

堆積軟岩の温度・クリープ特性の実験的検証とモデル化およびその境界値問題の数値解析への適用

学籍番号 23413554 氏名 西村 友宏

指導教員名 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、堆積軟岩の力学挙動における温度の影響を考慮して提案された熱弾粘塑性構成式を境界値問題へ適用させ、解析手法の妥当性を検証する。

2. 高温下における三軸圧縮・クリープ試験

堆積軟岩の力学挙動における温度の影響を把握するために、高温高压三軸試験機（図 1）を用いて異なる温度環境下（20～80℃）における三軸圧縮・クリープ試験を実施する。試験試料には、多孔質凝灰

岩の自然堆積軟岩である田下石を高さ 100mm、直径 50mm に整形し、飽和化したものを用いる。所定の有効拘束圧において 24 時間圧密を行い、側圧一定のもとで排水せん断を行う。三軸圧縮試験の場合、軸ひずみ 5%程度までひずみ制御（0.002%/min.）によるせん断を継続し、三軸クリープ試験の場合、所定のクリープ応力を一定に保つことで、クリープ挙動を調べる。

図 2 に、異なる温度環境下における三軸圧縮・クリープ試験結果を示す。これより、設定した有効拘束圧 0.49、0.98MPa においては、堆積軟岩特有の力学挙動であるひずみ軟化とダイレイタンスー特性、クリープ挙動を確認できる。温度依存性に注目すると、各有効拘束圧ともに 20℃の結果と比較して 80℃の結果は、「三軸圧縮試験では最大軸差応力が低下し、三軸クリープ試験ではクリープ破壊時間が短縮する」傾向が確認できる。しかし、本研究では、過去 3 年間、図 2 以外にも数多くの試験条件のもとで温度依存性の実験的検証を実施しており、全ての

