

論文 層降伏型 RC 建物の形状指標について

梅村恒\*1・市之瀬敏勝\*2・神林宏之\*3

**要旨:**本研究では、RC造建物を対象とした多自由度系モデルの地震応答解析を行い、建物の各階に入力するエネルギーの分布について検討を行うとともに、文献<sup>[2]</sup>で提案された形状指標の算定式について検証する。建物に入力される全エネルギーは弱点階の位置の影響を受けない。建物の各層で吸収される塑性エネルギーは、逆三角形分布の外力を与えたときに弱点となる階に集中する。また、文献<sup>[2]</sup>による形状指標の算定式によって、層降伏型建物の耐震性能を安全側に評価することができる。

**キーワード:**塑性エネルギー、層せん断余裕率、形状指標、模擬地震動

1. はじめに

近年、現行の鉄筋コンクリート建物の耐震診断基準の合理化の必要性が指摘されている。建物の塑性変形を考慮する場合、建物の地震応答の予測のためには、建物の挙動をエネルギーの授受の観点からとらえる方法<sup>[1]</sup>が有効であると考えられるが、現行の耐震診断の形状指標では、層降伏型建物の塑性エネルギーの特定層への集中が考慮されていない。そのため、層降伏型建物に対しては危険側の判定をする可能性がある。

本研究では、建物および地震動にばらつきを与えて地震応答解析を行い、地震時に建物に入力するエネルギーの分布に関して検討するとともに、参考文献<sup>[2]</sup>で提案された耐震診断の形状指標の算定式について検証する。

が崩壊するときの*i*層の層せん断力を $Q_{Bi}$ とする。また図-1(b)のような水平力を受けて崩壊するときの層せん断力、すなわち単純な*i*層の強度を $Q_{Si}$ とする。このとき $Q_{Si}$ が $Q_{Bi}$ に比べて十分に大きければ、層崩壊は生じないものと予想されることから、層せん断余裕率 $f_i$ は式(1)で定義されている。

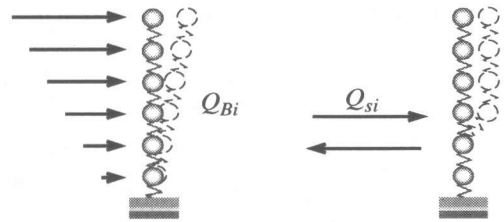
表-1 解析モデルの基本パラメータ

質点	3, 6, 9質点
階高	3m
各階の質量	100t
降伏変形	2cm
ひび割れ強度	降伏強度の1/3
復元力特性	修正武田モデル

2. 解析モデルと入力地震動

2.1 解析モデル

解析モデルの基本パラメータを表-1のように設定する。文献<sup>[2]</sup>では、層崩壊の起こりにくさを示す指標として、層せん断余裕率 $f_i$ を定義している。変形モードが直線形であると仮定し、図-1 (a) 一次モード外力



(a) 一次モード外力 (b) 層の強度

図-1 外力と強度

\*1 名古屋工業大学助手 工学部システムマネジメント工学科 博士(工)(正会員)  
 \*2 名古屋工業大学教授 工学部システムマネジメント工学科 工博(正会員)  
 \*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻(正会員)

$$f_i = \frac{Q_{yi}}{Q_{Bi}} - 1 \quad (1)$$

表-2 層せん断余裕率 $f_i$ の設定

(a) ピロティモデル (b) 中間階弱点モデル

階	a	b
1	0	0
2~9	0.25	0.5

階	a	b
1~4	0.25	0.5
5	0	0
6~9	0.25	0.5

(c) 最上階弱点モデル (d) 均等モデル

階	a	b
1~8	0.25	0.5
9	0	0

階	a
1~9	0

表-2(a)~(d)に示すように各階の層せん断余裕率 $f_i$ を設定し、それぞれピロティモデル、中間階弱点モデル、最上階弱点モデル、均等モデルと呼ぶ。

各階の等価一質点系のせん断力係数 $S_{ai}$ を次式で定義する。なお、 $S_{ai}$ の最小値 $S_a$ については0.6とした。

$$S_{ai} = (1 + f_i) \cdot S_a \quad (2)$$

各階の降伏強度は式(2)で求められる $S_{ai}$ を用いて次式で算出する。

$$Q_{yi} = \frac{3}{2} \times \frac{n+i}{2n+1} \times S_{ai} \times W_i \quad (3)$$

