

論文

[2046] 繰り返し荷重を受ける RC 構造物の終局変位に関する基礎的研究

正会員 ○中村 光 (名古屋大学大学院)

正会員 田辺 忠顕 (名古屋大学工学部)

1. 序

コンクリート構造物の合理的な耐震設計を行うためには、最終的に振動中の構造物が崩壊する終局破壊点を予測することが不可欠と思われる。しかし現状においては、実験的にも解析的にもそれらを精度よく評価する手法は確立されていない。そこで現在の段階では、それに代わるものとして部材の塑性変形能(靱性)を考慮し、靱性が確保されれば構造物は崩壊しないという仮定によって設計を行っている。ここで使われている部材の変形能については、部材の断面定数あるいは、断面に作用している応力のみで決定されると一般に考えられているが、これは逆にいえば局部的な断面の耐荷力が低下しないなら、構造物は安定な状態を保つという考え方である。しかし大きな軸力が作用する構造物では、仮に局部的な断面耐荷力の低下がなくても、構造自体の大変形効果により早期に構造物としての耐荷力を失うことも考えられる。

鉄筋コンクリート構造物におけるこの種の大変形の問題は、現在までほとんど論じられることがなかったが、構造物の終局変形を論じるためには、この観点からの考察が必要と思われる。

そこで本研究では、鉄筋コンクリート構造物における靱性の評価及び終局破壊点の予測を目的として、曲げ変形並びにせん断変形を考慮した有限変形問題の定式化を行い、解析理論を構築するとともに、一定軸力を受けるRC柱の正負繰り返し載荷試験を行い、その妥当性を確認した。そして、せん断靱性・軸力・スタールップ量が靱性率に及ぼす影響を解析的に明らかにすることを試みた。

2. 仮想仕事の原理による有限変形理論の定式化<sup>1)8)</sup>

図2.1に示すような座標系を取り、軸力、せん断力、モーメントが作用している梁部材を考える。せん断変形を考慮するため梁の  $x, y$  方向の各々の増分変位関数  $V(x, y)$ ,  $W(x, y)$  として以下を用いる。(曲げによるものには  $b$  せん断力によるものには  $s$  の添字をつける)

$$V(x, y) = v_b + v_s \quad (2.1.a)$$

$$W(x, y) = w - y v'_b \quad (2.1.b)$$

ここで  $v_b$ : 曲げによるたわみ変位増分,  $v_s$ : せん断によるたわみ変位増分,  $w$ : 軸力による軸方向変位増分

このとき有限変形問題に対する増分形式で書かれた仮想仕事方程式は、(2.1)式を用いて次のように書ける。

$$\begin{aligned} & \iiint \{ \sigma_x \cdot \delta(w' - yv''_b) + \tau_{xy} \cdot \delta v'_s \} dv \\ & + \iiint \{ \sigma_x \cdot \delta(v_b + v'_s)(v'_b^{(0)} + v'_s^{(0)})/2 \} dv \\ & + \iiint \{ \sigma_x^{(0)} \cdot \delta(v'_b + v'_s)^2/2 \} dv \\ & + \iint (f_x \cdot \delta u_x + f_y \cdot \delta u_y) ds = \delta U_r \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \delta U_r = & \iint (f_x^{(0)} \cdot \delta u_x + f_y^{(0)} \cdot \delta u_y) ds \\ & - \iiint \{ \sigma_x^{(0)} \cdot (\delta(w' - yv''_b) + \tau_{xy}^{(0)} \cdot \delta v'_s) \} dv \\ & - \iiint \{ \sigma_x^{(0)} \cdot 1/2 \cdot \delta(v'_b^{(0)} + v'_s^{(0)})(v'_b + v'_s) \} dv \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで 上付の(0)のあるものはある荷重状態における解を表し、上付の(0)のないものは微少

