

ご参考資料

ダクタイル管路の耐震設計について

(水道施設耐震工法指針・解説(2009年版)にもとづく資料)

日本ダクタイル鉄管協会

1 計算例

呼び径 500NS 形ダクタイル管路の耐震検討例を示す。ダクタイル管路の耐震性は、常時の荷重と地震動レベル1及び地震動レベル2それぞれによる管体応力がダクタイル鋳鉄の耐力以下(弾性域検討)、及び継手部の管軸方向伸び量が設計照査用最大伸び量以下となることで照査する。なお、常時の荷重は、管体発生応力については内圧と自動車荷重を、継手伸縮量については、内圧、自動車荷重、温度変化、不同沈下を考慮する。

1-1 検討条件

(1)管種	:呼び径 500 (S種管)
(2)管の外径	: $D_2=0.528$ m
(3)規格管厚	: $t=0.0085$ m
(4)計算管厚 ¹⁾	: $t_1=0.0075$ m($=t-0.001$)
(5)管長	: $l=6$ m
(6)管の土被り	: $h=1.20$ m
(7)土の単位体積重量	: $\gamma_t=17$ kN/m ³
(8)鉛直方向地盤反力係数	: $K_v=10000$ kN/m ³
(9)設計内圧	: $P_i=1.30$ MPa= 1300 kN/m ²
(10)自動車荷重	: $P_m=100$ kN/輪(T-25)
(11)温度変化	: $\Delta T=20$ °C
(12)地域別補正係数の地域区分	:地域区分 A($C_z=1.0$)
(13)管路の重要度ランク	:ランク A(地震時の計算で、地震動レベル1では軸応力に3.12の重要度係数を乗じる。)
(14)地盤の不均一度係数	: $\eta=2.0$ (極めて不均一)

注1) 鋳造公差を差し引いたもの

1-2 地盤モデル

地盤モデルを図-1.1に示す。

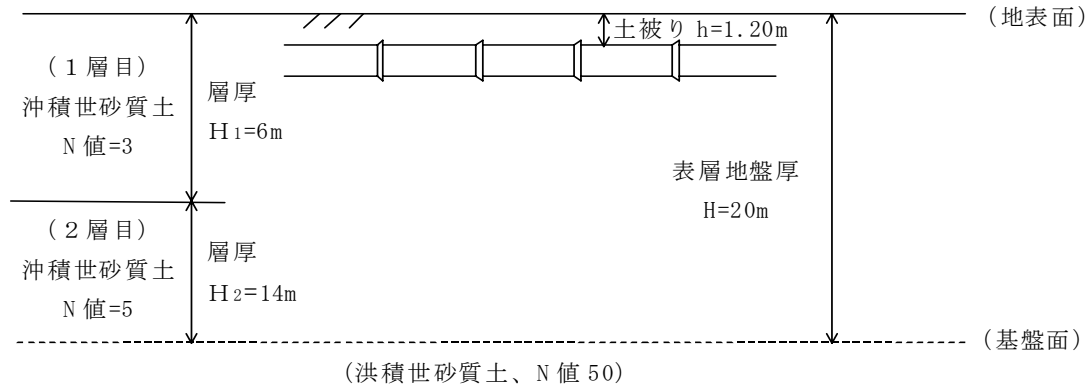


図-1.1 地盤モデル

1-3 管断面の諸数値

① 断面積 A

$$A = \frac{\pi}{4} \{ D_2^2 - (D_2 - 2t_1)^2 \} = 0.01226 \text{ m}^2$$

ここに、A : 管の断面積 (m²)

D₂ : 管の外径 (=0.5280 m)

t₁ : 計算管厚 (=0.0075 m)

② 断面2次モーメント I

$$I = \frac{\pi}{64} \{ D_2^4 - (D_2 - 2t_1)^4 \} = 0.00041541 \text{ m}^4$$

ここに、I : 断面2次モーメント (m⁴)

D₂ : 管の外径 (=0.5280 m)

t₁ : 計算管厚 (=0.0075 m)

③ 断面係数 Z

$$Z = \frac{2 \cdot I}{D_2} = 0.001574 \text{ m}^3$$

ここに、 Z : 断面係数 (m^3)

D_2 : 管の外径 (=0.5280 m)

1-4 常時荷重による管体応力及び継手伸縮量

(1) 管体応力

① 内圧による軸方向応力 σ_{pi}

$$\sigma_{pi} = \nu \cdot \frac{P_i \cdot (D_2 - t_1)}{2 \cdot t_1} = 12631 \text{ kN/m}^2$$

ここに、 σ_{pi} : 内圧による軸方向応力 (kN/m^2)

ν : ダクタイル鉄管のポアソン比 (=0.28)

P_i : 内圧 (=1300 kN/m^2)

D_2 : 管の外径 (=0.5280 m)

t_1 : 計算管厚 (=0.0075 m)

②自動車荷重による軸方向応力 σ_{po}

自動車荷重の分布を図-1.2に示す。これより、自動車荷重 W_m は、

$$W_m = \frac{2 \cdot P_m \cdot D_2}{2.75 \cdot (a + 2 \cdot h \cdot \tan \theta)} \cdot (1 + i) = 22.15 \text{ kN/m}$$

ここに、 W_m :自動車荷重(kN/m)

P_m :自動車1後輪当りの荷重(=100kN/輪)

D_2 :管の外径(=0.5280 m)

a :接地幅(=0.20 m)

h :管の土被り(=1.20 m)

