

日本国有鉄道 技研 正会員 工屋 敬  
(株) 構造計画研究所 伊藤 太郎  
○柳沢 成一

## 1. はじめに

NATM (New Austrian Tunnelling Method) 工法とは、地山の有する支持力を十分に活用するという基本理念に基づき、薄肉構造としての吹付コンクリート、ロックボルトの利用による補助覆工を利用して、地山の強度維持及び本覆工への土圧の軽減を計る工法である。筆者らは、NATMにおける地山掘削時の力学的挙動を解明するため、FEMを用いた二次元粘弾塑性フロスラムの開発を行った。このフロスラムの目的として

- (1) トンネル断面及び施工法決定
- (2) 決定した断面及び施工法に対して詳細計算を行うことによるトンネル設計への適用
- (3) 工事に当たって困難が生じた場合の対策として、断面及び施工法の検討

等があげられる。ここでは、筆者らが行った解析事例のうち(2)について、成田空港トンネルの解析を、概略記述してみることにする。

## 2. 解析手法

### 2.1 地山の非線形特性

地山の非線形特性は、日比野・庄子等の提案している破壊接近度を用いて評価した。破壊接近度 $R$ は、

$$R = \min \left( \frac{d_1}{D_1}, \frac{d_2}{D_2} \right) \quad (1)$$

で定義される。(図1参照) この破壊接近度と変形係数 $D$ 及びポアソン比 $\nu$ は、次式の関係にある。

$$\frac{D}{D_0} = R^{\frac{1}{n}} + (1-R) \frac{D_f}{D_0}, \quad \nu = \nu_0 R^{\frac{1}{n}} + (1+R^{\frac{1}{n}}) \nu_f \quad (2)$$

ここに、

$D_0, \nu_0$  : 最も安定した状態における変形係数とポアソン比

$D_f, \nu_f$  : 破壊時における変形係数とポアソン比

$n$  : 岩種により異なる定数

### 2.2 ロックボルトのモデル化

ロックボルトは、ロッド要素(トラス要素)とし、地山とロックボルトの滑りは、結合要素の剛性 $K$ によって表現した。(図2参照)

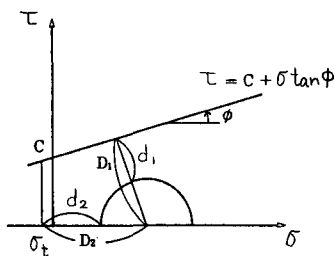


図1 破壊接近度

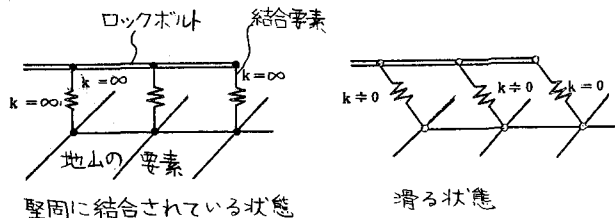


図2 ロックボルト

## 2.3 覆工のモデル化

NATMでは、基本的には地山を1次覆工で安定させ、2次覆工は安全性の増加として考えている。本解析では1次覆工のみをモデル化し、ヒーム要素またはラティス要素（コンクリートの剛性と等価な剛性を持つトラス）で表し、コンクリートの材齢による剛性の変化を考慮した。

## 2.4 三次元的応力解放による影響

現場計測によれば、膨張性地山を除き一般には、クリープひずみよりも切羽の進行に伴う三次元的応力解放によるひずみの方が大きい。このひずみ $\varepsilon$ をクリープ函数的に次式で表した。

$$\varepsilon = \alpha \varepsilon_0 (1 - e^{-\beta t}) \quad (3)$$

ここに、

$\varepsilon_0$  : 切羽通過時のひずみ

$\alpha$  : 粘性倍率

$\beta$  : 時間係数

$t$  : 経過時間

## 3. 解析事例

以下に記述する解析事例に対しての解析条件を表1に、解析流れ図を図3に示す。

### 3.2 成田空港トンネル第8工区

成田空港第8工区では、先づ、断面形状決定のための弾性計算を行い、次に施工法決定のための弾塑性解析を行い、最後に、詳細な粘弾塑性解析を行った。表2にその結果の一覧を示す。

弾性計算で決定した図4に示す断面形状について、サイロット工法と多段ベンチ工法について比較計算を行った。この施工法決定計算は、概略の値をつかむために弾塑性を行った。多段ベンチ工法は、天端沈下量が大きく、ロックボルト軸力も耐力を越えているため、サイロット工法による設計を行うことに決定した。また、この弾塑性計算では、サイロット工法については天端変位が最大となる素振り先行の場合と、覆工応力が最大となる掘削同時覆工の場合との2ケースの計算を行った。実際の変位は両者の中間の値になると考えられ、詳細計算ではそれを裏付ける結果が得られた。詳細計算では、側壁部の変位は0.7cmと小さく、ロックボルトが有効に働いていると思われる。覆工の曲げモーメントは大きい。設計では曲げひびわれの発生は許容し、せん断力に対しせん断耐力が確保でき

