

水道施設の設計指針等

1. 水道施設設計指針（抜粋）
2. 水道施設耐震工法指針・概説（抜粋）

水道施設設計指針

2 0 1 2

社団法人 日本水道協会

域を想定する。

(3) 各管路の分担すべき計画時間最大配水量を定める。

なお、この配水量が各管路の両端より1/2量ずつ集中して流出するものと仮定して計算の簡素化を図る。

(4) 多量の水を使用する施設が予想されるときは、その給水量を考慮に入れておくことはもとより、別に流出点を定める方が合理的である。

(5) 管網の流量計算によって、各管路の流量及び損失水頭を求め、これから各地点の有効動水圧を算出する。

(6) 管網の網目の数は、少ないほど計算が簡単である。網目の数が大きくなるときは、細管を大管径に合成するか、若しくは省略して、骨格となる管網について計算を行うのが便利である。

配水管の損失水頭の計算には、摩擦損失水頭のみを考えればよい。

2) 火災時における流量計算

(1) 計画給水人口100,000人を超える場合は、計画時間最大配水量に十分余裕があり、平常時の場合と同様に計算する。

(2) 計画給水人口100,000人以下の場合は、各管路の分担する流量は、計画一日最大給水量と消火用水量との合計とするのが望ましい。

なお、ブロック化区域の場合も同様の扱いとする。消火用の放水地点は配水区域のうち最も条件の悪い地域を選定し、1地域で不十分と思われるときは、それ以外の地域にも火災発生を考慮して水理計算を行う。条件の悪い地域とは、一般に配水池あるいは配水ポンプ場より遠い所又は高所で、かつ、平常時の計算でも水圧が低い市街地又は密集地が対象となる。消火用水量は、7.1.5 消火用水量の2. 及び3. による計画同時開放消火栓数だけの消火栓から放水するものとして計算する。

平常時及び火災時ともに管網計算の際注意することは、管網を形成していないもの、すなわち管網より分岐している配水管（分岐管）の流量及び水圧を常に考慮することである。

7.5.6 埋設位置及び深さ

配水管の埋設位置及び深さは、次の各項による。

1. 公道に管を布設する場合は、道路法及び関係法令によるとともに、道路管理者との協議による。公道以外に管を布設する場合でも、当該管理者からの使用承認を得る。
2. 配水管を他の地下埋設物と交差又は近接して布設するときは、少なくとも0.3m以上の間隔を保つ。
3. 地下水位が高いまたは高くなることが予想

される場合には、管の浮上防止を考慮する。

4. 寒冷地における管の埋設深さは、凍結深度よりも深くする。

〔解説〕

1. について；

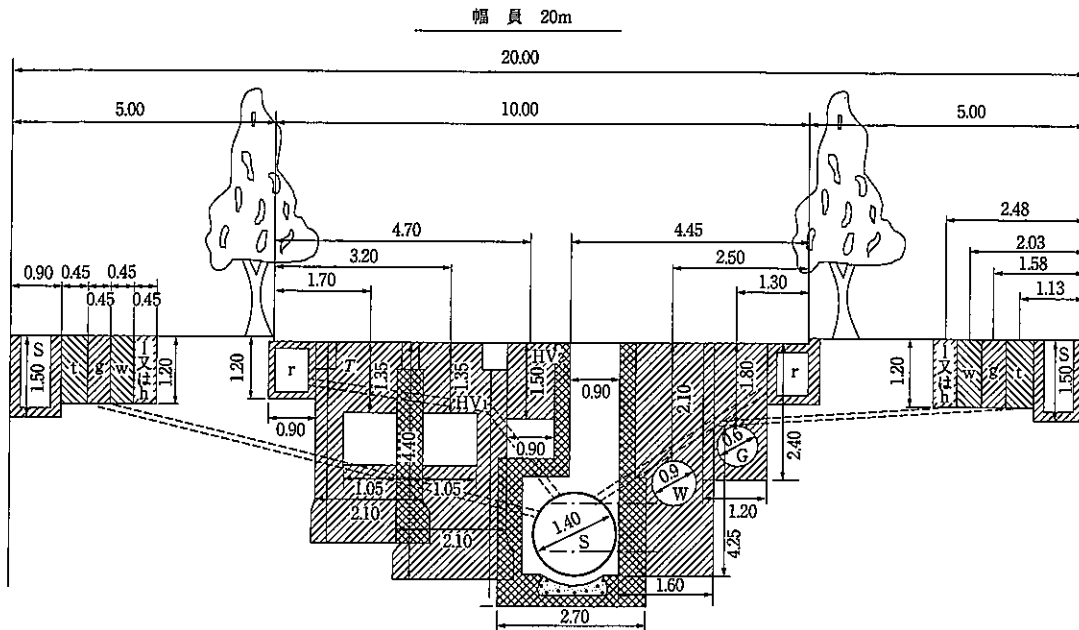
配水管は、維持管理の容易性に配慮し、原則として道路（公道）に布設する。この場合、配水本管は、道路の中央寄りに布設し、配水支管は給水管分岐の都合上、なるべく道路の片側寄りに布設するのがよい。道路幅員が余り広くない場合は、配水支管はいずれかの決められた片側に布設すればよいが、道路幅員がかなり広い場合には、需要者への給水の利便を図るとともに、給水管の漏水防止の上から広い道路を横断して引込むことのないように両側の歩道又は車道の両側に布設する。

埋設物の位置と深さについては、道路管理者と水道、工業用水道、下水道、ガス、電信、電力、電話等の地下埋設物占有者との間で、道路種別ごとの配置を定めていることが多い。道路占用地下埋設物の配置標準の一例を図-7.5.3に示す。

河川敷、軌道敷あるいは私有地に管を布設する場合は、当該敷地管理者あるいは土地所有者と協議の上、使用承認を得る。

「道路法施行令」（昭和27年政令第479号）では、土被りの標準は1.2mと規定されているが、水管橋取付部の堤防横断箇所や他の埋設物と交差の関係等で、土被りを標準又は規定値までとれない場合は、道路管理者又は河川管理者と協議の上、土被りを0.6mまで減少することができる。

水道管の浅層埋設については、「電線、水管、ガス管又は下水道管を道路の地下に設ける場合における埋設の深さ等について」（平成11年3月31日建設省道政発第32号・建設省道国発第5号。以下、「浅層化通達」という。）により、管径300mm以下の鋼管（JIS G 3443）、ダクタイル鋳鉄管（JIS G 5526）、及び水道用硬質ポリ塩化ビニル管（JIS K 6742）並びに管径200mm以下で外径／厚さ＝11の水道配水用ポリエチレン管（引張降伏強度204kgf/cm²以上）について、「水管の頂部と路面との距離は、当該水管を設ける道路の舗装の厚さに0.3mを加えた値（当該値が0.6mに満たない場合には、0.6m）以下としないこと」の運用規定が出されているのでこれによることができる。なお、平成12年3月24日に「浅層化通達」の一部改正があり、歩道に布設する場合の防護措置について、改正前の「所要の防護措置」は、「あらかじめ十分な強度を有する管路等を使用する場合を除き、所要の防護措置」に改められたことに留意する。



- 1 本図例の縮尺は百分の一とする。
- 2 本図例は通常北西又は西面として実地に適用するものとする。
- 3 本図例に於ける路下管線路の標示は下表に依る。

路下管線路種別	凡 例			摘 要
	本 線	支線		
電 信 電 話 線	T	t		
高 圧 電 線	HV ₁	HV ₂	h	HV ₁ はダクト式 HV ₂ はトラフ式
電 燈 低 圧 線			l	
水 道 管	W		w	
下 水 管	S		s	sは汚水樹、rは 雨水樹
瓦 斯 管	G		g	

図-7.5.3 道路占用地下埋設物の配置標準図例（福山市）（単位：m）

また、都道府県市町村道において、各道路管理者が浅層埋設について別途規定している場合は、これによる。

2. について；

配水管と他の地下埋設物との間に離隔がないと、維持補修が困難である。また、漏水による加害事故発生のおそれもある。こうした状況を考慮して、布設する際の最小離隔を0.3m以上とした。なお、0.3m以上離せばサンドエロージョン（サンドブラスト）が発生しにくいことが報告されている。サンドエロージョン（サンドブラスト）とは、水道管の漏水により発生した水流が周辺の土砂を巻き込み、水と土砂が混合された状態でガス管等の埋設管に継続的に衝突して管体を減耗させ、孔を開ける現象をいう。

3. について；

地下水位が高いまたは高くなることが予想される場合には、管内空虚時に管が浮上しないよう注意する必要がある。管の浮上防止のための最小土被りの例を表-7.5.5、また、管が浮上する危険水位を表-7.5.6に示す。

4. について；

寒冷地で土地の凍結深度が標準埋設深さよりも深い

ときは、それ以下に埋設するが、やむを得ず埋設深度が確保できない場合は、断熱マットなどの適当な措置を講じる（1.4.3 地盤及び基礎 図-7.5.4参照）。

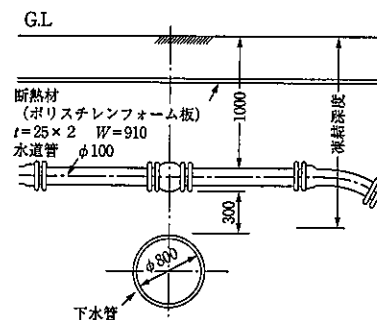


図-7.5.4 断熱マットの施工例（釧路市）
（単位：mm）

表-7.5.5 浮上防止のための最小土被り

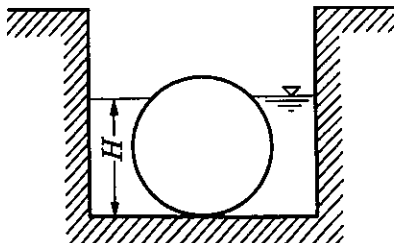
呼び径 (mm)	鋼管		ダクタイル鋳鉄管 (3種管)		硬質塩化ビニル管		水道配水用ポリエチレン管	
	管厚 (mm)	最小土被り (m)	管厚 (mm)	最小土被り (m)	管厚 (mm)	最小土被り (m)	管厚 (mm)	最小土被り (m)
50	—	—	—	—	4.5	0.05	5.8	0.05
75	—	—	6.0	—	5.9	0.08	8.2	0.08
100	4.5	—	6.0	—	7.1	0.10	11.4	0.11
150	5.0	0.02	6.0	0.01	9.6	0.15	16.4	0.16
200	5.8	0.04	6.0	0.07	11.5	0.20	22.7	0.22
500	6.0	0.32	8.0	0.36	—	—	—	—
1000	9.0	0.72	13.0	0.80	—	—	—	—
1500	14.0	1.07	18.0	1.25	—	—	—	—
2000	18.0	1.45	23.5	1.68	—	—	—	—
2400	22.0	1.73	27.5	2.03	—	—	—	—
2600	24.0	1.86	29.5	2.05	—	—	—	—

注) 1. 管上の土も水中に没するものと考え、埋め戻し土の重量を $(18 \cdot 10 = 8 \text{KN/m}^3)$ として算出した。
 2. ダクタイル鋳鉄管については、モルタルライニングの重量を考慮している。

表-7.5.6 管が浮上する危険水位

呼び径 (mm)	鋼 管		ダクタイル鋳鉄管 () 内は 1種管、その他は3種管	
	管厚 (mm)	水位 H (m)	管厚 (mm)	水位 H (m)
100	4.5	—	(7.5) 6.0	(—) —
150	5.0	0.14	(7.5) 6.0	(—) —
200	5.8	0.17	(7.5) 6.0	(—) 0.19
500	6.0	0.20	(9.5) 8.0	(0.31) 0.27
1000	9.0	0.33	(16.5) 13.0	(0.54) 0.47
1500	14.0	0.50	(23.5) 18.0	(0.76) 0.64
2000	18.0	0.65	(30.5) 23.5	(0.99) 0.84
2400	22.0	0.79	(36.5) 27.5	(1.17) 0.97
2600	24.0	0.86	(39.5) 29.5	(1.26) 1.04

注) ダクタイル鋳鉄管については、モルタルライニングの重量を考慮している。



7.5.7 伸縮継手

伸縮継手は、次の各項による。

1. 軟弱地盤や構造物との取り付け部など不同沈下のおそれのある箇所には、可撓性のある伸縮継手を設ける。

2. 伸縮自在でない継手を用いた管路の露出配管部には、20～30mの間隔に伸縮継手を設ける。
3. 溶接継手鋼管を布設する場合には、必要に応じ伸縮継手を設ける。
4. 基幹管路に設ける伸縮継手は、離脱防止機能をもつものが望ましい。

