

## (44) 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の解析的研究

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から主筋およびせん断補強筋を取り除き、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について解析的に検討を行なった。特に復元力特性のうち、履歴曲線の定式化を行なうことで、本合成柱材の復元力特性を明らかとすることが目的である。解析変数には、内蔵鉄骨比、コンクリート及び鋼材の材料強度、鋼管の幅厚比、軸力比、部材角をとり、履歴曲線に影響を及ぼす因子を明らかとする。除荷点、残留変形点、中間点の三つの特異点からなる履歴曲線のモデル化を行ない、弾塑性解析結果及び曲げせん断実験結果を精度よく追跡できることを示した。

**Key Words:** Steel concrete column, Elastic-plastic behavior, Restoring force characteristics, Cruciform steel

### 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。本柱断面の特徴は、内蔵鉄骨には十字鉄骨を使用し、また外周補強鋼管には幅厚比 100 程度の薄い鋼管を用いていることである。この鋼管には柱頭及び柱脚に隙間を設け、軸力と曲げを負担させないことを想定している。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 柱材の挙動を精度よく再現するには、骨格曲線と履歴曲線から成る復元力特性を明らかにする必要がある。著者らは文献<sup>2)</sup>にて本 SC 柱材の骨格曲線について定式化を行ない、曲げひび割れ発生点、降伏点、最大耐力点および限界変形点の四つの特異点で実験挙動ならびに解析結果を精度よく追跡できることを示した。部材の履歴挙動を把握するための復元力特性には、単調載荷や繰返し載荷の包絡線で得られる骨格曲線だけでなく、履歴

ループの形状や面積、除荷剛性の低下等の性状を表す履歴曲線がある。履歴曲線のモデル化は、今日まで相当数提案されており、様々な挙動を再現することが可能となっている。広く使用されているモデルには、鉄骨部材ではバイリニアモデル、鉄筋コンクリート（以下 RC と略記）部材ではトリリニアモデル<sup>3) 4)</sup>や Clough モデル<sup>5)</sup>、Takeda モデル<sup>6)</sup> 等がある。何れも骨格曲線を与え、除荷剛性や再載荷による剛性をパラメータとして履歴曲線の形を決定づけるモデルとなっている。

本 SC 柱材は内蔵鉄骨に十字鉄骨を内蔵しており、RC 柱材と比較して高軸力下でも紡錘形の履歴曲線を示す傾向にある。また、薄肉鋼管及び十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果から、コンクリートの強度及び靱性が向上し、大変形時でも剛性の低下及び損傷が抑えられるものと考えられる。鉄骨を内蔵した SRC 部材は、立花<sup>7)</sup>、土井<sup>8)</sup> 等が復元力特性のモデル化を行っているが、内蔵鉄骨に H 形鋼を使用した SRC 部材を対象としており、これらのモデルには作用軸力、コンクリート及び鋼材の材料強度等の影響因子の検討がなされていない。

そこで本研究では、骨格曲線に続いて履歴曲線の定式化を行なうため、本 SC 柱材の挙動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、軸力比および部材角を解析変数にとり、履歴曲線に影響を及ぼす影響因子を明らかとする。これらの影響因子が柱材の弾塑性性状に及ぼす影響を定量的に評価し、除荷点、残留変形点、中間点の三つの特異点から成る履歴曲線のモデル化を行なう。

## 2. 解析方法

### (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>10)</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<sup>1)</sup>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>11)</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。

