

# 論文 RC柱の安定限界軸力比に及ぼす横補強筋の影響

崎野健治<sup>\*1</sup>・田福勝<sup>\*2</sup>・孫玉平<sup>\*3</sup>・大庭央久<sup>\*4</sup>

**要旨:** 鉄筋コンクリート (RC) 柱が一定軸力下で多数回の繰り返し曲げを受ける場合、軸力比が高い場合は材軸方向の縮みが累積したり顕著な耐力低下が生じるなどの不安定な挙動を示す。軸力比が低い場合はこのような現象は生じず、柱は安定な挙動を示す。本論においては、柱が安定な挙動を示すかあるいは不安定な挙動を示すかの境界となる軸力比を安定限界軸力比と定義した。ついで、安定限界軸力比に及ぼす横補強筋の影響を解析的に検討し、実験により解析方法の妥当性を検証した。

**キーワード:** 安定限界軸力比、多数回繰り返し曲げ、軸ひずみ、横補強筋、耐力低下

## 1. はじめに

RC柱の変形能力を定量的に把握することは、終局強度型耐震設計法を用いる場合には非常に重要である。RC柱の変形能力と載荷軸力比との関係、即ち限界変形或いは安定限界軸力比に関しては、平石らの研究<sup>1)</sup>をはじめ多くの研究がある。しかしながら、横補強筋の拘束度合いがRC柱の限界変形或いは安定限界軸力比に及ぼす影響については、その定量的な評価に関する研究はまだ充分とは言い難い。したがって本研究においては、横補強筋の拘束度合いがRC柱の安定限界軸力比に及ぼす影響を検討するとともに、その定量的評価法を提案した。また、提案した評価法の妥当性を調べるために、合計11体の試験体について一定軸力下における一定曲率振幅の繰り返し曲げ実験を行った。

## 2. 安定限界軸力比に関する解析的研究

### 2. 1 解析方法および解析仮定

一定軸力と繰り返し曲げモーメントを受ける拘束RC柱の弾塑性性状を、断面分割法を用い、次の仮定に基づき解析する。<sup>①</sup>平面保持を仮定する。

<sup>②</sup>コンクリートの引張強度を無視する。<sup>③</sup>拘束コ

ンクリートの応力-ひずみ関係は表-1および図-1に示すものを用いる。応力-ひずみ関係の包絡線は崎野・孫モデル<sup>2)</sup>に断面内のひずみ勾配の影響を考慮に入れたモデル<sup>3)</sup>である。再負荷曲線には既往の研究<sup>1,4)</sup>を参考にして直線式を用いる。残留塑性ひずみ $\epsilon_{pl}$ はIyengarらの式<sup>5)</sup>を参考にして決めた。<sup>④</sup>主筋の応力-ひずみ関係はManderらの提案式<sup>6)</sup>を用いる。<sup>⑤</sup>繰り返し載荷を受ける場合は、かぶりコンクリートはその圧縮ひずみが0.4%に達した時に剥離崩壊し、その後は圧縮応力を負担しないとする。

### 2. 2 解析結果に及ぼす載荷履歴の影響

上述した解析方法および解析仮定を用いて3種類の繰り返し載荷履歴の場合について解析を行い、解析結果の比較検討を行う。解析に用いる対象断面は、後述する実験で計画したE75タイプの試験体の断面である(図-5および表-2を参照)。3種類の繰り返し載荷履歴を図-2に示す。繰り返し曲率( $\Phi D$ )振幅の最大値を1.5%とし、繰り返し回数を20サイクルとした場合の解析結果を図-3および図-4に示す。

図-3に示すのは、軸力比( $N/bD_c\sigma_B$ )が51%

\*1 九州大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

\*2 松尾建設(株) 研究所 工修

\*3 九州大学助教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

\*4 フジタ(株) 工修

で、繰り返し載荷履歴が異なる場合の曲げモーメント一曲率関係の比較である。図-3から分かるように、曲げモーメント一曲率関係における曲げモーメントの低下度合いは、累積曲率が最も大きくなる一定曲率振幅の場合が最も顕著である。

