一軸圧縮荷重下での岩石のクリープ特性*

福井 勝則¹ 大久保 誠介² 西松 裕一³

[UDC 624.131.37]

Creep Behavior of Rock under Uniaxial Compression

by Katsunori FUKUI¹, Seisuke OKUBO² and Yuichi NISHIMATSU³

Uniaxial compression creep tests were conducted under comparatively high stress level (90 ~ 95% of strength) on Inada-granite, Tako-sandstone, cement-mortar and Akiyoshi-marble. The following results are obtained;

- 1) In all samples, the primary creep follows the logarithmic creep law.
- 2) The secondary creep where strain rate is nearly constant is apparent only for cement-mortar. For other samples, the strain rate continuously decreases at first, and increases after taking its minimum.
- 3) For Tako-sandstone and Akiyoshi marble, the value of creep strain at the minimum strain rate is nearly equal to half of the width of the complete-stress-strain curve cross-sectioned at corresponding creep stress. In case of granite, the creep strain at minimum strain rate is rather small, whereas, in case of cement-mortar nearly double of the width.
- 4) Strain rate at an arbitrary time in tertiary creep is inversely proportional to the residual time up to final failure. If this law is applied to rock mass, the failure of underground constructions may be predicted.
- 5) Except cement-mortar, the creep strain just before final failure (1 sec before failure) is nearly equal to the cross-sectional width of the complete-stress-strain curve. In case of cement-mortar, the creep strain just before final failure is as much larger than the width.

1 ~ 3. Faculty of Engineering, The University of Tokyo.

1. Graduate Student

2. Assoc. Prof., Dr.

3. Prof., Dr.

1. はじめに

クリープ試験は、実験方法が比較的簡単なので、岩石の時間依存性挙動を調べるために、古くから行なわれている^{1)~7)}。例えば Parsons ら¹⁾は、20種類の岩石に対して破壊荷重の50%程度でクリープ試験を行ない、大部分の岩石において、対数クリープ則に近い関係が見られたとしている。Kranz ら²⁾は、三次クリープ開始点の非弾性体積歪を測定し、同一岩種であれば、クリープ応力に関係なくほぼ一定であると報告している。Wawersik³⁾によると、クリープ挙動は、完全応力-歪線図と深くかかわっており、クリープ変形が進行し、強度破壊点以降の応力-歪曲線の位置まで歪が蓄積すると三次クリープになる。ここで挙げた報告以外にも多くの報告がなされているが、そのほとんどは一次クリープ、二次クリープ、あるいは三次クリープ開始点についてであり、三次クリープそのものについての報告は非常に少ない⁶⁾⁷⁾。三次クリープは、破壊現象と密接に関連を持つものと考えられ、その解

明はトンネル等の地下構造物の破壊の予知あるいは防止に役立つものと思われる。また、応力-歪線図上での強度破壊点以降の特性とも関連していると考えられ、時間依存性を考慮した構成方程式の構築にも役立つものと思われる。既報⁷⁾では、三城目安山岩および河津凝灰岩を用いて、クリープ試験を行ない、三次クリープにおいて、歪速度と残存寿命との間に簡単な法則があることを示した。この法則が多くの岩種において成り立つとすると、岩盤構造物の破壊の予知等に应用することが可能となる。よって本論文においては、4種類の試料を用いたクリープ試験を行ない、三城目安山岩および河津凝灰岩について既報で得られた知見が今回用いた試料に対しても成り立つかどうかを慎重に検討した。また、試料の種類による違い等についても検討したので、ここに報告する。

2. 実験装置と試料岩石

2.1 実験装置および実験方法

稲田花こう岩以外については、既報で報告したクリープ試験機を用いた。試験片には、1 s 以内に所定の応力が加わるようになっている。詳しくは、既報⁷⁾を参照されたい。

稲田花こう岩については、クリープ試験機の定格以上の荷重を加える必要があったので、最近当研究室で開発したデジタル制御

* 1988年8月9日受付 10月5日受理 昭和63年度日本鉱業会春季大会にて一部発表

1. 正会員 東京大学大学院 工学部資源開発工学科
2. 正会員 工博 東京大学助教授 工学部資源開発工学科
3. 正会員 工博 東京大学教授 工学部資源開発工学科

