

# BEMを使用した国府津・松田断層による地震動のシミュレーション

塩見和利<sup>1)</sup>・佐々木浩人<sup>1)</sup>・本城稔洋<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>富士通エフ・アイ・ピー (株) 科学技術システム部 (〒135-8686 東京都江東区青海2-45 タイム24)

本論文では、3次元BEMのモデル化、解析データの作成、解析の実行、結果の表示を統合的に行うシステムを使用し、国府津-松田断層による地震をシミュレーションした結果を報告する。特に強い地震のゆれを生じる地域は、断層面を地上に投影した部分に発生した。

**Key Words :** BEM, fault, simulation, Kouzu, Matuda

## 1. はじめに

阪神大震災における土木構造物の被害は甚大であった。地震被害の調査の結果、地震災害の集中する「震災の帯」<sup>1)</sup>の存在が指摘された。片岡<sup>2)</sup>は、兵庫県南部地震の断層メカニズムの逆解析結果を用い、BEMによるシミュレーションにより「震災の帯」が発生することを示した。

本論文では、片岡らの開発したプログラムを使用し、国府津-松田断層による地震動をシミュレーションした。

まず、解析理論<sup>3)</sup>、地盤のモデル化、断層のモデル化、数値計算上の設定、データの作成方法<sup>4)</sup>について説明する。

最後に地震動の時刻歴波形、地表面上の水平成分地震動の伝播を示し、断層面を地上に投影した部分に地震動の大きな地域が発生したことを報告する。

## 2. 解析理論

BEMの定式化<sup>3)</sup>を、 $x_1-x_2-x_3$ の直交座標系で表現すると次のようになる。

$$c_{ij}(x)u_{ij}(x) + \oint_{\Gamma_A} T_{ij}(x, x_0)u_j(x_0)d\Gamma(x_0) - \int_{\Gamma_A} U_{ij}(x, x_0)t_j(x_0)d\Gamma(x_0) = 0 \quad (1)$$

$u_i$ と $t_i$ は変位とトラクションの $x_i$ 成分、 $\Gamma_A$ は層Aの境界、 $U_{ij}$ は基本解、 $T_{ij}$ は基本解のトラクションである。 $x_0$ は作用点、 $x$ は領域上の点を表

す。 $c_{ij}$ は $x$ 点の境界の形状によって決まるfree-termと呼ばれる項である。最初の積分はCauchyの主値の意味での積分である。

領域内に入射波が存在する場合は、その影響を表す $\bar{\Psi}_i(x)$ の項を考慮する。

$$c_{ij}(x)u_{ij}(x) + \oint_{\Gamma_B} T_{ij}(x, x_0)u_j(x_0)d\Gamma(x_0) - \int_{\Gamma_B} U_{ij}(x, x_0)t_j(x_0)d\Gamma(x_0) = \bar{\Psi}_i(x_0) \quad (2)$$

$\Gamma_B$ は領域Bの境界である。

$\bar{\Psi}_i(x)$ は、 $x_0$ 位置の断層の食い違い量 $d_j$ によ

って発生する入射波を表し、断層面上の積分式として表現できる。ここに、 $d$ の添字 $j$ は直交座標系による食い違いの発生する方向を表す。

$$\bar{\Psi}_i(x) = \int T_{ij}(x, x_0)d_j(x_0)d\Gamma(x_0) \quad (3)$$

Brebbiaら<sup>5)</sup>による離散化表示を使用し

(1)~(3)式を離散化する。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_A \mathbf{u}_A - \mathbf{G}_A \mathbf{t}_A &= 0 \\ \mathbf{H}_A \mathbf{u}_B - \mathbf{G}_B \mathbf{t}_B &= \bar{\mathbf{Y}} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに $\mathbf{u}$ は変位のベクトル表示、 $\mathbf{t}$ はトラクションのベクトル表示、 $\bar{\mathbf{Y}}$ は入射波 $\bar{\Psi}_i$ のベクトル表示である。 $\bar{\mathbf{Y}}$ の積分は、断層を小領域に分割し、小領域内で食い違い量一定として計算する。

領域AとBの間の境界面上において、変位の連続条件とトラクションの釣り合い条件から式(5)

が成り立つ。

$$\mathbf{u}_A = \mathbf{u}_B \quad (5)$$

$$\mathbf{t}_A + \mathbf{t}_B = \mathbf{0}.$$

式(4)、(5)を使用して応答を計算する。

### 3. 解析条件

#### 3. 1 地盤のモデル化

関東及び相模湾の地層構造の調査は精力的に行われている。瀬尾<sup>6)</sup>の報告を参考に、地盤を上層と下層の2層にモデル化し、地表面側の地層の厚さを0.2~2.6kmとした。地盤材料の値を表3-1に、解析領域と断層を図3-1に示す。

