

# 論文 層降伏型 RC ピロティ建物の応答変位予測

花井伸明<sup>\*1</sup>・市之瀬敏勝<sup>\*2</sup>・神林宏之<sup>\*3</sup>

**要旨：**現在の耐震診断基準では、建物の応答変位が予測しにくい。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。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、ピロティと上階との強度比を考慮して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、強度比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：**ピロティ, 応答変位, 強度比, 等価速度,  $A_i$ 分布

## 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. 既往の研究

現在の耐震診断基準<sup>1)</sup>では、崩壊の可能性が分かるのみであって、応答変位が予測しにくい。秋山<sup>2)</sup>によりエネルギーから多質点系の損傷分布を評価する手法が提案されているが、累積塑性

変形倍率などの算出が煩雑で、かつかなりの計算量を要する。秋山<sup>2)</sup>の理論を一般化する理論としてモーダル損傷理論<sup>3)</sup>があるが、予測精度がいいとはいえない。また、ピロティ建物の応答予測として、多質点系を等価な1質点系に置き換える手法も提案されているが<sup>4)</sup>、弱点階が極端に弱いケース以外は精度が低下する。さらに、建物の強度などから直接応答を予測することができず、1階以外が弱点階になっている場合には適用できないという面もある。

## 3. 解析モデルと入力地震波

### 3.1 解析モデル

解析モデルは、復元力特性を修正武田モデル<sup>5)</sup>、質点数を3～10質点、減衰定数を0.05、減衰タイプは瞬間剛性比例に設定した。 $i$ 階の降伏強度  $Q_{yi}$  を以下のように設定した。

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

$$C_0 = 0.2, 0.3, 0.4$$

$t_i$  : 強度比       $W_i$  :  $i$ 階より上の質量

2階以上の  $t_i$  を  $t_i=1, 2$  としたモデルをそれぞれ強度比1倍モデル、強度比2倍モデルと呼び、高

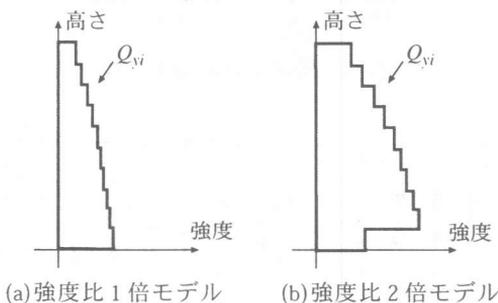


図 - 1 強度比  $t$  倍モデル

\*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 (会員外)

さ方向の強度分布を図-1に示す。剛性は $C_0=0.2, 0.3, 0.4$ において降伏変形 $\delta_y$ がそれぞれ $\delta_y=1.5, 2.25, 3\text{cm}$ , また, ひびわれ強度 $Q_{ci}$ , 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。これを図-2, 図-3に示す。

### 3.2 入力地震波

解析には, 次に示す過去の10種類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)東北大1階 NS 成分 1978 宮城県沖地震
  - (4)Taft NS 成分 1952 Kern-County 地震
  - (5)葦合供給所 NS 成分 1995 兵庫県南部地震
  - (6)葦合供給所 EW 成分 1995 兵庫県南部地震
  - (7)JR 鷹取駅 NS 成分 1995 兵庫県南部地震
  - (8)JR 鷹取駅 EW 成分 1995 兵庫県南部地震
  - (9)Sylmar NS 成分 1994 Northridge 地震
  - (10)Sylmar EW 成分 1994 Northridge 地震
- ((7) (8)の波形はJR警報地震計(鷹取駅, FDシリアル番号R-081)<sup>6)</sup>による。)

解析プログラムは, 「RESP-M/II」<sup>5)</sup>を使用した。

### 4. 応答解析結果分析のための定義

図-3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, 式(2) (3) (4)で定義する。

$$E_i = \frac{3}{4} Q_{yi} \cdot \delta_y \cdot \mu_i^2 \quad (\mu_i \leq 1/3) \quad (2)$$

$$E_i = \frac{1}{24} Q_{yi} \cdot \delta_y (9\mu_i^2 + 6\mu_i - 1) \quad (1/3 < \mu_i \leq 1) \quad (3)$$

$$E_i = Q_{yi} \cdot \delta_y \left( \mu_i - \frac{5}{12} \right) \quad (1 < \mu_i) \quad (4)$$