$W_i$ : その階より上の重量

剛性については、降伏変形角を1/150に固定し、降伏点割線剛性が初期剛性の0.3倍となるように設定した。スケルトンカーブの概形を図-2に示す。

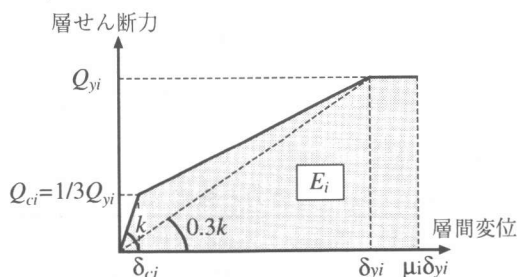


図-2 剛性およびエネルギーの定義

## 2.2 入力地震動

入力地震動は、以下に示す4種類の基本地震動と、これらをもとに作成した模擬地震動20波<sup>[3]</sup>を用いる。ただし、(1)、(2)については最大速度100kineに基準化して入力した。

- (1)八戸港湾 EW 成分 1968年 十勝沖地震
  - (2)El Centro NS成分 1940年 Imperial Valley地震
  - (3)葺合供給所 NS成分 1995年 兵庫県南部地震
  - (4)Sylmar NS成分 1994年 Northridge地震
- 解析プログラムは、RESP-M/II<sup>[4]</sup>を使用した。

## 3. 応答解析結果分析のための定義

図-2の網掛けの部分の面積で示すように、 $i$ 階の最大応答に対応するポテンシャルエネルギー $E_i$ を定義する。建物全体のポテンシャルエネルギー $E_{total}$ を、式(4)で定義する。

$$E_{total} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (4)$$

$n$ : 質点数

各階の塑性エネルギー $E_{pi}$ を式(5)(6)で定義する。

$$E_{pi} = 0 \quad (\mu_i \leq 1) \quad (5)$$

$$E_{pi} = Q_{yi} \cdot \delta_y \cdot (\mu_i - 1) \quad (\mu_i > 1) \quad (6)$$

$\mu_i$ :  $i$ 階の最大応答塑性率

全体の塑性エネルギー $E_p$ を式(7)で定義する。

$$E_p = \sum_{i=1}^n E_{pi} \quad (7)$$

$n$ : 質点数

## 4. 解析結果

### 4.1 建物に入力されるエネルギーの検証

建物に入力する全エネルギー $E_{total}$ が、地震動の性質や弱点階の存在によって受ける影響について検討する。

9質点モデルで、弱点階以外の階の層せん断余裕率 $f_i=0.25$ 場合について、基本とした4つの地震動と、応答スペクトル及び継続時間が基本地震動と同様で位相情報のみ異なる地震動<sup>[3]</sup>20波を入力したときの $E_{total}$ の分布を図-3に示す。横軸は $E_{total}$ 、縦軸はモデルの名称を示している。 $E_{total}$ は地震動の位相特性によって大きくばらつくが、弱点階の位置の影響は見られない。層せ

