

管体軸方向(一体構造)の耐震計算

1.設計条件

(1) 管に関する設計条件

管種		鋼 管	(SP)	1種管
管の呼び径			2000	mm
管の外径		D	=	2032 mm
規格管厚		t	=	18 mm
埋設管路のひずみ硬化特性値		κ	=	0.1
管の降伏ひずみ		ε_y	=	0.00114
管の断面積	$A = \pi/4 \cdot \{ D^2 - (D - 2t)^2 \}$		=	1138.9 cm ²
管の断面係数	$Z = \pi/32 \cdot \{ D^4 - (D - 2t)^4 \} / D$		=	56840 cm ³
管の断面2次モーメント	$I = \pi/64 \cdot \{ D^4 - (D - 2t)^4 \}$		=	5774913 cm ⁴
ポアソン比		ν	=	0.3
管の弾性係数		E	=	210 kN/mm ²
線膨張係数		α	=	0.000012
レベル1 許容ひずみ				0.11 %
レベル2 許容ひずみ				46・t/D %

(2) 土圧の設計条件

管の土被り		h	=	3.00 m
道路の状態				舗装
温度変化		ΔT	=	15 °C
不同沈下による軸方向ひずみ				
軟弱地盤区間		L	=	15.00 m
盛土の高さ		h'	=	1.00 m

(3) 荷重の設計条件

設計内圧		PI	=	0.2 Mpa
自動車荷重	T-25	P	=	100 kN
衝撃係数		i	=	表-2
断面力の低減係数		β	=	表-3
その他荷重		Ws	=	0 N/mm
土の単位体積重量		γ_t	=	17 kN/m ³
管と地盤との摩擦力		τ	=	0.01 N/mm ²
鉛直方向地盤反力係数		Kv	=	9800 kN/m ³

(4) 地震力の設計条件

基盤面における基準水平震度		K'h01	=	0.15
基盤面における設計水平震度		K'h1	=	0.15
地域別補正係数		Cz	=	1.00 A区分

(5)地盤条件

表-1地盤条件

層 i	深度 (m)	層厚 Hi(m)	堆積時代	土質名	N値	土の単位 重量 γ_{ti} (kN/m^3)
1	25.00	25.00	沖積世	砂質土	2	17.0
2	30.00	5.00	沖積世	粘性土	5	17.0
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
基盤層		30.00	洪積世	砂質土	50	

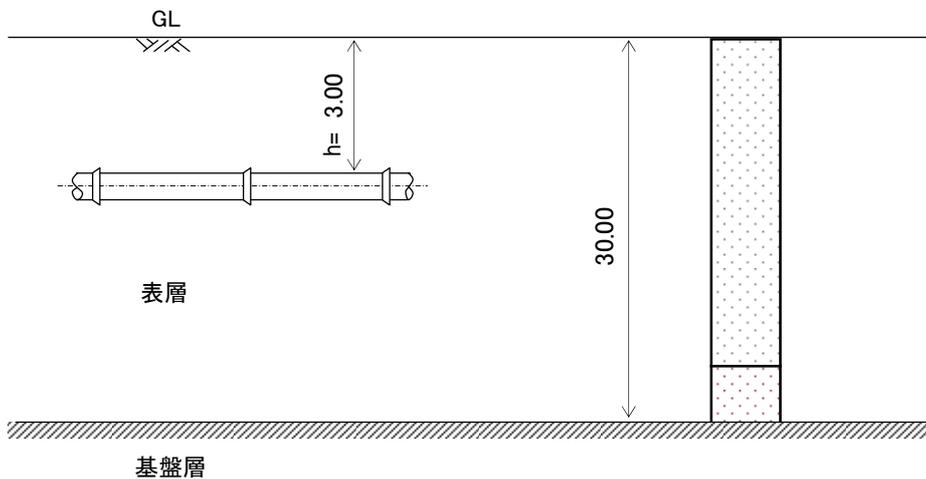


図-1 地盤モデル

2. 常時荷重による管体発生ひずみ

(1)管体発生ひずみ

地中埋設管で軸方向の変化が拘束されている管の内圧による軸方向ひずみは、次式で求まる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{li} &= \frac{\nu \cdot P_i (D - t)}{2 \cdot t \cdot E} \\ &= \frac{0.30 \times 0.20 \times (203.20 - 1.80)}{2 \times 1.80 \times 210,000} = 0.00002 \quad (0.002 \%) \end{aligned}$$

