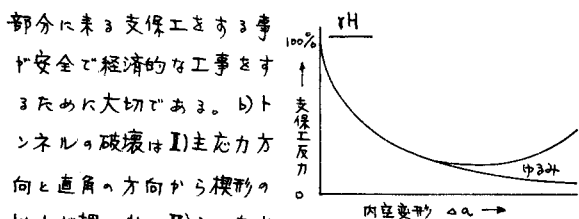


1. 概要 岩盤力学の原理を生かした新しいトンネル工法として、新オーストリア・トンネル工法(NATM)は最近日本でも注目されており、施工例も見られる様になった。その場合の設計法としてはセ人断破壊説によるもの^{1,2}、及び有限要素法によるものがあるが、いくつかの問題点が残っている。ここではセ人断破壊説に基づく設計法を拡張・改良した新しい設計法を提案するものである。

2. NATMの原理 a)トンネル掘削後、僅かに内空変形を許すと支保工反力は減るが、過大な変形を許すと支保工反力は再び増え、変形量と支保工反力との間には図1の様な関係があることが実験より知られている。最低点の近く、曲線が右下りの



部分に来る支保工をする事

で安全で経済的な工事をするために大切である。b)トンネルの破壊はI)主応力方向と直角の方向から楔形の地山が押し出しII)このため

頂部と底版の地山はスパンの拡大した梁の様に働き、空洞に向かって撓み出しIII)で側圧も加わって座圧し空洞に向かって押し出されて来る、と言う過程で起る(図2)。c)支保工(外側アーチ)は地山に密着した薄肉の、撓み易いものとし、地山内の応力の再配列を許し、しかも有害な変形を起させないものとする。d)現場計測により計算式の不完全、土質や岩質の不均一、変化等に対応する。e)内側アーチ(本巻立)は一般には化粧、安全率の向上、防水などの役割しかない。f)周辺地山の耐荷能力と出来るだけ利用する。

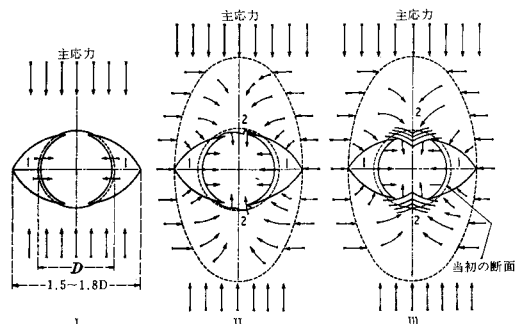


図2 応力再配列による空洞部のまわりの破壊の機理的進行過程とその状況の概念図

3. 従来の設計法 a)作用土圧は図1より算出すべきであるが明示なし。実験により推定している。弾性変形のみを許す時は後記⑩式により算出。b)破壊は図3に示すセ人断すべり面沿ひに起るものとし、この面どうの(i)吹付コンクリート(ii)鋼アーチ支保工(iii)ロックボルト(iv)周辺地山、のセ人断抵抗力を計算して合計している。c)岩盤は吹付コンクリート等により拘束され、三軸応力状態におかれているとし、

Mohr-Coulombの降伏規準によりセ人断抵抗力を計算している。但しロックボルトにより補強された岩盤部分のみ有効とする。

4. 従来の設計法の問題点 a)変形量と所要支保工耐力の関係が明確でない。b)変形を許して所要支保耐力を減らす考えと、岩盤アーチの支持力を期待することとは一部重複しているからである。c)岩盤アーチの支持力はロックボルトがあつて初めて發揮されるものとしてゐるが、ボルトなしの地山でも支持力ゼロとはおえない。但しこの項とb項による誤差は一部消し合う。d)ロックボルトの長さを変えて行くに岩盤アーチ支持力の最大点が生じ、それよりボルトを長くしても逆に支持力は減ると言う矛盾した計算結果になる。e)地

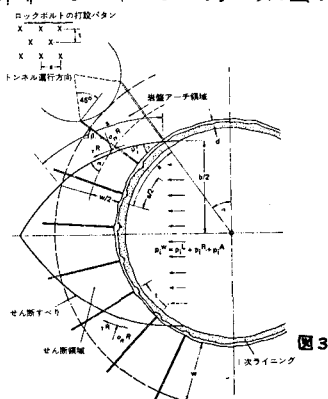


図3

山拘束力 p_i (=支保工反力 p_i)を増すと岩盤アーチ支持力が減ることがある。f)他の条件が一定なら吹付コンクリート厚さ、鋼アーチ支保工の断面積、岩盤アーチ厚さ(従つてロックボルトの長さ)はトンネル径に比例し、単位面積当りボルト本数はトンネル径に関係なく一定となるが、小トンネルなら無支保で掘れる地質でも大地下発

掘削と掘るのには相当な支保が必要、と云う経験と矛盾する。g) ロックボルトが有効に働くためにはセメント断面より奥に定着長が必要なのを考慮してなす。h) 安全率なり荷重係数の概念が明確でなし。i) 円型トンネルしか設計出来ない。j) 側圧係数 $K_a = 1$ の場合しか設計出来ない。従って天盤、側壁、底盤で所要支保工耐力は異なる筈であるが一定の答しか出ない。k) 施工速度、施工順序などの影響が現れなし。その他。

5. 新設計法で前提とした岩盤の特性 a) 岩盤の応力—ひずみ関係は降伏限界までは完全弾性、それ以上のひずみに対しては完全塑性とする。塑性変形中は体積一定。b) 降伏条件は Mohr-Coulomb による。c) トンネルは図3に示すセメント断面沿いにセメントひずみが生じ、ひずみが一定値を超えるとセメント破壊を生じる。このひずみ限度は岩質、拘束力、ロックボルトの有無・間隔・全面接着型ボルトがどうかにより変る。d) ボルトはセメント断面の所でS字状に曲り、セメント破壊に抵抗する。

