

5-2

管厚計算

5-2-1 基本的な考え方

1 荷重

ダクタイル鉄管の管厚計算は実験結果から以下の荷重が同時に働くものとして計算される。

●図表5-2-1-1 管厚計算において用いる荷重

項目	荷重
内圧	静水圧(最高使用水圧)、水撃圧
外圧	土かぶりによる土圧、路面荷重による土圧

2 安全率

ダクタイル鉄管の管厚計算の安全率を以下に示す。

●図表5-2-1-2 安全率

項目	安全率
静水圧	2.5
水撃圧	2.0
土かぶりによる土圧	2.0
路面荷重による土圧	2.0

3 管厚の種類

●図表5-2-1-3 管厚の種類と記号および適用呼び径

種類	記号	適用呼び径
1種管	D1	75～2600
2種管	D2	400～2600
3種管	D3	75～2600
4種管	D4	600～2600
5種管 ^{注1}	D5	600～2600
PF種管 ^{注2}	DPF	300～2600
S種管	DS	50～1000
P種管 ^{注3}	DP	700～1500
E種管	DE	75～150

注1 JDPA G 1029など推進管にのみ規定されている。

注2 呼び径300～700はJDPA G 1029など推進管にのみ規定されている。

注3 2017年10月の規格改正により廃止になった。

備考 農業用水用ダクタイル鉄管の管種は、「JDPA G 1027-2016 農業用水用ダクタイル鋳鉄管」「JDPA G 1053 ALW形ダクタイル鉄管」を参照のこと。

4 管厚の種類の設定

「JWWA G 113-2015 水道用ダクタイル鋳鉄管」「JWWA G 114-2015 水道用ダクタイル鋳鉄異形管」の「資料」に管厚計算方法および直管の管厚の種類の設定表が掲載されている。図表5-2-1-4に示すような通常の設計条件下では、ダクタイル鉄管の管厚は内外圧に対して安全性が確保できるようになっている。しかし、高水圧、土かぶりが深い場合、均一でない地盤(片持ち張り状態、大きな不陸^{ふりく}など)の場合には計算による確認が必要である。

管厚の種類の設定の詳細および下水道、農業用水のダクタイル鉄管は、以下の技術資料を参照のこと。

- ・「ダクタイル鉄管管路 設計と施工 JDPA T23」(日本ダクタイル鉄管協会)
- ・「ダクタイル鉄管管路のてびき JDPA T26」(日本ダクタイル鉄管協会)
- ・「下水道用ダクタイル鉄管管路 設計と施工 JDPA T30」(日本ダクタイル鉄管協会)
- ・「JSWAS G-1-2016 下水道用ダクタイル鋳鉄管」(日本下水道協会)
- ・「農業用水用ダクタイル鉄管管路 設計と施工 JDPA T32」(日本ダクタイル鉄管協会)
- ・「ALW形ダクタイル鉄管 JDPA T60」(日本ダクタイル鉄管協会)

- ・「JDKPA G 1027-2016 農業用水用ダクタイル鋳鉄管」(日本ダクタイル鉄管協会)
- ・「土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計『パイプライン』」(農業農村工学会、平成21年3月)

●図表5-2-1-4 管厚の種類の選定表

呼び径	土かぶり (m)											
	1.2				1.8				3			
	静水圧 (MPa)				静水圧 (MPa)				静水圧 (MPa)			
	1.5	1	0.75	0.45	1.5	1	0.75	0.45	1.5	1	0.75	0.45
50~300	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
350	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
400	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
450	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
500	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	3	3
600	3	4	4	4	3	4	4	4	2	4	4	4
700	3	4	4	4	3	3	4	4	3	3	3	4
800	3	4	4	4	3	4	4	4	2	3	4	4
900	3	4	4	4	3	4	4	4	2	3	4	4
1000	3	4	4	4	3	4	4	4	2	3	4	4

備考1 設計条件は下表により、数値は管厚の種類(1種管、2種管、3種管、4種管)を示す。

項目	設計条件
布設状態	平底溝
管底支持角	60°
路面荷重	245kNトラック2台並行同時通過
水撃圧	0.55MPa
土の単位体積重量	18kN/m ³

備考2 S種管は呼び径350、450を除き、本表の全ての条件で使用できる。

備考3 E種管(呼び径75~150)の設計水圧は1.3MPa以下となっており、本表の静水圧0.75MPa以下では全ての条件で使用できる。

備考4 呼び径1100~2600、その他の条件はJWWA G 113-2015、JWWA G 114-2015を参照のこと。

5-2-2 管厚計算

① 内圧によって発生する引張応力

$$\sigma_t = \sigma_{ts} + \sigma_{td} = \frac{(P_s + P_d)d}{2t} \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-2-1}$$

$$\sigma_{ts} = \frac{P_s \cdot d}{2t}$$

$$\sigma_{td} = \frac{P_d \cdot d}{2t}$$

- ここに、 σ_t : 内圧によって発生する引張応力
 σ_{ts} : 静水圧によって発生する引張応力
 σ_{td} : 水撃圧によって発生する引張応力
 P_s : 静水圧
 P_d : 水撃圧
 d : 管内径
 t : 正味管厚

② 外圧によって発生する曲げ応力

$$\sigma_b = \frac{M_f + M_t}{Z} = \frac{6(M_f + M_t)}{t^2} \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-2-2}$$

- ここに、 σ_b : 外圧によって発生する曲げ応力
 M_f : 土かぶりによる土圧によって発生する曲げモーメント
 M_t : 路面荷重により発生する曲げモーメント
 Z : 断面係数 $\left(\frac{b \cdot t^2}{6} \right)$
 b : 管長 (単位長さで考えれば、 $b=1$)

土かぶりによる土圧 W_f は、土かぶりが浅い場合は垂直公式を用いてもよいが、一般には土かぶりが深い場合は実際とよく合致するヤンセン公式を用いる。

土かぶりによる土圧 W_f によって発生する曲げモーメント M_f 、路面荷重により発生する曲げモーメント M_t は、次の式による。

$$M_f = K_f \cdot W_f \cdot R^2 \dots\dots\dots \text{式 5-2-2-3}$$

$$M_t = K_t \cdot W_t \cdot R^2 \dots\dots\dots \text{式 5-2-2-4}$$

従って、単位長さ当たりの曲げ応力は、式5-2-2-5で表される。

$$\sigma_b = \frac{6(K_f \cdot W_f + K_t \cdot W_t)R^2}{t^2} \dots\dots\dots \text{式 5-2-2-5}$$

管厚計算に当たっては、管頂および管底の両方について計算し、いずれか大きい方を採用する。

ここに、 W_f : 土かぶりによる土圧 (「5-2-6 土かぶりによる土圧」参照)

W_t : 路面荷重による土圧 (「5-2-7 路面荷重による土圧」参照)