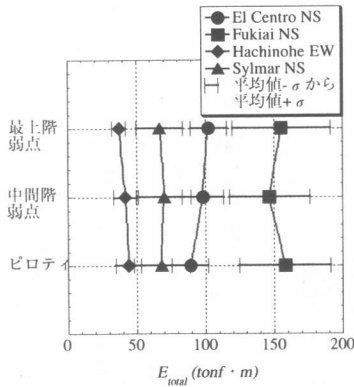


図-3  $E_{total}$  の検討

ん断余裕率の異なるモデル, また3, 6質点モデルの場合でも同様の結果を得た。

#### 4.2 塑性エネルギーの分布

弱点階の存在と塑性エネルギーの分布の関係について検討する。

##### 4.2.1 強度が均等な場合

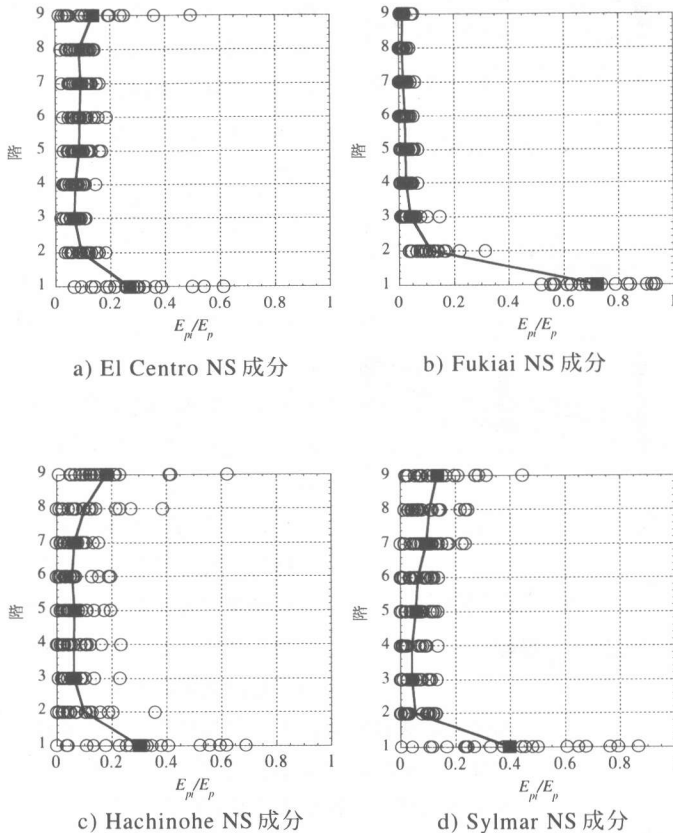


図-4 塑性エネルギーの分布 (強度が均等な場合)

9質点モデルで強度が均等な場合における塑性エネルギーの分布を, 基本地震動ごとに図-4に示す。実線は各階の $E_{pi}/E_p$ の平均値である。図の横軸は $E_{pi}/E_p$ すなわち塑性エネルギーの集中度, 縦軸は階を示している。Fukiiai NS成分で1階に $E_{pi}/E_p$ が集中していることを除き, 塑性エネルギーは比較的均等に各階に分配されている。3, 6質点モデルの場合でも同様の結果を得た。

##### 4.2.2 弱点階がある場合

9質点モデルで, 弱点階以外の層で $f_i$ が0.5の場合における塑性エネルギーの分布を, 各モデルごとに図-5に示す。横軸は層せん断余裕率 $f_i$ , 縦軸は $E_{pi}/E_p$ すなわち塑性エネルギーの集中度を示している。塑性エネルギーが弱点階に集中することがわかる。弱点階が上階になるにつれ集中の度合いは減少していくように見えるが, 弱点階以外に大きな変形が生じているケースの

多くは算合を入力した場合の1階の応答値である。原因として, Fukiiai NS成分は短周期成分が小さく高次モードの影響が小さいため変形が1階に集中しやすいということが考えられる。図より,  $E_{pi}/E_p$ の上限値の予測式を以下のように定義する。

$$\frac{E_{pi}}{E_p} = \frac{1}{(1+2f_i)^2} \quad (8)$$

##### 4.3 形状指標 $S_D$

参考文献<sup>[2]</sup>で提案された形状指標 $S_D$ の算定式について検証する。形状指標 $S_D$ の算定式を以下に示す。

$$S_D = 2 \times \left( \frac{S_a}{I_{so}} - \frac{1}{2} \right) + \frac{4}{3} \times \frac{2n+1}{n+1} \times (1+f_i) \sqrt{G_i} \times \left( 1 - \frac{S_a}{I_{so}} \right) \quad (9)$$