〔解説〕

伸縮継手は、温度変化による伸縮、地盤の不同沈下、地震による地盤変位等を吸収し、管路に無理な力が作用するのを避ける目的で使用する。

伸縮継手は、伸縮可撓管と伸縮可撓継手に分類される。伸縮可撓管は角度変位と伸縮、場合によっては同時にひねりを受けることから、設置位置の環境と要求される機能を満足する構造のものを選択する。伸縮可撓管の例を図-7.5.6、硬質ポリ塩化ビニル管の伸縮継手の例を図-7.5.7に示す。

なお、経年劣化や想定を超える不同沈下による伸縮可撓管の漏水事故が発生しているので、採用に当たっては材料の耐久性や想定される地盤変位量を慎重に検討する必要がある (図-7.5.5参照)。

伸縮可撓継手とは、地盤沈下、地震による地盤変動などに伴う管路の変位応力を軽減し、管路の安全性を高めるために用いられる継手をいう。近年、伸縮性、可撓性を有し、さらに離脱防止性を併せもつS形、NS形等の耐震性を有する継手が普及している。図-7.5.8にダクタイル鋳鉄管耐震継手の例を示す。

1. について；

軟弱地盤など不同沈下が広範囲に生じると予測される場所については、管路全体に伸縮可撓性の大きな耐震性を有する継手を用いる。水管橋、伏越し部等構造物との取り付け部に可撓性のある伸縮継手を用いる場合は、推定沈下量を吸収できる可撓性だけで選定するのではなく、内外圧、耐久性及び水密性に対する安全性を検討の上、最適なものを選定する。

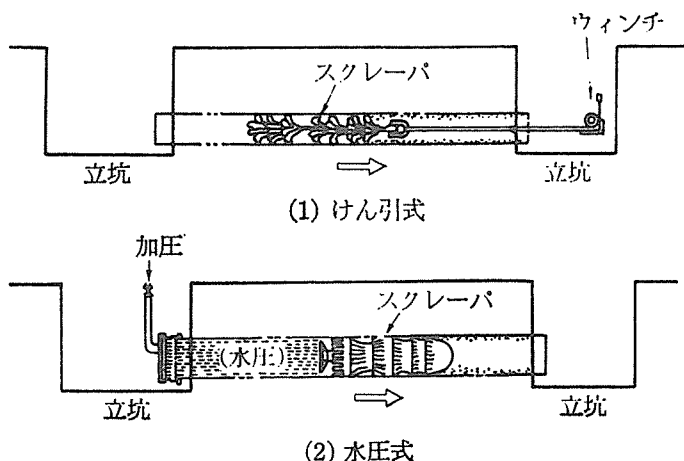


図-7.5.57 スクレーパー工法の例



図-7.5.58 ジェット工法の例

要時間を含めた検討を行い、管路条件に適合した工法を選択する。

一般に用いられる工法としては、スクレーパ工法、ジェット工法及びポリピッグ工法等がある。

スクレーパ工法は、フレキシブルな軸の周りに弾力に富んだスクレーパを、放射状に数段取付けた構造の機材を用いて行う方法であり、ピアノ線などを用いたけん引式と水圧を利用して推進させる水圧式とがある。

けん引式は、管径300mm以上の管に適しており、水圧式は、管径250mm以下で水圧が0.20MPa以上確保できる場合に有利である（図-7.5.57参照）。

なお、一回の施工延長は管路の状態によって左右されるが、けん引式の作業区間は100m前後が一般的であり、水圧式はそれ以上の場合でも可能である。

ジェット工法は、特殊高压ポンプにより、水を9.8～14.7MPa程度に加圧して、特殊ノズルにより、管内面の斜め後方に噴射されるジェット流の反動を利用して前進させ錆こぶを除去する工法である（図-7.5.58参照）。

〔参考7.5〕 管厚計算式

1. ダクタイル鋳鉄管管厚計算式

(JWWA G 113: 2010、JWWA G 114: 2010)

静水圧、水撃圧、土被りによる土圧、路面荷重による土圧を全部同時に考慮して誘導している。

いま、静水圧を P_s で、水撃圧を P_d で表わすと、内圧によって発生する引張応力 σ_t は

$$\sigma_t = \frac{(P_s + P_d)d}{2t} \text{ である。}$$

ここに、

d : 管内径 (mm)

t : 管厚 (mm)

また、土被りにより発生する曲げモーメントを M_f 、路面荷重により発生する曲げモーメントを M_t とすると、外圧によって発生する曲げ応力 σ_b は

$$\sigma_b = \frac{(M_f + M_t)}{Z}$$

$$Z = \frac{b \cdot t^2}{6}$$

$$\therefore \sigma_b = \frac{6(M_f + M_t)}{t^2}$$

ここに、

Z : 断面係数

b : 単位長さ (mm)

土被りによる土圧を W_f 、路面荷重による土圧を W_t で表わすと

$$M_f = K_f \cdot W_f \cdot R^2$$

$$M_t = K_t \cdot W_t \cdot R^2$$

であるからこれを上式に代入すると

$$\sigma_b = \frac{6(K_f W_f + K_t W_t) R^2}{t^2}$$

となる。

さて、 σ_b は曲げ応力であるから、引張応力に換算するために0.7（曲げと引張の強度比相当）を乗じ、許容応力を σ_z とすると、管厚は次式を満足するように決定すればよいことになる。

$$\sigma_t + 0.7 \sigma_b = \sigma_z$$

ここで、静水圧に対し安全率 2.5

水撃圧に対し安全率 2.0

土被りによる土圧安全率 2.0

路面荷重による土圧安全率 2.0

を見込み、管材の引張強さをとすると計算式は

$$2.5 \sigma_{ts} + 2.0 \sigma_{td} + 1.4 \sigma_b = S$$

ここに、

σ_{ts} : 静水圧による発生応力

σ_{td} : 水撃圧による発生応力

$R \approx \frac{D_m}{2}$ と置いて解くと

(R : 管半径 (mm)、 D_m : 管中心半径)

$$S \cdot t^2 - (1.25 P_s + P_d) D t - 2.1 (K_f W_f + K_t W_t) D_m^2 = 0$$

$D_m \approx D$ と置いて t について解くと

$$t = \frac{(1.25 P_s + P_d) + \sqrt{\{(1.25 P_s + P_d)^2 + 8.4 (K_f W_f + K_t W_t)\} S}}{2S} \times D$$

となる。

ここに、

t : 計算管厚 (mm) D : 管口径 (mm)

P_s : 静水圧 (MPa) P_d : 水撃圧 (MPa)

W_f : 土被りによる土圧 (kN/m²)

W_t : 路面荷重による土圧 (kN/m²)

S : 管材の引張強さ (420N/mm²)

K_f : 管底の支持角によって定まる係数で参考表-7.6.1のようである。

K_t : 管頂 76×10^{-6} 管底 11×10^{-6}

さらに公称管厚は

$T = (t + 2) \times 1.1$ (mm) $t + 2 \geq 10$ mm の場合

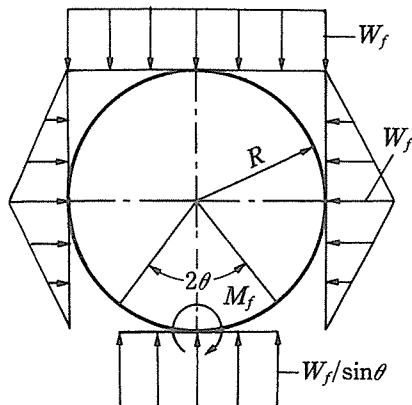
$T = (t + 2) + 1$ (mm) $t + 2 < 10$ mm の場合

である。

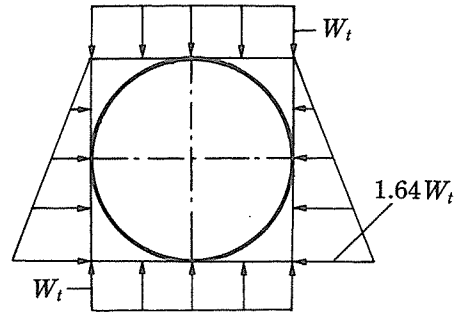
管頂、管底の両者について計算し大きい方を採用する。

参考表-7.5.1 管底支持角によって定まる係数值
(ダクタイル鋳鉄管)

位置	管底の支持角	40°	60°	90°	120°	180°
管 頂		140×10^{-6}	132×10^{-6}	121×10^{-6}	108×10^{-6}	96×10^{-6}
管 底		281×10^{-6}	223×10^{-6}	160×10^{-6}	122×10^{-6}	96×10^{-6}



参考図-7.5.1 土被りによる重荷重分布



参考図-7.5.2 路面荷重による重荷重分布

2. 鋼管管厚計算式 (JWWA G 117、G 118)

1) 内圧による検討

$$\sigma_t = \frac{P \cdot d}{2t} \leq \sigma_a$$

σ_t : 内圧による円周方向応力度 (N/mm²)

σ_a : 許容応力度 (N/mm²)

P : 内 圧 (MPa)

d : 管の内径 (mm)

t : 管 厚 (mm)

2) 外圧に対する検討

○変形量

$$\Delta X = \frac{2 \cdot K_x \cdot (W_o + W_t) R^4}{E \cdot I + 0.06146 \cdot E' \cdot R^3}$$

$$\text{変形率} = \frac{\Delta X}{D_m} \cdot 100 \leq \Delta X_a$$

○曲げ応力度

$$\sigma_b = \frac{2}{f \cdot Z} (W_o + W_t) \cdot$$

$$\frac{K_b \cdot R^2 \cdot E \cdot I + (0.06146 K_b - 0.08303 K_x) E' \cdot R^5}{E \cdot I + 0.06146 \cdot E' \cdot R^3} \leq \sigma_a$$

σ_b : 外圧による管底部曲げ応力度 (N/mm²)

f : 形状係数 1.5

Z : 管の単位幅の断面係数

$$Z = \frac{t^2}{6} \text{ (mm}^2\text{)}$$

t は管厚 (mm)

W_o : 鉛直土荷重強度 (N/mm²)

W_t : トラック荷重強度 (N/mm²)

R : 管の平均半径 (計算簡略化のためには呼び径の1/2を用いてもよい。) (mm)

E : 鋼の弾性係数 $E = 200,000 \text{ N/mm}^2$

I : 管の単位幅の断面2次モーメント

$$I = \frac{t^3}{12} \text{ (mm}^3\text{)}$$

E' : 土の反力係数 (N/mm²)

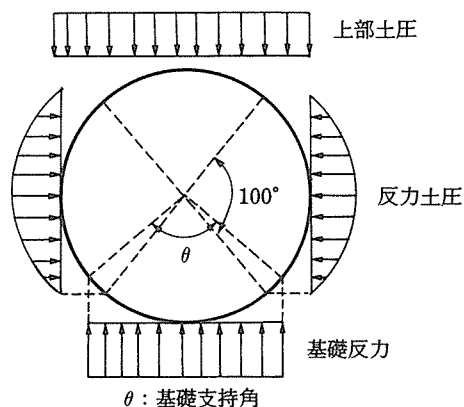
K_b : 管底における曲げモーメント係数

K_x : 水平方向変形係数

ΔX : 水平方向の変形量 (直径分) (mm)

ΔX_a : 許容変形率 (%)

D_m : 管の平均径 (mm)



参考図-7.5.3 土圧の分布モデル

上の反力係数 E' の標準値における締固め程度と施工方法の関係は通常以下のように考える。

設計に用いる E' は、一般に「締固めⅠ (軽度の締固め)」を用いる。ただし、土質、土留工法等によっては E' の値を低減してよい。

参考表-7.5.2 土の反力係数 E'

土の種類	締固め度による E' (N/mm ²)		
	締固めなし	軽度の締固め プロクター密度で <85% 相対密度で <40%	中度の締固め プロクター密度で ≥85~95% 相対密度で ≥40~70%
細粒土 (LL>50) 中程度の塑性から高塑性までの土 CH、MH、CH-MH	利用できるデータがない：有資格の 土質技術者に相談のこと。 その他の場合は $E'=0$ を使用すること。		
細粒土 (LL≤50) 中程度の塑性から塑性のない土まで CL、ML、ML-CL (粗粒部分25%以下)	0.35	1.4	2.8
細粒土 (LL≤50) 中程度の塑性から塑性のない土まで CL、ML、ML-CL (粗粒部分25%以上)	0.7	2.8	7.0
細粒土を含む粗粒土 GW、GC、SM、SC (12%以上の細粒土を含む)			
細粒土をほとんど含まないか全く 含まない粗粒土 GW、GP、SW、SP (12%以下の細粒土を含む)	1.4	7.0	14.0

