

論文 曲げ変形が卓越する鉄骨鉄筋コンクリート柱材の耐震性能評価法に関する研究

大坪 朋未*1・倉富 洋*2・田中 照久*3・堺 純一*4

要旨:鉄骨鉄筋コンクリート構造は鋼構造と鉄筋コンクリート構造を組合わせた合成構造であり、地震力を受けるときの柱材の挙動は複雑化する。力学的に合理的な設計が可能となる性能設計を行う上でも、SRC部材の耐震性能を精度良く評価できる設計法や検証法を整備することが必要である。そこで本研究では、骨格曲線と履歴曲線から構成されるSRC部材の復元力特性のモデル化を検討し、各特異点において解析的に評価式を提案する。また、履歴曲線の除荷点が、骨格曲線上にない現象がみられるが、履歴曲線の除荷点は骨格曲線上の点にあることを想定しているため、載荷軸力に関する適用条件について検討することも目的とする。

キーワード:復元力特性, 安定限界軸力, 骨格曲線, 履歴曲線

1. 序論

鉄骨鉄筋コンクリート構造（以下SRCと略記）は鋼構造と鉄筋コンクリート構造を組合わせた合成構造であり、それぞれの特徴を併せ持つため、地震力を受けるときの柱材の挙動は複雑化する。力学的に合理的な設計が可能となる性能設計を行う上でも、SRC部材の耐震性能を精度良く評価できる設計法や検証法を整備することが必要である。

著者らは、十字鉄骨を内蔵したSRC断面を対象として、鉄骨で囲まれたコンクリートの拘束効果について検討し、その評価法(図-1参照)を提案したり。コンクリートの拘束効果を考慮した弾塑性解析を行うことにより、SRC柱材の曲げせん断実験の挙動を精度よく評価できることを明らかにしている。

構造性能を精度よく評価するために、各部材の復元力特性を明確にしておく必要があり、既往の研究では骨格曲線から構成されるSRC部材の復元力特性のモデル化を行っている。骨格曲線は、曲げひび割れ発生点、降伏点、

最大耐力点、限界変形点の4つの特異点から成るものとし、各特異点において解析的に評価式を提案している。

そこで、本研究では履歴曲線から構成されるSRC部材の復元力特性のモデル化を検討し、評価法を提案する。履歴曲線は除荷点、残留変形点、中間点の3つの特異点から成るものとし、各特異点において解析的に評価式を提案する。また、軸力比がSRC柱材の挙動に及ぼす影響は大きく、載荷する軸力の大きさによっては、履歴曲線の除荷点が、コンクリートの圧壊による抵抗力の低下により、骨格曲線上にない現象がみられる。履歴曲線の除荷点は骨格曲線上の点にあることを想定しているため、載荷軸力に関する適用条件の検討が必要である。本研究では、この適用条件についても検討する。

2. 解析計画

2.1 柱材の解析モデル

軸力と曲げせん断を受けるSRC柱材の弾塑性挙動を解析的に検討した。解析モデルを図-2に示すような弾塑性ヒンジ部と剛体からなるモデルとし、SRC柱材の変形を弾塑性ヒンジ部に集中させ、その点の断面のモーメント

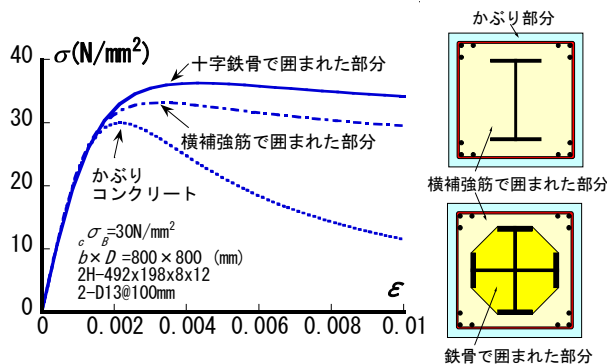


図-1 コンクリート応力-歪関係

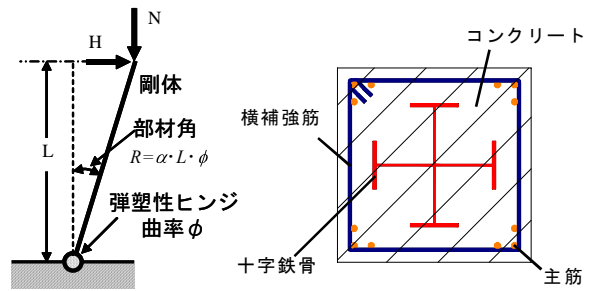


図-2 解析モデル

図-3 解析断面

*1 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (学生会員)
 *2 福岡大学 工学部建築学科助教 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 福岡大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