表3-1 地盤材料

| 地層 | 質量  | V <sub>p</sub><br>(km/sec) | V <sub>s</sub><br>(km/sec) |
|----|-----|----------------------------|----------------------------|
| 上層 | 2.8 | 2.8                        | 1.5                        |
| 下層 | 2.5 | 4.8                        | 2.5                        |

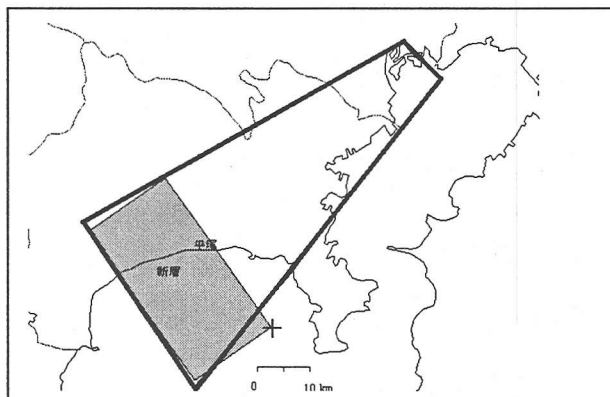


図3-1 解析領域(太線の領域)

#### 3. 2 断層のモデル化

神縄-国府津-松田断層のモデル化に際し、松田<sup>7)</sup>に従って、大磯丘陵側が隆起する縦ずれの断層(断層長さ50km、Mは7.66)とし、神縄-国府津部分を省略し35km(陸域10km、海域25km)の部分をモデル化した。また、断層のずれ量Dと立ち上がり時間τの経験式として式(6)、(7)を使用した。

$$\log D = 0.6M - 4 \quad (\text{cm}) \quad (6)$$

$$\tau = \frac{10^{0.5M-1.4}}{80} \quad (\text{sec})^8) \quad (7)$$

破壊伝播速度V<sub>r</sub>は、V<sub>r</sub>=0.8V<sub>s</sub>とした。

図3-1の+点が破壊開始位置に対応する。破壊は、+点を中心に放射状に伝播することとした。

表3-2に、断層パラメータを示す。

表3-2 断層パラメータ

| パラメータ  | 値               | パラメータ   | 値     |
|--------|-----------------|---------|-------|
| 断層長    | 35km            | 傾斜角     | 45度   |
| 断層幅    | 25km            | 食い違い量   | 3.94m |
| 走行     | 325度            | 立ち上がり時間 | 3.36秒 |
| 破壊伝播速度 | 2.0<br>(km/sec) | 断層の分割数  | 50×50 |

#### 3. 3 数値計算上の設定

周期が10秒程度の地震動の伝播を計算できるように、解析対象の振動数を0Hzから0.5Hzとした。メッシュ間隔は2.0km程度とした。

#### 4. 解析モデルの作成

3次元メッシュによるモデルの作成手順を以下に示す。<sup>4)</sup>

- ①図3-1の太線に対応する線分を定義
- ②線分上を解析精度に合わせ分割
- ③線分上と線分に囲まれた内部に対して、深さの既知な点を定義
- ④深さを考慮し、指定したメッシュ間隔でメッシュを自動生成

ここで①~③はCAD操作と画面からの数値入力を行い、即座に形状を画面に表示することにより、入力ミスを防ぐ。

作成した面を組み合わせで地層を定義し地層材料定数を定義する。断層パラメータを設定し断層を地層と同一画面に表示しデータを確認する。さらに、計算する周波数範囲等の数値計算上の設定を画面上から設定する。

以上の操作により図4-1に示す解析モデルを作成した。

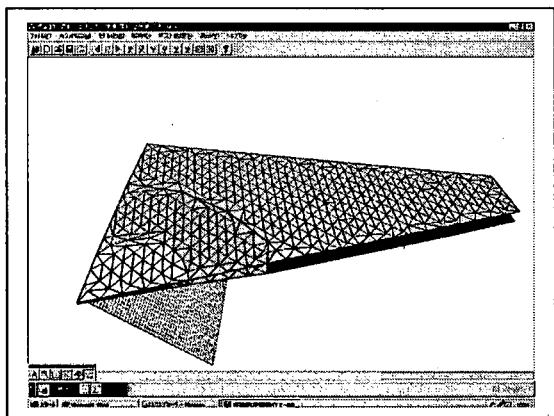


図 4—1 解析モデルと断層

## 5. 解析結果

図 5—1 は断層面の上にある平塚（図 3—1 参照）における地震動の速度波形である。UD成分の速度の大きさは、EW成分およびNS成分に比べて大きくなった。（解析最大振動数は0.5Hz）

