

長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究

大久保 誠介

要 旨

本研究は1994年度にはじめられた。1994年度には、空圧式クリープ試験機の改良を行った。1994年度の終わりに、稲田花崗岩を購入し、P波速度やシュミットハンマー試験などを行った。1995年度には、空圧式クリープ試験機を使用して、湿潤状態の田下凝灰岩のクリープ試験を行った。また、完全応力-歪曲線を求めるために、サーボ試験機を用いて一軸圧縮試験と一軸引張試験を行った。さらに、サーボ試験機を用いて稲田花崗岩の短期クリープ試験を行った。1996年度中に開始する予定である稲田花崗岩を用いたクリープ試験に備えて、油圧式クリープ試験機の改造を行った。狙いは、耐久性と安定性の向上である。特に測定装置は、完全に置き替えて新しいものとした。1996年度には、クリープ試験、圧縮試験および引張試験を行った。また、2つの様式（油圧式と空圧式）の周圧維持装置を検討した。1997年度は、従来の結果を踏まえた上で、クリープ試験、圧縮試験および引張試験などを行い、引き続き行ってきた田下凝灰岩の長期クリープ試験、稲田花崗岩の中期クリープ試験の結果について報告した。なお、クリープ試験はともに湿潤状態で行った。1998年度は田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。サーボ試験機を使用した中期クリープ試験も行った。白浜砂岩では、クリープ応力レベル17%でもかなりのクリープ変形が見られた。さらに、3種類の岩石を用いた三軸圧縮試験、一軸引張応力下での除荷・載荷試験を行った。

1999年度～2002年度は、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。また、多連油圧式クリープ試験機と可視化周圧ベッセルを開発し、試験データを取得することに成功した。

2003年度（本年度）も、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。試験期間は6年を越え、従来の報告がほとんどない長期間のデータを取得中といえる。この結果を第2章で述べる。第3章では、多連油圧式クリープ試験機を用いたクリープ試験結果を述べた。第4章では、種々の荷重条件に対する構成方程式の適用性について検討した。第5章では、開発した可視化ベッセルを用いた周圧下での実験結果について述べた。第6章では、中間温度領域におけるクリープ試験に関する検討結果について述べた。第7章では、10年間にわたる研究の経緯と成果を概観した。

本報告書は、東京大学が核燃料サイクル開発機構の委託研究契約により実施した研究の成果である。

核燃料サイクル開発機構担当部課室：

東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所 超深地層研究グループ

：東京大学工学部

Fundamental Study on long-term Stability of Rock
from the Macroscopic Point of View
(Research Document)

Seisuke Okubo

Abstract

In the fiscal year of 1994 when this project was started, a pneumatic creep testing machine was modified. At the end of the fiscal year of 1994, Inada granite was purchased, and the preliminary tests such as P-wave velocity measurement and Schmidt hammer testing were carried out. Through the fiscal year of 1995, a specimen of Tago tuff under water-saturated condition had been loaded in uniaxial condition in the pneumatic creep testing machine. In the fiscal year of 1995, the uniaxial compression and tension tests, and the short-term creep test of Inada granite were also carried out in the servo-controlled testing machines to obtain the complete stress-strain curves. A hydraulic creep testing machine which was planned to use in the next year was modified for long-term creep testing. Finally, a constitutive equation of variable compliance type was examined based on the experimental results. In the fiscal year of 1996, creep, compression and tension tests were carried out. Two types of pressure maintenance equipment (hydraulic and pneumatic types) were developed and examined. In the fiscal year of 1997, creep, compression and tension tests etc. were again carried out on the basis of the results heretofore. The experimental results of long-term creep testing of Tago tuff, middle-term creep testing of Inada granite were described. In both creep tests, samples were submerged in water. In the fiscal year of 1998, creep testing of Tago tuff was conducted. Results of relatively short-term (middle-term) creep conducted on a servo-controlled testing machine were also described. Sample rock was Sirahama sandstone that showed a considerably large creep strain in low stress level such as 17 % of the uniaxial compression strength. Results of triaxial compression test and uniaxial tension test including unloading-reloading tests were described.

In the fiscal years of 1999 - 2002, creep testing of Tago tuff was continuously conducted. A multi-cylinder hydraulic creep testing machine and a transparent triaxial cell were also developed and some data were successfully obtained.

In this year, creep testing of Tago tuff was continuously conducted and the total testing time exceeded 6 years. The data is considered to be very scarce and valuable (chapter 2). Short-term creep testing was also conducted in the multi-cylinder hydraulic creep-testing machine and the results were described (chapter 3). Applicability of a non-linear constitutive equation to various loading conditions was discussed (chapter 4). The results of triaxial compression test by the transparent triaxial cell were also described (chapter 5). Results of creep testing at mid-range temperature were described (chapter 6). Finally, the sequences and results of the 10-years investigation were overviewed in chapter 7.

This work was performed by The University of Tokyo under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison: Tono Geoscience Center, Mizunami Underground Research Laboratory,
Underground Research Group
:The University of Tokyo, Faculty of Engineering

目次

1.	はじめに	1
2.	堆積岩（田下凝灰岩）の長期クリープ試験	2
3.	結晶質岩用多連油圧式クリープ試験機による試験	11
3.1	はじめに	11
3.2	試料岩石	11
3.3	試験装置と試験方法	12
3.4	低応力レベルでのクリープ試験結果	13
3.5	高応力レベルでのクリープ試験結果	13
3.6	低応力レベルと高応力レベルでの試験結果の比較	14
3.7	長期クリープ寿命予測	15
3.8	まとめ	16
4.	広範囲の応力レベルに適用可能な構成方程式の開発	33
4.1	はじめに	33
4.2	構成方程式の解析的な検討	33
4.2.1	拡張した構成方程式	33
4.2.2	クリープ	34
4.2.3	強度試験	35
4.3	強度試験結果に基づく検討	37
4.3.1	一軸圧縮強度試験	37
4.3.2	一軸引張強度試験	38
4.3.3	強度試験結果に基づく構成方程式の定数	39
4.4	考察	40
4.5	まとめ	42
5.	可視化ベッセルを利用した三軸圧縮試験	59
5.1	はじめに	59
5.2	試験方法	60
5.2.1	試料岩石と試験装置	60
5.2.2	写真撮影と横変位の測定	60
5.3	三軸圧縮強度試験結果	61
5.4	三軸圧縮クリープ試験結果	62
5.5	考察	64
5.5.1	クリープ破壊直前の軸歪と横歪	64
5.5.2	クリープ寿命の予測	65
5.6	まとめ	66
6.	中間温度領域におけるクリープ試験	92
6.1	クリープ試験結果	92
6.2	クリープ試験後の試験片の一軸圧縮試験	95

7. まとめ	107
7.1 本年度のまとめ	107
7.2 10年間（平成6年度～平成15年度）のまとめ	108
参考文献	113

表 目 次

表 3 - 1	稲田花崗岩の物性値と (3 - 3) 式中のパラメータの値	17
表 3 - 2	試験条件およびクリープ寿命	18
表 4 - 1	構成方程式の定数の値	43
表 4 - 2	構成方程式の検証に用いた公表された試験結果	44
表 5 - 1	田下凝灰岩の物性値と , (5 - 3) 式中のパラメータ a_3^z (軸方向) および a_3^x (横方向) の値	67
表 7 - 1	長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎研究	112

目 次

図 2 - 1	空圧クリープ試験機の概略図	4
図 2 - 2	クリープ歪および空圧の経時変化	5
図 2 - 3	補正したクリープ歪および空圧の経時変化	6
図 2 - 4	補正したクリープ歪の経時変化	7
図 2 - 5	クリープ歪の経時変化 岩石：田下凝灰岩，環境：湿潤状態， クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1 MPa)の 30 %	8
図 2 - 6	クリープ歪速度の経時変化 岩石：田下凝灰岩，環境：湿潤状態， クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1 MPa)の 30 %	9
図 2 - 7	クリープ歪とクリープ歪速度の関係 岩石：田下凝灰岩，環境：湿潤状態， クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1 MPa)の 30 %	10
図 3 - 1	油圧式クリープ試験機の概略図	19
図 3 - 2(a)	低応力レベルでのクリープ歪の経時変化 (気乾状態)	上に凸 20
図 3 - 2(b)	低応力レベルでのクリープ歪の経時変化 (気乾状態)	ほぼ直線 21
図 3 - 2(c)	低応力レベルでのクリープ歪の経時変化 (気乾状態)	下に凸 22
図 3 - 3(a)	低応力レベルでのクリープ歪の経時変化 (湿潤状態)	上に凸 23
図 3 - 3(b)	低応力レベルでのクリープ歪の経時変化 (湿潤状態)	ほぼ直線 24
図 3 - 3(c)	低応力レベルでのクリープ歪の経時変化 (湿潤状態)	下に凸 25
図 3 - 4(a)	高応力レベルでのクリープ試験結果 (気乾状態) クリープ歪の経時変化	26
図 3 - 4(b)	高応力レベルでのクリープ試験結果 (気乾状態) クリープ歪速度の経時変化	27
図 3 - 5(a)	高応力レベルでのクリープ試験結果 (湿潤状態) クリープ歪の経時変化	28
図 3 - 5(b)	高応力レベルでのクリープ試験結果 (湿潤状態) クリープ歪速度の経時変化	29
図 3 - 6(a)	クリープ試験結果と (3 - 3) 式による計算結果	気乾状態 30
図 3 - 6(b)	クリープ試験結果と (3 - 3) 式による計算結果	湿潤状態 31
図 3 - 7	クリープ応力レベルとクリープ寿命	32
図 4 - 1(a)	クリープ歪と歪速度のマスターカーブ．横軸は $\epsilon = (\dot{\epsilon})^n \cdot t$ クリープ歪 $\epsilon / \dot{\epsilon} = \dots$	45
図 4 - 1(b)	クリープ歪と歪速度のマスターカーブ．横軸は $\epsilon = (\dot{\epsilon})^n \cdot t$ ． クリープ歪速度 $(d\epsilon/dt) / \dot{\epsilon} = d\epsilon/dt \cdot \dots$	46
図 4 - 2	** - **線図上に描いた応力 - 歪曲線のマスターカーブ	47
図 4 - 3	一軸圧縮強度試験における応力 - 歪曲線 (大久保・西松, 1986)	48

図 4 - 4	一軸圧縮強度試験における応力 - 歪曲線 (福井ら, 1993)	49
図 4 - 5(a)	一軸圧縮強度試験における応力 - 歪曲線の載荷速度依存性 (大久保ら, 1987b) 表 4 - 1 の定数 を用いた計算結果との比較	50
図 4 - 5(b)	一軸圧縮強度試験における応力 - 歪曲線の載荷速度依存性 (大久保ら, 1987b) 表 4 - 1 の定数 を用いた計算結果との比較	51
図 4 - 6	一軸引張強度試験における応力 - 歪曲線 (秋ら, 1995)	52
図 4 - 7(a)	一軸引張強度試験における応力 - 歪曲線の載荷速度依存性 (福井ら, 2003) 表 4 - 1 の定数 を用いた計算結果との比較	53
図 4 - 7(b)	一軸引張強度試験における応力 - 歪曲線の載荷速度依存性 (福井ら, 2003) 表 4 - 1 の定数 を用いた計算結果との比較	54
図 4 - 8(a)	強度試験における (σ^* - 1) と σ^{**} の関係 一軸圧縮強度試験 (大久保・西松, 1986). 試験条件は, $C = 10^{-5}$, $\alpha = 0.5$	55
図 4 - 8(b)	強度試験における (σ^* - 1) と σ^{**} の関係 一軸引張強度試験 (秋ら, 1995). 試験条件は, $C = 10^{-6}$, $\alpha = 0.3$	56
図 4 - 9	クリープ曲線 (大久保・西松, 1986). 応力レベル 77%の一軸圧縮クリープ試験の場合	57
図 4 - 10	ばね要素 と並列に非線形粘性要素 が存在するモデル	58
図 5 - 1	載荷および写真撮影システム	68
図 5 - 2(a)	試験片の横方向変形 変形した試験片の写真	69
図 5 - 2(b)	試験片の横方向変形 試験片高さごとの横方向変位	70
図 5 - 3	三軸圧縮試験での応力 - 歪曲線	71
図 5 - 4(a)	三軸圧縮試験での試験片の横方向変形 周圧 2.0 MPa	72
図 5 - 4(b)	三軸圧縮試験での試験片の横方向変位 周圧 5.9 MPa	73
図 5 - 4(c)	三軸圧縮試験での試験片の横方向変形 周圧 9.8 MPa	74
図 5 - 5	三軸圧縮試験での試験片の膨張した部分の長さ	75
図 5 - 6	試験片中央断面の横歪と最大横歪 (周圧 5.9 MPa)	76
図 5 - 7	三軸圧縮試験での軸歪と最大横歪	77
図 5 - 8(a)	試験片の連続写真と横方向変形 試験片の連続写真	78
図 5 - 8(b)	試験片の連続写真と横方向変形 軸歪および最大横歪	79
図 5 - 8(c)	試験片の連続写真と横方向変形 試験片の横方向変形	80
図 5 - 9	三軸クリープ試験での試験片の膨張した部分の長さ	81
図 5 - 10	三軸クリープ試験での軸歪と最大横歪	82
図 5 - 11(a)	クリープ歪とクリープ歪速度 軸歪	83
図 5 - 11(b)	クリープ歪とクリープ歪速度 最大横歪	84
図 5 - 12(a)	クリープ歪と残存寿命 軸歪	85
図 5 - 12(b)	クリープ歪と残存寿命 最大横歪	86
図 5 - 13(a)	クリープ歪速度と残存寿命 軸歪	87
図 5 - 13(b)	クリープ歪速度と残存寿命 最大横歪	88

図 5 - 14	応力 - 歪曲線上で，クリープ歪速度が最小になる位置 (,) と 破壊直前 (5 秒前) の位置 (,) (周圧 5.9 MPa) 89
図 5 - 15	(5 - 3) 式中のパラメータ a_3 90
図 5 - 16	三軸圧縮試験での $\frac{d}{d} \frac{x}{z}$ と三軸クリープ試験での $\frac{d}{d} \frac{x}{c} \frac{z}{c}$ 91
図 6 - 1	片対数グラフに示したクリープ歪の経時変化 (38) 96
図 6 - 2	片対数グラフに示したクリープ歪の経時変化 (58) 97
図 6 - 3	片対数グラフに示したクリープ歪の経時変化 (78) 98
図 6 - 4	クリープ歪の経時変化のまとめ 99
図 6 - 5	クリープ歪の経時変化における温度の影響 100
図 6 - 6	普通軸で示したクリープ歪の経時変化 (38) 101
図 6 - 7	普通軸で示したクリープ歪の経時変化 (58) 102
図 6 - 8	普通軸で示したクリープ歪の経時変化 (78) 103
図 6 - 9	10^5 s ~ 5×10^5 s の区間平均クリープ歪速度の自然対数と $1/(kT)$ の関係 . . 104
図 6 - 10	クリープ試験後試験片の一軸圧縮強度 105
図 6 - 11	5×10^5 s のクリープ歪とクリープ試験後試験片の一軸圧縮強度の関係 106

