

耐震性について

○ 日本水道協会「水道施設耐震工法指針・解説2009年版」に、水道配水用ポリエチレン管の耐震計算法が掲載されました。

出典：日本水道協会「水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版 I 総論」（平成 21 年 7 月 1 日発行）
総論解説編 VII埋設管路の耐震計算法より抜粋

参考：水道配水用ポリエチレン管の場合

・地震動レベル1、地震動レベル2のいずれの場合も、地震動による管体歪みは、次式によって計算する。

$$\varepsilon_{1L} = \alpha_1 \cdot \varepsilon_G \quad \dots\dots\dots (3.2.21)$$

$$\varepsilon_{1B} = \alpha_2 \cdot \frac{2\pi D}{L} \cdot \varepsilon_G \quad \dots\dots\dots (3.2.22)$$

$$\varepsilon_{1x} = \sqrt{\varepsilon_{1L}^2 + \varepsilon_{1B}^2} \quad \dots\dots\dots (3.2.23)$$

ここに、

ε_{1L} ：埋設管路の軸歪み

ε_{1B} ：埋設管路の曲げ歪み

ε_{1x} ：軸歪みと曲げ歪みの合成歪み

ε_G ：地盤の軸歪み（式（3.1.*）を適用）

α_1 ：管軸方向の地盤変位の伝達係数（管と地盤のすべりを考慮しないので 1.0 とする）

α_2 ：管軸直交方向の地盤変位の伝達係数（管の可とう性により地盤と同じ挙動としてよく、1.0 とする）

地震動レベル1の場合、式（3.2.23）の ε_{1L}^2 には、従来の耐震計算式と同様、重要度に応じて 1.00～3.12 を乗じるのが望ましい。また、式（3.2.21）、式（3.2.22）の ε_G には、地震動レベル1、地震動レベル2のいずれの場合にも、地盤の条件に応じて地盤不均一度係数： η を乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。また、水道配水用ポリエチレン管にあつては、地震動レベル1及びレベル2に対する安全性の照査を行う場合は、常時荷重も考慮した埋設管路の歪みが許容値（3%）以下であることを原則とする。

備考：一体構造管路で、管に柔軟性があるため、地震動での地盤歪みに追従するとして計算します。従って、管に発生する歪みの計算式は、地盤歪みを求める式と同じです。

○ 水道配水用ポリエチレン管についての耐震計算結果の例

下表に呼び径 150 についての計算結果の例を示します。詳細は以降を参照ください。

表 地震動レベル2(土被り 0.6m) 単位：%

名 称	$\eta=1.0$	$\eta=2.0$
自動車荷重(T-25)による軸方向歪み	0.18	0.18
不同沈下(L=15m)による軸方向歪み	0.01	0.01
温度変化による軸方向歪み	0.20	0.20
内圧による軸方向歪み	0.23	0.23
地震による軸方向歪み	0.50	1.00
管体歪み（軸方向歪みの合計）	1.12	1.62
許容歪み	3.0	3.0

【耐震計算の詳細】

3.5.1 許容歪み

水道配水用ポリエチレン管は一体構造管路の一種であり、耐震性能の照査基準には許容歪みを用います。「日本水道協会：水道配水用ポリエチレン管・継手に関する調査報告書，平成 10 年 9 月」の「2.4 ポリエチレン管の耐震性について」に掲載されている実験（表 2 参照）より、水道配水用ポリエチレン管の耐震計算で用いる許容歪みを、表 1 に示すとおり設定しています。

