

(147) 共同溝および内部管路の地震応答解析について

八代工業高等専門学校 正員 ○淵田邦彦
熊本大学工学部 正員 秋吉 卓

1. まえがき 数種類の管路・ケーブル等を収容する共同溝が数多く建設されてきており、その耐震性の問題は、今後、地震時の都市機能維持の点で重要となろう。共同溝の設計に関しては埋設管の耐震設計指針と同様の取扱いをした共同溝設計指針¹⁾が適用されているが、その妥当性を検討した例はこれまであまりなかったようである。そこで本研究では、共同溝の地震時の挙動特性の把握を目的として、管路におけるすべりを考慮した地震応答解析手法²⁾を応用して、共同溝の地震応答を解析し³⁾、さらに、共同溝の内部に収容された管路を集中質量系の離散モデルに置き換えて、共同溝の地震応答を入力としたときの内部管路の応答を解析する⁴⁾。ここでは、特に強震時の、共同溝と内部管路の歪応答について検討する。

2. 共同溝・内部管路のモデル化と基礎式 図1のように、共同溝は、本体と継手とが交互に周期的に連なったものを等価な一様断面の連続な弾性床の上のほりに置き換え、地盤は弾性地盤とし、地震波は共同溝の軸を含む水平面に沿って任意の角度 ϕ で入射するものとする。

平面P波が入射するとき共同溝の軸方向・軸直角方向の運動方程式はそれぞれ次式のように表わされる。

a) 管軸方向

$$m_c \frac{\partial^2 v_{z1}}{\partial t^2} = E_c A_c \frac{\partial^2 v_{z1}}{\partial z^2} + k_{z1} (w_1 \cos \phi e^{-ik_l z \cos \phi} - v_{z1}) \quad \dots(1)$$

b) 管軸直角方向

$$E_c I_c \frac{\partial^4 v_{x1}}{\partial z^4} + m_c \frac{\partial^2 v_{x1}}{\partial t^2} + N_1 \frac{\partial^2 v_{x1}}{\partial z^2} = k_{x1} (w_1 \sin \phi e^{-ik_l z \cos \phi} - v_{x1}) \quad \dots(2)$$

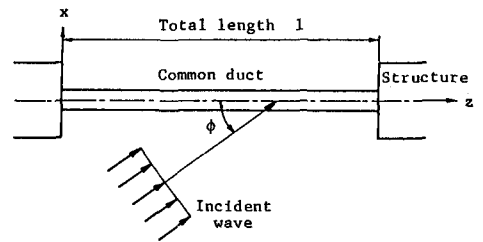


図1 共同溝モデル

ここに、 v_{z1}, v_{x1} = 共同溝の軸方向、軸直角方向変位、 m_c, E_c, A_c, I_c = 共同溝の単位長さ当り質量、ヤング率、断面積、断面2次モーメント、 $N_1 = E_c A_c (v_{z1}|_{z=z_1} - v_{z1}|_{z=z_0})/l$ = 共同溝に働く軸方向力、 w_1 = 入射P波の変位振幅、 $k_{z1} = i l_0 \mu k_l \sin \phi$ = P波に対する軸方向の単位長さ当り地盤ばね定数(無限長の平面構造物のすべりを考慮した解⁴⁾を用いる)、 l_0 = 共同溝断面の周長、 $k_l (= \omega/v_l) =$ P波の波数、 $k_{x1} = -i \rho_c A_c \omega^2 \sin \phi / k_l =$ P波に対する単位長さあたりの軸直角方向地盤ばね定数、 $\rho_c =$ 共同溝の密度、 $\omega =$ 円振動数、 $v_l = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho} =$ 土のP波伝播速度、 $\lambda, \mu =$ Laméの定数、 $\rho =$ 土の密度。

