

横ボーリング工の先端間隔計算

横ボーリング工の平面配置は、一般に扇形(場合によっては平行)とし、横ボーリングがすべり面を横切る位置で各ボーリングの間隔を5～10m程度として決定することが多い。

本計算書は、管暗渠の公式を用いて、横ボーリング工による効果を推定し、横ボーリング工の配置間隔(先端間隔)の妥当性の参考資料とするものである。

横ボーリング工の先端間隔計算

被圧地下水の排除を目的とした横ボーリング工

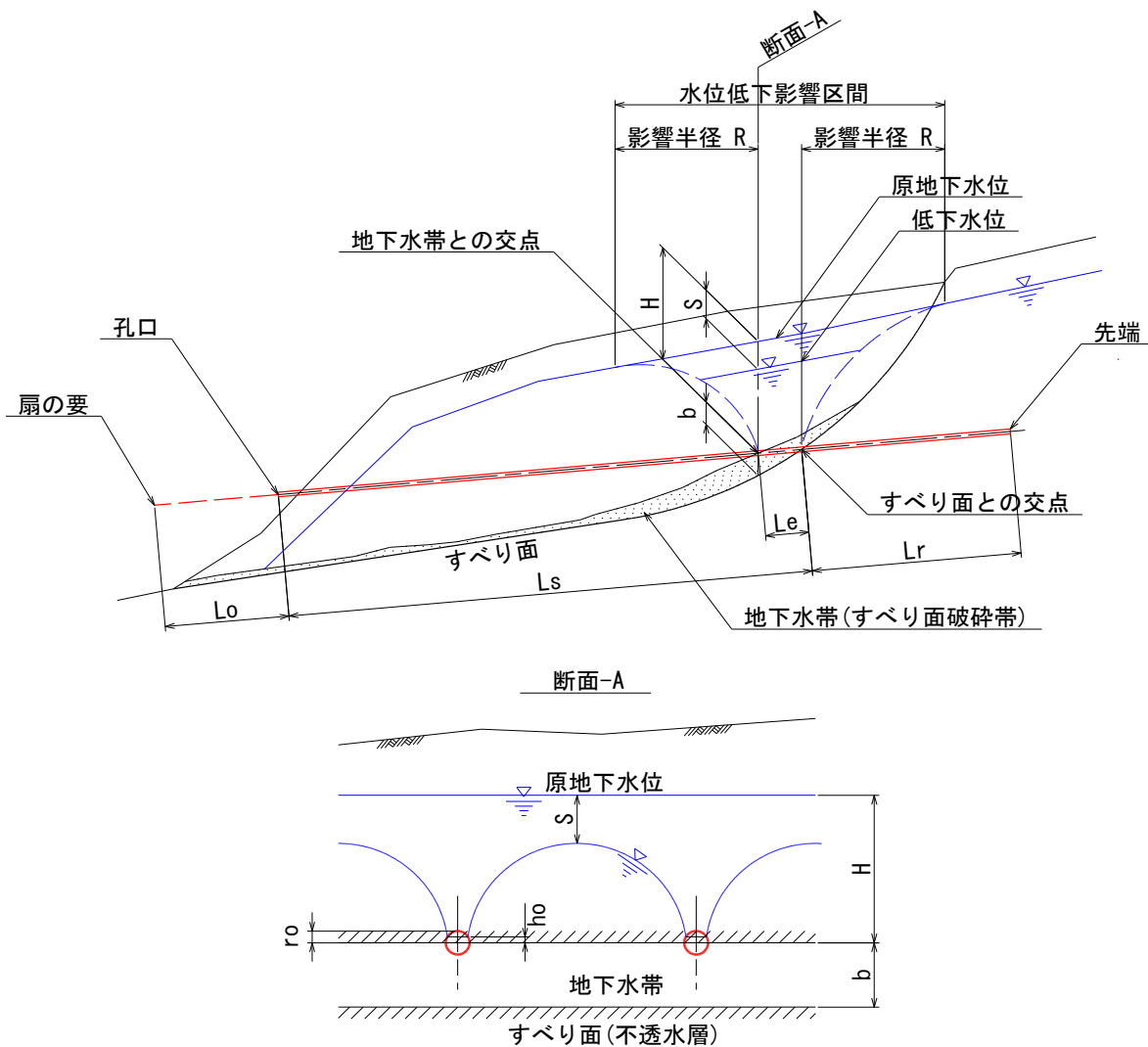
本計算書は、すべり面付近の破砕帯に生じた有圧(被圧)地下水を対象とした管暗渠の公式を用いて、横ボーリング工による効果をするものである。

横ボーリング工の先端間隔計算

不透水層が浅く、被圧帯水層に暗渠管を設けた場合の横ボーリング先端間隔計算

(1) 計算条件

計算条件項目	記号	単位	数値	備考
管暗渠の半径	r_0	m	0.020	
管暗渠の扇の要から孔口までの距離	L_0	m	2.000	
管暗渠の孔口から地すべり交点までの距離	L_s	m	16.000	
管暗渠の地すべり交点からの根入れ長	L_r	m	5.000	
ストレーナ有効長(すべり面の亀裂帯幅)	L_e	m	1.000	
地下水帯厚(通常、数cm～十数cm程度と薄い)	b	m	0.100	
管暗渠の地下水帯交点位置での水位高	H	m	2.700	
水位低下計画高	S	m	0.500	
移動層の透水係数	k	cm/s	1.500E-03	



