

上総層群堆積軟岩の 一軸クリープ特性の温度依存性

岡田 哲実^{1*}・平賀 健史²・高倉 望³・谷 和夫⁴・澤田 昌孝¹・池野谷 尚史³

¹財団法人 電力中央研究所 地球工学研究所（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）

²株式会社 セレス 我孫子事業所（〒270-1166 千葉県我孫子市我孫子1646電力中央研究所内）

³東急建設 株式会社 技術本部 土木エンジニアリング部（〒150-8340東京都渋谷区1-16-14）

⁴横浜国立大学大学院 工学研究院（〒240-8501神奈川県横浜市保土ヶ谷常盤台79-5）

*E-mail: t-okada@criepi.denken.or.jp

本研究では、温度の影響を考慮した堆積軟岩空洞の長期安定性評価手法を確立する目的で、上総層群の堆積軟岩空洞内にて、加熱試験を実施中である。これに先立ち現地の泥岩を用いて高温下の一軸クリープ試験を実施した。その結果、過去に実施された凝灰岩の試験結果ほど明瞭な温度依存性を示さなかったものの、温度が80、90℃の試験ケースでは、破壊時間と最小ひずみ速度に温度による影響が示唆された。また、破壊時間と最小ひずみ速度の関係は温度や応力比によらずユニークな関係が得られた。

Key Words : *high temperature, unconfined compression test, creep, soft rock*

1. はじめに

従来、地下発電所等に代表される大深度地下利用では、硬質な岩盤中に地下空洞が建設されることが多く、長期間の力学的安定性は主要な検討課題にならなかった。これに対して今後は、透水性の低い堆積軟岩を対象として、エネルギー貯蔵や廃棄物処分などの新規地下利用が期待されている。堆積軟岩の特徴として、長期の変形（クリープ）が比較的大きく、熱や水などの外部環境の変化に影響を受けやすいことが挙げられる。そのため、外部環境の変化を考慮した堆積軟岩空洞の長期安定性評価手法の確立が望まれている。

そこで本研究では、現地での計測技術の検討と熱・水・応力の連成解析コード¹⁾の検証を行うため、堆積軟岩中に構築した地下空間実験場において、高温条件（最大約90℃）を負荷する原位置加熱実験を実施中である²⁾。本論文では、現地からサンプリングした泥岩のコア試料を用いて実施した高温下の一軸クリープ試験の結果を報告する。また、過去に実施された凝灰岩（大谷石）の高温下の一軸クリープ試験結果³⁾と比較することにより、泥岩のクリープ特性の温度依存性についても検討した。

