

(株) 熊谷組技術研究所 正会員 藤木 広一

同 上野 正高

1. はじめに

高速輸送時代を迎えた今日、苛酷な地質条件のもとでもトンネルを施工する場合が増え、今後もこの傾向は続くものと思われる。したがってこのような条件下でトンネルを設計・施工するにあたっては、地山の特性を十分に把握することが必要である。ところがこれらの地山特性は多くの場合、非線形性を有し、粘弾性挙動、弾塑性挙動として表現される場合もあるが、それぞれが単独に見られることは少なく、両者が組み合わさった形の粘弾塑性挙動を示すものと思われる。本研究ではトンネル掘削のシミュレーションを行なう場合に粘弾塑性解析を適用するときの考え方と解析方法の概略について説明する。

## 2. トンネル掘削シミュレーションの概念

地山内にトンネルを掘削する場合に、地山の变形・応力再配分が生じる過程は(1)掘削と同時に生じる時空依存性のない变形・応力再配分の過程(2)地山のクリープ特性による变形・応力再配分の過程の2過程であるとして、それぞれ弾塑性解析、粘弾塑性解析を用いてシミュレーションする。図-1は以上のトンネル掘削シミュレーションの概念を示すものである。ここで各掘削段階におけるクリープ変形は、途中で他の掘削段階による弾塑性挙動が生じても、これに関係なく続行するものとする。言い換えれば各掘削段階におけるクリープ変形は、以前の掘削段階におけるクリープ変形を含んだ形であらわれると考える。

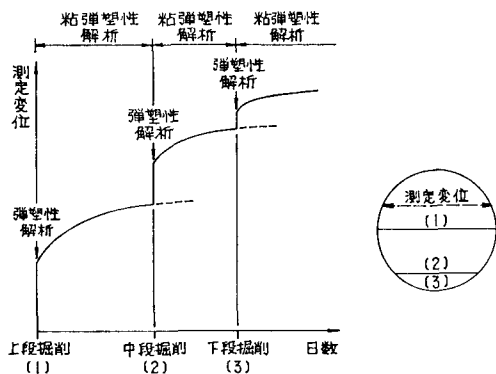


図-1 トンネル掘削シミュレーションの概念図

## 3. 地山材料の力学モデル

地山材料の力学モデルは図-2に示すような一般化Voigtモデルを用いる。歪増分は弾性成分、粘性成分(2次クリープ)、塑性成分、粘性成分(1次クリープ)の和で表わされるものとする。

$$\{\dot{\epsilon}\} = \{\dot{\epsilon}^e\} + \{\dot{\epsilon}^c\} + \{\dot{\epsilon}^p\} + \sum_i \{\dot{\epsilon}^i\} \quad (1)$$

また降伏条件はDrucker-Pragerの降伏条件を用いるものとする。

$$f = \alpha J_1 + \sqrt{J_2'} - k \quad (2)$$

ここに

$$J_1 = \sigma_{ii}, J_2' = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \quad (S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij})$$

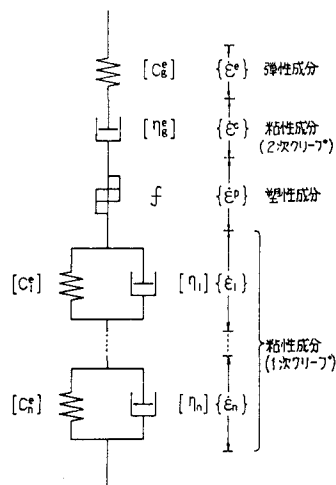


図-2 地山材料の力学モデル

$$\alpha = \frac{\sin \phi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \phi}}, \quad k = \frac{3C \cos \phi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \phi}}, \quad \phi; \text{地山の内部摩擦角}, C; \text{地山の粘着力}$$

#### 4. 粘弾塑性体における応力-歪方程式

粘弾塑性体における応力-歪方程式は(2)式を用いて次式のように表わされる。

$$\{\dot{\sigma}\} = [D_V^p] \{\dot{\epsilon}\} - [D_V^c] \{\dot{A}\} \quad (3)$$

ここに

$$[D_V^c] = [I] - \frac{[D_g^e] \{\partial f / \partial \sigma\} L \partial f / \partial \sigma}{H_V}$$

$$[I]; \text{単位マトリックス}, [D_g^e]; \text{弾性応力-弾性歪マトリックス}, H_V = L \partial f / \partial \sigma [D_g^e] \{\partial f / \partial \sigma\},$$

$$[D_V^p] = [D_V^c] [D_g^e], \{\dot{A}\} = [D_g^e] \left( [\eta_a]^{-1} \{\sigma\} + \sum_i [\eta_i]^{-1} (\{\sigma\} - [D_i^e] \{\epsilon_i\}) \right)$$

特別な場合として、弾塑性問題では  $\{\dot{A}\} = 0$  と考えることができる。また粘弾性問題では  $[D_V^p] = [D_g^e]$ ,  $[D_V^c] = [I]$  となる。

#### 5. 有限要素法による定式化

有限要素法を用いると粘弾塑性問題は(3)式を用いて次のように定式化される。

$$[K] \{\dot{u}\} = \{\dot{P}\} \quad (4)$$

ここに

$$[K] = \int_V [B]^T [D_V^p] [B] dV, [B]; \text{歪-節点変位マトリックス}, \{\dot{P}\} = \{\dot{P}^b\} + \{\dot{P}^a\},$$

$$\{\dot{P}^b\}; \text{外荷重ベクトル速度}, \{\dot{P}^a\} = \int_V [B]^T [D_V^c] \{\dot{A}\} dV$$

#### 6. 粘弾塑性解析プログラム

図-3にトンネル掘削シミュレーション用粘弾塑性解析プログラムのフローチャートを示す。計算は(4)式にもとづき接線係数法を用いる。また時間積分に対しては、2次のRunge-Kutta法を用いる。なお、弾塑性計算を行なう解析ステップでは、みかけの時間を進行させることにより粘弾塑性解析ステップと同じ解析ループを用いて計算を行なう。

#### 7. おすび

本文ではトンネル掘削のシミュレーションを行なう場合に、粘弾塑性解析を適用するときの考え方と解析方法の概略について説明した。本解析方法の検証例については講演会当日に発表する予定である。

— 参考文献 —

「塑性・粘弾性」, 山田嘉昭, 有限要素法の基礎と応用シリーズ6, 培風館

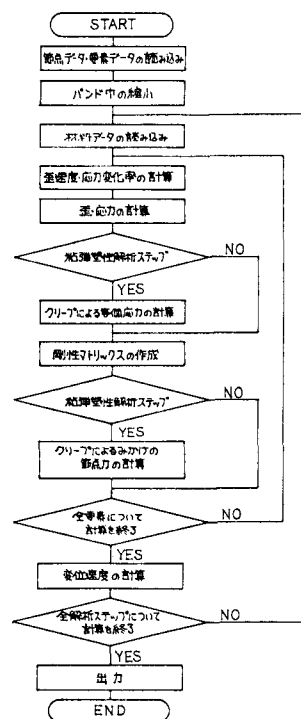


図-3 プログラムのフローチャート