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－

RESTORING FORCE CHARACTERISTICS OF STEEL AND CONCRETE COMPOSITE COLUMNS
COVERED BY THIN STEEL TUBE

－ Formulae on skelton curves －

倉 富 洋*, 堺 純一**, 田中照久***, 河本裕行****

Yo KURATOMI, Junichi SAKAI, Teruhisa TANAKA
and Hiroyuki KAWAMOTO

The elastic-plastic behavior of steel and concrete (SC) composite column encased cruciform steel and covered by thin steel tube has been investigated. Encased cruciform steel ratio, material strength of steel and concrete, width-to-thickness ratio of thin steel tube and axial force ratio are thought to effect the elastic plastic behavior of SC columns. In order to evaluate quantitatively of the seismic performance of the columns, skelton curves of restoring force characteristics were investigated. The model of skelton curves was suggested to be composed of four points: flexural crack point, yield point, maximum strength point, ultimate deformation point. Effect of the above mentioned factors on skelton model of SC column was investigated quantitatively and skelton curves formulae were proposed. They were able to pursue the elastic plastic analysis and experiment results of columns.

Keywords: Steel concrete column, Elastic-plastic analysis, Axial force ratio, Material strength, Width-to-thickness ratio of steel tube

鉄骨コンクリート柱, 弾塑性解析, 軸力比, 材料強度, 鋼管幅厚比

1. 序

現在数多くある構造システムの中で、鉄骨鉄筋コンクリート(以下SRCと略記)構造が優れた耐震性能を示すことは周知のことである。しかしながら、鉄筋の配筋作業や鉄骨加工、コンクリートの型枠工事が必要となり、建設費の増加や工期が長期化する傾向にあり、実務上解決すべき課題であると考えられる。そこで本研究では、SRC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、なお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、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^{1)~3)}。これは脆性材料であるコンクリートを薄肉鋼管及び内蔵十字鉄骨によって拘束することにより、最大耐力発揮後の耐力低下域における耐力低下を抑えられることが要因である。鋼管によって拘束されたコンクリートの応力-歪関係のモデル化については数多くの報告がなされているが、著者らは文献3), 4)で十字鉄骨によって拘束されたコンクリートの応力-歪関係を定量的に評価できる解析手法を検討し、SC柱材のコンクリートの構成則について明らかにした。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SC柱材の弾塑性解析を行った結果、軸力と水平力を受ける柱材の実験挙動を精度よく追跡できることを確認した³⁾。

SC柱材の実用化を目指すにあたり、合理的かつ経済的な設計法の確立のため、精確な構造性能を把握する必要がある。特に、本柱材の弾塑性性状に影響を与える内蔵十字鉄骨比、コンクリート及び鉄骨の材料強度、鋼管幅厚比、軸力比といった影響因子が復元力特性に大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで本研究の目的として、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、四つの特異点(曲げひび割れ発生点、降伏点、最大耐力点、限界変形点)からなる骨格曲線のモデル化を行い、各特異点について評価式を提案する。

また、SC柱材はSRC柱材と比較して、被りコンクリートがなく十字鉄骨を内蔵しているため、コンクリートの拘束効果によって高強度コンクリート特有の耐力低下域における急激な靱性低下を改善できることから、近年著しい発展を遂げる高強度コンクリートの使用が容易になると考えられる。高強度材料の使用に伴い柱断面の縮小化が可能になると考えられるが、脆性材料であるコンクリートに十分な変形能力を持たせるためにはコンクリートの拘束効果に影響を与えると考えられる鋼管幅厚比とコンクリート強度の関係性を明らかにすることは重要な課題である。更に、高強度鋼の使用も視野に入

* 福岡大学工学研究科 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.

れて鋼とコンクリートの材料強度の組合わせが柱材に及ぼす影響についても合わせて検討する。

2. SC 柱材の弾塑性解析

2.1 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ー曲率関係を求め、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ー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(1)、(2)が成立つと仮定している。式(2)の α 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⁵⁾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。

2.2 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⁶⁾をそれぞれ使用した。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^{3), 4)}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

