

一軸クリープ試験で見られたクリープ挙動の岩種依存性

INFLUENCE OF ROCK TYPE ON CREEP BEHAVIOR OBSERVED IN UNCONFINED CREEP TEST

三保雄司*・谷和夫**・柴田健弘***・岡田哲実****

Yuji MIHO, Kazuo TANI, Kenko SHIBATA and Tetsuji OKADA

Influence of rock type on creep behavior is investigated by literature review. Experimental results of unconfined creep tests on a semi-hard rock, Kimachi sandstone, and two softrocks, tuff and mudstone, are compared. Focuses are placed on the relationships among three characteristic creep parameters, the stress ratio, the minimum strain rate and the time to failure.

The results demonstrate that the relationships between the minimum strain rate and the stress ratio or the time to failure appear to depend on the rock type. However, the relationship between the time to failure and the stress ratio seems to be independent of the rock type.

Key Words: rock type, creep, soft rock, stress ratio, strain rate,

1. はじめに

我が国の高レベル放射性廃棄物の地層処分の概念は、ガラス固化体を格納容器に収め、その周りを緩衝材（ベントナイトなど）で囲んで岩盤中に埋設する多重バリアの考え方に立っている。^{1),2)} 地層処分場には、放射能レベルが十分に低下するまで、数万年間の安定性が要求され、その候補として堆積軟岩が挙げられている。堆積軟岩は、割れ目が少ないため、放射性物質を閉じ込める性能が高い反面、比較的に軟らかいためにクリープ変形が大きいことが懸念される。

クリープ挙動の研究は、それぞれ異なった岩種を用いた実験的研究が散発的に行われ、さまざまなモデルが提案されてきた³⁾。しかし、クリープ挙動の岩種依存性が、未だ分析されていないため、その知見は体系化されていない。そこで、柴田ら⁴⁾が提案したクリープモデルを用いて一軸クリープ試験で見られたクリープ挙動の岩種依存性を文献調査により検討した。

2. 文献調査の方法

堆積岩のクリープ特性の岩種依存性を整理・分析するために、文献調査を実施した。異なる岩種でクリープ試験が数多く実施されている一軸クリープ試験に注目した。

*		横浜国立大学	工学部 建設学科 シビルエンジニアリングコース
**	Ph.D.	横浜国立大学大学院	工学研究院
***	学士(工学)	横浜国立大学大学院	工学府 社会空間システム学専攻
****	修士(工学)	(財)電力中央研究所	地球工学研究所 バックエンド研究センター

(1) 対象とした堆積岩

大谷石・泥岩・来待砂岩の3種類の堆積岩が試料に用いられている。各岩種の物性について表－1に示す。

(a) 大谷石

柴田(2004)⁴⁾、伊東(1995)⁵⁾、山内(1992)⁶⁾の3文献に記載されている各試料を大谷石A、大谷石B、大谷石Cと区別した。なお、大谷石Bについては物性値の記載がなかった。

栃木県宇都宮市大谷町を中心に分布している流紋岩質溶結凝灰岩であり、新第三紀中新世に形成された（約2000万年前頃）。軟質で薄い緑色の基質部と、「みそ」といわれる黒い斑状部分が存在し、不均質な点の特徴である。

(b) 泥岩⁷⁾

第四紀更新世～新第三紀中新世に形成されたもので、非常に軟質で暗灰～帯緑灰色を呈する。粒子径は16分の1mm程度で、多くの場合に有機物を含み、雲母・石英・長石を主成分とする。

(c) 来待砂岩⁸⁾

島根県八束郡宍道町来待地区に産する来待石とも呼ばれる凝灰質砂岩である。新第三期中新世（1400万年前程）に形成され、やや硬質で準硬岩に属する。火山岩片が7割程度を占め、石英を1割程度含む。また、粒子径は0.8mm程度で、1mmを超えるものも散見されるが、全体としては均質である。