K_f : 土かぶりによる曲げモーメント係数

K_t : 路面荷重による曲げモーメント係数

R : 管半径

3 合成応力

合成応力を求めるためには、曲げ応力 σ_b を引張応力に換算するために0.7を乗じる。この合成応力が許容応力 σ_z を満足する必要がある。

$$\sigma_t + 0.7 \sigma_b = \sigma_z \dots\dots\dots \text{式 5-2-2-6}$$

4 管厚計算式

$$\sigma_t = \sigma_{ts} + \sigma_{td}$$

さらに、 静水圧に対する安全率	2.5
水撃圧に対する安全率	2.0
土かぶりによる土圧に対する安全率	2.0
路面荷重による土圧安全率	2.0
管材の引張強さ	S

とすると、

$$2.5 \sigma_{ts} + 2.0 \sigma_{td} + 1.4 \sigma_b = S \dots\dots\dots \text{式 5-2-2-7}$$

従って、

$$2.5 \frac{P_s \cdot d}{2t} + 2.0 \frac{P_d \cdot d}{2t} + 1.4 \frac{6(K_f \cdot W_f + K_t \cdot W_t)R^2}{t^2} = S \dots\dots\dots \text{式 5-2-2-8}$$

ここで、 $R = \frac{D_m}{2}$ とおくと、

$$S \cdot t^2 - (1.25P_s + P_d) d \cdot t - 2.1 (K_f \cdot W_f + K_t \cdot W_t) D_m^2 = 0 \dots\dots\dots \text{式 5-2-2-9}$$

ここに、 D_m : 管厚中心直径

ここで、 $D_m \equiv D$ (呼び径) とおいて、 t について解くと式5-2-2-10になる。

$$t = \frac{(1.25P_s + P_d) + \sqrt{(1.25P_s + P_d)^2 + 8.4 (K_f \cdot W_f + K_t \cdot W_t) S}}{2S} D \dots \text{式 5-2-2-10}$$

となる。

ここに、 t : 正味管厚 (mm)

P_s : 静水圧 (MPa)

P_d : 水撃圧 (MPa)

K_f : 土かぶりによる曲げモーメント係数

K_t : 路面荷重による曲げモーメント係数

W_f : 土かぶりによる土圧 (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)

D : 管の呼び径 (mm)

式5-2-2-10で計算した管厚は正味管厚であるので、これに腐食に対する余裕2mmを加算し、これらに対して鑄造上の余裕10%または1mmを加算すると計算管厚は、式5-2-2-11により求められる。

$$\begin{aligned} t+2 \geq 10\text{mm} \text{ の場合 } & T_1 = (t+2) \times 1.1 \\ t+2 < 10\text{mm} \text{ の場合 } & T_1 = (t+2) + 1 \end{aligned} \dots\dots\dots \text{式 5-2-2-11}$$

ここに、 t : 式5-2-2-10より求めた正味管厚 (mm)

T_1 : 式5-2-2-11より求めた計算管厚 (mm)

計算管厚 T_1 より、規格管厚 T を選定する。

● 図表5-2-2-1 管底支持角により定まる係数 K_f

位置	管底支持角 (2θ)					
	0°	40°	60°	90°	120°	180°
管頂	145 × 10 ⁻⁶	140 × 10 ⁻⁶	132 × 10 ⁻⁶	121 × 10 ⁻⁶	108 × 10 ⁻⁶	96 × 10 ⁻⁶
管底	433 × 10 ⁻⁶	281 × 10 ⁻⁶	223 × 10 ⁻⁶	160 × 10 ⁻⁶	122 × 10 ⁻⁶	96 × 10 ⁻⁶

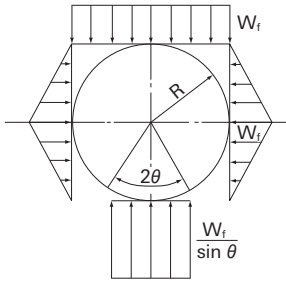
● 図表5-2-2-2 路面荷重により定まる係数 K_t

項目	K_t
管頂	76 × 10 ⁻⁶
管底	11 × 10 ⁻⁶

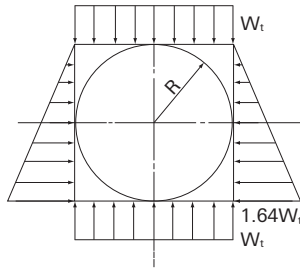
●図表5-2-2-3 土圧分布

土かぶりによる土圧

路面荷重による土圧



2θ : 管底支持角



5-2-3 たわみ量の計算

土かぶりと路面荷重による土圧による垂直たわみ量の計算式を以下に示す。

① 土かぶりによる土圧による垂直たわみ量

$$\delta_f = k_f \frac{W_f \cdot R^4}{E \cdot I} \dots\dots\dots \text{式5-2-3-1}$$

ここに、 k_f : 土かぶりによる土圧によるたわみ係数

δ_f : 土かぶりによる土圧による垂直たわみ量(mm)

W_f : 土かぶりによる土圧 (kN/m²)

R : 管半径 (mm)

E : ダクタイル鉄管の弾性係数 (= 1.6 × 10⁵N/mm²)

I : 断面2次モーメント (mm⁴)

$$I = \frac{t_2^3}{12} \quad (\text{単位長さで考えた場合})$$

t_2 : たわみ計算管厚 (mm)

t_2 は規格管厚 T より製造上の余裕(10%または1mm)を差し引いた管厚である。

$$T - 1 \geq 10\text{mm} \text{ の場合 } t_2 = T / 1.1 \dots\dots\dots \text{式5-2-3-2}$$

$$T - 1 < 10\text{mm} \text{ の場合 } t_2 = T - 1$$

● 図表5-2-3-1 管底支持角により定まる係数 k_f

管底支持角(2θ)					
0°	40°	60°	90°	120°	180°
122×10^{-6}	111×10^{-6}	100×10^{-6}	84×10^{-6}	70×10^{-6}	58×10^{-6}

② 路面荷重による土圧による垂直たわみ量

$$\delta_t = k_t \frac{W_t \cdot R^4}{E \cdot I} \dots\dots\dots \text{式5-2-3-3}$$

ここに、 δ_t : 路面荷重による土圧による垂直たわみ量(mm)

W_t : 路面荷重による土圧(kN/m²)

k_t : 路面荷重による土圧によるたわみ係数(= 30×10^{-6})

③ 合計たわみ量

$$\delta = \delta_f + \delta_t \dots\dots\dots \text{式5-2-3-4}$$

ここに、 δ : 合計たわみ量(mm)

④ たわみ率

$$\delta_r = \frac{\delta}{D} \times 100 \dots\dots\dots \text{式5-2-3-5}$$

ここに、 δ_r : たわみ率(%)

D : 呼び径(mm)

設計たわみ率 δ_r は、モルタルライニングのクラック発生などを考慮して一般に3%以下とする。

⑤ 実測値との比較

たわみ量の実測値と計算値との比較を図表5-2-3-2に示す(実験状況は図表5-2-6-4を参照)。

● 図表5-2-3-2 たわみ量の実測値と計算値との比較

呼び径	管厚(mm)	基礎	土かぶり(m)	突固め	管底支持角(2θ)	実測値(mm)	計算値(mm)
1350	17.5	平底溝	2	なし	0	14.93	14.7
				あり	60	11.17	11.3

