

報告

[2060] 変動軸力を考慮した RC 造骨組の弾塑性挙動

○ 正会員 飯藤 将之 (宮城 工業 高専)  
 同 柴田 明德 (東北大学工学部)  
 渋谷 純一 (東北大学工学部)

1. はじめに

柱に作用する軸圧縮力が、地震時に水平力と共に増減することは、高層 RC 造建物の耐震設計上の考究すべき問題の一つである。本稿では、曲げ解析に用いられるファイバーモデルにより骨組の部材を構成し、部材毎に変動軸力を考慮した RC 造骨組の静的解析手法を示し、更に、6層純ラーメン建物を対象とした構造物全体の解析と下層部分を取り出した解析により、水平力と変動軸力を受ける骨組の弾塑性挙動について述べる。

2. 解析手法

2.1 剛性マトリックス

本稿で用いる部材モデルはファイバーモデルに基づいている<sup>1)</sup>。図1に示す部材の可撓部分の A 端部と B 端部にコンクリートと鉄筋の一軸応力-歪特性を有する微小要素 (=ファイバー) から成る厚さ 0 の断面 (=スライス) を挿入して、部材の剛性マトリックスを導く。両端スライスにおける部材角を含まない回転角  $\Delta \tau_{yA}$ ,  $\Delta \tau_{yB}$  とモーメント  $\Delta M_{yA}$ ,  $\Delta M_{yB}$  及び、スライス間の軸変形  $\Delta \delta_{Nm}$  と部材軸力  $\Delta N_m$  の関係は次式となる。

$$\{\Delta M_{yA}, \Delta M_{yB}, \Delta N_m\}^T = [K_B] \{\Delta \tau_{yA}, \Delta \tau_{yB}, \Delta \delta_{Nm}\}^T \quad (1)$$

ここに、 $[K_B] = [F_B]^{-1}$  (2)

$$[F_B] = \int_0^{\ell} [b(x)]^T [f_s(x)] [b(x)] dx \quad (3)$$

$$[b(x)] = \begin{bmatrix} -1+x/\ell, & x/\ell, & 0 \\ 0, & 0, & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[f_s(x)]^{-1} = [k_s(x)] = \begin{bmatrix} \Sigma E y^2 dA, & -\Sigma E y dA \\ -\Sigma E y dA, & \Sigma E dA \end{bmatrix} \quad (5)$$

部材途中の断面柔性  $[f_s(x)]$  は、A 端部、B 端部の柔性  $f_{s(A)}$ ,  $f_{s(B)}$  と、材中央は弾性柔性  $f_{se}$  であるとして、三者を直線補間して与える。この柔性分布は、地震時の部材応力状態を想定した場合の最も単純なものであり、これより (3) 式の積分が容易になる。(1) 式に部材角による回転角、軸変形の関係式、更に、剛域の影響を考慮すると、一つの節点での自由度を  $x -$

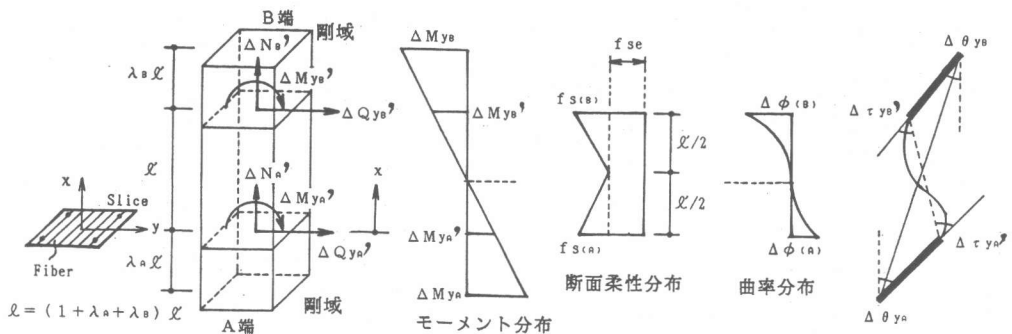


図1 部材モデル

y 面内の回転角  $\Delta \theta_{yA}$ , y 方向の水平変形  $\Delta \delta_{yA}$ , 軸変形  $\Delta \delta_{NA}$  とした時の部材剛性マトリックスは次式となる。

$$\begin{aligned} & \{ \Delta M_{yA}, \Delta Q_{yA}, \Delta N_A, \Delta M_{yB}, \Delta Q_{yB}, \Delta N_B \}^T \\ & = [C]^T [B]^T [K_B] [B] [C] \\ & \quad \{ \Delta \theta_{yA}, \Delta \delta_{yA}, \Delta \delta_{NA}, \Delta \theta_{yB}, \Delta \delta_{yB}, \Delta \delta_{NB} \}^T \end{aligned} \quad (6)$$

