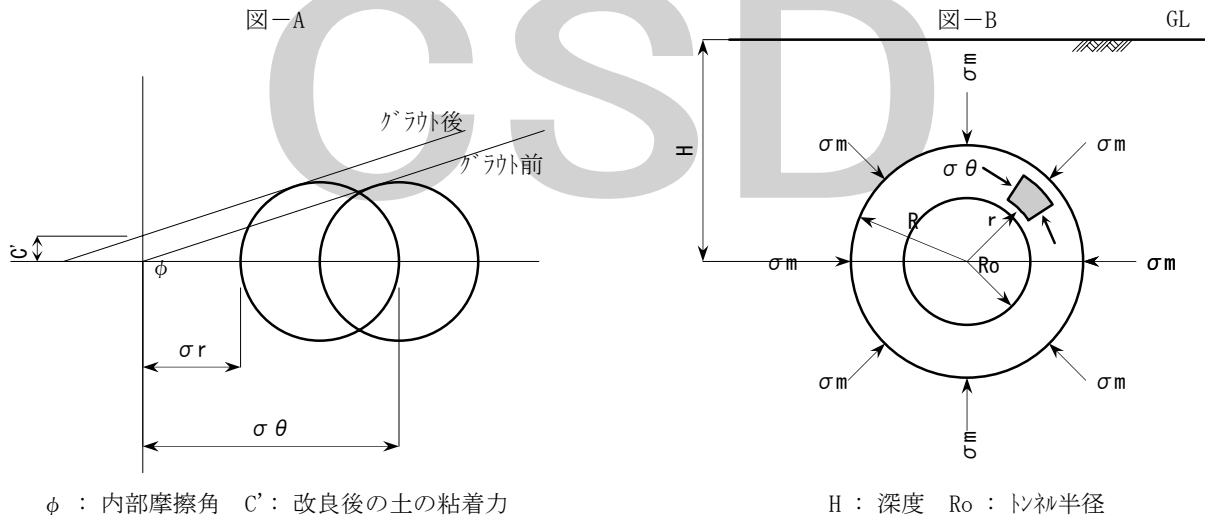


薬液注入工法

坑口防護の検討

1. 改良断面決定

改良断面は、以下に述べる塑性領域理論に基づいて決めるものとする。



地中にトンネルを掘削すると地中の応力のバランスが失われるトンネル周辺に付加応力が発生する。土の破壊（塑性化）は、最大主応力と最小主応力の差がある限度以上になると発生しこの時の応力状態をモール円を表すと包絡線をよぎっている。この包絡線は土の固有強度を示すもので、土の粘着力と内部摩擦角により規定されるため、地盤改良により粘着力を増加させてやれば、図-Aのようになり応力円に接するところまで（破壊しない状態まで）固有強度が高められることになる。

図-Bにおいて、地盤改良により粘着力の増加した地山にトンネルを掘ると、 $R_0 < r < R$ で表される r が塑性領域となることから、地盤改良はこの不等式の範囲を行えばよいことになり R が求める改良範囲である。

塑性領域の σ_r は次式で表される。

$$\frac{\partial \cdot \sigma_r}{\partial r} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} \quad (\text{応力平衡式})$$

$$\sigma_\theta - \sigma_r = 2 \cdot C' \quad (\text{破壊条件式})$$

上式において $r = R$ の時 $\sigma_r = \sigma_m$ (土被り圧) とすると

$$\sigma_r = \sigma_m + 2 \cdot C' \cdot \ln \frac{r}{R}$$

が得られ、更に裏込注入を行う前では、 $r = R_0$ の時 $\sigma_r = 0$ であるから、

$$\ln R + \frac{R \cdot \gamma t}{2 \cdot C'} = \frac{H \cdot \gamma t}{2 \cdot C'} + \ln R_0 \quad \dots \dots (A)$$

が得られる。

これにより計算される R が求める塑性領域である。

ここに、 R : 塑性領域半径 (m)
Ro : トンネル半径 (m)
H : トンネル中心までの深さ (m)
 γt : 土の単位体積重量 (kN/m³)
C' : 改良後の土の粘着力 (kN/m²)

CSD

CSD

(1) トンネル上部

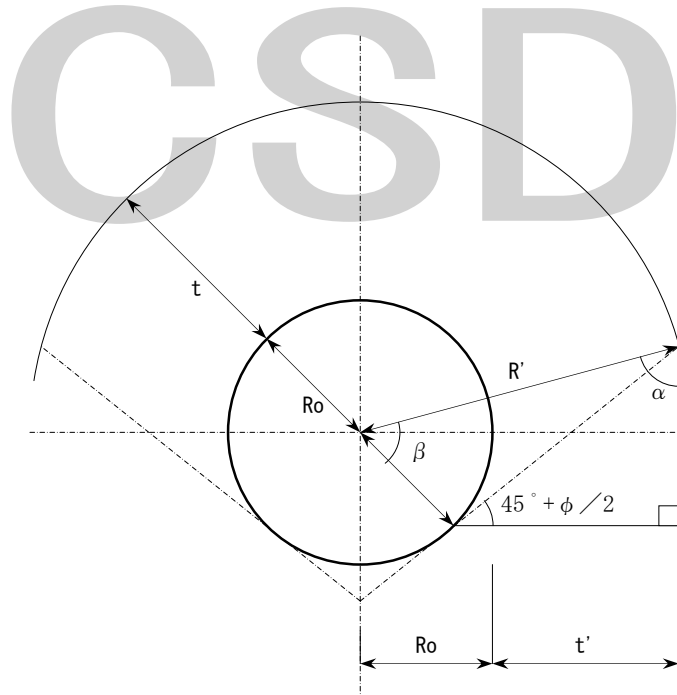
前項の式(A)により求められる R から必要厚さ t を求める。

$$t = F_s \cdot (R - R_o)$$

ここに、 F_s : 安全率

(2) トンネル側部

塑性領域 R とトンネルの崩壊角 ($45^\circ + \phi/2$) が交わる点までの距離を下図の t' とすると



ここで、

$$\begin{aligned} t' &= R' \cdot \sin \alpha - R_o \\ R' &= R_o + t \\ \alpha &= 360^\circ - (90 \times 2 + \beta + \theta) \\ \beta &= \cos^{-1}(R_o/R') \\ \theta &= 45^\circ + \phi/2 \end{aligned}$$

