

I-532

不確かな境界を有する確率構造の周波数応答解析

鹿島建設(株) 正員 ○右近八郎、沖見芳秀、吉清 孝

1. はじめに

筆者らは、確率構造における伝達関数の確率変数軸に対する非線形的変動を評価するために、一質点系の応答を基にした補間関数を用いた動的確率有限要素法を提案した<sup>1),2)</sup>。さらに本報では、地盤の動的解析において問題となる波動エネルギーの消散を目的とする境界条件に着目して、Lysmer型の粘性境界を取り入れた簡単なモデルにより、その確率論的影響度を評価したので報告する。

2 解析手法

1) 運動方程式

粘性境界を有する系の運動方程式は、単位調和加速度加振 $e^{i\omega t}$ に対して、次式で与えられる。

$$[M]\ddot{\{y\}} + [K]^*\{y\} = -[M]\{V\}e^{i\omega t} + [T]^T[D]\{\dot{y}_f\} - [T]\{\dot{y}\} \quad \text{--- (1)}$$

ここに、 $[M]$ : 質量マトリックス、 $[K]^*$ : 複素剛性マトリックス、 $\{V\}$ : 加振方向ベクトル、 $[D]$ : 境界での粘性係数マトリックス、 $\{y\}$ : 相対変位、 $[T]$ : 変換マトリックス、 $\{y_f\}$ : 自由地盤の相対変位

2) 伝達関数

(1)式で $\{y\}$ が調和応答すると仮定して、相対変位の伝達関数を $\{H\}$ 、等価動剛性を $[K_T]$ 、等価外力を $[F_T]$ とすれば、 $[K_T]\{H\} = [F_T]$ となる。 $\{K_T\}$ 、 $[F_T]$ は次式で与えられる。

$$[K_T] = -\omega^2[M] + i\omega[T]^T[D][T] + [K]^*, \quad \{F_T\} = -[M]\{V\} + i\omega[T]^T[D]\{H_f\} \quad \text{--- (2)}$$

ここに、 $[H_f]$ : 自由地盤の相対変位の伝達関数

伝達関数 $\{H\}$ は、連立方程式 $[K_T]\{H\} = [F_T]$ を解くことにより求められる。

3) 自由地盤による一次変化率

解析領域(irregular zone)の構造諸量(ヤング率 $E$ 、単位質量 $\rho$ 、減衰定数 $h$ 、ポアソン比 $\nu$ )による一次変化率は、既報に示す通りである<sup>1),2)</sup>。自由地盤(regular zone)の構造諸量による一次変化率は、それぞれの構造諸量で微分することにより得られる。例えば、自由地盤のヤング率 $E_f$ による一次変化率は次式で与えられる。

$$[K_T]_{E_f}^1 = \frac{\partial [K_T]}{\partial E_f} = i\omega \frac{\partial [D]}{\partial E_f} = i\omega \begin{bmatrix} \frac{\partial(\rho V_p A)}{\partial E_f} & 0 \\ 0 & \frac{\partial(\rho V_s A)}{\partial E_f} \end{bmatrix}, \quad [F_T]_{E_f}^1 = i\omega \left( \frac{\partial [D]}{\partial E_f} \{H_f\} + [D] \frac{\partial \{H_f\}}{\partial E_f} \right) \quad \text{--- (3)}$$

ここに、 $V_s$ : セン断波速度 $=\sqrt{G/\rho}$ 、 $V_p$ : 粗密波速度 $=\sqrt{(\lambda+2G)/\rho}$ 、 $G$ : セン断剛性 $=E/2(1+\nu)$   
 $\lambda$ : ラーメの定数

4) 補間関数

伝達関数の各確率変数 $a_i$ に対する補間関数を、一質点系の周波数伝達関数を基にして以下のように設定する<sup>1),2)</sup>。

$$H(\omega; a_i) = \frac{c_1 + c_2 a_i}{1 + c_3 a_i} \quad \text{--- (4)}$$

ここに、 $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ : 定数 (複素数)

3 数値解析例

図-1に示す簡単有限要素モデルを用いて解析を行った。解析エリアは縦25m、横50m、要素数26、節点数38、自由地盤は左右とも5層から成っている。エルセントロ波(N-S)の最大値を100(gal)に基準化したものをx方向に入力した。物性1のヤング率は $2.06 \times 10^5(kN/m^2)$ 、単位質量 $1.7 \times 10^3(kg/m^3)$ 、粘性減衰定数0.03、ポアソン比0.3とした。 $V_s$ は215.8(m/sec)、 $V_p$ は403.7(m/sec)となっている。各構造諸量の変動係数(COV)は、解析領域、自由地盤ともに0.2を設定した。図-1に示す節点38のx方向の応答に着目した。図-2に確定応答(x方向相対加速度)を示す。図-3は一例として、図-1に示す右自由地盤4層目のヤング率の変動による節点38のx方向相対加速度の標準偏差の応答を示したものである。表-1は左右自由地盤各層の節点38の標準偏差応答への寄与(時刻歴)の最大値を示したものである。