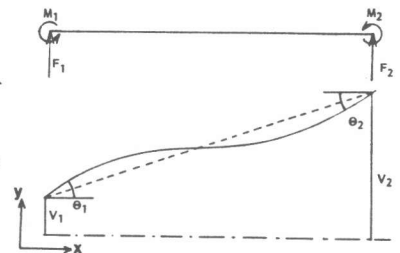


図2.1 部材の変形

な荷重増分が作用したときの各増分を表している。また  $\sigma_x \cdot \delta(v'_b + v'_s)^2$  は2次の微小量であるから、これを無視して線形化している。(2.2) 式の第1項が微小変形理論におけるひずみエネルギーの変分で応力がなす仮想仕事を表し、第2項は変形の進行にともなう生じる付加応力成分のなす仮想仕事項、第3項は初期応力  $\sigma_x^{(0)}$  のなす仮想仕事項である。また (2.3) 式は前段階における釣合い方程式が完全に満足されないために生じる不平衡力が  $\delta u_x, \delta u_y$  に対してなす仮想仕事である。

有限変形理論を支配する仮想仕事方程式を導いたので、有限要素法の標準的手法に従い、増分理論に基づく解析の形に書き改める。

今、第n段階の応力・変位の分布が既知であるとし、第(n+1)段階の変形を決定する方程式は式(2.2)より以下に示すようになる。

$$(K + K_0 + K_g)^{(n+1)} \Delta u^{(n+1)} = \Delta F^{(n+1)} + F_r^{(n)}$$

ここに、上付きの(n+1)又は(n)はそれぞれ、第(n+1)あるいは第(n)段階における諸量を表す。

K: 与えられた構造物の剛性マトリクス、 $K_0$ : 初期ひずみマトリクス、

$K_g$ : 幾何剛性マトリクス、 $F_r$ : 不平衡力(前段階の諸量で表せ、(2.3)式に対応)

### 3. 解析方法<sup>2)</sup>

本解法は、任意状断面のRC部材が定軸力下で正反繰り返し応力を受ける時の挙動を、コンクリート及び鉄筋の応力度とひずみの関係に基づいて導かれた剛性方程式に従って解析を行うものであり、解析に当たっては以下の仮定をした。

① 断面は変形後も平面を保つ。(平面保持の法則) ② 鉄筋とコンクリートの付着滑りは無視する。③ 構成材料の応力度-ひずみ関係の機械的性質は以下のように仮定する。

#### 1) コンクリートの応力-ひずみ曲線<sup>3) 4) 9)</sup>

コンクリートの応力-ひずみ曲線は圧縮領域にあつては、2次パラボラと応力降下直線の結合されたものとする。ただし応力降下直線の勾配はACI基準により決定している(図3.1)。繰り返し応力下の挙動は、図中に示す法則に従って応力は変化するとした。ただしひずみ除荷途中より再びひずみを増加させる場合には、除荷時と同じ直線上で応力は求められると仮定した。

また引張領域のコンクリートには一般に tension stiffening 効果が存在し、変形解析にあたっては極めて重要な要因となると思われる。吉川は<sup>4)</sup> tension stiffening 効果を鉄筋比、弾性係数比などに依存した形で表しているが、本解析では吉川の方法を考慮し、更にそれを単純化して図3.2のように、最大引張りひずみが 0.0002 を越えるとコンクリートの引張応力が直線的に低減すると仮定した。

繰り返し時に、応力が圧縮側から引張側に移るときは、応力は過去の最大引張りひずみ点を目標し、引張側から圧縮側に移るときは、軸力だけが作用する時の初期応力状態に向かうと仮定した。鉄筋の応力-ひずみ曲線は計算の簡便さを考え、バイリニア型とした。

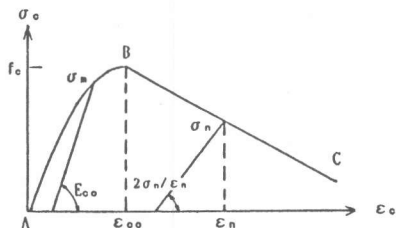


図3.1 コンクリートの応力-ひずみ関係(圧縮)