一曲率関係を算定し、水平力と部材角の関係求めた。ここで、弾塑性ヒンジ部での曲率 ϕ と部材角 R には式(1)、(2)が成立すると仮定している。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である²⁾。

$$R = \alpha \cdot L \cdot \phi \quad (1)$$

$$\alpha = 0.1 + 1.3 \frac{D}{L} \quad (2)$$

ここで、 L : 柱材長、 D : 断面せいである。図-3に解析断面を示す。

2.2 鋼材の応力-歪関係

鋼材の応力-歪関係は図-4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 $E=2.05 \times 10^5$ (N/mm²)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-型のモデルとした。繰返しに伴う除荷後の挙動については、バウシinger部の構成則に加藤らの双曲線のモデル³⁾を用い、バウシinger部の終点の歪は山田らの提案式⁴⁾を用いた。鋼材の応力-歪関係の詳細については文献1)を参照されたい。

2.3 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⁵⁾を元に、十字鉄骨で横拘束された効果を考慮した評価式¹⁾を用いた(図-1参照)。繰返し則は渡辺らのモデル⁶⁾を用いた。図-5に横拘束効果の一例を示す。

2.4 解析結果と実験挙動の比較

著者らが行った実験⁷⁾と本解析との比較を行った。図-6にSRC柱材の試験体と載荷装置を示す。図-7に解析結果と実験挙動の水平力-部材角関係の比較を示す。試験体は十字鉄骨を内

蔵したSRC柱材であり、実験変数をせん断スパン比 L/D および軸力比 n としている。せん断スパン比と軸力比の違いにかかわらず、解析結果が実験挙動を精度良く追跡している。なお、軸力比が0.5の場合については、高軸力であることから水平抵抗力がなくなるものの、作用軸力を最後まで保持できている実験挙動を精度良く評価できていると考えられる。

以上より、本解析はSRC柱材の実験挙動を追跡できるとし、本解析を用いて、履歴曲線を検討する。

3. 復元力特性のモデル化

3.1 骨格曲線

図-8に、骨格曲線のモデル化を示す。骨格曲線の定式化は文献8)を参照されたい。

3.2 履歴曲線の定式化

(1) 解析計画

SRC柱材の復元力特性の履歴曲線は図-9に示すように、除荷点、残留変形点、中間点の3つの特異点で構成されるものとした。ここで、除荷点は骨格曲線上の点を通るものとしている。骨格曲線と同様、定量的な検討を行い、各特異点ごとに定式化する。また、図-3に示すSRC断面を対象とし、表-1に示すような、鉄骨比、鉄骨降伏点、コンクリート強度、横補強筋比、軸力比を解析変数にとり、各

