

3 要素 Maxwell 形モデルを用いたトンネル掘削に伴う周辺地山の挙動

佐賀大学 ○ 学生員 石 垣 純 一
佐賀大学 正 員 石 橋 孝 治

1. はじめに

トンネルの計測は、計測機器の設置、切羽作業の進捗に関連して掘削の数日後から開始される。したがって、掘削直後から計測開始までの間の挙動は不明である。岩石を含めて多くの材料では、クリープ現象に代表される時間依存性の挙動を示す。そこで、本研究では3要素形 Maxwell モデルとして、Maxwell モデルと Spring を並列に連結したレオロジーモデル（以後、Zener モデルと呼ぶ）を用いて掘削直後からの変位挙動が捕捉できる有限要素法解析プログラムを開発した。

2. レオロジーモデルの適用

岩石のクリープを表現するために様々なレオロジーモデルが考案されてきた。図-1 に示す Zener モデルもその一つである。このモデルに時刻 t_1 から t_2 まで応力を一定値 σ_0 に保った後、再び0に戻す載荷を行った場合、図-2 のようなひずみ時間応答を示す。このモデルの応力とひずみの関係は次式で与えられる。

$$\sigma + \frac{\eta}{\gamma_2} \frac{d\sigma}{dt} = \gamma_1 \left\{ \varepsilon + \eta \left(\frac{1}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_2} \right) \frac{d\varepsilon}{dt} \right\} \quad \cdots (1)$$

ここで、 γ_1 、 γ_2 は Spring の弾性率であり、 η は Dashpot の粘性率である。(1) 式は応力とひずみの関係を表す線形微分方程式 (Zener の方程式) と呼ばれる。

また、3要素 Voigt モデル形として Spring と Voigt モデルを直列に連結したレオロジーモデル（以後、Boltzmann モデルと呼ぶ）を図-3 に示す。このモデルは、Zener モデルと力学的に等価であり既存の粘弾性解析プログラムはレオロジーモデルとしてこのモデルを採用している。Zener モデルでは、非粘性の変形挙動を表す Spring と、粘性の変形挙動を表す Maxwell モデルとが従属しているため、粘性の変形挙動に対して2つの Spring が関係してくるが、Boltzmann モデルでは、非粘性の変形挙動を表す Spring と粘性の変形挙動を表す Voigt モデルとがそれぞれ独立しているため、粘性の変形挙動に対しては、Voigt モデルとなり、1つの Spring しか関係していない。そこで、本研究では、岩石の粘性変形挙動を表現するには、Zener モデルの方が適していると考え有限要素法への適用を試みた。

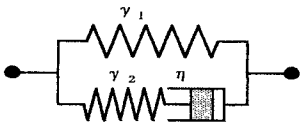


図-1 Zener モデル

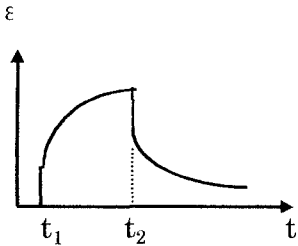


図-2 ひずみ-時間線図

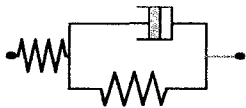


図-3 Boltzmann モデル

表-1 入力パラメータ

γ_1	10000tf/m ²
γ_2	2500tf/m ²
η	10000tf/m ² ・day
ポアソン比	0.4
単位体積重量	2.25tf/m ³

3. 解析手順

本解析は、弾性解析に粘弾性解析を加えたものである。解析の一例として、図-4 に示すように土被り 19m、トンネル半径 5m の円形素掘りトンネル、および掘削方法は全断面掘削のケースについて行った。表-1 に解析に使用したパラメータを示す。

本解析で用いた FEM プログラムフローを図-5 に示す

解析の第 1 段階として掘削前の地山の状態を把握するために初期地圧の計算を行う。次に、掘削面に相当する要素節点上で初期応力成分から掘削相当外力を計算し、各節点に外力として作用させる。この操作により、掘削による応力解放の物理的意味を満足させることができる。

以上の過程により掘削前の構造系から、掘削後の構造系へと移行したことになる。

粘弾性解析は、掘削により得られた応力を初期応力としてクリープによるひずみ増分を計算し、このクリープひずみ増分を用いてこのひずみを拘束するのに必要な節点力を求める。この節点力を各節点に作用させる。すると、クリープによる変位増分と、応力増分が求められ、新しい応力分布と変位増分が得られる。これらの値を用いて同じ方法で次の時間増分に対する計算を行う。

4. 結果と考察

解析によって得られた変位の経日変化を図-6 に示す。この結果より変位量が掘削直後から捕捉されていることが分かる。そして、地表面の沈下量と天端沈下量とを比較すると変位量の曲線は同様の形で収束している。

5. まとめ

本研究は、トンネル支保工の施工時期に関する研究の一つである。今回、Zener モデルを用いた粘弾性解析プログラムにより掘削直後からの変位量を経時的に捕捉することが可能となった。今後は、このプログラムに支保部材を表す要素を加え、支保工を施工した時の変位量を捕捉することにより支保工の設計とその施工時期に関する研究を進めていく所存である。

6. 参考文献

- 1) C.Zener :Elasticity and Anelasticity of Metals,The Univ.of Chicago Press,1948
- 2) 山田嘉昭 : 塑性・粘弾性, 培風館, 1980. 12
- 3) 土木学会 : トンネルにおける調査計測の評価と利用, 1987. 9

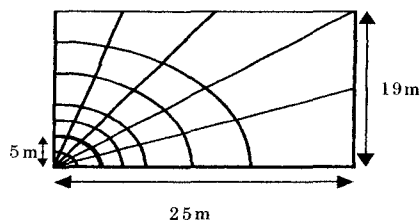


図-4 解析モデル

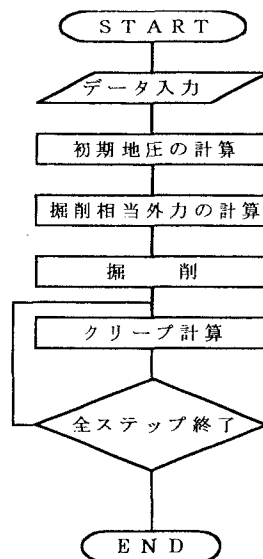


図-5 FEM プログラムフロー

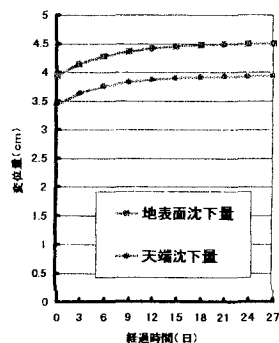


図 -6 変位の経日変化