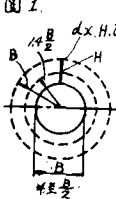


株式会社 ダイヤコンサルタント 正会員 ○ 尾上哲介

1 緒言 著者はトンネル工事の施工に従事し種々の難かしい場面に遭遇し、トンネルの圧力を何等かのほう法で確からしい値を得たい所念で至極した実状に照らして以下のごとき考へ方、数式で求めた値を参考に、今後の設計ならびに施工の役敵、支保工に適応するごとく修正し採用してはと思ひ以下に示す式を提案する。

$P = B/2 \cdot \gamma - S^2/M$ P トンネル圧 B トンネルの水平ほう向の中 γ 地山の代表的比重 S 地山附近の代表的せん断強度 M 地山附近の代表的曲げ強度

2 トンネル圧の考へ方 その1 トンネルの地山は地球上多くの分類によって多種多様であるが通常採れるトンネルについて述べる。地山はトンネルを掘らなければ平衡が保たれ、掘ることによつて平衡が破れるものと仮定する。便宜上トンネルは半徑 R の円筒とし円筒が地山であり、この円筒の任意の点 P で微細分の考へ方を入れて深さ、または高さ H の地山が中るので圧力を及ぼす範囲として $d \times H \cdot \gamma$ の圧力が生ずるものと考へる。トンネル圧は H を探るごととなる。トンネルの掘削は掘削機、その他の使用する重機械の影響で中のみで異なるのが通常で、理想的に掘れたとしても時間がかかる。この作業に要する時間を無視しても通常何日かの後



に掘立工事、支保工工事などを施工することが多い。地山の中のみはこんなことには無関係に進行するものと理想的に一樣に連続して中のみものと仮定する。地山は半徑 R の円筒の中心に向つて崩れ、穴を埋めるものと仮定する。穴が埋まれば平衡を回復するものと仮定すれば、内空断面は πR^2 である。平衡を回復するものは πR^2 と同一断面積の地山で充塞するものとすれば地山の範囲は理想的には $2\pi R^2$ の断面積が中のみと考へる。併つてその場合の断面の半徑を R' とすれば $R' = \sqrt{2}R$

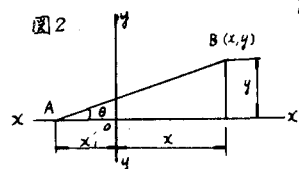
$R = \sqrt{2}R' \approx 1.41$ トンネルの断面を除けば円筒の外に 0.41 の同心円の範囲が地山の中のみを範囲とし、これを第一次の中のみ範囲と称することとする。トンネルは瞬間的に破れることは難かしい、また地山の中のみは抵抗するものが発生し全く中のみ終るには時間がかかる。この抵抗と時間のかゝることを利用してトンネル工事が進捗し工事が完結するものと考へる。第一次の中のみが終ると更に拡大し第二次の中のみ外について $\sqrt{2} \times \sqrt{2}R' = 2R$ となる。同様の考へ方で仮に倍々、拡大すると考へるのでは第二次の中のみは 1 の 2 倍となる。すなわちトンネルの中のみとすれば半徑は $R/2$ だけ地山が中のみこととなり、この中のみを第二次の中のみ範囲と称する。第一次の中のみも第二次の中のみも実際の現場では区別なく中のみ易い所から中のみするものである。第一次の中のみも第二次の中のみも節度があるわけではなく 0.41 より 0.6 と、 0.8 と考へられるが崩れ方の統計的実状より見て第二次に考へれば十分であると至極上より考へるの $R/2$ を提案する。トンネル工事より又丹那トンネル等の最近、又過去のトンネルの例より見て 0.41 範囲うしいトンネル圧は無くずつと小さいものであつた。

この考へに至る役敵が幾つあるが端的に言つて静水圧的に考へた考へ方が多く入れているので現場の実状をこの様に説明し 0.41 すなわち $0.4 \times R/2$ の範囲の地山の中のみは避け難い範囲、十分覚悟してトンネル掘削は万全を期すべき範囲と考へる。すなわち基礎的に $0.4 R/2$ 範囲と工事の終る頃迄は $R/2$ 範囲を考へるのが通常のトンネルの状態と考へる。この範囲に於ける項で示す抵抗が生じてずつと小さいトンネル圧となつてゐる。

