

(42) 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 正会員 竹宮宏和
○岡山大学 大学院 安井信吾

1. はじめに

本研究は、大規模造成地等に見られる不整形基盤の存在による地震波の散乱・反射を考慮し、このような基盤面の不整形性が表層地盤に与える影響を明らかにしようとするものである。

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(F.E.M.)と境界要素法(B.E.M.)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できる有限要素法を、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。なお、定式化は動的サブストラクチャ法に基づき、両手法のカップリングには重み付き残差法を適用した。

これにより得られる、対象系の時間領域の漸化式は式(1)である。

$$\left[M + \frac{1}{2}\Delta t_F C + \frac{1}{4}\Delta t_F^2 K + \frac{1}{2}\Delta t_F^2 K_{BB} \right] u_F^n = \left[2M + \frac{1}{2}\Delta t_F^2 K - \frac{1}{2}\Delta t_F^2 K_{BB} \right] u_F^{n-1} + \left[M - \frac{1}{2}\Delta t_F C + \frac{1}{4}\Delta t_F^2 K \right] u_F^{n-2} + \frac{1}{2}\Delta t_F^2 F_{BB}^n + \frac{1}{2}\Delta t_F^2 F_{BB}^{n-1} \quad (n = 1, \dots, N) \quad (1)$$

ここに、 M 、 C 、 K ：それぞれ有限要素領域内の質量、減衰、及び剛性マトリックス

K_{BB} ：遠地盤剛性、 Δt_F ：時間刻み幅

なお、減衰マトリックスについては、地盤の振動において一次モードが応答を支配する Rayleigh 型減衰(式2)を導入する。

$$C = \beta \omega_1 M + \frac{\beta}{\omega_1} K \quad (\beta: \text{減衰定数}, \omega_1: \text{1次の固有円振動数}) \quad (2)$$

また、 F_{BB} は境界要素領域において(式3)で表現されるものである。

$$F_{BB}^{K+1} = L \left\{ \sum_{k=1}^K (H^k u^k - k - G^k t^k - k) \right\} \quad (3)$$

ここに、 L ：表面力を節点力に変換する分布マトリックス

G 、 H ：それぞれ変位、表面力グリーン関数マトリックス

また、式(1)からは変位が評価できるので、中央差分式(式4)から加速度応答を求める。

$$\ddot{u}_F^n = (u_F^{n+1} - 2u_F^n + u_F^{n-1}) / \Delta t^2 \quad (n = 1, \dots, N) \quad (4)$$

3. 解析モデル

本研究における解析モデルは、図1を基にして、その沖積層全幅 = 456 (m) で各長さを割ることで無次元化したものをモデル1 (図2.1) とし、その沖積層を二層にしたものをモデル2 (図2.2) とした。また、各物性値の次元量は表1に示す通りであり、無次元量は、外部領域でのせん断波速度と密度の値が、それぞれ 1.0 となるように設定した。なお、モデル2については、沖積層を2層とし、物性値は、表2に従う。

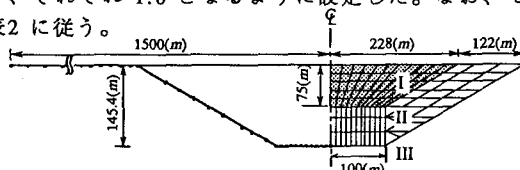


図1 台形基盤を有する沖積地盤 (次元量)

表1 地盤の物性定数

領域	せん断波速度 V_s (m/s)	密度 ρ (t/m^3)	減衰定数 β	ポアソン比 ν
I (内部)	200	1.6	0.10	0.45
II, III (外部)	500	2.0	0.02	0.35

表2 地盤の物性定数 (モデル2)

領域	せん断波速度 V_s	密度 ρ
I (内部)	0.2	0.8
II (内部)	0.4	0.8
III, IV (外部)	1.0	1.0

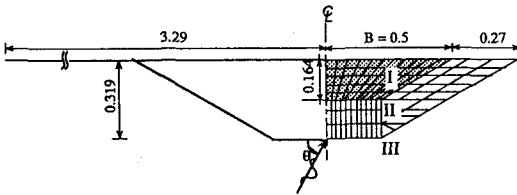


図2.1 モデル1 (無次元量)

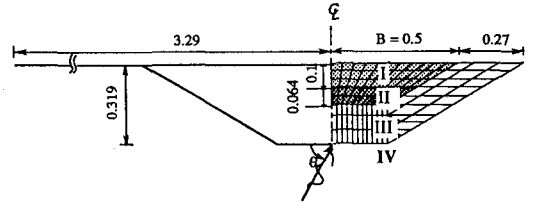


図2.2 モデル2 (無次元量)

また、各種入射波については以下を採用した。

A. 速度型のリック-波

$$u(\bar{\alpha}^I) = aV(\bar{\alpha}^I)H(\bar{\alpha}^I) \quad (5.1)$$

$$V(\bar{\alpha}^I) = \left[2\pi^2 (\bar{\alpha}^I)^2 \left(\frac{B}{\lambda_s} \right)^2 - 1 \right] \exp \left\{ -\pi^2 (\bar{\alpha}^I)^2 \left(\frac{B}{\lambda_s} \right)^2 \right\} \quad (5.2)$$

