

強化プラスチック複合管の計算

1. 設計条件

「土地改良施設 耐震設計の手引き -2004 年版-」(社団法人農業土木学会)により、強化プラスチック複合管の耐震性の検討を行う。

(1) 管体仕様

呼び径	: 2000mm
管種	: 内圧 5 種管
接合形式	: B 形
管の外径	: $D = 2080\text{mm}$
規格管厚	: $t = 40\text{mm}$
管長	: $l = 4.0\text{m}$
継手の設計照査用最大伸び量	: $\delta_0 = 99\text{mm}$
継手の接合時の許容屈曲角度	: $\theta_0 = 2^\circ 30'$
FRPM 管の許容応力 (軸方向)	: $\sigma_0 = 7.35\text{N/mm}^2$
FRPM 管のヤング係数 (軸方向)	: $E = 8.8 \times 10^6\text{kN/m}^2$
FRPM 管のポアソン比	: $\nu = 0.3$
FRPM 管の線膨張係数 (軸方向)	: $\alpha = 3 \times 10^{-5}/$

(2) 埋設条件

土かぶり	: $h = 3.0\text{m}$
道路の状態	: アスファルト舗装道路
温度変化	: $t = 20$

(3) 荷重条件

表層地盤の厚さ	: $H = 30.0\text{m}$
土の単位体積重量	: $\gamma_t = 17\text{kN/m}^3$
鉛直方向地盤反力係数	: $k_v = 9800\text{kN/m}^3$
重畳係数	: $\mu = (1.00 \sim 3.12、本計算例ではレベル 1 で 3.12、レベル 2 で 1.00 を用いる)$
設計内圧	: $P_i = 0.2\text{N/mm}^2$
自動車荷重	: $P_m = 100\text{kN/輪}$

(4) 地震力条件

構造物の重要度区分	: A 種
基盤面における設計水平震度の標準値	: $K'_{h10} = 0.15$ (レベル 1 地震動)
地域別補正係数	: $C_z = 1.0$ (地域区分 A)

(5) 地盤条件

表-1 地盤条件

層	層厚 H_i (m)	土質		平均 N 値
		沖積層	砂質土	
1	25.0	沖積層	砂質土	2
2	5.0	沖積層	粘性土	5
計 (H)	30.0			
基盤		洪積層	砂質土	50

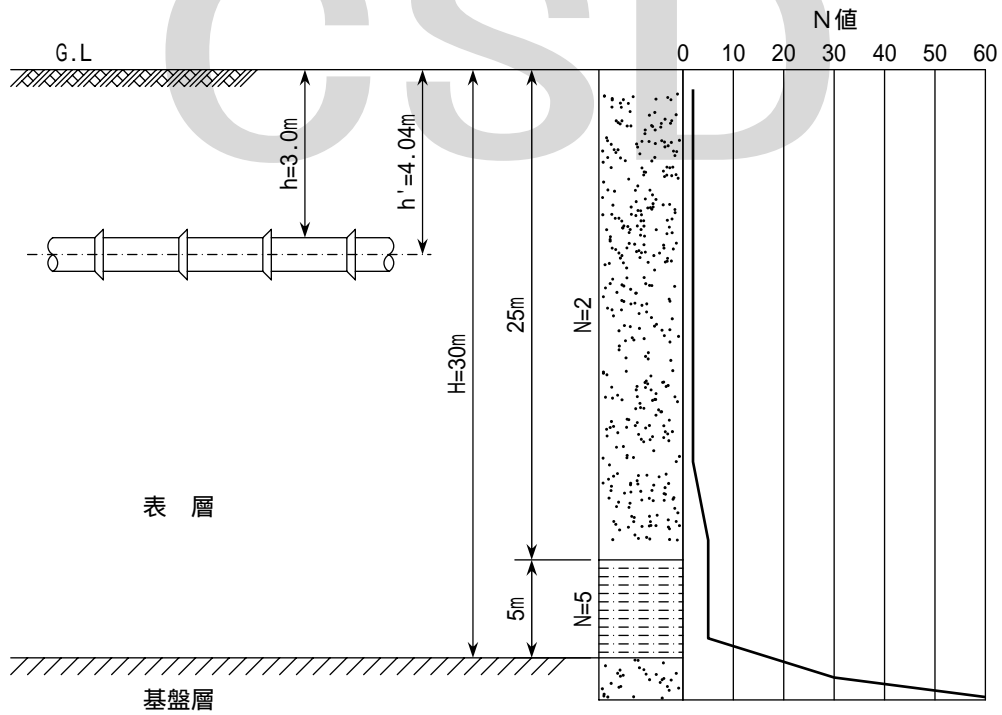


図-1 地盤モデル図

2. 管体発生応力

(1) 常時の管体発生応力

1) 内圧による軸方向応力

$$p_i = \frac{P_i \cdot (D - t)}{2 \cdot t}$$

ここに、 p_i : 内圧による管軸方向応力 (N/mm²)

ν : ポアソン比 (0.3)

P_i : 内圧 (0.2N/mm²)

D : 管外径 (2080mm)

t : 管厚 (40mm)

$$p_i = 0.3 \times \frac{0.2 \times (2080 - 40)}{2 \times 40} = 1.530\text{N/mm}^2$$

CSD

2) 自動車荷重による軸方向応力

自動車荷重による軸方向応力は、次式より求める。

$$p_o = \frac{0.322 \cdot W_m}{Z_p} \sqrt{\frac{E \cdot I_p}{k_v \cdot D}}$$

ここに、 p_o : 自動車荷重による軸方向応力 (N/mm²)

W_m : 自動車荷重 (24.155kN/m)

E : ヤング係数 (8.8 × 10⁶kN/m²)

K_v : 鉛直方向地盤反力係数 (9800kN/m³)

D : 外径 (2.08m)

I_p : 断面二次モーメント

$$I_p = \frac{\pi \cdot \{D^4 - (D - 2t)^4\}}{64} \\ = \frac{\pi \cdot \{2.08^4 - (2.08 - 2 \times 40.0)^4\}}{64} = 1.33 \times 10^{-1} \text{m}^4$$

