

論文

[2080] 2方向水平力と大きな変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の解析モデルに関する研究

正会員 ○辰巳 佳裕 (清水建設設計本部)

正会員 小谷 俊介 (東京大学工学部)

正会員 青山 博之 (東京大学工学部)

1. はじめに

地震動を受ける骨組構造物では、水平2方向の地震力により鉛直支持部材は2方向の曲げとせん断力を受ける。外柱ではさらに転倒モーメントにともなう変動軸力も受けるが、特に、高層建物の隅柱では軸力の変動が大きく、かなりの高軸力や引張軸力となる。一般に、高軸力を受ける鉄筋コンクリート(RC)柱は、コンクリートの圧縮破壊が早められるので、じん性が乏しく大きな変形能力を期待するのが困難といわれているが、コアコンクリートを十分に拘束した柱試験体に2方向の繰返し水平力と大きな変動軸力を加える実験<sup>1)</sup>から、

- ①高軸力を受けるRC柱でも横補強筋や芯鉄筋を適切に配筋すれば良好なじん性が得られる、
- ②高軸力と繰返し水平力を受けることにより、軸方向変形が大きくなる、
- ③3軸変動力を受けるRC柱は3軸相互作用により複雑な挙動を示す、

などのことがわかった。本論文では、実験データをもとに、このようなRC柱の挙動を再現する解析モデルの検証をおこなった。3軸変動力を受ける部材の挙動を解析的に再現するモデルには、S. S. Lai、小谷、李、青山ら<sup>2) 3) 4)</sup>が提案したMS (Multi-Spring)モデルを使用した。

2. 実験概要

試験体は高層RC建物の1階の内柱と隅柱を想定したスケール約1/5モデルである。柱断面は20cm×20cm、片持ち柱形式で加力点までの高さ60cm、主筋は12-D10(主筋比2.14%)で、芯鉄筋1-D25(芯鉄筋比1.27%)を有する(図1)。コンクリートの設計基準強度は240(kgf/cm<sup>2</sup>)で、主筋はSD30程度のもを使用している。試験体の主なパラメータは、横補強筋の量( $p_w \cdot \sigma_{wy}$ )と軸力の変動幅である。内柱を想定した試験体の軸力比(コンクリート強度に対する軸応力度の比、軸応力度は軸力を柱全断面積で除した値とした)は0.3、隅柱を想定した試験体の軸力比の変動範囲は-0.1~0.7、または-0.4~1.0である。試験体柱頭に与えた2方向の強制変位履歴は図2のようなものであり、軸力は2方向の水平変位に比例して変動するものとした。図中の数値はそれぞれの変位における軸力比である。

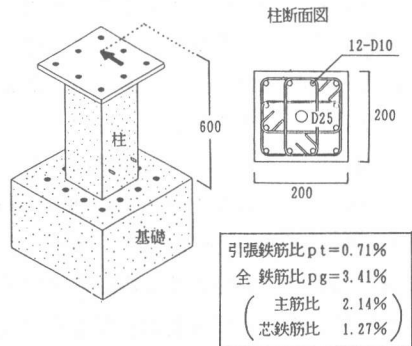


図1 試験体の形状 (単位:mm)

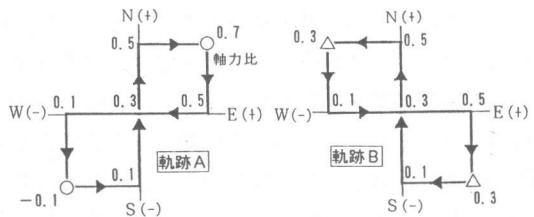


図2 2方向の強制変位履歴と軸力比の変動

試験体はいずれも曲げ降伏し、高軸力を受けるものでも大きな耐力低下を起こさず比較

的安定した挙動を示した。主な試験体(表1)の荷重-変形関係と2方向の復元力履歴を図3に、軸歪(部材全長に対する軸方向変形の比)の時刻歴を図4に示す。軸力比を $-0.1 \sim 0.7$ の範囲で変動させた試験体T2-1では、荷重-変形関係が複雑であり、軸歪の進展が大きい。

