

不整形基盤層を考慮した地盤一構造物系の耐震解析

岡山大学 正会員 竹宮 宏和  
 岡山大学 学生員 小野 正樹  
 (株)建設技術研究所 田中 宏明

1. まえがき 近年の地震による被害は、新しく開発された丘陵地や埋立地などの不規則な地層構成を有する造成地盤に集中する傾向がある。また、都市の立地する地盤全域や、広域的な拡がりを持つ長大構造物を対象とする場合には、周辺の表層地盤の地形的な変化を考慮する必要がある。本研究は、以上の観点から、不整形基盤層上に軟弱地盤が沖積した場合の波動解析手法を提案している。Fig.1 に示す沖積谷を対象に境界要素法(BEM)、有限要素法(FEM)とBEMのハイブリッド法を用いて定式化を行い、数値解析を通して不整形基盤層の影響を明らかにしている。

2. 定式化 BEMによる定式化では、波動方程式を満足する基本解(グリーン関数)<sup>1)</sup>の評価が重要である。対象とする地盤領域は半無限の拡がりを持つており、半無限体に対するグリーン関数(自由表面で応力が零)の評価が必要とされる。しかし、半無限体に対するグリーン関数は解析的には求め難く、波数領域における無限積分項を含んだ形で定式化される。したがって、無限積分項の評価が解の精度を左右する重要なファクターとなる。本研究では、精度、演算時間共に優れたチェビシェフ多項式<sup>2)</sup>を用いて無限積分項を評価している。

<境界要素法による定式化> 対象とする沖積谷は任意形状を持ち、興行方向へは無限の拡がりを持つ平面歪を仮定する。境界Γによって分割される領域I、IIは波動媒体として異なる材料特性を持つ様な等方均質弾性体とする。領域I、IIは、境界面で接合され、変位の連続性と応力のつり合い条件を満足するものとする。

入射波は、水平面に対して任意の傾斜角で入射する面外波(SH波)、面内波(P波、SV波)とする。領域Iにおける変位場U<sub>1</sub>は入射波と反射波による変位場U<sub>1</sub><sup>i</sup>と境界Γによって生じる散乱波による変位場U<sub>1</sub><sup>s</sup>、領域IIにおける変位場U<sub>2</sub>は、境界Γによって生じる散乱波による変位場U<sub>2</sub><sup>s</sup>となる。

$$U_1 = U_1^i + U_1^s, \quad U_2 = U_2^s \quad (1)$$

領域I、IIの散乱波による変位場U<sub>1</sub><sup>s</sup>、U<sub>2</sub><sup>s</sup>は、境界Γからわずかに離れた仮想境界C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>に加振力を想定したソース問題によって理解できる(Fig.2 参照)。つまり、グリーン関数G<sub>ij</sub>を用いて、次式のように表される。

$$U_1^s = \int_{C_1} G_{ij}(P, Q) p_j(Q) dS_{C_1}, \quad U_2^s = \int_{C_2} G_{ij}(P, Q) p_j(Q) dS_{C_2} \quad (2)$$

ただし、p(Q)は未知加振外力、Qは加振点、Pは応答点を示す。境界Γ、仮想境界C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>に離散化を施し、境界条件、すなわち、境界Γでの変位の連続性(U<sub>1</sub>=U<sub>2</sub>)と、応力のつり合い条件(σ<sub>1</sub>=σ<sub>2</sub>)を導入すれば、

$$\sum_{m=1}^N p_m(Q_m) G_{ij}(P_L, Q_m) - \sum_{n=1}^N p_n(Q_n) G_{ij}(P_L, Q_n) = -U_1^i(P_L) \\ \sum_{m=1}^N p_m(Q_m) G_{ij}(P_L, Q_m) - \mu_2/\mu_1 \sum_{n=1}^N p_n(Q_n) G_{ij}(P_L, Q_n) = -\sigma_1^i(P_L) \quad (3)$$