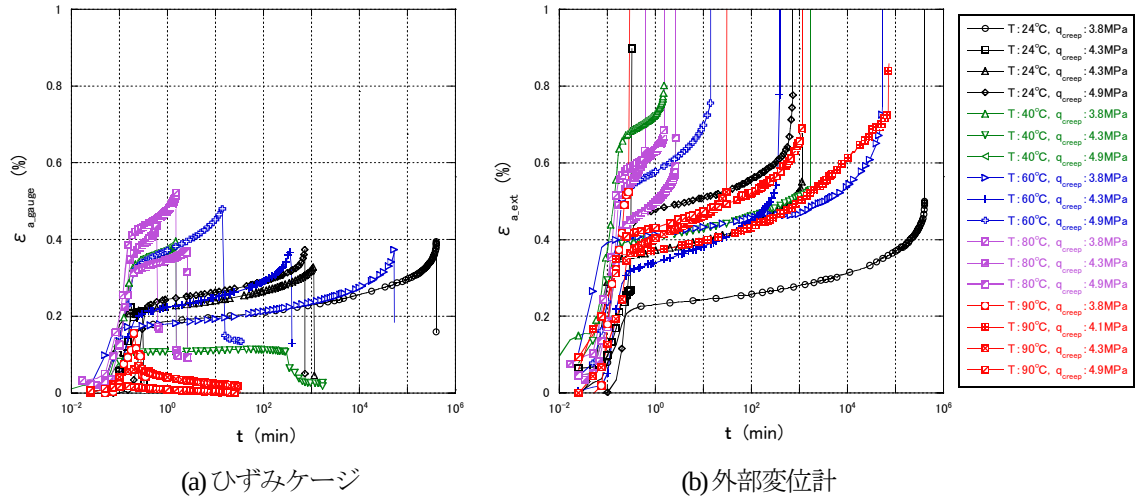
2. 試料

試料は原位置加熱実験を実施する神奈川県相模原市郊外のGL-50mの地下実験場から採取した。なお、地下実験場は掘削から約14年が経過している。同深度は上総層群の泥岩層で構成されている。底盤から長さ約5mのボーリングを計4本実施し、採取後すぐに約10cmに切断し、ラップで包んだ後、真空コアパックに保存した状態で試験室に保管した。

一軸クリープ試験に用いた供試体の湿潤密度と超音波速度の平均値±標準偏差は、 $\rho_t = 19.93 \pm 0.19$ (kN/m³)、 $V_p = 2150 \pm 64$ (m/s)、 $V_s = 931 \pm 48$ (m/s) であった。

3. 一軸クリープ試験の概要

供試体はひずみゲージを貼った後、6日以上水中で脱気して飽和させた。三軸セル内に供試体を設置した後、側圧は負荷しないためメンブレンは用いずに、セル内を水で満たし、セル外部に設置したヒーターでセル水を加熱することにより、温度を負荷した。セル内部、つまり供試体内部に温度むらが生じないようにセル水は常にポンプにより循環させた。



図－1 载荷からの時間と軸ひずみの関係

昇温速度は厳密に制御されていないが、およそ0.4～0.5°C/min程度である。供試体の温度が一定になった後、ひずみゲージの出力値の安定を待って軸荷重を载荷した。結果として载荷までに所定の温度を負荷した時間は、12～25時間程度である。重錘式の载荷装置により、軸ひずみ速度2.0%/minを目標として手動でハンドルを回すことにより载荷した。

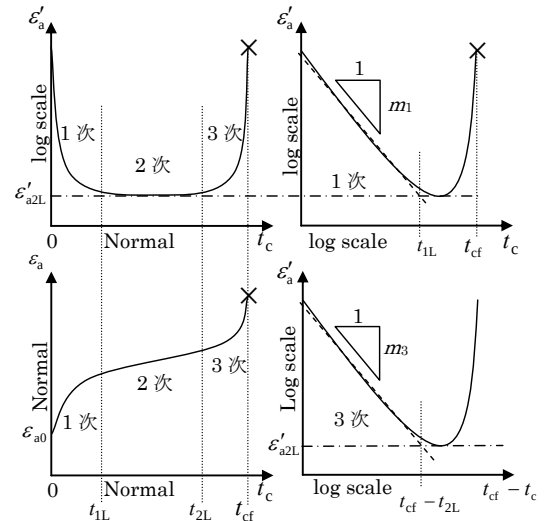
試験ケースを表－1に示す。軸荷重については、温度 T (°C)における一軸圧縮強さ $q_u(T)$ に対する载荷（クリープ）応力 q_{creep} を応力比 $q_{creep}/q_u(T)$ として定義し、载荷条件を決定した。応力比は $q_{creep}/q_u(T)=0.5\sim0.9$ 、温度は $T=24$ (常温) , 40, 60, 80, 90°Cで実施した。

4. 試験結果および考察

(1) ひずみと時間の関係

軸荷重载荷からの経過時間 t とひずみゲージで計測された軸ひずみ $\varepsilon_{a, gauge}$ 、外部変位計で計測された軸ひずみ $\varepsilon_{a, ext}$ の関係を図－1に示す。ベディングエラーの影響により、外部変位計で計測されたひずみは、ひずみゲージで計測されたひずみと比較し、ひずみを過大評価している。一方、ひずみゲージの計測結果のうち、特に90°Cの条件については、ひずみが载荷中に負の方向に変化しているものが見られる。これはひずみゲージが途中で剥がれてしまったためと考えられる。高温時のひずみ計測については今後の課題である。