ここに,

$$[B] = \begin{bmatrix} 1 + \lambda_A & \lambda_B & 0 \\ \lambda_A & 1 + \lambda_B & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} 1, 1/\ell, 0, 0, -1/\ell, 0 \\ 0, 1/\ell, 0, 1, -1/\ell, 0 \\ 0, 0, -1, 0, 0, 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

であり,  $\ell$  は剛域を含む部材全長である。本稿の解析では, 剛域の長さ  $\lambda_A \ell$ ,  $\lambda_B \ell$  は部材に接続する柱もしくははりのフェイスまでとした。

## 2.2 解析方法

まず, 初期軸力に対する応答を求める。各階の軸力の差が鉛直荷重として柱の上端節点に作用するものとして解くが, ファイバーの非線形性を考慮するため荷重は数ステップの増分に分けて与える。次に, 各階の水平荷重分布係数をその階の柱の本数で割り, 柱の上端節点に無次元化荷重として作用させて解く。その解と制御節点に与える変形が増分線形関係にあるものとし, 増分荷重及び各節点の変形を計算する。スライスの曲率  $\Delta \phi_y$ , 軸歪  $\Delta \epsilon_o$  は,

$$\begin{aligned} & \{ \Delta \phi_y, \Delta \epsilon_o \}^T = [f_s(x)] [b(x)] [K_B] [B] [C] \\ & \quad \{ \Delta \theta_{yA}, \Delta \delta_{yA}, \Delta \delta_{NA}, \Delta \theta_{yB}, \Delta \delta_{yB}, \Delta \delta_{NB} \}^T \end{aligned} \quad (9)$$

として節点の変形より計算し, ファイバーの応力-歪関係に基づいて剛性マトリックスを変えて行く。本稿の手法によれば, 予め材端バネの復元力特性を定める骨組解析手法では考慮できない, 作用軸力の大小による柱部材の水平耐力の違いを表現できる。

## 3. 解析対象骨組

純ラーメン構造についての既往の文献<sup>2)</sup>を参考にして, 図2に示す6層の1スパン及び3スパン骨組を解析の対象とした。この骨組は均等多スパンラーメンの一部として設計された ( $F_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ ,  $\sigma_y = 3000 \text{ kg/cm}^2$ ) ものであり, 本来なら応力状態によって各部材の配筋を変更すべきだが, ここでは部材位置に関係なく表1に示す断面寸法, 配筋とした。また, 厳密には常時負担する軸力も側柱と中柱で異なるが, 本稿では, 水平力による軸力の推移を比較するため, 一つの層において柱の初期軸力はその位置に係わらず同じ値としており, 表2に示す通りである。

本稿では, まず, 骨組全体について水平荷重分布係数を与えた静的解析により, スパン数による柱の軸力の変動状態及び

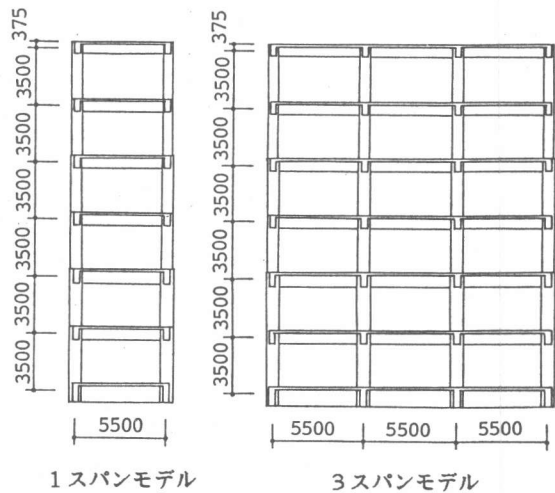


図2 解析対象骨組 単位: mm

表1 断面の形状と配筋

柱階	単位: mm		梁階	単位: mm		
	断面 $b \times D$	主筋		断面 $b \times D$	端部上 $\bar{h}$	端部下 $\bar{h}$
5, 6	650 × 650	12-D22	6, R	400 × 750	4-D22	3-D22
3, 4	700 × 700	12-D22	4, 5	400 × 800	5-D22	4-D22
1, 2	750 × 750	12-D22	2, 3	400 × 850	6-D22	4-D22

