

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

1. まえがき 埋設管の耐震性に関する研究より多くの知見が得られているが、地震時の管路のすべりがその応答に与える効果は大きいにも拘らず十分な説明がなされてはいないようである。そこで本研究では、弾性地盤中に水平に埋設された一様管路に、P・S波が同時に斜め方向より入射するとき、管路と地盤とのすべりを考慮した応答について波動論的に解析しようとするものである。すべりは振動数に依存して発生するため、地震動の種々の振動数成分波に対する検討が必要であるが、ここでは、定常確率過程と考えたP・S波を離散変位スベクトルに分解し、管路の周波数応答関数を用いて、管歪の2乗平方平均(RMS)などを算出した。さらに、継手を持つ系を一様管路に等価的に変換する近似手法により、継手の伸縮量についての推定も行なった。

2. 解析手法 図-1のような直線管路に各度で平面P波・S波が入射するとき、定常状態では、すべりを考慮した管路の全歪 ε は次のように表わされる。²⁾

$$\varepsilon = G_1(\omega) W_P e^{i\omega t} + G_2(\omega) W_S e^{i\omega t} \quad (1)$$

ただし、 $G_1(\omega), G_2(\omega)$: P波・S波に対する管歪の周波数応答関数、 W_P, W_S : 入射P波・S波の変位振幅。

式(1)は $e^{i\omega t}$ を取り去ると、管歪のFourier変換形と見なせるので、逆変換により、管歪の時間応答をうる。

一方、管歪 ε の2乗平均応答を σ_ε^2 とすると、定常確率過程論より次式のように表わすことができる。

$$\sigma_\varepsilon^2 = \int_0^\infty [G_1^*(\omega) G_1(\omega) S_1(\omega) + G_2^*(\omega) G_2(\omega) S_2(\omega) + G_1^*(\omega) G_2(\omega) S_{12}(\omega) + G_1(\omega) G_2^*(\omega) S_{12}(\omega)] d\omega = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\sigma_{12}^2 \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_1^2 = \int_0^\infty |G_1(\omega)|^2 S_1(\omega) d\omega$, $\sigma_2^2 = \int_0^\infty |G_2(\omega)|^2 S_2(\omega) d\omega$, $\sigma_{12}^2 = \int_0^\infty \text{Re} [G_1^*(\omega) G_2(\omega) S_{12}(\omega)] d\omega$ および、 $S_1(\omega), S_2(\omega), S_{12}(\omega)$ = P波, S波の変位パワースペクトル密度関数およびクロスパワースペクトル密度関数。

次に、継手を持つ管路の地震応答の大きな推定を行なうために、有限長の管体と継手が交互に周期的に直列結合している管路を考えると、この管路の等価なばね剛性 k_e および等価なYoung率 E' は次の関係をみたす。

$$\frac{1}{k_e} = \frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_j}, \quad \frac{E'}{E} = 1 - \frac{1}{1 + k_j/k_p}; \quad k_p: \text{管軸方向ばね剛性}, k_j: \text{継手のばね剛性}, E: \text{管のYoung率} \quad (3)$$

式(3)より管路の等価伝播速度 v_p' は、 $v_p'/v_p = \sqrt{E'/E} = \sqrt{1 - 1/(1 + k_j/k_p)}$ の関係がある。

一方、継手伸縮量の最大値 d を、管体のすべり d_s と継手部分の前後端間の相対変位 d_j との和とすると、

$$d_s = L_1(\omega) W_P e^{i\omega t} + L_2(\omega) W_S e^{i\omega t}, \quad d_j = \int_0^L \varepsilon dz = N_1(\omega) W_P e^{i\omega t} + N_2(\omega) W_S e^{i\omega t} \quad (4)$$

$$d = P_1(\omega) W_P e^{i\omega t} + P_2(\omega) W_S e^{i\omega t} \quad (5)$$

表-1 地盤・管路・地震波の諸元

ここに、 $P_1(\omega) = L_1(\omega) + N_1(\omega)$, $P_2(\omega) = L_2(\omega) + N_2(\omega)$, $L_1(\omega), L_2(\omega)$: P・S波に対する管路すべりの周波数応答関数、 $N_1(\omega), N_2(\omega)$: P・S波に対する継手伸縮量の周波数応答関数、 e : 継手有効長さ。そこで、継手伸縮量のRMSを σ_d とすると、管歪の場合と同様に、定常過程論より次式のように表わされる。

$$\sigma_d^2 = \int_0^\infty \{ |P_1(\omega)|^2 S_1(\omega) + |P_2(\omega)|^2 S_2(\omega) + 2 \text{Re} [P_1^*(\omega) P_2(\omega) S_{12}(\omega)] \} d\omega \quad (6)$$

3. 数値計算結果 本研究では管路としてダクタイル鋳鉄管を解析の対象とし、基本的な数値としては表-1に示す値を用いた。

Ductile cast iron pipes

	Low	Stand.	High
ϕ (deg.)	0	45	90
σ_{11} (m/s ²)	0.5	1.0	3.0
σ_{12} (m/s ²)	0	0.5	1.5
σ_{22} (m/s ²)	50	200	500
v_l/v_s	$\frac{2}{10^{-6}}$	$\frac{2}{10^{-6}}$	$\frac{3}{10^{-6}}$
τ_s/G_s	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
r_0 (m)	0.01	0.05	1.00
v_p (m/s)		4000	
$\bar{m}$		0.50	
I/Sr_0^2		0.50	