$\mu_i$ :  $i$ 階の最大応答塑性率

建物全体のポテンシャルエネルギー $E_{total}$ を, 式(5)で定義する。

$$E_{total} = \sum_{i=1}^n E_i \quad (5)$$

$n$ : 質点数

建物全体の弾性エネルギー $E_e$ を式(6)で定義する。

$$E_e = \frac{7}{12} \sum_{i=1}^n \frac{Q_{yi} \cdot \delta_y}{t_i^2} \quad (6)$$

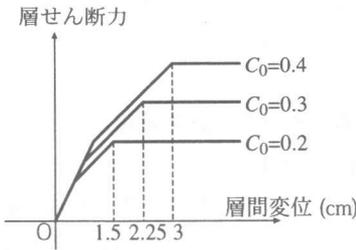


図-2 解析モデル

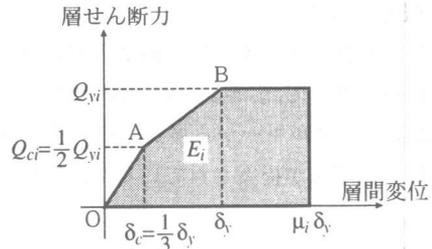
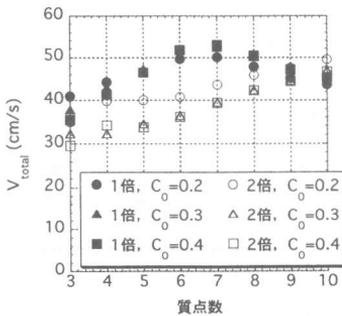
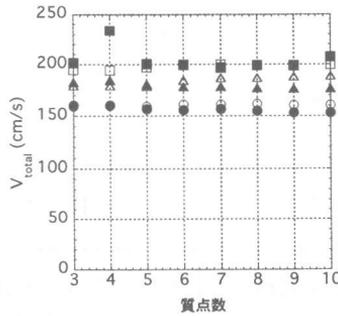


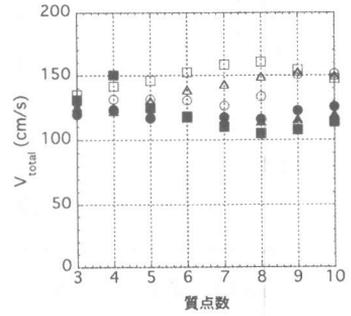
図-3 降伏変形と降伏強度



(a)八戸港湾 NS 成分



(b)葦合供給所 EW 成分



(c)Sylmar EW 成分

図-4 質点数  $n$  と等価速度  $V_{total}$  の関係

ここで、7/12とは式(4)に $\mu_i=1$ を代入したときの( )内の値である。また、塑性エネルギー $E_p$ を式(7)で定義する。

$$E_p = \sum_{i=1}^n Q_{vi} \cdot \mu'_i \cdot \delta_i \quad (7)$$

$$\mu'_i = 0 \quad (\mu_i \leq 1)$$

$$\mu'_i = \mu_i - 1 \quad (\mu_i > 1)$$

$E_{total}$ 、 $E_p$ は建物の質量によるので、標準化のために等価速度 $V_{total}$ 、 $V_p$ を式(8) (9)で定義する。

$$V_{total} = \sqrt{\frac{2E_{total}}{M}} \quad (8)$$

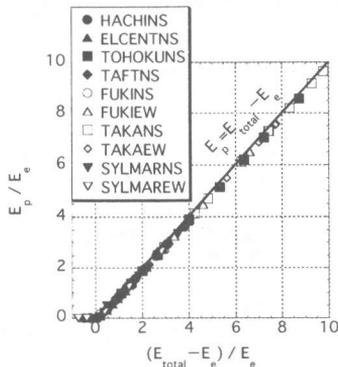
$$V_p = \sqrt{\frac{2E_p}{M}} \quad (9)$$