(透水係数の参考表)

		透水係数 (cm/sec)										
		10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1
透水性		実質上不透水		非常に低い		低い		中位		高い		
土の種類		粘性土		微細砂, シルト, 砂-シルト -粘土混合土			砂及び礫		清浄な礫			

出典：「土質試験の方法と解説」地盤工学

(2) 管暗渠の集水量算定式

不透水層が浅く、被圧帯水層に暗渠管を設けた場合の暗渠算定には、小柳・前川の式^(※)を用いる。

$$q = \frac{\pi \cdot k \cdot S_o}{2.3 \cdot \text{Log} \left[\frac{\sinh \{ (\pi \cdot R) / 2b \}}{\sinh (\pi \cdot r_o) / 2b} \right]}$$

$$S_o = H - h_o = H - r_o \quad (h_o \doteq r_o)$$

$$R = 575 \cdot S_o \cdot \sqrt{k \cdot b}$$

ここに、 q : ストレーナ単位長さ当りの集水量 (m³/s)

H : 管地下水帯交点位置での水位高 (m)

S_o : 水位低下高 (m)

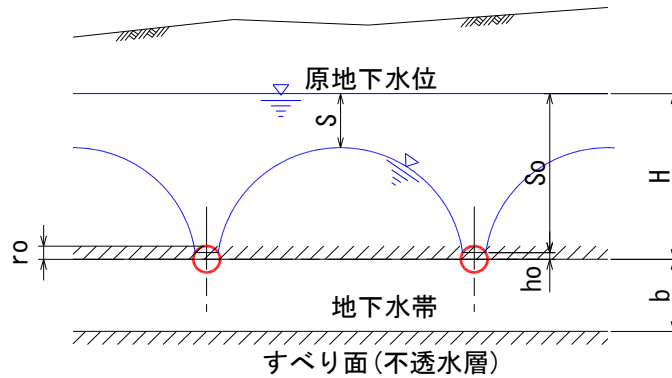
R : 影響圏 (m)

r_o : 管暗渠の半径 (m)

h_o : 管暗渠内の水位 (m)

b : 地下水帯厚 (m)

k : 透水係数 (m/s)



※小柳・前川の式の出典

「地すべり工学 -理論と実線- (山海堂)」 p.972~p.973)

「新版 地すべり工学 -最新のトピックス- (山海堂)」 p.453~p.455)

「H25版 治山技術基準 解説 地すべり防止編 (日本治山治水協会)」 p.114~p.115)

(3) 管暗渠の先端間隔算定式

ストレーナ有効区間でのボーリング間隔は、ボーリング中間地点での水位低下計画高(S)との関係式から、以下の式で表される。

$$d = 2b / \pi \cdot \sinh^{-1} \{ \exp (X) \}$$

$$\theta = 2 \cdot \sin^{-1} (d/a)$$

$$X = \text{Ln} [\sinh \{ (\pi \cdot r_o) / (2b) \}] + \pi \cdot k (S_o - S/2) / q$$

ここに、 d : ストレーナ有効区間中間での先端間隔の1/2 (m)

ここに、管暗渠の打設角度 ($^{\circ}$)

b : 地下水帯厚 (m)

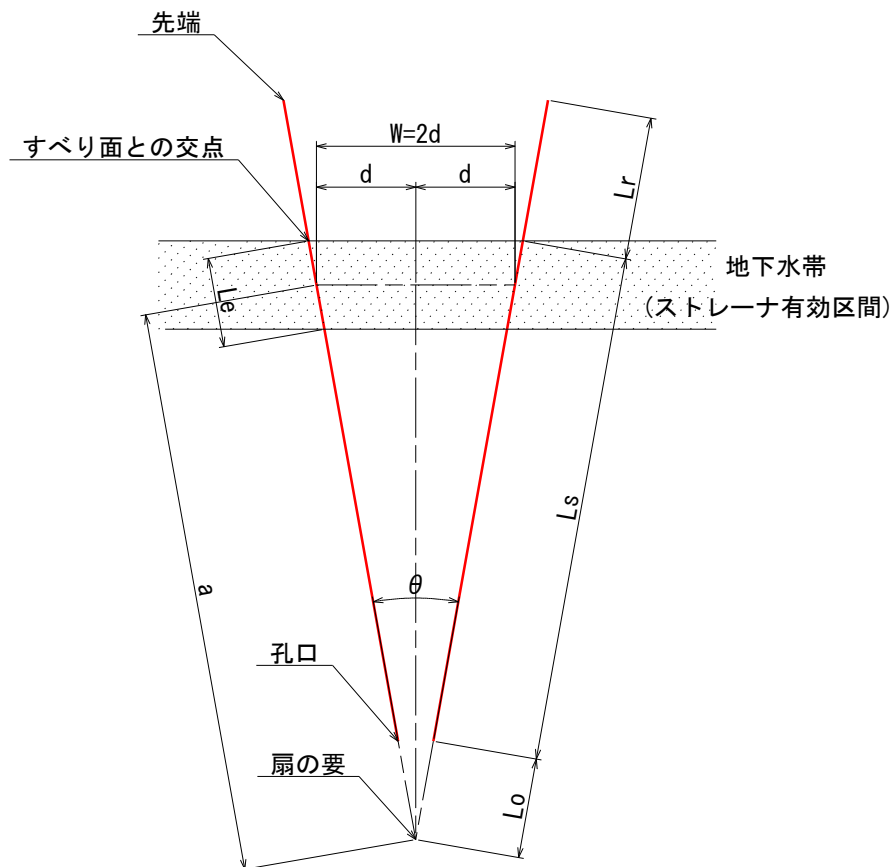
r_o : 管暗渠の半径 (m)

k : 透水係数 (m/s)

