

III-A 330

5要素の粘弾性モデルを用いた堆積軟岩のクリープ変形の検討

東急建設技術研究所 正会員 松本正士
 東京大学 工学部 正会員 龍岡文夫

1. はじめに

著者等は、堆積軟岩の基本的なレオロジー特性を把握するため排水三軸クリープ試験を行い、線形粘弾性モデルの適用を試みた¹⁾。今回は5つの要素で構成される粘弾性モデルについて検討した。

2. 試験装置および試験方法²⁾

軸荷重はデッドウェイトとてこを用い、拘束圧はステップモータを用いた増圧器により加えている。供試体の変位は非接触型変位計を直接供試体に取り付け測定した。

試料は、神奈川県相模原大地西部の第三紀上総層の堆積軟岩(土丹)をブロック採取して用いた。供試体は直径約5cm、高さ約10cmに整形し、水浸した状態で5日間以上真空脱気を施し、飽和化を図った。供試体の上下端面にはポーラストーンおよびろ紙を、側面にはろ紙を設置した。

実験は196kPaの背圧のもと、 $\sigma' = 394\text{kPa}$ まで供試体を等方圧密した後、8kPa/分の低速度で偏差応力 q を加え、排水条件で開始した。 $q=1.3 \sim 4.3\text{MPa}$ の5段階で3日間以上载荷した。なお、当該試料の三軸圧縮強度 q_{max} は、約4.5~6.0MPaであった。

3. 試験結果

内部および外部で計測した軸ひずみと q の関係を図-1に示す。各载荷ステップで発生する軸ひずみは、内部計測と比較して外部計測の方が大きく、供試体端面のベディングエラーの影響が見られる。特に、 $q=3.5\text{MPa}$ 以上でクリープひずみは q の増加にともない増加している。

4. レオロジーモデルの適用

土の一般的なレオロジーモデルは、図-2(a)に示すように、非粘性の変形挙動を支配する弾塑性体 $EP1$ と $EP2$ 及び粘性の変形を支配する粘弾塑性体 v で表現される。今回、まず3要素で構成される線形モデル(図-2(b))に単純化してパラメータを求め、次に解析値と実験値がより適合するようモデルを3要素から5要素(図-2(c))に拡張する。3要素モデルのクリープひずみは(1)式で表わされる。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{E}} - \left(\frac{\sigma}{\bar{E}} - \varepsilon_0 \right) \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t \right) \quad \text{--- (1)}$$

ここで、 ε : 全ひずみ ε_0 : クリープ応力に達した時のひずみ、 σ : クリープ応力

(MPa)、 E_1 、 E_0 : 線形モデルの変形係数(MPa)、 \bar{E} : クリープ変形が完了した時の変形係数(MPa) ($\bar{E} = 1/(1/E_0 + 1/E_1)$) --- (2)、

η_1 : 線形ダッシュポットの粘度(1/(MPa・分))

(1)式を t について解くと次式を得る。

$$\ln\left(\frac{\sigma/\bar{E} - \varepsilon}{\sigma/\bar{E} - \varepsilon_0} \right) = -\frac{E_1}{\eta_1} t \quad \text{--- (3)}$$

図-1から载荷ステップごとの E_0 と ε_0 を求め、(3)式の E_1 および η_1 を線形と仮定して、(3)式を直線近似できるように \bar{E} を試行的に求める。(2)式より E_1 を求め、図-3の勾配から η_1 を最終的に得る。求めた3要素のモデルのパラメータを表-1に示す(3要素モデル1)。今回は最終载荷ステップ5のクリープ挙動について検討した。

一方、実験では最終的なクリープ変形を求める事が困難なため、クリープ変形量の最終値 σ/\bar{E} だけを(4)式的双曲線近似により便宜的に求め¹⁾、これを実測データとして解析値と比較した。

$$\frac{t}{\varepsilon - \varepsilon_0} = \frac{1}{F} + \frac{t}{(\sigma/\bar{E} - \varepsilon_0)} \quad \text{--- (4)}$$