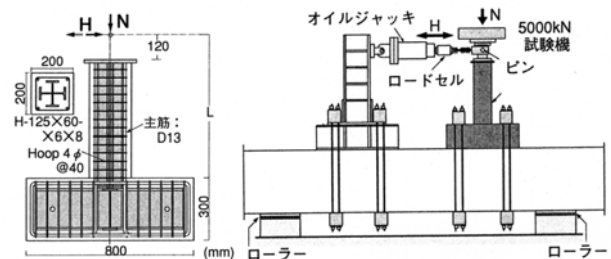


図-6 SRC柱の試験体及び載荷装置

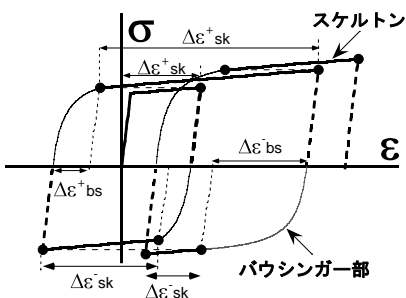


図-4 鉄骨の応力-歪関係

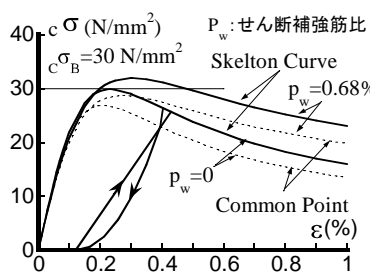


図-5 コンクリートの繰返し則

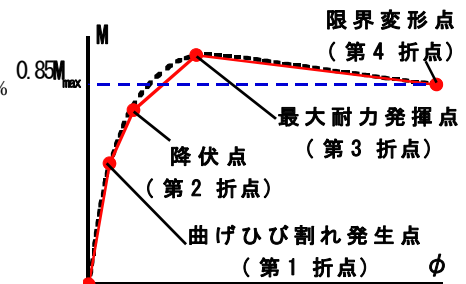
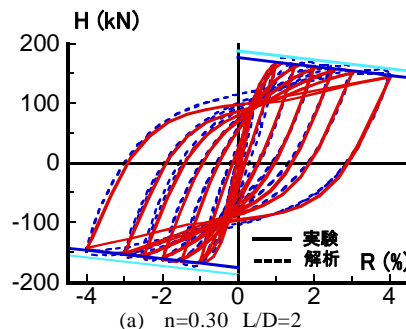
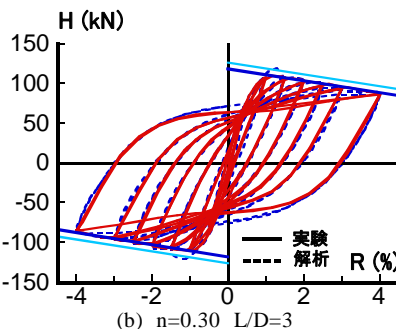


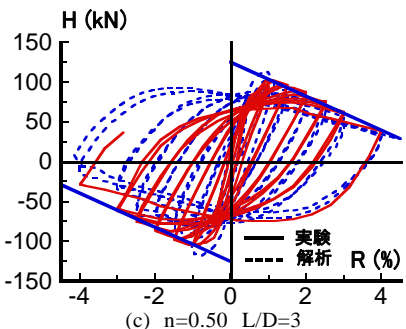
図-8 骨格曲線のモデル化



(a) $n=0.30$ $L/D=2$



(b) $n=0.30$ $L/D=3$



(c) $n=0.50$ $L/D=3$

図-7 実験挙動と解析結果の比較

特異点に及ぼす影響因子を定量的に評価した。解析方法は各部材角ごとに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のモデル化を対象とする。

(2) 除荷点 M

ループの最大応力点である除荷点Mは、弾塑性解析で得られた除荷点をとる。

(3) 除荷剛性(残留変形点R)

曲げモーメントが0となる残留変形点R_rは、図-10に示すように、エネルギー吸収量を精度よく評価するため、エネルギー損失量(図中で囲んだ領域)とM_{max}、R_{max}、R_r点で囲まれた面積が等しくなるようにとった。除荷剛性の評価方法は、式(3)を元にして鉄骨比や軸力比といった影響因子を組み込んだ評価式を提案する。

$$K_r = \frac{M_{max}}{R_{max} - R_r} \text{src}K \quad (3)$$

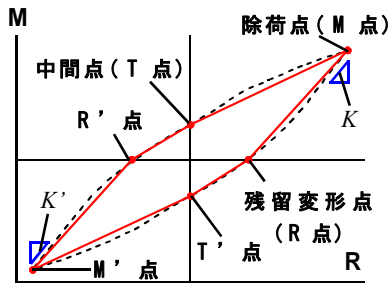


図-9 履歴曲線のモデル化

表-1 解析変数

内蔵鉄骨寸法 (mm)	CH-492x198x8x12 (p=2.65%)
	CH-506x200x10x19 (p=3.84%)
	CH-524x204x14x28 (p=5.59%)
鉄骨降伏点 σ _y (N/mm ²)	235 300 350 400
コンクリート強度 σ _c (N/mm ²)	24 30 42 60
横補強筋比 p _w (%)	0.1 0.3 0.6
軸力比 n	0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 (0.1刻み)
共通事項	柱断面: 800x800(mm)
	主筋: 12-D25(SD345)(鉄筋比:0.95%)
	横補強筋: D13 (SD345)

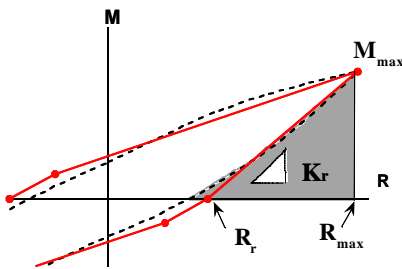


図-10 残留変形点の算出法

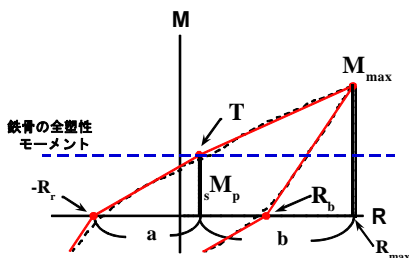


図-11 中間点の算出法

ここで、_{src}K:SRC部材の初期剛性、R_{max}:最大応答部材角、R_r:降伏点部材角である。式(3)により得られた傾きK_rを定式化することで、R点を算定することができる。回帰分析を行った結果、表-2に部材角ごとに評価した式を示す。影響因子は、軸力比、コンクリート強度、鉄骨比である。