表 1 許容歪み

耐震計算の方法	許容歪み
応答変位法による耐震計算	3%
地盤変状に対する耐震計算	6%

表 2 耐震性能評価に関する実験（抜粋）

実験名	実験内容	実験結果
引張実験	呼び径 75×1.5m の実管を用いた引張実験を行い、引張速度別の降伏点歪みなどを求めた。（引張速度：2.5cm/s～100cm/s）	降伏点歪みは、7.8%（100cm/s）～11%（2.5cm/s）の範囲にあった。また、ネッキング現象の開始点歪みは、15%程度であった。
	呼び径 75×5m の定尺管を用いた引張実験を行い、管体歪みの分布状況などを求めた。	降伏点歪みに近い 8%まで、管体歪みは一部に集中せず、管はほぼ一様に伸びた。
圧縮試験	呼び径 75，150×0.5m の実管を用いた圧縮試験を行い、圧縮降伏点歪みなどを求めた。	圧縮降伏点歪みは、呼び径 75 で 7%～9%の範囲にあり、呼び径 150 で 10%程度であった。
繰り返し伸縮実験	呼び径 75×1.5m の実管を用いた繰り返し伸縮実験を行い、許容歪みなどを検討した。	管軸方向歪み±3%、周波数 1Hz×50 回の繰り返し伸縮後の管体に、ネッキングや破断などの異常は認められなかった。
初期変形品の内圧クリープ試験	呼び径 75×0.7m の実管を用い、予め引張歪みを与えた状態で内圧クリープ試験を実施し、長期性能などを検討した。（引張歪み：2.5%～10%）	内圧クリープ試験の結果は、すべてマスターカーブを上回っており、2.5%～10%程度の引張歪みが生じた管でも長期性能に問題がないことが確認できた。

2 応答変位法による耐震計算

「日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，2009 年版」に掲載されている水道配水用ポリエチレン管の耐震計算法（応答変位法による耐震計算）による計算例を示します。

(1) 計算条件

- ・管体仕様 呼び径 : 150
 外径 : $D=0.18\text{m}$
 管厚 : $t=0.0164\text{m}$
 管材質 : 水道配水用ポリエチレン管 (PE100)
- ・埋設条件 土被り : 1.2m および 0.6m
 (数値計算例は、土被り 1.2m のものを示します)
- ・設計内圧 : 1.0MPa
- ・自動車荷重 : 100kN/輪 (T-25)
- ・温度変化 : 15°C
- ・地盤モデル : 図 1 に示します。

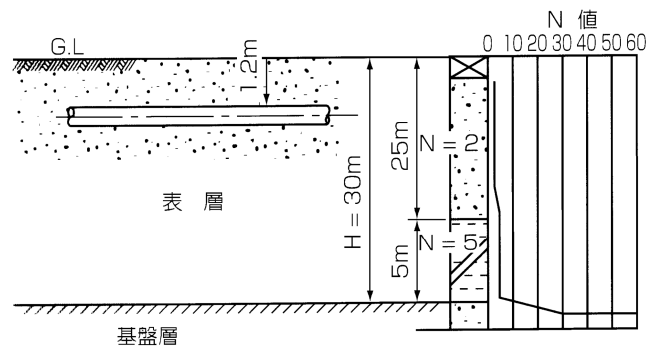


図 1 地盤モデル

(2) レベル 1 地震動に対する検討

(a) 表層地盤の固有周期

$$T_G = 4 \sum \frac{H_i}{V_{s i}}$$

ここに、

- T_G : 表層地盤の固有周期 (s)
- H_i : 第 i 層の厚さ (m)
- $V_{s i}$: 第 i 層のせん断弾性波速度 (m/s) (表 3)

表 3 地盤のせん断弾性波速度

i	層厚 (m)	N 値	せん断弾性波速度の算出	$H_i / V_{s i}$
①	25	2	$61.8 N^{0.211} = 71.5\text{m/s}$	0.350
②	5	5	$122.0 N^{0.0777} = 138.3\text{m/s}$	0.036
③	—	50	$205.0 N^{0.125} = 334.3\text{m/s}$	—

$$T_G = 4 \sum \frac{H_i}{V_{s i}} = 4 \times 0.386 = 1.54\text{(s)}$$

(b) 管軸位置の地盤の水平変位振幅

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

ここに、

- U_h : 管軸位置の地盤の水平変位振幅(m)
 S_v : 基盤地震動の単位震度当りの速度応答スペクトル($T_G \geq 0.5s$, $=0.80m/s$)
 K'_{h1} : 基盤面における設計水平震度($=0.15$)
 h' : 地表面から管中心までの深さ ($=1.29m$)
 H : 表層地盤の厚さ($=30m$)