表1 解析条件

| トンネル                             |                                       | 成田空港<br>第8工区      | 成田空港<br>第9工区      |
|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------|-------------------|
| 解析条件                             |                                       |                   |                   |
| 地<br>山<br>の<br>条<br>件            | 単位体積重量 $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )   | 1.5~1.9           | 1.5~1.9           |
|                                  | 初期変形係数 $E_0$ (kg/cm <sup>2</sup> )    | 50~300            | 50~400            |
|                                  | 破壊時 $\gamma$ $E_f$ (t)                | 25~60             | 25~80             |
|                                  | 初期ポアソン比 $\nu_0$                       | 0.30~0.45         | 0.35~0.45         |
|                                  | 破壊時 $\gamma$ $\nu_f$                  | 0.45~0.48         | 0.45~0.48         |
|                                  | パラメータ $n$                             | 1.0               | 1.0               |
| 破<br>壊<br>条<br>件                 | 引張強度 $\sigma_t$ (kg/cm <sup>2</sup> ) | 0.035<br>~2.12    | 0.035<br>~1.47    |
|                                  | 粘着力 $C$ (t)                           | 0.1~1.3           | 0.1~1.3           |
|                                  | 摩擦角 $\phi$ (°)                        | 0~30              | 0~35              |
|                                  | 粘性倍率 $\alpha$                         | 1.0               | 1.0               |
| 粘<br>弾<br>性<br>条<br>件            | 時間係数 $\beta$ (1/day)                  | 0.2               | 0.2               |
|                                  |                                       |                   |                   |
| 土被り (m)                          |                                       | 7.0               | 8.2               |
| 覆工厚 (cm)                         |                                       | 20                | 25                |
| コンクリート変形係数 (kg/cm <sup>2</sup> ) |                                       | 20,000<br>150,000 | 20,000<br>150,000 |

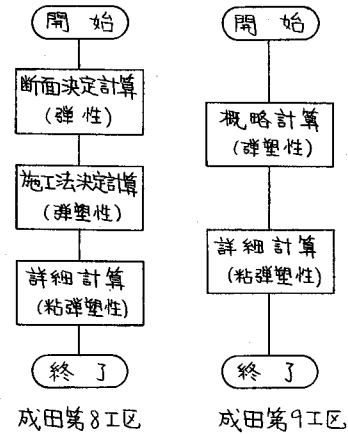


図3 解析流れ図

表2 成田第8工区解析結果

| 計算方法 | 工法    | 計算条件   | 吹付コンクリート最大軸力 (t) |      | 吹付コンクリート最大曲げモーメント (t・m) | ロックボルト最大軸力 (t) | 天端沈下量 (cm) |
|------|-------|--------|------------------|------|-------------------------|----------------|------------|
|      |       |        | 正                | 負    |                         |                |            |
| 工法決定 | サイロット | 素振り先行  | 20.6             | 24.0 | 26.3                    | 11.1           | 28.9       |
|      |       | 掘削同時覆工 | 97.9             | 26.1 | 24.2                    | 9.1            | 7.0        |
|      | 多段ベンチ | 素振り先行  | 24.8             | 12.6 | —                       | 42.5           | 37.8       |
| 詳細   | サイロット | —      | 75.3             | 28.6 | 29.9                    | 29.9           | 18.0       |

ればよいとした。

### 3.2 成田空港トンネル第9工区

成田空港第9工区では、トンネル断面が第8工区に比べて小さいため、サイロット工法よりも経済的な多段ベンチ工法を採用することになった。この場合には、第8工区の解析事例から、天端沈下量が大きくなると予測されるので、天端沈下量の把握が必要である。そのために素掘先行モデル及び掘削同時覆工モデルについて概略計算を行い、その結果をふまえて詳細計算を行った。結果の一覧を表4に示す。

概略計算の結果より、2モデルの変位の中間値は、 $19\text{ cm}$ であり、これは、第8工区値よりも $1\text{ cm}$ 大きい。この程度の変形量は十分許容できると判断した。

詳細計算では、多段ベンチ工法と、変位の低減及び施工の容易性を考慮した1次閉合ベンチ工法についての計算を行った。この結果、天端沈下量は、1次閉合ベンチ工法の方が多段ベンチ工法よりも約13%少なかった。このトンネルの地上近傍に既設構造物があることを考え合わせれば、地中変位を小さくすることが望ましいので、1次閉合による設計を採用することになった。

### 4. おわりに

以上、この二次元粘弾塑性フロタラムを用いたNATMの設計への適用例について紹介した。成田空港トンネルでは、断面、工法の決定とともに、変形の状態、覆工にかかる断面力、ロックボルトの効果的な配置な