また、除荷時軸ひずみ一繰り返し回数関係の比較を図-4に示す。図-4から次のことが分かる。  
1)一定曲率振幅で繰り返す場合は、漸増および漸減曲率振幅で載荷する場合と比較すると、軸力比が5%しか変わらない場合でも20回載荷における除荷時軸ひずみは8倍ぐらい違い、軸力比の増大による軸ひずみの進行が顕著である。2)一定曲率振幅で繰り返す場合、軸力比が小さい場合は、除荷時軸ひずみは一定値に収束するが、軸力比が大きい場合は発散する。1%の軸力比の違いが軸ひずみが収束するか発散するかの違いとなって境界となる軸力比が存在する。

### 2.3 安定限界軸力比の定義

前節における検討により、軸ひずみの累積現象の安定性に関しては、一定曲率振幅という載荷履歴が最も厳しい載荷条件であることが分かった。言い換えると、最大曲率振幅が同じ場合、一定曲率振幅という載荷履歴で検討した結果が、柱の挙動の安定性に関しては安全側な評価になる。そこで、次節で述べる安定限界軸力比に関する実験的研究には、一定曲率振幅という載荷履歴を採用することにした。

以上の考察から、本研究では一定軸力と一定曲率振幅繰り返し曲げモーメントを受ける拘束RC柱が20回までの繰り返し載荷を受けても除荷時の軸ひずみがある一定値に収束する状態を安定状態とし、このような安定状態を保つ最大軸力比を安定限界軸力比と定義する。

20回の繰り返し回数を設定した理由は次の2つである。

- (1) 安定限界軸力比に関する実験的研究において、静的に加力するという条件のもとで一日に載荷できる繰り返し回数の目安として20回を設定した。

表-1 コンクリートの応力一ひずみ関係の詳細

包絡線モデル

$$f_c = f_{cc}' \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2}, \quad X = \varepsilon_c / \varepsilon_{co}$$

$$K = f_{cc}' / f_c' = 1 + 11.5 \frac{\rho_h f_{yh}}{f_c'} \left( \frac{d''}{C} \right) \left( 1 - \frac{s}{2D_c} \right)$$

$$A = E_c \varepsilon_{co} / f_{cc}', \quad E_c = \left( 0.69 + 0.332 \sqrt{f_c'} \right) \times 10^4$$

$$\frac{\varepsilon_{co}}{\varepsilon_o} = \begin{cases} 1 + 4.7(K-1), & K \leq 1.5 \\ 3.35 + 20(K-1.5), & K > 1.5 \end{cases}, \quad \varepsilon_o = 0.94(f_c')^{1/4} \times 10^{-3}$$

$$D = 2.25 - 0.017 f_c' + 1.6 \sqrt{(K-1)f_c' / 23}$$

除荷曲線モデル

$$f_c = f_{un} \left[ 1 - \frac{AX - X^2}{1 + (A-2)X} \right], \quad A = E_{uc} (\varepsilon_{un} - \varepsilon_{pl}) / f_{un}$$

$$X = (\varepsilon_{un} - \varepsilon_c) / (\varepsilon_{un} - \varepsilon_{pl}), \quad \varepsilon_{pl} = 0.72 \varepsilon_{un}$$

$$E_{uc} = E_c \text{ 且つ } E_{uc} \geq f_{un} / (\varepsilon_{un} - \varepsilon_{pl})$$

再負荷曲線モデル

$$f_c = f_{ro} + E_{ro}(\varepsilon_c - \varepsilon_{ro}), \quad E_{ro} = (f_{un} - f_{ro}) / (\varepsilon_{un} - \varepsilon_{ro})$$

また、

$f_{cv}$  : コンファインドコンクリート強度 (MPa)

$f_c'$  : コンクリートのシリnder強度 (MPa)

$f_{yh}$  : 横補強筋の降伏強度 ( $\leq 680$  MPa)