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

図4 SC柱の試験体と載荷装置¹⁾

図5 弾塑性実験と弾塑性解析の比較

図6 骨格曲線のモデル化

表1 解析変数一覧	
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 ²)
$c\sigma_B$	30, 45, 60, 75, 90 (N/mm ²)
薄肉鋼管板厚	6 (133), 9 (89), 12 (67) (mm) ()内は鋼管幅厚比
軸力比 n	0.1~0.6まで0.1刻み
共通事項	解析断面:800x800 (mm) , セン断スパン比 2
	薄肉鋼管降伏点:235 (N/mm ²)

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

ル⁷⁾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3)を参照されたい。

2.3 弾塑性解析と実験挙動の比較

図4に著者らが行ったSC柱材の曲げせん断実験¹⁾の試験体と荷重装置を、図5に実験結果と弾塑性解析の水平力 Q -変位角 R 関係の比較をそれぞれ示す。ここで、 b/t は鋼管の幅厚比、 n は軸力比、 $c\sigma_B$ はコンクリート強度である。何れの試験体も解析結果は実験結果をよく追跡できていることから、本解析手法の精度は十分に高いものと考えられる。

3. 骨格曲線の提案

3.1 骨格曲線のモデル化

SC柱材の復元力特性を明らかにするため、骨格曲線のモデル化を行う。本研究では、骨格曲線を曲げひび割れ発生点、降伏点、最大耐力点、限界変形点の四つの特異点で構成されるものとした(図6参照)。本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、鋼管幅厚比、軸力比が考えられる。これらの影響因子が骨格曲線上の四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。本柱材で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235N/mm²で統一している。2章で示した解析手法を用いて弾塑性解析を行い、その結果から回帰的に復元力特性の骨格曲線の特異点毎に定式化する。

3.2 曲げひび割れ発生点

曲げひび割れ発生点の耐力 M_{cr} とその曲率 ϕ_{cr} を表2中の式(3)、(4)で評価する。曲げひび割れ発生点は構造物の使用限界状態を考慮して曲げひび割れ幅が0.2mmに達したときに生じるものとした⁸⁾。解析では、解析モデルの変形域長さに相当する αL の長さで様な歪が生じるものとし、この歪による最外縁での伸びが0.2mmに達したときとしている。

弾塑性解析の結果を図7、8に示す。図7の縦軸には曲げひび割れ発生時の耐力 M_{cr} を鉄骨の降伏点 $s\sigma_y$ とコンクリート強度の $c\sigma_B$ を用いて計算した一般化累加強度 M_{pci} で除したものを、図8の縦軸にはその曲率 ϕ_{cr} に断面せい D を乗じて、それぞれ無次元化したものを用いている。 $R(\%)$ はせん断スパン比を2として曲率から(1)、(2)式を用いて変換した部材角である。また、両図中のプロットは弾塑性解析によって得られた値を、直線はコンクリート強度ごとに求めた回帰直線を、それぞれ示す。両図より曲げひび割れ発生点の耐力及びその曲率は軸力比とコンクリート強度の影響を受けることが分かる。これは、軸力比が大きくなるとコンクリートの圧縮領域が増大すること、また高強度コンクリートになると初期剛性が大きくなることから曲げひび割れ発生時期が遅くなることによるものと考えられる。

図7 曲げひび割れ発生点の耐力

図8 曲げひび割れ発生点の曲率

図9 曲げひび割れ発生点の解析値と評価式の比較

図9に弾塑性解析と評価式の比較を示す。曲率に多少のばらつきが見られるが、その他大部分は概ね評価できてることがわかる。なお、曲げひび割れ発生点の耐力及びその曲率の評価式による計算値に対する解析値の比の統計値は、それぞれ平均値1.00, 1.04, 変動係数5.10%, 8.16%であった。

3.3 降伏点

本柱材の降伏点は圧縮縁コンクリートが圧壊歪に達したとき、あるいは鉄骨の引張側フランジが降伏したときのどちらか早期に生じた方で決定するものと定義した。鉄骨の圧縮側フランジの降伏は柱材の剛性低下に影響が見られなかったことから、ここでは考慮しないものとした。降伏点の曲率 ϕ_y は表2中の式(5), (7), (9)で評価し、降伏耐力 M_y はどちらか小さい方の曲率に付随して求めるものとする。引張側の鉄骨フランジで決定する場合の降伏耐力とその曲率を式(6), (7)で、コンクリートの圧壊で決定する場合の降伏耐力とその曲率を式(8), (9)でそれぞれ評価する。

