概ね評価可能である。S60では $n_f=0.62$ （実験値 $n_f=0.50$ ）と乖離した結果が得られたが、この試験体に内蔵した鉄骨比が小さく、拘束効果が十分に発揮できなかったためである。

## 4. 結論

鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性解析を行い、安定限界軸力に影響を及ぼす影響因子について考察し、評価式を検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 内蔵鉄骨比、鉄骨降伏点、コンクリート強度、鋼管の幅厚比、部材角を解析変数にとり、安定限界軸力について解析的に検討したところ、コンクリート強度、鋼管の幅厚比、部材角の影響を大きく受ける。
- 2) 本SC柱材の安定限界軸力をSRC規準で規定されている制限軸力式で評価したところ、安全側の評価となった。そこで、安定限界軸力載荷時における鉄骨とコンクリートの負担軸力を算出し、表-4に基づいて各部材角毎に安定限界軸力の定式化を行った。本論で提案した評価式は、部材角1.0%～2.0%の範囲内で安定限界軸力を精度よく評価できる。

謝辞：本研究は平成24年度福岡大学堺研究室の卒研究生の友池美耶子氏（現鹿島建設）の多大な協力を得た。ここに記して、感謝の意を表します。

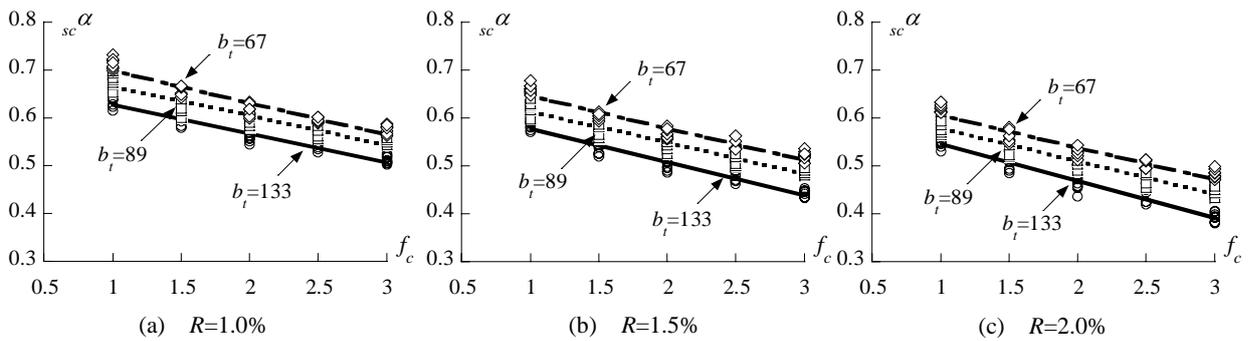


図-10  $\alpha$ に及ぼす影響因子

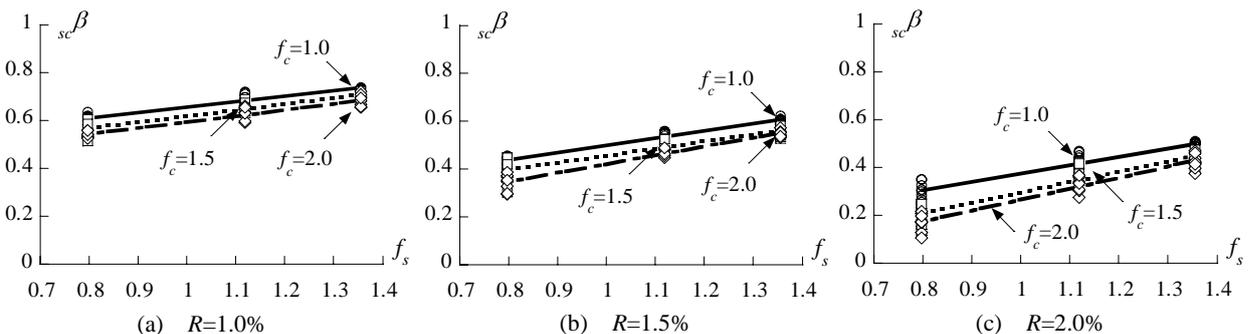


図-11  $\beta$ に及ぼす影響因子

表-4 安定限界軸力式一覧

安定限界軸力式		${}_{sc}N_l = {}_{sc}\alpha \cdot b \cdot D \cdot \sigma_B + {}_{sc}\beta \cdot (A_s - A_{sf})_s \sigma_y$
部材角	${}_{sc}\alpha$	${}_{sc}\beta$
R=1.0%	$0.835 - 0.115b_t - 0.062f_c$	$0.47 - 0.044f_c + (0.22 + 0.013f_c)f_s$
R=1.5%	$0.775 - 0.10b_t - 0.068f_c$	$0.23 - 0.030f_c + 0.30f_s$
R=2.0%	$0.72 - 0.076b_t - 0.070f_c$	$0.18 - 0.15f_c + (0.26 + 0.087f_c)f_s$

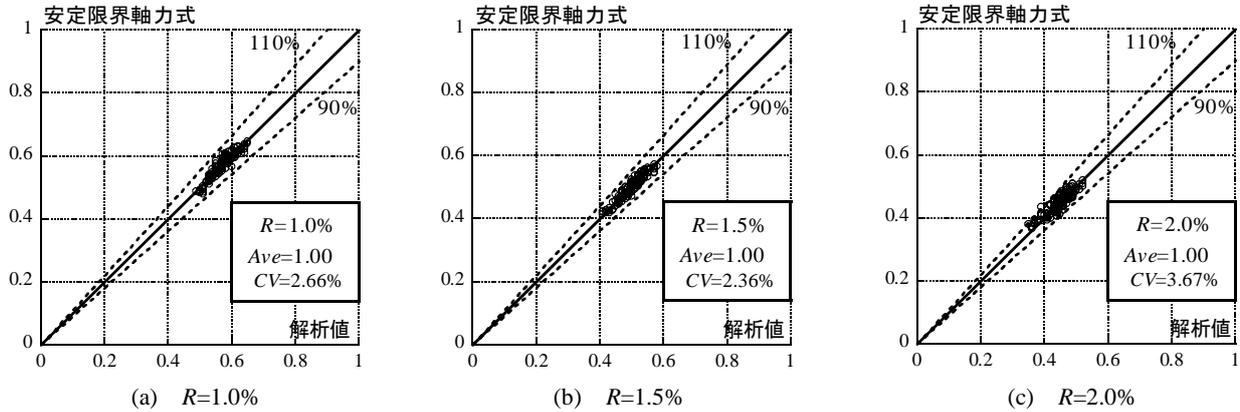


図-12 解析値と安定限界軸力式の比較

参考文献

- 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
- 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
- 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
- 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
- 李麗, 松井千秋: 繰返し曲げモーメントを受けるSRC柱材の安定限界軸力の解析, 日本建築学会九州支部研究報告, 第10号, pp.657-660, 1996.3
- 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
- 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
- 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(東北), 構造II B, pp.505-506, 1991.9
- 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

AN ANALYTICAL STUDY ON STABILITY LIMIT AXIAL LOAD OF STEEL AND CONCRETE COMPOSITE COLUMNS COVERED BY THIN STEEL TUBE

Yo KURATOMI, Junichi SAKAI and Teruhisa TANAKA

In order to investigate stability limit axial load of steel and concrete (SC) composite columns, an analytical work of SC column was carried out under constant axial load and cyclic horizontal load. The analytical variables were selected factors which were encased steel ratio, material strength of steel and concrete, width-to-thickness ratio of steel tube and rotation angle of columns. From the analytical results it was made to clear stability limit axial load ratio was greatly depended compressive strength of concrete and width-to-thickness of steel tube. Effect of the above mentioned factors on stability limit axial load of SC columns was investigated quantitatively and limiting formulae of axial load were proposed.