

I - 403 BEM-FEMの時間領域ハイブリッド解析法による沖積地盤の震動解析

岡山大学 学生員 安井信吾

岡山大学 正会員 竹宮宏和

1. はじめに

従来、不整形地盤の震動解析法には、波動固有関数法、差分法、有限要素法、境界要素法、ハイブリッド法などが採られてきている。これらの多くは、不整形基盤面からの定常調和波動の散乱解析から捉え、対象地盤の応答増幅率を評価している。本研究では、不整形地盤としての沖積地盤へSH波が入射した際の面外応答を時間領域において有限要素法（FEM）と境界要素法（BEM）のハイブリッド法から解析した。そして、同手法により、沖積層地盤の変位及び加速度応答成分の不整形基盤による効果を評価した。

2. 解析手法

解析手法としては、近傍地盤には表層地盤の不規則性を有効に取り入れることが出来る有限要素法を、また遠地盤には地震波動の散乱現象をより忠実に表現できる境界要素法を導入したハイブリッド法を採用した。定式化としては動的サブストラクチャ法に基づく。そして両手法のカップリングには重み付き残差法を適用した。

以上より得られる対象系の時間領域の漸化式は、

$$\begin{aligned} [M + \gamma \Delta t_F C + \beta \Delta t_F^2 K + \alpha \Delta t_F^2 K_{BB}] u_F^n = & [2M - (1 - 2\gamma) \Delta t_F C + (\frac{1}{2} - 2\beta + \gamma) \Delta t_F^2 K - (1 - \alpha) \Delta t_F^2 K_{BB}] u_F^{n-1} \\ & + [M - (1 - \gamma) \Delta t_F C + (\frac{1}{2} + \beta - \gamma) \Delta t_F^2 K] u_F^{n-2} + \alpha \Delta t_F^2 F_{BB}^n + (1 - \alpha) \Delta t_F^2 F_{BB}^{n-1} \quad (n = 1, \dots, N) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 M 、 C 、 K は有限要素領域内の質量、減衰、および剛性マトリックスを、 K_{BB} は遠地盤剛性を表す。また、 F_{BB} は境界要素領域において式(2)で表現されるものである。（ $\alpha=1/2$ 、 $\beta=1/4$ 、 $\gamma=1/2$ ）ここに、 L は表面力を節点力に変換する分布マトリックス、 G 、 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る。式(1)からは変位を評価できるので中央差分式(3)から加速度応答を求める。

$$F_{BB}^{K+1} = L \left\{ \sum_{k=1}^K (H K_u K - k - G K_t K - k) \right\} \quad (2) \quad \ddot{u}_F^n = (u_F^{n+1} - 2u_F^n + u_F^{n-1}) / \Delta t^2 \quad (n = 1, \dots, N) \quad (3)$$

3. 解析モデル

解析対象地盤として沖積層地盤（図1、図2）を選んだ。また物性値はそれぞれ表1、表2に従うものとする。また、各種入射波については以下を採用した。

A. 速度型のリッカー波： $u(\bar{\alpha}^1) = aV(\bar{\alpha}^1)H(\bar{\alpha}^1)$, $V(\bar{\alpha}^1) = \left[2\pi^2 (\bar{\alpha}^1)^2 \left(\frac{B}{\lambda_s} \right)^2 - 1 \right] \exp \left\{ -\pi^2 (\bar{\alpha}^1)^2 \left(\frac{B}{\lambda_s} \right)^2 \right\}$ (4)

B. 周期波： $u(\bar{\alpha}^1) = aV(\bar{\alpha}^1)$, $V(\bar{\alpha}^1) = \sin(2\pi\eta\bar{\alpha}^1)$, $\bar{\alpha}^1 = (\tau - \tau_s) - \sin\theta(\bar{x} - \bar{x}_s) + \cos\theta(\bar{z} - \bar{z}_s)$ (5)

C. 複数のリッカー波から作成される模擬地震波： $u^I(\bar{x}, \bar{z}, \tau) = \sum_{k=1}^N a_k u_k^I(\bar{x}, \bar{z}, \tau - \tau_s^k)$ (6)

$V(\alpha^1)$ は波形を与える、 α^1 は波面を与える位相、無次元時間 $\tau = V_s t / 2B$ 、無次元振動数 $\eta = 2B/\lambda = 1.0$ 、

a : 強度、 B : 沖積層の表面半幅、 λ_s : 代表波長、 T_p : 代表周期、 τ_s : 波の到達時間、 H : Heaviside step関数

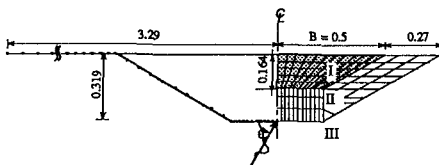


図1 台形基盤を有する沖積地盤 1

表1 地盤の物性定数 1

領域	せん断波速度 V_s	密度 ρ	減衰定数 β	ポアソン比 ν
I (内部)	0.4	0.8	0.10	0.45
II, III (外部)	1.0	1.0	0.02	0.35

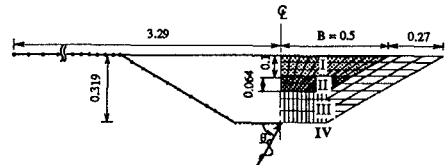


図2 台形基盤を有する沖積地盤 2

表2 地盤の物性定数 2

領域	せん断波速度 V_s	密度 ρ	減衰定数 β	ポアソン比 ν
I (内部)	0.2	0.8	0.10	0.45
II (内部)	0.4	0.8	0.10	0.45
III, IV (外部)	1.0	1.0	0.02	0.35