1. はじめに

本研究は、巨視的観点からの長期岩盤挙動の評価の確立を目指したものであり、この主旨を実現するために平成6年度よりこの委託研究は始まった。

10年目にあたる平成15年度(本年度)も、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行いその結果を第2章で述べる。時間の経過に従い、クリープ歪速度は減少しているが、その速度の減少がどの程度であるかは、長期の安定性を考える上で重要である。現在、クリープ試験を開始して6.5年経過し、測定結果に年変動が見られるなど、問題点も見られるが、クリープ歪速度の変化に注目し、今後も実験を継続していくつもりである。

第3章では、結晶質岩用4連式油圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験結果について述べる。従来の研究結果が乏しい低応力下での花崗岩のクリープ試験を行った。その結果、気乾状態、湿潤状態のいずれの条件下でもクリープ歪が生じ、その大きさは約1週間で $30 \sim 160 \times 10^{-6}$ であることがわかった。しかし今回の試験では、従来あまり例を見なかった、クリープ歪が時間の対数に対して上に凸の曲線を描く試験片が何本かあった。この点は、試験開始直後の変位計測システムが不安定であった可能性もある。

第4章では、昨年度提案した構成方程式が、一軸圧縮強度試験および一軸引張強度試験に適用可能かどうかについて検討した。過去に実施した強度試験結果と構成方程式に基づいた計算結果とを比較・検討したところ、構成方程式は応力-歪曲線をある程度再現するとともに、強度の載荷速度依存性も再現することがわかった。また、過去に行ったクリープ試験結果に関する検討結果と合わせて考えると、構成方程式は強度試験とクリープ試験に適用でき、しかも一軸圧縮のみならず一軸引張応力下にも適用できるといえよう。ただし、従来の構成方程式と比べて、より複雑になったため構成方程式中の定数を求めることが難しくなったといえよう。また、今回は検討の対象を一軸応力下に限ったが、三軸応力下への拡張が今後の大きな課題といえる。

第5章では、可視化ベッセルを用いて三軸圧縮クリープ試験を行った結果を述べる。試験を実施する前に、写真撮影方法および横変位の計測方法について改良を加えた。まず、写真撮影システムを従来の試験システムに組み込むことで、歪がある値をとった時点での写真撮影や連続写真撮影を可能にした。これは、手動での撮影や一定時間毎の撮影が困難な長期にわたる試験で特に有効であると考えられる。三軸圧縮クリープ試験において、3次クリープでは、軸歪速度と同様に、横歪速度も残存寿命に反比例することがわかった。これが成り立つ条件下では、横歪速度の観察結果から破壊時刻を推定できることになる。

第6章では、中間温度領域におけるクリープ試験結果を述べる。経過時間 10^4 sまでは対数クリープ則が成り立ち、温度の影響は大きくないが、経過時間 10^4 s以降では、温度が高くなると対数クリープ則よりずれが生じ、クリープ歪の温度依存性は高くなることがわかった。

第7章の後半に、10年間にわたった研究の経緯をまとめた。

2. 堆積岩（田下凝灰岩）の長期クリープ試験

本章では試験を開始し、6.5年経過した空圧式クリープ試験機による田下凝灰岩の長期クリープ試験について述べる。

実験条件は、前回の試験（大久保，1997）と同様で以下の通りである。

岩石：田下凝灰岩

環境：常温下，湿潤状態

実験装置：図2-1参照

試験片：直径25mm×高さ50mmの円柱形

クリープ応力：2.8MPa [一軸圧縮強度(9.1MPa)の30%]

実験開始日時：平成9年5月23日10時27分

昨年度と同様，毎週月曜日と金曜日の午前10時にA/D変換した電圧より求めたクリープ歪と，空圧の経時変化を図2-2に示す。データは平成15年12月31日までの結果を示した。図で， 1.62×10^8 sまで空圧が徐々に低下している様子が見られたため，精密弁のリリーフ孔およびブリード孔に水滴がたまり，圧力が低下したと判断し，平成14年7月12日に図2-1のバルブ(c)を閉め，精密弁の水を抜く操作を行い，改めて設定圧である 1 kg/cm^2 となるように精密弁を設定してから，(c)のバルブを開け，実験を再開した。それ以降， 1.8×10^8 sまでは空圧はほぼ設定圧を保持していた。しかしながら，その後，空圧は徐々に低下したため，平成15年7月15日に再度，同じ操作を行い，圧力を設定圧に調整した。平成15年9月29日も同様の操作を行った。

クリープ応力が低下すると，弾性的な歪が解放され，みかけ上，クリープ歪が低下するため，図2-2で示すように空圧の低下に従い，クリープ歪が減少する。そこで，この歪を近似的に弾性変形と見なし，低下したクリープ応力をヤング率2.6GPaで除して，クリープ歪を補正することとした。 0.01 kg/cm^2 の空圧（クリープ応力にして 0.028 MPa ）の低下で 1.1×10^{-5} のクリープ歪を補正した。補正したクリープ歪の経時変化を図2-3に示す。図2-3では，図2-2の空圧の変動によるクリープ歪の変動現象は見られておらず，補正はうまくいっているものと考えられる。

図2-3に示した補正したクリープ歪の経時変化の縦軸を拡大したものを図2-4に示す。図には，平成14，15，16年の1月1日にあたる時間を示した。図では，平成14年および平成15年とも，1月1日以降，徐々にクリープ歪が低下し，6月から8月に極小値を取った後，クリープ歪が増加し，11月から12月に極大値を取る傾向が見られる。このようにクリープ歪に年変化の傾向が見られる理由は判然としないが，室温の変化による計測装置などの温度ドリフトの可能性が高いと考えられる。

6.5年経過したクリープ歪の経時変化を図2-5に示す。ただし，図のクリープ歪は温度環境などによる変化が見られたため， 10^8 s以降は1月1日のクリープ歪を基本としてスムージング化した結果である。図で 10^5 sまでは，片対数グラフで直線的に歪が増加しており，対数クリープ則にほぼ従っていることがわかる。しかしながら 10^5 s以降，経過時間の対数に対する歪の増加率が多少大きくなっており，対数クリープ則からずれ始めていることがわかる。 10^5 s以降も最初の傾きで対数クリープ則が成立しているとして直線部を延長して見ると，クリープ歪は 400×10^{-6} 程度であり，

対数クリープ則より歪が大きくなっている。図には前回の試験結果も示した。前回はクリープ歪測定用アンプが故障したため、1.5年経過した時点で試験を打ち切った。図では今回に比べ、 10^3 sまでクリープ歪は小さいがそれ以降、逆転し大きくなっている。 10^4 s以降の増加傾向は今回の結果を平行移動したような結果である。

クリープ歪速度の経時変化を図2-6に示す。図2-6では最初、クリープ歪速度は 10^{-5} /sであったものが、時間の経過に従って、クリープ歪速度は減少している。図には、傾きが-1の直線を破線で示した。 10^5 s以前ではほぼこの直線上にのっているが、 10^5 s以降、多少この直線より上にいく傾向が見られており、図2-5の傾向と一致している。前回の結果は、今回に比べ、 10^3 s以降クリープ歪速度が大きい傾向が見られる。

図2-7に、クリープ歪とクリープ歪速度の対数の関係を示す。クリープ歪にして 200×10^{-6} (クリープ歪速度にして、 10^{-9} /s)まではほぼ直線的となっており、対数クリープ則に従っているが、それ以降はクリープ歪が増加しても、クリープ歪速度の減少率は小さくなっていることがわかる。定性的には前回の結果も同様であり、対数クリープ則から推定されるクリープ歪より大きくなる傾向が見られた。

時間の経過に従い、クリープ歪速度は減少しているが、その速度の減少がどの程度であるかは、長期の安定性を考える上で重要である。現在、クリープ試験を開始して6.5年経過し、測定結果に年変動が見られるなど、問題点も見られるが、クリープ歪速度の変化に注目し、今後も実験を継続していくつもりである。

