

I-441 不整形基盤上の沖積地盤の震動解析

岡山大学 工学部 正員 竹宮 宏和

岡山大学 大学院学生員 小野 正樹

岡山大学 大学院学生員 菅野 由人

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、前報でその影響をBEMの間接法(ソース法)から調べたが、今回は、FEMとのハイブリッド法、また直接法で解析したのでそれらの比較を報告する。

2. 定式化 解析対象地盤は、一様な半無限体領域Ⅰと有限地盤領域Ⅱとからなる。地盤入力に対する領域Ⅰの応答は、自然地盤(領域Ⅱが領域Ⅰと同一の物性)の応答(上添字 f)と領域Ⅱの存在による散乱波の応答(上添字 s)からなり、変位、表面力において次のようになる。

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_1^f + \mathbf{u}_1^s, \quad \mathbf{t}_1 = \mathbf{t}_1^f + \mathbf{t}_1^s \quad (1), (2)$$

領域Ⅱは、一般に物性が不規則であることから、変位補間関数 $N(\mathbf{y})$ によるFEMで定式化する。一方、領域Ⅰは、一様と考えてBEMで定式化する。両者の離散化手法の結合を重み付き残差法から行う。従って、両者の連成方程式は、境界 S 上の変位、表面力(添字を付して対象領域を示す)に関して

$$\int_S \mathbf{w}_t^T (\mathbf{t}_{BEM} + \mathbf{t}_{FEM}) d\mathbf{s} + \int_S \mathbf{w}_d^T (\mathbf{u}_{BEM} - \mathbf{u}_{FEM}) d\mathbf{s} = 0 \quad (3)$$

ここに $\mathbf{w}_t$ と $\mathbf{w}_d$ は、独立な重み関数を定義している。

BEMの定式化には間接法(ソース法)と直接法を考えて、それぞれに対する支配方程式を誘導する。

〔間接法(ソース法)〕 地盤領域Ⅱからの散乱波を考えるにあたり、補助パラメータとしての一連のソース(本研究では点加振)を導入する。よって、半無限平面に対する変位、表面力のグリーン関数 $\mathbf{G}_u$, $\mathbf{G}_t$ を介して

$$\mathbf{u}_{BEM}^s(\mathbf{y}) = \int_S \mathbf{G}_u(\mathbf{y}, \mathbf{x}) \mathbf{P}(\mathbf{x}) d\mathbf{s}(\mathbf{x}) \approx \sum_e \mathbf{G}_u(\mathbf{y}, \mathbf{x}_e) \mathbf{P}_e \quad (4)$$

$$\mathbf{t}_{BEM}^s(\mathbf{y}) = \int_S \mathbf{G}_t(\mathbf{y}, \mathbf{x}) \mathbf{P}(\mathbf{x}) d\mathbf{s}(\mathbf{x}) \approx \sum_e \mathbf{G}_t(\mathbf{y}, \mathbf{x}_e) \mathbf{P}_e \quad (5)$$

式(3)の重み関数の選択を

$$\mathbf{w}_t(\mathbf{y}) = \mathbf{u}_{FEM}(\mathbf{y}) = \mathbf{N}(\mathbf{y}) \hat{\mathbf{u}}, \quad \mathbf{w}_d(\mathbf{y}) = \mathbf{t}^s(\mathbf{y}) \quad (6), (7)$$

とすると、 S 上の表面力がFEM内部領域とつり合うことを考慮して

$$\mathbf{H}^T \mathbf{P} + (\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \hat{\mathbf{u}} = -\mathbf{P}_b, \quad \mathbf{G}^T \mathbf{P} - \mathbf{H} \hat{\mathbf{u}} = \mathbf{H} \mathbf{u}^f \quad (8), (9)$$

を得る。 $\mathbf{P}$ を消去した結果は、

$$[(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) + \mathbf{K}_{bb}] \hat{\mathbf{u}}_{FEM}^T = -\mathbf{P}_b^f + \mathbf{K}_{bb} \mathbf{u}_b^f \quad (10)$$

但し、 $\mathbf{K}_{bb} = \mathbf{H}^T \mathbf{G} \mathbf{H}$

$$\mathbf{G} = \int_S \mathbf{G}_u^T(\mathbf{y}, \mathbf{x}_e) \mathbf{G}_t(\mathbf{y}, \mathbf{x}_e) d\mathbf{s}(\mathbf{y}) \quad \mathbf{H} = \int_S \mathbf{G}_u^T(\mathbf{y}, \mathbf{x}_e) \mathbf{N}(\mathbf{y}) d\mathbf{s}(\mathbf{y})$$

$$\mathbf{P}_b = \int_S \mathbf{N}^T(\mathbf{y}) \mathbf{t}^f(\mathbf{y}) d\mathbf{s}$$

$\mathbf{M}$ と $\mathbf{K}$ は、領域ⅡのFEMによる質量、剛性マトリックスを定義している。

〔直接法〕 領域Ⅰの散乱波場に対する支配方程式は、一般に

$$\hat{\mathbf{G}} \hat{\mathbf{t}} = \hat{\mathbf{H}} \hat{\mathbf{u}} \quad (11)$$

