

鋼管の計算

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
鋼管の耐震性の検討を行う

(1) 管体仕様

鋼管呼び径	: $R_D = 2000\text{mm}$
鋼管種類	: STW 400 A
鋼管外径	: $D = 2032\text{mm}$
管厚	: $t = 18\text{mm}$
管の断面積	: $A_p = 1.14 \times 10^{-1}\text{m}^2$
鋼管のヤング係数	: $E = 2.0 \times 10^8\text{kN/m}^2$

(2) 埋設条件

土かぶり	: $h = 3.0\text{m}$
道路状態	: アスファルト舗装道路
軟弱地盤区間 (盛土区間)	: $L = 15.0\text{m}$
盛土の高さ	: $h'' = 1.0\text{m}$
温度変化量	: $t = 15$

(3) 荷重条件

内圧	: $P_i = 0.2\text{N/mm}^2$
自動車荷重	: $P_m = 100\text{kN/輪}$
車輪接地幅	: $a = 0.2\text{m}$
分布角	: $= 45^\circ$
衝撃係数	: $i = 0.1$ (土かぶり 2.5m 以上、アスファルト舗装道路)
鋼管の線膨張係数	: $= 1.2 \times 10^{-5}/$
鉛直方向地盤反力係数	: $k_v = 9800\text{kN/m}^3$
埋設位置の土の単位体積重量	: $\gamma_t = 17\text{kN/m}^3$
重畳係数	: $= (1.00 \sim 3.12、本計算例ではレベル 1 で 1.00、レベル 2 で 1.00 を用いる)$

(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

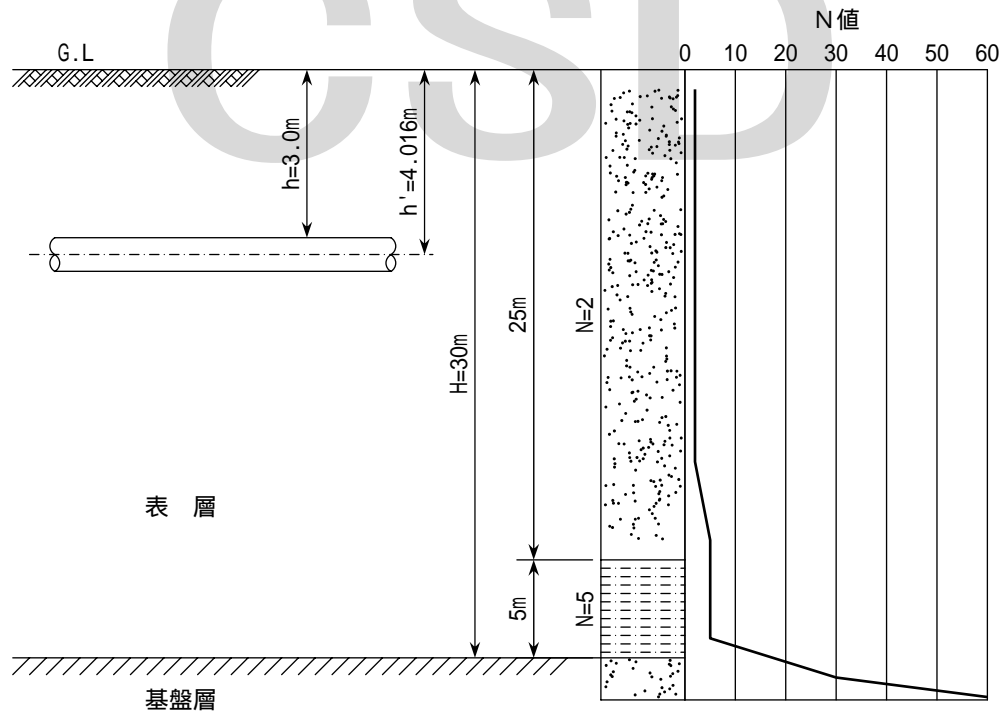


図-1 地盤モデル

2. 管体発生ひずみ

(1) 常時の管体発生ひずみ

1) 内圧による軸方向ひずみ (ϵ_{ii})

内圧による軸方向ひずみは、次式より求める。

$$\epsilon_{ii} = \frac{P_i \cdot (D - t)}{2 \cdot t \cdot E}$$

ここに、 ϵ_{ii} : 内圧による管軸方向ひずみ

: ポアソン比 (0.3)

P_i : 内圧 (0.2N/mm²)

