

### 3次元直接境界要素法による震源断層—不整形地盤系の応答解析と 震源断層近傍地震動の渦現象

原田 隆典<sup>1</sup>・黒田 拓氏<sup>2</sup>・大角 恒雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 日本建設コンサルタント株式会社 (〒141-0022 東京都品川区東五反田5-2-4)

<sup>3</sup>正会員 博士(工) 日本工営株式会社中央研究所 (〒330-1259 茨城県稲敷郡基崎町稻荷原2304)

運動学的断層モデルを用いた震源断層—不整形地盤系が厳密に積分方程式系として定式化できることを示し、3次元境界要素法による解析を行った。数値計算例から、横ずれ断層と溺れ谷地形を有する洪積堆積層の幾何学的な位置関係によって地表地震動の最大値分布が変わる様子を示すと共に、震源断層近傍では、地震波は台風の雲の動きのように渦を巻きながら伝播し地表地震動の時空間分布特性が極めて複雑であることを示した。

*KeyWords* : seismic ground motions, kinematic source model, boundary element method, seismic waves, vortex

#### 1. まえがき

本研究では、運動学的断層モデルを用いた震源断層—不整形地盤系が厳密に積分方程式系として定式化でき、これらが3次元境界要素法によって離散化され解析できるという数理工学的エレガント性に趣をおき、3次元境界要素法による震源断層—不整形地盤系の解析法を示す。数値計算例によって、横ずれ断層と溺れ谷地形を有する洪積堆積層の幾何学的な位置関係によって地表における地震動の最大値分布が変わる様子を示すと共に、震源断層近傍では、地震波は台風の雲の動きのように渦を巻きながら伝播し地表地震動の時空間分布特性が極めて複雑であることを明らかにした。

#### 2. 震源断層—不整形地盤系の積分方程式表示

本章では、定式化とその記号を簡単化するため、図-1のような震源断層を含む2層から成る不整形3次元地盤を対象として、振動数領域における積分方程式系を示す。図-1のように境界面の単位鉛直ベクトル  $n$  を定義し、波動方程式の積分方程式表示における外部問題の定式化を用いると<sup>1)</sup>、震源断層を含む弾性体  $V_0$  においては、次式が成立する。

$$\int_{\Gamma_0+\Gamma_{01}} [H_{mk}^0(x|\xi, n, \omega) u_m(\xi, \omega) - G_{mk}^0(x|\xi, \omega) \times T_m(\xi, n, \omega)] d\Gamma(\xi) + u_k^{(in)}(x, \omega) = c(x) u_k(x, \omega) \quad (1)$$

ここに、 $x, \xi$  はそれぞれ観測点と荷重点を表し、両者は境界  $(\Gamma_0 + \Gamma_{01})$  上にあるものとする。滑らかな境界の

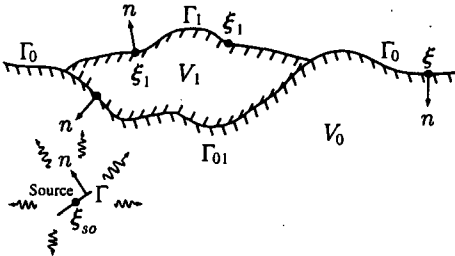


図-1 震源断層—不整形地盤系とその記号

場合、 $c(x) = 1/2$  である。また、 $u_m(\xi, \omega)$  と  $T_m(\xi, n, \omega)$  は  $m$  座標軸方向の変位と表面応力をそれぞれ表す。 $H_{mk}^0(x|\xi, n, \omega)$  と  $G_{mk}^0(x|\xi, \omega)$  は、無限領域の弾性体において荷重点  $\xi$  の  $k$  軸方向に単位荷重が作用したときの観測点  $x$  における  $m$  軸方向の表面応力と変位を意味し、表面応力グリーン関数と変位グリーン関数と呼ばれる。これら関数の上添字 0 は、これらの関数が弾性体  $V_0$  において求められる物理量であることを示す。

式(1)の  $u_k^{(in)}(x, \omega)$  は、震源断層が無限領域の弾性体中に存在するとして求められる観測点  $x$  における地震波の  $k$  軸方向変位を表す。震源断層面において表面応力は連続で、変位が不連続（食い違い）であるとすると、この場合も外部問題と内部問題の定式化を用いると、次式のように求められる<sup>2)</sup>。

$$u_k^{(in)}(x, \omega) = \int_{\Gamma} m_{ij}(\xi_{so}, n, \omega) \frac{\partial G_{ki}(\xi_{so}|x, \omega)}{\partial \xi_{soj}} d\Gamma(\xi_{so}) \quad (2)$$