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} \times 0.80 \times 1.54 \times 0.15 \times \cos \frac{\pi \times 1.29}{2 \times 30} = 0.0374(m)$$

(c) 地震波動の波長

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

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

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

ここに,

L : 45度斜め入射せん断波の波長(m)

V_{DS} : 表層地盤のせん断弾性波速度(m/s)

V_{BS} : 基盤面のせん断弾性波速度($=334.3m/s$)

$$V_{DS} = \frac{30}{0.386} = 77.7(m/s)$$

$$L_1 = 1.54 \times 77.7 = 119.7(m)$$

$$L_2 = 1.54 \times 334.3 = 514.8(m)$$

$$L = \frac{2 \times 119.7 \times 514.8}{119.7 + 514.8} = 194.2(m)$$

(d) 地盤の歪み, 管路の歪み

$$\varepsilon_G = \eta \cdot \frac{\pi \cdot U_h}{L}$$

$$\varepsilon_{1L} = \alpha_1 \cdot \varepsilon_G$$

$$\varepsilon_{1B} = \alpha_2 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot D}{L} \cdot \varepsilon_G$$

$$\varepsilon_{1X} = \sqrt{\varepsilon_{1L}^2 + \varepsilon_{1B}^2}$$

ここに,

ε_G : 地盤の軸歪み

ε_{1L} : 埋設管路の軸歪み

ε_{1B} : 埋設管路の曲げ歪み

ε_{1X} : 軸歪みと曲げ歪みの合成歪み

- α_1 : 管軸方向の地盤変位の伝達係数(管と地盤の滑りを考慮しないので1.0とする)
 α_2 : 管軸直交方向の地盤変位の伝達係数(管の可撓性により地盤と同じ挙動としてよく、1.0とする)
 η : 地盤の不均一度係数(均一 : 1.0, 不均一 : 1.4, 極めて不均一 : 2.0)
 (数値計算例は、 η が 1.0 のものを示します)

$$\varepsilon_G = 1.0 \times \frac{\pi \times 0.0374}{194.2} = 0.000605 (=0.061\%)$$

$$\varepsilon_{1L} = 1.0 \times 0.000605 = 0.000605$$

$$\varepsilon_{1B} = 1.0 \times \frac{2 \times \pi \times 0.18}{194.2} \times 0.000605 = 0.00000352$$

$$\varepsilon_{1X} = \sqrt{0.000605^2 + 0.00000352^2} = 0.000605 (=0.061\%)$$

(3) レベル2地震動に対する検討

(a) 表層地盤の固有周期

レベル1地震動の計算と同じ。 $T_G = 1.54$ (s)

(b) 管軸位置の地盤水平変位振幅

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} \cdot S'_v \cdot T_G \cdot \cos \frac{\pi \cdot h'}{2 \cdot H}$$

ここに、

S'_v : 基盤地震動の速度応答スペクトル ($T_G \geq 0.7s$, $=1.0m/s$)

$$U_h = \frac{2}{\pi^2} \times 1.0 \times 1.54 \times \cos \frac{\pi \times 1.29}{2 \times 30} = 0.3114 (m)$$

(c) 地震波動の波長

レベル1地震動の計算と同じ。 $L = 194.2$ (m)