ひずみ－時間関係を見ると、多くの結果は载荷応力の増加とともにひずみが急増した後、ひずみが漸増し、破壊直前でまたひずみが急増する傾向を示している。また、図－1からは、明瞭な温度依存性を確認することはでき



図－2 クリープモデルの概要³⁾

ない。

(2) 実験結果の整理

加藤らの提案したクリープモデル³⁾を用いて、実験データを整理するとともに、柴田らが行ったの凝灰岩の試験結果⁴⁾と比較を試みる。そのクリープモデルの概要を図－2に示す。ひずみ速度が最小となるまでの1次クリープ、ひずみ速度が一定の2次クリープ、破壊直前の3次クリープに分けられる。クリープを開始してから経過時間を t_c とし、その時の軸ひずみを ε_0 とする。図の関係から各クリープ段階を以下に定義する。

1) 最小となる軸ひずみ速度が一定となる部分を2次クリープのひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_{aL}$ （最小ひずみ速度）とする。

表－１ クリープ特性値

T (°C)	q_{creep} (MPa)	$q_{creep}/q_u(T)$	$\dot{\epsilon}'_{a2L}$ (%/min)	t_{cf} (min)	t_{c1} (min)	t_{c2} (min)	m_1	m_3	ϵ_{a0} (%)
24	3.77	0.51	2.17E-07	397426	114213	373683	-0.849	-0.871	0.189
24	3.86	0.52	-	-	-	-	-	-	※1
24	4.30	0.58	5.09E-05	1149	466	686	-0.747	-0.289	0.226
24	4.54	0.61	7.50E-05	731	265	465	-0.747	-0.807	0.246
40	3.71	0.53	2.67E-02	1.34	0.86	1.06	-0.705	-0.940	0.379
40	4.25	0.61	2.12E-05	1715	1289	1104	-0.807	-0.546	※2
40	4.83	0.70	2.00E-04	213	74.4	121	-0.722	-0.620	0.242 ※5
60	3.74	0.59	1.84E-06	53478	10709	38553	-0.832	-0.644	0.181
60	4.30	0.68	1.99E-04	386	103	207	-0.778	-1.243	0.225 ※5
60	4.84	0.76	6.67E-03	14.9	5.43	12	-0.597	-0.215	0.376
80	3.70	0.64	6.24E-02	1.37	0.12	1.05	-0.333	-0.589	※2
80	4.31	0.75	1.40E-01	0.47	0.15	0.26	-0.674	-0.297	0.347
80	4.80	0.84	1.48E-02	2.43	1.08	2.10	-0.660	-0.454	0.350 ※5
90	3.72	0.68	3.03E-01	0.08	-	0.03	-0.8533	-3.224	※2, ※3
90	4.00	0.73	2.56E-06	73287	23203	-	-0.7824	-	※2, ※4
90	4.28	0.79	2.87E-03	32.1	8.38	24.2	-0.8287	-0.458	※2
90	4.76	0.87	9.81E-05	1178	474	887	-0.7752	-0.8171	※2

※1：載荷中に破壊，※2：ひずみゲージの計測が失敗したため，外部変位計で評価，※3：載荷直後に破壊したため t_{c1} 不明

※4：未破壊，※5：ゲージ2枚のうち1枚が計測失敗したため1枚の結果で評価

2) 1次クリープにおいて、軸ひずみ速度と経過時間の両対数関係を直線近似し、この傾きを m_1 とする。また、この直線と二次クリープの $\dot{\epsilon}'_{a2L}$ との交点の時間を t_{1L} とし、1次クリープの範囲を定める。

3) 3次クリープにおいて、軸ひずみ速度とクリープ破壊時間 t_d までの残りの時間 $t_d - t_c$ の両対数関係を直線近似し、この傾きを m_3 とする。2次クリープの $\dot{\epsilon}'_{a2L}$ との交点の時間を t_{2L} とし、2次クリープと3次クリープの範囲を定める。