ここに、 $\xi_{so}$  は震源断層上の位置を、 $m_{ij}(\xi_{so}, n, \omega)$  は地震モーメントテンソルを意味する。上式は運動学的断層モデルによる観測点  $x$  における地震波変位を与え

□ u : This study    - - u : Sanchez-Sesma (1989)  
 △ v : This study    — v : Sanchez-Sesma (1989)  
 ○ w : This study    - · - w : Sanchez-Sesma (1989)

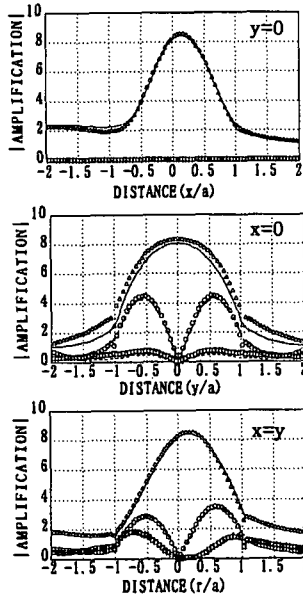


図-2 既往の研究結果<sup>13)</sup>との比較 ( $\eta=0.5$ )

る基礎式であり、直交座標系における振動数一波数領域の解析解は文献<sup>3),4)</sup>に記載されている。

最後に堆積層に相当する弾性体  $V_1$  においては、内部問題の定式化を用いて次の積分方程式が成立する。

$$\int_{\Gamma_1 + \Gamma_{01}} [G_{mk}^1(x|\xi_1, \omega) T_m(\xi_1, n, \omega) - H_{mk}^1(x|\xi_1, n, \omega) \times u_m(\xi_1, \omega)] d\Gamma(\xi_1) = c(x) u_k(x, \omega) \quad (3)$$

ここに  $x$  と  $\xi_1$  は境界 ( $\Gamma_1 + \Gamma_{01}$ ) 上の位置を表す。

以上のように図-1に示すような震源断層—不整形地盤系における地震波問題は、積分方程式によって厳密に表すことができる。これらの式(1)と式(3)の積分方程式の境界条件を考慮し、境界要素法によって離散化すると、境界上の未知変位と未知応力を求めることができる。積分方程式では、無限領域への波動伝播は解析的に考慮されており、さらにこれら積分方程式を離散化して解くための境界要素法の研究も完成していること<sup>1)</sup>を考え合わせると、震源断層—不整形地盤系の数値計算に境界要素法を用いることは数学的にエレガントな方法であることがわかる。

### 3. 研究で用いた境界要素法プログラムの検証

境界面を矩形または3角形の一定要素で離散化する境界要素法をここでは使った。プログラム検証のために、半球形の堆積層にSH波が入射される場合の応答倍率を計算した既往の研究結果<sup>5)</sup>と比較する。図-2はその比較を示しているが、既往のものとはよく一致している。

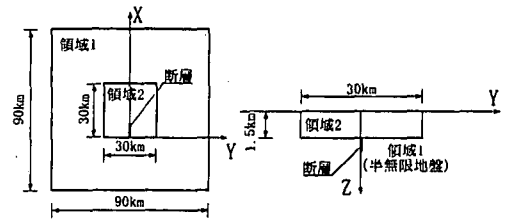


図-3a 解析で用いた横ずれ断層—矩形溺れ谷地盤モデル

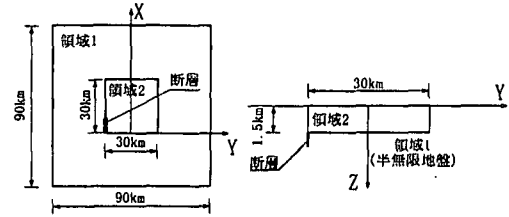


図-3b 解析で用いた横ずれ断層—矩形溺れ谷地盤モデル

表-1 解析で用いた矩形谷地盤モデルの物性値

|     | P波<br>速度<br>[m/sec] | S波<br>速度<br>[m/sec] | 密度<br>$\rho$<br>[t/m <sup>3</sup> ] | 減衰定数<br>D |
|-----|---------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------|
| 領域1 | 6000                | 3500                | 2.8                                 | 0.00125   |
| 領域2 | 2800                | 1600                | 2.3                                 | 0.00333   |