Z_p : 断面係数

$$Z_p = \frac{2 \cdot I_p}{D} = \frac{2 \times 1.33 \times 10^{-1}}{2.08} = 1.28 \times 10^{-1} \text{m}^3$$

$$p_o = \frac{0.322 \times 24.155}{1.28 \times 10^{-1}} \times \sqrt{\frac{8.8 \times 10^6 \times 1.33 \times 10^{-1}}{9800 \times 2.08}} = 460 \text{kN/m}^2 = 0.460 \text{N/mm}^2$$

ただし、自動車荷重 W_m は、

$$W_m = \frac{2 \cdot P_m \cdot D}{C \cdot (a + 2 \cdot h \cdot \tan \theta)} \cdot (1 + i)$$

ここに、 P_m : 自動車後輪1輪当たりの荷重 (100kN)

C : 車両占有幅 (2.75m)

a : 接地幅 (0.20m)

h : 土かぶり (3.0m)

θ : 荷重分布角 (45°)

i : 衝撃係数 (0.1)

表-2 衝撃係数(自動車荷重) i の標準値

土かぶり深さ (m)	1.5 未満	1.5 ~ 2.5 未満	2.5 以上
道路の状態			
未舗装道路	0.4	0.3	0.2
コンクリート及び アスファルト舗装道路	0.3	0.2	0.1

: 自動車の荷重条件による低減係数 (0.9)

表-3 断面力の低減係数

荷重条件	低減係数
T-25	0.9
T-20 以下	1.0

$$W_m = \frac{2 \times 100 \times 2.08}{2.75 \times (0.20 + 2 \times 3.0 \times \tan 45^\circ)} \times (1 + 0.1) \times 0.9 = 24.155 \text{kN/m}$$

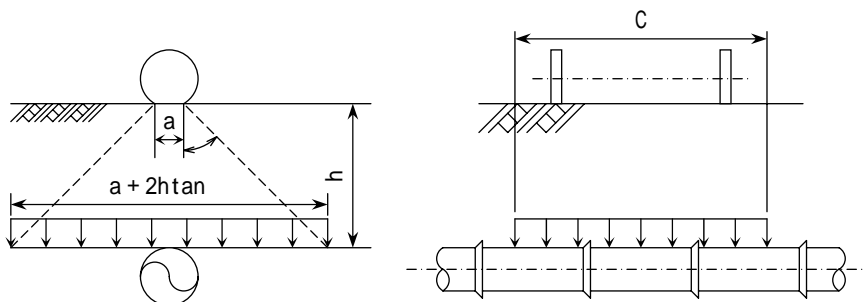


図-2 自動車荷重の分布図

(2) 地震時の管体発生応力

1) 地盤のせん断弾性波速度

表層地盤のせん断弾性波速度は、次式より求める。

$$V_{DS} = \frac{\sum H_i}{\sum \frac{H_i}{V_{Si}}}$$

ここに、

V_{DS} : 表層地盤のせん断弾性波速度

H_i : 第 i 層厚 (m)

V_{Si} : 第 i 層のせん断弾性波速度 (m/s)

表-4 せん断弾性波速度の計算式(せん断ひずみとの関係)

堆積時代別土質	V_s (m/s)			
	10^{-3}	10^{-4}	10^{-6}	
洪積層	粘性土	$129N^{0.183}$	$156N^{0.183}$	$172N^{0.183}$
	砂質土	$123N^{0.125}$	$200N^{0.125}$	$205N^{0.125}$
沖積層	粘性土	$122N^{0.0777}$	$142N^{0.0777}$	$143N^{0.0777}$
	砂質土	$61.8N^{0.211}$	$90N^{0.211}$	$103N^{0.211}$

表-5 せん断弾性波速度

層	層厚 H_i (m)	土質	ひずみ レベル	平均 N 値	算定式	速度 V_{Si} (m/s)	$\frac{H_i}{V_{Si}}$
1	25.0	沖積層 砂質土	10^{-3}	2	$61.8N^{0.211}$	71.5	0.3497
2	5.0	沖積層 粘性土	10^{-3}	5	$122N^{0.0777}$	138.3	0.0362
計	30.0						0.3859
基盤		洪積層 砂質土	10^{-6}	50	$205N^{0.125}$	334.3	

$$V_{DS} = \frac{30.0}{0.3859} = 77.7 \text{ m/s}$$

2) 表層地盤の特性値

表層地盤の特性値は、次式より求める。

$$T_G = 4 \sum \frac{H_i}{V_{Si}}$$

ここに、 T_G : 表層地盤の特性値 (s)

H_i : 第 i 層厚 (m)

V_{Si} : 第 i 層のせん断弾性波速度 (m/s)

表-6 表層地盤の特性値

層	層厚 H_i (m)	せん断弾性波速度 V_{Si}	$\frac{H_i}{V_{Si}}$
1	25.0	71.5	0.3497
2	5.0	138.3	0.0362
計 (H)	30.0		0.3859

$$T_G = 4 \times 0.3859 = 1.54 \text{ s}$$

3) 地震動の波長

地震動の波長は、次式より求める。

$$L = \frac{2 \cdot L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

$$L' = \sqrt{2} \cdot L$$

$$L_1 = T_G \cdot V_{DS}$$

$$L_2 = T_G \cdot V_{BS}$$

ここに、

$$\begin{aligned}
L &: \text{地震動の波長 (m)} \\
L' &: \text{みかけの波長 (m)} \\
T_G &: \text{表層地盤の特性値 (1.54s)} \\
V_{DS} &: \text{表層地盤のせん断弾性波速度 (77.7m/s)} \\
V_{BS} &: \text{基盤のせん断弾性波速度 (334.3m/s)} \\
L_1 &= 1.54 \times 77.7 = 119.7 \text{ m} \\
L_2 &= 1.54 \times 334.3 = 514.8 \text{ m} \\
L &= \frac{2 \times 119.7 \times 514.8}{119.7 + 514.8} = 194.2 \text{ m} \\
L' &= \sqrt{2} \times 194.2 = 274.6 \text{ m}
\end{aligned}$$

