

## 3要素 Maxwell モデルを用いた 鉄筋コンクリート骨組の地震応答解析法

正 会 員 藤 本 盛 久\*  
正 会 員 和 田 章\*\*  
正 会 員 木 村 雄 一\*\*\*

### 1. 序 論

地震時のような動的外力が作用する場合の建築物の応答挙動を動的解析より推定する場合、一般には静的加力下で得られた復元力特性に基づいているのが現状である。しかし、実際の地震時における鉄筋コンクリート構造物の挙動は、部材があるひずみ速度をもって変形するために、静的載荷下での挙動とは異なることが考えられる。このような考えに基づいて、いくつかの鉄筋コンクリート部材の高速載荷実験が行われており、以下に示すように力学的挙動・破壊性状等において静的載荷実験の現象と異なる点が報告されている。

竹田ら<sup>1),2),3)</sup>、最上ら<sup>4)</sup>は、鉄筋コンクリートはり試験体に一方向高速載荷実験を行い荷重—変形関係に対する載荷速度の影響を調べ、載荷速度が大きくなるにつれ、耐力が上昇することを明らかにした。さらに最上らは、曲げ破壊型の試験体については鉄筋・コンクリートの素材のひずみ速度による耐力上昇でこれを説明できることを報告した。若林ら<sup>5),6)</sup>は、鉄筋コンクリートはりの載荷速度の違いによる力学的挙動を実験により調べ、載荷速度を考慮した素材の応力—ひずみ関係を用いて計算することにより、実験結果を説明できることを報告した。北川ら<sup>7)</sup>は、変形速度および応力緩和効果を考慮した応答解析手法を用い、その解析結果を振動実験および仮動的実験の結果と比較することにより解析モデルの妥当性を示した。睦好ら<sup>8)</sup>は、動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の降伏耐力・最大耐力の上昇はひずみ速度の上昇により鉄筋の降伏点が増加するためであり、また、その減衰機構は速度依存型ではなく、変位の大きさに依存した履歴減衰が支配的であると述べた。森田ら<sup>9)</sup>は、載荷速度の影響を考慮した材料モデルを用いた解析により耐力の上昇、荷重—変形特性を説明した。山口ら<sup>10)</sup>は、ひずみ速度効果を考慮しない応力—ひずみ関係式を用いた非線形動的有限要素法による応答解析手法について検

討した。最相ら<sup>11)</sup>は、曲げ破壊部材の動的復元力特性を変位履歴長さをを用いて静的復元力特性から予測し、静的復元力に基づく地震応答と動的復元力に基づく地震応答の結果を比較、検討した。また、松浦ら<sup>12)</sup>は、鉄筋コンクリート骨組要素の時間依存性の挙動をコンクリートの材料特性として非線形成分とクリープ成分を直列結合したレオロジーモデルを使用し区分線形法による増分理論で定式化を行い、はりのクリープ、リラクゼーションおよび柱のクリープ座屈等の実験結果と解析結果との比較・検討を行った。

以上のようにひずみ速度の影響を考慮した実験・解析は数多く行われているが、これらは部材単位で行われていることが多く、骨組等の構造物の地震応答計算に利用できるモデルは少ない。

本論文では、部材端部に変形速度の影響を考慮した3要素 Maxwell モデルからなる軸バネ（以下、3要素 Maxwell 軸バネと呼ぶ）を有するモデルを用い、鉄筋コンクリート骨組の地震応答計算を行う解析法を提案し、ひずみ速度が応答性状に与える影響について考察する。

### 2. ひずみ速度の影響を考慮した骨組の解析法

#### 2.1 骨組のモデル

骨組を構成する部材に用いるモデル<sup>13)</sup>は図—1に示すように、中間部材(c—d間)を曲げ・せん断変形を考慮した弾性の線材とし、その両端に断面を層状に分割し有限な長さを持つ複数の3要素 Maxwell 軸バネ(b—c, d—e間)を設けたモデルである。図中のa—b部分、e—f部分は剛域である。

#### 2.2 3要素 Maxwell 軸バネの性質

コンクリートと鉄筋の力学的特性が載荷速度によって異なるということは古くから知られており<sup>14),15)</sup>、素材の動的特性を扱う場合、これらの材料を粘弾性体と考え Maxwell 系や Voigt 系のモデルを用いることが多い<sup>16),17)</sup>。

ここでは、図—2に示す3要素 Maxwell モデルを軸バネの性質として用いる。これは、変形速度の影響、応力緩和を考慮できるものであり、ひずみに対する応力を

\* 神奈川大学 教授・工博

\*\* 東京工業大学 助教授・工博

\*\*\* 東京工業大学 大学院生

(1988年11月10日原稿受理、1989年2月17日採用決定)

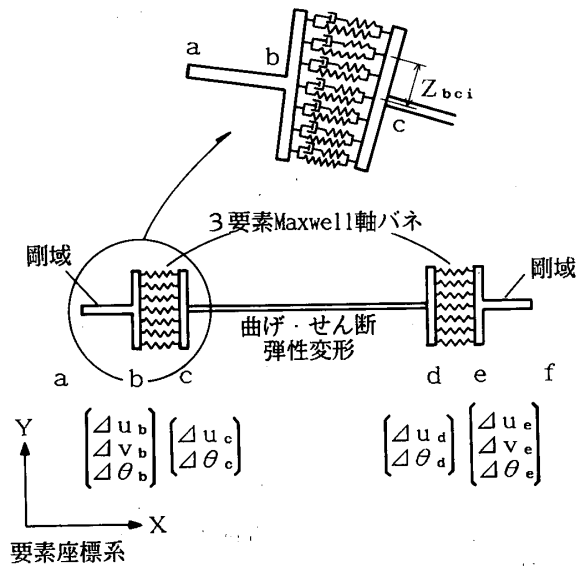


図-1 部材モデル

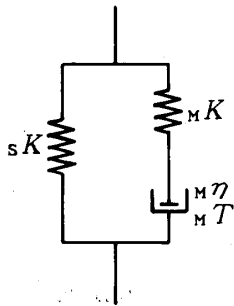


図-2 3要素 Maxwell 軸バネ

求めるのに適したモデルであり、ここでは有限な長さと同断面積を考えているため、ひずみは変位で、応力は力で表し以下の展開を行う。

1) 3要素 Maxwell 軸バネの構成

3要素 Maxwell 軸バネは2要素 Maxwell 部分とバネ部分を並列に並べたものである。2要素 Maxwell 部分に関する Maxwell の基礎方程式は、(1) 式で表される。

$${}_m\dot{D}(t) = \frac{1}{{}_mK} {}_m\dot{N}(t) + \frac{1}{{}_m\eta} {}_mN \quad \dots\dots\dots (1)$$