$G_i$ : 直線振動する建物のi階へ入力する地震エネルギーと全入力エネルギーとの比

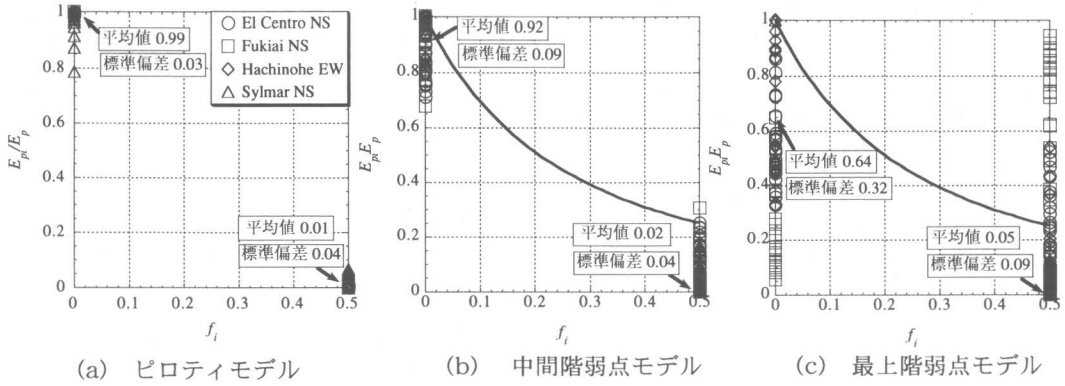


図-5 塑性エネルギーの分布（弱点階）

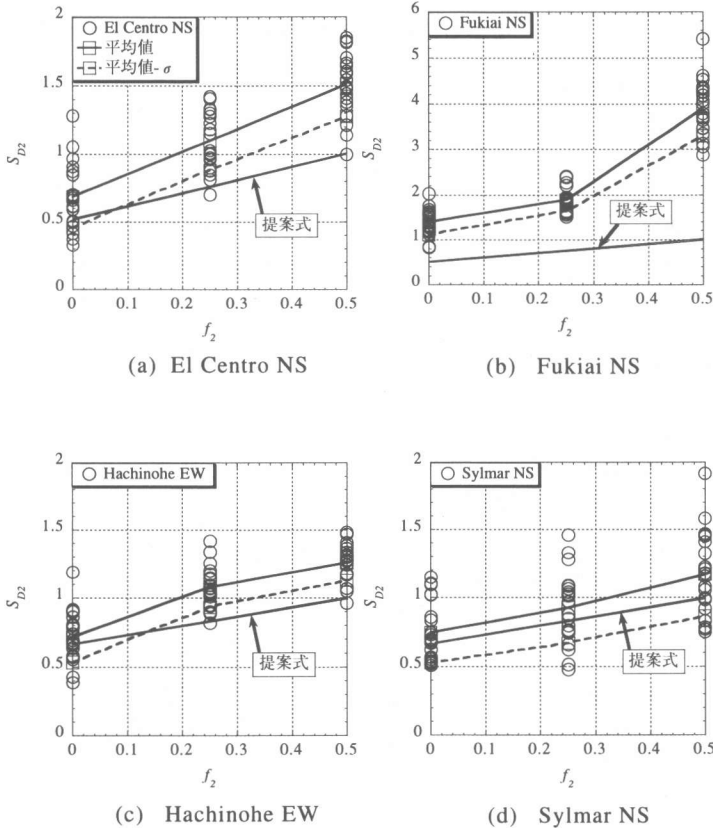


図-6 層せん断余裕率  $f_i$  の影響

$$G_i = \frac{3(n+i)(n+1-i)}{n(n+1)(2n+1)} \quad (10)$$

#### 4.3.1 層せん断余裕率 $f_i$ の影響

9質点のピロティモデルにおける2階の層せん断余裕率  $f_2$  と形状指標  $S_{D2}$  の関係を、地震動ご

とにまとめて図-6に示す。実線は平均値、破線は平均値 -  $\sigma$  を示している。矢印で示した実線は式(9)で算出したものである。 $S_D$  は、建物が直線振動するという仮定の下で  $i$  階に分配されるエネルギー  $E_{Bi}$  と、 $i$  階に実際に入力したエネルギー  $E_i$  を用いて、以下の式で算出した<sup>[2]</sup>。

$$S_D = \frac{2}{3} \times \frac{2n+1}{n+1} \times \sqrt{\frac{E_{Bi}}{E_i}} \quad (11)$$

$f_2$  が大きくなるにつれ塑性化が生じにくくなるため  $S_D$  が大きくなる。提案式は応答解析結果の平均値を下回っている。

#### 4.3.2 ( $S_a/I_{so}$ ) の影響

建物に入力する地震動の強さを簡単に表すため、降伏点周期の0.8~1.2倍の周期に対する減衰定数8%の応答せん断力係数の平均値を  $I_{so}$  と見なす。ここで等価減衰定数8%は、修正武田モデルの塑性率1の履歴エネルギーに対応する減衰定数(3%)に粘性減衰(5%)を加えたものである。9質点で1階

せん断係数の平均値を  $I_{so}$  と見なす。ここで等価減衰定数8%は、修正武田モデルの塑性率1の履歴エネルギーに対応する減衰定数(3%)に粘性減衰(5%)を加えたものである。9質点で1階

の強度を  $S_{a1}/I_{s0}=0.5 \sim 1.5$  とし、1階以外の強度は  $f_i=0.1$  となるように定め、ピロティモデルとして解析を行った。