4. 考察

A. Ricker小波入射のケース（図3、図4）

モデル1の地表面変位の最大応答分布をBEMによる結果と比較した。その結果からは、基盤面の存在によって散乱・反射を起こした波動が沖積層の内部に伝わり、特に中心部で応答が大きくなっているのが分かる。また外側に向かって伝わる波もあり、この影響で沖積層の端部にも増幅が見られる。そして両手法による差もわずかである。つぎに、モデル2の地表面変位の最大応答分布を求めた。この場合の大きな特徴は、沖積地盤中央部での応答の増幅があまり見られない点にある。また、加速度においても同様の傾向が見られた。

B. 周期波入射のケース（図5）

ここでは、振幅が1のsin波をモデル1に入射したときの地表面変位の最大応答分布を求めた。この時の結果を見ると中心からの距離が0.3の辺りで極端に増幅しているが、これがこの台形地盤特有の不整形性を表していると考えられる（半円形地盤解析結果では見られない）。また、ハイブリッド法による結果とBEMによる結果は形状はほぼ同様であるが、前者の値が後者の値よりも全体的に多少大きくなっている。そしてハイブリッド法では、沖積地盤内の内部減衰の効果がはっきりと現われている。

C. 模擬地震波入射のケース（図6、図7）

ここでは、最大振幅が1の模擬地震波をモデル1に入射したときの地表面変位及び加速度の最大応答分布を求めた。短周期型の模擬地震波を入射した際の変位の最大応答分布に着目すると、模擬地震波の周期成分によって変位加速度応答が大きく影響されていることがわかる。変位が卓越する地盤では加速度は小さく、その逆も起こりうる。

5. 結論

本研究によって得られた主な成果を挙げると、

1. 不整形基盤の存在は、沖積層内に表面波を発生させ、これが沖積層内にトラップされる現象となる。そのため形状、場所によって大きな増幅効果が現われる。
2. 沖積層内の地盤構成によって地盤応答は変化する。
3. 長周期型模擬地震波と短周期型模擬地震波に対して沖積層のサイズで変位、加速度応答の様相が大きく変化する。

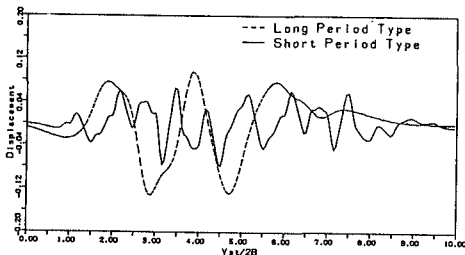


図8 複数のRicker波からなる模擬長・短周期波（変位成分）

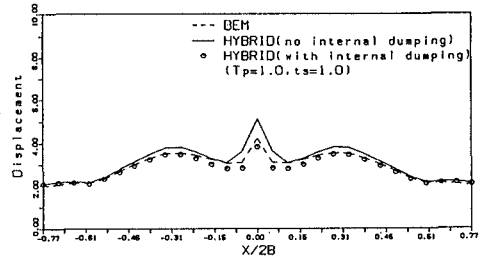


図3 モデル1に対するRicker波入射時の変位の最大応答分布

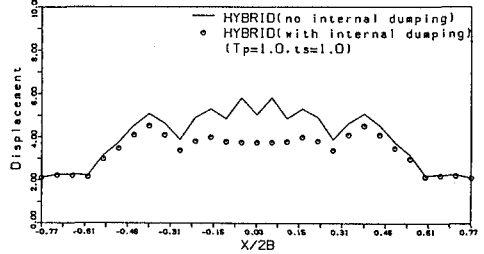


図4 モデル2に対するRicker波入射時の変位の最大応答分布

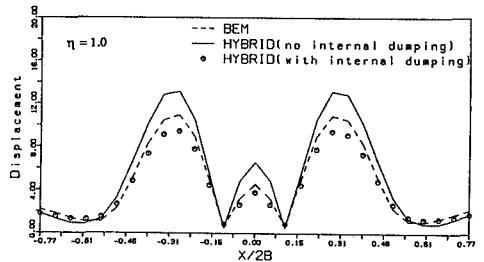


図5 モデル1に対する周期波入射時の変位の最大応答分布

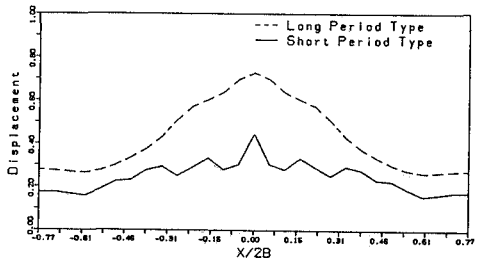


図6 モデル1に対する模擬長・短周期波入射時の変位の最大応答分布

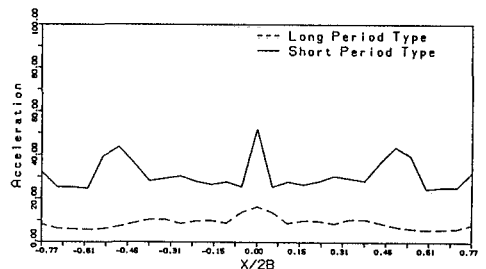


図7 モデル1に対する模擬長・短周期波入射時の加速度の最大応答分布