

# 境界要素法に部分解析法を用いた 震源断層 - 不整形地盤系の効率的地震動シミュレーション

原田隆典<sup>1</sup>・岡田洋輔<sup>2</sup>・王宏沢<sup>2</sup>・小林正樹<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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)

E-mail: harada@civil.miyazaki-u.ac.jp

<sup>2</sup>宮崎大学大学院学生, 工学研究科土木環境工学専攻 (〒889 - 2192宮崎市学園木花台西1 - 1)

本論文では, 境界要素法の弱点である計算機容量と計算速度の問題点を改良するために, 部分解析法を用いた境界要素法による震源断層 - 不整形地盤系の効率的地震動シミュレーション手法を提案した。本論文では, 手法の定式化とその検証を主な目的とするため, 震源断層 - 不整形地盤系を深部地盤と表層地盤系の2つの部分領域に分ける場合について記述した。さらに効率性に優れた近似部分解析法についても記述し, 数値計算例によって手法の検証と効率性を例示した。

**Key Words :** seismic ground motions, kinematic source model, boundary element method, seismic waves, subsystems method

## 1. まえがき

地表の地震動は, 震源断層で発生した地震波が地盤を伝播し, 地表まで到達した結果として現われる地盤の揺れである。したがって, 構造物の耐震設計や都市の地震防災対策で必要とされる強震動波形やその特性を評価する際には, このような震源断層破壊によって生じた地震波の伝播過程を考慮した数理モデルの開発が必要となる。

数理モデルに基づく地震動波形の合成法に関する研究は, 主に地震学分野で発展してきた。この広範な研究現状は, 他の論文<sup>1)</sup>に詳しく述べられているが, ここでは観測記録が皆無に等しくその特性があまりわかっていない震源断層近傍の地震動を震源断層 - 3次元不整形地盤系とした数理モデルによって模擬することに絞ると, 現状では差分法による研究<sup>2), 3), 4), 5)</sup>が主流になっているようである。しかし差分法では, 無限に広がる領域のモデル化ができないこと, 材料減衰の導入や数値計算精度の改良等にまだ問題が残されている。一方, 無限領域への波動伝播を解析的に考慮できる境界要素法は, 差分法や有限要素法に比べて計算機容量の面で弱点がある。境界要素法を用いた3次元波動問題に関するこれまでの研究では, 平面波入射による3次元不整形地盤の解析を扱ったものが主流で, 震源断層からの地震波を考慮した研究は少ない<sup>6), 7)</sup>。しかし震源断層近傍では, 振幅の違うあらゆる種類の波があらゆる方向から入射するため, 震源断層 - 不整形地盤系を一体

とした解析が不可欠となる。

境界要素法には, 例えば論文<sup>9)</sup>で整理しているように, 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, これらは境界要素法によって離散化され数値的に解析できるという数理的厳密性とエレガント性がある。

そこで本研究では解析法としては目新しいものではないが, これを震源断層近傍での構造物の耐震設計用入力地震動評価という工学問題に適用することを目的に, 境界要素法の弱点である計算機容量と計算速度の問題点を改良した, 「部分解析法を用いた境界要素法による震源断層 - 不整形地盤系の効率的地震動シミュレーション手法」を提案する。本論文では, 手法の定式化とその検証を主な目的とするため, 震源断層 - 不整形地盤系を深部地盤と表層地盤系の2つの部分領域に分ける場合について記述する。さらに効率性に優れた近似部分解析法についても記述する。また, 以下のような工学的なパラメータ感度解析に本論文で提案する部分解析法を用いれば, さらに有利となると思われる。すなわち, 震源断層 - 不整形地盤系において, (1) 深部地盤系よりも表層地盤の地形や物性値が変わると地表の地震動がどのように変わるかを調べる場合や, (2) 深部地盤系の震源特性が変わると地表の地震動がどのように変わるかを調べる場合, 一方に關係する領域のみの計算を他方のものと組み合わせると地表の地震動が計算できるので全体解析をするよりも計算速度の点

