

岩石のクリープ挙動に及ぼす応力履歴の影響

羽柴 公博¹・松井 裕哉²・佐藤 稔紀³・瀬野 康弘⁴

¹工博 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 結晶質岩地質環境研究グループ
(〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)
E-mail: hashiba.kimihiro@jaea.go.jp

²正会員 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 堆積岩工学技術開発グループ
(〒098-3207 北海道天塩郡幌延町宮園町1-8)

³正会員 工博 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 結晶質岩工学技術開発グループ
(〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)

⁴正会員 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 結晶質岩地質環境研究グループ
(同上)

本研究では、凝灰岩と珪質岩を用いて、クリープ応力を段階的に増加させる多段階クリープ試験を行った。第1段階と第2段階のクリープ応力や第1段階のクリープ継続時間を種々変化させて、クリープ挙動に及ぼす応力履歴の影響を検討した。その結果、第1段階のクリープの影響により、第2段階の初期クリープ歪速度が小さくなる場合があることがわかった。さらに、第1段階と第2段階のクリープ応力の差が小さく、第1段階のクリープ継続時間が長いほど、第2段階に及ぼす応力履歴の影響が大きくなることがわかった。凝灰岩と珪質岩の試験結果を比較したところ、珪質岩の方が、クリープ挙動に及ぼす応力履歴の影響の程度が大きかったことがわかった。

Key Words : rock, tuff, siliceous rock, creep, stress history

1. はじめに

地下構造物の長期的な挙動と安定性を評価するには、岩石のクリープ特性の解明が重要であり、従来から、数多くの研究が行われている¹⁾。しかし、クリープ特性に及ぼす応力履歴の影響に関する知見はいまだに少ないのが現状である。大久保²⁾は構成方程式を用いた検討で、岩石のクリープ寿命にマイナの式³⁾が成り立つ可能性を指摘しているが、検証に役立つ試験結果の報告例はないとしている。山口他⁴⁾は、累積損傷則³⁾の立場からクリープ寿命の予測手法を提案したが、比較的短期間の試験結果をもとにしているため、今後多面的に実証される必要があるとしている。このように、岩石のクリープ寿命に及ぼす応力履歴の影響については不明な点が多い。さらに、長期的な挙動に密接な関係があると考えられる1次クリープに対する、応力履歴の影響についての知見はほとんどない。

そこで本研究では、凝灰岩と珪質岩を用いて多段階クリープ試験を行い、1次クリープに対する応力履歴の影響を、異なる試験条件や岩種間で比較した。さらに、応力履歴の影響を定量的に検討するための指標を提案した。

2. 試験方法

試料岩石として、栃木県宇都宮市産の田下凝灰岩と、北海道天塩郡幌延町で採取した珪質岩（以下、幌延珪質岩と称する）を用いた。試験片は直径 25 mm、高さ 50 mm の円柱形とした。田下凝灰岩の試験片は岩石ブロックから作成し、整形後は試験室内に2週間以上放置して自然乾燥させた。幌延珪質岩の試験片は、HDB-6 孔の直径 80 mm のボーリングコア⁵⁾から作成した。HDB-6 孔地点は地表から深度約 270 m までが珪藻質泥岩からなる声問層、それより深部が硬質頁岩からなる稚内層であり、本研究ではこれらを総称して珪質岩と呼んでいる。試験片は、深度 240 m（珪藻質泥岩）と 500 m（硬質頁岩）の岩石コアから作成した。整形後の試験片は、乾燥を防ぐためラップで覆った後、真空パックで包み水中で保存した。表-1 には一軸圧縮強度試験の結果をまとめて示した。

本研究では、東京大学において約6年間のクリープ試験の実績を有する装置⁶⁾と同様の構造の、図-1に示す空圧式一軸圧縮クリープ試験機を用いた。コンプレッサはタンク容量 50 L、最大常用圧力 1 MPa で、上限と下限圧力が設定できる。圧力が下限以下まで低下するとモータが回転を始め、上限に達すると回転が止まる。モータの回転時間は1分程度であ

表-1 田下凝灰岩と幌延珪質岩の一軸圧縮強度試験結果

岩石	採取深度 (m)	試験方法			試験結果	
		環境	試験数	歪速度 ($\times 10^{-6}$)	一軸圧縮強度 (MPa)	一軸圧縮強度の 変動係数 (%)
田下凝灰岩		気乾状態	24	10	21.8	8.4
幌延珪質岩	珪藻質泥岩	240	湿潤状態	6	50	5.3
	硬質頁岩	500	湿潤状態	6	50	15.1
						45.0