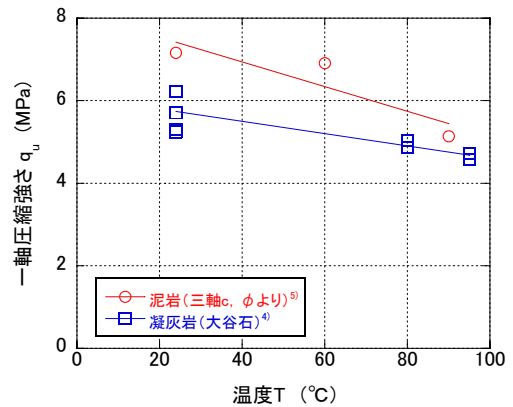
4) 1次クリープの開始時間は、誤差により設定荷重に到達しない場合を考慮し、載荷軸応力が $q_a = 0.98 \times q_{creep}$ となった時点とした。また破壊時間 t_d は一定荷重を完全に保持できなくなったと判断される $q_a = 0.8 \times q_{creep}$ となった時点とした。

(3) 一軸圧縮強さの温度依存性

一軸クリープ試験と同じ場所の泥岩を用いて実施した多段階三軸試験の結果⁵⁾から、一軸圧縮強さの温度依存性を推定した(図－3)。同図中にクリープ特性を比較する凝灰岩の試験結果⁴⁾も示す。両岩種ともに温度の上昇にともない一軸圧縮強さが低下する傾向を示す。他の軟岩を対象とした既往の実験⁶⁾でも同様の傾向が見られることから、温度の上昇に伴う強度低下は、軟岩の一般的な特性と考えられる。

図－3の関係から泥岩の一軸圧縮強さ $q_u(T)$ (MPa) と温度 T (°C) の関係を以下のとおり推定し、応力比 $q_{creep}/q_u(T)$ を求めた。

$$q_u(T) = 8.13 - 0.0298T \quad (1)$$



図－3 q_u の温度依存性

(4) 各クリープ特性値の応力比との関係

図－2に示した各クリープ特性値と応力比 $q_{creep}/q_u(T)$ との関係を凝灰岩の既往の実験結果⁴⁾と合わせて図－4に示す。各パラメータについては、次のとおりである。

1) ϵ_{a0}

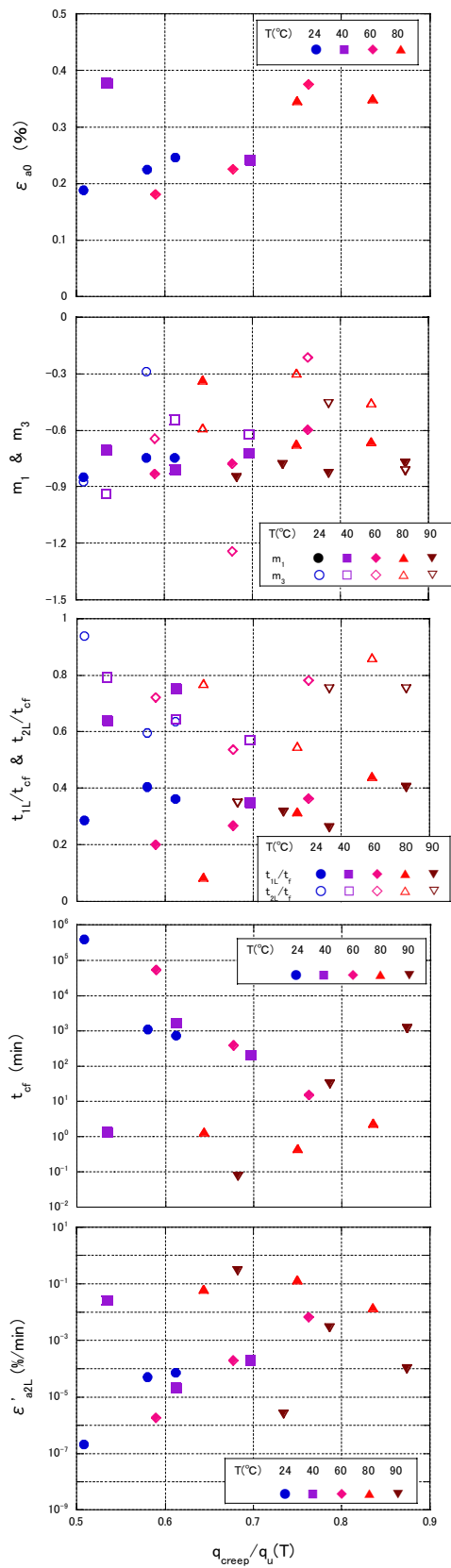
クリープ開始前のひずみ ϵ_{a0} は、応力比 $q_{creep}/q_u(T)$ の増加に伴い、増加する。データがややばらつくが、その傾向は概ね凝灰岩の実験結果と同様である。明瞭な温度依存性は見られない。

