

粘性を考慮したモデル解析による変状地層形成の要因分析

○東北大学工学部 学生員 金澤 秀太
 東北大学大学院工学研究科 正 員 京谷 孝史
 東北大学大学院工学研究科 正 員 松原 成志朗

1. はじめに

地層が形成された時期は数万年前まで遡る。地層に変状が観察された際に、その変状が形成されるまでの過程を知るためには、堆積物を分析することや断面の形状から判断することが主な方法となっている。一方で、地層の変状を計算力学的に解析したという例は少ない。その原因としては、地層を形成する岩石の力学挙動が複雑であることや、力学挙動を再現するために数多くの研究が行われたきたにも関わらず、岩石の材料パラメータが不確定であること、その他、地層の変状がいつ起きたものなのか、さらに変状が起きた当時の岩石の物性を知ることさえ困難であることなどが挙げられる。本研究ではこのような背景を考慮し、粘弾性・粘塑性複合モデルを用いて地層の変状を再現すること、およびその要因を分類することを試みる。しかし、岩石の弾性や粘性特性を精確に再現する材料パラメータを求めることは困難であるため、本研究では実材料の物性値を求めることを目的とはしない。具体的には、作成した変状地層モデルの下部から強制変位が与えられるときに、負荷速度に依存して地層が粘性的、または塑性的に変状する様子の再現を試みる。つまり変状が粘性的であるか塑性的であるかの原因となる物性値、およびその強制変位の速度に関してパラメータスタディーを行う。

2. 粘弾性・粘塑性モデル

本研究で構築する変状地層の粘弾性・粘塑性複合構成則について述べる。当該モデルは、微小変形理論に基づいて、全ひずみ ε の粘弾性ひずみ ε^{ve} と粘塑性ひずみ ε^{vp} への加算分解を基軸としている。粘弾性ひずみ ε^{ve} に対しては一般化 Maxwell 粘弾性モデルを採用し、粘塑性ひずみ ε^{vp} に対しては粘塑性モデルを採用する。一般化 Maxwell モデルは図-1 に示すような、並列に接続された N^{ve} 個の Maxwell モデルと 1 つのバネ要素(純弾性要素) から構成される。Maxwell 要素の個数が多いほど、複数の緩和時間を考慮することが可能であり、複雑な緩和挙動だけでなく、Maxwell モデル

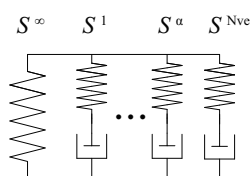


図-1 一般化 Maxwell モデル

では不可能な様々なクリープ挙動の予測精度を向上させることができる。ここで、 α 番目の Maxwell 要素の応力に関する微分方程式は次式で表される。

$$2\gamma^\alpha G \mathbf{I}^{\text{dev}} : \dot{\varepsilon}^{\text{ve}} = \dot{s}_\alpha + \frac{1}{\tau^\alpha} \mathbf{I} : s_\alpha, \quad \tau^\alpha \mathbf{I} = \frac{\eta^\alpha}{2\gamma^\alpha G} \quad (1)$$

ここで、 G はせん断弾性係数、 η^α は粘性係数、 γ^α はモデル全体のバネ剛性の和と各バネの剛性に対する比である。 s_α は偏差応力、 $\mathbf{I}^{\text{dev}}$ は偏差成分を抽出する四階のテンソルであり、四階の単位テンソル $\mathbf{I}_{(4)}$ および二階の単位テンソル $\mathbf{I}_{(2)}$ を用いて以下の式で表せる。

$$\mathbf{I}^{\text{dev}} = \left(\mathbf{I}_{(4)} - \frac{1}{3} \mathbf{I}_{(2)} \otimes \mathbf{I}_{(2)} \right) \quad (2)$$

式 (1) から、粘弾性モデルにおける偏差応力が次式のように表せる。

$$s_\alpha = \int_{-\infty}^t 2\gamma^\alpha G \mathbf{I}^{\text{dev}} : \frac{d\varepsilon^{\text{ve}}}{ds} \exp\left(-\frac{s-t}{\tau^\alpha}\right) ds \quad (3)$$

一方で、粘塑性モデルについては、Perzyna 型 J2-Mises の粘塑性モデルを用いた。このモデルでは、材料が降伏後に粘塑性の効果が発揮され、その挙動は時間依存性を持つ。まず、Von-Mises の降伏関数 f^{vp} は偏差応力 s 、硬化駆動力 q および降伏応力 $\bar{\sigma}_Y^0$ を用いて次式で定義される。

$$f^{\text{vp}}(s, q) = \sqrt{\frac{3}{2}} s : s + q - \bar{\sigma}_Y^0 \quad (4)$$

なお、硬化駆動力 q は次式で定義する。

$$q = -H^{\text{iso}} \xi - R_\infty [1 - \exp(-\beta \xi)] \quad (5)$$

ここで、 H^{iso} 、 R_∞ および β は等方硬化に関する材料パラメータである。また、 ξ は硬化変数であり、その速度形は粘塑性乗数 $\dot{\gamma}^{\text{vp}}$ を用いて、次式で得られる。

$$\dot{\xi} - \dot{\gamma}^{\text{vp}} = 0 \quad (6)$$

さらに、粘塑性乗数 $\dot{\gamma}^{\text{vp}}$ の発展則には次式の Ree-Eyring 則を採用する。

$$\dot{\gamma}^{\text{vp}} - \frac{\dot{\gamma}_0^{\text{vp}}}{\eta^{\text{vp}}} \sinh\left\{ \frac{f^{\text{vp}}}{\Sigma} \right\} = 0 \quad (7)$$

