

長崎大学大学院	学生会員	元尾秀行
長崎大学工学部	正会員	蔣 宇静
第一復建株式会社	正会員	矢口晃見
長崎大学工学部	正会員	棚橋由彦

1. 研究目的

トンネルや地下空洞の設計に際して、地山の支持力を最大限に生かすためにゆるみ圧の定量的評価は重要であるが、評価手法がまだ確立されていないのが現状である。本研究は、軟岩地山に NATM により施工されたトンネルを対象とし、ひずみ軟化特性などを考慮した理論的解析手法を示し、地山特性曲線を定量的に求めることにより、支保設計を行うためのゆるみ圧の評価法を提案することを目的とする。

2. 初期地山応力とトンネルの安定性の関係

ひずみ軟化特性を呈する地山トンネルの周りには、ひずみ軟化領域と塑性流動領域が生じると考えられる。とくに塑性流動領域が生じるとゆるみ荷重が発生するため、無支保状態では自立できない。

初期地山応力は図 - 1 に示すように、 x 軸方向と y 軸方向にそれぞれ無限遠から σ_x^0 と σ_y^0 が作用しているとする。 p_0 は静水圧に相当する成分、 s_0 は初期応力の偏差成分である。ここでは、トンネル壁面にせん断破壊を生じさせないための極限内圧 $p_{ie}(\theta)$ を考慮することで、図 - 2 に示すように、地山岩盤の内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ の場合、初期地山応力の載荷経路とトンネル周辺地山の塑性化状態の関係を表す境界線を求めることができる。まず、トンネル壁面における応力は式(1)の様に表せる。そこで、Mohr-Coulomb の規準式($\sigma_1 = \sigma_c + K_p \sigma_3$)を利用することで、極限内圧 $p_{ie}(\theta)$ は式(2)のように誘導された。

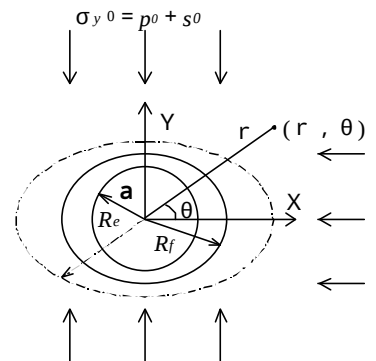


図 - 1 非静水圧モデル

$$s_q = s_1 = 2p_0 + 4s_0 \cos 2q - p_{ie}(q) \quad (1)$$

$$s_r = s_3 = p_{ie}(q)$$

$$p_{ie}(q) = (2p_0 + 4s_0 \cos 2q - s_c) / (K_p + 1) \quad (2)$$

上式を用いることで各境界線を定義することができた。各境界線の内容として、oi 線は側圧係数 $k = 0$ としたもの、ij 線は未掘削状態で地山岩盤が塑性化される境界線、ok 線はトンネル壁面に引張応力が生じる境界線、nl 線はトンネル壁面周辺の塑性領域の形が変相する境界線、mp 線は塑性領域の閉合程度を示す境界線、mn 線は無支保状態でのトンネルが自立できる境界線、aa 線は塑性流動領域の閉合程度を示す境界線、bb 線は塑性流動領域の発生を区別する境界線である。これらの 8 つの境界線に基づき、領域 I は地山岩盤が塑性化される領域、領域 II は無支保状態でのトンネルが自立できる領域、領域 IIIa では壁面に部分的せん断破壊、領域 IIIb では壁面全周にせん断破壊が生じると予測できる。

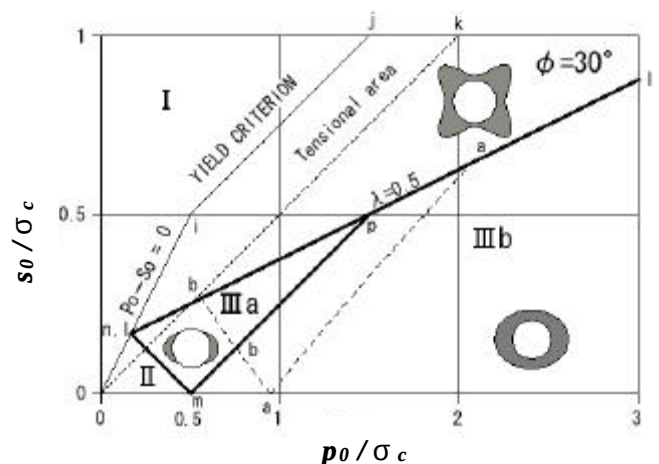


図 - 2 初期地山応力の載荷経路

キーワード：軟岩地山，トンネル，ゆるみ荷重，地山特性曲線

連絡先：長崎市文教町 1 - 14 長崎大学工学部社会開発工学科 Tel：095-847-1111，Fax：095-848-3624

3. 塑性半径の理論解

3.1 塑性流動領域発生判定

ここでは、 σ_c/p_0 を地山強度比(S_{rp})と定義し、無支保状態で塑性流動域を生じない地山強度比 (σ_c/p_0) を $[S_{rp}]$ とすると、 $S_{rp} < [S_{rp}]$ では塑性流動領域が生じるのに対し、 $[S_{rp}] \leq S_{rp}$ 2ではひずみ軟化領域のみが生じる。以上の判断に基づき、図 - 1 における側圧係数を 1 とした場合の解析解を用いて、地山の力学的物性値と地山強度比から塑性流動領域の発生を判定するためのグラフを作成することができる。図 - 3 はその結果の一部である。図中の D は $D = \sigma_c^* / \sigma_c$ とし、圧縮強度低下率と定義している。実際の地山強度比 S_{rp} がグラフ中の曲面よりも上であれば、トンネルの周りにおいてひずみ軟化領域のみが生じ塑性流動領域は発生しなくなる。図 - 3 から塑性流動領域の発生に対して、内部摩擦角 ϕ とぜい性率 α が大きな影響を及ぼすことが明らかである。