図1 サーボ試験機の概念図

方式のサーボ試験機を用いた。デジタル制御方式にした理由は、例えば変位速度一定試験からクリープ試験に変更するような、制御変数の変更を実験の途中で比較的簡単にこなせるためである。図1にサーボ試験機の概略図を示す。油圧源は、定格20MPaのもので、サーボ弁に圧力を供給している。荷重は、ロードセル（日本特殊測器製LRX-10T）で測定し、その出力は直流増幅器（ユニバース製AM30）を経て、A/D変換器に送られる。雑音防止のため、直流増幅器に内蔵の1kHzのローパスフィルタをかけた。変位は、差動変圧器式変位計（新光電機製6014）で測定し、その出力は増幅器（新光電機製1533）を経て、A/D変換器に送られる。雑音防止のため、4kHzのローパスフィルタをかけた。A/D変換器（システムポート筑波製SPIF-AD1）は、12bitの分解能をもち、1チャンネル当りの変換時間は20μsである。D/A変換器（CONTEC製DA12-4）は、12bitの分解能で、セトリグ時間は600nsである。A/D変換器とD/A変換器は、マイクロコンピュータ（NEC製PC-9801E）に組み込んである。制御は、比例制御によって行なった。デジタル制御方式では、信号は一定間隔（サンプリング時間）ごとにサンプルされ、その後ホールドされる。サンプリング時間が長いと制御性が劣化するが、今回の実験で用いたサーボ試験機のサンプリング時間は0.2ms程度であり、この値がサーボ弁の時定数に比べてはるかに小さいことから、サンプリング時間の影響はほとんどないと考えられる⁸⁾。クリープ試験の荷重時には、歪速度一定(10^{-5} s^{-1})で、設定荷重まで荷重を行ない、その後、荷重を一定としてクリープ試験を行なった。

変位の計測は70ms毎に行なった。測定期間が長期にわたるので、すべてのデータを記憶することは現実的に不可能である。幸いクリープ試験では変位が単調に増加していくので、A/D変換器の出力が指定された値を取った最終時間を順次記憶することにした。この際重要になるのは、二次クリープ領域のように歪速度が小さくなる所での測定系の安定性であるが、今回の実験装置では、変動がA/D変換器の分解能、すなわち歪に換算して 10^{-5} 程度であり、問題とならなかった。

2.2 試料

試料としては、多胡砂岩、セメントモルタル、中粒秋芳大理石および稲田花こう岩を用いた。セメントモルタルは、ロックボルト用のケー・エフ・シー製ドライモルタルを使用し、セメント：砂：水＝1：0.5：0.5の混合比で調製したものを用いた。セメントモル

図2 稲田花こう岩のクリープ歪の経時変化

タルは、製作後しばらくの期間力学的特性が変化しやすいので、製作してから3～4年経たしたものを用いた。試験片としては、直径2.4cm、高さ5.2cmの円柱形に整形したものを用いた。試験片の両端面は、平面研削盤により、平行度±0.02mm以内に仕上げた。試験片は、整形後1ヵ月以上自然乾燥させてから使用した。試料の物性値、クリープ応力およびクリープ寿命を表1に示す。

3. クリープ実験結果

3.1 一次クリープ領域における歪、歪速度の経時変化

図2は、荷重後1sでの値を原点とした稲田花こう岩のクリープ歪 ϵ_2 の経時変化を片対数グラフ上に示したものである。図より、クリープ歪は約50s経過した後直線的に増加してゆき、その後急速に傾きを増して最終的な破壊に至っているのがわかる。これより、一次クリープ領域では、クリープ歪が経過時間の対数に比例するという対数クリープ則が成り立っていることがわかる。このことは、他の試料でも成り立っている。よって、一次クリープ領域においては荷重後1sでの値を原点としたクリープ歪と経過時間 t (s)との間には次式のような関係があることがわかる。

$$\epsilon_2 = a_1 \cdot \log(t) \quad (1)$$

直線部分において求めた(1)式の a_1 の値を表2に示す。表2のうち三城目安山岩と河津凝灰岩についての数値は既報の実験結果⁷⁾より求めた。稲田花こう岩、秋芳大理石、多胡砂岩に比べて、セメントモルタル、三城目安山岩、河津凝灰岩では(1)式の傾き a_1 が大きな値となっていることがわかる。