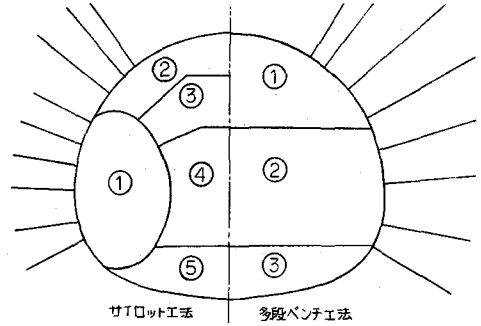


図4 成田第8工区の断面形状

表3 成田第9工区解析結果

| 計算方法 | 工法    | 計算条件   | 吹付コンクリート最大曲げモーメント (t・m) | 最大軸力 (t) |     | 天端沈下量 (cm) |
|------|-------|--------|-------------------------|----------|-----|------------|
|      |       |        |                         | 正        | 負   |            |
| 概略   | 多段ベンチ | 素掘り先行  | 25.3                    | 13.5     | —   | 23.1       |
|      |       | 掘削同時覆工 | 55.9                    | 6.1      | 4.3 | 17.6       |
| 詳細   | 多段ベンチ | —      | 32.5                    | 9.2      | —   | 19.4       |
|      | 1次閉合  | —      | 57.5                    | 8.0      | 3.4 | 18.3       |

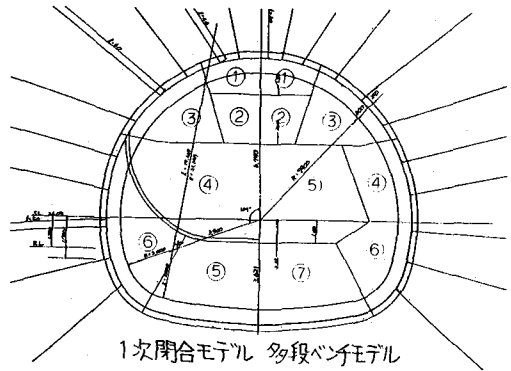


図5 成田第9工区の断面形状

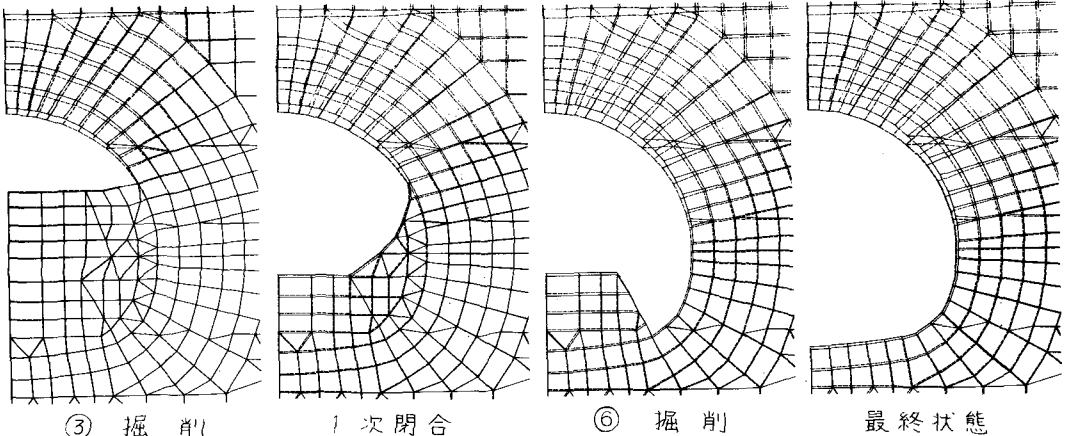


図6 成田第9工区の変形の推移 (1次閉合ベンチ)

どについての解析結果を実施設計に役立てることができた。

今後、NATMの施工は増加する傾向にあり、このプログラムをさらに有効に活用していくために、ゆめゆめは、物性値の評価、解析手法等を解析結果と現場計測値とのフィードバックを通じて、より現実近づけていくよう努力している。

最後に、本研究の全般にゆめゆめ御指導いただいた吉村恒前新幹線建設局局長に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- (1) 谷本、佐々木：岩盤、断尺、破砕帯の変形特性の試料の強度による試みとその検討、鹿島建設技術研究所年報 第22号
- (2) 庄子、田林、谷本、佐々木：有限要素法による地下構造物の非線形解析、同上
- (3) 林、日比野：地下開削による周辺地盤の緩みの進展に関する解析、電力中央研究所報告 No. 67095 1968年
- (4) 吉村、土屋：システムロックボルト設計プログラムの開発 第13回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 1980年
- (5) 土屋、松村、川崎：システムロックボルトの岩盤補強効果に関する基礎的実験 同上