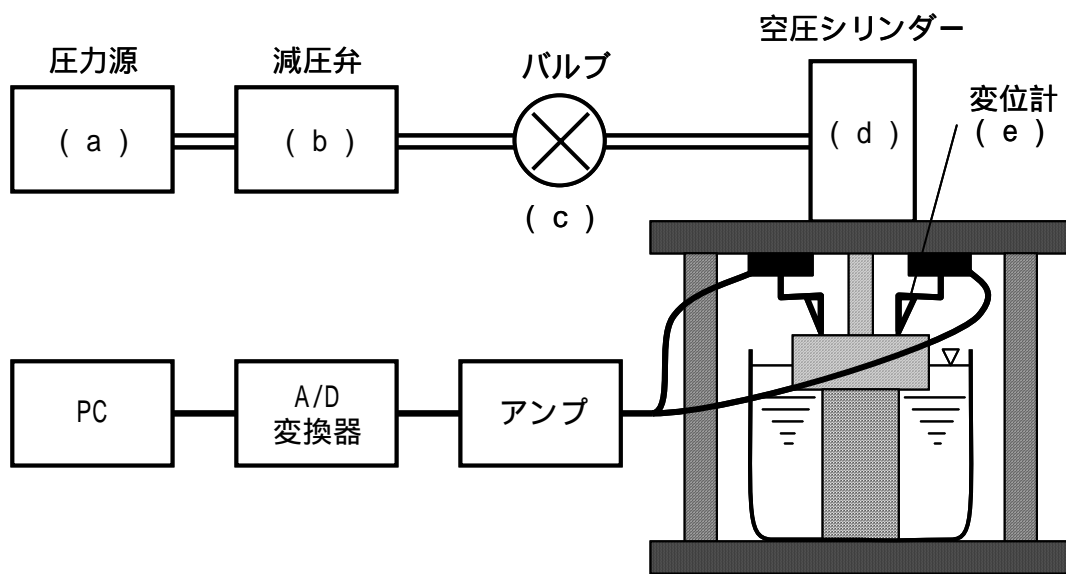


図 2 - 1 空圧クリープ試験機の概略図

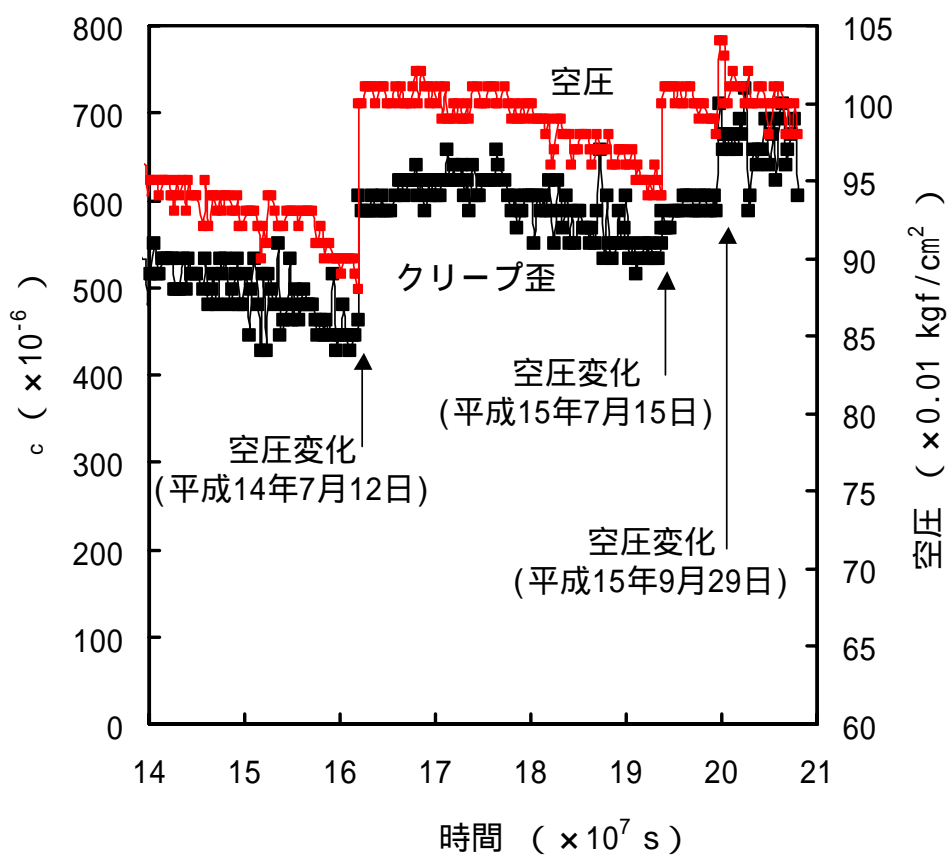


図 2 - 2 クリープ歪および空圧の経時変化

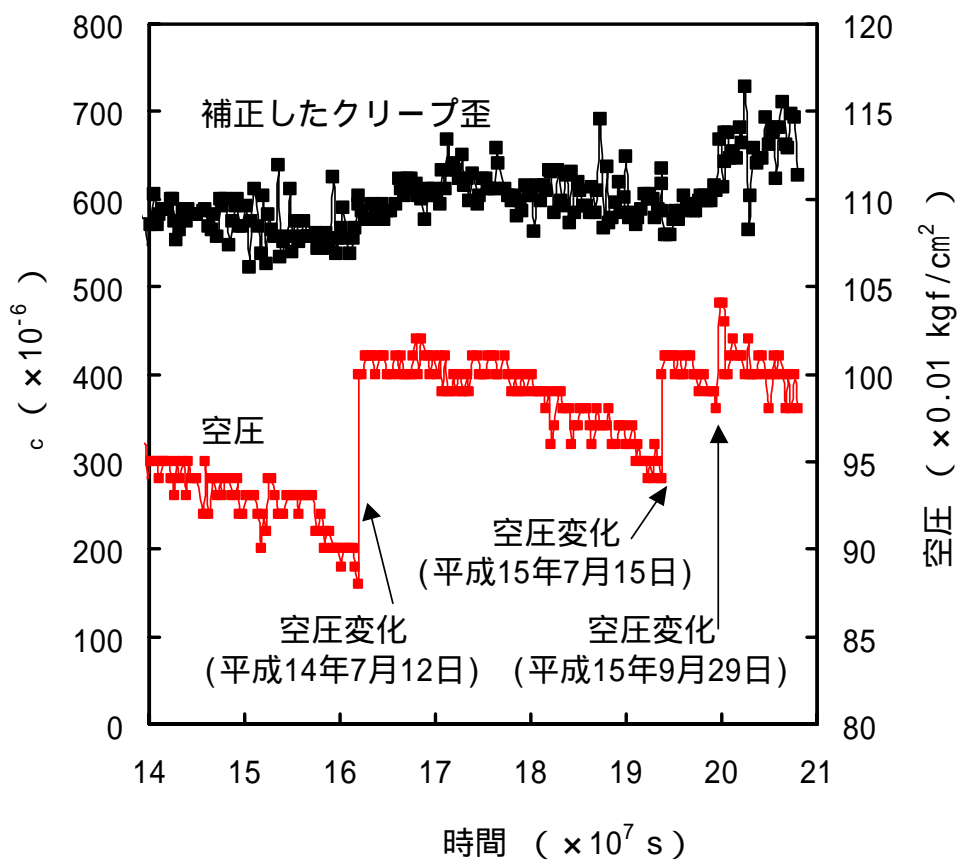


図2-3 補正したクリープ歪および空圧の経時変化

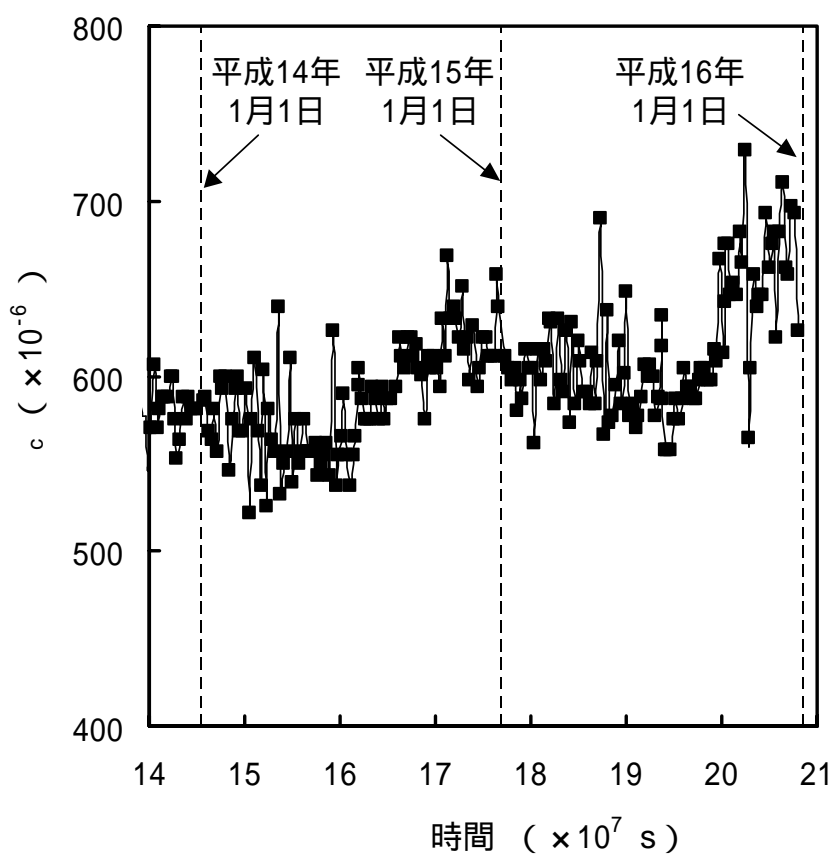


図 2 - 4 補正したクリープ歪の経時変化

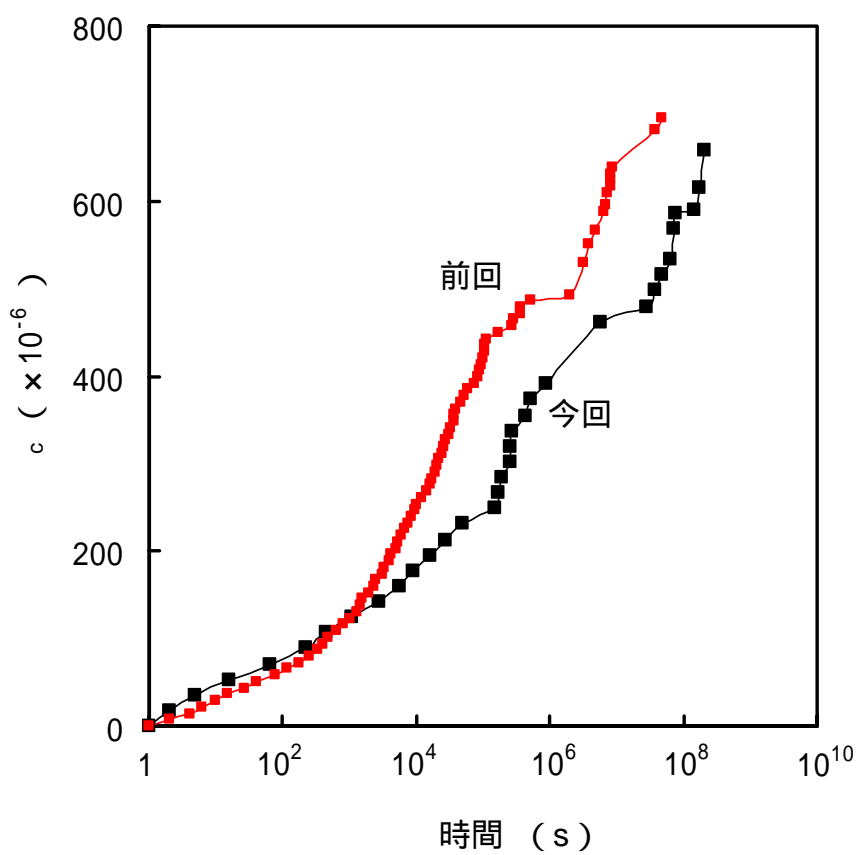


図 2 - 5 クリープ歪の経時変化

岩石：田下凝灰岩

環境：湿潤状態

クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1 MPa)の 30 %

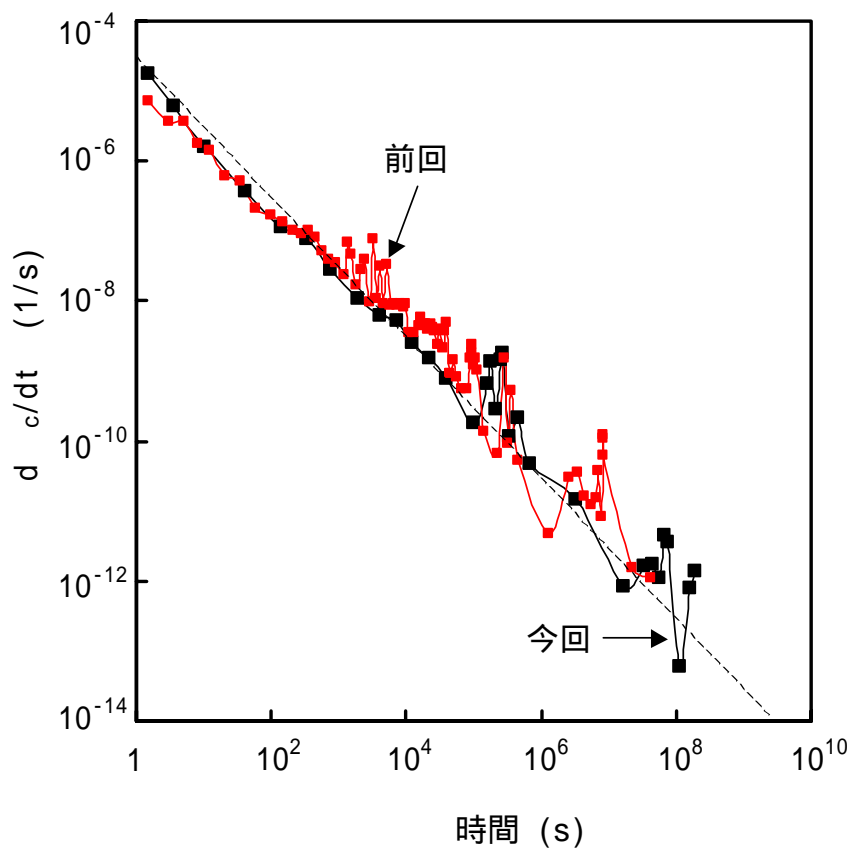


図 2 - 6 クリープ歪速度の経時変化

岩石：田下凝灰岩

環境：湿潤状態

クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1 MPa)の 30 %

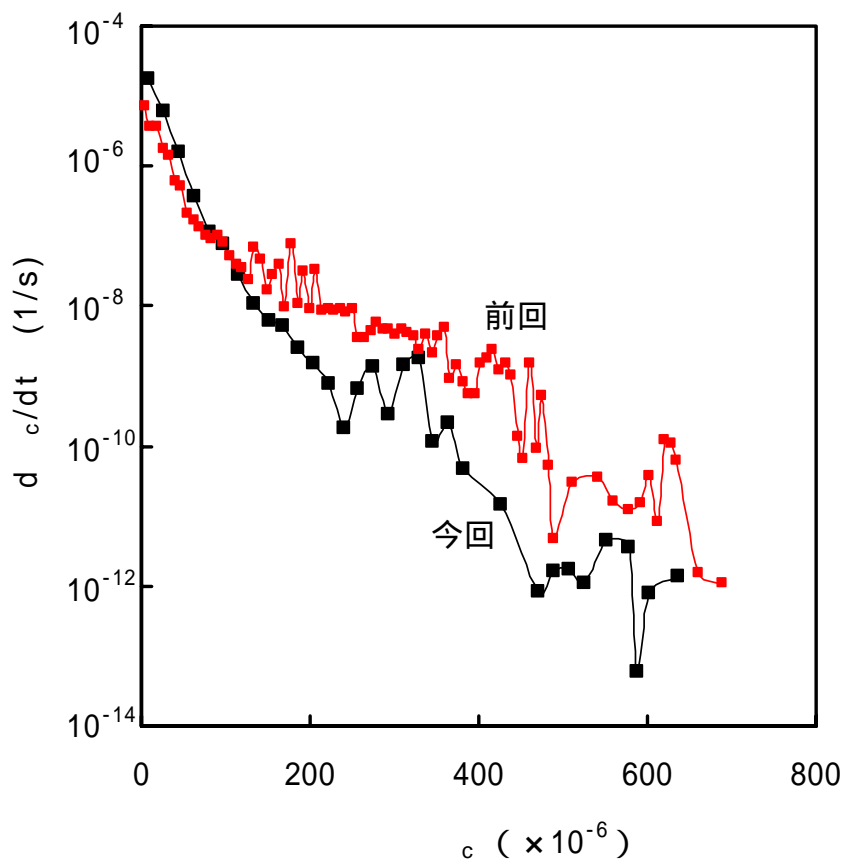


図 2 - 7 クリープ歪とクリープ歪速度の関係

岩石：田下凝灰岩

環境：湿潤状態

クリープ応力：一軸圧縮強度(9.1 MPa)の 30 %

3. 結晶質岩用多連油圧式クリープ試験機による試験

2000年度に開発した4連油圧式クリープ試験機を用いて、稲田花崗岩の低応力レベルでのクリープ試験を行い、過去に実施した高応力レベルでのクリープ試験結果（大久保，1997）と比較・検討を行った。

3.1 はじめに

花崗岩は地球上に広く分布しており、堅硬かつ安定なため、その岩盤中には種々の構造物が建設されてきた。エネルギー資源の安定供給や環境保全の観点からみると、今後も、多くの岩盤構造物が花崗岩中に作られると考えられる。しかし、これからの地下空間開発では、構造物は従来よりも長期間の安定性が求められる。例えば、石油やLNGの地下備蓄基地では最低数百年、高レベル放射性廃棄物の地層処分場では数千年から数万年程度の安定性が要求されるであろう。また、地上の建造物とは異なり、一旦作ってしまうと、作り直しや放置は許されないため、より慎重な調査や計画が必要である。

岩盤の長期間の安定性評価を行うためには、岩石の時間依存性挙動に関する研究が必要である。その中でもクリープ試験は比較的容易にできるため、従来から種々の岩石で多くの研究が行われてきている。しかし、他の岩石に比べて花崗岩のクリープに関する工学的研究は少ない。花崗岩の粘弾性的性質は小さく、実務レベルではクリープ変形は生じないと認識されている場合もある。これは、花崗岩の強度が大きく、クリープ応力レベルが低い事例が多いためであり、高い応力レベルでは花崗岩でもクリープ変形が生じることがわかっている（福井ら，1989，児玉ら，1992）。しかし、低応力レベルでのクリープ試験は、時間がかかるうえ、変位の測定に高い精度が要求されるため、過去の研究例は非常に少ない（熊谷ら，1986）。

そこで本研究では、比較的容易に長期クリープ試験ができる試験機を開発し、花崗岩の低応力レベルでのクリープ試験を行った。また、高応力レベルでのクリープ試験もあわせて行い、長期クリープ寿命について検討した。

3.2 試料岩石

試料岩石として茨城県笠間市産の稲田花崗岩を用いた。一軸圧縮強度とヤング率を表3-1に示すが、両者とも気乾状態よりも湿潤状態の方が数%小さかった。花崗岩には、互いに直交する割れやすい3面、すなわち、rift面、grain面、hardway面が存在するが、今回はhardway面に対して垂直にコアを抜き取った。試験片は直径20mm、高さ40mmの円柱形とし、端面の平行度は1/100mm以内に仕上げた。整形した試験片は2週間以上、温度 20 ± 5 、湿度 65 ± 15 %に保たれた試験室内に放置し、自然乾燥させた。湿潤状態で用いる試験片については、その後、デシケータに入れ、真空ポンプで1日以上デシケータ内部及び岩石の空隙中の空気を除去した。ポンプを作動させたまま水を加え、1日程度保持した後ポンプを止め、1日以上放置してから試験に供した。なお、水は試験中も一貫して市販のイオン交換水を用いた。

3.3 試験装置と試験方法

低応力レベルでのクリープ試験では、本研究室で開発した油圧式クリープ試験機を用いた。概略図を図3-1に示す。油圧ポンプは0.55 kWの交流モータによって駆動される。油はアキュムレータに導かれた後、分岐してピストンに達する。図3-1のバルブ1およびバルブ2は試験中は全開にしてあり、バルブ4を開放することで試験が開始される。バルブ3の開閉具合により、載荷開始からクリープ荷重に達するまでの時間が変化する。今回は試験開始から10秒以内にクリープ荷重に達するようにバルブ3を適宜調整した。また、この油圧系は圧力、すなわちクリープ荷重をほぼ一定に保つように設計されている。すなわち、歪ゲージ式圧力変換器によって測定された圧力は、リレー出力付きのアンプに導かれ、油圧駆動用のモータをON/OFFする。試験前に油圧の上限値と下限値を設定しておくこと、回路内の油圧が下限値よりも低下するとモータが動き始め、上限値を越えると止まる機構となっている。ラムからの油の漏れは微小であり、アキュムレータに蓄えられた油にて、かなりの時間、圧力を保持することが可能である。今回は油圧の上限値と下限値との差を0.02 MPa、クリープ応力に換算して0.9 MPaとし、約30分で油圧が低下し40秒程度でもとに戻るようバルブ3を調整した。つまり、1時間に2度、合計80秒程度モータを動かすことで、クリープ応力の変動を±0.45 MPa以内に抑えることができる。このような機構により、モータを常に動かし続けることによる機器の損耗を防ぐとともに、万が一停電があっても、短時間であれば試験が継続できる。

