

# 論文 層降伏型 RC 建物の応答変位予測型耐震診断法

神林宏之\*1・市之瀬敏勝\*2・花井伸明\*3

要旨：本研究は、現在の耐震診断基準の問題を指摘すると共に、建物の高さ方向の強度分布から実際の応答変位を予測するという新たな形の耐震診断法を提案するための基礎的検討を行う。応答変位は以下の手順で予測できる。まず、地震波によって決まる等価速度と建物の全質量から建物に入力されるエネルギーを算出する。次に、建物の降伏強度、降伏変形、層せん断余裕率から弾性エネルギーを算出し、これと建物に入力されるエネルギーから塑性エネルギーを予測する。そして、層せん断余裕率によって塑性エネルギーの分布を予測し、各階の塑性率を予測する。

キーワード：塑性エネルギー、等価速度、層せん断余裕率、応答変位

## 1. はじめに

1995年1月に起こった兵庫県南部地震は、多くの建物に被害を与えた。その中でもピロティ部分や中間階での破壊程度が大きかった。本研究は、建物の高さ方向の強度分布から実際の応答変位を予測するという新たな形の耐震診断法を提案するための基礎的検討を行う。

## 2. 現行の耐震診断基準の検討

### 2.1 解析モデル

解析モデルは、質点数を3質点、復元力特性を修正武田モデル<sup>1)</sup>、減衰定数を0.05、減衰タイプを瞬間剛性比例、階高 $h=4m$ 、各階の質量は100tに設定した。また、 $i$ 階の降伏強度 $Q_{yi}$ を以下のように設定した。

$$Q_{yi} = \psi_i \cdot W_i \cdot A_i \cdot C_0 \quad (1)$$

$W_i$  :  $i$ 階より上の質量

$C_0=0.3, 0.6$

$\psi_i$  : 強度係数

強度係数 $\psi_i$ とは、 $A_i$ 分布に従う強度を1としたときの $i$ 階の強度の比率のことであり、表-1に示すように設定する。また、ひび割れ強度 $Q_{ci}$ 、ひ

び割れ変形 $\delta_c$ はそれぞれ $Q_{ci}=Q_{yi}/2$ 、 $\delta_c=\delta_y/3$ となるように設定した。なお、周期を一定とするため剛性は一定で強度のみを2倍とした。

表-1 強度係数 $\psi_i$

階	$\psi_i$			
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
3	1	2	2	1
2	1	2	1	2
1	1	1	2	2

### 2.2 入力地震波

解析には、次に示す過去の4つの地震記録を用いる。

- (1)八戸港湾記録 NS 成分 1968 十勝沖地震
  - (2)El Centro NS 成分 1940 Imperial Valley 地震
  - (3)葺合供給所 EW 成分 1995 兵庫県南部地震
  - (4)Sylmar NS 成分 1994 Northridge 地震
- 解析プログラムは、「RESP-M/II」<sup>1)</sup>を使用し、(1)(2)は加速度を原波の3倍で、(3)(4)は原波で入力した。

### 2.3 解析結果

図-1に階と $E_0$ の関係を示す。 $E_0$ は文献<sup>2)</sup>より式(2)(3)で算出した。

$$E_0 = \frac{1}{A_i} \cdot C_i \cdot \sqrt{2\mu_i - 1} \quad (\mu_i > 1) \quad (2)$$

\*1 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)

\*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)

$$E_0 = \frac{1}{A_i} \cdot C_i \cdot \mu_i \quad (\mu_i \leq 1) \quad (3)$$

$C_i$  :  $i$ 階の層せん断力係数

$\mu_i$  :  $i$ 階の最大応答塑性率

図-1より、Case1は弱点階がないため $E_0$ は比較的均等であるが、Case3において $E_0$ は弱点階で大きな値を示している。また、弱点階への塑性エネルギーの集中を考慮するための形状指標 $S_D$ を $E_0$ に乗じたとしても、図-2のようになり、すべての階で一定である $I_{S0} = E_0 \cdot S_D$ は弱点階で過小な要求となるという問題が生じる。Case2, Case4でも同様の結果を得た。