表-2 多段階クリープ試験の試験条件

岩石	試験片	第1段階の クリープ応力 σ_{c1} *(MPa)	第1段階の クリープ継続時間 t_1 (s)	第2段階の クリープ応力 σ_{c2} *(MPa)	σ_{c1}/σ_{c2}
田下凝灰岩	1	13.0 (60%)	98	17.5 (80%)	0.75
	2	10.8 (50%)	98	15.2 (70%)	0.71
	3	13.0 (60%)	81886	15.2 (70%)	0.86
	4	13.0 (60%)	83029	15.2 (70%)	0.86
	5	13.0 (60%)	998	15.2 (70%)	0.86
	6	13.0 (60%)	998	15.2 (70%)	0.86
	7	13.0 (60%)	9309	15.2 (70%)	0.86
	8	13.0 (60%)	9401	15.2 (70%)	0.86
	9	10.8 (50%)	82675	13.0 (60%)	0.83
	10	17.5 (80%)	100	-	-
	11~15	15.2 (70%)	97~9933	-	-
珪藻質泥岩	1	3.3 (63%)	4197	4.0 (75%)	0.83
	2	2.0 (38%)	3583	2.5 (47%)	0.79
	3	2.3 (43%)	3597	2.7 (51%)	0.83
	4	2.0 (38%)	3597	2.5 (47%)	0.80
	5	2.4 (45%)	3597	2.9 (54%)	0.83
	6	2.0 (38%)	3596	2.5 (47%)	0.79
	7	2.0 (38%)	86122	2.5 (47%)	0.79
	8	2.0 (38%)	85826	2.5 (47%)	0.79
硬質頁岩	1	5.7 (37%)	3597	6.8 (45%)	0.83
	2	5.0 (33%)	3597	6.0 (40%)	0.83
	3	12.0 (79%)	3597	14.3 (95%)	0.83
	4	5.0 (33%)	3597	6.0 (40%)	0.84
	5	5.1 (34%)	3597	6.1 (41%)	0.83
	6	5.0 (33%)	3597	6.0 (40%)	0.83

* 括弧内は表-1 に示した一軸圧縮強度に対する割合

り、約1時間に1回動作させることで、試験片に加わる応力をほぼ一定に保つことができる。試験片の変位は片持梁式変位計を2個用いて測定した。変位計の出力は増幅器（共和電業製、CDV-700A）を介して、デジタルマルチメータ（アドバンテス製、R6451A）に送られる。さらに、 GPIB で PC に取り込まれる。

試験では、まず、試験機に試験片を設置し、変位計のキャリブレーションを行った後、ゼロ点を調整する。次に、開閉弁を閉めたまま減圧弁の出口圧力

を調整する。その後、開閉弁を開いて試験を開始し、載荷応力を σ_{c1} に保つ。この状態を以下では第1段階と呼ぶ。第1段階を任意の時間 t_1 (s) 継続した後、載荷応力を σ_{c2} に増加させ、一定に保つ。この状態を以下では第2段階と呼ぶ。第1段階から第2段階へ応力を増加させる際は、一旦開閉弁を閉めて減圧弁の出口圧力を調整した後、再び開閉弁を開く。なお、開閉弁を開いてから、応力が所定の値に達するまでには約1sを要した。