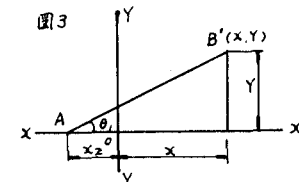
3 S^2/M の誘導について 提案式の S^2/M は或るトンネル周囲上の某に於ける圧力に対して γ の長で抵抗してゐる、せん断、曲げモーメントで抵抗してゐる強度を示すもので地山の單なる破壊時のせん断、曲げ強度の地山の中のみを考慮に入れたものである。以下に述べるごとく S^2/M は圧力を示すものである。

トンネルの周囲はせん断力、曲げモーメントが存在し、或る一つの平面すなわち断面について連続して有限のある値として存在し、せん断力、曲げモーメントは弾性理論が成り立つものと仮定する。トンネル周囲上の任意の某においてせん断力と曲げモーメントは同時に同一某で求められたいものとする。これらのせん断力と曲げモーメント

ントを直交軸 \$x\$ 軸, \$y\$ 軸上に表はされ, 表はされた線上の任意の一点 \$B\$ を曲げモーメントについて \$x, y\$ セン断力について \$x, y\$ で表はされたものとする。曲げモーメント, セン断力は同じ長さの値であるので \$x\$ 軸については同じ \$\alpha\$ とし, その値を \$y\$ 軸上に表はし, 曲げモーメント \$y\$, セン断力 \$Y\$ の値として表はす。これを図 2, 3 のごとく表はす。曲げモーメント \$y\$ は \$x\$ の関数 $y = f(x)$ で示されるので $\frac{dy}{dx} = \tan \theta = \frac{y}{(x+x_1)} = Y$ となる



$Y = f'(x)$ である。 $f'(x) = f'(x)$ で示される。 $\therefore \tan \theta = \frac{y}{(x+x_1)}$ より
 $(x+x_1) = \frac{y}{\tan \theta}$ (1) また $\frac{dY}{dx} = f''(x) = f''(x) = \tan \theta_1$ を得る
 ので $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{dY}{dx} = \tan \theta_1 = \frac{Y}{(x+x_2)}$ の関係があるので, これに $Y = \frac{y}{(x+x_1)}$



を代入すると $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{Y}{(x+x_2)} = \frac{y}{(x+x_1)} \times \frac{1}{(x+x_2)} = \frac{\tan \theta}{(x+x_2)}$ すなわち
 $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\tan \theta}{(x+x_2)} = \frac{y}{(x+x_1)} \times \frac{1}{(x+x_2)}$ (2) $\frac{(x+x_1)}{(x+x_2)} = \alpha$ とおき

(1) を代入すると, すなわち $\frac{1}{(x+x_2)} = \frac{\alpha}{(x+x_1)} = \alpha \frac{\tan \theta}{y}$
 $\therefore$ (2) は $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\tan \theta}{(x+x_2)} = \frac{y}{(x+x_1)} \times \frac{1}{(x+x_2)} = y \times \frac{\tan \theta}{y} \times \alpha \frac{\tan \theta}{y} = \alpha \frac{\tan^2 \theta}{y}$
 $\therefore \frac{d^2y}{dx^2} = \alpha \frac{\tan^2 \theta}{y}$ (3) (3) 式の $\frac{d^2y}{dx^2}$ は荷重すなわち圧力

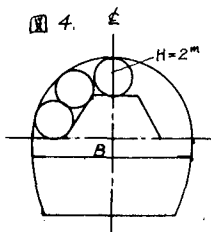
を示す。 $\tan \theta$ はせん断力, y は曲げモーメントである。 α は $\frac{(x+x_1)}{(x+x_2)}$ で x_1, x_2 は符号を持った値である。 よって (3) は $P = \alpha \frac{S^2}{M}$ となる。 $\frac{S^2}{M}$ は圧力の項である。 $\therefore P \propto S^2$