ここに、 σ_{li} ：内圧による軸方向ひずみ

ν ：ポアソン比

P_i ：内圧

D ：管の外径

t ：管厚

E ：管の弾性係数

(2) 自動車荷重+その他荷重による軸方向ひずみ

$$\begin{aligned} \text{自動車荷重 } W_t &= \frac{2 \times P \times D \times (1+i) \times \beta}{2.75 \times (a + 2h)} \\ &= \frac{2 \times 100 \times 2,032 \times (1+0.1) \times 0.9}{2.75 \times (0.20+2 \times 3.0)} \\ &= 23.597 \text{ kN/m} = 23.597 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

ここに、 W : 自動車荷重(N/mm)
 P : 自動車1後輪当たりの荷重
 D : 管の外径
 a : 接地幅
 h : 管の土被り
 i : 衝撃係数 (0.1)

$$\beta = 0.9$$

表-2 衝撃係数

土被り深さ(m)	$h < 1.5$	$1.5 \leq h < 2.5$	$2.5 \leq h$
未舗装	0.4	0.3	0.2
コンクリート・アスファルト	0.3	0.2	0.1

表-3 断面力の低減係数

荷重条件	低減係数 β
T-25	0.9
T-20以下	1.0

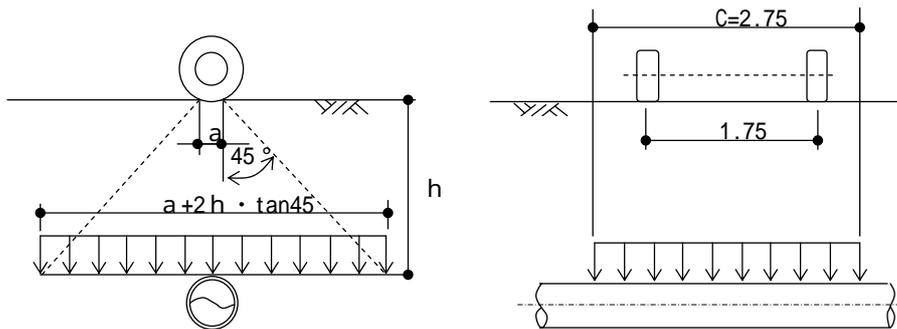


図-2自動車荷重の分布図

その他の荷重 $W_s = 0 \text{ N/mm}$

$$W = W_t + W_s = 23.60 + 0.00 = 23.60 \text{ N/mm}$$

従って荷重による軸方向ひずみは

$$\begin{aligned} \varepsilon_{10} &= \frac{0.322W}{ZE} \sqrt{\frac{EI}{K_v \cdot D}} \\ &= \frac{0.322 \times 23.60}{56,840,000 \times 210,000} \sqrt{\frac{210,000 \times 57,749,130,000}{0.010 \times 2,032}} \\ &= 0.000016 = 0.002 \% \end{aligned}$$

ここに、 W : 自動車荷重+その他荷重
 Z : 管の断面係数 56840 cm³
 E : 管の弾性係数 210 kN/mm²
 I : 管の断面2次モーメント 5774913 cm⁴
 K_v : 鉛直方向地盤反力係数 9800 kN/m³
 D : 管の外径 2032 mm

(3) 温度変化による軸方向ひずみ

$$\varepsilon_{1t} = \alpha \Delta T = 0.000012 \times 15 = 0.00018 \text{ (0.018 \%)}$$

