

堆積軟岩の温度・クリープ特性のモデル化

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○西村友宏 栗本悠平 蔭山星 熊勇林
名古屋工業大学 正会員 張鋒

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の処理方法として、地層処分は各国で注目されているが、解決しなければならない問題が少なくない。天然バリアである堆積軟岩に地層処分を実施する場合、高レベル放射性廃棄物が長期に渡って大量の熱エネルギーを放出するため、岩盤の長期安定性を脅かす可能性がある懸念されている。一方、高温環境下における堆積軟岩の研究^{1),2)}は多く行われているものの、十分とは言えず、定量的に評価できる熱弾粘塑性構成式の早期確立が望まれている。本稿では、堆積軟岩である大谷石（田下石）の三軸試験結果³⁾を用いて、熱弾粘塑性構成式⁴⁾の適用性を示す。

2. 試験概要³⁾

本研究で用いる大谷石（田下石）は、多孔質凝灰岩に部類される自然堆積軟岩である。栃木県宇都宮市大谷町の採掘場より採取されたブロックを、H100mm × φ50mm の円柱形に整形し、飽和化(B 値=0.96 以上)を行った。これらを用いて、4種類の異なる温度環境下における、三軸圧縮試験と三軸クリープ試験を実施する。全ての試験において、せん断時のひずみ速度は0.002%/min.（応力制御の場合は0.05kN/min.）に固定し、上下端排水条件とした。また、三軸クリープ試験の際に必要なクリープ応力は、各拘束圧における80℃の三軸圧縮試験より得られた最大軸差応力の95%に固定した。

3. 温度を考慮した軟岩の熱弾粘塑性構成式

堆積軟岩の温度特性に関する実験結果に基づいて、従来の弾粘塑性構成式⁵⁾をベースにして、温度変化に起因する等価応力の概念を導入することにより、新しい熱弾粘塑性構成式⁴⁾を提案する。

参照温度 θ_0 から θ までの温度変化による地盤材料の体積ひずみは次式で求められる。

$$\varepsilon_v^{\theta} = 3\alpha_T(\theta - \theta_0) \Rightarrow \dot{\varepsilon}_v^{\theta} = 3\alpha_T\dot{\theta} \Rightarrow \dot{\varepsilon}_{ij}^{\theta} = \alpha_T\dot{\theta}\delta_{ij} \quad (1)$$

ここに、 α_T は材料の線膨張率である。また、温度変化による地盤材料の変形特性を評価するため、温度変化に起因する等価応力の概念を導入する。すなわち、この等価応力により発生した弾性体積ひずみが温度

変化による材料の弾性ひずみに等しくなるように次式により表される。

$$\tilde{t}_N = t_N + 3K\alpha_T(\theta - \theta_0) \quad (2)$$

ここに \tilde{t}_N は、実際の応力 t_N の状態温度 θ で温度変化 $(\theta - \theta_0)$ を受ける時の等価応力である。

温度の影響を考慮できる塑性ポテンシャルは次式で定義することができる。

$$f(t_{ij}, \varepsilon_{ij}^p, \theta) = \ln\left(\frac{t_N}{t_{N0}}\right) + \xi(X) - \left[\varepsilon_{ij}^p - \frac{\rho}{1+e_0}\right] / C_p = 0 \quad (3)$$

$$\text{ただし、 } f_{\sigma}(t_{ij}) = \ln(t_N / t_{N0}) + \xi(X) \quad (4)$$

全ひずみは、応力変化によるものと温度変化によるものの和で表す。

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p, \quad \dot{\varepsilon}_{ij}^e = \dot{\varepsilon}_{ij}^{e\sigma} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{\theta} \quad (5)$$

ここで、 $\dot{\varepsilon}_{ij}^{e\sigma}$ は応力変化による弾性ひずみである。適合条件は次式で表される。

$$\dot{f} = 0 \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\sigma}_{ij} - \frac{1}{C_p} \left[\dot{\varepsilon}_{ij}^p - \frac{\dot{\rho}}{1+e_0} \right] = 0 \quad (6)$$