で有利となる。

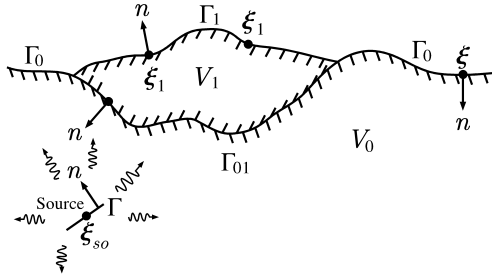


図 - 1 震源断層－不整形地盤系とその記号

## 2. 境界要素法による全体解析法

本章では、定式化とその記号を簡単化するため、図 - 1 に示す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<sup>9)</sup>を境界要素法によって離散化した次式から説明を始める。図 - 1 に示すように境界面の単位法線ベクトル  $\mathbf{n}$  を定義し、3 次元弾性波動方程式の積分方程式表示における外部問題を境界要素法に従って一定要素で離散化し、マトリックス表示すると次式が得られる<sup>8)</sup>。

領域  $V_0$  に対して：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11}^0 & \mathbf{H}_{12}^0 \\ \mathbf{H}_{21}^0 & \mathbf{H}_{22}^0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{U}_{01} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{11}^0 & \mathbf{G}_{12}^0 \\ \mathbf{G}_{21}^0 & \mathbf{G}_{22}^0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{T}_0 \\ \mathbf{T}_{01} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{u}_0^{(in)} \\ \mathbf{u}_{01}^{(in)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに、

- $\mathbf{U}_0, \mathbf{T}_0$  : 境界  $\Gamma_0$  上の変位と表面応力ベクトル
- $\mathbf{U}_{01}, \mathbf{T}_{01}$  : 境界  $\Gamma_{01}$  上の変位と表面応力ベクトル
- $\mathbf{H}_{ij}^0, \mathbf{G}_{ij}^0$  : 領域  $V_0$  の積分方程式を境界要素法に従って離散化して求められる表面応力 Green 関数と変位 Green 関数に関わる係数マトリックスの  $\mathbf{U}_0, \mathbf{U}_{01}$  および  $\mathbf{T}_0, \mathbf{T}_{01}$  に対応する成分
- $\mathbf{u}_0^{(in)}, \mathbf{u}_{01}^{(in)}$  : 境界  $\Gamma_0$  および境界  $\Gamma_{01}$  上の入射波成分

同様な記号の約束に従って領域  $V_1$  に対して次のような記号を用い、次式が得られる。

領域  $V_1$  に対して：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11}^1 & \mathbf{H}_{12}^1 \\ \mathbf{H}_{21}^1 & \mathbf{H}_{22}^1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_{01} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{11}^1 & \mathbf{G}_{12}^1 \\ \mathbf{G}_{21}^1 & \mathbf{G}_{22}^1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{T}_1 \\ -\mathbf{T}_{01} \end{pmatrix} \quad (2)$$

- $\mathbf{U}_1, \mathbf{T}_1$  : 境界  $\Gamma_1$  上の変位と表面応力ベクトル
- $\mathbf{H}_{ij}^1, \mathbf{G}_{ij}^1$  : 領域  $V_1$  の積分方程式を境界要素法に従って離散化して求められる表面応力 Green 関数と変位 Green 関数に関わる係数マトリックスの  $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_{01}$  および  $\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_{01}$  に対応する成分

| Output | $\mathbf{u}_1$                                    | Step 1 : $\mathbf{u}_{01}^{free}$                   | Step 2 : $\mathbf{K}_{01}$                      | Step 3 : $\mathbf{u}_1$                             |
|--------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| System |                                                   |                                                     |                                                 |                                                     |
| Input  | $\mathbf{u}^{(in)}$                               | $\mathbf{u}^{(in)}$                                 | $\mathbf{T}_{01}$                               | $\mathbf{K}_{01}, \mathbf{u}_{01}^{free}$           |
|        | (a) Free Field Response Analysis of Entire System | (b) Free Field Response Analysis of Subsystem $V_0$ | (c) Forced Response Analysis of Subsystem $V_0$ | (d) Free Field Response Analysis of Subsystem $V_1$ |

図 - 2 部分解析法の説明図

上式の右辺の  $-\mathbf{T}_{01}$  のマイナス記号は、境界  $\Gamma_{01}$  上の領域  $V_0$  側の表面応力を  $\mathbf{T}_{01}$  とすると、作用反作用の法則から領域  $V_1$  側の表面応力は大きさが同じで、その向きが逆方向であるためである。