$\rho_h$  : 横補強筋の体積比  $c$  : 有効横支持長さ

$d''$  : 横補強筋の直径  $s$  : 横補強筋の材軸方向の間隔

$D_c$  : 周辺横補強筋の軸線の間の距離

$f_{ro}$  : 除荷段階の最後の応力値

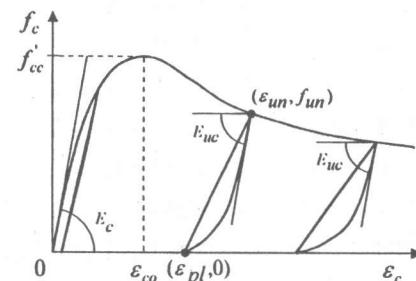


図-1 コンクリートの応力一ひずみ関係曲線

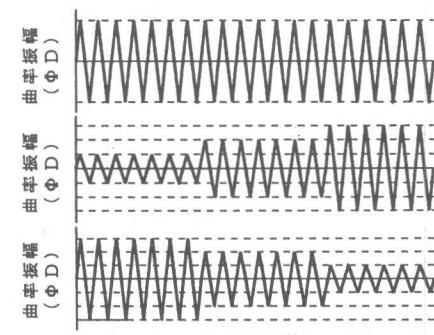


図-2 繰り返し載荷履歴

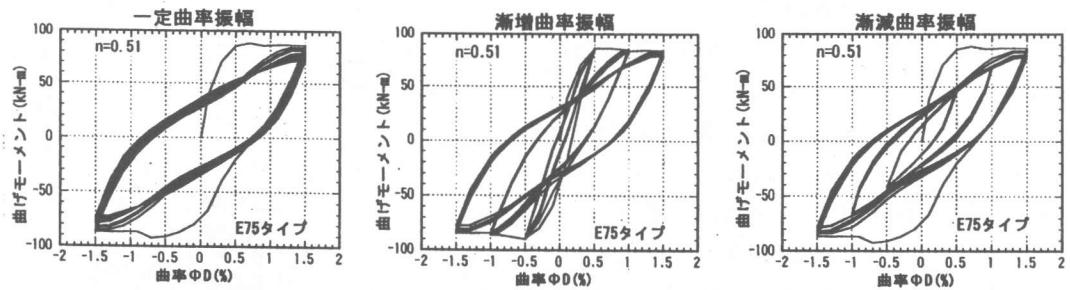


図-3 曲げモーメント-曲率関係の計算結果

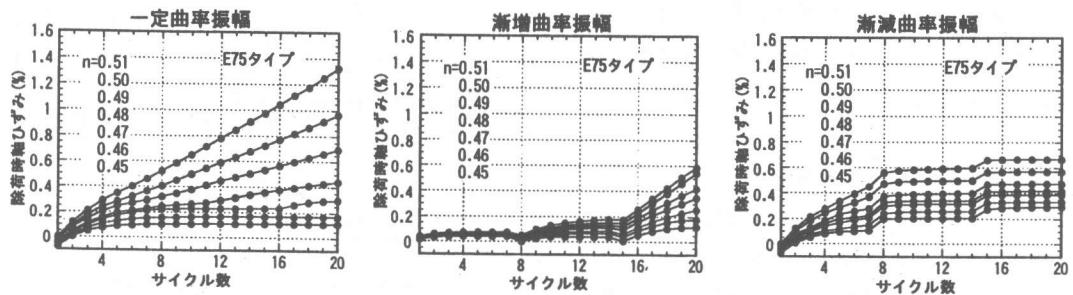


図-4 除荷時軸ひずみ-繰り返し回数関係

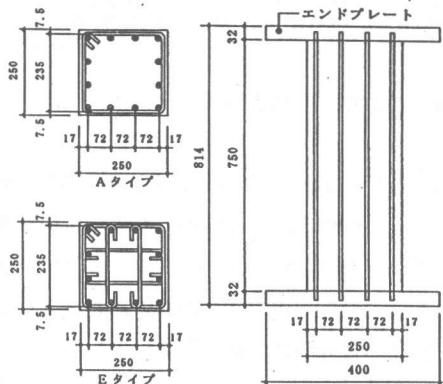


図-5 試験体の寸法詳細

(2) 2.2 節で検討したように、一定曲率振幅による載荷履歴が最も厳しい載荷条件であることを考えると、曲率振幅の大きさを曲率地震応答最大値と考えれば、20回の繰り返し回数は充分多数回と見なせると考えた。

