

熊本大学工学部

正員 秋吉 卓

八代工業高等専門学校

正員 〇利田 邦彦

1. まえがき 管路の耐震性についての研究は、さわめて活発に行なわれてきて、その成果の一部は新設の管路に生かされつつある。ところで大口径の管路は地震時の被害が少ないことが報告されているが、これは管体の剛性が大きく、したがってすべり易いこととも関連があるといわれている。このことから地盤を単純なばねに置き換えて、管体とのすべりを考慮した解析も行なわれてはいるが、管体の運動を支配する周辺の土の動特性が十分には考慮されていないようである。そこで本研究では、周辺の土は完全弾性体として波動論的に取り扱い、管体と土との間のすべりを等価線形化して、管路と土の理論解を導いた。このとき地震波は平面P波およびS波としこれらが任意の角度で管路に入射するものとしたが、表面波についてはここでは考慮していない。

2. 解析手法 図-1 のような直線管路に角度 ϕ で平面P波 w_p が入射するとき、 w_p は次式のように書ける。

$$w_p = w_p \exp[i(\omega t - k_1 x - k_2 z)] \quad , \quad k_1 = k_0 \sin \phi, \quad k_2 = k_0 \cos \phi, \quad k_0 = \omega / v_2 \quad (\text{波数}) \quad (1)$$

ただし、 v_2 は一般には位相速度であるが、ここではP波の伝播速度にしている。ここで管半径を r_0 、地震波の波長を λ とすると、通常の管路では $r_0/\lambda \ll 1$ であり、地震動の卓越振動数を f_0 とすると、無次元振動数は一般には $\alpha_0 = 2\pi r_0 f_0 / v_2 < 1$ となる。そこで、鶴岡および土岐・高田の手法により、入射波を (r, θ, z) の三成分波に分解し、かつ管路よりの反射波の解を導くことができるので、これらを成分ごとに重ね合わせて一般解を得るが、ここでは省略する。

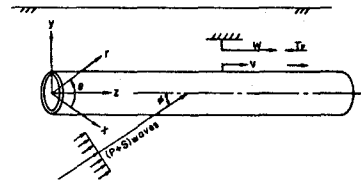


図-1 管路、地盤、地震波のモデル

管体と土との境界面ですべりが発生している状態を考えてみる。図-1のように管体の軸(z)方向変位を v 、土の z 方向変位を w とすると、すべり変位は $y = w - v$ で表わされる。境界面ではクーロン摩擦 τ_F が働いているとすると、これが単弦調振動をしているときには、等価線形化しうる。すなわち、

$$\tau_F = i(4\tau_0/\pi\omega Y) \dot{y} = i(4\tau_0/\pi) \exp[i(\omega t - k_2 z - \phi_r)] \quad , \quad [Y: \text{振幅}, \phi_r: \text{位相角}, \tau_0: \text{すべり応力}] \quad (2)$$

一方境界面における地盤表面のせん断応力 $\tau_{rz}|_{r=r_0}$ は次式のように書き表わされる。

$$\tau_{rz}|_{r=r_0} = \mu \partial w / \partial r|_{r=r_0} = -(\alpha_1 w_1' + \alpha_2 w_2') \exp[i(\omega t - k_2 z)] \quad (3)$$

$$\text{ここに} \quad \alpha_1 = \mu k_1 \frac{J_1(k_1 r_0)}{J_0(k_1 r_0)}, \quad \alpha_2 = \rho \omega^2 \left/ \left[\frac{k_0^2 H_0^{(2)}(k_2 r_0)}{k_2 H_1^{(2)}(k_2 r_0)} + \frac{k_0^2 H_0^{(2)}(k_2 r_0)}{H_1^{(2)}(k_2 r_0)} \right] \right. = Q + ib, \quad w_1' = w_p \cos \phi J_0(k_1 r_0), \quad w_2' = \text{反射波} \quad (4)$$

境界面では $\tau_F = \tau_{rz}|_{r=r_0}$ であるから、(2)=(3)として実数部・虚数部に分けてやると、次の関係をうる。

$$Y = -\frac{4\tau_0}{\pi} \frac{b}{a^2 + b^2} + \left\{ \left[\left(1 - \frac{a\alpha_1}{a^2 + b^2} \right)^2 + \left(\frac{b\alpha_1}{a^2 + b^2} \right)^2 \right] |w_1'|^2 + \left(\frac{4\tau_0}{\pi} \right)^2 \left(\frac{2\pi r_0}{M_0} + \frac{a}{a^2 + b^2} \right)^2 \right\}^{1/2} ; \quad |w_1'| > w_{cr} \quad \text{その他のとき} \quad Y = 0 \quad (5)$$

$$\text{ただし、} \quad w_{cr} = \frac{4\tau_0}{\pi} \left[\left(\frac{2\pi r_0}{M_0} + \frac{a}{a^2 + b^2} \right)^2 + \left(\frac{b}{a^2 + b^2} \right)^2 \right]^{1/2} \left/ \left[\left(1 - \frac{a\alpha_1}{a^2 + b^2} \right)^2 + \left(\frac{b\alpha_1}{a^2 + b^2} \right)^2 \right]^{1/2} \right., \quad M_0 = -m\omega^2 + E\beta k_2^2 \quad (6)$$

