

(79) 埋設管路周囲の土の劣化が地震応答に与える影響について

熊本大学工学部 〇秋吉 卓
 八代工業高等専門学校 瀧田 邦彦
 鹿島建設 吉弘 英光

1. まえがき 地震記録から単純に地盤のひずみを推定してみると、それが意外に小さいにもかかわらず、埋設管路とくにその弱点部といわれる継手に被害が多く発生している。これの一つの要因として管体と地盤にずれが生じて、その分が継手等の弱体部の吸収能力を超えることが挙げられよう。この地盤と管体との間の滑りに関しては、これまでいくつかの解析手法が提案され、管路の震害の一部がうまく説明できることもあった^{1)~4)}。しかしながら地震時には、杭の打込時に見られるような、滑りだけでなく接触面のごく近辺の土の劣化ないしは破壊も考えられるので、ここではこれら両者を考慮した解析法を提案しようとするものである。解析はこれまでと同様に定常震動を対象にすることにして、土と管路の接触面での滑りと劣化を等価線形モデルに置き換えて線形問題にしている。したがって、半無限の土と管路の間に2つのVoigtモデルが直列に入った系となるが、土の剛性劣化の範囲を与えることについては全く工学的判断を要する。また管路については、線形剛性を持つ継手が等間隔に入っているものとして、管体-継手系を静的に等価な一樣管路に置き換えて数値計算を行っている。

2. 解析手法 図1のような水平一樣な管路に水平方向からS(SH波)とP波が同時に、管軸への入射角φで来襲する場合を考える。

(α) 管軸方向の振動 図2のように管周に剛性が劣化した薄層(層厚d)と滑りが発生している状態について考えるとき、境界B₁においてはせん断抵抗力 $\tau_{rz}|_{r=r_0}$ は次式のように書き表わすことができる⁴⁾

$$\tau_{rz}|_{r=r_0} = -(\alpha_1 \omega_0 + \alpha_2 \omega_0') \quad \dots (1)$$

ここに、 $\omega_0 = W_p \cos \phi$, $\omega_0' = B \left(\frac{2\delta_2}{r_0}\right) H_0^{(2)}(\delta_2 r_0) F(r)$, $W_p = \lambda$ 射P波の変位振幅(小文字の変位 w_p は $\exp[i(\omega t - k_z z)]$ を含み、大文字 W_p は含まない。以後同じ)、 $B =$ 未定係数, $\alpha_1 = \mu k_e \sin \phi J_1(\delta_2 r_0) / J_0(\delta_2 r_0)$, $\delta_2 r_0 = r_0 \omega \sin \phi / v_2$, $v_2 = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$, $\lambda, \mu =$ Laméの定数, $\rho =$ 土の密度, $r_0 =$ 管半径, $\delta_2 = k_e \sin \phi$, $k_e = \omega / v_2$, $J_0(\cdot), J_1(\cdot) =$ Bessel関数, $\alpha_2 = \rho \omega^2 / F(r_0)$,

$$F(r) = \frac{k_0^2 \cos^2 \phi}{\delta_2} \frac{H_0^{(2)}(\delta_2 r)}{H_1^{(2)}(\delta_2 r_0)} + \frac{\delta_2 H_0^{(1)}(\delta_2 r)}{H_1^{(1)}(\delta_2 r_0)}, \quad H_0^{(1)}(\cdot), H_1^{(1)}(\cdot) : \text{Hankel関数}$$

$\omega =$ 円振動数, $\delta_2 = \sqrt{1 - (v_2/v_2)^2} \cos^2 \phi \cdot k_s$, $k_s = \omega / v_s =$ S波の波数。一方境界B₁, B₂間の劣化土のせん断抵抗力 τ_1 として履歴等価系

$$\tau_1 = K(1 + i\eta) u_1, \quad (K, \eta = \text{等価せん断係数, 減衰定数}) \quad \dots (2)$$