表-2 には各試験片の試験条件を示したが、田下

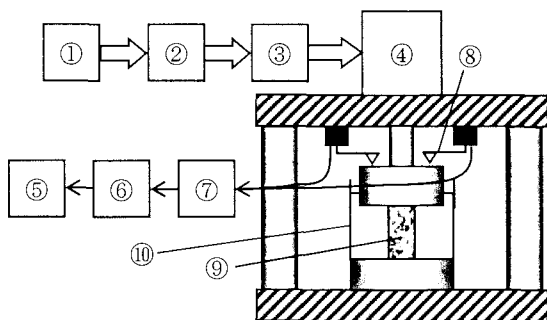
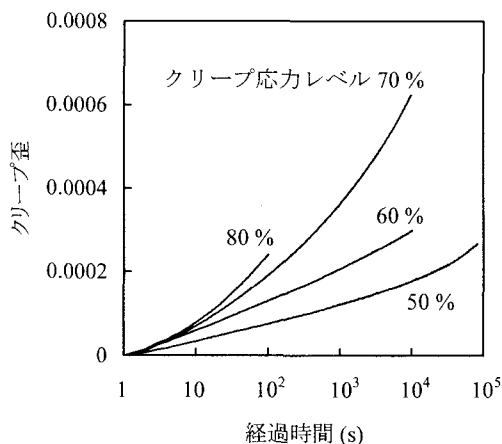
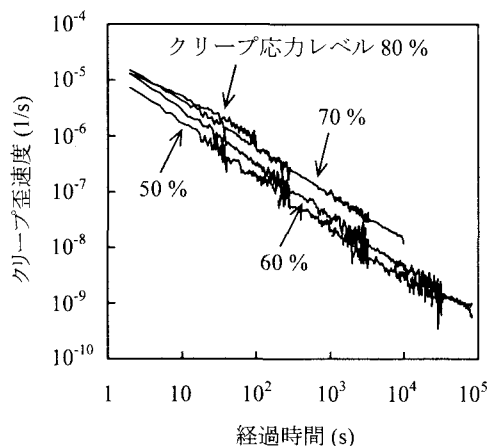


図-1 空圧式一軸圧縮クリープ試験機の概略

①コンプレッサ, ②減圧弁, ③開閉弁, ④シリンダ,
⑤PC, ⑥デジタルマルチメータ, ⑦増幅器,
⑧片持梁式変位計, ⑨試験片, ⑩水槽



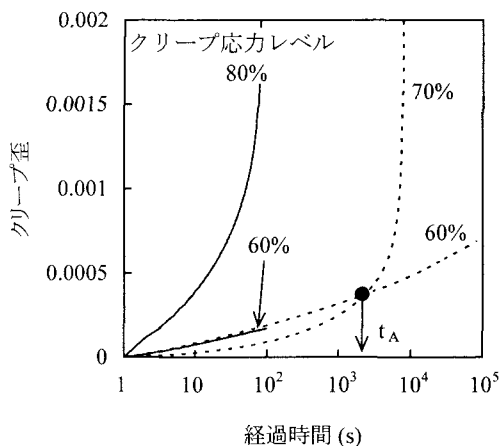
(a) クリープ歪の経時変化



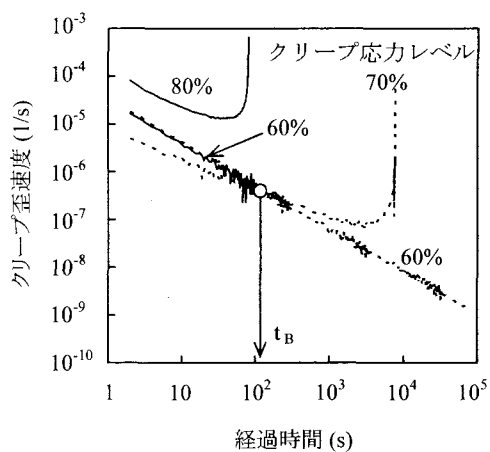
(b) クリープ歪速度の経時変化

図-2 田下凝灰岩の第1段階のクリープ試験結果

凝灰岩は気乾状態、幌延珪質岩は試験片を水没させた完全湿潤状態で試験を行った。田下凝灰岩の試験片10～15は、試験後に他の目的で使用したため、第1段階のみで試験を打ち切った。幌延珪質岩の試験ではイオン交換水を用いた。



(a) クリープ歪の経時変化



(b) クリープ歪速度の経時変化

図-3 田下凝灰岩の第1段階と第2段階のクリープ試験結果 実線：試験片1, 破線：試験片3

t_A : 2本のクリープ歪曲線が交わるまでの時間

t_B : 2本のクリープ歪速度曲線が交わるまでの時間

3. 試験結果

(1) 田下凝灰岩

図-2には、田下凝灰岩の試験片4, 9, 10, 13の第1段階での結果を示した。なお以降の図では、載荷応力が各段階のクリープ応力に達した後、1s経過した時点でのクリープ歪を0として結果を整理した。クリープ歪は時間の経過とともに若干下に凸の曲線を描きながら増加している(図-2(a))。クリープ歪速度は経過時間の対数に対してほぼ直線的に減少しており、応力レベルが変化しても傾きはほとんど変わらないが、クリープ応力が大きいほど、同じ経過時間での歪速度は大きい(図-2(b))。これらの結果は、他の岩石でのクリープ試験結果と類似している⁷⁾。