状態変数 ρ の発展則 $\dot{\rho}$ を応力状態、時間および温度の関数として次式により規定する。

$$\frac{\dot{\rho}}{1+e_0} = -\Lambda \frac{G(\rho, t)}{\tilde{t}_N} + h(t) = -\Lambda \frac{G(\rho, t)}{t_N + 3K\alpha_T(\theta - \theta_0)} + h(t) \quad (7)$$

$$h(t) = \dot{\varepsilon}_v^0 [1+t/t_1]^{\alpha} \quad (8)$$

$$G(\rho, t) = a \cdot \rho \cdot \rho^{C_n \ln(1+t/t_1)} \quad (9)$$

$\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ は関連流れ則により、次式で定義する。

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial t_{ij}} \quad (10)$$

式(7)と式(10)を適合条件の式(6)に代入すると、非負変数 Λ が次式で表されることになる。

$$\Lambda = \frac{\dot{f}_{\sigma} + h(t) / C_p}{h_0^p / C_p} \quad (11)$$

$$h_0^p = \frac{\partial f}{\partial t_{kk}} + \frac{G(\rho, t)}{t_N + 3K\alpha_T(\theta - \theta_0)} \quad (12)$$

また、純粋クリープの場合は、

$$\dot{f}_{\sigma} = 0 \Rightarrow \Lambda = h(t) / h_0^p \quad (13)$$

以上の式展開により、温度効果を考慮するために、新たに導入した構成式のパラメータは線膨張率 α_T のみであることがわかる。

4. パラメータ

表1に、本研究室が提案する熱弾粘塑性構成式に用

いるパラメータを示す。本構成式は異なる拘束圧ごとに、過圧密比 OCR と限界状態の応力比 $R_{CS}(=\sigma'_a / \sigma'_r)$ を与える必要がある。また、下線で示した値は三軸圧縮試験、三軸クリープ試験、物理試験より決定した。

表1 パラメーター一覧

| | | |
|----------------|---|-----------------------|
| 物理特性 | 有効拘束圧 σ'_r (MPa) | <u>0.5(1.0)</u> |
| | 過圧密比 OCR | <u>40(20)</u> |
| | 線膨張率 α_t (1/K) | -2.5×10^{-5} |
| | 参考間隙比 e_0 | <u>0.5</u> |
| 材料パラメータ | ヤング率 E (MPa) | <u>1000.0</u> |
| | ポアソン比 ν | <u>0.12</u> |
| | 限界状態の応力比 $R_{CS}(=\sigma'_a / \sigma'_r)$ | <u>6.9(6.0)</u> |
| | 塑性剛性 $E_p(=\lambda - \kappa)$ | <u>0.015</u> |
| | ポテンシャル形状パラメータ β | 1.1 |
| | 時間依存性パラメータ α | <u>0.5</u> |
| | 時間依存性パラメータ C_n | 0.025 |
| 過圧密消散パラメータ a | 3000 | |

5. 熱弾粘塑性構成式の適用性

図1,2に、三軸圧縮試験の実験・解析結果の比較を示す。これより、堆積軟岩特有の力学挙動であるひずみ軟化やダイレイタンスー特性を精度よく表現できているほか、同一のパラメータを用いて、異なる温度・拘束圧の挙動を表現できていることが確認できる。

図3,4に、三軸クリープ試験の実験・解析結果の比較を示す。これより、温度によるクリープ破壊時間への影響を概ね表現できていることが確認できる。

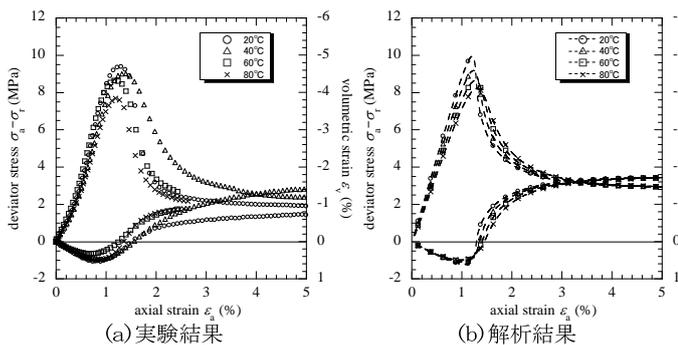


図1 三軸圧縮試験(有効拘束圧0.5MPa)

