

## 強震下におけるせん断型多質点履歴系の損傷度制御に関する基礎的研究

A BASIC STUDY ON DAMAGE CONTROL OF INELASTIC MULTI-MASS SHEAR SYSTEMS  
UNDER SEVERE EARTHQUAKE MOTIONS

成行義文\*, 平尾 潔\*\*, 沢田 勉\*\*, 由井大二朗\*\*\*, 酒部義宏\*\*\*\*

Yoshifumi NARIYUKI, Kiyoshi HIRAO, Tsutomu SAWADA, Daijiro YUI and Yoshihiro SAKABE

\*工博 徳島大学助教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

\*\*工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

\*\*\*徳島大学大学院生 博士前期課程 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

\*\*\*\*徳島大学教務員 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

The objective of this study is to develop a control method of the damage distribution of elasto-plastic multi-mass shear systems under severe earthquake motions. The control method proposed is based on the repetition of energy response analyses of MDOF systems. In these systems, bilinear and Q-hyst models are employed as a hysteretic model of restoring force and the seismic damage of each story is evaluated by using the displacement ductility or Park and Ang's damage index. Numerical results for several observed earthquake records show that the required stiffness of each story for an arbitrary damage distribution is obtained accurately and its convergence characteristics is relatively stable.

Key words : seismic damage control, multi-mass shear system, energy response analysis

## 1. まえがき

近年, より合理的な耐震設計の理念として, 中小地震に対する使用性ならびに大地震に対する終局安全性等の確保を目的とした2段階耐震設計法が定着しつつある。阪神淡路大震災(1995年)を契機に土木学会に設置された「耐震基準等基本問題検討会議」がまとめた「土木構造物の耐震基準等に関する第一次<sup>1)</sup>ならびに第二次<sup>2)</sup>提言」の中にも明確にその理念が反映されている。

2段階耐震設計法を確立するためには, まず強震下における構造物の損傷度評価法を導く必要がある。現在用いられている損傷度指標は2つに大別される。一つは, 従来より塑性変形を伴う構造物の損傷度を表す指標としてよく用いられてきた変位じん性率(塑性率)である。これは, その単純さゆえに工学的に有用な指標であるが, 応答継続時間中の瞬間の値であり, 最終的な構造物の損傷度を正確に表しているとは言い難い。他の一つは, 強震下における構造物の損傷を最大変形に伴う瞬間的損傷と繰り返し塑性変形に伴う累積的損傷の複合として定義された指標である。この種の指標の代表的なものとして, Parkらが提案した指標<sup>3)</sup>が挙げられる。彼らの指標は変位じん性率とエネルギーじん性率の一次結合として定義されており, 比較的簡便であるため, 1質点構造物の地震時損傷度評価に関する最近の研究においてよく用いられている<sup>4-7)</sup>。

中低層建築物あるいは橋脚等のせん断型多質点構造物の場合, その地震時損傷度は, 各層の損傷度から総合的に判断されるものである。各層の損傷度は, 前述の1質点構造物と同様, 各層の変位じん性率ならびにエネルギーじん性率等を用いて評価することができる。一般に, このようなせん断型多質点構造物を設計する場合, まず各層の質量が決まり, ついで剛性が設定される。このとき, 各層の強震時損傷がすべて所定のレベルになるように各層の初期剛性を設定できれば, 第2段階の耐震設計が比較的容易になるものと思われる。

せん断型多質点構造物の応答を所定のレベルに制御し得る所要剛性の推定に関しては, 山田ら<sup>8)</sup>ならびに大野ら<sup>9)</sup>の研究がある。山田ら<sup>8)</sup>は, 予め定めた目標塑性率の分布に等しくなるように, 繰り返し計算によって剛性分布を求める最適設計法の問題として検討している。また, 大野ら<sup>9)</sup>は, 1次振動モードが卓越する場合を対象として, 所定の入力エネルギー配分比を実現するための所要剛性を, 固有値問題の逆問題として推定する手法を提案している。これらは, ともに実用性の高い優れた手法であると考えられるが, 入力地震動特性がそれらの推定精度に及ぼす影響が比較的大きいこと, また *bilinear* 型復元力履歴特性を有する系にしか適用できないこと, さらに規範とする応答が固定されていること等, いくつかの改善すべき点が残されている。

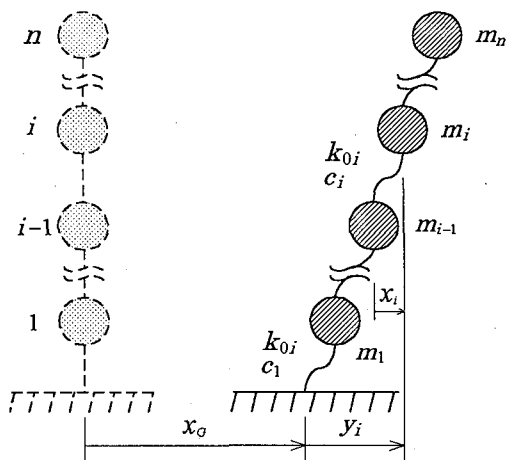


図-1 せん断型n質点系

以上のようなことより、本研究では、任意の入力地震動に対するせん断型多質点系の各層の損傷を所定のレベルに制御し得る所要剛性を、エネルギー応答解析の繰り返しによりできる限り正確に求める手法の開発を試みた。各層の復元力履歴モデルとしては、*bilinear* モデルならびに RC 構造物の復元力特性を大域的に表した *Q-hyst* モデル<sup>10)</sup>を用い、また各層の損傷度は、変位じん性率あるいは *Park* らの指標<sup>3)</sup>により評価した。2・3 の実地震動記録を用いて、本法の精度ならびに収束性等について検討するとともに、入力地震動特性の相違が収束解に及ぼす影響についても若干の考察を加えている。

なお従来は、多質点系の弾塑性応答解析の繰り返しは演算時間の面で極めて不利であったが、昨今の計算機の進歩は著しく、そのことはさほど大きな問題ではなくなっている。将来的には、さらにその傾向が顕著になるものと思われる。

## 2. せん断型多質点履歴系の運動方程式とエネルギー釣合式

### 2.1 運動方程式

図-1 はせん断型  $n$  質点系を示している。図中、 $m_i$ 、 $c_i$ 、および  $k_{0i}$  は、それぞれ質点  $i$  の質量、 $i$  層の減衰係数および初期剛性であり、また、 $x_g$ 、 $x_i$  および  $y_i$  はそれぞれ地動変位、 $i$  層の層間変位および質点  $i$  の基礎からの相対変位を表している。