6. 新設計法の基礎となる岩盤力学 a) 上下、水平に圧力 $p = \gamma H$ を受ける地山内に円型トンネルを掘ると、トンネル周壁切線方向には $\sigma_\theta = 2p \cdots \text{①}$ の応力が生じる。b) σ_θ が地山の軸圧縮強度 σ_d を超えると一般にはトンネル周辺の半径 R より内側では塑性状態になる。c) 軸対称関係より $\sigma_r + r \frac{d\sigma_r}{dr} = \sigma_\theta \cdots \text{②}$ d) $r > R$ (弾性域) では $\sigma_r = \gamma H (1 - \frac{R^2}{r^2}) + p_0 \frac{R^2}{r^2} \cdots \text{③}$, $\sigma_\theta = \gamma H (1 + \frac{R^2}{r^2}) - p_0 \frac{R^2}{r^2} \cdots \text{④}$ となる。但し p_0 : 半径 R での半径方向応力 (④式で求める)。e) $r = R$ (弾塑性境界) では降伏条件 $\sigma_\theta = \sigma_r \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} + \frac{2C \cos\phi}{1-\sin\phi} \cdots \text{⑤}$ と②④を連立して解いて $\sigma_r = \gamma H (1 - \sin\phi) - C \cos\phi = p_0 \cdots \text{⑥}$ $\sigma_\theta = \gamma H (1 + \sin\phi) + C \cos\phi \cdots \text{⑦}$ となる。f) トンネル半径を a とし、 $a < r < R$ (塑性域) では⑤と②より $\log \frac{r}{a} = \frac{1-\sin\phi}{2\sin\phi} \log \frac{\sigma_r + C \cot\phi}{p_0 + C \cot\phi} \cdots \text{⑧}$ これを解いて $p_0 = -C \cot\phi + [\gamma H (1 - \sin\phi) + C (\cot\phi - \cos\phi)] (\frac{r}{a})^{\frac{2\sin\phi}{1-\sin\phi}} \cdots \text{⑨}$ (但し p_0 : 支保工反力), これに $R = a$ を代入すると弾性変形のみを許した時の支保工反力 $p_{ie} = \frac{(2\gamma H - \sigma_d)}{2} \frac{1-\sin\phi}{1-\sin\phi} \cdots \text{⑩}$ が求められる。g) 弾塑性境界の半径 R は $\Delta R = \frac{R}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r) \cdots \text{⑪}$ が減少する。④⑦を代入すると $\Delta R = \frac{R}{E} [\gamma H (1 - \nu + \sin\phi + \nu \sin\phi) + C \cos\phi (1 + \nu)] \cdots \text{⑫}$ h) 塑性域内では体積変化なし $\therefore R^2 - a^2 = (R - \Delta R)^2 - (a - \Delta a)^2 \cdots \text{⑬}$ $\therefore \Delta a \div \Delta R \frac{R}{a} \cdots \text{⑭}$

7. 新設計法による設計手順 a) 支保工の寸法・数量を仮定する。b) 仮定した支保工による許容反力 p_a を計算する。計算法は文献に従って岩盤アーチの耐力は考慮しない。c) $\sigma_3 = p_a$ として許容ひずみ量 Δa を想定する。許容塑性ひずみ量はトンネル半径に依らず、 σ_3 、岩質、ロックボルトの本数・形式により決る。弾性ひずみ量は⑤⑫より求められる。d) ⑫より $\Delta R/R$ を求める。e) ⑭より R を求める。f) ⑨より p_0 を求める。g) 文献によりS字状に曲ったロックボルトのセメント抵抗力 p_{ia} を求める。 $\therefore p_{ia} = p_{ia}' + p_{ia}$ h) $p_0 < p_{ia}$ であればOK, $p_0 > p_{ia}$ 又は $p_0 \ll p_{ia}$ であればa)に戻り支保工を再び仮定し直す。i) $r = R$ より奥で所要の引張耐力が得られる様にアンカーボルトの長さを決める。j) $\Delta a - \Delta R$ よりロックボルトの伸び量を求め、アレステレス必要性、等々検討する。k) ⑫の値を参考にして施工順序、時期、余掘り量、吹付コンクリートに可塑性を肉をいれるが、どうか等を検討する。l) $K_a = 1$ の時、円形以外のトンネルの場合は、それぞれの場合、場所の応力集中係数を求め、①の γH の代りに $\frac{\sigma_1 \gamma H}{2}$ を用いることにより設計出来る。

8. まとめ 破壊をセメントひずみ量で捉えた点がこの設計法の最も従来と変わっている所であるが、鋼材の引張り試験でも弾性ひずみは試験片の長さで比例するが、塑性ひずみは試験片の長さで関係のない事を知らなければならないが、岩盤でもほぼ同じ関係が成立する筈である。それ以外の点については NATM の創始者 L. V. Rabcewicz が論文で説明している事を素直に数式化したばかりであり、彼のトンネル破壊についての現状認識が実に正しかったことをあらためて感じてゐる所である。今後試験設計と実施工・計測を重ねてこの設計法の適否を検証し、なお改善して行きたいと思つてゐます。

参考文献 1. Rabcewicz, L. V.: Stability of Tunnels Under Rock Load (Water Power 1969 June, July, August)

2. Rabcewicz, L. V. & Golser J.: Principles of dimensioning the supporting system for the "New Austrian Tunneling Method" (Water Power 1973, March)

3. Feder, G.: Zur Wirkungsweise der Systemankerung von Hohlraumbauten in isotropem festen Gebirge (Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 1976, 6)