このとき管路の変位 v は周波数応答関数 $H_2(\omega)$ を用いて、 $v = H_2(\omega) w_p \cos \phi \cdot \exp[i(\omega t - k_2 z)]$ と書ける。ただし、

$$H_2(\omega) = (k_{21}' - k_{22}') J_0(k_2 r_0) / (M_0 + k_{22}'), \quad k_{21}' = 2\pi r_0 \alpha_1, \quad k_{22}' = 2\pi r_0 \alpha_2 \beta \quad (\beta: \text{土の見かけの剛性}), \quad \beta: \text{増幅率} \quad (7)$$

$$\text{したがってP波に対する軸歪} \quad \varepsilon_{a1} = (-ik_2) H_{a1}(\omega) w_p \cos \phi \cdot \exp[i(\omega t - k_2 z)] \quad (8)$$

同様にしてP波に対する曲げ歪 ε_{b1} は $\varepsilon_{b1} = (r_0 k_2) H_{b1}(\omega) w_p \sin \phi \cdot \exp[i(\omega t - k_2 z)]$ 、 $H_{b1}(\omega)$: 周波数応答関数 (9) 鶴岡のすべりの条件式は式(6)の虚数項を省いた形となっているが、若干問題であろう。S波の場合は省略する。

3. 数値計算

図-2は管体座の周波数応答の一割であるが、一定変位振幅の外力に対しては高振動数域ですべりが発生し、歪を低下させている。実地震動を図-3のように加速度パルス密度一定として考えるときは、その変位スペクトル分布は図-4のようになる。鋳鉄管について、 ω_{cr} と ω_0 を加速度表示したのが図-5、6であり、当然パワーが低振動数域に集中するほど、すべりが発生しやすくなっている。

参考文献 1. 鋳鋼

- 山口：土質工学論文報告集，Vol. 19，No. 4，1979，pp. 21-102.
- 2. 土岐・高田：Ball. Discr. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 24, Part 2, No. 221, 1974, pp. 107-125.
- 3. 秋吉：Earthq. Engrg. Struct. Dyn. (in print)
- 4. 鋳鋼：土木学会論文報告集，第272号，1978，pp. 27-37

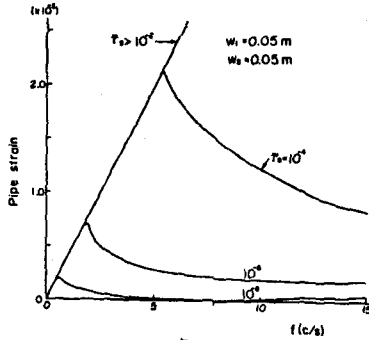


図-2 P波に対する管路歪； $\varepsilon_1 = \varepsilon_{a1} + \varepsilon_{b1}$

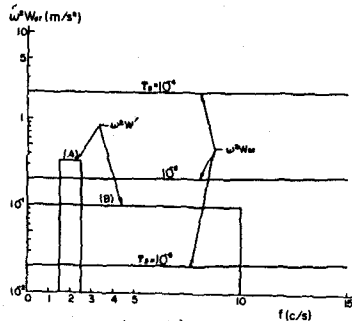


図-5 w_{cr} と $10'$ の加速度表示に比較 (P波)

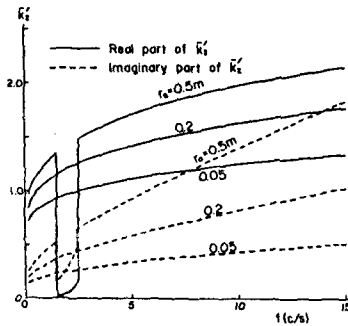


図-7 見かけの土の剛性

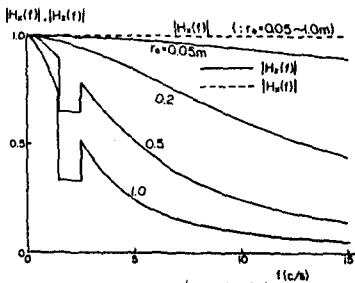


図-8 管路の周波数応答関数

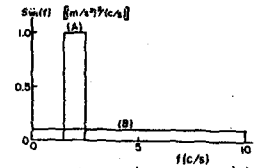


図-3 P波の加速度パルス密度

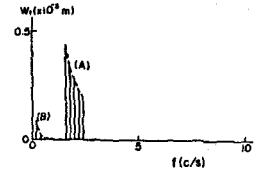


図-4 P波の離散化変位振幅スペクトル

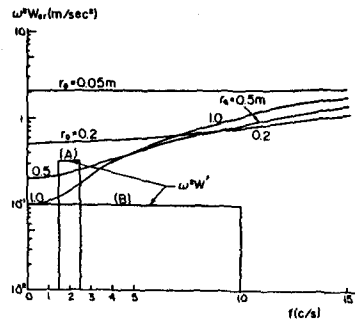


図-6 w_{cr} と $10'$ の加速度表示に比較 (P波)

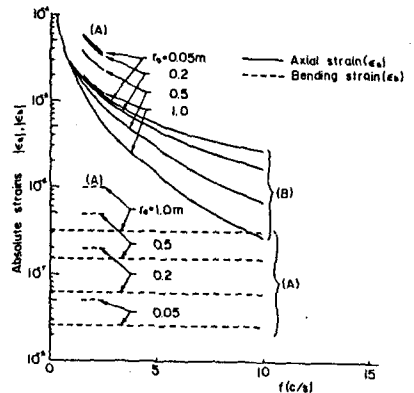


図-9 入力分布の違いによる軸歪 ε_1 と曲げ歪 ε_2 の比較