ここに、 ε_{1t} : 温度変化による軸方向歪み
 α : 線膨張係数
 ΔT : 温度変化

(4) 不同沈下による軸方向歪み

不同沈下によって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。

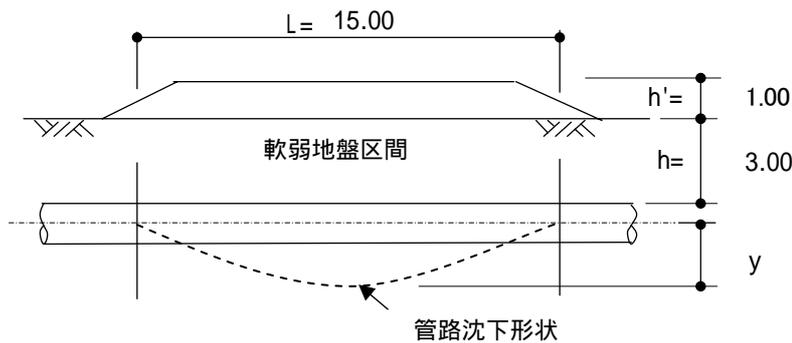


図-3 不当沈下想定図

管を弾性床の梁とし、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。

$$M_1 = \frac{Wd}{2\beta^2} e^{-\beta L/2} \sin \frac{\beta L}{2}$$

$$M_2 = \frac{e^{\pi/4} Wd}{4\sqrt{2} \beta^2} \{e^{-\pi/2} + e^{-\beta L} (\sin \beta L - \cos \beta L)\}$$

$$= \frac{0.377 \cdot Wd}{\beta^2} \{0.2079 + e^{-\beta L} (\sin \beta L - \cos \beta L)\}$$

ここに、 L : 軟弱地盤区間長
 Wd : 鉛直土荷重(N/mm)

$$\begin{aligned} Wd &= \gamma t (h + h') D \\ &= 17.00 \times (3.00 + 1.00) \times 2.032 \\ &= 138.18 \text{ kN/m} = 138.18 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{Kg^2}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{26.63 \times 100}{4 \times 21,000,000 \times 5,774,913}}$$

$$= 0.00153$$

$$\begin{aligned}\beta L &= 0.00153 \times 1500 \\ &= 2.295\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M1 &= \frac{138.18}{2 \times 0.00153^2} e^{-2.295} \sin \frac{2.295}{2} \\ &= 8541819 \text{ N/mm} \{0.2079 + e^{-\beta L} (\sin \beta L - \cos \beta L)\}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M2 &= \frac{0.3877 \times 138.18}{0.00153^2} \{0.2079 + e^{-2.295} \sin(2.295) - \cos(2.295)\} \\ &= 8012890 \text{ N/mm}\end{aligned}$$

M1 > M2 なので最大発生ひずみは、下記のように求まる。

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{M1 \times D}{2 \times EI} \\ &= \frac{8,541,819 \times 203.2}{2 \times 2,100,000 \times 5,774,913} \\ &= 0.000072 \text{ (0.007 \%)}\end{aligned}$$

3. 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。

$$V_{DS} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}}} = 77.79 \text{ m/s}$$

ここに、 V_{DS} : 表層地盤の平均剪断弾性波速度
 H_i : i 番目の地層の厚さ(s)
 V_{si} : i 番目の地層の平均剪断弾性波速度 (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		$V_s(\text{m/s})$		
		10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
洪積世	粘性土	$129N_i^{0.183}$	$156N_i^{0.183}$	$172N_i^{0.183}$
	砂質土	$123N_i^{0.125}$	$200N_i^{0.125}$	$205N_i^{0.125}$
沖積世	粘性土	$122N_i^{0.0777}$	$142N_i^{0.0777}$	$143N_i^{0.777}$
	砂質土	$61.8N_i^{0.211}$	$90N_i^{0.211}$	$103N_i^{0.211}$

(2) 表層地盤の特性値

表層地盤の特性値は次式で計算される。

$$T_G = 4 \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{V_{si}} = 4 \times 0.38566 = 1.54 \text{ (s)}$$