系の地震応答が弾性範囲にとどまる場合の基礎からの相対変位に関する運動方程式は周知のように式(1)で表される<sup>11)</sup>。

$$[m]\{\ddot{y}\} + [c]\{\dot{y}\} + [k_0]\{y\} = -[m]\{I\}\ddot{x}_g \quad (1)$$

ここに、 $[m]$ 、 $[c]$ 、および  $[k_0]$  は、それぞれ質量マトリクス、減衰マトリクスおよび初期剛性マトリクスを表しており、また、 $\{\ddot{y}\}$ 、 $\{\dot{y}\}$  および  $\{y\}$  は、それぞれ相対

加速度ベクトル、相対速度ベクトルおよび相対変位ベクトルである。

相対変位ベクトル  $\{y\}$  と層間変位ベクトル  $\{x\}$  との間には、式(2)のような関係がある。

$$\{y\} = [D]^T \{x\} \quad (2)$$

ここに、 $[D]$  は式(3)のような変換マトリクスである。

$$[D] = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \cdots & \cdots & 1 \\ 0 & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & & 1 & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

相対変位に関する運動方程式 (式(1)) を、変換マトリクス  $[D]$  を用いて変換すると、式(4)のような層間変位に関する運動方程式が得られる。

$$[D][m][D]^T \{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K_0]\{x\} = -[D][m]\{I\}\ddot{x}_g \quad (4)$$

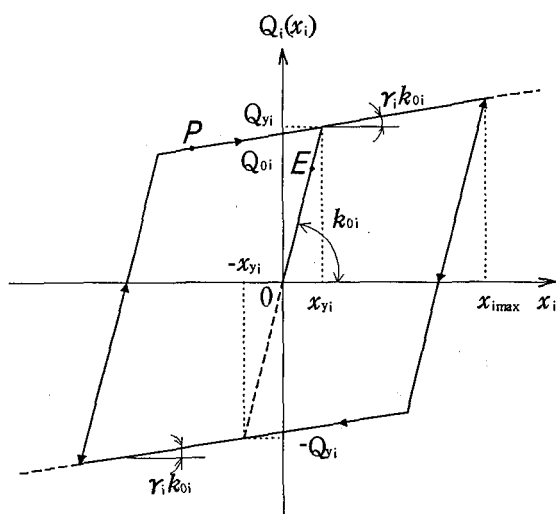
ここに、 $[C]$ 、 $[K_0]$  はそれぞれ  $c_i$ 、 $k_{0i}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) を  $i$  行  $i$  列の要素とする対角マトリクスである。各質点における力の釣合式(式(1))が各層における力の釣合式(式(4))に変換されているのがわかる。

本研究では、強震下における多質点系の弾塑性応答解析を行うために、図-2 に示すような2種類の復元力履歴モデルを用いた。同図(a)は従来より構造物の地震応答解析によく用いられており、どちらかといえば鋼構造物の履歴特性を表す *bilinear* モデルである。図中、 $x_{yi}$ 、 $Q_{yi}$ 、および  $\gamma_i$  はそれぞれ  $i$  層の降伏変位、降伏復元力および弾塑性剛性比を表している。また同図(b)は RC 構造物の履歴特性を大域的に表わした *Q-hyst* モデルである。変位反転時の劣化勾配  $k_{ri}$  は図中に示すように最大変位  $x_{imax}$  に依存する。一般に各層の復元力履歴特性が *multi-linear* モデルで表される場合、系の弾塑性応答を表す運動方程式は、式(4)の左辺第3項を一般化することにより、式(5)のように得られる。

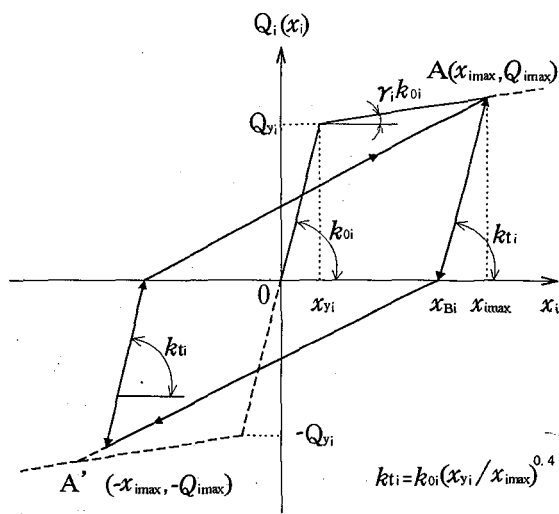
$$[D][m][D]^T \{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} + \{u\} = -[D][m]\{I\}\ddot{x}_g \quad (5)$$

ここに、 $[K]$  は各層の剛性  $k_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) を要素とする対角マトリクスであり、 $\{u\}$  は各層の荷重項  $u_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) を要素とする荷重項ベクトルである。

今、各層の復元力履歴特性が、*bilinear* モデル(図-2(a))で表されるとすると、 $Q_i$ - $x_i$  関係が、例えば  $E$  点上にある場合には  $k_i = k_{0i}$  および  $u_i = 0$ 、また  $P$  点上にある場合には  $k_i = r_i k_{0i}$  および  $u_i = Q_{0i}$  となる。すなわち、 $k_i$  および  $u_i$  は点



(a) Bilinearモデル



(b) Q-hystモデル

図-2 復元力履歴モデル

$(x_i, Q_i)$ が存在する直線の傾きと切片を表している。

復元力ベクトルを $\{Q_{(s)}\}$ とすると、 $\{Q_{(s)}\} = [K]\{x\} + \{u\}$ であるから、せん断型多質点履歴系の層間変位に関する運動方程式は、より一般的に式(6)のように表される。

$$[D][m][D]^T \{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + \{Q_{(s)}\} = -[D][m]\{I\}\ddot{x}_G \quad (6)$$

## 2.2 エネルギー釣合式

式(6)の両辺にそれぞれ左から $\{\dot{x}\}^T$ を乗じ、時間 $t$ で積分すると地震動入力を受けるせん断型多質点履歴系のエネルギー釣合式が式(7)のように得られる<sup>12)</sup>。

$$\int_0^t \{\dot{y}\}^T [m] \{\ddot{y}\} dt + \int_0^t \{\dot{x}\}^T [C] \{\dot{x}\} dt + \int_0^t \{\dot{x}\}^T \{Q_{(s)}\} dt = \int_0^t -\{\dot{y}\}^T [m] \{I\} \ddot{x}_G dt \quad (7)$$

