

徳島大学工学部 正員 藤井 清司
徳島大学大学院 学生員 ○篠田 淳二

まえがき トンネル周辺地山にロックボルト支保工を設置した場合、ロックボルト設置後の締め付け力効果やそれが長期のトンネル周辺地山の变形に与える影響を知る目的で有限要素法を用いて解析を行う。地山は時間依存の变形をする粘弾性体とし、降伏条件をみたす塑性域では粘塑性体とする。

解析概要 等方性の三次元線形粘弾性体の特性を図-1に示す一般化Maxwellモデルを仮定し表わすと、その構成方程式は、せん断変形および体積変形成分に関するそれぞれ独立した緩和関数 $G(t)$ 、 $K(t)$ より、次式の記憶積分で表示できる。

$$\sigma_{ij}(t) = \int_0^t 2G(t-\tau) \left[\partial e_{ij}(\tau) / \partial \tau \right] d\tau + \delta_{ij} \int_0^t K(t-\tau) \left[\partial \epsilon_{kk}(\tau) / \partial \tau \right] d\tau \quad (1)$$

ここで、 $e_{ij} = \epsilon_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \epsilon_{kk}$ 、 $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk}$ 、 δ_{ij} : Kronecker delta
緩和関数 $G(t)$ 、 $K(t)$ は熱力学的制約をうけて非常に限定され、Prony級数表示するのが最も一般的である。

$$G(t) = G_0 + \sum_{\alpha=1}^N G_{\alpha} e^{-t/T_{\alpha}}, \quad K(t) = K_0 + \sum_{\alpha=1}^N K_{\alpha} e^{-t/T_{\alpha}} \quad (2) \quad \text{図-1 粘弾性モデル}$$

これらの粘弾性特性はバネ要素とダッシュポット要素の結合した力学的モデルで表示することができ、一般化Maxwellモデルにおいて単位ステップ入力 $\epsilon(t) = \text{const.}$ を与えたときの応答に相当する。(2)を(1)へ代入して時間経過を多数のステップに分割し、各ステップごとに応力は一定と仮定すると、応力-ひずみ関係が簡素化されて非線形問題も弾性問題と同一の手法を適用して解を求めることができる。

また、粘塑性挙動は、図-2に示すモデルを仮定し、その特性を表わす。降伏基準は von Mises の基準を用いて、八面体せん断応力 τ_{oct} が限界値 K_{oct} になると降伏が始まるとする。このときのひずみ速度は次式である。

$$\frac{d\tau_{oct}^p}{dt} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\eta_i} \right) (\tau_{oct} - K_{oct}) - \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{\eta_i} \tau_{oct(i)} \quad (3)$$

τ_{oct}^p : 塑性八面体ひずみ、 E_i : 各バネ定数、 η_i : 各ダッシュポットの粘性係数
これを Prandtl-Reuss の方程式(4)の時間について微分したものに代入して、(5)の粘塑性の構成方程式が得られる。

$$d\epsilon_{ij}^p = (d\tau_{oct}^p / \tau_{oct}) S_{ij} \quad (4)$$

$$\frac{d\epsilon_{ij}^p}{dt} = \left(\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\eta_i} \right) (\tau_{oct} - K_{oct}) - \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{\eta_i} \tau_{oct(i)} \right) \frac{S_{ij}}{\tau_{oct}} \quad (5)$$

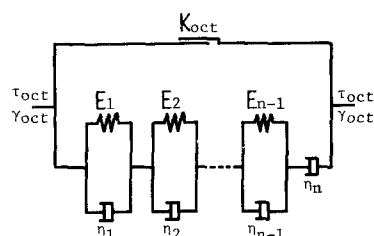


図-2 粘塑性モデル

次に粘弾性-粘塑性解析の概要を述べる。要素 i において、短い時間では粘弾性に関して節点変位 $\{u_i^e\}$ は節点力 $\{F_i^e\}$ と線形関係があり、もし粘塑性変形を生じようならば全変位 $\{u_i^e\}$ は粘弾性変位 $\{u_i^e\}$ と粘塑性変位 $\{u_i^p\}$ の合計である。同様に全節点力 $\{F_i^e\}$ は粘弾性節点力 $\{F_i^e\}$ と粘塑性節点力 $\{F_i^p\}$ の合計による。

$$\{u_i^e\} = \{u_i^e\} - \{u_i^p\}, \quad \{F_i^e\} = \{F_i^e\} - \{F_i^p\} \quad (6)$$

また、線形粘弾性体の剛性方程式は剛性を $[K(t)]$ とし、上式を用いて

$$\{F_i^e\} = \int_0^t [K(t-\tau)] \frac{\partial \{u_i^e\}}{\partial \tau} d\tau = \int_0^t [K(t-\tau)] \frac{\partial \{u_i^e\}}{\partial \tau} d\tau - \int_0^t [K(t-\tau)] \frac{\partial \{u_i^p\}}{\partial \tau} d\tau \quad (7)$$