### 3. MSモデルの概要

MSモデルは、部材が材軸方向中央部の弾性要素と材端の塑性要素から構成されると仮定し塑性要素を複数の軸方向バネに置き換えるモデルである(図5)。ここではバネは鉄筋バネ(Sバネと呼ぶ)とコンクリートバネ(Cバネと呼ぶ)の複合バネとする<sup>3)</sup>。MSモデルでは以下のような仮定を用いる。

- ①危険断面について平面保持が成り立つ、
- ②軸方向バネは、それぞれ独立に軸方向力を受け、軸方向変形のみを生ずる、
- ③部材の塑性変形は塑性要素に集中する、
- ④せん断補強は十分であり、せん断による塑性変形は小さい、

この仮定のもとに、バネの軸方向の力-変形関係を定義すれば、「柱脚のモーメント増分-軸力増分、塑性要素回転変形増分」の関係、「塑性要素の軸方向変形増分-軸力増分、塑性要素回転変形増分」の関係が定まり、軸力増分と塑性要素回転変形増分から、柱脚に作用するモーメント、軸方向変形が求められる。

MSモデルでは、バネの耐力、降伏変位などのパラメータの評価方法が解析精度を左右する。李<sup>3)</sup>が提案したパラメータ評価方法は、3軸変動力を受けるRC柱の実験結果を再現したが、検証用試験体の軸力変動幅が小さいため、Cバネの圧縮特性が重要となる高軸力時の検証はおこなわれていない。また、試験体は芯鉄筋を有していない。ここでは、李の方法を軸力変動幅の大きな場合、芯鉄筋のある場合に拡張して、パラメータを評価し、解析モデルの検証をおこなう。

表1 主な試験体の特性 (単位:kgf/cm<sup>2</sup>)

試験体名	横補強筋		主筋強度 (芯鉄筋)	コンクリート 強度	軸力変動範囲 (軸力比)
	配筋	$p_w \sigma_{wy}$			
P3-C	4- $\phi$ 4@40	30.9	3300(3690)	281	0.3 (一定)
T2-1	4- D4@32	20.5	3190(3610)	252	$-0.1 \sim 0.7$