ここで、未知数は、 $\mathbf{U}_0, \mathbf{U}_{01}, \mathbf{U}_1, \mathbf{T}_{01}$  であり、 $\mathbf{T}_0, \mathbf{T}_1$  は領域  $V_0, V_1$  の地表面応力で既知(零)であるので、未知数を左辺にまとめると、式(1)、(2)から次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11}^0 & \mathbf{H}_{12}^0 & -\mathbf{G}_{12}^0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_{21}^0 & \mathbf{H}_{22}^0 & -\mathbf{G}_{22}^0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}_{12}^1 & \mathbf{G}_{12}^1 & \mathbf{H}_{11}^1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}_{22}^1 & \mathbf{G}_{22}^1 & \mathbf{H}_{21}^1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{U}_0 \\ \mathbf{U}_{01} \\ \mathbf{T}_{01} \\ \mathbf{U}_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{11}^0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{G}_{21}^0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{G}_{11}^1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{G}_{21}^1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{T}_0 \\ \mathbf{T}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{u}_0^{(in)} \\ \mathbf{u}_{01}^{(in)} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (3)$$

上式の連立方程式を解いて未知数  $\mathbf{U}_0, \mathbf{U}_{01}, \mathbf{U}_1, \mathbf{T}_{01}$  が求められる。これが通常境界要素法を用いた全体解析の定式である。しかし、上式の全体解析法では、境界  $\Gamma_0$  上を離散化した要素数を  $N_0$ 、境界  $\Gamma_{01}$  上を離散化した要素数を  $N_{01}$ 、境界  $\Gamma_1$  上を離散化した要素数を  $N_1$  とすると、各要素に対して変位と表面応力はそれぞれ  $x-y-z$  軸方向の 3 成分を持つので、未知数の数は要素数の 3 倍になり、 $3(N_0 + 2N_{01} + N_1)$  元の連立方程式を解くことになる。

## 3. 境界要素法による部分解析法

図 - 2 (a) に示すような震源断層 - 不整形地盤系を図 - 2 (b), (c), (d) に示すように、

- (1) 入射波  $\mathbf{u}^{(in)}$  による自由表面を持つ地盤の入射波問題(自由地盤の入射波問題 図 - 2 (b))
  - (2) 入射波は存在しないが自由地盤上に外力(正確には表面応力)  $\mathbf{T}_{01}$  が作用する時の地盤の応答問題(自由地盤の外力応答問題 図 - 2 (c))
  - (3) 領域  $V_1$  の応答問題 図 - 2 (d),
- の 3 段階の応答問題に分けて計算する部分解析法の定式化を以下に説明する。

上記(1)の自由地盤の入射波問題では、式(1)にお

いて境界上の表面応力 $T_0$ 、 $T_{01}$ は零(自由表面上の応力は零)とおけるため、次式の連立方程式を解いて自由表面上の変位 $U_0^{free}$ 、 $U_{01}^{free}$ が求められる。

$$\begin{bmatrix} H_{11}^0 & H_{12}^0 \\ H_{21}^0 & H_{22}^0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_0^{free} \\ U_{01}^{free} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_0^{(in)} \\ u_{01}^{(in)} \end{pmatrix} \quad (4)$$

また、上記(2)の自由地盤の外力応答問題では、式(1)の入射波の項を零とおき、更に表面応力 $T_0$ も零となるので、境界 $\Gamma_{01}$ 上の表面応力 $T_{01}$ のみによる自由地表面の変位応答 $U_0^{force}$ 、 $U_{01}^{force}$ が、次式から求められる。

$$\begin{bmatrix} H_{11}^0 & H_{12}^0 \\ H_{21}^0 & H_{22}^0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_0^{force} \\ U_{01}^{force} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}^0 & G_{12}^0 \\ G_{21}^0 & G_{22}^0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ T_{01} \end{pmatrix} \quad (5)$$

上式(5)より、自由地表面の変位応答 $U_0^{force}$ を消去し、境界 $\Gamma_{01}$ 上の表面応力 $T_{01}$ と自由地表面の変位応答 $U_{01}^{force}$ の関係式を求めると、次式のように剛性マトリックス $K_{01}$ を用いて表現することができる。

$$T_{01} = K_{01} U_{01}^{force} \quad (6a)$$

ここに、

$$K_{01} = \left[ H_{21}^0 (H_{11}^0)^{-1} G_{12}^0 - G_{22}^0 \right] \times \begin{bmatrix} H_{21}^0 (H_{11}^0)^{-1} H_{12}^0 - H_{22}^0 \end{bmatrix} \quad (6b)$$