2) m_1 & m_3

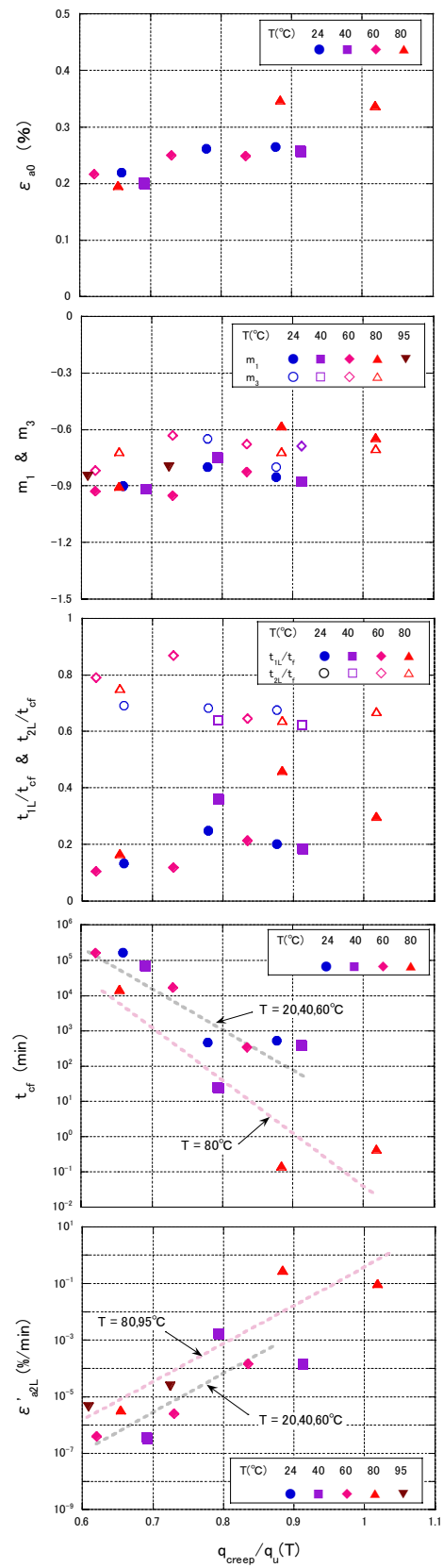
凝灰岩の結果と比較してばらつきは大きいものの、クリープ曲線の傾き m_1 、 m_3 は、応力比に依存せず、概ね一定である。明瞭な温度依存性は見られない。