4) 地盤の剛性係数

地盤の剛性係数は、次式より求める。

$$K_{g1} = C_1 \cdot \frac{t}{g} \cdot V_s^2$$

$$K_{g2} = C_2 \cdot \frac{t}{g} \cdot V_s^2$$

ここに、 K_{g1} : 管軸方向の単位長さ当たりの地盤の剛性係数 (kN/m²)
 K_{g2} : 管軸直交方向の単位長さ当たりの地盤の剛性係数 (kN/m²)
 g : 重力加速度 (9.8m/s²)
 V_s : 管路位置での地盤のせん断弾性波速度 (71.5m/s)
 t : 土の単位体積重量 (17kN/m³)
 C_1, C_2 : 地盤の剛性係数に対する定数 ($C_1=1.5, C_2=3.0$)

よって、地盤の剛性係数 K_{g1}, K_{g2} は、次のようになる。

$$K_{g1} = 1.5 \times \frac{17}{9.8} \times 71.5^2 = 13302.3 \text{ kN/m}^2$$

$$K_{g2} = 3.0 \times \frac{17}{9.8} \times 71.5^2 = 26604.6 \text{ kN/m}^2$$

5) 速度応答スペクトル

レベル1地震動

基盤地震動の単位震度当たりの速度応答スペクトル S_v を下図より求めると、
表層地盤の固有周期 $T_G=1.54s$ より、 $S_v=0.80m/s$ となる。

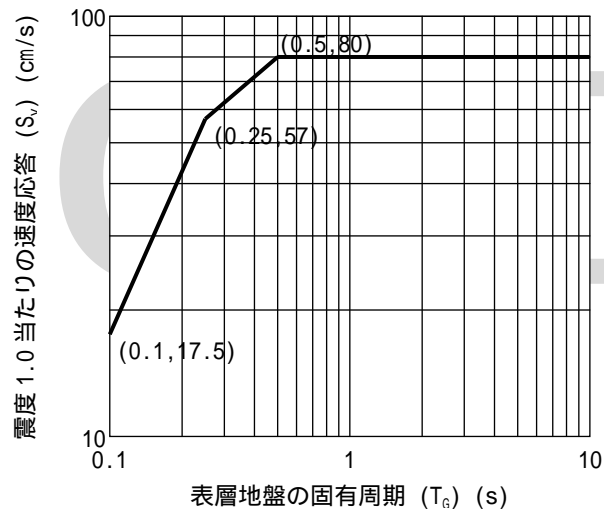


図-3 設計用速度応答スペクトル S_v

CSD

レベル2地震動

軸応力検討用の速度応答スペクトル S'_{v1} を下図の上限値より求めると、
表層地盤の固有周期 $T_g=1.54s$ より、 $S'_{v1}=1.00m/s$ となる。

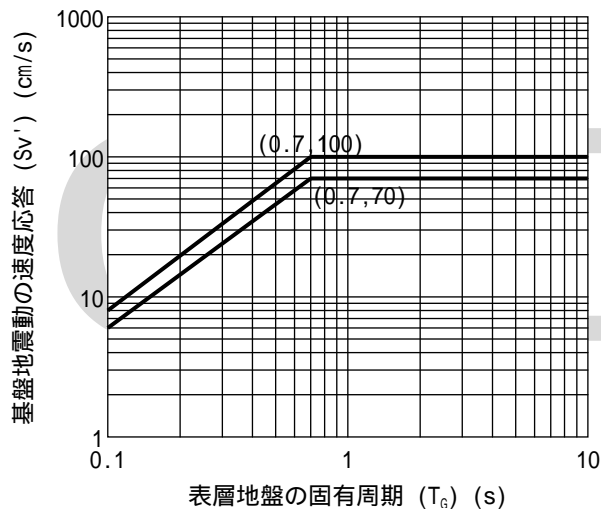


図-4 設計用速度応答スペクトル S'_{v1} (レベル2地震動、軸応力検討)

曲げ応力、継手伸縮量・屈曲角度検討用の速度応答スペクトル S'_{v2} を下図の上限値より求めると、
表層地盤の固有周期 $T_g=1.54s$ より、 $S'_{v2}=1.00m/s$ となる。

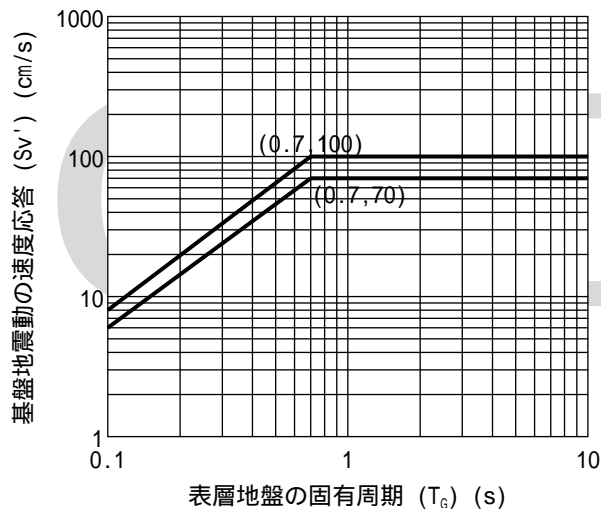


図-5 設計用速度応答スペクトル S'_{v2} (レベル2地震動、その他検討用)

6) 基盤面における設計水平震度

基盤面における設計水平震度は、次式より求める。

$$K'_{h1} = C_z \cdot K'_{h10}$$

ここに、 K'_{h1} : 基盤面における設計水平震度

C_z : 地域別補正係数 (1.0) (A 地域)

