102—⑩　境界要素法による根入れ基礎の動的地盤反力解析

福岡大学　正員　○　大西和栄
佐賀大学　正員　　荒牧軍治
福岡大学　　　　　伊藤朋子

1. まえがき

地震時における地盤と構造物の相互作用の問題はLysmer等の有限要素解析法の確立により大きく進歩した。地盤と構造物の相互作用を有限要素法で解析する際に問題となる点は，半無限に拡がる領域を有限の領域で近似することによって現れる波動の反射である。Lysmer等[1]は水平方向への波動伝達境界を用いて反射の問題を解決した。また 3次元問題については 2次元の伝達境界と側面のダッシュポット境界とを組み合わせて解析する方法を提案している。しかし一般的な 3次元問題を有限要素法で解析することは実際には非常に困難である。最近境界要素法と呼ばれる数値計算法が注目されており，種々の分野で成果をあげつつある。境界要素法は，領域の境界における変数のみを未知数として離散化するため，次元を減ずることができるばかりでなく，無限領域を取り扱うのに便利である。特に境界における反射が問題となる波動問題に適している。境界要素法を用いた地盤- 構造物の相互作用の解析は， 2次元モデルについては小林等[2]の，又 3次元モデルについてはOttenstreuer[3]， Dominguez[4]等の優れた研究がある。本研究は 3次元モデルにおける地盤- 構造物系の相互作用について，境界要素法を用いる総括的な定式化を行なったものである。

2. 地盤- 構造物モデル

地盤- 構造物系を図- 1 に示すような，上部構造物，剛基礎，表面層 Ω_1，下層又は基盤層 Ω_2 でモデル化する。

応答は全て定常応答であるものとし，時間に対しては Fourier変換された領域を考えるとき上部構造物- 剛基礎の運動方程式は一般に次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_r \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{\tilde{u}}_r \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sr} \\ K_{rs} & K_{ss} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u_s \\ \tilde{u}_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_r \end{Bmatrix} \qquad (1)$$

ただし M_s， M_r， u_s， u_r， F_s， F_r はそれぞれ上部構造物および剛基礎のマスマトリックス，変位ベクトル，外力ベクトルを示し，また K は複素剛性マトリックスを示す。

領域 Ω_1 は自由表面 Γ_f，剛基礎上表面 Γ_r，領域 Ω_2 との境界表面 Γ_{b1}の 3種の境界面を持つ。境界要素法を用いて次の方程式が得られる。

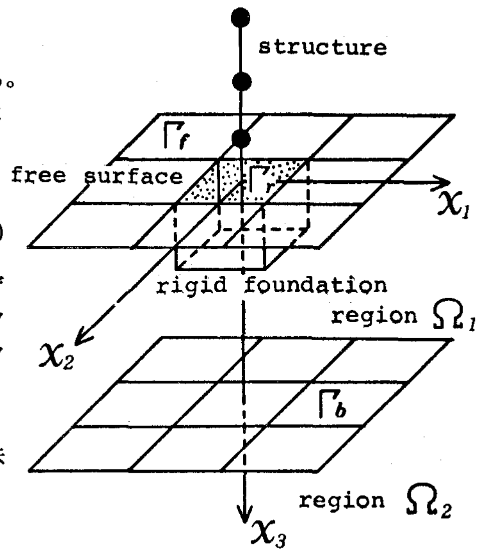

Fig.1　Soil-Structure Model

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} u_r \\ u_f \\ u_{b1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} p_r \\ p_f \\ p_{b1} \end{Bmatrix} \qquad (2)$$

ただし u_r， u_f， u_{b1}， p_r， p_f， p_{b1} はそれぞれ剛基礎表面上要素，自由表面上要素，部分領域分割要素における変位ベクトル，応力ベクトルを示す。

領域 Ω_2 の境界Γ_{b2}(表裏 2枚の境界要素面を考える) に対して次式が与えられる。

$$\bar{H}u_{b2} = \bar{G}p_{b2} \qquad (3)$$

剛基礎は 3変位， 3回転，計 6コの自由度を有する。すなわち式(2) の u_r は，式(1) の $\tilde{u}_r$ を用いて次のように表わされる。

$$u_r = T\tilde{u}_r \qquad (4)$$

ただしTは剛基礎表面要素数の 3倍× 6のマトリックスである。

またΓ_b の 2枚の境界面において連続および力のつり合いより次式が成り立つ。

$$u_{b1} = u_{b2} \quad , \quad p_{b1} + p_{b2} = 0 \qquad (5)$$

3．解析概要

3・1） 根入れ基礎の複素剛性マトリックス

式 (2)の両辺にAG^{-1}を掛け，$AG^{-1}H$ をQとすると，

$$\begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_r \\ u_f \\ u_{b1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_r & & \\ & A_f & \\ 0 & & A_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_r \\ 0 \\ p_{b1} \end{Bmatrix} \qquad (6)$$

