

Terzagh-Peckと村山の説

この方法は、掘削で切羽前方にすべり線が形成される仮定に基づき、①土塊の重量、②土塊上面に作用するゆるみ荷重および③すべり面における抵抗力の釣り合い安定から、切羽の安定を評価し、切羽を安定させる抗力Pを求めるものである。

切羽前方に生ずるすべり面の形状は、図-1に示すように、切羽無支持面下端を通り、切羽頂部の位置で、垂直方向となる対数らせんと考える。

この対数らせんは、曲線上の任意点における曲線からの垂線と動径とのなす角が常に地山の内部摩擦角φであるらせん形よりなる。(動径の始点i, θ=0でも同じ)

【引用】土木学会 トンネル・ライブラリー第20号 山岳トンネルの補助工法-2009年版-,pp30-31.

φが一定のとき、対数らせん曲線はr₀に比例し相似形となっている。このため、r₀によって、δは変化する。

図-1 切羽すべり面の対数らせん曲線近似(Terzagh-Peckと村山の説)

$$r = r_0 \cdot \exp(\theta \cdot \tan \phi) \tag{式1}$$

$$\begin{aligned} \frac{dr}{d\theta} &= r_0 \cdot \tan \phi \cdot \exp(\theta \cdot \tan \phi) \\ \therefore \frac{dr}{d\theta} &= r \cdot \tan \phi \end{aligned} \tag{式2}$$

村山の式は次の力のモーメントつり合い式から成る。

$$\begin{aligned} \text{切羽安定力P} &= \text{切羽の土塊重量} M_w + \text{土圧} M_e \\ &\quad - \text{すべり面の摩擦抵抗力} M_r \\ P \cdot l_p &= W_f \cdot l_w + Q(l_a + B/2) \\ &\quad - \int_{r_0}^{r_d} r \cdot C \cdot \cos \phi \cdot ds \end{aligned} \tag{式3}$$

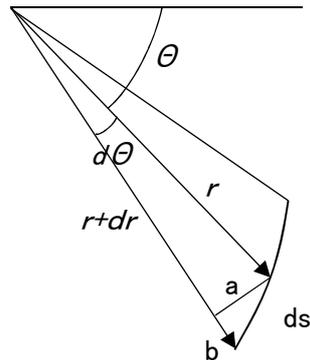
$$\begin{aligned} P \cdot l_p &= W_f \cdot l_w + Q(l_a + B/2) \\ &\quad - \frac{C}{2 \tan \phi} (r_d^2 - r_0^2) \end{aligned} \tag{式4}$$

Pは、すべり面の深さBを変えて繰り返し計算を行い、最大値を持って解とする。

【参考文献】福島啓一「わかりやすいトンネルの力学」土木工学社, pp16-17, 1994(H6)年.およびTerzagh-Peck(小野薫ほか訳)土質力学基礎編, 1964(昭和39)年, pp171-173を参照した。

式3の積分項を求める。(式の誘導は私案)

か



ds: すべり面の微小長さを定義する。

ラジアン定義から

$$a/r = d\theta \quad \text{よって} \quad a = r \cdot d\theta$$

$$\text{また} \quad b = dr$$

図-2 すべり面の微小長さ

$$\begin{aligned} ds &= \sqrt{a^2 + b^2} \\ &= \sqrt{(r \cdot d\theta)^2 + dr^2} \\ &= \sqrt{dr^2 \cdot (r \cdot d\theta / dr)^2 + dr^2} \\ &= \left[\sqrt{1 + r^2 (d\theta / dr)^2} \right] \cdot dr \\ &= \sqrt{1 + r^2 (1/r \cdot \tan\phi)^2} \cdot dr && \text{式2より} \\ &= \sqrt{1 + (1/\tan\phi)^2} \cdot dr \\ \therefore ds &= (1/\sin\phi) \cdot dr && \text{式5} \end{aligned}$$

ここで

$$\begin{aligned} \int_{r_0}^{rd} r \cdot C \cdot \cos\phi \cdot ds &= C \cdot \cos\phi \int_{r_0}^{rd} r \cdot ds \\ &= C \cdot \cos\phi \int_{r_0}^{rd} r \cdot (1/\sin\phi) \cdot dr && \text{式5より} \\ &= C \cdot \cos\phi (1/\sin\phi) \int_{r_0}^{rd} r \cdot dr \\ &= C \cdot \cos\phi (1/\sin\phi) \left[(1/2) r^2 \right]_{r_0}^{rd} \\ &= \frac{C}{2 \tan\phi} (r_d^2 - r_0^2) \end{aligned}$$