次に、田下凝灰岩の試験片1と3の第1段階と第2段階の結果を図-3に示した。試験片1では、クリ

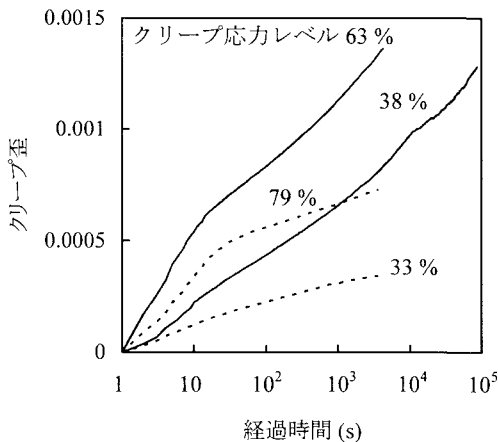
ープ応力レベル 60 % の第 1 段階を約 100 s 間継続した後、応力レベルを 80 % に増加させた。応力レベルが低い第 1 段階と高い第 2 段階の結果の関係は図-2 に示した結果と類似している。すなわち、応力レベルが高い第 2 段階の方が低い第 1 段階よりもクリープ歪、クリープ歪速度ともに大きい。また、第 2 段階の開始直後は、歪速度は時間の対数に対してほぼ直線的に減少している。つまり、第 2 段階のクリープ挙動には、第 1 段階で受けた応力履歴がほとんど影響していないことがわかる。一方、試験片 3 の第 2 段階の結果は第 1 段階の影響を受けており、クリープ開始後約 100 s 間は第 1 段階よりも歪速度が小さい。約 2000 s 経過後（図中の●）に第 1 段階と第 2 段階の 2 本のクリープ歪曲線が交わった後、急激に歪が増加していき、第 2 段階の開始から約 7700 s 経過後に破壊に至っている。

過去の研究により、クリープ応力に達するまでの載荷速度が遅いほど、初期のクリープ歪速度が小さ

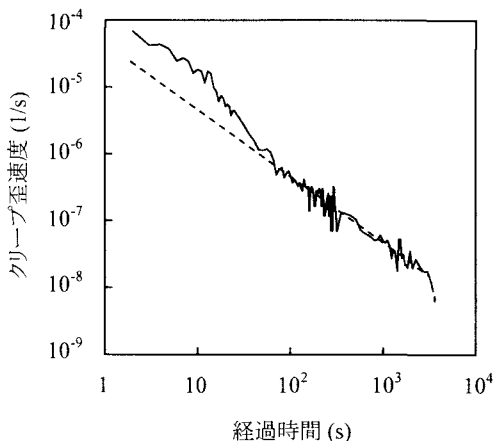
くなるということが定性的に知られている⁷⁾。しかし、多段階クリープ試験でも似た傾向の結果が得られることはあまり知られていない⁸⁾。試験片 3 では、第 1 段階の継続時間が長く、第 1 段階と第 2 段階のクリープ応力の差が小さかった。そのため、第 1 段階で受けた応力履歴が、第 2 段階でのクリープ挙動に影響したと考えられる。

(2) 幌延珪質岩

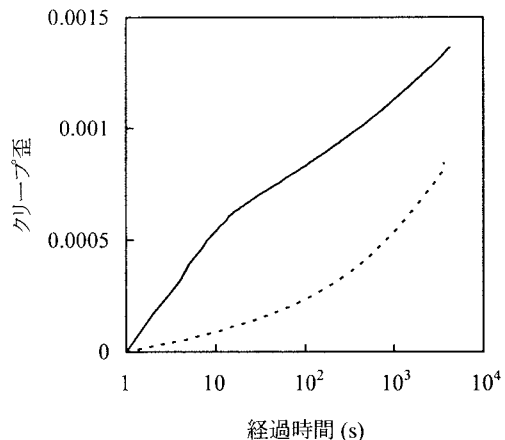
図-4(a) には、幌延珪質岩の第 1 段階の結果のうち、珪藻質泥岩の試験片 1 と 7、および、硬質頁岩の試験片 3 と 4 のクリープ歪の経時変化を示した。図より、幌延珪質岩も他の多くの岩石と同様に、同一岩種では応力レベルが大きいほど、同じ経過時間でのクリープ歪が大きいことがわかる。また図より、幌延珪質岩の比較的高い応力レベルでのクリープ試験では、クリープ歪は上に凸の曲線を描きながら増加していることがわかる。図-4(b) には硬質頁岩の試験片 3 のクリープ歪速度の経時変化を示したが、