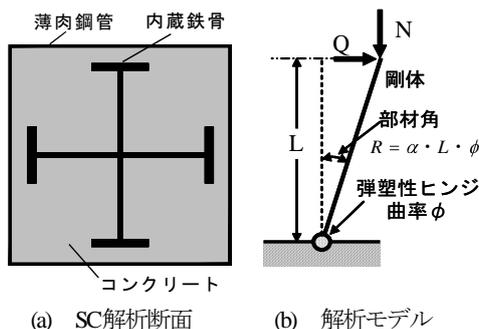


図-1 弾塑性解析

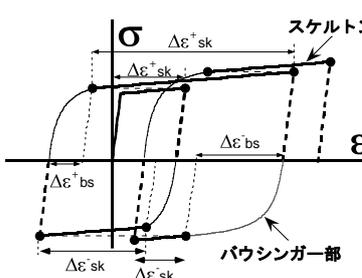


図-2 鋼材の応力-歪関係

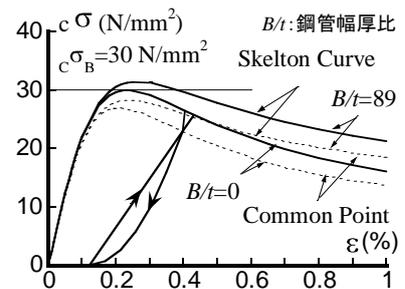


図-3 コンクリートの繰返し則

## 3. 履歴曲線の評価法

### (1) 履歴曲線のモデル化

本SC柱材の履歴曲線は、図-4に示すように、除荷点、残留変形点、中間点の三つの特異点から構成されるものとした。本SC柱材の弾塑性性状に与える影響因子として、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、軸力比が考えられる。これらの影響因子が履歴曲線上の三つの特異点に及ぼす影響を定量的に評価するために、表-1に示すような解析変数をとった。本SC柱材を対象としている薄肉鋼管の幅厚比は100程度としているため、解析変数には100前後の鋼管板厚を3種類選定した。なお、薄肉鋼管はコンクリートを横補強をするためだけであるものとし、降伏点を $235\text{N/mm}^2$ で統一している。

解析方法は、部材角ごとに2回繰返し水平力を与え、定常ループとなる2サイクル目の履歴ループをモデル化の対象とする。部材角は1.0%から3.0%まで0.5%間隔で解析し、部材角0.5%は弾性範囲と見做しエネルギーを吸収しないものとしてモデル化の対象外とした。また、著者らは本SC柱材が安定した挙動を示す限界の軸力である安定限界軸力<sup>12), 13)</sup>について検討しており、文献13)では部材角ごとに安定限界軸力を算出できる評価式を示している。本柱材には安定限界軸力以上の軸力を載荷することは想定していないため、本研究においても解析条件は安定限界軸力以下の軸力比を解析対象とした。

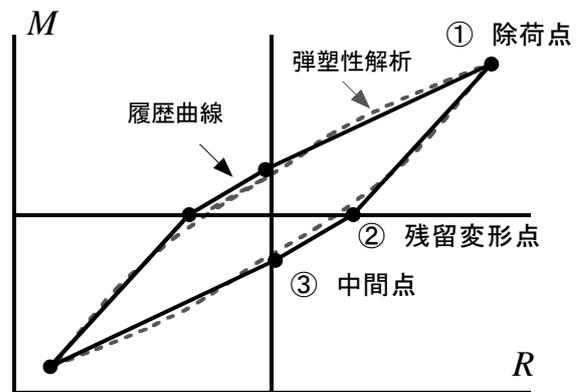


図-4 履歴曲線のモデル化

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)	( )内は幅厚比
軸力比 $n$	0.1~0.6まで0.1刻み	
部材角	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 (%)	
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

前章で示した解析手法を用いて弾塑性解析を行い、その結果から復元力特性の履歴曲線の特異点を回帰的に定式化する。式(3)から式(7)に各式に出てくる諸記号をまとめて示す。

$$f_c = \frac{c \sigma_B}{30(\text{N/mm}^2)} \quad (3)$$

$$f_s = \frac{s \sigma_y}{295(\text{N/mm}^2)} \quad (4)$$

$$s p = \frac{s A}{B \cdot D} \cdot 100 \quad (5)$$

$$n = \frac{N}{s c N_u} \quad (6)$$

$$s c N_u = s \sigma_y \cdot s A + c \sigma_B \cdot c A \quad (7)$$

ここで、 $c \sigma_B$ :コンクリート強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $s \sigma_y$ :鉄骨降伏点(N/mm<sup>2</sup>)、 $B$ :柱断面幅、 $D$ :断面せい、 $A$ :鉄骨断面積、 $c A$ :コンクリート断面積、 $n$ :軸力比、 $N$ 、 $s c N_u$ :それぞれ、

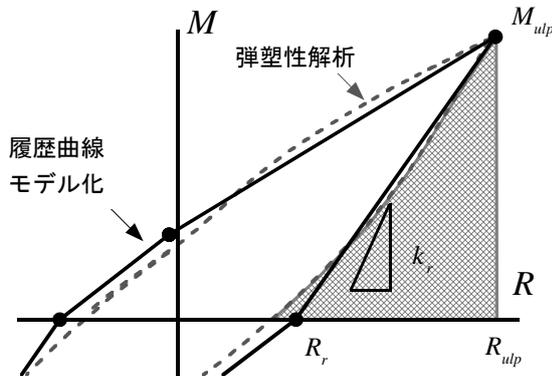


図-5 残留変形点の取り方

作用軸力及び本SC柱断面の圧縮耐力である。

(2) 除荷点

本履歴曲線の除荷点は文献2)で記載した骨格曲線上の点を取る。

(3) 残留変形点

荷重0の残留変形点は除荷剛性 $k_r$ から算出できる。ここではTAKEDAモデルやCloughモデルを参考とし、式(8)で除荷剛性を評価することとした。

$$k_r = s c k \cdot \left( \frac{R_{ulp}}{R_y} \right)^{-\alpha_r} \quad (8)$$

ただし、

$$s c k = \frac{s E_s I + c E_c I}{\alpha \cdot L} \quad (9)$$

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

ここで、 $k$ :除荷剛性、 $s c k$ :本SC柱材の初期剛性、 $R_{ulp}$ :最大応答部材角、 $R_y$ :降伏点發揮時の部材角(文献2)に示した骨格曲線の評価式より算出)、 $\alpha_r$ :除荷時剛性低下指数、 $E_s$ 、 $E_c$ :それぞれ、鉄骨及びコンクリートの弾性係数、 $I_s$ 、 $I_c$ :それぞれ、鉄骨及びコンクリートの断面二次モーメント、 $\gamma$ :コンクリートの単位容積重量(kNm<sup>3</sup>)である。