(d) 地盤の歪み、管路の歪み

計算式はレベル1地震動と同じ。

$$\varepsilon_G = 1.0 \times \frac{\pi \times 0.3114}{194.2} = 0.00504 (=0.504\%)$$

$$\varepsilon_{1L} = 1.0 \times 0.00504 = 0.00504$$

$$\varepsilon_{1B} = 1.0 \times \frac{2 \times \pi \times 0.18}{194.2} \times 0.00504 = 0.0000294$$

$$\varepsilon_{1X} = \sqrt{0.00504^2 + 0.0000294^2} = 0.00504 (=0.504\%)$$

(4) 常時荷重に対する検討

(a) 自動車荷重による軸方向歪み

$$\varepsilon_{10} = \frac{0.322 \cdot W_m}{Z \cdot E} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot I}{K_v \cdot D}}$$

ここに,

- ε_{10} : 自動車荷重による管軸方向歪み
- W_m : 自動車荷重 ($h=1.2\text{m}$, $=7.552\text{kN/m}$)
- D : 管の外径 ($=0.18\text{m}$)
- K_v : 鉛直方向地盤反力係数 ($=10000\text{kN/m}^3$)
- E : 管の弾性係数 ($=1.0 \times 10^6\text{kN/m}^2$)
- Z : 管の断面係数 ($=3.165 \times 10^{-4}\text{m}^3$)
- I : 管の断面 2 次モーメント ($=2.84837 \times 10^{-5}\text{m}^4$)

$$\varepsilon_{10} = \frac{0.322 \times 7.552}{3.165 \times 10^{-4} \times 1.0 \times 10^6} \sqrt{\frac{1.0 \times 10^6 \times 2.84837 \times 10^{-5}}{10000 \times 0.18}} = 0.000966 (=0.097\%)$$

(b) 不同沈下による軸方向歪み

$$\varepsilon = \frac{M_2 \cdot D}{E \cdot I \cdot 2}$$

ここに,

- ε : 不同沈下による管軸方向歪み
- M_2 : 不同沈下による最大曲げモーメント ($=0.041\text{kN}\cdot\text{m}$)
- E, I, D : 前記のとおり

$$\varepsilon = \frac{0.041}{1.0 \times 10^6 \times 2.84837 \times 10^{-5}} \times \frac{0.18}{2} = 0.000130 (=0.013\%)$$

(c) 内圧による軸方向歪み

$$\varepsilon_{1i} = \frac{P_i \cdot (D - t)}{2 \cdot t \cdot E} \cdot \nu$$

ここに,

- ε_{1i} : 内圧による管軸方向歪み
- P_i : 内圧 ($=1.0\text{MPa}$)
- ν : ポアソン比 ($=0.47$)
- t : 管厚 ($=0.0164\text{m}$)
- E, D : 前記のとおり

$$\varepsilon_{1i} = \frac{1.0 \times (0.18 - 0.0164)}{2 \times 0.0164 \times 1000} \times 0.47 = 0.00234 (=0.234\%)$$

(d) 温度変化による軸方向歪み

$$\varepsilon_{1t} = \alpha \cdot \Delta t$$

ここに,

ε_{1t} : 温度変化による管軸方向歪み
 α : ポリエチレンの線膨張係数($=1.3 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$)
 Δt : 温度変化($=15^{\circ}\text{C}$)
 $\varepsilon_{1t} = 1.3 \times 10^{-4} \times 15 = 0.00195 (=0.195\%)$

(5) 耐震性能の照査

(a) レベル 1 地震動に対する耐震性能の照査

表 4 および表 5 に示す通り、この計算例では、地盤が極めて不均一な場合でも、管体歪みが許容歪み以下となります。これは、指針の「3.2.2 埋設管路の耐震性能の照査」によれば、レベル 1 地震動に対して耐震性能 1 を満足することになります。

表 3.5.4 地震動レベル 1 (土被り 1.2m) 単位：%

名 称	$\eta=1.0$	$\eta=2.0$
自動車荷重(T-25)による軸方向歪み	0.10	0.10
不同沈下(L=15m)による軸方向歪み	0.01	0.01
温度変化による軸方向歪み	0.20	0.20
内圧による軸方向歪み	0.23	0.23
地震($K'_{h1}=0.15$)による軸方向歪み	0.06	0.12
管体歪み (軸方向歪みの合計)	0.60	0.66
許容歪み	3.0	3.0