(4) 中間点 T

中間点のモーメント値は、図-11に示すように、鉄骨の全塑性モーメントを發揮するときの点とし、中間点の変形は半ループのエネルギー吸収量と、M_{max}点、R_b点、-R_r点を結ぶ範囲の面積が等しくなる点をとる。

図-11において、-R_r点とT点のx座標の距離をa、T点とM_{max}点のx座標の距離をbとし、表-3にa/(a+b)を部材角ごとに評価した式を示している。影響因子は軸力比、コンクリート強度、鉄骨比である。また、部材角が0.5%の場合、変形が小さく弾性域であるとみなしT点は考慮せず、全て曲げひび割れ発生点をとる。

(5) 評価式の精度

図-12、図-13にそれぞれの残留変形点と中間点の変形について、解析で得られたそれぞれの点と評価式による点の比較を示している。それぞれの図中に、(評価式/解析値)の平均値と変動係数を示している。図-12より、残留変形点については、部材角1.0%のときに、ばらつきが大きい結果となっている。これは、高軸力と高強度コンクリートの影響であり、今後さらなる検討の必要がある。

また、図-14にモデル化した履歴曲線と解析結果の比較を示している。特に、影響が大きかった影響因子の軸力比と、コンクリート強度の比較をそれぞれ示しているが、解

表-2 残留変形点Rの評価式

部材角	評価式
0.5%	0.32+0.036 _p +(-0.069+0.0058 _p)f _c +{0.024-0.030 _p +(0.78-0.039 _p)f _c }n
1.0%	0.28+0.029 _p +(-0.051+0.0089 _p)f _c +{0.014-0.027 _p +(0.79-0.042 _p)f _c }n
1.5%	0.26+0.026 _p +(-0.011+0.0041 _p)f _c +{0.41-0.088 _p +(-0.25+0.055 _p)f _c }n
2.0%	0.21+0.032 _p +{0.012-0.0021 _p }f _c +{-0.019+0.0026 _p +(-0.0026-0.0082 _p)f _c }n
2.5%	0.21+0.03 _p +{0.0053-0.0017 _p }f _c +{0.0052-0.0029 _p +(-0.052+0.0025 _p)f _c }n
3.0%	0.22+0.029 _p -0.024f _c +{-0.16+0.032 _p +(0.088-0.03 _p)f _c }n

表-3 中間点Tの評価式

部材角	評価式
1.0%	0.25+0.058 _p +(-0.052-0.0061 _p)f _c +{0.47-0.16 _p +(-1.6+0.27 _p)f _c }n
1.5%	0.21+0.039 _p +{0.027-0.0029 _p }f _c +{-0.2-0.007 _p +(-0.59+0.036 _p)f _c }n
2.0%	0.073+0.062 _p +{0.21-0.034 _p }f _c +{0.21-0.091 _p +(-1.9+0.31 _p)f _c }n
2.5%	0.15+0.045 _p +{0.14-0.023 _p }f _c +{-0.13-0.051 _p +(-0.57+0.081 _p)f _c }n
3.0%	0.18+0.03 _p +{0.11-0.0047 _p }f _c +{-0.45+0.022 _p +(-0.19-0.025 _p)f _c }n

※_p=sA_{src}/A, f_c=σ_y/30, n=N_{src}/N_U

ここで、_sA: 十字鉄骨の断面積、_{src}A: SRC柱の全断面積、σ_y: コンクリート強度 (N/mm²)、N: SRC柱に作用する軸力、_{src}N_U: SRC断面の圧縮耐力である。