### 3. 安定限界軸力比に関する実験的研究

#### 3. 1 試験体

試験体の寸法および横補強筋の配筋詳細を図-5に示す。試験体一覧を表-2に示す。コンクリ

表-2 試験体一覧

試験体名	軸力比 n	曲率振幅 $\Phi D$ (%)	横補強筋			
			形式	s (mm)	$\rho h$ (%)	K
A100C10F20	0.11	2.0				
A100C30F20	0.34	2.0	A	100	0.54	1.02
A100C40F20	0.45	2.0				
A100C60F20	0.68	2.0				
E75C30F15	0.34	1.5				
E75C50F15	0.57	1.5	E	75	1.45	1.17
E75C30F20	0.34	2.0				
E75C50F20	0.57	2.0				
E40C45F15	0.51	1.5				
E40C60F15	0.68	1.5	E	40	2.72	1.35
E40C45F30	0.51	3.0				

試験体名凡例: A 100 C 30 F20

A : 配筋形式 (A:単純配筋 E:複合配筋)

100 : 横補強筋間隔 (s) 100 : 横補強筋の体積比

C : 繼り返し載荷 K : 橋脚束度合 (拘束係数)

30 : 全断面に対する軸力比 (表の中 n:コア断面に対する軸力比)

F20 : 曲半振幅 ( $\Phi D$ ) =  $\Phi \times D = 2.0\%$ ,  $\Phi$  : 曲半 D : 断面のせい)

一トの圧縮強度（設計強度は 25MPa, 実験時材令での強度は 25.7MPa), 鉄筋の降伏強度（主筋は 309MPa, 帯筋は 347MPa), 主筋量 (D13 異形鉄筋を 12 本配筋) を実験定数とし, 横補強筋の体積比, 軸力比, 曲率 ( $\Phi D$ ) 振幅を実験変数とした。

### 3. 2 加力および測定装置

加力および測定装置を図-6に示す。軸力と曲げモーメントは、主筋の端部を溶接により取り付けたエンドプレートを通じて試験体の両端部に載荷した。加力方法は次の通りである。まず一定軸力を5MN油圧試験機により設定値まで載荷し、その後図-2に示す一定曲率振幅載荷履歴に従い、加力ビームに取り付けた2台の200kN油圧ジャッキにより、繰り返し曲げモーメントを載荷した。また、曲げモーメントを載荷する時、付加軸力を伴うが、5MN油圧試験機の載荷軸力を調整することにより軸力を一定になるようにした。

### 4. 実験結果に関する考察

#### 4. 1 曲げモーメント-曲率関係

実験結果の一部を図-7に示す。図-7から分かるように、横拘束度合いと曲率振幅が同じ場合、軸力比の違いにより実験結果が明確に違った。軸力比が0.11の試験体A100C10F20は2サイクル目の除荷時において曲げ耐力の低下が見られたが、その後20サイクルまで耐力の低下がほとんどなく、安定した挙動を示した。しかし、軸力比が0.34であるA100C30F20の試験体は繰り返し載荷に伴い、顕著な耐力低下が生じた。4サイクル目終了時には軸力を保持できなくなり崩壊に至った。一方、軸力比が0.34であるE75C30F20の試験体は曲げ耐力の低下はほとんど見られなかった。軸力比が0.57である試験体E75C50F20は、8サイクル目の除荷時の耐力が1サイクル目の除荷時の耐力の25%ぐらいに低下した後に崩壊した。

