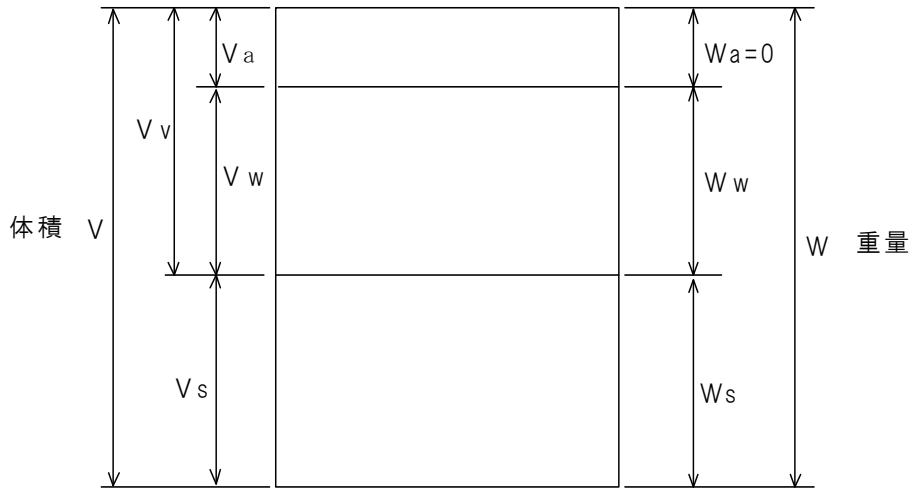


第 2 章 技 術 資 料

(1) 組成図

図 2-1 組成図



(2) 計算方法

V_a : 空隙体積 V_s : 土粒子の体積 V_w : 水の体積
 W_a : 空隙重量=0 W_s : 土粒子の重量 W_w : 水の重量
 G_s : 土粒子の比重 γ_s : 土粒子の単位体積重量 γ_w : 水の単位体積重量

① 間隙比: 土粒子体積に対する空気・水の体積比

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{n}{100-n} = \frac{\gamma_w}{\gamma_d} \times G_s - 1$$

② 間隙率: 全体積に対する土粒子以外の体積の割合

$$n = \frac{V_v}{V} \times 100 = \frac{e}{1+e} \times 100 (\%)$$

③ 含水比: 土粒子重量に対する水重量の割合

$$\omega = \frac{W_w}{W_s} \times 100 (\%)$$

④ 飽和度: 空隙体積に占める水体積の割合

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 (\%) = \frac{\omega \cdot \gamma_s}{e \cdot \gamma_w} = \frac{\omega \cdot G_s}{e}$$

⑤ 比重: 土粒子

$$G_s = \frac{W_s}{V_s \cdot \gamma_w} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \times (1+e)$$

⑥ 湿潤重量:

$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V}$$

⑦ 乾燥重量:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma_t}{1 + \omega/100} = \frac{\gamma_w \cdot G_s}{1+e} = \frac{\gamma_s}{1+e}$$

⑧ 飽和重量: 空隙を完全に水で飽和した時の単位重量

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s + e}{1+e} \times \gamma_w$$

⑨ 水中重量: 水中に浸けた状態で浮力を受けた場合の単位重量

$$\gamma_{sub} = \frac{G_s - 1}{1+e} \times \gamma_w$$

1. 土質定数の推定(1)

(1) N値

63.5kg のハンマーを 75cm 落下させ、サンプラーを 30cm 打ち込むのに要した打撃回数をN値といい、地盤が非常に締まって堅いとき、N=50 を限度としてそのときの貫入量を測定します。
 この場合 換算N値=(50/貫入量)×30 として計算します。(例 50/15 換算N値=100)

(2) 一軸圧縮強度 (qu)

表 2-1 粘土のコンシステンシー、N値と一軸圧縮強 qu(N/mm²)との関係

| コンシステンシー | 非常に軟らかい | 軟らかい | 中位の | 硬い | 非常に堅い | 固結した |
|----------|---------|------------|----------|---------|---------|--------|
| N | 2以下 | 2~4 | 4~8 | 8~15 | 15~30 | 30以上 |
| qu | 0.025以下 | 0.025~0.05 | 0.05~0.1 | 0.1~0.2 | 0.2~0.4 | 0.4 以上 |

(土質工学会：土質調査法より)

(3) 粘着力

$$C = qu / 2 \quad (\text{道路橋示方書より})$$

$$qu = N / 80 \text{ (Terzaghi-Peck の式) より } C = 0.00625N \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

(4) 内部摩擦角

$$\phi = \sqrt{1.5 N + 15}$$

表 2-2 N値と砂の相対密度、内部摩擦角との関係

| N値 | 相対密度(Relative Density) Dr = (e _{max} - e) / (e _{max} - e _{min}) | 内部摩擦角 φ | | |
|-------|--|-------------|-----------------|-------|
| | | Peck による | Meyerhof による | |
| 0~4 | 非常に緩い(Very Loose) | 0.0~0.2 | 28.5以上 | 30 以上 |
| 4~10 | 緩い(Loose) | 0.2~0.4 | 28.5~30 | 30~35 |
| 10~30 | 中位の(Medium) | 0.4~0.6 | 30~36 | 35~40 |
| 30~50 | 密な(Dense) | 0.6~0.8 | 36~41 | 40~45 |
| 50以上 | 非常に密な(Very Dense) | 0.8~1.0 | 41以上 | 45 以上 |

(土質工学会：土質調査法より)

(5) 透水係数

① ダルシーの法則

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{dh}{dL} = k \cdot A \cdot i \quad k: \text{透水係数 cm/sec}$$

$$V = \frac{Q}{A} = k \cdot i \quad \begin{array}{l} Q: \text{面積Aの断面を流れる流量} \\ V: \text{平均流速 (実流速} = V/n\text{)} \\ i: \text{動水勾配 (無次元)} \end{array}$$

② 土の種類と透水性

表 2-3 土の種類と透水係数の関係

| | 5μm | 75μm | 425μm | 2mm | 4.75mm | 19mm | 75mm | 300mm | | | | |
|--------------|--------------------|------|-----------------------------------|------------------|--|------------------|------------------|-------------------|------------------|--|------------------|------------------|
| | 粘土 | シルト | 細砂 | 粗砂 | 細礫 | 中礫 | 粗礫 | コブル | ボルダー | | | |
| | 10 ² | 10 | 1 | 10 ⁻¹ | 10 ⁻² | 10 ⁻³ | 10 ⁻⁴ | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁶ | 10 ⁻⁷ | 10 ⁻⁸ | 10 ⁻⁹ |
| 透水性 | 大きい | | | 中位 | | 小さい | 非常に小さい | | 実質上不透水 | | | |
| 土の種類 統一分類 | きれいな礫 (GW),(GP) | | きれいな砂および きれいな砂と礫の 混合土 GW,SW | | 微細砂、シルト、砂・シルト 粘土の混合土、層状粘土など (SM),(SC),(ML) | | | 不透水性の土が草木・風化で変化した | | 不透水性の土、 風化を受けていない 均質な粘土 など (CH),(MH),(VH) | | |

③ 推定透水係数

Hazen の方法 $k = C(0.7 + 0.03t)d_e^2$

C : 係数 (50~150)

t : 水温

$$\approx 100d_e^2 \text{ (cm/sec)}$$

d_e : 10%通過粒径 (cm)

Creager の方法 $k = 0.359D_{20}^{2.327} \text{ (cm/sec)}$

D₂₀ : 20%通過粒径 (mm)

2. 土質定数の推定(2)

表 2-4 自然状態の土の性質

| 特性 土質 | 自然含水比 % | 真比重 | 液性限界 WL(%) | 塑性限界 WP(%) | 湿潤密度 tf/m ³ | 自然間隙比 |
|----------|------------|---------|---------------|---------------|---------------------------|---------|
| 砂 | 5~20 | 2.6~2.8 | — | — | 1.6~2.0 | 0.5~1.0 |
| 砂質土 | 20~40 | 2.5~2.7 | 30~50 | 20~40 | 1.6~1.8 | 1.1~2.0 |
| 砂質シルト | 30~60 | 2.5~2.7 | 40~70 | 30~50 | 1.5~1.6 | 1.5~2.5 |
| 粘土シルト | 50~100 | 2.5~2.7 | 40~120 | 30~70 | 1.4~1.7 | 1.5~3.0 |

(土質工学会:土質試験法より)

表 2-5 自然状態土の間隙率と、間隙比および単位重量

| 土の種類 | 間隙率 n(%) | 間隙比 e | 含水比 W(%) | 単位重量 | |
|----------------|-------------|----------|-------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| | | | | γ_d (kN/m ³) | γ_{sat} (kN/m ³) |
| 1 砂 均等で、ゆるい | 46 | 0.85 | 32 | 14.01 | 18.52 |
| 2 砂 均等で、密な | 34 | 0.51 | 19 | 17.15 | 20.48 |
| 3 砂 混合の、ゆるい | 40 | 0.67 | 25 | 15.58 | 19.50 |
| 4 砂 混合の、密な | 30 | 0.43 | 16 | 18.13 | 21.07 |
| 5 粘土(氷成)軟らかい | 55 | 1.22 | 45 | 11.66 | 17.05 |
| 6 粘土(氷成)硬い | 37 | 0.59 | 22 | 16.37 | 19.99 |
| 7 粘土(有機質少)軟らかい | 66 | 1.94 | 70 | 8.82 | 15.29 |
| 8 粘土(有機質多)軟らかい | 75 | 3.00 | 110 | 6.47 | 13.82 |
| 9 ベントナイト 軟らかい | 84 | 5.25 | 194 | 4.12 | 12.35 |