参考表-7.5.3 締固め程度と施工方法

締固め程度	管側面での締固め方法
締固めなし	(タコ突+突棒)で一層仕上り厚30cm程度
締固めⅠ (軽度の締固め)	(タンバ又はコンパクト+突棒)で3回以上、一層仕上り厚30cm程度
締固めⅡ (中程度の締固め)	過去の実績や現地試験等により施行方法とそれに伴う E' の値が確実に期待できる場合

備考 本表は、以下に示す資料を参考に作成した。

- ① A.K Howard: Modulus of Soil Reaction Values for Buried Flexible Pipe.
- ② 「土地改良事業標準設計 (解説)」(農林水産省構造改善局)

参考表-7.5.4 管底支持角によって定まる係数値

基礎支持角	K_b	K_z	$(0.06146K_b - 0.08303K_z)$
60°	0.18859	0.10258	0.00307
90°	0.15699	0.09559	0.00171
120°	0.13770	0.08910	0.00107
150°	0.12790	0.08478	0.00082

3) 許容応力

参考表-7.5.5 許容応力

規格名称	種類の番号	許容応力 (N/mm ²)
JWWA G 117 水道用塗覆装鋼管	STW 290	100
JWWA G 117 水道用塗覆装鋼管	STW 370	125
JWWA G 117 水道用塗覆装鋼管	STW 400	140
JIS G 3101 一般構造用圧延鋼材	SS 400	140
JIS G 3106 溶接構造用圧延鋼材	SM 400	140

備考

1. 水圧に対する許容応力の割増しは、水道用埋設鋼管の管厚計算基準 (日本水道協会) によるが、使用条件など安全性を十分検討すること。
2. STW290は、内圧による発生応力度にかかわらず、静水圧1.0MPa以下に使用する。

4) 許容変形率

参考表-7.5.6 許容変形率 (%)

内面塗装	塗 装	モルタル
許容変形率	5	3

3. 硬質ポリ塩化ビニル管管厚計算式

1) 内圧と管厚

$$t \geq \frac{P \cdot D}{2\sigma + P}$$

t : 最小管厚 (mm)

P : 使用圧力 (MPa)

σ : 設計応力 10.8MPa

D : 外径 (mm)

参考表-7.5.7 土圧・輪圧 (25 tトラック) 計算値
(硬質ポリ塩化ビニル管)

土被り (m)	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
土圧 Pe	0.0108	0.0162	0.0216	0.0270	0.0324	0.0378	0.0432
輪圧 Pt	0.0701	0.0491	0.0378	0.0307	0.0253	0.0214	0.0185
合計 $Pv = Pe + Pt$	0.0809	0.0653	0.0594	0.0577	0.0577	0.0592	0.0617

参考表-7.5.8 曲げモーメント係数

曲げモーメント係数	支 承 角 管の位置	60°		90°		120°	
		管頂	管底	管頂	管底	管頂	管底
K_1		0.132	0.223	0.120	0.160	0.107	0.121
K_2		0.079	0.011	0.079	0.011	0.079	0.011

参考表-7.5.9 たわみ係数

たわみ係数	支 承 角	60°	90°	120°
		K_3	K_4	K_5
K_3		0.102	0.085	0.070
K_4		0.030	0.030	0.030

参考表-7.5.10 硬質ポリ塩化ビニル管の設計に用いる諸数値

呼び径	管厚中心半径 r (mm)	断面係数 Z (mm ³ /mm)	断面二次モーメント I (mm ⁴ /mm)
40	22.00	2.667	5.333
50	27.75	3.375	7.594
75	41.55	5.802	17.11
100	53.45	8.402	29.83
150	77.70	15.36	73.73
200	102.3	22.04	126.7
250	126.4	33.61	238.6
300	150.5	48.17	409.4

2) 外圧と撓み、発生応力

塩ビ管を土中に埋め込んだ場合、石などによる局所的支承がないようにすれば、呼び径300mm以下で土被り60cm以上ならば、土圧、輪圧の外荷重に対して、撓み率は5%以下、応力は設計曲げ応力19.6N/mm²以下で問題にする必要はない。

なお、支承角すなわち砂基礎をしっかりとすることにより、応力はかなり小さくなる。

○曲げ周応力

$$\sigma = \frac{(K_1 \cdot P_e + K_2 \cdot P_t) r^2}{Z} \quad (\text{N/mm}^2)$$

参考表-7.5.11 埋設硬質ポリ塩化ビニル管の曲げ周応力と撓み率

単位 曲げ周応力 σ : N/mm²、撓み率 $\delta/2r$: %

呼び径	支承角	項目	土被り (m)						
			0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
40	60°	σ	1.26	1.09	1.06	1.15	1.36	1.57	1.79
		$\delta/2r$	0.096	0.094	0.10	0.11	0.12	0.13	0.15
	90°	σ	1.24	1.06	1.01	1.03	1.07	1.14	1.29
		$\delta/2r$	0.090	0.085	0.089	0.096	0.11	0.12	0.13
	120°	σ	1.22	1.02	0.961	0.964	0.992	1.04	1.10
		$\delta/2r$	0.086	0.078	0.079	0.084	0.091	0.098	0.11
50	60°	σ	1.59	1.37	1.33	1.45	1.71	1.98	2.24
		$\delta/2r$	0.14	0.13	0.14	0.16	0.17	0.19	0.21
	90°	σ	1.56	1.33	1.27	1.29	1.34	1.43	1.62
		$\delta/2r$	0.13	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.18
	120°	σ	1.53	1.28	1.21	1.21	1.25	1.31	1.39
		$\delta/2r$	0.12	0.11	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15
75	60°	σ	2.07	1.79	1.74	1.89	2.23	2.58	2.93
		$\delta/2r$	0.20	0.20	0.21	0.23	0.26	0.28	0.31
	90°	σ	2.03	1.73	1.66	1.69	1.75	1.87	2.12
		$\delta/2r$	0.19	0.18	0.19	0.20	0.22	0.24	0.27
	120°	σ	1.99	1.67	1.58	1.58	1.63	1.71	1.81
		$\delta/2r$	0.18	0.16	0.17	0.18	0.19	0.21	0.22
100	60°	σ	2.37	2.05	1.98	2.16	2.55	2.95	3.34
		$\delta/2r$	0.25	0.24	0.26	0.28	0.31	0.35	0.38
	90°	σ	2.32	1.98	1.90	1.93	2.00	2.14	2.42
		$\delta/2r$	0.23	0.22	0.23	0.25	0.27	0.30	0.32
	120°	σ	2.28	1.91	1.80	1.81	1.86	1.95	2.07
		$\delta/2r$	0.22	0.20	0.20	0.22	0.23	0.25	0.27
150	60°	σ	2.74	2.36	2.29	2.50	2.95	3.41	3.87
		$\delta/2r$	0.31	0.30	0.32	0.35	0.39	0.43	0.47
	90°	σ	2.69	2.29	2.19	2.23	2.31	2.47	2.80
		$\delta/2r$	0.29	0.27	0.28	0.31	0.34	0.37	0.40
	120°	σ	2.63	2.21	2.08	2.09	2.15	2.25	2.39
		$\delta/2r$	0.27	0.25	0.25	0.27	0.29	0.31	0.34
200	60°	σ	3.30	2.85	2.77	3.02	3.56	4.11	4.67
		$\delta/2r$	0.41	0.40	0.42	0.46	0.51	0.57	0.63
	90°	σ	3.24	2.76	2.64	2.69	2.79	2.98	3.37
		$\delta/2r$	0.38	0.36	0.38	0.41	0.44	0.49	0.53
	120°	σ	3.18	2.66	2.51	2.52	2.59	2.72	2.88
		$\delta/2r$	0.36	0.33	0.33	0.36	0.38	0.42	0.45
250	60°	σ	3.31	2.86	2.77	3.02	3.57	4.12	4.68
		$\delta/2r$	0.41	0.40	0.42	0.47	0.52	0.57	0.63
	90°	σ	3.25	2.77	2.65	2.69	2.80	2.99	3.38
		$\delta/2r$	0.38	0.36	0.38	0.41	0.45	0.49	0.54
	120°	σ	3.18	2.67	2.52	2.53	2.60	2.73	2.89
		$\delta/2r$	0.36	0.33	0.34	0.36	0.38	0.42	0.45
300	60°	σ	3.28	2.83	2.74	2.99	3.53	4.07	4.63
		$\delta/2r$	0.40	0.39	0.42	0.46	0.51	0.56	0.62
	90°	σ	3.21	2.74	2.62	2.66	2.77	2.95	3.35
		$\delta/2r$	0.38	0.36	0.37	0.40	0.44	0.48	0.53
	120°	σ	3.15	2.64	2.49	2.50	2.57	2.70	2.86
		$\delta/2r$	0.36	0.33	0.33	0.35	0.38	0.41	0.45

注) 曲げ周応力は、管頂と管底の計算値で大きい方を記載する。なお、網掛け部分は、管底の計算値であることを示す。

○撓み

$$\delta = (K_3 \cdot P_e + K_4 \cdot P_t) \cdot \frac{r^4}{E \cdot I} \quad (\text{mm})$$

○撓み率

$$\frac{\delta}{2r} = (K_3 \cdot P_e + K_4 \cdot P_t) \times \frac{r^4}{2r \cdot E \cdot I} \times 100 \quad (\%)$$

ここに、

P_e : 埋設管にかかる土圧 (N/mm²)

P_t : 埋設管にかかる輪圧 (N/mm²)

σ : 土圧及び輪圧によって生じる埋設管の曲げ周応力 (N/mm²)

δ : 土圧及び輪圧によって生じる埋設管の撓み (mm)

r : 管厚中心半径 (mm)

t : 管厚 (mm)

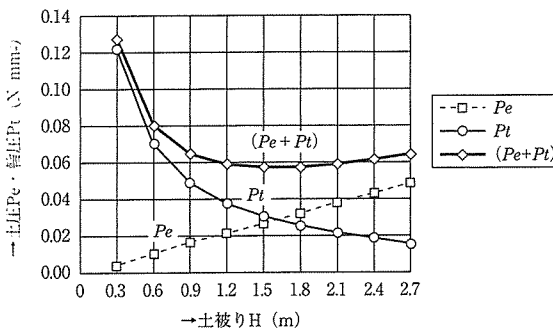
Z : 断面係数 = $t^2/6$ (mm³/mm)

I : 断面二次モーメント = $t^3/12$ (mm⁴/mm)

E : 曲げ弾性率 (ここでは、3,334N/mm²)

K_1, K_2 : 曲げモーメント係数

K_3, K_4 : たわみ係数



参考図-7.5.4 埋設管にかかる土圧・輪圧 (25tトラック)

4. 水道配水用ポリエチレン管管厚計算式

水道配水用ポリエチレン管は、日本水道協会規格 (JWWA K 144 2009) において、設計内圧1.0MPa (使用圧力0.75MPa に水撃圧0.25MPaを見込んだ内圧に相当) で50年後の安全率が2となるように管厚設計されている。

同規格では、水道配水用ポリエチレン管の適用範囲を、使用圧力0.75MPa以下と定めており、水撃圧0.25MPa以下とすれば、安全率2以上は確保されることになる。

一方、外圧に対しては、「水道配水用ポリエチレン管・継手に関する調査報告書」(日本水道協会)において、実埋設実験の結果として、水圧のみを負荷したときより、土圧と水圧を同時に負荷したときの方が発生歪みやたわみが大きくならないことが示されている。

したがって、水道配水用ポリエチレン管の管厚は、通常の埋設条件では内圧に対する安全性のみを検討すれば良い。

ただし、過大な路面荷重が見込まれるなど特別な埋設条件の場合は、内圧に対する安全性検討と外圧に対する安全性検討を、それぞれ別個に行う方法 (内外圧分離の考え方) を適用する。

1) 内圧に対する検討

○許容応力

内圧に対する許容応力は、材料であるPE100のMRS (長期静水圧強度[※]) 10MPaに対して、安全率2を見込んだ5MPa以下とする。

※MRS (長期静水圧強度)

長期静水圧強度は、管が20℃で50年以上耐えうる周方向応力のこと、長期静水圧強度の試験方法 (ISO 9080) によって求める。その結果、水道配水用ポリエチレン管の長期静水圧強度は、10MPa以上となる。

○数値計算例

内圧により発生する引張周方向応力はNaday式で、SDR (Standard Dimension Ratio) 11として計算する。

Naday式

$$\sigma = \frac{P(D-t)}{2t} \quad \dots \textcircled{1}$$

ここに、

σ : 引張周方向応力 (MPa)

P : 設計内圧 = 1.0MPa

T : 管の最小厚さ (mm)

D : 管の基準外径 (mm)