不安定な挙動を示した試験体A100C30F20と試験体E75C50F20は耐力の低下が激しくなった時点においては、主筋の座屈が観察された。不安定な挙動を生じた原因としては、次のことが考えられる。軸力比が高い場合は、柱断面の圧縮ひずみが大きくなるが、コンクリートは圧縮ひずみが大きくなるほど繰り返し載荷を受ける時の負担圧縮応力の劣化(除荷および再負荷時の応力が同じひずみにおける包絡線の応力より小さい)現象が著しくなる。断面が一定軸力を保つためには、軸縮み

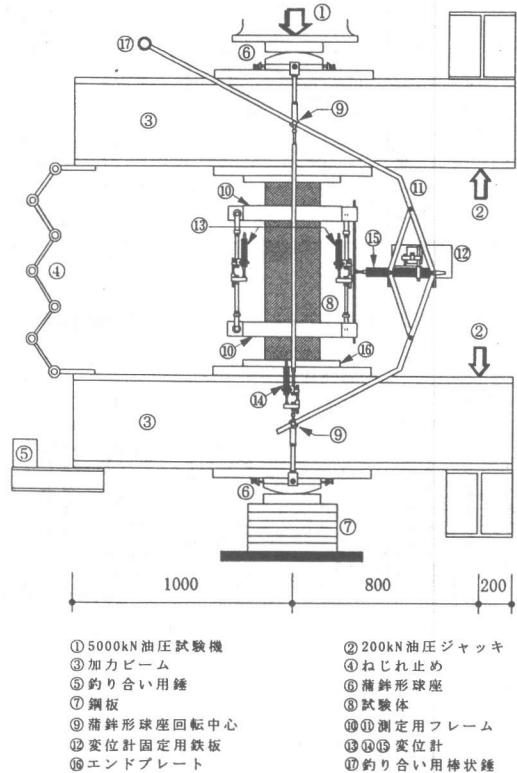


図-6 加力および測定装置

が進行していくが、この時曲げ耐力の低下を誘発する。また、軸縮みが進行することにより横拘束度合いが小さい試験体は、かぶりコンクリートが剥離した後、剥離崩壊の範囲がコアコンクリートまで進行すると同時に主筋の座屈が生じた。

また、載荷軸力比、曲率振幅が同じである試験体A100C30F20と試験体E75C30F20の実験結果を比較することにより、横拘束度合いが高くなるに伴い安定な挙動を示す軸力比が大きくなることが分る。理由としては、横拘束度合いが大きくなるに伴い、コンクリートの強度時ひずみが大きくなることにより顕著な負担圧縮応力の劣化現象が生じにくくなつたことと、横補強筋の間隔が狭くなつて、コアコンクリートの剥離による断面の損傷および主筋座屈が抑えられたことなどが考えられる。

