

京大工学部 正会員 亀田弘行, コロンビア大学 正会員 篠塚正宣

1. まえがき 水平方向に伝播する地震波による埋設直管のひずみ解析はこれまで多く扱われており、^{1)~3)} 地盤とのすべりや波動の入射方向の影響などが考慮されてきた。本報での解析の基本仮定も文献1)~3)と同じであるが、将来の地震波動の入射方向が未知であるところから、任意方向からの地震波に対する最大管ひずみを論じ、これをきわめて簡単な推定式で与えた。

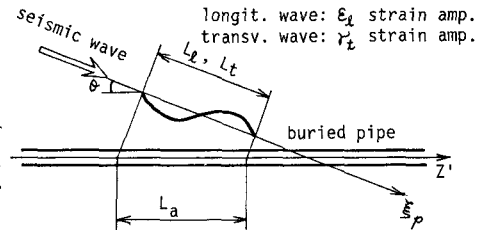


Fig.1 Buried Pipe and Horizontally Propagating Seismic Wave.

2. 入力地震動と地盤ひずみ Fig. 1 のように管軸に入射角 θ なる正弦波で地震波が伝播すると考える。縦波の場合、波長 L_e 、垂直ひずみ振幅 ε_L 、横波の場合、波長 L_t 、せん断ひずみ振幅 γ_e とする。管軸方向の見かけの波長 L_a と見かけの地盤垂直ひずみ ε_g は次式で与えられる。

$$L_a = \begin{cases} L_e / \cos \theta & \text{--- (1)} \\ L_t / \cos \theta & \text{--- (1')} \end{cases}, \quad \varepsilon_g = \begin{cases} \varepsilon_L \cos^2 \theta & \text{--- (2)} \\ \gamma_e \sin \theta \cos \theta & \text{--- (2')} \end{cases}$$

3. 管軸方向地盤ひずみに対する管体ひずみとその上・下界 管体の z 軸方向変位を u_p とし、その基礎方程式を文献1)~3)と同様に次式で表す。

$$\frac{d^2 u_p}{dz^2} + \frac{f}{Ed} = 0 \quad \text{--- (3)}$$

ただし、 E は管体のヤング率、 d は肉厚、 f は管体に作用する地震力で、埋設管がない場合の管軸方向地盤変位 u_a を用いて次式で与えられる。

$$f = \begin{cases} K(u_a - u_p); & |u_a - u_p| \leq \Delta u_{cr} & \text{--- (4)} \\ K \cdot \Delta u_{cr}; & |u_a - u_p| > \Delta u_{cr} & \text{--- (4')} \end{cases}$$

ただし、 K は地盤のばね係数、 Δu_{cr} はすべりが生ずる限界相対変位。また、地盤のせん断剛性を G 、すべりが生ずる限界での管体に接する地盤のせん断ひずみを γ_{cr} とすると、次の関係がある。

$$K \cdot \Delta u_{cr} = G \cdot \gamma_{cr} \quad \text{--- (5)}$$

式(3)の厳密解は文献2)で与えられており、また文献4)に本研究に即した形で表されているが、その計算はかなり煩雑である。ここでは、それより得られる管体のひずみ振幅の上・下界値を論ずる。

管軸方向の1波長分の地震力 f の分布は Fig. 2 に厳密解の形状が示されているが、これに対し、同図 (a), (b), (c) なる3種類の近似値を考える。(a) は半波長全域ですべりが起っているもの、(b) はすべりが発生し始めるときの弾性解、(c) は弾性解を最大値 $G \gamma_{cr}$ でカットしてその部分だけすべっていると仮定したもので、これから得られる管体ひずみ振幅は、(a) は上界、(b), (c) は下界を与える。また、(a) は文献1)~3)で、(b) は文献3)で扱われており、ガス導管耐震設計指針⁵⁾では、(c) の考え方が用いられている。解の詳細は文献4)によりたい。

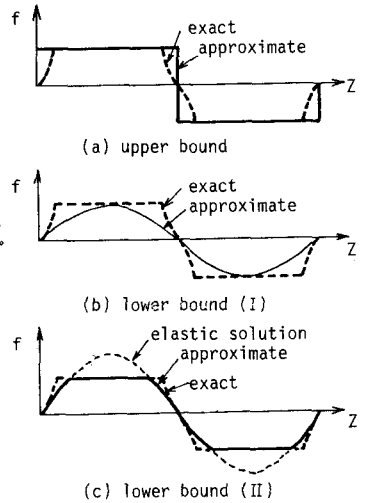


Fig.2 Distribution of Frictional Forces for Approximate Pipe Strain.

