I-436　ＢＥＭの地盤と基礎の３次元動的相互作用問題への応用

岡山大学工学部　正　員　竹宮　宏和
岡山大学大学院　学生員　○王　燦雲

１．まえがき

地盤と基礎の動的相互作用問題において、数値解析手法として有限要素法（ＦＥＭ）が広く使用されている。しかし、波動伝播媒体としての地盤は３次元空間および半無限遠の境界条件より、モデル化において高度な工夫を要する。一方、境界要素法（ＢＥＭ）はこのような媒体内の波動伝播問題に、その特性上対応し易い。本研究では、層状地盤を念頭において、深位方向に離散化したＷａａｓ，Ｋａｕｓｅｌのグリーン関数（３次元に対応する準解析解）[1),2)]を利用して、ＢＥＭより地盤と基礎の動的相互作用を解析する。そして従来の３次元軸対称ＦＥＭよりの解と比較する。

２．定式化

基礎と接する地盤内の動的つりあいのＮａｖｉｏｒ式を、両者のインターフェイスにおける変位、応力に関する積分方程式で表すと、一般に

$$[C]^i\{U\}^i + \int_s [P^*]\{U\}\,ds - \int_s [U^*]\{P\}\,ds = 0 \qquad (1)$$

ここで、$[C]^i$ は加振点ｉの近傍の境界条件から決まる定数マトリックス、$\{U\}$ は変位ベクトル、$[U^*]$、$[P^*]$ はそれぞれｉ点を加振することによって得られる媒体内の変位と応力のグリーン関数マトリックス、Ｓはインターフェイスでの積分領域である。なお、本研究で用いたグリーン関数は、まず円筒座標系上で深さ方向に離散化して（線形内挿関数を使用）、周方向にはフーリエ級数展開をし、半径方向には解析解を求めている。したがって、直交座標への変換後のものを使用する。同積分領域の離散化を行うと、一般的に、ＢＥＭの基本方程式

$$[G]\{P\} = [H]\{U\} \qquad (2)$$

を得る。ここに$\{U\}$、$\{P\}$はインターフェイス要素の変位および節点力ベクトル、$[H]$ は一般に$[P^*]$、$[C]^i$を合わせて各要素に対して得られるマトリックス、$[G]$ は$[U^*]$から各要素に対して得られるマトリックスである。

つぎに、$[G]$，$[H]$ の求める際の積分法について述べる。加振点を含まない要素における積分は要素内において、変位、応力ともに一定と仮定して数値的に行った。加振点を含む要素においては、グリーン関数が特異となるので、等価円要素を用いて解析的に積分を行った。式が繁雑になる関係で、ここでは、Ｘ方向加振により生じたＸ方向変位の積分のみを示す。

$$\iint P_x\, U^*_{xx}\, ds = P_x \iint \left(\overline{U}^*_\rho \cos^2\theta + \overline{U}^*_\theta \sin^2\theta \right) \rho\, d\theta\, d\rho = \pi P_x \int_0^a \left(\overline{U}^*_\rho + \overline{U}^*_\theta \right) \rho\, d\rho \qquad (3)$$

ここで、$\overline{U}^*_\rho$ は半径方向の、$\overline{U}^*_\theta$ は周方向のグリーン関数の振幅をそれぞれ表す。このグリーン関数の特異項は、ハンケル関数の級数展開式を、各項ごとに積分して求めた。

特に、剛体基礎の場合、各要素の変位は、基準点に関する変位$\{\Delta\} = \{U_x, U_y, U_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z\}^T$ で表すと、

$$\{U\} = [T]\{\Delta\} \qquad (4)$$

同様にして、合力および合モーメント$\{F\} = \{F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z\}^T$ と要素応力　の関係は、