(3) トンネル底部

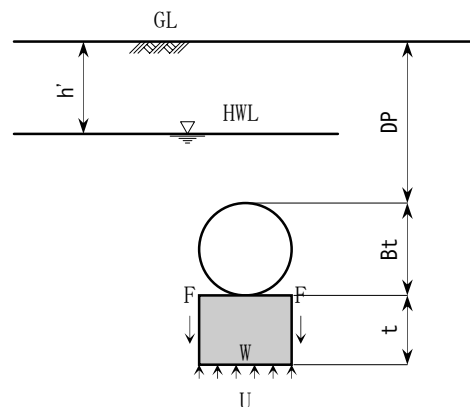
改良体の底部に作用する揚圧力(U)と改良土の重量(W)と改良土のせん断抵抗力(F)との平衡式より求める。

$$\begin{aligned} W &= \gamma k \cdot B \cdot t \\ F &= 2 \cdot C' \cdot t \\ U &= \gamma_w \cdot B \cdot (DP - h' + Bt + t) \end{aligned}$$

以上より、

$$F_s = \frac{W + F}{U}$$

で求められる。



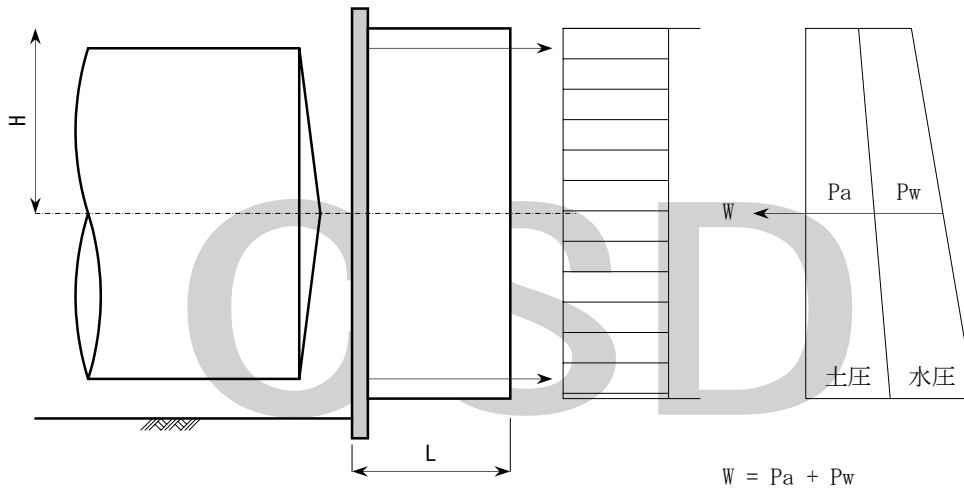
ここに、 t : 底部改良厚 (m)
 γ_k : 改良土の単位体積重量 (kN/m³)
 γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m³)
 B : 底部改良幅 (m)
 B_t : トンネル外径 (m)
 C' : 改良後の土の粘着力 (kN/m²)
 DP : 土被り (m)
 h' : 地下水位 (m)

CSD

CSD

2. 改良長の決定

改良長は、以下に述べる押し抜きせん断応力で支持するものとして検討する。



トンネルは発進する際、発進口は矢板を切断した後、掘進機を押し出すまでの間、止水はもとより、切羽は自立していなければならない。

一般に、発進部の改良長さは、掘進機長程度を設定する。

次に、発進部の鏡を切るだけに必要な改良長さを切羽前面に作用する土圧・水圧に対して改良土の押し抜きせん断応力で支持するものとして検討する。

$$Fs = \frac{F}{W}$$

$$F = l \cdot C' \cdot L$$

$$W = (Pa + Pw) \cdot S$$

ここに、 F : 改良土のせん断抵抗 (kN/m^2)
 W : 土圧と水圧との総和 (kN/m^2)
 l : 切羽の周長 (m)
 C' : 改良後の土のせん断応力 (kN/m^2)
 L : 必要改良厚さ (m)
 S : 切羽開放面積 (m^2)
 Pa : 主働土圧 (kN/m^2)
 Pw : 水圧 (kN/m^2)

$$Pa = (\sum \gamma_t \cdot H) \times \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) - 2 \cdot C \cdot \tan(45^\circ - \frac{\phi}{2})$$

$$Pw = \gamma_w \cdot hw$$

ここに、 γ_t : 土の単位体積重量 (kN/m^3)
 γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m^3)
 H : トンネル中心までの深さ (m)
 C : 現地盤の粘着力 (kN/m^2)
 ϕ : 土の内部摩擦角 ($^\circ$)
 hw : トンネル中心までの水頭差 (m)

$$Fs = \frac{l \cdot C' \cdot L}{(Pa + Pw) \cdot S}$$

したがって、改良長は、

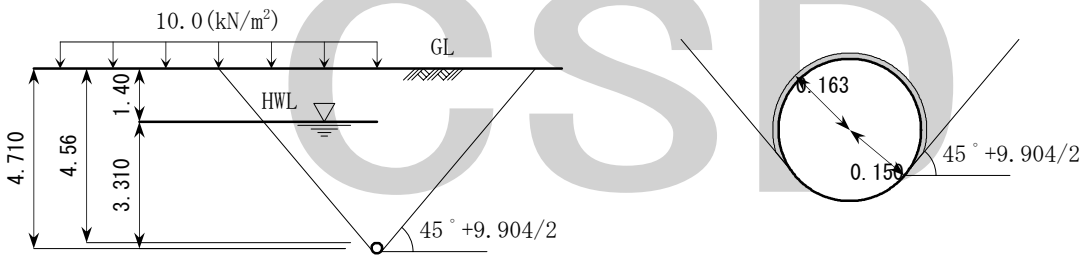
$$L = \frac{Fs \cdot (Pa + Pw) \cdot S}{l \cdot C'}$$