$P \propto 1/M$ α の $x_1 = x_2$ であれば $\alpha = 1$ である。 S はせん断強度, M は曲げ強度とすれば S と M は地山中で必ずともに最大の値をとって S^2/M が最大値とは限らない。後述のごとく入手した試料の破かい試験で分ったことであるが堅硬な岩面であればあるほどはせん断強度も曲げ強度も共に大きい値となつてゐる。これらの関係より α を控へ目な値として推定すると現在迄に入手した資料より判断して α は 1.0 ~ 1.6 が適当ではないかと思ふので 1.0 ~ 1.6 とし, トンネル圧は主として天上部のアーチ部の中央トンネル中の $B/4$ より $3B/4$ 間の近似値として扱ふ。地山岩石類のせん断, 曲げ強度は現場ボーリングで得た試験片を用ひ実測によるか類似の試験結果得た値を用ひる。この方法は試験片の大きさやその方法によりばうつき必ずしも一定でないので注意を要する。従つて $\alpha = 1$ とし S^2/M とする。但し実用に供する場合には α を考慮するものとする。

4 トンネル圧の考へ方 その 2 トンネル圧は一つの岩石, 土砂などの地山より泥土, シルトなどに至るまで含水率などの値により各種, 様々であるがトンネル圧としては強れるトンネルを考へ通常の工法で施工するものを対象としレールドなど特殊なものを除くが適用し得るものには適用することにより有効である場合適用する。工事の仕方機械, 爆薬の使用とその量により自う招いた圧力として, 圧力は定まるものと考へる。時間的にも比較的早目に充保工, 掘立工事施工すればトンネル圧の拡大をまねかれることもある。本文で云ふアーチ中のみの範囲の圧力が全面的に発生することは稀である。天上アーチ部も局所的に云はば発生し易い所があるといふ現象がある。圧力の伝達上側圧, 地盤圧について本文の仮定とは異なるが現象には地盤圧は考慮しないことが多い。側圧も可なり減少してゐる。せん断, 曲げの強度が主として影響して居るものと思ふがせん断については変力のある場合には変力効果とても云いたい効果があるものと思ふ。試算にまつては Case by Case で考へべき場合が多い。トンネル掘進の初期より掘立て終る迄の間の圧力の變化が著しいのが普通で充保工を入れて徐々に平衡を回復する様相で一定値に近づくものごとくである。掘進により中のみ拡大しても充保工で平衡を得れば充保工設計に本文の試算式を適用し, 掘立てコンクリートなどで施工すればこれにも試算式を適用するものである。掘進の方法例へば普通なほどにも適用しその大きさ断面の決定にも適用し得るものである。かくてトンネルが平衡を得て安定が保たれる場合は S^2/M はトンネル圧より大きいものとなる。充保工では掘立施工までの間多少の掘み, 膨張があつても免れるごとくは施工も S^2/M をトンネル圧より大きくするごとくは設計し施工に當つてはこれを確認して次の工事を施工することとなる。このそれぞれの場合に適用しオー項, オ二項をひとして

取り扱ふこともあり得る。

5 提案式を用ひての例 トンネル掘進の初期は強制的に施工せられ比較的に地山内の圧力は不安定な時期に據立てる施工する事となる。第一次のゆるみと第二次のゆるみ迄の時期に安定するごとく施工する必要があると思ふ。この共に重負を置く。〇鉄新幹線丹那トンネルの着工前の施工計画として特に温泉余土地帯の施工計画として断面中を10mとして天上に翻つて作業員の身長高さ2.0を基準としてアーチ周附近の圧力を小さくする目的で図のごとく小円型の植刺上に鋼支保工を入れその圧力五次のごとく推定した。上部半断面に高さ2mの内では上部の半円についてのみ考へる。従つて $H=2.0$ で $1.0 \times 0.4 = 0.4$ の厚さの圧力を考へ地山比を $2.0^2/m^2$ と仮定し、 S^2/M の値を無視する。 $\therefore 0.4 \times 2.0 = 0.8^2/m$ 以内と推定した。その後比を $1.8^2/m^2$ 鋼支保工は溶接H200x200x12x25で施工した。温泉余土地帯以外は上部半断面とし中負9.5と仮定し $H=9.5$ 従つて下部を無視して $\frac{H}{2} = 2.37$ $2.37 \times 0.4 \times 1.8 = 1.71^2/m$ $1.71^2/m$ を最としその $1/2$, $0.85^2/m$ を予想して施工した。実際には150H鋼支保工を仮ふこととなつた。工事中の室時はせん断強度、曲げ強度はあまり考へられなかつた。温泉余土の190m向中6ヶ所の鋼支保工に12ヶ所内隔1.336はカールソンメーターを取付けな力を計測しその結果は土木学会論文集に佐久間博士より發表されてゐる。この資料を用ひ弾性理論を応用してトンネルの圧力を概算した値と提案式を用ひて概算した圧力を比較する。〇鉄工事区の所好表により比重 $1.8^2/m^3$ 圧縮強度 $20kg/cm^2$ せん断強度 $10kg/cm^2$ と得た。曲げ強度については黒田現場のボーリングによるコアー長野県裾花ダム現場の安山岩、泥炭凝灰岩、長崎県ドク建設現場の軟砂岩ボーリングコアーを万かに夾み他端に重量をかけた実測による破かい試験により得た値より推定して曲げ強度 $25 \sim 30 kg/cm^2$ とした。図のごとき掘進で $H=2.0$ としトンネル中を約11.0として以下のごとく算出する。



