

1. まえがき 管路の耐震性の検討において、地震波を正弦波動として取り扱うことが度々行なわれているが、これは地動変位は比較的振動数成分が卓越することの他、波動論的考察が容易になることもあろう。しかしながら卓越振動数が明瞭でないことも多く、かつ著者の1人が発表している様に、管路のすべりが振動数に依存して発生することから¹⁾、地震動の種々の振動数成分波に対する検討が必要になる。このことから本研究では、地震波をスペクトルに分解して平均変位を定義し、管路の周波数応答関数を用いて、管路の歪(=軸歪+曲げ歪)の二乗平均平方(RMS)を算出する、いわゆる定常過程による。定常平面P波とS波が同時に管路に、ある角度で入射するものとしたが、表面波については考えていない。

2. 解析手法 継続時間Tの地震動 $w(t)$ をN個の離散値として取り扱うと、離散値間は $\Delta t = T/N$ とする。そこで、Fourier 変換対高周波フーリエ変換(FFT)の定義と対応するように、次の平均変位で定義し直す。

$$w(t) = T \int_0^F W(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad \text{よって} \quad W(\omega) = \frac{1}{T} \int_0^T w(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (F = 1/\Delta t, T \text{ は十分大とする}) \quad (1)$$

$$\text{これは次のFFTの定義と同形となる: } w(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} W(\omega_k) e^{i\omega_k t_n}, \quad W(\omega_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} w(t_n) e^{-i\omega_k t_n} \quad (2)$$

一方、定常状態では、管路の応答変位は次のように書ける。

$$P\text{波: } v_{z1} = H_{z1}(\omega) W_P \cos \phi e^{i(\omega t - k_1 z)}, \quad v_{z2} = H_{z2}(\omega) W_P \sin \phi e^{i(\omega t - k_2 z)} \quad (3)$$

$$S\text{波: } v_{z1} = H_{z1}(\omega) W_S \sin \phi e^{i(\omega t - k_1 z)}, \quad v_{z2} = H_{z2}(\omega) (-W_S \cos \phi) e^{i(\omega t - k_2 z)} \quad (4)$$

ただし、 $k_1 = \omega \cos \phi / v_P$, $k_2 = \omega \cos \phi / v_S$, v_P, v_S : P, S波の伝播速度。したがって、 $z=0$ における管路の歪 $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$ として

$$\epsilon = [(-ik_1) H_{z1} \cos \phi + (ik_2) H_{z2} \sin \phi] W_P \exp(i\omega t) + [(-ik_1) H_{z1} \sin \phi - (ik_2) H_{z2} \cos \phi] W_S \exp(i\omega t) = G_1(\omega) W_P \exp(i\omega t) + G_2(\omega) W_S \exp(i\omega t) \quad (5)$$

と書くと、 $G_1(\omega), G_2(\omega)$ は歪の周波数応答関数であるから、式(5)の W_P, W_S をP波・S波のFourier変換形と見なして、 $\exp(i\omega t)$ を取り去ると、式(5)は歪 ϵ のFourier変換形と見なせる。したがって、P波・S波のFourier変換形が与えられたり、式(5)の逆変換により歪の時間応答をうる。²⁾

一方、式(5)を参照すると、歪 ϵ の二乗平均応答 σ^2 は定常過程論より

$$\sigma^2 = \int_0^F [G_1^* G_1 S_P(\omega) + G_2^* G_2 S_S(\omega) + G_1^* G_2 S_{PS}(\omega) + G_2^* G_1 S_{SP}(\omega)] d\omega = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 2\sigma_{12}^2 \quad (6)$$

ここに、 $\sigma_1^2 = \int_0^F |G_1|^2 S_P(\omega) d\omega$, $\sigma_2^2 = \int_0^F |G_2|^2 S_S(\omega) d\omega$, $\sigma_{12}^2 = \int_0^F \text{Re}[G_1^* G_2] S_{PS}(\omega) d\omega$ および S_P, S_S, S_{PS} = P波, S波の変位パワースペクトル密度およびクロスパワースペクトル密度。したがって、P・S波の相関を考慮に入れると、それを無視する場合に比べて、二乗平均の値は増大する。

サンプル地震動によるシミュレーションを行なう場合は、式(2)より

$$S_P(\omega_k) = T |W_P(\omega_k)|^2, \quad S_S(\omega_k) = T |W_S(\omega_k)|^2, \quad S_{PS}(\omega_k) = T W_P(\omega_k)^* W_S(\omega_k) \quad (7)$$

とすればよい。ただし $W_P(\omega_k), W_S(\omega_k)$ はそれぞれP波・S波のFFTに離散化された変位振幅のスペクトルであり、入力変位の単位と同じである。

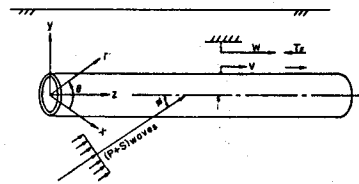


図-1 管路、地盤、地震波のモデル

表-1 管路、地盤、地震波の諸元

	Ductile Cast Iron Pipes		
	Low	Stand.	High
ϕ (deg.)	0	45	90
α_{12}^1 (m/s ²)	0.5	1.0	3.0
α_{12}^2 (m/s ²)	0	0.5	1.5
v_0 (ft/s)	50	200	500
v_1/v_0	2	2	3
τ_0/G	10^{-6}	10^{-4}	10^{-2}
r_0 (m)	0.01	0.05	1.00
v_0 (m/s)	4000		
m (mass ratio)	0.50		
I/S_0^2	0.50		