式(7)を展開すると式(8)のようになる。

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i \dot{y}_{it}^2 + \sum_{i=1}^n \int_0^t c_i \dot{x}_i^2 dt + \sum_{i=1}^n \int_0^t Q_{i(x_i)} \dot{x}_i dt = \sum_{i=1}^n \int_0^t (-m_i \dot{y}_i \ddot{x}_G) dt \quad (8)$$

ここに、 $\dot{y}_{it}$ は時刻 $t$ における質点 $i$ の相対速度である。質点 $i$ の時刻 $t$ における運動エネルギーを $W_{ki}$ 、 $i$ 層の時刻 $t$ までの減衰エネルギーおよびひずみエネルギーの総和をそれぞれ $W_{Di}$ および $W_{Hi}$ 、また、質点 $i$ からの入力エネルギーの時刻 $t$ までの総和を $E_i$ とすると、式(8)は式(9)のように表される。

$$\sum_{i=1}^n W_{ki} + \sum_{i=1}^n W_{Di} + \sum_{i=1}^n W_{Hi} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (9)$$

ここに、各層のひずみエネルギー $W_{Hi}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ )は、弾

性ひずみエネルギーと塑性ひずみエネルギーとの和であり、後者が構造物の累積損傷に深く関係している。

系の地震応答終了時には、各質点の運動エネルギーならびに各層の弾性ひずみエネルギーは零となり、この時点でのエネルギー釣合式は式(10)のようになる。

$$\sum_{i=1}^n W_{Di} + \sum_{i=1}^n W_{Hi} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (10)$$

ここに、 $W_{Hi}$ は地震応答継続時間にわたって累積された $i$ 層の塑性ひずみエネルギーであり、本論文ではこれを履歴吸収エネルギーと呼ぶことにする。式(10)は、各質点からの入力エネルギーの総和が各層における消費エネルギー(減衰エネルギーおよび履歴吸収エネルギー)の総和に等しいことを示している。すなわち、各質点からの入力エネルギーが各層に分配され、そして消費され则认为られる。

## 2.3 構造特性パラメータ

せん断型多質点履歴系の地震応答を支配するパラメータを明確にするために、前出の運動方程式(式(5))の正規化を行う。

本研究では、各層の減衰定数は、式(11)のように、各層の初期剛性に比例すると仮定した。

$$[C] = \frac{2\eta h_0}{1\omega_0} [K_0] \quad (11)$$

ここに、 $\eta h_0$ および $1\omega_0$ は、それぞれ線形系における1次モードの減衰定数および固有円振動数である。

式(5)の両辺に左から $[D]^{-1}/Q_{yi}$ を乗じ、それに式(11)を代入して整理すると、せん断型多質点履歴系の正規化さ

れた運動方程式が式(12)のように得られる。

$$\begin{aligned} & \eta_0^2 \rho_0^2 [\alpha] [D]^T [\xi] \{\ddot{x}\} + 2 {}_1 h_0 \eta_0 \omega_p [D]^{-1} [\beta_0] [\xi] \{\dot{x}\} \\ & + \omega_p^2 [D]^{-1} [v] [\beta_0] [\xi] \{\bar{x}\} + \omega_p^2 [D]^{-1} [\beta_0] [\xi] [v] \\ & = -\omega_p^2 R_I \frac{[\alpha]}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \{I\} \ddot{z}_G \end{aligned} \quad (12)$$

ここに、 $[\alpha]$ 、 $[\beta_0]$ 、 $[v]$ 、 $[\xi]$ および $[v]$ は、それぞれ $\alpha_i (= m_i/m_1)$ 、 $\beta_{0i} (= k_{0i}/k_{01})$ 、 $v_i (= k_i/k_{0i})$ 、 $\xi_i (= x_{yi}/x_{y1})$ および $v_i (= u_i/Q_{yi})$ を $i$ 行 $i$ 列要素( $i=1,2,\dots,n$ )とする対角マトリクスであり、また、 $\omega_p$ は入力加速度波の卓越円振動数、 $\eta_0 = \omega_p/{}_1\omega_0$ 、 $\rho_0 = {}_1\omega_0/\omega_{01} (= {}_1\omega_0/\sqrt{k_{01}/m_1})$ 、 $\ddot{z}_G$ は地動加速度 $\ddot{x}_G$ をその最大地動加速度 $\ddot{x}_{0\max}$ で除し正規化したものである。 $\{\bar{x}\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ および $\{\ddot{x}\}$ は、それぞれ各層の降伏変位 $x_{yi}$ で規準化された層間変位、速度ならびに加速度ベクトルである。また、 $R_I$ は入力強度比を表しており、式(13)に示すように入力地震動強度と1層の降伏強度との比として定義されている。

$$R_I = \frac{\ddot{x}_{0\max} \sum_{i=1}^n m_i}{Q_{y1}} \quad (13)$$

以上のようなことより、せん断型多質点履歴系の地震応答を支配する構造特性パラメータは、質量比 $\alpha_i$ 、初期剛性比 $\beta_{0i}$ 、弾塑性剛性比 $\gamma_i$ 、降伏変位比 $\xi_i$ (以上、 $i=1,2,\dots,n$ )、入力波の卓越円振動数 $\omega_p$ 、減衰定数 ${}_1h_0$ 、振動数比 $\eta_0$ 、および入力強度比 $R_I$ の8種類のパラメータであることがわかる。式(12)中の $\rho_0$ は、線形非減衰系の固有値解析から求まる1次モードの固有値の平方根であり、質量比 $\alpha_i$ ならびに初期剛性比 $\beta_{0i}$ ( $i=1,2,\dots,n$ )の関数とみなすことができる。