D : 外径 (2032mm)

t : 管厚 (18.0mm)

E : ヤング係数 (2.0×10^5 N/mm²)

$$\epsilon_{ii} = 0.3 \times \frac{0.2 \times (2032 - 18.0)}{2 \times 18.0 \times 2.0 \times 10^5} = 1.68 \times 10^{-5} = 0.002\%$$

CSD

2) 自動車荷重による軸方向ひずみ (l_0)

自動車荷重による軸方向ひずみは、次式より求める。

$$l_0 = \frac{0.322 \cdot W_m}{Z_p \cdot E} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I_p}{k_v \cdot D}}$$

ここに、 l_0 : 自動車荷重による軸方向ひずみ

W_m : 自動車荷重 (23.597kN/m)

D : 外径 (2.032m)

t : 管厚 (0.0180m)

E : ヤング係数 (2.0×10^8 kN/m²)

I_p : 断面二次モーメント (5.77×10^{-2} m⁴)

$$I_p = \frac{\pi \cdot \{D^4 - (D - 2t)^4\}}{64}$$

$$= \frac{\pi \{2.032^4 - (2.032 - 2 \times 0.0180)^4\}}{64} = 5.77 \times 10^{-2} \text{m}^4$$

Z_p : 断面係数 (5.68×10^{-2} m³)

$$Z_p = \frac{2 \cdot I_p}{D} = \frac{2 \times 5.77 \times 10^{-2}}{2.032} = 5.68 \times 10^{-2} \text{m}^3$$

K_v : 鉛直方向地盤反力係数 (9800kN/m³)

$$l_0 = \frac{0.322 \times 23.597}{5.68 \times 10^{-2} \times 2.0 \times 10^8} \times \sqrt{\frac{2.0 \times 10^8 \times 5.77 \times 10^{-2}}{9800 \times 2.032}} = 1.61 \times 10^{-5} = 0.002\%$$

ただし、自動車荷重 W_m は、

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

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

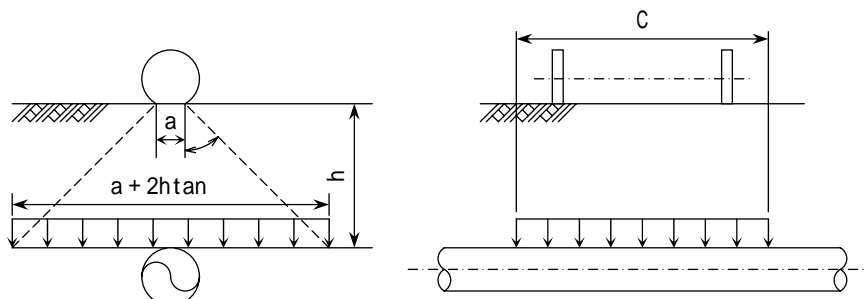
土かぶり深さ (m)	1.5 未満	1.5~2.5 未満	2.5 以上
道路の状態			
未舗装道路	0.4	0.3	0.2
コンクリート及び アスファルト舗装道路	0.3	0.2	0.1

θ : 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

$$W_m = \frac{2 \times 100 \times 2.032}{2.75 \times (0.20 + 2 \times 3.0 \times \tan 45^\circ)} \times (1 + 0.1) \times 0.9 = 23.597 \text{kN/m}$$



3) 温度変化による軸方向ひずみ (ϵ_m)

温度変化による軸方向ひずみは、次式より求める。

$$\epsilon_m = \alpha \cdot t$$

ここに、 ϵ_m : 温度変化による軸方向ひずみ
 α : 管の線膨張係数 ($1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$)
 t : 温度変化 (15 $^\circ\text{C}$)

$$\epsilon_m = 1.2 \times 10^{-5} \times 15 = 1.80 \times 10^{-4} = 0.018\%$$

CSD

CSD

4) 不同沈下による軸方向ひずみ

不同沈下によって溶接鋼管に発生する軸方向ひずみの計算に際しては、盛土による地盤の沈下を対象とした計算を行う。

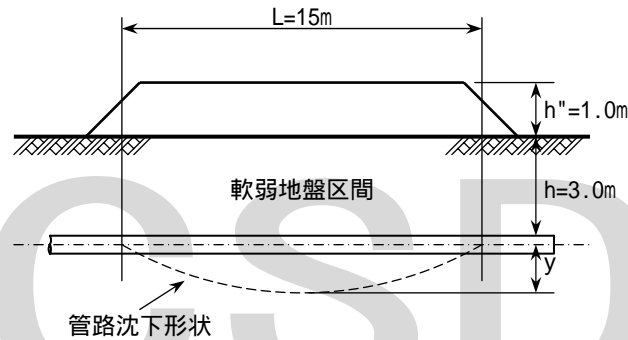


図-3 不同沈下想定図

溶接鋼管を弾性床上の梁とし、最大曲げモーメントは、「構造力学公式集」(土木学会)によると、以下の M_1 または M_2 のいずれか大きな値によって、安全側に近似することができる。