①式にSDR = $\frac{D}{t} = 11$ を代入すると、引張周方向応力は5MPaとなる。

$$\sigma = \frac{P(D-t)}{2} = 1 \times \frac{11-1}{2} = 5$$

したがって、水道配水用ポリエチレン管の管厚計算はSDR = 11の時、参考表-7.5.12のように計算される。

参考表-7.5.12 管厚 (水道配水用ポリエチレン管)

設計内圧	SDR	呼び径	最小管厚t
1.0MPa	11	50	5.8mm
		75	8.2mm
		100	11.4mm
		150	16.4mm

2) 外圧に対する検討

○許容たわみ率

とう性管の許容たわみ率は、主に水理特性や舗装面への影響から、一般に、管外径の5%以下とされている。水道配水用ポリエチレン管も、この値を許容たわみ率とする。

○許容曲げ応力

水道配水用ポリエチレン管の外圧による曲げ応力に対する許容値は、引張降伏強さに対して安全率2.5を見込んだ値とする。

したがって、許容応力 = 引張降伏強さ / 安全率 = 20/2.5 = 8MPaである。

○数値計算例

外圧に対する検討を、3. 硬質ポリ塩化ビニル管管厚計算式に準じて行った。計算結果を参考表-7.5.13に示す。なお、計算には以下の式、数値を用いた。

参考表-7.5.13 土圧、輪圧による曲げ応力とたわみ率の計算結果
(水道配水用ポリエチレン管)

E' : 埋戻し土の受動抵抗係数
 σ_{max} : 最大曲げ応力 (MPa)
 V : たわみ率 (たわみ量/管外径 $\times 100$) %

埋戻し土	支承角	土被り 呼び径	0.6m		0.8m		1.2m		1.5m	
			σ_{max}	V	σ_{max}	V	σ_{max}	V	σ_{max}	V
砂突固め $E' = 100$	60°	50	5.88	1.76	4.43	1.32	2.97	0.89	2.42	0.72
		75	5.94	1.79	4.48	1.35	3.01	0.91	2.45	0.74
		100	5.92	1.78	4.47	1.34	3.01	0.9	2.45	0.74
		150	5.88	1.77	4.46	1.34	3	0.9	2.45	0.74
	120°	50	3.87	1.52	2.92	1.14	1.96	0.77	1.59	0.63
		75	3.9	1.54	2.94	1.17	1.98	0.78	1.61	0.64
		100	3.89	1.54	2.94	1.16	1.97	0.78	1.61	0.64
		150	3.86	1.53	2.93	1.16	1.97	0.78	1.61	0.64
砂質土壌 突固め $E' = 70$	60°	50	6.46	2.04	4.87	1.54	3.27	1.03	2.66	0.84
		75	6.54	2.09	4.93	1.57	3.31	1.06	2.7	0.86
		100	6.51	2.07	4.92	1.57	3.31	1.05	2.69	0.86
		150	6.47	2.06	4.91	1.56	3.31	1.05	2.69	0.86
	120°	50	4.38	1.77	3.3	1.33	2.21	0.89	1.8	0.73
		75	4.42	1.8	3.33	1.36	2.24	0.91	1.82	0.74
		100	4.4	1.79	3.32	1.35	2.24	0.91	1.82	0.74
		150	4.37	1.78	3.31	1.35	2.23	0.91	1.82	0.74
ローム 突固め $E' = 40$	60°	50	7.27	2.44	5.48	1.84	3.68	1.24	2.99	1.01
		75	7.38	2.5	5.57	1.89	3.74	1.27	3.04	1.03
		100	7.34	2.49	5.55	1.88	3.73	1.26	3.04	1.03
		150	7.3	2.48	5.53	1.88	3.73	1.26	3.04	1.03
	120°	50	5.08	2.11	3.82	1.59	2.57	1.07	2.09	0.87
		75	5.14	2.16	3.88	1.63	2.61	1.1	2.12	0.89
		100	5.12	2.15	3.87	1.62	2.6	1.09	2.12	0.89
		150	5.09	2.14	3.86	1.62	2.6	1.09	2.12	0.89

- a) 土圧の計算 : マーストンの式
b) 輪圧の計算 : ブーシネスクの式
c) 埋戻し土の単位体積重量 : 18kN/m^3
d) 管頂部の溝幅 : 0.50m
e) 輪荷重の条件 : 25tトラック 2台並走
f) ポリエチレン樹脂の曲げ弾性率 : 1000MPa
g) 管の寸法 : $\phi 50 \sim \phi 150$

水道施設耐震工法指針・解説

2009年版

I 総 論

社団法人 日本水道協会

3.2 埋設管路の耐震計算法

3.2.1 総 説

埋設管路の耐震計算は、地震による地盤、埋設管路の動的挙動を反映できる手法を用いて、管体の発生応力、歪み及び継手部の伸縮量等を求める。

〔説明〕

埋設管路の耐震計算では地震動の動的な作用を考慮して行うものとする。ここでは地震動による地盤変位を動的解析によって求め、その地盤変位の最大応答値を入力値として、応答変位法を用いて管体発生応力、歪み及び継手部の伸縮量等を算定することを原則とする。地盤の動的解析で地層条件の変化を考慮する場合には、2次元あるいは3次元の有限要素（FEM）モデルを用いて地盤変位・地盤歪みを求める。地盤が比較的均一で条件の変化がほとんど見られない場合には、地盤変位を一次元地盤応答解析により算定し、式(3.1.26)より地盤歪みを求めてもよい。

埋設管路は、一般に断面の外周の長さと比較して構造物軸方向の長さが長く、かつ、見かけの単位体積重量も周辺地盤と比較して相対的に軽いために、地震時に独自の振動をすることはなく、周辺地盤の動きに支配されるものと考えられる。そのため、従来から埋設管路の耐震設計では、地盤の応答特性を反映させた応答変位法が用いられている。

ここで、地盤変位振幅の計算式は、過去の強震記録の速度応答スペクトルを基に設定された設計速度応答スペクトル等を用いており、地盤の応答特性が反映されたものである（計算式は「総論解説編Ⅶ 埋設管路の耐震計算法」に示す）。したがって、埋設管路の耐震設計において、静的解析で地盤変位、地盤歪みを求めても、地盤の動的な作用を考慮していることになる。ただし、静的解析により求められる地盤歪みは、一様地盤を仮定したものであるため、地盤歪みの算定においては、必要に応じて表-3.1.8を考慮するものとする。静的解析による埋設管路の耐震計算の手順を図-3.2.1に示す。なお、地震時の影響を考慮しない、平常時における荷重等の影響は別途検討が必要である。

埋設管路は広い区域を対象として布設されるため、全ての埋設管路の耐震設計において、詳細な地盤調査を行い、地盤の動的解析を実施することは困難であり合理性に欠ける。このため一般的には用途に応じて規格化された管材料を使用し、全ての新設管路の設計に対して個別に埋設管路の耐震計算を行うことは少ない。これは水道事業が長い歴史の中で管種や継手等について、適正な仕様を定めてきたことによるもので、中小口径管路の通常の設計では埋設管路の耐震計算は省略してもよい。

特別に地盤条件に応じた管種を選定する場合や、設計地震動に対する既設管路の耐震性照査、重要管路の設計、断層横断部・軟弱地盤における設計、構造物との接続部の設計などの特別な検討を必要とする場合には、本指針に沿って埋設管路の耐震計算を行うものとする。

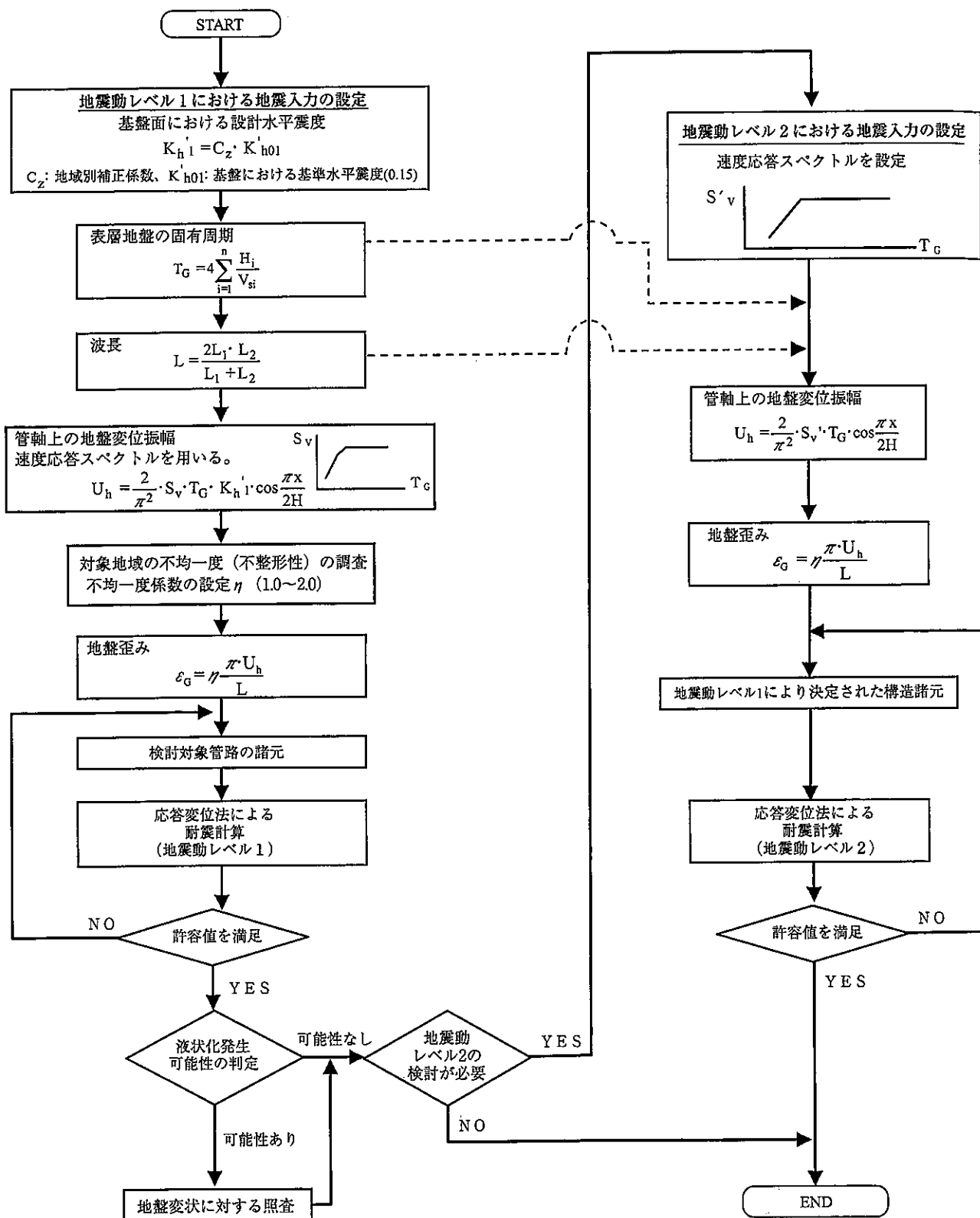


図-3.2.1 埋設管路の耐震計算の手順

3.2.2 埋設管路の耐震性能の照査

- レベル1地震動に対して耐震性能1の照査を行う場合には、一体構造管路及び継手構造管路では、「3.2.3 耐震計算法」及び「3.2.4 応答変位法による耐震計算」の規定に基づいて耐震性能の照査を行う。
- レベル1地震動又はレベル2地震動に対して耐震性能2の照査を行う場合には、一体構造管路及び継手構造管路では、「3.2.3 耐震計算法」及び「3.2.4 応答変位法による耐震計算」の規定に基づいて耐震性能の照査を行う。なお、継手構造管路では、併せて継手部の伸縮量も照査する。
- 液状化等の地盤変状により地盤歪みが著しく増大する場合、レベル1地震動に対する埋設管路の耐震性能の照査は、ランク A1、A2であっても耐震性能2を満足することを照査する。

〔説明〕

水道施設の管路には多くの管種が含まれるが、これらは次の2つに大別できる。

- ① 管路の変形能力の大部分を継手にもたせるもの（継手構造管路）
- ② 管路の変形能力の大部分を管体材料にもたせるもの（一体構造管路）

埋設管路の管軸方向の耐震計算法は応答変位法により、地盤と管路の相対変位に起因する挙動を基に、その耐震性能を照査することを基本とする。なお、応答変位法による計算は地盤が均一に歪むと想定したものであるが、実際の地震時には地盤の不均質性により局部的に歪みの集中が発生し、当初の計算結果よりも大きくなり得ることに留意する必要がある。

地盤が塑性状態となる地割れや液状化など大きな地盤変状の発生が予想される箇所では、その地盤の動きに管路が追従できるかという面から耐震性能の照査も行う（地盤変状の耐震性能の照査については「3.2.5 地盤変状に対する耐震計算」参照）。

