

地震時すべりを表現する等価線形化手法に関する検討

熊本大学工学部 学正員 ○吉田 克明
 同上 正員 秋吉 卓
 八代高専 正員 羽田 邦彦
 熊本大学工学部 学正員 大部 蘭 和久

1. まえがき 地震時すべりを伴う大変形は構造物に大きな損傷を与える要因であるが、その適正な予測のための解析手法の確立が望まれている。構造物のすべりについて、これまで地震動が正弦波の場合についてはいくつかの研究があり、また入力が実地震動の場合でも解析対象が平面上の剛体のすべりについては、かなりの報告がある。しかし管路のように長大な構造物のすべりを未知変位に対して解析するのは、それほど容易ではなく、その報告は少ない。本研究は、地震動をフーリエ変換によって単正弦波に分解し、それらの波形を提案するすべりの等価線形化手法で、すべりの有無をチェックした後再合成して、すべりの応答を得ようとするものであるが高速フーリエ変換を用いるので計算時間が大幅に短縮する。

2. 解析手法 ここで解析の対象とするモデルは、慣性力に左右されるモデル1と、慣性力は無視するモデル2の管路である。
 モデル1: 質量を無視すると、管路の運動は次式で表わされる。

$$EA \frac{d^2 Y}{dx^2} + T_F = 0 \quad \text{-----(1)}$$

ここに、 E 、 A : 管路のヤング率、断面積、 Y : 管路の軸方向変位、 $T_F = T_0 \sin(\dot{s})$: 周面摩擦力、 $\dot{s}$: すべり速度。

すべり $\dot{s}$ は、図2を参照すると

$$\dot{s} = X - Y \quad (X: \text{地震動変位}) \quad \text{-----(2)}$$

ここで、 $\dot{s}$ および X を伝播波動と考え、次式のように書く。

$$\dot{s} = \dot{s}_0 \exp[i(\omega x - kx + \phi)] \quad (k = \omega/c) \quad \text{-----(3)}$$

$$X = X_0 \exp[i(\omega t - kx)] \quad (c: \text{伝播速度}) \quad \text{-----(4)}$$

ここで、図2、3を参考にし T_F を等価線形化すると、

$$T_F = T_0 \sin(\dot{s}) = 2\pi r_0 \tau_f \sim 2\pi r_0 \left(\frac{4\tau_0}{\pi \omega S_0} \right) \dot{s} \quad \text{-----(5)}$$

ただし、 r_0 : 管径、 τ_f , τ_0 : 摩擦応力。式(1)~(5)を解くと

$$\dot{s}_0 = \begin{cases} X_0 & : |X_0| < X_{cr} \\ \sqrt{|X_0|^2 - X_{cr}^2} & : |X_0| > X_{cr} \end{cases} \quad \text{-----(6)}$$

ただし、 $X_{cr} = \delta_0 \tau_0 c^2 / EA \omega^2$ (すべり限界変位) ----(7)

故に、すべり時の管路の軸方向変位 Y と歪 ϵ_y は次式となる。

$$Y = X (|X_0| < X_{cr}) \text{ 又は } X_{cr} \exp[i(\omega x - kx + \phi)] \quad \text{-----(8)}$$

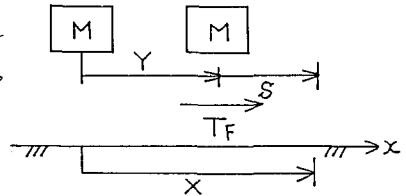
$$\epsilon_y = \partial Y / \partial x = -\dot{Y} / c \quad \text{-----(9)}$$

$$\phi = \tan^{-1} [(X_{cr} X_1 + X_{cr} \dot{s}_0) / (X_{cr} X_2 - X_1 \dot{s}_0)] \quad \text{-----(10)}$$

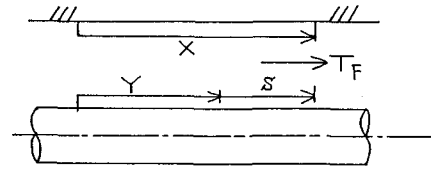
ただし、 X_1 , X_2 : 入力振幅 X の実数部、虚数部。

$\dot{s}$ と $\dot{s}_0$ 、入力地震動 $X(t_m)$ を高速フーリエ変換(FFT)すると

$$\overline{X_k} = \overline{X(\omega_k)} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X_m \exp(-i \omega_k t_m) \quad (m=0 \cdots N-1) \quad \text{-----(11)}$$

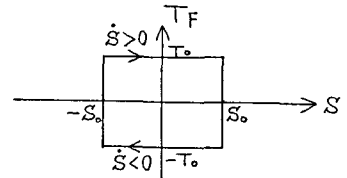
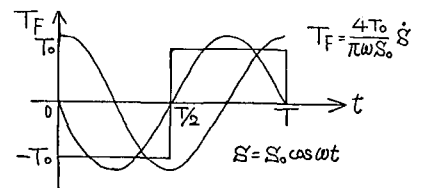


(a) モデル1



(b) モデル2

図1 解析対象モデル

図2 T_F (摩擦力) - S (すべり) 関係図3 T_F (摩擦力) の時刻歴

この $\bar{X}_k = \bar{X}(w_k)$ は先述の X_0 に、また式(8)の Y を管路のフーリエ振幅 $\bar{Y}_k = \bar{Y}(w_k)$ と考えると

$$\bar{Y}_k = \begin{cases} \bar{X}_k & : |\bar{X}_k| < X_{ch}(w_k) \\ X_{ch} \exp(i\phi) & : |\bar{X}_k| > X_{ch}(w_k) \end{cases} \quad (12)$$