T_G : 表層地盤の特性値(s)
 H_i : i 番目の地層の厚さ(s)
 V_{si} : i 番目の地層の平均剪断弾性波速度 (m/s)
 表層地盤ではせん断歪みが 10^{-3} レベルの値を用い、基盤においては 10^{-6} レベルの値を用いる。
 土質に関わらず $N_i=0$ のとき $V_{si}=50(\text{m/s})$
 N_i : 標準貫入試験による i 番目の地層の平均 N 値
 i : 当該地盤が地表面から基盤面まで n 層に区分されときの地表面から i 番目の地層の番号

層 i	深度 (m)	堆積時代	土質名	N値	層厚 H_i	せん断弾性波速度 (m/s)	$\frac{H_i}{V_{si}}$ (s)
1	25.00	沖積世	砂質土	2	25.00	71.53	0.34949
2	30.00	沖積世	粘性土	5	5.00	138.25	0.03617
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
Σ					30.000		0.38566
基盤		洪積世	砂質土	50		334.29	

(3) 地震動の波長

地震動の波長は、次式より求める。

$$\begin{aligned} L &= \frac{2 \times L_1 \times L_2}{L_1 + L_2} \\ &= \frac{2 \times 119.80 \times 514.81}{119.80 + 514.81} \\ &= 194.37 \text{ m} \end{aligned}$$

また、みかけの波長は次式で求まる。

$$L' = \sqrt{2} L = 274.88 \text{ m}$$

ここに、 V_{DS} : 表層地盤の平均せん断弾性波速度

V_{BS} : 基盤のせん断弾性波速度 334.29 m/s

T_G : 表層地盤の特性値 1.54 s

$$L_1 = V_{DS} \cdot T_G = 119.80 \text{ m}$$

$$L_2 = V_{BS} \cdot T_G = 514.81 \text{ m}$$

(4) 地盤の剛性係数

地震動レベル1に対しては、地盤と管路の滑りを考慮しない耐震計算式を適用する。

この場合、埋設管路の管軸方向及び管軸直交方向の単位長さ当たりの地盤の剛性係数が必要となるが、これらは次式によって求める。

$$\begin{aligned} K_{g1} &= C_1 \cdot \frac{\gamma t}{g} V_s^2 \\ &= 1.5 \times \frac{17}{9.8} \times 71.53^2 \\ &= 13314.57 \text{ kN/m}^2 = 13.31 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{g2} &= C_2 \cdot \frac{\gamma t}{g} V_s^2 \\ &= 3 \times \frac{17}{9.8} \times 71.53^2 \\ &= 26629.13 \text{ kN/m}^2 = 26.63 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

γt : 土の単位体積重

g : 重力加速度

V_s : 管路位置での表層地盤1層目の剪断弾性波速度 = 71.533

C_1, C_2 : 埋設管路の管軸および管軸直交方向の単位長さ当たりの地盤の剛性係数に対する定数であり、一般には、おおむね $C_1 = 1.5$

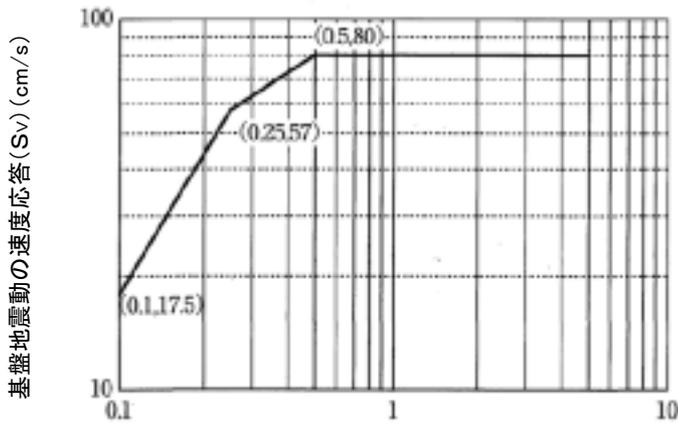
$C_2 = 3$ 前後の値になると想定される。

4. レベル1地震動に対する検討

(1) 速度応答スペクトル

地表層下面から単位震度1.0を与えた場合の地表層上面の応答速度は、表層地盤の固有周期に応じて図3から求める。この図は地震動の速度応答スペクトルと呼ばれるものである。