なお、本研究では、正規化された運動方程式(式(12))を増分形式の線形加速度法を用いて解くことにより、せん断型多質点系の非線形地震応答を求めた。

### 3. 所定の損傷度分布に対する所要初期剛性比の求め方

#### 3.1 各層の損傷度指標

本研究では、 $n$ 質点履歴系の各層の地震時損傷度評価指標として、式(14)ならびに式(15)で定義されるような2種類の指標を用いた。

$$\mu_{Di} = \frac{|x_i|_{\max}}{x_{yi}} \quad (14)$$

$$D_i = \frac{1}{\mu_{ui}} (\mu_{Di} + \beta_{pi} \mu_{Hi}) \quad (15)$$

ここに、 $\mu_{Di}$ ( $i=1,2,\dots,n$ )は、従来より、変形が塑性域にまで及ぶ構造物の損傷の程度を表すのによく用いられている変位じん性率である。一方、 $D_i$ ( $i=1,2,\dots,n$ )はParkら<sup>3)</sup>が多くの特材の実験結果から導いた損傷度指標であり、瞬間的損傷を表す変位じん性率 $\mu_{Di}$ と累積的損傷を表すエネルギーじん性率 $\mu_{Hi}(=W_{Hi}/Q_{yi}x_{yi})$ の線形和として定義されている。式(15)中、 $\mu_{ui}$ は $i$ 層の終局変位じん性率を、また $\beta_{pi}$ は正の係数を表している。

#### 3.2 所要初期剛性比の求め方

図-3は、任意の地震動入力を受ける $n$ 質点履歴系の各層の損傷度をそれぞれ所定のレベル $D_i^*$ ( $i=1,2,\dots,n$ )に制御するための所要初期剛性比 $\beta_{0i}$ ( $i=1,2,\dots,n$ )の算定手順を簡単に示したものである。図中の $\beta_{ei}$ ( $i=1,2,\dots,n$ )および $\rho_e$ はすべて収束計算の過程で変動するパラメータであり、解析に用いる基本式(式(12))が $k_{0i}x_{yi}$ で基準化されている関係上、それぞれ次式のような定義となっている。

$$\beta_{ei} = \frac{k_{ei}}{k_{01}} \quad (16)$$

$$\rho_e = \frac{{}_1\omega_e}{\omega_{01}} \quad (17)$$

$$R_I^* = \frac{\ddot{x}_{G\max} \sum_{i=1}^n \alpha_i}{\omega_{01}^2 x_{y1}} \quad (18)$$

ここに、 $k_{ei}$ は $i$ 層の修正された初期剛性、また ${}_1\omega_e$ は $k_{ei}$ ( $i=1,2,\dots,n$ )を有する系の1次固有円振動数である。 $\rho_e$ は2.3で述べたように、 $\alpha_i$ ならびに $\beta_{ei}$ が与えられれば固有値解析より求まるパラメータである。

まず、これらのパラメータに適当な初期値 $[\beta_{0i}^*](i=1,2,\dots,n)$ 、 $R_{01}^*$ 、 $\rho_{01}^*$ (固有値解析より)]を与えて、エネルギー応答解析を行い、各層の変位ならびにエネルギーじん性率( $\mu_{Di}$ 、 $\mu_{Hi}$ )を算定する。ついで、これらの値を式(15)に代入して各層の損傷度 $D_i$ ( $i=1,2,\dots,n$ )を求め、所定の損傷度 $D_i^*$ ( $i=1,2,\dots,n$ )と比較する。ここで、すべての層で $D_i \leq D_i^*$ ( $i=1,2,\dots,n$ )でなければ、今回の初期剛性比を $\beta_{ei}'$ とし、式(19)、(20)に示す2段階の手順で $\beta_{ei}$ ( $i=1,2,\dots,n$ )を修正する。そして、これらの修正された $\beta_{ei}$ ( $i=1,2,\dots,n$ )に対する $\rho_e$ を固有値解析より求め、これを用いて再びエネルギー応答解析を行う。なお、図-3中の $\varepsilon$ は収束判定誤差である。