となるので、これを逆FFTして管路の時刻歴応答値とする。

$$Y(t_m) = \sum_{k=0}^{N-1} \bar{Y}_k \exp(i w_k t_m) \quad \text{-----} (13)$$

一方、モデル2について2の単正弦波に対する鵜飼の近似解があるが、これは単正弦波にならないので、本解析法に適用する場合は、式(11)まではFFTでよいが、すべりの判定以降は多くの正弦・余弦関数の計算が必要となるため、本解析法と比較して数10~100倍もの計算時間となる。しかし、その詳細は紙面の都合上省略する。

3. 計算結果 入力の最大加速度を30gal、地震波の伝播速度を $C = 300 \text{ m/sec}$ に固定して、 $A_{cr} = 2\pi r_0 \gamma_c^2 / EA$ (gal) を変化させたときの様子を、図4はモデル1の場合で、剛体と地面の最大加速度の比を国示しているが、等価線形化手法と鵜飼の方法ととも、 A_{cr} が入力の最大加速度とほぼ同じ値ですべりが始まり、 A_{cr} の低下につれて $\dot{Y}_{max}$ を減じており、ほぼ妥当な結果となっている。

一方、図6~9は人工地震波(卓越振動数 = 3 Hz 、 $0 \sim 10 \text{ Hz}$ の三角形分布スペクトル)をモデル2の管軸に沿って入射させたときの管軸変位 Y と管歪 E_y を、周囲の土のそれらとの比を、2示したものである。管路の応答値の傾向は、正弦波(図5)と相似ではあるが、地震波の継続時間を $T = 20.48 \text{ sec}$ と長くとると、各振動数ごとにパワーが分散するため、すべりの発生が A_{cr} の相対的に低い場合しか起らないという結果となり現実的なものといえない。一方、 $T = 2.56 \text{ sec}$ と短いときは正弦波の傾向に近づき、結果は改善されている。その他は構造物に依らず。

参考文献 1) 鵜飼・山口: 土質工学論文報告集、Vol. 19、No. 4、1979、2) 鵜飼: 土木学会論文集第272号、1978、3) 例えは N. Mohtagheh 他2名: EESD、Vol. 11、1983、4) 秋吉・瀬田、土木学会論文報告集、第334号、1983

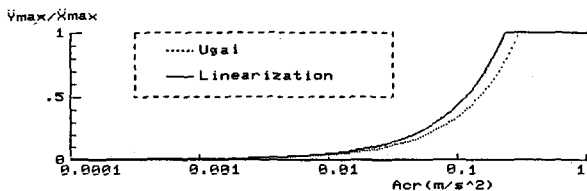


図4 正弦波入力に対する剛体と地盤の最大加速度比 (モデル1)

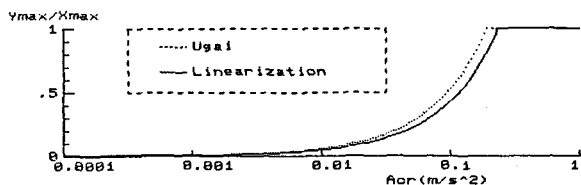


図5 正弦波入力に対する管路と地盤の最大加速度比 (モデル2)

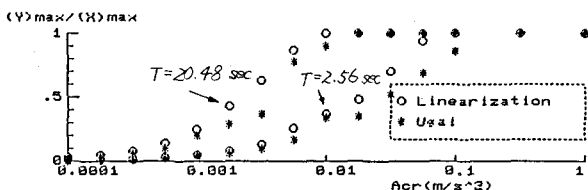


図6 不規則波入力に対する管路と地盤の最大変位比 (モデル2)

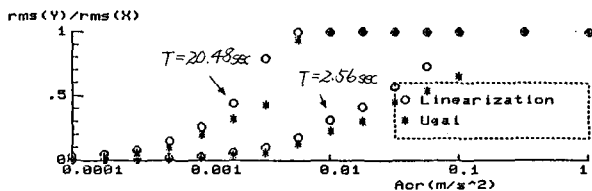


図7 不規則波入力に対する管路と地盤のrms変位比 (モデル2)

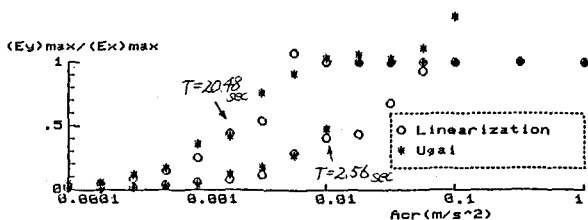


図8 不規則波入力に対する管路と地盤の最大歪比 (モデル2)

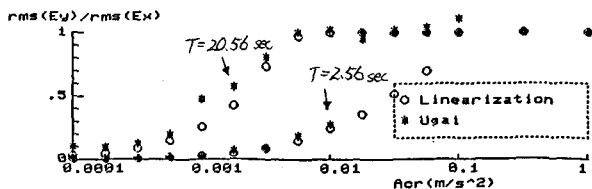


図9 不規則波入力に対する管路と地盤のrms歪比 (モデル2)