埋設管路の耐震性能と照査基準を表-3.2.1に示す。

表-3.2.1 埋設管路の耐震性能と照査基準

耐震性能	耐震性能1	耐震性能2
レベル1地震動の耐震性能※1	ランク A1、ランク A2	ランク B
レベル2地震動の耐震性能	—	ランク A1、ランク A2
一体構造管路の照査基準	(原則として弾性域検討) 管体応力 $\leq$ 降状点応力 管体歪み $\leq$ 許容歪み	(塑性域検討) 管体歪み $\leq$ 許容歪み
継手構造管路の照査基準※2	(管体：弾性域検討) 管体応力 $\leq$ 許容応力 継手部伸縮量 $\leq$ 設計照査用最大伸縮量	(管体：弾性域検討) 管体応力 $\leq$ 許容応力 継手部伸縮量 $\leq$ 設計照査用最大伸縮量

※1：液状化等の地盤変状により地盤歪みが著しく増大する場合、レベル1地震動に対する埋設管路の耐震性能の照査は、ランク A1、A2であっても耐震性能2を満足することを照査する。

※2：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ため、これを照査するものとする。

3.2.3 耐震計算法

1. 耐震計算における埋設管路の耐震性能は、常時荷重（自重及び常時の積載荷重）と地震の影響を組み合わせた状態に対して照査するものとする。
2. 埋設管路の耐震計算は、原則として応答変位法を用いて行い、レベル1地震動に対しては管と地盤の滑りを考慮せず、レベル2地震動に対しては管と地盤の滑りを考慮してもよい。
3. 埋設管路の耐震性能の照査は「3.2.2 埋設管路の耐震性能の照査」に従うものとする。

〔説明〕

1.について；耐震性能の照査は、常時荷重と地震の影響との組み合わせた状態で行う。常時荷重としては、設計内圧、自動車荷重などの活荷重、温度変化、不同沈下等を考慮する。

2.について；水道施設の管路には多くの管種がある。管種別の適用条件・特徴についての詳細は、「平成18年度 管路の耐震化に関する検討会報告書」（厚生労働省、平成19年3月）及び「4.2.1.3 導・送・配水管路」を参照し、耐震計算を行うこと。

本指針における埋設管路の管軸方向の耐震計算法は応答変位法により、地盤と管路の相対変位に起因する挙動を基に、その耐震性を検討する。このとき、レベル1地震動に対しては弾性域検討を原則とし、管と地盤の滑りは考慮しない。レベル2地震動に対しては、継手構造管路では弾性域検討、一体構造管路では塑性域検討とし、管と地盤の滑りを考慮してもよい。なお、応答変位法による計算は地盤が均一に歪むと想定したものであるが、実際の地震時には地盤の不均質性により局部的に歪みの集中化が発生し、当計算のものよりも大きくなる場所もありうることに留意しておく必要がある。また、重要管路や管路形態等から、特に必要と考えられる場合は、別途、非線形応答計算等により検討するのが望ましい。

3.2.4 応答変位法による耐震計算

1. 応答変位法に用いる地盤歪みは、「3.1.8 地震動に伴う地盤歪み」により算定することを原則とする。
2. 応答変位法による埋設管路の継手の変位、管体応力、歪みの耐震計算は、地震動レベル1とレベル2について行うものとする。

〔説明〕

1.について；応答変位法に用いる地盤歪は、「3.1.8 地震動に伴う地盤歪み」により算定することを原則とする。なお、詳細な地盤条件が明らかで、地盤応答解析により地盤歪みを求める場合には、その結果を用いてもよい。

2.について；レベル1地震動に対しては、地盤と管路の滑りを考慮しない耐震計算式を適用する。滑りを考慮しない耐震計算式では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 K_{g1} 、 K_{g2} が必要となるが、それらは次式によって求める。

$$K_{g1} = C_1 \cdot \frac{\gamma_t}{g} \cdot V_s^2 \dots\dots\dots (3.2.1)$$

$$K_{g2} = C_2 \cdot \frac{\gamma_t}{g} \cdot V_s^2 \dots\dots\dots (3.2.2)$$

ここに、

K_{g1} 、 K_{g2} ：埋設管路の管軸及び管軸直交方向の単位長さ当たりの地盤の剛性係数（Pa）

γ_t ：土の単位体積重量（N/m³）

g : 重力加速度 (9.8m/s^2)

V_s : 表層地盤のせん断弾性波速度 (m/s) (表-3.1.6による)

C_1 、 C_2 : 埋設管路の管軸及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、概ね $C_1 = 1.5$ 前後、 $C_2 = 3$ 前後になると想定される。

なお、 C_1 、 C_2 の詳細な値については有限要素法 (FEM) 等によって求めるのが望ましい。参考までに表層地盤厚さ $5 \sim 30\text{m}$ 、管径 $150 \sim 3,000\text{mm}$ に対して線形有限要素法 (FEM) によって地盤の剛性係数に対する定数を求めた結果を以下に示す。

$$C_1 = 1.3 H^{-0.4} D^{0.25} \dots\dots\dots (3.2.3)$$

$$C_2 = 2.3 H^{-0.4} D^{0.25} \dots\dots\dots (3.2.4)$$

ここに、

H : 表層地盤厚さ (m)

D : 管径 (cm)

また、管と地盤の滑りを考慮した耐震計算を行う場合には、管と地盤との摩擦力は概ね 0.01MPa (0.1kgf/cm^2) 前後としてよい。

応答変位法による耐震計算法の例を「総論解説編Ⅶ 埋設管路の耐震計算法」に示す。

3.2.5 地盤変状に対する耐震計算

地割れや液状化等大きな地盤変状に対しては、伸縮可撓性のある継手の伸縮、若しくは管体の変形能力によって管路が地盤の動きに追従し得るかどうかにより耐震性能を照査する。

〔説明〕

兵庫県南部地震をはじめ過去の主な地震において、管路の被害は地割れや液状化、地盤沈下等の埋設された管路に大きな変位をもたらす地盤変状の発生した場所で数多く発生している。

地盤変状の発生した場所では、地盤が大きく変形し塑性状態に達しているため、地盤を弾性状態として考える応答変位法による耐震設計のみでは不十分であり、別途、耐震性能の照査が必要である。

地盤変状に対する耐震計算の例を「総論解説編Ⅶ 埋設管路の耐震計算法」に示す。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター：トンネル耐震継手技術指針基準（案）、昭和54年3月
- 2) 建設省土木研究所：新耐震設計法（案）、土木研究所資料、第1185号、昭和52年3月
- 3) 萩原浩、寺田章次、栗林栄一：石油パイプラインの耐震設計技術基準、土木技術資料、16-4、1974、pp.169-174
- 4) 栗林栄一、岩崎敏男、川島一彦、宮田忠明：埋設管と埋土間の動的相対変位及び抵抗力に関する実験的研究、土木研究資料、第1266号、昭和52年7月
- 5) E. Kuribayashi and K. Kawashima: Earthquake Resistant Design of Submerged Tunnels and An Example of It's Application, PWRI Technical Memorandum No. 1169, November 1976
- 6) 桜井彰雄、高橋忠、栗原千鶴子、矢島浩：地盤時土の歪みより見た埋設パイプラインの耐震性（超高压地中電線路埋設管路の耐震研究 その2）、電力中央研究所技術研究報告、No. 69087、昭和45年4月
- 7) 厚生省：南関東大震災対策調査報告書、昭和48年3月
- 8) 岩崎敏雄、龍岡文男、佐伯光昭：N値とひずみレベルを考慮した波速度 V_s との関係例、第12回土質工

学研究発表会講演集、昭和52年5月

- 9) 国土開発技術研究センター：地下埋設管路耐震継手の技術基準（案）、昭和52年3月
- 10) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針、平成16年3月
- 11) 小軽米松太郎、大沢章宏他：埋設管路の地震時挙動観測、水道協会雑誌、第601号、昭和59年10月
- 12) 三浦久人：阪神・淡路大震災による耐震形ダクタイル鋳鉄管路の挙動調査（ポートアイランド、六甲アイランド）、ダクタイル鉄管、No.61、平成8年10月
- 13) 日本水道協会：1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析、平成8年5月
- 14) 日本溶接協会：塑性設計資料集（その12）地下基礎構造物－設計法の現状と展望－、平成元年11月
- 15) 厚生労働省：管路の耐震化に関する検討会報告書、平成19年3月

VII 埋設管路の耐震計算法

1. 応答変位法による耐震計算法の例

ここでは、耐震計算法の一例を示す。

なお、硬質塩化ビニル管及び水道配水用ポリエチレン管については、耐震計算法を審議した総論専門委員会において検証していないので、関係業界から示された計算事例を参考として記載した。

1) ダクタイル鋳鉄管の場合（継手構造管路）

・地震動レベル1に対し管体応力は、管と地盤の滑りを考慮しないこととし、次式によって計算すること。

$$\sigma'_{1L}(\chi) = \xi_1(\chi) \cdot \sigma_{1L} \quad \dots\dots\dots (3.2.8)$$

$$\sigma'_{1B}(\chi) = \xi_2(\chi) \cdot \sigma_{1B} \quad \dots\dots\dots (3.2.9)$$

$$\sigma'_{1x}(\chi) = \sqrt{\{\sigma'_{1L}(\chi)\}^2 + \{\sigma'_{1B}(\chi)\}^2} \quad \dots\dots\dots (3.2.10)$$

ここに、

$\sigma'_{1L}(\chi)$ 、 $\sigma'_{1B}(\chi)$: 伸縮可撓継手から管軸方向の距離 x (m) の点における軸応力と曲げ応力 (Pa)

$\sigma'_{1x}(\chi)$: 伸縮可撓継手から管軸方向の距離 x (m) の点における軸応力と曲げ応力の合成応力 (Pa)

$\xi_1(\chi)$ 、 $\xi_2(\chi)$: 埋設管路を連続とした場合の応力に対する埋設管路の伸縮可撓継手がある場合の応力の補正係数（参考 I 参照）

σ_{1L} 、 σ_{1B} : 埋設管路の軸応力と曲げ応力 (Pa)

$$\sigma_{1L} = \alpha_1 \cdot \frac{\pi U_h}{L} \cdot E \quad \dots\dots\dots (3.2.11)$$

$$\sigma_{1B} = \alpha_2 \cdot \frac{2\pi^2 D U_h}{L^2} \cdot E \quad \dots\dots\dots (3.2.12)$$

α_1 、 α_2 : 管軸方向・管軸直交方向の地盤変位の伝達係数で式 (3.2.13)、(3.2.14) で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 L'}\right)^2} \\ \alpha_2 &= \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_2 L}\right)^4} \end{aligned} \right\} \quad (3.2.13)$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \sqrt{\frac{K_{g1}}{EA}} \text{ (1/m)} \\ \lambda_2 &= \sqrt{\frac{K_{g2}}{EI}} \text{ (1/m)} \end{aligned} \right\} \quad (3.2.14)$$

ここに、

π : 円周率

L' : 見かけの波長 ($=\sqrt{2}L$) (m)

L : 波長 (m)

K_{g1} 、 K_{g2} : 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 (Pa)

E : 埋設管路の弾性係数 (Pa)

A : 埋設管路の断面積 (m^2)

I : 埋設管路の断面 2 次モーメント (m^4)

U_h : 管軸上の地盤の水平変位振幅 (m)

D : 埋設管路の外径 (m)

$\{\sigma'_{1L}(x)\}^2$ には従来の耐震計算式と同様、重要度に応じて 1.00～3.12 の係数を乗じるのが望ましい。この係数は、重畳係数と呼ばれるもので、管軸上で交わり直交する 2 平面内で、それぞれ管軸に 45° の傾きをもつ直交した 2 成分の波動、計 4 成分の波動が入射し軸歪みを生じ、また、同時に水平面内で管軸に平行な波動が入射した場合の合成応力を、二乗和の平方根によって均等化した形で表したものである。重畳係数は考慮する波動成分によって 1.00～3.12 の値とするが、重要度に応じてその値を決めるものとする。

・地震動レベル 2 に対し管体応力は、管と地盤の滑りを考慮することとし、次式によって計算すること。

$$\sigma'_{2L}(x) = \xi_1(x) \cdot \sigma_{2L} \quad \dots\dots\dots (3.2.15)$$

$$\sigma'_{1B}(x) = \xi_2(x) \cdot \sigma_{1B} \quad \dots\dots\dots (3.2.16)$$

$$\sigma'_{2x}(x) = \sqrt{\{\sigma'_{2L}(x)\}^2 + \{\sigma'_{1B}(x)\}^2} \quad \dots\dots\dots (3.2.17)$$