図 5—2～図 5—6 は地震動の水平成分の速度をベクトル表示した図である。速度ベクトル分布図に示されている時間は、断層の破壊の開始時間からの経過時間である。断層の破壊領域が、海側の最深部+点（図 3—1）を中心に放射状に広がるに従い、破壊領域に断層のずれが発生する。つまり、破壊の伝播は海側から陸側に進行し、地震動の強い部分（矢印の長い部分）も海側から陸側に伝播する。図 5—2～図 5—6 は、海側から陸側に伝播する地震動に対応している。地震動の速度の大きな部分は、四角形で囲まれた断層面を地表面に投影した部分に対応している。

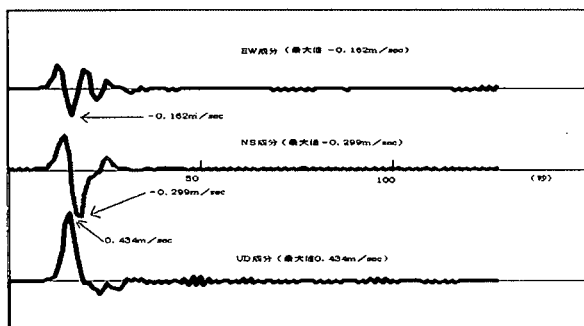


図 5—1 速度応答波形（平塚）

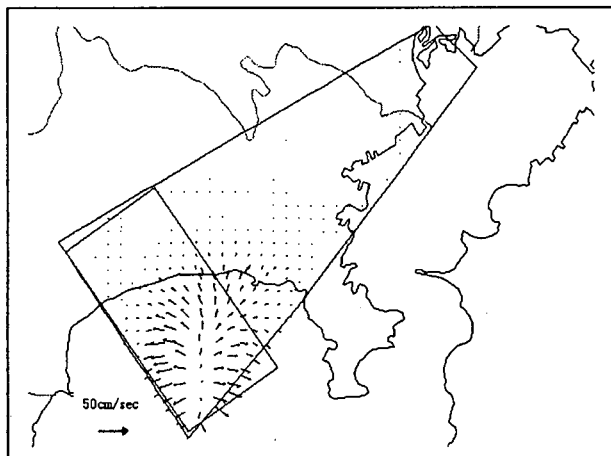


図 5—2 速度ベクトル分布図（1.1 sec）

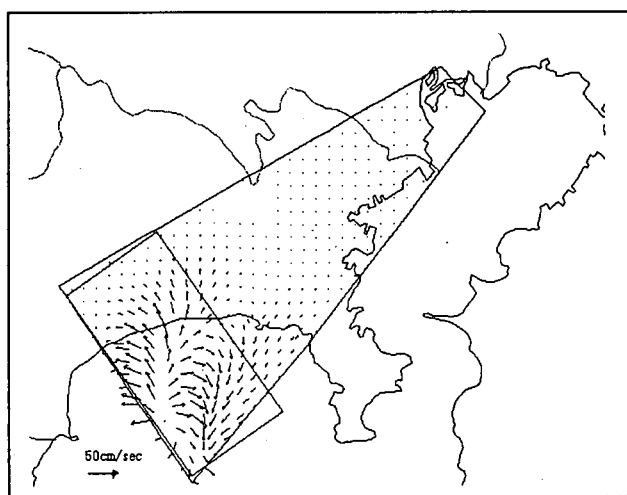


図 5—3 速度ベクトル分布図（1.4 sec）

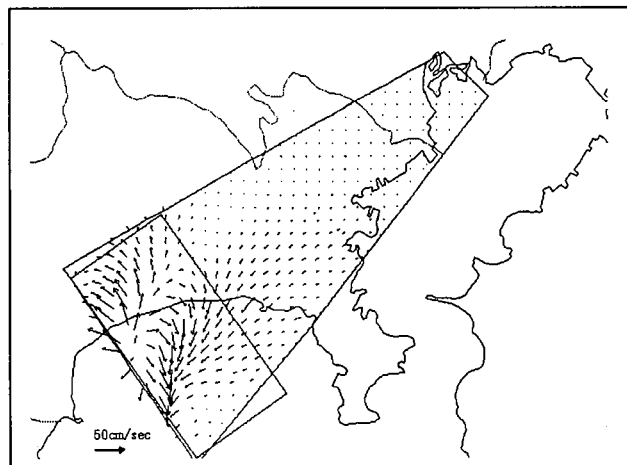


図 5—4 速度ベクトル分布図（1.7 sec）

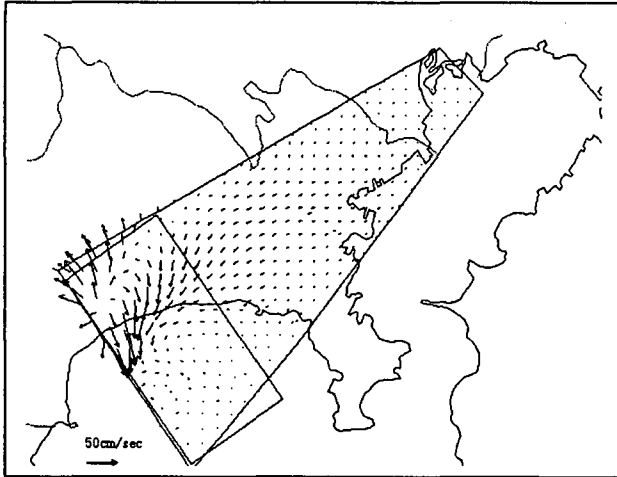


図 5-5 速度ベクトル分布図 (20 sec)

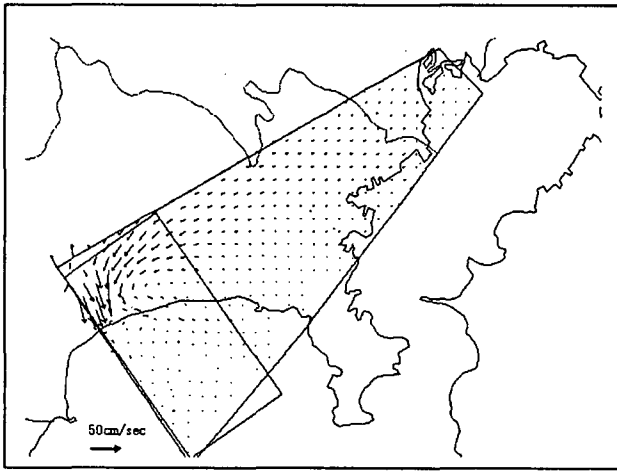


図 5-6 速度ベクトル分布図 (23 sec)

## 6. 結論

3次元BEMのモデル化、解析データの作成、解析の実行、結果の表示を統合的に行うシステムを使用することにより、比較的簡単に理論的地震動の計算を行うことができた。

長周期成分 (0 Hz ~ 0.5 Hz) について計算した本解析の場合、断層面を地表面に投影した部分に含まれる平塚において、UD成分の速度の大きさは、EW成分およびNS成分にくらべて大きい。