$$\beta_{ei}'' = \beta_{ei}' \times \frac{D_i}{D_i^*} \quad (19)$$

$$\beta_{ei} = \beta_{ei}' + \frac{\beta_{ei}'' - \beta_{ei}'}{n_b} \quad (20)$$

ここで、 $\beta_{ei}$ の修正を上記のように2段階にしたのは、本法の収束安定性を高めるためである。すなわち、一般に、

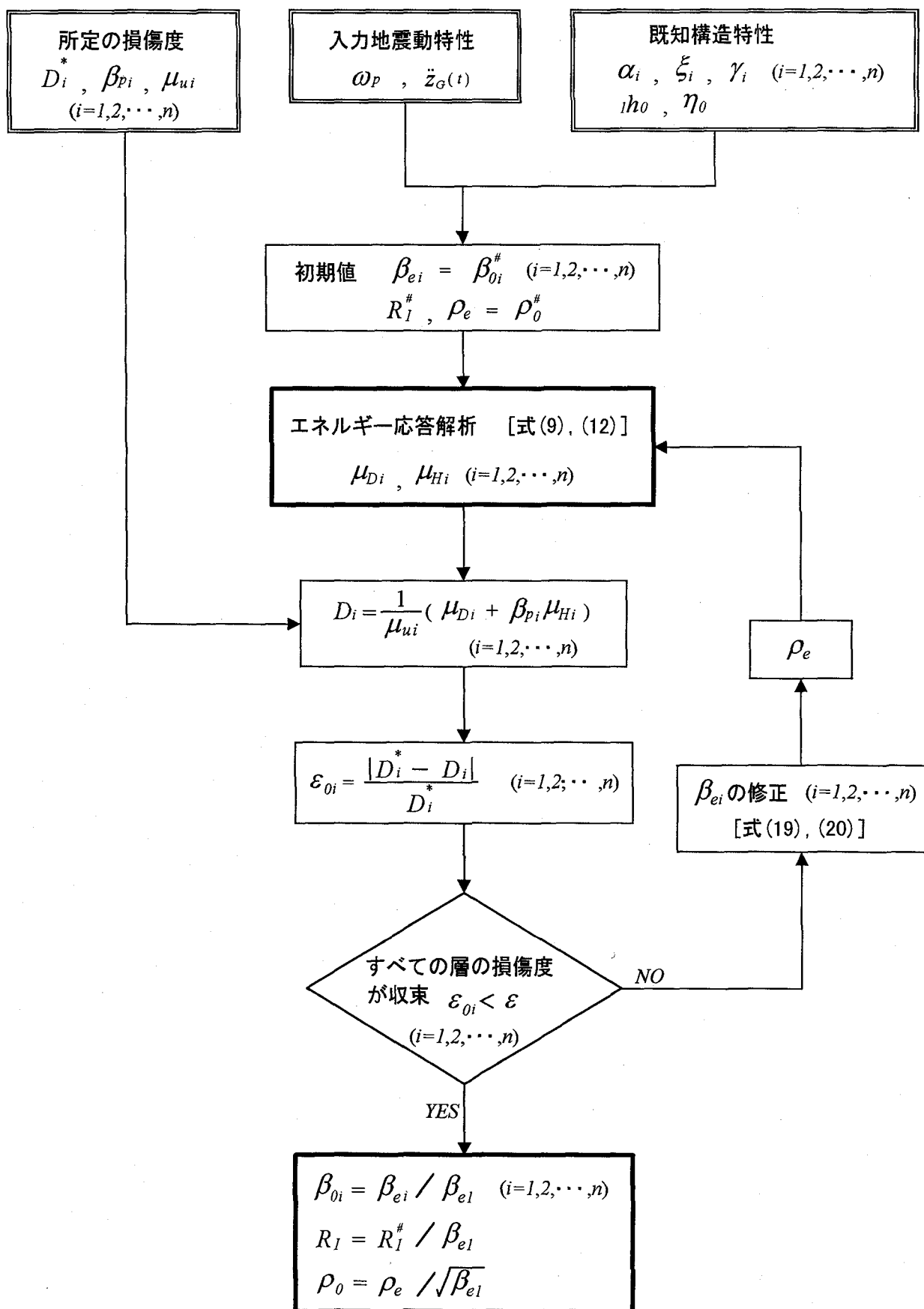


図-3 所要の損傷度  $D_i^*$  に対する所要初期剛性比  $\beta_{0i}$  の算定手順

$D_i < D_i^*$  の場合には  $\beta_{ei}$  が過大に、また逆に  $D_i > D_i^*$  の場合には  $\beta_{ei}$  が過小に評価されていると考えられるので、次の初期剛性比  $\beta_{ei}$  をまず式(19)により推定する。しかし、この  $\beta_{ei}$  を直接次の初期剛性比として用いず、式(20)に示すように、 $(\beta_{ei}'' - \beta_{ei}')$  の  $n_b$  等分値を増分とすることにより、 $\beta_{ei}$  の振動あるいは発散等を比較的抑えることができるものと思われる。なお、本研究ではこの  $n_b$  を増分係数と呼ぶことにする。

以上の手順を繰り返し、 $D_i \equiv D_i^* (i=1,2,\cdots,n)$  となった時点で収束解が得られたとみなす。この時の  $\beta_{ei}$ 、 $\rho_e$  ならびに  $R_I^\#$  は、前出の式(16)~(18)から明らかなように、初期値として適当に与えられた第1層の初期剛性  $k_{01}$  で正規化されたままである。したがって最終的には、 $\beta_{ei} (i=1,2,\cdots,n)$ 、 $R_I^\#$  および  $\rho_e$  等を、式(21)~(23)のように本来の定義より求めた値に変換しておく必要がある。

$$\beta_{0i} = \frac{\beta_{ei}}{\beta_{e1}} \tag{21}$$

$$R_I = R_I^\# / \beta_{e1} \tag{22}$$

$$\rho_0 = \rho_e / \sqrt{\beta_{e1}} \tag{23}$$

また、具体的に、 $\ddot{x}_{Gmax}$  ならびに  $m_i$  等が与えられれば、収束計算によって得られた  $\rho_0$ 、 $R_I$ 、 $\beta_{0i} (i=1,2,\cdots,n)$  ならびに予め与えられた質量比  $\alpha_i (i=1,2,\cdots,n)$  等から、 $x_{y1}$  ならびに  $k_{0i} (i=1,2,\cdots,n)$  が次のように求まる。

$$x_{y1} = \frac{\rho_0^2 \eta_e^2 \ddot{x}_{Gmax} \sum_{i=1}^n \alpha_i}{\omega_p^2 R_I} \tag{24}$$

$$k_{0i} = \frac{\omega_p^2 m_i \beta_{0i}}{\rho_0^2 \eta_0^2} \tag{25}$$

以上は、損傷度指標として、式(15)で定義された Park らの指標  $D_i (i=1,2,\cdots,n)$  を対象とした場合であるが、式(14)のような変位じん性率  $\mu_{Di} (i=1,2,\cdots,n)$  を損傷度指標とした場合も全く同様な手順で、各層の損傷度を所定のレベルに制御する所要初期剛性比  $\beta_{0i} (i=1,2,\cdots,n)$  を求めることができる。

#### 4. 計算例

前章で示した強震下におけるせん断型多質点履歴構造物の損傷度制御法の妥当性を検討するために、次のような比較的特性の異なる 3 個の実地震動加速度記録(①~③)と周期 1.0 秒の調和地動を入力波として、所定の損傷度に対する所要初期剛性比を求めた。ただし、本研究では入力波の継続時間はすべて 20<sub>sec</sub> とした。

- ① El Centro 記録 (S00E, 1940, Imperial Valley Earthquake,  $\ddot{x}_{Gmax} = 341.7_{gal}$ ,  $T_p = 0.68_{sec}$ )
- ② 八戸記録 (S-252, N-S, 1968年, 十勝沖地震,

表-1 収束結果に及ぼす初期値の影響  
( $\mu_{Di}$  を制御)

(a)

|                                                                 |               |       |             |       |
|-----------------------------------------------------------------|---------------|-------|-------------|-------|
| El Centro , Bilinear , $\mu_{Di}^*=6.0$ ( $i=1,2,3$ ) , $n_b=2$ |               |       |             |       |
| 初期値 : $R_I^\# = 5.0$ , $\beta_{0i}^\# = 1.0$ ( $i=1,2,3$ )      |               |       |             |       |
| 層番号                                                             |               | 1     | 2           | 3     |
| 収束値                                                             | $\beta_{0i}$  | 1.000 | 0.751       | 0.433 |
|                                                                 | $\mu_{Di}$    | 5.999 | 6.001       | 5.995 |
|                                                                 | $R_I=6.175$ , |       | 繰り返し回数 : 10 |       |

(b)

|                                                                                     |                           |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|
| El Centro , Bilinear , $\mu_{Di}^*=6.0$ ( $i=1,2,3$ ) , $n_b=2$                     |                           |       |       |       |
| 初期値 : $R_I^\# = 5.0, \beta_{01}^\# = 1.0, \beta_{02}^\# = 0.8, \beta_{03}^\# = 0.6$ |                           |       |       |       |
|                                                                                     | 層番号                       | 1     | 2     | 3     |
| 収束値                                                                                 | $\beta_{0i}$              | 1.000 | 0.751 | 0.433 |
|                                                                                     | $\mu_{Di}$                | 5.998 | 5.997 | 5.998 |
|                                                                                     | $R_I=6.175$ , 繰り返し回数 : 10 |       |       |       |