(2) クリープモデルの概要

岩種の影響を同じ枠組みで比較するため、柴田(2004)⁴⁾が提案したクリープモデルに用いられている3つのパラメータ（クリープ応力比、最小ひずみ速度、破壊時間）に注目した。柴田(2004)のクリープモデルの概念と各パラメータの定義を図－1に示す。

(a) クリープ応力比

一軸クリープ試験で加えた軸応力 q_{creep} と一軸圧縮試験(JGS 2521-2000)による一軸圧縮強さ q_u の比 q_{creep}/q_u をクリープ応力比と定義した。ただし、泥岩⁷⁾の一軸圧縮強さは文献調査から導き出されたものである。

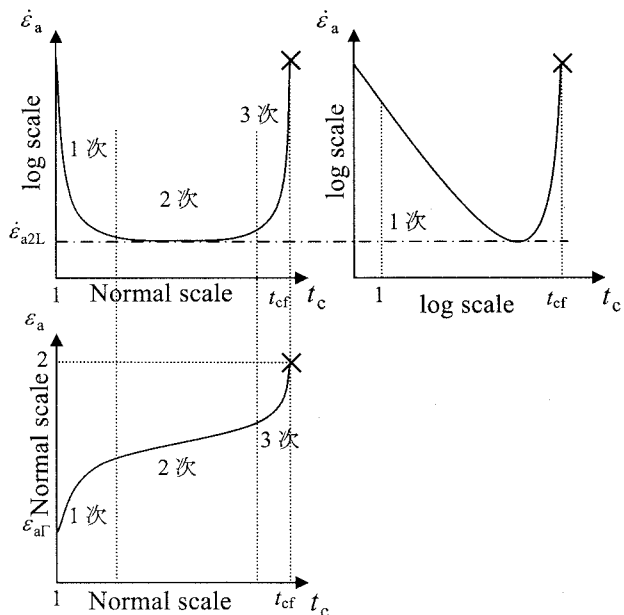
(b) 最小ひずみ速度

一般に、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_a$ の変化に基づき、クリープ挙動は3つの時間領域に区分される。加藤ら(2003)⁷⁾は、この区分に従い、図-1に示す各種の特性値を定義してモデルを提案した。

図-1 左上の2次（定常）クリープにおいて、

表－1 各岩種の物性値

項目	大谷石A ⁴⁾	大谷石C ⁶⁾	泥岩 ⁷⁾	来待砂岩 ⁸⁾
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.88	1.71	1.93	2.03
自然含水比 w_n (%)	25.29	20.8	27.8	7.21
一軸圧縮強さ q_u (MPa)	5.86	9.4	4.3	27.6
ヤング率 E (MPa)	5955	1884	2315	—
ポアソン比 ν	0.36	0.25	0.37	—
P波速度 V_p (m/s)	2207	1886	1533	2490
S波速度 V_s (m/s)	1088	846	654	1560



図－1 クリープモデルの概念

ひずみ速度が一定となる部分の $\dot{\epsilon}_a$ を最小ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{a2L}$ と定義した。ただし来待砂岩⁸⁾においては内部変位計の値を示している。

(c)破壊時間

外部変位計のひずみ ϵ_a が2%となった時間をクリープ破壊時間 t_{cf} と定義した。

3. 一軸クリープ挙動の岩種依存性

(1) t_{cf} と q_{creep}/q_u の関係

t_{cf} と q_{creep}/q_u の片対数関係を図-2に示す。

全ての岩種について q_{creep}/q_u が大きくなるにつれて t_{cf} が小さくなる傾向がある。近似直線として次の式を示す。

$$\log t_{cf} = A + B \times q_{creep} / q_u \quad \cdots \text{式 (1)}$$

さらに、岩種別の A, B と相関係数 R_1 の値を表-2に示す。

3種類の大谷石A, B, Cはほぼ同一直線上にあるので、図-2には全体の近似直線を表示している。来待砂岩は、多少のばらつきがあるものの大谷石と近い値を示している。一方、泥岩は、他の2岩種に比べて A, B の絶対値が小さい。しかし、 $q_{creep}/q_u = 0.86$ のプロット点を除けば、他の2岩種と同じような位置にデータが分布していることより、 t_{cf} と q_{creep}/q_u の関係には岩種依存性は認められない。