(推進工法講座基礎知識編より)

表 2-6 土質定数参考表

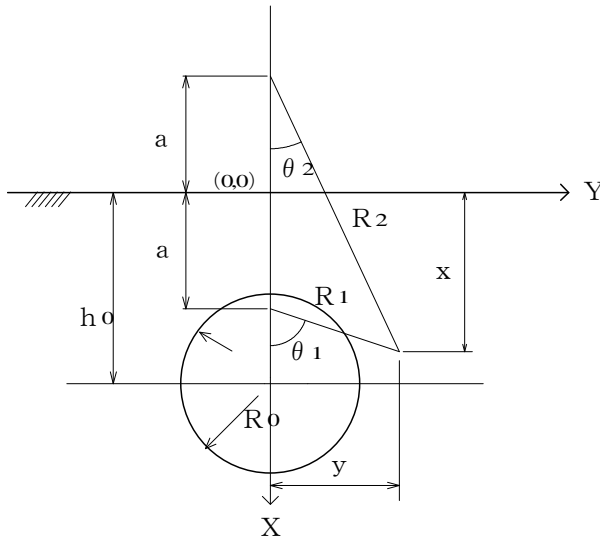
| 種類 | 状態 | 単位体積重量 kN/m ³ | 内部摩擦角 (度) | 粘着力 kN/m ² | 摘要 (統一分類) | | |
|-------|-----------|-----------------------------|---------------|--------------------------|--------------|------------------------|-----------|
| 盛土 | 礫および礫混じり砂 | 締め固めたもの | 20 | 40 | 0 | (GW)・(GP) | |
| | 砂 | 締め固めたもの | 粒度の良いもの | 20 | 35 | 0 | (SW)・(SP) |
| | | | 粒度の悪いもの | 19 | 30 | 0 | |
| | 砂質土 | 締め固めたもの | 19 | 25 | 30 以下 | (SM)・(SC) | |
| | 粘性土 | 締め固めたもの | 18 | 15 | 50 以下 | (ML)・(CL) (MH)・(CH) | |
| 関東ローム | 締め固めたもの | 14 | 20 | 10 以下 | (VH) | | |
| 自然 | 礫 | 密実なもの または粒度の良いもの | 20 | 40 | 0 | (GW)・(GP) | |
| | | 密実でないもの または粒度の悪いもの | 18 | 35 | 0 | | |
| | 礫混じり砂 | 密実なもの | 21 | 40 | 0 | (GW)・(GP) | |
| | | 密実でないもの | 19 | 35 | 0 | | |
| | 砂 | 密実なもの または 粒度の良いもの | 20 | 35 | 0 | (SW)・(SP) | |
| | | 密実でないもの または 粒度の悪いもの | 18 | 30 | 0 | | |
| 砂質土 | 密実なもの | 19 | 30 | 30 以下 | (SM)・(SC) | | |
| | 密実でないもの | 17 | 25 | 0 | | | |
| 地 | 粘性土 | 固いもの (指で強く押し多少へこむ) | 18 | 25 | 50 以下 | (ML)・(CL) | |
| | | やや軟らかいもの (指の中程度の力で貫入) | 17 | 20 | 30 以下 | | |
| | | 軟らかいもの (指が容易に貫入) | 16 | 15 | 15 以下 | | |
| 盤 | 粘土およびシルト | 固いもの (指で強く押し多少へこむ) | 17 | 20 | 50 以下 | (CH)・(MH) (ML) | |
| | | やや軟らかいもの (指の中程度の力で貫入) | 16 | 15 | 30 以下 | | |
| | | 軟らかいもの (指が容易に貫入) | 14 | 10 | 15 以下 | | |
| 関東ローム | | 14 | 5(ϕ_u) | 30 以下 | (VH) | | |

3. Jeffery の2極座標系による沈下計算

(1) 2極座標系による理論式

$$U = -(1+\nu) \frac{P}{E} R_0^2 \left[\left\{ 2(1-\nu) \frac{h_0}{a} - (1-2\nu) \right\} \frac{\cos\theta_1}{R_1} - \left\{ 2(1-\nu) \frac{h_0}{a} + (1-2\nu) \right\} \frac{\cos\theta_2}{R_2} + \left\{ (h_0-a) \frac{\cos 2\theta_1}{R_1^2} - (h_0+a) \frac{\cos 2\theta_2}{R_2^2} \right\} \frac{x}{a} \right]$$

$$V = -(1+\nu) \frac{P}{E} R_0^2 \left[\left\{ 2(1-\nu) - (1-2\nu) \frac{h_0}{a} \right\} \frac{\sin\theta_1}{R_1} + \left\{ 2(1-\nu) + (1-2\nu) \frac{h_0}{a} \right\} \frac{\sin\theta_2}{R_2} + \left\{ (h_0-a) \frac{\sin 2\theta_1}{R_1^2} - (h_0+a) \frac{\sin 2\theta_2}{R_2^2} \right\} \frac{x}{a} \right]$$



ここで

$$a = \sqrt{h_0^2 - R_0^2}$$

$$R_1 = \sqrt{(x-a)^2 + y^2}$$

$$R_2 = \sqrt{(x+a)^2 + y^2}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{y}{x-a}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{y}{x+a}$$

U: 沈下量 (cm)

ν : ポアソン比

P: 有効応力 $P = \gamma t \cdot h_0 + q$

q: 上載荷重 (kN/m²)

通常 $q = 10.0$

E: 地山の弾性係数 (kN/m²)

h_0 : 掘進機中心位置 (m)

$h_0 = H + r$

r: 掘進機半径 (m)

H: 土被り (m)

図 2-2 2極座標参考図

(2) 土質定数

土質定数により解が変わるため、ここではFEM解析で一般的に使用される土質定数を用います。

表 2-7 FEM解析に使用している土質定数

| 土質 | N値 | 変形係数 (kN/m ²) | ポアソン比 | 単位体積 重量(kN/m ²) | 粘着力 (kN/m ²) | 内部摩擦角 (度) |
|-----------|------|------------------------------|-------|--------------------------------|-----------------------------|--------------|
| 埋土 | 2~4 | 3,000 | 0.45 | 15 | 50 | 6 |
| シルト | 1 | 800 | 0.49 | 16 | 10 | 0 |
| | 2~3 | 2,400 | 0.45 | 16 | 30 | 6 |
| 砂質 シルト | 4 | 5,000 | 0.45 | 16 | 30 | 10 |
| | 15 | 15,000 | 0.40 | 17 | 60 | 15 |
| 粘土 | 6 | 5,000 | 0.45 | 15 | 80 | 6 |
| | 8~12 | 10,000 | 0.45 | 15 | 80 | 6 |
| | 25 | 20,000 | 0.45 | 15 | 80 | 6 |
| 細砂 | 10 | 8,000 | 0.35 | 18 | 0.0 | 25~30 |
| | 20 | 10,000 | 0.35 | 18 | 0.0 | 25~30 |
| | 30 | 20,000 | 0.35 | 18 | 0.0 | 35 |
| | 40 | 25,000 | 0.35 | 18 | 0.0 | 38 |
| | 50 | 35,000 | 0.35 | 18 | 0.0 | 42 |
| 中砂 | 50 | 50,000 | 0.35 | 18 | 0.0 | 42 |
| 礫 | 40 | 30,000 | 0.30 | 20 | 0.0 | 39 |
| | 50 | 50,000 | 0.30 | 20 | 0.0 | 42 |

(トンネル標準示方書[開削工法編]土木学会)

4. リマノフによる弾性沈下量

Jeffery による 2 極座標系沈下解析を、Limanov が均質な物質に応用し、一般に採用されています。

(1) 最大沈下量計算

掘削断面直上において最大沈下量とな

$$U_{max} = (1 - \nu^2) \frac{P}{E} \frac{4R_0^2 h}{h_0^2 - R_0^2} \quad \text{る}$$

- ν : ポアソン比
- P : 有効応力 $P = \gamma t \cdot h + q$
- q : 上載荷重 (kN/m²) 通常 $q = 10.0$
- E : 地山の弾性係数 (kN/m²)
- h : 掘進機中心位置 (m) $h = H + r_0$
- r_0 : 掘進機半径 (m)
- H : 土被り (m)

(2) 沈下曲線

最大沈下量より、Aversin の確率曲線を基礎として中心より x での沈下量を求めます。
沈下曲線の円錐体の、直径の半分が $2a$ であるなら次式となります。

最大沈下量をもとにした沈下曲線

$$U = U_{max} \left[1 - \frac{x}{2a} \right]^4 e^{\left[\frac{4x}{2a} \right]}$$

- x : 掘進機中心よりの離れ (m)
- a : 掘進機中心よりの緩み範囲 (m)