表-7 地域別補正係数 C_z

地域区分	地域別補正係数 C_z
A	1.0
B	0.85
C	0.7

K'_{h10} : 基盤面における設計水平震度の標準値 (0.15)

$$K'_{h1} = 1.0 \times 0.15 = 0.15$$

7) 管軸位置の地盤の水平変位振幅

レベル1地震動

管軸位置の地盤の水平変位振幅は、次式より求める。

$$U_{h1} = \frac{2}{2} \cdot S_v \cdot T_G \cdot K'_{h1} \cdot \cos \frac{\cdot h'}{2 \cdot H}$$

ここに、 U_{h1} : 管軸位置の地盤の水平変位振幅 (m)

S_v : 基盤地震動の単位長さ当たりの速度応答スペクトル (0.80m/s)

T_G : 表層地盤の特性値 (1.54s)

K'_{h1} : 基盤面における設計水平震度 (0.15)

h' : 地表面から管路中心までの深さ ($h' = h + D/2 = 4.04\text{m}$)

H : 表層地盤の厚さ (30.0m)

$$U_{h1} = \frac{2}{2} \times 0.80 \times 1.54 \times 0.15 \times \cos \frac{\times 4.04}{2 \times 30.0} = 0.0366\text{m}$$

レベル2地震動

管軸位置の地盤の水平変位振幅は、次式より求める。

$$U_{h21} = \frac{2}{2} \cdot S'_{v1} \cdot T_G \cdot \cos \frac{\cdot h'}{2 \cdot H}$$

$$U_{h22} = \frac{2}{2} \cdot S'_{v2} \cdot T_G \cdot \cos \frac{\cdot h'}{2 \cdot H}$$

ここに、 U_{h21} : 管軸位置の地盤の水平変位振幅(軸応力検討用) (m)

U_{h22} : 管軸位置の地盤の水平変位振幅(その他検討用) (m)

S'_{v1} : 基盤地震動の単位長さ当たりの速度応答スペクトル(軸応力検討用) (1.00m/s)

S'_{v2} : 基盤地震動の単位長さ当たりの速度応答スペクトル(その他検討用) (1.00m/s)

T_G : 表層地盤の特性値 (1.54s)

h' : 地表面から管路中心までの深さ ($h' = h + D/2 = 4.04\text{m}$)

H : 表層地盤の厚さ (30.0m)

$$U_{h21} = \frac{2}{2} \times 1.00 \times 1.54 \times \cos \frac{\times 4.04}{2 \times 30.0} = 0.3051\text{m}$$

$$U_{h22} = \frac{2}{2} \times 1.00 \times 1.54 \times \cos \frac{\times 4.04}{2 \times 30.0} = 0.3051\text{m}$$

8) 地盤変位の伝達係数

地盤変位の伝達係数は、次式より求める。

$$1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot}{1 \cdot L'}\right)^2}, \quad 2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot}{2 \cdot L}\right)^4}$$

ここに、 1 : 軸方向の地盤変位の伝達係数

2 : 軸直角方向の地盤変位の伝達係数

1 : 地盤変位の伝達係数に係わる係数 (0.0768 m^{-1})

2 : 地盤変位の伝達係数に係わる係数 (0.3883 m^{-1})

L : 波長 (194.2m)

L' : みかけの波長 (274.6m)

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \times}{0.0768 \times 274.6} \right)^2} = 0.918$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \times}{0.3883 \times 194.2} \right)^4} = 1.000$$

ただし、係数 α_1 , α_2 は

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{K_{g1}}{E \cdot A_p}}, \quad \alpha_2 = \sqrt[4]{\frac{K_{g2}}{E \cdot I_p}}$$

ここに、 K_{g1} : 管軸方向の単位長さ当たりの地盤の剛性係数 (13302.3kN/m²)

K_{g2} : 管軸直交方向の単位長さ当たりの地盤の剛性係数 (26604.6kN/m²)

E : 管のヤング係数 (8.8×10^6 kN/m²)

A_p : 管の断面積 (2.56×10^{-1} m²)

$$A_p = \frac{\pi \cdot \{D^2 - (D - 2t)^2\}}{4}$$

I_p : 管の断面二次モーメント (1.33×10^{-1} m⁴)

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{13302.3}{8.8 \times 10^6 \times 2.56 \times 10^{-1}}} = 0.0768\text{m}^{-1}$$

$$\alpha_2 = \sqrt[4]{\frac{26604.6}{8.8 \times 10^6 \times 1.33 \times 10^{-1}}} = 0.3883\text{m}^{-1}$$

CSD

9) 応力の補正係数

伸縮可とう継手がある場合の軸応力補正係数および曲げ応力補正係数は、次式より求める。

$$f_1(x) = \frac{\sqrt{f_1(x)^2 + f_2(x)^2}}{\exp(\mu' \cdot x) - \exp(-\mu' \cdot x) - \mu' \cdot L'}$$

$$f_2(x) = \sqrt{f_3(x)^2 + f_4(x)^2}$$

ここに、
 $f_1(x)$: 伸縮可とう継手がある場合の軸応力補正係数
 $f_2(x)$: 伸縮可とう継手がある場合の曲げ応力補正係数
 L : 伸縮可とう継手間の長さ (4.0m、管長相当)
 E : ヤング係数 ($8.8 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$)
 I_p : 断面二次モーメント ($1.33 \times 10^{-1} \text{ m}^4$)
 L : 波長 (194.2m)
 L' : みかけの波長 (274.6m)
 K_{g2} : 管軸直交方向の地盤の剛性係数 (26604.6kN/m²)
 μ_1 : 地盤変位の伝達係数に係わる係数 (0.0768m⁻¹)
 μ_2 : 地盤変位の伝達係数に係わる係数 (0.3883m⁻¹)
 x : 継手からの距離で応力を最大にする位置 ($x=L/2=2.0\text{m}$)

