

清水建設 大崎研究室 正員 ○ 須原淳二  
同 正員 近藤 司

1. はじめに 非線形地震応答解析手法には力と変形の関係を時刻ごとに評価しながら計算する方法と等価な線形系に置換して解析する方法がある。後者の考え方の中には等価剛性と減衰を等価線形系の最大振幅をもとに定める方法があり、成層地盤の応答解析に適用したプログラム「SHAKE」が有名である<sup>1)</sup>。

ここでは成層地盤を対象にランダム振動論の成果<sup>2),3)</sup>を応用した等価線形化法によって非線形応答を近似的に表すことを試みた。また、時刻歴非線形解析とSHAKEの等価線形化解析との比較を行った。

2. 解析方法 深さ $x$ の変位を $u(x,t)$ 、応力 $\tau$ 、密度 $\rho$ 、ひずみを $\varepsilon$ とすると一次元地盤の支配方程式は式(1)、(2)となる。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial x} \quad \dots(1), \quad \varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \dots(2)$$

土の応力とひずみの非線形特性は次式に示す微分方程式により表されるものとした<sup>2)</sup>。

$$\tau = \alpha \frac{\tau_y}{\varepsilon_y} \varepsilon + (1-\alpha) \tau_y z \quad \dots(3), \quad \varepsilon_y \dot{z} = -\gamma |\dot{\varepsilon}| z |\dot{\varepsilon}|^{n-1} - \beta \dot{\varepsilon} z^n + A \dot{\varepsilon} \quad \dots(4)$$

$\tau_y, \varepsilon_y$  は応力とひずみの基準量、 $z$  は履歴を表す無次元振幅、 $\gamma, \beta, A, n$  は履歴形状を決定するパラメータである。(4)式は(5)式で線形化されるものとする。確率論から、 $n=1$ のとき、平均値0の定常ガウス加振に対して係数 $C_e, K_e$ は(6)式で表される<sup>2)</sup>。ここで、 $\sigma_\varepsilon, \sigma_z$  は $\varepsilon, z$ の標準偏差で、 $E[\ ]$ は期待値である。

$$\varepsilon_y \dot{z} + C_e \dot{\varepsilon} + K_e z = 0 \quad \dots(5), \quad C_e = \left( \frac{2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \gamma \frac{E[\varepsilon z]}{\sigma_\varepsilon} + \beta \sigma_z \right\} - A, \quad K_e = \left( \frac{2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \gamma \sigma_\varepsilon + \beta \frac{E[\varepsilon z]}{\sigma_z} \right\} \quad \dots(6)$$

(1)~(3), (5)式をフーリエ変換し変位の振幅を $U(\omega)$ とすると(1)式は(7)式のように振動数領域で表わされる。各層の境界の変位と応力の連続条件で(7)式を解くことにより任意の層の応答は求まる<sup>1)</sup>。係数 $C_e, K_e$ は応答値により定まるため、これらの係数が収束するまで反復計算を行う。

$$-\rho \omega^2 U = \left\{ \alpha \frac{\tau_y}{\varepsilon_y} + (1-\alpha) \tau_y \frac{-i\omega C_e}{K_e + i\omega \varepsilon_y} \right\} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad \dots(7)$$

3. 解析例 解析対象の地盤は図-1に示す3層とした。土の応力-ひずみ関係はRamberg-Osgoodモデルにより表すものとした。この時のひずみに応じた剛性低下、減衰特性を図-2に示す。地盤をせん断型の質点系にモデル化し時刻歴非線形解析を行った結果を精解とし、SHAKEによる解析および上記の手法による解析結果を比較する。この時、(3), (4)式のパラメータは $\alpha=0, \gamma=0.8, \beta=0.8, A=1.0, n=1$ とした。その時の履歴ループを図-3に示す。入力にはGL-150mの位置に入射波(E)として定義する。入力のレベルは入射波の2倍が50, 100, 300Galの3ケースとした。入力波はEICentroの位相を持つ人工地震波でありその加速度波形および加速度応答スペクトルを図-4に示す。最大ひずみ分布、最大加速度分布、地表の応答波形の加速度応答スペクトルを図-5~7に示す。また、入力(2E)に対する地表の加速度伝達関数を図-8に示す。

SHAKEによる応答は、精解値に比べると入力が高くなるに従いスペクトルの高振動数成分が少なくなる傾向があり、加速度分布は小さく評価される。しかし、ひずみ分布は良く一致している。一方、上記の手法による応答のスペクトル特性は高振動数領域まで良く一致しているが、ひずみ分布は小さく評価される。

4. おわりに 成層地盤を対象にランダム振動論の成果を応用した等価線形化法の有効性が確かめられた。今後、構造物にこの手法を適用する予定である。

| 0m    | $\rho$<br>( $\text{t/m}^3$ ) | $V_s$<br>(m/s) | 分割 |
|-------|------------------------------|----------------|----|
| -50m  | 1.7                          | 400            | 13 |
| -100m | 1.7                          | 500            | 10 |
| -150m | 1.7                          | 600            | 10 |
| 半無限   | 1.8                          | 700            |    |