この試験機ではピストンとシリンダの径の差を数 μm として油の漏れを極めて小さくすることで、シールを使用しない設計とした。その結果、摩擦力は十分小さくでき、荷重変換器とそれに対応するアンプを減らすことができた。比較的長期にわたる試験では計測器を減らすことは、測定精度を高める上で重要であると考えている。

変位の測定には1対の片持梁式変位計を用いた。変位計先端の端子には摩擦の影響が小さいルビ一製のものを用いた。変位計の出力はアンプ、そして、デジタルマルチメータに送られ、測定結果はパソコンに保存される。試験前にキャリブレーションを用いて、計測システムの安定性を調べたところ、1週間でのドリフトは計測器の分解能、つまり、歪の分解能(約 10×10^{-6})以下であった。

試験は常温下、気乾状態および湿潤状態で行った。湿潤状態での試験は、図3-1のように試験片を水没させた状態で行った。試験ではまず、バルブ4を閉じた状態で油圧ポンプを起動し、回路内を設定圧力にした。試験片をセットし、手動ポンプにより、載荷シリンダに圧力をわずかに与え、変位の0点を決定した。手動ポンプの回路を遮断した後、バルブ4を開放し、試験を開始した。

高応力レベルでのクリープ試験は、気乾状態では容量1500 kNのサーボ試験機、湿潤状態では容量100 kNのサーボ試験機を用いた。荷重は歪ゲージ式ロードセル、変位は差動変圧器で測定した。試験開始からクリープ荷重に達するまで、荷重制御のもとで荷重を増加させていった。

各試験片の試験条件を表3-2にまとめて示すが、クリープ応力レベルとは表3-1に示した一軸圧縮強度に対するクリープ応力の割合である。

3.4 低応力レベルでのクリープ試験結果

試験期間は最短で約1週間、最長で約1年であったが、計測システムの安定性を考慮し、今回はいずれの試験片とも試験開始後約1週間の結果のみ扱った。また、クリープ荷重に達した後1秒の時点を基点として、経過時間とクリープ歪を算出した。

気乾状態でのクリープ歪の経時変化を図3-2に示す。図では、クリープ歪が時間の対数に対して、上に凸の曲線を描きながら増加する試験片(図3-2(a))、ほぼ直線的に増加する試験片(図3-2(b))、下に凸の曲線を描きながら増加する試験片(図3-2(c))の3種類に分けて示した。グラフが上に凸の試験片(図3-2(a))は3本あり、いずれの試験片でも試験開始後約 10^3 秒間で $30 \sim 50 \times 10^{-6}$ 程度の歪の増加がみられた。しかし、その後の変化は小さく、クリープ歪は収束しているように見える。グラフがほぼ直線的な試験片(図3-2(b))は2本あった。2本の試験片の歪の増加傾向は定性的には似ており、グラフが若干波うちながら歪が増加している。これらの試験片は、図3-2(c)に示した、グラフが下に凸の試験片と同様に、試験開始後約 10^6 秒が経過しても、クリープ歪の収束はみられない。気乾状態ではいずれの試験片でも、試験開始後約 10^6 秒間で $30 \sim 100 \times 10^{-6}$ のクリープ歪が生じていた。

図3-3には湿潤状態で行ったクリープ試験結果を示す。湿潤状態でも、横軸を時間の対数としたときのクリープ歪曲線が、上に凸(図3-3(a))、ほぼ直線(図3-3(b))、下に凸(図3-3(c))の3種類に分けられた。グラフが上に凸の試験片は6本あり、いずれの試験片でも試験開始後数百秒間での歪の増加量が大きい。その後の変化は小さく、6本中4本では歪の増加が収束しているように見える。しかし、残りの2本では約 10^6 秒経過後も歪の増加がみられる。グラフが直線的な試験片は3本あった。そのうち2本は、図3-3(b)で示した試験片と定性的に似た傾向を示しており、グラフが波うちながら歪が増加している。グラフが下に凸の試験片は4本あった。約 10^6 秒経過後のクリープ歪は $60 \sim 140 \times 10^{-6}$ であるが、歪の増加が収束に向かう気配はなく、今後も変形が進行すると推測される。湿潤状態ではいずれの試験片でも、試験開始後約 10^6 秒間で $40 \sim 160 \times 10^{-6}$ のクリープ歪が生じており、気乾状態よりも若干変形が大きかった。カナダ産のLac du Bonnet花崗岩では、気乾状態よりも湿潤状態の方がクリープ変形が生じやすいという研究結果が発表されているが(Lajtai et al., 1987)、今回用いた稲田花崗岩でも同様の傾向があると思われる。

3.5 高応力レベルでのクリープ試験結果

高応力レベルでのクリープ試験では、載荷開始からクリープ荷重に達するまでに数十秒かかった。そのため、クリープ開始直後は変形が生じにくくなると考えられる(福井ら, 1989)。そこで、以下に示す試験結果では、横軸を時間の対数としたときにクリープ歪曲線が原点を通るように若干の補正を加えた。

図3-4(a)には気乾状態でのクリープ歪の経時変化を示す。応力レベル97%と87%では、試験開始から時間の対数に対してほぼ直線的に歪が増加した後、曲線が若干下に凸になり、破壊に至っている。一方、85%と82%では、グラフは少し波うちながらほぼ直線的に歪が増加している。この2本では試験は破壊の起こる前に打ち切った。図3-4(b)にはクリープ歪速度の経時変化を示した。図では破壊寿命が非常に短かった試験片A1とB1は示していない。図より、2本の試験片とも、時

間と歪速度の関係は両対数グラフ上でほぼ直線的であり，次式で近似できる．

$$d \epsilon_c / dt = A t^{-\mu} \quad (3-1)$$

ここで， ϵ_c はクリープ歪， t は経過時間， A は定数である．図には $\mu = 0.9$ としたときの計算結果を示したが，歪速度が減少していく様子がうまく再現できている．なお， A は 10^{-5} とした．

図3-5(a)には湿潤状態でのクリープ歪の経時変化を示す．湿潤状態では4本とも破壊に至っており．気乾状態で破壊した2本のように，クリープ開始直後はほぼ直線的に歪が増加し，その後，若干下に凸の曲線を描き破壊に至っている．応力レベルの低下とともに，おおむね寿命が増加しているが，応力レベル85%での寿命は88%での寿命よりも若干短かった．図3-5(b)にはクリープ歪速度の経時変化を示した．湿潤状態でも気乾状態と同様に，クリープ開始直後は(3-1)式で近似できるが，傾きは気乾状態よりも少し緩やかである．図には(3-1)式で $\mu = 0.8$ ， $A = 10^{-5}$ とした計算結果を示したが，4本の試験片とも歪速度が減少していく様子をうまく再現できている．

3.6 低応力レベルと高応力レベルでの試験結果の比較

今回の高応力レベルでのクリープ試験結果および従来のクリープに関する研究結果によると，クリープ歪は時間の対数に対して直線的，もしくは，下に凸の曲線を描く場合がほとんどである(Crudon, 1970)．今回の低応力レベルでのクリープ試験では，クリープ歪が時間の対数に対して上に凸の曲線を描きながら増加する試験片が19本中9本存在した．そして，そのほとんどの試験片では，試験開始直後の歪の増加は大きいものの，それ以降の変形量は小さかった．これは，試験開始直後の変位計先端とピストンとの接触状況の変化により，試験片は変形していないにもかかわらず，変位が記録された可能性がある．この点は今後の重要検討課題であるが，以下では，時間の対数に対してクリープ歪曲線が直線および下に凸であった試験片についてのみ，高応力レベルでの結果と比較を行った．

図3-6(a)には気乾状態での，低応力レベルおよび高応力レベルでのクリープ試験結果を合わせて示す．試験本数が少なかったため，図には福井(1990)が別の岩石ブロックを用いて行ったクリープ試験結果(福井, 1990)も示した．福井(1990)が用いたブロックの気乾状態での一軸圧縮強度は169 MPaと，今回用いたブロックよりも小さかったが，クリープ歪曲線は今回の結果と非常に似ている．そこで気乾状態に関しては，福井(1990)の結果も用いて検討を行うことにする．

1次クリープの近似法は種々あるが(Parsons and Hedley, 1966)，以下では(3-1)式を積分した次式を用いて議論を行った．

$$\epsilon_c = \{A / (1 - \mu)\} t^{1-\mu} \quad (3-2)$$

A はクリープ応力レベルの関数であり，その関数形には任意性があるが，ここでは仮にべき乗とする．つまり，(3-2)式は次式となる．

$$\epsilon_c = \{B / (1 - \mu)\} (\sigma^*) t^{1-\mu} \quad (3-3)$$

ただし、 $A = B (\sigma_c^*)$ であり、 B は定数である。 $\sigma_c^* = \sigma_{cr} / \sigma_c$ で、 σ_{cr} はクリープ応力、 σ_c は一軸圧縮強度である。大久保・福井(2002)は岩石の σ_c^* は2~5の間に入っていることが多いとしている。そこで、 $\mu = 3.5$ として(3-3)式を用いて計算した結果を図3-6(a)に示した。 μ は図3-4(b)から得られた値0.9を用いた。また、 B は(3-3)式を用いた計算結果が試験結果とあうように 220×10^{-6} とした。高応力レベルの結果では破壊直前までの部分で試験結果と計算結果が非常によくあっている。また興味深いことに、同じパラメータを用いて計算した低応力レベルでの計算結果も試験結果とうまくあっている。

図3-6(b)には湿潤状態でのクリープ試験結果を示す。湿潤状態では気乾状態よりもクリープ変形の時間依存性が大きいという研究結果が得られている(Lajtai et al., 1987)。そこで、(3-3)式で $\mu = 4$ とした計算結果を図3-6(b)に示した。 μ は図3-5(b)から得られた値0.8を、 B は計算結果が試験結果とあうように 110×10^{-6} とした。高応力レベルでの結果は気乾状態の結果と同様に、破壊直前までの部分で計算結果と非常によくあっている。また、低応力レベルでの試験結果もうまく再現できている。

以上の結果より、気乾状態、湿潤状態ともに、高応力レベルでのクリープ試験結果と低応力レベルでの結果を、同一の式でパラメータを変えずに再現することができた。つまり1次クリープについては、高応力レベルでのクリープ試験結果から、低応力レベルでの試験結果を外挿できる可能性がある。なお、表3-1には計算で使用したパラメータの値をまとめて示した。

3.7 長期クリープ寿命予測

従来から多くの岩石について、クリープ応力レベルとクリープ寿命との間に、近似的に次式が成り立つという研究結果が報告されている(Kranz, 1980)。

$$t_f (\sigma_c^*)^{n_1} \quad (3-4)$$

ここで、 t_f はクリープ寿命、 n_1 は定数である。過去の研究によると、 n_1 の値は気乾状態よりも湿潤状態の方が小さく(Lajtai et al., 1987)、同一条件下では試験方法(一軸圧縮クリープ試験、曲げクリープ試験など)によらずほぼ一定の値をとるという結果が得られている(Wilkins, 1987)。

一方、大久保ら(1987b)は多くの岩石について、一軸圧縮強度の載荷速度依存性について近似的に次式が成り立つとしている。

$$\sigma_c = C^{1/(n_2+1)} \quad (3-5)$$

ここで、 C は載荷速度、 n_2 は定数である。そして興味深いことに、福井ら(2003)は三城目安山岩や田下凝灰岩では、種々のクリープ試験から求めた(3-4)式中の n_1 と強度試験から求めた(3-5)式中の n_2 が、非常に近い値をとるとしている。つまり、強度の載荷速度依存性からクリープ寿命の予測ができる可能性がある。

図3-7には、今回行った高応力レベルでのクリープ試験と福井が行ったクリープ試験での、応力

レベルとクリープ寿命の関係を示した。試験片の本数が少ないため、この結果から(3-4)式中の n_1 を求めるのは困難であるが、大久保・福井(1997)は稲田花崗岩の(3-5)式中のパラメータ n_2 を求めており、気乾状態では51、湿潤状態では38としている。そこで、稲田花崗岩でも n_1 と n_2 が等しいと仮定して、(3-4)式より計算される結果を図3-7に示した。ただし、応力レベル100%でのクリープ寿命を10秒とした。気乾状態では、試験結果は計算結果の周囲に分布しているがばらつきが大きく、(3-4)式の妥当性を論じるのは困難である。一方湿潤状態では、試験結果が少ないため断定的なことは言えないが、試験結果と計算結果はよくあっており、クリープ応力レベルとクリープ寿命の間に(3-4)式が成り立つ可能性がある。

もし、クリープ応力レベルとクリープ寿命の関係が(3-4)式で近似でき、そのパラメータ n_1 が、強度の载荷速度依存性をあらかずパラメータ n_2 と等しいのであれば、強度試験や高応力レベルでの試験結果から、低応力下での長期クリープ寿命を予測できる。例えば、図3-7の2直線から外挿した場合、クリープ寿命が約1000年となるときのクリープ応力レベルは、気乾状態では64%、湿潤状態では56%であった。花崗岩の粘弾性的性質は小さく、(3-4)、(3-5)式中のパラメータを求めるのは困難であるが、今後検討すべき課題であると考えられる。

3.8 まとめ

本研究では、従来の研究結果が乏しい低応力下での花崗岩のクリープ試験を行った。その結果、気乾状態、湿潤状態のいずれの条件下でもクリープ歪が生じ、その大きさは約1週間で $30 \sim 160 \times 10^{-6}$ であることがわかった。しかし今回の試験では、従来あまり例を見なかった、クリープ歪が時間の対数に対して上に凸の曲線を描く試験片が何本もあった。この点は、試験開始直後の変位計測システムが不安定であった可能性もあり、今後検討を要する。

高応力レベルと低応力レベルでの試験結果を比較したところ、試験開始直後の1次クリープは、同じパラメータの値を用いた(3-3)式で近似できることがわかった。また、クリープ寿命について(3-4)式が成り立つ可能性と、クリープ寿命と強度の時間依存性をあらかずパラメータの値が等しい可能性を指摘した。今後の研究の進展によっては、強度試験や高応力レベルでのクリープ試験結果から、低応力レベルでの長期クリープ寿命を予測できる可能性がある。

室内および原位置での試験では、継続期間は長くても10年程度が限度であろう。それ以上の期間の岩石の変形特性を知るには、過去に作られた岩盤構造物や自然現象の調査などがよりどころとなる。その調査結果と今回のように短期間の試験結果から推定した結果を照らし合わせることでより、より精度の高い予測が可能になると考えている。