Chapter 1 Chapter 2 Chapter 3 Chapter 4 Chapter 5 Chapter 6 Chapter 7 Appendix

⑥ たわみ量と管底支持角

東京都の呼び径1600および名古屋市の呼び径1800のダクタイル鉄管管路のたわみ量実測値から管底支持角を推定した。90°基礎の場合は120°～180°、平底溝の場合は60°以上、平底溝で突き固めた場合はほぼ120°の管底支持角が得られる。

●図表5-2-3-3 たわみ量の実測値と管底支持角

呼び径	管厚 ^{注1} (mm)	土質	基礎	土かぶり (m)	突固め	たわみ 量実 測値 (mm)	たわみ量計算値(mm)				
							管底支持角(2θ)				
							0°	60°	90°	120°	180°
1600	25.0 (15)	関東 ローム	90°	2.2	なし	3.0	6.5	5.3	4.5	3.7	3.1
				3.2	なし	3.7	8.4	6.9	5.8	4.8	4.0
				3.4	なし	4.8	8.7	7.2	6.0	5.0	4.2
		シルト	平底溝	2.1	なし	4.6	6.3	5.1	4.3	3.6	2.9
1800	22.5 (12)	粘土	平底溝	2.5	あり	10.4	17.7	15.5	—	10.2	8.4
				4.0	あり	14.9	26.1	21.4	—	15.0	12.4
1650	22.5 (12)	シルト	平底溝 管頂ま で砂を 置換え	2.1	なし	5.3	10.4	8.6	7.2	6.0	5.0
				3.2	なし	9.1	15.0	12.3	10.3	8.6	7.1
2200	28.0 (15)	シルト	平底溝 管底突 固め	2.0	なし	10.5	18.3	15.0	12.6	10.5	8.7
				3.6	なし	16.4	28.4	23.3	19.6	16.3	13.5

注1 ()内はライニング厚。

5-2-4 構造計算

管の構造計算には応力計算管厚、たわみ計算管厚を用いる。

① 応力に対する検証

応力計算管厚 t_1 は規格管厚 T から铸造上の余裕および腐食に対する余裕を引いたものとする。

$$\begin{aligned}
 T-1 \geq 10\text{mm} \text{ の場合} \quad t_1 &= T / 1.1 - 2 \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-4-1} \\
 T-1 < 10\text{mm} \text{ の場合} \quad t_1 &= T - 1 - 2
 \end{aligned}$$

ここに、 T : 規格管厚 (mm)

t_1 : 応力計算管厚 (mm)

応力計算管厚 t_1 を用いて、式5-2-4-2～4より合成応力を求めて、管材の引張強さと比較して応力に対する安全性を検証する。

$$\sigma_z = 2.5\sigma_{ts} + 2.0\sigma_{td} + 1.4\sigma_b < S \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-4-2}$$

ここに、 σ_{ts} : 静水圧によって発生する引張応力 (N/mm²)

σ_{td} : 水撃圧によって発生する引張応力 (N/mm²)

σ_b : 外圧によって発生する曲げ応力 (N/mm²)

S : 管材の引張強さ (= 420N/mm²)

② たわみ量に対する検証

たわみ計算管厚 t_2 は規格管厚 T から鑄造上の余裕を引いたものとする。

$$T \geq 10\text{mm} \text{ の場合 } t_2 = T / 1.1 \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-4-3}$$

$$T < 10\text{mm} \text{ の場合 } t_2 = T - 1$$

たわみ量計算管厚 t_2 を用いて、式5-2-3-1～4より合計たわみ量よりたわみ率 δ_r を求める。設計たわみ率3%と比較してたわみ率に対する安全性を検証する。

$$\delta_r = \frac{\delta}{D} \times 100 \leq 3\% \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-4-4}$$

ここに、 δ_r : たわみ率

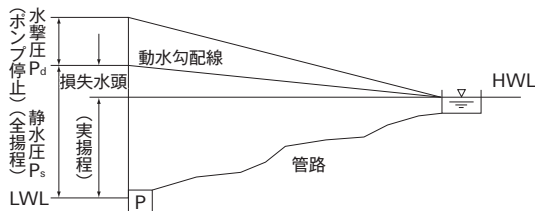
δ : 合計たわみ量 (mm)

D : 呼び径 (mm)

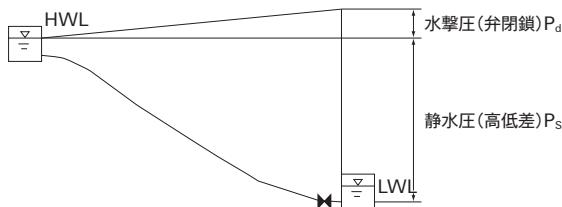
5-2-5 静水圧 (最大使用圧力) と水撃圧

ポンプ加圧式の場合の静水圧と水撃圧について以下に示す。

● 図表5-2-5-1 ポンプ加圧式の場合の静水圧と水撃圧



●図表5-2-5-2 自然流下式の場合の静水圧と水撃圧



●図表5-2-5-3 静水圧と水撃圧の基準

項目	基準
静水圧 P_s	ポンプ加圧式の場合は全揚程の水圧とする
	自然流下の場合はHWLとLWLの高低差
水撃圧 P_d	配水管から給水管に分岐する箇所での配水管の最大静水圧が740kPa (0.74MPa) ^{注1} を超えないこと
	ダクタイル鉄管 450～550kPa (0.45～0.55 MPa) ^{注2} 硬質塩化ビニル管 250kPa (0.25MPa) ^{注2}

注1 「水道施設の技術的基準を定める省令」より

注2 値は『水道施設設計指針 2012』（日本水道協会）より

5-2-6 土かぶりによる土圧

1 土圧の計算式

土かぶりによる土圧の計算式としては図表5-2-6-1に示すようにヤンセン公式が実測値とよく合致する。ただし、土かぶりが2m以下の場合、垂直公式でも大差なく、計算も簡単であるので垂直公式がよく使用されている。土かぶりが2mを超える場合は、土かぶり2m時の垂直公式の値とヤンセン公式で求めた値の大きい方を採用する。土留めに矢板を使用する場合は垂直公式を用いる。

① 垂直公式

$$W_f = \gamma \cdot H \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-6-1}$$

ここに、 W_f : 垂直土圧 (kN/m²)

γ : 土の単位体積重量 (kN/m³)

H : 土かぶり (m)

② ヤンセン公式

$$W_f = \frac{\gamma}{2K \cdot \tan \phi} \left(1 - e^{-2K \cdot \tan \phi \cdot \frac{H}{B}} \right) \cdot B \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-6-2}$$

$$K = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-6-3}$$

ここに、 W_f : 土かぶりによる土圧 (kN/m^2)

γ : 土の単位体積重量 (kN/m^3)