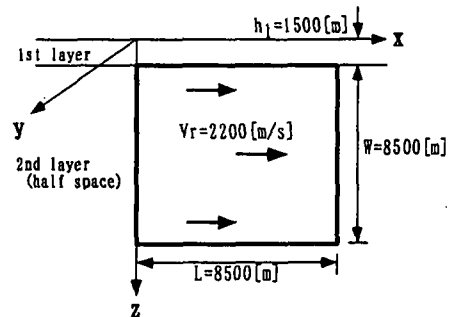


図-4 解析で用いた横ずれ断層モデル

## 4. 横ずれ断層—矩形の溺れ谷地盤の地表面地震動

### 4.1 横ずれ断層—矩形の溺れ谷地盤モデル

図-3a, bに示すように半無限地盤中に鉛直横ずれ断層があり、その上に矩形の溺れ谷地盤が存在するような震源断層—不整形地盤系モデルを想定する。鉛直横ずれ断層が溺れ谷地盤の下方中央に存在する場合(a)と下方左端に存在する場合(b)の2つのケースを解析し、横ずれ断層と溺れ谷地形を有する洪積堆積層の幾何学的な位置関係によって地表における地震動がどのように変化するかを調べた。モデル地盤の物性値は、表-1に示す。半無限地盤の方は、3km x 3km、矩形谷地盤の方は、1.5km x 1.5kmの正方形の一定要素で境界を分割した。要素の大きさと地盤物性値を考慮し、解析した地震動の振動数は2 rad/sまでを対象と