表2 荷重分布等

階	A1	水平力分布	初期軸力 (ton)	軸力比 $\eta_0$ (%)
6	1.866	3.710	20.2	2.3
5	1.531	2.377	40.4	4.6
4	1.347	1.947	60.6	5.9
3	1.212	1.604	80.8	7.9
2	1.099	1.293	101.0	8.6
1	1.000	1.000	121.2	10.3

表3 解析における諸定数

コンクリートの材料特性		
$F_e = 80 \text{ kg/cm}^2$	$F_c = 210 \text{ kg/cm}^2$	$E_1 = 2.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
$\epsilon_{co} = 0.0025$	$\epsilon_u = 0.2500$	
鉄筋の材料特性		
$\sigma_y = 3000 \text{ kg/cm}^2$	$E_1 = 2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$E_2 = E_1 / 100$

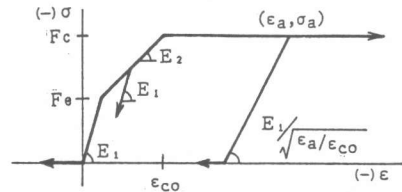


図3 (a) コンクリートの応力-歪関係

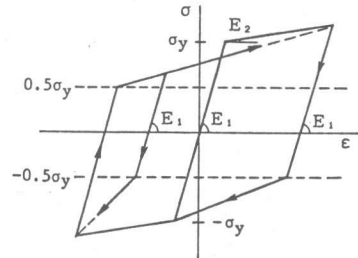


図3 (b) 鉄筋の応力-歪関係

部材挙動について比較する。次に、6層のうち下部2層のみ取り出し、上部の転倒モーメントから得られる側柱の変動軸力をパラメーターとした解析によって、軸力の変動量が部材の挙動に及ぼす影響についての検討を行う。

#### 4. 骨組全体の解析

図2に示す骨組の各部材端を14のファイバーに分割して解析を行った。はりについては、スラブ効果を考慮せず矩形断面のままとした。コンクリートファイバーと鉄筋の応力-歪関係は、図3に示す折れ線で仮定した。コンクリートの引張応力は無視し、圧縮最大応力後の軟化は入っていない。各折れ曲がり点の値を表3に示す。変位制御点は1層の左側柱の上端とし、柱頭での変形増分を0.002cmずつ与えて行き、1層での各柱の層間変形の平均が3.0cmに達するまで解析を行った。ファイバーから生じる不釣合応力は、はり、柱共不釣合軸力から計算した不釣合軸歪を解除すると共に、柱については上下端の不釣合いモーメントより得られる不釣合せん断力の補正を行っている。不釣合力の補正が適切に行われているかを調べるため、最終計算ステップにおける曲げモーメント図を描いたものが、図4である。1スパンモデルでは、1層、2層での反曲点がかかなり高くなっており、下端スライスに塑性ヒンジが生じるのに対し、上端スライスでのM-φ関係はほぼ線形となる。多スパンラーメンでは、通常、側柱より中柱のモーメントが大きくなるのが知られているが、変動軸力を考慮した本解析では、圧縮軸力増大側の柱のモーメントが大きくなっている。それに伴い、はりの反曲点はスパン中央よりややずれていることになる。

図5は塑性ヒンジの進展状況を示したものである。はり崩壊を形成しているが、圧縮軸力減少側の2層柱脚や上層部柱頭にもヒンジの発生が見られ、図4のモーメント図と対応

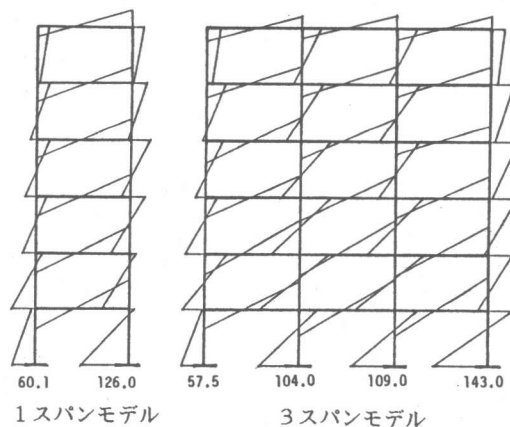


図4 曲げモーメント図

単位: t·m

している。はりに生じるモーメントは圧縮軸力増大側の方が大きくなるにも拘らず、配筋の違いにより、ヒンジは、圧縮軸力減少側の材端から発生している。1層柱脚の塑性ヒンジは圧縮軸力増大側から生じているが、単に応力が大きくなっているだけでなく、はりが軸方向に伸びることにより、圧縮軸力減少側の柱よりも、大きな層変形を強制されるためでもある。