薬液注入工法

坑口防護の検討

測点 1

1. 設計条件



ここに、 GL : 地盤高
 DP : 土被り
 H : トンネル中心までの深さ
 h' : 地下水位
 γ_w : 水の単位体積重量
 Bt : トンネル外径
 Ro : トンネル半径
 Fs : 安全率
 q : 上載荷重

GL = 84.21 (m)
 DP = 4.56 (m)
 H = 4.710 (m)
 h' = 1.40 (m)
 $\gamma_w = 10.0$ (kN/m³)
 Bt = 0.30 (m)
 Ro = 0.150 (m)
 Fs = 1.20
 q = 10.0 (kN/m²)

2. 土質条件

BNo. 5

地盤高 = 84.21 (m)

層厚 (m)	γ_t (kN/m ³)	γ_k (kN/m ³)	γ_t' (kN/m ³)	ϕ (°)	C (kN/m ²)	C' (kN/m ²)
1.400	16.00	20.0	6.00	0.00	12.00	500.00
0.200	16.00	20.0	6.00	0.00	12.00	500.00
3.110	17.00	20.0	7.00	15.00	0.00	500.00
0.150	17.00	20.0	7.00	15.00	0.00	500.00
0.390	17.00	20.0	7.00	15.00	0.00	500.00
1.80	18.00	20.0	8.00	30.00	0.00	500.00
8.65	19.00	20.0	9.00	35.00	0.00	500.00
2.48	18.00	20.0	8.00	30.00	0.00	500.00

3. 計算結果

(1) トンネル上部

$$\begin{aligned} H &= DP + R_o \\ &= 4.56 + 0.150 \\ &= 4.710 \text{ (m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ln R + \frac{R \cdot \gamma t}{2 \cdot C'} &= \frac{H \cdot \gamma t + q}{2 \cdot C'} + \ln R_o \\ \ln R + \frac{R \times 16.660}{2 \times 500.000} &= \frac{4.710 \times 16.660 + 10.0}{2 \times 500.000} + \ln 0.150 \\ \ln R + 0.017R &= -1.809 \\ R &\doteq 0.163 \text{ (m)} \end{aligned}$$

となる。

$$\begin{aligned} t &= F_s \cdot (R - R_o) \\ &= 1.20 \times (0.163 - 0.150) \\ t &= 0.016 \text{ (m)} \\ t &\doteq 1.500 \text{ (m)} \end{aligned}$$

となる。

ここに、 t	: 必要改良厚 (m)	H	= 4.710 (m)
H	: トンネル中心までの深さ	DP	= 4.56 (m)
DP	: 土被り	γt	= 16.660 (kN/m ³)
γt	: 土の単位体積重量	C	= 4.076 (kN/m ²)
C	: 現地盤の粘着力	C'	= 500.000 (kN/m ²)
C'	: 改良後の土の粘着力	ϕ	= 9.904 (°)
ϕ	: 土の内部摩擦角	R_o	= 0.150 (m)
R_o	: トンネル半径	q	= 10.0 (kN/m ²)
q	: 上載荷重	F_s	= 1.20
F_s	: 安全率		

(2) トンネル側部

$$\begin{aligned} R' &= R_o + t \\ &= 0.150 + 0.016 \\ &= 0.166 \text{ (m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta &= 45 + \frac{\phi}{2} \\ &= 45 + \frac{9.904}{2} \\ &= 49.952 \text{ (°)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta &= \cos^{-1} \frac{R_o}{R'} \\ &= \cos^{-1} \frac{0.150}{0.166} \\ &= 25.363 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= 180 - (\beta + \theta) \\ &= 180 - (25.363 + 49.952) \\ &= 104.685 \end{aligned}$$

以上の計算より、必要改良厚を求めると、

$$\begin{aligned} t' &= R' \cdot \sin \alpha - R_o \\ &= 0.166 \times \sin 104.685 - 0.150 \\ &= 0.011 \end{aligned}$$

$$\cong 1.000 \text{ (m)}$$

ここに、 t' : 必要改良厚 (m)
 R_o : トンネル半径
 t : 上部改良厚
 ϕ : 土の内部摩擦角

$$R_o = 0.150 \text{ (m)}$$

$$t = 0.016 \text{ (m)}$$

$$\phi = 9.904 (^{\circ})$$

(3) 底部改良厚

$$W = \gamma_k \cdot B \cdot t$$

$$F = 2 \cdot C' \cdot t$$

$$U = \gamma_w \cdot B \cdot (DP - h' + Bt + t)$$

$$F_s = \frac{W + F}{U}$$

以上の式より必要改良厚は以下の様に求められる。

$$t = \frac{F_s \cdot \gamma_w \cdot B \cdot (DP - h' + Bt)}{\gamma_k \cdot B + 2 \cdot C' - F_s \cdot \gamma_w \cdot B}$$

$$= \frac{1.20 \times 10.0 \times 1.00 \times (4.56 - 1.40 + 0.30)}{20.000 \times 1.00 + 2 \times 500.000 - 1.20 \times 10.0 \times 1.00}$$

$$= 0.041 \text{ (m)}$$

$$\cong 1.000 \text{ (m)}$$

ここに、 t : 必要改良厚 (m)
 F_s : 安全率
 γ_w : 水の単位体積重量
 h' : 地下水位
 B : 底部改良幅
 DP : 土被り
 Bt : トンネル外径
 γ_k : 改良土の単位体積重量

$$F_s = 1.20$$

$$\gamma_w = 10.0 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$h' = 1.40 \text{ (m)}$$

$$B = 1.00 \text{ (m)}$$

$$DP = 4.56 \text{ (m)}$$

$$Bt = 0.30 \text{ (m)}$$

$$\gamma_k = 0.820 / 0.041 = 20.000 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

	H (m)	γ_k (kN/m ³)	$\gamma_k \cdot H$ (kN/m ²)
1	0.041	20.0	0.820
合計	0.041		0.820

C' : 改良後の土の粘着力

$$C' = 20.500 / 0.041 = 500.000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