設計用速度応答スペクトル S_v (地震動レベル1)

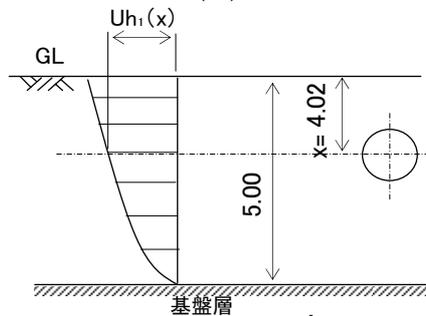


これより、表層地盤の固有周期 T_G が $= 1.54$ s の場合の
 基盤地震動の単位震度当たりの速度応答スペクトル V_s は以下のように求まる。

$$S_v = 80 \text{ cm/s}$$

(2) 管軸位置の地盤の水平変位振幅

地盤の水平変位振幅は、地表面から x (m) の位置において次式で求める。ここに、 x は管中心深さとする。



$$\begin{aligned} U_{h1} &= \frac{2}{\pi^2} S_v \cdot T_G \cdot K_h \times \cos \frac{\pi h'}{2H} \\ &= \frac{2}{\pi^2} 80 \times 1.54 \times 0.15 \times \cos \frac{\pi \times 4.02}{2 \times 30.00} \\ &= 3.66 \text{ cm} \end{aligned}$$

ここに、 U_{h1} : 軸位置の地盤の水平変位振幅 (cm)

S_v : 基盤地震動の単位震度当たりの速度応答スペクトル

T_G : 表層地盤の固有周期

K_h : 基盤面における設計水平震度

h' : 管中心の深さ $h + D/2 = 4.02$ m

h : 管の土被り 3.00 m

D : 管の外径 2.032 m

H : 表層地盤の厚さ 30.00 m

(3) 管軸方向への地盤ひずみ

レベル1地震動における管軸方向の地盤歪みは、次式で求まる。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{G1} &= \frac{\pi \cdot U_{h1}}{L} \\ &= \frac{\pi \times 3.66}{19437} \\ &= 0.00059 \text{ (0.059 \%)}\end{aligned}$$

ここに、 U_{h1} : 管軸上の地盤の水平変位振幅
 L : 波長

(4) 管体ひずみ

①地盤変位の管路に対する伝達係数
地盤変位の伝達係数に係わる係数 λ_1 、 λ_2 は次式で求まる。

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \sqrt{\frac{Kg2}{EA}} = \sqrt{\frac{13.31 \times 100}{21,000,000 \times 1,139}} \\ &= 0.00024 \text{ cm}^{-1} \\ \lambda_2 &= \sqrt[4]{\frac{Kg2}{EI}} = \sqrt[4]{\frac{26.63 \times 100}{21,000,000 \times 5,774,913}} \\ &= 0.00216 \text{ cm}^{-1}\end{aligned}$$

これより、地盤変位の伝達係数は以下のように計算される。

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 \cdot L} \right)^2} \\ &= \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{0.00024 \times 27,488} \right)^2} \\ &= 0.524\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_2 \cdot L} \right)^4} \\ &= \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{0.00216 \times 19,437} \right)^4} \\ &= 0.999\end{aligned}$$

α_1 : 管軸方向の地盤変位の伝達係数
 α_2 : 管軸直交方向の地盤変位の伝達係数
 λ_1 : 地盤変位の伝達係数に係わる係数
 λ_2 : 地盤変位の伝達係数に係わる係数
 L' : みかけの波長
 L : 波長