図6(a), 図7(a)は、1層柱の解析ステップと軸力、軸方向変形の推移をプロットしたものである。3スパンモデルでは、中柱2本の軸力変動は殆どなく、両側柱のみ1スパンモデルの柱と同じ±100ton程度の変動が生じている。図6(b), 図7(b)に1層柱のせん断力と層間変形関係を示す。軸力の影響によって圧縮軸力減少側の耐力は増大側の4割程度となっている。最終計算ステップにおける層間変形は、1スパンモデルの圧縮軸力減少側で2.46cm, 増大側で3.54cm, 3スパンモデルでは1.70cmと4.60cmなっており、部材の軸方向変形を自由度としているため、2層のはりに0.7~1.3cm 即ち0.1~0.2%の伸びが生じている。図6(c),

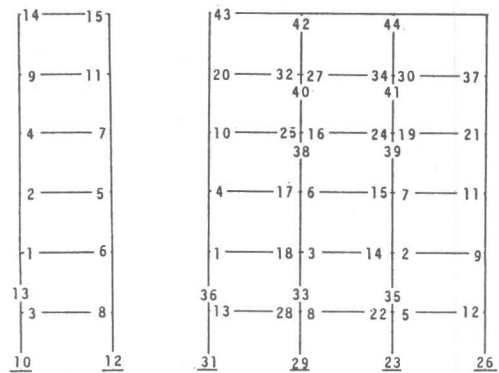
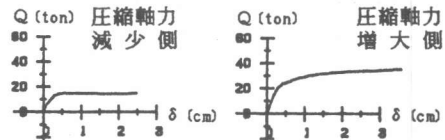


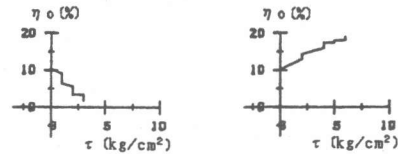
図5 骨組全体を解いた時の塑性ヒンジ発生順



(a) 1階柱の軸力変動状況

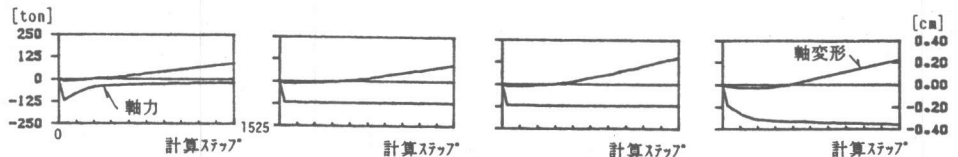


(b) 1階柱のQ-δ関係

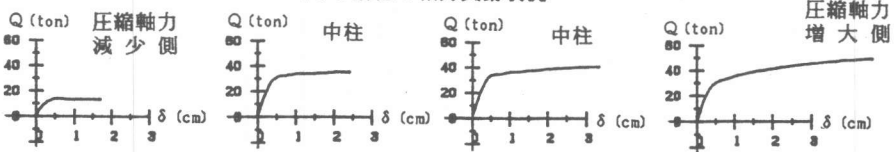


(c) 1階柱のτ-η関係

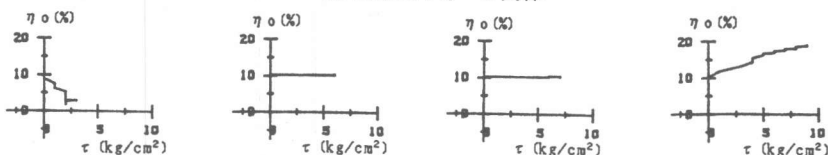
図6 1スパンモデル全体を解いた時の解析結果



(a) 1階柱の軸力変動状況



(b) 1階柱のQ-δ関係



(c) 1階柱のτ-η関係

図7 3スパンモデル全体を解いた時の解析結果

図7(c)は、軸力比 $\eta_0 (=N/bDFc)$ とせん断応力 $\tau (=Q/bD)$ の関係を示したものであり、両側において軸力の変動幅はほぼ等しいものの、負担せん断力に差異の出ることが現れている。

