

電力中央研究所 正員 塩尻弘雄

甲南大学 正員 田口友康

1. まえがき

地震時の構造物の挙動の解析に当っては、地震と構造物の相互作用を考慮する必要がある。それに際しては、半無限の広がりを持つ地盤中への波動伝散を適切に模擬しなければならない。このような相互作用の解析法は、周波数領域で解析しフーリエ変換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ゝ二種があり、前者は基本的に線形解析に限られる。ここで述べる方法は後者に属するもので、先に発表した半無限地盤—構造物系の動的応答計算法にジョイント要素を導入することにより、強震時の構造物の挙動に影響を及ぼすと考えられる、半無限地盤中へのエネルギー—逸散効果、根入れ効果、構造物や地盤の亀裂、構造物と地盤間の剥離や滑動を取扱うことを可能としたものである。

2. 解析法

図-1に示すように、構造物—地盤系をZone AとZone Bに分割する。Zone A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 SchemeであるNewmark β 法を用いる。Zone Bについては、まず波動方程式を一階系に変換した後、座標変換によって無限領域を有限領域に写像し、Lax Wendroff法によって積分する。以下、有限要素法に導入したジョイント要素と、それに伴う非線形形変方程式の解法を述べる。

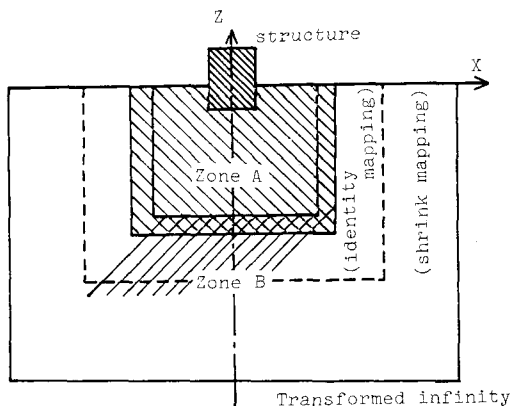


図-1 座標変換されたモデル

(1) ジョイント要素

ジョイント要素の考へ方、取扱い方を下表にとりまとめた。

表-1 ジョイント要素

	法線方向応力 σ_n とせん断応力 τ は、次のように定義するとする。σ_0は残留応力(静応力)
法線方向歪 ϵ_n とせん断歪 γ を下記のように定義する。 $S' = (s + \ell/2)/\ell \quad \text{とする。}(0 \leq S' \leq 1)$	(a) $Kn\epsilon_n + \sigma_0 < 0 \quad \sigma_n = Kn\epsilon_n + \sigma_0$ $Kn\epsilon_n + \sigma_0 > 0 \quad \sigma_n = 0$
$\gamma = ((U_L + U_K)/2\ell) - ((U_L + U_J)/2\ell)$	(b) すべり抵抗応力 τ_y は、 $\sigma_n \leq 0$ のとき $\tau_y = C - \sigma_n \tan \phi$ ($\sigma_n < 0$) Cは粘着力, ϕは内部摩擦角 $\sigma_n > 0$ のとき $\tau_y = 0$
$\epsilon_n = S' \cdot ((W_K - W_J)/\ell) + (1 - S') \cdot ((W_L - W_I)/\ell)$ ・積分点は5点とし、台形公式を用いる。 ・要素剛性行列 [K]	(c) せん断応力 τ は、γ_0を残留歪(すべり量に対応)として、 $Ks(\gamma - \gamma_0) \leq \tau_y$ のとき $\tau = Ks(\gamma - \gamma_0)$ $Ks(\gamma - \gamma_0) > \tau_y$ のとき $\tau = \text{Sign}(\gamma) \tau_y$ $\gamma_0 = \gamma - \tau_{\text{mean}}/Ks$ τ_{mean}はτの平均値
・等価節点力 $[F] = \sum_{i=1}^5 B_i^T \{f_{\sigma i}^T\} W_i$	各種分点の重み W ・歪行列 B ・応力・歪行列 D

(2) 非線形方程式の解法

ニューマー7β法による積分を行うものとする。取扱い方は表2にまとめて示した。

3. 数値解析例

一例として、図2のような簡単な構造物モデルを対象に、根入れ深さを変えた場合、地盤と構造物の間にジョイント要素を入れた場合について、200ガル水平正弦地動に対する応答を求めた結果を、図3、図4、図5に示した。根入れ効果、滑動、剝離の効果がみとめられる。他解析結果等については当日発表する予定である。

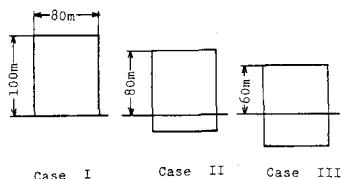


図2 構造物モデル

表3 物性値

	$\rho(t/m^3)$	$\lambda(t/m^2)$	$\mu(t/m^2)$
structure	0.24	2.4×10^5	3.6×10^5
foundation	0.24	8.3×10^5	1.25×10^5