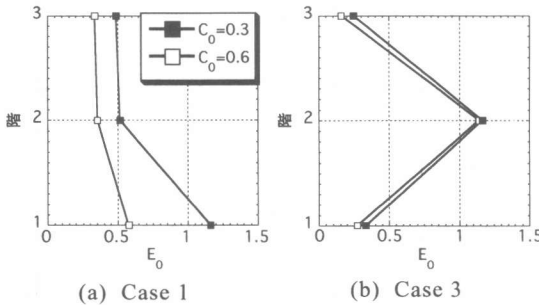


図-1 階と $E_0$ の関係 八戸NS成分( $\times 3$ )

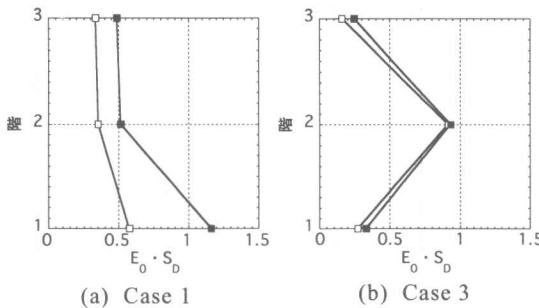


図-2 階と $I_{S0} = E_0 \cdot S_D$ の関係 八戸NS成分( $\times 3$ )

### 3. 応答解析結果分析のための定義

$i$ 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、図-3の網掛けの部分の面積で示すように定義する。<sup>3)</sup>

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

等価速度 $V_{total}$ を式(5)で定義する。

$$V_{total} = \sqrt{\frac{2E_{total}}{M}} \quad (5)$$

$M$  : 建物の全質量

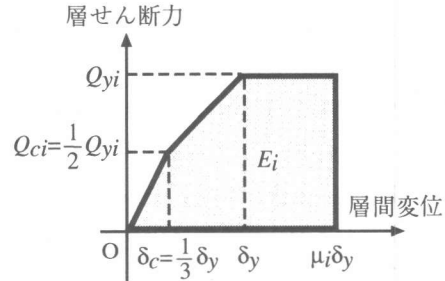


図-3  $E_i$ の定義

## 4. $E_0$ スペクトルと $V_{total}$ スペクトル

### 4.1 解析モデルと入力地震波

解析モデルは、質点数を1, 2, 3, 10質点、減衰定数を0.05、減衰タイプを瞬間剛性比例に設定した。 $i$ 階の降伏強度 $Q_{yi}$ 、ひびわれ強度 $Q_{ci}$ 、ひび割れ変形 $\delta_c$ 、入力地震波は2.1節および2.2節と同様に設定した。ただし、周期の影響を見るため $\delta_y$ については種々変化させた。強度係数 $\psi_i$ はすべて1に設定した。復元力特性は修正武田モデルおよび原点指向型の2種類を用いた。

### 4.2 解析結果

図-4(a)に算合EW成分10質点、 $C_0=0.3$ における $E_0$ スペクトルを示す。なお、復元力特性は修正武田モデルである。図の黒丸は1階の $E_0$ 、白丸は各階の $E_0$ の平均値である。図より、 $E_0$ は周期や階によってばらつきのでる不安定な値であることがわかる。ここで、現行の耐震診断基準<sup>2)</sup>の定義により近い $E_0$ を算出するため、図-4(a)の $E_0$ スペクトルの解析によって得られた応答変位を式(6)に代入して塑性率を求める。ただし、この解析では階高 $h$ を4mと設定している。

$$\mu_i = \frac{\delta_i}{h/150} \quad (6)$$

$\mu_i$  :  $i$ 階の最大応答塑性

$\delta_i$  :  $i$ 階の最大応答変位

$h$  : 建物の階高 (=4m)

この塑性率を用いて2.3節の式(2), (3)より算出した $E_0$ スペクトルを図-4(b)に示す。この場合も $E_0$ は周期や階によってばらつきがでることがわかる。他の地震波、質点数、 $C_0=0.6$ でも同様の結果を得た。