$M$ : 建物の全質量

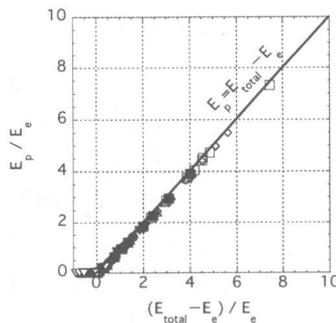
## 5. 解析結果

### 5.1 質点数 $n$ と $V_{total}$ の関係

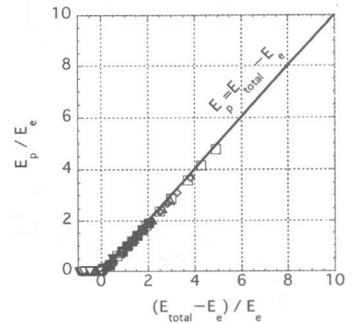
図-4に、質点数 $n$ と各地震波の原波を入力し



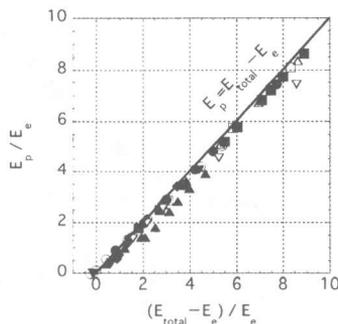
(a) 強度比1倍モデル  $C_0=0.2$



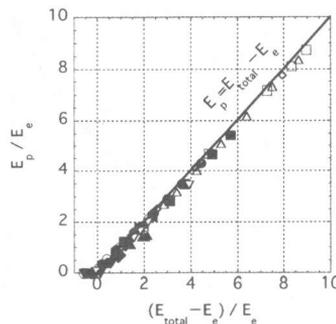
(b) 強度比1倍モデル  $C_0=0.3$



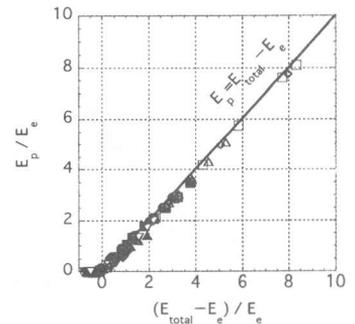
(c) 強度比1倍モデル  $C_0=0.4$



(d) 強度比2倍モデル  $C_0=0.2$



(e) 強度比2倍モデル  $C_0=0.3$



(f) 強度比2倍モデル  $C_0=0.4$

図-5  $(E_{total} - E_e)$ と $E_p$ の関係

たときの $V_{total}$ の関係を示す。図-4において、 $V_{total}$ は強度比、 $C_0$ や質点数によらずほぼ一定の値を推移している。すなわち、 $V_{total}$ は地震波によって決まる固有の値であるといえる。 $V_{total}$ を地震波の破壊力を表す尺度とみなせば、式(8)より建物に入力されるエネルギーが推定できる。

### 5.2 塑性エネルギー $E_p$ の推定

本節および次節では、地震波の最大加速度を200galから600galまで50gal刻みで変化させて解析した。また、解析は、10質点についてのみ行った。式(5) (6)より算出される $(E_{total} - E_e)$ と応答解析から式(7)により算出される $E_p$ は以下の関係にあると予測される。

$$E_p \approx E_{total} - E_e \quad (10)$$

式(10)の両辺をそれぞれ $E_e$ で除して基準化して図-5に示す。図-5より、強度比1倍モデル、強度比2倍モデルとも式(10)の予測は妥当といえる。

### 5.3 1階への塑性変形の集中

1階への塑性変形の集中は、式(9)により求め

られた  $V_p$  と1階の最大応答塑性率  $\mu_1$  の関係により検証する。図-6は10質点の  $V_p$  と  $\mu_1$  の関係である。図-6(a)-(f)はそれぞれ強度比1倍モデルおよび強度比2倍モデルの結果である。塑性エネルギー  $E_p$  が1階に集中すると想定すると、

$$\mu_1 = \frac{E_p}{Q_{v1} \cdot \delta_y} + 1 \quad (11)$$

となる。これを図中の実線で表す。塑性エネルギー  $E_p$  が各階に均等に分配されると想定すると、

$$\mu_1 = \frac{E_p}{n \cdot Q_{v1} \cdot \delta_y} + 1 \quad (12)$$

となる。これを図中の破線で表す。

図-6(a)-(c)の強度比1倍モデルにおいて  $\mu_1$  は、式(11)の実線よりは、式(12)の破線に近い値を取っている。すなわち、強度比1倍モデルの塑性エネルギー  $E_p$  は平均的に各階に分配される傾

向にある。また、図-6(d)-(f)の強度比2倍モデルにおいて、 $\mu_1$  は式(11)の実線にほとんど一致する。つまり、強度比が大きくなれば、弱点階である1階に塑性エネルギー  $E_p$  が集中する。