除荷剛性の算出に当たり、除荷時剛性低下指数 $\alpha_r$ の値を0.5など決め打ちする手法も考えられる。簡易に評価できるものではあるが、最大変形角の増大に伴う除荷剛性の低下を精度よく評価するには、式(8)の除荷剛性低下指数 $\alpha_r$ に対して影響因子を考慮した評価式を提案する必要があるものと考えられる。

モデル上の残留変形点 $R_r$ の取り方を図-5に示す。弾塑性解析によって得られた履歴ループのエネルギー損失量(図中灰色で囲んだ領域)とモデル上の点 $M_{ulp}$ 、 $R_{ulp}$ 、 $R_r$ で囲まれた面積が等しくなるように $R_r$ を設定した。ま

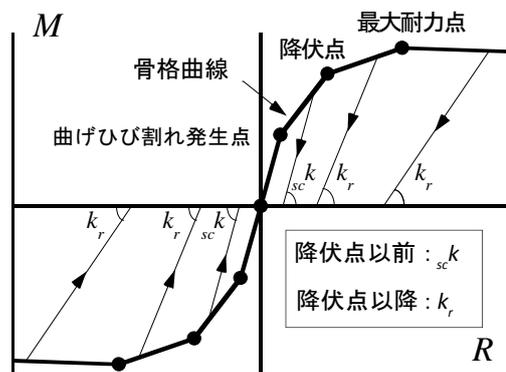


図-6 除荷剛性の履歴ルール

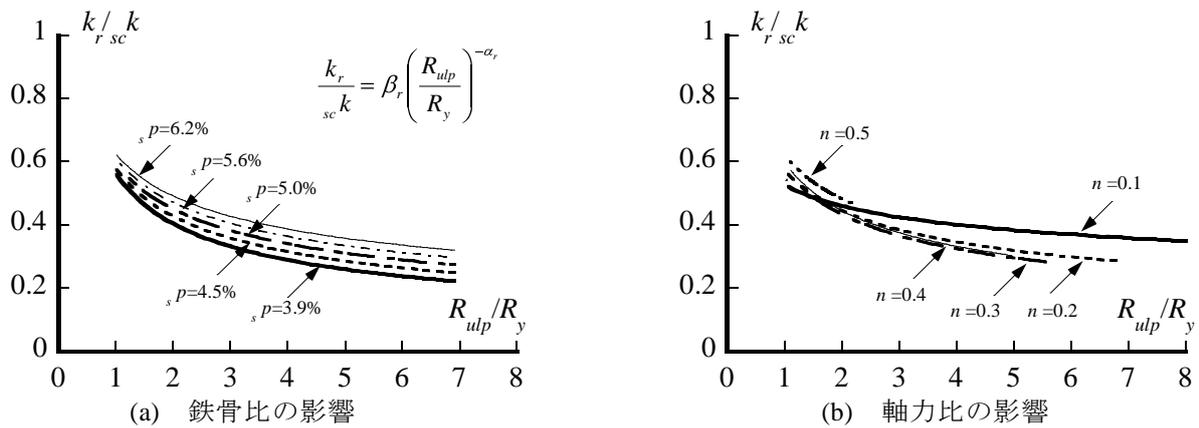


図-7 除荷剛性に及ぼす影響因子

た、除荷剛性の定式化の対象範囲は、除荷時の部材角が降伏点を超えていることを条件とした。即ち、図-6に示すように降伏点に達するまでは初期剛性 $k_{sc}$ の傾きを保持したまま除荷し、降伏点を超えてから剛性低下指数を考慮した $k_r$ で除荷剛性を評価する。

式(8)の $k_{sc}$ を左辺に移行し、無次元化すると、図-7に示すような $k_r/k_{sc} - R_{ulp}/R_y$ 関係が得られる。なお、グラフ上には数千個のプロットが存在するが、グラフが不明瞭となるため回帰曲線のみ載せている。図より、除荷剛性は最大応答部材角が大きくなるほど低下する傾向があることがわかる。影響因子を回帰的に分析したところ、鉄骨比による影響を大きく受けることが判明した(図-7(a)参照)。また、軸力比による分析では $n=0.1$ と $n=0.2$ 以上で異なる傾向を示したため、定式化では軸力比に応じた場合分けを行ない、鉄骨比を影響因子とした評価式を算定した。