θ :荷重分布角(=45°)

i :衝撃係数(=0.5、表-1.1による)

表-1.1 衝撃係数

h (m)	$h \leq 1.5$	$1.5 < h < 6.5$	$6.5 \leq h$
i	0.5	$0.65 - 0.1h$	0

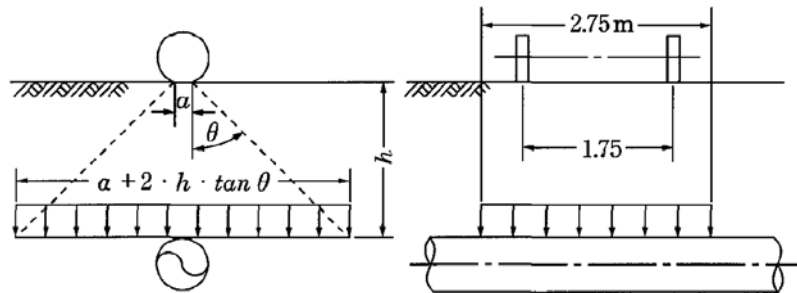


図-1.2 自動車荷重の分布図

$$\sigma_{po} = \frac{0.322 \cdot W_m}{Z} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{K_v \cdot D_2}} = 16077 \text{ kN/m}^2$$

ここに、 σ_{po} : 自動車荷重による軸方向応力 (kN/m²)

W_m : 自動車荷重 (=22.15 kN/m)

Z : 管の断面係数 (=0.001574 m³)

E : ダクタイル鋳鉄の弾性係数
(=160000000 kN/m²)

I : 管の断面2次モーメント (=0.00041541 m⁴)

K_v : 鉛直方向地盤反力係数 (=10000kN/m³)

D_2 : 管の外径 (=0.5280 m)

(2) 継手部の管軸方向伸縮量

① 内圧による継手伸縮量 e_i

$$e_i = \frac{l \cdot \sigma_{pi}}{E} = 0.00047 \text{ m} = 0.47 \text{ mm}$$

ここに、 e_j : 内圧による継手伸縮量 (mm)

l : 管長 (=6.0 m)

σ_{pi} : 内圧による軸方向応力 (=12631 kN/m²)

E : ダクタイル鋳鉄の弾性係数 (=160000000 kN/m²)

② 自動車荷重による継手伸縮量 e_o

$$e_o = \frac{l \cdot \sigma_{po}}{E} = 0.00060 \text{ m} = 0.60 \text{ mm}$$

ここに、 e_o : 自動車荷重による継手伸縮量 (mm)

l : 管長 (=6.0 m)

σ_{po} : 自動車荷重による軸方向応力 (=16077 kN/m²)

E : ダクタイル鋳鉄の弾性係数 (=160000000 kN/m²)

③ 温度変化による継手伸縮量 e_t

$$e_t = \alpha \cdot \Delta T \cdot l = 0.00120 \text{ m} = 1.20 \text{ mm}$$

ここに、 e_t : 温度変化による継手伸縮量 (mm)

α : ダクタイル鋳鉄の線膨張係数 (=0.00001/°C)

ΔT : 温度変化 (=20 °C)

l : 管長 (=6.0 m)

④ 不同沈下による継手伸縮量 e_d

不同沈下による継手伸縮量は、図-1.3のような状態を想定して算出する。軟弱地盤区間 60m において、その中央部が 20cm の不同沈下を生じたと想定すると、 $l=30\text{m}$ の区間における軸心の伸び Δl は、

$$\Delta l = \sqrt{(30.0 \times 10^2)^2 + 20^2} - 30.0 \times 10^2 = 0.00067 \text{ m}$$

この伸び Δl は、30m 区間の6カ所の継手に分散吸収されるが、ここでは1カ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は以下のように求まる。

$$e_d = \Delta l = 0.00067 \text{ m} = 0.67 \text{ mm}$$

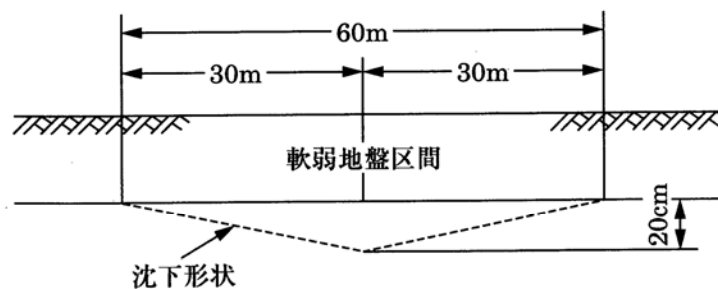


図-1.3 不同沈下想定図

1-5 地震動による管体応力、継手伸縮量及び継手屈曲角度

(1) 諸元の計算

①地層毎のせん断弾性波速度

表-1.2 せん断弾性波速度

地層	層厚 H_i (m)	地質	N値	平均せん断弾性波速度 V_{si} (m/s)	H_i/V_{si}
1層目	6	沖積世砂質土	3	$61.8 \cdot N^{0.211} = 61.8 \times 3^{0.211} = 77.92$	0.07700
2層目	14	沖積世砂質土	5	$61.8 \cdot N^{0.211} = 61.8 \times 5^{0.211} = 86.79$	0.16131
基盤	—	(洪積世砂質土)	50	$205 \cdot N^{0.125} = 205 \times 50^{0.125} = 334$	—

② 表層地盤の平均せん断弾性波速度 V_{DS}

$$V_{DS} = \frac{\sum H_i}{\sum (H_i/V_{si})} = 83.92 \text{ m/s}$$

ここに、 V_{DS} : 表層地盤の平均せん断弾性波速度 (m/s)