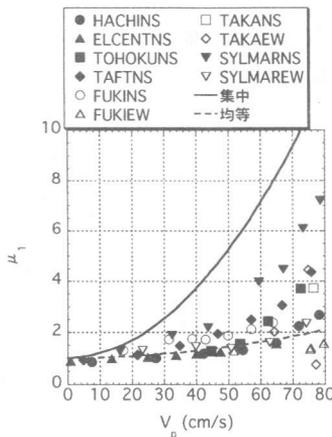
#### 5.4 集中係数

図-7は、図-6を模式的に表したものである。図中の点Bは解析値である。弱点階への塑性変形の集中を考慮するため、集中係数  $\phi_j$  を図-7におけるACに対するBCの割合で定義する。これを式で表すと次式のようにになる。

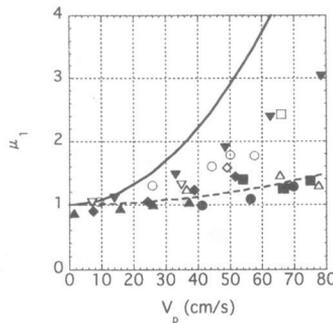
$$\phi_j = \frac{BC}{AC} = \frac{1}{n-1} \left\{ n \cdot \frac{Q_{vj} \cdot \delta_y}{E_p} (\mu_j - 1) - 1 \right\} \quad (13)$$

$j$ : 弱点階

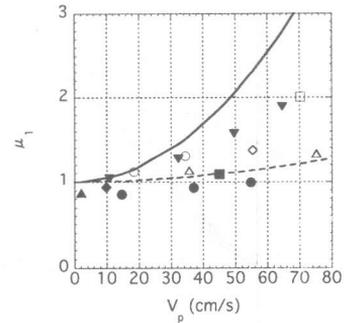
図-8は地震波の最大加速度を500galで入力したときの、1階の集中係数  $\phi_1$  と2階以上の  $t_i$  の関係である。なお、この解析は、10質点のみについて行った。図-8より、塑性変形は  $t_i=1.2$  倍辺りから1階に集中し始め、 $t_i=1.35$  倍辺りでほぼ集中するといえる。 $\phi_j$  の平均値は次式で近似できる。



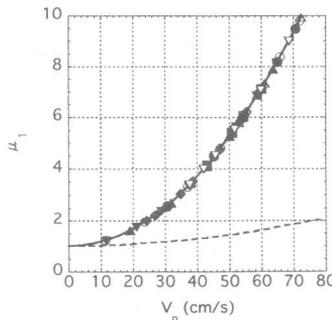
(a) 強度比1倍モデル  $C_0=0.2$



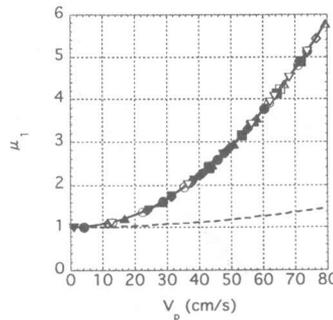
(b) 強度比1倍モデル  $C_0=0.3$



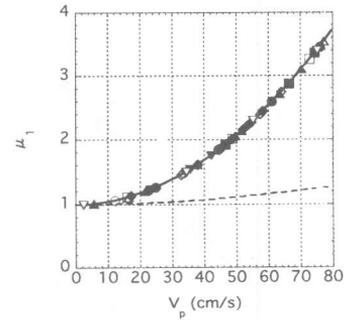
(c) 強度比1倍モデル  $C_0=0.4$



(d) 強度比2倍モデル  $C_0=0.2$



(e) 強度比2倍モデル  $C_0=0.3$



(f) 強度比2倍モデル  $C_0=0.4$

図-6  $V_p$  と最大応答塑性率  $\mu_1$  の関係

$$\phi_j = 4(t_i - 1) \quad (\phi_j < 1) \quad (14)$$

また、 $t_i=1$ における $\phi_j$ の標準偏差を考慮すると、5%上限・下限値は次式で近似できる。

$$\phi_j = 4(t_i - 1) \pm \frac{1}{4} \left( 1.4 - \frac{j}{n} \right)^2 \quad (\phi_j < 1) \quad (15)$$

図-8の実線は、式(14)により近似した $\phi_j$ の平均値であり、破線は式(15)により近似した $\phi_j$ の上限・下限値である。

### 5.5 本研究の予測値と解析値との対応

本研究における応答変位予測は地震波固有の $V_{total}$ と建物の性質から式(6) (8) (10) (14) (15)および、式(13)より求められる次式

$$\mu_j = \frac{1 + \phi_j(n-1)}{n} \cdot \frac{E_p}{Q_{vj} \cdot \delta_y} + 1 \quad (16)$$