上式の解は、特解 $v_{z1}^{(1)}, v_{x1}^{(1)}$ と同時方程式の一般解 $v_{z1}^{(2)}, v_{x1}^{(2)}$ との和として求められる。ここでは、共同溝が無限に連続しているものとして式(1),(2)の右辺の指数項を定数と見なして近似的に特解 $v_{z1}^{(1)}, v_{x1}^{(1)}$ を求めるものとするれば、上式(1),(2)の解は次式のように表わされる。

$$v_{z1} = v_{z1}^{(1)} + v_{z1}^{(2)} = H_{z1}(\omega) w_1 \cos \phi e^{-ik_l z \cos \phi} + A_1 e^{\nu_1 z} + A_2 e^{\nu_2 z} \quad (3)$$

$$v_{x1} = v_{x1}^{(1)} + v_{x1}^{(2)} = H_{x1}(\omega) w_1 \sin \phi e^{-ik_l z \cos \phi} + B_1 e^{\lambda_1 z} + B_2 e^{\lambda_2 z} + B_3 e^{-\lambda_1 z} + B_4 e^{-\lambda_2 z} \quad (4)$$

ここに、 $H_{z1}(\omega), H_{x1}(\omega) =$ 無限長とした共同溝における軸方向、軸直角方向変位の周波数応答関数であり、次式のように表わされる。

$$H_{z1}(\omega) = \frac{k_{z1}}{k_{z1} - m\omega^2 + E_c A_c k_l^2 \cos^2 \phi} \quad (5)$$

$$H_{x1}(\omega) = \frac{k_{x1}}{E_c I_c k_l^4 \cos^4 \phi - m\omega^2 - N_1 k_l^2 \cos^2 \phi + k_{x1}} \quad (6)$$

また、 $A_1, A_2, B_1, B_2, B_3, B_4 =$ 未定係数、および $\nu_1 = \sqrt{(k_{z1} - m\omega^2)/E_c A_c} = -\nu_2$,

$$\lambda_1 = \sqrt{-\frac{N_1}{2E_c I_c} + \sqrt{\left(\frac{N_1}{2E_c I_c}\right)^2 - \frac{k_{x1} - m\omega^2}{E_c I_c}}, \quad \lambda_2 = \sqrt{-\frac{N_1}{2E_c I_c} - \sqrt{\left(\frac{N_1}{2E_c I_c}\right)^2 - \frac{k_{x1} - m\omega^2}{E_c I_c}} \quad (7)$$

上式の未定係数 $A_1, A_2, B_1, B_2, B_3, B_4$ を求めるため、境界条件として、共同溝の両端 $z = z_0, z_1$ における、軸方向変位、軸直角方向変位および曲げモーメントが次式のように与えられるものとする。

$$\begin{aligned} z = z_0 \quad & v_{z1} = G_{z1}^{(0)}(\omega) w_1 \cos \phi e^{-ik_l z_0 \cos \phi} \\ & v_{x1} = G_{x1}^{(0)}(\omega) w_1 \sin \phi e^{-ik_l z_0 \cos \phi} \\ & M = k_r \left(\frac{\partial v_{x1}}{\partial z} \right)_{z=z_0} = -E_c I_c \left(\frac{\partial^2 v_{x1}}{\partial z^2} \right)_{z=z_0} \\ z = z_1 \quad & v_{z1} = G_{z1}^{(l)}(\omega) w_1 \cos \phi e^{-ik_l z_1 \cos \phi} \\ & v_{x1} = G_{x1}^{(l)}(\omega) w_1 \sin \phi e^{-ik_l z_1 \cos \phi} \\ & M = -k_r \left(\frac{\partial v_{x1}}{\partial z} \right)_{z=z_1} = -E_c I_c \left(\frac{\partial^2 v_{x1}}{\partial z^2} \right)_{z=z_1} \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 $G_{z1}^{(0)}(\omega), G_{x1}^{(0)}(\omega), G_{z1}^{(l)}(\omega), G_{x1}^{(l)}(\omega) =$ それぞれ、構造物の両端 $z = z_0, z_1$ における、軸方向および軸直角方向の、構造物の周波数応答関数、 $k_r =$ 共同溝と構造物との結合部における回転ばね剛性。

ここでは、共同溝の両端 $z = z_0, z_1$ における軸方向、軸直角方向の構造物変位の周波数応答関数 ($G_z^{(0)}(\omega), G_z^{(l)}(\omega), G_x^{(0)}(\omega), G_x^{(l)}(\omega)$ 等) と地盤変位の周波数応答関数 ($H_s(\omega)$) との比 $g = |G(\omega)/H_s(\omega)|$ を任意に与えることにより、式(8)の境界条件に充てる。これは、両端構造物の沈下・滑動等の共同溝への影響を入力損失の効果の形で与えようとするものであり、 $g = 1$ のとき入力損失なし、 $g = 0.5$ のとき入力損失50%という境界条件を考えることに相当する。

