

熊本大学工学部 正員 秋吉 卓
八代工業高等専門学校 正員 瀧田 邦彦
熊本大学大学院 学生員 吉田 克明

1. まえがき 地震時の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¹⁾、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²⁾。しかし管路のように長大な構造物のすべりを不規則波に対して解析するのは、それほど容易ではなく、その報告は少い³⁾。本研究は、不規則な地震動を受ける構造物のすべりを、高速フーリエ変換により短時間に処理しうる実用的な手法を提案しようとするものである。そのため地震波をフーリエ分解し、それに単弦波に対してすべりが等価線形化された既存解を適用する、近似的取扱いを基本にしている⁴⁾。

2. 解析手法 解析の対象とするモデルは、図1中に示す2つのモデルであるが、ここではモデル2について記す。簡単のため質量を無視すると、管路の運動は次式となる。

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

ここに、 E 、 A 、 Y = 管路のヤング率、断面積、軸方向変位、 T_F = 周面摩擦力(図2参照)。

ところで、土と管路の接触面は、図2のクーロン摩擦を考えると、単弦振動時は図3のように線形化される。

$$T_F = T_0 \operatorname{sign}(\dot{S}) \sim 4 T_0 \dot{S} / \pi \omega S_0 \quad \dots(2)$$

ただし、 T_0 = 単位長当りの摩擦抵抗、 S 、 S_0 、 $\dot{S}$ = すべり変位、同振幅およびすべり速度。このとき S_0 は次式となる。

$$S_0 = \begin{cases} 0 & : |X_0| < X_{cr} \\ (|X_0|^2 - X_{cr}^2)^{1/2} & : |X_0| > X_{cr} \end{cases} \quad \dots(3)$$

ただし、 X_0 = 入力振幅、 X_{cr} = すべり限界変位；

$$X_{cr} = 4 T_0 c^2 / \pi \omega^2 EA \quad \dots(4)$$

このとき、管路の軸方向変位 Y は次式で書き表わせる。

$$Y = \begin{cases} X & : |X_0| < X_{cr} \\ X_{cr} \cdot \exp[i(\omega t - kx + \phi)] & : |X_0| > X_{cr} \end{cases} \quad \dots(5)$$

ここに、 $k = \omega / c$ 、 c = 地震波の速度、 ϕ = 位相角。

次に、不規則入力 $X(t_m) = X_m$ ($m=0, 1, \dots, N-1$) について高速フーリエ変換を行うと($x=0$ とする)

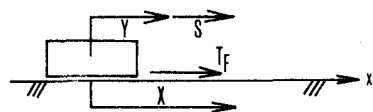
$$\bar{X}_k = \bar{X}(\omega_k) = \sum_{m=0}^{N-1} X_m \cdot \exp(-i \omega_k t_m) / N \quad \dots(6)$$

$$(k, m=0, 1, \dots, N-1)$$

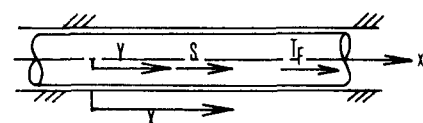
この $\bar{X}_k = \bar{X}(\omega_k)$ は先述の X_0 に、また式(5)の Y をフーリエ振幅 $\bar{Y}_k = \bar{Y}(\omega_k)$ に読みかえて、図4および次式のようなすべりの判定を行う($x=0$ とする)。

$$\bar{Y}_k = \bar{X}_k \quad : |\bar{X}_k| < X_{cr}(\omega_k)$$

$$\bar{Y}_k = X_{cr} \cdot \exp(i \phi) \quad : |\bar{X}_k| > X_{cr}(\omega_k) \quad \dots(7)$$



(a) モデル1 (剛体)



(b) モデル2 (管路)

図1 解析対象モデル

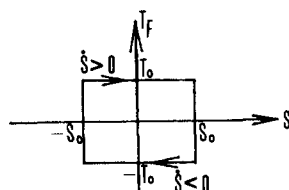
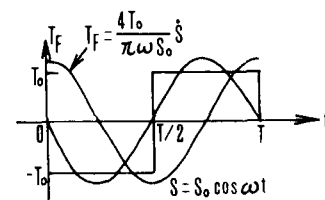
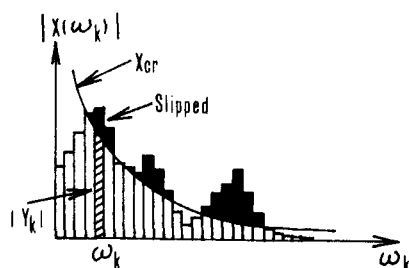
図2 T_F (摩擦力) - S (すべり) 関係図3 T_F (摩擦力) の時刻歴