時刻  $t$  と時刻  $t+\Delta t$  間で考え、(1) 式を  ${}_mN_{t+\Delta t}$  について解くとその一般解は (2) 式となる。

$${}_mN_{t+\Delta t} = e^{-\frac{{}_mK_t \cdot \Delta t}{{}_m\eta}} \left( {}_mN_t + {}_mK_t \int_0^{\Delta t} {}_m\dot{D}_t(t) \cdot e^{\frac{{}_mK_t \cdot dt}{{}_m\eta}} dt \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ${}_mN_t$  は時刻  $t$  における 2要素 Maxwell 部分の力、 ${}_m\dot{D}_t(t)$  は時刻  $t$  から  $t+\Delta t$  での変形速度、 ${}_mK_t$  は時刻  $t$  での 2要素 Maxwell 部分にあるバネの剛性、 ${}_m\eta$  はダッシュポットの粘性係数である。緩和時間 (力が  $1/e$  に緩和するのに必要な時間) を  ${}_mT$  とすると  ${}_mK$  と  ${}_m\eta$  の間には  ${}_m\eta = {}_mT \cdot {}_mK$  の関係がある。

$\Delta t$  間で変形速度  ${}_m\dot{D}_t(t)$  を一定とみなして、その間のバネの変位増分を  $\Delta d$  とすると  ${}_m\dot{D}_t(t) = \Delta d / \Delta t$  と

なり、(2) 式は、

$${}_mN_{t+\Delta t} = {}_mN_t \cdot e^{-\frac{{}_mK_t \cdot \Delta t}{{}_m\eta}} + \frac{\Delta d}{\Delta t} {}_m\eta \left( 1 - e^{-\frac{{}_mK_t \cdot \Delta t}{{}_m\eta}} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり、十分  $\Delta t$  を小さくする条件で (3) 式が適用できると考える。

また、もう一つの要素であるバネ部分の負担する力は

$${}_sN_{t+\Delta t} = {}_sK_t \cdot \Delta d + {}_sN_t \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで、 ${}_sN_t$  および  ${}_sK_t$  は時刻  $t$  におけるバネ部分の力およびバネ部分の瞬間剛性である。したがって、3要素 Maxwell 軸バネの時刻  $t+\Delta t$  における力は (5) 式となる。

$$N_{t+\Delta t} = {}_mN_t \cdot e^{-\frac{{}_mK_t \cdot \Delta t}{{}_m\eta}} + \frac{\Delta d}{\Delta t} {}_m\eta \left( 1 - e^{-\frac{{}_mK_t \cdot \Delta t}{{}_m\eta}} \right) + {}_sK_t \cdot \Delta d + {}_sN_t \quad \dots\dots\dots (5)$$

2) 3要素 Maxwell 軸バネの特性

(3) 式において変位が一定に保たれているとすれば、2要素 Maxwell 部分の応力緩和現象は、

$${}_mN_{t+\Delta t} = {}_mN_t \cdot e^{-\frac{{}_mK_t \cdot \Delta t}{{}_m\eta}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

で表される。3要素 Maxwell モデルは時間  $t$  が無限大の極限において応力緩和により応力が図-3 に示すように有限の値に漸近することが特徴である。本論文では  ${}_sK$  は静的な剛性、 ${}_mK$  はバネが動的に変形することによる耐力上昇分の剛性と考える。軸方向の力と変形を 3要素 Maxwell 軸バネの静的な剛性と動的効果による剛性の 2つにより定式化することにより、部材モデルとして静的解析、動的解析の両方が可能となる。静的解析を行おうとするときは、 ${}_mK$  または  ${}_m\eta$  を小さな値にするか、変形速度を十分小さな値にすればよい。

2.3 節点増分変位と部材に生じる力の関係

1) 剛性マトリクスおよび内力ベクトル

$\Delta t$  間にある部材の  $b, c$  に生じる要素座標系の変位増分を  $\Delta u_{bc} = [\Delta u_b, \Delta \theta_b, \Delta u_c, \Delta \theta_c]^T$  とすると、 $b-c$  間の  $i$  番目の 3要素 Maxwell 軸バネの伸びの増分  $\Delta d_{bci}$  は (7) 式のように表される。

$$\Delta d_{bci} = [-1, -Z_{bci}, 1, Z_{bci}] \Delta u_{bc} \quad \dots\dots\dots (7)$$

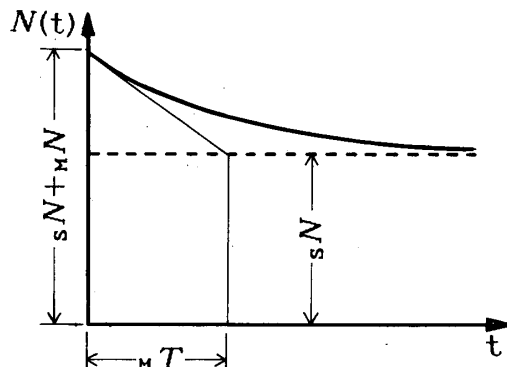


図-3 3要素 Maxwell 軸バネの応力緩和

ただし、 $Z_{bci}$  は断面中心から  $i$  番目の 3 要素 Maxwell 軸バネまでの距離である。 $\Delta d_{bci}$  よりバネの変形速度  $\Delta d_{bci}/\Delta t$  を求めることができ、(5) 式より 3 要素 Maxwell 軸バネの力  $N_{bci}(t+\Delta t)$  を求めることができる。

