

電力中央研究所 正会員 塩尻弘雄

甲南大学 正会員 田口友康

1. まえがき

動的荷重が加わった際構造物と地盤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、地盤と一体として解析する方法と、構造物と地盤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がある。ともに地盤は半無限の広がりを持つものと仮定されている。構造物、地盤を一体として解析する場合、通常の離散化法では半無限地盤を扱えないので仮想の境界を設けざるを得ないが、この境界で波動が反射すれば誤差が生じるので特別な工夫が必要となる。特殊なエネルギー吸収境界、半無限要素等が提案されている。

さて、これらの方は、同波数応答を求め $F \cdot F \cdot T$ により時間領域に変換するものと、直接時間領域で解析するものとに分けられる。前者に属する方法としては、サブストラクチャー法のみや、一体解析で用いられる伝達境界、半無限要素などがあげられる。しかしこの方法は、基本的に系が線型の場合に限られる。地震時には構造物、地盤が非線型挙動を示すことも予想されるので、この意味では時間領域での適切な解析法の開発が望まれる。

過去提案された時間領域解析法では、仮想の境界で実体波はよく吸収されていたが表面波の吸収は必ずしも十分とはいえなかった。そこで述べる方法は、構造物およびその周辺地盤は有限要素法、外周は田口の差分法を組合せて解析を行うもので、時間領域で解析がなされ、原理的にすべての波を吸収しうるものである。

2. 連成解析法

図-1に示すように構造物地盤系を領域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かつ細かくなり、剛性も高いので、有限要素法で解析し接分法としては、

Implicitな積分法のNewmark β 法 ($\beta = 1/4$) を用いる。領域Ⅱに

ついては田口の差分法を用い、積分法はExplicitなLax Wendroff

法で積分する。時間刻み Δt は両者同一とする。領域ⅠとⅡの接合部に

等間隔メッシュの2層(メッシュ線3本 L , M , N)をとり、最も

外側のメッシュ線 L を領域Ⅰの境界とし、中央のメッシュ線 M を領

域Ⅱの境界とする。領域Ⅰの節点未知数ベクトルは、 $\vec{U}_1 = (U, W$

)であり、領域Ⅱでの節点未知数ベクトルは、 $\vec{U}_2 = (u, w, \sigma_x,$

$\tau, \sigma_z)$ である。ただし、 $U, W, u, w, \sigma_x, \tau, \sigma_z$ はそれぞれ

x, z 方向変位、 $\dot{x}, \dot{z}$ 方向速度、 σ_x 方向直応力、せん断応力、 σ_z 方向直応力である。

数値積分の手順は次のようになる。

(i) 境界 M を含む領域Ⅱ上で $t = n\Delta t$ における $\vec{U}_2 = \vec{U}_2(t)$ が与えられているとき、Lax Wendroff法により境界 M を除いた領域Ⅱ内の $\vec{U}_2(t+\Delta t)$ を求める。

(ii) 境界 L 上で $\vec{U}_1(t)$ と $\vec{U}_2(t+\Delta t)$ が与えられているとき、 $\vec{U}_1(t+\Delta t)$ を次式で求める。

$$U(t+\Delta t) = U(t) + \frac{\Delta t}{2}(\dot{U}(t) + \dot{U}(t+\Delta t)), \quad W(t+\Delta t) = W(t) + \frac{\Delta t}{2}(\dot{W}(t) + \dot{W}(t+\Delta t))$$

(iii) 境界 L 上での $\vec{U}_1(t+\Delta t)$ と、領域Ⅰ内の $\vec{U}_1(t)$ 、 $\frac{\Delta t}{2}\dot{\vec{U}}_1(t)$ を用い、Newmark β 法により領域Ⅰ内における

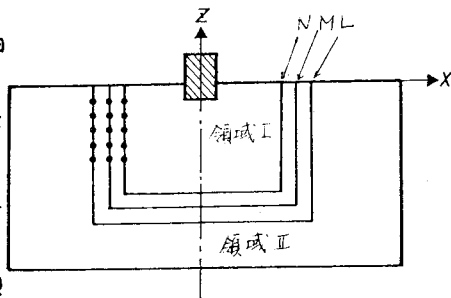


図-1 構造物・地盤系モデル

$\vec{v}_i(t+\Delta t)$, $\vec{w}_i(t+\Delta t)$ を求める。

(例)境界M上で、 $t+\Delta t$ における応力テンソル $\sigma_x(t+\Delta t)$, $\tau(t+\Delta t)$, $\sigma_z(t+\Delta t)$ を次式で求める。

$$\sigma_x(t+\Delta t) = (\lambda + 2G) \frac{1}{2} (D_x + D_{\bar{x}}) U(t+\Delta t) + \lambda \frac{1}{2} (D_x + D_{\bar{x}}) W(t+\Delta t)$$

$$\tau(t+\Delta t) = G \left\{ \frac{1}{2} (D_x + D_{\bar{x}}) U(t+\Delta t) + \frac{1}{2} (D_x + D_{\bar{x}}) W(t+\Delta t) \right\}$$

$$\sigma_z(t+\Delta t) = \lambda \frac{1}{2} (D_x + D_{\bar{x}}) U(t+\Delta t) + (\lambda + 2G) \frac{1}{2} (D_x + D_{\bar{x}}) W(t+\Delta t)$$