領域 AB  $\sigma = f_c \{ 2 \epsilon_c / \epsilon_{c0} - (\epsilon_c / \epsilon_{c0})^2 \}$   
 領域 BC  $\sigma = f_c \{ 1 - 0.5(\epsilon_c - \epsilon_{c0}) / (\epsilon_{sn} + \epsilon_{su} - \epsilon_{c0}) \}$   
 $\epsilon_{sn} = 0.75 \rho (b/s)^{0.5}$   
 $\epsilon_{su} = (0.21 + 0.002 f_c) / (f_c - 70)$

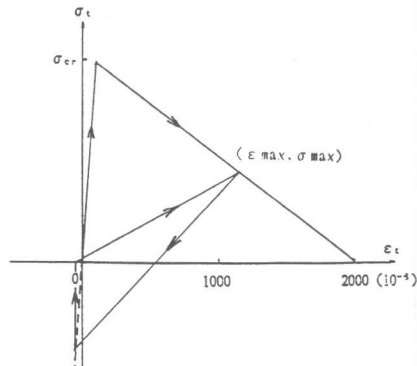


図3.2 コンクリートの応力-ひずみ関係(引張)

### 3.2 要素剛性マトリクスの評価<sup>5)</sup>

断面内の各位置において応力状態が異なるため、その位置でのヤング係数も異なる。これらを考慮するために、各要素の任意の断面を図3.3に示すように、x方向にm等分、y方向にn等分し、各微小要素ごとに応力-ひずみ関係を導入すると、積分形式は各要素の総和となる。この表し方によりコンクリートのひび割れや、材料非線形を考慮することにした。

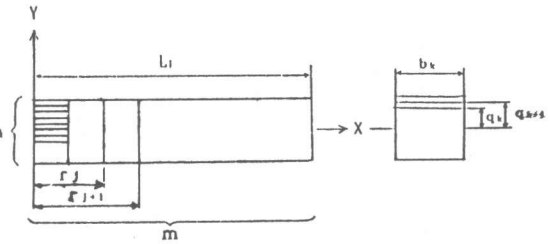


図3.3 微小要素

## 4. 鉄筋コンクリート柱の正負交番載荷実験

### 4.1 供試体

図4.1に示すような形状の供試体を用いて、正負交番載荷実験を行った。また使用したコンクリート及び鉄筋の機械的性質及び供試体の配合は表4.1に示す。

なおRC柱とフーチングは別々に作成し、その後フーチング中心部に柱部分を差し込み、両者の隙間をモルタルで埋めることにより供試体を作成した。この様にして作成した供試体においては、軸方向引張鉄筋のフーチングからの抜き出しによる影響は、ほとんど考える必要がなかった。

### 4.2 載荷方法

載荷装置の概略は、図4.2に示す。載荷は、一定軸力(400Kg)のもとで、正負交番水平方向荷重を作用させた。そして、供試体が作用軸力を保持できなくなるまで(終局破壊状態)水平方向振幅を増大させた。なお供試体頭部が、水平荷重によって大きく変位しても、軸力が頭部より正しく鉛直下方に作用する条件を満たすために、鉛直方向ジャッキと上部のはりとの間に、ローラーを挿入して、供試体頭部の水平変位量と等しい距離だけ鉛直方向ジャッキを平行移動した。

