

## 平面SH波による地盤応答特性のモデル化

宮崎大学大学院  
(株)環境調査技術研究所(元宮崎大学大学院)  
宮崎大学工学部

学生員 根本 健志  
正員 寺本 諭司  
正員 原田 隆典

1. まえがき 地盤震動のこれまでの研究の多くは水平成層構造の地盤震動を検討したもので、これによって観測記録を解釈することが多い。したがって、水平成層構造でない、いわゆる不整形な構造の地盤の震動がどのようなかを検討しておくことは必要である。本報告では、SH波入射による不整形成層地盤の応答に適用できる数値解析法を直接境界要素法によって開発し、摂動法に基づく解析解との比較を行なったのでその概要を説明する。

2. 直接境界要素法による解析の概要と精度の検証 BEMによる解析の方法は成書に譲るが、本研究では、無限媒質における基本解を用いる次式のような境界積分表示を一定要素により離散化する直接境界要素法を採用した。

$$v^{(i)}(\mathbf{r}) + \int [G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)q(\mathbf{r}_S) - H(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S)v(\mathbf{r}_S)]dB_S = (1 - C(\mathbf{r}))v(\mathbf{r}) \quad \mathbf{r}, \mathbf{r}_S \text{ on Boundary} \quad (1)$$

ここに、 $G$ ,  $H$ はグリーン関数とその境界応力を表わす。 $v$ ,  $q$ はSH波の絶対変位とその境界応力を表わす。 $v^{(i)}$ は入射SH波の変位を表わす。なめらかな境界の場合、 $C=0.5$ である。一定要素による離散化では、境界はなめらかな境界となる。 $\mathbf{r}$ ,  $\mathbf{r}_S$ は、それぞれ観測点と荷重点の座標を表わす。無限粘弾性体におけるSH波問題では、グリーン関数は次式のように与えられる。

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}_S) = -\frac{i}{4\mu} H_0^{(2)}\left(\frac{\omega}{C_S} R\right) e^{i\omega t}, \quad C_S = C_S^0(1 + iD) \quad (2)$$

ここに、 $\mu$ はせん断剛性、 $\omega$ は振動数、 $C_S^0$ ,  $C_S$ はせん断弾性波速度およびせん断粘弾性波速度、 $t$ は時間、 $R$ は観測点と荷重点の距離、 $D$ は媒質の材料減衰定数を表わす。 $H_0^{(2)}$ は第2種0次ハンケル関数を表わす。

図1のような2次関数形の基盤を有する2層地盤に鉛直下方からSHが入射する場合の地表の応答の増幅率を計算し、Bravo等<sup>2)</sup>による境界積分方程式法(BIEM)の結果と比較した。図2に示すように両者の結果はよく一致しており、BEMの精度が確認できたものと思われる。

3. 摂動法に基づく解析解の概要 ここで示す解析解は図3に示すような半無限地盤上に単層の表層地盤が存在する場合で、地表面の高さが場所によって異なる不整形地表面を有する。もちろん、摂動法に基づく、図1に示す以外の不整形地盤に対しても、また、SH波以外のP-SV波および3次元問題に対しても解析解を導くことができる。図3の不整形地表面における応答変位の第1次近似解は振動数-波数領域で次のように求められる。

$$v^I(\kappa, f) = \left[ \frac{p}{\cos \gamma H} \delta(\kappa - \kappa_0) + f(\kappa - \kappa_0) q \gamma_0 \frac{\sin \gamma H}{\cos \gamma_0 \cdot \cos \gamma H} \left( \frac{\kappa \kappa_0 - \kappa_0^2}{\gamma \gamma_0} - \frac{\gamma_0}{\gamma} \right) \right] 2v_{in} \quad (3)$$

ここに

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{\omega}{C_S}\right)^2 - \kappa^2}, \quad \operatorname{Re} \gamma \geq 0, \quad \operatorname{Im} \gamma \geq 0(e^{-i\omega t}), \quad \operatorname{Im} \gamma \leq 0(e^{i\omega t}) \quad (4)$$

$$p = \frac{1}{1 + i \frac{\mu \gamma}{\mu_1 \gamma_1} \frac{\sin \gamma H}{\sin \gamma_1 H}}, \quad q = p \frac{1 - i \frac{\mu \gamma}{\mu_1 \gamma_1} \frac{\cos \gamma H}{\sin \gamma_1 H}}{1 + i \frac{\mu \gamma}{\mu_1 \gamma_1} \frac{\sin \gamma_0 H}{\sin \gamma_{10} H}} \quad (5)$$

式(3)において、右辺第1項は水平成層地盤の応答を表し、第2項は不整形地表面による散乱波の効果を表す。

4. 摂動法による解析解の検証 図4に示すような正弦波的に変動する地表面を有する地盤に対して比較を行う。SH波は鉛直下方から入射されるものとする。図5は摂動法と直接境界要素法による地表面の増幅率を示す。図6に示すような地震波が鉛直下方から入射したときの地表面の加速度波形を計算し、図7に示す。摂動法および直接境界要素法による地盤応答はよく一致していることが読み取れる。

5. まとめ SH 波入射による不整形成層地盤の応答に適用できる数値解析法を直接境界要素法によって開発した。摂動法による解析解の適用限界<sup>1)</sup>を考慮すると、これまでの検討により工学的な振動数範囲、地盤条件で、摂動法による解は十分適用できるものと思われる。

参考文献 1) Harada, T., A Stochastic SH Wave Model of Earthquake Ground Motion, 土木学会論文報告集, 第495号/I-28, pp.43-50, 1994.