の形を仮定すると、 $\tau_{rz}|_{r=r_0} = \tau_1$ となるので次の関係が成り立つ。故に、

$$-(\alpha_1 \omega_0 + \alpha_2 \omega_0') = K(1 + i\eta) u_1 \quad \dots (3)$$

ただし、劣化部分の等価せん断剛性を G_{og} とすると、 $K = G_{og}/d$ ($d =$ 劣化幅)。さらに管と土の境界B₂においてCoulomb摩擦を考えると、摩擦応力 τ_f は図3のような履歴を描くが、これを等価線形化すると次式となる⁴⁾

$$\tau_f = 4 \tau_s u_2 / (\pi \omega L_2) \cdot \exp[i(\omega t - k_z z - \phi_{u_2})] \quad \dots (4)$$

ここに、 $u_2 = L_2 \exp[i(\omega t - k_z z - \phi_{u_2})]$ は滑り変位振幅、および $L_2, \phi_{u_2} =$ 滑り変位の突振幅と位相差, $k_z = k_e \cos \phi = \omega \cos \phi / v_2 =$ P波(軸方向)の波数。

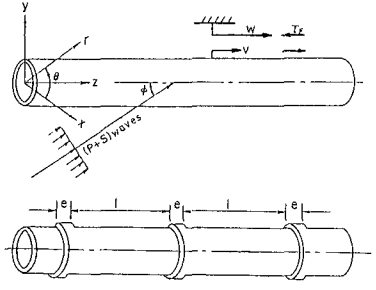


図1 管路モデル

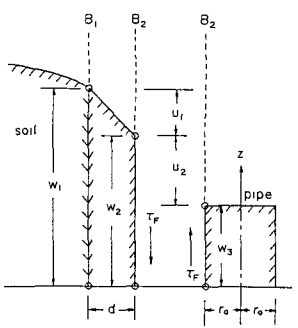


図2 土と管の変形模式図

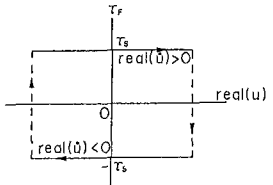


図3 接触面の滑り変位と摩擦応力

境界B₂においては、 $\tau_F = \tau_1$ が成り立つので次の関係式をうる。

$$i(4\tau_s/\pi) \exp[i(\omega t - k_1 z - \phi_{u2})] = K(1+i\eta) u_1 \quad \dots (5)$$

一方管の軸方向変位を w_3 とすると、その運動方程式は次式のように書き表わされる。

$$m \frac{\partial^2 w_3}{\partial t^2} = ES \frac{\partial^2 w_3}{\partial z^2} + 2\pi r_0 \tau_F \quad (m, E, S = \text{管の単位長質量, Young 率, 突断面積}) \quad \dots (6)$$

そこで、 $u_2 = U_2 \exp[i(\omega t - k_1 z - \phi_{u2})]$, $w_0 = W_0 \exp[i(\omega t - k_1 z)]$ とすると、反射波 w'_0 は(3)と(5)より

$$w'_0 = -\frac{\alpha_1}{\alpha_2} w_0 - i \frac{4\tau_s}{\pi \alpha_2} e^{i(\omega t - k_1 z - \phi_{u2})} \quad \dots (7)$$

同様に(5)より $u_1 = i \frac{4\tau_s}{\pi} / [K(1+i\eta)] \cdot e^{i(\omega t - k_1 z - \phi_{u2})}$... (8)

ここで、 $w_3 = w_1 - (u_1 + u_2)$, および(4),(8)などを(6)に代入すると次式をうる。

$$\left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right) W_0 - i \frac{4\tau_s}{\pi \alpha_2} e^{-i\phi_{u2}} = \frac{i \frac{4\tau_s}{\pi}}{K(1+i\eta)} \cdot e^{-i\phi_{u2}} + U_2 e^{-i\phi_{u2}} + 2\pi r_0 \frac{i \frac{4\tau_s}{\pi}}{-m\omega^2 + ES k_1^2} e^{-i\phi_{u2}} \quad \dots (9)$$

これを実数部・虚数部に分けて整理すると、次の2次をうる。

$$\frac{4\tau_s}{\pi} (S_1 + \delta_1 + \frac{2\pi r_0}{M_0}) \sin \phi_{u2} + \left[\frac{4\tau_s}{\pi} (S_2 + \delta_2) + U_2 \right] \cos \phi_{u2} = (1 - S_1 \alpha_1) W_R - S_2 \alpha_1 W_I \quad \dots (10)$$

$$- \left[\frac{4\tau_s}{\pi} (S_2 + \delta_2) + U_2 \right] \sin \phi_{u2} + \frac{4\tau_s}{\pi} (S_1 + \delta_1 + \frac{2\pi r_0}{M_0}) \cos \phi_{u2} = S_2 \alpha_1 W_R + (1 - S_1 \alpha_1) W_I \quad \dots (11)$$