H : 表層地盤の厚さ (= $\sum H_j = 20.0$ m)

H_1 : 1 番目の地層の厚さ (= 6.0 m)

H_2 : 2 番目の地層の厚さ (= 14.0 m)

V_{S1} : 1 番目の地層の平均せん断弾性波速度
(= 77.92 m/s)

V_{S2} : 2 番目の表層の平均せん断弾性波速度
(= 86.79 m/s)

③ 表層地盤の固有周期 T_G

$$T_G = 4 \cdot \sum (H_i / V_{si}) = 0.95s$$

ここに、 T_G : 表層地盤の固有周期 (s)

H_1 : 1 番目の地層の厚さ (=6.0 m)

H_2 : 2 番目の地層の厚さ (=14.0 m)

V_{s1} : 1 番目の地層の平均せん断弾性波速度
(=77.92 m/s)

V_{s2} : 2 番目の表層の平均せん断弾性波速度
(=86.79 m/s)

④ 波長 L

$$L_1 = V_{DS} \cdot T_G = 79.7 \text{ m}$$

$$L_2 = V_{BS} \cdot T_G = 317.3 \text{ m}$$

$$L = \frac{2L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} = 127.4 \text{ m}$$

ここに、 V_{DS} : 表層地盤の平均せん断弾性波速度
(=83.92m/s)

V_{BS} : 基盤のせん断弾性波速度 (=334 m/s)

T_G : 表層地盤の固有周期 (=0.95 s)

⑤ みかけの波長 L'

$$L' = \sqrt{2} \cdot L = 180.2 \text{ m}$$

ここに、 L' : みかけの波長 (m)

L : 波長 (=127.4 m)

(2) 地震動レベル1に対する検討

①基盤面における設計水平震度 K'_{h1}

$$K'_{h1} = C_z \cdot K'_{h01} = 0.15$$

ここに、 C_z : 地域別補正係数 (=1.0)

K'_{h01} : 基盤面における基準水平震度 (=0.15)

②速度応答スペクトル S_v

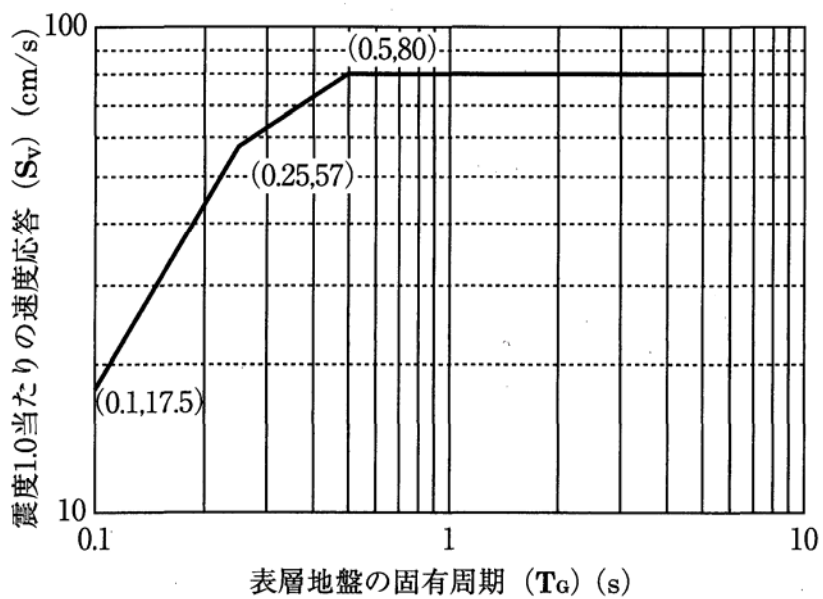


図-1.4 設計用速度応答スペクトル S_v (地震動レベル1)

図-1.4から、表層地盤の固有周期 T_G が 0.95s の場合の応答速度は、

$$S_v = 0.8 \text{ m/s}$$

ここに、 S_v : 基盤地震動の単位震度当りの速度応答スペクトル (m/s)

③地盤の水平変位振幅 U_{h1}

$$U_{h1}(x) = \frac{2}{\pi^2} \cdot S_V \cdot T_G \cdot K'_{h1} \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{2 \cdot H} = 0.0229 \text{ m}$$

ここに、 $U_{h1}(x)$: 管中心深さ x における地盤の水平変位振幅 (m)

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 (=0.8 m/s)

T_G : 表層地盤の固有周期 (=0.95 s)

K'_{h1} : 基盤面における設計水平震度 (=0.15)

x : 管中心深さ {= $h + D_2/2 = 1.46$ m}

h : 管の土被り (=1.2 m)

D_2 : 管の外径 (=0.5280 m)

H : 表層地盤の厚さ (=20 m)

④管軸方向の地盤歪み ε_{G1}

$$\begin{aligned} \varepsilon_{G1} &= \eta \cdot \varepsilon_G \\ &= \eta \cdot \frac{\pi \cdot U_{h1}}{L} = 0.00113 = 0.113 \% \end{aligned}$$

ここに、 ε_{G1} : 管軸方向の地盤歪み¹⁾

η : 地盤の不均一度係数 (=2.0 極めて不均一)

ε_G : 基準地盤歪み

U_{h1} : 地盤の水平変位振幅 (=0.0229 m)

L : 波長 (=127.4 m)