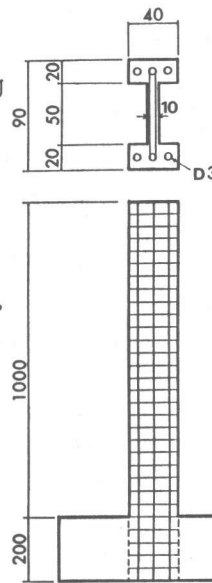


図4.1 供試体寸法

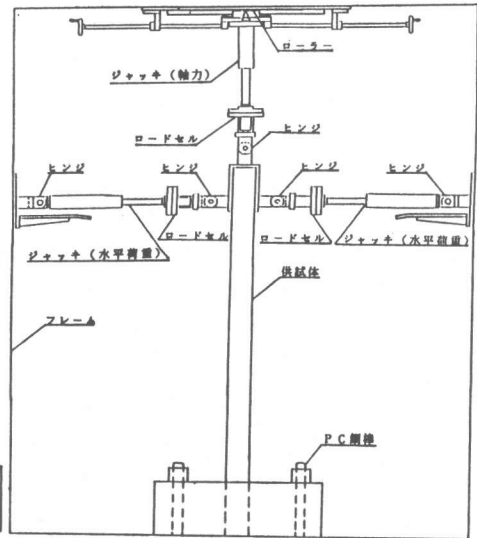


図4.2 載荷装置の概略

### 4.3 解析との比較

本解析手法による解析結果と実験値を図4.3に示す。解析値と実験結果とは比較的一致していると思われる。繰り返しのループについては解析値の方がエネルギー吸収の少ないループを描いて

表4.1 材料の機械的性質

鉄筋		コンクリート
$E_s$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )
$1.6 \times 10^6$	2400	300.0

表4.2 コンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				CSA
	水 W	セメント C	細骨材		
			細砂	粗砂	
76	304	400	412	962	30

いるが、これは圧縮側のコンクリートの応力-ひずみ曲線において、繰返し時に応力が直線的に変化すると仮定したためである。

図4.4は実験値の包絡線と、本解析で行った単調載荷での解析値である。実験、解析ともよく一致している。しかし解析においては圧縮鉄筋が塑性化した後図中D点（接線剛性マトリクスの行列式=0）で、耐力が急激に低下し解析は終了してしまった図に示されているD点以降は圧縮側鉄筋が弾性的挙動を示すとして解析したものである。解析で実験より小さい値で構造不安定となったのは、コンクリートによる圧縮鉄筋の3次元拘束効果及び、繰返しによる降伏点強度の増加などを考慮していないためと考えられる。いずれにしても、荷重-変形曲線の包絡線については、一方向加力と正負繰返し加力とではほとんど差がなく、次節では、一方向加力で求めた解析解で、種々のパラメータの変化による変形能及び構造不安定性への影響を考察する。

#### 5. 鉄筋コンクリート柱の靱性評価

鉄筋コンクリート柱の変形性能に影響を与える要因としては、軸力、帯筋量、主筋量、コンクリート強度などが考えられている。これらの要因を考慮した靱性の評価式<sup>6)7)</sup>がすでにいくつか提案されている。これらの提案式はいずれも比較的数の限られた実験結果に基づくものであり、必ずしも理論的な裏づけがあるわけでない。従って、靱性評価式の妥当性の検証のためにもまた試験体の諸元が異なる各実験データを有機的に結び付け、実験結果を総合化するためにも解析的手法による靱性評価が必要である。

靱性率を次の2通りに定義する<sup>8)</sup>。

$$\mu_1 = \delta_N / \delta_y$$

$$\mu_2 = \delta_D / \delta_y$$

ここで、 $\delta_N$ は最大荷重の80%に対応する変位、 $\delta_D$ は解析において接線剛性マトリクスの行列式が零となる変位である。 $\mu_1$ は塑性変形能を $\mu_2$ は構造不安定性を評価するものとする。

本節では実験で用いた供試体の寸法、材料強度、外力条件をモデルとし、鉄筋コンクリート柱の変形性能に及ぼすこれらの要因のうち、軸力・スターラップ量・せん断剛性を独立に変化させ、解析的にこれらの要因が変形性能及び構造不安定性に及ぼす影響を調べた。

#### 5. 1 軸力が柱の靱性に及ぼす影響

鉄筋コンクリート柱の変形性能に影響を与える構造特有の因子のうち、軸力は最も影響の大きい要因と考えられる。図5.1は軸力だけをパラメーターとし、変化させた時の荷重-変位曲線を示す。軸力が大きいほど最大耐力は大きくなり、最大耐力以降の負荷配も急になる。また軸力がかなり大きくなると、最大耐力点に対応する変位が大きくなる傾向を示した。図5.2に軸圧縮力が4