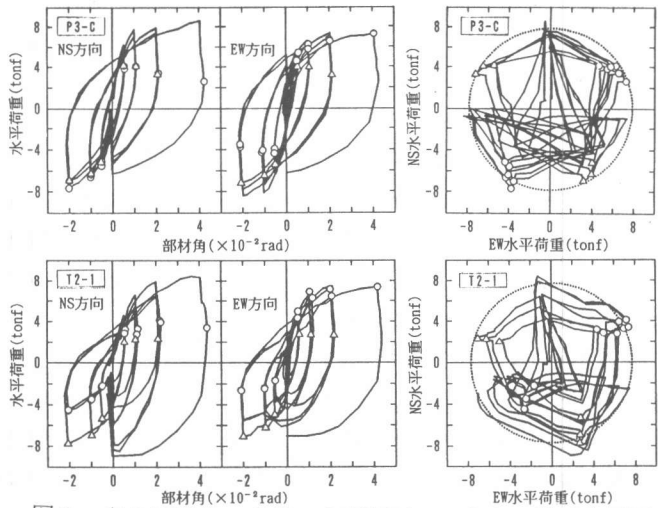


図3 主な試験体の荷重-変形関係と2方向の復元力履歴

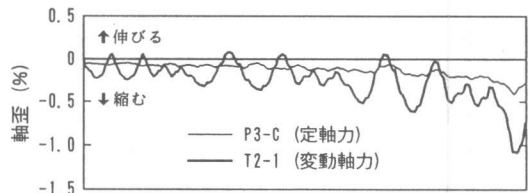


図4 軸歪の時刻歴

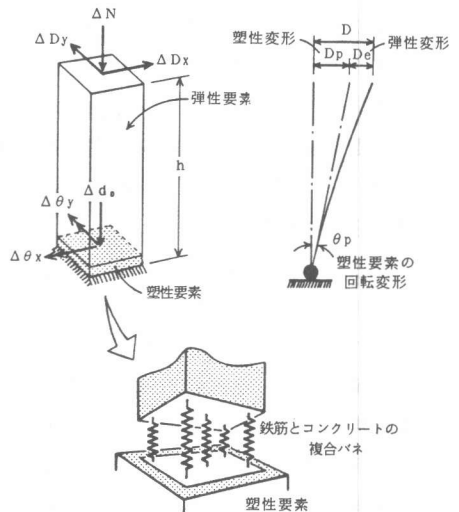


図5 MSモデル<sup>3)</sup>

#### 4. バネの耐力、位置の評価方法

複合バネの復元力特性はbi-linearとし、圧縮耐力はSバネとCバネの降伏耐力の和、引張耐力はSバネのみの降伏耐力とする。また、バネの圧縮降伏変位  $d_{cy}$  は引張降伏変位  $d_{sy}$  の  $a$  倍であるとする。複合バネには4本の周辺バネと1本の中心バネがある(図6)。中心位置のコンクリートは低軸力時には部材の曲げ挙動にあまり影響しないが、高軸力時には中立軸位置が部材中心より圧縮側に移動し、中心部の圧縮コンクリートの面積が大きくなるので、中心バネは重要な因子となる。また、芯鉄筋が存在する場合にも、中心バネの影響が大きくなる。

周辺Sバネ(図6)の降伏耐力  $f_{sy}$  は、主筋の全断面積(周辺Sバネの支配面積)と降伏強度の積を4で割ったものとし、中心Sバネの降伏耐力  $f_{sy_0}$  は、芯鉄筋の断面積(中心Sバネの支配面積)と降伏強度の積とする。

周辺バネの圧縮降伏と引張降伏が同時に起こる軸力(釣合軸力  $N_b$ )時の断面状態を図7に示す。

ここで、周辺バネの降伏の定義は以下のようにした。引張降伏は多段配筋を考慮して、断面内の引張側の1段目の主筋の歪度  $\epsilon_{st}$  が降伏歪度  $\epsilon_{sy}$  の1.5倍になるときとし、圧縮降伏は圧縮最外線のコンクリートの歪度  $\epsilon_{cc}$  が0.003になるときとした。釣合軸力時の各バネの降伏耐力と軸力の関係は、鉛直方向の力の釣合から①式ようになる。①式の右辺第2項は  $a$  が1.0に近ければ無視でき、周辺Cバネの降伏耐力  $f_{cy}$  は  $N_b/2$  で求められる。なお、 $N_b$  は平面保持仮定に立脚した数値積分法(以下では精算法と呼ぶ)により求めた。

このようにして求めた  $f_{cy}$  をコンクリート圧縮強度  $f_c$  で割ると、周辺Cバネの支配面積が求まる。全断面積からSバネ支配面積、周辺Cバネ支配面積を差し引けば、中心Cバネ支配面積最大値(中心C

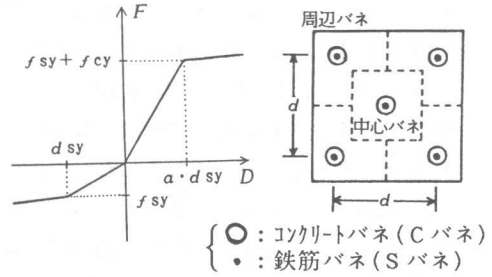
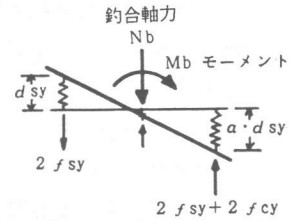
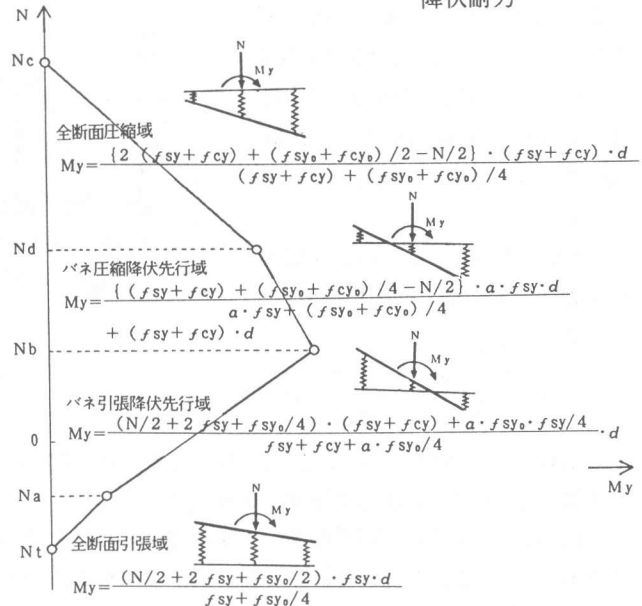


