

B I E Mによる弱層周辺地盤の動的挙動解析

京都大学工学部 正員 小林昭一
 京都大学工学部 正員 田村 武
 京都大学工学部 学生員 ○木嶋 健

1. はじめに

弱層及びその周辺が、地震時どのような挙動を示すかについては、いまだに不明確な点が多い。そこで本研究では、地震波動としてP波・SV波を仮定し、これらが弱層を含む半無限地盤に入射した際の定常応答について、境界積分方程式法 (Boundary Integral Equation Method) 及び有限要素法 (Finite Element Method) を用いて数値解析を行なった。BIEM, FEM はそれぞれ、領域が無限にまで及ぶ場合、領域内の物理定数が異なる場合に定式化が容易である。ここでもこの両者の特徴を生かして、外部領域にBIEMを、内部領域にFEMを使用している。

2. モデルの定式化

ここでは、地盤を等方均質な2次元線形弾性体と仮定する。モデル形状は下図に示すとおりである。領域($D_i + \partial D_i + \partial D_{ii} + \partial D_{ir}$)においてはBIEMによる定式化を、領域($D_e + \partial D_e + \partial D_{ir}$)においてはFEMによる定式化を行なう。ただし、境界 ∂D_{ir} 上において表面力が釣り合い、変位が連続するという条件を満足しなければならない。

(i) 外部問題

2次元定常弾性問題の基本特異解は次のように与えられる。

$$\Gamma_i^{(0)}(x, z) = \frac{1}{4\pi\mu} \left[H_0^{(0)}(k_r r) \delta_{ik} - \frac{1}{k_r} \left\{ H_0^{(0)}(k_r r) - H_0^{(0)}(k_l r) \right\} \delta_{ik} \right] \quad (1)$$

(ここに、 $r = |x - x_i|$, k_l, k_r はそれぞれP波, SV波の波数)

Betti の相互作用の定理を用いると、領域($D + \partial D$)において、次の境界積分方程式が成立する。

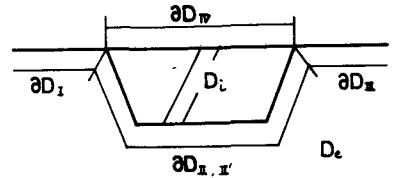
$$\frac{1}{2} u_k(x) = \int_{\partial D} \left\{ \Gamma_i^{(0)}(x, z) t_i(z) - \Gamma_{ir}^{(0)}(x, z) u_i(z) \right\} d\zeta \quad (x \in \partial D) \quad (2)$$

一方、領域内にある点の変位、表面力は、平面入射波、平面反射波、散乱波によるものの和で与えられる。外部領域のように領域が無遠にまで及ぶ場合、無限遠での境界条件として、radiation condition を満足しなければならない。これを満足する変数として、ここでは散乱波によるものを考えた。

式(2)を区間($\partial D_i + \partial D_{ii} + \partial D_{ir}$)にわたって適用し、離散化を行なうと、結局次に示す方程式が得られる。なお、 u_s, t_s は、それぞれ散乱波による変位、表面力を表わしている。

$$\begin{bmatrix} T_{\partial D_i} & T_{\partial D_{ii}} & T_{\partial D_{ir}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s(\partial D_i) \\ u_s(\partial D_{ii}) \\ u_s(\partial D_{ir}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{\partial D_i} & U_{\partial D_{ii}} & U_{\partial D_{ir}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_s(\partial D_i) \\ t_s(\partial D_{ii}) \\ t_s(\partial D_{ir}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

(ここに T: 2重層 U: 1重層)



(iii) 内部問題

基礎式は動弾性の基礎方程式より導かれる。

$$\int_D (v_{i,j} T_{ij} - \rho \omega^2 u_i u_i) ds = \int_{\partial D} v_i t_i dc \quad (4)$$

(ただし、 v_i は任意の変位ベクトル)

領域 $(D_c + \partial D_c + \partial D_w)$ の要素分割を行ない、式(4)を適用すると、結局次に示す式が得られる。

$$\begin{bmatrix} K_{\partial D_c} & K_{D_c + \partial D_w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(\partial D_c) \\ u(D_c + \partial D_w) \end{bmatrix} = [F_{\partial D_c}] (t(\partial D_c)) \quad (5)$$

(K, F は、形状関数及び物理定数に依存する係数)

(iv) 定式化

$\partial D_c, \partial D_w$ の区間については、波長の2倍程度にとどめた。一方、境界上では表面力のつり合い条件(6)、変位の連続条件(7)、半無限地盤上での応力 free の条件(8)が成り立つ。

$$t(\partial D_c) = -t(\partial D_w) \quad (6) \quad u(\partial D_c) = u(\partial D_w) \quad (7) \quad t(\partial D_c) = t(\partial D_w) = 0 \quad (8)$$

これを用いると、(3)と(5)は次のような1つの方程式で表わすことができる。

$$\begin{bmatrix} T_{\partial D_c} & T_{\partial D_w} & T_{\partial D_w} - U_{\partial D_w} & 0 \\ 0 & K_{\partial D_c} & 0 & F_{\partial D_c} & K_{D_c + \partial D_w} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(\partial D_c) \\ u(\partial D_w) \\ u(D_c + \partial D_w) \\ t(\partial D_c) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{\partial D_c} u_{IR}(\partial D_c) + T_{\partial D_w} u_{IR}(\partial D_w) + T_{\partial D_w} u_{IR}(\partial D_w) \\ -U_{\partial D_c} t_{IR}(\partial D_c) - U_{\partial D_w} t_{IR}(\partial D_c) - U_{\partial D_w} t_{IR}(\partial D_w) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

(ここに、 $u_{IR} = u_I + u_R$ であり、 u_I は平面入射波によるもの、 u_R は平面反射波によるものをさす)

この式を解けば、境界上の変位、表面力、内部の変位を求めることができる。

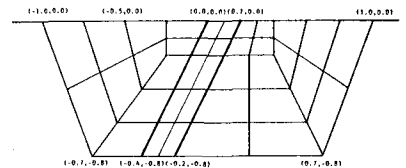
3. 数値計算結果

内部領域での要素分割は右図に示すとおりである。図の太線で囲まれた部分を弱層として数値計算を行なった。なお、BIEM, FEM 共に、離散化にあたっては2次アイソパラメトリック要素を用いている。

下図は、振幅1、波長1.57のSV波が鉛直下方から入射した時の応答を表わしている。地盤条件は以下に示すとおりである。

弱層以外 $\rho = 1.0 \quad \nu = 0.25 \quad E = 1.0$

弱層部分 $\rho = 1.0 \quad \nu = 0.25 \quad E = 0.01$



REAL PART, IMAGINARY PART はそれぞれ、原点に波の腹がきた場合、波の節がきた場合の挙動を表わしている。

0.0 0.5 地盤のスケール
0.0 10.0 変位のスケール

REAL PART
SV-WAVE
W.L.=1.57
I.R.=0.0

0.0 0.5 地盤のスケール
0.0 10.0 変位のスケール

IMAGINARY PART
SV-WAVE
W.L.=1.57
I.R.=0.0