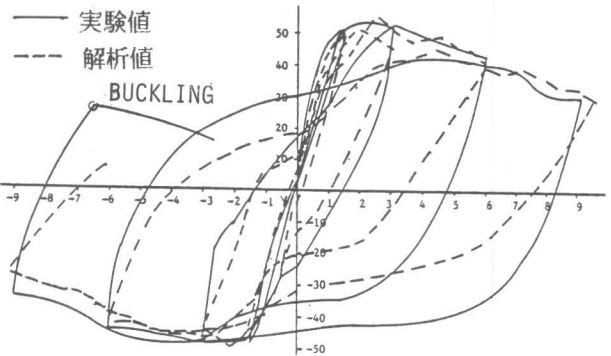


図4.3 実験値及び解析値

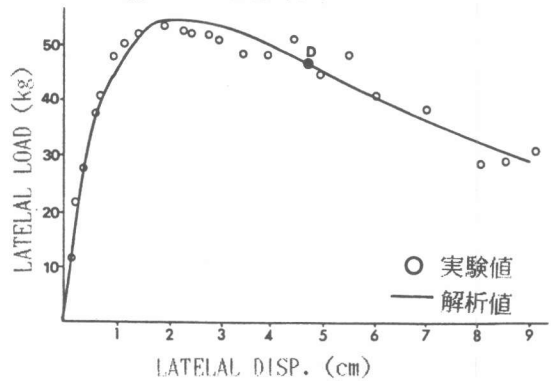


図4.4 包絡線及び解析値

0(Kg<sup>2</sup>)と80(Kg<sup>2</sup>)の時の水平変位と柱下端に発生する軸力によるモーメント(P・δ)、水平力によるモーメント(Q・L)、全モーメント(P・δ+Q・L)の関係を示す。軸力が大きいほど断面が耐えるるモーメントは増大する。しかしRC柱の変形が進行するに従い、

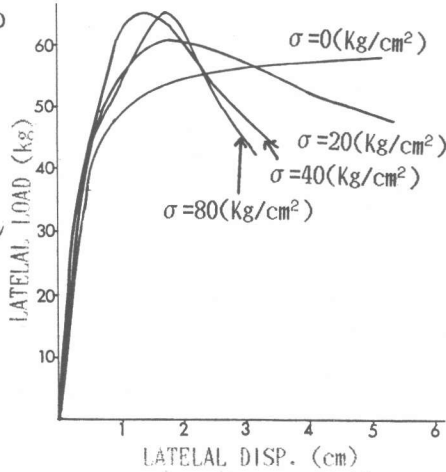


図5.1 荷重-変形関係

全モーメントに占める軸力による2次モーメントの割合が非常に大きくなる。そのため水平力によるモーメントは相対的に減少することになり、構造物の耐荷力、靱性率は軸力により大きな影響を受ける事が分かる。図5.2中で水平力によるモーメント(Q・L)とたわみ(δ)との関係は、σ=80(Kg/cm<sup>2</sup>)及びσ=40(Kg/cm<sup>2</sup>)の場合に、途中で交差し一見不合理のようにも見えるが、断面に作用する全モーメントで考えれば、○●で示すように、きれいに整理される。図5.3は、各応力段階における靱性率(μ<sub>1</sub>)を示したものである。これによれば軸圧縮力の増加に伴い靱性率はかなり小さくなる。また靱性率は軸圧縮力の逆数に比例することを図は示している。