図6 複合バネ



$$N_b = 2 f_{cy} + \frac{a-1}{2a} \cdot (f_{sy_0} + f_{cy_0}) \quad \text{--- ①}$$

図7 周辺Cバネの降伏耐力



境界点の軸力

$$\begin{cases} N_c = 4(f_{sy} + f_{cy}) + (f_{sy_0} + f_{cy_0}) \\ N_d = 2(f_{sy} + f_{cy}) + (f_{sy_0} + f_{cy_0}) / 2 \\ N_b = 2 f_{cy} + \frac{a-1}{2a} \cdot (f_{sy_0} + f_{cy_0}) \\ N_a = -2 f_{sy} - f_{sy_0} / 2 \\ N_t = -4 f_{sy} - f_{sy_0} \end{cases}$$

図8 MSモデルの降伏モーメント  $M_y$  と軸力  $N$  の関係

バネが全て圧縮域にある時の値であり、支配面積は軸力により変化するが、隅柱を想定し高軸力を受ける試験体では一定としてこの値を使用した)が求まり、これに $f'_c$ を掛ければ中心Cバネの耐力 $f_{cy}$ が求まる。なお、横補強筋の拘束効果による $f'_c$ の上昇は修正Kent-Park<sup>5)</sup>の圧縮強度増大係数 $k$ を使って考慮し、無拘束の被りコンクリートを含む周辺Cバネの $f'_c$ は0.9倍に低減した。

バネはSバネとCバネが複合したものと考え、中心バネは断面中心にあるとするので、周辺バネの間隔 $d$ が求まればバネの位置は決まる。軸力 $N$ のもとでバネが降伏する時のモーメント $My$ は、図8に示すように4つの軸力の範囲において $N$ の1次関数で与えられる。バネの間隔 $d$ は、初期軸力 $N_0$ 時(バネ引張降伏先行域)におけるMSモデルの1軸の曲げ強度が精算法で求めた値と一致するように決めた。精算法とMSモデルによる軸力と1軸曲げモーメント( $N-M$ )相互作用図(試験体T2-1の場合)を図9に示す。

### 5. バネの降伏変位の評価方法

バネの降伏変位は、部材としての降伏がおこる時の塑性変形が危険断面に集中するものと考えて求める。

複合バネの引張降伏変位 $d_{sy}$ は、部材降伏時の塑性要素回転角 $\theta_p$ から求めた $d_{sy}'$ と、鉄筋が危険断面で降伏する時の定着部分からの抜け出し変形 $d_{sy}''$ (弾性付着変形と呼ぶ)の和とし、圧縮降伏変位 $d_{cy}$ は $d_{sy}'$ の $a$ 倍( $a \geq 1.0$ )とした。

$\theta_p$ は次式のように、降伏回転角から弾性変形による回転角を引いたものであり、

$$\theta_p = \frac{Dy}{H/2} - \frac{H/2}{3EI} \cdot My$$

[ここに、 $Dy$ :部材の降伏変位、 $H$ :柱の高さ、 $E$ :コンクリートの弾性係数、 $I$ :鉄筋を考慮した断面2次モーメント]