図3に稲田花こう岩について得られたクリープ歪速度 $\dot{\epsilon}_2$ (s^{-1})と経過時間 t (s)の関係を両対数グラフに示す。図において、クリープ歪速度-時間曲線は、約50s経過した後ほぼ-1の傾きを持っているが、次第に傾きが水平に近付き、その後急激に増加しているのがわかる。荷重後10s経過した時の歪速度は、稲田花こう岩以外の試料では、既報⁷⁾に示したとおり、ほぼ 10^{-5} s^{-1} 程度であったが、稲田花こう岩では、 10^{-6} s^{-1} 程度であった。稲田花こう岩以外では1s以内に設定荷重まで荷重を行なっているが、稲田花こう岩では、サーボ試験機を用いて歪速度で約700sかけて荷重したため、初期の歪速度が小さくなったものと思われる。

表1 試料の物性値及びクリープ応力・寿命

	圧縮強度* (MPa)	ヤング率* (GPa)	圧裂引張強度 (MPa)	見掛け比重	クリープ応力 (MPa)	幾何平均寿命 (s)	算術平均寿命 (s)	クリープ 試験個数
稲田花こう岩	169	24.0	11.3	2.61	155	$3.6 \cdot 10^4$	$3.3 \cdot 10^5$	6
多胡砂岩	32.5	8.13	4.34	2.08	31.0	$7.0 \cdot 10^3$	$9.2 \cdot 10^3$	4
セメントモルタル	71.5	14.3	5.27	2.09	64.0	$1.1 \cdot 10^5$	$1.0 \cdot 10^6$	12
中粒秋芳大理石	57.8	27.2	5.29	2.60	53.8	$4.7 \cdot 10^3$	$1.1 \cdot 10^6$	10

* 歪速度 10^{-5} s^{-1} での一軸圧縮試験による。

表2 クリープ試験結果より求めた諸値

	(1)式の a_1 (10^{-4})	(3)式の a_2 (10^{-4})	(4)式の b_3	最小歪速度となった時のクリープ歪 (10^{-6})	(6)式の n^*
稲田花こう岩	0.7	1.4	-4.2	300 ~ 400	51
多胡砂岩	1.0	1.0	-4.4	300 ~ 400	72
セメントモルタル	2.3	0.6	-4.6	2300 ~ 4000	24
中粒秋芳大理石	0.4	0.4	-4.7	300 ~ 400	64
河津凝灰岩	1.7	1.3	-4.2	500 ~ 900	58
三城目安山岩	2.4	2.4	-4.0	900 ~ 1100	35

* 多胡砂岩, セメントモルタルは, 文献 13) より, 他は文献 12) より引用。

図3 稲田花こう岩のクリープ歪速度の経時変化

3・2 三次クリープ領域における歪, 歪速度の経時変化

図2, 3のように, 経時変化の対数を横軸に取ったのでは, 三次クリープ領域での歪の変化を詳しく議論し難いので, 残存寿命 T という概念を導入した⁷⁾。

$$T = t_F - t \quad (2)$$

ただし, t_F は破壊寿命, t は試験開始時よりの経過時間である。この残存寿命の対数を横軸に取り, 各試料の実験結果を表したのが, 図4, 5である。図4より, 多胡砂岩, セメントモルタル, 秋芳大理石では, 残存寿命が小さくなった時すなわち破壊に近付

くとクリープ歪と対数表示による残存寿命との間に直線関係が見られ, 次式で示されるような実験式が成り立っていることがわかる。

$$\varepsilon_2 = a_2 \cdot \log(T) + b_2 \quad (3)$$

直線部分において求めた(3)式の a_2 の値を表2に示す。稲田花こう岩と河津凝灰岩では, クリープ歪-残存寿命曲線はかなり複雑に曲がりくねっているが, これを直線近似して(3)式に当てはめて求めた a_2 も表2に示した。表2より, 秋芳大理石, セメントモルタルでは a_2 の値が小さく, 三城目安山岩, 河津凝灰岩では a_2 の値が大きくなっているが目立つ。また表2より, セメントモルタルについては, 一次クリープにおける傾きの方が, 三次クリープの傾きの4倍程度になっているが, 他の試料では, ほぼ同じ値となっていることがわかる。セメントモルタルを除き, 一次クリープにおける歪の経時変化と, 三次クリープにおける歪の残存寿命による変化が, 定性的にはもちろん定量的にも, ほぼ同じになっている。

