堆積軟岩の温度・クリープ特性に関する実験的研究

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

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、解決しなければならない問題は少なくない。地層処分を実施する場合、高レベル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パックで覆い、さらにこれらを緩衝材（人工バリア）で覆ったものを、地下深部に埋設するという考え方が有力である。高レベル核廃棄物は半減期が極めて長い（数十年～数万年）ため、その貯蔵には人工バリアとその外部にある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。しかし、人工バリアの研究結果に比べ、天然バリアの研究結果はあまり多くない[1), 2)]。そこで本研究では、堆積軟岩の力学挙動の温度依存性を把握するために、80℃まで温度制御が可能な中容量高温三軸試験機を用いて、異なる温度環境下における戸室石（大谷石の一種）の排水三軸圧縮試験と三軸クリープ試験を行い、堆積軟岩の力学的特性を調べた。

2. 試験概要

本研究で用いる戸室石は大谷石の一種であり多孔質凝灰岩に部類される自然堆積軟岩である。戸室石の基本物性を表 1 に示す。

表1　戸室石の基本物性

比重 G_s	2.54
間隙比 e	0.45
飽和単位体積重量γ_{sat}	2.06

試験には、戸室石を高さ 100mm×直径 50mm の円柱形に加工し、完全飽和させたものを用いた。試験は最初に 20～80℃で三軸圧縮試験を行い、最大軸差応力を求め、その結果をもとにクリープ応力を算定し、三軸クリープ試験を行った。

1)　三軸圧縮試験

表 2 に三軸圧縮試験の試験条件を示す。堆積軟岩の最大軸差応力における温度依存性を調べるために 20℃、40℃、60℃、80℃の 4 種類の温度を圧密開始前に与えた。

図 2､3 に三軸圧縮試験における軸差応力～軸ひずみ関係、体積ひずみ～軸ひずみ関係を示す。図 2 より、ピーク強度に達した後、応力が減少に転じ、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。最大軸差応力の平均値は、20℃の時に 9.16[MPa]、40℃の時に 8.96[MPa]、60℃の時に 8.76[MPa]、80℃ の時に 7.76[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。また、図 3 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るダイレイタンシー特性が確認できる。

表 2　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
ひずみ速度[%/min.]	0.002
排水条件	上下排水

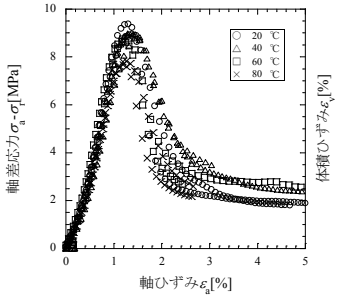

図 2 軸差応力～軸ひずみ

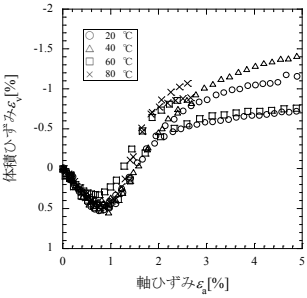

図 3 体積ひずみ～軸ひずみ

2)　三軸クリープ試験

表 3､4 に三軸クリープ試験の試験条件を示す。case1 のクリープ応力 q は 20℃で 8.70[MPa]、40℃で 8.51[MPa]、60℃で 8.32[MPa]、80℃で 7.37[MPa]を用いて行った。これらは、先に行った三軸圧縮試験の各温度における最大軸差応力の平均値の 95%の値である。一方、case2 のクリープ応力 q は各温度とも 7.37[MPa]（80℃の最大軸差応力の平均値の 95%の値）を用いて行った。

表 3　三軸クリープ試験の試験条件(case1)

温度[℃]	20, 40, 60, 80
クリープ荷重[MPa]	8.70,8.51,8.32,7.37
有効拘束圧[MPa]	0.49
載荷速度[kN/min.]	0.05
排水条件	上下排水

表 4　三軸クリープ試験の試験条件(case2)