図-1 地盤モデル

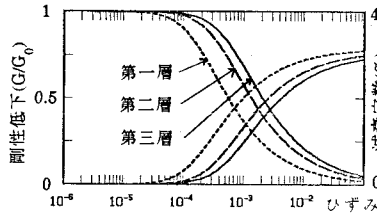


図-2 剛性低下と減衰特性

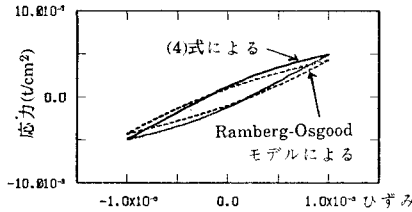


図-3 履歴ループの一例(第3層)

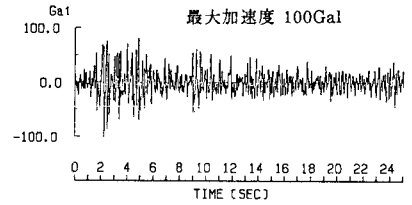


図-4 加速度波形および  
応答スペクトル

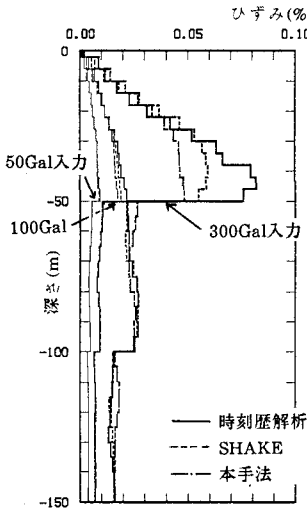


図-5 最大ひずみ分布

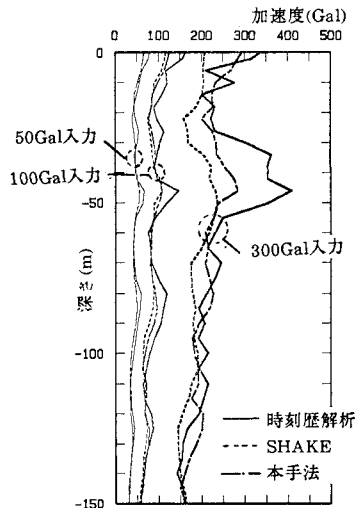


図-6 最大加速度分布

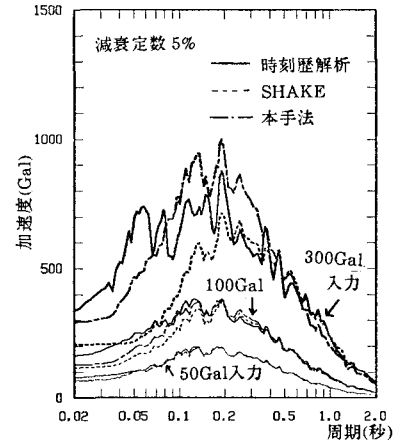
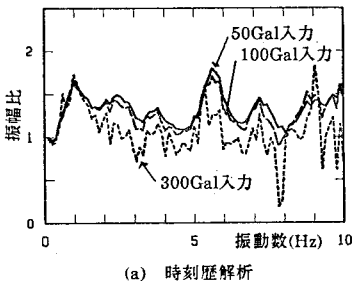
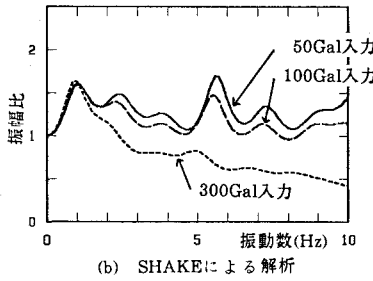


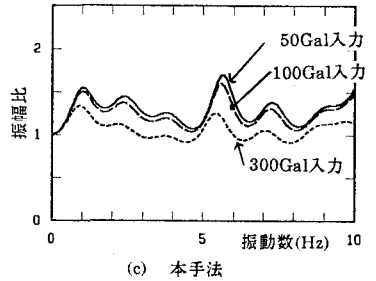
図-7 加速度応答スペクトル(地表)



(a) 時刻歴解析



(b) SHAKEによる解析



(c) 本手法

図-8 加速度伝達関数(地表/入射波 $\times 2$ )

参考文献 1) Schnabel, P. B., Idriss, I. M., "SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontal Layered Sites," Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, Calif., Dec., 1970 2) Wen, Y. K., "Equivalent linearization for hysteretic systems under random excitations," Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME, March 1980, pp150~154 3) Wen, Y. K., "Stochastic response and damage analysis of inelastic structures," Probabilistic Engineering Mechanics, Vol 1, No1, March 1986, pp49~57