η : 地盤の不均一度係数(均一 : 1.0, 不均一 : 1.4, 極めて不均一 : 2.0)

表 5 地震動レベル 1 (土被り 0.6m) 単位：%

名 称	$\eta=1.0$	$\eta=2.0$
自動車荷重(T-25)による軸方向歪み	0.18	0.18
不同沈下(L=15m)による軸方向歪み	0.01	0.01
温度変化による軸方向歪み	0.20	0.20
内圧による軸方向歪み	0.23	0.23
地震($K'_{h1}=0.15$)による軸方向歪み	0.06	0.12
管体歪み (軸方向歪みの合計)	0.68	0.74
許容歪み	3.0	3.0

η : 地盤の不均一度係数(均一 : 1.0, 不均一 : 1.4, 極めて不均一 : 2.0)

(b) レベル2地震動に対する耐震性能の照査

表6および表7に示す通り、この計算例では、地盤が極めて不均一な場合でも、管体歪みが許容歪み以下となります。これは、指針の「3.2.2 埋設管路の耐震性能の照査」によれば、レベル2地震動に対して耐震性能2を満足することになります。

表6 地震動レベル2(土被り1.2m) 単位：%

名 称	$\eta=1.0$	$\eta=2.0$
自動車荷重(T-25)による軸方向歪み	0.10	0.10
不同沈下(L=15m)による軸方向歪み	0.01	0.01
温度変化による軸方向歪み	0.20	0.20
内圧による軸方向歪み	0.23	0.23
地震による軸方向歪み	0.50	1.00
管体歪み(軸方向歪みの合計)	1.04	1.54
許容歪み	3.0	3.0

η ：地盤の不均一度係数(均一：1.0, 不均一：1.4, 極めて不均一：2.0)

表7 地震動レベル2(土被り0.6m) 単位：%

名 称	$\eta=1.0$	$\eta=2.0$
自動車荷重(T-25)による軸方向歪み	0.18	0.18
不同沈下(L=15m)による軸方向歪み	0.01	0.01
温度変化による軸方向歪み	0.20	0.20
内圧による軸方向歪み	0.23	0.23
地震による軸方向歪み	0.50	1.00
管体歪み(軸方向歪みの合計)	1.12	1.62
許容歪み	3.0	3.0

η ：地盤の不均一度係数(均一：1.0, 不均一：1.4, 極めて不均一：2.0)

3 地盤変状に対する耐震計算

「日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，2009年版」に掲載されている水道配水用ポリエチレン管の耐震計算法（地盤変状に対する耐震計算）を示します。

$$\varepsilon_p = \alpha \cdot \varepsilon_g$$

ここに、

ε_p : 埋設管路の歪み

ε_g : 側方流動等による地盤の歪み

α : 地盤変位の伝達係数(管が地盤の歪みに追従するとして，1.0とする)

水道配水用ポリエチレン管の地盤変状に対する耐震計算における許容歪みは6%です。これは、指針・解説の「3.1.9 地盤の液状化と側方流動」で定められている「①護岸近傍域，②埋立地および河川流域の内陸部，③埋立地や河川流域，④傾斜した液状化地盤，⑤傾斜した人工改変地盤」における設計用地盤歪み（表8参照）に対して十分大きな値であるため，水道配水用ポリエチレン管は，側方流動を受けた場合でも耐震性を有すると判断されます。

表8 側方流動による設計用地盤歪み

①護岸近傍域における地盤の引張歪み	1.2～2.0%
②埋立地および河川流域の内陸部における地盤の引張歪み	1.0～1.5%
③埋立地や河川流域における地盤の圧縮歪み	1.0～1.5%
④傾斜した液状化地盤の歪み	計算による（概ね2%以下）
⑤傾斜した人工改変地盤における地盤歪み	1.0～1.7%