### 5. 部分構造の解析

6層骨組のうち下部2層のみを取り出し、1層柱頭に水平荷重分布係数1.0を、2層柱頭に2層以上の水平荷重分布係数の和を作用させて解析を行った。表4に示す様に、水平力のみ加えた場合(ケース1=軸力係数0.0)と、2層柱頭位置での上層の転倒モーメントを計算し、2層柱頭の変動軸力として水平力と共に加えた場合(ケース2=軸力係数1.0)について解析した。材料定数、増分の刻み等は骨組全体の解析と同一とした。

解析結果を図8~図11に示す。1スパン、3スパンモデル共、ケース1では両側柱で±40tonの、ケース2では±120tonの軸力の変動が生じており、骨組全体を解いた時と同様に中柱での軸力の変動は見られない。作用軸力が異なるにも拘らず柱のせん断力の差は、最終計算ステップにおける圧縮軸力減少側、増大側共約4ton前後であり、1層柱のQ- $\delta$ 関係は、圧縮軸力減少側の降伏後の耐力低下傾向を除いては、ケース1、ケース2共大差ない様に思われる。軸方向変形の推移を見ても、ケース1とケース2の差は殆どなく、軸力係数を1とした場合、係数0の時よりも圧縮軸力増大側でやや伸びが小さくなっている。

係数1とした解析は、全体骨組の解析に対応するものである。軸力の変動は、全体を解いた時と殆ど同じであるが、圧縮軸力増大側の耐力は、1スパン、3スパンモデル共に約10ton部分解析の方が高くなっている。

図には示していないが、本稿の解析モデルにより2層ラーメンを解いた場合、2層と3層のよりの伸びがほぼ等しいため、圧縮軸力増大側の2層柱のせん断力が著しく小さくなってしまふ。部分構造の解析では軸力係数の値に係わらずこの傾向が見られた。

表4 部分構造の解析ケース(無次元荷重で表示)

	1 スパン モデル	3 スパン モデル
ケース1 軸力係数 0.0		
ケース2 軸力係数 1.0		

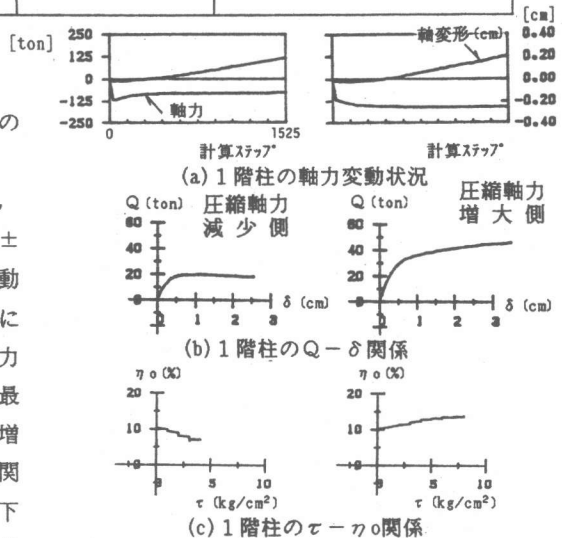


図8 1スパンモデルの部分解析の結果(軸力係数0.0)

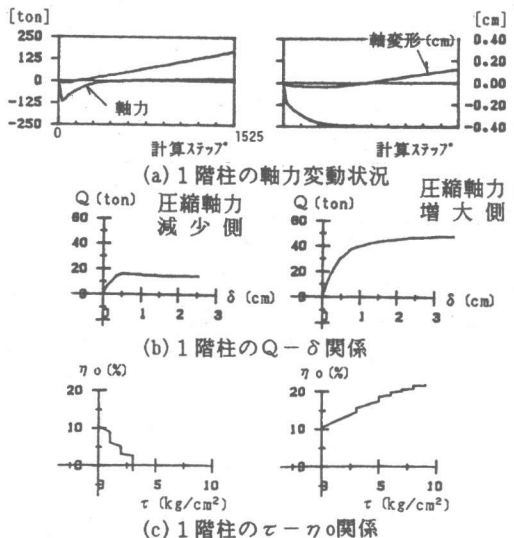


図9 1スパンモデルの部分解析の結果(軸力係数1.0)