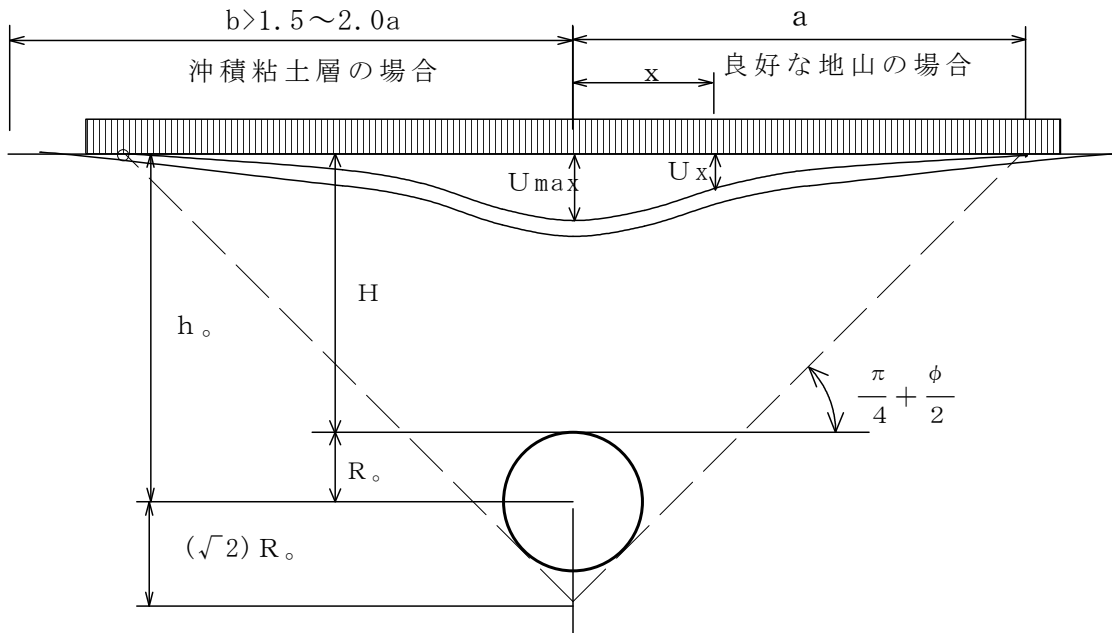


図 2-3 沈下曲線参考図

(3) 考察

- ① 現実大きめの値となることが多く、理論的に 2 倍程度大きな値が得られる可能性がある。
「わかりやすいトンネル工学」土木工学社／福島啓一
- ② 「 U_{max} はトンネルのまわりに埋め戻しされなかった、緩んだ面積からも計算される。」
「トンネル工学—理論・設計・施工」(鹿島出版会)

以上のように過大な値となり易く、しかも刃口推進のような余堀による応力開放を前提としていと考えられます。本工法は切羽及びテールボイドの管理方法において基本的に応力解放をおこさない工法であることから適用は不適と考えられます。

5. 緩み土圧

(1) 均一地盤層における緩み土圧の基本式

Terzaghi の緩み土圧は、

$$q = \sigma_v = \frac{B1(\gamma - C/B1)}{K_o \cdot \tan \phi} (1 - e^{-k_o \cdot \tan \phi \cdot H/B1}) + P_o \cdot e^{-k_o \cdot \tan \phi \cdot H/B1}$$

$$B1 = R_o \cdot \cot \left[\frac{\pi/4 + \phi/2}{2} \right]$$

ただし、内部摩擦角 $\phi = 0$ の場合は解が不定となって適用できないため、 $\phi = 0$ の場合緩み土圧の計算に下記の式を用います。

また、 N 値 < 2 以下の軟弱な粘性土地盤等では、粘着力は考慮しません。

$$q = \sigma_v = (\gamma - c/B1) \cdot H + P_o$$

ここに

- q : 管にかかる等分布付荷重 (kN/m²)
- Σv : Terzaghi の緩み土圧 (kN/m²)
- k_o : 水平土圧と鉛直土圧との比 (通常 $k_o = 1$ としてよい)
- ϕ : 土の内部摩擦角度 (度)
- p_o : 上載荷重の影響 (= 10 kN/m²)
- γ : 土の単位体積重量 (kN/m³)
- c : 土の粘着力 (kN/m²)
- R_o : 掘削半径 (m)
- $R_o = (B_e + 0.1) / 2$
- B_e : 管外径 (m)

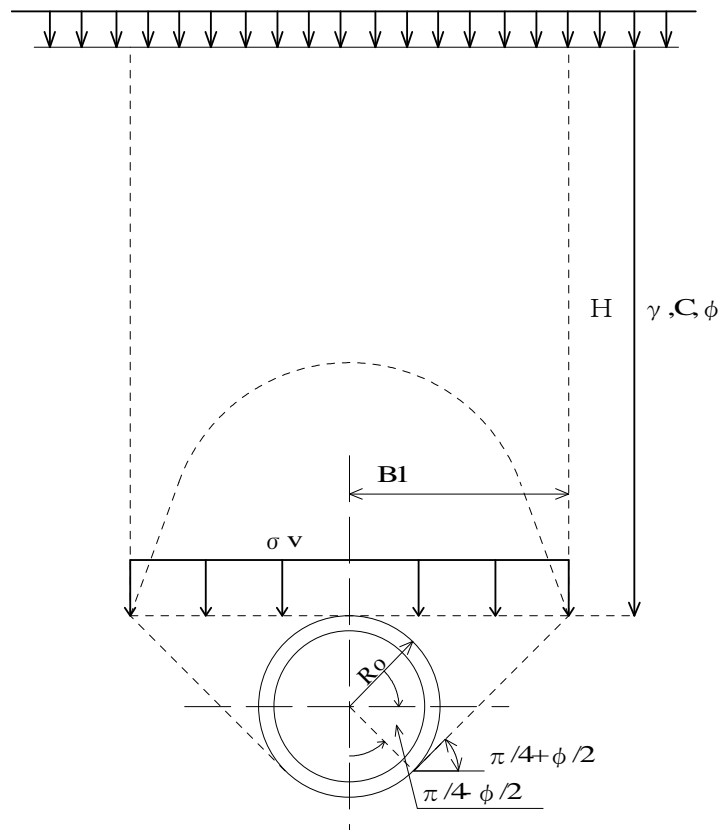


図 2-4 均一地盤層における緩み土圧

(2) 多層地盤層における緩み土圧の基本式 (GL-10m を超える埋設位の場合)

土の単位体積重量 γ 、粘着力 c 、内部摩擦角度 ϕ がそれぞれ異なる多層地盤の場合は下記の式により緩み土圧を算出します。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{v1} &= \frac{B1(\gamma_1 - C_1/B1)}{K_o \cdot \tan \phi_1} (1 - e^{-k_o \cdot \tan \phi_1 \cdot H1/B1}) + P_o \cdot e^{-k_o \cdot \tan \phi_1 \cdot H1/B1} \\ \sigma_{v2} &= \frac{B1(\gamma_2 - C_2/B1)}{K_o \cdot \tan \phi_2} (1 - e^{-k_o \cdot \tan \phi_2 \cdot H2/B1}) + \sigma_{v1} \cdot e^{-k_o \cdot \tan \phi_2 \cdot H2/B1} \\ \sigma_{vi} &= \frac{B1(\gamma_i - C_i/B1)}{K_o \cdot \tan \phi_i} (1 - e^{-k_o \cdot \tan \phi_i \cdot Hi/B1}) + \sigma_{vi-1} \cdot e^{-k_o \cdot \tan \phi_i \cdot Hi} \\ q = \sigma_{vn} &= \frac{B1(\gamma_n - C_n/B1)}{K_o \cdot \tan \phi_n} (1 - e^{-k_o \cdot \tan \phi_n \cdot Hn/B1}) + \sigma_{vn-1} \cdot e^{-k_o \cdot \tan \phi_n \cdot Hn} \\ B1 &= B1 = R_o \cdot \cot \left[\frac{\pi/4 + \phi/2}{2} \right] \end{aligned} \right\}$$

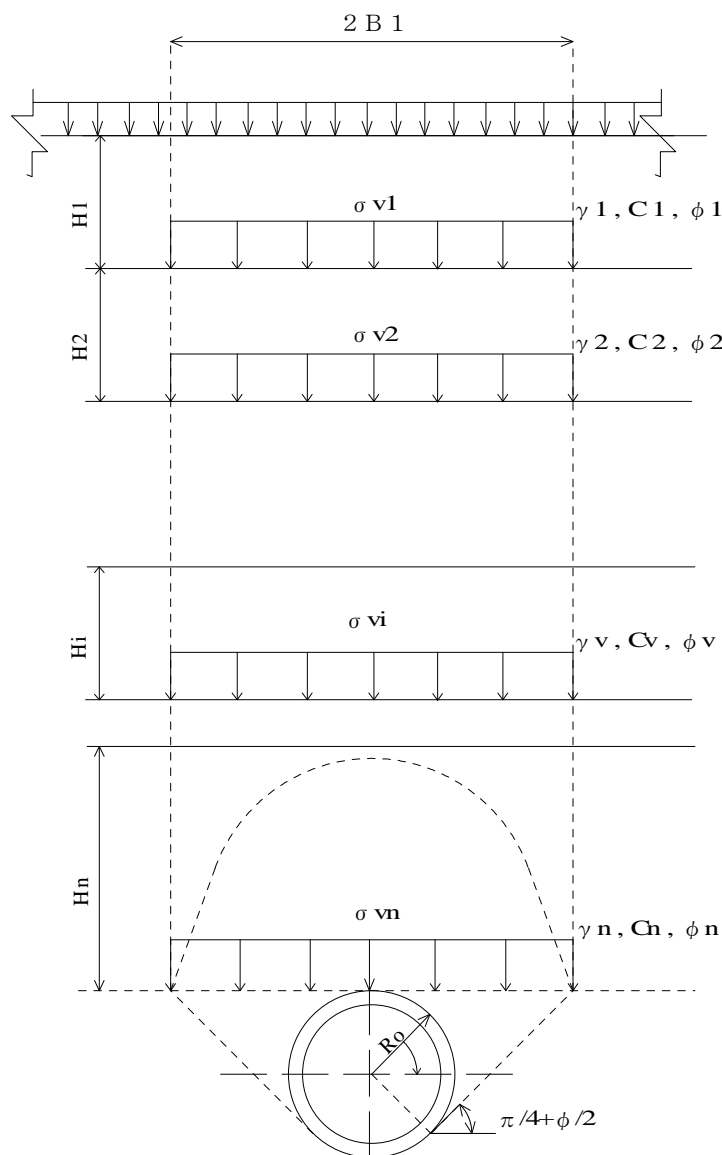


図 2-5 多層地盤における緩み土圧

6. 鉛直方向の管の耐荷力

$$q_r = \frac{Mr}{0.275 \cdot r^2}$$

qr: 鉛直方向の管の耐荷力 (kN/m²)
 Mr: 外圧強さより求まる管の抵抗モーメント(kN・mm)
 r : 管厚中心半径(m)