K : ランキン (Rankine) 係数

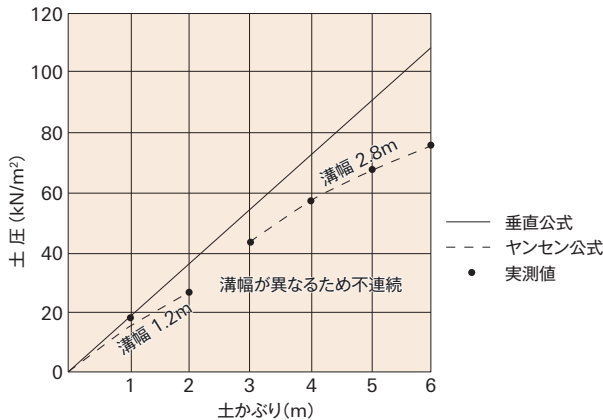
ϕ : 土の内部摩擦角 ($^\circ$)

H : 土かぶり (m)

B : 溝幅 (m)

e : 自然対数の底

●図表5-2-6-1 土かぶり6mの実験における実測値と計算値



備考 ダクタイル鉄管呼び径700を土かぶり4mの溝に布設。

土かぶり2mに達したときに矢板を引き抜き、溝幅を1.2mから2.8mに拡大し、地上2mまで盛土を行った。

2 土の単位体積重量と内部摩擦角

式5-2-6-1～3における土の単位体積重量 γ と土の内部摩擦角 ϕ の例を以下に示す。

●図表5-2-6-2 土の単位体積重量と内部摩擦角

土質	単位体積重量 γ (kN/m ³)	内部摩擦角 ϕ (°)
土砂(乾燥したもの)	14	35~40
土砂(自然の湿り)	16	45
土砂(充分湿ったもの)	18	27
粘土質土砂(乾燥したもの)	15	40~46
粘土質土砂(湿ったもの)	19	20~25
粘土(乾燥したもの)	16	40~50
粘土(湿ったもの)	20	20~25
砂(乾燥したもの)	15.8~16.5	30~35
砂(自然の湿り)	18	40
砂(充分湿ったもの)	20	25
砂利(乾燥したもの)	18~18.5	35~40
砂利(濡れたもの)	18.6	25
玉石(角立ったもの)	18	45
玉石(丸みのもの)	18	30

東京工学研究会編『設計施工土木工学公式便覧』(鉄道図書局)より

土かぶり1m、溝幅1m、土の単位体積重量18kN/m³などの条件で土かぶりが浅い場合は、内部摩擦角は土かぶりによる土圧には大きく影響しない。

●図表5-2-6-3 内部摩擦角と土圧の関係

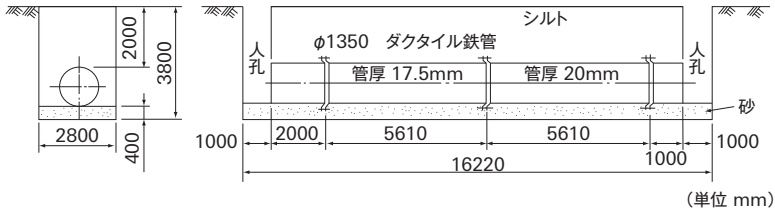
内部摩擦角 ϕ (°)	土かぶりによる土圧 Wf (kN/m ²)
10	15.4
20	15.1
30	15.0
40	15.1
50	15.4

3 埋戻しによる管体発生応力

埋戻土によって、管体各部にそれぞれ異なる応力を発生するが、最大応力は管中央部円周方向に生じる。円周方向応力と管軸方向応力を比較すると前者が大きく、また、円周方向応力の中では管中央部かんそくが大きい。中でも、管底が最大である。管側

の土を埋め戻すときに突き固めた場合と突き固めない場合では、突き固めない場合の方が大きい。埋設実験の状況と実験結果を示す。

● 図表5-2-6-4 埋設実験状況

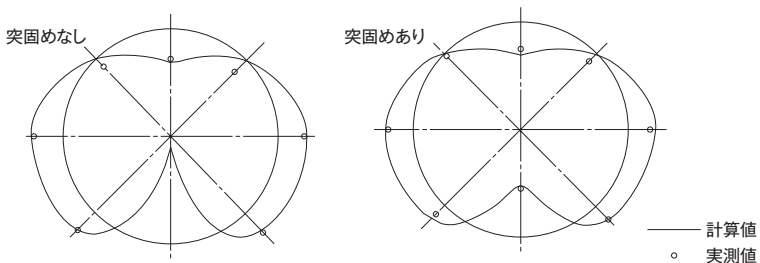


● 図表5-2-6-5 管中央部発生応力および曲げモーメント (呼び径1350、管厚17.5mm)

測定箇所	突固めなし		突固めあり	
	応力 (N/mm ²)	曲げモーメント (kN・m)	応力 (N/mm ²)	曲げモーメント (kN・m)
上部	42.4	2.17	37.4	1.91
斜右上部	19.3	0.99	15.7	0.80
右側部	38.0	1.94	30.7	1.57
斜右下部	33.3	1.71	26.1	1.33
下部	137.3	7.01	69.3	3.54
斜左下部	35.1	1.79	15.6	0.79
左側部	35.0	1.78	35.2	1.80
斜左上部	17.3	0.89	7.0	0.35

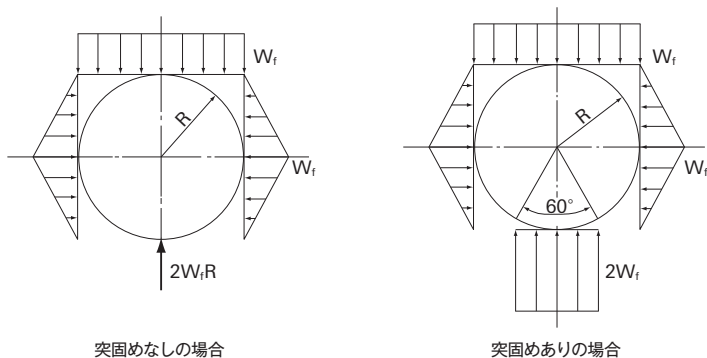
図表5-2-6-5を線図化したものが、図表5-2-6-6であるが、計算値と実測値が合致しているのがよく分かる。

● 図表5-2-6-6 埋戻土による曲げモーメント線図 (呼び径1350、管厚17.5mm、土かぶり2m)