注1) 地盤の条件に応じて、地盤の不均一度係数(η)を基準地盤歪み(ε_G)に乗じるこ
とで、地盤歪みの増幅を考慮する。

地盤の剛性係数 K_{g1} 、 K_{g2}

$$K_{g1} = C_1 \cdot \frac{\gamma_t}{g} \cdot V_s^2 = 15798 \text{ kN/m}^2$$

$$K_{g2} = C_2 \cdot \frac{\gamma_t}{g} \cdot V_s^2 = 31597 \text{ kN/m}^2$$

ここに、 K_{g1} : 管軸方向の地盤の剛性係数 (kN/m^2)

K_{g2} : 管軸直角方向の地盤の剛性係数 (kN/m^2)

γ_t : 土の単位体積重量 ($=17 \text{ kN/m}^3$)

g : 重力加速度 ($=9.8 \text{ m/s}^2$)

V_s : 管路位置での表層地盤 (1層目) のせん断弾性波速度 ($=77.92 \text{ m/s}$)

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、

$$C_1=1.5, C_2=3$$

⑤地盤変位の管路に対する伝達係数 λ_1 、 λ_2

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{K_{g1}}{E \cdot A}} = 0.0897 / \text{m}$$

$$\lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{K_{g2}}{E \cdot I}} = 0.8304 / \text{m}$$

ここに、 K_{g1} : 管軸方向の地盤の剛性係数 ($=15798 \text{ kN/m}^2$)

K_{g2} : 管軸直交方向の地盤の剛性係数
($=31597 \text{ kN/m}^2$)

E : ダクタイル鋳鉄の弾性係数 ($=160000000 \text{ kN/m}^2$)

A : 管の断面積 ($=0.01226 \text{ m}^2$)

I : 管の断面2次モーメント ($=0.00041541 \text{ m}^4$)

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda_1 \cdot L'}\right)^2} = 0.869$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda_2 \cdot L}\right)^4} = 1.000$$

ここに、 L' : みかけの波長 (=180.2 m)
 L : 波長 (=127.4 m)

⑥埋設管路を連続(一体構造管路)とした場合の管体応力 σ_{1L} 、 σ_{1B}

・軸応力

$$\sigma_{1L} = \alpha_1 \cdot \frac{\pi \cdot U'_{h1}}{L} \cdot E = 157031 \text{ kN/m}^2$$

・曲げ応力

$$\sigma_{1B} = \alpha_2 \cdot \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot D_2 \cdot U'_{h1}}{L^2} \cdot E = 4706 \text{ kN/m}^2$$

ここに、 α_1 : 管軸方向の地盤変位の伝達係数 (=0.869)
 α_2 : 管軸直交方向の地盤変位の伝達係数 (=1.000)
 D_2 : 管の外径 (=0.528 m)
 E : ダクタイル鋳鉄の弾性係数 (=160000000 kN/m²)
 L : 波長 (=127.4 m)
 U'_{h1} : 地盤の増幅を考慮した地盤の水平変位振幅
(=0.0458 m)²⁾

$$U'_{h1} = \eta \cdot U_{h1}$$

η : 地盤の不均一度係数 (=2.0 極めて不均一)
 U_{h1} : 地盤の水平変位振幅 (=0.0229 m)

注 2) 地盤の条件に応じて、地盤の不均一度係数(η)を U_h に乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。

⑦ 伸縮可とう継手がある場合の応力の補正係数 ξ_1 、 ξ_2

$$\xi_1 = \sqrt{\phi_1(x)^2 + \phi_2(x)^2} / [\exp(\nu' \cdot \lambda_1 \cdot L') - \exp(-\nu' \cdot \lambda_1 \cdot L')]$$

$$\xi_2 = \sqrt{\phi_3(x)^2 + \phi_4(x)^2}$$

ここに、

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_g^2}{4 \cdot E \cdot I}} = 0.5871$$

$$\nu = l / L = 6 / 127.4 = 0.047$$

$$\nu' = l / L' = 6 / 180.2 = 0.033$$

$$\mu = x / L = 3 / 127.4 = 0.024$$

$$\mu' = x / L' = 3 / 180.2 = 0.017$$

$$\nu \cdot \beta \cdot L = 3.515$$

$$\mu \cdot \beta \cdot L = 1.795$$

$$C_1 = \sin(\nu \cdot \beta \cdot L) \sinh(\nu \cdot \beta \cdot L) = -6.126$$

$$C_2 = \sin(\nu \cdot \beta \cdot L) \cosh(\nu \cdot \beta \cdot L) = -6.137$$

$$C_3 = \cos(\nu \cdot \beta \cdot L) \sinh(\nu \cdot \beta \cdot L) = -15.636$$

$$C_4 = \cos(\nu \cdot \beta \cdot L) \cosh(\nu \cdot \beta \cdot L) = -15.664$$

$$e_1 = \sin(\mu \cdot \beta \cdot L) \sinh(\mu \cdot \beta \cdot L) = 2.853$$

$$e_2 = \sin(\mu \cdot \beta \cdot L) \cosh(\mu \cdot \beta \cdot L) = 3.015$$

$$e_3 = \cos(\mu \cdot \beta \cdot L) \sinh(\mu \cdot \beta \cdot L) = -0.651$$

$$e_4 = \cos(\mu \cdot \beta \cdot L) \cosh(\mu \cdot \beta \cdot L) = -0.688$$

$$\Delta = (C_3 + C_2) \cdot (C_3 - C_2) + 2 \cdot C_1^2 = 281.88$$

$$f_1 = \frac{1}{\Delta} \left[\{C_1 \cdot (C_4 - C_1) - C_3 \cdot (C_3 + C_2) - C_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu)\} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\beta \cdot L} + (C_3 + C_2) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu) \right] = -0.10478$$