剛性マトリックス $K_{01}$ は、振動数によって変わる複素数であるため振動数依存の複素ばねと呼ぶことができる。

さて、上記(1)と(2)のように自由地盤の入射波問題と外力応答問題に分けることによって新しく定義された自由地表面の変位 $U_0^{free}$ 、 $U_{01}^{free}$ および $U_0^{force}$ 、 $U_{01}^{force}$ は、これらを足し合わせると、変位の適合条件から全体系の境界上の変位 $U_0$ 、 $U_{01}$ に等しくならなければならない。したがって、次式が成立する。

$$\begin{pmatrix} U_0 \\ U_{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_0^{free} + U_0^{force} \\ U_{01}^{free} + U_{01}^{force} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式(6a)と式(7)から、領域 $V_0$ と領域 $V_1$ の境界 $\Gamma_{01}$ 上の表面応力 $T_{01}$ は、次式のように表される。

$$T_{01} = K_{01} U_{01}^{force} = K_{01} (U_{01} - U_{01}^{free}) \quad (8)$$

上式を式(2)の表面応力 $T_{01}$ に代入し整理すると、次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} H_{11}^1 & H_{12}^1 + G_{12}^1 K_{01} \\ H_{21}^1 & H_{22}^1 + G_{22}^1 K_{01} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_{01} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}^1 & G_{12}^1 \\ G_{21}^1 & G_{22}^1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ K_{01} U_{01}^{free} \end{pmatrix} \quad (9)$$

上式は、図 - 2 (d)に示すように領域 $V_1$ を剛性マトリックス(複素ばね)で支持し、その支点到自由地盤の地震動変位 $U_{01}^{free}$ を作用させて領域 $V_1$ の応答変位 $U_1$ 、 $U_{01}$ を計算するための連立方程式を表している。

最後に、残る未知変位 $U_0$ は、式(1)において自由表面応力 $T_0$ を零とおき、未知数 $U_0$ 、 $T_{01}$ を左辺に移して得られる次式から求められる。

$$\begin{bmatrix} H_{11}^0 & -G_{12}^0 \\ H_{21}^0 & -G_{22}^0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U_0 \\ T_{01} \end{pmatrix} = - \begin{bmatrix} H_{12}^0 \\ H_{22}^0 \end{bmatrix} U_{01} + \begin{pmatrix} u_0^{(in)} \\ u_{01}^{(in)} \end{pmatrix} \quad (10)$$

式(6)は、 $V_0$ と $V_1$ の境界 $\Gamma_{01}$ の変位と表面応力を関係付ける剛性マトリックス $K_{01}$ を厳密に求める式であり、このように厳密に求められた剛性マトリックス $K_{01}$ に基づく部分解析法を厳密部分解析法(式(9)、(10))と呼ぶ。

これに対して振動数が高くなると(短波長)、不整形地盤の地表面法線方向にP波やS波が伝播すると仮定できるので、不整形地盤地表面の各要素は局部的に半無限地盤地表面の各要素で近似できると考えられる。一方よく知られているように、半無限地盤地表面に鉛直方向、水平方向に表面応力が作用するときの剛性マトリックスは減衰係数 $\rho C_s$ 、 $\rho C_p$ 、( $\rho$  = 密度、 $C_s$  = S波速度、 $C_p$  = P波速度)のダッシュポットによってモデル化できる。このような近似的な剛性マトリックスを用いる場合を近似部分解析法と呼ぶ。

ここで、上記の厳密部分解析法における連立方程式の次元を整理すると、自由地盤入射波応答問題(式(4))で、 $3(N_0 + N_{01})$ 元、自由地盤外力応答問題(剛性マトリックス)(式(6))では、 $3(N_{01})$ 元、領域 $V_1$ の応答問題(式(9))では、 $3(N_{01} + N_1)$ 元、領域 $V_0$ の応答問題(式(10))で、 $3(N_0 + N_{01})$ 元の連立方程式を解くことになる。ここに、境界 $\Gamma_0$ 上を離散化した要素数を $N_0$ 、境界 $\Gamma_{01}$ 上を離散化した要素数を $N_{01}$ 、境界 $\Gamma_1$ 上を離散化した要素数を $N_1$ とする。