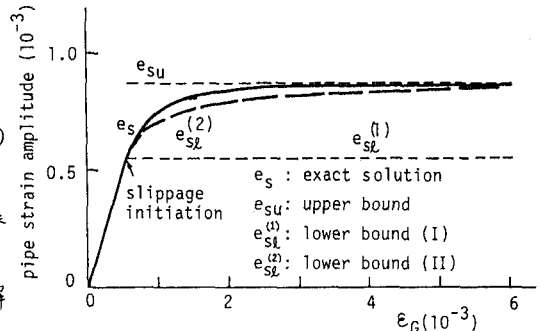
Fig.3 Pipe Strain Amplitude ($L/D=10^3$, $h/D=15$, $D/d=100$, $G/E=2.5 \times 10^{-4}$, $\gamma_{cr}=1.4 \times 10^{-4}$).

Fig. 3 に、管体ひずみ振幅の種々の解を示した。下界(II) $e_{sl}^{(2)}$ が厳密解に比較的良好に追従しているが、 E_d がすべり点の2倍程度以上では、上界 e_{su} もよい近似値である。下界(I) $e_{sl}^{(1)}$ の精度はよくない。

4. 任意方向からの入射波に対する管体の最大ひずみ振幅 式(1),(2)でみたように、管軸方向の見かけの波長 L_d や地盤ひずみ E_d は地震波の入射角 θ によって異なるが、将来の地震における θ は未知であるから、設計の問題としては、種々の θ に対する管体ひずみ振幅のうち最大値を用いるのが一つの妥当な考え方であろう。Fig. 4 に、管体ひずみ振幅と θ の関係を示した。そのうち最大値は、縦波では e_{ml} 、横波では e_{mt} で示されており、それらを与える入射角がそれぞれ θ_{ml} , θ_{mt} である。弾性解では $\theta_{ml} = 0$, $\theta_{mt} \cong \pi/4$ であるが、 γ_{cr} が小さく、すべりが発生しやすくなると、 θ_{ml} , θ_{mt} とともに $\pi/2$ に近づき、両者の差は小さくなる。

Fig. 5 に入射波の地盤ひずみ E_d , γ_d に対する最大管体ひずみ振幅 e_{ml} , e_{mt} の値を示した。それらはすべり領域で非線形挙動を示すが、一定の上界に収束することはないことに注意されたい。

5. 最大管体ひずみ振幅の簡易推定式 Fig. 4 の点Aのように、上界 e_{su} と弾性解との交点は、 e_{ml} のよい近似解を与えるものと考えられる。このことを用いると、縦波・横波に対して、それぞれ最大管体ひずみ振幅 e_{ml} , e_{mt} について、次のような簡単な近似式が得られる。

(1) 縦波:

$$e_{ml} \cong \begin{cases} \frac{E_d}{1+\beta_d} & ; E_d \leq E_{ld} \\ \sqrt[3]{e_{tw}^2 E_d} & ; E_d > E_{ld} \end{cases} \quad \text{----- (6)}$$

(2) 横波:

$$e_{mt} \cong \begin{cases} \frac{\gamma_d}{2\sqrt{1+\beta_d}} & ; \gamma_d \leq \gamma_{td} \\ \sqrt{e_{tw} \gamma_d} & ; \gamma_d > \gamma_{td} \end{cases} \quad \text{----- (7)}$$