図5より, 残存寿命が小さくなるに従い, すなわち破壊に近付くと, 歪速度が次第に増加しているのがわかる。しかも図より, 寿命の大小に拘わらず残存寿命の小さい領域すなわち破壊間近では, 残存寿命と歪速度の間には, 両対数グラフ上ではほぼ直線関係が見られる。このことは, (3)式を時間で微分することによっても得られ, 式の形で表すと以下ようになる。

図4 クリープ歪と残存寿命との関係

図5 クリープ歪速度と残存寿命との関係

$$\log(\dot{\epsilon}_2) = -\log(T) + b_3 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし,

$$b_3 = \log(a_2 \cdot \log(e))$$

である。ここで、 e は自然対数の底である。(4)式における b_3 の値を表2に示す。(3)、(4)式は、既報で報告した三城目安山岩、河津凝灰岩についても成り立っており⁷⁾、かなり一般的に成り立つ

ものと考えられる。

(4)式を残存寿命について解くと以下のようになる。

$$T = a_2 \cdot \log(e) / \dot{\epsilon}_2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

a_2 がわかっていれば、歪速度を測定することにより、(5)式を用いて、残存寿命を推定することができる。実際の岩盤の計測において、歪の絶対量を測定することは、困難であるが、歪速度なら比較的容易に測定することができると思われる。(5)式のような関係が一般に成り立つとすれば、歪速度が加速的に増加している状態において、歪速度だけで、最終破壊までの時間の予知ができることになる。

3.3 クリープ歪と歪速度の関係

図6にクリープ歪と歪速度の関係を片対数グラフ上に示す。図より、はじめクリープ歪が増加するに従い、歪速度が減少してゆき、ある所で最小となり、その後徐々に増加しているのがわかる。最小歪速度となった時のクリープ歪を表2に示す。表より、実験の範囲では、 $3 \cdot 10^{-4} \sim 4 \cdot 10^{-3}$ 程度のクリープ歪になると、歪速度が減少より増加に転じているのがわかる。図6より、三城目安山岩、秋芳大理石、多胡砂岩、河津凝灰岩では、最小歪速度となった時のクリープ歪の所を軸として

ほぼ対称となっていることがわかる。ここで、一軸圧縮試験における応力-歪線図とクリープ歪との関係を表すため、クリープ歪速度が最小となる応力と歪の値を図7に小三角形で示す。ただし、図7に示した応力-歪線図は、応力帰還制御⁹⁾を用い、載荷速度 10^{-5} s^{-1} によって得られたものである。図より、三城目安山岩、

図6 クリープ歪速度とクリープ歪との関係

(a) 秋芳大理石, 多胡砂岩 (b) 稲田花こう岩, セメントモルタル (c) 三城目安山岩, 河津凝灰岩
 三角形は最小クリープ歪速度の時の応力と歪の値, 四角形は残存寿命が1sの時の
 応力と歪の値を表す。(c)の破線は強度破壊点からの除荷曲線を表す。

図7 応力 - 歪線図

秋芳大理石, 河津凝灰岩および多胡砂岩は強度破壊点以前, 以降の応力-歪曲線のほぼ中間に歪速度が最小となる所が存在していることがわかる。稲田花こう岩は, 応力-歪曲線の内側に存在するが多少強度破壊点以前の曲線に近付いた所に位置しているのがわかる。一方, セメントモルタルでは応力-歪曲線内ではなく, 強度破壊点以降の曲線の外側に存在しクリープ歪がかなり大きくなっていることがわかる。三城目安山岩, 河津凝灰岩については, 2つのクリープ応力で実験を行なっている。図7(c)に示すように, 歪速度が最小となる点は, 破線で示した強度破壊点から除荷した線の上に並ぶ。除荷中の非弾性歪の変化は小さいので, このことは, 強度破壊点における非弾性歪とクリープ試験における最小歪速度となった時の非弾性歪が同じ値であることを示している。換言すれば, 応力の大きさに関係なくある量の非弾性歪が岩石内に蓄積すると, その後は加速的に変形していくことになる。