以上からわかるように厳密部分解析法では、連立方程式の係数マトリックスの大きさは、最大でも部分領域の境界上の要素分割数の3倍( $3(N_0 + N_{01})$ または $3(N_{01} + N_1)$ )以上にはならないので、計算機容量および計算速度に関して部分解析法は、全体解析法 $3(N_0 + 2N_{01} + N_1)$ 元連立方程式)に比べ優れた計算方法であることがわかる。また、近似部分解析法を用いると、自由地盤の外力応答問題で逆行列の計算(式(6b))が不要になるので、近似部分解析法は全体解析法と厳密部分解析法に比べより少ない時間で計算できる。具体的計算例による計算機容量と計算速度に関する比較は、後で述べる。

#### 4．震源断層－不整形地盤の地震動計算例

#### 4.1 横ずれ断層－矩形の溺れ谷地盤モデル

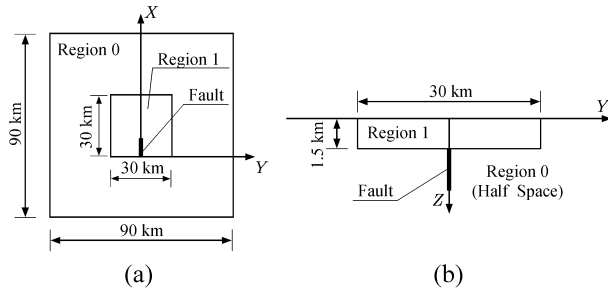


図 - 3 横ずれ断層 - 矩形溺れ谷地盤モデル

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> ] | Q 値 |
|------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----|
| 領域 1 | 6000                  | 3500                  | 2.8                                   | 400 |
| 領域 2 | 2800                  | 1600                  | 2.3                                   | 150 |

部分解析法の検証と数値計算上の優位性を示すために、図 - 3 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し、全体解析法、厳密部分解析法、近似部分解析法によって地表面地震動を計算し比較する。鉛直横ずれ断層は溺れ谷地盤の下方中央に存在する。地盤物性値は、表 - 1 に示すように震源断層が存在する半無限地盤のS波速度は、3.5km/sで標準的な地殻の硬さである。矩形の谷地盤のS波速度は、1.6km/sで地殻よりもかなり軟らかではあるが、中程度の硬さの岩盤でありこれが水平成層地盤構造であればそのS波の1次固有振動数( $2\pi C_s / (4H)$ )は1.7 rad/s ( $=2\pi 1.6 / (4 \times 1.5)$ )となる。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( $N_0=800$ ,  $N_{01}=480$ ,  $N_1=400$ )。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 までを対象としている。

震源断層は、図 - 4 に示すような 8.5km x 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、震源パラメータを表 - 2 に示す。

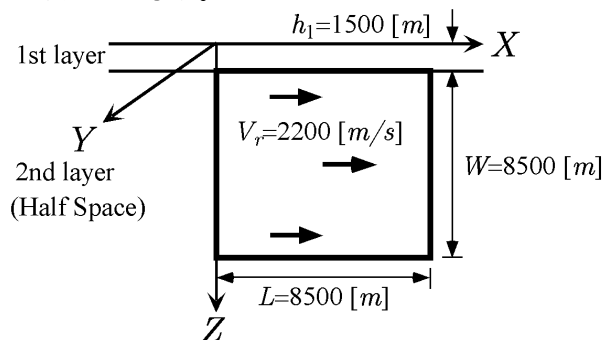


図 - 4 解析で用いた横ずれ断層モデル

表 - 2 解析で用いた横ずれ断層の震源パラメータ

|                  |                    |                                                  |
|------------------|--------------------|--------------------------------------------------|
| 地震モーメント $M_0$    | [N・m]<br>[dyne・cm] | $2.230 \times 10^{17}$<br>$2.230 \times 10^{24}$ |
| 立ち上がり時間 $\tau$   | [sec]              | 0.3                                              |
| 断層長さ $L$         | [m]                | 8500                                             |
| 断層幅 $W$          | [m]                | 8500                                             |
| 破壊伝播速度 $v_r$     | [m/sec]            | 2200                                             |
| 断層上端長さ $z_{s0}$  | [m]                | 0.0                                              |
| 走行角度 $\varphi$   | [°]                | 0.0                                              |
| 傾斜角度 $\delta$    | [°]                | 90.0                                             |
| 食い違い角度 $\lambda$ | [°]                | 0.0                                              |
| 破壊伝播タイプ          |                    | Type 1                                           |