図-5に葦合EW成分の1, 2, 10質点における $V_{total}$ スペクトルを示す。図の黒四角は $C_0=0.3$ , 白四角は $C_0=0.6$ を示す。なお、復元力特性は修正武田モデルである。図より、 $V_{total}$ は2, 10質点では質点数による影響はなく、1質点だけが異なっている。また、周期にあまり依存しないため、図-4の $E_0$ よりも比較的安定しているといえる。図-6に復元力特性を原点指向型にした場合の葦合EW成分の2質点における $V_{total}$ スペクトルを示す。図より繰り返しエネルギー消費能力の小さい復元力特性では $V_{total}$ が大きくなることわかる。他の地震波でも同様の結果を得た。

## 5. 応答変位予測の方法

### 5.1 解析モデル

解析モデルは、 $C_0=0.3, 0.6$ の6質点モデルと10質点モデルで、ピロティモデルと中間階弱点モデルの2種類とし、それぞれについてケースa~eの5種類を考えた。復元力特性は修正武田モデル、階高 $h=4m$ , 各階の重量は100tとする。また、各階の強度係数 $\psi_i$ を表-2, 表-3のように設定し、降伏強度 $Q_{yi}$ の分布を図-7に示す。図-7(a)はピロティモデル, 図-7(b)は中間階弱点モデルであり、それぞれケースd, ケースeについて示した。剛性は、 $C_0=0.3, 0.6$ において降伏変形 $\delta_y=2.25, 4.5cm$ となるように設定した。

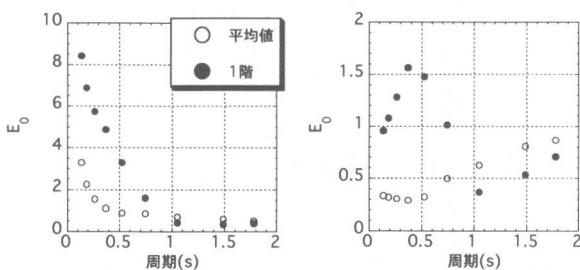
各階の塑性エネルギー $E_{pi}$ を次式で定義する。

$$E_{pi} = Q_{yi} \cdot \delta_y \cdot (\mu_i - 1) \quad (7)$$

ただし、 $E_{pi} = 0$  ( $\mu_i \leq 1$  のとき)

建物全体の塑性エネルギー $E_p$ を次式で定義する。

$$E_p = \sum_{i=1}^n E_{pi} \quad (8)$$



(a)  $\mu_i$ をそのまま使用 (b)  $\mu_i$ を式(6)で定義

図-4  $E_0$ スペクトル 葦合EW成分  
10質点  $C_0=0.3$

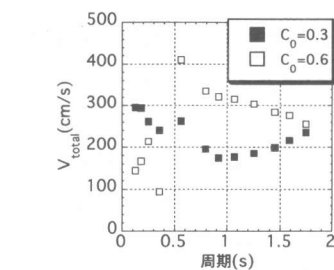


図-6  $V_{total}$ スペクトル 葦合EW成分  
原点指向型 2質点

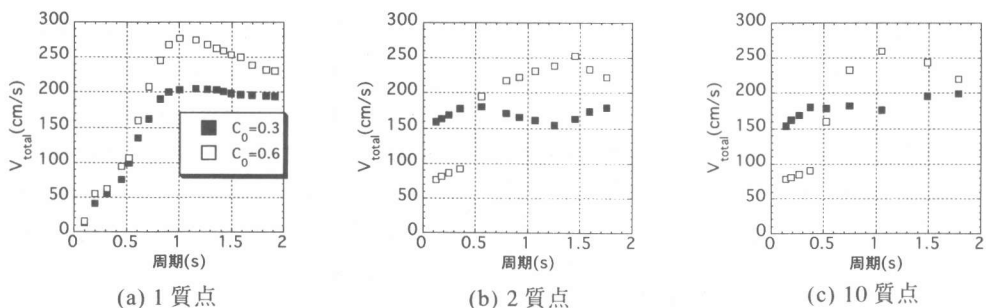


図-5  $V_{total}$ スペクトル 葦合EW成分  
修正武田モデル

表-2 ピロティモデルの設定

階	a	b	c	d	e
4~	1.1	1.1	1.2	1.3	2
3	1.1	1	1.1	1.3	2
2	1.1	1	1.1	1.3	2
1	1	1	1	1	1

表-3 中間階弱点モデルの設定

6質点	10質点	a	b	c	d	e
5~	7~	1.1	1.1	1.2	1.3	2
4	6	1.1	1	1.1	1.3	2
3	5	1	1	1	1	1
2	4	1.1	1	1.1	1.3	2
1	~3	1.1	1.1	1.2	1.3	2