$$M_1 = \frac{W_d}{2} \cdot e^{-L/2} \cdot \sin \frac{L}{2}$$

$$M_2 = 0.3877 \cdot \frac{W_d}{2} \cdot \{0.2079 + e^{-L} \cdot (\sin L - \cos L)\}$$

$$W_d = \gamma \cdot (h + h'') \cdot D$$

$$= \sqrt[4]{\frac{K_{g2}}{4 \cdot E \cdot I_p}}$$

ここに、 W_d : 鉛直土荷重 (kN/m)

γ : 基礎の特性値 (m^{-1})

L : 軟弱地盤区間 (15.0m)

γ : 土の単位体積重量 (17kN/m³)

h : 土かぶり (3.0m)

h'' : 盛土の高さ (1.0m)

D : 外径 (2.032m)

K_{g2} : 管軸直角方向の地盤の剛性係数 (後述) (26604.6kN/m²)

E : ヤング係数 (2.0×10^8 kN/m²)

I_p : 断面二次モーメント (5.77×10^{-2} m⁴)

$$W_d = 17 \times (3.0 + 1.0) \times 2.032 = 138.176 \text{ kN/m}$$

$$= \sqrt[4]{\frac{26604.6}{4 \times 2.0 \times 10^8 \times 5.77 \times 10^{-2}}} = 0.155 \text{ m}^{-1}$$

$$L = 0.155 \times 15.0 = 2.325$$

$$M_1 = \frac{138.176}{2 \times 0.155^2} \times e^{-2.325/2} \times \sin \frac{2.325}{2} = 825.314 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_2 = 0.3877 \times \frac{138.176}{0.155^2} \times \{0.2079 + e^{-2.325} \times (\sin 2.325 - \cos 2.325)\} = 771.775 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

よって $M_1 > M_2$ なので、最大発生ひずみは以下のように求まる。

$$= \frac{M_1}{E \cdot I_p} \cdot \frac{D}{2} = \frac{825.314}{2.0 \times 10^8 \times 5.77 \times 10^{-2}} \times \frac{2.032}{2} = 7.27 \times 10^{-5} = 0.007\%$$

(2) 地震時の管体発生ひずみ

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、

L : 地震動の波長 (m)

L' : みかけの波長 (m)

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

4) 地盤の剛性係数

地盤の剛性係数は、次式より求める。

$$K_{g1} = C_1 \cdot \frac{1}{g} \cdot V_s^2$$

$$K_{g2} = C_2 \cdot \frac{1}{g} \cdot V_s^2$$

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)
 γ : 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。

