

# 堆積軟岩の温度・クリープ特性に関する実験的研究

## Experimental research on thermo-creep behavior of soft sedimentary rock

西村友宏<sup>1</sup>, 熊勇林<sup>1</sup>, 中野裕智<sup>2</sup>, 張鋒<sup>3</sup>, 栗本悠平<sup>4</sup>

- 1 名古屋工業大学・工学研究科・創成シミュレーション工学専攻
- 2 東海旅客鉄道株式会社
- 3 名古屋工業大学・工学研究科・創成シミュレーション工学専攻 E-mail : [cho.ho@nitech.ac.jp](mailto:cho.ho@nitech.ac.jp)
- 4 名古屋工業大学・工学部・都市社会工学科

### 概 要

本研究は、高温環境下における岩盤の力学挙動の把握を目的として、高温中容量三軸圧縮試験機を用いて、三軸圧縮試験と三軸クリープ試験を行った。試料は多孔質凝灰岩に部類される自然堆積軟岩である大谷石を用いた。20℃、40℃、60℃、80℃の4種類の温度環境下で三軸試験を行った結果、三軸圧縮試験からは、軟岩特有の力学挙動であるダイレイタンスー特性とひずみ軟化が確認された。また、温度依存性については、環境温度が上昇するにつれて最大軸差応力が減少していくことがわかった。一方、三軸クリープ試験からは軸差応力をある一定の値に保つことで、時間とともに軸ひずみが増加するクリープ挙動が確認された。温度依存性については、20℃、40℃、60℃の間では温度が上昇するにつれて、クリープ破壊時間が短縮することがわかった。

キーワード：軟岩、温度依存性、クリープ

## 1. はじめに

高レベル核廃棄物（放射線廃棄物）の地層処分は各国で注目されているが、解決されなければならない問題が山積している。地層処分を実施する場合、核廃棄物を凝集したガラス固化体を炭素鋼製のオーバーバックで覆い、さらにこれらをベントナイトを主成分とする緩衝材で覆ったもの（人工バリア）を、埋め戻し材と共に地下深部に掘削された空洞に埋設するのが一般的である。高レベル核廃棄物の半減衰期が極めて長い（数十年～数万年）ため、その貯蔵には人工バリアと天然バリアである周辺母岩の熱による長期安定性が厳しく要求される。アメリカ・フランスなど地質的に安定する地下岩盤を有する国々とは異なり、日本では、地質条件の制約で、亀裂の少ない堆積軟岩（地下数百メートル～千メートル）が貯蔵母岩の候補として挙げられている。しかし、人工バリアに関する研究はこれまでに多くなされているが、天然バリアの堆積軟岩に関する研究がある<sup>1)2)</sup>ものの、比較的少ない。本研究では、堆積軟岩の力学挙動の温度依存性を調べる目的で、温度制御が可能な中容量高温三軸試験機を用いて、20℃、40℃、60℃、80℃の4種類の温度環境下で戸室石（大谷石の一種）の排水三軸試験とクリープ試験を行い、堆積軟岩の力学的特性の温度依存性について考察した。

## 2. 試験概要

### 2.1 試料について

本研究では、試験試料として栃木県宇都宮市大谷町で採集された大谷石を用いる。大谷石は薄緑色で、多孔質凝灰岩に部類される自然堆積軟岩である。大谷石は褐色の斑点として見られる「みそ」の部分が非常に少ない上に目立った空隙も少なく、比較的均一な試料という事ができる。本研究で用いた大谷石の基本物性について表 1-1 に示す。本研究で行う三軸試験では、大谷石を高さ 100[mm]×直径 50[mm]に加工した円柱形の試料を脱気水槽の中で完全飽和させたものを用いる。

表1-1 大谷石の基本物性

比重 $G_s$	2.54
間隙比 $e$	0.45

### 2.2 三軸試験概要

写真 1 と図 2-1 に、試験装置全体図と本試験で用いる三軸試験室を示す。この三軸試験機を用いて、三軸圧縮試験と三軸クリープ試験を行う。外部にある温度制御装置を用いて三軸試験室内の電熱器により、温度を上昇させる。外部のモータで三軸試験室内の攪拌器を回すことで、三軸試験室内の温度を均一に保つようになっている。温度上昇中は三軸試験室上部を解放して行った。そして、設定温度ま

で上昇させて約1時間放置してから圧密過程、せん断過程へと移った。

三軸圧縮試験と三軸クリープ試験ともに、上下端排水条件で行い、20℃、40℃、60℃、80℃の4種類の温度環境下で行った。また、再現性を確認するために各試験最低2回の試験を行った。表2-1と2-2に、三軸圧縮試験と三軸クリープ試験の試験条件を示す。