本解析では各時間ステップごとにその時点の 3 要素 Maxwell 軸バネの性質を考慮して剛性マトリクスを作り骨組全体を解く方法を用いているため、 $t=t \sim t+\Delta t$  の間における 3 要素 Maxwell 軸バネのみかけの剛性を求める必要がある。この部分では収束計算を行うが、 $\Delta t$  間にバネに生じる変位増分を仮定して速度の効果も考慮した 2 要素 Maxwell 部分の力の変化を計算し、仮定した変位増分で除することにより、2 要素 Maxwell 部分のみかけの剛性  ${}_M K_{pbci}$  を (8) 式のように求めることができる。

$${}_M K_{pbci} = \{ {}_M N_{bci}(t+\Delta t) - {}_M N_{bci}(t) \} / \Delta d_{bci} \quad \dots\dots\dots (8)$$

これより  $i$  番目の 3 要素 Maxwell 軸バネのみかけの剛性  $K_{bci}$  は (9) 式ようになる。

$$K_{bci} = {}_S K_{bci} + {}_M K_{pbci} \quad \dots\dots\dots (9)$$

上で求めた  $K_{bci}$ 、 $\Delta d_{bci}$ 、 $N_{bci}(t+\Delta t)$  を材端にあるバネ全体で集計することにより b—c 間の全 3 要素 Maxwell 軸バネによる剛性マトリクス  $K_{bc}$  および時刻  $t+\Delta t$  での内力ベクトル  ${}_M f_{bc}$  が求まる。

$$K_{bc} = \begin{bmatrix} \sum K_{bc} & \sum K_{bc} Z_{bc} & 0 & 0 \\ \sum K_{bc} Z_{bc} & \sum K_{bc} Z_{bc}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sum K_{bc} & \sum K_{bc} Z_{bc} \\ 0 & 0 & \sum K_{bc} Z_{bc} & \sum K_{bc} Z_{bc}^2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$${}_M f_{bc} = \begin{Bmatrix} \sum (-N_{bc}) \\ \sum (-N_{bc} Z_{bc}) \\ \sum (N_{bc}) \\ \sum (N_{bc} Z_{bc}) \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (11)$$

d—e 間の全 3 要素 Maxwell 軸バネについても同様である。

2) 要素剛性マトリクスおよび要素内力ベクトル

図—1 の b—c 間、d—e 間ではせん断ずれは生じないとしているため、要素座標系において 1 部材に対して  $[\Delta u_b, \Delta v_b, \Delta \theta_b]$ 、 $[\Delta u_c, \Delta \theta_c]$ 、 $[\Delta u_d, \Delta \theta_d]$ 、 $[\Delta u_e, \Delta v_e, \Delta \theta_e]$  の 10 個の変位増分が必要であり、これに対応して外力の項は  $[F_{xb}, F_{yb}, M_b]$ 、 $[F_{xc}, M_c]$ 、 $[F_{xd}, M_d]$ 、 $[F_{xe}, F_{ye}, M_e]$  の 10 個となる。このうち、 $F_{xc}$ 、 $M_c$ 、 $F_{xd}$ 、 $M_d$  は c 点、d 点に外力が作用しないことからゼロである。この性質を利用して、b—c の節点間の力と増分変位の関係は (12) 式で表せる。

$$\begin{Bmatrix} {}_{ex} f_{be} \\ {}_{ex} f_{cd} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_{be} \\ \Delta u_{cd} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} {}_{inf} f_{be} \\ {}_{inf} f_{cd} \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (12)$$

(12) 式の  ${}_{ex} f_{cd}=0$  より、要素剛性マトリクス  $K_{be}$ 、要素内力ベクトル  ${}_{inf} f_{be}$  が求まる。

$${}_{ex} f_{be} = K_{be} \Delta u_{be} + {}_{inf} f_{be} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$K_{be} = [K_{11} - K_{12} K_{22}^{-1} K_{21}] \quad \dots\dots\dots (14)$$

$${}_{inf} f_{be} = -K_{12} K_{22}^{-1} {}_{inf} f_{cd} + {}_{inf} f_{be} \quad \dots\dots\dots (15)$$

${}_{ex} f$  は外力ベクトル、 ${}_{inf} f$  は内力ベクトル、 $K_{11}$  は b と e を関係づける剛性マトリクス、同様に  $K_{12}$  は b、e と c、d を、 $K_{21}$  は c、d と b、e を、 $K_{22}$  は c と d を関係づける剛性マトリクスである。

剛域の長さや部材の傾きを考慮して  $K_{be}$ 、 ${}_{inf} f_{be}$  を座標変換することによって a—f の節点間を関係づける要素剛性マトリクス  $K$ 、要素内力ベクトル  ${}_{inf} f$  を求める。

$$K = T^T K_{be} T \quad \dots\dots\dots (16)$$

$${}_{inf} f = T^T {}_{inf} f_{be} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$T$  は変位増分の全体座標系から要素座標系への座標変換マトリクスである。

3. 応答解析法

3.1 建物のモデル化

質点は集中質量とし各質点について水平・上下二方向の慣性力が作用するものとする。個々の質点位置における回転は考慮するがその回転慣性は考慮しない。

このモデルの振動方程式を (18) 式に示す。

$$[M] \{ \ddot{a} \} + \{ f \} = -[M] \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \vdots & \vdots \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_h \\ \ddot{y}_v + g \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots (18)$$

$[M]$  は質量マトリクス、 $\{ a \}$  は加速度ベクトル、 $\{ f \}$  は復元力ベクトル、 $\ddot{y}_h$  は水平方向入力加速度、 $\ddot{y}_v$  は上下方向入力加速度、 $g$  は重力加速度である。減衰力の項は各部材の端部に 3 要素 Maxwell 軸バネを用いているため  $\{ f \}$  の中に自動的に含まれる。

3.2 数値積分法

このモデルは部材自身に応力緩和、減衰効果があるので、その復元力特性は時間依存性がある。これを考慮するため、数値積分法には Newmark- $\beta$  法を用いる。図—4 にその動的解析部分のフローチャートを示す。

3.3 解析法の流れ

次のステップの加速度を、現在のステップの加速度と前のステップの加速度から (19) 式で求め第 1 仮定値とする。

$$\{ a_{t+\Delta t}^* \} = 2 \{ a_t \} - \{ a_{t-\Delta t} \} \quad \dots\dots\dots (19)$$