S_o : ストレーナ区間の平均水位低下高 (m)

S : 水位低下計画高 (m)

q : ストレーナ単位長さ当りの集水量 (m^3/s)



(4) 管暗渠先端間隔の計算

1) 流出量の計算

$$S_o = H - h_o = H - r_o \quad (h_o \doteq r_o)$$

$$= 2.680 \text{ (m)}$$

$$R = 575 \cdot S_o \cdot \sqrt{k \cdot b}$$

$$= 1.887 \text{ (m)}$$

$$q = \frac{\pi \cdot k \cdot S_o}{\text{Ln} \left[\frac{\sinh \{ (\pi \cdot R) / (2b) \}}{\sinh \{ (\pi \cdot r_o) / (2b) \}} \right]}$$

$$= \frac{1.263\text{E-}04}{30.0945}$$

$$= 4.197\text{E-}06 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

2) ストレーナ有効区間中間でのボーリング間隔

$$X = \text{Ln} \left[\frac{\sinh \{ (\pi \cdot r_o) / (2b) \}}{\sinh \{ (\pi \cdot d) / (2b) \}} \right] + \pi \cdot k (S_o - S/2) / q$$

$$= 26.146$$

$$d = 2b / \pi \cdot \sinh^{-1} \{ \exp(X) \}$$

$$= 1.709 \text{ (m)}$$

よって、ストレーナ有効区間中間でのボーリング間隔 $W (=2d)$ は

$$W = 2 \cdot d = 3.42 \text{ (m)}$$

ここに、 W : ストレーナ有効区間中間での暗渠管間隔

d : ストレーナ有効区間中間での暗渠管間隔の1/2 (m)

b : 地下水帯厚 (m) = 0.100 (m)

r_o : 管暗渠の半径 (m) = 0.020 (m)

k : 透水係数 (m/s) = 1.500E-03 (cm/s)
= 1.500E-05 (m/s)

S_o : ストレーナ区間の平均水位低下高 (m)

S : 水位低下計画高(m)= 0.500 (m)

q : ストレーナ単位長さ当りの集水量 (m³/s)

2) 打設角度

管暗渠の打設角度は次式で求める。

$$\begin{aligned}\theta &= 2 \cdot \sin^{-1} (d/a) \\ &= 2 \cdot \sin^{-1} \{ 1.709 / 18.500 \} \\ &= 10.60 (^\circ)\end{aligned}$$

ここに、 θ : 管暗渠の打設角度 ($^\circ$)

d : ストレーナ有効区間中間での暗渠管間隔の1/2 (m)

$$d = 1.709 \text{ (m)}$$

a : 扇の要からストレーナ有効区間中間までの距離 (m)

$$a = L_o + L_s - L_e/2 = 18.500 \text{ (m)}$$

3) 地すべり面より先に根入れした管暗渠の先端管距離

管暗渠の先端管距離は次式で求める。

$$\begin{aligned}W_r &= 2 \cdot L_t \cdot \sin (\theta / 2) \\ &= 2 \times 23.000 \times \sin (10.60 / 2) \\ &= 4.25 \text{ (m)}\end{aligned}$$

ここに、 W_t : 暗渠管先端間隔 (m)

θ : 管暗渠の打設角度 ($^\circ$)

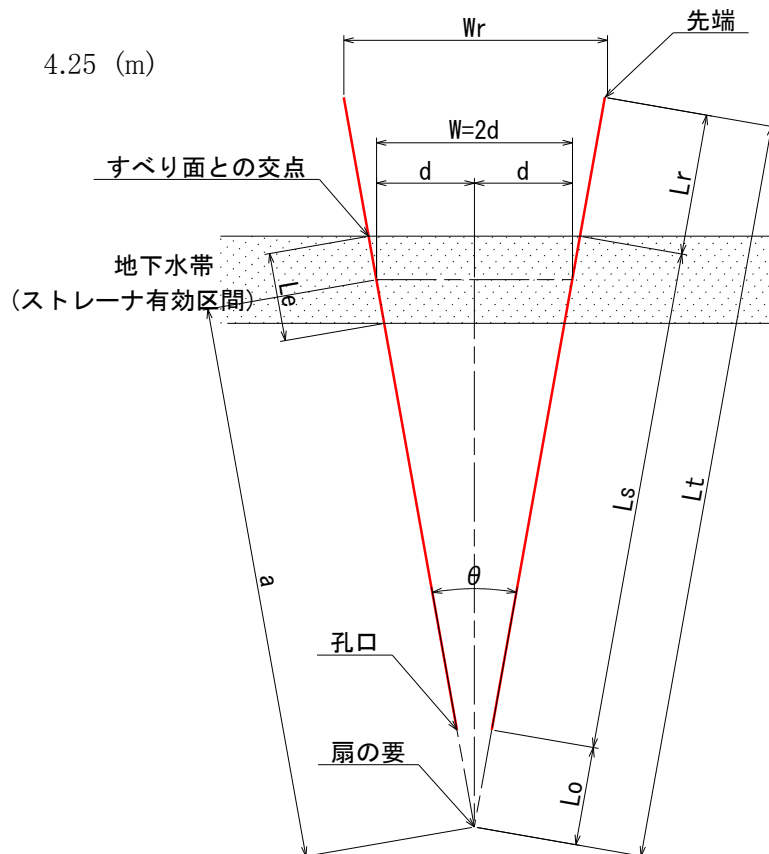
L_t : 扇の要から暗渠管先端までの距離 (m)