$$f_2 = \frac{1}{\Delta} \left[C_1 \cdot (C_3 - C_2) - C_4 \cdot (C_3 + C_2) + (C_3 + C_2) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu) + C_1 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\beta \cdot L} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu) \right] = -1.07791$$

$$f_3 = \frac{1}{\Delta} \left[\{C_1 \cdot (C_4 + C_1) - C_2 \cdot (C_3 + C_2) - C_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu)\} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\beta \cdot L} + (C_3 + C_2) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu) \right] = -0.02077$$

$$f_4 = \frac{1}{\Delta} \left[\{C_3 \cdot (C_4 + C_1) - C_2 \cdot (C_4 - C_1) + (C_2 - C_3) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu)\} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\beta \cdot L} - 2 \cdot C_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu) \right] = 0.09945$$

$$f_5 = \frac{1}{\Delta} \left[(C_3 - C_2)^2 + 2 \cdot C_1 \cdot C_4 - 2 \cdot C_1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu) - (C_2 - C_3) \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\beta \cdot L} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu) \right] = 1.04170$$

$$\nu' \cdot \lambda_1 \cdot L' = 0.533$$

$$2 \cdot \pi \cdot \nu' = 0.207$$

$$\mu' \cdot \lambda_1 \cdot L' = 0.275$$

$$2 \cdot \pi \cdot \mu' = 0.151$$

$$2 \cdot \pi \cdot \mu' = 0.107$$

$$\phi_1(x) = [\exp(-\nu' \cdot \lambda_1 \cdot L') - \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu')] \cdot \exp(\mu' \cdot \lambda_1 \cdot L') - [\exp(\nu' \cdot \lambda_1 \cdot L') - \cos(2 \cdot \pi \cdot \nu')] \cdot \exp(-\mu' \cdot \lambda_1 \cdot L') + 2 \cdot \sinh(\nu' \cdot \lambda_1 \cdot L') \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot \mu') = 0.04399$$

$$\phi_2(x) = 2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \nu') \cdot \sinh(\mu' \cdot \lambda_1 \cdot L') - 2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \mu') \cdot \sinh(\nu' \cdot \lambda_1 \cdot L') = -0.00484$$

$$\phi_3(x) = f_3 \cdot e_3 - f_1 \cdot e_2 - f_4 \cdot e_1 - \sin(2 \cdot \pi \cdot \mu) = -0.10472$$

$$\phi_4(x) = e_4 + f_2 \cdot e_3 - f_2 \cdot e_2 - f_5 \cdot e_1 - \cos(2 \cdot \pi \cdot \mu) = -0.69697$$

l : 伸縮可とう継手間の長さ (=6.0 m、管長相当)

K_{g2} : 管軸直交方向の地盤の剛性係数 (=31597 kN/m²)

E : ダクタイル鋳鉄の弾性係数 (=160000000 kN/m²)

I : 管の断面2次モーメント (=0.00041541 m⁴)

L : 波長 (=127.4 m)

L' : みかけの波長 (=180.2 m)

$x = l / 2 = 3\text{m}$ (伸縮可とう継手間の中央で応力が最大となるため)

これより、 $\xi_1(x) = 0.03961$ 、 $\xi_2(x) = 0.70479$

⑧継手構造管路の管体応力 $\sigma'_{1L}, \sigma'_{1B}, \sigma'_{1x}$

- ・ 軸応力 $\sigma'_{1L} = \xi_1 \cdot \sigma_{1L} = 6220 \text{ kN/m}^2$
- ・ 曲げ応力 $\sigma'_{1B} = \xi_2 \cdot \sigma_{1B} = 3317 \text{ kN/m}^2$
- ・ 合成応力 $\sigma'_{1x} = \sqrt{3.12 \cdot (\sigma'_{1L})^2 + (\sigma'_{1B})^2}$
 $= 11477 \text{ kN/m}^2$

ここに、 ξ_1 : 伸縮可とう継手がある場合の軸応力の補正係数
(=0.03961)

ξ_2 : 伸縮可とう継手がある場合の曲げ応力の補正係数
(=0.70479)

σ_{1L} : 埋設管路を連続とした場合の軸応力
(=157031 kN/m²)

σ_{1B} : 埋設管路を連続とした場合の曲げ応力
(=4706 kN/m²)

⑨継手の管軸方向伸縮量 e_1 (ダクタイル鉄管継手部の軸方向の伸縮量
計算のための簡便計算法による場合)

ダクタイル管路の継手の管軸方向伸縮量は、震度IV程度以上の地震時の観測
結果から得られた次式により計算する。

$$e_1 = \varepsilon_{G1} \cdot l = 0.00113 \times 6.0 = 0.00678 \text{ m} = 6.78 \text{ mm}$$

ここに、 ε_{G1} : 管軸方向の地盤歪み (=0.00113)

l : 伸縮可とう継手間の長さ (=6.0 m、管長相当)