ここに、 $W_R, W_I = W_0$ の実部・虚部、 $M_0 = -m\omega^2 + ES k_1^2$, $a, b = \alpha_2$ の実部・虚部、 $S_1 = a/(a^2+b^2)$, $S_2 = b/(a^2+b^2)$, $\delta_1 = 1/[K(1+\eta^2)]$, $\delta_2 = \eta/[K(1+\eta^2)]$ 。したがって(10),(11)の両辺を2乗して辺々加えよると次式をうる。

$$U_2 = \begin{cases} -\frac{4\tau_s}{\pi} (S_2 + \delta_2) + \sqrt{\left[(1 - \alpha_1 S_1)^2 + \alpha_1^2 S_2^2 \right] |W_0|^2 - \left(\frac{4\tau_s}{\pi} \right)^2 \left(S_1 + \delta_1 + \frac{2\pi r_0}{M_0} \right)^2} & ; |W_0| > W_{cr} \\ 0 & ; |W_0| < W_{cr} \end{cases} \quad \dots (12)$$

$$\text{ここに、} W_{cr} = \frac{4\tau_s}{\pi} \sqrt{\frac{(S_1 + \delta_1 + \frac{2\pi r_0}{M_0})^2 + (S_2 + \delta_2)^2}{(1 - \alpha_1 S_1)^2 + \alpha_1^2 S_2^2}}, \quad |W_0|^2 = W_R^2 + W_I^2 \quad \dots (13)$$

同様にして、位相角 ϕ_{u2} に関しては、(9)より $\exp(-i\phi_{u2})$ の形で得られるので、これと U_2 とを結合すると、

$$u_2 = U_2 e^{i(\omega t - k_1 z - \phi_{u2})} = \frac{U_2}{i \frac{4\tau_s}{\pi} \cdot \frac{2\pi r_0}{M_0}} H_{21}(\omega) W_0 e^{i(\omega t - k_1 z)}, \quad [W_0 = W_p \cos \phi, W_p = P \text{波振幅}] \quad \dots (14)$$

$$\text{ここに、} H_{21}(\omega) = \frac{\left(1 - \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right) i \frac{4\tau_s}{\pi} \frac{2\pi r_0}{M_0}}{i \frac{4\tau_s}{\pi} \left[\frac{1}{\alpha_2} + \frac{1}{K(1+i\eta)} + \frac{2\pi r_0}{M_0} \right] + U_2} \quad [\text{: 管の軸方向変位の周波数応答関数}] \quad \dots (15)$$

これより、 $w_1 = w'_0 + w_0$, $w_2 = w_1 - u_1$, および $w_3 = w_2 - u_2$ より管変位 w_3 は次式となる。

$$w_3 = H_{21}(\omega) w_0 = H_{21}(\omega) W_p \cos \phi \cdot \exp[i(\omega t - k_1 z)] \quad \dots (16)$$

(b) 管軸直角方向の振動 P波による土圧 p'_x が管軸に直角に作用するとき、管の横方向運動は次式のようになる。⁴⁾

$$EI \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} + m \frac{\partial^2 v_x}{\partial t^2} = p'_x e^{i(\omega t - k_1 z)}, \quad [v_x = \text{管の横方向変位, } EI = \text{曲げ剛性}] \quad \dots (17)$$

$$\text{ただし、} p'_x = p \pi r_0^2 \omega^2 \rho_s^2 K_x [W_p \sin \phi - v'_x] \quad \dots (18)$$

$$K_x = (R_2 + R_3 - 4)/(R_2 R_3 - R_2 - R_3), \quad R_2 = \delta_2 r_0 H_0^{(2)}(\delta_2 r_0)/H_1^{(2)}(\delta_2 r_0), \quad R_3 = \delta_3 r_0 H_0^{(2)}(\delta_3 r_0)/H_1^{(2)}(\delta_3 r_0).$$