ここで、表2-1に示す有効拘束圧と鉛直軸ひずみ速度について説明する。有効拘束圧とは三軸試験室内の拘束圧と試料の内部にかかる背圧との差分であり、本試験では、拘束圧0.98 [MPa]、背圧0.49[MPa]のもとで、コンピュータプログラムの制御で荷重を行い、その荷重条件を表2-1に示した。

また、鉛直軸ひずみ速度とは、三軸圧縮試験のせん断過程における鉛直軸ひずみの発生させる割合のことである。三軸試験室の下の荷重台を用いて、強制的に変位を発生させ、発生した応力を測定するひずみ制御で行っている。完全な排水試験を行うためには、1日に1%のひずみを発生させる速度が望ましいのだが、荷重台の性能上、表2-1に示す値を採用している。

続いて、表2-2に示すクリープ荷重100%の値と荷重速度について説明する。クリープ荷重100%の値とは、20℃、40℃、60℃、80℃の4種類の各温度環境下の三軸圧縮試験における最大軸差応力の平均値である。本研究での三軸クリープ試験は、最大軸差応力の平均値の95%の値を一定に保つことで、クリープ挙動を確認した。

また、荷重速度とは、三軸クリープ試験のせん断過程(設定したクリープ荷重95%の値に到達するまで)の軸差応力の発生させる割合のことである。表2-2に示す値を採用することで、三軸圧縮試験のせん断過程(ひずみ制御)における応力経路と、三軸クリープ試験のせん断過程(応力制御)における応力経路が一致することが確認されている。

三軸圧縮試験の計測値は、同じ温度でも各試料で最大軸差応力の値にばらつきがあり、また高温になるほど最大軸差応力が増大した結果になった試験もある。しかし、クリープ荷重はデータに忠実に設定した。

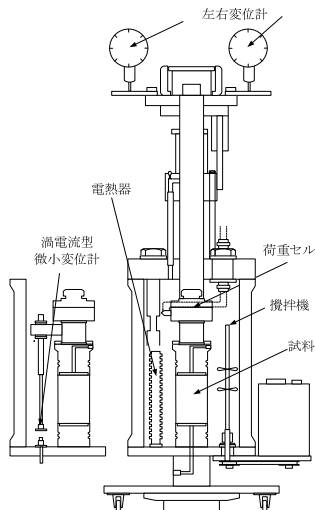


図2-1 三軸試験室



写真1 試験装置全体図

表2-1 三軸圧縮試験の試験条件

温度[℃]	20, 40, 60, 80
有効拘束圧[MPa]	0.49
鉛直軸ひずみ速度[%/min.]	0.002
排水条件	上下排水

表2-2 三軸クリープ試験の試験条件

温度[℃]	20, 40, 60, 80
クリープ荷重100%の値[MPa]	9.16, 8.96, 8.76, 7.76
有効拘束圧[MPa]	0.49
荷重速度[kN/min.]	0.05
排水条件	上下排水

### 3. 試験結果

#### 3.1 三軸圧縮試験

図3-1、3-2、3-3に軸差応力～軸ひずみ関係、体積ひずみ～軸ひずみ関係と試験後の破壊した試料の様子を示す。ここで、図3-3に示す試料は環境温度40℃での試験で用いた試料であるが、全ての試験でせん断角度が55°～60°の範囲におさまっていた。

図3-1より、ピーク強度に達した後、応力減少に転じ、最終的には残留応力に至るひずみ軟化挙動が確認できる。軸差応力が最も大きくなるのは、軸ひずみが1%を過ぎたあたりであった。せん断初期の勾配は全ての試験でほぼ一致しており、最大軸差応力の平均値は、20℃の時に9.161[MPa]、40℃の時に8.960[MPa]、60℃の時に8.757[MPa]、80℃の時に7.762[MPa]であった。各温度ともばらつきがあるものの、環境温度が上昇するにつれて、最大軸差応力が減少する事が分かった。せん断初期の勾配が一致し、最大軸差応力が減少していることから、環境温度が上昇するにつれて破壊形態が脆性的になっていると言える。また軸ひずみが3%を過ぎたあたりからの残留応力の値からは、明確な温度依存性は確認されなかった。

図3-2に示す体積ひずみ～軸ひずみ関係より、全ての試験において軸ひずみの増加に伴い体積が圧縮から膨張に転じているダイレイタンスー特性が確認できる。圧縮量、膨張量ともに明確な温度依存性は確認できなかった。軸差応力が最も大きくなるのは、軸ひずみが1%を過ぎたあた

りであったが、それに対し圧縮量が最も大きくなるのは、軸ひずみが1%になる直前であることがわかった。また、軸差応力～軸ひずみ関係においてひずみ軟化挙動をして軸ひずみが3%を過ぎてからは残留応力状態(応力が一定)になっているのに対し、体積ひずみ～軸ひずみ関係において体積の膨張量が一定値になることはなかった。これは図3-3に示す試験後の破壊した試料の様子より、せん断帯が非常にラフであることが原因と考えられる。すなわち、せん断が進むにつれて体積が膨張していくような計測値は材料の本質ではなく、あくまでもせん断帯のラフネス(凸凹)によるものだと示唆している。このことから堆積軟岩の限界状態を定義することの難しさが示された。