ここに、

$\sigma'_{2L}(x)$ 、 $\sigma'_{1B}(x)$: 伸縮可撓継手から管軸方向の距離 x (m) の点における軸応力と曲げ応力 (Pa)

$\sigma'_{2x}(x)$: 伸縮可撓継手から管軸方向の距離 x (m) の点における軸応力と曲げ応力の合成応力 (Pa)

σ_{2L} 、 σ_{1B} : 埋設管路の軸応力と曲げ応力 (Pa)

$$\sigma_{2L} = \alpha_1 \cdot \frac{\pi U'_h}{L} \cdot E \quad \dots\dots\dots (3.2.18)$$

U'_h : 参考Ⅱ参照

埋設管路継手部の管軸方向伸縮量及び屈曲角度は、次式によって計算する。なお、継手部で生じる管軸直交方向の相対変位は非常に小さいため、軸方向の伸縮量のみを照査すればよい。また、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、「3.1.8 地震動に伴う地盤歪み」の節に述べられている地盤不均一度係数： η を U_h に乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。

(1) 継手部の軸方向の伸縮量

$$|u_f| = u_o \cdot \bar{u}_f \quad \dots\dots\dots (3.2.19)$$

ここに、

$|u_f|$: 管軸方向継手伸縮量 (m)

u_o : 無限連続梁とした場合の梁の管軸方向相対変位量 (m)

$$\frac{-}{u_J} = \frac{2\gamma_1 |\cosh \beta_1 - \cos \gamma_1|}{\beta_1 \sinh \beta_1}$$

$$u_o = \alpha_1 U_a$$

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

$$\beta_1 (= \lambda_1 l) = \sqrt{\frac{K_{g1}}{EA}} \cdot l$$

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

EA : 伸び剛性 (N)

l : 継手間の長さ (m)

K_{g1} : 埋設管路の管軸方向の単位長さ当たりの地盤の剛性係数 (Pa)

L' : 見かけの波長 ($=\sqrt{2}L$) (m)

L : 波長 (m)

U_a : 地盤の管軸方向の水平変位振幅 (m)

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

U_h : 地表面からの深さ x(m)における地盤の水平変位振幅 (m) (総論解説編Ⅲ (97年版指針再掲部) に示す地震動レベル1、レベル2に対して各々式 (1.3.5)、(1.3.6) による $U_h(\chi)$ を用いる) また、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、「3.1.8 地震動に伴う地盤歪み」の節に述べられている地盤不均一度係数: η を U_h に乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。

(2) 継手の屈曲角度

継手の屈曲角度は、次式によって計算する。

$$\theta = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot l \cdot U_h}{L^2} \dots\dots\dots (3.2.20)$$

ここに、

θ : 継手部の屈曲角度 (rad)

l : 継手間の長さ (m)

U_h : 地表面からの深さ x(m)における地盤の水平変位振幅 (m) (総論解説編Ⅲ (97年版指針再掲部) に示す地震動レベル1、レベル2に対して各々式 (1.3.5)、(1.3.6) による $U_h(\chi)$ を用いる。) また、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、「3.1.8 地震動に伴う地盤歪み」の節に述べられている地盤不均一度係数: η を U_h に乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。

L : 波長 (m)

ダクトイル鋳鉄管の設計照査用最大伸縮(伸び)量は、各論「4.2 管路構造物及び付属施設」表-4.2.5「ダクトイル鋳鉄管継手の伸縮(伸び)量」を参照すること。なお、通常の場合、継手部の検討を十分に行えば管体応力の照査を割愛してもよい。

また、NS形ダクトイル鋳鉄管等の鎖構造管路は、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継手部の離脱防止機能により引っ張ることで管路全体として地盤変位を吸収できる。

<応答変位法による継手構造管路の管体応力、歪みの耐震計算法>

埋設管路に伸縮可撓継手のある場合の $\xi_1(x)$ 、 $\xi_2(x)$ は次式によって求めるものとする。

$$\left. \begin{aligned} \xi_1(x) &= \sqrt{\phi_1(x)^2 + \phi_2(x)^2} / [\exp(v'\lambda_1 L') - \exp(-v'\lambda_1 L')] \\ \xi_2(x) &= \sqrt{\phi_3(x)^2 + \phi_4(x)^2} \end{aligned} \right\} \quad (式①)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} v &= l/L, \quad v' = l/L' \\ \phi_1(x) &= [\exp(-v'\lambda_1 L') - \cos(2\pi v')] \\ &\quad \exp(\mu'\lambda_1 L') \\ &\quad - [\exp(v'\lambda_1 L') - \cos(2\pi v')] \\ &\quad \exp(-\mu'\lambda_1 L') \\ &\quad + 2\sinh(v'\lambda_1 L') \cos(2\pi \mu') \\ \phi_2(x) &= 2\sin(2\pi v') \sinh(\mu'\lambda_1 L') \\ &\quad - 2\sin(2\pi \mu') \sinh(v'\lambda_1 L') \\ \phi_3(x) &= f_3 e_3 - f_1 e_2 - f_4 e_1 - \sin(2\pi \mu) \\ \phi_4(x) &= e_4 + f_2 e_3 - f_2 e_2 - f_5 e_1 - \cos(2\pi \mu) \end{aligned} \right\} \quad (式②)$$

$f_1 \sim f_5$ $e_1 \sim e_4$: 表-①に示すとおりである。

l : 埋設管路の伸縮可撓継手間の長さを表している。

なお、埋設管路の任意の位置に、管体に比べて継手の剛性が同程度に近いばね定数の継手を設けて計算する場合には、管軸方向伸縮量及び管軸直交方向相対変位量、屈曲角度を剛性マトリックス法で求めることができる。

表 - ① 係数 $f_1 \sim f_5$

f_1	$\frac{1}{\Delta} \left[\{C_1(C_4 - C_1) - C_3(C_3 + C_2) - C_1 \cos(2\pi \nu)\} \frac{2\pi}{\beta L} + (C_3 + C_2) \sin(2\pi \nu) \right]$		
f_2	$\frac{1}{\Delta} \left[C_1(C_3 - C_2) - C_4(C_3 + C_2) + (C_3 + C_2) \cos(2\pi \nu) + C_1 \frac{2\pi}{\beta L} \sin(2\pi \nu) \right]$		
f_3	$\frac{1}{\Delta} \left[\{C_1(C_4 + C_1) - C_2(C_3 + C_2) - C_1 \cos(2\pi \nu)\} \frac{2\pi}{\beta L} + (C_3 + C_2) \sin(2\pi \nu) \right]$		
f_4	$\frac{1}{\Delta} \left[\{C_3(C_4 + C_1) - C_2(C_4 - C_1) + (C_2 - C_3) \cos(2\pi \nu)\} \frac{2\pi}{\beta L} - 2C_1 \sin(2\pi \nu) \right]$		
f_5	$\frac{1}{\Delta} \left[(C_3 - C_2)^2 + 2C_1 C_4 - 2C_1 \cos(2\pi \nu) - (C_2 - C_3) \frac{2\pi}{\beta L} \sin(2\pi \nu) \right]$		
Δ	$(C_3 + C_2)(C_3 - C_2) + 2C_1^2$		
C_1	$\sin(\nu \beta L) \sinh(\nu \beta L)$	C_2	$\sin(\nu \beta L) \cosh(\nu \beta L)$
C_3	$\cos(\nu \beta L) \sinh(\nu \beta L)$	C_4	$\cos(\nu \beta L) \cosh(\nu \beta L)$
e_1	$\sin(\mu \beta L) \sinh(\mu \beta L)$	e_2	$\sin(\mu \beta L) \cosh(\mu \beta L)$
e_3	$\cos(\mu \beta L) \sinh(\mu \beta L)$	e_4	$\cos(\mu \beta L) \cosh(\mu \beta L)$
ν	l/L	μ	x/L
β	$\sqrt[4]{\frac{K_g^2}{4EI}}$		

<地震動レベル2に対するダクトイル鋳鉄管等の管体応力の算定のための簡便計算法（継手構造管路）>

1) 地震動レベル2に対して、軸応力 σ_{2L} は非線形応答を考慮した解析を用いた簡便計算法で計算する。このとき、滑りを考慮した速度応答スペクトル S_v' （図-①または図-②）を用いて U_h' を計算する。

$$\left(U_h' = \frac{2}{\pi} S_v' T_G \cos \frac{\pi \alpha}{2H} \cdots \text{「総論解説編Ⅲ（97年版指針再掲部）」に示す式（1.3.6）と同様。} \right)$$

なお、図-①及び②は、地盤と管との間の滑りを考慮した非線形応答計算での管体応力と、滑りを考慮しない式（3.2.8）を用いて計算した管体応力が等価となるような見かけ上の速度応答を逆算し、種々の管径、地質に対してそれらの結果を包絡するような速度応答スペクトルを求めたものである。

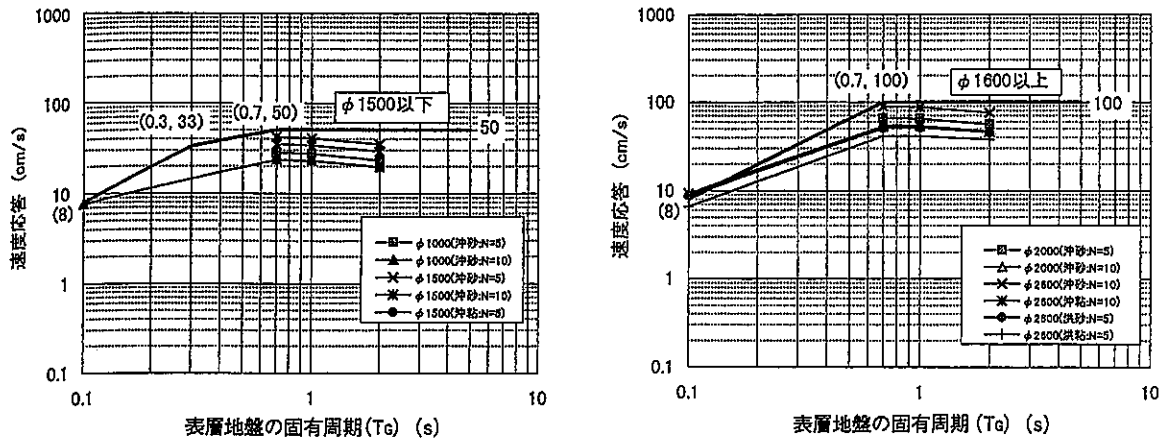


図-① 地震動レベル2入力 velocity 応答結果例（「総論解説編Ⅲ（97年版指針再掲部）」に示す表-1.3.5における上限（90％）に相当）

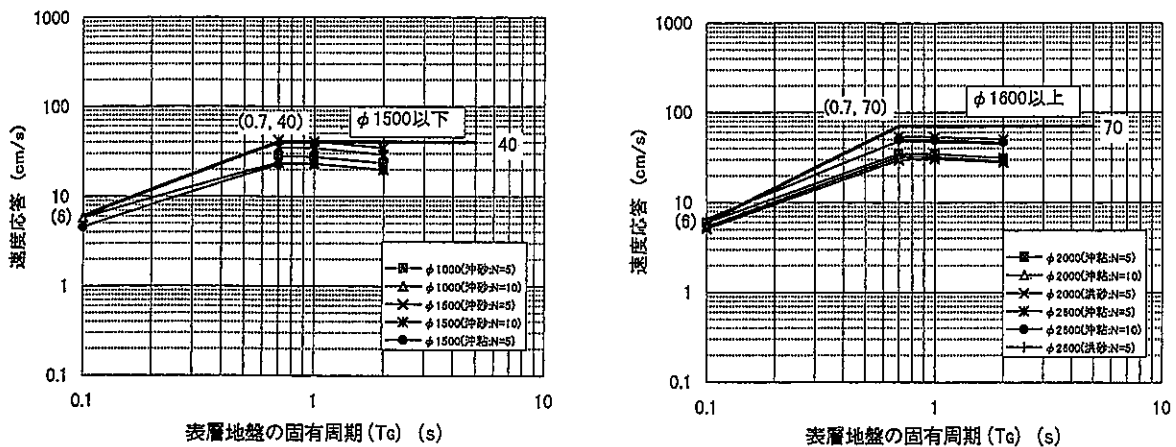


図-② 地震動レベル2入力 velocity 応答結果例（「総論解説編Ⅲ（97年版指針再掲部）」に示す表-1.3.5における下限（70％）に相当）

2) またダクトイル鋳鉄管路の場合は、震度4程度以上の地震時の観測結果から得られた次式によって計算してもよい。

$$\sigma_{2L} = \frac{\pi \cdot D \cdot \tau \cdot l}{2 \cdot A} \cdots \cdots \cdots \text{（式③）}$$