その結果として速度、変位の仮定値を求めることができる。

$$\{ v_{t+\Delta t} \} = \{ v_t \} + \frac{1}{2} \Delta t \{ a_t \} + \frac{1}{2} \Delta t \{ a_{t+\Delta t}^* \} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\{ x_{t+\Delta t} \} = \{ x_t \} + \Delta t \{ v_t \} + \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t^2 \{ a_t \} + \beta \Delta t^2 \{ a_{t+\Delta t}^* \} \quad \dots\dots\dots (21)$$

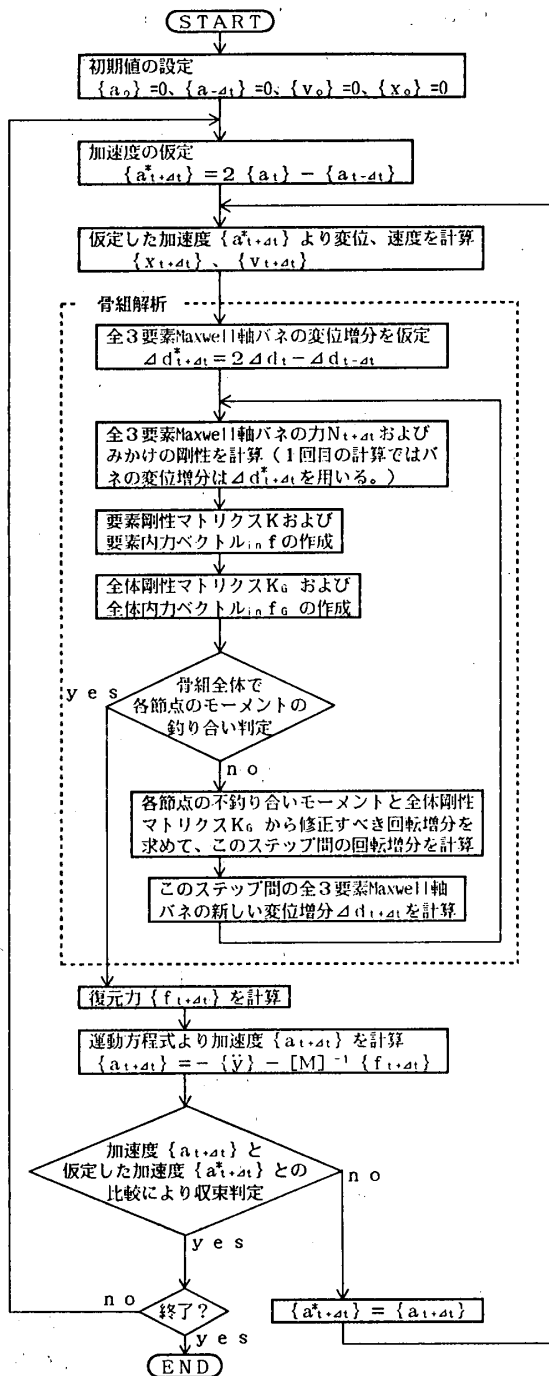


図-4 フローチャート (動的解析部分)

上で求めた各質点位置での上下・水平方向の変位を入力として外力と内力がつり合うまで収束計算し、質点位置に作用させるべき水平・上下方向の節点力を次のようにして求める。各部材の中間部分は弾性と仮定しているから問題ないが、材端バネの力-変位関係には3要素Maxwellモデルを用いているため  $t = t \sim t + \Delta t$  における力と変位の関係は一義的には定まらない。そのため、節点の上下・水平方向の変位増分は仮定値に固定し、回転増分を未知量として収束計算により、つり合い状態を求める。各ステップの1回目の計算における3要素Maxwell軸バネのみかけの剛性計算の際には、各バネ

の変位増分を(22)式のように  $\Delta d_{t+\Delta t}^*$  と仮定して計算を進める。

$$\Delta d_{t+\Delta t}^* = 2 \cdot \Delta d_t - \Delta d_{t-\Delta t} \dots (22)$$

仮定した  $\Delta d_{t+\Delta t}^*$  を用いて(5)式から3要素Maxwell軸バネの力を、(9)式よりみかけの剛性をもとめ、(10)~(17)式により部材ごとの要素剛性マトリクス  $K$  および要素内力ベクトル  $inf$  を作る。

部材ごとの要素剛性マトリクス  $K$  および要素内力ベクトル  $inf$  を用いて全体剛性マトリクス  $K_c$  および全体内力ベクトル  $inf_c$  を求める。

質点には回転慣性を考えていないため、各節点での骨組全体のモーメントの和がゼロになるか否かでつり合いを判定することができる。つり合っていないときは各節点での不釣り合いモーメントおよび骨組全体の剛性マトリクス  $K_c$  を用いて節点の回転増分の修正すべき値を求める。1ステップ間に計算されるこの値を集計することにより1ステップ中に生じる回転増分を計算することができる。仮定した水平および鉛直方向の節点変位増分と回転増分を用いて(7)式より3要素Maxwell軸バネの新しい変位増分  $\Delta d_{t+\Delta t}$  を求める。1回目の収束計算では  $\Delta d_{t+\Delta t}$  の代わりに  $\Delta d_{t+\Delta t}^*$  を用いたが、2回目以降は  $\Delta d_{t+\Delta t}$  を用いて上述した骨組の解析を繰り返し、収束状態を求める。このときの  $inf_c$  から水平・上下成分を取り出すことにより各質点位置で構造物が発揮している水平・上下二方向の復元力ベクトル  $\{f_{t+\Delta t}\}$  を求めることができる。

復元力が求まった後、運動方程式よりNewmark- $\beta$ 法に従い同じステップの加速度  $\{a_{t+\Delta t}\}$  を求め直す。

$$\{a_{t+\Delta t}\} = - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y}_h \\ \dot{y}_v + g \end{Bmatrix} - [M]^{-1} \{f_{t+\Delta t}\} \dots (23)$$

これを仮定した加速度  $\{a_{t+\Delta t}^*\}$  と比較し、収束判定を行う。収束条件を満たしたとき次のステップに進み、満たしていないときは求まった加速度を新しい加速度として仮定し、速度、変位の次の近似値を求め上の計算を繰り返す。収束判定は全自由度に対応する加速度について行い、収束判定条件としては、

$$\frac{|a_i^* - a_i|}{|a_i^*| + |a_i|} < 10^{-3} \quad (i=1, 2n : n \text{ は質点数}) \dots (24)$$