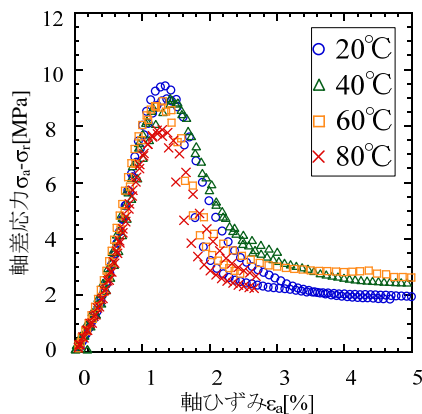


図3-1 軸差応力～軸ひずみ関係

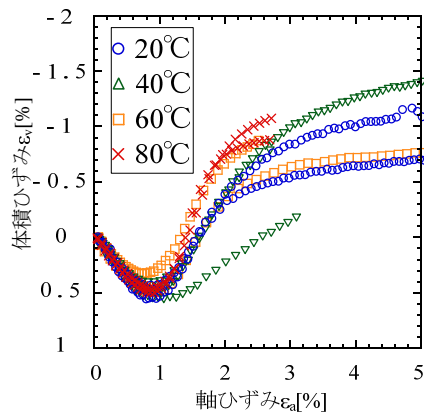


図3-2 体積ひずみ～軸ひずみ関係



図3-3 試験後の破壊した試料の様子

### 3.2 三軸クリープ試験

図3-4～3-7に軸ひずみ～時間関係、軸ひずみ速度～時間関係、体積ひずみ～時間関係、体積ひずみ速度～時間関係を示す。横軸の時間とは、クリープ過程に入ってから時間のことである。

図3-4に示す軸ひずみ～時間関係より、全ての試験において、応力が一定に保たれ、時間の経過とともに軸ひずみが増加していくクリープ挙動が確認できた。クリープ荷重の荷重を開始してから破壊に至るまでの時間の平均値は、20°Cで1410[*min.*]、40°Cで480[*min.*]、60°Cで203[*min.*]、80°Cで8700[*min.*]であった。20°C、40°C、60°Cの各温度において、ばらつきがあるものの、環境温度が上昇するにつれて、クリープ破壊時間が短くなっていくことが分かった。しかし、80°Cの試験ではクリープ破壊時間が最も遅くなる結果であった。これは、80°Cのクリープ荷重100%の値が20°Cの値の85%ほどしかないことが原因だと考えている。

表3-1と図3-8に内藤ら<sup>3)</sup>の行った常温での三軸クリープ試験の試験条件と軸ひずみ～時間関係を示す。図3-8より、クリープ荷重100%の値に対して89%と86%は破壊したが、83%と79%ではクリープ荷重の荷重を開始してから20000[*min.*]経過しても破壊しないことがわかる。以上より破壊に至るまでの時間と軸ひずみの発生量はクリープ荷重に強く依存することを示した。今後はクリープ挙動がクリープ荷重や温度、拘束圧などの要因の中で何が支配的であるかを再度考察していきたい。具体的に言うと、異なる環境温度において、クリープ荷重が一定であるクリープ試験を実施し、温度の影響を調べる。

図3-5に示す軸ひずみ速度～時間関係より、時間の経過とともに軸ひずみ速度が減少する遷移クリープ過程を確認した。そして、減少が落ち着き一定の速度を保つ定常クリープ過程の後に破壊に近づき、軸ひずみ速度が再び増加する加速クリープ過程を確認した。遷移クリープ過程の勾配は全ての試験でほぼ一致している。また、クリープ荷重の荷重を開始してから破壊に至るまでの時間が短いほど、グラフが上部に位置していることがわかった。ただし、ここに用いている軸が対数軸であるため、長さが同じであっても、グラフが右に行くほどクリープ時間が長い。また、各試験での1つ目のプロットの時間が一致していないのは、軸ひずみ速度を算出する際、試験時間が長いほど時間間隔を長くとしているためである。

図3-6、3-7に示す体積ひずみ～時間関係、体積ひずみ速度～時間関係も軸ひずみのグラフと同様の傾向が確認できた。

図3-6に示す体積ひずみ～時間関係より、時間の経過とともに軸ひずみが増加し、それに伴い体積が膨張することがわかった。これは、せん断過程で軸差応力がクリープ荷重95%に達した時には、ダイレイタンシーにより体積圧縮から体積膨張に転じているためだと考えられる。