指数を $\alpha_r$ 、比例定数を $\beta_r$ とおくと、 $\alpha_r$ と $\beta_r$ はそれぞれ鉄骨比の影響を受けるため、回帰的に評価すると式(11)、式(12)が得られる。

$$k_r =_{sc} k \cdot (0.30 + 0.047_s p) \cdot \left( \frac{R_{ulp}}{R_y} \right)^{-0.30 + 0.021_s p} \quad (11)$$

in case  $0.1 \leq n < 0.2$

$$k_r =_{sc} k \cdot (0.46 + 0.027_s p) \cdot \left( \frac{R_{ulp}}{R_y} \right)^{-0.70 + 0.058_s p} \quad (12)$$

in case  $0.2 \leq n \leq 0.6$

図-8に弾塑性解析と評価式の比較を示す。除荷時の部材角に拘らず概ね精度よく評価できていることが分かる。ややばらつきが見られる部分は主に60N/mm<sup>2</sup>以上の高強度コンクリートと $n=0.4$ 以上の高軸力比の組合わせであり、これらの取り扱いに関しては更に式を細分化するなど検討が必要であるものと考えられる。なお、除荷

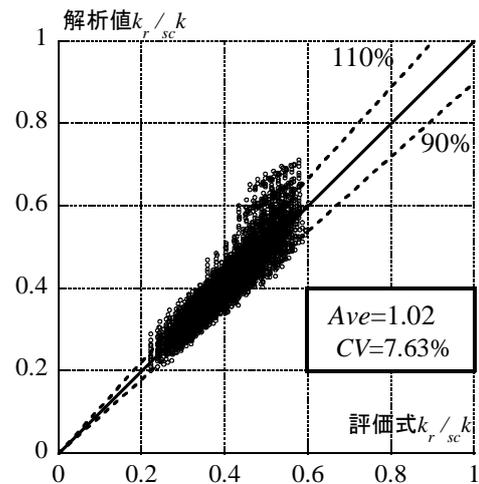


図-8 解析値と評価式の比較

剛性の評価式による計算値に対する解析値の比の統計値は、平均値 1.03、変動係数 8.26% であった。

### (3) 中間点

図-9に鉄骨とコンクリートのモーメントの負担分を表したモーメント-部材角関係の解析結果の一例を示す。図から、除荷後の荷重0から部材角の正負が反転するまでは鉄骨がモーメントを負担し、その後部材角の増大に伴い、鉄骨はモーメントを一定に負担したまま、コンクリートがモーメントを負担するようになることが分かる。このことより、鉄骨が内蔵された部材が紡錘形の履歴曲線を示す要因として、鉄骨要素の影響が大きいものと考えられる。内蔵鉄骨による履歴ループの膨らみを表現するために、残留変形点から骨格曲線上の除荷点を目指すのではなく、中間点を経由するモデルとした。中間点の取り方を図-10に示す。中間点のモーメントの値は鉄骨の全塑性モーメント $M_p$ をとり、中間点の変形の値は半ループのエネルギー吸収量(図中灰色で囲まれた領域)と $M_{up}$ 、 $R_p$ 、 $-R_p$ 、 $T$ 点を結ぶ面積が等しくなるようにとった。中間点に向かう剛性 $k_i$ は図中の記号を用いると式(13)で表される。

$$k_t = \frac{{}_sM_p}{R_t - (-R_r)} \quad (13)$$

ここで、 ${}_sM_p$ :鉄骨の全塑性モーメント、 $R_t$ :鉄骨の全塑性モーメントを發揮するときの部材角、 $R_r$ :残留変形点である。

鉄骨の全塑性モーメントである中間点を経由するための条件を示す。変形が小さい間は鉄骨が全塑性モーメントに達していないため、中間点を経由することは合理的でないと考えられる。そこで、最大耐力を發揮するまでは中間点の代わりに文献2)で示した骨格曲線の曲げひび割れ点を経由するものとし、最大耐力發揮後は前述した中間点を通るものとした(図-11参照)。

鉄骨の全塑性モーメントの値は求められるため、全塑性モーメントを發揮するときの変形点をエネルギー吸収量が等しくなるように算出した弾塑性解析の中間点の変形量に対して定式化を行う。中間点の定式化を行うにあたり、最大応答部材角を考慮した式(14)で評価することとした。

$$\frac{k_t}{{}_{sc}k} = \beta_t \left( \frac{R_{ulp}}{R_y} \right)^{-\alpha_t} \quad (14)$$