#### 4.2 地表面の増幅特性

震源断層から放射される地震波による応答特性を見る前に、図 - 3 の不整形地盤に単位振幅のSH波(y軸方向の変位のみ)が鉛直下方から入射したときの矩形谷中央を通るy軸に沿う地表面応答倍率の変化を見ておく。振動数 0.0625 rad/s から 2.0 rad/s の5つの振動数毎のy軸に沿う地表面応答倍率の変化を図 - 5, 6 に示す。図 - 5 は、全体解析法(曲線)と厳密部分解析法(○□ 記号)による応答倍率を比較し、図 - 6 は全体解析(曲線)と近似部分解析法(○□ 記号)の比較結果である。全体解析法によるプログラムの検証は論文<sup>9)</sup>でなされているので、図 - 5 に示すように全体解析法(曲線)と厳密部分解析法(○□ 記号)の完全な一致は、本論文で提案した厳密部分解析法の妥当性を示している。また、図 - 6 のように近似部分解析法の結果は、全体解析法と完全に一致しないもの、両者の応答倍率は似ており、近似部分解析法も実用的には問題はないものと思われる。

#### 4.3 地表面の速度波形特性

ここでは、横ずれ断層から放射される地震波による矩形谷地表面の地震動波形を全体解析法、厳密部分解析法、近似部分解析法で計算し比較する。なおこの比較では、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ことがわかったので、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による比較結果を示すものとする。

図 - 7 は、全体解析法と厳密部分解析法による速度波形の比較を示す。前節のSH波入射による地盤増幅特性の場合と同様に、全体解析法と厳密部分解析法による結果は完全に一致しており、厳密部分解析法の妥当性が確認されたことを示している。また、図 - 8 に示す全体解析法と近似解析法の比較では、両者の完全な一致は見られないものの近似部分解析法による波形はほぼ全体解析法の結果に似ており、近似部分解析法の妥当性が確認されたものと思われる。