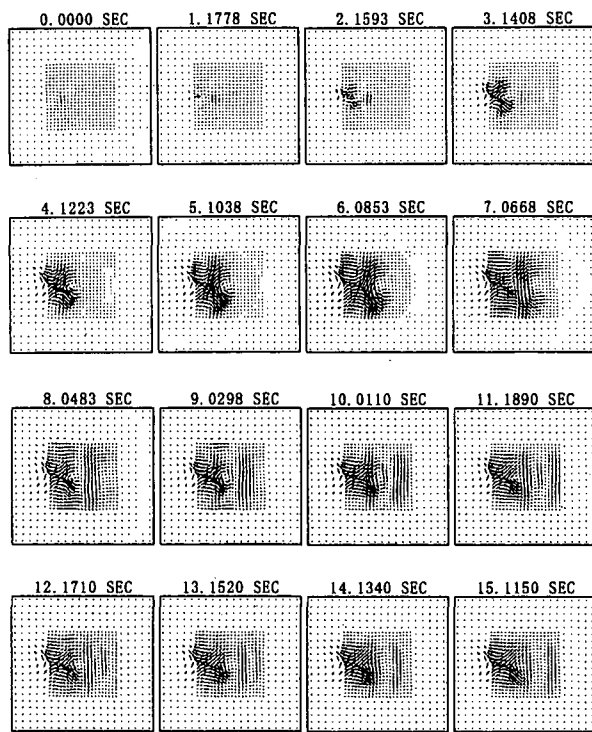


図-5a 矩形溺れ谷の中央下に横ずれ断層が存在する場合における地表面水平変位ベクトルの時間変化

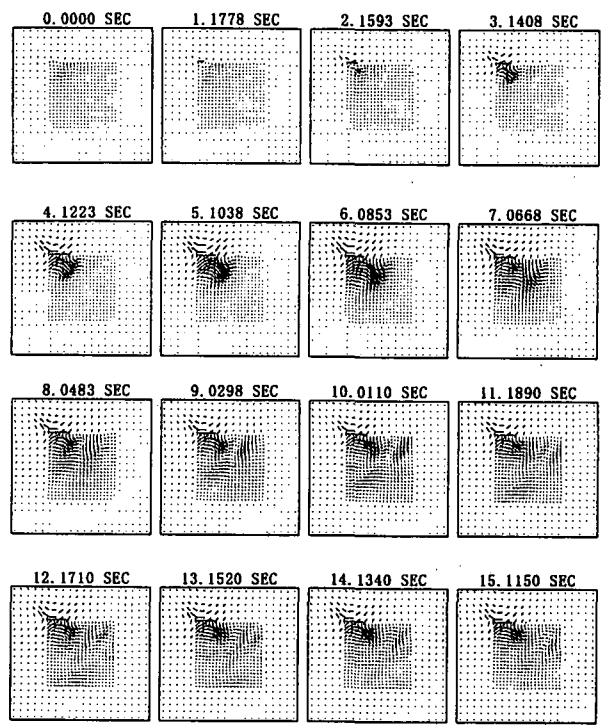


図-5b 矩形溺れ谷の左端下に横ずれ断層が存在する場合における地表面水平変位ベクトルの時間変化

している。

震源断層は、図-4に示すような8.5km×8.5kmの矩形断層で、震源メカニズムは断層の左端から一様に破壊が伝播する横ずれ断層とし、震源パラメータは論文<sup>3),4)</sup>のものを用了。

#### 4. 2 地表面における水平変位ベクトルの時空間特性

矩形の溺れ谷地盤を含む60km×60kmの地表面における地震動水平変位ベクトルが時間と場所によってどのように変わるかを調べた。その結果を図-5a, bに示す。これらの図は、時刻零から約15秒間における約1秒毎における地表面各点の水平変位の大きさと方向をベクトル表示したものである。断層の破壊開始時刻を零とし、この断層モデルでは約4秒 ( $3.8636=8.5/2.2$ ) で破壊が終了する。図-5aは、矩形溺れ谷の中央下に横ずれ断層が存在する場合 (図-3aのモデルに対応)、一方図-5bは、矩形溺れ谷の左端下に横ずれ断層が存在する場合 (図-3bのモデルに対応) の地表面水平変位ベクトルの時空間分布特性を示す。

図-5a, bを比較すると、震源断層と矩形溺れ谷地盤の位置によって地表面変位の時空間分布が異なっていることがわかる。一方、両者に共通する特性としては、いずれも左横ずれ断層による地表面の水平変位を反映しつつ、渦を巻きながら地表面が水平に動いている様子が観察される。時間が15秒程度で永久変位

に近い状態であるが、この永久変位に比べると、時刻4から7秒での水平変位は2倍程度大きく、また断層破壊終了付近前方の変位が大きい。これらの水平変位分布は時刻15秒あたりの永久変位分布とは明らかに異なっている。

同じような渦現象という震源断層近傍の特異な地震動は、水平成層地盤モデルにおいても観察されている<sup>4)</sup>。

#### 4. 3 地表面の速度波形特性

前節より、震源断層破壊終了付近の断層直交方向変位が最も大きくなるので、ここではその付近の4つの地点における直交方向の速度波形を見てみる。

図-6に速度波形を示す。横ずれ断層が矩形溺れ谷中央下 (ケース1) と左端下 (ケース2) に存在する場合の2つのケースに共通に、断層破壊終了時刻約4秒あたりで速度波形は最大値を示し、約16秒以降も揺れてはいるが振幅は小さくなっている。しかし最大速度が起こる場所は、ケース1では震源断層延長上で最も大きいのに対し、ケース2では震源断層延長上より少し溺れ谷方向へ入った場所での振幅が最も大きくなっており、2つのケースで異なっていることがわかる。震源断層近傍においても、震源断層を含む岩盤上の速度波形 (ケース2の上段の波形) の振幅は最も小さく継続時間も小さい。

