

地震波の地域的不均一性が埋設管路の応答に及ぼす影響について

熊本大学工学部 正員 秋吉 卓
 八代工業高等専門学校 正員 利田邦彦
 熊本大学工学部 正員 松本英敏

1. まえがき 地中埋設管の耐震性について従来から多くの研究成果が発表されているが、継手に被害が集中する説明としては、管と地盤とのすべりに着目した研究が報告されている¹⁾。一方、管路への入射地震波に関して、その振幅・位相の分布が地盤構造等の変化に応じて一様でない²⁾ために、管体の歪が増大することは十分予想される。そこで本研究では、位相は同一であるが振幅の分布が一様でない地震波を考え、これが水平な埋設管路に入射するときの管路のすべりと応答を波動論的手法より求め、振幅の地域的不均一性が管路の応答に与える影響を検討した。なお、振幅の分布形としては、単調な確定曲線を数種類与え、従来の波動論的な近似解に振幅の不均一性の効果が見通しよく入る程度の近似解を導いた。

2. 解析手法 図1のように弾性地盤中に水平に埋設された一様管路に水平方向から管軸に対して角度 ϕ でP波が入射する場合を考える。このP波は、図2のように同位相で振幅の分布が一様でないものとし、その関数形を $\xi(z)$ とすれば、軸方向入射成分 u_1' は近似的に次式のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} u_1' &= (1 - \alpha_1/\alpha_2) u_{s1} - i(4\tau_s/\pi\alpha_2) e^{i(\omega t - k_1 z - \phi_0)} \\ u_{s1} &= u_1 \xi(z) \cos \phi \cdot e^{i(\omega t - k_1 z)} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここに、 u_1 : P波変位振幅, $\alpha_1 = \mu g_2 \cdot J_1(g_2 r_0)/J_0(g_2 r_0)$, $g_2 = k_2 \sin \phi$
 $= (\omega/v_2) \sin \phi$, ω : 円振動数, k_1 : P波の波数, v_2 : P波速度,
 μ : 土のせん断弾性係数, $J_0()$ ・ $J_1()$: 第1種0次・1次のBessel関数, α_2 : resistance factor [文献1)参照], τ_s : すべり摩擦応力, r_0 : 管半径。管の軸方向変位 $u_1^{(0)}$ は次式のように仮定する。

$$u_1^{(0)} = u_1' - u_1 \quad [\text{ただし, } u_1 = U_1(z) e^{i(\omega t - k_1 z - \phi_0)} \text{ とする}] \dots (2)$$

ここに、 u_1 : すべり変位, ϕ_0 : 位相のずれ。

一方、管の軸方向運動方程式は次式で表わされる。

$$m(\partial^2 u_1^{(0)}/\partial z^2) = E_p S (\partial^2 u_1^{(0)}/\partial z^2) + i \cdot 8 r_0 \tau_s e^{i(\omega t - k_1 z - \phi_0)} \dots (3)$$

ただし、 m : 管の単位長質量, E_p : 管のYoung率, S : 管の突断面 図2 振幅分布が一様でない入射波の模式図
 積。(1)・(2)式を(3)式に代入して整理すると次式となる。

$$(1 - \alpha_1/\alpha_2) [M_0 \xi - E_p S (\xi'' - 2i k_1 \xi')] u_1 \cos \phi - i(4\tau_s/\pi\alpha_2) M_0 e^{-i\phi_0} = [M_0 U_1 - E_p S (U_1'' - 2i k_1 U_1') + i \cdot 8 r_0 \tau_s] e^{-i\phi_0} \dots (4)$$

ここに、 $M_0 = -m\omega^2 + E_p S k_1^2$, $\xi' = \partial \xi(z)/\partial z$, $\xi'' = \partial^2 \xi(z)/\partial z^2$, $U_1' = \partial U_1(z)/\partial z$, $U_1'' = \partial^2 U_1(z)/\partial z^2$ 。
 ここで、 $U_1'' = U_1' = \xi'' = 0$ と近似すれば、すべり振幅 U_1 が次式のように求められる。

$$U_1 = -(4\tau_s/\pi) S_2 + \sqrt{\{(1 - \alpha_1/\alpha_2) \xi - 2k_1 E_p S \xi' \alpha_1 S_2/M_0\}^2 + \{ \alpha_1 S_2 \xi + 2k_1 E_p S \xi' (1 - \alpha_1/\alpha_2)/M_0\}^2} u_1 \cos^2 \phi - (4\tau_s/\pi)^2 (S_1 + 2\pi r_0/M_0)^2} \dots (5)$$