(m = meter, s = second)

また、地震波を変位スペクトルに分解するときの選点総数は、1024個とした。P・S波およびワロスした波のワースペクトル密度関数は相似分布を持つものとして図-2のような分布形を与えた。図-3～図-5はそれぞれ、入射角 ϕ 、S波速度 V_s 、管半径 r_o に対して管歪のRMS値を図示したものであるが、 $\phi = 35^\circ$ 付近で最大ひずみとなり、すべり応力 σ_s が小さいほど、土が軟いほど、かつ半径が大きいほどすべりが発生しやすいことがわかる。図-6、図-7は、細い管では相互作用は小さく、すべりによる管歪の低下が著しいことを示している。図-8、図-9は継手伸縮量と V_p' および管長 l との関係であるが、当然、すべりが生じた場合、継手伸縮量が大きく、継手部に負担がかかることになる。

参考文献 1. 鶴飼：土木学会論文報告集 第272号，PP. 27-37，1978。
 2. 秋吉・沢田：昭和56年度西部支部研究発表会講演集，pp. 11-14，1982。
 3. 土岐・高田：Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Part 2, Vol. 221, pp. 107-125, 1974.

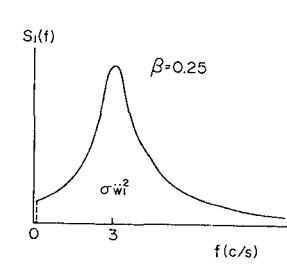


図-2 P・S波の加速度ワースペクトル密度

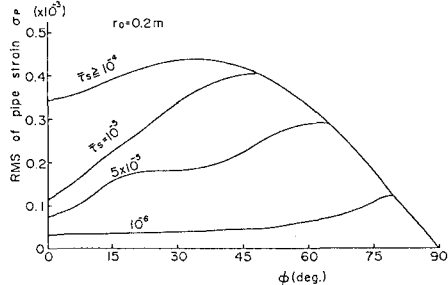


図-3 入射角 ϕ に対する管歪のRMS σ_p

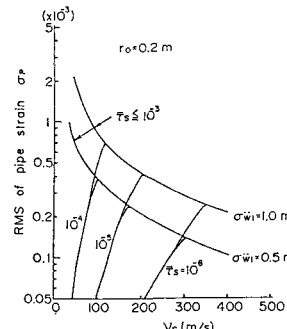


図-4 S波速度に対する管歪のRMS σ_p

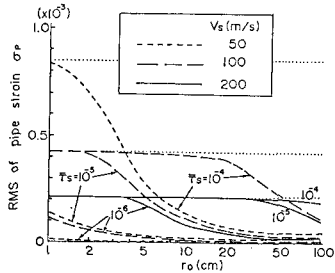


図-5 管半径に対する管歪のRMS σ_p

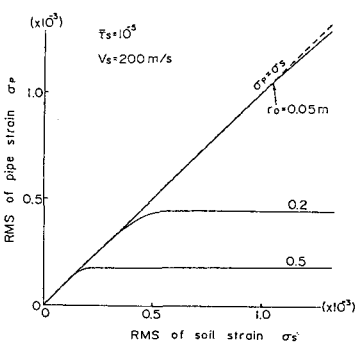


図-6 地震波と管のRMS歪

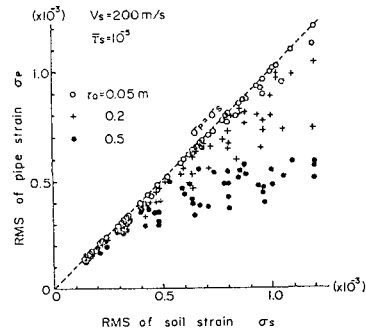


図-7 地震波と管のRMS歪

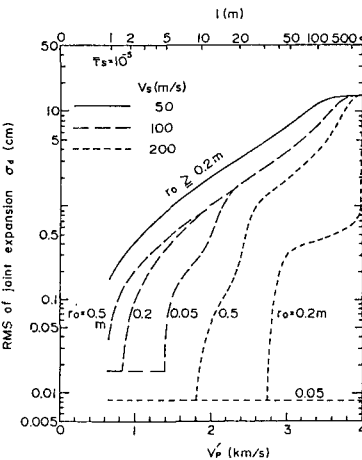


図-8 管長に対する継手伸縮量のRMS σ_j

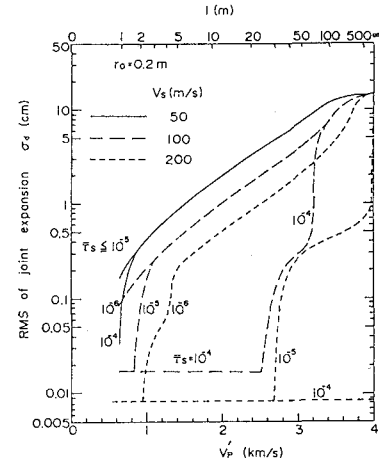


図-9 管長に対する継手伸縮量のRMS σ_j