(参考)継手の管軸方向伸縮量(応答変位法による耐震計算法の場合)

$$|u_J| = u_{01} \cdot \bar{u}_J = 0.00655 \text{ m} = 6.55 \text{ mm}$$

ここに、 u_{J1} : 管軸方向継手伸縮量(m)

u_{01} : 無限連続梁とした場合の梁の管軸方向相対変位量(m)

$$u_{01} = \alpha_1 \cdot U_{a1} = 0.028 \text{ m}$$

$$\bar{u}_J = \frac{2 \cdot \gamma_1 \cdot |\cosh \beta_1 - \cos \gamma_1|}{\beta_1 \cdot \sinh \beta_1} = 0.234$$

$$\gamma_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot l}{L'} = 0.209$$

$$\beta_1 (= \lambda_1 \cdot l) = \sqrt{\frac{K_{g1}}{E \cdot A}} \cdot l = 0.538$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + (\gamma_1 / \beta_1)^2} = 0.869$$

E : ダクタイル鋳鉄の弾性係数 (=160000000 kN/m²)

A : 管の断面積 (=0.01226 m²)

l : 伸縮可とう継手間の長さ (=6.0 m、管長相当)

K_{g1} : 管軸方向の地盤の剛性係数 (=15798 kN/m²)

L' : みかけの波長 (=180.2 m)

U_{a1} : 地盤の管軸方向の水平変位振幅(m)

$$U_{a1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U'_{h1} = 0.0324 \text{ m}$$

U'_{h1} : 地盤の増幅を考慮した地盤の水平変位振幅
(=0.0458 m)³⁾

$$U'_{h1} = \eta \cdot U_{h1}$$

η : 地盤の不均一度係数 (=2.0 極めて不均一)

U_{h1} : 地盤の水平変位振幅 (=0.0229 m)

注3) 地盤の条件に応じて、地盤の不均一度係数(η)を U_h に乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。

⑩ 継手の屈曲角度 θ_1

$$\theta_1 = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot l \cdot U'_{h1}}{L^2} = 0.0006684 \text{ rad} = 0^\circ 2' 18''$$

ここに、 l : 伸縮可とう継手間の長さ (=6.0 m、管長相当)

U'_{h1} : 地盤の増幅を考慮した地盤の水平変位振幅
(=0.0458 m)⁴⁾

$$U'_{h1} = \eta \cdot U_{h1}$$

η : 地盤の不均一度係数 (=2.0 極めて不均一)

U_{h1} : 管軸上の地盤の水平変位振幅 (=0.0229 m)

L : 波長 (=127.4 m)

注4) 地盤の条件に応じて、地盤の不均一度係数(η)を U_h に乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。

(3) 地震動レベル2に対する検討

①速度応答スペクトル S'_v

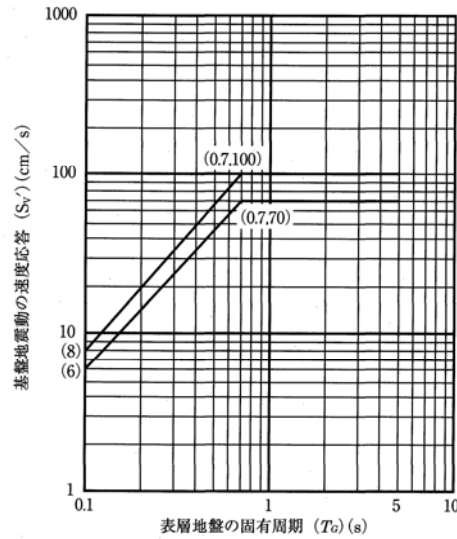


図-1.5 設計用速度応答スペクトル S'_v (地震動レベル2)

図-1.5の上限值から、表層地盤の固有周期 T_G が 0.95s の場合の
 応答速度は、

$$S'_v = 1.0 \text{ m/s}$$

②地盤の水平変位振幅 U_{h2}

$$U_{h2(x)} = \frac{2}{\pi^2} \cdot S'_v \cdot T_G \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{2 \cdot H} = 0.1912 \text{ m}$$

ここに、 $U_{h2(x)}$: 管中心深さ x における地盤の水平変位振幅 (m)

S'_v : 基盤地震動の速度応答スペクトル (=1.000 m/s)

T_G : 表層地盤の固有周期 (=0.95 s)

x : 管中心深さ (=1.46 m)

H : 表層地盤の厚さ (=20.0 m)

③ 管軸方向の地盤歪み ε_{G2}

$$\begin{aligned}\varepsilon_{G2} &= \eta \cdot \varepsilon_G \\ &= \eta \cdot \frac{\pi \cdot U_{h2}}{L} = 0.00943 = 0.943 \%\end{aligned}$$

ここに、 ε_{G2} :管軸方向の地盤歪み⁵⁾

η :地盤の不均一度係数(=2.0 極めて不均一)

ε_G :基準地盤歪み

U_{h2} :地盤の水平変位振幅(=0.1912 m)

L :波長(=127.4 m)

注 5)地盤の条件に応じて、地盤の不均一度係数(η)を基準地盤歪み(ε_G)に乗じること、地盤歪みの増幅を考慮する。

④ 継手構造管路の管体応力 σ'_{2x} (軸応力を簡便な軸方向応力の計算法による場合)

ダクタイル管路の管体の軸応力は、震度IV程度以上の地震時の観測結果から得られた次式により計算する。

・ 軸応力

$$\sigma'_{2L} = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot \tau \cdot l}{2 \cdot A} = 4059 \text{ kN/m}^2$$

ここに、 D_2 :管の外径(=0.5280 m)

τ :管と地盤との摩擦力(=10 kN/m²)

l :伸縮可とう継手間の長さ(=6.0 m、管長相当)

A :管の断面積(=0.01226 m²)