(1) 管の外圧強さ

表 2-8 管の外圧強さはひび割れ加重による。(kN/m)

| 呼び径 D | ひび割れ荷重 | | 破壊荷重 | |
|----------|--------|-------|-------|-------|
| | 1種 | 2種 | 1種 | 2種 |
| φ 800 | 35.4 | 70.7 | 57.9 | 106.0 |
| φ 900 | 38.3 | 76.5 | 64.8 | 115.0 |
| φ 1000 | 41.2 | 82.4 | 71.6 | 124.0 |
| φ 1100 | 42.7 | 85.4 | 78.5 | 128.0 |
| φ 1200 | 44.2 | 88.3 | 86.3 | 133.0 |
| φ 1350 | 47.1 | 94.2 | 98.1 | 142.0 |
| φ 1500 | 50.1 | 101.0 | 110.0 | 151.0 |
| φ 1650 | 53.0 | 106.0 | 122.0 | 159.0 |
| φ 1800 | 55.9 | 112.0 | 134.0 | 168.0 |
| φ 2000 | 58.9 | 118.0 | 142.0 | 177.0 |
| φ 2200 | 61.8 | 124.0 | 149.0 | 186.0 |

ひび割れ荷重とは管に幅 0.05mm のひび割れを生じたときの荷重を有効長で除した値
 破壊荷重とは試験機が示す最大荷重を有効長で除した値

(2) 外圧強さより求まる管の抵抗モーメント

ひび割れ荷重により管値に生じる最大曲げモーメントと管の自重により生じるモーメントの和

$$Mr = 0.318P \cdot r + 0.239W \cdot r$$

P : 外圧強さ (kN/m)

W : 管の重量 (kN/m)

(3) 鉛直等分布荷重によって管に生じる曲げモーメント

120度の自由支承を考慮すると(下図支承条件による係数参照)

$$M = 0.275q \cdot r^2$$

q : 等分布荷重 (kN/m²)

r : 管厚中心半径 (m)

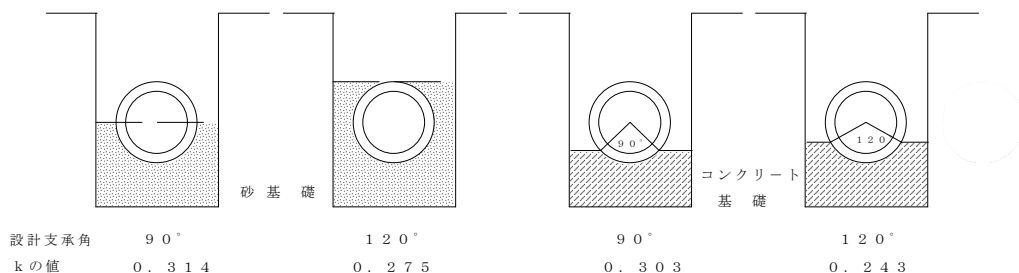
(4) 等分布荷重によって生じるひび割れの安全率

等分布荷重によって生じるひび割れの安全率(f)は、
 管の抵抗モーメント(Mr)と管に生じるモーメント(M)の比、または
 管の耐荷力(qr)と等分布荷重(q)との比でも求められます。

$$f = \frac{Mr}{M} = \frac{qr}{q} \geq 1.2$$

(5) 支承条件による係数

図 2-6 支障角度と係数



7. 推進方向の管の耐荷力

(1) 管の許容耐荷力(kN): $Fa = 1000 \cdot \sigma_{ma} \cdot Ae$

σ_{ma} : コンクリートの許容平均圧縮応力度

$$\sigma_c = 50 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{ma} = 13.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_c = 70 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{ma} = 17.5 \text{ N/mm}^2 \quad 1/4 \text{ 強度}$$

$$\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{ma} = 22.5 \text{ N/mm}^2 \quad 1/4 \text{ 強度}$$

Ae : 管の有効断面積

(2) コンクリートの許容圧縮応力度

$$\sigma_{ca} = \sigma_c / f$$

σ_{ca} : コンクリートの許容圧縮応力度 (N/mm²)

σ_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

f : 安全率 (=2)

(3) コンクリートの圧縮応力と圧縮歪みの関係

$$\sigma = (3.72 \times 10^5 \varepsilon + 0.611 \times 10^8 \varepsilon^2 - 6.322 \times 10^{10} \varepsilon^3) \times 9.80665$$

σ : コンクリートの圧縮応力 (N/mm²)

ε : コンクリートの圧縮歪み

(4) 管体に生じる応力

$$\varepsilon_{max} = 1.872 \times \varepsilon_{mean} + 19.1 \times 10^{-6}$$

ε_{max} : 管の断面に生じる最大歪み

ε_{mean} : 管の断面に生じる歪みの平均値

(5) コンクリートの許容平均圧縮応力度

$\sigma_c = 50 \text{ N/mm}^2$ の場合、 $\sigma_{ca} = 25 \text{ N/mm}^2$ を使用します。

σ_{ca} を式 2 に代入し、 $\varepsilon = 649 \times 10^{-6}$ を ε_{max} とし、 $\varepsilon_{mean} = 336 \times 10^{-6}$ を式 2 に代入し、 $\sigma_{ma} = 130 \text{ N/mm}^2$ となります。

(6) 管の有効断面積

$$Ae = \pi \times (B^2 - D^2) / 4$$

B : 管の外径 - ゴム溝深さ $\times 2 = D_1 - 2 \cdot S$

D : 管内径

(7) 管の許容耐荷力

表 2-9 許容耐荷力

| 呼び径 D | D1-3 (mm) | r (m) | Ae (m ²) | W (kN/m) | Fa (kN) | | |
|----------|--------------|----------|-------------------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | | | | 50N/mm ² | 70N/mm ² | 90N/mm ² |
| φ 800 | 930 | 0.4400 | 0.1766 | 5.314 | 2,296 | 3,091 | 3,974 |
| φ 900 | 1050 | 0.4950 | 0.2297 | 6.725 | 2,986 | 4,020 | 5,169 |
| φ 1000 | 1170 | 0.5500 | 0.2897 | 8.303 | 3,767 | 5,070 | 6,519 |
| φ 1100 | 1280 | 0.6025 | 0.3365 | 9.550 | 4,374 | 5,888 | 7,570 |
| φ 1200 | 1400 | 0.6565 | 0.4084 | 11.415 | 5,309 | 7,147 | 9,189 |
| φ 1350 | 1560 | 0.7375 | 0.4800 | 13.917 | 6,239 | 8,399 | 10,799 |
| φ 1500 | 1740 | 0.8200 | 0.6107 | 17.330 | 7,939 | 10,688 | 13,741 |
| φ 1650 | 1910 | 0.9000 | 0.7270 | 20.380 | 9,451 | 12,722 | 16,357 |
| φ 1800 | 2080 | 0.9800 | 0.8533 | 23.671 | 11,092 | 14,932 | 19,198 |
| φ 2000 | 2310 | 1.0875 | 1.0494 | 28.730 | 13,642 | 18,364 | 23,611 |
| φ 2200 | 2540 | 1.1950 | 1.2657 | 34.276 | 16,455 | 22,151 | 28,479 |

備考: 表中 Ae は $\{(D_1 - 3)^2 - D^2\} \pi / 4$ で求めた有効断面積、W は中央断面で求めた重量で

$W = \pi (D + T) T \times 2.45$ で計算しました。

Fa の計算に用いた許容平均圧縮応力度 σ_{ma} は、 $\sigma_c = 50 \text{ N/mm}^2$ 以上については 13 N/mm^2 、 $\sigma_c = 70 \text{ N/mm}^2$ 以上については 17.5 N/mm^2 、 $\sigma_c = 90 \text{ N/mm}^2$ 以上については 22.5 N/mm^2 としました。

8. BC点における許容軸方向推進力

曲線部BC点では、背面からの抵抗力は管の継手部に集中することになります。そのときの地盤反力は、管外径の 90° に分布すると仮定され、また、管端部にかかる偏圧の分布形状を三角とし、その分布範囲長をLaとすると、BC点での推進力 F_{BC} と分布荷重 R_g の関係は

$$F_{BC} \cdot \sin \alpha = R_g = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot L_a \cdot \sqrt{2} \cdot r \cdot q_a$$

となり、曲線推進における推進管の安全率 $\gamma (=1.5)$ を考慮した許容推進力 F_a は次式にて求められます。

$$F_a = \frac{\sqrt{2} \cdot L_a \cdot r \cdot q_a}{1.5 \times \sin \alpha}$$

ここに F_{BC} : BC点における推進力 (k N)

F_a : 曲線部の許容推進力 (k N)

R_g : 許容地盤反力 (k N)

r : 管厚中心半径 (m)

a : 管 1 本当りの折れ角 (°) $\alpha = 2\sin^{-1} \left[\frac{L}{2(R-D/2)} \right]$

R : 曲線半径 (m)