を使う。

#### 4. 部材モデルの検証

本モデルを使って、文献18)に発表されている実験の解析を行い、この部材モデルの妥当性を検討する。

##### 4.1 実験概要

試験体形状および配筋を図-5に示す。柱の寸法は、断面  $b \times D = 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 、長さ  $2a = 90 \text{ cm}$  (シアースパン比  $a/D = 1.5$ ) で、主筋は 8-D13、鉄筋比  $p_g = 1.13\%$ 、帯筋比  $p_w = 0.46\%$  である。実験では 2 本の柱を 1 m 間隔に立て上下に剛性、耐力の高いりを設け柱頭、柱脚の回転を拘束した逆対称曲げモーメントが生じる載荷を行っている。

柱頭における水平方向の載荷速度は、静的 (以後 SN と呼ぶ、以下同様)、動的 2.5 cm/sec (DNL)、25.0 cm/sec (DNH) の 3 種類であり、載荷速度 25.0 cm/sec については柱の軸方向変形を柱 1 本につき 4 本の  $80 \phi$  鋼棒で拘束したもの (DC) があり、試験体は計 4 体である。表-1 に鉄筋の降伏強度とコンクリートの圧縮強度を示す。

4.2 実験の解析

1) 素材定数の決定

2.2 の考えに基づいて、コンクリート・鉄筋のバネ部分のヤング係数  $E_e$ 、Maxwell 部分のヤング係数  $E_i$  および粘性係数  $\eta_i$  を決定する。コンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係は図-6 に示すように Bi-linear と仮定し、剛性  $sK$  のバネ、剛性  $mK$  のバネの両方にこれを用いる。また、バネ部分と Maxwell 部分の降伏時ひずみは同じとし、鉄筋は 0.18%，コンクリートは 0.11%

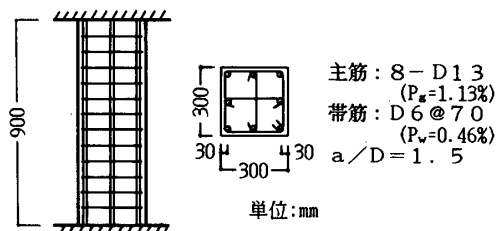


図-5 試験体

表-1 鉄筋・コンクリートの静的素材試験結果

鉄筋				
	降伏応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		
D6	4428	5710		
D13	3908	5610		
コンクリート				
試験体	28日 圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	材齢 (日)	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
SN	218	40	245	18.2
DNL	211	38	242	18.4
DNH	218	49	261	17.1
DC	211	42	257	23.5

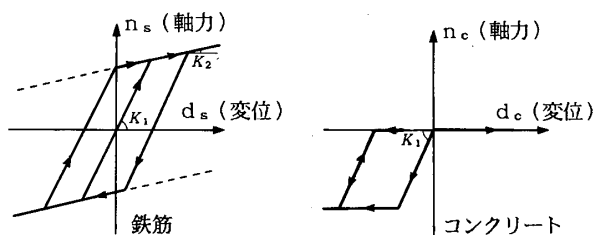


図-6 軸バネの軸力-変形関係

とする。コンクリートの圧縮強度に対するひずみ速度の影響は動的素材試験結果 18) と文献 5) を参考にして次のように定めた。図-7 は各ひずみ速度における圧縮強度  $c\sigma_B$  を静的圧縮強度  $c\sigma_{B0}$  で除したものと、ひずみ速度の関係を片対数グラフにプロットしたものである。この図に、本解析で用いる定数  $E_i = 0.25 E_e$  (ton/cm<sup>2</sup>)、 $\eta_i = 4.0$  (sec·ton/cm<sup>2</sup>) としたときの関係を実線で示す。これはひずみ速度の大きさにより 25% の耐力上昇があることを示している。

鉄筋については、文献 19), 20), 21) を参考にし、降伏強度の上昇について、図-8 中に実線で示すように各定数  $E_i = 0.30 E_e$  (ton/cm<sup>2</sup>)、 $\eta_i = 4.0$  (sec·ton/cm<sup>2</sup>) を決めた。

図-9 は 3 要素 Maxwell 軸バネを 3 種類の一定のひずみ速度 (0.1, 0.01, 0.001 (1/sec)) で変形させたときのひずみと応力関係をコンクリートと鉄筋について示してある。この図からひずみ速度による 3 要素 Max-

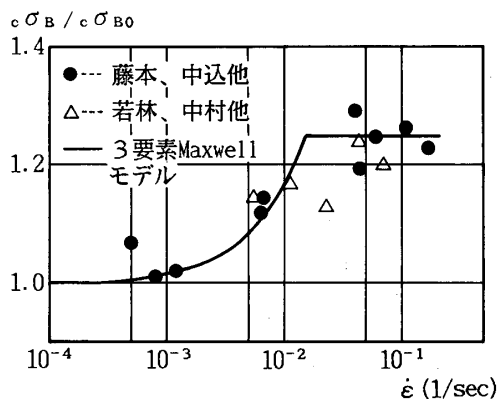


図-7 コンクリートの圧縮強度上昇率-ひずみ速度関係

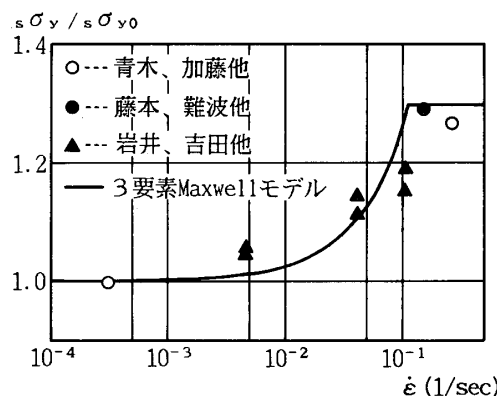


図-8 鉄筋の降伏強度上昇率-ひずみ速度関係

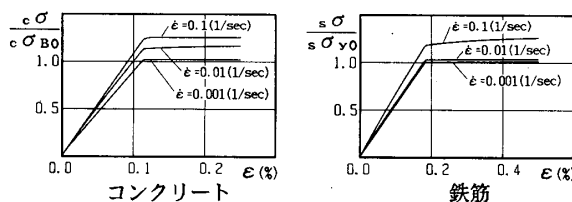


図-9 素材のひずみ速度による耐力上昇

well バネの降伏応力の違いがわかる。

2) 入力方法

解析は柱1本について行い、実験と同様に32.4 tonの軸力を加え、実験の水平方向変位の時刻歴を時間方向に600分割し、図-10に示すように変位増分として入力する。そのため1ステップの時間間隔はDNLでは0.00375 sec, DNH・DCでは0.000375 secと载荷速度によって異なった値を用いた。断面は図-11に示すように65本の3要素Maxwell軸バネで表し、バネの長さはスパンの1/9とし剛域は考えていない。DC試験体については、軸方向変形に対して80φ鋼棒4本分の剛性を考慮する。