ここに、

- σ_{2L} : 軸応力 (Pa)
- D : 管外径 (m)
- τ : 管と地盤の摩擦力 (Pa)
- l : 管長 (m)
- A : 管断面積 (m^2)

なお、通常の場合、継手部伸縮量の検討を十分に行えば、管体応力の照査を割愛してもよい。

<ダクタイル鋳鉄管継手部の軸方向の伸縮量算出のための簡便計算法>

ダクタイル鋳鉄管路の場合で、震度4程度以上の時は、地震時挙動観測結果から得られた次式によって計算してもよい。

$$e_p = \varepsilon_G \cdot l \quad \dots\dots\dots (式④)$$

ここに、

- e_p : 管軸方向継手伸縮量 (m)
- ε_G : 地盤歪み (式 (3.1.26) による)
- l : 管長 (m)

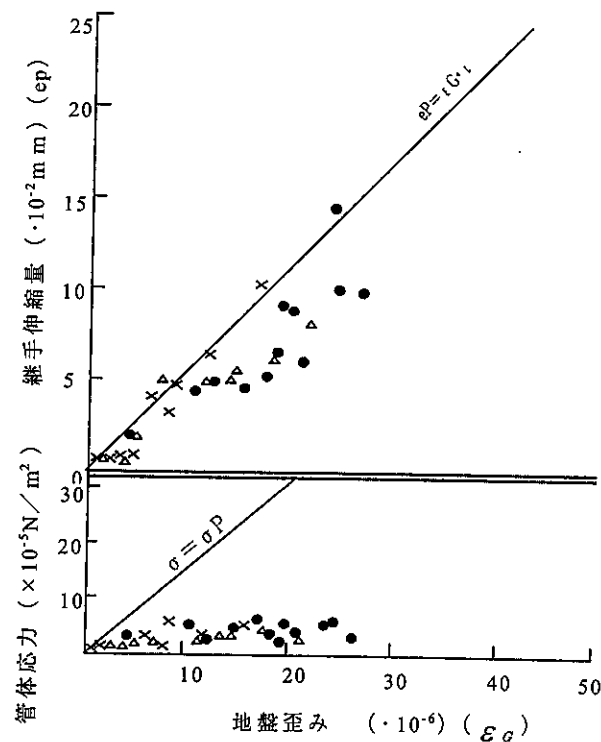


図-③ ダクタイル鋳鉄管路の地盤歪みと管体応力、継手伸縮量の地震時挙動観測結果例¹¹⁾

ただし、曲げ応力及び合成応力は式 (3.2.9)、(3.2.10) によって計算すること。

2) 鋼管の場合（一体構造管路）

・地震動レベル1に対する管体歪みは、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

α_1 : 管軸方向の地盤変位の伝達係数（式（3.2.13）を適用）

α_2 : 管軸直交方向の地盤変位の伝達係数（式（3.2.13）を適用）

なお、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、応力による照査の場合は、式（3.2.8）～（3.2.10）によって安全性を照査する。

・地震動レベル2に対する管体歪みは、次式によって計算する。

$$\varepsilon_{2X} = \sqrt{\varepsilon_{2L}^2 + \varepsilon_{2B}^2} \quad (\text{ただし、} \varepsilon_s \leq \varepsilon_G) \quad \dots\dots\dots (3.2.24)$$

ここに、

ε_{2X} : 軸歪みと曲げ歪みの合成歪み

ε_{2L} : 埋設管路の軸歪み

弾性領域 $\alpha_0 \cdot \varepsilon_G \leq \varepsilon_y$ の場合 : $\varepsilon_{2L} = \alpha_0 \cdot \varepsilon_G$

塑性領域 $\alpha_0 \cdot \varepsilon_G > \varepsilon_y$ の場合 : $\varepsilon_{2L} = \varepsilon_G$

ε_{2B} : 埋設管路の曲げ歪み

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

α_2 : 管軸直交方向の地盤変位の伝達係数（式（3.2.13）を適用）

ε_y : 管材の降伏歪み

ε_G : 地盤の軸歪み

α_0 : 滑りを考慮した場合の管軸方向の地盤変位の伝達係数

$$\alpha_0 = q \cdot \alpha_1$$

q : 滑り低減係数

$$\tau_G \geq \tau_{cr}, q = 1 - \cos \xi + \left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \sin \xi, \xi = \sin^{-1} \left(\frac{\tau_{cr}}{\tau_G} \right), q \leq 1$$

$$\tau_G < \tau_{cr}, q = 1$$

α_1 : 管軸方向の地盤変位の伝達係数（式（3.2.13）を適用）

τ_G : 管表面に作用するせん断応力（kN/m²）

$$\tau_G = \frac{2\pi}{L} E \cdot t \cdot \alpha_1 \cdot \varepsilon_G$$

- τ_{cr} : 管と周辺地盤間で滑りが発生するときの滑り開始限界せん断応力 (10kN/m²)
 L' : 地震動の見かけの波長 ($=\sqrt{2}L$ m)
 E : 管の弾性係数 (kN/m²)
 t : 管厚 (m)

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、「3.1.8 地震動に伴う地盤歪み」の節に述べられている地盤不均一度係数： η を ε_G に乘じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。

軸歪みは、それが管材の降伏歪みを超えると直ちに全断面降伏状態になるため、降伏歪みにより管軸方向の弾塑性状態を判別する。

地震動レベル2に対する一体構造管路の耐震安全性照査は、管軸方向の管体歪みと曲げ歪みの合成歪みを用いて行うこととする。

鋼管にあっては、地震動レベル1に対する安全性の照査を行う場合には、常時荷重も考慮した管体応力が管体材料の降伏点応力以下であることを原則とする。なお、降伏点応力に相当する歪みは $\varepsilon = \sigma/E = 2,400/2,100,000 = 0.11\%$ となる。しかしながら、現場条件等を総合的に考慮してより適切と考えられる場合には、管体歪みが $23 t/D$ (%) (0.15~0.20%程度) 以下であることにより照査してもよい。ここに、 t は管厚、 D は管径を表す。

また、地震動レベル2では、常時荷重も考慮した管体歪みが $46 t/D$ (%) (0.3~0.4%程度) 以下であることによって、耐震性の照査を行う。この場合、地震動レベル1の場合の照査の結果も安全であること。

技術メモ

鋼管計算式への滑り低減係数導入の経過

まっすぐな管路に対してせん断波が斜めに入射する場合、管路と地盤の軸方向変位は図aのように表される。また、管路に作用するせん断力は図bのように分布する。

管表面に作用するせん断応力は、ある値に達すると管周辺土がせん断破壊を生じて一定値となる。この現象を管と地盤の間に滑りが発生すると称している (図c参照)。この滑りが発生すると、管に作用するせん断応力が一定値に固定されるため、滑りを想定しない場合に比較して管に発生する歪みが相対的に小さくなる。滑り開始せん断応力度を τ_{cr} とすると、この値は土被り、管表面の摩擦特性 (滑りやすさ) に比例するものであり、概ね10kN/m²前後とされている。

97年版指針では、計算の簡易化を考慮し、レベル2地震動では直線管路全体が常に滑る (図d参照) と仮定して、管歪みを計算していた。しかしながら、もし全面的に滑りが発生しない場合にはより大きな管歪みが発生することになり、管歪みは厳密評価に対して過小に評価することになる。また、直管に接合する異形管の耐震性を検討する場合には、直線管路が全面的に滑ると仮定すると、異型管に対しては過大評価となる。

したがって、今回の指針改訂に際して、この滑りによる低減効果を合理的、定量的に評価するために、レベル2地震動の検討において滑り低減係数 $q^{1), 2)}$ を導入した。

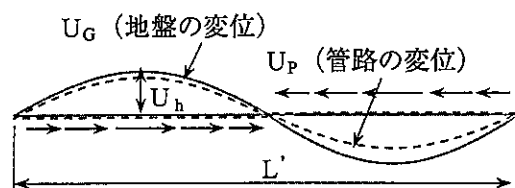


図 a - 管路と地盤の軸方向変位

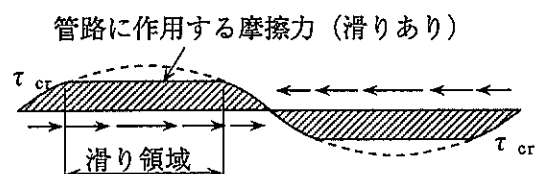


図 c - 管路に作用する摩擦力 (滑りあり)

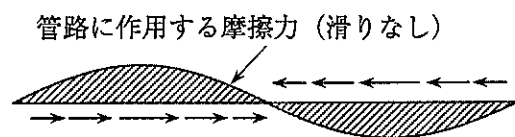


図 b - 管路に作用する摩擦力 (滑りなし)

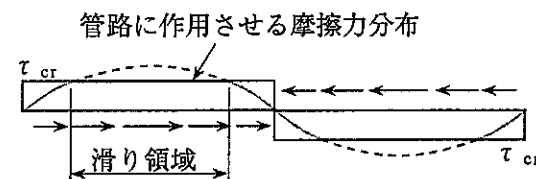


図 d - 管路に作用する摩擦力分布

参考文献

- 1) 小池 武：埋設パイプラインの地震時ひずみ評価、土木学会論文報告集 No.331、pp13-24、1983
- 2) 島村一訓、他：実大実験による埋設パイプラインの軸方向動的地盤ばね特性の研究、土木学会論文集 No.612/I-46、pp.55-56、1999年

参考：硬質塩化ビニル管（RR 管、RR ロング管）の場合

硬質塩化ビニル管は継手構造管路の一種である。塩化ビニル管・継手協会から示された耐震計算の例を以下に示す。

(1) 管体応力

地震動レベル 1、地震動レベル 2 のいずれの場合においても、管体応力は、管と地盤の滑りを考慮しないこととし、1)ダクタイル鋳鉄管の場合に記される次式によって計算すること。

$$\sigma'_{1L}(\chi) = \xi_1(\chi) \cdot \sigma_{1L} \quad \dots\dots\dots (3.2.8)$$

$$\sigma'_{1B}(\chi) = \xi_2(\chi) \cdot \sigma_{1B} \quad \dots\dots\dots (3.2.9)$$

$$\sigma'_{1\chi}(\chi) = \sqrt{\{\sigma'_{1L}(\chi)\}^2 + \{\sigma'_{1B}(\chi)\}^2} \quad \dots\dots\dots (3.2.10)$$

ここに、

$\sigma'_{1L}(\chi)$ 、 $\sigma'_{1B}(\chi)$: 伸縮可撓継手から管軸方向の距離 χ (m) の点における軸応力と曲げ応力 (Pa)

$\sigma'_{1\chi}(\chi)$: 伸縮可撓継手から管軸方向の距離 χ (m) の点における軸応力と曲げ応力の合成応力 (Pa)

$\xi_1(\chi)$ 、 $\xi_2(\chi)$: 埋設管路を連続とした場合の応力に対する埋設管路の伸縮可撓継手がある場合の応力の補正係数で、1)ダクタイル鋳鉄管の場合の参考 I を参照すること。

σ_{1L} 、 σ_{1B} : 埋設管路の軸応力と曲げ応力 (Pa)

$$\sigma_{1L} = \alpha_1 \cdot \frac{\pi U_h}{L} \cdot E \quad \dots\dots\dots (3.2.11)$$

$$\sigma_{1B} = \alpha_2 \cdot \frac{2\pi^2 D U_h}{L^2} \cdot E \quad \dots\dots\dots (3.2.12)$$

α_1 、 α_2 : 管軸方向・管軸直交方向の地盤変位の伝達係数で、1)ダクタイル鋳鉄管の場合に準拠する。地震動レベル 1 については、従来の耐震計算式と同様に、 $\{\sigma'_{1L}(\chi)\}^2$ に重要度に応じて 1.00～3.12 を乗じるのが望ましい。また、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、「3.1.8 地震動に伴う地盤歪み」の節に述べられている地盤不均一度係数： η を U_h に乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。

(2) 継手部の軸方向伸縮量

地震動レベル1、地震動レベル2のいずれの場合においても、継手部の軸方向伸縮量は、管と地盤の滑りを考慮しないこととし、1)ダクタイル鋳鉄管の場合に記される次式によって計算すること。

$$|u_j| = u_o \bar{u}_j \quad \dots\dots\dots (3.2.19)$$

ここに、

$|u_j|$: 管軸方向継手伸縮量 (m)

u_o : 無限連続梁とした場合の梁の管軸方向相対変位量 (m)

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

$$u_o = \alpha_1 U_a$$

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

$$\beta_1 (= \lambda_1 l) = \sqrt{\frac{K_{g1}}{EA}} \cdot l$$

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

EA : 伸び剛性 (N)

l : 継手間の長さ (m)