3) t_1/t_d & t_2/t_d

凝灰岩の結果と比較してばらつきは大きいものの、 t_1/t_d と t_2/t_d は、応力比に依存せず、概ね一定である。明瞭な温度依存性は見られない。



(a) 泥岩



(b) 凝灰岩⁴⁾

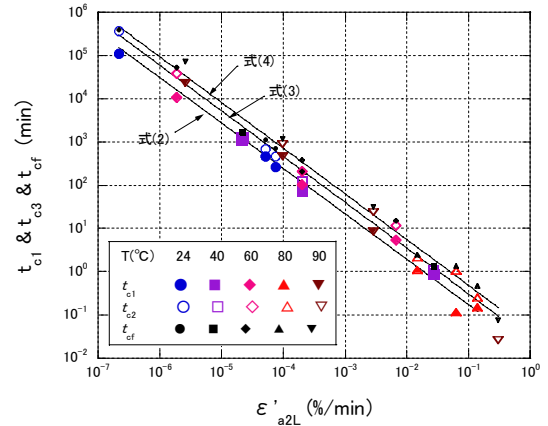
図-4 一軸クリープ試験から得られたクリープ特性値と応力比との関係

4) t_{cf}

破壊時間 t_{cf} は、応力比の増加に伴い減少する。特に 80℃、90℃ の高温時において特異なデータが見られるが、その傾向は概ね凝灰岩の実験結果と同様である。凝灰岩で見られたような明瞭な温度依存性は示さないものの、80℃、90℃ の高温時のデータに特にばらつきが大きいことから、温度による何らかの影響が示唆される。

5) ε_{a2L}

最小ひずみ速度 ε_{a2L} は、応力比の増加に伴い、増加する。破壊時間と同様に、特に 80℃、90℃ の高温時において特異なデータが見られるが、傾向は概ね凝灰岩の実験結果と同様である。



図－5 最小ひずみ速度と t_1, t_3, t_{cf} の関係

(5) 各クリープ特性値の最小ひずみ速度との関係

凝灰岩の温度依存性を検討した柴田らの研究⁴⁾と同様に各クリープ特性値と最小ひずみ速度との関係を図－5～図－7に示す。

1) ε_{a2L} と t_1, t_3, t_{cf} の関係 (図－5)

上述したように最小ひずみ速度 ε_{a2L} と破壊時間 t_{cf} には、80℃、90℃ の高温時において特異なデータが見られるが、 ε_{a2L} と t_{cf} の両対数関係は応力比や温度によらずユニークな直線性が認められる。同様に t_1, t_3 にも直線関係が認められる。これらの関係式を以下に示す。

$$\log t_{c1} = -1.05 \log \varepsilon'_{a2L} - 1.82 \quad (2)$$

$$\log t_{c2} = -1.06 \log \varepsilon'_{a2L} - 1.59 \quad (3)$$

$$\log t_{cf} = -1.06 \log \varepsilon'_{a2L} - 1.38 \quad (4)$$

2) ε_{a2L} と m_1, m_3 の関係 (図－6)

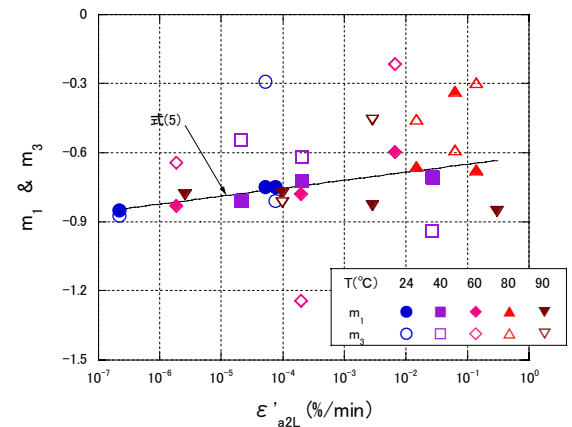
m_1 と最小ひずみ速度には、応力比によらず直線性が認められるが、 m_3 については応力比の関係と同様、ばらつきが大きく無関係に見える。したがって、ここでは m_1 の関係式のみ以下に示す。応力比との関係と同様に温度依存性は見られない。

$$m_1 = 0.034 \log \varepsilon'_{a2L} - 0.62 \quad (5)$$

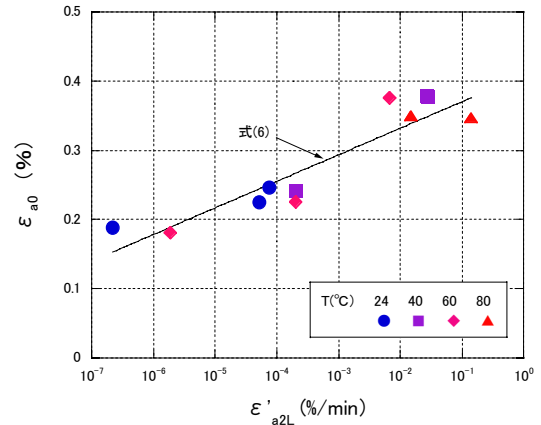
3) ε_{a2L} と ε_{a0} の関係 (図－7)