地震動の水平動伝播の様子をベクトル表示することで、地震動の強い部分が破壊伝播とともに移動することを示した。また、断層面を地表面に投影した部分の地震動は他の部分に比べ大きくなっ

た。

謝辞：

最後に、本解析を行うにあたり、東京工業大学 大学院総合理工学研究科 大町達夫教授、翠川三郎教授、年縄巧助教授から多大なるご指導、ご支援を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献：

- 1) 嶋本利彦：『震災の帯』の不思議、科学、Vol. 65, pp. 195-198, 1995
- 2) 片岡正次郎：三次元境界要素法による 1995 年兵庫県南部地震のシミュレーション、東京工業大学土木工学科研究報告、No. 54, pp. 11-20, 1996
- 3) 片岡正次郎、大町達夫：震源近傍の不整形地盤における地震動の三次元シミュレーション、土木学会論文集、No556/I-38, 139-149, 1997
- 4) 塩見、佐々木、本城：断層を考慮した地震動計算のための3次元データ作成システム、第23回土木情報システムシンポジウム講演集 pp79-80, 1998
- 5) Brebbia, C. A., J. C. Tells and L. C. Wrobel 1984. Boundary Element Techniques-Theory and Applications in Engineering. Berlin: Springer-Verlag.
- 6) 瀬尾和大：東京から小田原に至る地域の地下構造について、月間 地球/Vol. 7 No. 8, 452-456, 1985
- 7) 松田時彦：「要注意断層」の再検討。活断層研究, 14, pp. 1-8, 1996
- 8) 佐藤良輔、阿部勝征、岡田義光、島崎邦彦、鈴木保典：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック、鹿島出版会、82-90, 1997