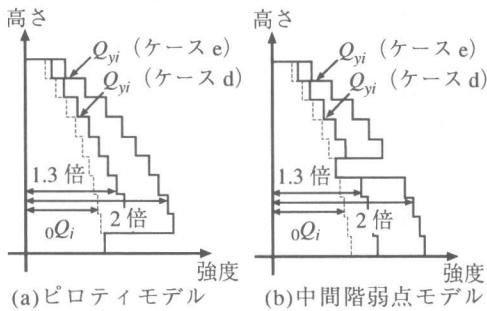


図-7 降伏強度の設定

## 5.2 塑性エネルギーの平均値の予測

### (1) 予測方法

塑性エネルギーの平均値を予測するために、層せん断強度係数  $C_{si}$  を次式で定義し、全階で最小の  $C_{si}$  をベースシア係数  $C_B$  とする。

$$C_{si} = \frac{Q_{yi}}{B_i W_i} \quad (9)$$

ただし、 $B_i = (n+i)/(n+1)$

さらに、平均値用の層せん断余裕率  $\alpha_i$  を次式で定義する。

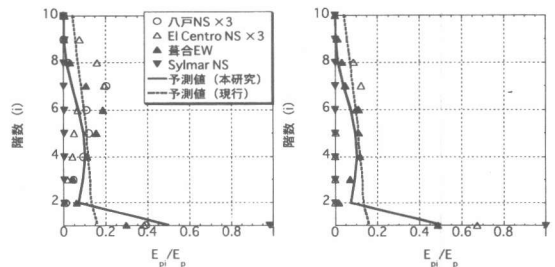
$$\alpha_i = \frac{C_{si}}{C_B} \quad (10)$$

また、以降の解析結果と一致するように、各階の塑性エネルギー  $E_{pi}$  の平均値を次式で予測する。

$$E_{pi} = \frac{\alpha_i^{-25}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i^{-25}} E_p \quad (\text{平均値}) \quad (11)$$

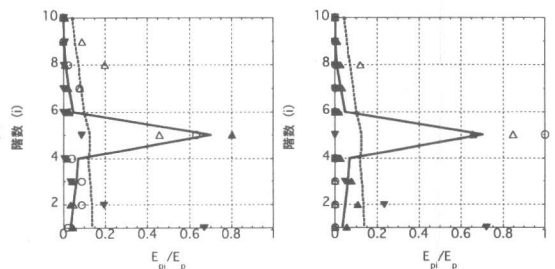
### (2) ピロティおよび中間階弱点の場合

図-8にケースaにおける各階への塑性エネルギーの分布を示す。図-8(a)(b)は10質点のピロティモデル、図-8(c)(d)は中間階弱点モデルの結果である。また、図-8(a)(c)は  $C_0=0.3$ 、図-8(b)(d)は  $C_0=0.6$  である。なお、横軸は  $E_{pi}/E_p$  で、図の実線は式(11)により予測した値であり、破線は現行の耐震診断基準<sup>2)</sup>に基づいて予測した値である。図より塑性エネルギーは、弱点階に集中している。また、解析値は、現行基準<sup>2)</sup>による予測値より、本研究による予測値のほうが近いといえる。ケースb~eにおいても同様の結果を得た。



(a)  $C_0=0.3$ , ピロティ

(b)  $C_0=0.6$ , ピロティ



(c)  $C_0=0.3$ , 中間階弱点

(d)  $C_0=0.6$ , 中間階弱点

図-8 塑性エネルギーの分布

### (3) 上層階への塑性エネルギーの集中

上層階に塑性エネルギーの集中が起こり得るかどうかを検証するため、10質点のピロティモデルのケースeについて、 $\psi_i$ を上下逆にしたモデルを設定して解析を行った。このときの塑性エネルギーの分布を図-9に示す。図は  $C_0=0.3$  の結果である。図より、最上階が弱点階となっても、他の階が弱点階になった場合と同様に塑性エネルギーの集中が起こるといえる。