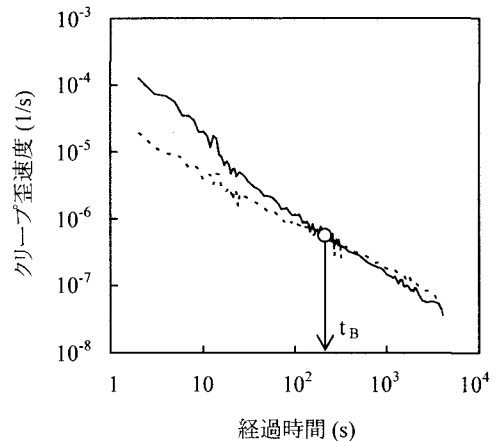
(a) クリープ歪の経時変化
実線：珪藻質泥岩、破線：硬質頁岩



(b) クリープ歪速度の経時変化
実線：硬質頁岩の応力レベル 79 % の結果
破線：試験結果が漸近する直線



(a) クリープ歪の経時変化



(b) クリープ歪速度の経時変化

図-5 珪藻質泥岩 試験片 1 の第 1 段階と第 2 段階のクリープ試験結果 実線：第 1 段階、破線：第 2 段階
 t_B ：2 本のクリープ歪速度曲線が交わるまでの時間

図-4 幌延珪質岩の第 1 段階のクリープ試験結果

クリープ開始直後の歪速度は比較的大きく、ある程度の時間が経過した後に、破線で示した直線に漸近していく。これは、他の岩石の湿潤状態でのクリープ試験結果には見られない傾向であるが、原因の一つとして間隙水の影響の可能性がある。幌延珪質岩は透水性が低く、かなり遅い载荷速度でも、強度試験中に間隙水圧が増加することがわかっている⁹⁾。本研究で用いたクリープ試験機では、試験片に加わる応力が約1 sで所定のクリープ応力に達する。そのため、クリープ開始直後は、排水されずに試験片中に残った間隙水の影響で、他の岩石とは若干異なるクリープ挙動を示した可能性がある。

珪藻質泥岩の試験片1で得られた、第1段階と第2段階の結果を図-5に示した。図より、第2段階のクリープ挙動は第1段階と大きく異なっていることがわかる。第2段階では開始直後から、若干下に凸の曲線を描きながらクリープ歪が増加しており、同じ経過時間で生じた歪は第1段階よりも小さい。また、第2段階でのクリープ歪速度は、両対数グラフ上で経過時間に対してほぼ直線的に減少している。その勾配は第1段階よりも小さく、第2段階のクリープ歪速度が第1段階とほぼ等しくなるのは約200 s経過後（図中の○）である。なお、珪藻質泥岩の他の試験片や硬質頁岩の結果も定性的には図-5とほぼ同じであった。

珪藻質泥岩と硬質頁岩でも、田下凝灰岩と同様に、第1段階で受けた応力履歴が、第2段階でのクリープ挙動に影響することがわかった。

4. 1次クリープに及ぼす応力履歴の影響

田下凝灰岩と幌延珪質岩では、多段階クリープ試験の第2段階のクリープ挙動が、第1段階で受けた応力履歴の影響を受けることがわかった。また、種々に条件を変えた田下凝灰岩の試験結果により、第1段階の継続時間が長く、第1段階と第2段階のクリープ応力の差が小さいほど、第2段階が受ける応力履歴の影響が大きいたことがわかった。以下では、1次クリープに着目して応力履歴の影響を定量的に検討するとともに、岩種間での比較を行った。

田下凝灰岩の試験片3では、図-3(a)のように第1段階と第2段階のクリープ歪曲線が●で交差した。そこで、第2段階の開始から2本のクリープ歪曲線が交わるまでの時間 t_A を、応力履歴の影響を表す指標とした。図-6には、第1段階の継続時間 t_1 と t_A との関係を示した。図には、第1段階の応力レベルを50%、第2段階を60%とした試験片9の結果を◇で示したが、試験期間中に2曲線が交わらなかったため矢印を付けて区別した。◆で示した試験片3～8では、 t_1 の増加とともに t_A も増加し、両者の関係は図中の直線で近似できることがわかる。しかし、◇で示した試験結果は直線からかなりずれている。すなわち、第1段階と第2段階のクリープ応力の比 $\sigma_{c1} / \sigma_{c2}$ がほぼ等しくても、それぞれの応