3) 解析結果と実験結果との対応

水平力と層間変位の関係について、図-12に実験結果、図-13に解析結果を示す。実験結果と解析結果を比較すると耐力上昇に関し、ほぼよい対応を示していることが分かる。しかし、コンクリートの応力-ひずみ関係にひずみ軟化を考慮していないため最大耐力以後の耐力低下については解析結果の方が少ない。

図-14に解析結果における引張側鉄筋について(a)図に層間変形とひずみ速度の関係、(b)図に層間変形と3要素Maxwell軸バネの力をバネ部分の力で除した耐力上昇率の関係を示す。図-15に圧縮側鉄筋位置のコンクリートについて同様の関係を示す。DNLとDNHを比べると鉄筋・コンクリートともDNHのほうがひずみ速度および素材の耐力上昇率が大きく、ひずみ速度による素材の耐力上昇を考慮すれば、部材としての耐力上昇が考慮されることが分かる。DCをDNHと比べるとDCは軸方向伸びを拘束しているため、DNHに比べ鉄筋のひずみ速度は小さいがコンクリートのひずみ速度が大きくなっており、軸方向伸びを拘束することによる違いがでてくる。図-14、図-15でDCとDNHがひずみ速度が異なるのに耐力上昇がほぼ等しくなっているのは、図-7、図-8に示すように、あるひずみ速

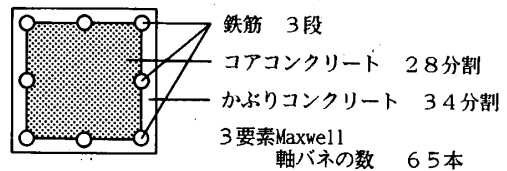


図-11 断面の分割

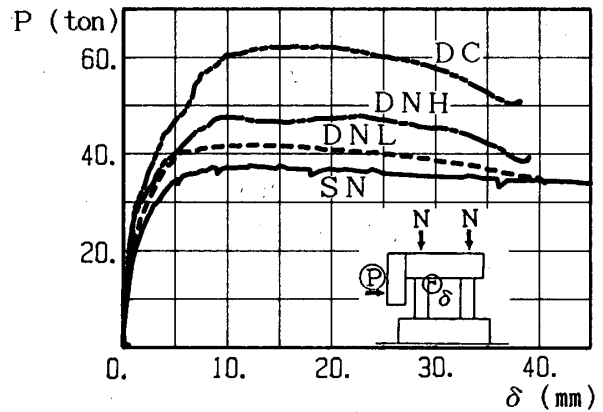


図-12 水平力と層間変位の関係 (実験結果)

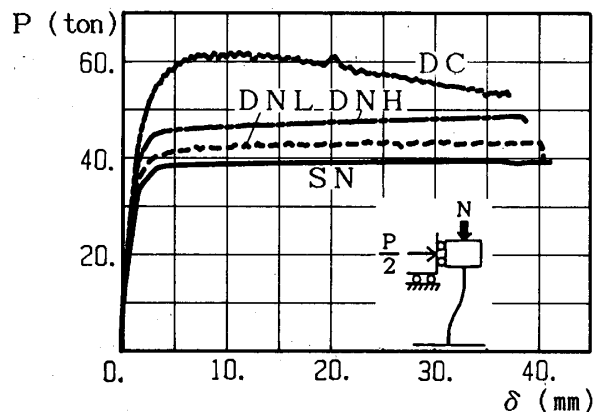


図-13 水平力と層間変位の関係 (解析結果)

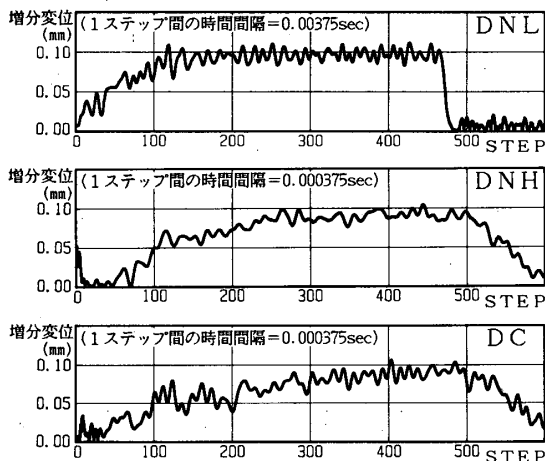


図-10 入力増分変位

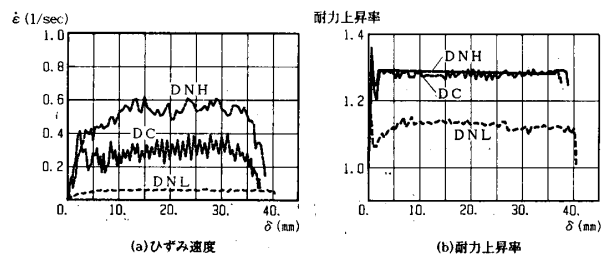


図-14 引張側鉄筋のひずみ速度および耐力上昇率 (解析結果)

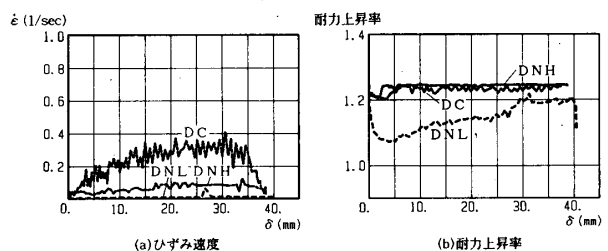


図-15 圧縮側コンクリートのひずみ速度および耐力上昇率 (解析結果)