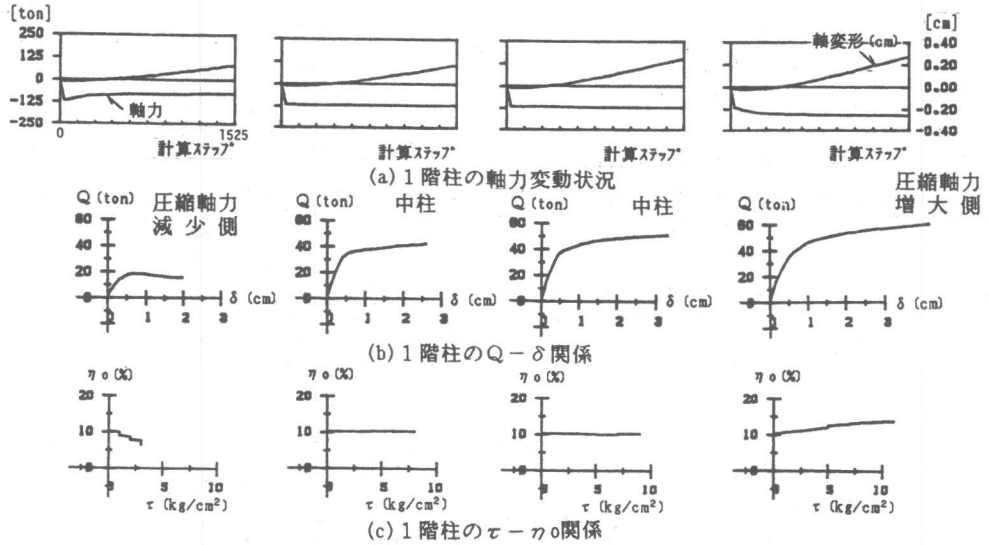


図10 3スパンモデルの部分解析の結果（軸力係数 0.0）

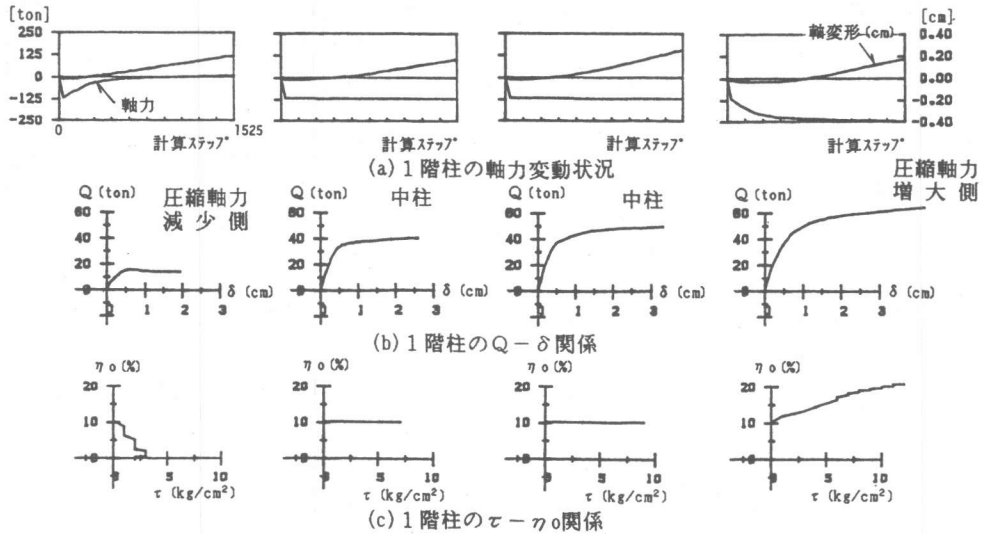


図11 3スパンモデルの部分解析の結果（軸力係数 1.0）

## 6. まとめ

ファイバーモデルに基づく骨組解析手法と6層骨組の静的解析例を示し、水平加力時には、1層両側柱において常時負担する軸力の8割程度の変動軸力が生じること、それにより水平耐力に差が現れること、モーメント反曲点の変化により一部の柱に塑性ヒンジの生じることを述べた。本手法は、変動軸力を考慮した骨組の弾塑性挙動を追跡するのに有効な解析法である。

### [参考文献]

- 1) S. A. Kaba and S. A. Mahin: " Refined Modeling of Reinforced Concrete Columns for Seismic Analysis", EERC Report No. 84/03, University of California, April 1984
- 2) 志賀, 柴田, 渋谷, 後藤: " 鉄筋コンクリート造純ラーメン建物モデルの弾塑性地震時応答性状", 日本建築学会学術講演梗概集 昭和61年B分冊 PP.677