したがって(17)の定常解は次式のように求められる。

$$v_x = H_{x1}(\omega) W_0 \sin \phi \cdot \exp[i(\omega t - k_1 z)], \quad [H_{x1}(\omega) = \text{管の横方向変位の周波数応答関数}] \quad \dots (19)$$

$$\text{ここに、} H_{x1}(\omega) = p \pi r_0^2 \omega^2 \rho_s^2 K_x / [EI k_1^4 \cos^2 \phi - m \omega^2 + p \pi r_0^2 \omega^2 \rho_s^2 K_x] \quad \dots (20)$$

一方S波入射の場合は、P波の場合の $w_p \cos \phi$, $w_p \sin \phi$, $k_2 = \omega/v_s$ を $w_s \sin \phi$, $-w_s \cos \phi$, $k_s = \omega/v_s$ と置けばよい。

(c) 継手伸縮量の簡易推定法 図1の下図のように管体と継手が交互に連結されているとき、管体の軸方向の

ばね剛性 $k_p = ES/l$ と継手の剛性 k_j に対して、静的に等価な一様管路のばね剛性 $k'_e = E'S/l$ (E' = 等価 Young 率) については次式が成り立つ; $\frac{1}{k'_e} = \frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_j}$ あるいは $\frac{E'}{E} = 1 - \frac{1}{1 + k_j/k_p}$. さらに等価伝播速度 v'_p については $v'_p/v_p = \sqrt{E'/E}$ となる。ここではダクタイル鋼鉄管として, $r_o = 15 \text{ cm}$, $l = 6 \text{ m}$ 程度の管では, $k_p = 3 \times 10^4 \text{ t/m}$, $k_j = 5 \times 10^3 \text{ t/m}$ 程度と推定されるので, 近似的には $k_j/k_p \sim l/36$ (l : メートル単位) となる。

管の一端の変形が建物や分岐で妨げられているときは, 継手伸縮量の最大値 d は管体のすべり量 d_s と継手前後端間の相対変位 d_j との和で推定することができよう。そこで一管体分のすべりを d_s として定義すると, (14)より

$$d_s = L_1(\omega) w_p e^{i\omega t} + L_2(\omega) w_s e^{i\omega t} \quad \dots (21)$$

$$\text{ここに } L_1(\omega) = (1 - \alpha_2'/\alpha_2) \cos \phi [\exp(-i k_2 l \cos \phi) - 1], \quad \alpha_2'/\alpha_2 = 1 - (1 - \alpha_1/\alpha_2) M_0 (L_2 + i \frac{4\tau_s}{\pi \alpha_2}) / [M_0 L_2 + i \frac{4\tau_s}{\pi \alpha_2} (M_1 + \alpha_2/\alpha_3)], \quad \alpha_3 = K(1 + i\eta), \quad M_1 = M_0 + 2\pi r_o \alpha_1.$$

なお S 波の場合については, P 波の $w_p \cos \phi$, $w_p \sin \phi$, $k_2 = \omega/v_2$ をそれぞれ $w_s \sin \phi$, $-w_s \cos \phi$, $k_s = \omega/v_s$ とする。