表 3 - 1 稲田花崗岩の物性値と (3 - 3) 式中のパラメータの値

	一軸圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	B (× 10 ⁻⁶)	μ	
気乾状態	204	39.6	220	0.9	3.5
湿潤状態	190	38.7	110	0.8	4

表 3 - 2 試験条件およびクリープ寿命

試験片番号	環境	クリープ 応力レベル (%)	クリープ寿命 (s)
D1_4	気乾	48	
D1_8	気乾	48	
D1_10	気乾	48	
D1_11	気乾	48	
D2_5	気乾	57	
D2_6	気乾	57	
M_1	湿潤	53	
M_2	湿潤	53	
M_4	湿潤	53	
D1_1	湿潤	53	
D1_2	湿潤	53	
D1_6	湿潤	53	
D1_9	湿潤	53	
D1_12	湿潤	51	
D1_13	湿潤	52	
D2_1	湿潤	52	
D2_2	湿潤	52	
D2_3	湿潤	59	
D2_4	湿潤	61	
A1	気乾	97	5.3
B1	気乾	87	66.2
C1	気乾	82	
D1	気乾	85	
A2	湿潤	93	735
B2	湿潤	88	1837
C2	湿潤	82	22232
D2	湿潤	85	1115

注) 全て実験を行った順に並べた

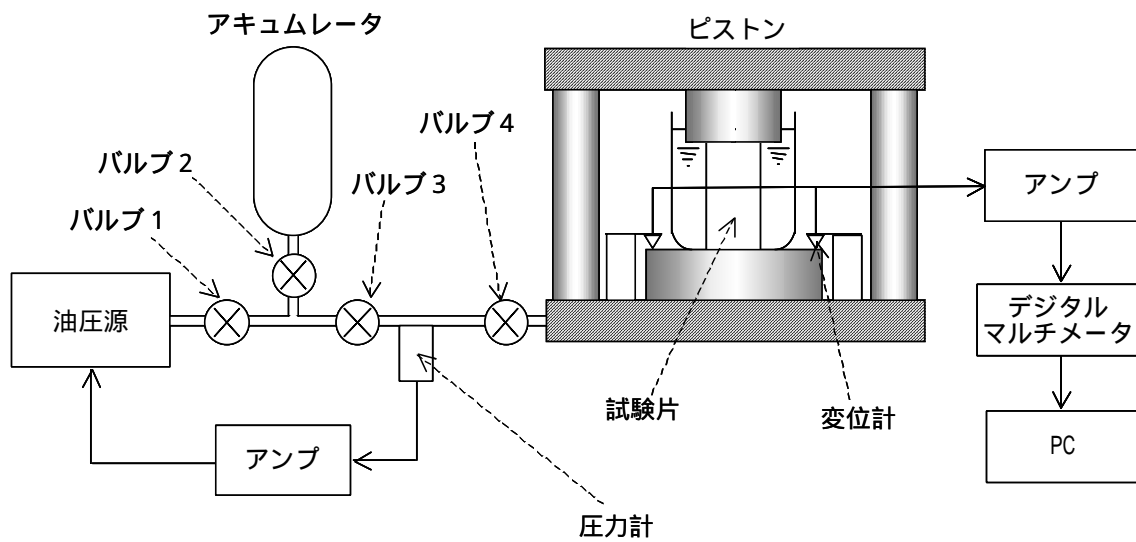
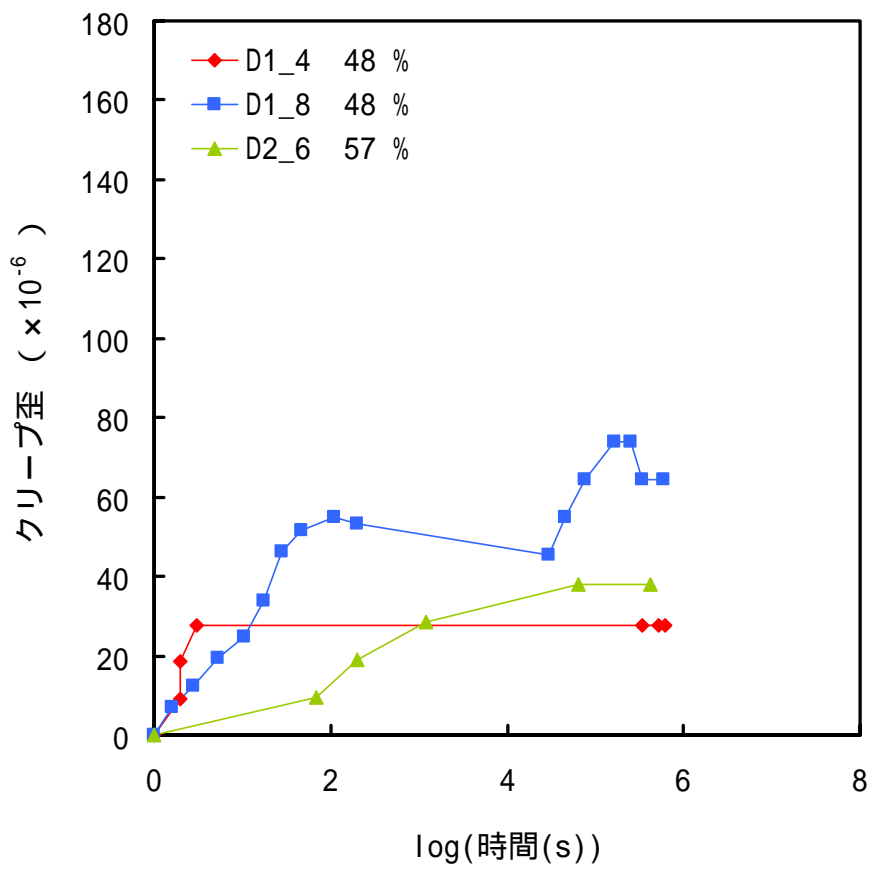
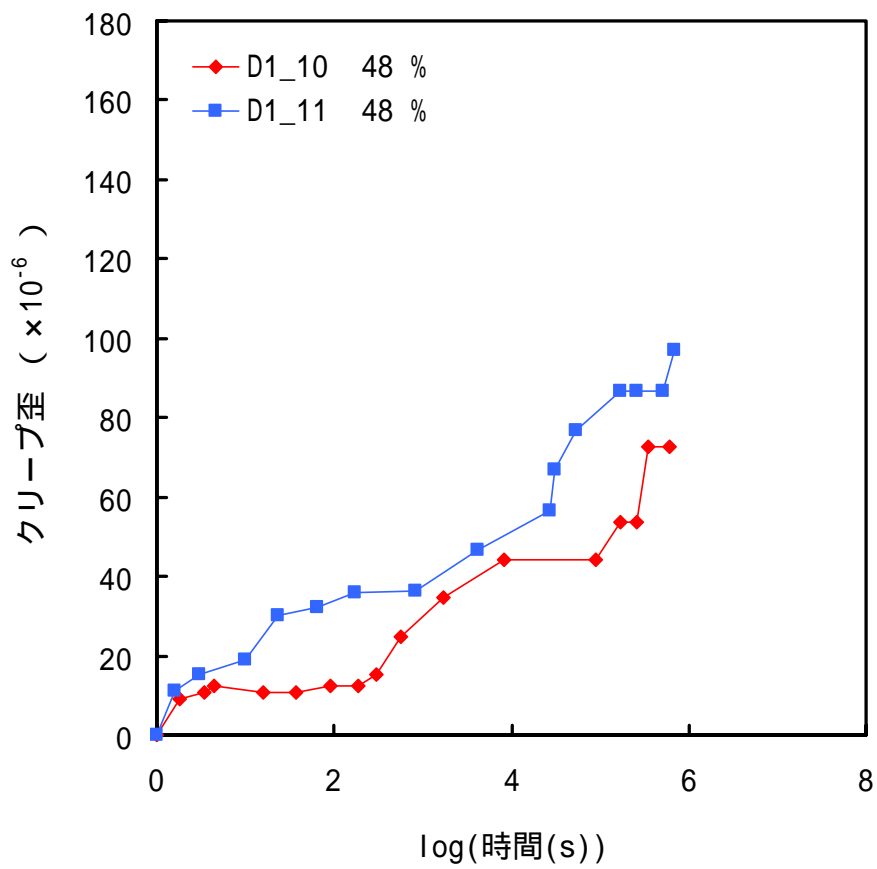


図 3 - 1 油圧式クリープ試験機の概略図



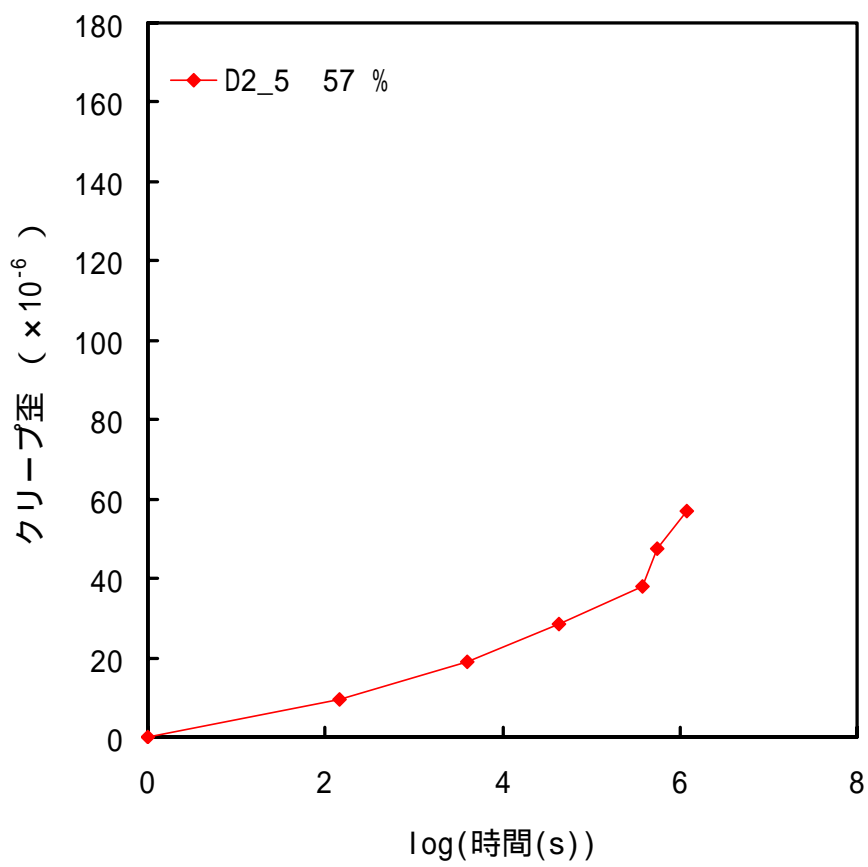
(a) 上に凸

図3-2 低応力レベルでのクリープ歪の経時変化(気乾状態)



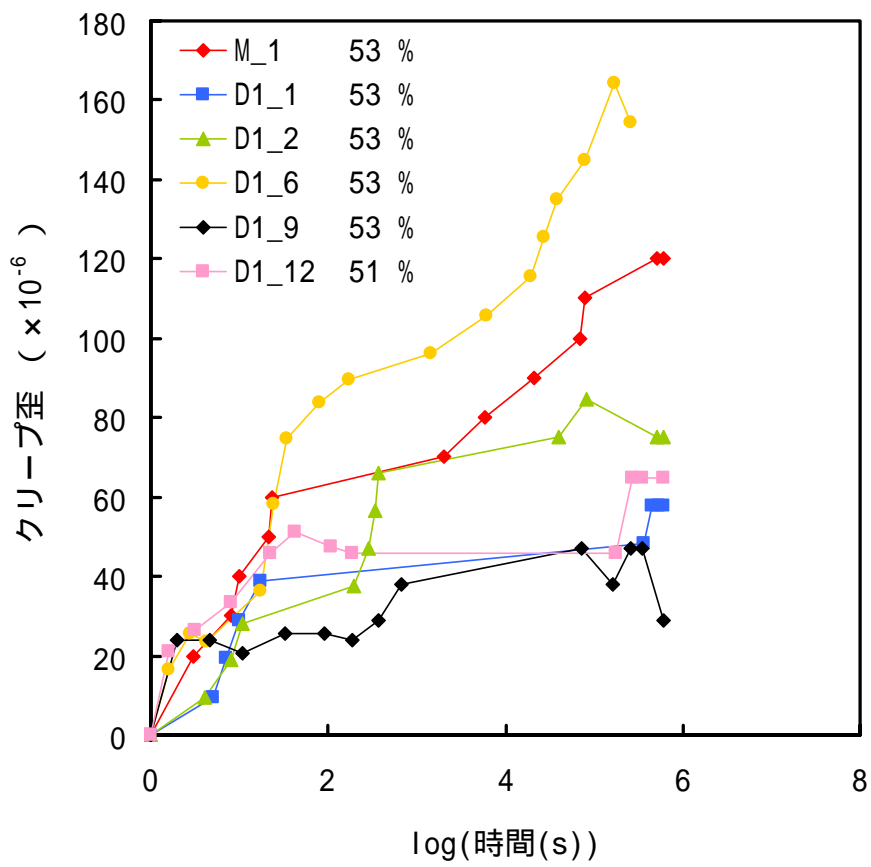
(b) ほぼ直線

図3-2 低応力レベルでのクリープ歪の経時変化(気乾状態)



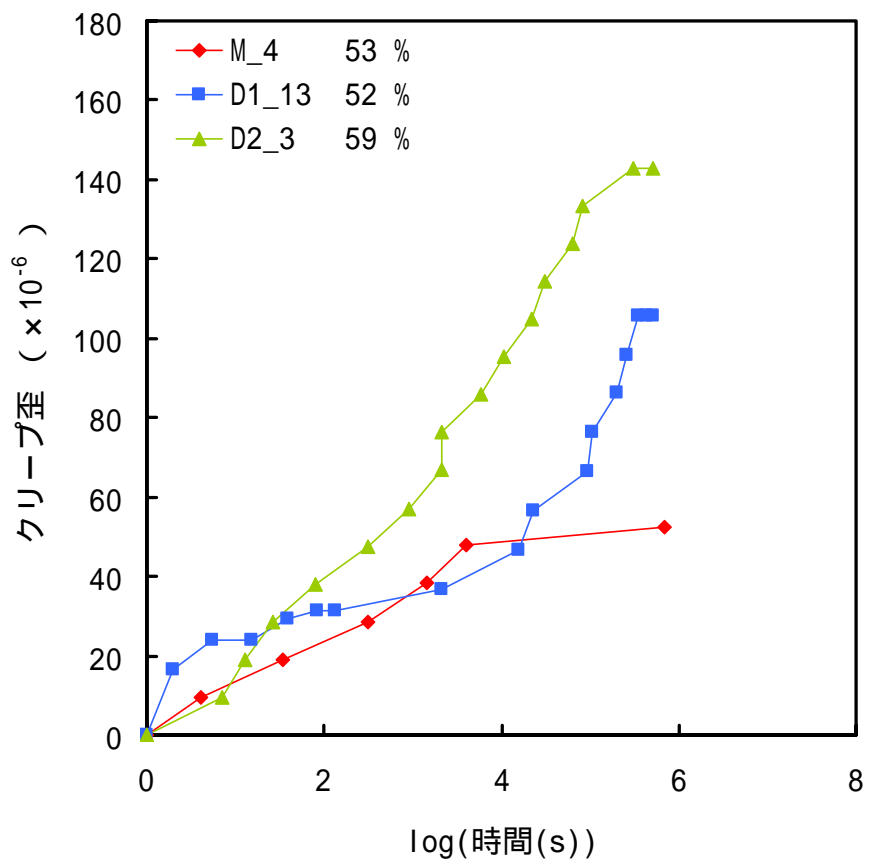
(c) 下に凸

図3-2 低応力レベルでのクリープ歪の経時変化(気乾状態)