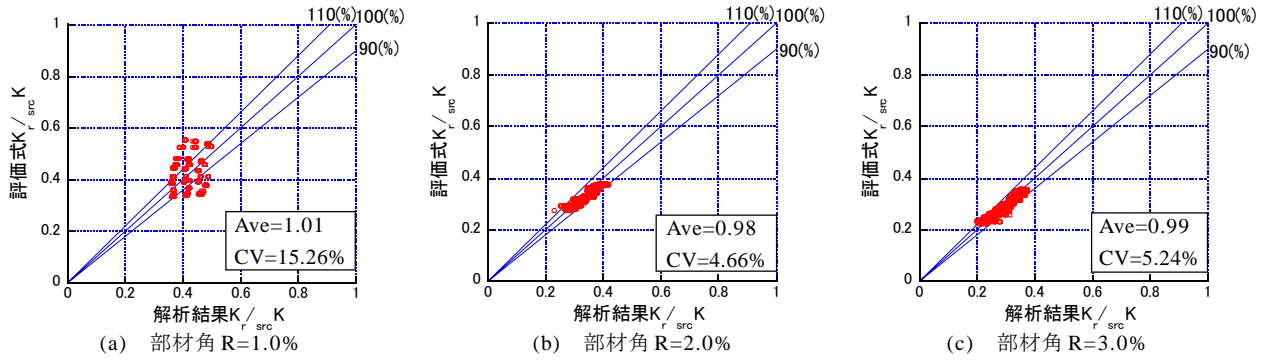


図-12 評価式と解析値の比較(残留変形点R)

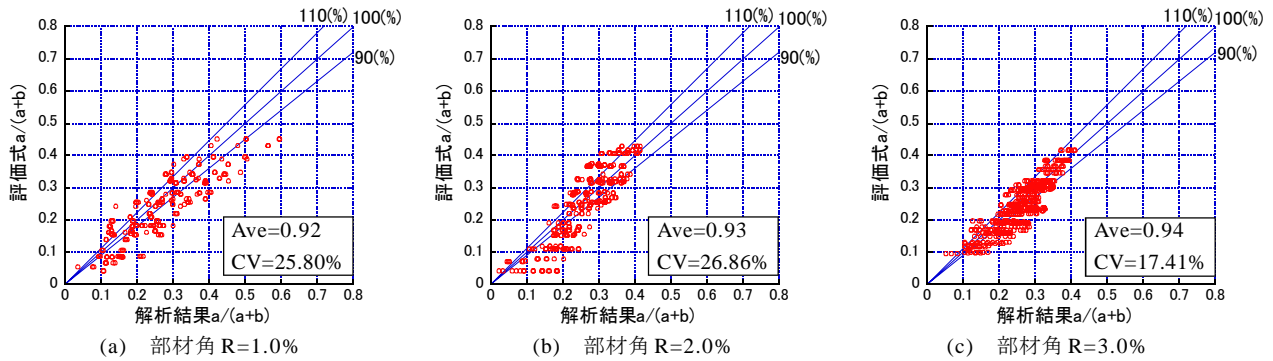


図-13 評価式と解析値の比較(中間点T)

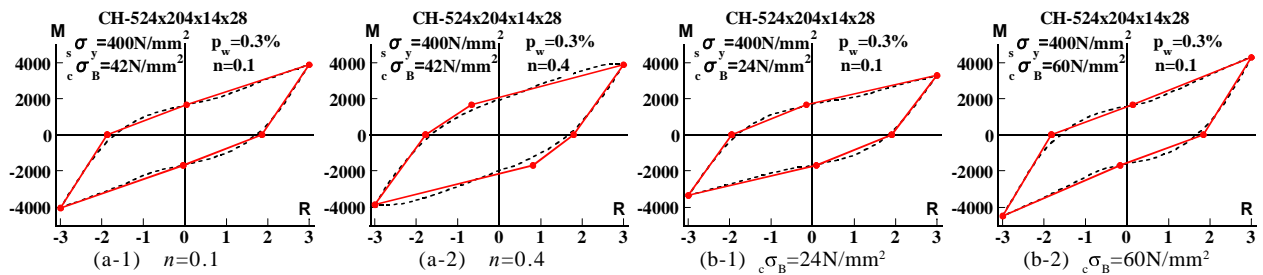


図-14 モデル化した履歴曲線と解析結果の比較(R=3.0%)

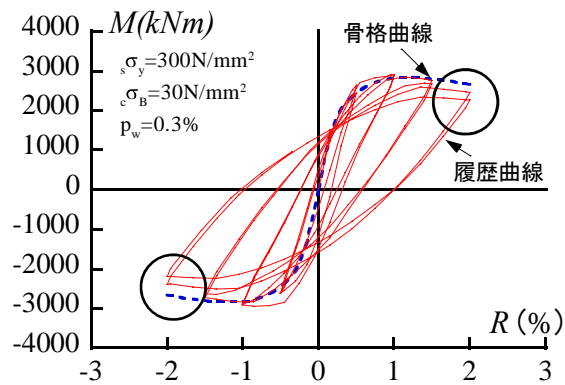


図-15 M-R 関係図 (n=0.50 載荷時)