B. 周期波

$$u(\bar{\alpha}^I) = aV(\bar{\alpha}^I) \quad (6.1)$$

$$V(\bar{\alpha}^I) = \sin(2\pi\eta\bar{\alpha}^I) \quad (6.2)$$

C. 複数のリック-波から作成される模擬地震波

$$u^I(\bar{x}, \bar{z}, \tau) = \sum_{k=1}^N a_k u_k^I(\bar{x}, \bar{z}, \tau - \tau_s^k) \quad (7)$$

ここで、 α^I は波面を与える位相 (式8)である。

$$\bar{\alpha}^I = (\tau - \tau_s) - \sin\theta(\bar{x} - \bar{x}_s) + \cos\theta(\bar{z} - \bar{z}_s) \quad (8)$$

なお、(式5.1)~(式8)中の各文字は以下に示すものである。

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、 τ : 無次元時間 ($\tau = V_s t / 2B$)、 η : 無次元振動数 ($\eta = 2B/\lambda = 1.0$)

4. 考察

A. Ricker 小波入射のケース

最大振幅が1のRicker小波を、モデル1及びモデル2に鉛直入射したときの地表面変位応答(図3)、及びその最大応答分布(図4)を求めた。なお、代表周期による無次元振動数 $\eta = 1.0$ である。

1) モデル1の最大応答分布を時間領域BEMによるものと比較したが、両手法による差は僅かである。そして、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応答の増幅が見られる。また、沖積地盤内の内部減衰の効果も現われている。

2) モデル2の場合の大きな特徴は、応答の増幅が沖積地盤中央に限らずに見られる点にある。また、沖積地盤内の内部減衰の効果ははっきりと現われている。

B. 周期波入射のケース

最大振幅が1のsin波をモデル1に鉛直入射したときの地表面変位の最大応答分布(図5)を求めた。なお、無次元振動数 $\eta = 1.0$ である。

1) 図5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。これが、この台形地盤特有の不整形性を表すと考えられる(半円形地盤解析結果では見られなかった)。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

模擬地震波(図6)をモデル1に入射したときの地表面変位・加速度応答(図7,8)、及びその最大応答分布(図9)を求めた。

1) 変位・加速度の最大応答分布に注目すると、模擬地震波の周期成分によって大きく影響されていることがわかる。長周期型の模擬地震波の場合は、変位が大きく加速度は小さい。一方、単周期型の場合はその逆である。

5. 結論

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、1次元モデルとは異なる大きな増幅効果が現われる。
2. 地表面に向かって徐々に剛性が低下する不整形層地盤では、沖積層内の地盤構成によって地盤応答が変化する。
3. 模擬地震波の周期成分と、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。

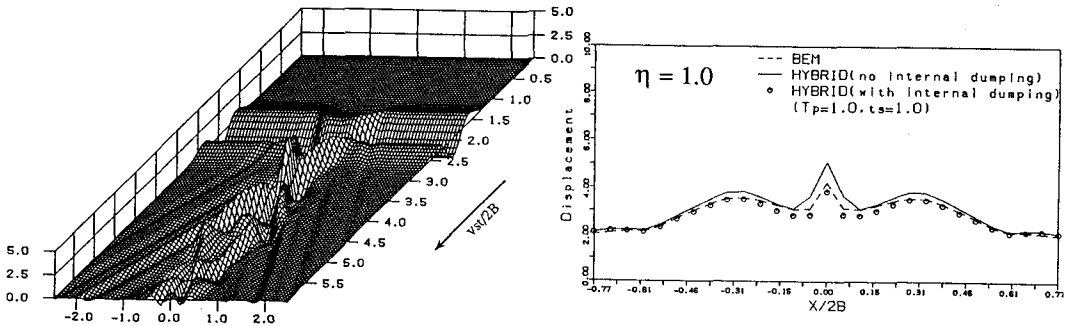


図3 Ricker波入射時の変位応答、及びその最大応答分布(モデル1)

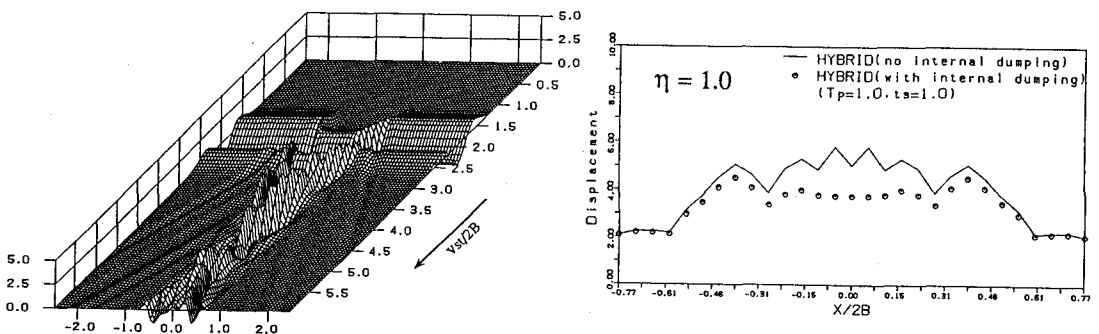


図4 Ricker波入射時の変位応答、及びその最大応答分布(モデル2)