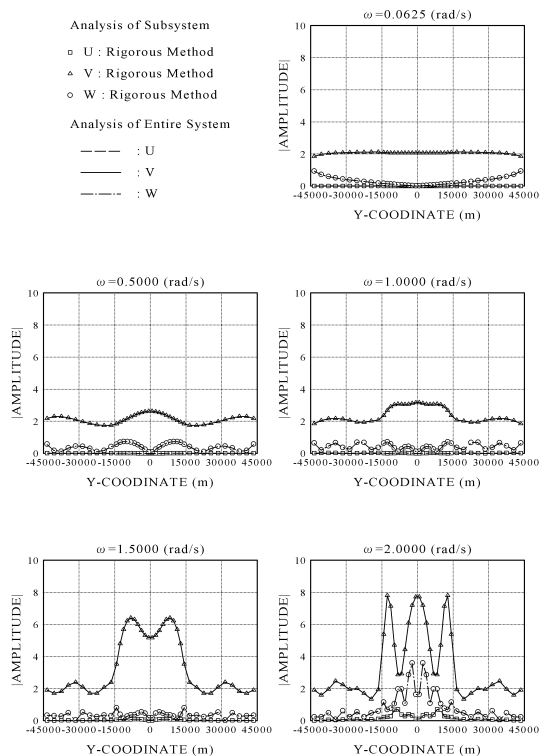


図 - 5 全体解析法と厳密部分解析法による増幅特性の比較

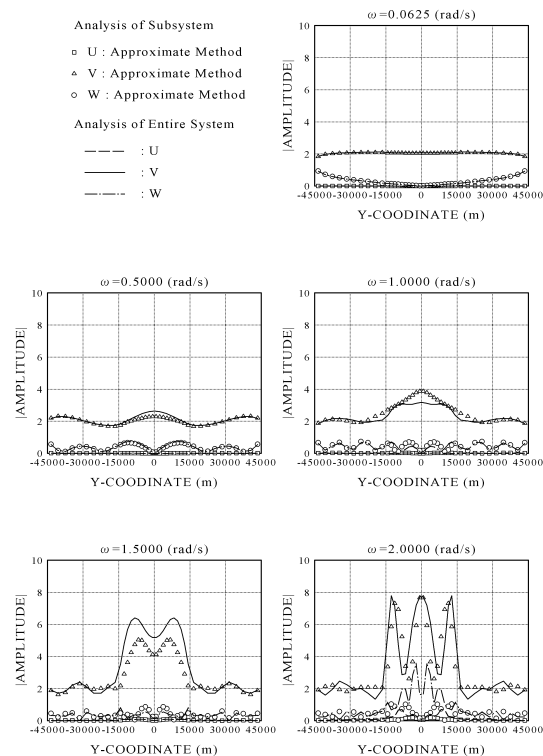


図 - 6 全体解析法と近似部分解析法による増幅特性の比較

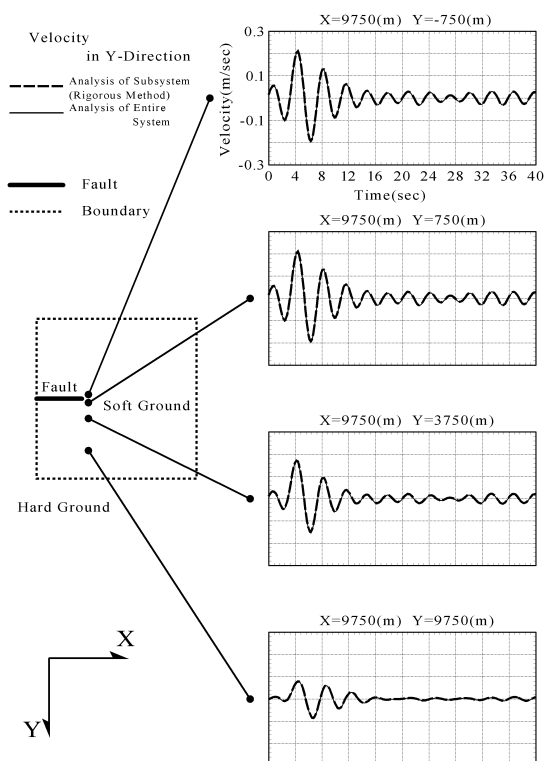


図 - 7 全体解析法と厳密部分解析法による断層直交方向の速度波形の比較

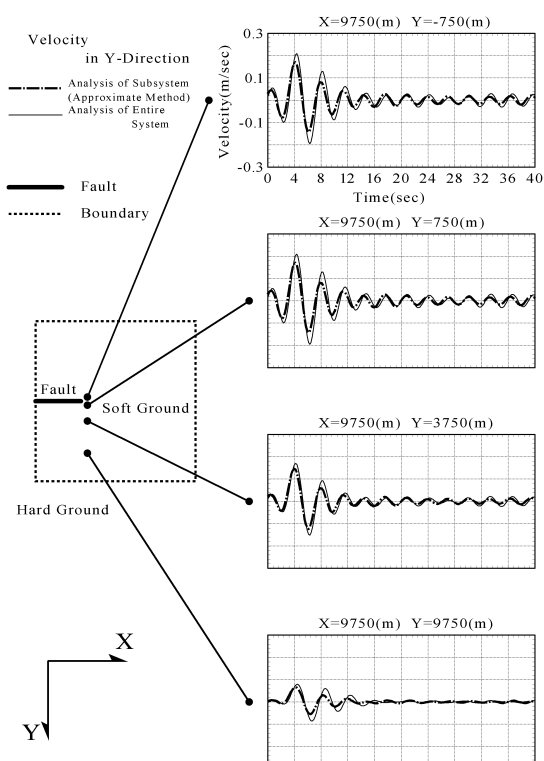


図 - 8 全体解析法と近似部分解析法による断層直交方向の速度波形の比較

## 5. 部分解析法の計算上の利点

本論文で新しく提案した厳密部分解析法と近似部分解析法の妥当性は前節の数値計算例による全体解析法との比較によって確認されたので、ここでは計算機容量や計算時間の比較をして、部分解析法の計算上の利点をまとめておく。

第4章で用いた震源断層 - 矩形谷地盤系で地表面速度波形を計算した場合について、1つの振動数による応答を計算するために必要な計算機メモリ最大使用量と計算時間について比較すると、表-3のようにまとめることができる。もちろんこれらの数字は、使用した計算機やプログラミングに依存するが、全体解析法に比べて、厳密部分解析法と近似部分解析法の相対的利点を見るには十分である。

表-3によると、全体解析法で必要とされる最大計算機メモリに関しては、厳密部分解析法と近似部分解析法では、それぞれ全体解析法の約1/2倍と約1/4倍の計算機メモリーで済むことになる。また、計算時間に関しては、厳密部分解析法と近似部分解析法は、それぞれ全体解析法の約1/3倍と約1/6倍の計算時間で計算できることがわかり、本論文の部分解析法の計算上の利点を確認できたものと思われる。