図-7は、 $S_a/I_{s0}$  と1階の形状指標  $S_{D1}$  の関係を地震動ごとに示したものである。図の矢印で示した実線は式(9)で算出した。図の○は塑性化したデータ、□は弾性範囲だったデータである。 $S_a/I_{s0}$  が小さい場合は、 $S_D$  が右上がりになる。これは、 $S_a$  が降伏変位に対する応答せん断力係数の平均値  $I_{s0}$  に近づくにつれて塑性エネルギーの集中が起こらなくなったからである。 $S_a/I_{s0}$  が1を越えると、ほとんどの場合建物は弾性範囲にとどまる。El-Centroでは  $S_a/I_{s0}$  が大きいときに  $S_{D1}$  を過大評価しているが、この場合塑性率は非常に小さい値にとどまっている。Fukiai NS成分を入力した場合及び  $S_a/I_{s0}$  の大きいモデルにEl-Centroを入力した場合を除き、提案式は

応答解析結果のほとんどを下回っており、 $S_D$  を安全側に評価していることがわかる。Fukiai NSを入力した場合には1階の応答が大きくなる。このような長周期のパルスのな地震動に対してはエネルギーの分布の特性が他の地震動と大きく異なるので、別途検討が必要である。

#### 4.4 塑性エネルギーの分布 (建物のばらつき)

実際の建物では材料レベルのばらつき、非構造部材の影響など様々な原因により、必ずしも正しい診断結果が得られるとはかぎらない。そこで判定された数値と実際の性能との違いの影響について調べるため、建物の強度を変動させた場合について検討した。9質点で1階以外の強度が  $f_i=0.2$  となるように定めたピロティモデルを規準として、各階の強度を  $COV=0.1, 0.2$  の正規乱数を用いて変動させた。ここではEl-Centro NS成分の原波に対して、建物強度のばらつきの  $COV=0$  及び  $0.1$  の場合について示す。

特定層への塑性エネルギー集中度のヒストグラムを図-8に示す。(a)は1階、(b)は5階、(c)は9階について示している。図の横軸は  $E_{pi}/E_p$  すなわち塑性エネルギーの集中度、縦軸は頻度を示している。図の矢印はそれぞれ、式(8)で予測した  $E_{pi}/E_p$  の上限値である。予測値は  $COV=0$  の場合の塑性エネルギー集中度を上回っており、安全側の評価をしていることが分かる。 $COV=0.1$  の建物の強度のばらつきを考慮すると、エネルギーの分布は大きくばらつき予測値を上回るケースも見られる。

