

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 洲田 邦彦

1. まえがき 地震記録から算出した地盤変形に比して埋設管路の被害が意外に大きいことがある。継手に被害が集中する説明としては、管体のすべりによる土と管体の相対変位を、剛性の弱点部といわれる継手が吸収できないことにあるとした研究がこれまでにいくつか発表されてきた¹⁾。また一方、地盤構造等の変化に伴って地震波の振幅・位相の分布も一様でなくなり²⁾、したがって管体の歪は増大することが予想される。本研究では、位相はそろっているが、振幅の分布が一様でない地震波を考えて、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求め、従来の解と比較検討した。なお振幅の分布形としては、ごく単純な確定曲線を与えて、従来の解にこの振幅の不均一性の効果が見通しよく入る程度の近似解にとどめた。

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 θ でP波が入射する場合を考える。このP波は図2のように位相は同じだが z' 軸方向の振幅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 ξ は近似的に次式のように表わされる。

$$w_1' = w_1 \cos \theta \cdot \xi(z') e^{i(\omega t - k_1 z)} \quad \dots (1)$$

ここに、 w_1 : P波変位振幅、 ω : 円振動数、 $k_1 = \omega \cdot \cos \theta / v_p$: P波の波数、 v_p : P波速度、管の軸方向変位 $v_z^{(0)}$ は次式で表わされる。

$$v_z^{(0)} = w_1' - y_1, \quad [\text{ただし } y_1 = Y_1(z') e^{i(\omega t - k_1 z - \phi_1)} \text{ とする}] \quad \dots (2)$$

ここに、 y_1 : すべり変位、 ϕ_1 : 位相のずれ、管の軸方向運動方程式(土と管の弾性相互作用無視)は次式となる。

$$m(\partial^2 v_z^{(0)} / \partial t^2) = E_p S (\partial^2 v_z^{(0)} / \partial z^2) + 2\pi r_0 \tau_f \quad \dots (3)$$

ここに、 m : 管の単位長質量、 E_p : 管のYoung率、 S : 管の突断面積、 r_0 : 管半径、 $\tau_f = i \frac{4E_s}{\pi} e^{i(\omega t - k_1 z - \phi_1)}$ 等価線形化したすべり摩擦応力(coulomb摩擦¹⁾)。 (1)・(2)式を(3)式に代入して整理すると次式となる。

$$\begin{aligned} & [-E_p S \xi'' + M_1 \xi + 2i k_1 E_p S \xi'] w_1 \cos \theta \\ & = [-E_p S Y_1'' + M_1 Y_1 + 2i k_1 E_p S Y_1'] e^{-i\phi_1} e^{i \cdot 2\pi r_0 \frac{4E_s}{\pi}} e^{-i\phi_1} \quad \dots (4) \end{aligned}$$

ここに、 $M_1 = E_p S k_1^2 - m \omega^2$ 、 $\xi' = \partial \xi(z') / \partial z$ 、 $\xi'' = \partial^2 \xi(z') / \partial z^2$ 、 $Y_1' = \partial Y_1(z) / \partial z$ 、 $Y_1'' = \partial^2 Y_1(z) / \partial z^2$ 。そこで $Y_1'' = Y_1' = \xi'' = 0$ と近似すれば、すべり振幅 Y_1 は、

$$Y_1 = \sqrt{[(M_1 \xi^2 + (2k_1 E_p S \xi')^2) |w_1|^2 \cos^2 \theta - (8r_0 \tau_s)^2] / |M_1|} \quad \dots (5)$$

と求められる。ただし、 Y_1 の存在条件は、 $|w_1| > 8r_0 \tau_s / [\cos \theta \sqrt{(M_1 \xi^2 + (2k_1 E_p S \xi')^2)}] = 4\tau_f$ であり、 $|w_1| < 4\tau_f$ の場合、 $Y_1 = 0$ とする。同様に $e^{-i\phi_1}$ も導かれ、適当な近似をすれば、管変位 $v_z^{(0)}$ が次式のように得られる。

$$v_z^{(0)} = [i \cdot 8r_0 \tau_s \xi / (M_1 Y_1 + i \cdot 8r_0 \tau_s)] w_1 \cos \theta \cdot e^{i(\omega t - k_1 z)} \quad \dots (6)$$