度以上で耐力上昇が一定になるように定数を決めているためである。

以上より、この部材モデルと定数により変形速度の違いによる耐力の変化を表すことができると考える。

### 4.3 変形速度による履歴特性の変化

実験の解析で用いたものと同じモデルにより図一16に示すような繰り返し三角波形の変位履歴を与えたときの、静的と動的（変形速度 25 cm/sec）の復元力性状の違いを調べる。図一17はこの解析結果である。動的な場合の鉄筋とコンクリートに生じるひずみ速度の最大が約 0.6 (1/sec) である。変形速度による部材の耐力上昇を履歴ループの形に表すことができることが分かる。

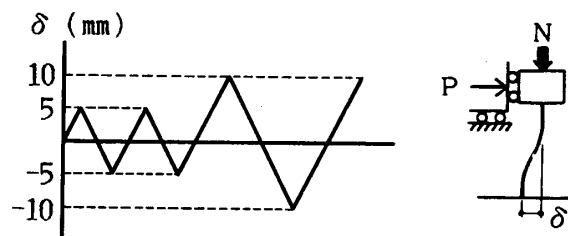
## 5. 多質点系の地震応答解析

### 5.1 8 質点フレームの地震応答解析

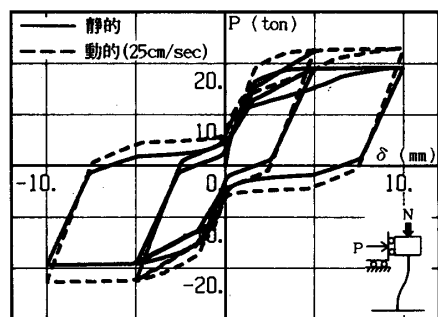
#### 1) 解析対象物

解析の対象は4層1スパン鉄筋コンクリート骨組で図

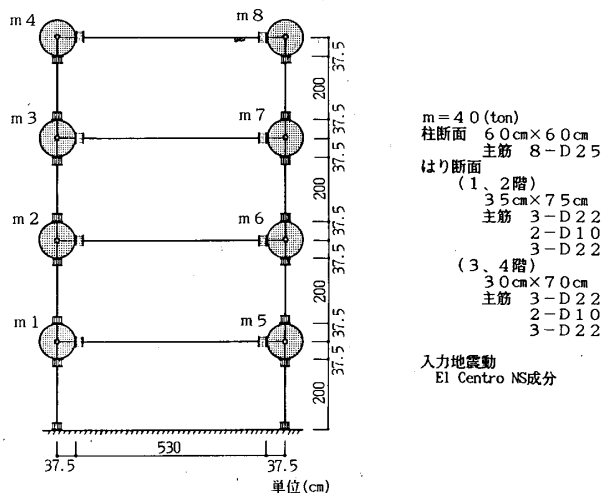
一18に示す8質点フレームにモデル化する。各々の質点の質量は 40 ton とする。柱断面は 60 cm×60 cm、はり断面は 35 cm×75 cm (1, 2階) と 30 cm×70 cm (3, 4階) である。部材端部に 37.5 cm の剛域を設け、バネの長さは部材長さから剛域長さを引いた長さの 1/9 とする。コンクリートの圧縮強度は 240 kg/cm<sup>2</sup>、鉄筋の降伏強度は 3850 kg/cm<sup>2</sup> を用い、4. で求めた 3 要素 Maxwell 軸バネの Maxwell 部分の剛性  $mK$  および減衰係数  $m\eta$  を用いたものを Type 1、 $mK$  および  $m\eta$  を 0.2 倍し、ひずみ速度の影響を少なくしたものを Type 2 とする。質点の質量による軸力を加える静的解析を行ってから地震動を入力とした動的解析を行う。入力地震動は、水平成分のみで、El Centro (1940) NS 成分 (Max 319.19 cm/sec<sup>2</sup>) を用いる。計算時間刻み  $\Delta t$  に関しては地震動の記録間隔は 0.01 sec であるが、発散を防ぐためそれをさらに 100 分割して、 $\Delta t=0.0001$  sec を用



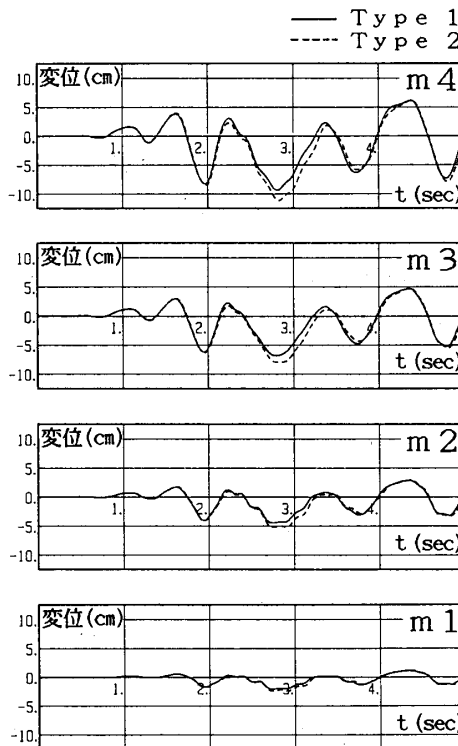
図一16 入力履歴



図一17 静的と動的の復元力の違い (解析結果)

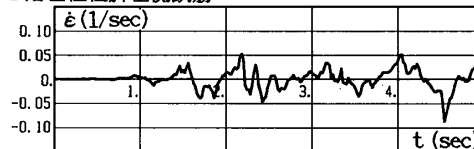


図一18 解析対象物

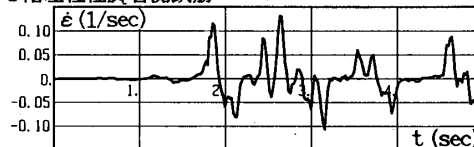


図一19 水平相対変位応答結果

#### type 1 (case A) 1階左柱柱脚左側鉄筋



#### 1階左柱柱脚右側鉄筋



図一20 1階左柱柱脚の鉄筋のひずみ速度

いて5秒間の継続時間に対して解析を進めた。

## 2) 解析結果

Type 1 と Type 2 の地表に対する左側の質点 (m1~m4) の水平相対変位応答結果を図-19 に示す。図-20 に Type 1 について1階左柱柱脚での鉄筋のひずみ速度の時刻歴を示す。