となる。ただし、μ<sub>1</sub>、μ<sub>2</sub>はそれぞれ領域I、IIのせん断弾性定数を示す。簡略化のためマトリックスで示せば、

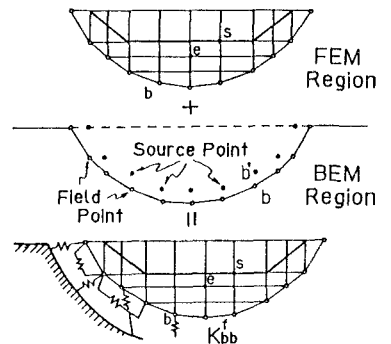
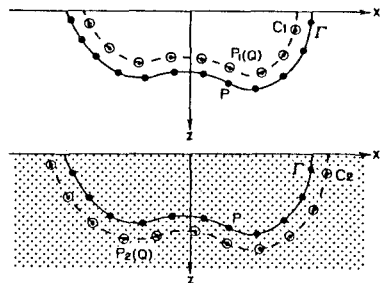
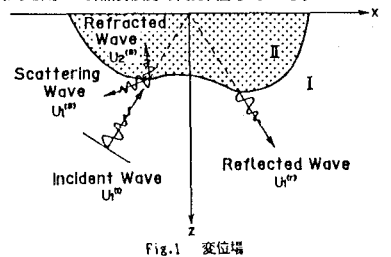
$$G x = b \quad (4)$$

となり、前式より未知加振外力を含むベクトルxを求めれば、

$$x = [ [ \text{conj}(G) ]^T G ]^{-1} [ \text{conj}(G) ]^T b \quad (5)$$

となる。したがって、式(1)、(2)を考慮して任意点の変位と応力が計算できる。

<ハイブリッド法による定式化> 有限要素法(FEM)は複雑な形状の構造物基礎を含む近傍地盤に対してモデル化が容易であり、境界要素法(BEM)は、無限境界をもつ遠地盤解析に対して、エネルギーの逸散減衰が捉えられる。本研究では、両手法の利点を取り入れたハイブリッド法の定式化も行っている。Fig.3 に示すようにサブストラクチャ法に従って、近傍地盤(FEM)と遠地盤(BEM)領域に分割する。両領



域は、インターフェイスb上で変位の連続性と応力のつり合い条件を満足する。媒体1のみからなる領域の仮想境界b'上に離散力を与え、グリーン関数を用いてインターフェイスb上の応答を求める。次に、インターフェイスbを直接離散化して得られる離散応答値との両力学系でMaxwell-Bettiの相反定理を適用すれば、

$$\sum_{\text{全要素}} \left[ \left\{ \int_{S_a} G_{00}^T(x, \xi) N^e(x) dS(x) \right\} \hat{u}_b(\xi) \right] = \sum_{\text{全要素}} \left[ \left\{ \int_{S_a} G_{00}^T(x, \xi) G_1^T(x, \xi) dS(x) \right\} \hat{t}_b(\xi) \right] \quad (6)$$

ただし、 $G_{00}$ は変位のグリーン関数、 $G_1$ は応力のグリーン関数、 $N$ は内挿関数、 $\hat{u}_b, \hat{t}_b$ はインターフェイスbにおける離散変位値および離散応力値を示す。簡略化のため、マトリックスで表せば、

$$G \hat{t}_b = H \hat{u}_b \quad (7)$$

となる。したがって、インターフェイス節点bの節点力 $\hat{P}_b$ 、節点変位 $\hat{u}_b$ の関係は、

$$\hat{P}_b = (H^T G^{-1} H) \hat{u}_b = K_{bb}^1 \hat{u}_b \quad (8)$$

となる。ここで、 $K_{bb}^1$ は、遠地盤領域の地盤インピーダンスである。一般にFEM領域の運動方程式は、次式で与えられる。

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = P - P_b \quad (9)$$

ただし、 $M, C, K$ は、質量、減衰、剛性マトリックスで、 $\ddot{u}, \dot{u}, u$ は、加速度、速度、変位、 $P$ は外力、 $P_b$ は遠地盤との連成力ベクトルである。ここで、定常調和振動を考え、動的剛性を $D$ とし、内部節点iとインターフェイス節点bとに分割マトリックス表示すれば、

$$\begin{bmatrix} D_{ii}^n & D_{ib}^n \\ D_{bi}^n & (D_{bb}^n + K_{bb}^1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{u}_i \\ \hat{u}_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_i^n \\ K_{bb}^1 u_b^0 - P_b^0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