ε_{a0} と最小ひずみ速度には、応力比によらず直線性が認められる。応力比との関係と同様に温度依存性は見られない。

$$\varepsilon_{a0} = 0.038 \log \varepsilon'_{a2L} - 0.41 \quad (6)$$



図－6 最小ひずみ速度と m_1, m_3 の関係



図－7 最小ひずみ速度と ε_{a0} の関係

以上のとおり、凝灰岩を用いた既往の研究⁴⁾と同様に、式(2)～(6)を用いることにより、泥岩についても応力比や温度に依存せず、ほとんどのクリープ特性値を最小ひずみ速度 ε_{a2L} より推定することがわかった。 m_3 については、最小ひずみ速度に依存しないものの、データのばらつきが大きいことから、精度の高い予測には何らかの工夫が必要と考えられる。

5. まとめ

泥岩の高温下の一軸クリープ試験を実施し、既往のクリープモデルを用いて、そのクリープ特性値について検討した結果、以下の結論が得られた。

(1) 最小ひずみ速度と破壊時間以外のクリープ曲線の形状を決定する特性値については、凝灰岩と同様に温度

依存性は見られなかった。

(2) 最小ひずみ速度と破壊時間については、凝灰岩ほど明瞭な温度依存性は示さないものの、高温時のデータに特にばらつきが大きいことから、温度による何らかの影響が示唆された。

(3) 凝灰岩の結果と同様に、最小ひずみ速度と破壊時間の関係は、温度および応力比に依存せず、両対数表示で直線関係で示された。また、破壊時間以外のクリープ特性値についても最小ひずみ速度との間に高い相関が得られた。

6. 今後の課題

今後は、軸ひずみだけでなく、周ひずみの結果を整理する。また、拘束圧の影響を検討するため、三軸クリープ試験を実施する予定である。また今回、特に高温時のひずみ計測に失敗が多く見られたため、高温時のひずみ計測方法についても改善していく予定である。

謝辞：

現地試験の計画やコアサンプリングに際し、東急建設

株式会社の菊池智彦氏にご協力いただきました。また、実験を行うにあたり、株式会社セレスの平野公平氏にご協力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 澤田昌孝, 岡田哲実：地下施設力学的相互作用解析のための軟岩クリープモデルの開発，電力中央研究所研究報告，N04028, 2005.
- 2) 池野谷尚史, 岡田哲実, 高倉望, 澤田昌孝, 平野公平, 谷和夫：高温下における堆積軟岩の原位置試験（フェーズ I），第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム，2008，投稿中.
- 3) 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.
- 4) SHIBATA, K., TANI, K. and OKADA, T. : Creep behavior of tuffaceous rock at high temperature observed in unconfined compression test, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.1, pp.1-10, 2007.
- 5) 岡田哲実, 平賀 史, 高倉望, 谷和夫, 澤田昌孝, 吉川和夫：上総層群堆積軟岩の熱特性と高温下力学特性，第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.349-352, 2007.
- 6) 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），電力中央研究所研究報告，N04026, 2005.

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON UNCONFINED CREEP CHARACTERISTICS OF SEDIMENTARY SOFT ROCK

Tetsuji OKADA, Kenji HIRAGA, Nozomu TAKAKURA,
Kazuo TANI, Masataka SAWADA and Takafumi IKENOYA

In-situ heating test will be conducted to establish an evaluation method for the long-term stability of underground facilities in sedimentary soft rocks. Before the heater test, unconfined creep tests were conducted using the specimens retrieved at the site of the sedimentary soft rock, mudstone. The results demonstrate that the minimum strain rate and the time to failure appear to be slightly dependent on the temperatures over 80°C. However, unique relationships between the the minimum strain rate and the time to failure are found to be dependent on neither stress ratio nor temperature.