$$\{F\} = [T]^T [A]\{P\} \qquad (5)$$

ここに、$[A]$ は要素面積の対角マトリックスである。このときにインピーダンス　は、次のように表される。

$$[K] = [T]^T [A][G]^{-1}[H][T] \qquad (6)$$

3．数値解析例

解析対象を、剛基盤面をもつ地盤上の表面剛体基礎とした。そのＢＥＭモデル化を図１に示す。深さ方向の離散化は、鉛直方向伝播のせん断波を１０Ｈｚまで、振動数領域で考慮できるようにした。図３（実線）は、当該基礎に対する周辺地盤のインピーダンス関数を描いたものである。比較のため、ＦＥＭによる解を、同図に破線で描いた。ＦＥＭのモデル化は、図２に示すように、対象地盤－基礎系を軸対称とし、側方境界には、地盤応答を周方向にフーリエ級数展開した後、波数に関する固有モード展開から得られるエネルギー伝達境界要素を導入している。対象有限領域内はアイソパラメトリックリング（４節点）要素で離散化している。[3] ＢＥＭとＦＥＭの結果を比べて、全般的にほぼ良好な一致が得られているが、ＢＥＭの方がＦＥＭより僅か小さめにインピーダンスを評価している傾向がある。根入れ基礎についても、著者らはＢＥＭの手法を現在開発中である。

なお、本研究を進める中で、岡山大学大学院生の合田和哉、田中宏明君の御協力を得た。

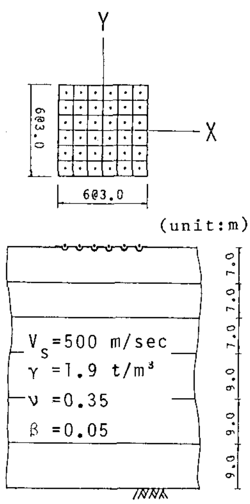

図1　ＢＥＭモデル

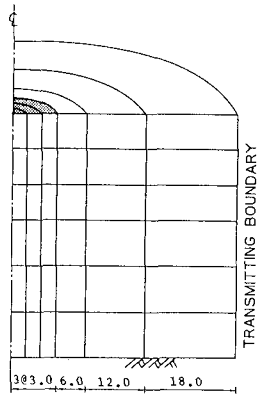

図2　ＦＥＭモデル

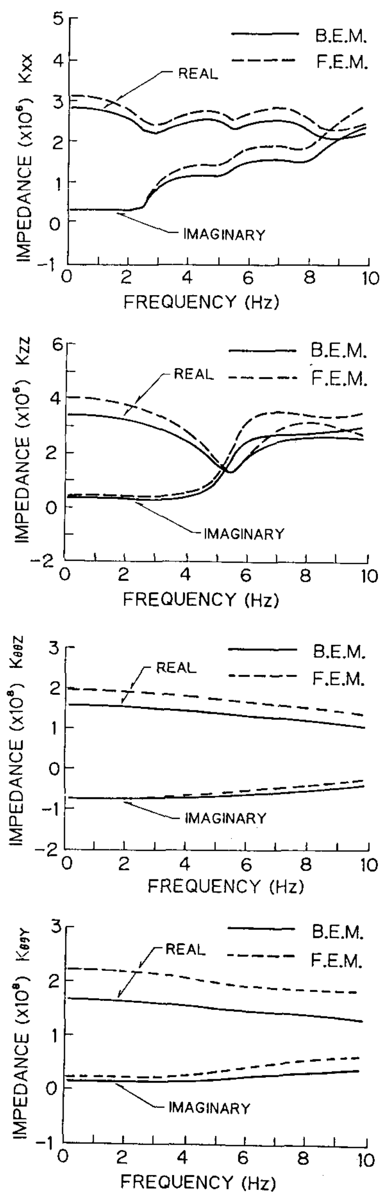

図3　地盤インピーダンス

《参考文献》

1) E.Kausel,R.Peek:Boundary Integral Method For Stratified Soils,M.I.T. Resarch Report R82-50,Order No.746,June 1982

2) G.Waas,H.R.Riggs And H.Werkel:Displacement Solutions For Dynamic Loads In Transversely-Isotropic Stratified Media Earthquake Engineering And Structural Dynamics,Vol.13, 1985,pp173-193

3) H.Takemiya :Three-Dimensional Seismaic Analysis For Soil -Foundation-Superstructure Based On Danamic Substructure Method,PROC.OF JCL Structural Eng./earthquake Eng.Vo12,No. 1,1985.4.