次に、共同溝の内部に收容された管路を、図2のような、管体ばね k_p で結合した集中質量系にモデル化し、各質点は共同溝とばね k_o で弾性結合され、共同溝の応答変位はばね k_o を介して管路に作用するものとする。各質点の静変位した位置を平衡位置とし、平衡位置からの質点の動的変位ベクトルを $\{y\}$ とすれば、質点系の運動方程式は次式で表わされる。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [K]\{y\} = -[M][K]^{-1}[K_o]\{\ddot{v}\} \quad (9)$$

ただし、 $[M] =$ 質量マトリクス、 $[K] =$ 管路に関する剛性マトリクス、 $[K_o] =$ 共同溝-管体間のばね k_o による剛性マトリクス、 $\{v\} =$ 共同溝の応答変位ベクトル。

内部管路の動的変位の周波数応答 $\{Y(i\omega)\}$ は、式(9)の両辺の Fourier 変換をとることにより、次式のよう求めることができる。

$$\{Y(i\omega)\} = \omega^2 [K_z - \omega^2 M]^{-1} [M] [K_z]^{-1} [K_o] \{V_z(i\omega)\} \quad (10)$$

内部管路の絶対変位応答 $\{Z(i\omega)\}$ は、平衡位置と式(10)の和より求められる。これを軸方向および軸直角方向の座標軸に関して微分すれば、管路の歪応答が得られる。さらに、それらの Fourier 逆変換をとれば、時間応答を求めることができる。

3. 数値計算結果と考察 数値計算では、土のS波速度 $v_s = 100$ m/s、共同溝の延長距離 $l = 500$ m、共同溝断面(幅×高さ) $= 4 \times 4$ m、共同溝の縦波伝播速度 $v_p = 1000$ m/s、無次元すべり摩擦抵抗 $\bar{\tau}_s = \tau/G = 10^{-3}$ 、 $G =$ 土のせん断弾性係数、地震波の入射角 $\phi = 45^\circ$ などを標準値とした。また管路はダクタイル鋳鉄管を対象として、軸方向の管体ばね ($k_p = E_p A_p / l_p$) として、管径 0.6 m、管長 $l_p = 5$ m の

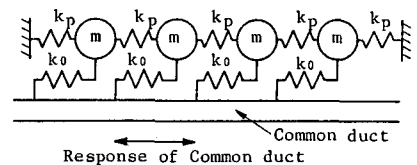


図2 共同溝内部管路モデル

場合で約 3×10^4 (tonf/m) 程度を用いた。軸直角方向ばね、共同溝—管体間ばねは、軸方向ばねと同程度とした。入射波は El Centro(1940) 強震記録の NS-EW 成分の加速度最大値を 100 gal として用いた。

図 3 は、共同溝歪の最大値応答分布の一例である。

(a),(b),(c) は共同溝両端における構造物の入力損失をそれぞれ、0%、50% (軸方向のみ) および 50% (軸直角方向のみ) とした場合に対応しており、実線はすべり摩擦抵抗 $\bar{\tau}_s = 10^{-3}$ 、破線は $\bar{\tau}_s = 10^{-5}$ の場合を表わしている。図 3 (a) では、共同溝の歪は同程度の大きさで分布しているが、(b),(c) では、共同溝の両端付近での応答が大きくなるのが示されている。また、摩擦抵抗が小さい場合には、すべりが生じるので、共同溝の歪は小さくなっており、とくに (b) の場合、両端部付近への歪の集中も見られない。一方、図中の点線は、共同溝設計指針¹⁾ による歪の計算例であり、地盤の卓越周期 1sec、加速度入力 100gal に対する値である。指針による歪の設計値は、図 3 (a) の通常の場合には本研究による計算値に比べて十分に安全側であり、(b),(c) の両端構造物の入力損失 50% の場合には端部近辺における本研究の計算値と比較できる程度の大きさとなっており、指針の設計値はかなり高めに設定されているようである。

図 4 は共同溝を正方形断面としてその断面寸法 D に対して端部 (a) および中央部 (b) における歪の最大値を示したものである。断面寸法が大なるほど歪が低下し両端の構造物の入力損失の影響は小さくなるが、Case2 のように、断面規模が小さいときには端部に歪が集中しやすくなるので注意を要する。