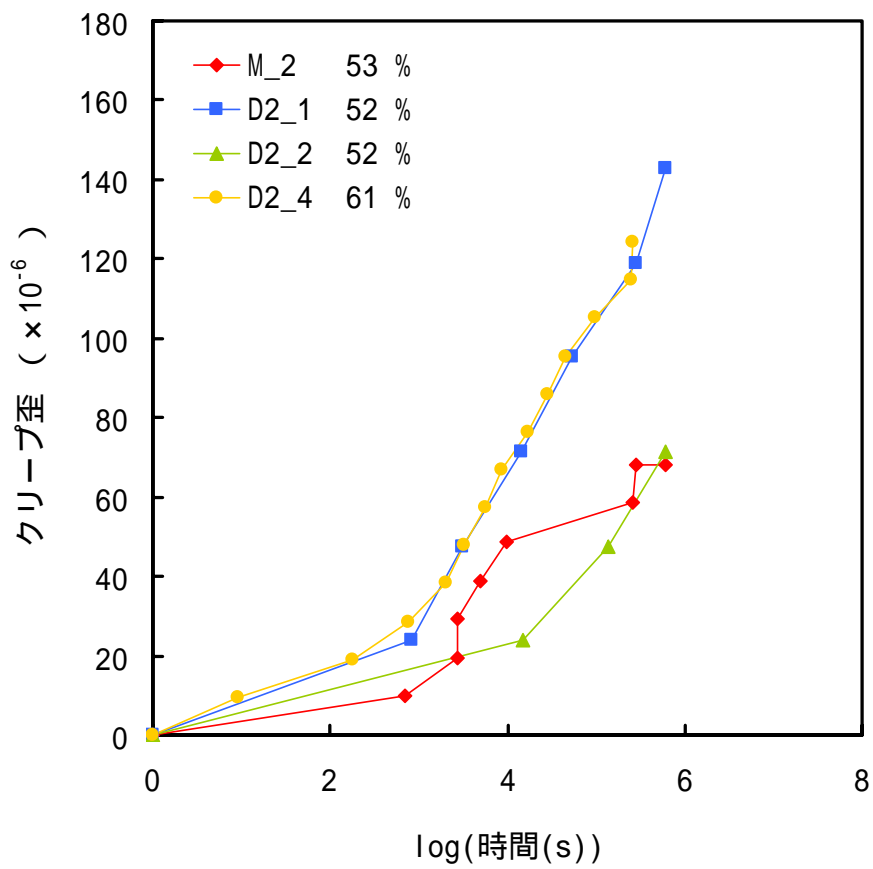
(a) 上に凸

図 3 - 3 低応力レベルでのクリープ歪の経時変化 (湿潤状態)



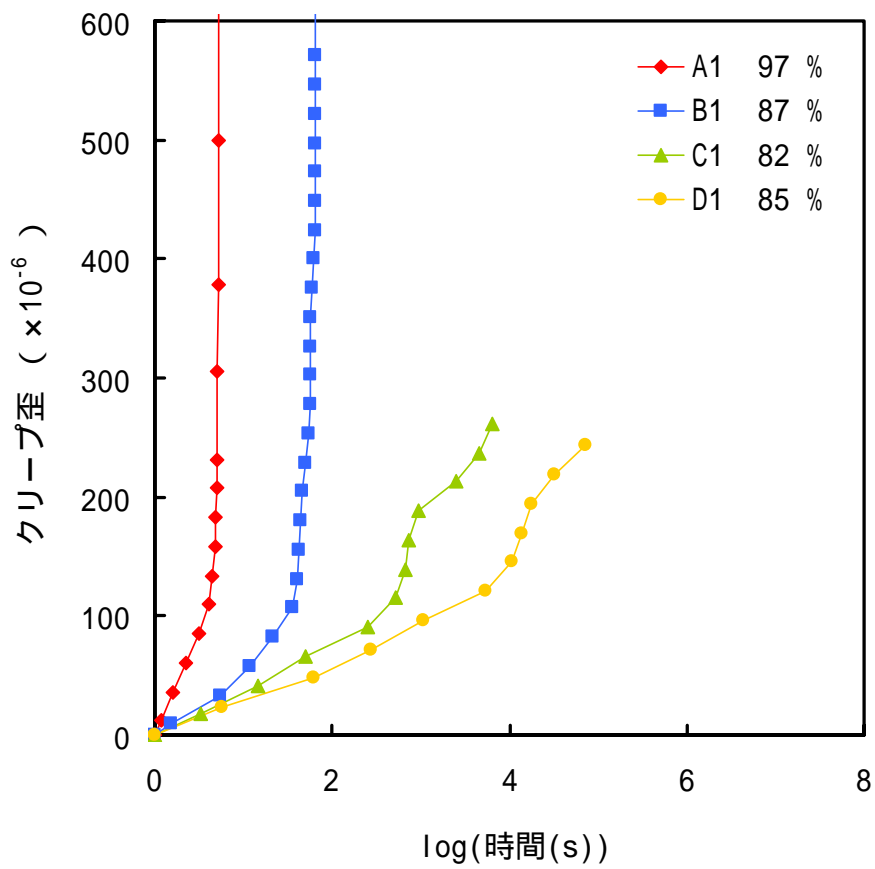
(b) ほぼ直線

図 3 - 3 低応力レベルでのクリープ歪の経時変化 (湿潤状態)



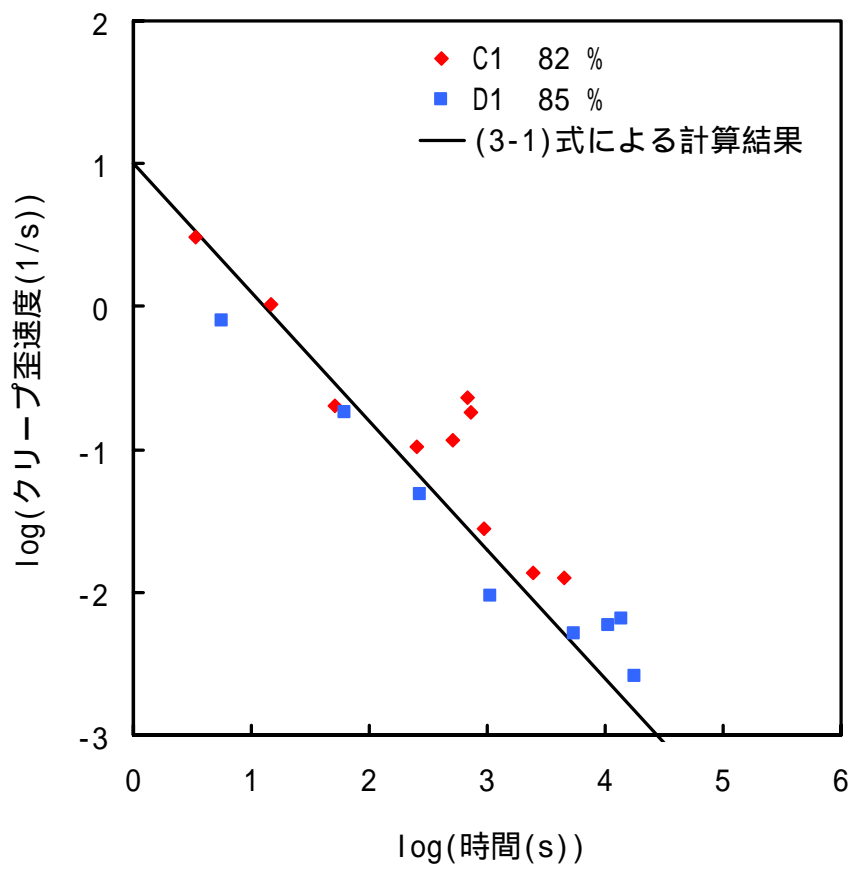
(c) 下に凸

図 3 - 3 低応力レベルでのクリープ歪の経時変化 (湿潤状態)



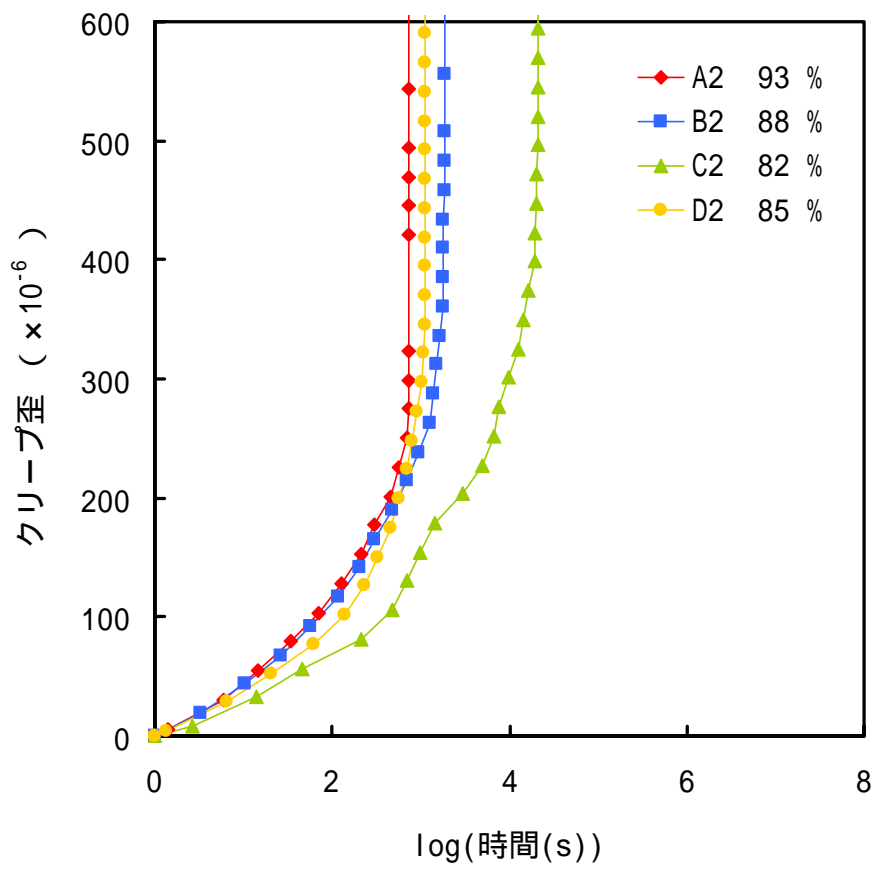
(a) クリープ歪の経時変化

図3-4 高応力レベルでのクリープ試験結果(気乾状態)



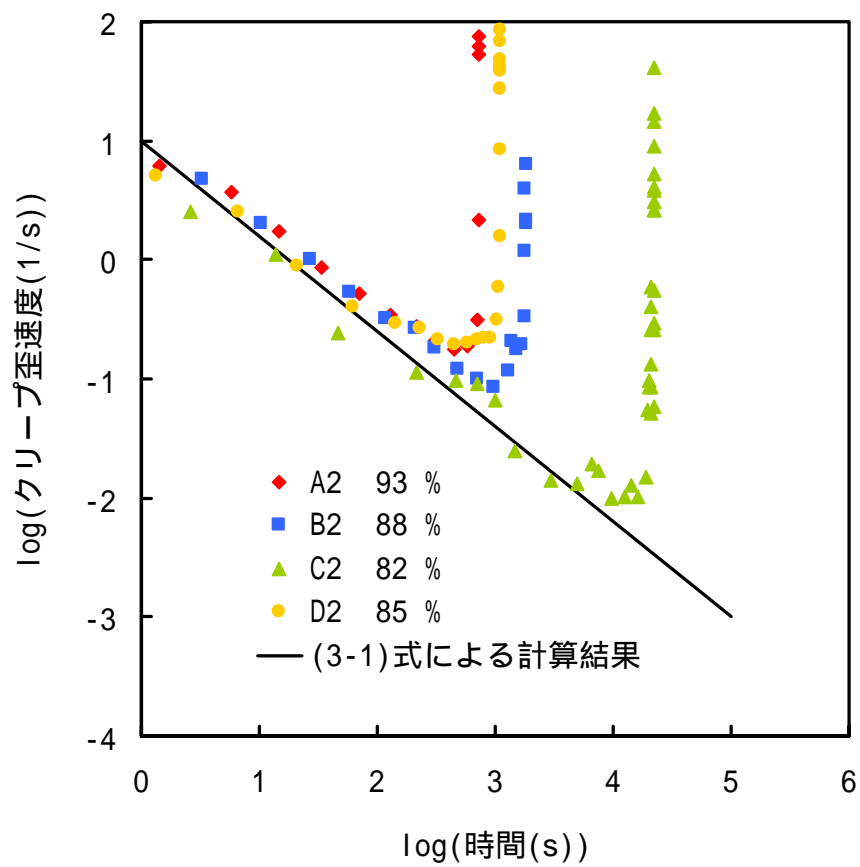
(b) クリープ歪速度の経時変化

図3-4 高応力レベルでのクリープ試験結果（気乾状態）



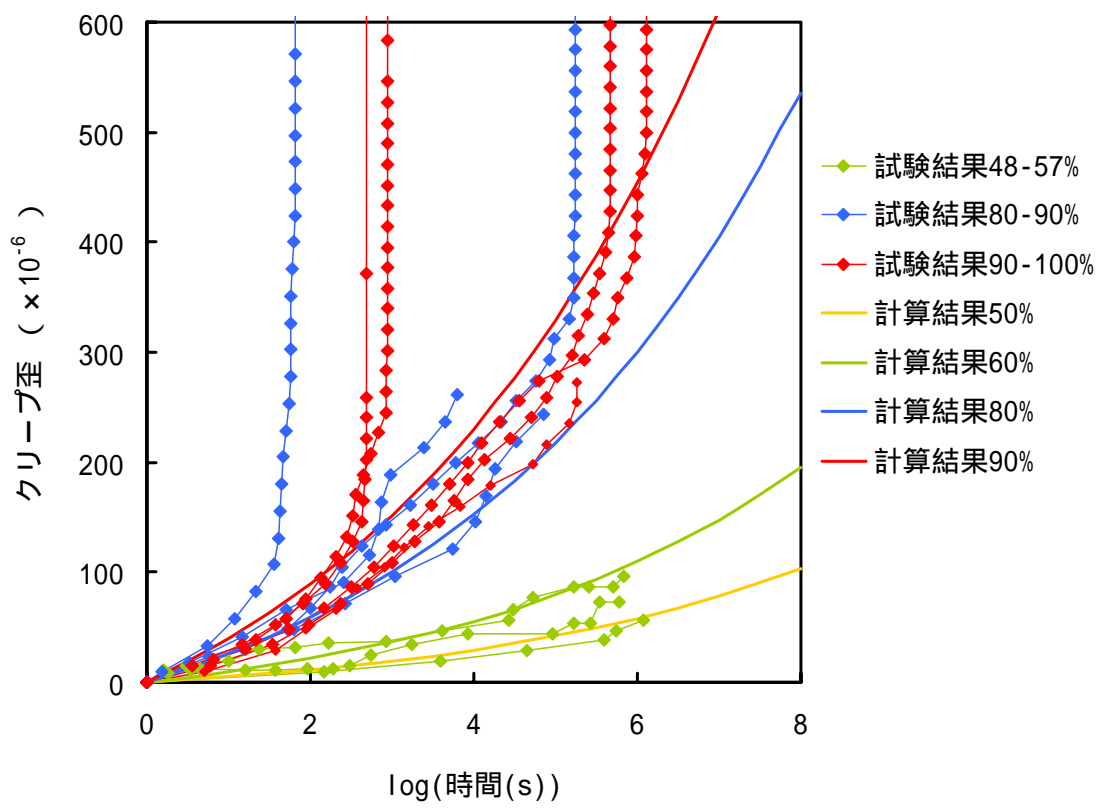
(a) クリープ歪の経時変化

図3-5 高応力レベルでのクリープ試験結果(湿潤状態)