図表5-2-6-7は計算値に用いた土圧分布であるが、突固めなしの場合には、点支持に近いことが分かる。

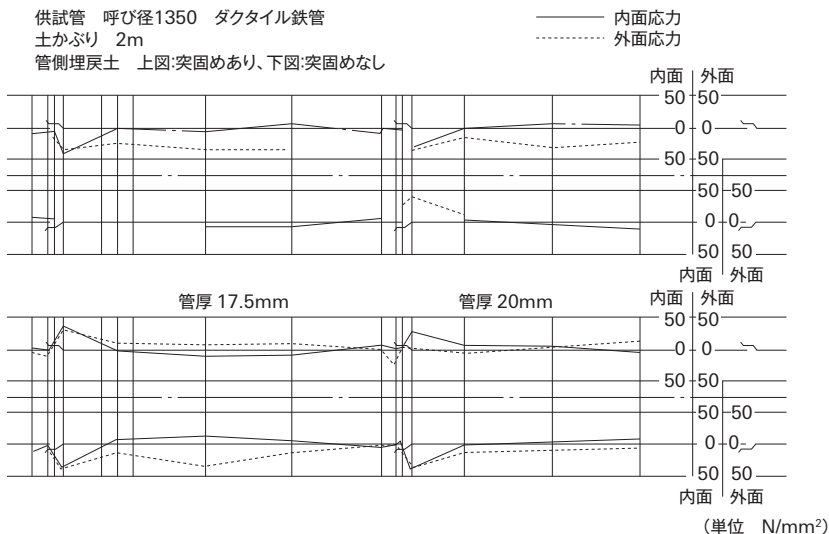
●図表5-2-6-7 計算値に用いた埋戻土による土圧分布



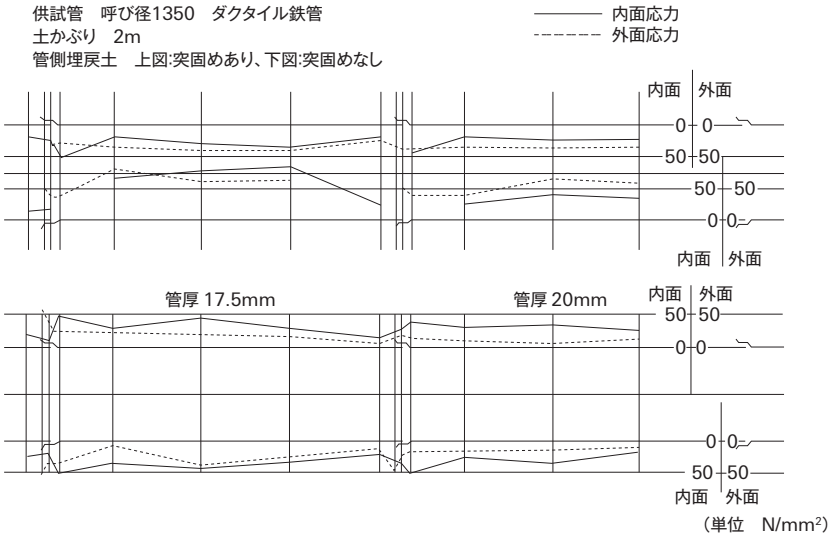
管軸方向応力(図表5-2-6-8)と円周方向応力(図表5-2-6-9)を比較すると管軸方向応力の発生が小さいことが分かる。また円周方向応力は管中央部の発生応力が大きいことが分かる。

管軸方向に見た管軸方向応力と円周方向応力のグラフを以下に示す。

●図表5-2-6-8 管軸方向応力



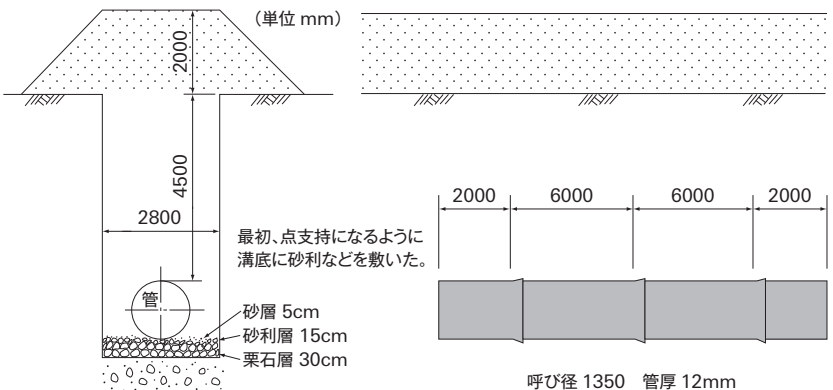
● 図表5-2-6-9 円周方向応力



4 土かぶりが深い場合の管体発生応力

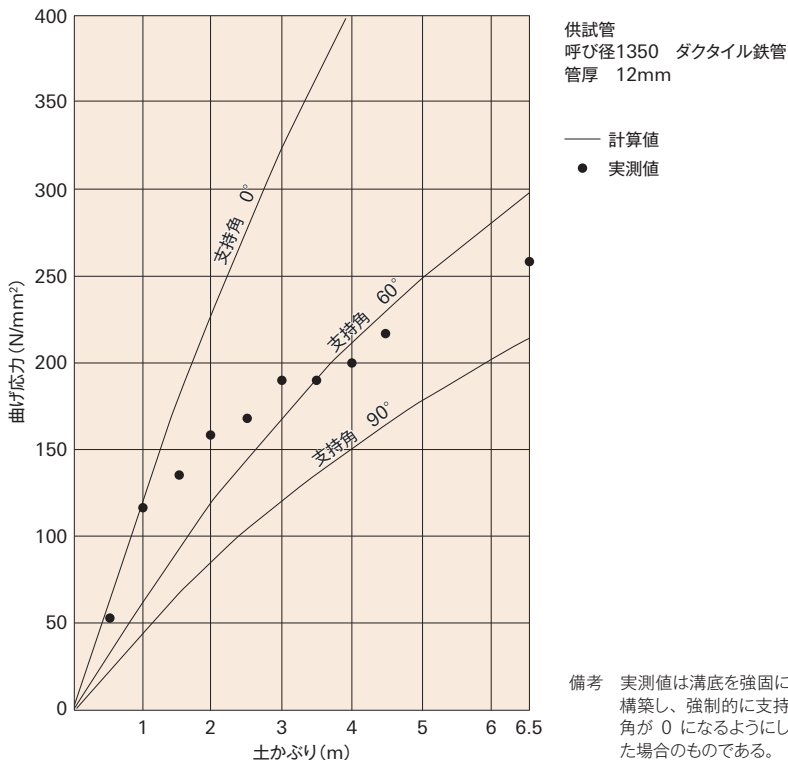
最初、点支持になるように溝底に砂層、砂利層、栗石層を形成し、硬いものとした。最大応力は管底に発生し、土かぶりが深くなると管体発生応力は大きくなるが、管の変形により管底支持角が増加し、土かぶり4mでは、管底支持角60°を上回った。

● 図表5-2-6-10 土かぶりが深い場合の管底支持角の確認実験状況 呼び径1350



Chapter 1 Chapter 2 Chapter 3 Chapter 4 Chapter 5 Chapter 6 Chapter 7 Appendix

●図表5-2-6-11 土かぶりが多い場合の管底支持角の変化



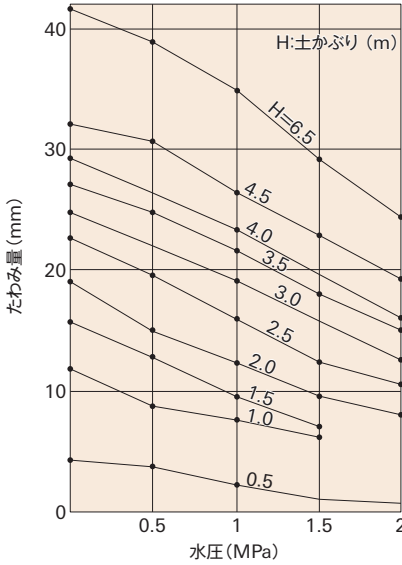
5 埋戻しと水圧負荷による管体発生応力

管を埋設して土かぶりによる土圧がかかると、管の垂直方向の径が減少して管体に曲げ応力が発生する。そこに水圧が内面から働いた場合には、管を真円に戻そうとする力が働き、図表5-2-6-12のように管のたわみ量が復元し、曲げ応力は緩和されるが、水圧による引張応力は増加する。図表5-2-6-13にその実験の結果を示す。