$H=2.0$ であるのでこれを直至、すなわち中として図4のごとく小円を考へると $B/2$ は1.0である。従つて $1.0 \times 0.4 = 0.4$ $\therefore 0.4 \times 1.8 = 0.72^2/m$ $\alpha = 1.2$ と推定仮定する $S^2/M = \alpha \times (40^2 \times 10^8) / (40^2 \times 25^2) = 1.2 \times 160^2 = 0.19^2/m$ $P = 0.72 - 0.19 = 0.53^2/m$ 地山に逆算して $0.53/1.8 = 0.29^2/m$ すなわち地山深さ $29^2/m$ の荷重がトンネル圧として生ずることとなる。比較のため $0.53^2/m \times 1.336 = 0.71^2$ これに対して 0.350^2 , 0.500^2 , 0.700^2 の計測値を得て居る。

次に黒田現場で大町ルート、黒部ルート其他附近トンネルのコンクリート據立を施工しその中の2号トンネルは花崗岩中長英斑岩比重 $2.5^2/m^3$ せん断強度 $25kg/cm^2$ (土木学会誌に黒田現場のせん断強度試験として既に發表されてゐる中で数枚試験片より引用する) 曲げ強度 $60kg/cm^2$ (著者の実験による) と推定する。2号トンネル中負8.0とし $H=8.0$ $\therefore H/2 = 4.0$ $0.4 \times 2.0 = 0.8$ $\therefore 0.4 \times 2.0 \times 2.5^2/m^3 = 2^2/m$ $\alpha = 1.6$ と推定し $\alpha \frac{S^2}{M}$ は $1.6 \times (25 \times 80^2) / (60 \times 80^2) = 1.3^2/m$ $P = 2^2 - 1.3^2 = 0.7^2/m$ 逆算して $0.7/2.5 = 0.28$ すなわち深さ $28^2/m$ のトンネル圧となる。このトンネルは現在大町ルートとしてトロリーバスが通行中で所によつては支保工が無く破砕帯のコンクリート據立経つた以外の場所でのこの程度以下のトンネル圧と推定する。地山の岩石などのせん断強度も曲げ強度について資料が少いのが現状でことにせん断強度と曲げ強度の両強度の併せての資料が甚だ少い。曲げ強度についてコンクリート以外について皆無に近い。著者はこの曲げ強度について、學の進歩について期待するものである。トンネル圧、圧力はせん断強度の自乗に比例し、曲げ強度に逆比例することを経導した。このことは他の分野はたぐひた用し地すべりなどに応用出来ると確信してゐる。

資料と提供されたかたがた、御指導下さつたかたがたに感謝します。

6 結言 以上により提案式 $P = \frac{B}{2} \gamma - \frac{S^2}{M}$ はその場合にはより例へば $P = 0.4 \frac{B}{2} \gamma - \alpha \frac{S^2}{M}$ に修正し、トンネル圧を推定し、大差のないものと思ふ。またこの式はトンネル掘進の比較的初期のトンネル圧に重負を置いておるが後期の安定したトンネル圧にも応用し得るものと思ふ。

以上