$$L_t = L_o + L_s + L_r = 23.000 \text{ (m)}$$

(5) 暗渠間の配置について

以上の計算結果より、下記の配置が目安となる。

- 暗渠間の打設角度
 $\theta \leq 10.60 (^\circ)$
- 暗渠先端の間隔
 $W_r \leq 4.25 \text{ (m)}$



横ボーリング工の先端間隔計算

雨水の浸透による水位上昇防止を目的とした横ボーリング工

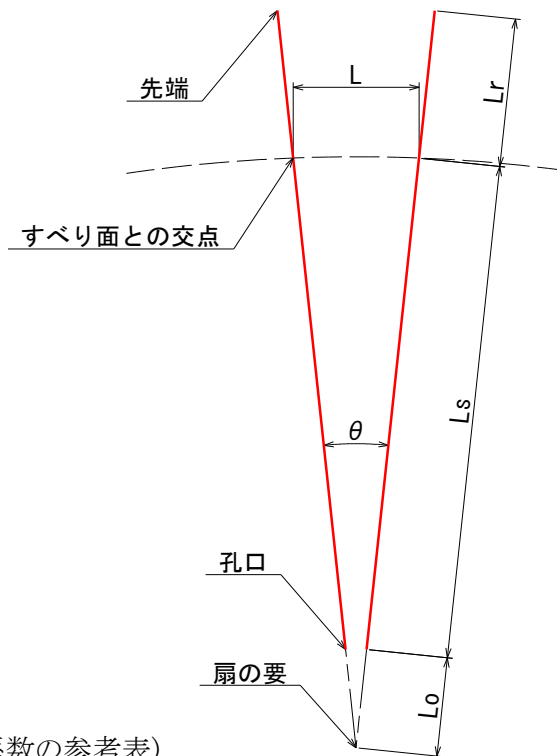
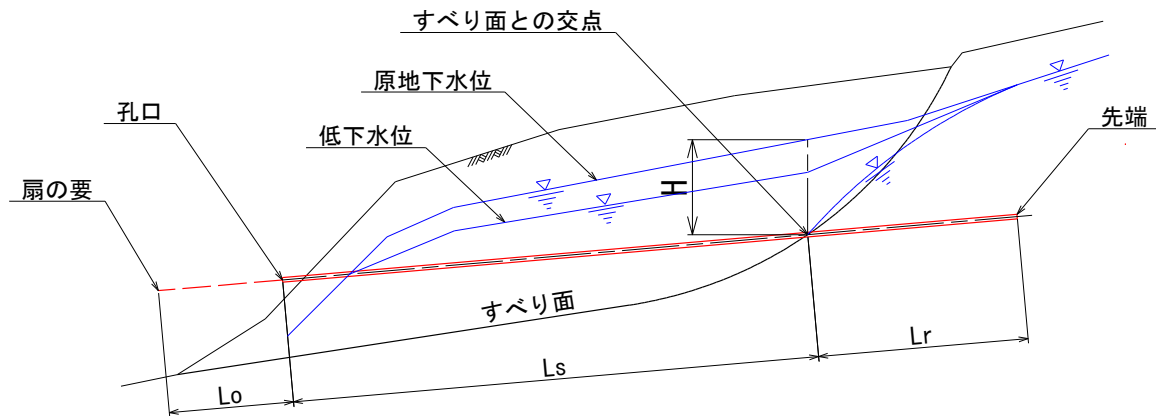
本計算書は、雨水の浸透を対象とした管暗渠の公式を用いて、横ボーリング工による効果を推定するものである。

横ボーリング工の先端間隔計算

雨水の浸透による水位上昇防止を目的とした場合の横ボーリング先端間隔計算

(1) 計算条件

計算条件項目	記号	単位	数値	備考
管暗渠の半径	ro	m	0.020	
管暗渠の扇の要から孔口までの距離	Lo	m	2.000	
管暗渠の孔口から地すべり交点までの距離	Ls	m	17.000	
管暗渠の地すべり交点からの根入れ長	Lr	m	5.000	
管暗渠の地すべり交点位置での水位高低差	H	m	5.000	
移動層の透水係数	k	cm/s	1.380E-03	
雨水の浸透能 (=設計降雨強度)	ω	mm/h	50	



(透水係数の参考表)

		透水係数 (cm/sec)										
		10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1
透水性		実質上不透水		非常に低い		低い		中位		高い		
土の種類		粘性土		微細砂, シルト, 砂-シルト -粘土混合土				砂及び礫		清浄な礫		