2) Bravo, M.A., Sanchez-Sesma, F.J., and Chavez-Carcia, F.J., Ground Motion on Stratified Alluvial Deposit for Incident SH Waves, BSSA, Vol.78, No.2, pp.436-450, 1988.

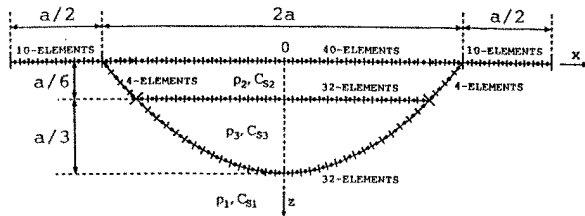


図1 2次関数形の基盤を有する2層地盤

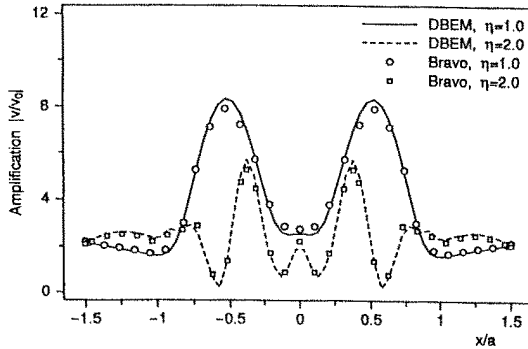


図2 BIEM と BEM による増幅率の比較

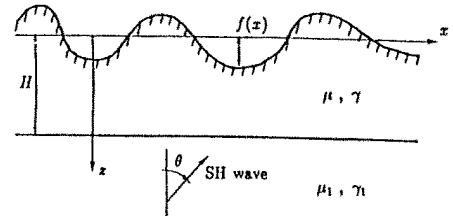


図3 半無限地盤上にある単層の表層地盤

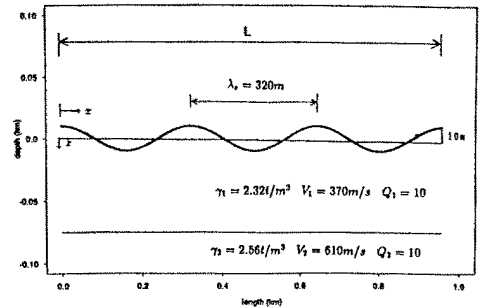


図4 計算例の地盤モデル

図6 入射地震波形

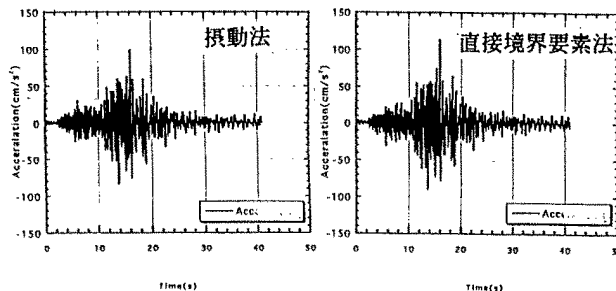
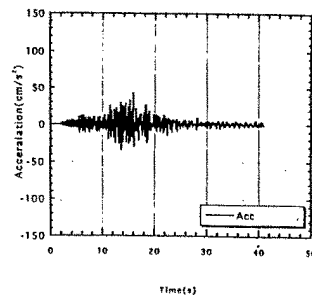


図7 摂動法と直接境界要素法による地表の応答加速度波形

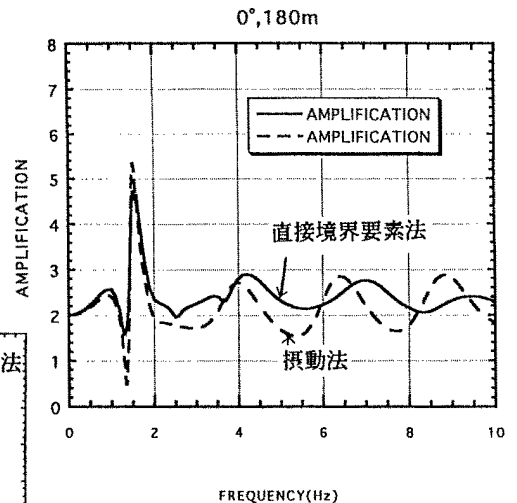


図5 摂動法と直接境界要素法による地表面の増幅率