$$\mu = \frac{L}{L'} = \frac{4.0}{194.2} = 2.060 \times 10^{-2}$$

$$\mu' = \frac{L}{L'} = \frac{4.0}{274.6} = 1.457 \times 10^{-2}$$

$$\mu = \frac{x}{L} = \frac{2.0}{194.2} = 1.030 \times 10^{-2}$$

$$\mu' = \frac{x}{L'} = \frac{2.0}{274.6} = 7.283 \times 10^{-3}$$

$$= \sqrt[4]{\frac{K_{g2}}{4 \cdot E \cdot I_p}} = \sqrt[4]{\frac{26604.6}{4 \times 8.8 \times 10^6 \times 1.33 \times 10^{-1}}} = 2.746 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$$

$$L = 2.060 \times 10^{-2} \times 2.746 \times 10^{-1} \times 194.2 = 1.099 \times 10^0$$

$$\mu L = 1.030 \times 10^{-2} \times 2.746 \times 10^{-1} \times 194.2 = 5.493 \times 10^{-1}$$

$$C_1 = \sin(L) \cdot \sinh(L) = \sin(1.099 \times 10^0) \times \sinh(1.099 \times 10^0) = 1.188 \times 10^0$$

$$C_2 = \sin(L) \cdot \cosh(L) = \sin(1.099 \times 10^0) \times \cosh(1.099 \times 10^0) = 1.485 \times 10^0$$

$$C_3 = \cos(L) \cdot \sinh(L) = \cos(1.099 \times 10^0) \times \sinh(1.099 \times 10^0) = 6.063 \times 10^{-1}$$

$$C_4 = \cos(L) \cdot \cosh(L) = \cos(1.099 \times 10^0) \times \cosh(1.099 \times 10^0) = 7.577 \times 10^{-1}$$

$$e_1 = \sin(\mu L) \cdot \sinh(\mu L) = \sin(5.493 \times 10^{-1}) \times \sinh(5.493 \times 10^{-1}) = 3.014 \times 10^{-1}$$

$$e_2 = \sin(\mu L) \cdot \cosh(\mu L) = \sin(5.493 \times 10^{-1}) \times \cosh(5.493 \times 10^{-1}) = 6.029 \times 10^{-1}$$

$$e_3 = \cos(\mu L) \cdot \sinh(\mu L) = \cos(5.493 \times 10^{-1}) \times \sinh(5.493 \times 10^{-1}) = 4.924 \times 10^{-1}$$

$$e_4 = \cos(\mu L) \cdot \cosh(\mu L) = \cos(5.493 \times 10^{-1}) \times \cosh(5.493 \times 10^{-1}) = 9.848 \times 10^{-1}$$

$$= (C_3 + C_2) \cdot (C_3 - C_2) + 2C_1^2$$

$$= ((6.063 \times 10^{-1}) + 1.485 \times 10^0) \times ((6.063 \times 10^{-1}) - 1.485 \times 10^0) + 2 \times 1.188 \times 10^0$$

$$= 9.851 \times 10^{-1}$$

$$2 = 2 \times \mu \times 2.060 \times 10^{-2} = 1.294 \times 10^{-1}$$

$$f_1 = \frac{1}{9.851 \times 10^{-1}} \left[\{C_1 \cdot (C_4 - C_1) - C_3 \cdot (C_3 + C_2) - C_1 \cdot \cos(2 \mu L)\} \cdot \frac{2}{L} + (C_3 + C_2) \cdot \sin(2 \mu L) \right]$$

$$= \frac{1}{9.851 \times 10^{-1}} \left[\{1.188 \times 10^0 \times ((7.577 \times 10^{-1}) - 1.188 \times 10^0) \right.$$

$$\left. - (6.063 \times 10^{-1}) \times ((6.063 \times 10^{-1}) + 1.485 \times 10^0) \right.$$

$$\left. - 1.188 \times 10^0 \times \cos(1.294 \times 10^{-1}) \right] \times \frac{2}{2.746 \times 10^{-1} \times 194.2}$$

$$+ ((6.063 \times 10^{-1}) + 1.485 \times 10^0) \times \sin(1.294 \times 10^{-1})$$

$$= -7.976 \times 10^{-2}$$

$$f_2 = \frac{1}{9.851 \times 10^{-1}} \{C_1 \cdot (C_3 - C_2) - C_4 \cdot (C_3 + C_2) + (C_3 + C_2) \cdot \cos(2 \mu L) + C_1 \cdot \frac{2}{L} \cdot \sin(2 \mu L)\}$$

$$= \frac{1}{9.851 \times 10^{-1}} \{1.188 \times 10^0 \times ((6.063 \times 10^{-1}) - 1.485 \times 10^0)$$

$$- (7.577 \times 10^{-1}) \times ((6.063 \times 10^{-1}) + 1.485 \times 10^0)$$

$$+ ((6.063 \times 10^{-1}) + 1.485 \times 10^0) \times \cos(1.294 \times 10^{-1})$$