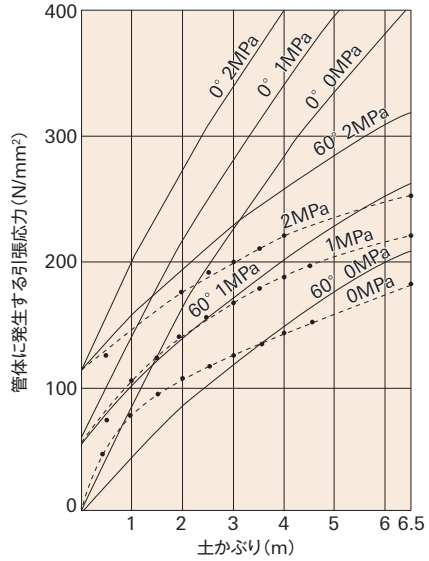
実測値水圧1MPa、2MPaのグラフから管底支持角60°の計算値よりも発生応力が小さいことが分かる。

実験は溝底を強固にし、管底支持角が最初は0°であったが、次第に増加し、最終的には管底支持角60°の計算値よりも下回ったので、計算上の管底支持角を60°としてもよいことを示唆している。

●図表5-2-6-12 水圧負荷による
たわみ量の復元(実測値)
(呼び径1350、管厚12mm)



●図表5-2-6-13 土圧と水圧負荷による
管体発生応力
(呼び径1350、管厚12mm)



●--- 実測値 ——— 計算値
備考 数値は管底支持角(°)と水圧(MPa)を示す。

5-2-7 路面荷重による土圧

1 土圧の計算式

トラックの車輪などの集中荷重が地表面に作用し、埋設管に荷重が伝達されるような場合は、下記のブーシネスク式を用いる。

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{H^3}{H_s^5} P \\
 &= \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{H^3}{(H^2 + r^2)^{5/2}} P \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-7-1} \\
 &= \frac{3}{2\pi} \cdot \frac{H^3}{(H^2 + X^2 + Z^2)^{5/2}} P
 \end{aligned}$$

ここに、 p : 地下の任意のA'点における垂直圧力(kN/m²)

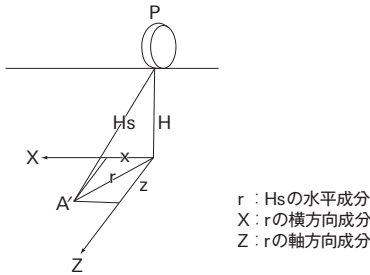
P : 集中荷重(kN)

Chapter 1 Chapter 2 Chapter 3 Chapter 4 Chapter 5 Chapter 6 Chapter 7 Appendix

H : A' 点の地表面下の深さ (m)

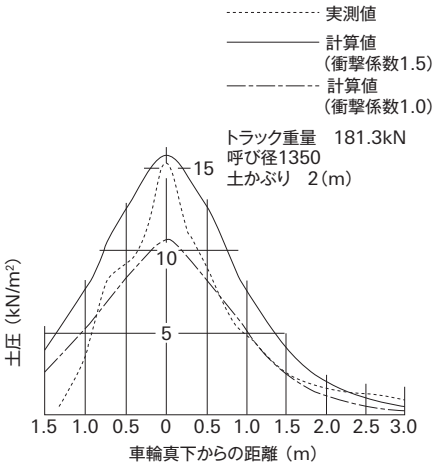
Hs : Pの作用点から A' 点までの傾斜した距離 (m)

●図表5-2-7-1 集中荷重(路面荷重)Pの成分

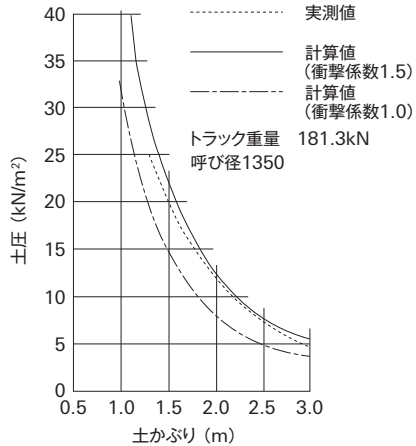


埋設実験での実測値とブーシネスク式による計算値を図表5-2-7-2、3に示す。車輪直下の土圧は、衝撃係数を1.5とした場合に計算値とよく合っている。

●図表5-2-7-2 管頂線上の土圧分布



●図表5-2-7-3 各土かぶりにおける車輪直下の土圧



ブーシネスク式で

$$\frac{3}{2\pi} \cdot \frac{H^3}{(H^2 + X^2 + Z^2)^{5/2}} = \phi \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-7-2}$$

とおくと、 $p = \phi \cdot P$

ただし、この式によって求まるのは地下の任意の一点における圧力である。そのため管に作用する全体の荷重を求めるには、管上の p を積算しなければならない。

厳密には積分して求めねばならないが、非常に複雑であるため管をいくつかの正

方形で区分し、その中央に作用する圧力 p ×正方形面積を正方形全体にかかる荷重とし、正方形にかかる荷重を全部加え合わせて全体にかかる荷重とする方法をとる。

以上より、路面荷重による土圧は、次式により求める。

$$W_t = 1.5a \cdot P \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-7-3}$$

$$P = \frac{4}{5} \cdot \frac{1}{2} U \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-7-4}$$

$$a = \frac{\Sigma(\phi \cdot a)}{\Sigma a} \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-7-5}$$

ここに、 W_t : 路面荷重による土圧 (kN/m²)

P : トラック1後輪荷重 (kN)

U : トラック重量 (kN)

1.5 : 衝撃係数

a : 呼び径、土かぶりにより定まる係数 (m⁻²)

a : 正方形面積 (m²)

一般に、 a を求めるのに図表5-2-7-4のような線図を利用すれば便利であるが、次式によって求めることもできる。

$$F(A, B, H) = 0.25 - \frac{1}{2\pi} \left\{ \sin^{-1} \left(H \sqrt{\frac{A^2 + B^2 + H^2}{(A^2 + H^2)(B^2 + H^2)}} \right) - \frac{A \cdot B \cdot H}{\sqrt{A^2 + B^2 + H^2}} \left(\frac{1}{A^2 + H^2} + \frac{1}{B^2 + H^2} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-7-6}$$

[トラック2台の場合]

$$S_h = F(3.3, B, H) + F(1.5, B, H) + F(0.5, B, H) - F(1.3, B, H)$$

$$a = \frac{4S_h}{2D} \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-7-7}$$