本研究では、共同溝への入力と構造物への入力の位相関係を考慮せずに、両端構造物の境界条件は任意に与えている。そこで入射波の位相を、共同溝の総延長の半分まで前後にずらして、最大応答値分布の上下限値の範囲を示したものが図 5 であり、(a),(b),(c) は図 3 と同じ条件である。歪は位相にかかわらず概略一定の形状で分布するようだが、(b) では、両端部における歪の値は位相の違いによって最大 2 倍ほど異なっており、注意が必要である。

図 6 は、共同溝 (破線) および内部管路 (実線) の最大歪分布の一例であり、(a),(b),(c) は図 3 と同様の条件である。各図とも、内部管路の歪は共同溝の歪よりも小さくなっており、耐震的には、共同溝が内部管路を保護するように働く可能性がある。

図 7 は共同溝—管体間ばねの標準値に対する比を横軸にとり、端部における内部管路歪の最大値を示したものである。Case2.3 のように共同溝の歪応答が端部に集中するときには、内部管路の歪も大きくなるので、共同溝—管体間ばねを何らかの方法で軟らかくして内部管路の歪を小さくする必要があろう。

4. まとめ 本研究の解析より、端部の構造物に著しい入力損失が生じる場合には共同溝の歪が両端部付近に集中しやすいことや、現行の設計指針は共同溝歪の設定でかなり安全側の基準であること、内部管路は共同溝によって地震外力から保護される可能性のあることなどが明らかとなった。

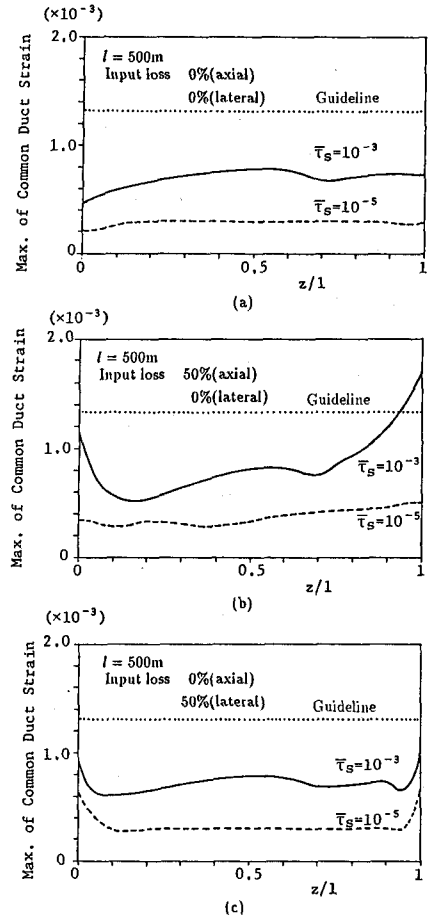


図 3 共同溝歪の最大値分布

参考文献 1) 日本道路協会：共同溝設計指針，1986。 2) 秋吉・潤田：土木学会論文報告集，第 334 号，pp.25～34，1983。 3) 潤田・秋吉・他：土木学会年次学術講演演進会講演概要集，pp.1134～1135，1988.10。