により、図-9に示す流れで行う。図-10は本研究の予測値と解析値との対応である。なお、解析は10質点のみ行った。解析値とは、各地震波の原波を入力した時の最大応答塑性率である。予測値とは、図-9により予測した最大応答塑性

率である。図-10(a)-(c)は平均値の予測で式(14)による $\phi_j$ を用い、図-10(d)-(f)は上限値の予測で式(15)による $\phi_j$ を用いた。 $V_{total}$ は、図-10(a)-(c)においては図-4に示したすべてのデータの平均値を採用し、図-10(d)-(f)においてはその最大値を採用した。なお、一部のモデル・地震波において $E_e > E_{total}$ となり、式(9)による $E_p$ が負になる状況が生じたため、その場合については次式によって求めた $\mu_j$ を予測値とした。

$$\mu_j = \sqrt{\frac{E_{total}}{E_e}} \quad (E_e > E_{total}) \quad (17)$$

図-10(a) (d)は強度比1倍モデルの1階、図-10(b) (e)は強度比1倍モデルの5階、図-10(c) (f)は強度比2倍モデルの1階の結果である。図-10より、予測値と解析値との対応は、ややばらつきはあるが、有効である。よって本研究によりピロティ階の応答変位予測は可能である。

## 6. 結論

- (1) 建物に入力されるエネルギー $E_{total}$ は地震波固有の $V_{total}$ と建物の全質量で決まる。塑性エネルギー $E_p$ は $(E_{total} - E_e)$ とほぼ一致する。
- (2) 強度比1倍モデル、すなわち $A_i$ 分布に従う場合、平均的には塑性エネルギー $E_p$ は各階に均等に分配される。強度比が大きくなると、塑性エネルギー $E_p$ は弱点階に集中する。
- (3) 弱点階の塑性率は、図-9の流れで予測できる。
- (4) 本論では2階以上の $t_i$ を一定としたが、各階

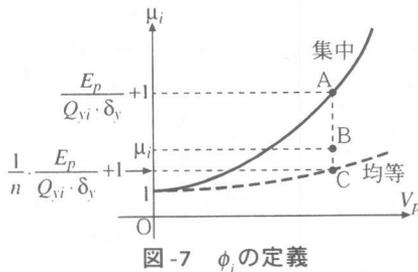


図-7  $\phi_j$ の定義

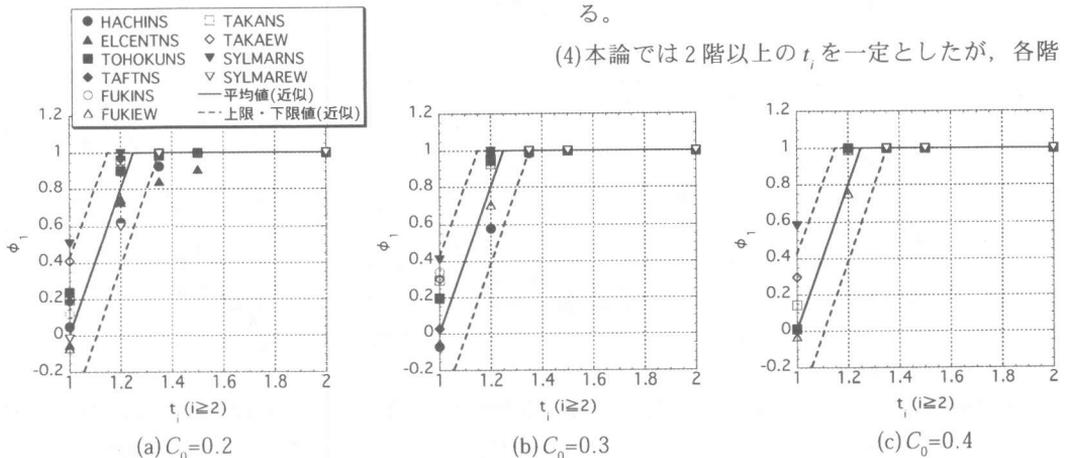


図-8 1階の集中係数 $\phi_1$ と2階以上の $t_i$ の関係

の $t_i$ の値が異なる場合、弱点階の次に弱い階の $t_i$ を用いて応答予測が可能かどうかは今後の課題である。

参考文献

- 1) 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，pp3-23，1995
- 2) 秋山 宏：建築物の耐震極限設計，第2版，東京大学出版会，1987
- 3) 桑村 仁，田村勝紀：地震による構造物のモーダル損傷-損傷分布則の一般化-，日本建築学会構造系論文集，第507号，pp79-86，1998.5
- 4) 馬 華，文 雪峰，鈴木計夫，大野義照：下層部にソフトストーリーを有するRC造建物の簡易地震応答予測について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20，No. 3，1998
- 5) (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