	H (m)	C' (kN/m ²)	$C' \cdot H$ (kN/m)
1	0.041	500.00	20.500
合計	0.041		20.500

(4) 改良区間長

$$P_a = K_a \cdot \{ (\sum \gamma t \cdot H) + q \} - 2 \cdot C' \cdot \sqrt{K_a} \quad (P_a > 0)$$

$$K_a = \tan^2(45^{\circ} - \frac{\phi}{2})$$

$$P_w = \gamma_w \cdot h_w$$

$$W = P_a + P_w$$

層 No	層厚 H (m)	土圧 係数 K _a	単位 体積重量 γt (kN/m ³)	粘着力 C (kN/m ²)	土圧 P _a (kN/m ²)	水圧 P _w (kN/m ²)	側方 土圧 W (kN/m ²)
1	1.400	1.000	16.00	12.00	(-14.000)	0.000	0.000
					8.400	0.000	8.400
2	0.200	1.000	6.00	12.00	8.400	0.000	8.400
					9.600	2.000	11.600
3	3.110	0.589	7.00	0.00	19.783	2.000	21.783

よって、

$$W = 65.701 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

したがって、改良区間長は、

$$\begin{aligned} L &= \frac{F_s \times W \times S}{l \times C'} \\ &= \frac{1.20 \times 65.701 \times 0.071}{0.942 \times 500.000} \\ &= 0.012 \text{ (m)} \\ &\approx 1.500 \text{ (m)} \end{aligned}$$

ここに、L : 必要改良厚 (m)

γ_t : 土の単位体積重量 (kN/m³)

ϕ : 土の内部摩擦角 (°)

C : 現地盤の粘着力 (kN/m²)

H : トンネル中心までの深さ

C' : 改良後の土の粘着力

S : 切羽開放面積

l : 切羽の周長

γ_w : 水の単位体積重量

hw : 被圧水頭

F_s : 安全率

q : 上載荷重

$$H = 4.710 \text{ (m)}$$

$$C' = 500.000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$S = 0.071 \text{ (m}^2\text{)}$$

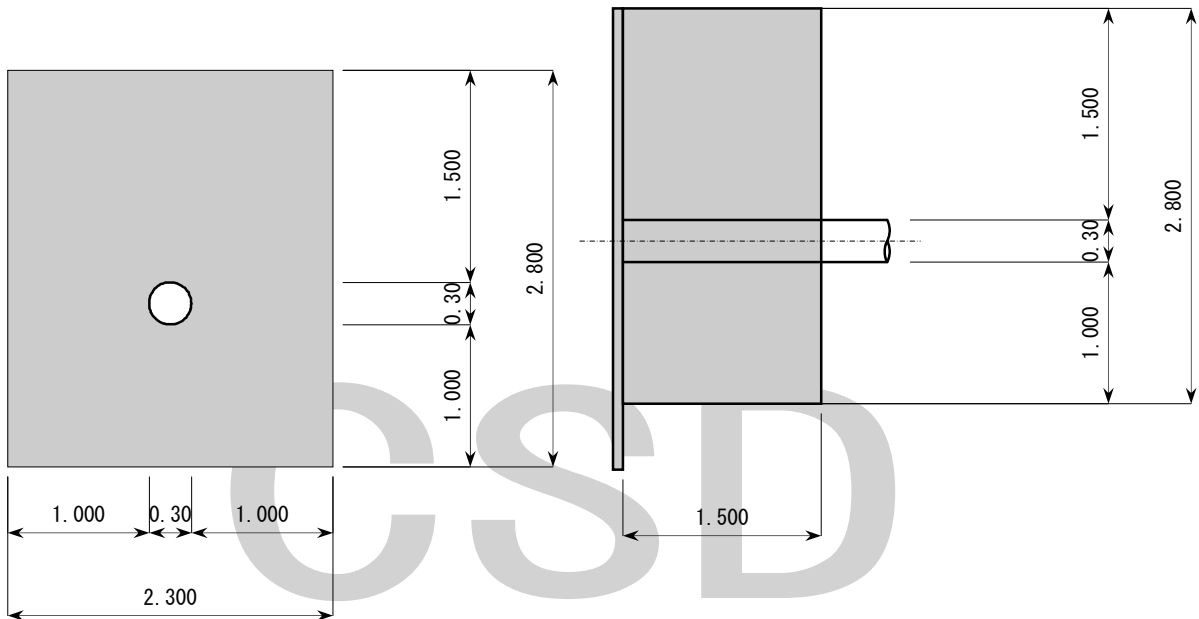
$$l = 0.942 \text{ (m)}$$

$$\gamma_w = 10.0 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$hw = 3.310 \text{ (m)}$$

$$F_s = 1.20$$

$$q = 10.0 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$



以上の計算より、改良厚・改良区間長は次のようになる。

上部改良厚 1.500 (m)

側部改良厚 1.000 (m)

底部改良厚 1.000 (m)

改良区間長 1.500 (m)

計算結果一覧表

1. 土質条件

地盤高 GL = 84.21

層厚 (m)	γt (kN/m ³)	γk (kN/m ³)	$\gamma t'$ (kN/m ³)	ϕ (°)	C (kN/m ²)	C' (kN/m ²)
1.400	16.00	20.0	6.00	0.00	12.00	500.00
0.200	16.00	20.0	6.00	0.00	12.00	500.00
3.110	17.00	20.0	7.00	15.00	0.00	500.00
0.150	17.00	20.0	7.00	15.00	0.00	500.00
0.390	17.00	20.0	7.00	15.00	0.00	500.00
1.80	18.00	20.0	8.00	30.00	0.00	500.00
8.65	19.00	20.0	9.00	35.00	0.00	500.00
2.48	18.00	20.0	8.00	30.00	0.00	500.00

2. 設計条件

安全率 $F_s = 1.20$

測点名	地盤高 GL (m)	土被り DP (m)	掘削径 Bt (m)	上載荷重 q (kN/m ²)	地下水位 h' (m)	水の単位体積重量 γ_w (kN/m ³)	底部改良幅 B (m)
測点 1	84.21	4.56	0.30	10.0	1.40	10.0	1.00