D : 管外径 (m)

L_a : 地盤反力に対する影響範囲長 (m) = L/η

L : 管の有効長 (m)

η : 推進管の影響範囲係数 (≥ 1.0) (分布範囲90° の場合)

$$\eta = -13.917R_t - 0.579R_L + 10.506R_t \times R_L + 2.033$$

表 2-10 影響範囲係数 η 値

| 呼び径 (mm) | 管長 L(m) | | 呼び径 (mm) | 管長 L(m) | |
|-------------|---------|-------|-------------|---------|-------|
| | 2.43 | 1.20 | | 2.43 | 1.2 |
| $\phi 600$ | 3.505 | 1.821 | $\phi 1500$ | 1.385 | 1.055 |
| $\phi 700$ | 2.922 | 1.566 | $\phi 1650$ | 1.322 | 1.041 |
| $\phi 800$ | 2.074 | 1.349 | $\phi 1800$ | 1.275 | 1.033 |
| $\phi 900$ | 1.915 | 1.270 | $\phi 2000$ | 1.229 | 1.019 |
| $\phi 1000$ | 1.787 | 1.207 | $\phi 2200$ | 1.194 | 1.010 |
| $\phi 1100$ | 1.641 | 1.167 | $\phi 2400$ | 1.167 | 1.003 |
| $\phi 1200$ | 1.566 | 1.127 | $\phi 2600$ | 1.145 | 1.000 |
| $\phi 1350$ | 1.453 | 1.094 | $\phi 2800$ | 1.128 | 1.000 |
| $\phi 1500$ | 1.385 | 1.055 | $\phi 3000$ | 1.113 | 1.000 |

R_t : 管厚比 = t/D_i

R_L : 管長比 = L/D_i

D_i : 推進管の内径 (m)

t : 推進管の管厚 (m)

r : 管厚中心半径 (m)

q_a : 管の許容等分布側圧 (k N/m²)
= $M_a / (0.239r^2)$ (90° 分布と仮定)

M_a : 管の抵抗曲げモーメント (k N-m)
= $0.318P \times r + 0.239W \times r$

P : 外圧試験荷重 (k N/m)

W : 管の自重 (k N/m)

供用等分布荷重を q_a に代入し算出した推力 F_a が許容推力となります。推進線形中の曲線区間において最も推進抵抗力の大きくなるBC点(曲線半径及び位置により異なります)の抵抗力を算出した F_a :許容推進力と比較することで必要推進管外圧強度を確認します。

【(社)日本下水道協会-下水道推進工法の指針と解説】より

表 2-11 1種管許容等分布側圧qa

| 呼び径 D _i (mm) | 管厚 t(mm) | 管厚半径 r(m) | 自重 w(kN/m) | 外圧強度 P (kN/m) | 抵抗 Ma (kN・mm) | 等分布側圧 q _a (kN/m ²) |
|----------------------------|-------------|--------------|---------------|------------------|------------------|--|
| φ 800 | 80 | 0.4400 | 5.308 | 35.4 | 5.511 | 119.112 |
| φ 900 | 90 | 0.4950 | 6.718 | 38.3 | 6.824 | 116.521 |
| φ 1000 | 100 | 0.5500 | 8.294 | 41.2 | 8.296 | 114.75 |
| φ 1100 | 105 | 0.6025 | 9.54 | 42.7 | 9.555 | 110.131 |
| φ 1200 | 115 | 0.6575 | 11.402 | 44.2 | 11.033 | 106.786 |
| φ 1350 | 125 | 0.7375 | 13.902 | 47.1 | 13.497 | 103.825 |
| φ 1500 | 140 | 0.8200 | 17.311 | 50.1 | 16.457 | 102.404 |
| φ 1650 | 150 | 0.9000 | 20.358 | 53.0 | 19.548 | 100.974 |
| φ 1800 | 160 | 0.9800 | 23.645 | 55.9 | 22.959 | 100.023 |
| φ 2000 | 175 | 1.0875 | 28.698 | 58.9 | 27.828 | 98.452 |
| φ 2200 | 190 | 1.1950 | 34.238 | 61.8 | 33.263 | 97.461 |
| φ 2400 | 205 | 1.3025 | 40.265 | 64.8 | 39.374 | 97.109 |
| φ 2600 | 220 | 1.4100 | 46.777 | 67.7 | 46.119 | 97.06 |
| φ 2800 | 235 | 1.5175 | 53.776 | 70.7 | 53.621 | 97.427 |
| φ 3000 | 250 | 1.6250 | 61.261 | 73.6 | 61.825 | 97.962 |

表 2-12 2種管許容等分布側圧qa

| 呼び径 D _i (mm) | 管厚 t(mm) | 管厚半径 r(m) | 自重 w(kN/m) | 外圧強度 P (kN/m) | 抵抗 Ma (kN・mm) | 等分布側圧 q _a (kN/m ²) |
|----------------------------|-------------|--------------|---------------|------------------|------------------|--|
| φ 800 | 80 | 0.4400 | 5.308 | 70.70 | 10.451 | 225.868 |
| φ 900 | 90 | 0.4950 | 6.718 | 76.50 | 12.837 | 219.207 |
| φ 1000 | 100 | 0.5500 | 8.294 | 82.40 | 15.502 | 214.420 |
| φ 1100 | 105 | 0.6025 | 9.540 | 85.40 | 17.736 | 204.430 |
| φ 1200 | 115 | 0.6575 | 11.402 | 88.30 | 20.254 | 196.029 |
| φ 1350 | 125 | 0.7375 | 13.902 | 94.20 | 24.543 | 188.802 |
| φ 1500 | 140 | 0.8200 | 17.311 | 101.00 | 29.729 | 184.993 |
| φ 1650 | 150 | 0.9000 | 20.358 | 106.00 | 34.716 | 179.327 |
| φ 1800 | 160 | 0.9800 | 23.645 | 112.00 | 40.442 | 176.191 |
| φ 2000 | 175 | 1.0875 | 28.698 | 118.00 | 48.266 | 170.760 |
| φ 2200 | 190 | 1.1950 | 34.238 | 124.00 | 56.900 | 166.716 |
| φ 2400 | 205 | 1.3025 | 40.265 | 130.00 | 66.380 | 163.713 |
| φ 2600 | 220 | 1.4100 | 46.777 | 136.00 | 76.743 | 161.511 |
| φ 2800 | 235 | 1.5175 | 53.776 | 142.00 | 88.028 | 159.943 |
| φ 3000 | 250 | 1.6250 | 61.261 | 148.00 | 100.271 | 158.881 |

【(社)日本下水道協会-下水道推進工法の指針と解説】より

9. カーブ部地盤反力

(1) BC点に作用する側圧の算定

推進管が曲線部を通過するときに必要なのは地盤反力です。

曲線部における管の張出力は、図 2-7 に示すように、管に働く側方荷重($F_{BC} \cdot \sin \alpha$)=地盤に必要な反力と考えられますが、軸方向の分布範囲は推進管の形状により変化するため、影響範囲係数を考慮し、地盤に必要な反力= P_{BC} を推進管張出力とします。

この管の許容等分布側圧： P_{BC} と同等以上の地盤反力が曲線部地盤に見込めない場合は、曲線部側面に地盤改良が必要と考えられます。

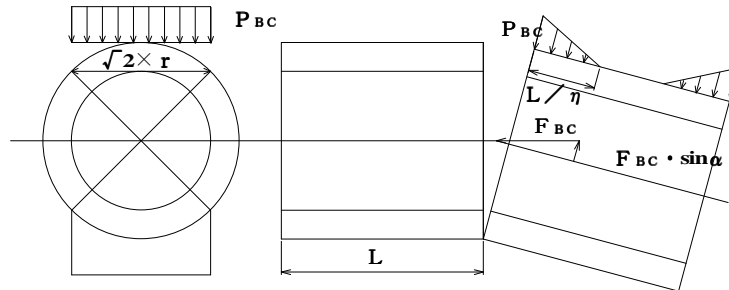


図 2-7 BC点における水平分力と側方荷重の模式図

BC点における許容軸方向推力許容推進力の計算式より、管の横方向の張出力を求めると、

$$F_{BC} \cdot \sin \alpha = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot L_a \cdot \sqrt{2} \cdot r \cdot P_{BC} \quad \text{より} \quad P_{BC} = \frac{F_{BC} \cdot \sin \alpha}{L_a \cdot \sqrt{2} \cdot r} \quad \text{となります。}$$

ここに、

- P_{BC} : 管の外方向張出力(kN)
- F_{BC} : BC点における推進力(kN)
- α : 管1本当りの折れ角(°)
- L_a : 地盤反力に対する影響範囲長(m) L/η
- L : 推進管の有効長(m/本)
- η : 推進管の影響範囲係数(≥ 1.0)(分布範囲90°の場合)
 $\eta = -13.917R_t - 0.579R_L + 10.506R_t \times R_L + 2.033$
- $\sqrt{2} \times r$: 分布範囲
- r : 管厚中心半径(m)

(2) 地山強度の計算

地盤反力は、管芯での平均受働土圧強度の計算を行います。

$$P = (\gamma \cdot H + \gamma' \cdot H') \cdot \tan^2(45 + \phi / 2) + 2 \cdot C \cdot \tan(45 + \phi / 2)$$