②埋設管路のひずみ

埋設管路の軸ひずみ、管の曲げひずみ、合成ひずみは、次式のように計算される。

$$\varepsilon_{1L} = \alpha_1 \varepsilon_{G1} = 0.524 \times 0.00059 = 0.000309$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{1B} &= \alpha_2 \frac{2\pi D}{L} \varepsilon_G \\ &= 0.999 \times \frac{2\pi \times 203.2}{19,437} \times 0.00059 \\ &= 0.0000387\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{1x} &= \sqrt{\varepsilon_{1L}^2 + \varepsilon_{1B}^2} \\ &= \sqrt{0.0003092^2 + 0.0000387^2} = 0.0003116 \text{ (0.031 \%)}\end{aligned}$$

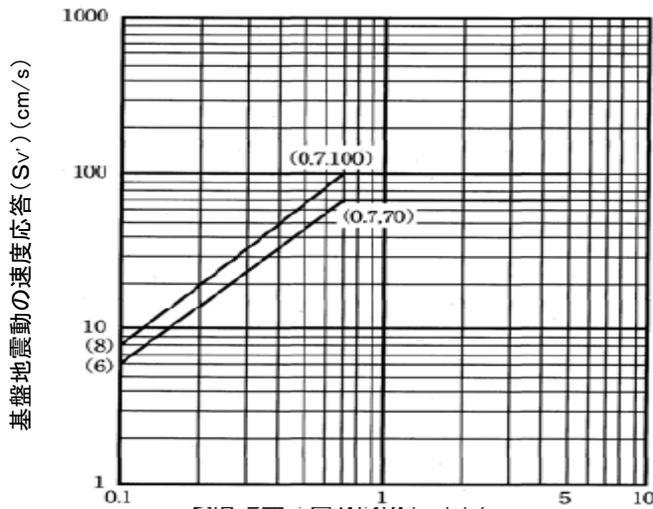
- ε_{1L} : 埋設管路の軸ひずみ
- ε_G : 管軸方向地盤ひずみ
- ε_{1B} : 埋設管路の曲げひずみ
- ε_{1x} : 軸歪みと曲げ歪みの合成ひずみ
- α_1 : 管軸方向の地盤変位の伝達係数
- α_2 : 管軸直交方向の地盤変位の伝達係数
- Uh : 管軸上の地盤の水平変位振幅
- L : 波長
- D : 管の外径
- E : 管の弾性係数

5. レベル2地震動に対する検討

(1) 速度応答スペクトル

レベル2地震動における地表層上面の応答速度は下図より求める。
 ここには、最大値として100cm/s(上限)と70cm/s(下限)の2種類が示されているが、これらは管路の重要度に合わせて使い分ける。従って、本管路の重要度(ランクA)の場合の応答速度は、これらのうち上限側のスペクトル線図を使用する。

設計用速度応答スペクトル Sv' (地震動レベル2)



これより、表層地盤の固有周期 $T_G = 1.54$ s の場合の応答速度は以下のように求まる。

$$Sv' = 100 \text{ cm/s}$$

ここに、 Sv' : 基盤地震動の単位震度当たりの速度応答スペクトル(cm/s)

(2) 地盤の水平変位振幅

地盤の水平変位振幅は、地表面から x (m)の位置において次式で求める。

$$\begin{aligned} U_{hz} &= \frac{2}{\pi^2} Sv' \cdot T_G \times \cos \frac{\pi h'}{2H} \\ &= \frac{2}{\pi^2} 100 \times 1.54 \times \cos \frac{\pi \times 4.02}{2 \times 30.00} \\ &= 30.52 \text{ cm} \end{aligned}$$

ここに、 U_{hz} : 管中心深さ x における地盤の水平変位振幅(cm)