$$\begin{aligned}
& + 1.188 \times 10^0 \times \frac{2}{2.746 \times 10^{-1} \times 194.2} \times \sin(1.294 \times 10^{-1}) \} \\
& = -5.447 \times 10^{-1} \\
f_3 &= \frac{1}{9.851 \times 10^{-1}} \{ \{ C_1 \cdot (C_4 + C_1) - C_2 \cdot (C_3 + C_2) - C_1 \cdot \cos(2 \quad) \} \cdot \frac{2}{L} + (C_3 + C_2) \cdot \sin(2 \quad) \} \\
&= \frac{1}{9.851 \times 10^{-1}} \{ \{ 1.188 \times 10^0 \times ((7.577 \times 10^{-1}) + 1.188 \times 10^0) \\
&\quad - 1.485 \times 10^0 \times ((6.063 \times 10^{-1}) + 1.485 \times 10^0) \\
&\quad - 1.188 \times 10^0 \times \cos(1.294 \times 10^{-1}) \} \times \frac{2}{2.746 \times 10^{-1} \times 194.2} \\
&\quad + ((6.063 \times 10^{-1}) + 1.485 \times 10^0) \times \sin(1.294 \times 10^{-1}) \} \\
&= 3.806 \times 10^{-2} \\
f_4 &= \frac{1}{9.851 \times 10^{-1}} \{ \{ C_3 \cdot (C_4 + C_1) - C_2 \cdot (C_4 - C_1) + (C_2 - C_3) \cdot \cos(2 \quad) \} \cdot \frac{2}{L} - 2 \cdot C_1 \cdot \sin(2 \quad) \} \\
&= \frac{1}{9.851 \times 10^{-1}} \{ \{ (6.063 \times 10^{-1}) \times ((7.577 \times 10^{-1}) + 1.188 \times 10^0) \\
&\quad - 1.485 \times 10^0 \times ((7.577 \times 10^{-1}) - 1.188 \times 10^0) \\
&\quad + (1.485 \times 10^0 - (6.063 \times 10^{-1})) \times \cos(1.294 \times 10^{-1}) \} \times \frac{2}{2.746 \times 10^{-1} \times 194.2} \\
&\quad - 2 \times 1.188 \times 10^0 \times \sin(1.294 \times 10^{-1}) \} \\
&= 1.051 \times 10^{-2} \\
f_5 &= \frac{1}{9.851 \times 10^{-1}} \{ (C_3 - C_2)^2 + 2 \cdot C_1 \cdot C_4 - 2 \cdot C_1 \cdot \cos(2 \quad) - (C_2 - C_3) \cdot \frac{2}{L} \cdot \sin(2 \quad) \} \\
&= \frac{1}{9.851 \times 10^{-1}} \{ ((6.063 \times 10^{-1}) - 1.485 \times 10^0)^2 \\
&\quad + 2 \times 1.188 \times 10^0 \times (7.577 \times 10^{-1}) \\
&\quad - 2 \times 1.188 \times 10^0 \times \cos(1.294 \times 10^{-1}) \\
&\quad - (1.485 \times 10^0 - (6.063 \times 10^{-1})) \times \frac{2}{2.746 \times 10^{-1} \times 194.2} \times \sin(1.294 \times 10^{-1}) \} \\
&= 2.060 \times 10^{-1} \\
\mu'_1 L' &= 1.457 \times 10^{-2} \times 0.0768 \times 274.6 = 3.073 \times 10^{-1} \\
\mu'_2 L' &= 7.283 \times 10^{-3} \times 0.0768 \times 274.6 = 1.536 \times 10^{-1} \\
2 \mu'_1 &= 2 \times 1.457 \times 10^{-2} = 9.155 \times 10^{-2} \\
2 \mu'_2 &= 2 \times 7.283 \times 10^{-3} = 4.576 \times 10^{-2} \\
1(x) &= \{ \exp(-\mu'_1 L') - \cos(2 \mu'_1) \} \cdot \exp(\mu'_1 L') \\
&\quad - \{ \exp(-\mu'_2 L') - \cos(2 \mu'_2) \} \cdot \exp(-\mu'_2 L') \\
&\quad + 2 \sinh(\mu'_1 L') \cdot \cos(2 \mu'_1) \\
&= \{ \exp(-3.073 \times 10^{-1}) - \cos(9.155 \times 10^{-2}) \} \times \exp(3.073 \times 10^{-1}) \\
&\quad - \{ \exp(1.536 \times 10^{-1}) - \cos(4.576 \times 10^{-2}) \} \times \exp(-1.536 \times 10^{-1}) \\
&\quad + 2 \sinh(3.073 \times 10^{-1}) \times \cos(4.576 \times 10^{-2}) \\
&= 7.936 \times 10^{-3} \\
2(x) &= 2 \cdot \sin(2 \mu'_1) \cdot \sinh(\mu'_1 L') - 2 \cdot \sin(2 \mu'_2) \cdot \sinh(\mu'_2 L') \\
&= 2 \times \sin(9.155 \times 10^{-2}) \times \sinh(3.073 \times 10^{-1}) - 2 \times \sin(4.576 \times 10^{-2}) \times \sinh(1.536 \times 10^{-1}) \\
&= -3.634 \times 10^{-4} \\
3(x) &= f_3 \cdot e_3 - f_1 \cdot e_2 - f_4 \cdot e_1 - \sin(2 \mu) \\
&= (3.806 \times 10^{-2}) \times (4.924 \times 10^{-1}) - (-7.976 \times 10^{-2}) \times (6.029 \times 10^{-1}) \\
&\quad - (1.051 \times 10^{-2}) \times (3.014 \times 10^{-1}) - \sin(6.472 \times 10^{-2}) \\
&= -1.014 \times 10^{-3} \\
4(x) &= e_4 + f_2 \cdot e_3 - f_2 \cdot e_2 - f_5 \cdot e_1 - \cos(2 \mu) \\
&= (9.848 \times 10^{-1}) + (-5.447 \times 10^{-1}) \times (4.924 \times 10^{-1}) - (-5.447 \times 10^{-1}) \times (6.029 \times 10^{-1}) \\
&\quad - (2.060 \times 10^{-1}) \times (3.014 \times 10^{-1}) - \cos(6.472 \times 10^{-2}) \\
&= -1.501 \times 10^{-2} \\
1(x) &= \frac{\sqrt{(7.936 \times 10^{-3})^2 + (-3.634 \times 10^{-4})^2}}{\exp(3.073 \times 10^{-1}) - \exp(-3.073 \times 10^{-1})} = 0.013 \\
2(x) &= \sqrt{(-1.014 \times 10^{-3})^2 + (-1.501 \times 10^{-2})^2} = 0.015
\end{aligned}$$