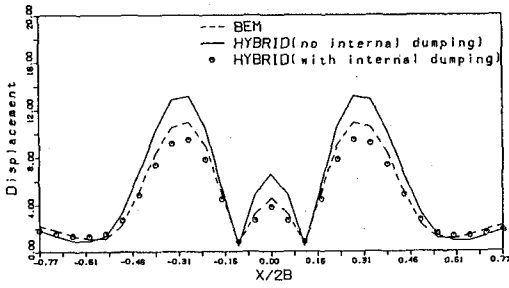


図5 周期波入射時の変位の最大応答分布

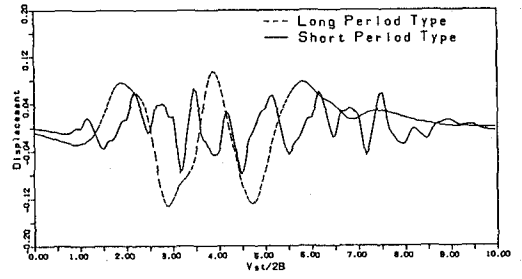


図6 模擬地震波 (変位入力)

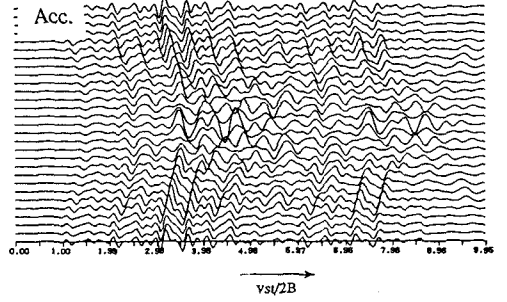
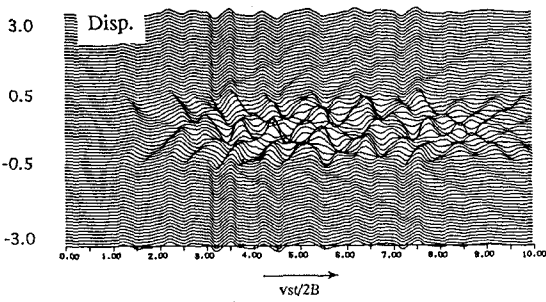


図7 模擬短周期波入射時の変位・加速度応答

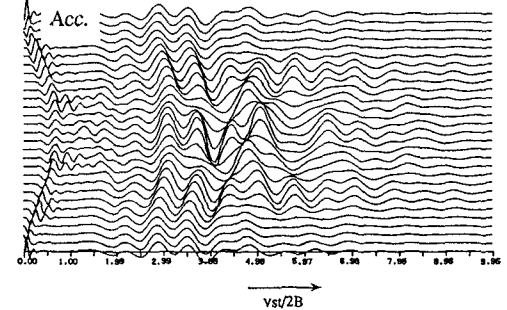
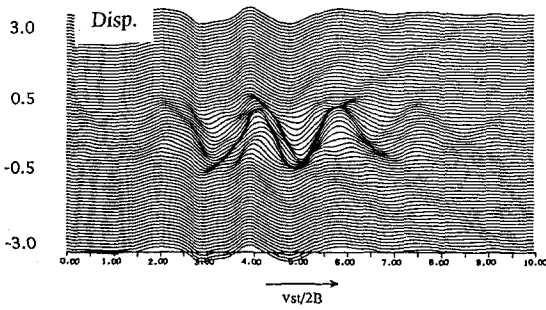


図8 模擬長周期波入射時の変位・加速度応答

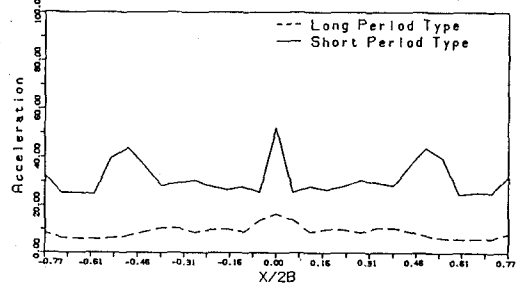
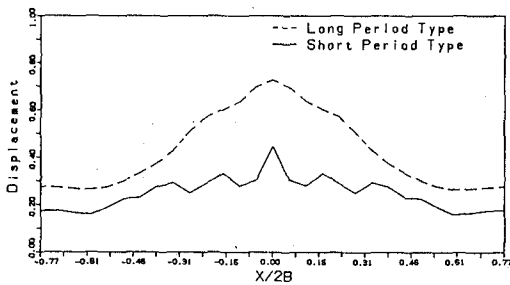


図9 模擬地震波入射時の変位・加速度の最大応答分布