$Dy$ は、図10のように部材の曲率分布を仮定して(部材のせん断変形等を考慮するため)、危険断面が降伏する時の曲率 $\phi_y$ (精算法で求めた)から算定した。 $\theta_p$ が求まれば、図11に示すように変形の適合条件から次式が得られる。図12 仮定した鉄筋歪

$$\theta_p \cdot d = d_{sy}' + d_{s1}$$

$$\therefore d_{sy}' = \begin{cases} \frac{f_{cy} + f_{sy}}{My/d + f_{cy}} \cdot \theta_p \cdot d & \text{[バネ引張降伏先行域]} \quad \text{---②} \\ \frac{f_{sy}}{My/d + (a-1) \cdot f_{sy} - f_{cy}} \cdot \theta_p \cdot d & \text{[バネ圧縮降伏先行域]} \quad \text{---③} \end{cases}$$

部材の降伏変位 $Dy$ は軸力により変化するので、 $d_{sy}'$ も軸力に依存する。李の方法では $d_{sy}'$

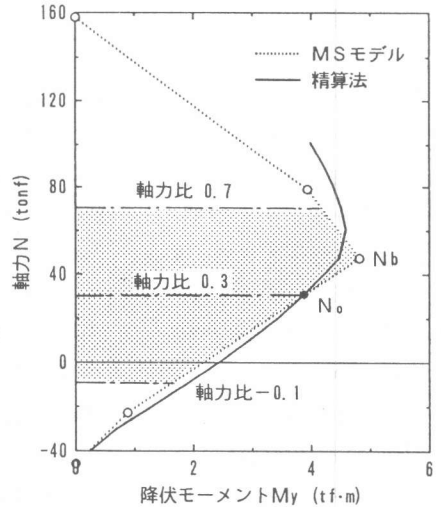


図9 N-M相互作用図

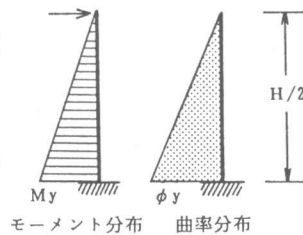


図10 仮定した曲率分布

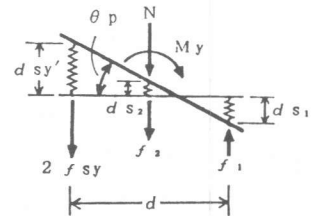


図11 変形の適合条件

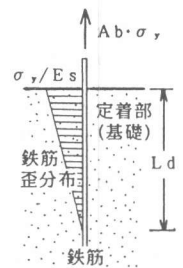


図12 仮定した鉄筋歪

は初期軸力時の値を使用し、 $d_{cy}$ は $d_{sy}(=d_{sy}' + d_{sy}'')$ と同じ値を用いている。ここでは、軸力変動幅が大きいので、引張降伏変位 $d_{sy}'$ は軸力を $(N_0 + N_{min})/2$ として②式から求め、圧縮降伏変位 $d_{cy}$ は軸力を $(N_0 + N_{max})/2$ として③式から求めた $d_{sy}'$ の $\alpha$ 倍とした( $N_{min}$ :最小軸力、 $N_{max}$ :最大軸力)。

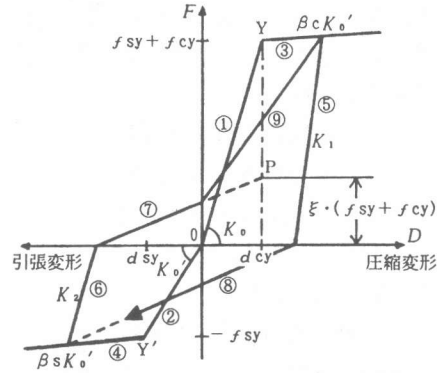
$d_{sy}''$ は、鉄筋歪を図12のように仮定して次式のように求めた。

$$d_{sy}'' = \frac{\sigma_y \cdot Ld}{2 \cdot E_s} = \frac{\sigma_y}{2 \cdot E_s} \cdot \frac{A_b \cdot \sigma_y}{\pi \cdot d_b \cdot \tau_u}$$

