

佐藤工業(株) 正員・稲田 広文
正員 金子 典由 稲島 晴夫

1. はじめに

NATMの基本的な考え方の一つは、現場で得られた計算結果をフィードバックして、トンネルの施工・管理に役立てることである。当社においてもNATMの施工現場に技術者を派遣し、施工および計画管理の指導を行っているが、さらに一歩進んで、現場における簡易計算による計画管理を可能にするための概略設計法を考案した。この設計法は、トンネル壁面の内空変位状況の推定を主目的としており、変位の経時挙動が計算できる。しかし、支保メンバーに発生する応力の計算方法は現在研究中であり、今後発表してゆく所存である。

2. 設計の考え方

2.1 概要

本設計法は、周辺等圧下の円形空洞周辺の応力分布と弾塑性計算式により導き、壁面応力 σ_r と壁面変位 u_r の関係 (Fenner-Pacher Curve) から最適支保パターンを設計しようとするものである。また、新しい試みとして、トンネルの安定に影響する諸因子を計算に組み入れており、次のような特徴と欠点を持っている。

特徴

- ① 岩石の降伏後の挙動を考慮した計算が可能である。
- ② 吹付コンクリートの強度変化および切羽の進行に伴う応力解放率(切羽の三次元効果)を計算に取り入れている。
- ③ 掘削進行と仮定することにより、壁面変位の経時変化が計算できる。

欠点

- ① 土被りが浅く、周辺等圧と考えられる地山条件下では適用できない。
- ② 支保メンバーの応力・変位計算や掘削の考慮ができない。

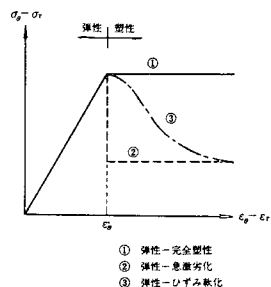


図-1 岩石の応力-ひずみ関係

2.2 弾塑性計算

周辺等圧下における円形空洞周辺の応力分布を求める弾塑性計算式は、カスナーが考案し P. Egger が展開した式を用いる。この式は図-1に示すような塑性領域での応力-ひずみ関係を考慮できる。

2.3 吹付コンクリート・ロックボルトの支持力計算

吹付コンクリートの支持力は薄肉円管式を用いる。また、ロックボルトの支持力は現場における引抜試験結果とロックボルト本数・打設ピッチから次式により計算する。

$$P_{LR} = \frac{P_t}{e \cdot t}$$

P_{LR} : ロックボルト支持力
 P_t : ロックボルト引抜耐力
 e : 横断方向ピッチ t : 縦断方向ピッチ

2.4 吹付コンクリートの強度変化

吹付コンクリートは吹付けた直後は軟らかいが、時間が経過するにつれて徐々に強度を発揮する。このためトンネル掘削直後と数日経過した後の吹付コンクリートの支持力を同一のコンクリート強度を用いて計算することは不合理である。そこで本計算では、若草今時のコンクリート強度試験結果から得られた吹付コンクリートの時間特性曲線を使用する(図-2参照)。

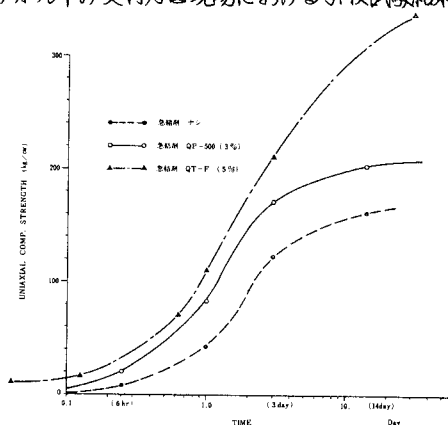


図-2 吹付コンクリート強度特性

2・5 切羽の進行に伴う応力解放率(切羽の三次元効果)

トンネルは切羽付近で先端が閉じており、切羽から遠ざかるに従って円管状になるような地山内に構築した一種のチューブ構造に近似できる。このため地山から作用する外力の分布は、切羽付近と円管部では異なり、トンネルの延長方向を考慮に入れた三次元解析によると次のような特徴が認められる。