#### 4. 2 除荷時軸ひずみ-繰り返し回数関係

4.1節で述べた試験体の除荷時軸ひずみ-曲率

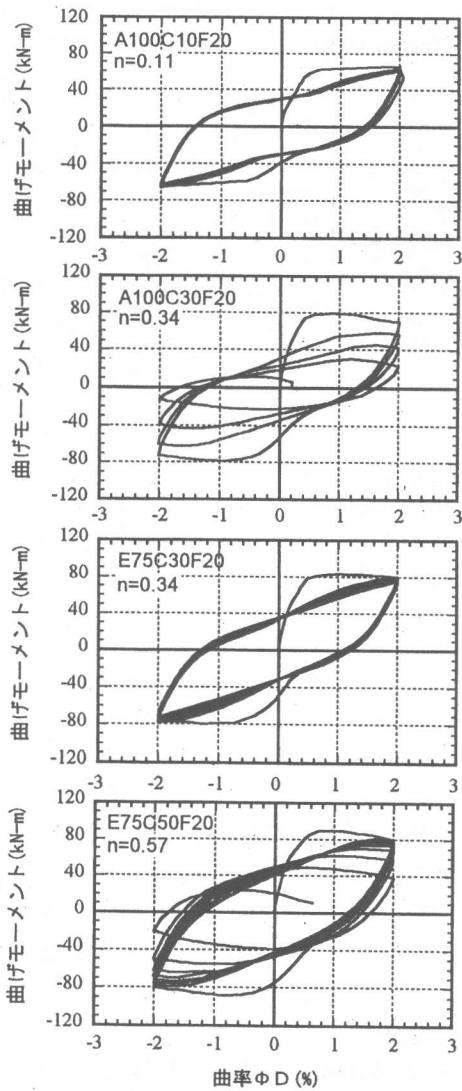


図-7 曲げモーメント-曲率関係の実験結果

関係を図-8に示す。図-8から分かるように、A100C10F20とE75C30F20の試験体は20サイクル載荷終了まで除荷時軸ひずみの進行が殆ど見られない安定した挙動を示している。したがって、解析結果の考察により定義した安定限界軸力比の存在は実験結果により検証されたことになる。

##### 5. 実験結果と解析結果の比較

曲げモーメント-曲率関係および軸ひずみ-曲率関係の解析結果と実験結果の比較を図-9に示す。図-9から分かるように、安定した挙動を示

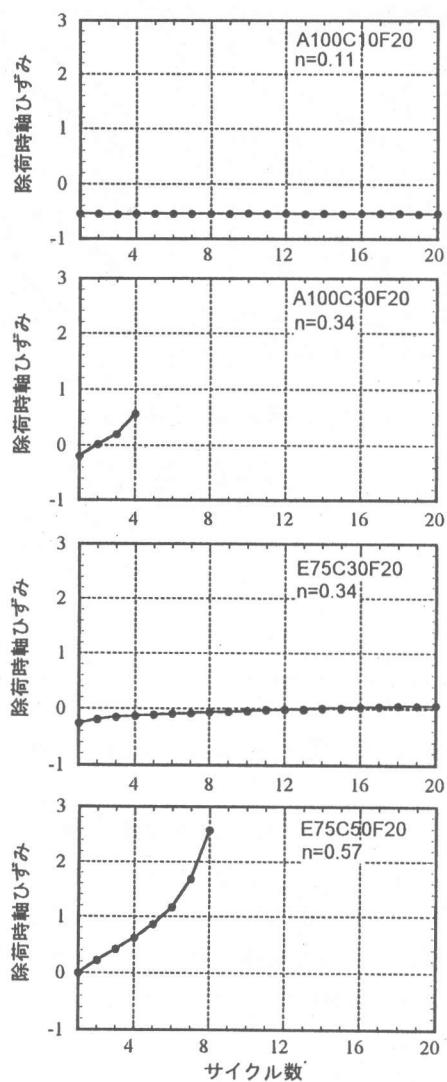


図-8 除荷時軸ひずみ-繰り返し回数関係

した試験体(A100C10F20, E75C30F20)に対して、解析結果は実験結果とよく対応している。しかしながら、曲げ耐力の低下および軸ひずみの進行が顕著な試験体(A100C30F20, E75C50F20)に対しては、コアコンクリートの圧壊および主筋の座屈が生じるまで解析結果は実験結果をよく追跡しているが、主筋の座屈による耐力低下が生じてからは、解析結果は実験結果をよく追跡できなくなる。