破壊直前, すなわち破壊の1s前における応力, 歪の位置を小四角形で図7に示した。図より, 三城目安山岩, 河津凝灰岩, 秋芳大理石, 多胡砂岩では, ほぼ強度破壊点以降の応力-歪曲線上に存在していることがわかる。稲田花こう岩では, 多少応力-歪曲線の外側に位置しており, セメントモルタルは, かなり外側に位置している。

3・4 各岩石における特徴

表2よりわかるように, 稲田花こう岩では, 一次クリープ領域での傾き a_1 より, 三次クリープ領域での傾き a_2 の方が大きくなっている。また, 図4, 5において, 歪速度が一旦急激に増加する所が存在している。この歪速度が極大となる時刻を基準時刻 T_s とし, この基準時刻までの時間($T_s - t$)と歪速度を両対数グラフに示した例が図8である。図より, 基準時刻に近づくにつれて, 歪速度が次第に大きくなり三次クリープ領域と同様の傾向を示すことがわかる。また, 基準時刻からの経過時間($t - T_s$)を横軸として整理したのが図9である。図より, 基準時刻以降しばらくの間, 一次クリープ領域と同様に対数クリープ則に従った変形の起きていることがわかる。花こう岩では, 試験片の側面が徐々に剥離していく。このような側面での局部破壊が積み重なって最終的に有効断面積が減少し破壊する。よって, 図8, 9のような歪速度-時間曲線が得られたのは, 試験片の側面より岩石片が剥離したことが原因であると考えられる。稲田花こう岩では, 図8, 9

に挙げた例以外にも, 同様の傾向がしばしば現れた。このような現象が起こる原因について考えてみる。まず, 側面が破壊し有効断面積が減少すると, まだ破壊していない領域での応力が増加し, その結果弾性歪も増加するであろう。しかし測定上は, この弾性歪もクリープ歪に含まれてしまう。その結果, 一次クリープ領域での傾き a_1 に比べて, 三次クリープ領域での傾き a_2 の方が見掛け上大きくなったのであろう。

多胡砂岩は, 図7(a)よりわかるように, 強度破壊点以降, 応力-歪線図が負の傾きを持つクラスI岩石に分類され, 一軸圧縮試験を行なうと強度破壊点以降徐々にせん断面が形成される。よっ

図8 稲田花こう岩のクリープ歪速度と基準時刻までの時間との関係

図9 稲田花こう岩のクリープ歪速度と基準時刻からの時間との関係

て、三次クリープにおいても徐々にせん断面が形成されてゆき、図4(b)のように滑らかなクリープ曲線が得られたものと思われる。一方、河津凝灰岩の一軸圧縮試験を行なうと、強度破壊点以降、数回にわたりせん断面が急激に形成されることが観察される。よって、三次クリープ領域においても同様に、せん断面の形成が急激に起こり、図4(e)のようにクリープ歪-残存寿命曲線が歪曲するのではないかと考えられる。

セメントモルタル以外の試料では、歪速度が一定となる二次クリープ領域が明瞭に現れなかった。他方、図6(c)からもわかるようにセメントモルタルでは、かなり明瞭に二次クリープと呼ばれている歪速度がほぼ一定になる領域が現れることが多く、その歪速度は 10^{-9} s^{-1} 程度であった。また、図7(b)に示したように、クリープ歪がかなり大きく、歪速度が最小となる点が、応力-歪線図内に含まれない点でも、他の試料と異なる傾向を示した。セメントモルタルの二次クリープ領域で卓越している現象としては、応力腐食に基づくクラックの進展が挙げられる。クリープ試験では応力が一定であるので、クラック先端部の反応物の濃度が一定であれば、応力腐食に基づく歪速度はほぼ一定となり¹⁰⁾、二次クリープ現象を説明することができる。ただし、応力腐食が起きているかどうかは、今回の実験では判断できない。