と表される。BEMとFEMにおいて同一の内挿関数を使用すると、それらの結合条件は、式(3)において、表面力に関するもののみとなる。そして、重み関数として

$$\mathbf{w}_i(\mathbf{y}) = \mathbf{N}(\mathbf{y}) \hat{\mathbf{u}} \quad (12)$$

を採ると

$$\mathbf{L} \hat{\mathbf{t}} + (\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{u} = -\mathbf{P}_b \quad (13)$$

但し $\mathbf{L}$ は、変位と表面力の内挿関数の積の積分から得られる。式(11)と式(13)から

$$[(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) + \mathbf{K}_{bb}] \mathbf{u} = -\mathbf{P}_b^f + \mathbf{K}_{bb} \mathbf{u}_b^f \quad (14)$$

3. 解析例 本研究の解析モデルとしては、不整形基盤形状を半円と仮定し、図 1. のように、境界面内部を領域Ⅱ、境界面外部を領域Ⅰとして、数値シミュレーションを行い、領域Ⅰ、Ⅱにおける地表面の自然地盤応答に対する応答倍率を求めた。

〔面外波：SH波〕 BEM間接法とBEM間接法-FEMによるハイブリッドの 2つの手法を用いて結果の比較検討を行った。BEM間接法においては、オフセットを半径の 3割としてソースポイントを 19個、境界上の節点を 23個にして解析を行い、FEMのメッシュは、図 2. に示す形で解析を行った。

〔面内波：P,SV波〕 面内波に関しては、BEM間接法、及びBEM直接法による解析を行い、比較検討している。間接法では、波数積分をチェビシェフの多項式近似を用いて行い、その項数を 80とした。また、オフセットは、面外波の場合と同じとし、境界S上を 36個、仮想境界 S_1' 、 S_2' 上をそれぞれ 18個の節点に離散化した。（図 1. 参照） 一方、直接法では、波数積分にはガウス積分を適用している。また、グリーン関数の計算において加振点と応答点が一致するときに特異積分を行う必要が生じるが、剛体変位条件を用いて回避している。境界S上の節点数は、25とした。なお、BEM直接法-FEMによるハイブリッド法の結果は当日発表する予定である。

4. 考察 以上の解析結果から、不整形基盤層上に軟弱地盤が沖積した部分では、自然地盤の応答に比べて、2~4倍程度以上の変位が生じる点が見られ、このような地形に構造物を建設する場合には、この影響を考慮する必要があると思われる。

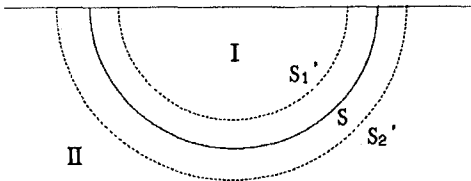


図 1. 間接法

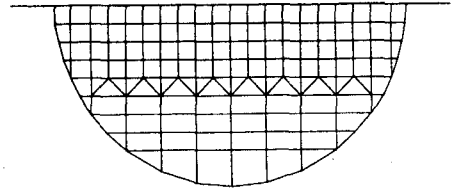
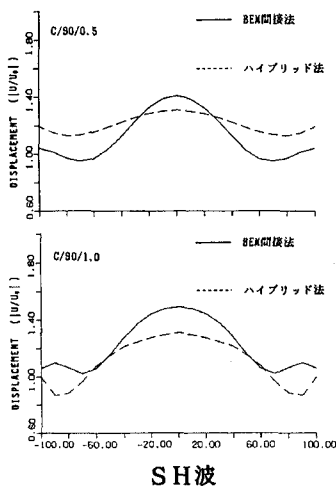
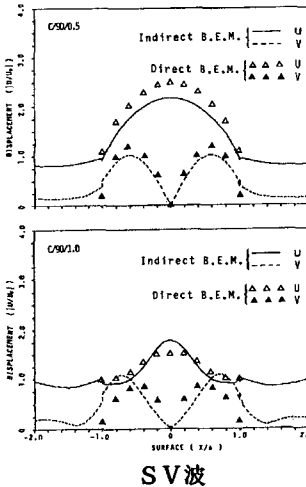


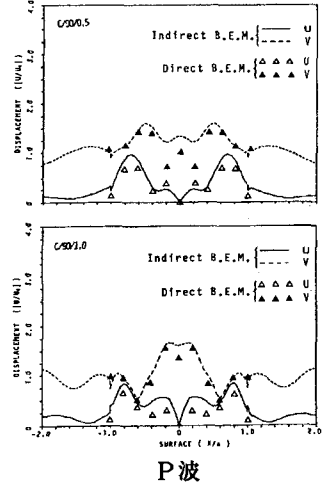
図 2. ハイブリッド法



SH波



SV波



P波

- 参考文献 1) 結城良治、木須博之；境界要素法による弾性解析；1987
2) 竹宮宏和他；不整形基盤を考慮した地盤-構造物系の耐震解析；第43回 土木学会大会；1988