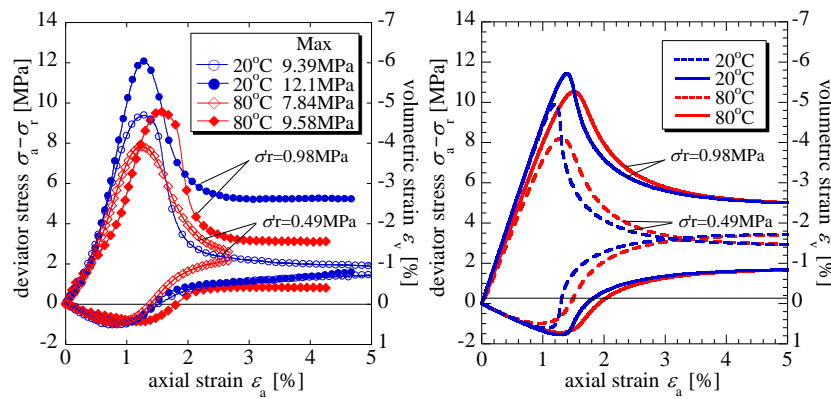


図1 高温高压三軸試験機

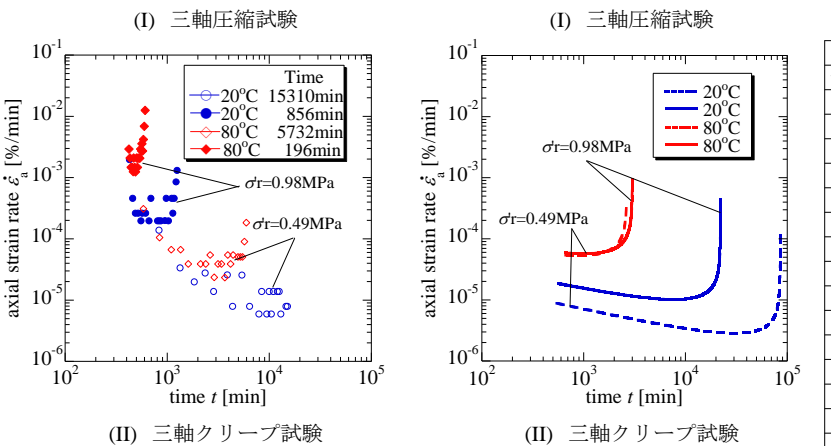


図2 試験結果

表1 解析パラメータ

有効拘束圧 $\sigma_r$ [MPa]	0.49, 0.98
せん断時のひずみ速度 [%/min.]	0.002
温度 $\theta$ [°C]	20, 80
過圧密比 OCR	40, 20
参考間隙比 $e_N$	0.5
ヤング率 $E$ [MPa]	1000
ポアソン比 $\nu$	0.12
極限応力比 $R_f$	6.9, 6.0
塑性剛性 $E_p (= \lambda - \kappa)$	0.015
二次圧密係数 $\alpha$	0.5
線膨張率 $\alpha_T$ [1/°C]	$-2.5 \times 10^{-5}$
ポテンシャル形状パラメータ $\beta$	1.1
過圧密消散パラメータ $a$	3000
時間依存性パラメータ $C_n$	0.025
熱伝達係数 $a_c$ [kJ/m <sup>2</sup> Kmin.]	236
熱伝導率 $K_1$ [kJ/mKmin.]	0.2
比熱 $C$ [kJ/MgK]	840
水の比熱 $C_w$ [kJ/MgK]	4184

図3 解析結果

試験で明確な温度依存性が確認されたわけではなく、さらなる実験的検証（走査型電子顕微鏡 SEM による内部構造変化の観察など）の必要性がある。

**3. 提案する熱弾粘塑性構成式**

さらなる実験的検証が必要であるものの、温度変化が堆積軟岩の力学挙動に及ぼす影響が大きいという試験結果に基づいて、温度依存性を考慮した熱弾粘塑性構成式を提案する。堆積軟岩特有の力学挙動は、超過圧密材料として取り扱うことができるため、過圧密と中間主応力の影響を考慮した Subloading<sub>ij</sub> モデルをベースに、温度変化と時間依存性を考慮した発展則を導入する。導入する発展則  $\dot{\rho}$  は、応力状態、時間、温度の関数として規定したものである。表 1 と図 3 に、パラメータ一覧と解析結果を示す。これより、堆積軟岩特有の力学挙動であるひずみ軟化とダイレイタンスー特性、クリープ挙動を表現できているうえに、温度が上昇するにつれて「三軸圧縮試験では最大軸差応力が低下し、三軸クリープ試験ではクリープ破壊時間が短縮する」傾向が表現できていることが確認できる。

**4. 境界値問題－熱土水連成解析－**

図 4 に、解析メッシュを示す。水理境界は、左側面（グレー部分）とトンネル壁面のみを非排水条件に設定し、全要素の初期全水頭を 520m に設定する。初期応力は、自重解析（図 4）によって与える。また、高レベル放射性廃棄物が放出する熱の影響を模

擬するために、トンネル壁面内部を熱源として設定する。熱量による比較のため、熱量の熱減衰開始から 10～310 年(Case1), 100～400 年(Case2)の 2 ケースを行う。パラメータは先程と同様である。

図 5, 6 に、各項目の経年変化を示す。これより、熱源に最も近い要素の温度がピークの時（20year）から 300year における、温度と偏差ひずみの分布を定量的に表現できていることが確認できる。

**5. まとめ**

本研究で得られた結論をまとめる。

- ・高温下における三軸圧縮・クリープ試験では、温度が上昇するにつれて「三軸圧縮試験では最大軸差応力が低下し、三軸クリープ試験ではクリープ破壊時間が短縮する」傾向が概ね確認されたが、全試験においてではなく、さらなる実験的検証が必要である。