図4 不規則波のすべりの判定概念図

これより式(7)を高速逆フーリエ変換すれば
ただちに管路の時刻歴応答が得られる：

$$Y(t_m) = \sum_{k=0}^{N-1} Y_k \cdot \exp(i\omega_k t_m) \quad \cdots (8)$$

ここで、過大なXcrのかわりに、次の補正值
X'crを導入する：

$$X'cr = \alpha Xcr \quad (\alpha: \text{補正係数}) \quad \cdots (9)$$

ただし、 α = フーリエ振幅最大値 / 時刻歴最大値。

3. 計算結果 入力（エル・セントロ1940 NS）の最大加速度を 0.3m/s^2 、地震波の伝播速度を $c = 300\text{m/s}$ に固定して、すべりの加速度限界値 $Acr = T_B c^2 / EA$ が変化するときの検討を行った。

図5は、管路と地盤の最大変位の比をAcrに対して示したものであるが、図中の実線は正弦波入力、その他のプロットはエルセントロ波入力の場合である。すべる時は正弦波であれ不規則波であれ同じ傾向となるはずであるから、Xcrに補正を施さない場合は、厳密解に近い正弦波入力の場合より相当かけ離れている。継続時間Tを短くするとフーリエ振幅は増大するので、図のように早くすべりが現われ、曲線に近づくようになるが、この方法にも限界がある。

そこで式(9)で定義したような、Xcrの補正係数 α を導入すると、図6の結果が得られた。明らかに不規則波入力の場合は正弦波入力の場合と同程度となり、かつ不規則波の継続時間の影響を受けなくなることから、本手法は補正により十分実用性を有するものとなっている。

図7の実線と点線は、正弦波入力に対する本手法（等価線形化）と鶴飼の方法¹⁾とを比較したものであるが、等価線形化による誤差は大きくない。

図8はAcrの違いによる波形とスペクトルを示したものであるが。説明は講演時にゆずる。

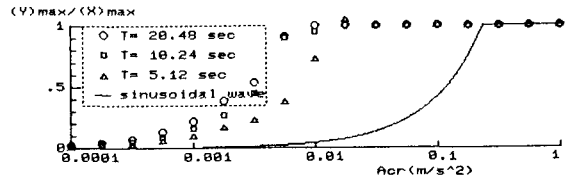


図5 管路と地盤の最大変位比（補正前）

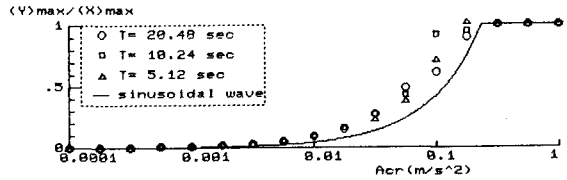


図6 管路と地盤の最大変位比（補正後）

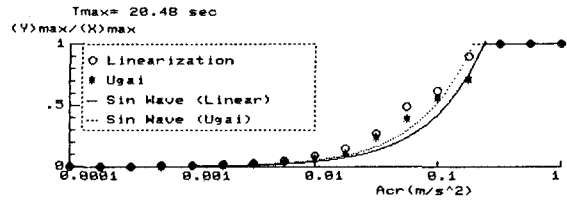
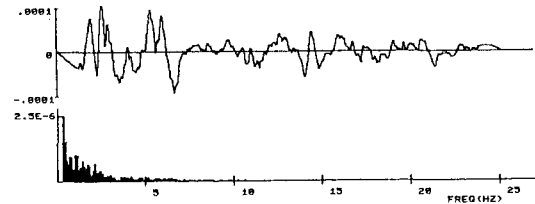
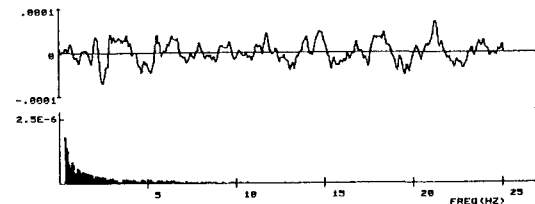


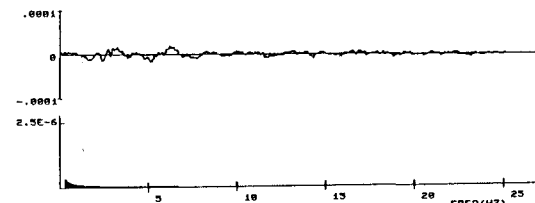
図7 管路と地盤の最大変位比（補正後）



(a) $Acr = 0.562(\text{m/s}^2)$



(b) $Acr = 0.100(\text{m/s}^2)$



(c) $Acr = 0.0178(\text{m/s}^2)$

図8 エル・セントロ地震波(1940)に対する管路の応答

参考文献 1) 鶴飼・山口：土質工学論文集，Vol. 19, No. 4, 1979. 2) 例えば，N. Monstaghel 他：EESD, Vol. 11, 1983. 3) 秋吉・淵田：土木学会論文報告集，第334号，1983. 4) 土木学会西部支部研究発表会(S61)，1987. 3.