回帰分析の結果を図-12に示す。除荷剛性の算出時と同様に縦軸に $k_t/k$ 、横軸に $R_{ulp}/R_y$ をとる。各影響因子に

おいて回帰分析を行なった結果、中間点の剛性 $k_t$ にはコンクリート強度による影響が最も大きいことがわかった。よって、コンクリート強度の影響を考慮した式(14)で剛性 $k_t$ を評価する。

$$k_t = {}_{sc}k \cdot (0.12 + 0.43f_c) \cdot \left( \frac{R_{ulp}}{R_y} \right)^{-(1.0+0.23f_c)} \quad (15)$$

図-13に弾塑性解析と評価式の比較を示す。ややばらつきが見られるが、これは高強度コンクリートを高軸力比で使用したケースである。より精度の高い式を提案する必要があるが、これは今後の課題である。なお、除荷剛性の評価式による計算値に対する解析値の比の統計値は、平均値0.97、変動係数22.1%であった。

また、弾塑性解析結果と評価式から求めた履歴曲線のモデル化との比較を行うと、図-14(a)に示すように残留変形点 $R_r$ と中間点 $R_t$ の変形値がさほど変わらず、残留変形点から載荷すると除荷剛性より剛性が大きくなる現象が見られた。この現象は、主に高強度コンクリート( $\sigma_c = 60\text{N/mm}^2$ 以上)を使用した状態で見られるものであり、このような現象が実挙動で生じる可能性は極めて少ないと考え、除荷剛性よりも再載荷するときの剛性が大きくなる場合には、除荷剛性の傾きを保持したまま、鉄骨の全塑性モーメント ${}_sM_p$ に達するものとした(図-14(b)参照)。