3. 計算結果

安全率 $F_s = 1.20$

測点名	上部改良 厚 (m)	側部改良 厚 (m)	底部改良 厚 (m)	改良区間 長 (m)	上部決定 厚 (m)	側部決定 厚 (m)	決定底部 厚 (m)	決定区間 長 (m)
測点 1	0.016	0.011	0.041	0.012	1.500	1.000	1.000	1.500

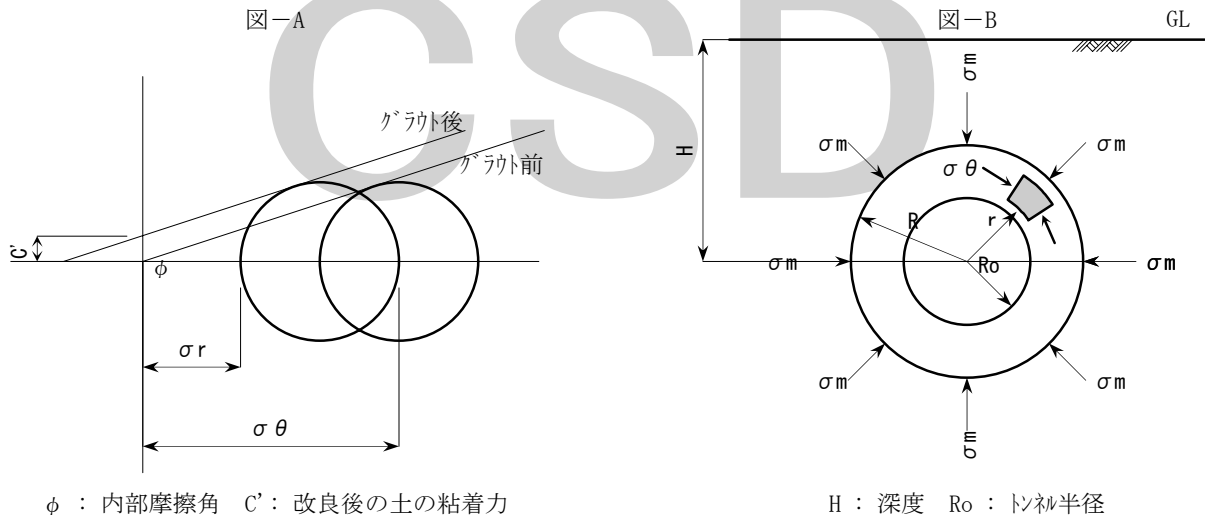
CSD

高圧噴流注入

坑口防護の検討

1. 改良断面決定

改良断面は、以下に述べる塑性領域理論に基づいて決めるものとする。



地中にトンネルを掘削すると地中の応力のバランスが失われるトンネル周辺に付加応力が発生する。土の破壊（塑性化）は、最大主応力と最小主応力の差がある限度以上になると発生しこの時の応力状態をモール円で表すと包絡線をよぎっている。この包絡線は土の固有強度を示すもので、土の粘着力と内部摩擦角により規定されるため、地盤改良により粘着力を増加させてやれば、図-Aのようになり応力円に接するところまで（破壊しない状態まで）固有強度が高められることになる。

図-Bにおいて、地盤改良により粘着力の増加した地山にトンネルを掘ると、 $R_o < r < R$ で表される r が塑性領域となることから、地盤改良はこの不等式の範囲を行えばよいことになり R が求める改良範囲である。

塑性領域の σ_r は次式で表される。

$$\frac{\partial \cdot \sigma_r}{\partial r} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} \quad (\text{応力平衡式})$$

$$\sigma_\theta - \sigma_r = 2 \cdot C' \quad (\text{破壊条件式})$$

上式において $r = R$ の時 $\sigma_r = \sigma_m$ (土被り圧) とすると

$$\sigma_r = \sigma_m + 2 \cdot C' \cdot \ln \frac{r}{R}$$

が得られ、更に裏込注入を行う前では、 $r = R_o$ の時 $\sigma_r = 0$ であるから、

$$\ln R + \frac{R \cdot \gamma t}{2 \cdot C'} = \frac{H \cdot \gamma t}{2 \cdot C'} + \ln R_o \quad \dots \dots (A)$$

が得られる。

また、 σ_m を考慮する際に注入改良域内の自重を含めるものとするれば、 $\sigma_m = (H - R_o) \cdot \gamma_t$ となり、先の式は、

$$R = \exp\left\{\frac{(H - R_o) \cdot \gamma_t}{2 \cdot C'} + \ln R_o\right\}$$

となる。

これにより計算される R が求める塑性領域である。

ここに、R : 塑性領域半径 (m)
R_o : トンネル半径 (m)
H : トンネル中心までの深さ (m)
 γ_t : 土の単位体積重量 (kN/m³)
C' : 改良後の土の粘着力 (kN/m²)