(2) $\dot{\epsilon}_{2L}$ と q_{creep}/q_u の関係

$\dot{\epsilon}_{2L}$ と q_{creep}/q_u の片対数関係を図-3に示す。なお、大谷石C⁶⁾については、 $\dot{\epsilon}_{2L}$ を求めることができなかった。

全体として q_{creep}/q_u が大きくなるにつれて $\dot{\epsilon}_{2L}$ が大きくなる傾向がある。近似直線として次の式を示す。

$$\log \dot{\epsilon}_{2L} = C + D \times q_{creep} / q_u \quad \cdots \text{式 (2)}$$

さらに、岩種別の C, D と相関係数 R_2 の値を表-2に示す。

大谷石A, Bを見ると、式(2)の C, D の値が

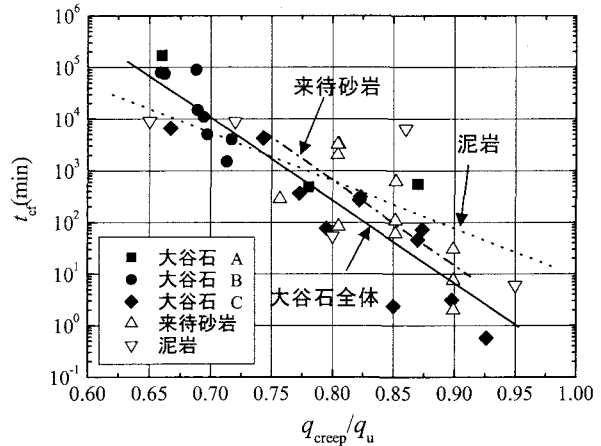


図-2 t_{cf} と q_{creep}/q_u の関係

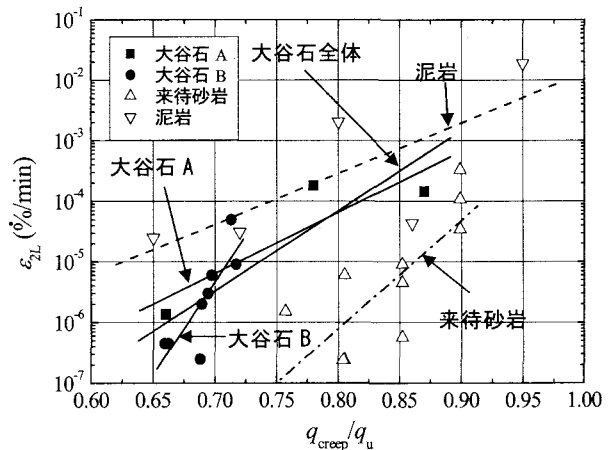


図-3 $\dot{\epsilon}_{2L}$ と q_{creep}/q_u の関係

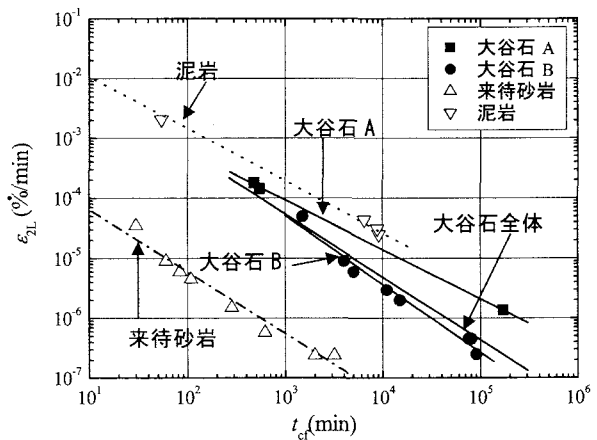


図-4 $\dot{\epsilon}_{2L}$ と t_{cf} の関係

大きく異なっている。しかし、それぞれのデータの q_{creep}/q_u の範囲が狭いので、両岩を合わせて大谷石全体の近似直線を見ると、同程度の相関係数 R_2 が得られる。