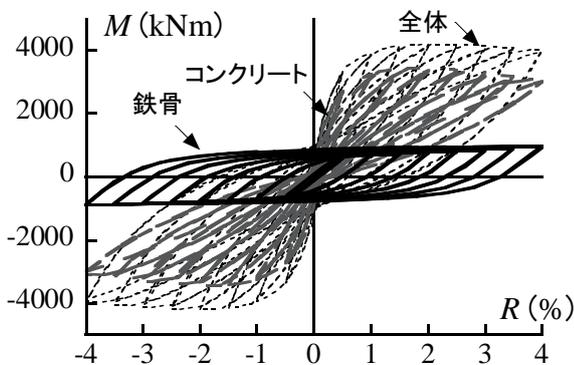


図-9 鉄骨とコンクリートの負担モーメント

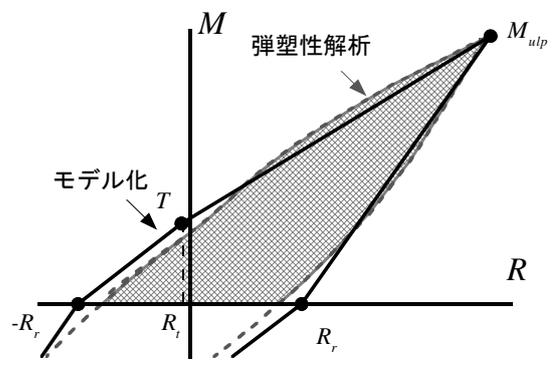


図-10 中間点の取り方

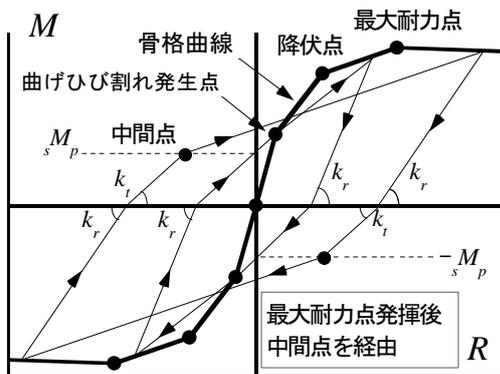


図-11 中間点の履歴ルール

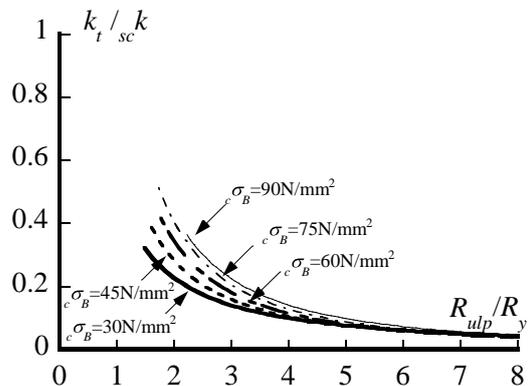


図-12 中間点に及ぼす影響因子

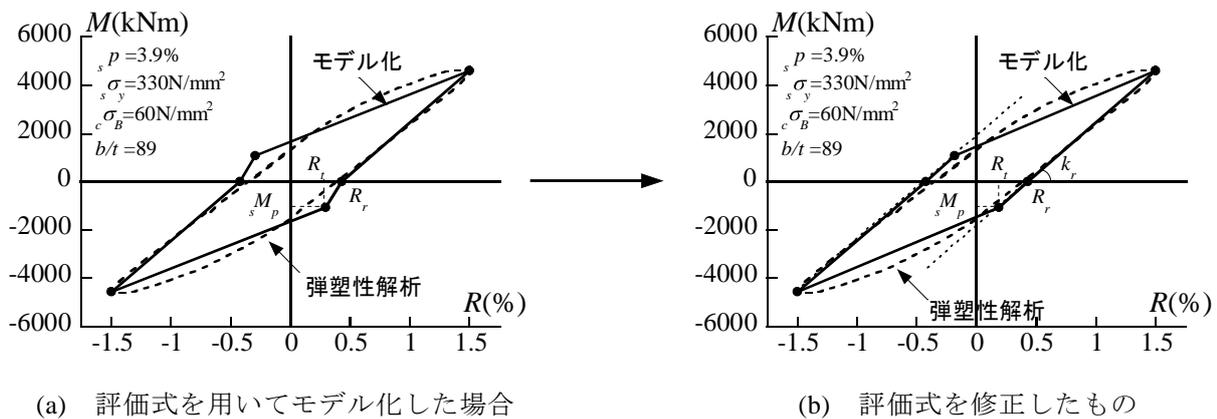


図-14 中間点の変形量の取り方

(4) 評価式と解析結果の比較

図-15 に評価式から算出した履歴曲線のモデルと弾塑性解析結果の比較を示す。図中の実線は評価式から求めた各特異点を結んだもの、点線は弾塑性解析結果をそれぞれ表している。また、鉄骨降伏点を  $\sigma_y=330\text{N/mm}^2$ 、鋼管の幅厚比を  $b/t=89$ 、軸力比を  $n=0.3$  に、それぞれ統一している。

図-15(a)より、コンクリート強度  $\sigma_c=30\text{N/mm}^2$  を使用した場合、部材角の増大に拘らず、履歴曲線を除荷点、残留変形点、中間点の三点でよく評価できていると云える。特に、中間点の位置を適切に評価することにより、部材角が大きくなる大変形時でも良好に履歴曲線を追跡していることがわかる。

図-15(b)は、高強度コンクリート  $\sigma_c=60\text{N/mm}^2$  を使用した場合の比較である。観察できる傾向としては  $30\text{N/mm}^2$  と大差ないが、部材角の増大に伴い弾塑性解析をやや過大評価する傾向にある。除荷剛性および中間点の定式化の項でも述べたように、高強度コンクリートになるほどばらつきが大きくなるため、式の精度を向上させることが今後の課題であると云える。

図-15(a)では鉄骨比  $p=3.9\%$  の比較を示したが、同図(c)には鉄骨比  $p=6.2\%$  を用いた場合を比較した結果を示す。図より、鉄骨比を大きくすると解析結果の履歴曲線はより紡錘形を示すようになるが、鉄骨比が変化してもモデル化した評価式は精度よく解析結果を追跡している。

また、部材角  $R=1.0\%$  では中間点に曲げひび割れ点を経由しているが、比較を見る限り曲げひび割れ点を経由させることに問題はないものと考えられる。

以上より、本評価式は鉄骨比、コンクリート強度、軸力比、部材角の違いに拘らず、エネルギー吸収能力に乏しい挙動から紡錘形の履歴曲線まで弾塑性解析結果を良好に追跡できたことから、本評価式の精度は高いものと考えられる。

(5) 評価式と実験挙動の比較

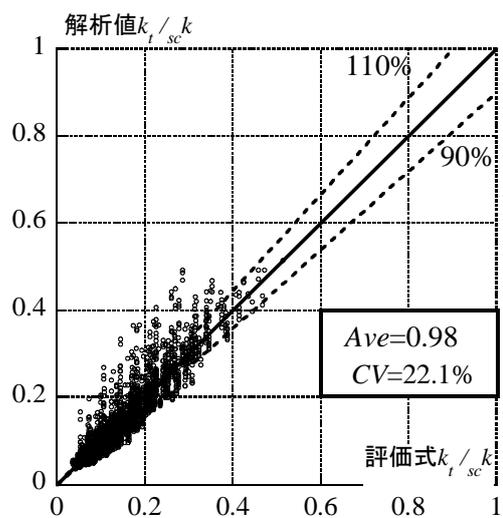


図-13 解析値と評価式の比較

図-16 に評価式と第3章で行った本SC柱材の曲げせん断実験の実験挙動の比較を示す。図中の実線は評価式から求めた各特異点を結んだもの、点線は実験挙動をそれぞれ表している。評価式は式(1), (2), (16)に従い、水平力-部材角関係に変換している。