出典：「土質試験の方法と解説」地盤工学

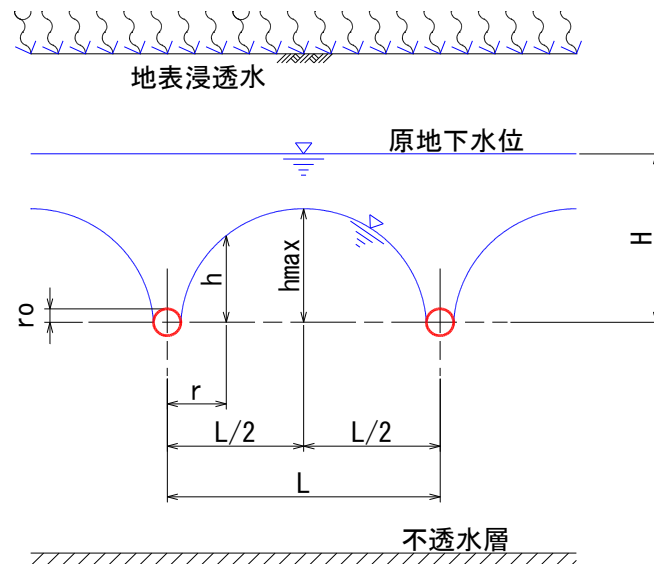
(2) 管暗渠の公式

雨水による浸透を対象とした自由地下水位の算定には、ア・エヌ・コスチャコフの式^(※)を用いる。

$$q = \alpha \cdot k \cdot H / \text{Ln} (R/r_0) \quad \dots \text{式(a)}$$

$$h = q \cdot \text{Ln} (r/r_0) / (\alpha \cdot k) \quad \dots \text{式(b)}$$

- ここに、 q ：ストレーナ単位長さ当りの集水量 (m^3/s)
 r ：管暗渠中心からの計算点の離れ(m)
 h ：管暗渠中心から r 離れた点の水位高 (m)
 H ：暗渠中心と地下水面との高さ (m)
 R ：影響半径 (m)
 r_0 ：管暗渠の半径 (m)
 k ：透水係数 (m/s)
 α ：次式で算定される係数
$$\alpha = \pi/2 + H/R$$



※ア・エヌ・コスチャコフの式の出典

「地すべり工学 -理論と実線- (山海堂)」 p.966～p.968)

「新版 地すべり工学 -最新のトピックス- (山海堂)」 p.448～p.450)

(3) 管暗渠先端間の距離算定式

管暗渠先端間の距離算定式は、先端最高水位 h_{max} が H に一致するものとして、雨水の浸透能を考慮して決定する。

最高水位 h_{max} は $r = L/2$ の位置に生じ、 $L/2$ 区間の総浸透量は $\omega \cdot L/2$ である。

$q = \omega \cdot L/2$ 、 $R=L/2$ を式(b)に代入して整理すると、 H に関する二次方程式となる。

$$H^2 + \pi/4 \cdot L \cdot H - \omega \cdot L^2 \text{Ln}(L/2r_0) / (4k) = 0 \quad \dots \text{式(c)}$$

この方程式を解いて、 H と L の関係式をが求まる。

$$H = \{ \sqrt{(\pi \cdot L/4)^2 + \omega \cdot L^2 / k \cdot \text{Ln}(L/2r_0)} - \pi \cdot L / 4 \} / 2 \quad \dots \text{式(d)}$$

ここに、 L ：管暗渠の先端管距離 (m)

H ：先端における暗渠中心と地下水面との高さ

$$H = 5.000 \text{ (m)}$$

r_0 ：管暗渠の半径

$$r_0 = 0.020 \text{ (m)}$$

k ：透水係数 (m/s)

$$k = 1.380\text{E-}03 \text{ (cm/s)} = 1.380\text{E-}05 \text{ (m/s)}$$

ω ：浸透能(=設計降雨強度)

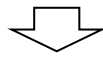
$$\omega = 50 \text{ (mm/h)} = 1.389\text{E-}05 \text{ (m/s)}$$

(4) 管暗渠先端間の距離

1) 地すべり面との交点における管暗渠間距離 (L)

管暗渠先端間の距離算定である式(d)に与値を代入すると、式(e)となる。

$$H = \{ \sqrt{(\pi \cdot L/4)^2 + \omega \cdot L^2 / k \cdot \text{Ln}(L/2r_0)} - \pi \cdot L / 4 \} / 2 \quad \dots \text{式(d)}$$



$$5.000 = \{ \sqrt{0.617 \times L^2 + 1.006 \times L^2 / \text{Ln}(L/0.040)} - 0.785 \times L \} / 2 \quad \dots \text{式(e)}$$

式(e)を満足する L の値を求めると以下の値を得る。

$$L = 6.242 \text{ (m)} \rightarrow \text{検証 } H = 5.000 \text{ (m)}$$

2) 打設角度 (θ)