図10, 11に降伏点について検討した結果を示す。図中の白抜きで表したプロットは降伏点が鉄骨降伏で決定する場合を、塗り潰したプロットはコンクリートの圧壊で決定する場合をそれぞれ示している。この図より、軸力比 $n \leq 0.4$ の範囲では鉄骨の引張側フランジで決定し、 $0.5 \leq n$ 以降ではコンクリートの圧壊で決定する場合が多いことがわかる。特に、鉄骨の材料強度が高強度になるほど降伏歪が上昇するため、コンクリートの圧壊で決定されやすくなる傾向がある。一方で、 $b/t=133$ のように鋼管幅厚比が大きいとコンクリートを拘束する効果が薄れるため、軸力比 $n=0.4$ でもコンクリートの圧壊で決定する場合が見られた。また、軸力比 $n=0.6$ で降伏時に降伏耐力 M_y が一般化累加強度 M_{pc1} を発揮することがある。

図10 降伏点の耐力

図11 降伏点の変形

図12 $b/t=89$ の鋼管で拘束されたコンクリートの応力-歪関係

図13 降伏点が鉄骨で決定する場合の解析値と評価式の比較

降伏耐力とその曲率は、鉄骨降伏で決定する場合は鉄骨降伏点に依存し、コンクリートの圧壊で決定する場合は鋼管幅厚比に大きく左右される。図10からコンクリートの圧壊で決定する場合、軸力比 $n=0.6$ でのばらつきが大きいことに留意して更に分析を行ったところ、コンクリート強度の影響を受けることが分かった。

通常、コンクリートは高強度になるほど圧壊歪が上昇する。コンクリートの圧壊で決定する評価式内には、コンクリート強度による影響も考慮しているが、図12より拘束されたコンクリートの圧壊歪はシリンダー強度に拘らず近い値をとることがわかる。よって、本柱材の降伏点に特に影響を及ぼすのは、鋼管幅厚比と鉄骨降伏点であると考えられる。

図13, 14に降伏点が鉄骨降伏で決定する場合とコンクリート圧壊で決定する場合の弾塑性解析と評価式の比較をそれぞれ示す。大部分が精度よく評価できてることがわかる。なお、鉄骨降伏で決定する場合の耐力とその曲率の評価式による計算値に対する解析値の比の統計値は、それぞれ平均値1.00, 1.01, 変動係数2.81%, 2.89%であり、コンクリートの圧壊で決定する場合の耐力とその曲率は、それぞれ平均値1.00, 1.00, 変動係数1.68%, 7.99%であった。

3.4 最大耐力点

弾塑性解析から最大耐力点についてまとめた結果を図15に示す。図より最大耐力 M_{max} の値は軸力比が大きくなるほど増加していることが分かる。これは高軸力比になるほどコンクリートが圧縮力を負担し、十字鉄骨及び薄肉鋼管による拘束効果(図16参照)によってコンクリートの圧縮強度及び強度発揮後の強度低下性状が改善されるためだと考えられる。降伏点がコンクリートの圧壊で決定した場合でも、金の進行に伴い鉄骨が全塑性状態に近づくまでの間、拘束効果

図14 降伏点がコンクリートで決定する場合の解析値と評価式の比較

によってコンクリートの耐力が低下しにくくなり柱材の耐力を上昇させることが可能となる。また、全塑性モーメント M_{pc1} を求める際にはシリンダー強度 σ_B を使用しているが、実際には「字鉄骨及び薄肉鋼管による拘束でコンクリートの強度が上昇する。図16の拘束コンクリートの応力-歪関係からわかるように(図中の鋼管拘束と表記した応力-歪曲線は鋼管幅厚比 $b/t=89$ でコンクリートを拘束したもの、 K は拘束コンクリートの強度をシリンダー強度 σ_B で除した値を、それぞれ示す)、この上昇率はコンクリート強度が小さいほど大きな効果を持つため、低強度コンクリートになるほど合成効果を発揮しやすくなることによる。図17に最大耐力発揮時の曲率 ϕ_{max} を解析によって求めた結果を示す。軸力比が大きくなると柱材の応力状態が厳しくなるため早期に最大耐力に達することがわかる。また鋼管幅厚比が小さくなると曲率が大きくなるのは、拘束効果によりコンクリートの圧壊歪が上昇するためである。