CSD

(1) トンネル上部

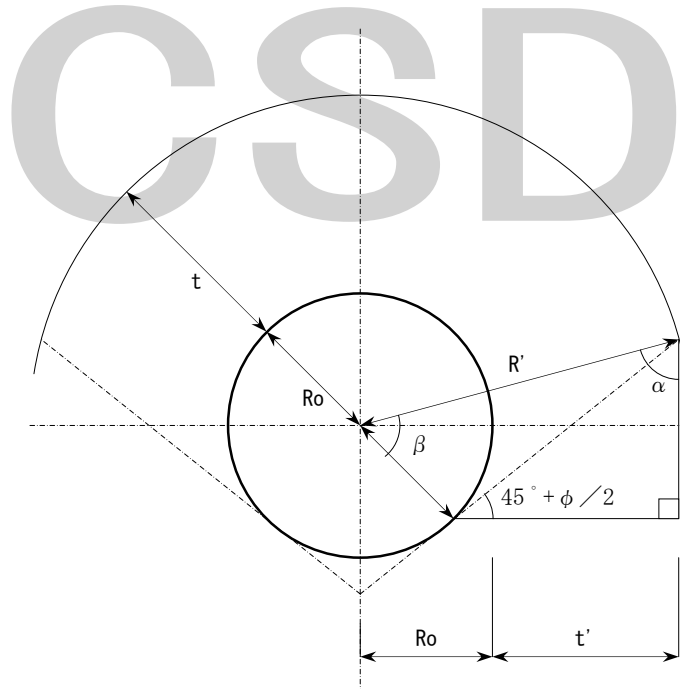
前項の式(A)により求められる R から必要厚さ t を求める。

$$t = F_s \cdot (R - R_o)$$

ここに、 F_s : 安全率

(2) トンネル側部

塑性領域 R とトンネルの崩壊角 $(45^\circ + \phi/2)$ が交わる点までの距離を下図の t' とすると



ここで、

$$t' = R' \cdot \sin \alpha - R_o$$

$$R' = R_o + t$$

$$\alpha = 360^\circ - (90 \times 2 + \beta + \theta)$$

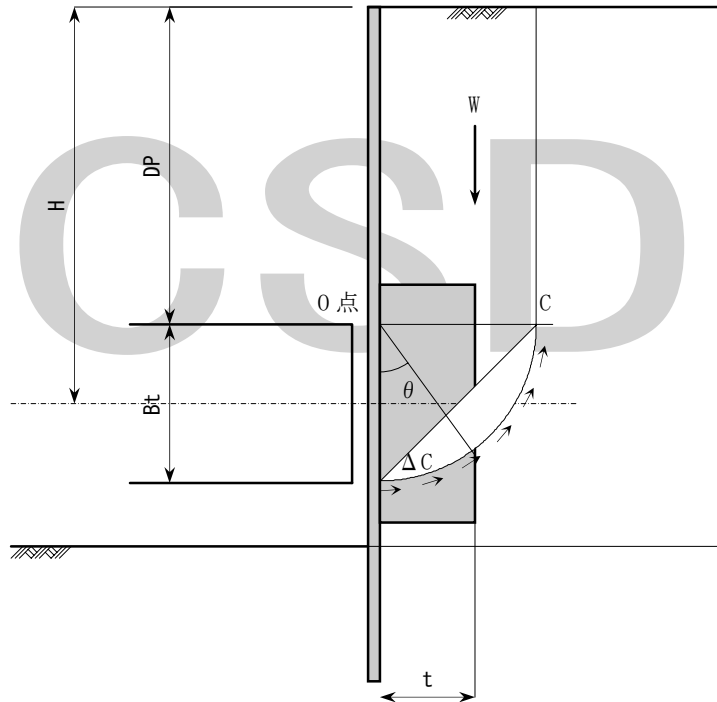
$$\beta = \cos^{-1}(R_o/R')$$

$$\theta = 45^\circ + \phi/2$$

となる。

2. 改良区間の計算

土留開放径(Bt)を半径とする円弧滑りを想定し、改良体の粘着力で滑りモーメントに抵抗させるものとする。



上図より 0点を支点とするモーメントの釣り合いから改良必要厚さを算出する。

$$Md1 = \gamma t \cdot DP \cdot Bt \cdot \frac{Bt}{2}$$

$$Md2 = \frac{\gamma t \cdot \pi}{4} \cdot \frac{Bt^2 \cdot 4}{3 \cdot \pi} \cdot Bt = \frac{\gamma t \cdot Bt^3}{3}$$

$$Mr = \frac{C \cdot \pi \cdot Bt^2}{2}$$

$$\Delta Mr = \Delta C \cdot \theta \cdot Bt^2$$

$$Fs \cdot Md - Mr = \Delta Mr$$

ここに、
 Md : 起動モーメント (kN・m)
 Mr : 改良前の抵抗モーメント (kN・m)
 ΔMr : 改良後の増加抵抗モーメント (kN・m)
 γt : 土の単位体積重量 (kN・m)
 Bt : トンネル外径 (m)
 C : 現地盤の粘着力 (kN/m²)
 Fs : 安全率

とすれば、

$$\theta = \frac{Fs \cdot Md - Mr}{\Delta C \cdot Bt^2}$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{t}{Bt}\right) \quad (\text{rad})$$

より、

$$t = Bt \cdot \sin \theta$$

で求めることができる。

ここに、 ΔC : 改良後の増加粘着力 (kN/m²)
($\Delta C = C' - C$)
 C' : 改良後の土の粘着力 (kN/m²)
 t : 必要改良厚さ (m)

CSD

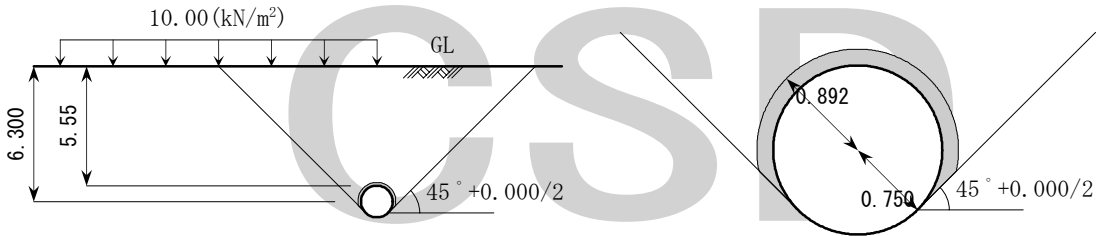
CSD

高圧噴流注入

坑口防護の検討

測点 1

1. 設計条件



ここに、 GL : 地盤高
 DP : 土被り
 H : トンネル中心までの深さ
 Bt : トンネル外径
 Ro : トンネル半径
 Fs : 安全率
 q : 上載荷重

GL = 10.00 (m)
 DP = 5.55 (m)
 H = 6.300 (m)
 Bt = 1.50 (m)
 Ro = 0.750 (m)
 Fs = 1.20
 q = 10.00 (kN/m²)

2. 土質条件

BNo. 1

地盤高 = 10.00 (m)