管の曲げ歪についても従来と同様の手法で求めるので、P波による管の全歪の周波数応答関数 G_1 は次式のようになる。

$$G_1 = \cos \theta \cdot [i \cdot 8r_0 \tau_s (\xi' - i k_1 \xi) / (M_1 Y_1 + i \cdot 8r_0 \tau_s) + \sin \theta \cdot r_0 \{k_1^2 \xi + 2i k_1 \xi'\}] \quad \dots (7)$$

次に、管体と継手とが交互に周期的に接続した管と一様管路に等価的に置き換え、管体すべり量と継手前後端間の相対変位とから継手伸縮量を推定すれば、その周波数応答関数 P_1 は次式のように得られる。

$$P_1 = \cos \theta \left[Y_1(z) \frac{\{2i k_1 E_p S \xi(z) + M_1 \xi(z)\} e^{-i k_1 z}}{M_1 Y_1(z) + 2i k_1 E_p S Y_1'(z) + i \cdot 8r_0 \tau_s} - Y_1'(z) \frac{M_1 \xi(z) + 2i k_1 E_p S \xi'(z)}{M_1 Y_1(z) + 2i k_1 E_p S Y_1'(z) + i \cdot 8r_0 \tau_s} \right]$$

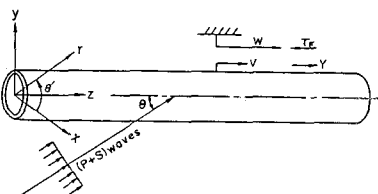


図1 管路モデル

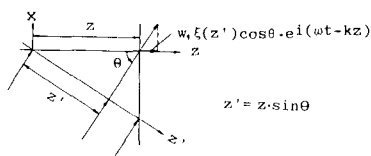
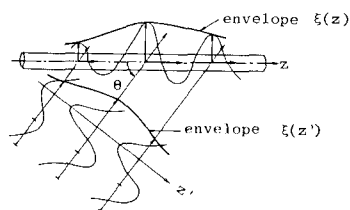


図2 振幅分布が一様でない入射波の模式図

$$+ \frac{\{-2i k_1 E_P \xi'(e) Y_1(e) + i \cdot 8 r_0 T_S \xi(e)\} e^{-i k_1 e}}{M_1 Y_1(e) + 2i k_1 E_P S Y_1'(e) + i \cdot 8 r_0 T_S} \\ - \frac{\{-2i k_1 E_P S \xi(0) Y_1(0) + i \cdot 8 r_0 T_S \xi(0)\}}{M_1 Y_1(0) + 2i k_1 E_P S Y_1'(0) + i \cdot 8 r_0 T_S} \Bigg], \left[\begin{array}{l} l: \text{管長}, \\ e: \text{継手有効長とする} \end{array} \right] \dots (8)$$

S波入射の場合は、 $\omega_1 \cos \theta$, $\omega_1 \sin \theta$, $k_1 = \omega \cos \theta / v_s$ とそれぞれ $-\omega_2 \sin \theta$, $\omega_2 \cos \theta$, $k_2 = \omega \cos \theta / v_s$ と置き換えれば、管歪・継手伸縮量の周波数応答関数 $G_2 \cdot P_2$ が同様な手順で導かれるが、ここでは省略する(注: S波の変位振幅, v_s : S波速度)。これら周波数応答関数より、P波・S波同時入射による管の全歪 ϵ と全継手伸縮量 d は次式によって求められる。

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

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

3. 数値計算結果と考察 入射P・S波としてEl Centro(1940)強震記録のNS・EW成分のRMSを50galに低減したものを用い、振幅を包絡する関数 $\xi(z')$ は図3に示すものを仮定し、計算に用いる諸量は管半径 r_0 , 土のせん断弾性係数 G などで無次元化して、管歪や継手伸縮量のRMS値 σ_p , α を数値計算した。図4より、振幅分布が一樣でない場合は、分布一樣の場合と傾向的