ここに $\sigma_y$ :鉄筋降伏強度、 $Ld$ :有効定着長さ、  
 $E_s$ :鉄筋弾性係数、 $A_b$ :鉄筋断面積、 $d_b$ :鉄筋直径、  
 $\tau_u$ :鉄筋降伏時付着強度 $=3.7\sqrt{\sigma_B}$ とする  
 (単位 $\text{kgf/cm}^2$ )、 $\sigma_B$ :コンクリート圧縮強度

### 6. バネの復元力特性

複合バネの復元力特性は李のモデル<sup>4)</sup>を参考に図13のようなものとした。このモデルでは、除荷剛性係数 $S_1$ 、 $S_2(\geq 1.0)$ によって除荷剛性を大きくし、ピンチング係数 $\xi(0 \leq \xi \leq 1.0)$ によってピンチング性状を表わすことができる。バネ引張降伏後の剛性低下係数 $\beta_s$ は1軸材端曲げモデルの降伏後剛性低下係数 $\beta$ をもとに求められる。圧縮降伏後の剛性低下係数 $\beta_c$ は、コンクリート圧壊に伴いCバネの耐力が低下することを考慮して $\beta_s$ より小さくした。



圧縮側	$K_1 = \begin{cases} S_1 \cdot K_0 & (d_{max} \leq d_{cy}) \\ S_1 \cdot K_0   d_{cy}/d_{max} ^\gamma & (d_{max} > d_{cy}) \end{cases}$
引張側	$K_2 = \begin{cases} S_2 \cdot K_0 & (d_{min} \geq -d_{sy}) \\ S_2 \cdot K_0   d_{cy}/d_{min} ^\gamma & (d_{min} < -d_{sy}) \end{cases}$

図13 複合バネの復元力特性

### 7. モデルの検証

以上のような方法で求めた試験体T2-1のパラメータ

表2 試験体T2-1のモデル化パラメータ (単位: tonf, mm)

k	Nb	N <sub>0</sub>	M <sub>0y</sub>	バネの耐力				d	降伏変位			
				f <sub>sy</sub>	f <sub>sy0</sub>	f <sub>cy</sub>	f <sub>cy0</sub>		d <sub>sy'</sub>	d <sub>sy''</sub>	d <sub>sy</sub>	d <sub>cy</sub>
1.27	47.3	30.2	3856	6.82	18.3	23.7	17.7	129	0.24	0.10	0.34	0.27

( $\alpha = 1.0$ のとき)を表2に示す。復元力特性のパラメータは、李が用いた値 $S_1 = 2.0$ 、 $S_2 = 2.0$ 、 $\gamma = 0.4$ 、 $\xi = 0.5$ を標準として、 $S_1$ 、 $S_2$ を変化させた。 $\beta_s$ は0.08、 $\beta_c$ は0.02とした。解析は、実験時に試験体柱頭に与えた2方向の水平変位、および変動軸力を入力データとし、増分解法を用いておこなった。パラメータを変えたときの、試験体T2-1の荷重-変形関係(部材角1/100のサイクル)、塑性要素の軸方向変形時刻歴を図14に示す。荷重-変形関係はパラメータによる差があまり無いが、軸方向変形は $S_1$ を4.0、 $S_2$ を1.0に変えた場合の方が

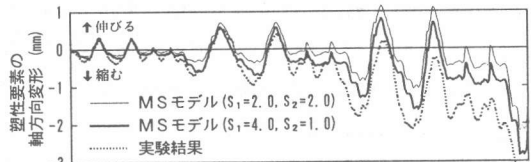
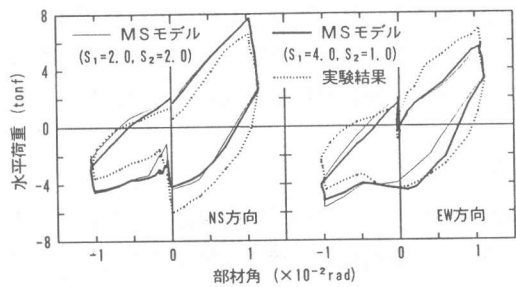