層厚 (m)	γ_t (kN/m ³)	ϕ (°)	C (kN/m ²)	C' (kN/m ²)
1.60	16.00	0.00	3.00	300.00
3.65	17.00	0.00	7.00	300.00
0.300	18.00	0.00	2.00	300.00
0.750	18.00	0.00	2.00	300.00
0.750	18.00	0.00	2.00	300.00
8.65	19.00	0.00	3.50	300.00
2.48	18.00	0.00	2.00	300.00

3. 計算結果

(1) トンネル上部

$$\begin{aligned} H &= DP + R_o \\ &= 5.55 + 0.750 \\ &= 6.300 \text{ (m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R &= \exp\left\{\frac{(H - R_o) \cdot \gamma t + q}{2 \cdot C'} + \ln R_o\right\} \\ &= \exp\left\{\frac{(6.300 - 0.750) \times 16.913 + 10.00}{2 \times 300.000} + \ln 0.750\right\} \\ &= 0.892 \end{aligned}$$

となる。

$$\begin{aligned} t &= F_s \cdot (R - R_o) \\ &= 1.20 \times (0.892 - 0.750) \\ t &= 0.170 \text{ (m)} \\ t &\doteq 1.500 \text{ (m)} \end{aligned}$$

となる。

ここに、 t : 必要改良厚 (m)

H : トンネル中心までの深さ

DP : 土被り

γt : 土の単位体積重量

C : 現地盤の粘着力

C' : 改良後の土の粘着力

ϕ : 土の内部摩擦角

R_o : トンネル半径

q : 上載荷重

F_s : 安全率

$$H = 6.300 \text{ (m)}$$

$$DP = 5.55 \text{ (m)}$$

$$\gamma t = 16.913 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$C = 5.151 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$C' = 300.000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\phi = 0.000 \text{ (}^\circ\text{)}$$

$$R_o = 0.750 \text{ (m)}$$

$$q = 10.00 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$F_s = 1.20$$

(2) トンネル側部

$$\begin{aligned} R' &= R_o + t \\ &= 0.750 + 0.170 \\ &= 0.920 \text{ (m)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta &= 45 + \frac{\phi}{2} \\ &= 45 + \frac{0.000}{2} \\ &= 45.000 \text{ (}^\circ\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta &= \cos^{-1} \frac{R_o}{R'} \\ &= \cos^{-1} \frac{0.750}{0.920} \\ &= 35.391 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= 180 - (\beta + \theta) \\ &= 180 - (35.391 + 45.000) \\ &= 99.609 \end{aligned}$$

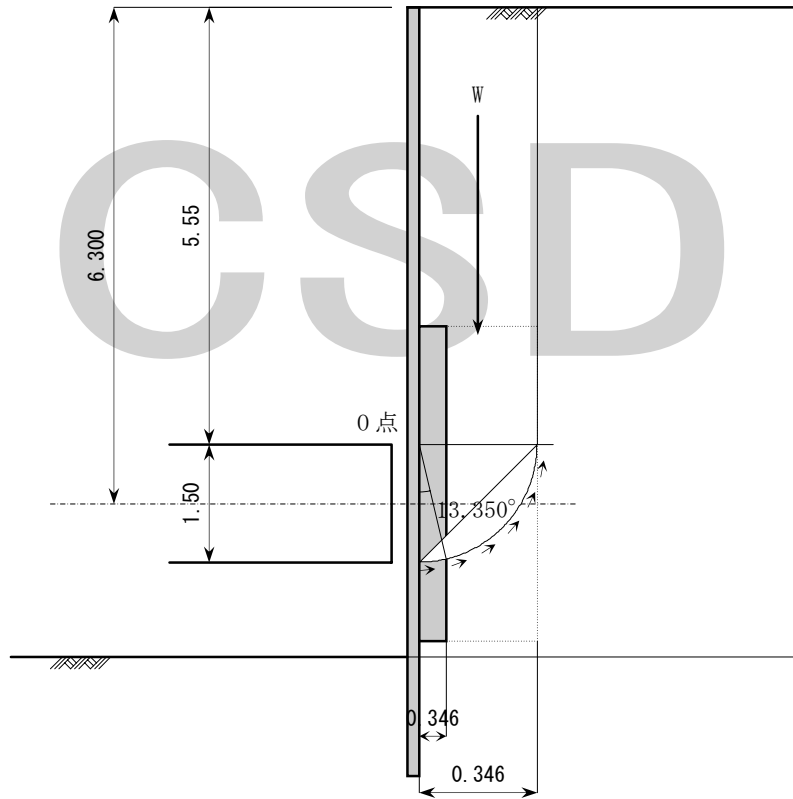
以上の計算より、必要改良厚を求めると、

$$\begin{aligned} t' &= R' \cdot \sin \alpha - R_o \\ &= 0.920 \times \sin 99.609 - 0.750 \\ &= 0.157 \\ t' &\doteq 1.000 \text{ (m)} \end{aligned}$$

ここに、 t' : 必要改良厚 (m)
 R_o : トンネル半径
 t : 上部改良厚
 ϕ : 土の内部摩擦角

$R_o = 0.750$ (m)
 $t = 0.170$ (m)
 $\phi = 0.000$ (°)

(3) 改良区間長の計算



・ 起動モーメント

$$M_{d1} = \sum_{i=1}^n (\gamma t_i \cdot H_i + q) \times \frac{B t^2}{2}$$

$$= (16.00 \times 1.60 + 17.00 \times 3.65 + 18.00 \times 0.300 + 10.00) \times \frac{1.50^2}{2}$$

$$= 115.931 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$$

$$M_{d2} = \frac{\gamma t \cdot B t^3}{3}$$

$$= \frac{18.000 \times 1.50^3}{3}$$

$$= 20.250 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$$

$$M_d = M_{d1} + M_{d2} = 115.931 + 20.250 = 136.181 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$$