来待砂岩は、ばらつきがあるものの大谷石よりも最小ひずみ速度は小さい。一方、泥岩は、大谷石よりも最小ひずみ速度は大きい。よって、同じクリープ応力比での最小ひずみ速度の大きさは、泥岩>大谷石>来待砂岩となる。

さらに付言すると、各岩種に対する回帰直線を $q_{\text{creep}}/q_u=1.0$ まで延長すると、 $\dot{\epsilon}_{2L}$ が $10^{-3} \sim 10^{-1} \%$ /minに収束しており、一軸圧縮試験の標準的なひずみ速度が $10^{-2} \sim 10^{-1} \%$ /minであることに対応している。

(3) $\dot{\epsilon}_{2L}$ と t_{cf} の関係

$\dot{\epsilon}_{2L}$ と t_{cf} の片対数関係を図-4に示す。全ての岩種について右下がりの直線関係が認められる。近似直線として次の式を示す。

$$\log \dot{\epsilon}_{2L} = E + F \log t_{\text{cf}} \quad \cdots \text{式 (3)} \quad \dot{\epsilon}_{2L} = t_{\text{cf}}^F \times 10^E \quad \cdots \text{式 (4)}$$

さらに、岩種別の E, F と相関係数 R_3 の値を表-2に示す。

近似直線の傾き F に着目すると、全岩種で $F \approx -1$ に近い値を示している。これは、既往の知見³⁾と一致している。近似直線の切片 E に着目すると、来待砂岩、大谷石、泥岩の順に絶対値が小さくなる。よって、同じ破壊時間での最小ひずみ速度の大きさは 泥岩>大谷石>来待砂岩 となる。さらに、相関係数 R_3 の値を見ると非常に1.0に近く、式(3)ないし(4)に示す最小ひずみ速度と破壊時間の関係の相関が高いことが分かる。

表-2 近似直線から得られた岩種別の特性値

項目	大谷石 A	大谷石 B	大谷石 C	大谷石全体	来待砂岩	泥岩	岩種全体
A	13.08	23.49	14.44	15.25	16.02	10.20	13.79
B	-12.38	-28.00	-15.25	-16.03	-16.50	-9.24	-13.99
R_1	0.90	0.87	0.88	0.92	0.75	0.73	0.86
C	-12.24	-26.72	-	-14.72	-20.40	-10.22	-
D	10.08	30.57	-	13.21	17.88	8.35	-
R_2	0.89	0.82	-	0.83	0.78	0.75	-
E	-1.56	-0.86	-	-1.11	-3.15	-1.10	-
F	-0.82	-1.14	-	-1.05	-1.03	-0.87	-
R_3	1.00	0.99	-	0.96	0.99	1.00	-

4. 考 察

3章の検討から、 t_{cf} と q_{creep}/q_u の関係は岩種に依存性はないが、 $\dot{\epsilon}_{2L}$ と q_{creep}/q_u の関係と $\dot{\epsilon}_{2L}$ と t_{cf} の関係については岩種の依存性が認められた。このような傾向と、試料の固結度、粘性、均質性の面に注目して、それぞれ一軸圧縮強さ、構成粒子の粒度、岩の成因の面から考察した。

(1) 固結度（一軸圧縮強さ）

表-1で示したように、来待砂岩は他の2岩種(軟岩)に比べて、一軸圧縮強さが27.6MPaと大きく準硬岩である。また、同じ2種類の軟岩についても、泥岩は大谷石より一軸圧縮強さが小さい。この一軸圧縮強さの順(来待砂岩>大谷石>泥岩)は、図-3や図-4で見られた最小ひずみ速度の順(泥岩>大谷石>来待砂岩)と逆である。つまり、岩の固結度または一軸圧縮強さが、クリープ挙動に影響していることが推察される。