ここで、 t : 载荷完了からの時間(分) ε_0 : 载荷完了時のひずみ、 F : 時間~ひずみ線図におけるクリープ初期の接線勾配、 σ/\bar{E} : 最終的なひずみ。

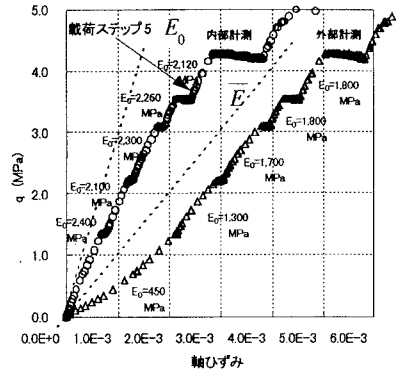


図-1 軸ひずみと q

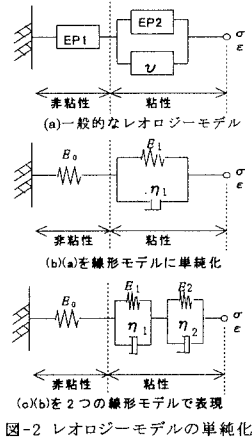


図-2 レオロジーモデルの単純化

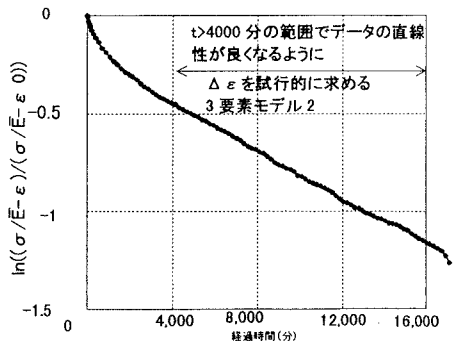


図-3 時間とひずみ($\Delta \varepsilon$ をこれにより算定)

実測データと3要素モデル1による解析の比較を、図-4に示す。解析値と実測値には差が認められ、実験結果をより忠実にシミュレーションするため、3要素モデルにバネとダッシュポットを加えた5要素モデルを用いて検討を行う。これは3要素モデルではできなかったクリープ初期の変形を表現するため、(3)式を2つの線形モデルの重ね合せとしたものである。

パラメータは以下の手順で算定した。

- (1) 3要素モデル1の σ/\bar{E} を $(\sigma/\bar{E}-\Delta\varepsilon)$ に置換えて、図-5の曲線①のように $t>4000$ 分 でデータをフィットするように $\Delta\varepsilon$ と E_1/η_1 を求める(3要素モデル2)。 E_1/η_1 は3要素モデル1の値とは異なる。
- (2) E_1/η_1 は $\ln((\sigma/\bar{E}-\varepsilon(\text{測定値})) / ((\sigma/\bar{E}-\Delta\varepsilon)-\varepsilon_0))$ と t の関係が $t>4000$ 分 で直線になるように図-3と同様に求める。
 $(\sigma/\bar{E}-\varepsilon_a) / ((\sigma/\bar{E}-\Delta\varepsilon)-\varepsilon_0) = \exp(-E_1/\eta_1 \times t)$ ——— ①
- (3) 次に曲線①の ε_a を $\varepsilon_b = \varepsilon_a - \Delta\varepsilon$ 又は $\varepsilon_a = \varepsilon_b + \Delta\varepsilon$ に置換えると、曲線②が得られる。
 $((\sigma/\bar{E}-\Delta\varepsilon)-\varepsilon_b) / ((\sigma/\bar{E}-\Delta\varepsilon)-\varepsilon_0) = \exp(-E_1/\eta_1 \times t)$ ——— ②

- (4) $E_2 = \sigma/\Delta\varepsilon$ である。
- (5) $\varepsilon_c = \varepsilon(\text{測定値}) - \varepsilon_b$ と t の関係を求める(図-6)。
 $\ln((\sigma/E_2 - \varepsilon_c) / (\sigma/E_2))$ と t を直接フィッティングして E_2/η_2 を求める。
 $(\sigma/E_2 - \varepsilon_c) / (\sigma/E_2) = \exp(-E_2/\eta_2)$ ——— ③