- 6) 中村 豊，上半文昭，井上英司：1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II)，JR地震情報 No.23d，財団法人鉄道総合技術研究所ユレダス開発推進部，1996.3

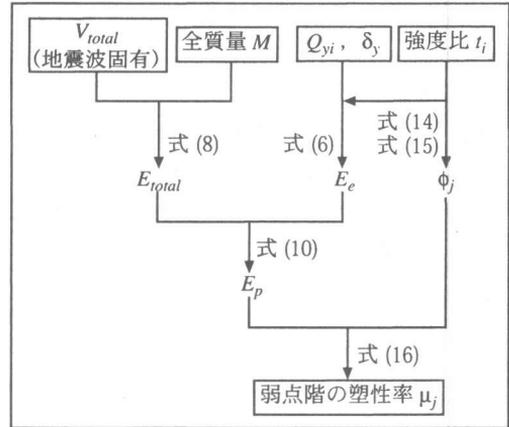


図-9 本研究における応答変位予測の流れ

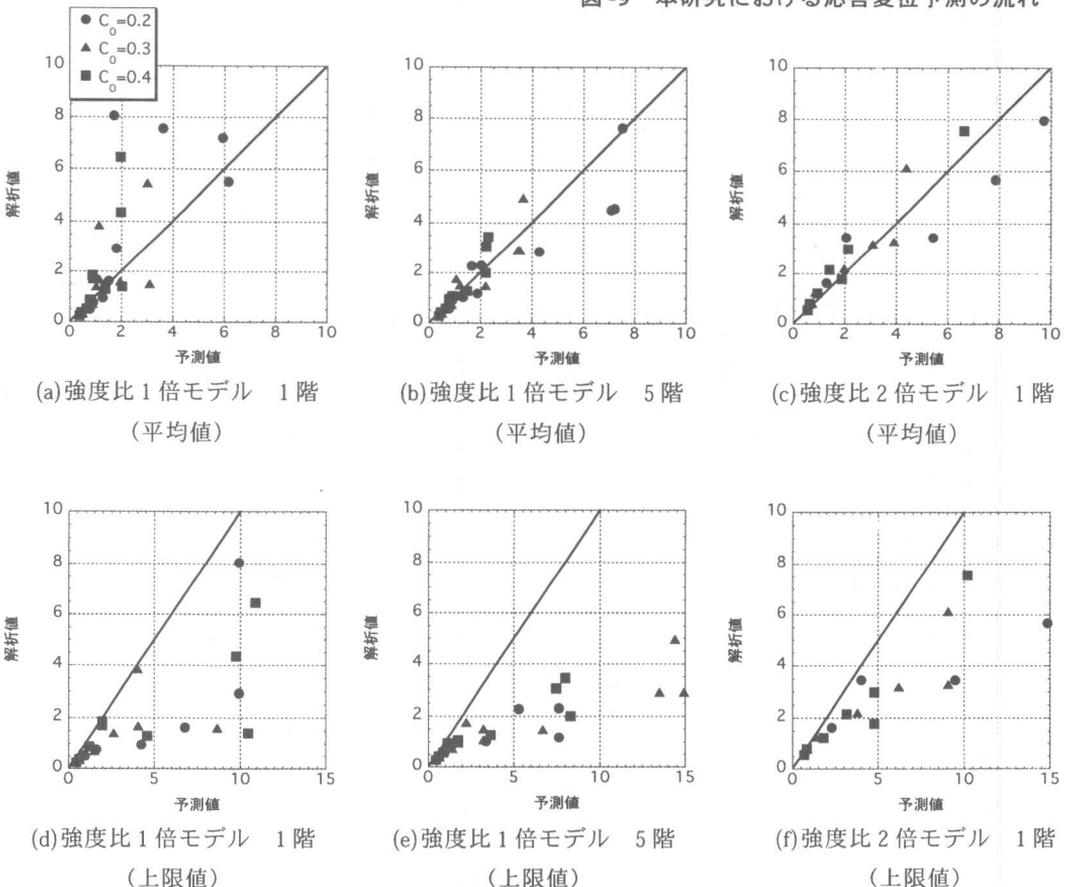


図-10 本研究の予測値と解析値の対応