

電力中央研究所 正会員 塩尻弘雄
甲南大学 正会員 田口反彦

1. まえがき

動的荷重が加わった際、構造物と地盤、及び構造物が接している水との間に相互作用が生じ、構造物の動的挙動に大きな影響を及ぼすことはよく知られている。このような相互作用を解析する方法としては、構造物と地盤及び水を別個に解析し境界でマッチングさせるサブストラクチャー法と構造物、水及び地盤を一体として解析する方法がある。ともに地盤は半無限の広がりをもつものと仮定され、水については有限及び無限の広がりをもつ場合が考えられる。サブストラクチャー法は通常周波数領域で解析されるため基本的に線型解析に限られ、また、構造物と地盤、構造物と水との間の相互作用は考慮されるが、水と地盤間の相互作用は無視される場合が多い。ここで述べる方法は、前回発表した半無限地盤-構造物系の動的応答計算法¹⁾を水(有限、及び無限)も含めた系に適用できるように拡張したもので、構造物-地盤、構造物-水及び、水-地盤の相互作用が考慮でき、時間領域で解析がなされる。

2. 連成解析法

図-1に示すように構造物-水-地盤系を領域Ⅰと領域Ⅱに分割する。領域Ⅰは構造物を含み、形状が複雑でメッシュ分割も不規則で細くなり剛性も高いので有限要素法で解析し、積分法としてはImplicitなNewmark β 法($\beta=1/2$)を用いる。領域Ⅱについては田口の差分法²⁾を水を含むよう拡張したのを用い、積分法はLax-Wendroff法を用いる。以下、有限要素部、差分部、および接合部について水部の扱いを中心に概説する。

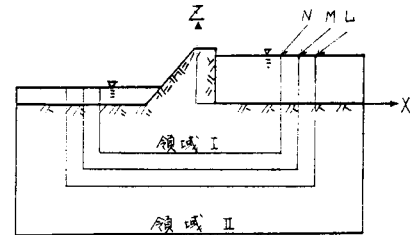


図-1 構造物・水・地盤系モデル

1) 有限要素部

接点未知バクトルは $\vec{U} = (U, W)$, あるいは $\vec{V} = (\Phi)$ である。ただし、 U , W , Φ はそれぞれ Z 方向変位及び速度ポテンシャルである。運動方程式は次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ 0 & M_w \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{W} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & -L \\ L^t & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{W} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_w \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ W \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_s \\ f_w \end{Bmatrix} \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 U は、各接点の U , W からなるバクトル、 Φ は、各接点の Φ からなるバクトルであり、 M_s , C_s , K_s は固体部の質量行列、減衰行列及び剛性行列である。 f_s , f_w は、領域Ⅰ、Ⅱ間の境界からの力を含む、固体部、水部に対する荷重バクトルである。 M_w , K_w , L は、次式で与えられる行列を全要素について重ね合せたものである。

$$M_w = \frac{\rho_w}{C^2} \int_{A_e} N^t N dA, \quad K_w = \rho_w \int_{A_e} [D_{ij}], dA, \quad L = \rho_w L_{ij} \int N^t N d\Omega \cdot 1/N_n \quad \dots\dots (2)$$

ただし、 ρ_w , C , N , L_{ij} , $1/N_n$ はそれぞれ、水の質量、水中の音速、内挿関数からなる行列、水と固体が接している辺の辺長、水と固体が接している辺の法線方向バクトルからなる行列であり、 $D_{ij} = \frac{\partial \epsilon_i}{\partial x} \frac{\partial \epsilon_j}{\partial x} + \frac{\partial \epsilon_i}{\partial z} \frac{\partial \epsilon_j}{\partial z}$, ϵ_i は接点 i に対応する内挿関数である。

(2) 差分部

接点未知ベクトルは固体部に対して $\vec{u}_s = (u, w, \sigma_x, \tau, \sigma_z)$ 水部に対して $\vec{u}_f = (\phi, \xi, \zeta)$ となる。ただし、 $u, w, \sigma_x, \tau, \sigma_z$ はそれぞれ x 方向速度、 y 方向速度、 x 方向直応力、せん断応力、 z 方向直応力であり、 $\phi = \frac{\partial \psi}{\partial t}$, $\xi = \frac{\partial \psi}{\partial x}$, $\zeta = \frac{\partial \psi}{\partial z}$ である。