・ 抵抗モーメント

$$M_r = \frac{C \cdot \pi \cdot B t^2}{2}$$

$$= \frac{2.000 \times \pi \times 1.50^2}{2}$$

$$= 7.069 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$$

・ 増加モーメント

$$\begin{aligned}\Delta C &= C' - C \\ &= 300.000 - 2.000 \\ &= 298.000 \text{ (kN/m}^2\text{)}\end{aligned}$$

$$\Delta Mr = \theta \cdot \Delta C \cdot Bt^2 = Fs \cdot Md - Mr$$

以上より改良厚は

$$\begin{aligned}\theta &= \frac{Fs \cdot Md - Mr}{\Delta C \cdot Bt^2} \\ &= \frac{1.20 \times 136.181 - 7.069}{298.000 \times 1.50^2} \\ &= 0.233 \text{ (rad)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}t &= Bt \cdot \sin \theta \\ &= 1.50 \times \sin 13.350 \\ &= 0.346 \\ &\approx 1.500 \text{ (m)}\end{aligned}$$

- ここに、 t : 必要改良厚さ (m)
 Md : 起動モーメント (kN・m)
 Mr : 改良前の抵抗モーメント (kN・m)
 γ_{ti} : i 層目の土の単位体積重量 (kN/m³)
 H_i : i 層目の層厚 (m)
 q : 上載荷重
 γ_t : 土の単位体積重量 (管内)

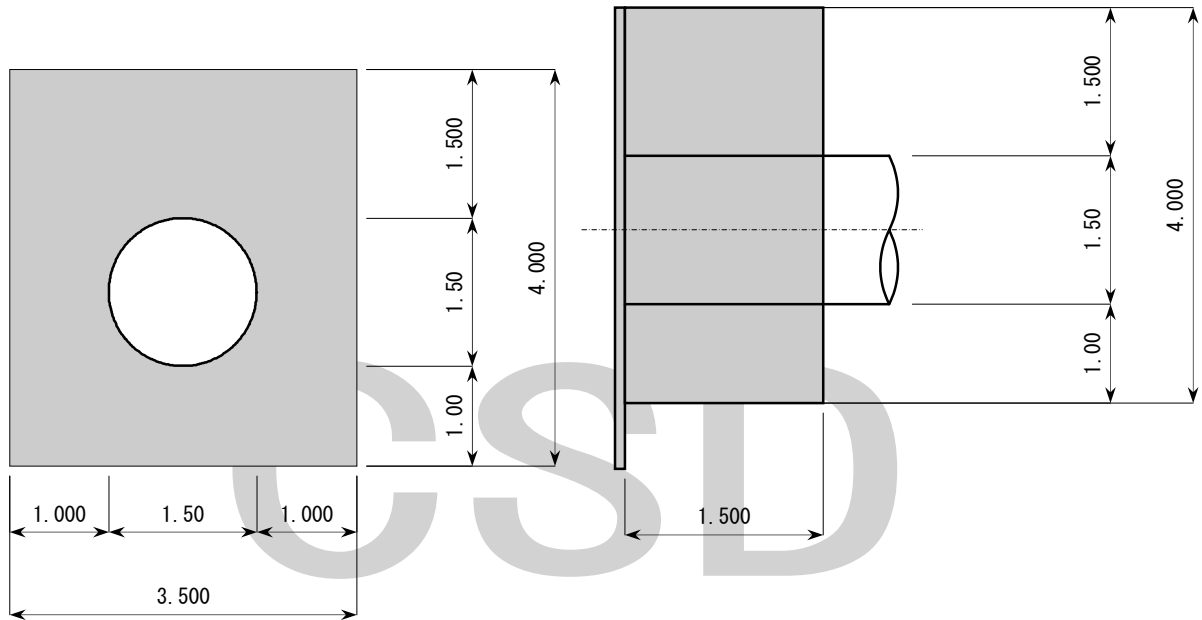
$$\begin{aligned}q &= 10.00 \text{ (kN/m}^2\text{)} \\ \gamma_t &= 27.000/1.500 = 18.000 \text{ (kN/m}^3\text{)}\end{aligned}$$

	H (m)	γ_t (kN/m ³)	$\gamma_t \cdot H$ (kN/m ²)
1	0.750	18.00	13.500
2	0.750	18.00	13.500
合計	1.500		27.000

- Bt : トンネル外径 $Bt = 1.50 \text{ (m)}$
 C : 現地盤の粘着力 $C = 0.698/0.349 = 2.000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$
 C' : 改良後の土の粘着力 $C' = 104.700/0.349 = 300.000 \text{ (kN/m}^2\text{)}$
 ΔC : 改良後の増加粘着力 ($\Delta C = C' - C$) (kN/m²)

	弧長 (m)	C (kN/m ²)	C' (kN/m ²)	C・弧長 (kN/m)	C'・弧長 (kN/m)
1	0.349	2.00	300.00	0.698	104.700
合計	0.349			0.698	104.700

- F_s : 安全率 $F_s = 1.20$



以上の計算より、改良厚・改良区間長は次のようになる。

上部改良厚	1.500 (m)
側部改良厚	1.000 (m)
底部改良厚	1.00 (m)
改良区間長	1.500 (m)

CSD

計算結果一覧表

1. 土質条件

地盤高 GL = 10.00

層厚 (m)	γt (kN/m ³)	ϕ (°)	C (kN/m ²)	C' (kN/m ²)
1.60	16.00	0.00	3.00	300.00
3.65	17.00	0.00	7.00	300.00
0.300	18.00	0.00	2.00	300.00
0.750	18.00	0.00	2.00	300.00
0.750	18.00	0.00	2.00	300.00
8.65	19.00	0.00	3.50	300.00
2.48	18.00	0.00	2.00	300.00

2. 設計条件

安全率 $F_s = 1.20$

測点名	地盤高 GL (m)	土被り DP (m)	掘削径 Bt (m)	上載荷重 q (kN/m ²)	底部改良厚 (m)
測点 1	10.00	5.55	1.50	10.00	1.00

3. 計算結果

安全率 $F_s = 1.20$

測点名	上部改良厚 (m)	側部改良厚 (m)	改良区間長 (m)	上部決定厚 (m)	側部決定厚 (m)	決定区間長 (m)
測点 1	0.170	0.157	0.346	1.500	1.000	1.500