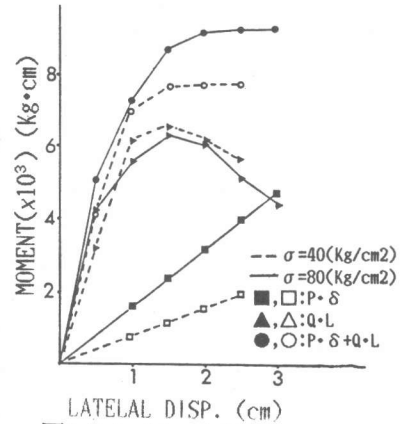


図5.2 モーメント-変位関係

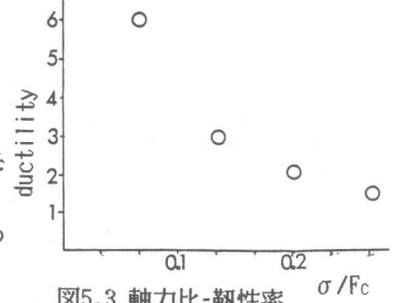


図5.3 軸力比-靱性率

### 5.2 帯鉄筋比(ρ<sub>w</sub>)が柱の靱性に及ぼす影響

スターラップ量の影響はコンクリートの応力-ひずみ曲線の応力降下直線の勾配を図3.1に示すACI基準<sup>3)</sup>により変化させることで考慮した。解析結果を図5.4に示す。図は帯鉄筋比が増加しても最大耐力までは同じ荷重変位曲線を示す事、しかし最大耐力以降においては荷重低下率は小さくなり、変形能の著しい改善を見ることができると示している。靱性率を表5.1に示す。図5.5は町田ら<sup>7)</sup>によって提案された靱性評価式により求めた靱性率と、本解析により求めた靱性率を比較したものであるが、ほぼ同じ傾向を示していることが分かる。またμ<sub>1</sub>、μ<sub>2</sub>とも帯鉄筋比の増加によりほぼ線形的に増加していることが分かる。

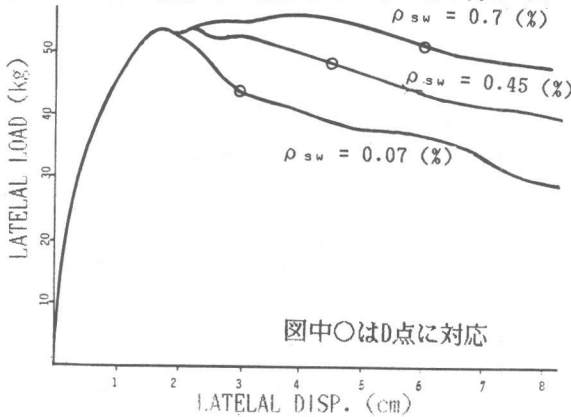


図5.4 荷重変形関係

表5.1 靱性率

ρ <sub>sw</sub> (%)	δ <sub>v</sub> (cm)	δ <sub>w</sub> (cm)	δ <sub>o</sub> (cm)	μ <sub>1</sub>	μ <sub>2</sub>
0.70	1.00		6.00		6.0
0.45	1.00	6.00	4.50	6.0	4.5
0.07	1.00	3.00	3.20	3.0	3.2

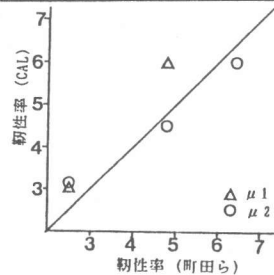


図5.5 靱性率の比較

### 5.3 せん断剛性 (GA) が柱の靱性に及ぼす影響

鉄筋コンクリートはり部材のせん断剛性は、曲げクラックが生じることによって低下し始めひびわれ直角方向のひずみ増加と共に非常に小さい値に漸近すると一般に言われている。そこでせん断剛性が曲げ剛性に比例して低下する、曲げ剛性比例型のせん断剛性低下モデルを用いた。その比例定数を3種に変化させた3ケースの解析結果を図5.6に示す。最大耐力までは、せん断剛性の低下はほとんど影響を及ぼさなかった。しかし、最大耐力以降せん断剛性の低下が著しいケースほど急な耐力低下を示した。表5.2に靱性率を示したが、 $\mu_1$   $\mu_2$ ともほぼ同じような傾向でせん断剛性の影響を受けたが、 $\mu_1$ についてはせん断剛性の低下により靱性率が50%程度低下することを示した。しかし、現在の段階ではせん断剛性の履歴法則は実験的にも、明らかにされておらず上記の計算結果や、それに基づく考察は、なお今後の詳細な検討を必要としている