図-9は、図-8と同様に層間変位についてプロット

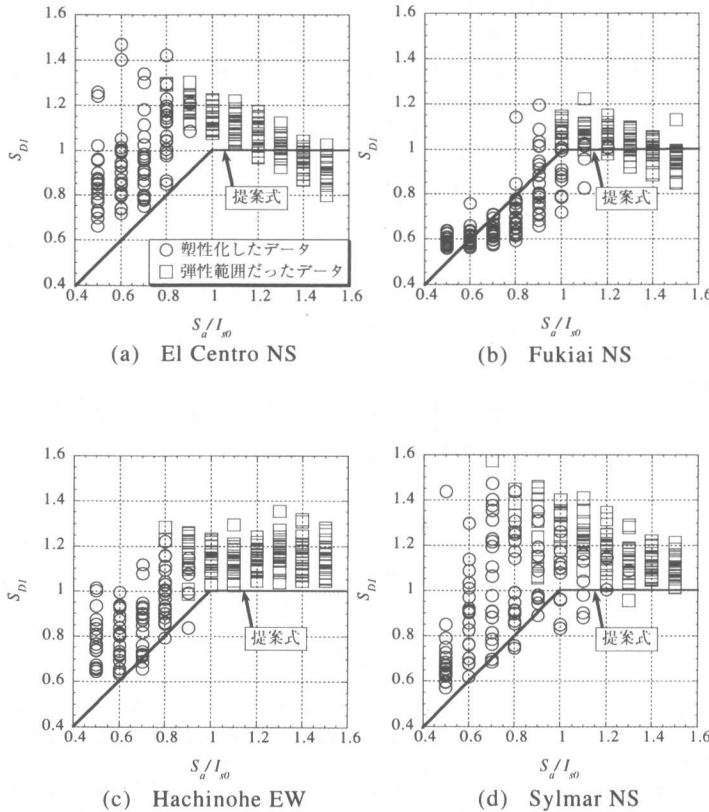


図-7  $S_a/I_{s0}$  の影響

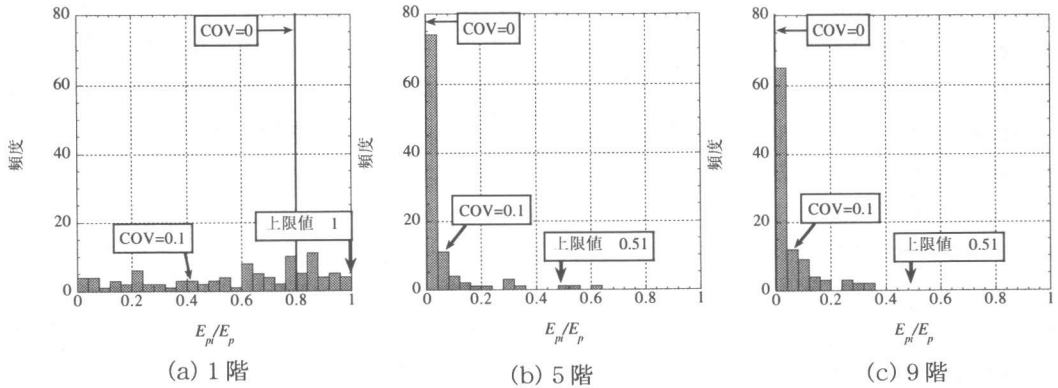


図8 塑性エネルギーの分布（建物のばらつき）

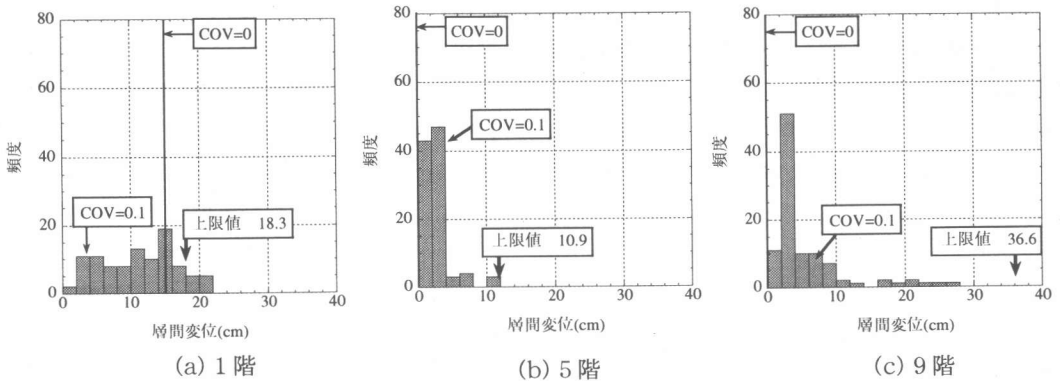


図-9 層間変位のヒストグラム

したものである。式(8)の予測値で層間変位を安全側に評価できることがわかる。ただし、本研究の仮定では9階の強度が小さく、わずかな塑性エネルギーを仮定しただけで大きな変形を予測するため、9階については予測値が極めて大きくなってしまふ。

### 5. 結論

- (1) 建物に入力される全エネルギーは弱点階の位置の影響を受けない。
- (2) 塑性エネルギーは、逆三角形分布の外力を与えたときに弱点となる階に集中する。
- (3) 参考文献<sup>[2]</sup>で提案された形状指標の算定式は、層降伏型建物において耐震性能を安全側に評価する。

(4) 変動係数10%の建物のばらつきを考慮すると、応答値は大きくばらつく。

謝辞：1995年兵庫県南部地震の強震記録は、大阪ガスより提供を受けた。

### 参考文献：

- [1]秋山 宏：エネルギーの釣り合いに基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，1999
- [2]市之瀬 敏勝：鉄筋コンクリート建物の耐震診断について（その1 増分解析と形状指標），東海支部研究報告集，2001
- [3]梅村 恒ほか：鉄筋コンクリート建物の耐震診断について（その2 スペクトル振幅及び包絡形状の等しい模擬地震動），東海支部研究報告集，2001
- [4]（株）構造計画研究所：建築構造物の振動解析プログラム RESP-M/II，第5.0版，1996.7