

1. Terzaghiによるトンネル地圧の三次元拡張式

三次元に拡張したTerzaghiのトンネル土圧式は、AGF等の長尺先受け工の設計計算に用いられている

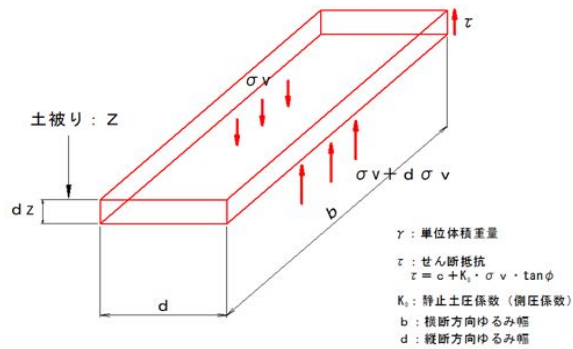
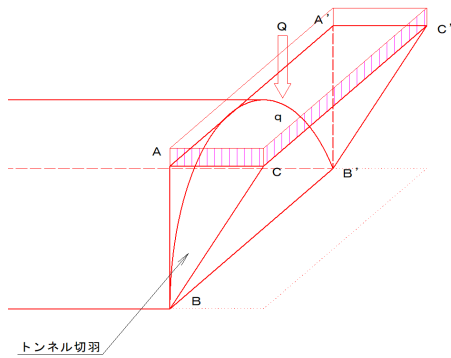


図-1 切羽前方におけるすべり土塊と荷重

図-2 テルツァーギのトンネル地圧(三次元拡張モデル)

図-1および図-2に示すように、トンネルにかかる土圧の横断方向幅をb、縦断方向幅をd、地表面の上載荷重をqとすると、土被りHの位置における鉛直地圧Pvは次式で与えられる。

$$P_v = \left[\frac{\gamma}{X} - C' \right] \left[1 - \exp(-X \cdot H) \right] + q \cdot \exp(-X \cdot H) \quad \text{式-1}$$

ただし

$$X = \left[\frac{2K_0(b+d) \cdot \tan \phi}{bd} \right], \quad C' = \left[\frac{C}{K_0 \cdot \tan \phi} \right]$$

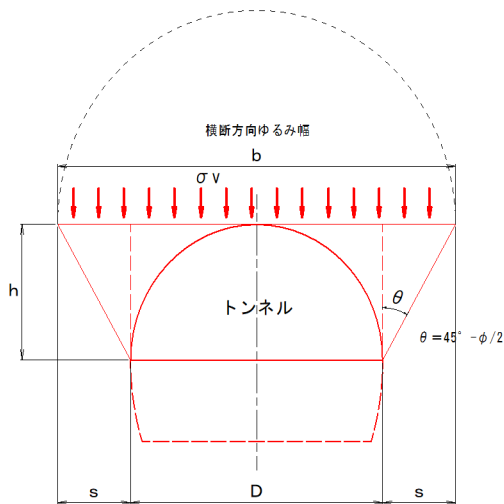


図-3 横断方向ゆるみ幅

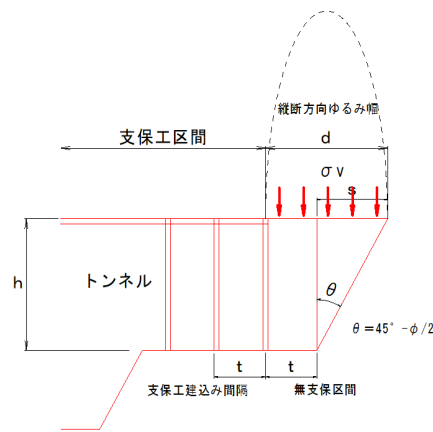


図-4 縦断方向ゆるみ幅(先受け工の例)

ここで、

- D: トンネルの幅
- Ht: トンネルの高さ
- H: 土被り
- Pv: トンネル天端にかかる鉛直地圧
- Ph: トンネルの側壁にかかる側圧

- Kh: 側圧係数, Kh=Ph/Pv
- q: 上載荷重
- gamma: 地山の単位体積重量
- C: 地山の粘着力
- phi: 地山の内部摩擦角

参照: 土木学会 トンネルライブラリー10 プレライニング工法 平成12年(2000年)6月
 土木学会 トンネルライブラリー20 山岳トンネルの補助工法 2009年度版
 ジェオフロンテ研究会 注入式長尺先受け工法(AGF工法)技術資料(六訂版) 2012年3月

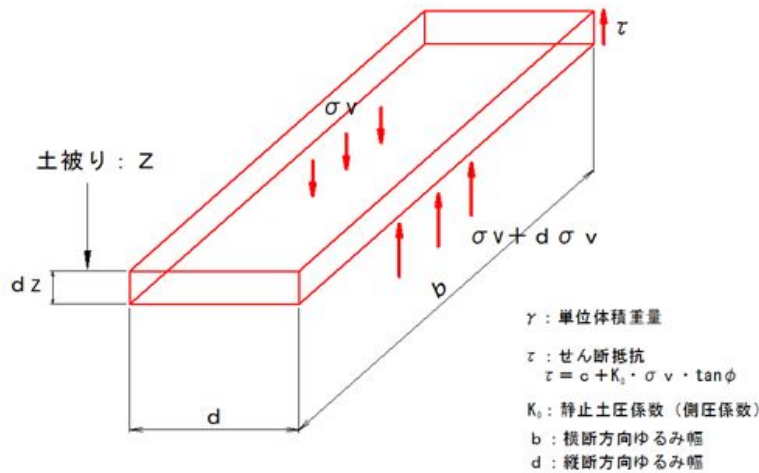


図-5 テルツァーギのトンネル地圧(三次元拡張モデル)