- (6) 最終的に5要素モデルによるひずみは次式で与えられる。
 $\varepsilon = \varepsilon_b + \varepsilon_c$
 $\varepsilon_b = (\sigma/\bar{E} - \Delta\varepsilon) - (\sigma/\bar{E} - \Delta\varepsilon - \varepsilon_0) \exp(-E_1/\eta_1 \times t)$
 $\varepsilon_c = \sigma/E_2 \times \{1 - \exp(-E_2/\eta_2 \times t)\}$

5要素モデルのパラメータを表-2に示す。5要素モデルによる解析と実測値の比較を図-7に示す。3要素モデル1も併せて示しているが、3要素モデル1と比較して5要素モデルは実測結果を良く表しており、当該軟岩では5要素モデルの方が適しているようである。

4. 結論

堆積軟岩の排水三軸クリープ試験を行い、5要素の粘弾性モデルを用いたシミュレーションを行った。その結果、3要素モデルを用いた場合より5要素の方が実験結果をうまく表現できた。今後とも、堆積軟岩のレオロジーモデルについて検討を進めていきたい。

5. 参考文献

- 1) 松本正士、龍岡文夫: 堆積軟岩のクリープ挙動における粘弾性モデルの適用、第31回地盤工学研究発表会、1996

表-1 3要素モデル1のパラメータ

載荷ステップ	q (MPa)	E0 (MPa)	E1 (MPa)	η_1 (1/MPa・分)
ステップ5	4.3	2,120	2,330	3.0×10^7

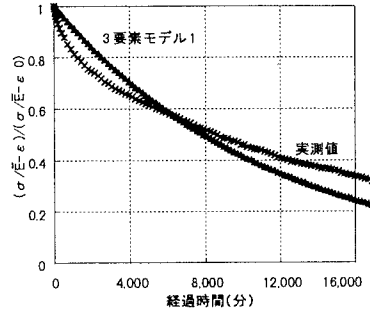


図-4 線形モデルと実測値(3要素モデル1)

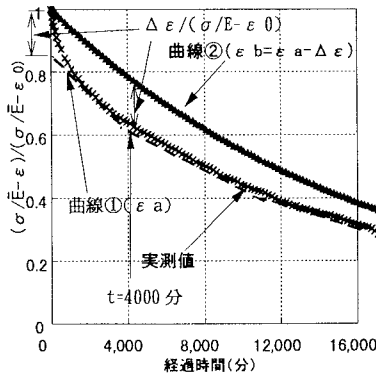


図-5 5要素モデルの求め方

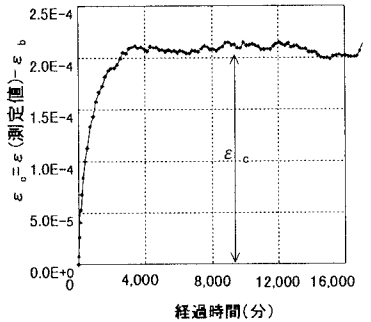


図-6 ε_c と時間

表-2 5要素モデルのパラメータ

載荷ステップ	q (MPa)	E0 (MPa)	E1 (MPa)	η_1 (1/MPa・分)	E2 (MPa)	η_2 (1/MPa・分)
ステップ5	4.3	2,120	2,448	4.1×10^7	21400	1.3×10^7

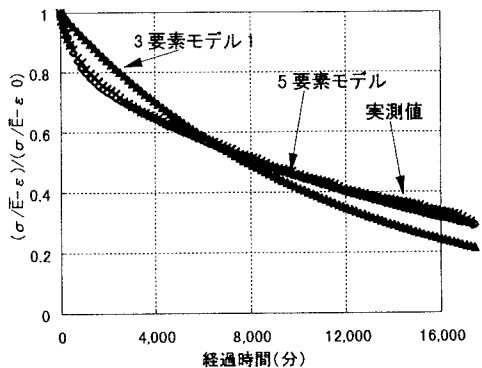


図-7 線形モデルと実測値 (3要素モデル1と5要素モデル)