以上

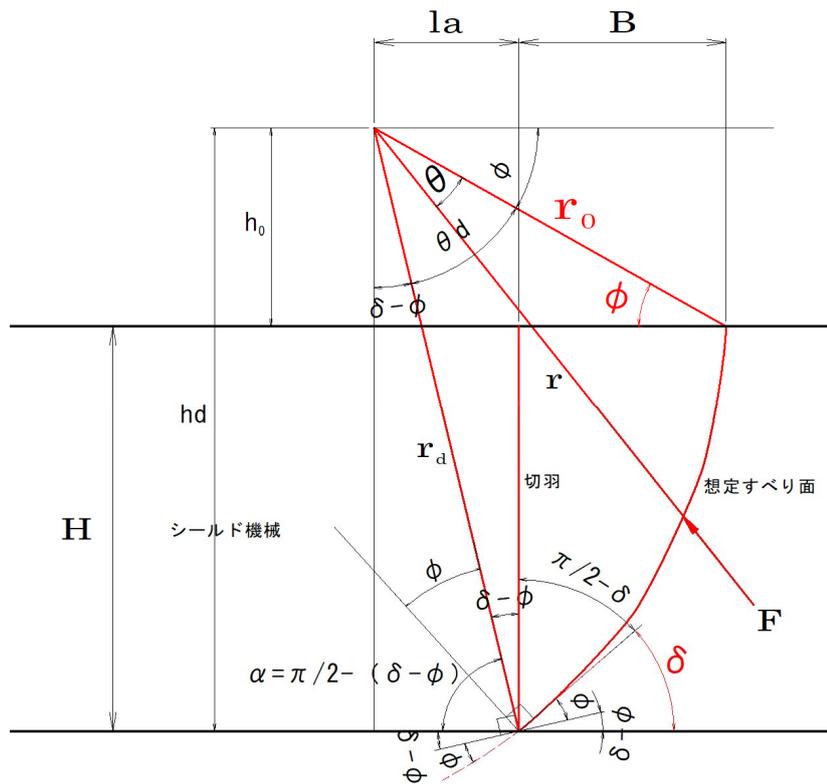


図-3 すべり面の初期動径 r_0 の求め方

定義より

$$r = r_0 \cdot \exp(\theta \cdot \tan \phi) \quad \dots \text{式1}$$

$$r_0 = r_0 \cdot \exp(\theta \cdot \tan \phi) = r_0 \cdot 1$$

$$rd = r_0 \cdot \exp(\theta d \cdot \tan \phi) \quad \dots \text{式2}$$

初期動径 $r_0 = f(H, \phi, \delta)$ を求める。

$$h_0 = r_0 \cdot \sin \phi$$

$$hd = rd \cdot \sin \alpha$$

$$H = hd - h_0$$

$$= rd \cdot \sin \alpha - r_0 \cdot \sin \phi$$

$$= r_0 \cdot \exp(\theta d \cdot \tan \phi) \cdot \sin \alpha - r_0 \cdot \sin \phi$$

$$= r_0 \cdot \exp((\pi/2 - \delta) \cdot \tan \phi) \cdot \cos(\phi - \delta)$$

$$- r_0 \cdot \sin \phi$$

$$\therefore r_0 = H / [\cos(\phi - \delta) \cdot \exp((\pi/2 - \delta) \cdot \tan \phi) - \sin \phi]$$

$$\text{ここで } \theta d = \pi/2 - \phi - (\delta - \phi) = \pi/2 - \delta$$

$$\alpha = \pi/2 - (\delta - \phi) = \pi/2 + (\phi - \delta)$$

$$\therefore \sin \alpha = \sin(\pi/2 + (\phi - \delta)) = \cos(\phi - \delta)$$

(注) このすべり面は、Terzaghi-Peckによる土質力学基礎編（小野薫ほか訳）の「切取りのブレイシングbracing（切り梁支保工）に対する土圧計算」pp171-173.の方法で解説されている。おそらく、すべり面末端と水平線のなす角 δ は、ランキン主動土圧の理論ではすべり線末端は $\delta = \pi/4 + \phi/2$ となるが、他のすべり面では対数らせんの制約（切羽無支持面下端を通り、切羽頂部の位置で垂直方向となる）から、この δ と異なる。