[トラック1台の場合]

$$S_h = F(0.1, B, H) + F(1.9, B, H)$$

$$a = \frac{4S_h}{2D} \quad \dots\dots\dots \text{式5-2-7-8}$$

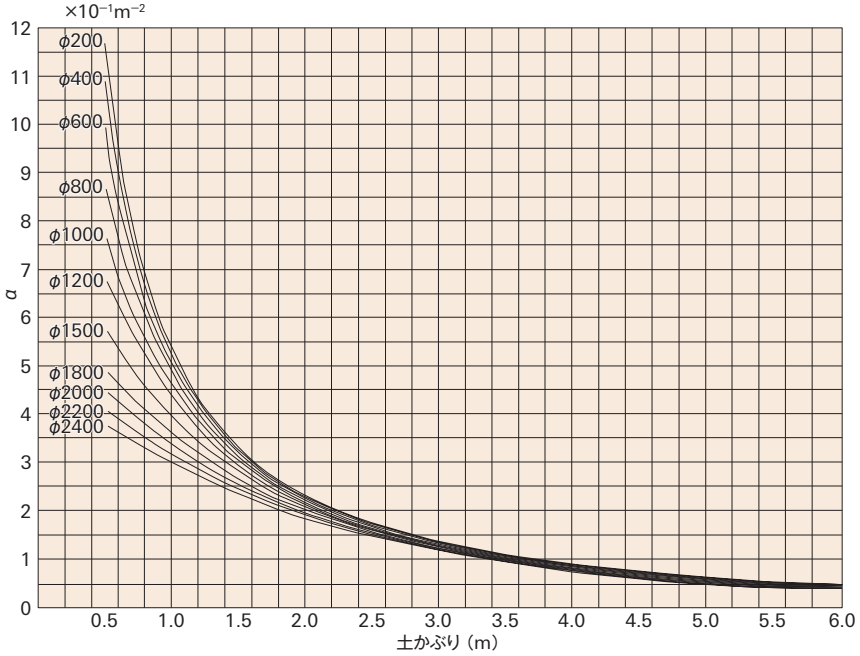
ここに、 D : 呼び径 (m)

H : 土かぶり (m)

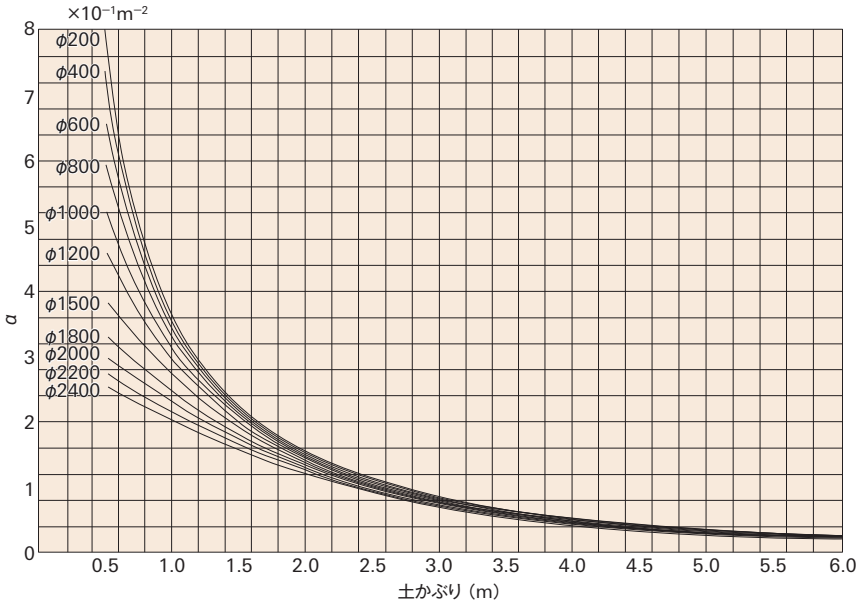
A : 管軸方向長さ (m)

B : $D/2$ (m)

● 図表5-2-7-4 トラック荷重による土圧計算のための係数 α の線図(トラック2台の場合)



● 図表5-2-7-5 トラック荷重による土圧計算のための係数 α の線図(トラック1台の場合)



2 路面荷重による管体発生応力

① 呼び径1350、土かぶり2mの場合

平底溝に呼び径1350(管厚17.5mm)のダクティル鉄管を土かぶり2mで埋設しトラックを通過させて管体の発生応力を測定した。

●図表5-2-7-6 トラック荷重の実測条件

突固め	トラック荷重(kN)
なし	181
あり	167

トラック通過に伴う管体発生応力は、トラックの位置により大きく異なり、場合によっては引張と圧縮が逆になることもある。トラックが通過する間に生じた最大応力を下記に示す。

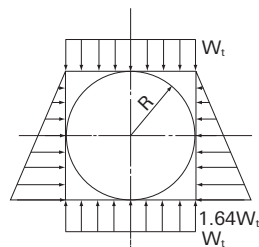
●図表5-2-7-7 トラック通過による管中央部最大応力

(単位: N/mm²)

測定位置	突固めなし	突固めあり
上	3.43	3.14
斜め上	1.76	1.86
横	2.94	2.74
斜め下	0.59	0.39
下	0.49	0.29

- ・ トラック通過による管体発生応力は小さい(埋戻土による発生応力は最大140N/mm²)。
- ・ 最大発生応力は管頂に生じる。従って埋戻土によるものとトラックによるものと同時に作用しても最大応力の上昇はほとんどない。
- ・ 突固めによる発生応力の差異はほとんどない(埋戻土による発生応力は突固めの有無により約2倍の違いがあった)。
- ・ 図表5-2-7-8に示す土圧分布が実際とよく合うことが分かった。

●図表5-2-7-8 トラック通過時の土圧分布



●図表5-2-7-9 トラック通過により管中央部に発生する曲げモーメント (単位:kN・m)

測定位置	実測値	計算値
上	0.39	0.36
斜め上	0.13	0.11
横	0.18	0.20
斜め下	0.14	0.11
下	0.03	0.05

② 呼び径300、土かぶり0.6mの場合

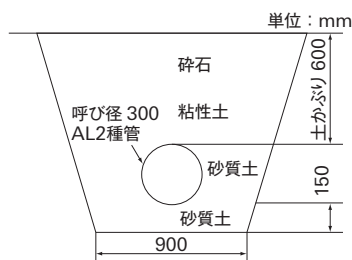
1) 目的

浅層埋設など厳しい埋設条件でも、トラック荷重に対して管体強度に問題がないことを確認する。

2) 試験方法

図表5-2-7-10に示す条件で管を埋設した後、T-25トラックを走行させて活荷重を負荷し、管体に生じるひずみを計測した。浅層埋設の実験には、呼び径300で管厚が薄い主に農業用水に使用されているALW形のAL2種管(供試管の管厚は規格公差内最小管厚の2.5mm)を使用した。土かぶりは設計基準の最小0.6mとし、水圧は負荷しない条件で行った。