4. 考察とまとめ

各試料についてそれぞれ1つのクリープ応力で実験を行なった。しかし破壊寿命のばらつきは、非常に大きいのが、図4よりわかる。この理由として、試験片の強度のばらつきが考えられる。通常、クリープ応力と破壊寿命 t_F の間に以下の式が成り立つとされている¹¹⁾。

$$t_F = a \cdot (\sigma_c / \sigma_{cr})^{n+1} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 σ_{cr} はクリープ応力、 σ_c は破壊応力、 a 、 n は岩石による定数である。一軸圧縮試験における破壊強度の載荷速度依存性より求めた n を表2に示す¹²⁾¹³⁾。今回行なったクリープ試験において、設定した応力は一定であったが、試験片ごとの破壊応力がある程度ばらついていてと考えられる。表2よりわかるように、 n の値はかなり大きく、(6)式より計算される破壊寿命がかなりばらつくことになる。よって、今回行なった実験においても、破壊寿命が5桁程度もばらついていたのではないかと考えられる。

本論文において4種類、既報⁷⁾で2種類の岩石を用いて、クリープ試験を行なった結果をまとめると次のようになる。一次クリープ領域においては、ほぼ対数クリープ則が成り立つ。三次クリープ領域では寿命、岩種に関係なく残存寿命と歪速度は両対数グラフ上で傾きがほぼ-1の直線となり、かつ残存寿命が1sの時、歪速度が $2 \cdot 10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ であった。また、(5)式を利用して、歪

速度より破壊までの時間を計算できることがわかった。この結果が実際の岩盤に成り立つとすれば、岩盤構造物の破壊予知を行ないうことになる。しかし、実際の岩盤では、応力状態、含水率、温度等の条件が複雑に絡みあっており、これらの条件下においても、今回得られた結果が成り立つかどうかを今後調べていく必要がある。

本研究では、従来より使用してきたクリープ試験機を用いた他、サーボ試験機をも併用してクリープ試験を行なった。サーボ試験機は岩石力学の分野において、かなり普及してきており、クリープ試験にも比較的簡単に用いることができるようになっている。しかしながら、三次クリープ領域のように、変位速度が加速的に増加していく領域においては、試験機の応答速度が追いつかず、設定した荷重に比べて実際の荷重が低下している可能性がある。今回の稲田花こう岩のクリープ試験においては、残存寿命が1sまでは応力が設定値を保っていたので、そこまでのデータを示した。しかし、もっと残存寿命が小さい所までのデータが望まれるので、そのためにはサーボ試験機の特性を考慮して得られたデータの信頼性についても十分に検討しておく必要がある。

参 考 文 献

- 1) Parsons, C. R. & Hedley, D. G. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **3**, p. 325~335 (1966)
- 2) Kranz, R. L. & Scholz, C. H. : J. Geoph. Res., **82** [30], p. 4893~4898 (1977)
- 3) Wawersik, W. R. : Proc. 14th U.S. Symp. Rock Mech., p. 85~106, The Pennsylvania State Univ., Pennsylvania (1972)
- 4) Scholz, C. H. : J. Geoph. Res., **73** [10], p. 3295~3302 (1968)
- 5) Cruden, D. M. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **11**, p. 67~73 (1974)
- 6) 磯部俊郎・富長勇作・Hardy Jr., H. R.・平松雅宏：日本鉱業会研究会・業績発表講演会講演要旨集(昭和56年度春期大会), p. 29~30 (1981)
- 7) 大久保誠介・西松裕一：日鉱誌, **102** [1181], p. 395~400 (1986)
- 8) 大久保誠介・福井勝則・西松裕一：日鉱誌, **104** [1200], p. 63~67 (1988)
- 9) 大久保誠介・西松裕一：日鉱誌, **100** [1161], p. 1052~1056 (1984)
- 10) Orson L. Anderson and Priscilla C. Grew : Review of Geophysics and Space Physics, **15**, p. 77~104 (1977)
- 11) B. J. S. Wilkins : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **24**, p. 379~380 (1987)
- 12) 大久保誠介・何昌榮・西松裕一：日鉱誌, **103** [1189], p. 177~181 (1987)
- 13) 福井勝則：東京大学修士論文, p. 52~54 (1987)