## 6. まとめ

本論文では、震源断層 - 不整形地盤系における地震動シミュレーションを3次元境界要素法によって行うときに問題となる、計算機容量と計算時間の改良を目指して、部分解析法を利用した境界要素法による効率的な地震動合成法を提案し、その検証と数値計算上の利点を示した。本論文では、手法の定式化とその検証を主な目的とするため、震源断層 - 不整形地盤系を深部地盤と表層地盤系の2つの部分領域に分ける場合について記述するとともに、さらに効率性に優れた近似部分解析法についても記述した。また、以下のような工学的なパラメータ感度解析に本論文で提案する部分解析法を用いれば、さらに有利となるとと思われる。すなわち、震源断層 - 不整形地盤系において、(1) 深部地盤系よりも表層地盤の地形や物性値が変わると地表の地震動がどのように変わるかを調べる場合や、(2) 深部地盤系の震源特性が変わると地表の地震動がどのように変わるかを調べる場合、一方に関係する領域のみの計算を他方のものと組み合わせると地表の地震動が計算できるので全体解析をするよりも計算速度の点で有利となる。

本論文で提案した部分解析法の考え方を、多数の部分領域に分けて計算する方法に拡張すれば、さらに効率性に優れた計算法になると考えられるが、具体的方法については今後の課題とする。

表-3 計算時間および記憶容量の比較

|        | 全体解析法                         | 厳密部分解析法                | 近似部分解析法                |
|--------|-------------------------------|------------------------|------------------------|
| 最大要素数  | $N_0 + 2N_{01} + N_1$<br>2160 | $N_0 + N_{01}$<br>1280 | $N_0 + N_{01}$<br>1280 |
| 最大記憶容量 | 1,338Mbyte                    | 609MByte               | 365Mbyte               |
| 計算時間   | 6時間46分                        | 2時間35分                 | 1時間11分                 |

## 参考文献

- 1) 瀧澤一起, 竹中博士(1989), 近地地震波の伝播に関する理論, 地震 第2号, 第42巻, pp.391-403.
- 2) Graves, R.W. (1995), Preliminary analysis of long-period basin response in the Los Angeles region from the 1994 Northridge earthquake, *Geophysical Research Letters*, Vol. 22, pp.101-104.
- 3) Olsen, K., and Archuleta, R.J. (1996), Three-dimensional simulation of earthquake on the Los Angeles fault system, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, pp.575-596.
- 4) Sato., Graves, R.W., and Somerville, P.G. (1999), 3-D finite-difference simulation of long-period strong motions in the Tokyo Metropolitan area during the 1990 Odawara earthquake ( $M_j 5.1$ ) and the Great 1923 Kanto earthquake ( $M_s 8.2$ ) in Japan, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 89, pp.575-596.
- 5) Inoue, T., and Miyatake, T. (1997), 3-D simulation of near-field strong ground motion: Basin edge effect derived from rupture directivity, *Geophysical Research Letters*, Vol. 24, pp.905-908.
- 6) 阿部和久, 吉田裕, 中村智樹 (1993), 時間領域境界要素法による3次元地震断層解析, 土木学会論文集, No.471/I-24, pp.125-133.
- 7) 片岡正次郎 (1996), 3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.
- 8) 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.
- 10) 原田隆典, 黒田拓士, 山上武志, (2002), 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, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.843-849.
- 11) 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作成への応用, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.99-108.
- 12) 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.

(2003年6月30日 受付)

# EFFICIENT SIMULATION METHOD OF GROUND MOTIONS USING SUBSYSTEMS ANALYSIS AND BOUNDARY ELEMENT METHOD

Takanori HARADA, Yousuke OKADA, and Koutaku OHO

Since the physical processes of propagation of seismic waves generated by a kinematical fault rupture model buried in laterally inhomogeneous layered media can be consistently and rigorously represented by using the integral equations and the integral equations can be numerically solved with making use of the direct boundary element method, the simulation method of earthquake ground motions for the fault - earth crust model with laterally inhomogeneous layered media has been developed by using the 3-dimensional direct boundary element method. Especially in this paper, in order to improve the computation memory capacity and computation time by using the 3-dimensional direct boundary element method, the method of analysis of subsystems of entire fault - earth crust model has been adopted in the direct boundary element method. The advantage of the developed method of analysis of sub systems has been demonstrated by the numerical examples for a single laterally inhomogeneous valley with a strike slip fault rupture model.