Sv' : 基盤地震動の速度応答速度応答スペクトル

T_G : 表層地盤の固有周期

K'_{h1} : 基盤面における設計水平震度

h' : 管中心の深さ $h + D/2 = 4.02$ m

h : 管の土被り 3.00 m

D : 管の外径 2.032 m

H : 表層地盤の厚さ 30.00 m

(3) 管軸方向の地盤歪み

レベル2地震動における管軸方向の地盤ひずみは次式で求まる。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{G2} &= \frac{\pi U_{hz}}{L} \\ &= \frac{\pi \times 30.52}{19,437} \\ &= 0.00493 \quad (0.493 \%) \end{aligned}$$

U_{hz} : 管軸上の地盤の水平変位振幅
 L : 波長

(4) 管体ひずみ

埋設管の軸ひずみは地震動の波長 L と次式で計算される L_1 、 L_2 との比較によって計算式が選択される。

$$\begin{aligned}(L \geq L_1) \text{の場合} & \quad \varepsilon_{2L} = L / \xi \\ (L_1 < L < L_2) \text{の場合} & \quad \varepsilon_{2L} = L / (\xi + (1 - 1/\kappa) \varepsilon_y) \\ (L_2 \leq L) \text{の場合} & \quad \varepsilon_{2L} = \varepsilon_{Gmax}\end{aligned}$$

$$L_1 = \xi \cdot \varepsilon_y = 106,914,545 \times 0.00114 = 121883 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned}L_2 &= \kappa \cdot \xi \{ \varepsilon_{Gmax} - (1 - 1/\kappa) \varepsilon_y \} \\ &= 0.1 \times 106,914,545 \times \{ 0.00493 - (1 - 1/0.1) \times 0.00114 \} \\ &= 162403 \text{ cm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\xi &= 2\sqrt{2} \cdot E \cdot t / \tau \\ &= 2 \times \sqrt{2} \times 2,100 \times 1,800 / 0.0001 \\ &= 106914545 \text{ cm}\end{aligned}$$

L : 波長
 E : 管の弾性係数
 t : 管厚
 τ : 管と地盤の摩擦力
 κ : 埋設管路のひずみ硬化特性値
 ε_y : 管の降伏歪み
 ε_{Gmax} : $S_{vmax}(=100.0\text{cm/s})$ における地盤歪み
= 0.00493

上記より、 $L \leq L_1$ であるから、埋設管の軸ひずみ ε_{2L} は次式のようになる。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{2L} &= L / \xi \\ &= 0.000182\end{aligned}$$

管の曲げひずみは ε_{2B} は次のように計算される。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{2B} &= \alpha_2 \frac{2\pi D}{L} E_{G2} \\ &= 0.999 \times \frac{2\pi \times 203.2}{19,437} \times 0.00493 \\ &= 0.000324 \quad (0.032\%) \end{aligned}$$

ここに、 ε_{2L} : 埋設管路の軸ひずみ
 ε_{2B} : 埋設管路の曲げひずみ
 α_2 : 管軸直角方向の地盤変位の伝達係数
 U_h : 管軸上の地盤の水平変位振幅
 L : 波長
 D : 管の外径
 E_{G2} : レベル2地震動における管軸方向の地盤ひずみ

軸ひずみと曲げひずみの合成ひずみ ε_{2x} は、次式のように計算される。

$$\begin{aligned}\varepsilon_{2x} &= \sqrt{\varepsilon_{2L}^2 + \varepsilon_{2B}^2} \\ &= \sqrt{0.000182^2 + 0.000324^2} = 0.000372 \quad (0.037\%) \end{aligned}$$

6. 耐震性の照査

地震動レベル1、レベル2について、軸方向ひずみの計算結果を下表に示す。

項目	ひずみ(%)	
	レベル1	レベル2
設計内圧 P= 0.2 Mpa	0.002	0.002
自動車+他荷重 W= 23.6 N/mm	0.002	0.002
温度変化 ΔT = 15 °C	0.018	0.018
不同沈下 L= 15 m	0.007	0.007
地震	0.031	0.037
軸方向ひずみ合計	0.060	0.066
許容ひずみ	0.110	0.407
判定	OK	OK

レベル2 $46 \times t/D(\%)$