析結果を追跡できているため、履歴曲線の精度は高いといえる。

4. 評価式の適用条件

4.1. 評価式の適用条件

図-15に示すように、高軸力下においては繰返し載荷時の除荷点が骨格曲線上にないこともあり、履歴曲線の評価式が危険側に評価されることとなる。履歴曲線の除荷点が骨格曲線上の点から離れる現象は、繰返しに伴うコ

ンクリートの耐力低下が主な要因であると考えられる。本評価式の適用条件は除荷点が骨格曲線上にあることが前提となる。そこで、これを満たす適用条件について検討する。この適用条件については、断面に作用する軸力が大きく影響してくる。

著者らは、SRC柱材を対象に安定限界軸力について検討し、部材角 $2/100\text{rad}$ までの柱材の安定限界軸力の評価法⁹⁾を示している。一定軸力下で多数回の繰返し水平力を受ける柱材の中心軸歪が一定値に収束し、収束するときの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いなければ安定状態と見なせる。そのときの最大の軸力を安定限界軸力と定義している。

軸力を安定限界軸力以下にしておけば、除荷点が骨格曲線上の点にあることになり、これが評価式の適用条件とみなせると考えられる。そこで、この条件設定の妥当性について検討する。

4.2 安定限界軸力

各部材角における安定限界軸力を算定するため、表-4に示すような解析変数を取り解析を行った。図-16に解析

における安定不安定の判別方法を示す。同図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。図中の中心軸歪挙動より、軸力比 $n=0.33$ では中心軸歪が一定値に収束しており、 $n=0.34$ 以上の軸力比では増加

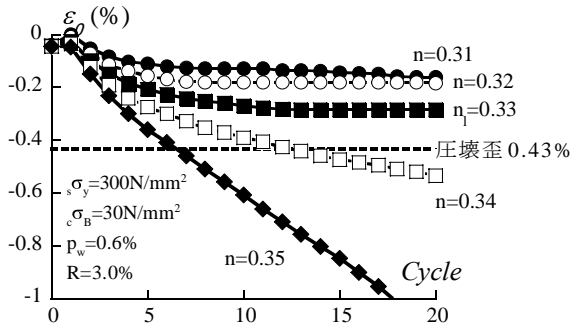


図-16 中心軸歪挙動

し続けている。この解析条件における安定限界軸力は $n=0.33$ と判定される。以上の方法により、求めた安定限界軸力比の一覧を表-5に示す。

4.3 骨格曲線と履歴曲線の比較

図-17に安定限界軸力を載荷したときの骨格曲線と履歴曲線の一例を示す。鋼材とコンクリートの材料強度、横補強筋比、部材角の違いにかかわらず、表-5で示した安

表-4 解析変数

鉄骨降伏点 $s\sigma_y$ (N/mm ²)	235 300 400
コンクリート強度 $c\sigma_B$ (N/mm ²)	24 30 42 60
横補強筋比 p_w (%)	0.1 0.3 0.6
部材角 R (%)	1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 4.0
共通事項	柱断面: 800x800(mm)
	主筋: 12-D25(SD345)
	横補強筋: D13(SD345)
	内蔵鉄骨寸法: CH-492x198x8x12(mm)