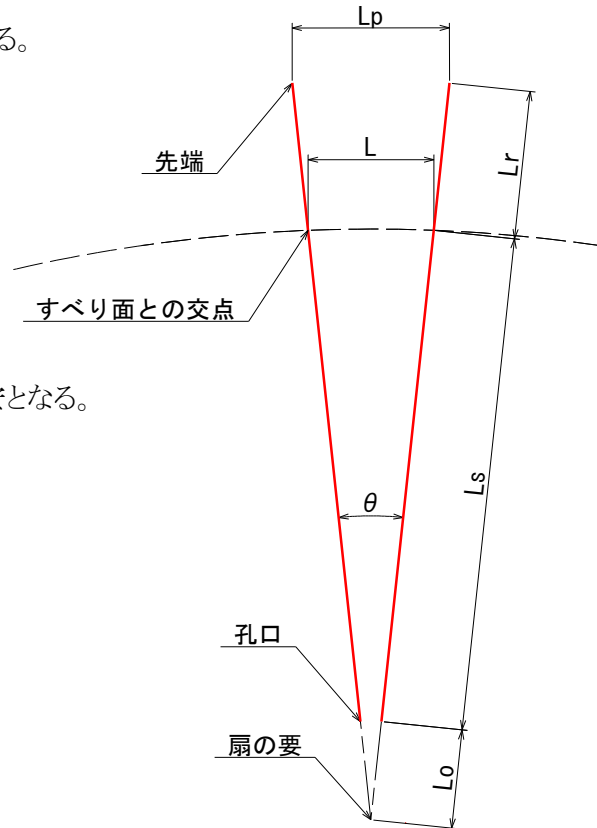
管暗渠間の打設角度は次式で求める。

$$\begin{aligned}\theta &= 2 \cdot \sin^{-1} [L / \{ 2 \cdot (L_o + L_s) \}] \\ &= 2 \cdot \sin^{-1} [6.242 / \{ 2 \times (2.000 + 17.000) \}] \\ &= 18.91 (^\circ)\end{aligned}$$

3) 地すべり面より先に根入れした管暗渠の先端管距離 (L_p)

管暗渠の先端管距離(L_p)は次式で求める。

$$\begin{aligned}L_p &= 2 \cdot (L_o + L_s + L_r) \cdot \sin(\theta / 2) \\ &= 2 \times 5.000 \times \sin(18.91 / 2) \\ &= 7.89 \text{ (m)}\end{aligned}$$



(5) 暗渠間の配置について

以上の計算結果より、下記の配置が目安となる。

- 暗渠間の打設角度

$$\theta \cong 18.91 (^\circ)$$

- 暗渠先端の間隔

$$L_p \cong 7.89 \text{ (m)}$$

横ボーリング工の先端間隔計算

原水位の低下および雨水の浸透の両方を対象とした場合

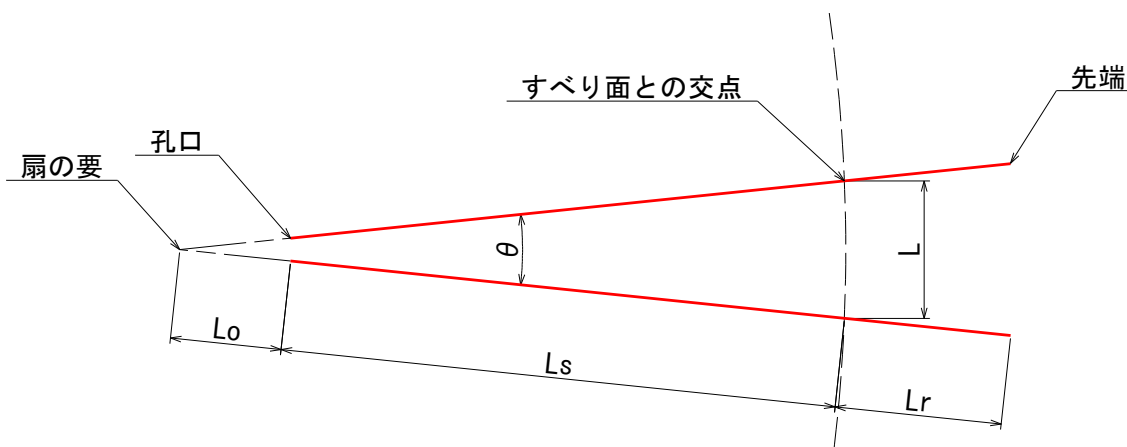
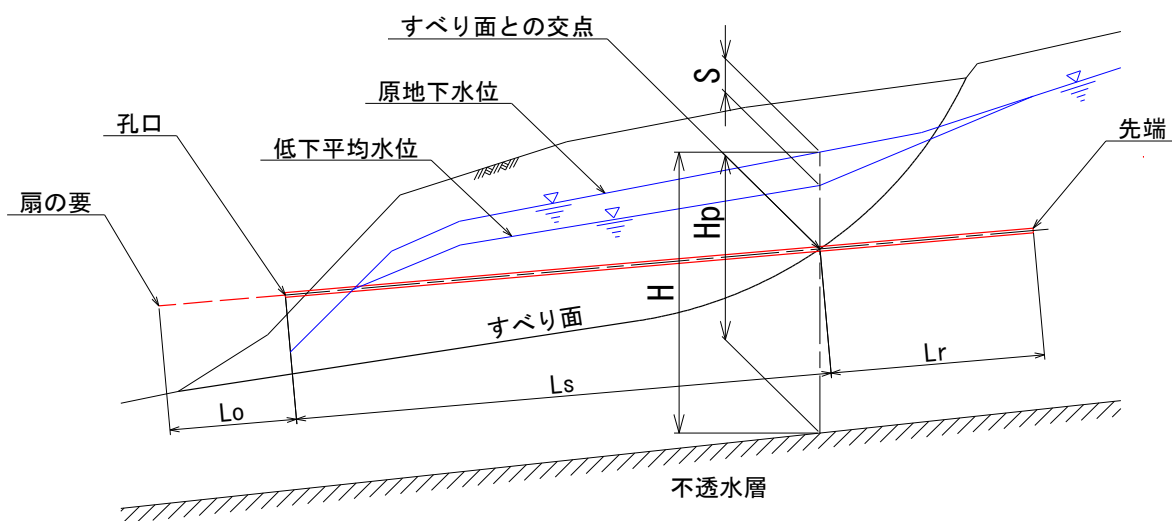
本計算書は、原水位と雨水の浸透を対象とした管暗渠の公式を用いて、横ボーリング工による効果を推定するものである。