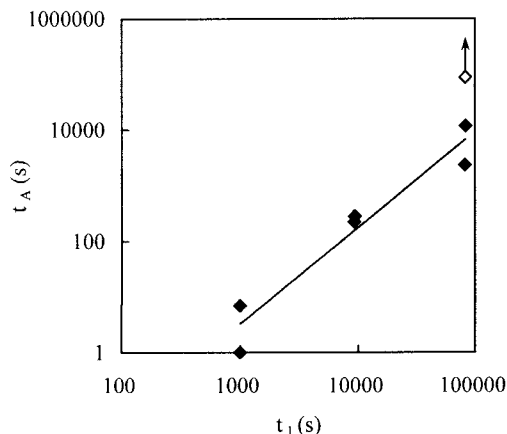


図-6 田下凝灰岩の t_1 と t_A の関係
◆：試験片3～8，◇：試験片9
 $\sigma_{c1} / \sigma_{c2} = 0.83 \sim 0.86$

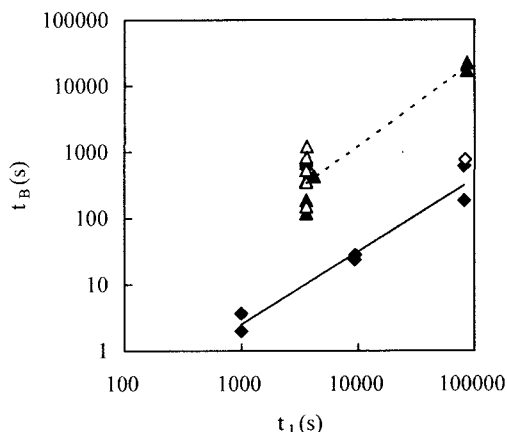


図-7 t_1 と t_B の関係
◆：田下凝灰岩 試験片3～8，
◇：田下凝灰岩 試験片9
▲：珪藻質泥岩，△：硬質頁岩，
 $\sigma_{c1} / \sigma_{c2} = 0.79 \sim 0.86$

力レベルが異なれば、 t_1 と t_A の関係は異なることがわかる。また、珪藻質泥岩と硬質頁岩では、すべての試験片で、試験期間中に2本のクリープ歪曲線は交わらなかった。つまり、 t_A は条件が異なる試験や岩種間での比較には適さないといえる。

今回行ったほとんどの試験で、図-3(b)と図-5(b)に示すように、第1段階と第2段階のクリープ歪速度曲線は○で交差した。そこで次に、第2段階の開始から2本のクリープ歪速度曲線が交わるまでの時間 t_B を、応力履歴の影響を表す指標とした。図-7には、第1段階の継続時間 t_1 と t_B との関係を示した。田下凝灰岩では、◆と◇のように試験条件が異なっているが、クリープ応力の比 $\sigma_{c1} / \sigma_{c2}$ がほぼ等しければ、試験結果は図中の直線でうまく近似できた。珪藻質泥岩と硬質頁岩の結果はほぼ一致し、表-2に示したように試験条件がかなり異なる場合でも、試験結果は図中の破線で近似できた。さらに、

t_1 と $\sigma_{c1} / \sigma_{c2}$ がほぼ等しい場合、幌延珪質岩の方が田下凝灰岩よりも t_B が大きくなることがわかった。つまり、田下凝灰岩よりも幌延珪質岩の方が、過去に受けた応力履歴をよく記憶しており、クリープ挙動に及ぼす応力履歴の影響が大きい可能性がある。

5. まとめ

岩石のクリープ挙動に及ぼす過去の応力履歴の影響を調べることは重要である。例えば、地下坑道の建設では段階的に掘削を行うことが多いが、この場合の坑道周辺岩盤内の応力は、多段階クリープ試験のように段階的に変化するであろう。また、長期間複雑な応力を受け続けてきた地下深部岩盤中に構造物を建設する場合は、過去の応力状態が未来の変形挙動に与える影響を把握することが重要と考えられる。