(4) 剛性分布の影響

本解析では降伏変形  $\delta_y$  をすべての階で一定にしており、そのため弱点階では強度とともに剛性も低くなっている。そこで、塑性エネルギーの分布が強度分布と剛性分布のどちらの影響を受けているのか検証するため、10質点の中間階弱点モデルのケースaについて、強度分布はそのまま5階の剛性のみを5倍としたモデルを設定して解析を行った。このときの塑性エネルギーの分布を図-10に示す。図-10(a)は  $C_0=0.3$ 、図-10(b)は  $C_0=0.6$ の結果である。図-10と図-8(c)(d)を比較すると、5階の剛性を5倍にしても塑性エネルギーの分布はほとんど変化がないことが分かる。また、破線の現行の耐震診断基準<sup>2)</sup>に基づいた予測値では4階に塑性エネルギーが集中しており、解析と異なっている。他のモデルはこれよりも5階に塑性エネルギーが集中しやすいので、当然同様の結果が得られるものと思われる。よって、塑性エネルギーの分布は強度分布によって決まり、剛性分布の影響はほとんどないといえる。

5.3 塑性エネルギーの上限値の予測

塑性エネルギーの上限値を予測するために、壁谷沢ら<sup>4)</sup>の研究を参考にして高次モードによる層せん断力の変動分を次式で推定する。右辺分子の  $(1-\beta_1 u_j)$  は、図-11に示すように、高次モードに伴う加速度の分布形を表す。

$$C_{\beta} = \frac{\sum_{j=1}^n (1-\beta_1 u_j) M_j}{B_1 W_i} C_B \quad (12)$$

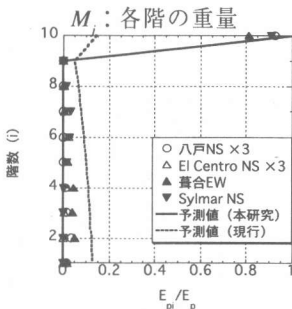


図-9 最上階が弱点階の場合

$$\beta_1 u_j = 3j / (2n+1)$$

さらに、上限値用の層せん断余裕率  $\alpha'_i$  を次式で定義する。

$$\alpha'_i = \max \left( \frac{C_{si} - |C_{\beta i}|}{C_B}, 1 \right) \quad (13)$$

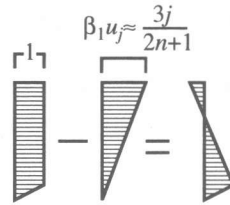
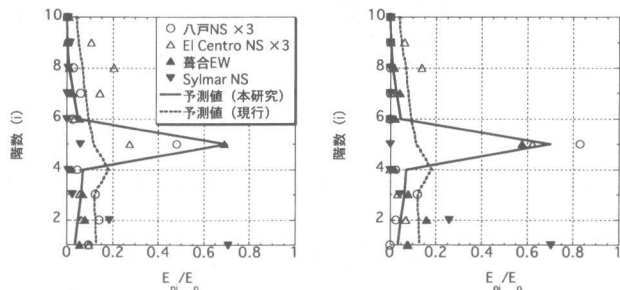


図-11 式(12)の  $(1-\beta_1 u_j)$

図-12に  $\alpha'_i$  と  $E_{pi}/E_p$  の関係を示す。図-12(a)(b)は6質点モデル、図-12(c)(d)は10質点モデルの結果である。図-12(a)(c)はピロティモデル、図-12(b)(d)は中間階弱点モデルである。実線は上限値の予測であり、次式による。

$$E_{pi} = \max \left\{ \left( \frac{2}{\alpha'_i} - 1 \right)^3, 0 \right\} E_p \quad (\text{上限値}) \quad (14)$$

図より、一部に解析値が上限値を上回っているものがあるが、だいたい上限値の予測は解析値の上限をおさええている。解析値が上限値を著しく上回っているもの(図-12(d))は  $C_0=0.6$ のケースdにSylmar NS成分を入力したときの1階であるが、これは1階に塑性エネルギーが集中しやすいというSylmar NS成分特有の性質によるところ