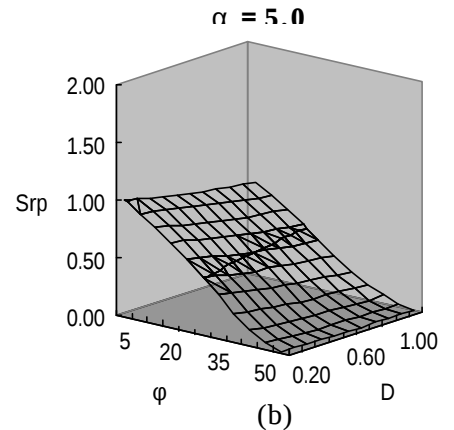


図 - 3 塑性流動領域の発生を判定するためのグラフ

4. 地山特性曲線の定量的評価

4.1 地山特性曲線の理論解

地山特性曲線を求める際、トンネル周辺岩盤の変形による地山支持力の低下と塑性流動半径におけるゆるみ荷重の増加との相互関係を連成問題としてとらえる必要がある。ここでは、次式を満足することによって地山特性曲線を求めることを提案する。

$$p_i \equiv \max \{p_{ir}, p_{iy}\}; \quad u_a/a \in (0, u_{ap}/a); \quad p_{iy} = \frac{ag}{p} \left[\left(\frac{R_f}{a} \right)^2 - 1 \right] \quad (3)$$

ただし、 p_{ir} は掘削によって働く地山荷重、 p_{iy} は塑性流動域における地山の自重によるゆるみ荷重、 γ は岩盤の単位体積重量、 a はトンネルの断面半径である。また、 u_{ap} は最終壁面変位である。

4.2 ケーススタディと考察

図 - 4 に内部摩擦角が地山特性曲線に及ぼす影響を示す。この図から内部摩擦角の減少につれて、支保圧を大きくしなければならないことが分かる。

図 - 5 には S_{rp} と最小支保圧比(図 - 4 における交点の支保圧比)の関係を表す。この図から地山強度比が分かればトンネルの変形制御のために必要な最小支保圧比(図 - 4 に見られる交点の縦軸の値)が容易に定められる。

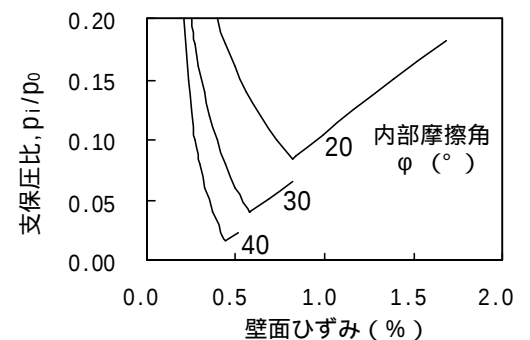


図 - 4 地山特性曲線に対する影響

5. まとめ

地山特性曲線を定量的に評価することは、合理的、経済的な支保設計を考えるために極めて重要なことである。本研究は、非静水圧状態での初期地山応力の載荷経路とトンネルの安定性との関係を示した。また、静水圧状態における軟岩トンネルを対象とした地山特性曲線の定量的解析を行い、地山特性曲線上の最小点に対応する最小支保圧比および制御壁面ひずみと地山強度比との関係を理論解析的に求めることができた。今後は、非静水圧状態への理論展開、模型実験との比較などを行うことでなお一層のデータの充実に図り、現場への適用を進めていく所存である。

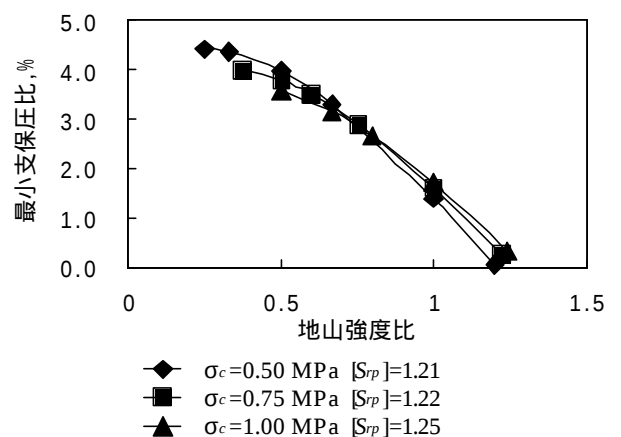


図 - 5 S_{rp} と最小支保圧比との関係