(c)

|                                                                 |                             |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|
| El Centro , Bilinear , $\mu_{Di}^*=6.0$ ( $i=1,2,3$ ) , $n_b=2$ |                             |       |       |       |
| 初期値 : $R_I^\# = 10.0$ , $\beta_{0i}^\# = 1.0$ ( $i=1,2,3$ )     |                             |       |       |       |
| 層番号                                                             |                             | 1     | 2     | 3     |
| 収束値                                                             | $\beta_{0i}$                | 1.000 | 0.752 | 0.433 |
|                                                                 | $\mu_{Di}$                  | 6.005 | 5.998 | 5.996 |
|                                                                 | $R_I = 6.175$ , 繰り返し回数 : 11 |       |       |       |

(d)

|                                                                 |                           |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|
| El Centro , Bilinear , $\mu_{Di}^*=6.0$ ( $i=1,2,3$ ) , $n_b=4$ |                           |       |       |       |
| 初期値 : $R_I^\# = 5.0$ , $\beta_{0i}^\# = 1.0$ ( $i=1,2,3$ )      |                           |       |       |       |
| 層番号                                                             |                           | 1     | 2     | 3     |
| 収束値                                                             | $\beta_{0i}$              | 1.000 | 0.751 | 0.433 |
|                                                                 | $\mu_{Di}$                | 5.996 | 5.996 | 5.997 |
|                                                                 | $R_I=6.175$ , 繰り返し回数 : 23 |       |       |       |

- $\ddot{x}_{Gmax} = 264.1_{gal}$  ,  $T_p = 2.64_{sec}$ .)
- ③ 神戸記録 ( N-S, 1995 年, 兵庫県南部地震,  $\ddot{x}_{Gmax} = 818.02_{gal}$  ,  $T_p = 0.69_{sec}$ .)

また、繰返し計算によってその値が変化しない構造特性パラメータは、特別に断らない限り、それらの値を次のように固定して解析を行った。そして、損傷度の収束判定誤差はすべて  $\varepsilon = 10^{-2}$  とした。

- ・質量比 :  $\alpha_i = 1.0 (i=1,2,\cdots,n)$
- ・降伏変位比 :  $\xi_i = 1.0 (i=1,2,\cdots,n)$
- ・弾塑性剛性比 :  $\gamma_i = 0.1 (i=1,2,\cdots,n)$
- ・弾性 1 次モードの減衰定数 :  $\eta_0 = 0.05$
- ・振動数比 :  $\eta_0 = 1.0$

表-1(a)~(d)は、bilinear 型復元力履歴特性を有する 3 質点系を対象として、収束結果(所要初期剛性比  $\beta_{0i} (i=1,2,3)$ )に及ぼす初期値ならびに  $\beta_{0i}$  の増分係数  $n_b$  の影響

表-2 収束結果に及ぼす初期値の影響  
( $D_i$ を制御)

(a)

|                                                            |                           |        |        |        |
|------------------------------------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
| El Centro , Bilinear , $D_i^*=1.0$ ( $i=1,2,3$ ) , $n_b=2$ |                           |        |        |        |
| 初期値 : $R_I^{\#}=5.0$ , $\beta_{0i}^{\#}=1.0$ ( $i=1,2,3$ ) |                           |        |        |        |
| 層番号                                                        | 1                         | 2      | 3      |        |
| 収束値                                                        | $\beta_{0i}$              | 1.000  | 0.7715 | 0.4774 |
|                                                            | $D_i$                     | 0.9987 | 1.006  | 0.9949 |
|                                                            | $\mu_{Di}$                | 3.938  | 3.866  | 3.626  |
|                                                            | $\mu_{Hi}$                | 20.54  | 21.67  | 23.44  |
|                                                            | $R_I=4.000$ , 繰り返し回数 : 10 |        |        |        |

(b)

|                                                                                              |                          |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|
| El Centro , Bilinear , $D_i^*=1.0$ ( $i=1,2,3$ ) , $n_b=2$                                   |                          |       |       |       |
| 初期値 : $R_I^{\#}=5.0$ , $\beta_{0i}^{\#}=1.0$ , $\beta_{02}^{\#}=0.8$ , $\beta_{03}^{\#}=0.6$ |                          |       |       |       |
| 層番号                                                                                          | 1                        | 2     | 3     |       |
| 収束値                                                                                          | $\beta_{0i}$             | 1.000 | 0.772 | 0.477 |
|                                                                                              | $D_i$                    | 1.002 | 1.007 | 1.000 |
|                                                                                              | $\mu_{Di}$               | 3.949 | 3.872 | 3.637 |
|                                                                                              | $\mu_{Hi}$               | 20.65 | 21.70 | 23.62 |
|                                                                                              | $R_I=4.000$ , 繰り返し回数 : 9 |       |       |       |

(c)

|                                                             |                           |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|
| El Centro , Bilinear , $D_i^*=1.0$ ( $i=1,2,3$ ) , $n_b=2$  |                           |       |       |       |
| 初期値 : $R_I^{\#}=10.0$ , $\beta_{0i}^{\#}=1.0$ ( $i=1,2,3$ ) |                           |       |       |       |
| 層番号                                                         | 1                         | 2     | 3     |       |
| 収束値                                                         | $\beta_{0i}$              | 1.000 | 0.772 | 0.477 |
|                                                             | $D_i$                     | 1.002 | 1.007 | 1.000 |
|                                                             | $\mu_{Di}$                | 3.948 | 3.871 | 3.638 |
|                                                             | $\mu_{Hi}$                | 20.65 | 21.69 | 23.64 |
|                                                             | $R_I=4.000$ , 繰り返し回数 : 11 |       |       |       |

(d)

|                                                            |                           |       |       |       |
|------------------------------------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|
| El Centro , Bilinear , $D_i^*=1.0$ ( $i=1,2,3$ ) , $n_b=4$ |                           |       |       |       |
| 初期値 : $R_I^{\#}=5.0$ , $\beta_{0i}^{\#}=1.0$ ( $i=1,2,3$ ) |                           |       |       |       |
| 層番号                                                        | 1                         | 2     | 3     |       |
| 収束値                                                        | $\beta_{0i}$              | 1.000 | 0.773 | 0.477 |
|                                                            | $D_i$                     | 1.000 | 0.999 | 0.999 |
|                                                            | $\mu_{Di}$                | 3.940 | 3.848 | 3.635 |
|                                                            | $\mu_{Hi}$                | 20.57 | 21.48 | 23.61 |
|                                                            | $R_I=4.000$ , 繰り返し回数 : 19 |       |       |       |