対応する一階形の波動方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \phi \\ \xi \\ \zeta \end{pmatrix} = a(x) \begin{pmatrix} 0, C^2, 0 \\ 1, 0, 0 \\ 0, 0, 0 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} \phi \\ \xi \\ \zeta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0, 0, C^2 \\ 0, 0, 0 \\ 1, 0, 0 \end{pmatrix} \frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} \phi \\ \xi \\ \zeta \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

$$x \equiv \int_0^x \frac{dx'}{a(x')}$$

水面での境界条件は Lax Wendroff 法による積分では、

以下のように取扱われる。

$$\begin{aligned} \xi^{n+1} &= \xi^n + h a(x') \delta x' \phi^{(1)} + \frac{1}{2} h^2 a(x') \Delta x' a \xi^n \\ \phi^{n+1} &= \left(1 + \frac{h^2 a^2}{4h}\right)^{-1} \left\{ \phi^{(1)} - \frac{h a}{2} \zeta^{(1)} + \frac{h^2 a^2}{4h} \phi^{(1)} s_1 \right\} \\ \zeta^{n+1} &= \zeta^{(1)} + \frac{1}{2h} \left\{ \phi^{(1)} - \phi^{(1)} s_1 \right\} \\ \phi^{(1)} &= \left(1 + \frac{h^2 a^2}{4h}\right)^{-1} \left\{ \phi^n - \frac{h a}{2} \zeta^n + \frac{h^2 a^2}{4h} \phi^{(1)} s_1 \right\} \\ \zeta^{(1)} &= \zeta^n + \frac{1}{2h} \left\{ \phi^{(1)} - \phi^{(1)} s_1 \right\} \\ \delta x' f &= \frac{1}{2h} \left\{ f(x'+h) - f(x'-h) \right\} \\ \Delta x' a f &= \frac{1}{h^2} \left\{ a(x'+\frac{h}{2}) f(x'+h) + a(x'-\frac{h}{2}) f(x'-h) \right. \\ &\quad \left. - 2(a(x'+\frac{h}{2}) + a(x'-\frac{h}{2})) f(x) \right\} \end{aligned} \dots\dots\dots (4)$$

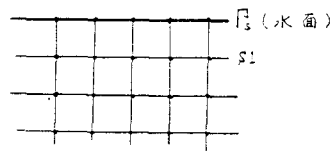


図-2 水表面部メッシュ

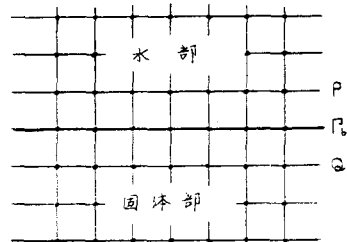


図-3 水・固体境界部メッシュ

水底での境界条件は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \xi^{n+1} &= \xi^n + h a(x') \delta x' \phi^{(1)} + \frac{1}{2} h^2 a(x') \Delta x' a \xi^n \\ \phi^{n+1} &= \phi^{(2)} + \frac{h}{2h} C^2 \frac{\lambda + 2G}{\lambda + 2G + K} \{ W a^{n+1} + \zeta_p^{n+1} \} \\ \zeta^{n+1} &= -\frac{1}{\lambda + 2G + K} \{ (\lambda + 2G) W a^{n+1} - K \zeta_p^{n+1} \} \\ W^{n+1} &= -\zeta^{n+1} \\ \sigma_z^{n+1} &= -\rho_w \phi^{n+1} \\ \phi^{(2)} &= \phi^{(1)} + h C^2 a(x') \delta x' \xi^{(1)} + \frac{1}{2} h^2 a(x') \Delta x' a \phi^{(1)} \\ \phi^{(1)} &= \phi^n + \frac{h}{2h} C^2 \frac{\lambda + 2G}{\lambda + 2G + K} \{ W a^{(1)} + \zeta_p^{(1)} \} \\ \xi^{(1)} &= -\frac{1}{\lambda + 2G + K} \{ (\lambda + 2G) W a^{(1)} - K \zeta_p^{(1)} \} \end{aligned} \dots\dots\dots (5)$$

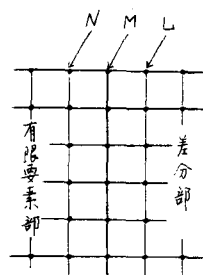


図-4 接合部メッシュ

(3) 接合部

$$\begin{aligned} \phi^n &= \bar{\psi}^n \\ \zeta^n &= \delta_x \bar{\psi}^n \\ \xi^n &= \frac{1}{2h} \{ \bar{\psi}(x, z+h) - \bar{\psi}(x, z-h) \} \end{aligned}$$

以上である。

解析法の詳細、及び解析結果については当日発表する予定である。

(参考文献)

- 1) 塩尻・田口：半無限地盤-構造拘束の動的応答計算 第37回平次学術講演会
- 2) 田口・塩尻：半無限弾性地盤の動的応答計算-1階双曲系の座標変換差分法 第37回平次学術講演会

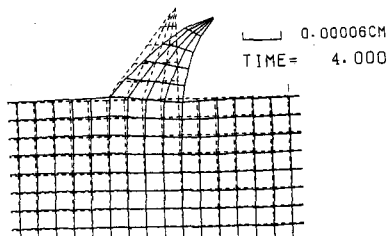


図-5 水・地盤系速度分布図例