3. 数値計算結果とその考察

入力地震波としては, 国内外の強震記録(加速度)の比較的定常部分の高速フーリエ変換により, 離散加速度振幅スペクトルを求め, これらを ω^2 で除して変位振幅として用いた。この場合 $\Delta t = 0.01 \text{ sec}$ に対して選点数 $N = 1024$ としている。⁴⁾ 計算結果は, El Centro (1940) の NS, EW 成分の強震部の RMS 値を各々 50 gal にしたものを, P 波・S 波の標準値として用い(図4参照), 土や管体のひずみおよび管継手の伸縮量の RMS 値を算出し検討している。図中では, 土の劣化部分の等価せん断剛性 $G_{eq} (=Kd)$ および滑り応力 τ_s を土のせん断弾性係数 G で除して, $\overline{G_{eq}} = G_{eq}/G$, $\overline{\tau_s} = \tau_s/G$ と無次元化している。図5には管ひずみの RMS 値 σ_p を土のせん断波速度 v_s に対してプロットしている。地盤が軟い (v_s が小さい) ほど滑りにくくなり, 管ひずみは上昇気味だが, τ_s の低下とともに滑りが発生し, 管体の負担は軽減される。ただし土の劣化が進行している範囲 d として, $d = 1 \text{ m}$ を基準にしている。図6は前図と同様であるが, 土の劣化が進むと (G_{eq} が小さくなると), 滑っていないくても v_s の低下とともに σ_p は低下する。図7は管ひずみ σ_p と管半径 r_o との関係を図示したものである。管径が大きいものほど滑りが発生しやすく, そのため σ_p の低下も著しいが, 一方 G_{eq} が小さい(劣化が著しい)ほど σ_p の低下が r_o の増大に伴って漸減して行き, 結局は滑らないでも管体のひずみは低く抑えられることがありうる。これは劣化した部分で地震波のエネルギーが吸収され, 管までの影響が少なくなることを意味している。図8は多くの地震波の入力レベルを変えたときの, 管体と土のひずみ σ_p , σ_s の相関図であり, 図中の実線は標準入力としている El Centro (1940) についてである。これより滑りや土の劣化のため管ひずみが軽減されていることが分り, 各地震波の定常部分のレベルを合わせてやると結果はほぼ同じものになることが示されている。図9も σ_p と σ_s の相関図であるが, 土の劣化が進むと σ_p が低下することは前出の傾向と一致している。図中の直線の勾配が変化しているのは, 劣化の上に滑りが新たに発生して, σ_p をさらに引下げていることを示し, G_{eq} が小さいほど滑りが発生しにくいことも分る。図10は土の剛性が $1/100$ 以下に落ちると σ_p への影響が出はじめ, そのかわり滑りが発生しにくくなることを示している。図11~13は管継手の伸縮量の RMS 値 σ_a (cm) を管長 l (m) に対して図示したものである。図11は, σ_a は l が大なるほど大きくなることを示しており, したがって継手を密に入れて管長を短くすることが, 継手伸縮量の低下に効果的であることが分る。地盤が軟かく, かつ管径の大きな

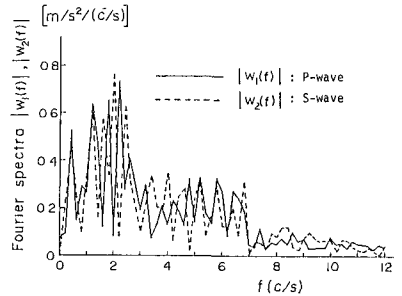


図4 標準入力 P・S 波 (RMS: 50 gal)

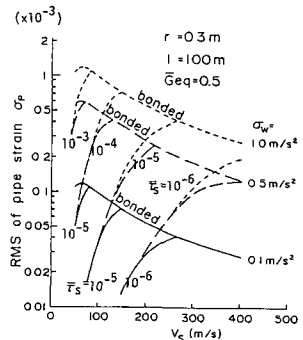


図5 管ひずみ σ_p と土のせん断波速度 v_s との関係

るほど滑りによる伸縮量が大きいので、本管等の施工にほとくに注意が必要であろう。図12は滑り応力 σ_s をパラメータにしてプロットしているが、前図と同様のことが言えよう。図13では、 σ_s は G_{eq} の低下により滑りにくくなるため緩和されるが、硬い地盤ほどその効果が著しく、図14でもそのことがはっきり表われている。

参考文献

- 1) 菅島・宮内: 埋設パイプラインに関するシンポジウム, 土木基礎工学協会, pp. 57-60, 1975.
- 2) 高田: 土木学会論文報告集, 第249号, pp. 1-11, 1976.
- 3) 龍崎: 土木学会論文報告集, 第272号, pp. 27-37, 1979.
- 4) 秋吉・米田: Proc. Soil Dyn. Earthq. Eng. Conf., pp. 477-511, 1982
- 5) 小池: 土木学会論文報告集, 第331号, pp. 13-24, 1983.
- 6) 高田・高橋: 水道協会誌, 第547号, pp. 27-39, 1980.