ただし、 U_1 の存在条件は、 $|u_1| > u_{cr}$ であり、 $|u_1| < u_{cr}$ の場合、 $U_1 = 0$ とする。ここに、

$$u_{cr} = \frac{1}{\cos \phi} \sqrt{\frac{(4\tau_s S_2/\pi)^2 + \{(4\tau_s/\pi)(S_1 + 2\pi r_0/M_0)\}^2}{\{(1 - \alpha_1/\alpha_2) \xi - 2k_1 E_p S \xi' \alpha_1 S_2/M_0\}^2 + \{ \alpha_1 S_2 \xi + 2k_1 E_p S \xi' (1 - \alpha_1/\alpha_2)/M_0\}^2}} \dots (6)$$

および、 $\alpha_2 = a + ib$, $S_1 = a/(a^2 + b^2)$, $S_2 = b/(a^2 + b^2)$ 。同様に $e^{-i\phi_0}$ も導かれ、(2)式より管変位 $u_1^{(0)}$ を得る。管の横方向変位も従来と同様の手法で求まるので、P波による管歪の周波数応答関数 G_1 は次式で表わされる。

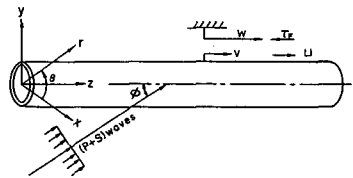


図1. 管路モデル

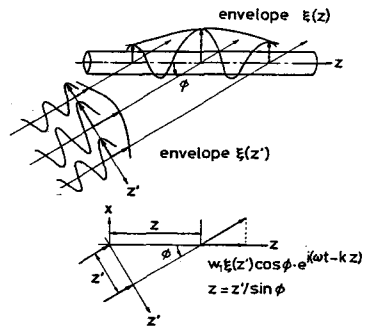


図2 振幅分布が一様でない入射波の模式図

$$G_1 = (1 - d_1/d_2) \cos \phi \cdot i 8 r_0 \tau_0 / M_0 \cdot \{ \xi' - i \xi_1 \xi' \} / \{ U_1 + i 4 \tau_0 / \pi \cdot (1/d_2 + 2\pi r_0 / M_0) \} + \sin \phi \cdot \gamma_0 H_{x1}(\omega) \{ R_2^* \xi + 2 i \xi_1 \xi' \} \quad \dots (7)$$

ただし、 $H_{x1}(\omega)$ ：P波に対する管の横方向周波数応答関数〔文献1〕参照〕。

次に管体と継手とが交互に周期的に接続した管を一樣管路に等価的に置き換えて、継手伸縮量を管体のすべり量と継手部の前後端間の相対変位の和として推定すれば、その周波数応答関数 P_1 は次式のように表わされる。

$$P_1 = \left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) \cos \phi \left[\frac{U_1(l) \xi(l) e^{-i k_1 l}}{U_1(l) + i \frac{4 \tau_0}{\pi} \left(\frac{1}{d_2} + \frac{2 \pi r_0}{M_0} \right)} - \frac{U_1(0) \cdot \xi(0)}{U_1(0) + i \frac{4 \tau_0}{\pi} \left(\frac{1}{d_2} + \frac{2 \pi r_0}{M_0} \right)} + \frac{i \frac{8 r_0 \tau_0}{M_0} \xi(e) \cdot e^{-i k_1 e}}{U_1(e) + i \frac{4 \tau_0}{\pi} \left(\frac{1}{d_2} + \frac{2 \pi r_0}{M_0} \right)} - \frac{i \frac{8 r_0 \tau_0}{M_0} \xi(0)}{U_1(0) + i \frac{4 \tau_0}{\pi} \left(\frac{1}{d_2} + \frac{2 \pi r_0}{M_0} \right)} \right] \quad \dots (8)$$