ところで、塑性化したときの応力-ひずみ関係は非線形となり、これは一義的に求められず、段階的に求める。時間 t_n での解は時間 t_{n-1} の解を前もって求めておき、 $\{F_i^p\}$ が既知であるなにおいて(7)は解くことが可能である。ま

た、応力変化は各ステップの初めに瞬間的かつ弾性的に生じるとし、一つ前のステップの応力より $\{F_i^m\}$ を決定する。各ステップでの応力はそのステップでの $\{u_i^m\}-\{u_i^{m-1}\}$ の関数として得られる。

なお解析モデルの地山材料は重量配合比 1:2:6（水、普通ポルトランドセメント、細骨材）である、材令2週間のモルタルセメントを考え、この材料で40、10、10cmの供試体を作製しクリープ試験を行い、緩和関数および粘塑性に関する定数を求める。その結果を(8)と表-1で示す。

$$\left. \begin{aligned} K(t) &= (3.929 + 3872e^{-t/0.2953} + 3.091e^{-t/97087}) \times 10^4 \\ G(t) &= (3.020 + 2.976e^{-t/0.2953} + 2.376e^{-t/97087}) \times 10^4 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Parameter	Average Value
E_1	$7.27 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$
E_2	$8.59 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$
η_1	$3.15 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{day/cm}^2$
η_2	$60.03 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{day/cm}^2$
η_3	$156.25 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{day/cm}^2$

計算結果と考察 図-3に土圧係数 $K = 0.5$ 、 $K = 0.1$ における初期値、12時間後、60時間後のトンネル周辺地山の変形を示す。

トンネル断面は地山圧荷重載荷によりその面積を縮小するとともに、土圧係数 K の大きさによりその変形過程が異なっていることがわかる。すなわち、 $K = 0.1$ の場合、側壁が外側へ張り出し、トンネル断面が偏平な精円状になっていく。 $K = 0.5$ の場合には、頂部の変位が大きく、隅角部が鋭角となり下方へ移動する。 $K = 0.35$ はこの中間に位置している。いずれも隅角部で応力集中が起こることは確認できる。

最大変位は $K = 0.5$ で、初期に頂部中央が、ついで時間の経過とともにトンネル中心水平線より上方 30° の方向に移り、 $K = 0.1$ では頂部中央、底部盤ぶくれが大きい。これは破壊へ発展するであろう。

初期ロックボルト効果として、 $K = 0.5$ の主ひずみの初期値を表わした図-4により明らかである。ただ、ロックボルトの有無にかかわらず $K = 0.1$ では頂部中央のトンネル接線方向に引張りひずみを生じている。また、時間経過後のロックボルト効果は、頂部がロックボルトの締め付け力で一休構造をなして動くために、頂部から側壁部の変形が拘束されて水平方向の変形が小さくなり、土圧係数 K が大きくなったと同じような効果が現われる。

*参考文献 昭和49、50年度土木学会中部支部学術講演集
藤井清司「トンネルロックボルト……その1,その2」

表-1 粘塑性定数 (day)

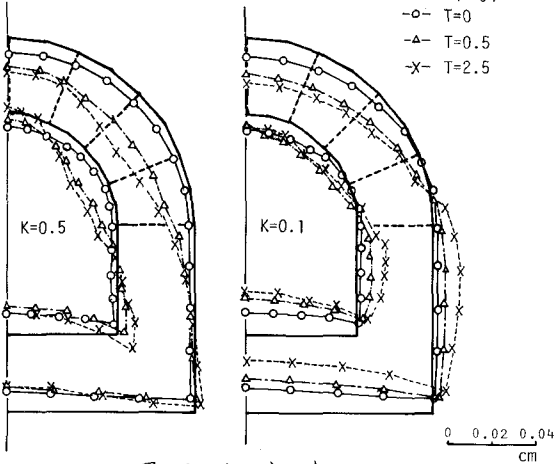


図-3 トンネル変形図

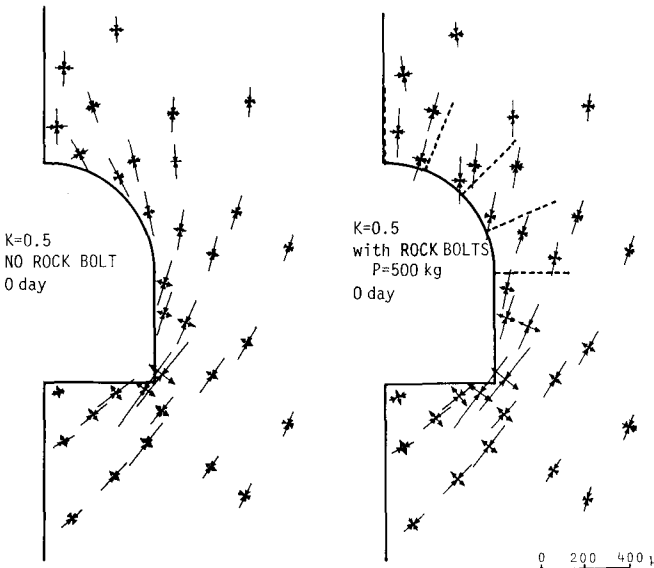


図-4 地山内主ひずみ図