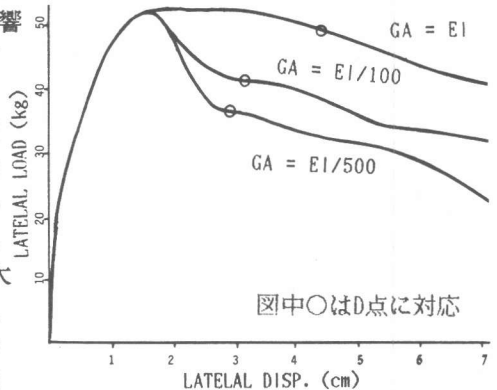


図5.6 荷重変形関係

表5.2 靱性率

GA	$\delta_v$ (cm)	$\delta_N$ (cm)	$\delta_D$ (cm)	$\mu_1$	$\mu_2$
EI	1.00	4.50	6.00	6.0	4.5
EI/100	1.00	3.25	3.25	3.25	3.25
EI/500	1.00	2.75	3.00	2.75	3.0

### 5.4 考察

鉄筋コンクリート部材の靱性評価を解析的に行うために、鉄筋コンクリート柱を対象とし有限変形理論に基づき、有限要素解析を行った。一般に鉄筋コンクリート構造物の終局変形限界は、その破壊形式に関わらず基本的には圧縮されたコンクリートの性質に大きく影響される。柱の靱性率に大きな影響を与える要因として、軸力と帯鉄筋比の影響が挙げられるのは、この2つの要因が圧縮側のコンクリートの性状そのものに影響を与えるためと思われ、その影響は他の要因と相互作用的に働き、これらの要因を独立に取り扱うのは、難しいと思われる。

### 6. 結論

本研究に於て、鉄筋コンクリート構造物の塑性変形能及び終局変位に影響を及ぼす要因について解析的検討を行い、終局破壊に到るまでの理論的解明の可能性の検討をおこなったが、その結果以下の結論を得た。

1) 本解析手法は繰り返し載荷時の鉄筋コンクリート柱の挙動を精度よく再現でき、実験との比較によりその妥当性が確認された。2) P- $\Delta$ 効果により耐荷力は早期に大きく減少するためこの効果を考慮する必要がある。3) 部材の靱性へ及ぼすせん断変形の影響を解析的に求められる可能性を示した。4) 本手法は、鉄筋コンクリート部材の塑性変形状を理論的に解明するうえで有力な手法となりうる。

#### 参考文献

- 1) 川井 忠彦 : 座屈問題解析, 培風館, 1970
- 2) 松本 公典 : モーメント-曲率関係の解析によるPC橋梁の靱性設計への応用, 名古屋大学学位論文, 1985
- 3) A C I : 鉄筋コンクリート構造設計基準(318-71)
- 4) 古川 弘道 : 面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的挙動に関する解析モデル, 間組特定研究報告第2号, 1987
- 5) 梅原 秀哲, 田辺 忠顕, 吉田 弥智 : 鋼材の付着状態を考慮したPCラーメンの履歴挙動に関する研究, 土木学会論文集, 1988
- 6) コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム, J C I, 委員会報告書, 1988
- 7) 町田 篤彦, 陸好 宏史, 豊田 和彦 : 鉄筋コンクリート部材の塑性変形能定量化に関する研究, 土木学会論文集, 1987
- 8) 中村 光, 田辺 忠顕 : RC構造物における構造不安定と靱性率との関係, コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集, J C I, 1988
- 9) Kent, D.C. and Park, R. : Flexural members with confined concrete, Proceedings of ASCE, Vol. 97, No. ST7, pp. 1969 ~ 1990, July 1971