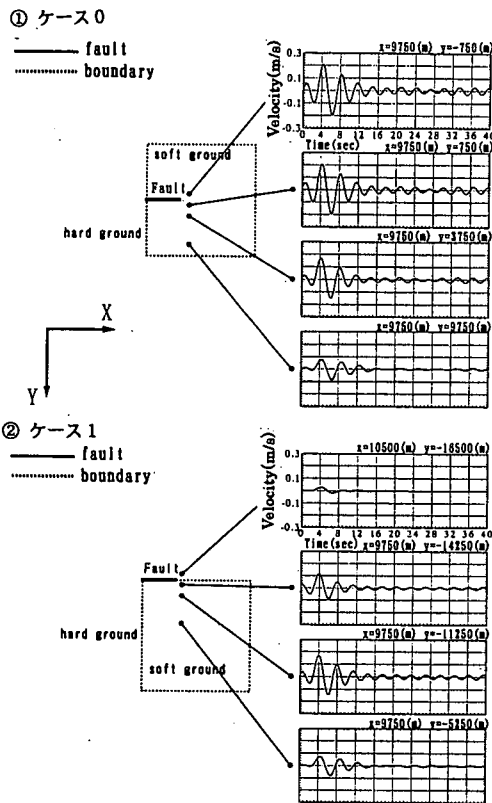


図-6 断層破壊終了付近の4地点における断層直交方向の速度波形の比較

#### 4. 4 断層直交方向の地表面最大速度の分布特性

図-7は、横ずれ断層が矩形溺れ谷中央下(ケース1)と左端下(ケース2)の他に、30km×30km四方の矩形溺れ谷の領域が無限に広がって水平な堆積層とみなされる場合(ケース0とし、これは水平成層地盤の剛性マトリックスを用いる方法<sup>3),4)</sup>によって計算した。)の3つの場合について、断層直交方向の最大速度分布を比較したものである。いずれも2rad/sまでの低振動数範囲の地震動を対象にしている。水平成層地盤の場合(ケース0)と矩形谷中央に震源断層が存在する場合(ケース1)の比較では、矩形谷の境界の影響が多少あるため、最大速度の分布特性は多少違っているものの、震源断層破壊終了付近前方に最大値が現れていることは共通している。しかし地殻部と溺れ谷部の境界に震源断層が存在するケース2では、震源断層破壊終了付近前方の溺れ谷側に最大値が現れているのが特徴的である。また震源断層近傍であっても、地殻の露頭部での振幅はかなり小さくなることがわかる。

このような現象は、1995年兵庫県南部地震の際の地震の帯のような特徴が再現されているようである。もちろん、本解析で用いた震源断層-地盤モデルは神戸の震源断層-地盤構造そのものではなく、また解析した振動数範囲は2rad/sと低振動数に限定され

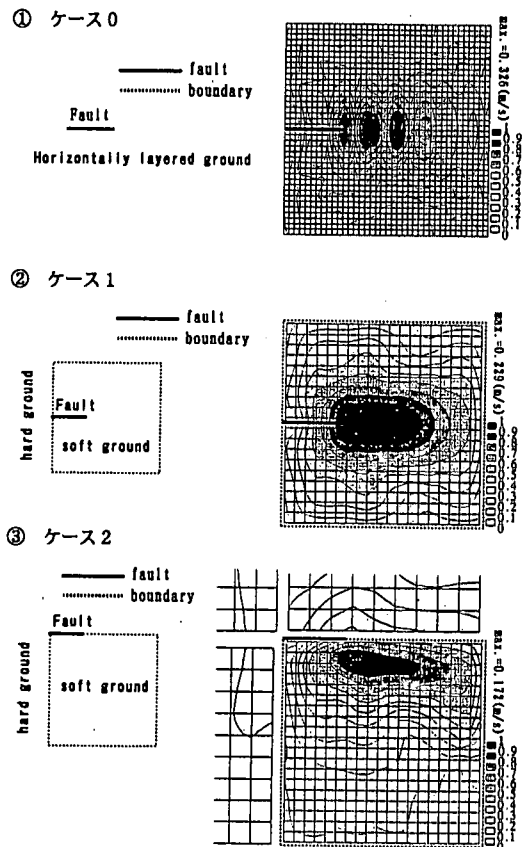


図-7 震源断層近傍の地表面における断層直交方向の最大速度分布の比較

ているためと思われるが、神戸に現れた地震の帯の幅は約2km程度であり、本解析で得られた約7.5kmと比べると幅が狭い。

#### 参考文献

- 1) 小林昭一(編著)(2000), 波動解析と境界要素法, 京都大学学術出版会.
- 2) Knopoff, L., and Gilbert, F., (1960), First motions from seismic sources, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 50, pp.117-134.
- 3) 原田隆典, 大角恒雄, 奥倉英世, (1999), 3次元直交座標系における波動場の解析解とその地震動波形成への応用, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.99-108.
- 4) 原田隆典, 山下肇, (2000), 剛性マトリックスに基づく地震動の波形合成法と震源断層近傍地震動の渦現象, 土木学会応用力学論文集, Vol. 3, pp.569-576.
- 5) Sanchez-Sesma, F.J. (1983), Diffraction of elastic waves by three-dimensional surface irregularities, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 73, pp.1621-1636.

(2001年5月25日 受付)