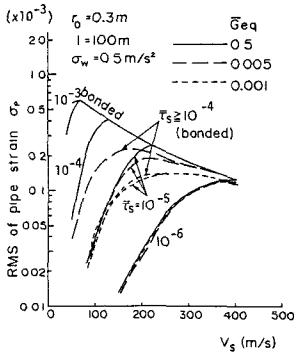


図6 管ひずみ σ_p と V_s との関係

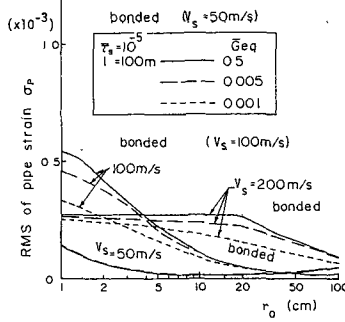


図7 管ひずみ σ_p と管半径 r_0 との関係

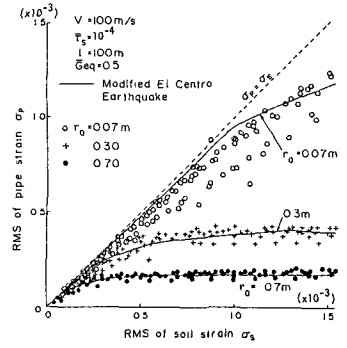


図8 管ひずみ σ_p と土ひずみ σ_s との関係

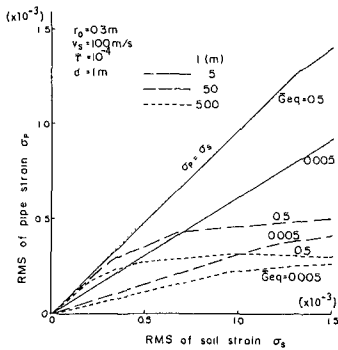


図9 管ひずみ σ_p と土ひずみ σ_s との関係

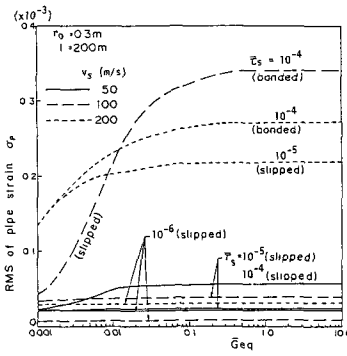


図10 管ひずみ σ_p と等価剛性 G_{eq} との関係

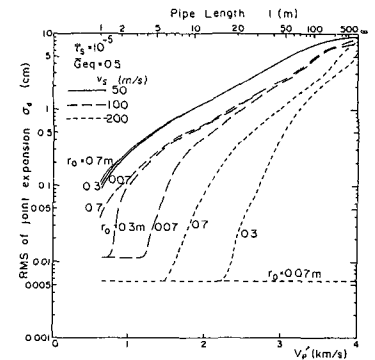


図11 継手伸縮量 σ_j と管長 l との関係

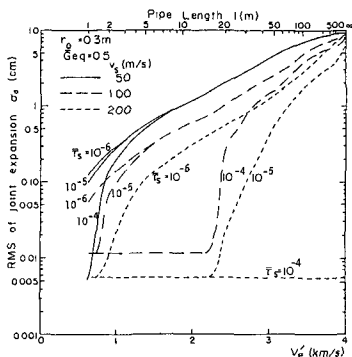


図12 継手伸縮量 σ_j と管長 l との関係

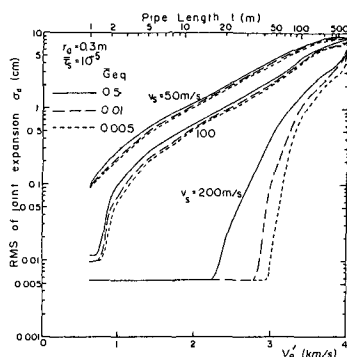


図13 継手伸縮量 σ_j と管長 l との関係

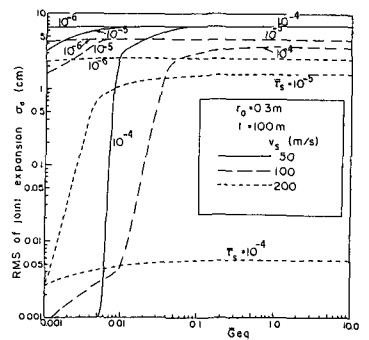


図14 継手伸縮量 σ_j と等価剛性 G_{eq} との関係