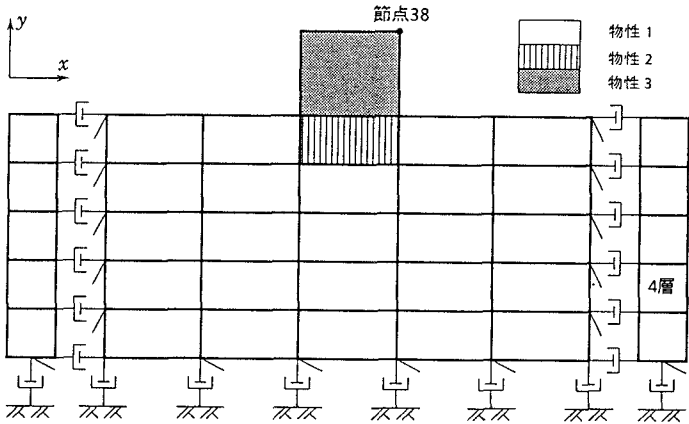


図-1 解析モデル

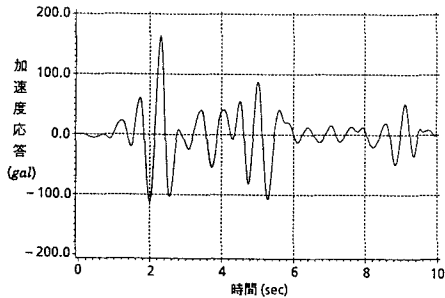


図-2 確定応答

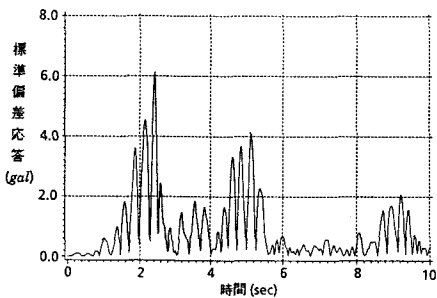


図-3 ヤング率による標準偏差応答

表-1 自由地盤の標準偏差応答(節点38)に対する最大値(gal)

| 確率変数 \ 層 | 右1層  | 右2層  | 右3層  | 右4層  | 右5層  | 左1層  | 左2層  | 左3層  | 左4層  | 左5層  |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ヤング率     | 5.12 | 5.37 | 5.93 | 6.23 | 6.62 | 5.13 | 5.32 | 5.85 | 6.14 | 6.54 |
| 単位質量     | 7.16 | 7.97 | 8.43 | 8.25 | 8.18 | 7.13 | 7.87 | 8.28 | 8.18 | 8.25 |
| 減衰定数     | 0.25 | 0.25 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.25 | 0.25 | 0.27 | 0.28 | 0.29 |
| ポアソン比    | 3.68 | 5.18 | 6.47 | 7.17 | 7.59 | 3.70 | 5.16 | 6.45 | 7.16 | 7.68 |

4. おわりに

確率有限要素法を活用する場合、確率変数間の相関を無視することはできない。特に、動的解析においては確率変数間の相関が応答性状を支配するため、相関の適切な評価が必要である。著者らは、既報においてその一手法を提案したが、自由地盤の確率変数と解析領域の確率変数との相関の問題は、確定解析での解析仮定に係わることもあり、現在検討中である。ここで提案した手法を用いて境界条件の不確かさを評価することにより、地表における地震動の解析的究明が可能となり、今後さらに検討を進めていく予定である。

参考文献

1) UKON, H., YOSHIKIYO, T., OKIMI, Y., and MATSUMOTO, T.: An Interpolation Function Method for Stochastic FEM Analysis under Dynamic Loads using Frequency Response Analysis, Proc. of JSCE, No.392/ I - 9, 1988. 4.  
2) UKON, H., YOSHIKIYO, T., OKIMI, Y., and MATSUMOTO, T.: Frequency Response Analysis of Probabilistic Structures Using Finite Element Method, Proc. of 9WCEE, V - 295~300, Tokyo - Kyoto, JAPAN, 1988. 8.