以下に、土木学会 トンネルライブラリー10 プレイニング工法 平成12年(2000年)6月,pp185-186に、上載荷重の影響も考慮して、式の誘導を行う。

いま、Terzaghiのトンネル横断面の土圧式を参考に、上図のような地中の土塊(横断幅b, 縦断幅d、厚さdz)を考えると、鉛直方向の力のつり合いは(式1)で示される。

$$bd \gamma dz = bd(\sigma_v + d\sigma_v) - bd\sigma_v + 2(b+d)\tau dz \quad (式1)$$

ここで γ ; 地山の単位体積重量

両辺をbdで除する。

$$\gamma dz = (\sigma_v + d\sigma_v) - \sigma_v + 2\{(b+d)/bd\} \tau dz$$

よって

$$d\sigma_v = \gamma dz - 2\{(b+d)/bd\} \tau dz \quad (式2)$$

側面での上向き摩擦力 τ は、クーロンの摩擦力の式より次のように表される。

$$\tau = c + K_0 \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi \quad (式3)$$

ここで K_0 ; 側圧係数 $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$

式2に式3を代入し

$$\begin{aligned} d\sigma_v / dz &= \gamma - 2\{(b+d)/bd\} (c + K_0 \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi) \\ &= \gamma - 2\{(b+d)/bd\} c - 2\{(b+d)/bd\} (K_0 \cdot \sigma_v \cdot \tan \phi) \\ &= \left[\frac{-2K_0(b+d) \cdot \tan \phi}{bd} \right] \left[\sigma_v + \left(\frac{c}{K_0 \cdot \tan \phi} \right) \right] \\ &\quad - \left[\frac{bd}{2K_0(b+d) \cdot \tan \phi} \right] \cdot \gamma \end{aligned}$$

ここで次のようにX、C'で置き換えて

$$X = \left[\frac{2K_0(b+d) \cdot \tan \phi}{bd} \right], \quad C' = \left[\frac{c}{K_0 \cdot \tan \phi} \right]$$

$$\frac{d\sigma_v}{dz} = -X \left[\sigma_v + C' - \frac{\gamma}{X} \right]$$

よって

$$\frac{d\sigma_v}{\sigma_v + \left(C' - \frac{\gamma}{X} \right)} = (-X)dz \quad (式4)$$

ここで、積分公式に準ずる式を利用する。

置換積分法

$$\int \frac{dy}{y+A} = \int BdZ \quad \text{ここで } \sigma_v=y, A=C'-\gamma/X, B=(-X)$$

$$\int \frac{dt}{t} = \int BdZ \quad dt/dy=1, dt=dy$$

$$\begin{aligned} \log e(t) &= BZ + \lambda \\ \log e(y+A) &= BZ + \lambda \\ \frac{y+A}{y} &= \exp(BZ + \lambda) \\ &= \exp(BZ + \lambda) \cdot \exp(-A) \end{aligned} \quad \lambda; \text{積分定数}$$

$$\therefore \sigma_v = - \left(C' - \frac{\gamma}{X} \right) + \exp((-X)Z + \lambda) \quad (式5)$$

ここで

$$\alpha = \left(C' - \frac{\gamma}{X} \right)$$

と置くと

$$\sigma_v = -\alpha + \exp((-X)Z + \lambda) \quad (式6)$$

次いで積分定数C'を求める。

いまZ=0(地表)では $\sigma_v=q$ (地表面載荷)となるため

$$\begin{aligned} q &= -\alpha + \exp(\lambda) \\ \therefore \exp(\lambda) &= q + \alpha \end{aligned} \quad (式7)$$

式6に式7を代入する

$$\begin{aligned} \sigma_v &= -\alpha + \exp((-X)Z) \times \exp(\lambda) \\ &= -\alpha + \exp((-X)Z) \times (q + \alpha) \\ &= -\alpha + \alpha \cdot \exp((-X)Z) + q \cdot \exp((-X)Z) \\ &= \alpha \cdot (\exp((-X)Z) - 1) + q \cdot \exp((-X)Z) \\ &= \left(C' - \frac{\gamma}{X} \right) (\exp((-X)Z) - 1) + q \cdot \exp((-X)Z) \end{aligned}$$

ここで、 $\sigma_v=pf$ (緩み荷重強度), $Z=H$ (土被り)と置いて

$$pf = \left(\frac{\gamma}{X} - C' \right) (1 - \exp(-X \cdot H)) + q \cdot \exp(-X \cdot H)$$

ただし

$$X = \left(\frac{2K_0(b+d) \cdot \tan\varphi}{bd} \right), \quad C' = \left(\frac{C}{K_0 \cdot \tan\varphi} \right)$$

(注)Xは緩み荷重係数, C'は粘着力の補正值ともいわれる。

以上