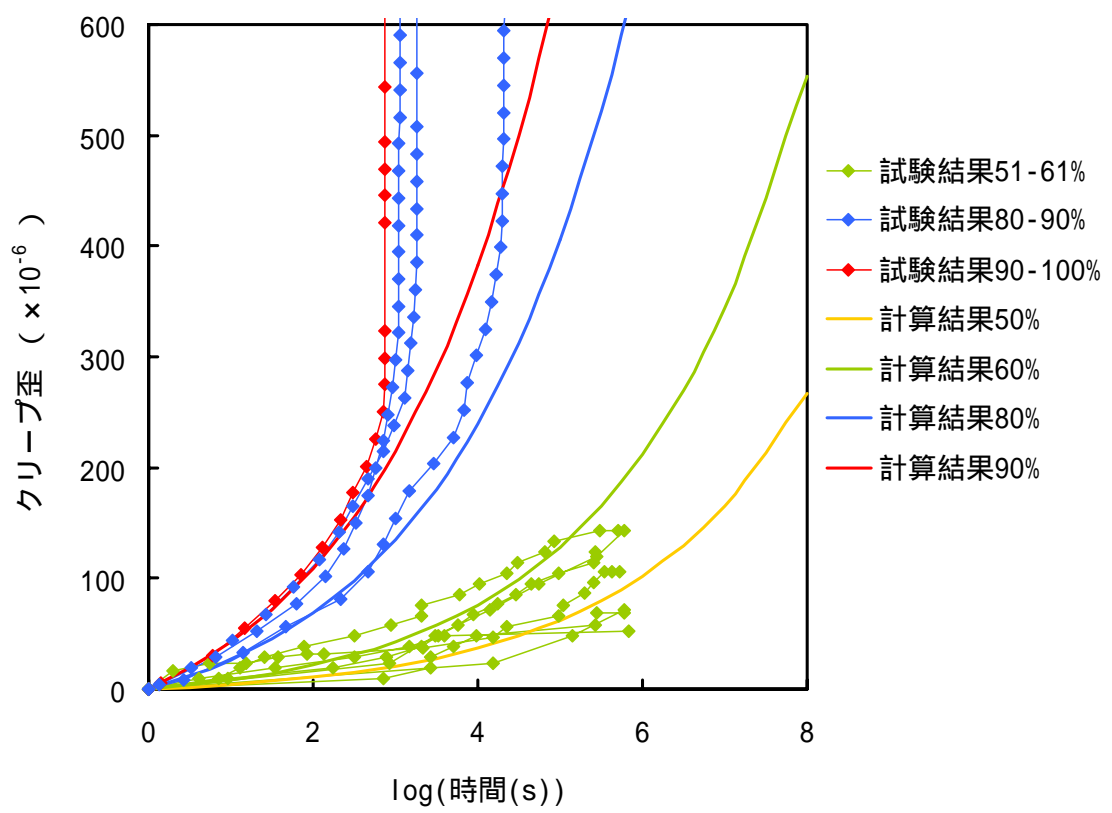
(b) クリープ歪速度の経時変化

図3-5 高応力レベルでのクリープ試験結果（湿潤状態）



(a) 気乾状態

図3-6 クリープ試験結果と(3-3)式による計算結果



(b) 湿潤状態

図 3 - 6 クリープ試験結果と (3 - 3) 式による計算結果

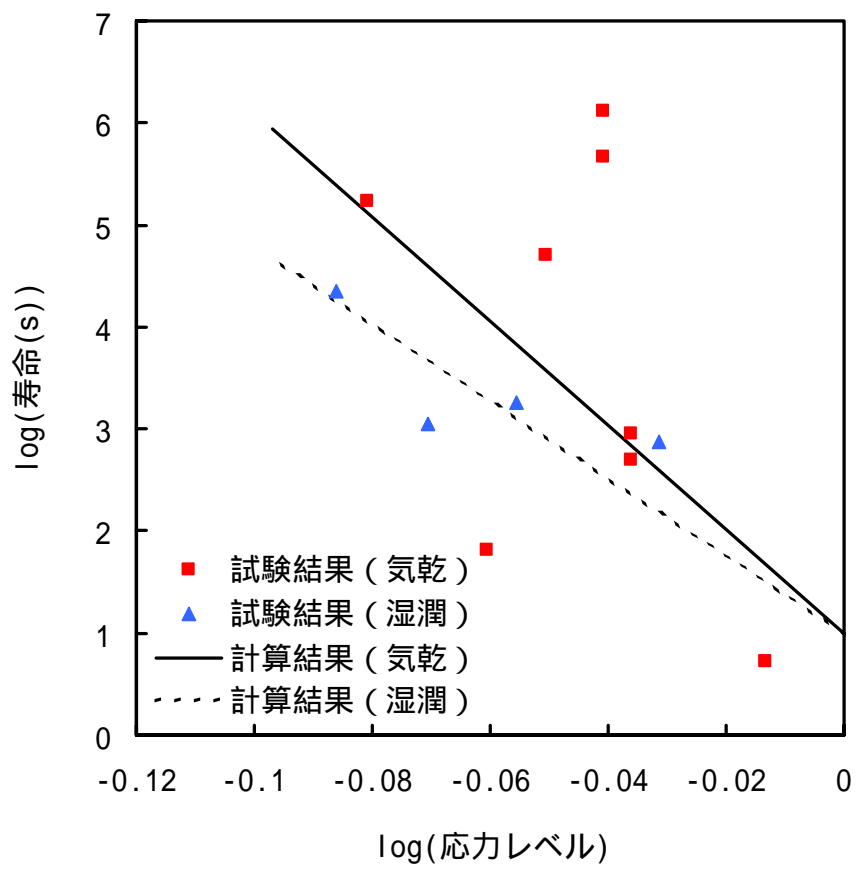


図3-7 クリープ応力レベルとクリープ寿命
(直線は(3-4)式による計算結果)

4. 広範囲の応力レベルに適用可能な構成方程式の開発

4.1 はじめに

岩石の時間依存性挙動や粘弾性的な挙動に対する認識が、徐々に浸透しつつある現状といえよう。今後、長期間の使用を前提とした地下空間の開発にあたっては、事前に長期にわたる変形や安定性を計算機シミュレーションにより検討することが頻繁に行われると予測する。その際に必要となる構成方程式は既にいくつか提案されているが(大久保, 1991), 破壊を表現できて、しかも定数を求める手順, 計算手順が比較的簡単なものはごく少ない。

大久保ら(1987a)はコンプライアンス可変型構成方程式を提案した。この構成方程式の特徴は、多くの荷重条件で解析解を持つとともに(大久保, 1992), 比較的簡単に有限要素法プログラムなどに組み込んで数値実験を行えることにある(大久保・金, 1993)。しかしながら、構成方程式を簡略化することに重きを置いたために、歪速度が低下していく1次クリープがあらわせないなどの欠点もある。

この欠点を補うため、大久保・福井(2002)は、クリープ試験直後にクリープ歪速度が次第に遅くなっていく部分をあらわせる構成方程式を提案し、田下凝灰岩の長期クリープ試験結果と比較検討した。その結果、この構成方程式は応力レベル30%で行われた田下凝灰岩の1次クリープをよく再現できることがわかったが、この構成方程式ではクリープ歪速度が急激に増加する3次クリープをあらわすことができない。

最近になって、大久保ら(2002b)は、3次クリープをあらわせる構成方程式(大久保ら, 1987a)と1次クリープをあらわせるそれ(大久保・福井, 2002)とを組み合わせた構成方程式を提案し、公表されているクリープ試験結果によってその適用性を検討した。その結果、一軸圧縮応力下におけるクリープ試験の1次クリープから3次クリープまでをよく再現できるとともに、一軸引張クリープ試験にも適用できる可能性があることを指摘した。

本章では大久保ら(2002b)が提案した構成方程式が、強度試験結果に適用できるかどうかについて検討した。まず、三城目安山岩の一軸圧縮強度試験から得られる応力-歪曲線や、一軸圧縮強度の载荷速度依存性などが、提案した構成方程式により再現できるかどうかを検討した。さらに、既往の研究が少なく(Wijk et al., 1978; Liao et al., 1997), 構成方程式の開発も進んでいない一軸引張強度試験について、提案した構成方程式でどの程度まで説明できるかを検討した。

4.2 構成方程式の解析的な検討

4.2.1 拡張した構成方程式

大久保ら(1987a)が提案した構成方程式は、歪と応力の比であるコンプライアンス λ^* が徐々に増加すると考えたものであり、無次元化した形では次のようになる。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_3 \left(\frac{\sigma^*}{\sigma_0^*} \right)^{n_3} \left(\lambda^* \right)^{m_3} \quad (4-1)$$

を初期値 λ_0 で正規化した値を, $\lambda^* = \lambda / \lambda_0$ とした. また, σ を一軸圧縮強度 σ_c で正規化した値を, $\sigma^* = \sigma / \sigma_c$ とした. なお, σ_c は載荷速度などの試験条件で変わるので, 任意に定めた同一の条件下で得られた値とする. n_3 は $d\lambda^*/dt$ の応力依存性をあらわす定数で, 値が大きいほど非線形性が高くなり, 例えばクリープではわずかな応力の違いで寿命が大きく変化する. m_3 は破壊が急激に進むかどうかをあらわす定数であり, この値が大きいと強度破壊点を過ぎた後, 応力が急激に低下する.

(4-1) 式より直ちにわかることであるが, 応力一定 (クリープ) では, 時間の経過に伴って λ^* が増大し, それに従って $d\lambda^*/dt$ も単調増加していく. λ^* と歪 $\epsilon^* = \lambda^* - 1$ とは比例するので, 歪速度 $d\lambda^*/dt$ も単調増加する. よって, 歪速度が減少していく 1 次クリープ (Cristescu, 1993) を再現できない.

大久保・福井 (2002) は, 1 次クリープをあらわす次式を提案した.

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1 (\sigma^*)^{n_1} (\lambda^* - 1)^{-m_1} \quad (4-2)$$

この場合にも n_1 は応力依存性をあらわす定数である. a_1 は正值の定数であり, m_1 も正值の定数なので, 応力一定の条件下では, 時間の経過に伴って λ^* は単調増加する. この場合には, λ^* の増大にともなって右辺は小さくなっていくので, 歪速度は経過時間に伴って減少する.

大久保・福井 (2002) は, 1 次クリープから 3 次クリープまでを再現できる構成方程式として, (4-1) 式と (4-2) 式を足し合わせた次式を提案した.

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1 (\sigma^*)^{n_1} (\lambda^* - 1)^{-m_1} + a_3 (\sigma^*)^{n_3} (\lambda^*)^{m_3} \quad (4-3)$$

以下では, 大久保ら (2002b) にならって, $n_1 = n_3 = n$ と仮定して, (4-3) 式の拡張したコンプライアンス可変型構成方程式について解析的に検討してみる.

4.2.2 クリープ

応力一定の条件下での (4-3) 式の解析解については, 既に大久保・福井 (2002) である程度議論されているので, 以下では, やや一般化した検討を行う.

$n_1 = n_3 = n$ の場合には, λ^* の関数 $f(\lambda^*) = a_1 (\lambda^* - 1)^{-m_1} + a_3 (\lambda^*)^{m_3}$ と λ^* の関数 $g(\lambda^*) = (\lambda^*)^n$ を用いて, (4-3) 式は次のように変数分離形でかける.

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = f(\lambda^*) g(\lambda^*) \quad (4-4)$$

これは、(4-1)式に対応するものであり、そこで議論したことの多くが成り立つ。

(4-4)式の構成方程式では、その時点での状態(変形ないし破壊の進み具合)は σ で決まる。この σ は、経過時間を t として、次式の σ によって決まる(大久保, 1992)。

$$\tau = \int_0^t g(\sigma) dt = \int_0^t (\sigma)^n dt \quad (4-5)$$

クリープの場合には応力 σ が一定なので

$$\tau = g(\sigma) \cdot t = (\sigma)^n \cdot t \quad (4-6)$$

となる。これを変形すると

$$t = \frac{\tau}{g(\sigma)} = \frac{\tau}{(\sigma)^n}$$

となるので、クリープ開始よりクリープ歪速度が最小になるまでの時間とか、クリープ寿命などは $g(\sigma) = (\sigma)^n$ に反比例する。例えばクリープ寿命 t_c は次のようになる。

$$t_c \propto \frac{1}{g(\sigma)} \propto \frac{1}{(\sigma)^n} \quad (4-7)$$

また、歪は $\epsilon = \dot{\epsilon} \cdot t$ なので、 $\dot{\epsilon}$ が同じならば、 $\sigma / \dot{\epsilon}$ や $(d\sigma/dt) / \dot{\epsilon}$ が同じといえる。すなわち $\sigma / \dot{\epsilon}$ を横軸として図4-1のようなマスターカーブを描くことができる。

4.2.3 強度試験

応力帰還制御は、次式で示すように、歪と応力の線形加算値が一定速度で増加させる制御方法である(大久保・西松, 1984)。

$$\sigma + \frac{\dot{\sigma}}{E} = C \cdot t \quad (4-8)$$

ここで $E (= 1/\epsilon_0)$ はヤング率、 C は载荷速度である。 $\dot{\sigma}$ は無次元の定数で応力の帰還量を決める。この応力帰還制御は、定応力速度試験や定歪速度試験を一般化したものといえるので、応力帰還制御を前提とした検討結果は、定応力速度試験や定歪速度試験に対しても適用できる。

(4-8)式を変形すると次式を得る。

$$\lambda^* - \lambda_0 = C^* \cdot t \quad (4-9)$$

ただし, $C^* = C \cdot E / \sigma_c$ である.