横ボーリング工の先端間隔計算

原水位の低下および雨水の浸透の両方を対象とした場合の横ボーリング先端間隔計算

(1) 計算条件

計算条件項目	記号	単位	数値	備考
管暗渠の半径	r_0	m	0.020	
管暗渠の扇の要から孔口までの距離	L_0	m	2.000	
管暗渠の孔口から地すべり交点までの距離	L_s	m	17.000	
管暗渠の地すべり交点からの根入れ長	L_r	m	5.000	
管暗渠の地すべり交点位置での原水位高	H	m	10.000	
管暗渠の地すべり交点位置での管暗渠高さ	H_p	m	5.000	
水位低下計画高	S	m	1.000	
移動層の透水係数	k	cm/s	1.000E-03	
雨水の浸透能 (=設計降雨強度)	ω	mm/h	50.0	



(透水係数の参考表)

		透水係数 (cm/sec)										
		10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1
透水性		実質上不透水		非常に低い		低い		中位		高い		
土の種類		粘性土		微細砂, シルト, 砂-シルト -粘土混合土				砂及び礫		清浄な礫		

出典: 「土質試験の方法と解説」地盤工学

(2) 管暗渠の公式

原水位の低下および雨水の浸透の両方を対象とした場合の自由地下水位の算定には、ア・エヌ・コスチャコフの式^(※)を用いる。

$$h = \frac{q_0 + \omega \cdot L/2}{\alpha \cdot k} [\text{Ln}(L/2 \cdot r_0) + 2 \cdot r_0/L - 1] \quad \dots \text{式(a)}$$

$$h_{\max} = 1/2 \sqrt{(\pi L/4)^2 + (2q_0 + \omega/L) \cdot L \cdot \text{Ln}(L/2r_0)/k} - \pi \cdot L/8 \quad \dots \text{式(b)}$$

$$q_0 = \alpha \cdot k \cdot H_1 / \text{Ln}(R/r_0) \quad \dots \text{式(c)}$$

$$\alpha = \pi/2 + H_1/R \quad \dots \text{式(d)}$$

$$\alpha = \pi/2 + 2 \cdot h_{\max}/L \quad \dots \text{式(e)}$$

$$R = 575 \cdot S_0 \sqrt{k \cdot H} \quad \dots \text{式(f)}$$

ここに、h：管暗渠標高から測った平均水位高 $h = H_1 - S = 4.000$ (m)

h_{max}：管暗渠中間の最高水位 (m) 式(b)で計算

H₁：管暗渠標高からの原水位 =H-H_p= 5.000 (m)

H：不透水層からの原水位 = 10.000 (m)

H_p：管暗渠の不透水層からの高さ = 5.000 (m)

S：水位低下計画高 = 1.000 (m)

q₀：雨水浸透水を考慮しない場合の流入量 (m³/s)

ω：雨水の浸透能 (=設計降雨強度) = 50.000 (mm/h)

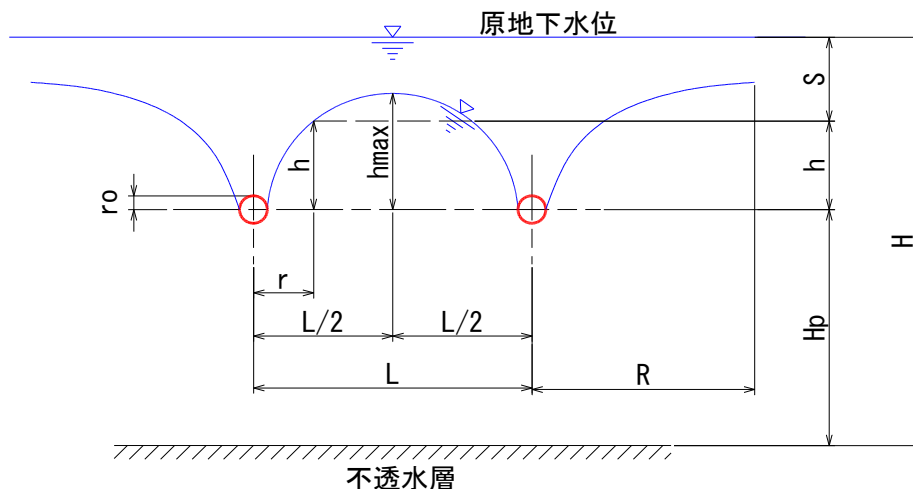
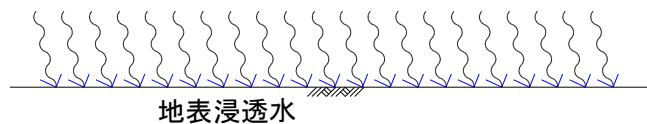
L：管暗渠のすべり面を切る位置での間隔 (m)

R：影響半径 (m) 式(f)で計算

r₀：管暗渠の半径 = 0.020 (m)

k：透水係数 = 1.000E-03 (cm/s)= 1.000E-05 (m/s)