γ : 単位体積重量 H : 土被り ϕ : 内部摩擦角度 C : 粘着力

注1) 地山反力として支圧壁の計算を流用するのが見られますが、計算値は幅 1m当たりの kN/mとして、地山強度×高さとなっている点が誤りです。

注2) また支圧壁と異なり、管に作用する地下水圧は相殺されることから、土圧計算には水中重量を使用しなければならないと考えられます。

(3) 地盤改良の有無の判定

管の外方向張出力： P_{BC} と地山強度の計算で求めた地盤反力： P を比較し、

$$\left(\begin{array}{l} \text{管の外方向張出力 } P_{BC} > \text{ 曲線部側面の地盤反力: } P \quad \text{地盤改良の必要有り。} \\ \text{管の外方向張出力 } P_{BC} < \text{ 曲線部側面の地盤反力: } P \quad \text{地盤改良の必要無し。} \end{array} \right)$$

と判断しております。

10. 曲線部推進力計算の考え方

- (1) ベルト伝動装置やバンドブレーキの理論を応用した、従来の方法と互換性があるうえ計算が簡単で応用が利く新しい推力計算の方法が提案されました。本工法では推力計算のみでなく管の外圧強度やカーブ防護工の検討まで理論展開しています。
「2000 年版下水道推進工法の指針と解説」にも $R/L > 20$ 程度以上であれば円弧と見なして差し支えなく有効であるとして採用されました。

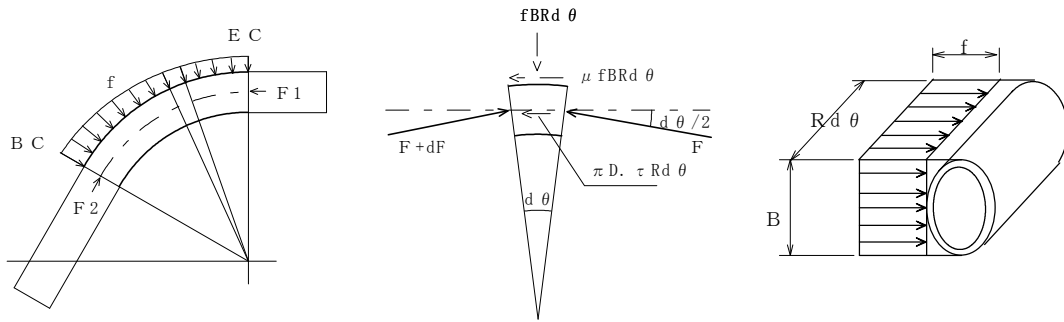


図 2-8 側方反力参考図

- (2) 接線方向の力の釣り合い

$$(F+dF)\cos(d\theta/2) - F\cdot\cos(d\theta/2) = \mu \cdot f \cdot B \cdot R \cdot d\theta + \pi \cdot D_o \cdot \tau_a \cdot R \cdot d\theta$$

$d\theta \rightarrow 0$ ならば $\cos(d\theta/2) \rightarrow 1$ なので整理すると

$$dF = \mu \cdot f \cdot B \cdot R \cdot d\theta + \pi \cdot D_o \cdot \tau_a \cdot R \cdot d\theta$$

$$dF = \mu \cdot f \cdot B \cdot R \cdot d\theta + \rho \cdot R \cdot d\theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

μ : 管と地山の摩擦係数

B : 管の地山と接触する幅 (m)

D_o : 管外径 (m)

τ_a : 管と土の剪断強さ (kN/m²)

f : 地盤反力 (kN/m²)

ρ : 外周面抵抗力 (kN/m) = $\pi \cdot D_o \cdot \tau_a$

- (3) 法線方向の力の釣り合い

$$(F+dF)\sin(d\theta/2) + F\cdot\sin(d\theta/2) = f \cdot B \cdot R \cdot d\theta$$

$d\theta \rightarrow 0$ ならば $\sin(d\theta/2) \rightarrow (d\theta/2)$ なので整理すると

$$F \cdot d\theta + dF \cdot (d\theta/2) = f \cdot B \cdot R \cdot d\theta$$

$dF \cdot d\theta/2$ は微少であるから無視して、両辺を $d\theta$ で除せば

$$F = f \cdot B \cdot R \quad \dots\dots\dots (2)$$

- (4) 推進力の計算

(2)を(1)に代入して整理すると

$$dF = (F + \rho \cdot R / \mu) \mu \cdot d\theta \text{ より } dF / (F + \rho \cdot R / \mu) = \mu \cdot d\theta$$

カーブ区間は、角度 $0 \sim \theta$ 、それに対応する推力は $F_1 \sim F_2$ なので積分すると

$$(\log | F + \rho \cdot R / \mu |) \Big|_{F_1}^{F_2} = \mu \cdot \theta$$

$$(F_2 + \rho \cdot R / \mu) / (F_1 + \rho \cdot R / \mu) = e^{\mu \cdot \theta}$$

$$F_2 = (F_1 + \rho \cdot R / \mu) e^{\mu \cdot \theta} - \rho \cdot R / \mu$$

$$F_2 = F_1 \cdot e^{\mu \cdot \theta} + (e^{\mu \cdot \theta} - 1) \cdot \rho \cdot CL / \mu \cdot \theta$$

($R = CL / \theta$ より)

$$F_2 = F_1 \cdot e^{\mu \cdot \theta} + \lambda \cdot \rho \cdot CL \quad \dots\dots (3)$$

11. 推力の算定

泥濃式推進工法の推力計算は、(社)日本下水道協会に参考式(I)として紹介されています。

本工法では参考式(I)の周面抵抗値計算式を基に、過去の施工実績より経験的に得られた管外周抵抗値を利用して推進力を算定しています。

また、曲線部推進力の計算式は、(社)日本下水道協会発行の下水道推進工法の指針と解説-2003-P119に記載されている(式2-9)を参考としています。

(1) 直線部推力

$$F = F_0 + (R \times S) \times L$$

F : 推力 (kN)

F₀ : 前面抵抗値 (kN) $F_0 = (P_e + P_w) \times (B_c / 2)^2 \times \pi$

P_e : 貫入抵抗 = 4 × N 値 (kN/m²)

最小貫入抵抗値として計算用N値は最小値を20とします。

P_w : 掘削室泥水圧 (地下水圧 + 20 kN/m²)

B_c : 推進管外径 (m)

R : 周面抵抗値 (kN) 下記表より求めます。

S : 管外周長 (m)

L : 推進延長 (m)

表 2-13 周面抵抗値 R の計算式

| 種 別 | 通常方式 | 推力低減装置 | |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | TYPE II | TYPE I |
| 粘土・シルト | 1.2 | 1.0 | 0.6 |
| 透水係数 10^{-4} 以下の砂・砂礫土 | $2.0 + 3.0 \times (G/100)$ | $1.5 + 1.0 \times (G/100)$ | $1.0 + 1.0 \times (G/100)$ |
| 透水係数 10^{-3} 以上の砂・砂礫土 | $2.0 + 3.0 \times (G/100)$ | $1.5 + 2.0 \times (G/100)$ | $1.0 + 2.0 \times (G/100)$ |

G : 礫率 (%)

(2) 曲線部推力

$$F_2 = F_1 \cdot e^{\mu \theta} + (f \cdot R / \mu) \cdot (e^{\mu \theta} - 1) = F_1 \cdot e^{\mu \theta} + \lambda \cdot f \cdot CL$$

F₂ : 曲線後端にかかる力

F₁ : 曲線部に前方よりかかる力

e^{μθ} : 前面抵抗の曲線後端での割り増し率

e : 自然対数の底 e = 2.718282 (少数点以下7桁目以降は省略)

μ : 管と地山の摩擦係数 (下記表 1-7 より)

θ : 曲率中心に対する曲線区間の角度 (θ = CL/R) (rad)

f : 管 1mあたりの推進抵抗 (kN/m)

R : 曲率半径 (m)

λ = (e^{μθ} - 1) / μθ : 曲線抵抗と直線抵抗の比率

CL : 曲線長 (=R・θ)

表 2-14 管と地山の摩擦係数 μ

| 種 別 | 通常方式 | 推力低減装置 | |
|-------------------------|------|---------|--------|
| | | TYPE II | TYPE I |
| 粘土・シルト | 0.3 | 0.2 | 0.1 |
| 透水係数 10^{-4} 以下の砂・砂礫土 | 0.3 | 0.2 | 0.1 |
| 透水係数 10^{-3} 以上の砂・砂礫土 | 0.3 | 0.3 | 0.2 |

(3) 推力計算例

施工条件

| | | | |
|------|-----------|------|------------|
| 管径 | : 800 mm | 推進延長 | : 160.0m |
| 土質名称 | : シルト層 | 平均N値 | : 20 程度 |
| 土被り | : 平均 5.0m | 地下水位 | : GL-1.00m |

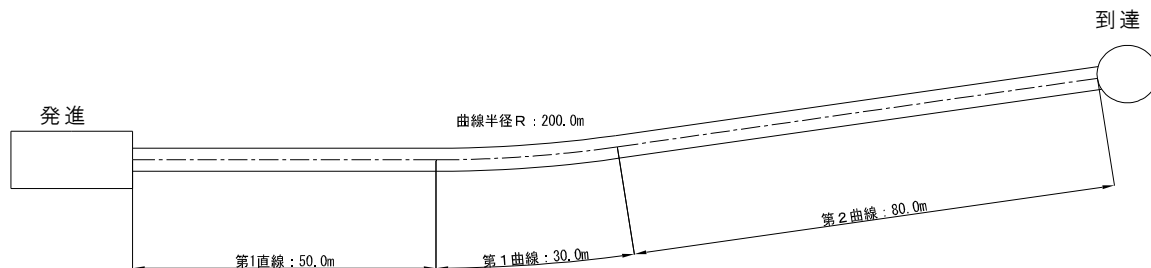


図 2-9 概略平面図

先端抵抗力

$$\begin{aligned}
 F_o &= (P_e + P_w) \cdot (B_s / 2)^2 \cdot \pi \\
 &= (80.000 + 64.800) \times (0.960 / 2)^2 \times \pi \\
 &= 104.81
 \end{aligned}$$