(a)  $C_0=0.3$ , 10質点 (b)  $C_0=0.6$ , 10質点

図-10 剛性分布の影響

ろが大きく、塑性率が極めて1に近い範囲でのみ起こりうる現象であるので無視しても構わない。よって、塑性エネルギーの上限値の予測は可能である。

#### 5.4 応答塑性率の予測

図-13に示す流れで応答塑性率を予測することができる。すなわち、地震波の $V_{total}$ スペクトルから文献<sup>3)</sup>の方法により式(15)~(17)で $E_p$ を予測する。

$$E_{total} = \frac{1}{2} M \cdot V_{total}^2 \quad (15)$$

$$E_e = \frac{7}{12} \delta_y \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Q_{yi}}{\alpha_i^2} \quad (16)$$

$$E_p = E_{total} - E_e \quad (17)$$

$n$ : 質点数

次に、式(11)または式(14)より各階の $E_{pi}$ を予測する。こうして得られた $E_{pi}$ から次式により各階の最大応答塑性率 $\mu_i$ を予測する。

$$\mu_i = \frac{E_{pi}}{Q_{yi} \cdot \delta_y} + 1 \quad (18)$$

#### 6. 結論

- (1) 現行の耐震診断基準における $S_D$ は、弱点階への塑性エネルギーの集中を考慮できていない。
- (2)  $V_{total}$ は2質点以上では周期や質点数にあまり依存しない。ただし、繰り返しエネルギー消費能力の小さい復元力特性では大きくなる。
- (3) 各階の塑性エネルギー $E_{pi}$ の平均値は式(11)により、上限値は式(14)により予測可能である。
- (4) 応答変位予測型耐震診断は、図-13の流れにより予測可能である。

#### 参考文献

- 1) (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
- 2) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説, 1995
- 3) 花井伸明, 市之瀬敏勝, 神林宏之: 層降伏型

RCピロティ建物の応答変位予測, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp. 1153-1158, 1999.7

- 4) 壁谷沢寿海, 緒方恭子: 鉄筋コンクリート壁フレーム構造の終局強度設計法(その4) 高次モード変動外力の評価及び推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp. 2183-2184, 1984

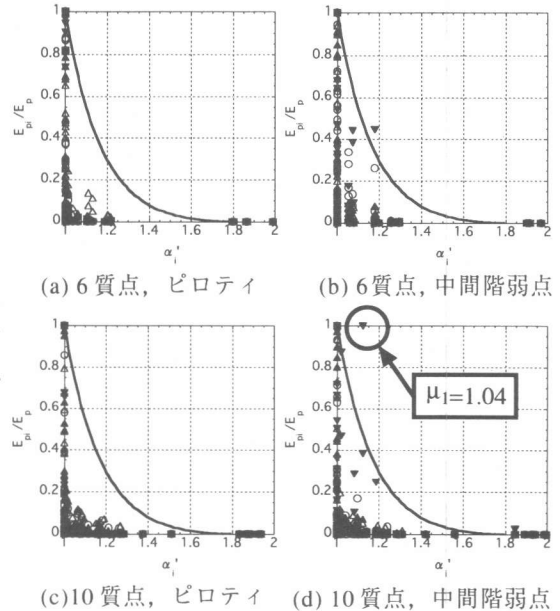


図-12  $\alpha_i'$ と $E_{pi}/E_p$ の関係

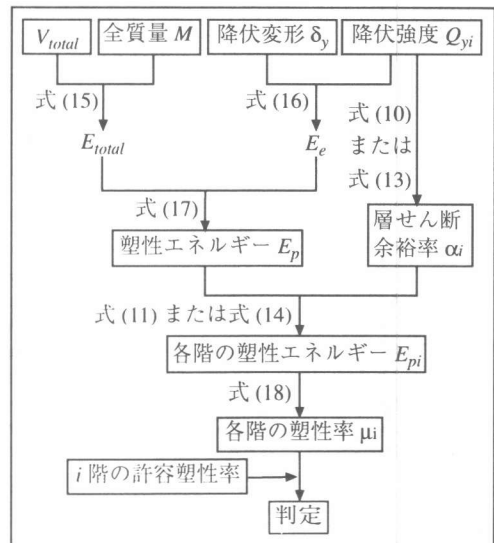


図-13 応答変位予測型耐震診断の流れ