Type 1 と Type 2 では変位応答結果が多少違っている。図-20 からわかるように Type 1 の最大ひずみ速度が約 0.13 (1/sec) となっており、ひずみ速度の影響を受けやすい Type 1 の方が部材の耐力が上昇し、その結果として層間変位が小さくなるものと考えられる。

## 6. 結論

部材端部に变形速度の影響を考慮した3要素 Maxwell 軸バネを有するモデルを用いた応答解析法を提案し、モデルの妥当性を検証し、このモデルを用いた骨組の応答解析を行った。これらのことより、以下のことが導かれた。

1) 部材モデルの検証により、本論文で提案したモデルは変形速度の違いによる部材の耐力の変化を表せることを示した。

2) 8質点フレームモデルの地震応答解析でひずみ速度の影響を考えた場合、部材の耐力が上昇し、層間変位が小さくなった。

3) 本解析モデルによりひずみ速度の影響により応力-ひずみ関係が変わることを考慮した地震応答解析が行えることを示した。

## 謝辞

研究費の一部に文部省科学研究費を使用しました。関係者各位に御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 竹田仁一・立川博之：“構造物及び構造材料の高速荷重に対する力学的性質の研究(その2)”，日本建築学会論文報告集第66号，pp.105~108，昭和35.10  
“同題(その3)”，日本建築学会論文報告集第77号，pp.1~6，昭和37.9  
“同題(その4)”，日本建築学会論文報告集第78号，pp.1~6，昭和37.10
- 2) 竹田仁一・立川博之：“高速荷重をうける鉄筋コンクリート梁の力学的諸性質”，日本建築学会論文報告集号外，pp.314，昭和42.10
- 3) 竹田仁一・立川博之・岡村攻三：“鉄筋コンクリート梁高速剪断実験”，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.705~706，昭和45.9
- 4) 最上達夫・小林 淳：“高速荷重を受ける鉄筋コンクリート梁の耐力と変形に関する実験的研究”，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1579~1582，昭和53.9
- 5) 若林 實・中村 武・吉田 望・岩井 哲・渡辺幸広：“構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究”，京大防災研究所年報，第23号B-1，pp.159~171，昭和55.4

- 6) 若林 實・中村 武・岩井 哲・渡辺幸広・下戸芳寛・林 康裕：“構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究(その2)”，京大防災研究所年報，第25号B-1，pp.151~167，昭和57.4
- 7) 北川良和・長滝慶明・鹿嶋俊英：“変形速度および応力緩和効果を考慮した地震応答解析—モデル化とその妥当性—”，日本建築学会構造系論文報告集第343号，pp.32~41，昭和59.9
- 8) 睦好宏史・町田篤彦：“動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究”，土木学会論文集第354号/V-2，pp.81~90，昭和60.2
- 9) 野村祥一・藤井 栄・大上 実・森田司郎：“鉄筋コンクリート柱に及ぼす載荷速度の影響”，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.411~414，昭和61.8
- 10) 山口 弘・藤本一男・野村設郎：“高速荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの動的応答解析”，構造工学論文集 Vol.32 B，pp.189~199，昭和61.3
- 11) 最相元雄・赤星 靖：“鉄筋コンクリート部材の動的復元力に関する実験的研究(その1~その5)”，日本建築学会九州支部研究報告，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和61.3~昭和63.3
- 12) 松浦 誠・山本春行：“鉄筋コンクリートはり，柱部材の非線形および時間依存性挙動”，日本建築学会構造系論文報告集第322号，pp.36~43，昭和57.12
- 13) 近藤 晃・深井 豊・和田 章・坂田弘安：“増分解法による保有耐力算定法について”第8回電子計算機利用シンポジウム，pp.175~179，昭和61
- 14) M. J. Wastein：“Effect of Strain Rate on Compressive Strength and Elastic Properties of Concrete”，ACI Journal Proceeding, Vol.49, No.10, pp.729~744, 1953
- 15) D. Manjoine：“Influence of Rate of Strain and Temperature on Yield Stress of Mild Steel”，Journal of Applied Mechanics, Vol.11, pp.A-211~218, 1944
- 16) 渡辺啓行：“軟鋼の動的弾塑性復元力特性”，土木学会論文報告集第182号，pp.1~18，昭和55.10
- 17) 畑野 正・渡辺啓行：“コンクリートの動的粘弾性定数ならびにポアソン比について”，土木学会論文報告集第184号，pp.105~112，昭和45.12
- 18) 藤本ほか7名：“高速荷重を受ける鉄筋コンクリート柱に関する実験的研究(その1~2)”，日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.407~410，昭和61.10  
“同題(その3~4)”，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.575~578，昭和62.10  
“同題(その5~6)”，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.753~756，昭和63.10
- 19) 藤本ほか6名：“衝撃的過荷重による鋼構造筋かいの破断と変形能力に関する実験的研究(その1)”，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.791~792，昭和62.10
- 20) 青木博文・加藤 勉・難波恒夫・佐藤亘宏：“変断面鋼板引張材の変形能力に及ぼす試験温度・ひずみ速度の影響”，日本建築学会構造系論文報告集第322号，pp.11~19，昭和57年12月
- 21) 岩井 哲・吉田 望・中村 武・若林 實：“構造部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究(その1)”，日本建築学会論文報告集第314号，pp.102~111，昭和57.4



## SYNOPSIS

UDC : 624. 012. 45 : 550. 34 : 624. 042. 7 : 624. 04

### **DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE FRAME USING A THREE-ELEMENT-MAXWELL MODEL**

by Dr. MORIHISA FUJIMOTO, Dr. AKIRA WADA and  
YUICHI KIMURA, Members of A. I. J.

The dynamic behavior of a reinforced concrete structure under earthquake loading differs from static behavior because its structural elements deform with their strain speed.

In this paper, the adequacy of a analytical model with a three-element-Maxwell model taking the effect of deformation speed on the ends of structural elements into account was examined, and the analytical results were compared with experimental results. And a dynamic response analysis of reinforced concrete frames using this model was carried out.

As a results, it was shown that this model can explain the increase of strength of structural elements caused by the deformation speed, and thus enable earthquake response analysis considering the effect of strain speed.