10) 地震時の軸方向応力

レベル1地震動

地震時の軸方向応力は、次式より求める。

$${}_{1L} = {}_1 \cdot \frac{U_{h1}}{L} \cdot E$$

$${}_{1B} = {}_2 \cdot \frac{2 \cdot D \cdot U_{h1}}{L^2} \cdot E$$

$${}'_{1L}(x) = {}_1(x) \cdot {}_{1L}$$

$${}'_{1B}(x) = {}_2(x) \cdot {}_{1B}$$

$${}'_1(x) = \sqrt{{}_1(x)^2 \cdot {}_{1L}^2 + {}_2(x)^2 \cdot {}_{1B}^2}$$

- ここに、
- ${}_{1L}$: 埋設管路を連続とした場合の軸応力 (N/mm²)
 - ${}_{1B}$: 埋設管路を連続とした場合の曲げ応力 (N/mm²)
 - ${}'_{1L}(x)$: 継手間の中央部における軸応力 (N/mm²)
 - ${}'_{1B}(x)$: 継手間の中央部における曲げ応力 (N/mm²)
 - ${}'_1(x)$: 継手間の中央部における軸応力と曲げ応力の合成応力 (N/mm²)
 - ${}_1(x)$: 継手管路の場合の補正係数 (0.013)
 - ${}_2(x)$: 継手管路の場合の補正係数 (0.015)
 - ${}_1$: 軸方向の地盤変位の伝達係数 (0.918)
 - ${}_2$: 軸直角方向の地盤変位の伝達係数 (1.000)
 - U_{h1} : 管軸位置の地盤の水平変位振幅 (0.0366m)
 - L : 地震動の波長 (194.2m)
 - D : 外径 (2.08m)
 - E : ヤング係数 (8.8×10^6 kN/m²)
 - 重畳係数 (3.12)

$${}_{1L} = 0.918 \times \frac{0.0366}{194.2} \times 8.8 \times 10^6 = 4783 \text{ kN/m}^2 = 4.783 \text{ N/mm}^2$$

$${}_{1B} = 1.000 \times \frac{2 \times 2.08 \times 0.0366}{194.2^2} \times 8.8 \times 10^6 = 351 \text{ kN/m}^2 = 0.351 \text{ N/mm}^2$$

$${}'_{1L}(x) = 0.013 \times 4.783 = 0.062 \text{ N/mm}^2$$

$${}'_{1B}(x) = 0.015 \times 0.351 = 0.005 \text{ N/mm}^2$$

$${}'_1(x) = \sqrt{3.12 \times 0.062^2 + 0.005^2} = 0.110 \text{ N/mm}^2$$

CSD

レベル2地震動

地震時の軸方向応力は、次式より求める。

$$\sigma_{2L} = \alpha_1 \cdot \frac{U_{h21}}{L} \cdot E$$

$$\sigma_{2B} = \alpha_2 \cdot \frac{2 \cdot D \cdot U_{h22}}{L^2} \cdot E$$

$$\sigma'_{2L}(x) = \alpha_1(x) \cdot \sigma_{2L}$$

$$\sigma'_{2B}(x) = \alpha_2(x) \cdot \sigma_{2B}$$

$$\sigma'_2(x) = \sqrt{\sigma'^2_{2L}(x) + \sigma'^2_{2B}(x)}$$

- ここに、
- σ_{2L} : 埋設管路を連続とした場合の軸応力 (N/mm²)
 - σ_{2B} : 埋設管路を連続とした場合の曲げ応力 (N/mm²)
 - $\sigma'_{2L}(x)$: 継手間の中央部における軸応力 (N/mm²)
 - $\sigma'_{2B}(x)$: 継手間の中央部における曲げ応力 (N/mm²)
 - $\sigma'_2(x)$: 継手間の中央部における軸応力と曲げ応力の合成応力 (N/mm²)
 - $\alpha_1(x)$: 継手管路の場合の補正係数 (0.013)
 - $\alpha_2(x)$: 継手管路の場合の補正係数 (0.015)
 - α_1 : 軸方向の地盤変位の伝達係数 (0.918)
 - α_2 : 軸直角方向の地盤変位の伝達係数 (1.000)
 - U_{h21} : 管軸位置の地盤の水平変位振幅(軸応力検討用) (0.3051m)
 - U_{h22} : 管軸位置の地盤の水平変位振幅(その他検討用) (0.3051m)
 - L : 地震動の波長 (194.2m)
 - D : 外径 (2.08m)
 - E : ヤング係数 (8.8×10^6 kN/m²)
 - : 重畳係数 (1.00)

$$\sigma_{2L} = 0.918 \times \frac{0.3051}{194.2} \times 8.8 \times 10^6 = 39872 \text{ kN/m}^2 = 39.872 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{2B} = 1.000 \times \frac{2 \times 2.08 \times 0.3051}{194.2^2} \times 8.8 \times 10^6 = 2923 \text{ kN/m}^2 = 2.923 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma'_{2L}(x) = 0.013 \times 39.872 = 0.518 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma'_{2B}(x) = 0.015 \times 2.923 = 0.044 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma'_2(x) = \sqrt{1.00 \times 0.518^2 + 0.044^2} = 0.520 \text{ N/mm}^2$$

CSD

3. 継手の伸縮量及び屈曲角度

(1) 常時の継手伸縮量

1) 内圧による継手伸縮量

内圧による継手伸縮量は、次式より求める。

$$e_i = \frac{p_i \cdot l}{E}$$

ここに、 e_i : 内圧による継手伸縮量 (mm)
 p_i : 内圧による軸方向応力 (1.530N/mm²)
 l : 管長 (4000mm)
 E : 管のヤング係数 (8.8 × 10³N/mm²)

$$e_i = \frac{1.530 \times 4000}{8.8 \times 10^3} = 0.695\text{mm}$$

2) 自動車荷重による継手伸縮量

自動車荷重による継手伸縮量は、次式より求める。

$$e_o = \frac{p_o \cdot l}{E}$$

ここに、 e_o : 自動車荷重による継手伸縮量 (mm)
 p_o : 自動車荷重による軸方向応力 (0.460N/mm²)
 l : 管長 (4000mm)
 E : 管のヤング係数 (8.8 × 10³N/mm²)

$$e_o = \frac{0.460 \times 4000}{8.8 \times 10^3} = 0.209\text{mm}$$

3) 温度変化による継手伸縮量

温度変化による継手伸縮量は、次式より求める。

$$e_t = \alpha \cdot t \cdot l$$

ここに、 e_t : 温度変化による継手伸縮量 (mm)
 α : 管の線膨張係数 (3 × 10⁻⁵/)
 t : 温度変化 (20)
 l : 管長 (4000mm)