K_{g1} : 埋設管路の管軸方向の単位長さ当たりの地盤の剛性係数 (Pa)

L' : 見かけの波長 $\sqrt{2} \cdot L$ (m)

L : 波長 (m)

U_a : 地盤の管軸方向の水平変位振幅 (m)

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

U_h : 地表面からの深さ χ (m) における地盤の水平変位振幅 (m) (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、「3.1.8 地震動に伴う地盤歪み」の節に述べられている地盤不均一度係数： η を U_h に乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。)

(3) 継手の屈曲角度

地震動レベル1、地震動レベル2のいずれの場合においても、継手の屈曲角度は、1)ダクタイル鋳鉄管の場合に記される次式によって計算する。

$$\theta = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot l \cdot U_h}{L^2} \quad \dots\dots\dots (3.2.20)$$

ここに、

θ : 継手部の屈曲角度 (rad)

l : 継手間の長さ (m)

U_h : 地表面からの深さ χ (m) における地盤の水平変位振幅 (m) (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、「3.1.8 地震動に伴う地盤歪み」の節に述べられている地盤不均一度係数: η を U_h に乗じることで、地盤歪みの増幅を考慮する。)

L : 波長 (m)

参考：水道配水用ポリエチレン管の場合

水道配水用ポリエチレン管は一体構造管路の一種である。配水用ポリエチレンシステム協会から示された耐震計算の例を以下に示す。

・地震動レベル1、地震動レベル2のいずれの場合にも、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

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)

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、「3.1.8 地震動に伴う地盤歪み」の節に述べられている地盤不均一度係数: 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っては、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。

2. 地盤変状に対する耐震計算の例

「3.2.5 地盤変状に対する耐震計算」では、地盤の亀裂や側方流動等大きな地盤変状に対しては、伸縮可撓性のある継手の伸縮、若しくは管体の変形能力によって管路が地盤の動きに追従し得るかどうかにより安全性を照査している。

1) ダクタイル鋳鉄管の場合

(1) 管軸方向の地盤歪みに対する耐震計算

管路の継手部の全伸縮量が地盤の全変形量よりも大きく、地盤の変形を継手部の伸縮で吸収できるかどうかを次式により照査する。

$$\varepsilon_G \cdot L < n \cdot \beta \cdot L_p \quad \dots\dots\dots (3.2.25)$$

ここに、

- ε_G : 地盤歪み
- L : 地盤歪みが生じる範囲の距離 (m)
- n : 対象とする管路長内にある継手数 (個)
- β : 継手の伸縮量/管1本の長さ
- L_p : 管1本の長さ (m)

上記を満足できない場合、すなわち、対象管路の継手部がすべて伸びきった状態になる場合には、管路に作用する管と土との摩擦力が一つの継手の離脱防止力よりも小さいことを確認することで照査できる。

$$F_p > \pi \cdot D \cdot \alpha \cdot \tau \cdot L_a \quad \dots\dots\dots (3.2.26)$$

ここに、

- F_p : 継手の離脱防止力 (kN)
- D : 管の外径 (m)
- α : 摩擦力の低減係数 (「3.1.9 地盤の液状化と側方流動」表-3.1.8参照)
- τ : 管と地盤の摩擦力 (Pa)
- L_a : 一つの継手で引張ることができる最大管路延長 (m)

実際に、1995年兵庫県南部地震において液状化が発生した神戸市内のポートアイランド、六甲アイランド地域で、SⅡ形ダクタイル鋳鉄管を用いた鎖構造管路の挙動を地震後計測した結果によると、管軸方向の平均地盤歪みは最大1.7%で、その時の管路の伸び量は管路長の0.8%であり、管路の伸びは管軸方向の平均地盤歪みの約1/2であった。この管路では約50%の継手しか伸びきっておらず、残りの継手はさらに伸びる余裕があることが分かり、2%以上の地盤の歪みに対しても、これらの管路は十分耐え得ることが分かった。

(2) 地割れ等に対する耐震計算

図-3.2.2に管軸方向に地盤変位が発生した場合の変位吸収状況例を示す。

耐震継手ダクタイル鋳鉄管は3DkN (D:呼び径mm)の離脱防止性能を有しており、管と地盤の摩擦力 τ を0.01MPaとすると、一つの継手で100mの管と地盤の摩擦力に等しい引張力に耐えることになる。したがって、この場合の変位吸収量は管路100m分の変位吸収量に等しく、図-3.2.2の場合の地盤変位吸収量は、50mm/継手(管長の1%)×20箇所(100÷5m)より1mとなる。図-3.2.2の左側も同様の配管であれば、両側の管路200m分で2mの地盤変位を吸収できる。

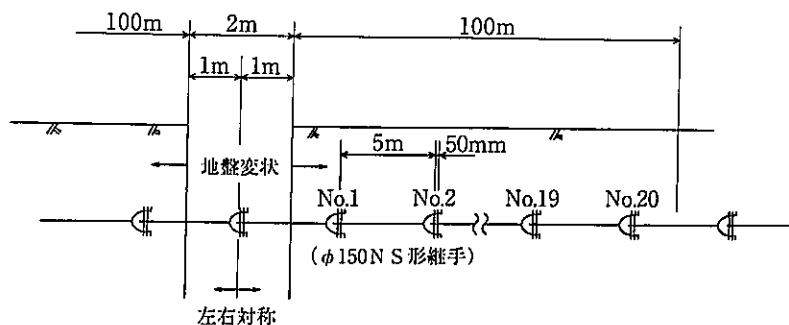


図-3.2.2 管軸方向の地盤変位吸収例

(3) 管軸直角方向の地盤歪みに対する耐震計算

図-3.2.3に側方流動や地盤沈下など管軸直角方向の地盤変位が発生した場合の変位吸収状況例（直管11本の場合）を示す。

$H_{\max}$ が想定される地盤変位量 $H_{G\max}$ より大きければ地盤変位を吸収可能である。

$$H_{\max} = L_p \cdot (\tan \theta + \tan 2\theta + \tan 3\theta + \cdots + \tan 3\theta + \tan 2\theta + \tan \theta) \quad \cdots \cdots (3.2.27)$$

ここに、

L_p : 管1本分の長さ (m)

θ : 継手1個当たりの最大屈曲角度 (°)

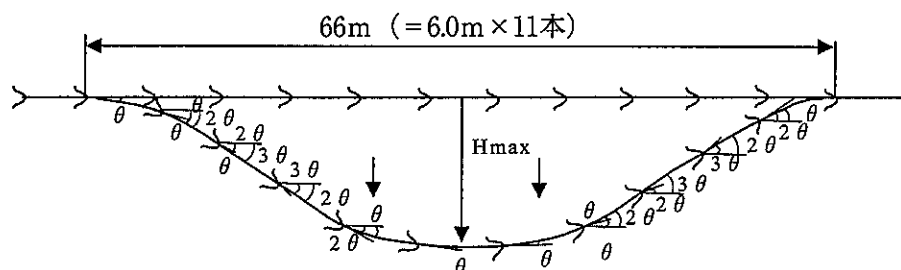


図-3.2.3 管軸直角方向の地盤変位吸収例

2) 鋼管の場合

ここでは、地盤の側方流動を入力条件として、埋設された溶接鋼管の管軸方向に変位成分を持つ計算モデルを取り上げ、鋼管に発生する最大歪みの計算方法を記述する。

地盤の側方変位が管軸方向に発生する場合、管に発生する最大歪みは次式により求めるものとする。

なお、直管の地震時歪と同様に、計算手続きの煩雑さを避けるため、管材の降伏歪みを超えると管歪みは直ちに降伏歪みに一致するとした。

$$\varepsilon_p = \frac{\tau_{cr}}{E \cdot t} \cdot L \quad \cdots \cdots (3.2.28)$$

ここに、

ε_p : 鋼管の軸歪み

τ_{cr} : 管と周辺地盤間で滑りが発生する時の滑り開始限界せん断応力 (kN/m²)

E : 鋼管の弾性係数 (kN/m²)

t : 鋼管の管厚 (m)

L : 変位領域の長さ (m)

参考：硬質塩化ビニル管の場合

地盤変位に対しては、RR ロング継手 + 耐震金具管路により対応することとする。耐震設計を以下に示す。

(1) 管軸方向地盤歪みに対する耐震計算

管路の継手部の全伸縮量が地盤の全変形量よりも大きく、地盤の変形を継手部の伸縮で吸収できるかどうかを1)ダクタイル鋳鉄管の場合に準拠した次式により照査する。通常のRR ロング継手管を採用しても上記を満足できない場合には、RR ロング継手2.5m 管を採用することにより、管路の継手部の全伸縮量（上式の右辺）を増して対応する。

$$\varepsilon_G \cdot L < n \cdot \beta \cdot L_p \quad \dots\dots\dots (3.2.25)$$

ここに、

- ε_G : 地盤歪み
- L : 地盤歪みが生じる範囲の距離 (m)
- n : 対象とする管路長内にある継手数 (個)
- β : 継手の伸縮量/管1本の長さ
- L_p : 管1本の長さ (m)

(2) 地割れに対する耐震計算

図-3.2.4に、地割れ状の地盤相対変位を想定した場合の耐震計算モデルを示す。RR ロング継手の耐震金具は、本図に示すように地割れ部を中心として左右5m 範囲の管路に軸力を伝達することができる離脱阻止力が付与されている。ただし、ここでは、継手に張出がありかつ分岐管があることを考慮して、管と地盤との摩擦力 τ を0.02MPa している。RR ロング継手1箇所当たりの伸縮量は $\pm 7.5\text{cm}$ であるので、5m 管を用いた場合に吸収可能な地割れ幅は $7.5 \times 3 = 22.5\text{cm}$ であり、2.5m 管を用いた場合には $7.5 \times 5 = 37.5\text{cm}$ である。

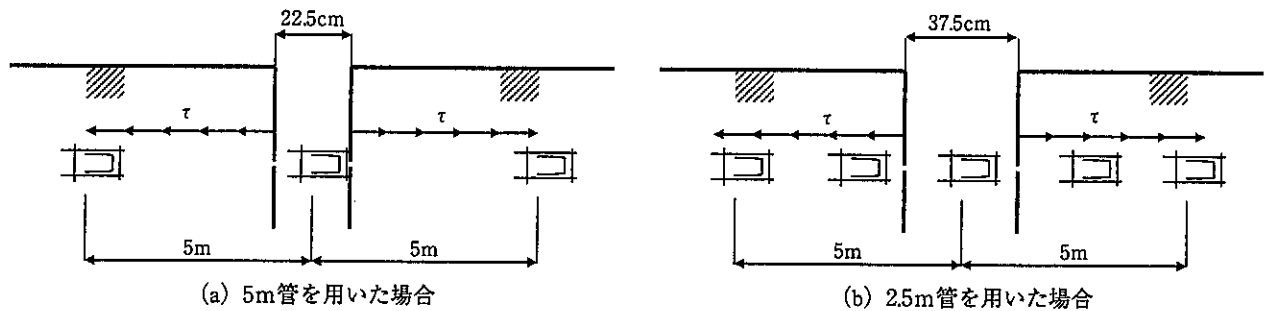


図-3.2.4 管軸方向の地盤相対変位吸収例

(3) 管軸直角方向の地盤歪みに対する耐震計算

1) ダクタイル鋳鉄管の場合に記される図-3.2.3に準拠し、側方流動や地盤沈下などの管軸直行方向の地盤変状が発生した場合の安全性を下式により照査する。予測される地盤変状の発生範囲を L_G 、地盤変状量を H_{Gmax} としたとき、式 (3.2.29) に示す条件であれば地盤変位を吸収可能である。図-3.2.3の例の場合、 L_p は直管11本分の全長である。

$$H_{max} > H_{Gmax} \quad \text{かつ} \quad n \cdot L_p < L_G \quad \dots\dots\dots (3.2.29)$$

$$H_{max} = L_p \cdot (\tan \theta + \tan 2\theta + \tan 3\theta + \dots + \tan 3\theta + \tan 2\theta + \tan \theta) \quad \dots\dots\dots (3.2.27)$$

ここに、

- L_p : 管1本の長さ (m)
- θ : 継手1箇所の最大屈曲角度 ($^\circ$) (許容屈曲角度 4° 以下とする)
- n : 管路変形範囲内の管の本数 (図-3.2.3の例では11本)

参考：水道配水用ポリエチレン管の場合

側方流動等大きな地盤変状に対する管体歪みは、次式によって計算する。

水道配水用ポリエチレン管は、可撓性があるため、管が地盤の歪みに追従するとして、伝達係数を1.0として計算する。

$$\varepsilon_P = \alpha \cdot \varepsilon_G$$

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）