弾塑性解析をもとに分析を行った結果、最大耐力点に影響を及ぼすのは軸力比、コンクリート強度、鋼管幅厚比であることがわかった。これらの影響因子を定量的に分析するにあたり、図15から軸力比 $n=0.2$ 付近で中立軸位置の影響もあり回帰直線の傾きが変化していることから、最大耐力を表2中の式(10)、(12)で評価した。また最大耐力発揮時の曲率は、低軸力下になるとコンクリートの圧縮領域は小さくなるため鉄骨の負担分が増加し、鉄骨降伏点の影響を受けるため軸力比が $0.1 \leq n < 0.2$ の範囲でばらつきが大きくなる。よって最大耐力発揮時の曲率を定量的に評価するにあたり、軸力比が $0.1 \leq n < 0.2$ の範囲では鉄骨降伏点の影響を考慮した式(11)で、 $0.2 \leq n \leq 0.6$ ではコンクリート強度を影響因子とした式(13)で評価する。

解析値と評価式の比較を図18に示す。曲率 ϕ_{max} にややばらつきが見られるが耐力 M_{max} は精度よく収まっている。なお、最大耐力点の

耐力及びその曲率の評価式による計算値に対する解析値の比の統計値は、それぞれ平均値1.00、1.04、変動係数2.05%、9.05%であった。

3.5 限界変形点

限界変形点として、被りコンクリートがなく拘束効果によって耐力の低下が抑えられることを考慮して、最大耐力が90%まで低下した点をとった。限界変形時の耐力及びその曲率を表2中の式(14)、(15)、(16)で評価する。

弾塑性解析の結果を図19に示す。限界変形点はばらつきが大きくなったので、 $\phi_{u90} \cdot D=0.033$ (部材角にして5%、図中点線で示す)の時点で90%まで低下したデータのみを用いて回帰的に定式化を行った。図より耐力低下を抑える役割を果たす鋼管幅厚比が小さいほどコンクリートの拘束効果が発揮されるため、限界変形点を発揮する曲率が人さくなっていることがわかる。このことから、限界変形点は軸力比、コンクリート強度、鋼管幅厚比に大きく影響されることがわかった。なお、低軸力下でコンクリート強度が低く、鋼管幅厚比が小さい場合(図19(a)参照)には耐力低下がほとんど見られないため、弾塑性挙動を考慮した結果、 $0.1 \leq n < 0.2$ で $\sigma_B < 60\text{N/mm}^2$ かつ $b/t \leq 89$ のときは部材角5%に相当する変形まで最大耐力を保持できるものとして評価しても危険側の評価とならないことを確認した。

解析値と評価式の比較を図20に示す。耐力における比較は M_{u90} を M_{pc1} で無次元化したものを示している。曲率はばらつきが大きいが、これは高軸力下で鋼管幅厚比が大きい場合にばらつきが多く、急激な耐力低下を正確に追跡することが困難なことによる。しかしながら、これらの点については評価式が安全側の値をとるように配慮している。限界変形時の耐力及びその曲率の評価式による計算値に対する解析値の比の統計値は、それぞれ平均値1.00、1.09、変動係数2.04%、16.2%であった。

図15 最大耐力点の耐力

図16 コンクリートの応力-歪関係

図17 最大耐力発揮時の曲率

(a) 耐力 M_{max}

(b) 曲率 $\phi_{max} \cdot c \cdot D$

図18 最大耐力点の解析値と評価式の比較

図19 最大耐力点の解析値と評価式の比較

4. 評価式の精度検証

4.1 評価式と弾塑性解析結果の比較

図21に表2に記載している骨格曲線の評価式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の、点線は弾塑性解析結果をそれぞれ表している。また、内蔵十字鉄骨寸法による違いは見られなかったことから、ここではCH-644x199x10x16を使用した条件で統一している。図21(a)にコンクリート及び鉄骨の材料強度の組合わせが評価式と弾塑性挙動に与える影響を比較したグラフを示す。材料強度の組合わせに拘らず、評価式は弾塑性解析を精度よく追跡できていることがわかる。また、鉄骨降伏点に $\sigma_y=400\text{N/mm}^2$ といった高強度鋼を使用すると、 $\sigma_y=235\text{N/mm}^2$ と比較して最大耐力発揮時の曲率は変わらないが、降伏点の曲率が大きくなっている。