・ 曲げ応力

$$\sigma_{2B} = \alpha_2 \cdot \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot D_2 \cdot U'_{h2}}{L^2} \cdot E = 39288 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_{2B} = \xi_2 \cdot \sigma_{2B} = 27690 \text{ kN/m}^2$$

ここに、 α_2 : 管軸直角方向の地盤変位の伝達係数 (=1.000)

D_2 : 管の外径 (=0.5280 m)

L : 波長 (=127.4 m)

U'_{h2} : 地盤の増幅を考慮した地盤の水平変位振幅 (=0.3824 m)⁶⁾

$$U'_{h2} = \eta \cdot U_{h2}$$

η : 地盤の不均一度係数 (=2.0 極めて不均一)

U_{h2} : 地盤の水平変位振幅 (=0.1912 m)

E : ダクタイル鋳鉄の弾性係数 (=160000000 kN/m²)

ξ_2 : 伸縮可とう継手がある場合の曲げ応力の補正係数
(=0.70479)

注6) 地盤の条件に応じて、地盤の不均一度係数(η)を U_h に乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。

これより、管体の合成応力は、

$$\sigma'_{2x} = \sqrt{(\sigma'_{2L})^2 + (\sigma'_{2B})^2} = 27986 \text{ kN/m}^2$$

(参考)

管体応力(軸応力を地盤と管の滑りを考慮した簡便計算法による場合)
 レベル2地震動に対する継手構造管路の軸応力を簡便計算法で計算する
 場合の応答速度は図-1.6より求める。

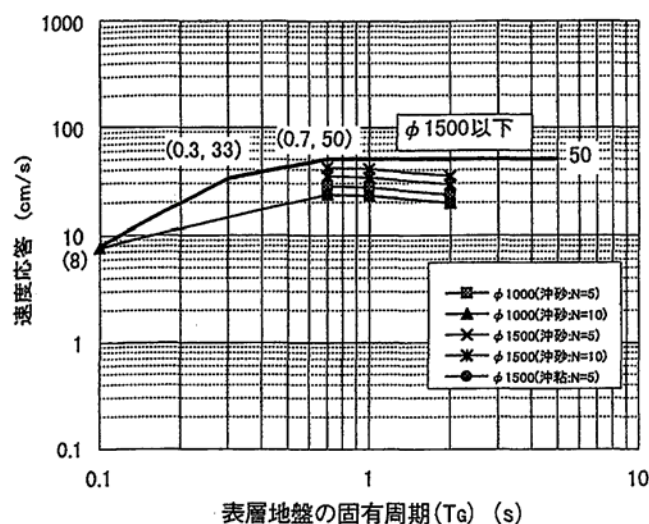


図-1.6 設計用速度応答スペクトル S'_v
 (地震動レベル2、軸応力検討用)

図-1.6より、表層地盤の固有周期 T_G が 0.95s の場合の応答速度
 は、

$$S'_v = 0.5 \text{ m/s}$$

地盤の水平変位振幅は、

$$U_{h2(x)} = \frac{2}{\pi^2} \cdot S'_v \cdot T_G \cdot \cos \frac{\pi \cdot x}{2 \cdot H} = 0.0956 \text{ m}$$

ここに、 $U_{h2(x)}$: 管中心深さ x における地盤の水平変位振幅 (m)

S'_v : 設計用速度応答スペクトル

(=0.5 m/s、地震レベル2、軸応力検討用)

T_G : 表層地盤の固有周期 (=0.95 s)

x : 管中心深さ (=1.46 m)

H : 表層地盤の厚さ (=20 m)

従って、

・ 軸応力

$$\sigma_{2L} = \alpha_1 \cdot \frac{\pi \cdot U'_{h2}}{L} \cdot E = 655553 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_{2L} = \xi_1 \cdot \sigma_{2L} = 25966 \text{ kN/m}^2$$

・ 合成応力

$$\sigma'_{2x} = \sqrt{(\sigma'_{2L})^2 + (\sigma'_{2B})^2} = 37960 \text{ kN/m}^2$$

ここに、 α_1 : 管軸方向の地盤変位の伝達係数 (=0.869)

U'_{h2} : 地盤の増幅を考慮した地盤の水平変位振幅⁷⁾

(=0.1912 m、軸応力検討用)

$$U'_{h2} = \eta \cdot U_{h2}$$

η : 地盤の不均一度係数 (=2.0 極めて不均一)

U_{h2} : 地盤の水平変位振幅 (=0.0956 m)

L : 波長 (=127.4 m)

E : ダクタイル鋳鉄の弾性係数 (=160000000 kN/m²)

ξ_1 : 伸縮可とう継手がある場合の軸応力の補正係数

(=0.03961)

σ'_{2B} : 伸縮可とう継手間の中央部における曲げ応力

(=27690 kN/m²)

注 7) 地盤の条件に応じて、地盤の不均一度係数(η)を U_h に乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。

⑤ 継手の管軸方向伸縮量 e_2 (ダクタイル鉄管継手部の軸方向の伸縮量計算のための簡便計算法による場合)

$$e_2 = \varepsilon_{G2} \cdot l = 0.00943 \times 6.0 = 0.05658 \text{ m} = 56.58 \text{ mm}$$

ここに、 ε_{G2} : 管軸方向の地盤歪み (=0.00943)

l : 伸縮可とう継手間の長さ (=6.0 m、管長相当)