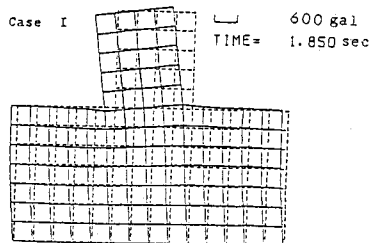


図3 Case I 応答図

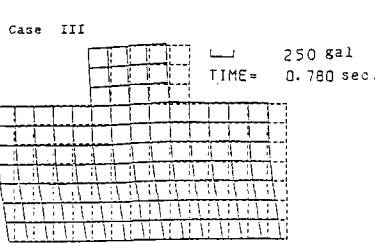


図4 Case III 応答図

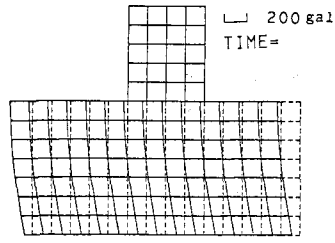


図5 ジョイント要素モデル

表2 ニューマー7β法 非線形形式

(1) 方程式

$$M\ddot{x}_{n+1} + C\dot{x}_{n+1} + f(x_{n+1}) = F_{n+1} \quad \text{----- (1)}$$

$$f(x_{n+1}) \div f(x_{n+1}^*) + K\Delta x \quad \text{----- (2)}$$

x_{n+1}^* は x_{n+1} の推定値

$$M\ddot{x}_{n+1} + C\dot{x}_{n+1} + K\Delta x = F_{n+1} - f(x_{n+1}^*) \quad \text{----- (3)}$$

(2) ニューマー7β法(速度による定式化)

$$\ddot{x}_{n+1} = \frac{1}{\gamma h}(\Delta \dot{x}_{n+1} - (1-\gamma)\ddot{x}_n h) \quad \text{----- (4)}$$

$$x_{n+1} = x_n + \dot{x}_n h + \frac{\beta h}{\gamma} \Delta \dot{x}_{n+1} + \{1/2 - \beta/\gamma\} h^2 \ddot{x}_n \quad \text{----- (5)}$$

$$\dot{x}_{n+1} = \dot{x}_n + \Delta \dot{x}_{n+1} \quad \text{----- (6)}$$

これらを、式(3)に代入する。式(3)は、非線形方程式式なので、下記のようなイタレーションによって解く。

$$\left[\frac{M}{\gamma h} + C + \frac{\beta h}{\gamma} K \right] \Delta \dot{x}_{(i+1)} = F_{n+1} - \{ M\ddot{x}_{n+1}^{(i)} + C\dot{x}_{n+1}^{(i)} + f(x_{n+1}^{(i)}) \} \quad \text{--- (7)}$$

$$\ddot{x}_{n+1}^{(i+1)} = \ddot{x}_{n+1}^{(i)} - \frac{1}{\gamma h} \Delta \dot{x}_{n+1}^{(i+1)} \quad \left[\ddot{x}_{n+1}^{(i)} = \frac{1}{\gamma h} \left(\sum_{j=1}^i \Delta \dot{x}_{n+1}^{(j)} - (1-\gamma)\ddot{x}_n h \right) \right]$$

$$\dot{x}_{n+1}^{(i+1)} = \dot{x}_{n+1}^{(i)} + \Delta \dot{x}_{n+1}^{(i+1)} \quad (8) \quad \left[\dot{x}_{n+1}^{(i)} = \sum_{j=1}^i \Delta \dot{x}_{n+1}^{(j)} + \dot{x}_n \right] \quad (9)$$

$$x_{n+1}^{(i+1)} = x_{n+1}^{(i)} + \frac{\beta h}{\gamma} \Delta \dot{x}_{n+1}^{(i+1)} \quad \left[x_{n+1}^{(i)} = x_n + \dot{x}_n h + \frac{\beta h}{\gamma} \sum_{j=1}^i \Delta \dot{x}_{n+1}^{(j)} + \{1/2 - \beta/\gamma\} h^2 \ddot{x}_n \right]$$

ただし、

$$\ddot{x}_{n+1}^{(0)} = -\frac{1}{\gamma} (1-\gamma) \ddot{x}_n$$

$$\dot{x}_{n+1}^{(0)} = \dot{x}_n \quad (10)$$

$$x_{n+1}^{(0)} = x_n + \dot{x}_n h + \{1/2 - \beta/\gamma\} h^2 \ddot{x}_n$$

☆ Kは、とりあえず一定とする(修正 ニュートンラフソン)

(参考文献)

- 1) 塩原・田口：半無限地盤-構造物系の動的応答計算 第37回年次学術講演会
- 2) 田口・塩原：半無限地盤の動的応答計算-1階双曲系の座標変換差分法 第37回年次学術講演会
- 3) 塩原・田口：半無限地盤-水-構造物系の一動的応答計算 第38回年次学術講演会