表-5 安定限界軸力の解析結果一例

R (%)	$c\sigma_B$	p_w	$s\sigma_y$			R (%)	$c\sigma_B$	p_w	$s\sigma_y$		
			235	300	400				235	300	400
1.0	24	0.1	0.49	0.49	0.51	2.5	24	0.1	0.31	0.32	0.33
		0.3	0.51	0.52	0.53			0.3	0.32	0.32	0.35
		0.6	0.52	0.53	0.55			0.6	0.33	0.34	0.35
	30	0.1	0.48	0.49	0.50		30	0.1	0.33	0.33	0.35
		0.3	0.50	0.50	0.52			0.3	0.34	0.34	0.36
		0.6	0.51	0.50	0.51			0.6	0.35	0.35	0.37
	60	0.1	0.45	0.45	0.46		60	0.1	0.28	0.29	0.30
		0.3	0.46	0.46	0.47			0.3	0.29	0.30	0.31
		0.6	0.46	0.47	0.47			0.6	0.30	0.31	0.32
1.5	24	0.1	0.45	0.43	0.45	3.0	24	0.1	0.28	0.31	0.32
		0.3	0.44	0.44	0.46			0.3	0.30	0.31	0.33
		0.6	0.45	0.46	0.47			0.6	0.31	0.32	0.34
	30	0.1	0.41	0.42	0.44		30	0.1	0.30	0.31	0.32
		0.3	0.42	0.43	0.45			0.3	0.31	0.32	0.34
		0.6	0.43	0.44	0.45			0.6	0.32	0.33	0.34
	60	0.1	0.37	0.38	0.39		60	0.1	0.25	0.26	0.27
		0.3	0.39	0.39	0.40			0.3	0.26	0.27	0.28
		0.6	0.39	0.40	0.41			0.6	0.28	0.28	0.29
2.0	24	0.1	0.38	0.38	0.40	4.0	24	0.1	0.26	0.27	0.28
		0.3	0.40	0.39	0.41			0.3	0.26	0.27	0.29
		0.6	0.40	0.40	0.42			0.6	0.27	0.28	0.29
	30	0.1	0.36	0.38	0.38		30	0.1	0.26	0.27	0.28
		0.3	0.38	0.38	0.40			0.3	0.24	0.28	0.29
		0.6	0.39	0.40	0.41			0.6	0.25	0.29	0.30
	60	0.1	0.32	0.33	0.34		60	0.1	0.21	0.22	0.23
		0.3	0.34	0.35	0.35			0.3	0.22	0.23	0.24
		0.6	0.34	0.35	0.36			0.6	0.23	0.24	0.25

※ここで、 R : 部材角 (%), $c\sigma_B$: コンクリート強度 (N/mm²), $s\sigma_y$: 鉄骨降伏点 (N/mm²), p_w : 帯筋比 (%) である。また、安定限界軸力比は安定限界軸力を SRC 断面の圧縮耐力で除したものである。

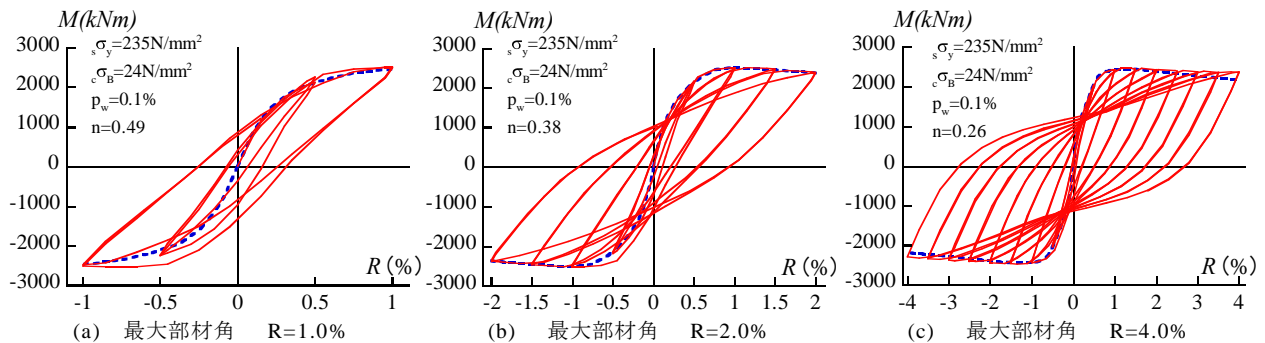


図-17 安定限界軸力載荷時の骨格曲線と履歴曲線の比較(その1)

