

すべりを伴う管路の地震応答に関する一近似解法

熊本大学工学部 学生員 ○古川 昌裕  
 熊本大学工学部 正員 秋吉 卓  
 八代工業高等専門学校 正員 淵田 邦彦

1. まえがき 地中構造物、とくに剛性の低い管路構造物は、地震時には周辺の地盤変形に追従しやすいことから、その耐震設計法として正弦波入力による応答変位法が提案されているが、<sup>1)</sup>実地震波動に対する検討も必要であろう。しかしながら、不規則波動入力に対する厳密な解析は困難であるため、著者らはこれまで、管体と地盤には相互作用を考慮せずに、すべりのみを許す近似解法を提案し、正弦波動に対する解と対比しその妥当性と実用性について報告してきた。<sup>2),3)</sup>ここでは、さらに管路と地盤との相互作用を考慮した場合について報告する。

2. 解析手法 管路と地盤のモデルを単純化して、図1のような2次元モデルを考える。管路の質量を無視すると、その運動方程式は次のように書ける。

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

ここに、E, A, Y= 管路のヤング率, 断面積, 軸方向変位, T<sub>F</sub>=周面摩擦力 (図2参照)。

土と管路の接触面は、図2のようにクーロン摩擦を考えるとき、単弦振動時は次のように線形化される。

$$T_F = T_e \text{sign}(\dot{S}) \sim 4 T_e \dot{S} / \pi \omega S_e \quad \text{----- (2)}$$

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

$$S_e = \begin{cases} 0 & : |X_e| < X_{or} \\ -\frac{4\tau_s c}{\pi G \omega \sin \theta} + \left[ 4|X_e|^2 - \left( \frac{4\tau_s c^2 l_e}{\pi EA \omega^2 \cos^2 \theta} \right)^2 \right]^{1/2} & : |X_e| > X_{or} \end{cases} \quad \text{----- (3)}$$

ただし、X<sub>e</sub>=入力振幅, X<sub>or</sub>=すべり限界変位; θ=入射角。

$$X_{or} = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{4\tau_s c}{\pi G \omega \sin \theta} \right)^2 + \left( \frac{4\tau_s c^2 l_e}{\pi EA \omega^2 \cos^2 \theta} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{----- (4)}$$

このとき、管路の軸方向変位Yは次式で書き表せる。

$$Y = \begin{cases} Y_B \cdot \exp(i\phi_B) & : |X_e| < X_{or} \text{ (密着時)} \\ Y_S \cdot \exp(i\phi_S) & : |X_e| > X_{or} \text{ (すべり時)} \end{cases} \quad \text{----- (5)}$$

ただし、Y<sub>B</sub>=MX<sub>e</sub>, Y<sub>S</sub>=2τ<sub>s</sub>l<sub>e</sub>c<sup>2</sup>/πAEω<sup>2</sup>cos<sup>2</sup>θ, 時間項exp[iω(t-xcosθ/c)]は省略。M(増幅率)=2/[1+(Reωcos<sup>2</sup>θ/sinθ)<sup>2</sup>]<sup>1/2</sup>, Re=AE/cGl<sub>e</sub>, φ<sub>B</sub>, φ<sub>S</sub>=密着時, すべり時位相角, l<sub>e</sub>=管路周長, τ<sub>s</sub>=管路・土接触面の摩擦応力, c, G=地盤のP波伝播速度, せん断弾性係数。

次に、不規則入力X(t<sub>m</sub>)=X<sub>m</sub>(m=0,1,⋯,N-1)について高速フーリエ変換を行うと(x=0とする)

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

この $\bar{X}_k = \bar{X}(\omega_k)$ は先述のX<sub>e</sub>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

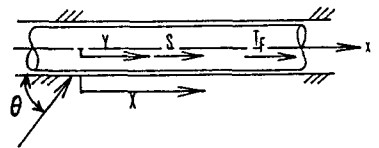


図1 解析対象モデル

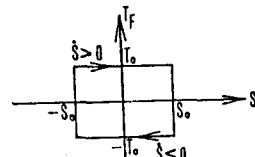


図2 T<sub>F</sub>(摩擦力) - S(すべり)関係

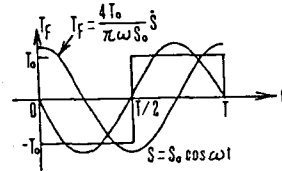


図3 T<sub>F</sub>(摩擦力)の時系列

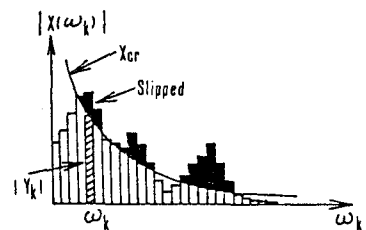


図4 不規則波のすべりの判定概念図

のようなすべりの判定を行う( $x=0$ とする)。

$$\bar{Y}_k = \begin{cases} M \bar{X}_k & : |\bar{X}_k| < X_{or} \\ Y_s \cdot \exp(i \phi_s) & : |\bar{X}_k| > X_{or} \end{cases} \quad \text{---- (7)}$$