を比較したものである。なお、これらの結果は、入力波としては El Centro 記録を用い、目標とする各層の変位じん性率 $\mu_{Di}^*$  ( $i=1,2,3$ )をすべて 6.0 とした場合である。

表-1(a)-(d)より、初期値( $R_I^{\#}$ ,  $\beta_{0i}^{\#}$  ( $i=1,2,3$ ))ならびに $\beta_{0i}$ の増分係数 $n_b$ 等によらず、 $\beta_{0i}$  ( $i=1,2,3$ )はほぼ同じ値に収束していることがわかる。また、表-2(a)-(d)は損傷度指標として Park らの指標  $D_i$ を用い、目標とする損傷度を $D_i^*=1.0$  ( $i=1,2,3$ )とした場合の結果を示したものである。

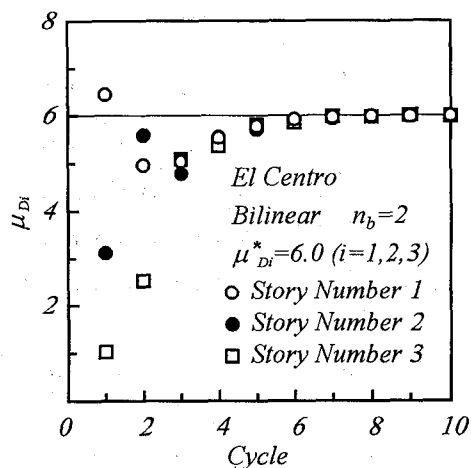


図-4  $\mu_{Di}$ の収束状況

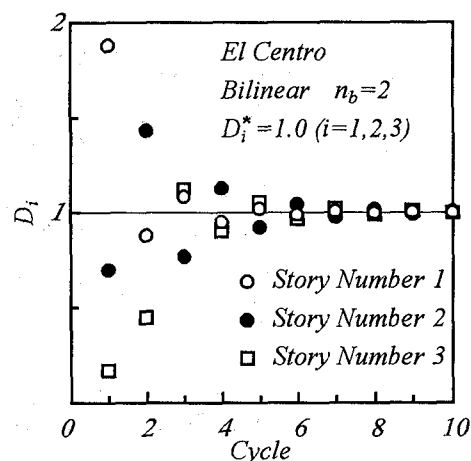


図-5  $D_i$ の収束状況

本研究では、 $D_i$ 中の正の係数 $\beta_{Pi}$  ( $i=1,2,3$ )および終局変位じん性率 $\mu_{Hi}$  ( $i=1,2,3$ )を、それぞれ 0.1 および 6.0 に設定している。これらの表の傾向は、表-1 とほぼ同様であり、本法により所定の損傷度に対する所要初期剛性比 $\beta_{0i}$ が一義的に決定できることを示している。

図-4 および図-5 は、それぞれ表-1(a)および表-2(a)の収束状況を示したものである。これらの図より、いずれの場合も初期には不均一であった各層の損傷度( $\mu_{Di}$ ならびに $D_i$ )が、4-5cycle 後にはほぼ所定値に近づき、それ以後は比較的ゆっくりと収束してゆく様子がよくわかる。また、図-6 は各層の損傷度が均一でない場合の $\mu_{Di}$  ( $i=1,2,3$ )の収束状況を示したものである。下層ほど損傷が小さくなるように  $i$  層 ( $i=1,2,3$ )の目標値を $\mu_{Di}^*=2.0+(i-1)$ と設定している。この図より、各層の目標損傷度が異なる場合でも、所要初期剛性比が安定して求まることがわかる。

図-7 は、質点数  $n$  と収束するまでの繰返し回数ならびに演算時間の関係をそれぞれ示したものである。ここに、 $\beta_{0i}$ の増分係数 $n_b=2$ である。質点数の増大による繰返し回数の増加に比べ、演算時間の増大が著しいことがわか

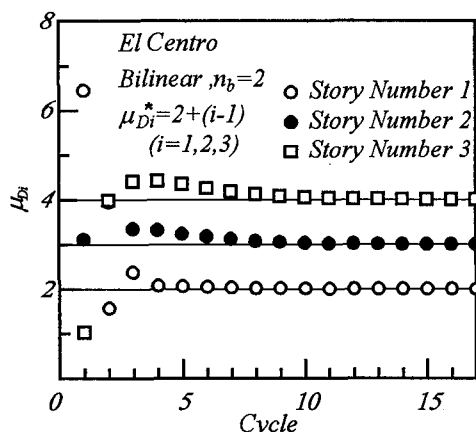


図-6 目標値が異なる場合の  $\mu_{Di}$  の収束状況

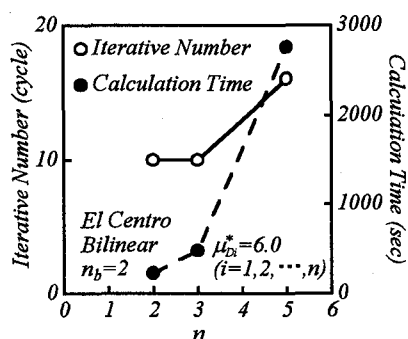


図-7 質点数  $n$  と繰り返し回数並びに演算時間との関係

る。5 質点系で約 45 分の演算時間を要している。ただし、本研究における数値計算はすべてパーソナルコンピュータ (CPU: Pentium 133MHz, RAM: 32Mbyte) を用いて行った。

図-8 は、各層の復元力履歴特性および損傷度指標等の相違が、所要初期剛性比  $\beta_{0i}$  に及ぼす影響を比較したものである。この図より、各層の復元力履歴特性が剛性劣化を考慮した  $Q$ -hyst モデルで表わされる場合の方が、また、損傷度指標として Park らの指標  $D_i$  を用いる方が、所要初期剛性比  $\beta_{0i}$  ( $i=1,2,3$ ) が大きくなっていることがわかる。このことは、復元力履歴モデルの特性ならびに損傷度指標の定義より明らかであるが、それらの相違が、所要初期剛性比  $\beta_{0i}$  に及ぼす影響は比較的小さいと言える。