ここで、 $\dot{\gamma}_0^{\text{vp}}$ 、 η^{vp} 、 Σ はそれぞれ初期粘塑性乗数、粘塑性粘性係数、引き応力である。最後に、式 (4) より流れ則は次式で与えられる。

$$\dot{\varepsilon}^{\text{vp}} - \dot{\gamma}^{\text{vp}} \mathbf{N} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{N} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{s}{\|s\|} \quad (8)$$

3. 地層解析モデル

本研究では図-2に示すような地層の解析モデルとして設定した。

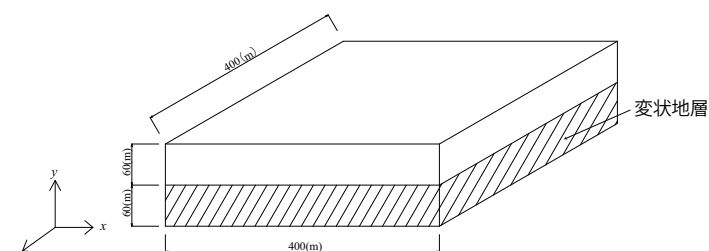


図-2 解析モデル

なお、モデルの下層に強制変位が加わった際の下層の変状を再現することを目的とするが、変位と力が線形関係にあると仮定し、モデル下層に分布荷重を与える境界条件を設定した。

4. 解析結果例

本研究では、強制変位の速度と地層変状の関係性についてパラメータスタディを行うが、解析では全載荷時間 t を入力値とする一方で、変状地層の要因は、緩和時間 τ^* との比である緩和時間比 T' を用いて分析を行う。

$$T' = \log_{10} \left(\frac{t}{\tau^*} \right) \quad (9)$$

緩和時間比 T' を変化させた際の応力ひずみ曲線を図-3に示す。

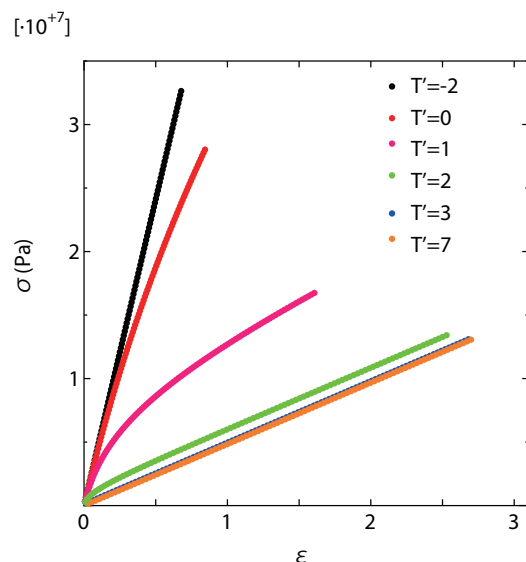


図-3 応力ひずみ曲線

$T' = 7$ のケースにおける、変形状態および Mises 応力分布を図-4に示す。

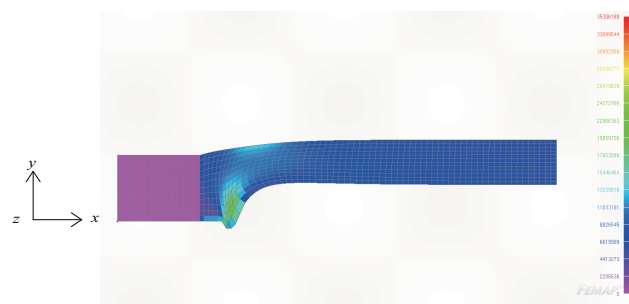


図-4 解析結果例

緩和時間比と最終応力の関係を図-5に示す。

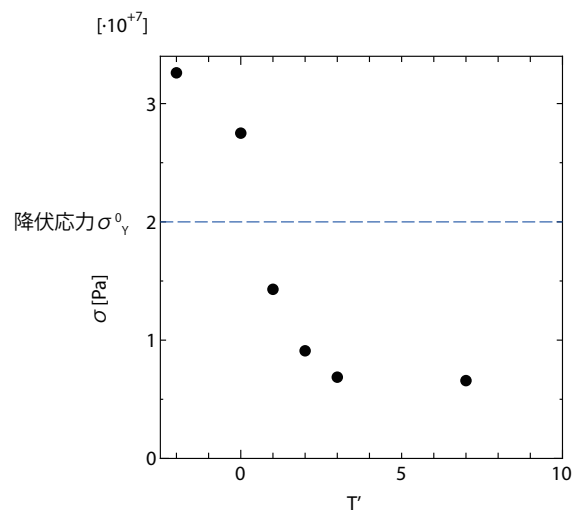


図-5 最終応力図

5. 結論

本研究の結果、地層の粘性的性質が強い場合、緩和時間に対して、10倍以上の時間をかけて負荷が行われた場合は、地層が粘性的に撓曲するような変状を示し、それより早い負荷では塑性的なせん断破壊をすることが分かった。一方で、地層の弾性的性質が強い場合は、長い時間をかけて負荷が行われた場合でも、材料はわずかなひずみレベルで降伏応力に達し、地層の変状は撓曲のような変状は示さなかった。

参考文献

- 1) R.D. Lama, V.S. Vutukuri : HANDBOOK ON MECHANICAL PROPERTIES OF ROCKS -Testing Techniques and Result- Volume 3.