【参考文献】 福島啓一「わかりやすいトンネルの力学」土木工学社，§6切羽の安定，p16-17，1994(H6)年.9月.をもとに式を誘導した。

標準対数らせん $r_0=10m$

$\phi=30^\circ, \delta=54.555^\circ$

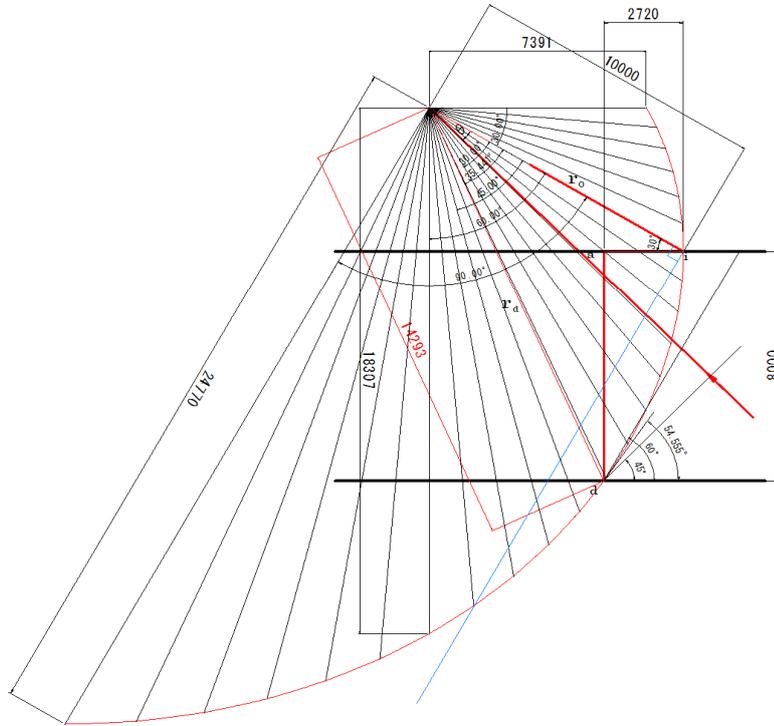
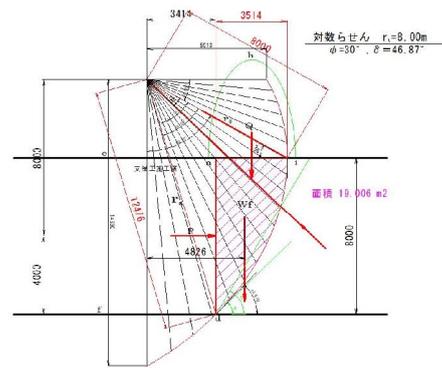
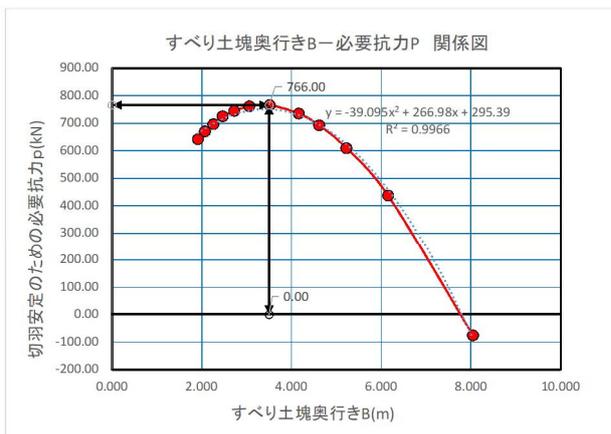


図-5 $r_0=10m$ とした標準対数らせんとしたもの



対数らせんすべり面 B=3.5m

図-6 切羽安定のための最大抗力Pを求めた例 (Pmax=766kN, B=3.5m)

(解説) ϕ が一定のとき対数らせん曲線は相似形のため標準曲線 ($r_0=10m$ など)をCADで作図し、拡大縮小する図解法が可能である。CADを用いると、すべり土塊をハッチングすることで土塊の面積、土塊の重心が容易に求められる。

すべり土塊幅Bは、初期動径 r_0 を変化させ、追従して変化させる。 r_0 を1.0mないし0.5m刻みで変化させ、Bが0.5m程度ピッチで変化するように作図で確認する。得られた各値から計算した結果をB-P関係グラフ(上に凸の二次曲線近似)に表し、Pの最大値とそのときのBを求める。