図-10に示す曲線は、安定限界軸力比の定義に基づいて本論第2節で述べた解析手法により求めた安定限界軸力比-曲率関係である。実験結果に

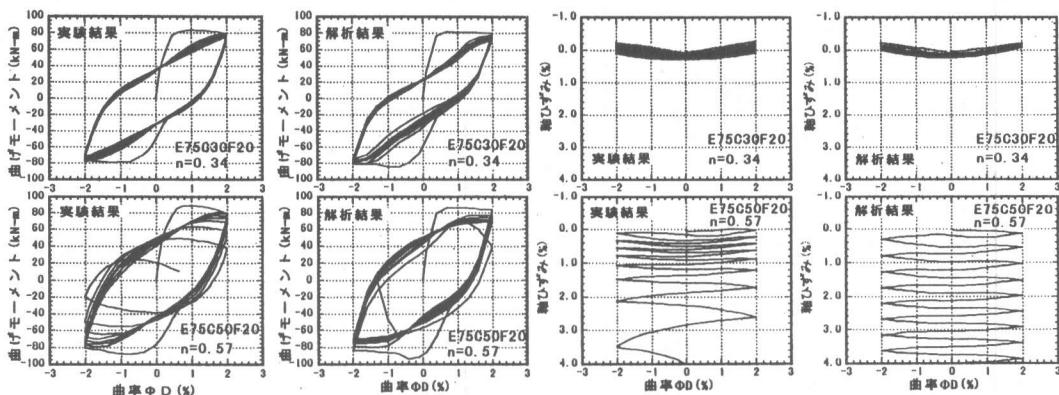


図-9 解析結果と実験結果との比較

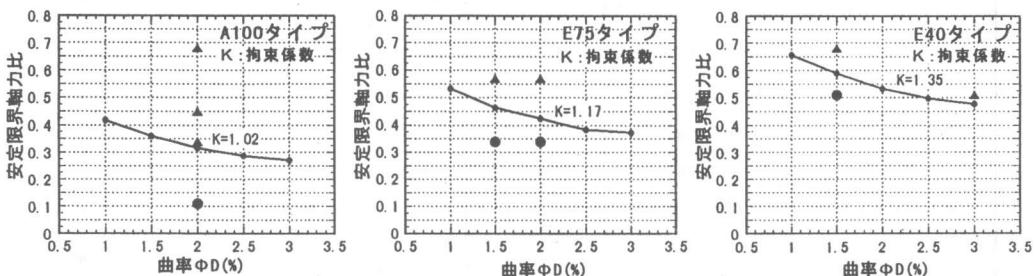


図-10 安定限界軸力比—曲率関係の比較

については、安定な挙動が現れた試験体を●、安定した挙動が現れなかった試験体を▲でプロットした。図-10から分かるように、解析により求めた安定限界軸力比は実験により得られた安定限界軸力比の存在範囲とよく対応している。

## 6. 結論

本研究により次の結論を得た。

- (1) 一定軸力と一定曲率振幅繰り返し曲げモーメントを受ける拘束RC柱の軸ひずみの進展状況に着目して定義した安定限界軸力比の存在が、実験により検証された。安定限界軸力比は、横補強筋の拘束度合いが高まるに従い上昇する。
- (2) 拘束コンクリートの応力-ひずみ関係である崎野・孫モデルに断面のひずみ勾配の影響を考慮に入れた応力-ひずみ関係モデルを用いて行った繰り返し曲げ圧縮の解析結果は、実験結果を精度よく追跡できる。しかしながら、不安定な挙動を示した試験体に対して、主筋の座屈が生じた後の曲げ圧縮挙動を

精度よく追跡できなかった。

- (3) 本論で提案した安定限界軸力比の定量的評価法により求めた安定限界軸力比は、実験により得られた安定限界軸力比の存在範囲とよく対応している。

## 「参考文献」

- 1) 平石久廣ほか:繰り返し載荷を受ける鉄筋コンクリート造柱の限界変形、日本建築学会構造系論文報告集、第454号、pp. 127-138、1993.12
- 2) 崎野健治・孫玉平:直線型横補強筋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、第461号、pp.95-104、1994.7
- 3) 田福勝・崎野健治・孫玉平:拘束RC柱の曲げ圧縮性状に及ぼす断面ひずみ勾配の影響、構造工学論文集、Vol.43B, pp.191-198, 1997.3
- 4) 藤井俊二、青山博之、梅村 魁:材料特性により求めた鉄筋コンクリート断面のモーメント-曲率関係、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1261-1262、1973.10
- 5) Desai, P., Iyengar, K.T.S.R., and Reddy, T.R., "Stress-Strain Characteristics of Concrete Confined in Steel Spirals Under Repeated Loading," Material and Construction, Vol. 12, No. 71, pp.375-383, 1979
- 6) Mander J.B.: "Seismic Design of Bridge Piers", Research Report(No.84-2), University of Canterbury, Feb.1984