F_o : 先端抵抗力 (ただし、 $F_o \geq 0$) (kN)

P_e : 切羽単位面積当たり推力 $P_e = 4 \times 20 = 80$ (kN/m²)

P_w : 掘削室内泥水圧力 $P_w = 10.0 \times (4.00 + 0.96 / 2) + 20.0 = 64.8$ (kN/m²)

γ_w : 水の単位体積重量 $\gamma_w = 10.0$ (kN/m³)

h' : 水頭差 $h' = 4.00$ (m)

B_c : 管外径(m) $B_c = 0.96$ (m)

B_s : 掘進機外径(m) $B_s = 0.96$ (m)

m当り抵抗力

$$f = R \cdot S = 1.200 \times 3.016 = 3.619 \text{ (kN)}$$

R : 周面抵抗力 表 1-6 より 通常、シルト層より $R = 1.20$ (kN/m²)

S : 管の外周長 $S = B_c \times \pi = 0.96 \times \pi = 3.016$ (m)

B_c : 管外径 $B_c = 0.96$ (m)

$$\begin{aligned}
 \text{直線 1 推力 } F_{t1} &= F_o + f \times L_1 \\
 &= 104.810 + 3.619 \times 80.000 \\
 &= 394.33 \text{ (kN)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{曲線 1 推力 } F_{c1} &= F_{t1} \cdot e^{(\mu \theta)} + \lambda \cdot f \cdot C_{L1} \\
 &= 394.33 \times e^{(0.15 \cdot 0.30)} + 1.022 \times 3.619 \times 30.000 \\
 &= 523.428 \text{ (kN)}
 \end{aligned}$$

$$\lambda_1 = \{e^{(\mu \theta)} - 1\} / \mu \theta = 1.022$$

$$e^{(\mu \theta)} = 1.046$$

$$e = 2.718282$$

$$\theta = C_{L1} / R_1 = 30.000 / 200.000 = 0.15$$

$$\mu : \text{摩擦係数 } \mu = 0.3$$

$$\begin{aligned}
 \text{直線 2 推力 } F_{t2} &= F_{c1} + f \times L_2 \\
 &= 523.428 + 3.619 \times 50.000 \\
 &= 704.378 \text{ (kN)}
 \end{aligned}$$

よって、総推進力は 704.378 (kN)

12. 合成曲線の計算

(1) 合成曲線について

平面カーブと縦断カーブが混在する混合カーブ、平面カーブと縦断カーブが同時施工となる合成カーブでの施工も可能です。

掘進機の操作にあたっては、平面カーブを形成するため左右のジャッキのストローク量に差を付けます。右に曲がりたいときは左のジャッキを伸ばします。縦断カーブを形成するためには上下のジャッキのストローク量に差を付けます。上に曲がりたいときは下のジャッキを伸ばします。45度方向に4点配置されたジャッキのストロークが4つとも異なるため、制御が難しいと考えられています。

また平面カーブと縦断カーブの合成により目地開口方向が斜めになりますが、クッション材は目地開口方向と直角の位置に配置する必要があります。

このようなことから推進工法における合成曲線の設計施工例は少なく、合成カーブについての理論的な検討は文献に見あたりません。

合成カーブは平面と縦断のカーブを同時に形成する3次元曲線のため施工困難と考えられていました。本工法では「合成カーブは平面カーブと縦断カーブで構成されており、互いに分解・合成出来る」と考えています。

また曲線数が少ない場合は塑性変形を利用したクッション材を全周に用いることで比較的容易に施工が出来ることになりました。

(2) 合成曲線の計算方法

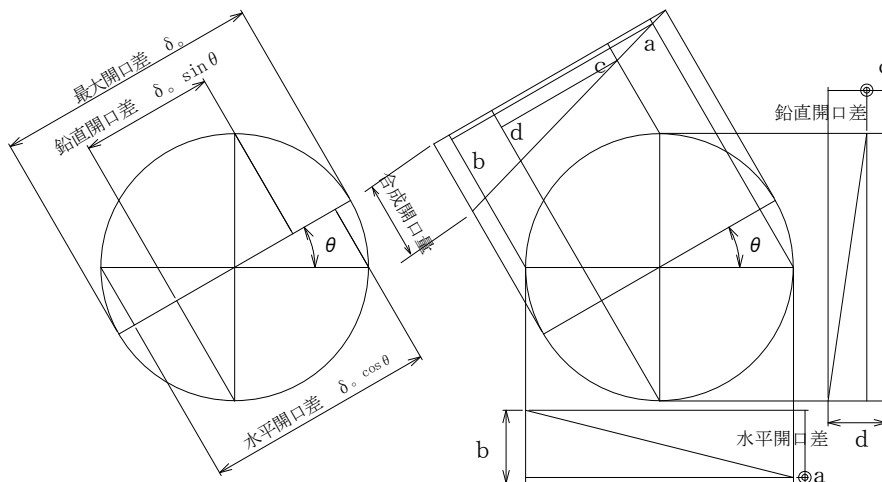


図 2-10 鉛直及び水平開口差参考図

① 水平・鉛直開口差と合成開口量

$$\delta_0^2 = \delta_H^2 \cos^2 \theta + \delta_V^2 \sin^2 \theta = \delta_H^2 + \delta_V^2 \quad \text{より} \quad \delta_0 = \sqrt{\delta_H^2 + \delta_V^2}$$

$$\text{合成開口量} \quad \delta_0 = \frac{D_0 \times L}{R_0 - D_0/2} = \sqrt{\left(\frac{D_0 \times L}{R_H - D_0/2}\right)^2 + \left(\frac{D_0 \times L}{R_V - D_0/2}\right)^2}$$

$$\text{水平開口差} \quad \delta_H = \frac{D_0 \times L}{R_H - D_0/2} = \delta_0 \times \cos \theta = b - a$$

$$\text{鉛直開口差} \quad \delta_V = \frac{D_0 \times L}{R_V - D_0/2} = \delta_0 \times \sin \theta = d - c$$

$$\text{② 合成曲率半径} \quad R_0 - D_0/2 = \frac{D_0 \times L}{\sqrt{\left(\frac{D_0 \times L}{R_H - D_0/2}\right)^2 + \left(\frac{D_0 \times L}{R_V - D_0/2}\right)^2}} = \frac{(R_H - D_0/2) \times (R_V - D_0/2)}{\sqrt{(R_H - D_0/2)^2 + (R_V - D_0/2)^2}}$$

$$D_0/2 \text{ を省略して簡略化すると} \quad R_0 = \frac{R_H \times R_V}{\sqrt{R_H^2 + R_V^2}}$$

$$\text{③ 合成開口方向の傾斜角} \quad \theta = \cos^{-1}\left(\frac{\delta_H}{\delta_0}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{\delta_V}{\delta_0}\right)$$

13. 推進管の選定

(1) 曲線施工法

推進工法では、推進管の継手部分にクッション材を使用することで、曲線推進を可能としています。カーブ用クッション材は管渠の曲線形成を容易にし、管端部の点接触を避けるため推進管の破損を防ぐ役割を果たします。

当工法では、図 2-11 に示すように、クッション材を推進管断面積の半分に貼付、曲線推進時に屈曲が容易になるように、接合部両側に空隙を作ります。

また、クッション材を使用することで角度を幾らでもつけられる訳ではなく、地震動により区別されている、震災レベル 1 地区とレベル 2 地区に適した推進管の最大拔出量及び許容拔出量の角度までとなっています。

本工法では、クッション材を推力伝達位置に設置して曲線推進を施工します。

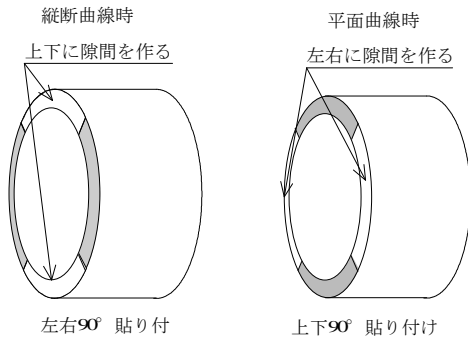


図 2-11 クッション材貼付位置

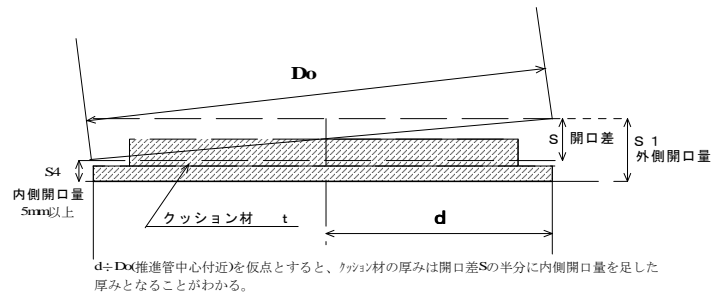


図 2-12 目地開口量参考図

(2) 目地開口量と許容拔出し長

表 2-15 継手性能

| | レベル1許容拔出し長 | レベル2許容拔出し長 |
|----|------------|------------|
| JA | 30 mm | 60 mm |
| JB | 40 mm | 80 mm |
| JC | 60 mm | 120 mm |