$$K_{g1} = 1.5 \times \frac{17}{9.8} \times 71.5^2 = 13302.3\text{kN/m}^3$$

$$K_{g2} = 3.0 \times \frac{17}{9.8} \times 71.5^2 = 26604.6\text{kN/m}^3$$

CSD

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。

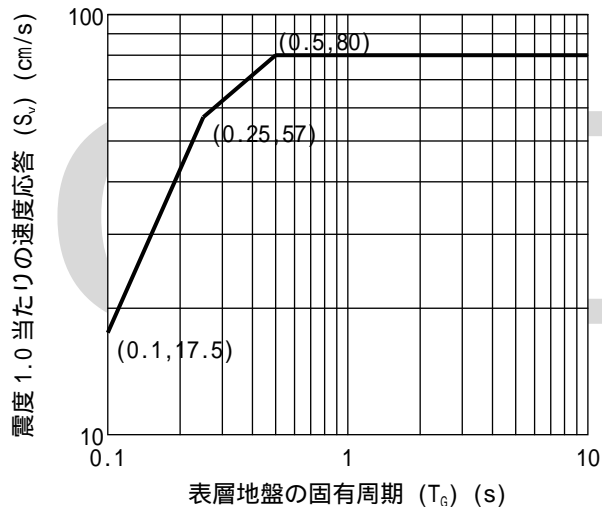


図-4 設計用速度応答スペクトル S_v

レベル2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、 $S'_v=1.00m/s$ となる。

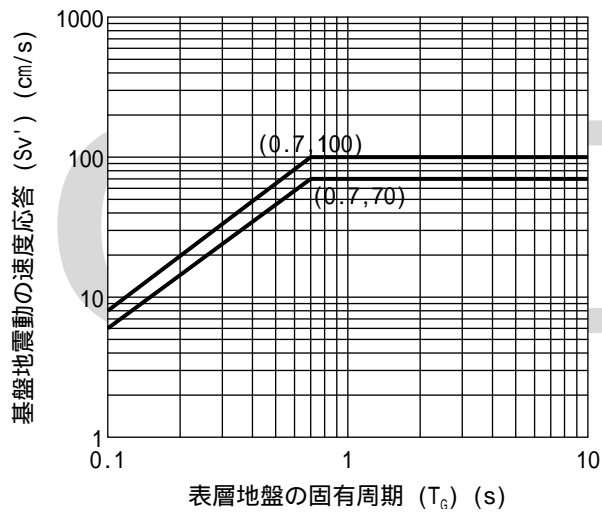


図-5 設計用速度応答スペクトル S'_v

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 ($h' = h + D/2 = 4.016\text{m}$)
 H : 表層地盤の厚さ (30.0m)

$$U_{h1} = \frac{2}{2} \times 0.80 \times 1.54 \times 0.15 \times \cos \frac{\times 4.016}{2 \times 30.0} = 0.0366\text{m}$$

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。

$$U_{h2} = \frac{2}{2} \cdot S'_v \cdot T_g \cdot \cos \frac{\cdot h'}{2 \cdot H}$$

ここに、 U_{h2} : 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 (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 ($h' = h + D/2 = 4.016\text{m}$)
 H : 表層地盤の厚さ (30.0m)

$$U_{h2} = \frac{2}{2} \times 1.00 \times 1.54 \times \cos \frac{\times 4.016}{2 \times 30.0} = 0.3052\text{m}$$

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 (0.0242 m^{-1})
 2 : 地盤変位の伝達係数に係わる係数 (0.2191 m^{-1})
 L : 波長 (194.2m)
 L' : みかけの波長 (274.6m)

$$1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \times}{0.0242 \times 274.6}\right)^2} = 0.528$$

$$2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \times}{0.2191 \times 194.2}\right)^4} = 1.000$$

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 (2.0×10^8 kN/m²)

A_p : 管の断面積 (1.14×10^{-1} m²)

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

I_p : 管の断面二次モーメント (5.77×10^{-2} m⁴)

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{13302.3}{2.0 \times 10^8 \times 1.14 \times 10^{-1}}} = 0.0242\text{m}^{-1}$$

$$\alpha_2 = \sqrt[4]{\frac{26604.6}{2.0 \times 10^8 \times 5.77 \times 10^{-2}}} = 0.2191\text{m}^{-1}$$

9) 管軸方向への地盤ひずみ

レベル1地震動

管軸方向への地盤ひずみは、次式により求める。

$$G_1 = \frac{\alpha_1 \cdot U_{h1}}{L}$$

ここに、 G_1 : 管軸方向への地盤ひずみ

U_{h1} : 管軸位置での地盤の水平変位振幅 (0.0366m)

L : 地震動の波長 (194.2m)

$$G_1 = \frac{0.0366}{194.2} = 5.92 \times 10^{-4}$$

レベル2地震動

管軸方向への地盤ひずみは、次式により求める。

$$G_2 = \frac{\alpha_2 \cdot U_{h2}}{L}$$

ここに、 G_2 : 管軸方向への地盤ひずみ

U_{h2} : 管軸位置での地盤の水平変位振幅 (0.3052m)

L : 地震動の波長 (194.2m)

$$G_2 = \frac{0.3052}{194.2} = 4.94 \times 10^{-3}$$

10) 埋設管路の軸ひずみ

レベル1地震動

埋設管路の軸ひずみは、次式により求める。

$${}_{1L} = \alpha_1 \cdot G_1$$

ここに、 ${}_{1L}$: 埋設管路の軸ひずみ

α_1 : 管軸方向の地盤の伝達係数 (0.528)