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。

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

ところで、式(7)ように分解された波動振幅に対応して、式(4)の $X_{or}$ をつぎのように修正する。

$$X'_{or} = \alpha \cdot X_{or} \quad \text{---- (9)}$$

補正係数 $\alpha$ のとり方に種々考えられるが、ここでは(フーリエ振幅最大値)/(時刻歴最大値)を基準とする。

**3. 計算結果** 入力地震動は最大加速度を $0.3 \text{ m/s}^2$ 、地震波はP波としてその伝播速度を $c = 300 \text{ m/s}$ に固定して、すべりの加速度限界値 $A_{or} = T_a \cdot c^2 / E A$ を変化させたときの検討を行った。

図5は、管路と地盤の相互作用を考慮しない場合の両者のrms応答歪の比を、 $Acr$ 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。両者の結果はかなり接近しており、式(a)の補正は十分実用性を有しているといえよう。

図6は、エルセントロ波入力に対して、 $Acr$ (地盤剛性と管剛性の比)のレベルの低下により、(b)、(c)ではすべりのため管路の応答のパワーが減少していく様子を示している。

一方図7は、管路と地盤の相互作用を考慮したときの管路と地盤のrms応答歪の比を、 $Acr$ に対して示したものである。すべりの限界変位が入力の振動数に依存するため(式(4)参照)、入力の最大加速度( $=0.3 \text{ m/s}^2$ )より相当低い $Acr$ ですべりが初まり、この点は相互作用を無視した場合と大幅に異なり、留意すべき点である。その他の結果については、講演時に述べる予定である。

参考文献1) 日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針  
2) 秋吉・淵田：土木学会西部支部研究発表会(S61), 1987.3, 3) 秋吉・淵田：土木学会第42会年次学術講演会(S62), 1987.9.

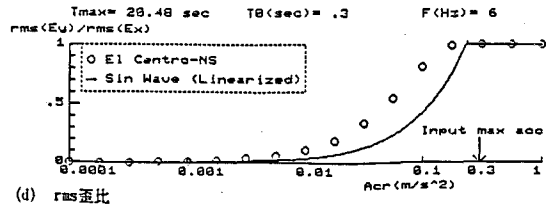


図5 入力と管体応答の比 (相互作用無視, 入力:エルセントロ1940)

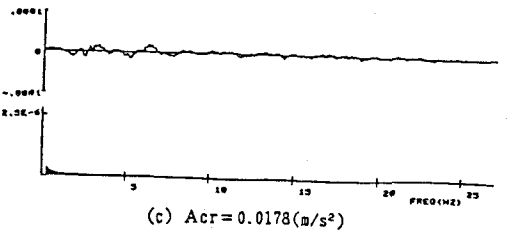
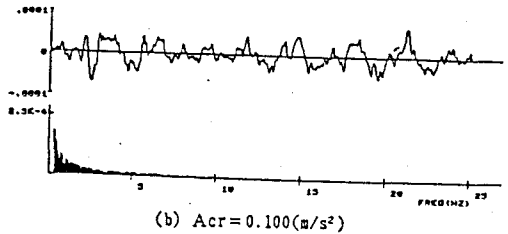
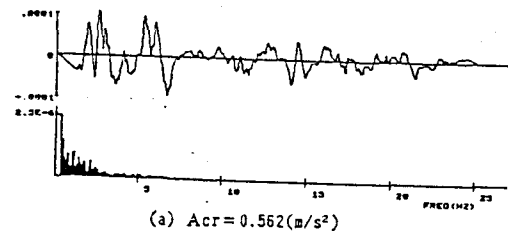


図6 エル・セントロ地震波(1940)に対する管道の応答

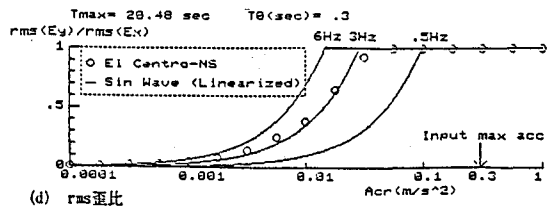


図7 入力と管体応答の比 (相互作用考慮, 入力:エルセントロ1940)