- ① レベル 2 における照査数値は、最大拔出し長及び最大曲げ角度を使用します。
- ② 最大拔出し長とは、止水ゴム輪が抜け出さない最大長さを言います。
- ③ 最大曲げ角度とは、最大拔出し長を角度にて表したものであるか、管が屈曲可能な最大曲げ角度を言います。
- ④ レベル 1 における照査数値は、レベル 2 照査数値の 1/2 とします。この数値は許容拔出し長及び許容曲げ角度と呼ばれるもので、曲線施工における目地開きと地震動における拔出しがレベル 1 照査数値を上回らないようにします。

目地開口差

$$\text{外側目地開口差} = \frac{L \times D_o}{R - D_o \div 2}$$

ここに

L : 推進管長 (m)
 D o : 推進管外径 (m)
 R : 曲線半径 (m)

(3) 曲線半径と必要推進管長

曲線半径に対する必要な推進管長は、下記式より求められます。

$$\text{必要推進管長(m)} = \frac{\{(\text{曲線半径:R(m)} - \text{管外径:Do(m)} \div 2) \times \text{許容拔出長(m)}\}}{\text{推進管外径:Do(m)}}$$

しかしながら、曲線の位置や推進延長によっては、受圧面積確保のため推進管長を短く選定する場合があります。

14. 推進工法用推進管

(1) ヒューム管等

- ① 下水道推進工法用鉄筋コンクリート管 (JSWAS A-2-1999)日本下水道協会規格

表 2-16 継手性能と取扱協会(1)

| 継手性能 | 管の名称 | 規格番号 | 登録者 |
|------|---------|-------------------|-------------|
| JA | E形管 | JSWAS A-2-1991 | |
| JA | HJP | KHK S-1 | 全国Wジョイント管協会 |
| JB | Wジョイント管 | JWJPAS J-2 | 全国Wジョイント管協会 |
| JB | NS推進管 | JHPAS-25 | 全国ヒューム管協会 |
| JC | Wジョイント管 | JWJPAS J-2N | 全国Wジョイント管協会 |

- ② 下水道推進工法用ガラス繊維鉄筋コンクリート管(JSWAS A-8-2002)日本下水道協会規格

表 2-17 継手性能と取扱協会(2)

| 継手性能 | 管の名称 | 規格番号 | 登録者 |
|------|----------|-------------------|-----------------|
| GJA | E形管 | JSWAS A-8-1992 | |
| GJA | HJP | KHK S-1 | 近畿ヒューム管工業協同組合 |
| GJC | SSジョイント管 | JSLPAS S-1 | 日本スーパーラインパイプ工業会 |
| GJC | Wジョイント管 | JWJPAS J-2N | 全国Wジョイント管協会 |
| GJC | NS推進管 | JHPAS-25 | 全国ヒューム管協会 |

- ③ 下水道推進工法用レジンコンクリート管(JSWAS K-12-2001)日本下水道協会規格

表 2-18 継手性能と取扱協会(3)

| 継手性能 | 管の名称 | 規格番号 | 登録者 |
|------|--------------|--------------------|-----------|
| RJC | レジンコンクリート推進管 | JSWAS K-12-1992 | 日本レジン製品協会 |

(2) その他の管

- ① 下水道用鋼・コンクリート合成管(栗本コンクリート工業株) MAX 推進管)
 1/3 管(800 mm)、1/4 管(600 mm)、1/5 管(500 mm)、1/6 管(400 mm)の鋼合成管であり、超急曲線(多曲線)・大深度・高水圧(内水圧)・耐震設計へ対応しています。
 外圧強度は JSWAS A-2 規格の推進管に比べ、3 倍(3 種)・4 倍(4 種)・5 倍(5 種)の外圧強度を有しています。
 対応口径:φ800 mm～φ3000 mm 標準管・半管があります。
- ② 合成鋼管(CPC ライニング鋼管) 日本工業用水規格-1964
 比較的薄肉の鋼管に膨張性コンクリートを遠心力でライニングした複合管です。
- ③ 鋼複合鉄筋コンクリート製埋込カラー形Wジョイント推進管(JWJPAS J-5-1994)
 全国Wジョイント管協会

上記、またはそれ以外の推進管については協会までお問い合わせください。

15. 中大口径推進管の規格

下水道推進工法用鉄筋コンクリート管 JSWAS A-2-1999

(1) 管の種類と継手性能

表 2-19 管の種類

| 種類 | | | | 種類 記号 ^{注1} | 呼び径 範囲 |
|-----|------|------|----------|------------------------|-----------|
| 形状 | 外圧強度 | 圧縮強度 | 継手性能 | | |
| 標準管 | 1種 | 50 | JA JB JC | X51 | 800~3000 |
| | | 70 | | X71 | |
| | 2種 | 50 | | X52 | |
| 中押管 | S | — | | XS | 1000~3000 |
| | T | 1種 | | XT51 | |
| | | 2種 | | XT52 | |

注1) 記号のXは継手性能区分JA、JB、JCのいずれかを示し、JA51は継手性能JA、51は管体コンクリート圧縮強度が50N/mm²以上で外圧強度が1種を示します。

注2) 抜出長は曲線推進の際に管の外側の目地開きとして設計上で用いることの出来る数値であり、最大抜け出し量の1/2となっています。

表 2-20 継手性能

| 継手区分 | 水圧(MPa) | 抜出長(mm) |
|------|---------|---------|
| JA | 0.1 | 30 |
| JB | 0.2 | 40 |
| JC | 0.2 | 60 |

(2) 水密試験について

表2-21 継手型式試験の種類と条件

| 継手区分 | 試験の種類 | 試験水圧(MPa) | 抜出長(mm) |
|------|-------|-----------|---------|
| JA | 水平水密 | 0.15 | 30 |
| | 曲げ水密 | | 45 |
| | 複合水密 | 0.10 | 67 |
| JB | 水平水密 | 0.25 | 40 |
| | 曲げ水密 | | 60 |
| | 複合水密 | 0.20 | 77 |
| JC | 水平水密 | 0.25 | 60 |
| | 曲げ水密 | | 90 |
| | 複合水密 | 0.20 | 97 |

複合水密試験は、曲線推進において管の片側が継手性能の寸法だけ抜け出している状態から、レベル2地震動によって更に抜け出した場合においても止水性を保ち管路の流下機能が確保できることを確認する試験となっています。

地盤の永久ひずみを1.5%とした場合の抜出量を「管の有効長×ひずみ」として計算します。標準管では、 $2430 \times 0.015 = 37\text{mm}$ となります。

よって JA: $30 + 37 = 67\text{mm}$
 JB: $40 + 37 = 77\text{mm}$
 JC: $60 + 37 = 97\text{mm}$

(3) 登録管

表 2-22 登録された管

| 継手性能 | 登録番号 | 管の名称 | 管の略号 | 規格番号 | 登録者 |
|------|------|------------|--------|--------------------|-------------|
| JA | JA1 | E形管 | E | JSWAS A-2-1991 | |
| JA | JA2 | HJP | HJP | KHK S-1 | 全国Wジョイント管協会 |
| JB | JB1 | Wジョイント管 | EW | JWJPAS J-2 | 全国Wジョイント管協会 |
| JB | JC1 | NS推進管 | NS | JHPAS-25 | 全国ヒューム管協会 |
| JC | JC2 | Wジョイント管 | ENW | JWJPAS J-2N | 全国Wジョイント管協会 |
| JC | JC2 | レジンコンクリート管 | RT, RM | JSWAS K-12-2001 | 日本レジン製品協会 |

管材の割付は工事費にも影響することから慎重に検討する必要があります。

下水道推進工法用ガラス繊維鉄筋コンクリート管は、水セメント比(W/C)24～29%程度のドライコンクリートを用いることで、管体強度 70N/mm²を保障し、高強度混和材を添加することで管体強度 90N/mm²を保障しています。

(1) 管の種類と継手性能

表 2-23 管の種類

| 種類 | | | | 種類 記号 ^{注1} | 呼び径 範囲 |
|-----|------|------|------------|------------------------|-----------|
| 形状 | 外圧強度 | 圧縮強度 | 継手性能 | | |
| 標準管 | 1種 | 70 | GJA GJC | X71 | 800～3000 |
| | | 90 | | X91 | |
| | 2種 | 70 | | X72 | |
| | | 90 | | X92 | |
| | 3種 | 70 | | X73 | |
| | | 90 | | X93 | |
| 中押管 | S | — | — | XS | 1000～3000 |
| | T | 1種 | 70 | XT 71 | |
| | | | 90 | XT 91 | |
| | | 2種 | 70 | XT 72 | |
| | | | 90 | XT 92 | |
| | | 3種 | 70 | XT 73 | |
| | | | 90 | XT 93 | |

注1) 記号のXは継手性能区分 GJA・GJC のいずれかを示します。

表 2-24 継手性能

| 継手区分 | 耐水性 (MPa) | 拔出長(mm) | 管の名称 |
|------|--------------|---------|-----------------------------|
| GJA | 0.1 | 30 | E型管 HJP |
| GJC | 0.2 | 60 | SSジョイント管 Wジョイント管N形 NS推進管 |

(2) 内圧性能について

中大口径における雨水貯留管や農業用水パイプラインなど、管体に内圧が発生する条件に対し有効な機能を有しています。

- ① 高強度で均質なコンクリート構造を確保しています
- ② 耐アルカリ性及び耐酸性ガラス繊維が全断面に有効に働く構造となっています。
- ③ 引張り強度の大きいガラス繊維を使用しています。

表 2-25 内圧性能

| 管種別内圧性能 | | |
|-----------|-----------|-----------|
| 1種 2P(2K) | 2種 4P(4K) | 3種 6P(6K) |