(2) 粘性（構成粒子の粒度）

岩の粘性はクリープ現象において重要である。また、一般的に構成粒子の粒度が細かいほど粘性が大きくなると考えられる。

3種類の岩種の粒度を比較すると、来待砂岩>大谷石>泥岩の順である。また、このことを岩の粘性の大きさに置きかえると、泥岩>大谷石>来待砂岩の順となる。この順序は、図-3や図-4に示す関係における最小ひずみ速度と一致している。すなわち、粘性の大きな岩ほど、同じ q_{creep}/q_u ないし同じ破壊時間 t_{cr} の下で $\dot{\epsilon}_{2L}$ が大きくなるという傾向を示すことが分かる。

(3) 均質性（岩の成因）

試料の均質性は、岩の成因に強く依存する。大谷石は火砕性の堆積岩、泥岩および来待砂岩は砕屑性の堆積岩である。砕屑岩は構成している粒子が十分に分級作用を受ける（淘汰される）ため、岩は均質となる。一方、火砕岩は、火山噴出物が十分に分級作用を受けず（淘汰されず）に堆積したものであるため、岩は不均質である。よって、大谷石は他の2岩種よりも不均質である。

図-2、図-3、図-4を見ると、不均質な大谷石のプロットにばらつきがあるのは当然と思われるが、均質な泥岩や来待砂岩も同じようにばらつきがある。よって、均質性のみがデータのばらつきに支配的に関与するとは断言できないようである。また、砕屑岩である泥岩と来待砂岩は共通で、火砕岩である大谷石と異なる特性は見当たらないので、均質性ないし岩の成因がクリープ挙動に強く影響していることはないようである。

5. まとめ

一軸クリープ試験で見られたクリープ挙動の岩種依存性について検討するために、文献調査を実施した。加藤ら⁷⁾、柴田ら⁴⁾が提案したクリープモデルのパラメータのうち、クリープ応力比、最小ひずみ速度、破壊時間について、大谷石、来待砂岩、泥岩のデータを比較した。

その結果、クリープ応力比と破壊時間の関係には岩種依存性は確認できなかったが、クリープ応力比と最小ひずみ速度の関係において、同じクリープ応力比での最小ひずみ速度の大きさが泥岩>大谷石>来待砂岩の順になる岩種依存性、最小ひずみ速度と破壊時間の関係において、同じ破壊時間での最小ひずみ速度の大きさは泥岩>大谷石>来待砂岩の順になる岩種依存性が認められた。この結果について、一軸圧縮強さ（固結度）、構成粒子の粒度（粘性）、そして成因（均質性）という3つの観点から考察した。その結果、クリープ挙動には固結度と粘性が関連することが示唆された。

今後の課題としては、まず、粘性と粒度の関係は不明瞭であるので、より適切に粘性を表現するパラメータ（例えば粘性係数やコンシステンシー特性など）を用いて評価することが必要である。そして、岩種の依存性を適切に反映した構成関係の提案が重要であろう。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性―地層処分研究開発第2次取りまとめ―（分冊2：地層処分の工学技術）、4.2 処分施設の設計、1999。
- 2) 原子力発電環境整備機構：地層処分 その安全性、2003。
- 3) 土質工学会：堆積軟岩の工学的性質とその応用、pp.5-9,123、1987。
- 4) 柴田健弘・谷 和夫・岡田哲実：凝灰岩の熱環境下における一軸クリープ特性、第39回地盤工学研究発表会 pp.286-287、2004。

- 5) 伊東 孝・赤木知之：大谷石のクリープ特性における寸法効果、第 30 回土質工学研究発表会、pp.1183-1184、1995.
- 6) 山内 優・三室俊明・山下 秀・長尾真宏・柴田和広：大谷石の時間依存性強度特性について、第 27 回土質工学研究発表会、pp.1235-1236、1992.
- 7) 加藤雄介・谷 和夫・岡田哲実：高温環境下における堆積軟岩の一軸クリープ試験と予測モデルの提案、第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.25-32、2004.
- 8) 山下 秀・杉本文男・山内 優・森 総・デンベレル ナムスライ：軟岩の圧縮クリープ過程を微視的構造の変化－岩石のクリープ破壊機構に関する研究（その 1）－、資源と素材、Vol.113、pp.817-824、1997.