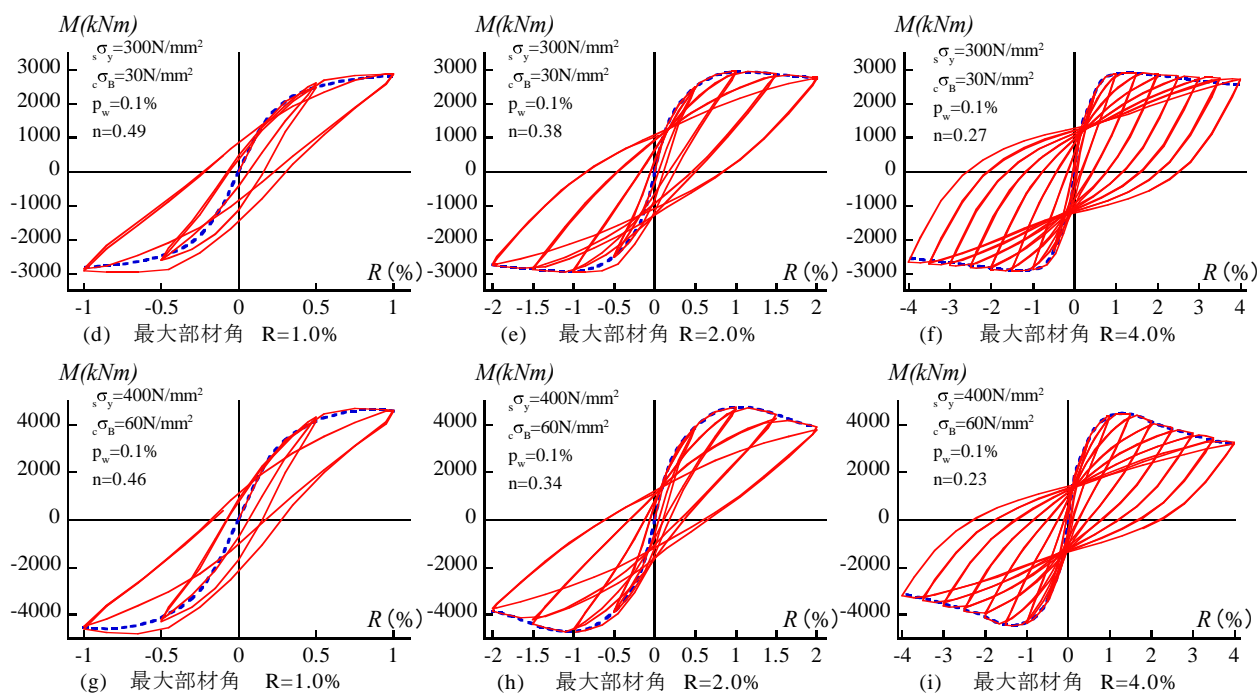


図-17 安定限界軸力載荷時の骨格曲線と履歴曲線の比較(その2)

定限界軸力載荷時では履歴曲線の除荷点と骨格曲線は一致していることがわかる。以上より、安定限界軸力が本研究で提案された復元力特性の評価式の適用範囲として成り得るものと推察される。また、部材角 $R=2.0\%$ までの変形における安定限界軸力比を算定できる評価式⁹⁾もすでに提案されており、定量的な評価も可能である。

5. 結論

SRC柱材の弾塑性解析を行い、履歴曲線の定式化および、履歴曲線の評価式の適用条件について検討したところ、以下のことがわかった。

- 1) SRC柱材の履歴曲線を、除荷点、残留変形点、中間点の3つの特異点でモデル化した結果、弾塑性挙動を精度よく評価できる。
- 2) 残留変形点では、影響因子にかかわらず、弾塑性解析結果を比較的精度よく評価できている。しかし、中間点では高軸力、高強度コンクリートを用いた場合は、中間点をうまく追跡できず、今後も検討の余地がある。
- 3) 安定限界時の軸力比以下であれば、履歴曲線の除荷点は骨格曲線上の点と一致する。
- 4) 部材角 4.0% までの各部材角における安定限界軸力比を算定した。
- 5) 本研究で提案された履歴曲線の評価式の適用範囲は、載荷軸力を安定限界軸力以下とする条件である。

参考文献

- 1) 坂田 学, 堺 純一, 田中照久, 檜垣直也: 十字鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート部材の弾塑性性状に関

する研究, 構造工学論文集, vol.57 B, pp.535-542, 2011.3

- 2) 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.
- 3) 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, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.937-938, 1973.10
- 4) 山田 哲, 今枝知子, 岡田 健: パウシンガ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, No.559, pp.225-232, 2002.9
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 李 麗, 堺 純一, 松井千秋: 軸力と繰返し曲げを受ける十字形鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート柱の弾塑性挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第596号, pp.151-157, 2005.10
- 8) 堺 純一, 田中照久, 倉富洋: 鉄骨鉄筋コンクリート柱材の構造性能評価法-骨格曲線の定式化-, 日本建築学会学術講演梗概集, C-1, pp.1307-1308, 2012.9
- 9) 川原健輔, 堺 純一, 田中照久, 倉富洋: 鉄骨鉄筋コンクリート柱材の安定限界軸力に関する研究, 構造工学論文集, vol.59 B, pp.101-107, 2013.3