ここで D_x , $D_{\bar{x}}$ は前進差分, $D_{\bar{x}}$, D_x は後退差分, λ , G はラメの定数である。

3. 入力方法

構造物-地盤系への入力としては構造物本体への直接入力と、地震波入力と考えられる。前者については問題ないので、後者について述べる。とりあえずP波、およびS波の入力を考える。

X軸に対して θ の角度をもって入力してくるP波またはS波の波形関数を $f(x)$ ($x = X \cos \theta + (Z - Z_0) \sin \theta$) とする。入力波に対応した接点未知関数は次のように与えられる。

$$\vec{v}_{i,I} = \begin{Bmatrix} U_{i,I} \\ W_{i,I} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos \theta f(r - c_p t) \\ \sin \theta f(r - c_p t) \end{Bmatrix}$$

$$\text{P波入力} \quad \vec{v}_{i,I} = \begin{Bmatrix} U_{i,I} \\ W_{i,I} \\ \sigma_{x,I} \\ \tau_{x,I} \\ \sigma_{z,I} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\cos \theta f'(r - c_p t) \\ -\sin \theta f'(r - c_p t) \\ \{ \lambda (2G \cos^2 \theta + \lambda \sin^2 \theta) f''(r - c_p t) \} \\ 2G \sin \theta \cos \theta f''(r - c_p t) \\ \{ \lambda \cos^2 \theta + (\lambda + 2G) \sin^2 \theta \} f''(r - c_p t) \end{Bmatrix}$$

$$\vec{v}_{i,I} = \begin{Bmatrix} U_{i,I} \\ W_{i,I} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sin \theta f(r - c_s t) \\ -\cos \theta f(r - c_s t) \end{Bmatrix}$$

$$\text{S波入力} \quad \vec{v}_{i,I} = \begin{Bmatrix} U_{i,I} \\ W_{i,I} \\ \sigma_{x,I} \\ \tau_{x,I} \\ \sigma_{z,I} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\sin \theta c_s f'(r - c_s t) \\ \cos \theta c_s f'(r - c_s t) \\ 2G \sin \theta \cos \theta f''(r - c_s t) \\ G (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) f''(r - c_s t) \\ 2G \sin \theta \cos \theta f''(r - c_s t) \end{Bmatrix}$$

節点未知数を, $\vec{v}_i = \vec{v}_{i,I} + \vec{v}_{i,R}$, $\vec{v}_i = \vec{v}_{i,I} + \vec{v}_{i,R}$ と書くものとし, $\vec{v}_{i,R}$, $\vec{v}_{i,R}$ について解くものとする。領域IIについては、地表面の境界条件を次式のように与えて解く。

$$\sigma_{x,R} = 0, \tau_{x,R} = -\tau_{z,R}, \sigma_{z,R} = -\sigma_{x,R}$$

領域内の方程式は $\vec{v}_i$ に対してと同じである。

領域Iについては、全節点の $\vec{v}_{i,I}$, $\vec{v}_{i,R}$ からなるベクトルを W_I , W_R とすれば、 M , C , K をそれぞれ質量、減衰、剛性行列として次式で与えられる方程式を解く

$$M \ddot{W}_R + C \dot{W}_R + K W_R = F$$

$$\text{ただし、} F = -M \ddot{W}_I - C \dot{W}_I - K W_I$$

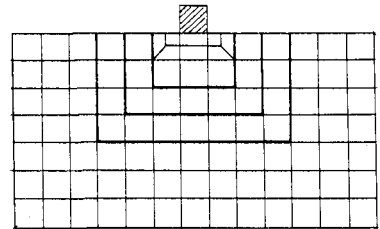


図-2 メッシュ図 (等長変換節)

4. 解析例

図-2に示す構造物-地盤系モデルに対し、構造物頂部に正弦上下加振力を加えた場合の応答を図-3に示す。地盤物性は、密度 $\rho = 2 \text{ t/m}^3$, ラーメパラメーター λ , G はそれぞれ $2.4 \times 10^9 \text{ Pa}$, $2.6 \times 10^9 \text{ Pa}$ である。比較的少ないメッシュ数でも弾性波の分散が表現されている。

5. まとめ

ここで述べた方法は、3次元の拡張、非線形問題への適用も容易であり、汎用性に富んだ方法といえる。解析法、解析結果の詳細は当日発表する。

(参考文献) 1. 田口: 動弾性波伝搬の数値解法, 電力中研報告 679003 (昭55.3)

2. 田口: The Near-field Finite Difference Solution to Linear Hyperbolic Systems, Res. Note, Kansai Univ. Oct. 1991

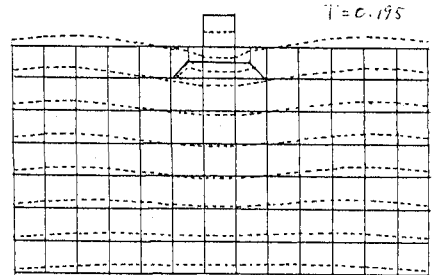


図-3 鉛直変位図 (外力振動数5 Hz)