

I-547

F.E.M.とD.B.E.M.による不整形半無限層状地盤の震動解析

(株)間組 正会員 小野 正樹
岡山大学 正会員 竹宮 宏和
岡山大学 学生員 友野 達夫

1. まえがき 不整形基盤上の沖積地盤の地震応答性状は、通常よく仮定される水平基盤上のそれと異なった様相を呈することから、不整形基盤面の影響を把握しておくことは、同地盤上に建設される構造物の耐震解析、設計上重要である。著者らは、これまでの報告でその影響をB.E.M.間接法(ソース法)及びB.E.M.直接法(D.B.E.M.)から調べたが、今回は、D.B.E.M.とF.E.M.とのハイブリッド法を用いて解析を行ったので、その結果を報告する。

2. 定式化

<(1) 波動場> 動的サブストラクチャ法によって、解析対象地盤を一様半無限領域Ⅰと表層地盤領域Ⅱとに分割する。領域Ⅰにおける変位 $\mathbf{u}_1$ は、入射波と反射波による変位 $\mathbf{u}_1^{(i)}$ と、基盤面Sによって生じる散乱波による変位 $\mathbf{u}_1^{(s)}$ で表わされる。すなわち、

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_1^{(i)} + \mathbf{u}_1^{(s)} \quad (1)$$

表面力についても同様に、

$$\mathbf{t}_1 = \mathbf{t}_1^{(i)} + \mathbf{t}_1^{(s)} \quad (2)$$

と表わされる。

<(2) ハイブリッド法> 領域Ⅰに対して、Maxwell-Bettiの相反定理を適用して得られる境界積分方程式に内挿関数を導入して離散化を施せば、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_1^{II} & \mathbf{H}_1^{IF} \\ \mathbf{H}_1^{FI} & \mathbf{H}_1^{FF} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_F \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1^{II} & \mathbf{G}_1^{IF} \\ \mathbf{G}_1^{FI} & \mathbf{G}_1^{FF} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{t}_1 \\ \mathbf{t}_F \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1^{II} & \mathbf{H}_1^{IF} \\ \mathbf{H}_1^{FI} & \mathbf{H}_1^{FF} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_1^{(i)} \\ \mathbf{u}_F^{(i)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1^{II} & \mathbf{G}_1^{IF} \\ \mathbf{G}_1^{FI} & \mathbf{G}_1^{FF} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{t}_1^{(i)} \\ \mathbf{t}_F^{(i)} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

なる支配方程式が得られる。ただし、 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{H}$ はそれぞれ変位、表面力グリーン関数マトリックスであり、I、F はそれぞれインターフェイス、自由表面に関するものを意味する。

式(3)に示す関係式に縮合操作を施し、インターフェイス上での変位-表面力関係を導く。

$$\{\mathbf{t}_{BEM}^I\} = [(\mathbf{G}_1^I)^{-1} \mathbf{H}_1^I] \{\mathbf{u}_1^I\} - [(\mathbf{G}_1^I)^{-1} \mathbf{H}_1^I] \{\mathbf{u}_1^{(i)} - \mathbf{t}_1^{(i)}\} \quad (4)$$

ただし、

$$[\mathbf{G}_1^I] = [\mathbf{G}_1^{II} - \mathbf{H}_1^{IF} (\mathbf{H}_1^{FF})^{-1} \mathbf{G}_1^{FI}] \quad (5.a)$$

$$[\mathbf{H}_1^I] = [\mathbf{H}_1^{II} - \mathbf{H}_1^{IF} (\mathbf{H}_1^{FF})^{-1} \mathbf{H}_1^{FI}] \quad (5.b)$$

一方、表層地盤領域に対するF.E.M.解析から、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D}^{EE} & \mathbf{D}^{IE} \\ \mathbf{D}^{EI} & \mathbf{D}^{II} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{u}}^E \\ \hat{\mathbf{u}}^I \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \int_{\Gamma_2} \mathbf{N}^T \mathbf{t}_{FEM}^I d\Gamma_2 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

なる関係式が得られる。ここに、 $\mathbf{D}$ はF.E.M.領域の動的剛性マトリックス、 $\mathbf{N}$ は内挿関数マトリックス、 Γ_2 は領域Ⅱの全境界であり、Eは領域内部の節点に関するものを意味する。

両領域のインターフェイス上での表面力のつり合いに関する重み付き残差は零であるから、

$$\int \mathbf{w}_t^T (\mathbf{t}_{BEM}^I + \mathbf{t}_{FEM}^I) ds = 0 \quad (7)$$

表面力に関する重み関数 $\mathbf{w}_t$ にF.E.M.領域の変位を用いれば、式(4)、(6)より、最終的に

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D}^{EE} & \mathbf{D}^{IE} \\ \mathbf{D}^{EI} & \mathbf{D}^{II} + \mathbf{K}_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{\mathbf{u}}^E \\ \hat{\mathbf{u}}^I \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{\mathbf{K}_{bb} \mathbf{u}^{(i)} - \mathbf{L} \mathbf{t}^{(i)}\} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