	PVC Pipes		
	Low	Stand.	High
ϕ (deg.)	0	45	90
α_{12}^1 (m/s ²)	0.5	1.0	3.0
α_{12}^2 (m/s ²)	0	0.5	1.5
v_0 (ft/s)	50	200	500
v_1/v_0	2	2	3
τ_0/G	10^{-6}	10^{-4}	10^{-2}
r_0 (m)	0.01	0.05	0.20
v_0 (m/s)	1400		
m (mass ratio)	0.25		
I/S_0^2	0.50		

3. 数値計算結果

表-1は本解析の対象とするダクタイル鋼鉄管(DCI)と強化ビニール管(PVC)の代表的な数値を示したものである。図-2は用いたP波・S波およびクロスした波のパワースペクトル密度関数であり、 $f=3\%$ にピークを持たせている。図-3は管路歪が入射角がほぼ33°のあたりで最大を示しているが、これは従来の解析結果と対応している²⁾⁴⁾。さらにP波・S波による分解を示しているが、明らかにクロスパワーのため管路歪のRMSは増大する。図-4は、すべりがほとんどP波入射によるものであることを示している。

参考文献 1. 秋吉・利田; 昭和56年度西部支部研究発表会講演集, 1982.
2. 土岐・高田; Bull. Disaster Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 24, Part 2, No. 221, 1974, pp. 107-125.
3. 鶴岡; 土木学会論文報告集, 第272号, 1978, pp. 27-37.
4. 鶴岡・山口; 土木学会論文報告集, Vol. 19, No. 4, 1979, pp. 92-102.

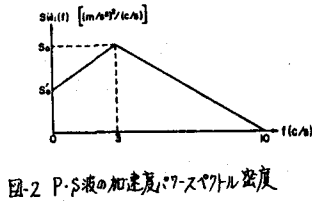


図-2 P・S波の加速反7-スワトル密度

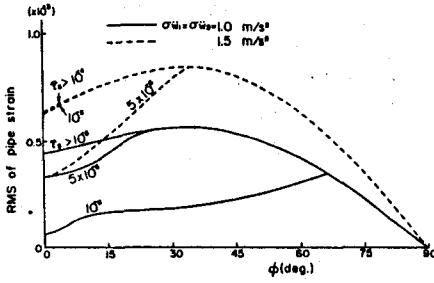


図-4 すべりによる管路歪の低減効果

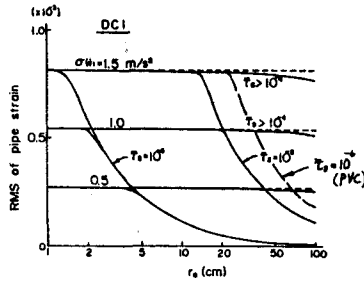


図-6 管半径と管路歪との関係

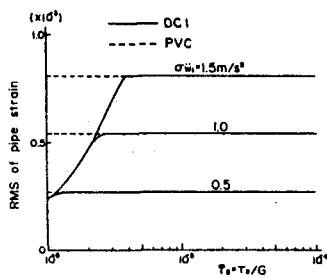


図-8 すべり応力と管路歪との関係

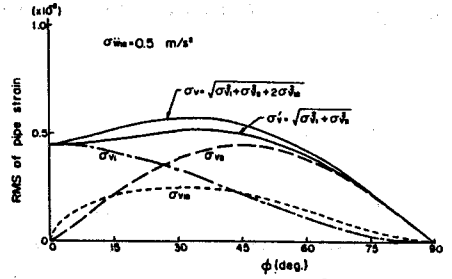


図-3 P・S波の管路歪に与える影響

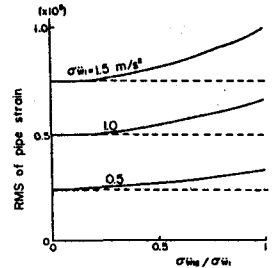


図-5 P・S波のクロスパワーが管路歪に与える影響

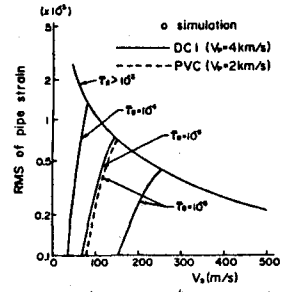


図-7 地盤の剛性が管路歪に与える影響

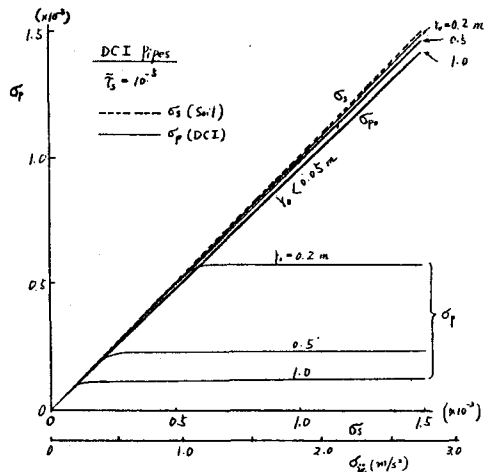


図-9 土の歪 σ_s と管路の歪 σ_p との関係