となる。ここで、遠地盤領域の地盤インピーダンス $K_{bb}^1$ と連成力を含んだ形でFEM解析を行う。

**3. 数値解析例および考察** 本研究では、円形、楕円形、逆三角形の沖積谷を対象に、入射波の種類、入射角 $\theta$ 、無次元振動数 $\eta = 2a/\lambda$ をパラメータに地表面応答を求めている。ただし、 $a$ は沖積谷の半幅、 $\lambda$ は入射波の波長である。Fig.4,5,6に、SH波、P波、SV波入射に対する円形沖積谷の無次元化地表面応答を示す。同図より、沖積層の堆積している地盤上で大きく増幅している地点があり、不整形基盤面の影響が明らかとなった。

**4. 結論** 本研究によって得られた結果を参照すれば、基盤面の形状によって変位の出方にかかなりの差異が見られる。また、入射波振動数が高まるにつれて、変位の変化が著しくなる傾向がうかがわれる。実際問題への適用に際しては、以上の2点が重要なポイントであろう。

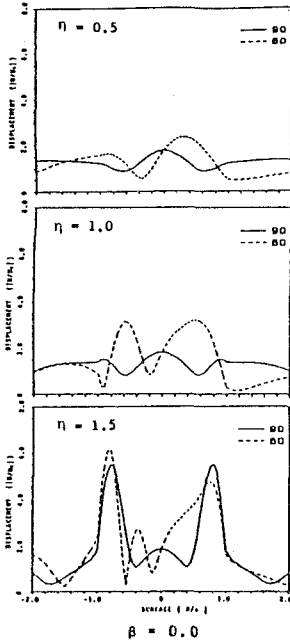


Fig.4 地表面応答 (SH波)

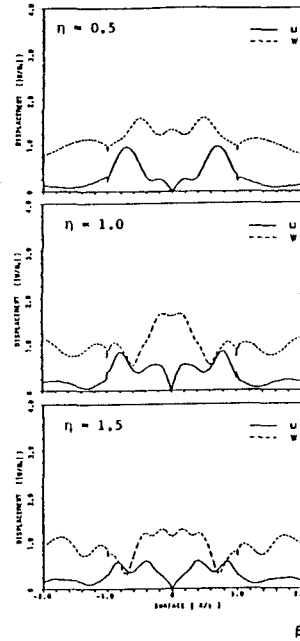


Fig.5 地表面応答 (P波)

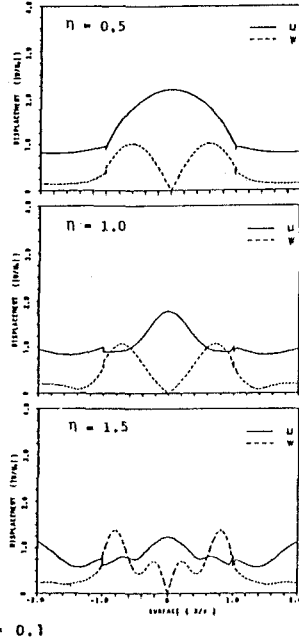


Fig.6 地表面応答 (SV波)

$v = 1/3$   
 $\mu_1/\mu_2 = 6.0$   
 $V_{p1}/V_{s1} = 2.0$   
 $V_{s1}/V_{s2} = 2.0$   
 $V_{p1}/V_{p2} = 2.0$   
 $V_{p2}/V_{s2} = 2.0$

参考文献

- 1) H.Dravinski; Scattering Of Elastic Waves By An Alluvial Valley Of Arbitrary Shape; Report No.CE80-06; 1980
- 2) C.W.Cienschaw and A.R.Curtis; A Method For Numerical Integration On An Automatic Computer; Numerische Mathematik 2. pp.197-205; 1960