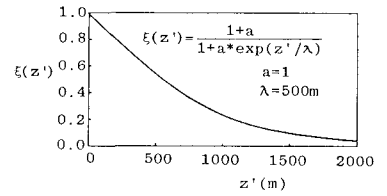


図3 入射波振幅分布の包絡線関数

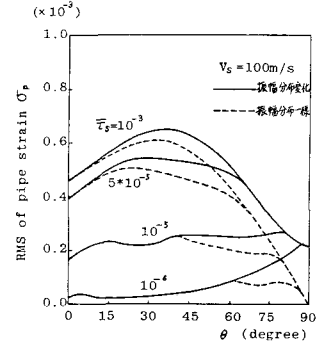


図4 管歪 σ_p と入射角 θ との関係

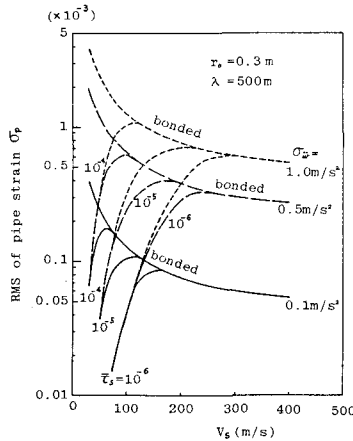


図5 管歪 σ_p と土のS波速度 v_s との関係

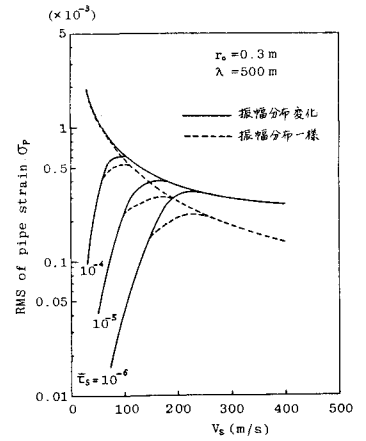


図6 管歪 σ_p と土のS波速度 v_s との関係

に似ているものの、 σ_p がやや大きく、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、振幅分布に影響される。図5より v_s の小さな柔らかい地盤ほどすべりにくいが、 T_S の低下とともにすべりが生じ管体の負担が軽減される。図6より分布一樣でない場合 σ_p がやや大きい、すべりが進行すれば σ_p は一樣分布の場合と等しくなり軽減される。図7・8より、継手伸縮量 α を低減するには管長を短くすることが効果的といえる。また振幅分布の影響は、管歪 σ_p に対するものと当然逆の関係になっている。

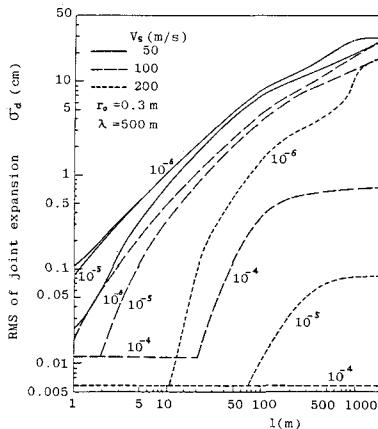


図7 継手伸縮量 α と管長 l との関係

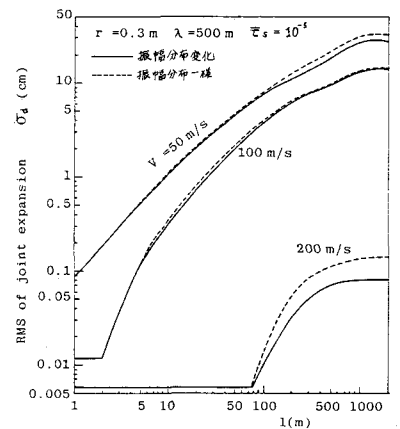


図8 継手伸縮量 α と管長 l との関係

*参考文献 1) 秋吉・利田: 土木学会論文報告集, 第334号, PP. 25~34, 1983.

2) 原田 他: 昭和58年度土木学会西部支部研究発表会概要集, PP. 80~81, 1984.