$$e_t = 3 \times 10^{-5} \times 20 \times 4000 = 2.400\text{mm}$$

4) 不同沈下による継手伸縮量

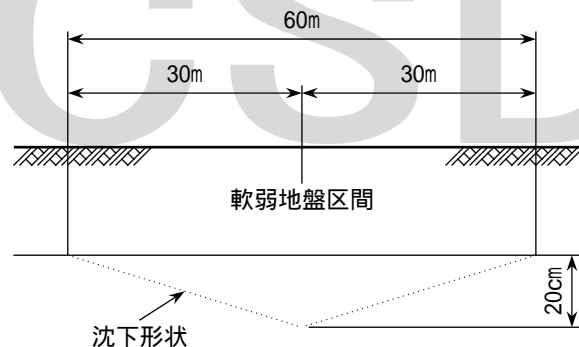


図-6 不同沈下想定図

不同沈下による継手伸縮量は、図-6 のような状態を想定して算出する。

軟弱地盤区間 $l_1=60\text{m}$ において、その中央部が $h=30\text{m}$ 区間における軸心の伸び l は、

$$l = \sqrt{30^2 + 0.2^2} - 30 = 0.000667\text{m} = 0.667\text{mm}$$

この伸び l は、30m 区間の複数の継手に分散吸収されるが、ここでは1箇所の継手に集中したときを仮定すると不同沈下による継手伸縮量 e_d は以下のように求まる。

$$e_d = l = 0.667\text{mm}$$

(2) 地震時の継手伸縮量

地震時の継手伸縮量は、次式より求める。

$$|u_j| = u_0 \cdot \bar{u}_j$$

$$u_0 = \beta_1 \cdot U_a$$

$$U_a = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_h$$

$$\bar{u}_j = \frac{2 \cdot \beta_1 \cdot |\cosh(\beta_1) - \cos(\beta_1)|}{\beta_1 \cdot \sinh(\beta_1)}$$

$$\beta_1 = \frac{2 \cdot \beta \cdot l}{L'}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{K_{g1}}{E \cdot A_p}} \cdot l$$

$$\beta_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\beta}{0.307}\right)^2}$$

ここに、 $|u_j|$: 管軸方向継手伸縮量 (mm)

u_0 : 無限連続はりとした場合のはりの管軸方向相対変位量 (m)

\bar{u}_j : 継手変位係数

U_a : 地盤の管軸方向の水平変位振幅 (m)

U_h : 管軸位置の地盤の水平変位振幅 (レベル 1=0.0366m, レベル 2=0.3051m)

l : 継手間の長さ (管長相当) (4.0m)

E : ヤング係数 ($8.8 \times 10^6 \text{kN/m}^2$)

A_p : 断面積 ($2.56 \times 10^{-1} \text{m}^2$)

L' : 地震動のみかけの波長 (274.6m)

K_{g1} : 管軸方向の地盤の剛性係数 (13302.3kN/m^2)

$$\beta_1 = \frac{2 \times 0.092 \times 4.0}{274.6} = 0.092$$

$$\beta = \sqrt{\frac{13302.3}{8.8 \times 10^6 \times 2.56 \times 10^{-1}}} \times 4.0 = 0.307$$

$$\beta_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{0.092}{0.307}\right)^2} = 0.918$$

$$\bar{u}_j = \frac{2 \times 0.092 \times |\cosh(0.307) - \cos(0.092)|}{0.307 \times \sinh(0.307)} = 0.099$$

レベル 1 地震動

$$U_{a1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 0.0366 = 0.0259\text{m}$$

$$u_{01} = 0.918 \times 0.0259 = 0.0238\text{m}$$

$$|u_{j1}| = 0.0238 \times 0.099 = 0.002356\text{m} = 2.356\text{mm}$$

レベル 2 地震動

$$U_{a2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 0.3051 = 0.2157\text{m}$$

$$u_{02} = 0.918 \times 0.2157 = 0.1980\text{m}$$

$$|u_{j2}| = 0.1980 \times 0.099 = 0.019602\text{m} = 19.602\text{mm}$$

(3) 地震時の継手屈曲角度

地震時の継手屈曲角度は、次式より求める。

$$= \frac{4 \cdot l^2 \cdot U_h}{L^2}$$

ここに、 θ : 継手部の屈曲角度 (rad)

l : 継手間隔 (4.0m)

U_h : 管軸位置の地盤の水平変位振幅 (レベル 1=0.0366m, レベル 2=0.3051m)

L : 地震動の波長 (194.2m)

レベル 1 地震動

$$\theta_1 = \frac{4 \times 4.0^2 \times 0.0366}{194.2^2} = 0.000153 \text{ rad} = 0^\circ 0' 32''$$

レベル 2 地震動

$$\theta_2 = \frac{4 \times 4.0^2 \times 0.3051}{194.2^2} = 0.001278 \text{ rad} = 0^\circ 4' 24''$$

CSD

4. 耐震性の照査

表-8 照査結果

項目		レベル1	レベル2
管体応力 (N/mm ²)	常時		
	設計内圧 p_i	1.530	1.530
	自動車荷重 p_o	0.460	0.460
	地震時		
	軸方向応力合計 σ_x	2.100	2.510
	許容応力 a	7.350	7.350
	安全率	3.500	2.928
継手伸縮量 (mm)	常時		
	設計内圧 e_i	0.695	0.695
	自動車荷重 e_o	0.209	0.209
	温度変化 e_t	2.400	2.400
	不同沈下 e_d	0.667	0.667
	地震時 $ u_i $	2.356	19.602
	伸縮量合計	6.327	23.573
	設計照査用最大伸び量 a	99.000	99.000
	安全率	15.647	4.200
継手屈曲角度	地震時	0° 0' 32"	0° 4' 24"
	許容屈曲角度 a	2° 30'	2° 30'

CSD