(参考) 継手の管軸方向伸縮量(応答変位法による耐震計算法の場合)

$$|u_{J2}| = u_{02} \cdot \bar{u}_J = 0.05499 \text{ m} = 54.99 \text{ mm}$$

ここに、 u_{J2} : 管軸方向継手伸縮量(m)

$$\bar{u}_J = 0.234 \text{ (レベル1の検討時に求めた値)}$$

u_{02} : 無限連続梁とした場合の梁の管軸方向相対変位量(m)

$$u_{02} = \alpha_1 \cdot U_{a2} = 0.235 \text{ m}$$

U_{a2} : 地盤の管軸方向の水平変位振幅(m)

$$U_{a2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U'_{h2} = 0.2704 \text{ m}$$

U'_{h2} : 地盤の増幅を考慮した地盤の水平変位振幅⁸⁾

$$(=0.3824 \text{ m})$$

$$U'_{h2} = \eta \cdot U_{h2}$$

η : 地盤の不均一度係数(=2.0 極めて不均一)

U_{h2} : 地盤の水平変位振幅(=0.1912 m)

注8) 地盤の条件に応じて、地盤の不均一度係数(η)を U_h に乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。

⑥ 継手の屈曲角度 θ

$$\theta = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot l \cdot U'_{h2}}{L^2} = 0.0055807 \text{ rad} = 0^\circ 19' 11''$$

ここに、 l : 伸縮可とう継手間の長さ(=6.0 m、管長相当)

U'_{h2} : 地盤の増幅を考慮した地盤の水平変位振幅⁹⁾

$$(=0.3824 \text{ m})$$

$$U'_{h2} = \eta \cdot U_{h2}$$

η : 地盤の不均一度係数(=2.0 極めて不均一)

U_{h2} : 地盤の水平変位振幅(=0.1912 m)

L : 波長(=127.4 m)

注9) 地盤の条件に応じて、地盤の不均一度係数(η)を U_h に乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。

1-6 安全性の照査

地震動レベル1、地震動レベル2の各々について、常時と地震時の管体応力、継手部の伸縮量及び屈曲角度をまとめた結果を表-1.3に示す。

表-1.3 計算結果まとめ

項目		レベル1	レベル2	
管体 応力 (kN/m ²)	常時	設計内圧 (Pi=1.30 MPa)	12631	
	時	自動車荷重 (T-25)	16077	
	地震時		11477	27986 (37960) ²⁾
	軸方向応力合計		40185	56694 (66668) ²⁾
	評価		○	○ (○) ²⁾
	(参考)許容応力		270000	270000
継手 伸縮 量 (mm)	常時	設計内圧 (Pi=13.0 kgf/cm ²)	0.47	
		自動車荷重 (T-25)	0.6	
	時	温度変化 (Δt=20℃)	1.20	
		不同沈下 (20cm)	0.67	
	地震時		6.55 (6.78) ³⁾	54.99 (56.58) ³⁾
	伸縮量合計		9.49 (9.72) ³⁾	57.93 (59.52) ³⁾
	評価		○ (○) ³⁾	○ (○) ³⁾
	(参考)設計照査用最大伸び量 ¹⁾⁴⁾		60	60
継手 屈曲 角度	地震時		0° 2' 18	
	評価		○	
	(参考)地震時の最大屈曲角度		7° 0'	

注1) 継手を許容屈曲角度まで曲げて配管した場合の継手の伸び出し量を示す。

注2) 本文中の参考に示したように、地震動レベル2の軸応力を簡便計算式で求めた場合を示す。

注3) 本文中の参考に示したように、継手伸縮量を簡便計算法で求めた場合を示す。

注4) 離脱防止機能を有する鎖構造管路は、一つの継手の継手部伸縮量が設計照査用伸び量を超えた場合でも、隣接する管を引張ることで管路全体として地盤変位を吸収できるため、これを照査するものとする。

これより、次のことが言える。

- (1) 管体応力は常時の荷重と地震動レベル1 および地震動レベル2 のいずれに対しても、ダクタイル鋳鉄の耐力以下となり安全である。また、継手屈曲角度は接合時の許容屈曲角度に比べて十分小さいことがわかる。
- (2) 継手伸縮量についても、地震動レベル1、地震動レベル2とも設計照査用最大伸び量以下となった。
- (3) NS形継手は、(財)国土開発技術研究センターの「地下埋設管路耐震継手の技術基準(案)」に規定されるA級 { $=0.3D_{tf} D_2$:呼び径} の離脱防止性能を有しており、管と地盤の摩擦係数 τ を0.01Mpaとすると、一つの継手で管路100m分の管と地盤の摩擦係数に等しい引張力に耐えることになる。
このため、継手が自由に伸縮、屈曲して地盤変状に順応し、最終的には伸び出したあと引掛かって、土との縁(摩擦係数)を切りながら隣接する管を次々と引き込み、いわば地中に埋められた鎖のように管路のつながりを保持できる。
- (4) 離脱防止機能を有する鎖構造管路は、一つの継手の継手部伸縮量が設計照査用最大伸び量を超えた場合でも、隣接する管を引張ることで管路全体として地盤変位を吸収できる。

(備考)

- ① 管体応力については、上記の結果からわかるように、レベル1、レベル2ともに十分な安全率を有している。このため、本指針の総論頁259にも示されているように、ダクタイル管路の場合は、通常、管体応力の検討を割愛してよいと考える。
- ② 継手伸縮量については表-1.3の括弧内に示したように、ダクタイル鉄管継手部の軸方向の伸縮量算出のための簡便計算法による結果と応答変位法による耐震計算法による結果はほぼ等しく、簡便計算法で安全性を照査すれば十分と言える。

以上