$$Q = \frac{M}{L} - N \cdot R \quad (16)$$

図より、コンクリート強度および軸力比の違いに拘らず、実験挙動を部材角 3.0% まで精度よく追跡できていることが分かる。

4. 結論

本SC柱材の復元力特性の履歴曲線を定式化するため、内蔵鉄骨比、鉄骨降伏点、コンクリート強度、鋼管の幅厚比、軸力比、部材角を解析変数にとり、一定軸力下で繰り返し水平力を受ける本SC柱材の弾塑性解析を行った。解析結果から履歴曲線のモデル化を提案し、評価式と、解析結果及び曲げせん断実験と比較検討した結果、以下

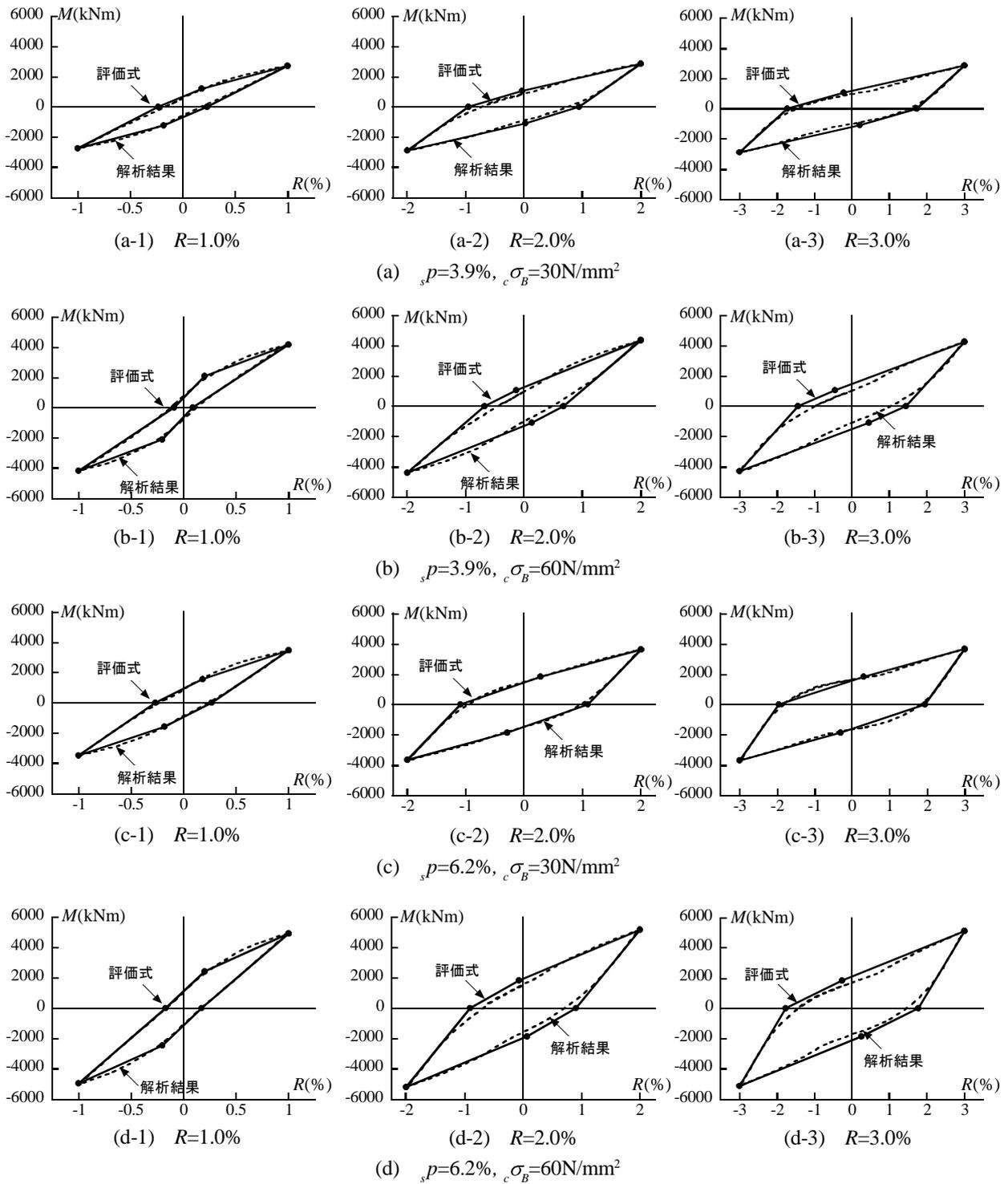


図-15 弾塑性解析と評価式の比較

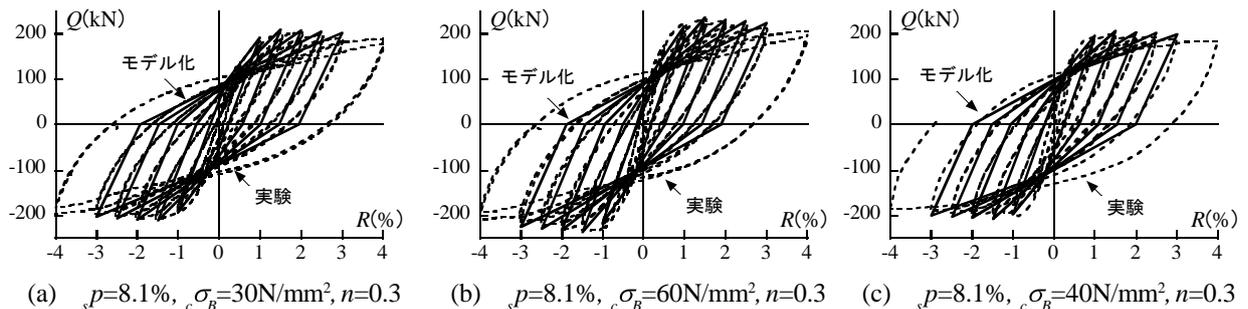


図-16 実験挙動と評価式の比較

のことが明らかとなった。

- 1) 本SC柱材の履歴曲線を、除荷点、残留変形点、中間点の三つの特異点でモデル化した結果、解析変数の違いによる弾塑性変形状を精度よく評価できる。
- 2) 残留変形点は、エネルギー損失量と、除荷点と残留変形点で囲まれた三角形の面積が等しくなるようにとった。除荷剛性に対して定量的な評価を行い、除荷剛性に主に影響を及ぼすのは鉄骨比であり、式(11)、式(12)で評価できることを示した。
- 3) 中間点は、鉄骨を内蔵することによる履歴ループの膨らみを評価するため、内蔵鉄骨が全塑性モーメントを発揮するときの点とし、そのときの変形量を、弾塑性解析の残留変形点、中間点、除荷点で囲まれた履歴面積と同じになるようにして決定した。中間点へ向かう剛性 $k_r$ は式(15)にて評価する。
- 4) 本評価式は鉄骨比、鉄骨降伏点、コンクリート強度、鋼管の幅厚比、軸力比、部材角の違いに拘らず、解析結果及び実験挙動を精度よく追跡できたことから、本評価式の精度は高いものと考えられる。

#### 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) 深田泰夫: 鉄筋コンクリート造建物の復元力特性に関する研究(その1) Degrading Stiffness Tri-Linear Modelの設定と応答計算, 日本建築学会学術研究発表会梗概集, pp.121-124, 1969
- 4) 島崎和司: 応答スペクトルを用いた鉄筋コンクリート構造物

の地震時応答変位の予測, 日本建築学会構造系論文集, No.562, pp.107-113, 2002.12

- 5) Clough, R.W., and S.B. Johnston: Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements. Proceedings, Second Japan National Conference on Earthquake Engineering, pp.227-232, 1966
- 6) Takeda, T., M.A. Sozan and N.N. Nelson: Reinforced Concrete response to simulated earthquakes. Journal of structural division, ASCE, Vol.96, No. ST12, pp.2557-2573, 1970