ただし、 $e_{tw} = L_d G \gamma_{cr} / (4 E d)$,

$e_{tw} = L_d G \gamma_{cr} / (4 E d)$, $\beta_d =$

$(2\pi/\lambda L_d)^2$, $\beta_d = (2\pi/\lambda L_d)^2$,

$E_{ld} = \sqrt{(1+\beta_d)^3} E_{tw}$, $\gamma_{td} =$

$4(1+\beta_d) E_{tw}$, $\lambda = \sqrt{K/E_d}$

Fig. 5 からわかるように、式(6),

(7) の近似解は、厳密解によく追従する。

特に、すべり領域では、 e_{ml} は地盤ひずみ E_d の3乗根に、 e_{mt} は地盤ひずみ γ_d の平方根に比例する。さらに、 θ_{ml} と θ_{mt} が近い値をとる領域では、縦波と横波が合成された管体ひずみを次式で表すことも考えられる。

$$e_{mc} \cong \sqrt{e_{ml}^2 + e_{mt}^2} \quad \text{----- (8)}$$

1) 桜井高橋東原矢島; 電中研報告, 69087号, (1970).

2) 宮島 名内; 埋設管シボシム, 工管工学会, (1975).

3) Shinozuka, Koike; ASME, PVP34, (1979).

4) Kameda, Shinozuka; Mem. Kyoto Univ., (1982).

5) ガス協会; ガス導管耐震設計指針, (1982).

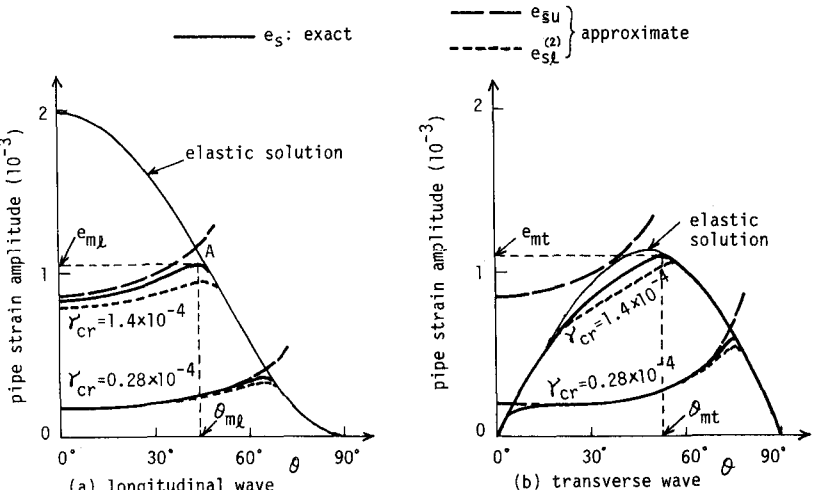


Fig. 4 Pipe Strain Amplitude ($E_d = \gamma_d = 2 \times 10^{-3}$, $L_d/L_t = D/D = 10^3$, $h/D = 15$, $D/d = 100$, $G/E = 2.5 \times 10^{-4}$).

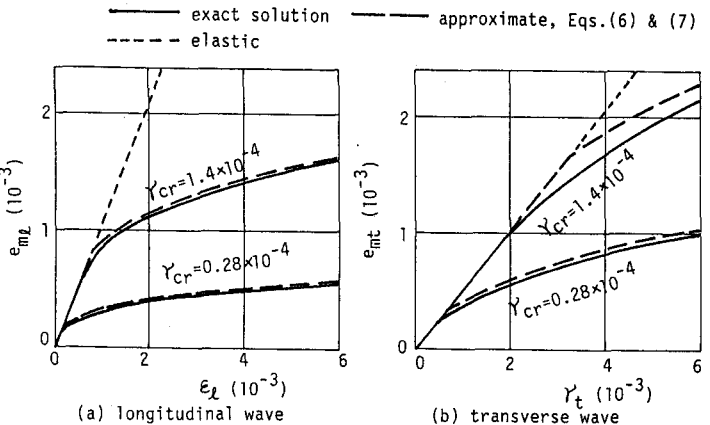


Fig. 5 Maximum Pipe Strain with Unknown Direction of Incidence (same parameter values as Fig. 4).