S₀：管暗渠位置での水位低下高 $S_0 = H - H_p = 5.000$ (m)



※ア・エヌ・コスチャコフの式の出典

「地すべり工学 -理論と実線- (山海堂)」 p.968～p.971)

「新版 地すべり工学 -最新のトピックス- (山海堂)」 p.450～p.452)

「H25版 治山技術基準 解説 地すべり防止編 (日本治山治水協会)」 p.116～p.117)

(3) 管暗渠先端間距離の計算

式(e)に式(b)を代入して整理する。

$$\begin{aligned} \alpha &= \pi/2 + 2 \cdot h_{\max}/L \\ &= 3\pi/8 + \sqrt{(\pi/4)^2 + \text{Ln}(L/2ro) \cdot [2\alpha_0 \cdot H1/\{L \cdot \text{Ln}(R/ro)\} + \omega/k]} \end{aligned} \quad \dots \text{式(g)}$$

式(a)に式(c)と式(g)を代入して整理する。

$$\begin{aligned} h &= \frac{q_0 + \omega \cdot L/2}{\alpha \cdot k} [\text{Ln}(L/2 \cdot ro) + 2 \cdot ro/L - 1] \\ &= \frac{[\text{Ln}(L/2ro) + 2ro/L - 1] \cdot [\alpha_0 \cdot H1/\text{Ln}(R/ro) + L \cdot \omega/(2 \cdot k)]}{3\pi/8 + \sqrt{(\pi/4)^2 + \text{Ln}(L/2ro) \cdot [2\alpha_0 \cdot H1/\{L \cdot \text{Ln}(R/ro)\} + \omega/k]}} \end{aligned}$$

よって、

$$\begin{aligned} &\{ 3\pi/8 + \sqrt{(\pi/4)^2 + \text{Ln}(L/2ro) \cdot [2\alpha_0 \cdot H1/\{L \cdot \text{Ln}(R/ro)\} + \omega/k]} \} \cdot h \\ &- [\text{Ln}(L/2ro) + 2ro/L - 1] \cdot [\alpha_0 \cdot H1/\text{Ln}(R/ro) + L \cdot \omega/(2 \cdot k)] = 0 \end{aligned}$$

式(h)に与値を代入して整理する。

$$\begin{aligned} &\{ 1.178 + \sqrt{0.617 + \text{Ln}(L/0.040) \times [3.634 \times 5.000/\{L \times 6.923\} + 1.389]} \} \times 4.000 \\ &- [\text{Ln}(L/0.040) + 0.040/L - 1] \times [1.312 + 0.694 \times L] = 0 \quad \dots \text{式(h)} \end{aligned}$$

ここに、h：管暗渠標高から測った平均水位高 (m)

$$h = H1 - S = 4.000 \text{ (m)}$$

H1：管暗渠標高からの原水位 (m)

$$H1 = H - H_p = 5.000 \text{ (m)}$$

S：水位低下計画高 = 1.000 (m)

ω ：雨水の浸透能 (=設計降雨強度) (m/s)

$$\omega = 50.00 \text{ (mm/h)} = 1.389\text{E-}05 \text{ (m/s)}$$

L：管暗渠のすべり面を切る位置での間隔 (m)

R：影響半径 (m)

$$\begin{aligned} R &= 575 \cdot S_o \sqrt{k \cdot H} \\ &= 575 \times 5.000 \times \sqrt{(1.0000\text{E-}05 \times 10.000)} \\ &= 20.3 \text{ (m)} \end{aligned}$$

※ Hの代わりにH1を用いて計算する(安全側の計算)

ro：管暗渠の半径 = 0.020 (m)

k：透水係数 = 1.000E-03 (cm/s) = 1.000E-05 (m/s)

$$\omega/k = 1.389\text{E+}00$$

S_o：管暗渠位置での水位低下高

$$S_o = H - H_p = 5.000 \text{ (m)}$$

α_0 ：次の式で求める係数

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \pi/2 + H1/R \\ &= \pi/2 + 5.000 / 20.3 \\ &= 1.817 \end{aligned}$$

式(h)を満足する Lの値を求めると以下の値を得る。

$$L = 4.706 \text{ (m)} \rightarrow \text{※検証 式(h)の左辺} = 0.000$$

2) 打設角度 (θ)

管暗渠間の打設角度は次式で求める。

$$\begin{aligned}\theta &= 2 \cdot \sin^{-1} [L / \{ 2 \cdot (L_o + L_s) \}] \\ &= 2 \cdot \sin^{-1} [4.706 / \{ 2 \times (2.000 + 17.000) \}] \\ &= 14.23 (^\circ)\end{aligned}$$

3) 地すべり面より先に根入れした管暗渠の先端管距離 (L_p)

管暗渠の先端管距離(L_p)は次式で求める。

$$\begin{aligned}L_p &= 2 \cdot (L_o + L_s + L_r) \cdot \sin(\theta / 2) \\ &= 2 \times 5.000 \times \sin(14.23 / 2) \\ &= 5.95 \text{ (m)}\end{aligned}$$

(5) 暗渠間の配置について

以上の計算結果より、下記の配置が目安となる。

- 暗渠間の打設角度

$$\theta \cong 14.23 (^\circ)$$

- 暗渠先端の間隔

$$L_p \cong 5.95 \text{ (m)}$$