- ・提案する熱弾粘塑性構成式は、堆積軟岩特有の力学挙動における温度依存性を定性的に表現できることが確認された。

- ・提案する熱弾粘塑性構成式を実スケールの境界値問題へ適用することにより、熱伝播による挙動や、熱量の違いを定性的に表現できることが確認された。同時に、実際に高レベル放射性廃棄物を地層処分する場合、地上施設である期間の放射過程を経たのちに地層処分を実施する必要があることが示唆された。

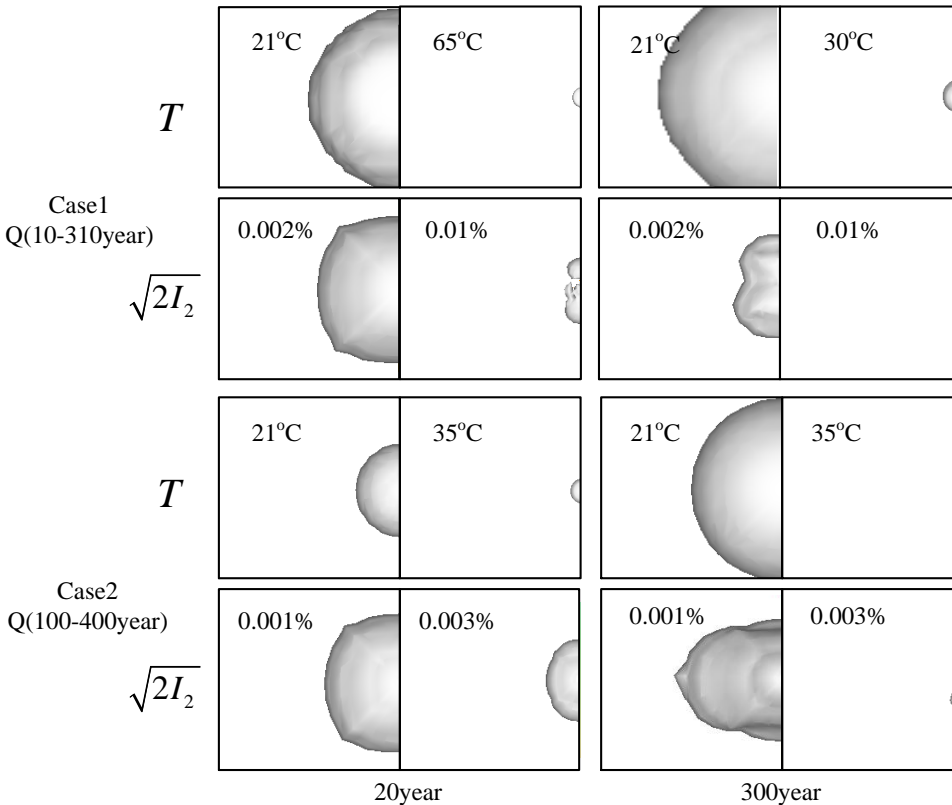


図6 温度分布、偏差ひずみ分布の経年変化(case1,2)

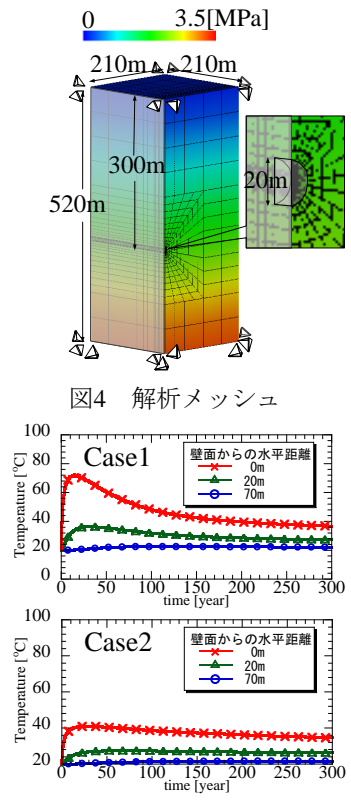


図5 温度の経年変化(case1,2)