- 7) 立花正彦, 森田耕次, 中野清司: 曲げ破壊型鉄骨鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, pp.513-518, 1987
- 8) 土井希祐: 鉄骨鉄筋コンクリート部材の荷重-変位履歴特性モデルに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.1143-1148, 1995
- 9) 堺純一, 松井千秋: 鉄骨鉄筋コンクリート柱部材の復元力特性に関する研究-単一冊鋼を内蔵したSRC柱の骨格曲線の定式化-, 日本建築学会構造系論文集, No.534, pp.183-190, 2000.8
- 10) 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, No.461, pp.95-104, 1994.7
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 倉富洋, 堺純一, 田中照久: 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, 第11回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 2013.11

## AN ANALYTICAL STUDY ON RESTORING FORCE CHARACTERISTICS OF STEEL AND CONCRETE COMPOSITE COLUMN COVERED BY THIN STEEL TUBE

Yo KURATOMI, Junichi SAKAI and Teruhisa TANAKA

The authors have designed to develop steel and concrete (SC) composite column covered by thin steel tube not used reinforced bars. Restoring force characteristics composed of a skeleton curve and a hysteresis curve are investigated to estimate the elastic-plastic behavior of the SC columns. An analytical work of the SC columns was carried out to propose formulae of the hysteresis curves. A model of the hysteresis curves consists of three points, namely, unloading point, residual deformation point, and middle point. 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. The model of hysteresis curves was able to pursue the analytical results and the experimental results of the SC columns.