コンクリート強度と鋼管幅厚比及び軸力比の違いについて比較した結果を図21(b), (c), (d)に示す。ここでは、内蔵十字鉄骨寸法に加えて、鉄骨降伏点についても $\sigma_y=330\text{N/mm}^2$ で統一している。コンクリート強度 $\sigma_B=30\text{N/mm}^2$ を鋼管幅厚比 $b/t=133$ で拘束した場合、軸力比 $n=0.5$ の高軸力下でも十分な変形性能を示していることがわかる(図21(b)参照)。軸力比が大きくなるとコンクリートの耐力低下が著しくなるため、柱材の変形性能が低下する。特に高強度コンクリートになるほど耐力低下域における耐力低下は十分に注意しなければならない。図21(c)より、軸力比 $n=0.3$ 程度であればコンクリート強度 $\sigma_B=60\text{N/mm}^2$ 使用時でも鋼管幅厚比133といった非常に薄い鋼管でも安定した挙動が得られることがわかる。しかしながら、軸力比 $n=0.5$ の高軸力下で高い変形性能を要求するならば鋼管幅厚比を89程度まで厚くしておく必要がある。本研究で使用を想定している鋼管幅厚比は100前後であるが、図21(d)のようにコンクリート強度 $\sigma_B=90\text{N/mm}^2$ を使用するとき、高軸力下ならば鋼管幅厚比を67以下とするか、軸力比 $n=0.3$ 程度で留めておくことがよい。鋼管幅厚比133で軸力比 $n=0.5$ を作用させると柱材は軸力を負担できず安定した解析結果が得られなかった。また、高軸力比になるほど降伏点から最大耐力点に至るまでの耐力上昇率が小さく、変形量も小さい。これは降伏点が鉄骨で決定する場合でもコンクリートで決定する場合でも見られる現象であり、過度に変形が進行した場合でも耐力低下を抑えられるようにコンクリート強度と鋼管幅厚比の組合わせに留意する必要がある。

ここでは解析結果の一例のみを示しているが、解析値と評価式の比較でばらつきが見られた限界変形点を含めて、全体的に評価式は弾塑性解析結果を精度よく評価している。

図20 限界変形点の解析値と評価式の比較

4.2 評価式と弾塑性実験結果の比較

図22に骨格曲線の評価式と実験結果の比較を示す。図中の実線は評価式から求めた各特異点を結んだものの、点線は実験結果をそれぞれ表している。ここで、 b/t は鋼管の幅厚比、 n は軸力比、 σ_B はコンクリート強度である。評価式は式(1), (2), (22)に従い、水平力 Q 一部材角 R 関係に変換している。

$$Q = \frac{M}{L} - N \cdot R \quad (22)$$

比較した結果、評価式で求めた四つの特異点は実験結果を精度よく追跡していることがわかる。

5. 結論

鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性解析を行い、柱材の挙動を定量的に検討した。その結果、復元力特性として骨格曲線上の四つの特異点について評価式を提案したところ、以下のことが明らかとなった。

- 1) 四つの特異点(曲げひび割れ発生点、降伏点、最大耐力点、限界変形点)で柱材の弾塑性挙動をよく評価できる。
- 2) 各特異点に影響を及ぼすのは軸力比、コンクリート及び鉄骨の材料強度、鋼管幅厚比であり、最大耐力点以降においてはコンクリート強度と鋼管幅厚比の影響を大きく受ける。また、内蔵十字鉄骨比は本解析の範囲内では影響は見られなかった。
- 3) 本柱材は高強度コンクリートを高軸力下において使用する場合、 $\sigma_B=60\text{N/mm}^2$ 級では鋼管幅厚比を89程度、 $\sigma_B=90\text{N/mm}^2$ 級では鋼管幅厚比を67程度にすると安定した復元力特性を示す。
- 4) 骨格曲線の評価式は、解析結果及び実験結果を精度よく評価しているため、本論で提案した評価式の精度は高いと考えてよい。