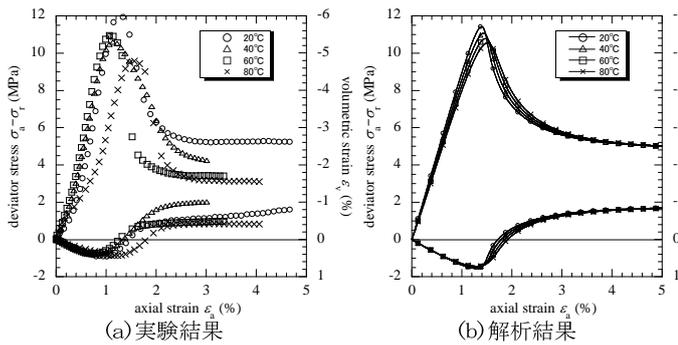


図2 三軸圧縮試験(有効拘束圧1.0MPa)

6. まとめ

本稿では、実験結果に基づき、堆積軟岩の力学特性、特に、ひずみ軟化、ダイレイタンスー特性、拘束圧・時間・温度依存性をモデル化した。提案する構成式の特徴として次の項目が挙げられる。

- ・構成式に用いられるパラメータは比較的少なく、室内試験により簡単に求められる。
- ・中間主応力の影響を考慮するため、構成式はすべて修正応力 t_{ij} 空間内で展開している。
- ・温度効果を説明するために導入した材料パラメータは線膨張率 α_t の1個のみである。
- ・提案する構成式に基づいた FEM 解析への取り組みも実施しており、今後、高レベル放射性廃棄物の地層処分を含めた様々な地盤工学諸問題への適用が期待できる。

参考文献

- 岡田哲実：高温環境下における堆積軟岩の力学特性(その1)―三軸圧縮試験による温度依存性の把握―，地球化学研究所報告，No.N04026，2005。
- 岡田哲実：高温環境下における堆積軟岩の力学特性(その2)―一軸圧縮試験によるクリープ特性の温度依存性の評価―，地球化学研究所報告，No.N05057，2006。
- 栗本悠平，西村友宏，蔭山星，熊勇林，張鋒：異なる温度環境下における堆積軟岩の熱力学特性に関する実験的研究，平成24年度土木学会中部研究発表会講演概要集(CD-ROM)，2012
- Xiong, Y.L., Zhang, S., Ye, G.L., Zhang, F.: Modification of thermo-elasto-viscoplastic model for soft rock and its application to THM analysis of heating tests, *Soils and Foundations*, (投稿中), 2012.
- Zhang, F., Yashima, A., Nakai, T., Ye, G. L. and Aung, H.: An elasto-viscoplastic model for soft sedimentary rock based on t_{ij} concept and unloading surface, *Soils and Foundations*, Vol.45, No.1, pp.65~73, 2005.

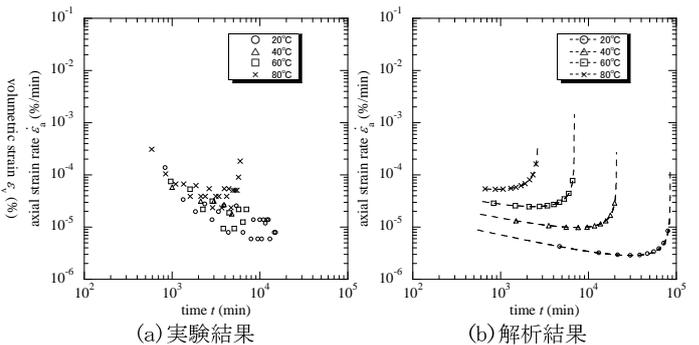


図3 三軸クリープ試験(有効拘束圧0.5MPa)

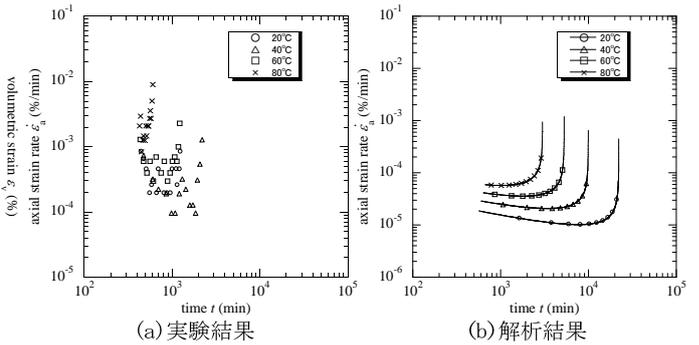


図4 三軸クリープ試験(有効拘束圧1.0MPa)