4) 秋吉・他：土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.78～79，1988.3。

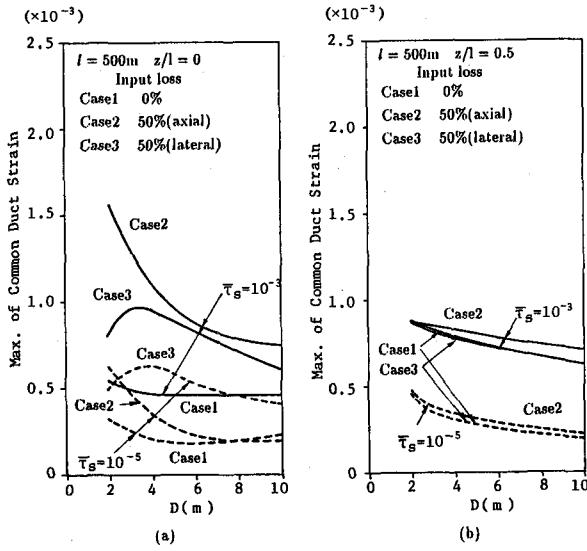


図4 共同溝歪の最大値と断面寸法 D との関係

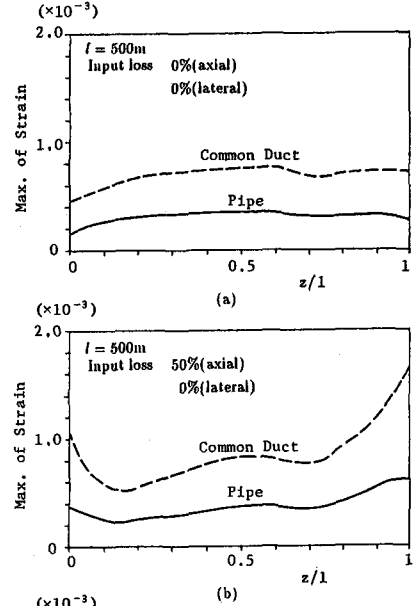


図6 応答歪の最大値分布

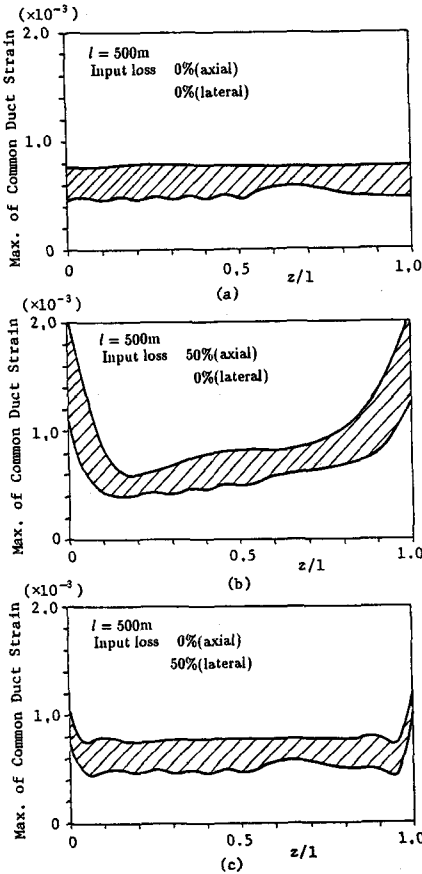


図5 共同溝歪の最大値分布

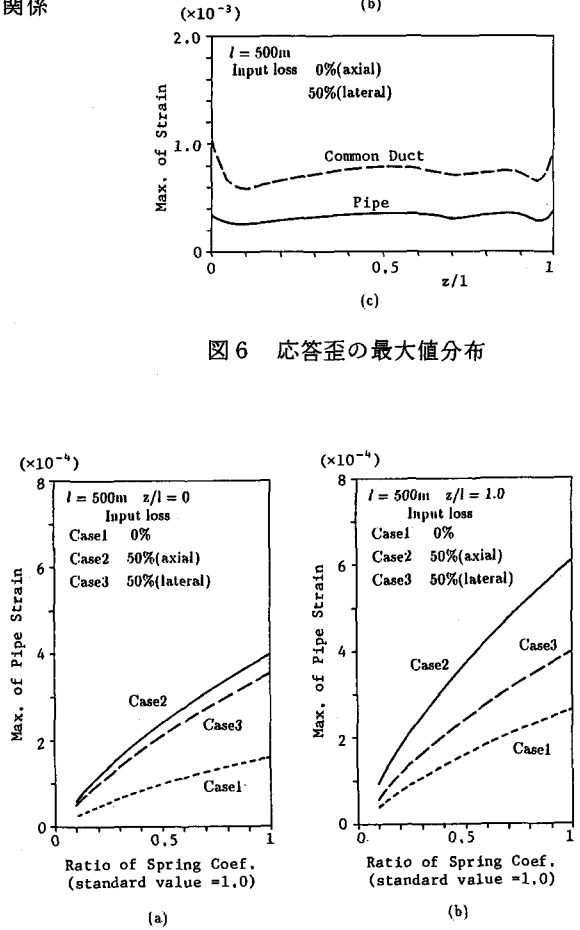


図7 管歪の最大値と共同溝-管体間ばね比との関係