ただし、 l ：管長、 e ：継手有効長。

S波入射の場合は、 $\omega \cos \phi$ 、 $\omega \sin \phi$ 、 $k_1 = \omega \cos \phi / v_2$ をそれぞれ $-k_2 \sin \phi$ 、 $k_2 \cos \phi$ 、 $k_2 = \omega \cos \phi / v_2$ と置き換えれば、同様の手順より管歪・継手伸縮量の周波数応答関数 $G_2 \cdot P_2$ が導かれるが、ここでは省略する〔 ω_2 ：S波変位振幅、 k_2 ：S波の波数、 v_2 ：S波速度〕。P・S波が同時に入射するときの管歪 ε と継手伸縮量 d はこれらの周波数応答関数を用いて次式より求められる。

$$\varepsilon = G_1 \omega_1 e^{i(\omega t - k_1 x)} + G_2 \omega_2 e^{i(\omega t - k_2 x)} \quad \dots (9)$$

$$d = P_1 \omega_1 e^{i \omega t} + P_2 \omega_2 e^{i \omega t} \quad \dots (10)$$

3. 数値計算結果と考察 入射P・S波としてEl Centro強震記録のNS・EW成分のRMSを50 galに低減したものを用い、振幅を包絡する関数の一例としては図3に示すようなものを仮定した。諸量は土のせん断弾性係数 μ 、管半径 r_0 等により無次元化して用い、管歪と継手伸縮量のRMS値 σ_p 、 α_2 を数値計算した。図4は管歪 σ_p と入射角の関係であるが、振幅分布が一樣でない場合は、振幅分布が一樣な場合とほぼ同じ傾向が得られるものの、管歪はやや大きくなり、とくに入射波が管軸と直角に近い角度で入射するときでも σ_p は無視できず、振幅分布の不均一性に影響されることがわかる。図5より管半径が大きくなるほどすべりが発生しやすく、管歪が低下して管体の負担が軽減されている。また図5・6より、すべりがある程度進行すれば、 σ_p は一樣分布の場合とほぼ等しくなり、低く押えらる。図7より継手伸縮量に対する振幅分布の影響は、管歪に対するそれと当然逆の関係になっている。

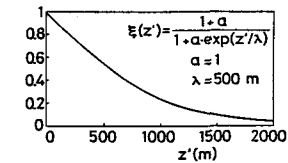


図3 入射波振幅分布の包絡線関数の一例

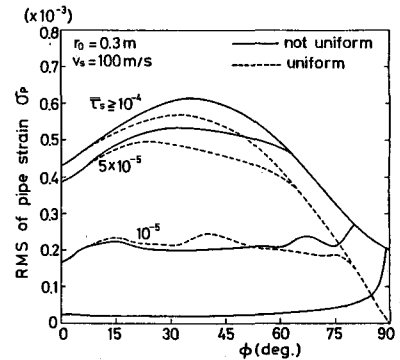


図4 管歪 σ_p と入射角 ϕ との関係

*参考文献 1) 秋吉・洲田：土木学会論文報告集，第334号，pp. 25~34，1983。 2) 原田 他：第17回地震工学研究発表会講演概要，pp. 99~102，1983。

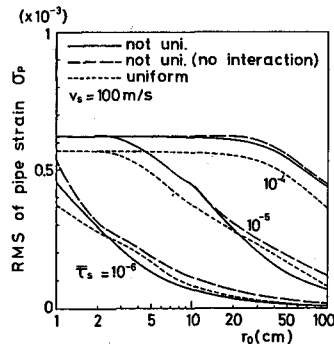


図5 管歪 σ_p と管半径 r_0 との関係

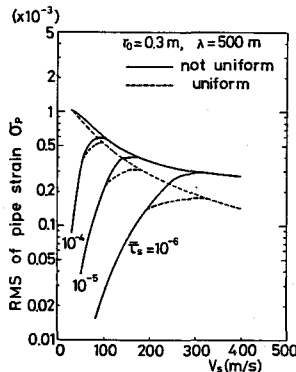


図6 管歪 σ_p と土のS波速度 v_s との関係

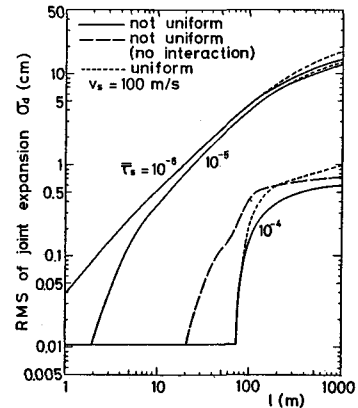


図7 継手伸縮量 α_2 と管長 l との関係