図14 パラメータと荷重-変形関係、軸方向変形

実験結果に近くなっており、軸方向の縮み変形が蓄積されていくという実験結果をバネの復元力履歴から再現するためには、 $S_1$ を大きく、 $S_2$ を小さくすればよい。これは、高軸力時には除荷

時の残留変形が大きいのが、引張軸力時には小さいことを意味する。

$S_1=4.0$ 、 $S_2=1.0$ としたときの、試験体T2-1の実験結果と解析結果の比較を図15、図16に示す。解析結果は、実験結果の傾向をうまくとらえているが、除荷時に水平荷重が負となるときの荷重-変形関係、部材角が大きいとき(特に部材角1/50以降)の軸方向変形は、まだ実験結果と合わない。軸方向縮み変形を実験結果のように大きくするために、ここではバネの復元力特性の除荷剛性を変化させたが、さらに、高軸力によるCバネの耐力低下をもう少し厳密に考慮すべきである。その他に考えられるモデルの問題点は、軸力のレベルにより変化する中心Cバネの支配面積の算出方法が確立されていないこと、繰返し载荷による鉄筋の抜け出し変形の増加が考慮されていないことなどであり、今後はこれらのことを改善すべきである。

## 8. まとめ

2方向水平力と大きな変動軸力を受けるRC部材の挙動を再現するために、MSモデルによる解析をおこなった。高軸力を受ける部材では、中心バネの特性、バネの除荷剛性、バネの圧縮変形時の耐力低下等の取り扱いが重要となる。解析結果は、実験結果の傾向をうまくとらえることができたが、解析の精度を高めるためには、これらのことをさらに厳密に考慮しなければならない。

### [参考文献]

- 1) 辰巳佳裕、小谷俊介、青山博之：2方向水平力と大きな変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究、構造工学論文集 Vol. 36B(1990年3月)、pp. 211-218.
- 2) S. S. Lai, G. T. Will, and S. Otani, "Model for Inelastic Biaxial Bending of Concrete Members", Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 110, ST11, 1984, pp. 2563-2584.
- 3) 李康寧、小谷俊介、青山博之：3軸変動力を受ける鉄筋コンクリート柱の解析モデル、構造工学論文集 Vol. 33B(1987年3月)、pp. 169-178.
- 4) 李康寧：3軸変動力を受ける鉄筋コンクリート柱の挙動(その3. MSモデルのバネの復元力特性モデル)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1987、pp. 523-524.
- 5) R. Park, M. J. N. Priestley, and W. D. Gill, "Ductility of Square-Confined Concrete Columns", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 108, ST4, 1982, pp. 929-950.

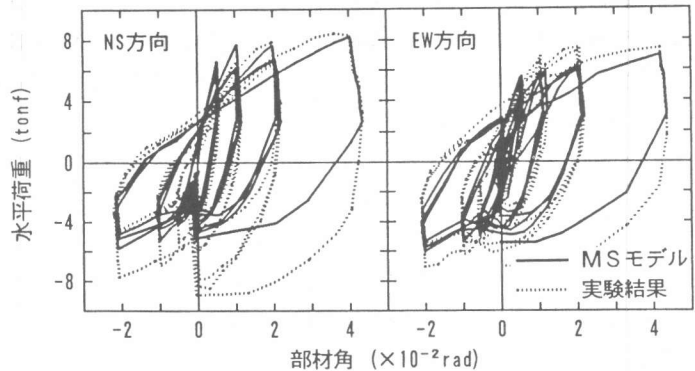


図15 実験結果と解析結果(荷重-変形関係)

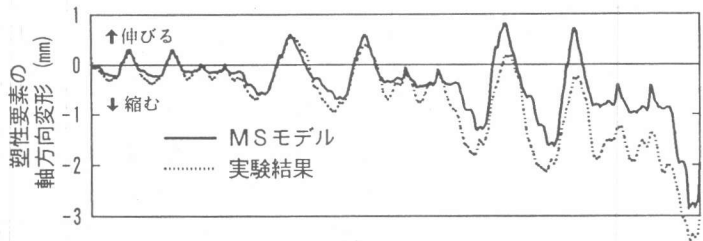


図16 実験結果と解析結果(軸方向変形)