温度[℃]	20, 40, 60, 80
クリープ荷重[MPa]	7.37
有効拘束圧[MPa]	0.49
載荷速度[kN/min.]	0.05
排水条件	上下排水

図 4、5 に三軸クリープ試験 case1 における時間～軸ひずみ関係､時間～軸ひずみ速度関係を示す。図 4 より、全ての試験において、応力が一定に保たれると、時間の経過とともに軸ひずみが増加するクリープ挙動が確認できる。クリープ荷重の載荷を開始してから破壊に至るまでの時間の平均値は、20℃で 1410[min.]、40℃で 480[min.]、60℃で 203[min.]､80℃で 8700[min.]であった。20℃､40℃、60℃の各温度において、ばらつきがあるものの、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℃の試験ではクリープ破壊時間が最も遅くなる結果となった。これは、80℃のクリープ荷重の値が他に比べて小さい(20℃の最大軸差応力の値の 80%ほど)ことが原因だと考えられる。内藤ら [3)]の行った常温での三軸クリープ試験の試験結果においても、破壊に至るまでの時間と軸ひずみの発生量はクリープ応力に強く依存することが示されている。

また図 5 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、減少が落ち着き一定の速度を保つ定常クリープ過程、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できる。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。

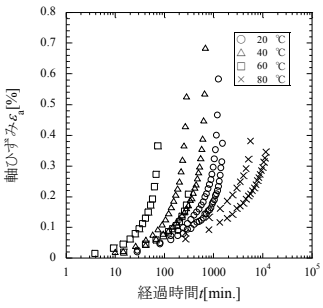

図 4 時間～軸ひずみ

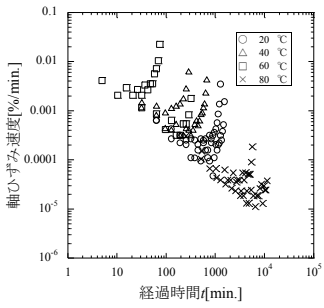

図 5 時間～軸ひずみ速度

次に case2（各温度ともクリープ応力一定）の試験結果として図 6、7 に時間～軸ひずみ関係、時間～軸ひずみ速度関係を示す。図 6 より、異なる温度において同じ値のクリープ応力を一定に保つことにより、ばらつきがあるものの、温度が上昇するにつれて、クリープ破壊時間が短くなる傾向が見られた。クリープ荷重の載荷を開始してから破壊に至るまでの時間の平均値は、20 ℃ で 15300[min.]、40 ℃ で 4700[min.]、60 ℃ で 7400[min.]、80℃で 5700[min.]であった。また、図 7 より、case1 と同様の傾向が確認できる。

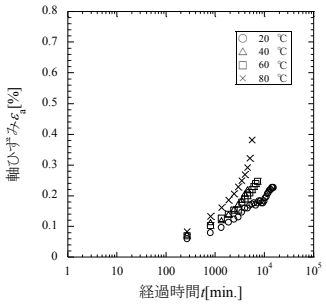

図 6 時間～軸ひずみ

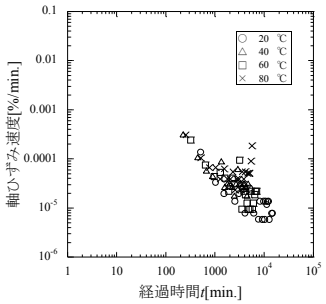

図 7 時間～軸ひずみ速度

3. 結論

三軸圧縮試験により、温度が上昇するにつれて、ばらつきはあるものの最大軸差応力が減少することが分かった。また、三軸クリープ試験により、case1 では 20℃、40℃、60℃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℃ではクリープ応力が他に比べて小さいため、最もクリープ破壊時間が長くなる結果となった。case2 の異なる温度において、クリープ荷重が同じ値であるクリープ試験により、温度が上昇するにつれて、ばらつきはあるもののクリープ破壊時間が短くなることがわかった。

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, 八島厚 : 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