図3-7に示す体積ひずみ速度～時間関係でも、遷移、定常、加速クリープ過程を確認できた。

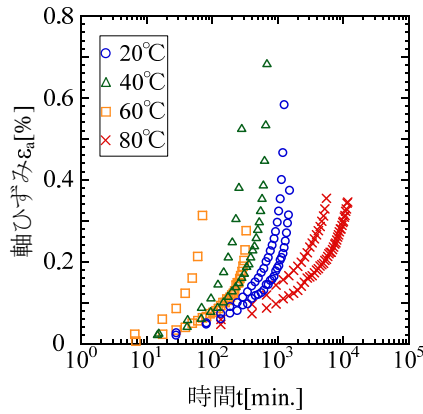


図 3-4 軸ひずみ～時間関係

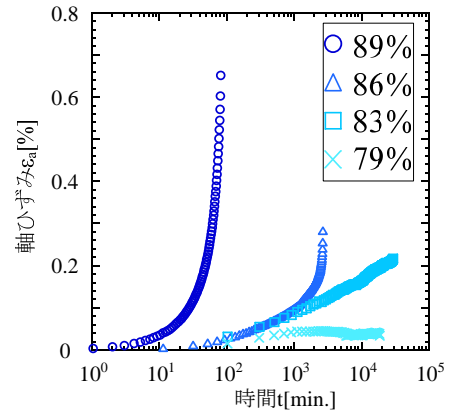


図 3-8 軸ひずみ～時間関係<sup>3)</sup>

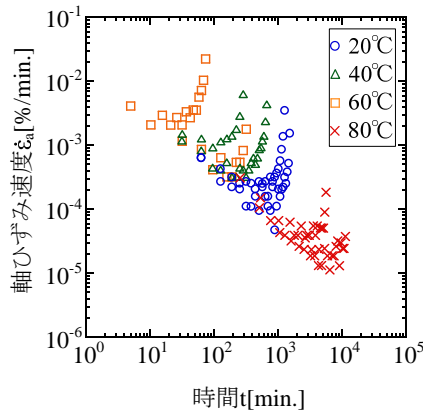


図 3-5 軸ひずみ速度～時間関係

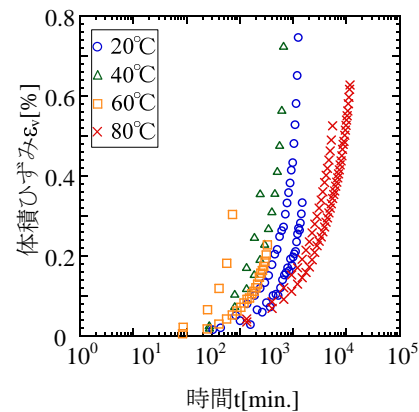


図 3-6 体積ひずみ～時間関係

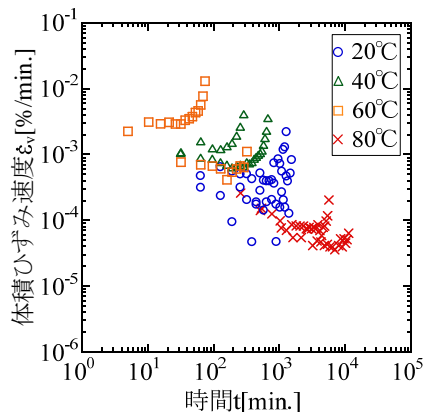


図 3-7 体積ひずみ速度～時間関係

表 3-1 試験条件<sup>3)</sup>

温度[°C]	20 (常温)
クリープ荷重 100%の値[MPa]	9.47
有効拘束圧[MPa]	1.0
載荷速度[kN/min.]	0.05
排水条件	上下排水

#### 4. まとめ

本研究は 20°C、40°C、60°C、80°C の 4 種類の温度環境下で三軸圧縮試験と三軸クリープ試験を行った。以下にそのまとめを述べる。

三軸圧縮試験により、軟岩特有のひずみ軟化挙動やダイレイタンス特性が確認できた。また、温度が上昇するにつれて最大軸差応力が減少することがわかった。せん断初期の勾配や残留応力、体積の圧縮・膨張量において明確な温度依存性が確認されなかった。

三軸クリープ試験により、応力を一定の値に保つと時間の経過とともに軸ひずみが増加するクリープ挙動を確認できた。20°C、40°C、60°C の間で、クリープ破壊時間は温度が上昇するにつれて短縮する事がわかった。しかし、80°C では、最も試験時間が長くなる結果となった。今後、クリープ挙動に与える影響の種々の要因、例えばクリープ荷重や温度、拘束圧の影響度合いを考察していきたい。特に、異なる環境温度において、クリープ荷重が一定であるクリープ試験を実施し、温度の影響を調べる。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 内藤清和：平面ひずみ試験機を用いた堆積軟岩のクリープ挙動の把握, 岐阜大学学位論文, 2006