- ① 地山の応力解放は、トンネル切羽より約1D(D:トンネル直径)奥の地山内において生じる。
- ② 切羽においては全応力の25%~30%が解放されてトンネルに作用する。
- ③ 切羽が進行すると応力解放率が増加するため、トンネルに作用する応力も増大する。
- ④ 切羽から1D~2D後方では応力解放率がほぼ100%となり、トンネル周辺の応力は増加しない。

このような切羽との距離と応力解放率の関係についてはF.E.M三次元弾性解析より求めた曲線図を使用する。また、地山が弾塑性挙動や粘塑性挙動を示す場合には、デフレクトメーター等による計測が必要である。

2・6 壁面応力の σ_r -壁面変位 U_r 曲線(Fenner-Pacher Curve)

σ_r - U_r 曲線はNATMの支保理論で説明されており、一般に良く知られているが、①地山の応力配分状況、②切羽の進行速度および切羽との距離、③掘削順序と加背割、等の条件により数多くの曲線を描くことができる。ここでは計算を簡単にするため、次のような仮定を設ける。

- ① σ_r - U_r 曲線は弾塑性計算式により導かれたものを利用する。
- ② 地山から作用する外力は、応力解放率のみにより定まるものとする。

以上の仮定に基づき、トンネルの掘削進行を考慮して周辺等圧 P_0 下における σ_r - U_r 曲線と考えると次のようになる。

- ① 掘削直後、切羽における応力解放率を α %とすると、トンネルに作用する外力は $\alpha \cdot P_0$ となる。
- ② 弾塑性計算式で $\alpha \cdot P_0$ の外力に対する σ_r - U_r 曲線を求めると図-3の②のようになる。この曲線は、最大応力-最大変位の関係曲線④を平行移動したものに相当する。
- ③ 各解放率における σ_r - U_r 曲線も④曲線を平行移動することにより求める。

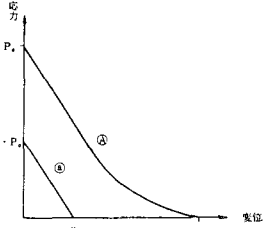


図-3 σ_r - U_r 曲線と応力解放の関係

3. 計算順序・計算結果

計算順序は図-4のフローチャートに示す。また、図-5に計算例を示す。この計算法によると、支保工建設後の壁面変位状況の経時変化が概略計算できる。

4. 参考文献

"CAVAN & FRONT マニュアル":P. Egger, "Zum Entwurf von Tunneln mit großem Ausbruchquerschnitt":M. Baudendistel

土盛り高さ(m)	150
作用外力(kg/cm ²)	39
弾性係数(kg/cm ²)	10,000
ポアソン比	0.3
粘着力	10
内部摩擦角	30
単位体積重量	2.6
トンネル断面積(m ²)	58
トンネル掘削半径(mm)	4,250
一環進長(m)	1.5
掘削サイクル(サイクル/日)	3
吹付コンクリート厚(cm)	8
ロックボルトφ×L	14×2,250
鋼支保工	

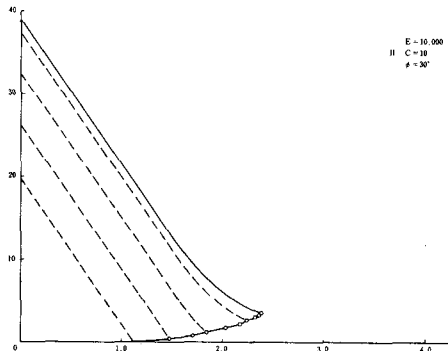


図-5 壁面応力-壁面変位曲線

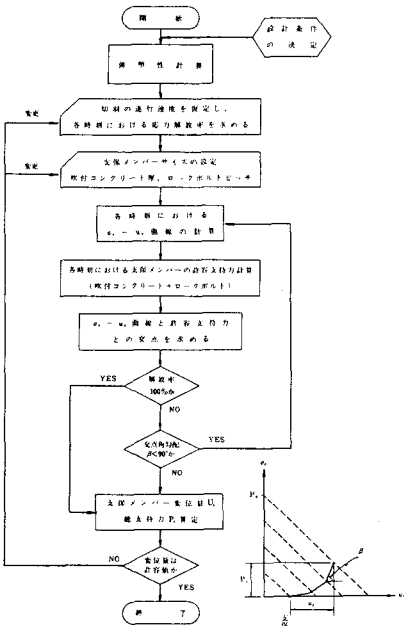


図-4 計算順序