図 21 評価式と弾塑性解析結果の比較

図 22 評価式と弾塑性実験結果の比較

表2 骨格曲線上的特異点の評価式一覧

特異点	評価式	備考
曲げひび割れ発生点	$\frac{M_{cr}}{M_{pci}} = 0.073 + 0.026f_c + 1.1n$ (3)	
	$\phi_{cr} = \frac{0.013 + (0.32 + 0.042f_c)n}{cD} \cdot 10^{-2}$ (4)	
降伏点	$\phi_y = \min(\phi_{sy}, \phi_{cy})$ (5)	
	$\frac{sM_y}{M_{pci}} = 0.38 + 0.17f_s + (1.1 - 0.18f_s)n$ (6)	鉄骨フランジの引張降伏で決定するとき
	$\phi_{sy} = \frac{0.22f_s + (0.3 + 0.34f_s)n}{cD} \cdot 10^{-2}$ (7)	
	$\frac{cM_y}{M_{pci}} = 0.23 + 0.55b_t + (0.21 - 0.15b_t)f_c + \{1.9 - 1.5b_t + (-0.52 + 0.37b_t)f_c\}n$ (8)	コンクリートの圧壊で決定するとき
	$\phi_{cy} = \frac{0.72 + 0.053b_t + \{0.8 - b_t + (-0.33 + 0.16b_t)f_c\}n}{cD} \cdot 10^{-2}$ (9)	
最大耐力点	$\frac{M_{max}}{M_{pci}} = 1.15 - 0.13b_t - (0.1 + 0.04f_c)n$ (10)	軸力比 n の範囲が $0.1 \leq n < 0.2$ のとき
	$\phi_{max} = \frac{0.12 + 0.37b_t + (1.3 - 0.46b_t)f_s + \{6.1 - 2.9b_t + (-5.1 + 1.3b_t)f_s\}n}{cD} \cdot 10^{-2}$ (11)	
	$\frac{M_{max}}{M_{pci}} = 1.06 - 0.11b_t + (0.33 - 0.094f_c)n$ (12)	軸力比 n の範囲が $0.2 \leq n \leq 0.6$ のとき
	$\phi_{max} = \frac{1.7 - 0.65b_t + 0.08f_c + (-1.2 + 0.8b_t - 0.3f_c)n}{cD} \cdot 10^{-2}$ (13)	
限界変形点	$\frac{M_{u90}}{M_{max}} = 0.9$ (14)	
	$\phi_{u90} = \frac{10 - 2.2f_c + (-24 + 5.5f_c)n}{cD} \cdot 10^{-2}$ in case $c\sigma_B \geq 60\text{N/mm}^2$ and $b/t > 89$ (15)	軸力比 n の範囲が $0.1 \leq n < 0.2$ のとき
	$\phi_{u90} = \frac{13.4 - 4.7b_t + (-2.2 + 0.39b_t)f_c + \{-12.3 + 3.4b_t + (1.3 + 0.22b_t)f_c\}n}{cD} \cdot 10^{-2}$ (16)	軸力比 n の範囲が $0.2 \leq n \leq 0.6$ のとき

$$f_c = \frac{c\sigma_B}{30(\text{N/mm}^2)} \quad (17), \quad f_s = \frac{s\sigma_y}{295(\text{N/mm}^2)} \quad (18), \quad b_t = \frac{b/t}{100} \quad (19), \quad {}_{sc}N_u = {}_s\sigma_y \cdot {}_sA + {}_c\sigma_B \cdot {}_cA \quad (20), \quad n = \frac{N}{{}_{sc}N_u} \quad (21)$$

ここで、 M_{pci} :鉄骨の降伏点 σ_y とコンクリート強度の σ_B を用いて計算した一般化累加強度、 D :柱断面せい、 b :柱断面幅、 t :鋼管板厚、 A :鉄骨断面積、 c :コンクリート断面積、 $c\sigma_B$:コンクリート強度(N/mm²)、 $s\sigma_y$:鉄骨降伏点(N/mm²)、 n :軸力比、 N 、 N_u :それぞれ、作用軸力及びSC柱断面の圧縮耐力である。なお、曲率 ϕ から部材角 R への変換は式(1)、(2)による。

謝辞

本研究は高岸幸成氏をはじめとする平成22年度福岡大学堺研究室の大学院生及び卒研生にお世話になった。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.53B，pp.383-388，2007.3
- 2) 河本裕行，堺純一，松原佳毅：横補強鋼管を用いた鉄骨コンクリート柱材の中心圧縮試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No. 3，pp.97-102，2007
- 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，日本建築学会構造工学論文集，Vol.57B，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コンクリートの構成則に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No. 2，pp.1201-1206，2009.7
- 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，No.534，pp.183-190，2000.8
- 6) 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
- 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
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説，pp.59-79，2004.1

(2011年9月9日原稿受理，2011年12月5日採用決定)