●図表5-2-7-10 埋設条件



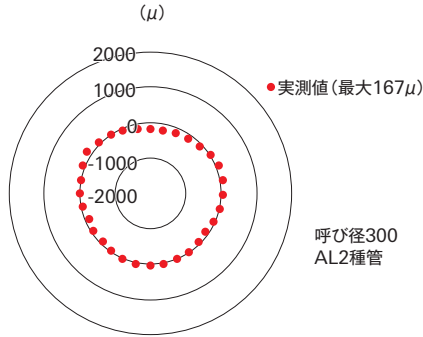
●図表5-2-7-11 試験状況



3) 試験結果

曲げひずみはほとんど発生しておらず、この埋設条件であれば問題ないことが確認された。

●図表5-2-7-12 管体ひずみ計測結果



3 トラック通過による衝撃の影響

トラックが通過する場合の衝撃による重量増加を測定した。一般には30%あるいは50%増とされているが、実際には土かぶり深さによって異なる。図表2-5-7-13から分かるように土かぶり0.5mでは50%増程度であるが、土かぶり1.5mになると測定位置「上」(管頂部)の実測値は、衝撃係数1.0の計算値よりも小さく、衝撃による割増は必要ないことが分かる。

●図表5-2-7-13 管体発生応力による衝撃係数の検証

(単位: N/mm²)

測定位置	土かぶり0.5m			土かぶり1.0m			土かぶり1.5m		
	実測値	計算値		実測値	計算値		実測値	計算値	
		衝撃係数			衝撃係数			衝撃係数	
		1.0	1.5		1.0	1.5		1.0	1.5
上	64.6	44.8	66.4	16.4	12.9	19.3	7.2	9.3	13.9
斜め上	19.5	14.6	21.9	14.8	4.7	6.4	0.7	3.0	4.6
横	20.2	26.3	39.3	12.4	7.6	11.5	6.1	5.8	8.3
斜め下	6.6	14.0	20.9	3.7	4.1	6.1	0.1	2.9	4.4
下	19.2	6.4	9.6	8.7	1.9	2.8	4.5	1.4	2.1

備考 呼び径700(管厚10mm)、平底溝、突固めなし、通過させたトラックの1後輪荷重は以下の通り。

土かぶり (m)	通過させたトラックの1後輪荷重 (kN)
0.5	89.5
1.0	74.4
1.5	66.8

5-2-8 管底支持角

平底溝で埋戻し時に管側の埋戻土を突き固めなくとも、管底あるいは管側に十分土が回るように留意すれば、一般には 60° 以上の管底支持角が期待できる。また、たとえ初期において管底支持角が 0° であっても、土かぶりの増大に従って管底支持角が増し、さらに水圧を負荷すれば曲げ応力は減少するという事実から、一般的な埋設条件下では、管底支持角 60° としても安全である。

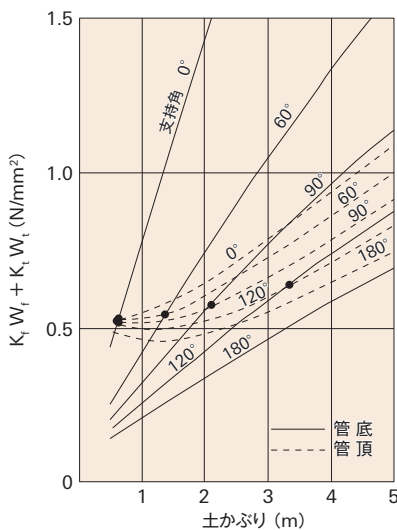
ただし、管底に接する溝底の地盤が特に硬い場合には、管底支持角が多少小さくなることも考えられるので、このような場合は 40° 程度の管底支持角を見込む方が安全である。従って、管厚計算に当たっては、特例を除き、一般には管底支持角を図表5-2-8-1のように考える。

●図表5-2-8-1 各埋設条件に対する管底支持角

区分	埋設条件	管底支持角
A	一般的な地盤の場合	60°
	溝底が強固な場合で溝底に砂を置く場合	
	溝底が強固な場合で埋戻土を砂で置き換える場合	
B	溝底が強固な場合	40°

同じ管底支持角であれば、土かぶりが浅い場合には管頂に、土かぶりが深い場合には管底に最大応力が発生する。管底支持角が 60° の場合は、図表5-2-8-2から分かるように、おおよそ土かぶり1.4m程度で最大発生応力の位置が管頂から管底に変わる。

●図表5-2-8-2 管頂、管底選択図



5-2-9 特殊な条件の管厚計算

ダクタイル鉄管は管体の強度が高いため通常の配管では管軸方向の検討は行わないが、小口径において管の一部が固定される場合や下部にコンクリート構造物、他の管路、障害物などが直接当たるような場合には管軸方向の検討が必要である。

$$M_R \geq M \cdot S$$

ここに、 M : 管の管軸方向に作用する曲げモーメント (kN・m)

M_R : 管の管軸方向の抵抗曲げモーメント (kN・m)

S : 安全率 (2.0以上)

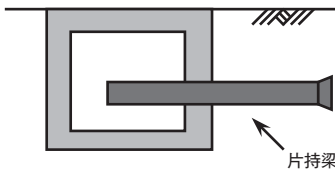
$$M_R = \sigma_b \cdot Z$$

ここに、 σ_b : 管の引張強度 (= 420×10^3 kN/m²)

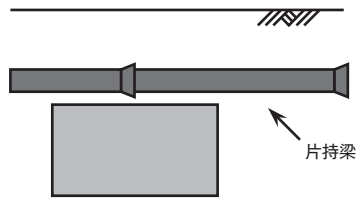
Z : 管の断面係数 (m³)

● 図表5-2-9-1 管軸方向の計算または対策が必要な場合

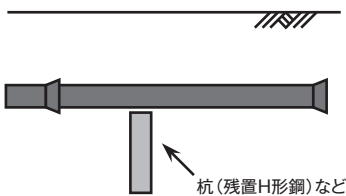
① 構造物で管が固定されている場合



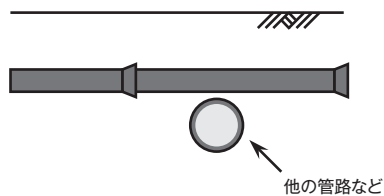
② 構造物が下であり管が載っている場合



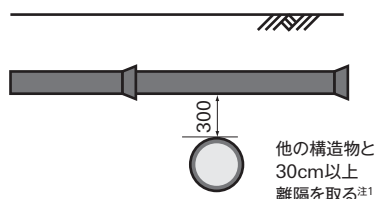
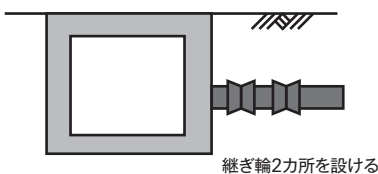
③ 管の下に杭など障害物がある場合



④ 他の管路と交差している場合



● 図表5-2-9-2 対応策の配管事例



注1 「水道施設設計指針 2012」(日本水道協会)では距離は30cm以上とされる。