以上は、入力波として El Centro 記録を用いた場合の計算例であるが、所定の損傷度に対する所要初期剛性比  $\beta_{0i}$  は入力地震動の相違によって、大きく異なることが予想される。図-9 は、本章の冒頭に示した 3 個の実地震動記録と 1 個の調和地動をそれぞれ入力波とした場合の各所要初期剛性比  $\beta_{0i}$  を比較したものである。ここでは、構造物の弾性 1 次固有周期  $T_0$  を 0.68(sec) としているため、各入力波の振動数比  $\eta_0 (=T_0/T_{0p})$  は図中に示すようにす

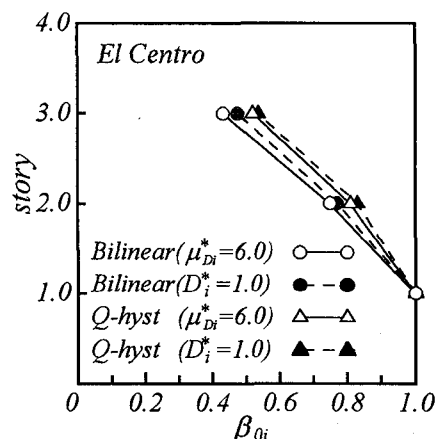


図-8 初期剛性比  $\beta_{0i}$  ( $i=1,2,3$ ) に及ぼす復元力特性の影響

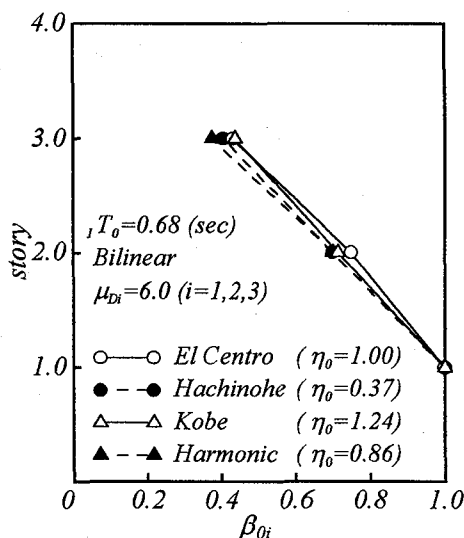


図-9 初期剛性比  $\beta_{0i}$  ( $i=1,2,3$ ) に及ぼす入力波特性の影響

べて異なっている。この図より、所要初期剛性比  $\beta_{0i}$  ( $i=1,2,3$ ) に及ぼす入力地震動特性の影響は、比較的小さいことがわかる。

## 5. あとがき

本研究では、強震下におけるせん断型多質点履歴構造物の各層の損傷を所定のレベルに制御するための所要初期剛性をエネルギー応答解析の繰返しにより厳密に求める手法を開発し、その妥当性を検討した。各層の復元力履歴モデルとしては bilinear ならびに  $Q$ -hyst モデルを、また各層の損傷度指標としては変位じん性率ならびに Park らの指標をそれぞれ用いた。また、比較的特性の異なる 3 個の実地震動記録と調和地動をそれぞれ入力加速度波として応答解析を行なった。

その結果、本法により、初期剛性比 $\beta_{0i}$  ( $i=1,2,\dots,n$ )の初期値ならびにその増分係数 $n_b$ の値によらず、所定の損傷度分布に対する所要初期剛性比が一義的に求まり、その収束性も比較的良好であることがわかった。ただし、本研究では $n_b$ の値を通常2としているが、質点数が多くなるほど収束しにくくなる傾向が見られた。特に $n \geq 5$ の場合には、 $n_b=3 \sim 4$ とした方が却って迅速に収束することもあり、最適な $n_b$ の値に関しては、今後若干の検討が必要であると思われる。

また、目標とする損傷度が同一の場合には、各層の復元力履歴特性、適用する損傷度指標ならびに入力地震動等が所要初期剛性比 $\beta_{0i}$  ( $i=1,2,\dots,n$ )に及ぼす影響は比較的小さい傾向が見られるが、これに関しては今後さらなる検討が必要であると思われる。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、図面の作成等で徳島大学工学部建設工学科4年生の三原博行君に多大なご協力を戴いた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する提言，土木学会誌，Vol.80，pp.(1)～(7)，1995.7.
- 2) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」，土木学会誌，Vol.81，PP.(1)～(10)，1996.1.
- 3) Park, Y.J., Ang H.-S. and Wen Y.K. : Mechanistic Seismic Damage Model For Reinforced Concrete , Jour. of Str. Eng. ASCE, Vol. 111, No. ST4, pp.722 ~ 739, 1985.
- 4) 安藤陽一，山崎文雄，片山恒雄；構造物損傷と地震動強さ指標の関係，土木学会第45回年次学術講演会講演概要集，I-630，pp.1290～1291, 1990.
- 5) 藤沢悟，山田善一，家村浩和，伊津野和行：各種の復元力モデルによるRC橋脚の耐震損傷度評価，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集，I-538，pp.1114～1115，1991.
- 6) 平尾 潔，笹田修司，成行義文，沢田 勉，川端茂樹：所要降伏強度比スペクトルとこれを用いた強震時終局安全性の一照査方法について，土木学会論文集，第525号/I-33，pp.213～225, 1995.
- 7) 堀則男，井上範夫，柴田明德：鉄筋コンクリート造建物の地震時エネルギー応答性状及び応答最大塑性率とエネルギー消費に基づく所要耐力の検討，日本建築学会構造系論文集，第481号，pp.17～25，1996.
- 8) 山田善一，家村浩和，古川浩平，坂本幸三：目標塑性率に基づく最適弾塑性耐震設計法に関する研究，土木学会論文報告集，第341号，pp.87～95，1984.
- 9) Ohno, T. and Nishioka, T. : Control of Input Energy for Elasto-plastic Multi-mass Systems subjected to Seismic Excitation, Proc. of JSCE, No.356/I-3, pp.247～257, 1985.
- 10) Mehdi Saiidi and Mete A. Sozen : Simple Nonlinear Seismic Analysis of R/C Structures, Jour. of Str. Eng., ASCE, Vol.107, No. ST5, pp.937～952, 1981.
- 11) 柴田明德：最新耐震構造解析，森北出版，pp.55～82，1981.
- 12) 成行義文：強震下における構造物のエネルギー応答の推定と損傷度評価に関する基礎的研究，京都大学学位論文，pp.175～182，1992.

(1996年9月6日受付)