本研究では、凝灰岩と珪質岩を用いて多段階クリープ試験を行い、クリープ挙動に及ぼす応力履歴の影響を検討した。その結果、過去に受けた応力が小さく、その継続時間が短ければ、図-3 の試験片 1 のように、応力履歴はクリープ挙動にほとんど影響を及ぼさないことがわかった。この知見は多段階クリープ試験を行う際に重要であり、1 次クリープ特性を精度良く調べるためには、前段階の影響が次段階に及ばないように、各段階のクリープ応力の差がある程度大きくする必要がある。

一方、第 1 段階のクリープ応力が大きく、継続時間が長い場合、第 2 段階での初期クリープ歪速度が小さくなる可能性があることがわかった。室内試験結果と原位置での岩盤の挙動を結びつけることは難しいが、過去に大きな応力を受け続けた岩盤中に坑道を掘削した場合、初期の変位速度が小さかったとしても、図-3 の試験片 3 のように、ある時間が経過した後には急激に変形が進行する可能性がある。

本研究では、第 1 段階と第 2 段階の 2 本のクリープ歪速度曲線が交わるまでの時間 t_B を定義し、クリープ挙動に及ぼす応力履歴の影響を定量的に検討した。その結果、 t_B は岩種間の長期挙動特性を比較する上での一つの指標になり得る可能性があること、田下凝灰岩よりも幌延珪質岩の方が 1 次クリープに及ぼす応力履歴の影響が大きいことなどがわかった。

過去の研究により、幌延珪質岩の粘弾性的性質の程度は田下凝灰岩よりも大きいことがわかっている¹⁰⁾。つまり、 t_B で表される応力履歴の影響と岩石の粘弾性的性質とは密接な関係がある可能性がある。この知見は、構成方程式の構築や検証にも役立つ成果と考えられる。しかし、現状では試験結果の蓄積が不十分のため、今後、より多くの岩種で検討するとともに、試験条件を種々に変化させて、その影響を調べる必要がある。また、室内試験に供する岩石試験片は、地下深部では三軸圧縮応力状態であり、採取によりその応力が解放される。このような複雑な応力履歴を調査し、室内試験結果との関係を検討することも今後の課題である。

謝辞：実験に際して、核燃料サイクル開発機構の高倉望氏（現 東急建設株式会社）にご助力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 山口梅太郎，西松裕一：岩石力学入門第 3 版，東京大学出版会，1997
- 2) 大久保誠介：コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討，資源と素材，108，pp.601-606，1992
- 3) 三村宏，町田進：基礎材料強度学，培風館，pp.136-148，2000
- 4) 山口勉，大久保誠介，エンリコ マラニーニ，成田孝：稲田花崗岩の周圧下の多段階クリープ試験と長期寿命予測，資源と素材，116，pp.91-96，2000
- 5) サイクル機構：幌延深地層研究計画平成 15 年度調査研究成果報告，サイクル機構技術資料，JNC TN5400 2004-001，2004
- 6) 大久保誠介，福井勝則：田下凝灰岩の長期クリープ試験と構成方程式，資源と素材，118，pp.36-42，2002
- 7) 福井勝則，大久保誠介，西松裕一：一軸圧縮応力下での岩石のクリープ特性，資源と素材，105，pp.521-526，1989
- 8) 羽柴公博，大久保誠介，福井勝則：泥岩の多段階三軸圧縮クリープ試験，資源・素材 2003（宇部）企画発表・一般発表（A）（B）講演資料 岩盤工学，pp.59-60，2003
- 9) 山本卓也，青木智幸，瀧治雄：堆積軟岩の長期挙動に関する試験研究計画の検討，サイクル機構技術資料，JNC TJ1400 2001-007，第 3 章，2002
- 10) 羽柴公博，大久保誠介，福井勝則：岩石のピーク強度および残留強度の載荷速度依存性，資源と素材，121，pp.11-18，2005

EFFECT OF STRESS HISTORY ON CREEP BEHAVIOR OF ROCK

Kimihiko HASHIBA, Hiroya MATSUI, Toshinori SATO and Yasuhiro SENO

In this study, multi-stage creep tests were conducted with tuff and siliceous rock. The creep stresses of each stage and the duration of the first stage were variable, and the effect of the stress history on creep behavior was examined. It was found that the primary creep strain rate might be decreased by the stress history. In particular, the effect of the stress history was notable after the first stage with the large creep stress and the long duration. It was also found that the effect of the stress history of siliceous rock was larger than that of tuff.