式(3)，式(5)を用いるとu_fとu_{b1}をu_rで表わすことが出来る。式 (6)の第 1行目を示すと

$$K_0 u_r = A_r p_r \qquad (7)$$

両辺にT^{T}をかけu_rを$\tilde{u}_r$で示すと

$$T^{\mathrm{T}} K_0 T\tilde{u}_r = T^{\mathrm{T}} A_r p_r \qquad (8)$$

式 (8)の右辺は図- 2 の外力ベクトルFに等しいので剛体基礎の複素剛性マトリックスは次式で与えられる。

$$K = T^{\mathrm{T}} K_0 T \qquad (9)$$

3・2） 上部加振に対する応答

上部加振に対する応答は式 (1)の右辺の F_s ，F_r に外力を加え (1)～ (5)を連立にすることで求めることができる。ただし3・1）で複素剛性マトリックスが得られているので，それに上部構造物の影響を加味してやれば式 (1)のみで求められる。

3・3） 底部加振に対する応答

地震時応答のように底部加振の場合は図- 4 に示すような入射波を与えると式 (1)～ (5)を連立にして求められる。特にΩ_2 が基盤層と考えられる場合はu_{b1}が既知となるので式 (6)を用いて整理すると基礎構造物に作用する力$\bar{F}$は$\tilde{u}_r$を未知量として次式で与えられる。

$$\bar{F} = T^{\mathrm{T}} A_r p_r = T^{\mathrm{T}}(Q_{11} - Q_{12}Q_{22}^{-1}Q_{21})T\tilde{u}_r - Q_{12}Q_{22}^{-1}Q_{23}u_{b1} \qquad (10)$$

式(10)を式 (1)に代入して構造物の応答 u_s ，$\tilde{u}_r$を求めることができる。

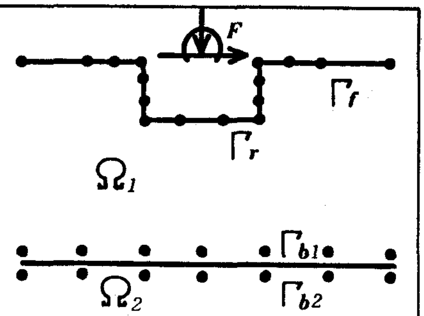

Fig.2 Stiffness

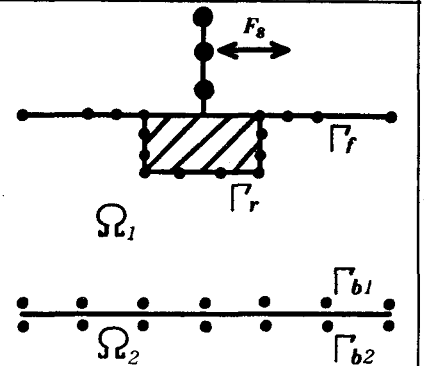

Fig.3 Upper Oscilation

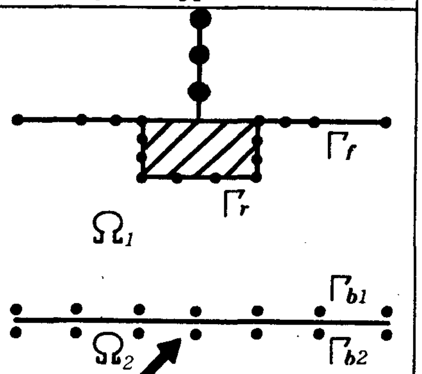

Fig.4 Incident Wave

参考文献

1) J.Lysmer and G.Waas; Shear waves in plane infinite structures. *Proc. ASCE*, 98, EM1 (1972), pp.85-105.

2) 小林 他， 定常動弾性学における積分方程式の解析的解法．土木学会年次学術講演会 (1980)

3) M.Ottenstreuer and G.Schmid; Boundary elements applied to soil-foundation interaction. pp.293-309 in *Proc. 3rd Int. Seminar* — C.A.Brebbia (1981).

4) J.Domingues and E.Alarcón; Elastodynamics. pp.213-257 in *Progress in Boundary Element Methods*, 1 — C.A.Brebbia (1981).