となり、遠地盤領域の応答特性が、遠地盤インピーダンス $\mathbf{K}_{bb}$

$$\mathbf{K}_{bb} = \mathbf{L} (\mathbf{G}_1^I)^{-1} \mathbf{H}_1^I \quad (9)$$

という形で評価され、F.E.M.解析の運動方程式に取り込まれている。ここに、

$$L = \int N^T M ds \quad (10)$$

であり、 M は内挿関数マトリックスである。

3. 数値解析例および考察

本研究では、Fig.1に示す3つの地盤モデルを取り上げ、入射波としてP、SV波(平面波)、Rayleigh波(表面波)を考えている。それぞれの入射波について無次元振動数

$$\eta = k_s a / \pi = 2a / \lambda_s \quad (\text{SV波、Rayleigh波}) \quad (11.a)$$

$$\eta = k_p a / \pi = 2a / \lambda_p \quad (\text{P波}) \quad (11.b)$$

を定義し、パラメータとして設定する。ただし k_p 、 k_s はそれぞれP波、SV波波数、 λ_p 、 λ_s はそれぞれP波、SV波波長、 a は沖積層の半幅とする。さらに平面波については入射波の入射角 θ をもパラメータとして数値解析を行った。一例として、モデルー1の解析結果をFig.2に示す。同図は、地表面における自然地盤応答に対する応答倍率を表すものである。解析結果についての考察を列記すれば、

- 1) 表層地盤の存在が、地表面の変位に及ぼす影響が明らかとなった。
- 2) 入射波の種類、入射角、および振動数の違いによる変位の差異が確認された。
- 3) 地盤の性状による変位の差異が確認された。
- 4) D.B.E.M.による遠地盤解析から得られる遠地盤インピーダンスを、F.E.M.解析に取り込むことが可能となった。

以上の4点が挙げられる。

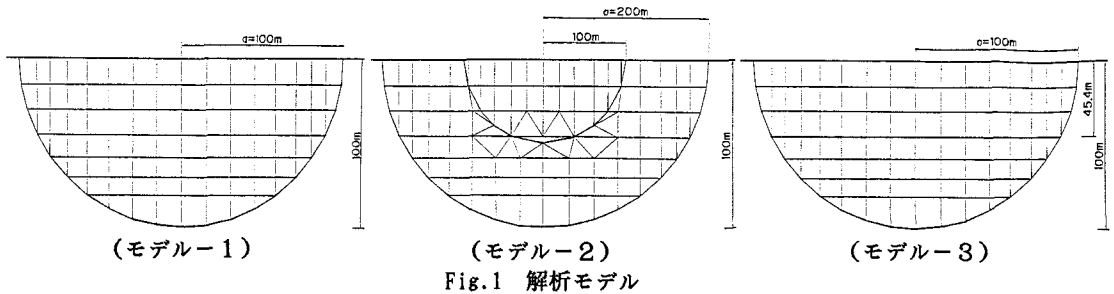


Fig.1 解析モデル

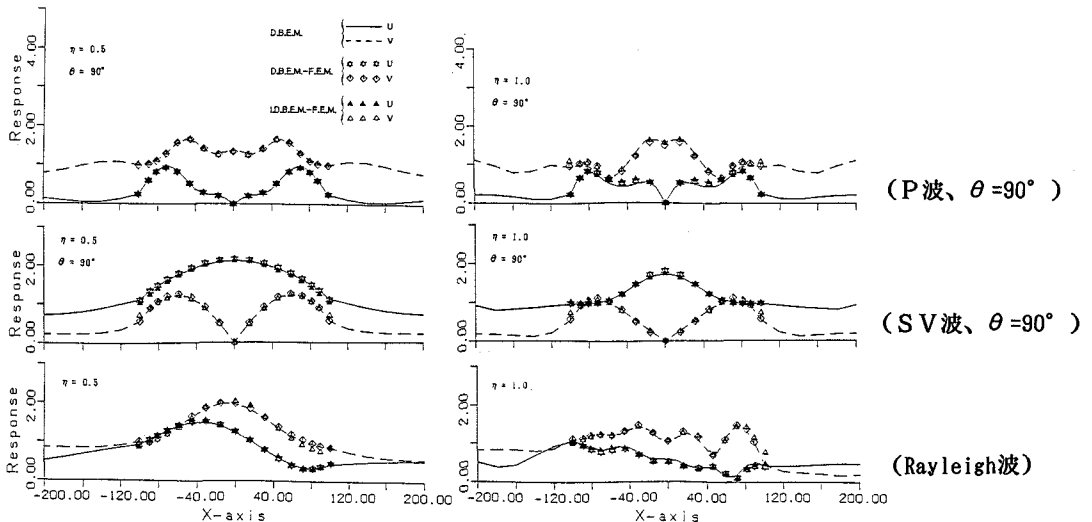


Fig.2 解析結果

参考文献

- 1) 竹宮宏和他；不整形基盤上の沖積地盤の震動解析；土木学会第44回年次学術講演会；1989
- 2) 竹宮宏和他；不整形基盤を有する沖積地盤層の振動性状；第20回地震工学研究発表会；1989