G_1 : 管軸方向への地盤ひずみ (5.92×10^{-4})

$${}_{1L} = 0.528 \times 5.92 \times 10^{-4} = 3.13 \times 10^{-4}$$

レベル2地震動

埋設鋼管路の軸ひずみは、地震動の波長 L と次式で計算される L_1 との比較によって計算式が選択される。

$$L_1 = \frac{2\sqrt{2} \cdot E \cdot t}{\gamma}$$

ここに、

γ : 降伏ひずみ (0.0011)

E : ヤング係数 (2.0×10^8 kN/m²)

t : 管厚 (0.018m)

γ : 管と地盤の摩擦力 (10.0kN/m²)

L : 地震動の波長 (194.2m)

$$= \frac{2\sqrt{2} \times 2.0 \times 10^8 \times 0.018}{10.0} = 1018234\text{m}$$

$$L_1 = 1018234 \times 0.0011 = 1120.1\text{m}$$

L₁であるから、埋設管路の軸ひずみ_Lは次式のように計算される。

$$\epsilon_L = \frac{L}{L_1} = \frac{194.2}{1018234} = 1.91 \times 10^{-4}$$

11) 埋設管路の曲げひずみ

レベル1地震動

管の曲げひずみは、次式により求める。

$$1B = \frac{2 \cdot D}{L} \cdot G_1$$

ここに、

1B : 管の曲げひずみ

2 : 管軸直角方向の地盤の伝達係数 (1.000)

D : 管の外径 (2.032m)

L : 地震動の波長 (194.2m)

G₁ : 管軸方向への地盤ひずみ (5.92 × 10⁻⁴)

$$1B = 1.000 \times \frac{2 \times 2.032}{194.2} \times 5.92 \times 10^{-4} = 3.89 \times 10^{-5}$$

レベル2地震動

管の曲げひずみは、次式により求める。

$$2B = \frac{2 \cdot D}{L} \cdot G_2$$

ここに、

2B : 管の曲げひずみ

2 : 管軸直角方向の地盤の伝達係数 (1.000)

D : 管の外径 (2.032m)

L : 地震動の波長 (194.2m)

G₂ : 管軸方向への地盤ひずみ (4.94 × 10⁻³)

$$2B = 1.000 \times \frac{2 \times 2.032}{194.2} \times 4.94 \times 10^{-3} = 3.25 \times 10^{-4}$$

12) 軸ひずみと曲げひずみの合成ひずみ

レベル1地震動

軸ひずみと曲げひずみの合成ひずみは、次式より求める。

$$1x = \sqrt{1 \cdot \epsilon_L^2 + 1B^2}$$

ここに、

1x : 軸ひずみと曲げひずみの合成ひずみ

1 : 重畳係数 (1.00)

1L : 管の軸ひずみ (3.13 × 10⁻⁴)

1B : 管の曲げひずみ (3.89 × 10⁻⁵)

$$1x = \sqrt{1.00 \times (3.13 \times 10^{-4})^2 + (3.89 \times 10^{-5})^2} = 3.15 \times 10^{-4} = 0.032\%$$

レベル2地震動

軸ひずみと曲げひずみの合成ひずみは、次式より求める。

$$2x = \sqrt{2 \cdot \epsilon_L^2 + 2B^2}$$

ここに、

2x : 軸ひずみと曲げひずみの合成ひずみ

2 : 重畳係数 (1.00)

2L : 管の軸ひずみ (1.91 × 10⁻⁴)

2B : 管の曲げひずみ (3.25 × 10⁻⁴)

$$2x = \sqrt{1.00 \times (1.91 \times 10^{-4})^2 + (3.25 \times 10^{-4})^2} = 3.77 \times 10^{-4} = 0.038\%$$

(3) 耐震性の照査

軸方向ひずみの計算結果をまとめると、下表のとおりである。

地震動レベル1

軸方向ひずみの合計は0.061%であり、降伏点ひずみ0.110%以下であるので安全である。

地震動レベル2

軸方向ひずみの合計は0.067%であり、許容ひずみ $0.407\%(\frac{46 \cdot t}{D})$ 以下であるので安全である。

表-8 照査結果

名称	レベル1	レベル2	備考
設計内圧	0.002%	0.002%	2.(1)
自動車荷重	0.002%	0.002%	2.(1)
温度変化	0.018%	0.018%	2.(1)
不同沈下	0.007%	0.007%	2.(1)
地震時	0.032%	0.038%	2.(2).12)
軸方向ひずみ合計	0.061%	0.067%	+ + + +
許容ひずみ	0.110%	0.407%	レベル2 46t/D (%)

CSD