(4-4)式で $g(\lambda^*) = (\lambda^*)^n$ とした後, (4-9)式を代入して t を消去すると次式を得る.

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = f(\lambda^*) \cdot \left(\frac{C^* \cdot t}{\lambda^* - \lambda_0} \right)^n \quad (4-10)$$

λ^* と t に関する項を, それぞれ左辺と右辺にまとめて積分する.

$$\int_{\lambda_0}^{\lambda^*} \frac{(\lambda^* - \lambda_0)^n}{f(\lambda^*)} d\lambda^* = \int_0^t (C^* \cdot t)^n dt$$

若干の計算の後に次式を得る.

$$\frac{1}{(\lambda^* - \lambda_0)} \left\{ (n+1) \int_{\lambda_0}^{\lambda^*} \frac{(\lambda^* - \lambda_0)^n}{f(\lambda^*)} d\lambda^* \right\}^{\frac{1}{n+1}} = (C^*)^{-\frac{1}{n+1}} \cdot t \quad (4-11)$$

(4-11)式左辺には載荷速度が入っていない. よって,

$$t = (C^*)^{-\frac{1}{n+1}} \cdot (\lambda^* - \lambda_0) \quad (4-12)$$

とおけば, (4-11)式を用いて描く $t - (\lambda^* - \lambda_0)$ 曲線は載荷速度によらないマスターカーブとなる. 同様に,

$$t = (C^*)^{-\frac{1}{n+1}} \cdot (\lambda^* - \lambda_0) \quad (4-13)$$

とおけば $t - (\lambda^* - \lambda_0)$ 曲線は載荷速度によらない. また,

$$t = \frac{1}{C^*} \cdot (\lambda^* - \lambda_0) \quad (4-14)$$

なので, $t - (\lambda^* - \lambda_0)$ 曲線も載荷速度によらない.

図4-2のように $t - (\lambda^* - \lambda_0)$ 線図上にマスターカーブが描けることから次のことがいえる. なお, 以下にあげる事項は(4-3)式のみならず(4-1)式に対してもいえることを断っておく(大久保,

1992).

1) 応力帰還制御で得られる応力 - 歪曲線 (- 曲線) は, 載荷速度が増加すると, 縦横とも $(C^*)^{1/(n+1)}$ 倍になる.

2) 無次元化する前の応力 - 歪曲線は, 載荷速度が大きいものが小さいものを内包し, 互いに相似形である.

3) 載荷速度 C^* での一軸圧縮強度 $\sigma_c(C^*)$ は次式となる.

$$\sigma_c(C^*) \propto (C^*)^{\frac{1}{n+1}} \quad (4-15)$$

4) 50 %割線ヤング率や 50 %接線ヤング率のように, 強度に対して相対的な応力レベルを指定したヤング率は, 載荷速度に依存しない (大久保ら, 2001).

5) 一方, 決まった応力 (例えば 20 MPa のように指定した応力) でのヤング率は, 載荷速度が速くなると増加する (大久保ら, 2001).

以上で行った議論は, 分かりやすさを重んじて, 一軸圧縮試験のみを対象としたが, 一軸圧縮を一軸引張に (例えば, 一軸圧縮強度 σ_c を一軸引張強度 σ_t に) 読み替えれば, 一軸引張試験にも適用できることを念のために断っておく.

4.3 強度試験結果に基づく検討

4.3.1 一軸圧縮強度試験

大久保・福井 (2002) は, 大久保・西松 (1986) の三城目安山岩の一軸圧縮クリープ試験結果より (4-3) 式中の定数をもとめた. それらを表 4-1 の識別番号 に示す. まず, このクリープ試験結果より求められた定数をそのまま用いて, 一軸圧縮強度試験の計算機シミュレーションを行い, 表 4-2 に示した過去の一軸圧縮試験結果との比較・検討を行った.

大久保・西松 (1986) は, クリープ試験と同じ岩石ブロックより試験片をボーリングして一軸圧縮試験を行った. 図 4-3 に試験結果と計算結果 (図中の) を示す. 縦軸は, $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_c / \sigma_c$, 横軸は $\epsilon^* = \epsilon / \epsilon_c$ である. なお, 制御方式として応力帰還制御を採用し, (4-8) 式中の載荷速度 C は 10^{-5} /s, 応力帰還量をあらかず定数 α は 0.5 としている. 試験開始直後の下に凸の部分を除いて, 強度の約 50 %までは試験結果と計算結果はほぼ一致している. 試験結果では, 強度の約 90 %まで応力 - 歪曲線は直線的であるが, 計算結果では強度の 50 %あたりから わずかに上に凸の曲線となる. このため, 強度破壊点での歪は計算結果の方が若干大きくなる. 試験結果では強度破壊点以降, 応力 - 歪曲線の傾きが正になったり負になったりと複雑で, 局所的な破壊が何度か生じていることをうかがわせる. このような挙動は計算では表現できていないが, 強度破壊点以降の AB 間および CD 間での傾きは, 計算結果のそれらと比較的良く合っている.

大久保・福井 (2002) は, 福井ら (1993) が行った強度破壊点以降でのクリープ試験の結果も, (4-3) 式を用いて計算した結果と良く合うとしている. ここで注目すべきことは, 別のブロックから切り出した試験片を使用し, 別の試験者が行った試験結果であったにもかかわらず, クリープ

試験結果をある程度再現できたということである。そこで、図 4 - 4 に示すように、福井ら (1993) が行った 4 本の一軸圧縮強度試験の結果と、(4 - 3) 式を用いて計算した結果との比較を行った。試験、計算とも、制御方式として応力帰還制御を採用し、 $C = 10^{-5} / s$ 、 $\alpha = 0.35$ としている。試験で得られた 4 つの応力 - 歪曲線は、正規化した線図上ではほぼ重なる。計算結果は強度の約 50 % までは試験結果と良く合っているが、その後は両者間の差が徐々に大きくなっていく。試験では強度破壊点以降、大久保・西松 (1986) の結果と同様に、何段階かの局所的な破壊が生じて応力 - 歪曲線が複雑に折れ曲がるが、この応力 - 歪曲線の傾きが正の部分については計算結果の傾きと比較的合っているといえる。

大久保ら (1987b) は、 $\alpha = 0.3$ とした応力帰還制御で、載荷速度を 4 段階に変えて一軸圧縮強度試験を行った。試験結果では、載荷速度の増加にともなって、一軸圧縮強度が増したが、これを計算結果で再現できるかどうかを検討した。図 4 - 5(a) に計算結果と試験結果を示すが、載荷速度の増加にともなう一軸圧縮強度の増加や、強度破壊点以降の応力 - 歪曲線が右側にシフトする点においては、計算結果でもよく再現できている。ただし、強度の約 50 % で計算結果が試験結果からずれはじめるのは、大久保・西松 (1986) や福井ら (1993) の場合と同じであった。

4.3.2 一軸引張強度試験

一軸引張応力下におけるクリープ試験 (Chugh, 1974) や強度試験 (秋ら, 1995; Okubo and Fukui, 1996) は公表された結果が少なく、構成方程式を用いた検討はほとんどの場合、強度破壊点以前の領域にとどまっている (Nova and Zaninetti, 1990)。大久保・福井 (2002) は、一軸圧縮クリープ試験で求めたパラメータをそのまま使用して計算した一軸引張クリープ歪やクリープ歪速度が、秋ら (1995) が行った一軸引張クリープ試験結果をかなり良く再現するとしている。そこで、表 4 - 1 に示した定数 (大久保・福井, 2002) を用いて一軸引張強度試験をシミュレートし、三城目安山岩の一軸引張試験結果と比較検討を行った。

図 4 - 6 に、秋ら (1995) の一軸引張強度試験結果と比較しつつ計算結果 (図中の) を示す。試験、計算とも、応力帰還制御を採用し $C = 10^{-6} / s$ 、 $\alpha = 0.3$ としている。載荷直後の応力 - 歪曲線は直線であるが、一軸圧縮応力下よりも低い応力レベル * でこの直線からずれ始める。計算結果も同じような傾向を示し、強度破壊点までは一軸圧縮強度試験よりもうまく試験結果を再現できている。計算では強度破壊点以降の応力 - 歪曲線の傾きは正となるが、試験では応力は強度の約 20 % まで急激に減少し、その後の応力低下は緩慢である。

福井ら (2003) は一軸引張強度の載荷速度依存性について調べた結果、強度やヤング率の増加傾向が、一軸圧縮応力下の場合と似ているとした。そこで、福井ら (2003) が載荷速度を 4 段階に変化させて行った一軸引張強度試験の結果と計算結果とを比較した。図 4 - 7(a) に試験結果と計算結果を示すが、いずれも応力帰還制御を採用し $\alpha = 0.3$ としている。秋ら (1995) の結果と同様に、試験結果と計算結果とは、いずれの載荷速度でも強度破壊点まではほぼ一致している。また、一軸圧縮強度試験の場合と同じように、強度の載荷速度依存性もうまく再現できている。一軸引張応力下でも一軸圧縮応力下と同じように、載荷速度の増加とともに強度破壊点以降の応力 - 歪曲線は右へとシフトしていくが、強度破壊点以降の傾きは負であり、計算結果とはやや異なる傾向を示した。

一軸圧縮クリープ試験から求めた (4 - 3) 式中の定数を用いて、一軸圧縮試験および一軸引張強

度試験の計算機シミュレーションを行い、試験結果と計算結果（図中の ）とを比較した．要点を整理すると次のようになる．

- 1) 一軸圧縮応力下では、試験開始から強度の約 50 %までは試験結果と良く合うが、それ以降強度破壊点までは、計算結果の方が試験結果よりも歪が大きい．
- 2) 一軸引張応力下では、試験開始から強度破壊点まで、試験結果と計算結果とは良く合う．
- 3) 一軸圧縮、引張応力下ともに強度破壊点以降の応力 - 歪曲線の傾きは、試験ではほぼ垂直になるが、計算では正の傾き（Class ）となる．
- 4) 一軸圧縮、引張応力下ともに強度の載荷速度依存性はよく再現できる．また、載荷速度の増加とともに、強度破壊点以降の応力 - 歪曲線が右に移動していく様子も再現できる．

特に注目すべきは、一軸圧縮クリープ試験結果から表 4 - 1 に示す定数（大久保・福井，2002）を求めたにもかかわらず、2)に記したように、計算は一軸引張強度試験結果の方をより良く再現することである．

4.3.3 強度試験結果に基づく構成方程式の定数

一軸圧縮クリープ試験から求めた（4 - 3）式中の定数に関する検討結果を述べてきたが、定数は強度試験からも求めることができる．本節では、強度試験から構成方程式中の定数を求めるとともに、クリープ試験より求めた定数との比較・検討を行う．

準備として、（4 - 3）式の右辺第 1 項と第 2 項が応力 - 歪曲線に与える影響について調べる．表 4 - 1 に示した定数（大久保・福井，2002）を用いて、（4 - 3）式の第 1 項と第 2 項の値を計算したところ、試験開始直後は第 1 項の値が支配的であり、その後徐々に第 1 項と第 2 項の比は小さくなっていくが、図 4 - 3 の a 点に至っても、第 1 項が第 2 項の約 100 倍であった．a 点以降になると、第 2 項の増加率が大きくなり、やがて第 2 項が第 1 項より大きくなる．例えば、図 4 - 3 の b 点では、第 2 項が第 1 項の 100 倍となる．つまり、強度破壊点以前ではかなり高い応力レベルまで第 1 項が支配的であり、強度破壊点以降は第 2 項が支配的といえる．

強度破壊点以前では（4 - 3）式の右辺第 1 項が支配的であることがわかったので、この部分の応力 - 歪曲線から、第 1 項中の定数である a_1 と m_1 を求める方法について検討する．計算機シミュレーションを交えて検討した結果によれば、強度破壊点以前のかかなり高い応力レベルまで、応力 - 歪曲線は制御方式によりさほど変化しないことが判明した．そこで、解析的な取り扱いが比較的簡単な定応力速度の場合の応力 - 歪曲線が試験結果と一致するように定数を決めることにした．（4 - 9）式で $\lambda^* - 1 = 1$ とすれば、一定の応力速度となる．（4 - 11）式の $f(\lambda^*)$ として（4 - 3）式右辺第 1 項を採用し、 $\lambda^* - 1 = 1$ の条件を代入して整理すると、次式が得られる．

$$\lambda^* - 1 = a_1 \frac{1}{m_1 + 1} (m_1 + 1) \frac{1}{m_1 + 1} (\lambda^*)^{\frac{n_1 + 1}{m_1 + 1}} \quad (4 - 16)$$

（4 - 16）式からわかるように、縦軸を $\lambda^* - 1$ 、横軸を λ^* とした両対数グラフ上に強度試験結果を描けば、その傾きは $(n_1 + 1) / (m_1 + 1)$ となる．例として大久保・西松（1986）が行った一軸圧縮強度試験結果の内、応力レベル 60 % ~ 90 % までを両対数グラフ上にプロットしたのが図 4 - 8(a)

である．試験結果の近似直線の傾き $(n_1 + 1) / (m_1 + 1)$ は 6.4 となった．載荷速度を変化させたときの強度の増加率から $n = n_1 = 37$ (大久保・福井, 1997) であることがわかっているので, $m_1 = 5$ が得られる．次に, この n_1 と m_1 を (4 - 16) 式に代入し, (4 - 16) 式より得られる計算結果が 図 4 - 8(a) の近似直線と重なるときの a_1 を求めると 4×10^{-10} となる．

(4 - 3) 式の右辺第 2 項は拡張前の構成方程式と同じであり, m_3 の算出には, 大久保・福井 (1997) による, 強度破壊点以降の応力 - 歪曲線の傾きから求める方法を採用した． a_3 については, 計算機を使用したくり返し計算を行い, 試験と計算の強度が一致するようにした．こうして一軸圧縮強度試験から求めた定数を表 4 - 1 の 示す．これらを用いて行った一軸圧縮強度試験のシミュレーション結果を, 図 4 - 3, 図 4 - 4 と図 4 - 5(b) の で示す．いずれの計算結果でも, 強度破壊点付近で応力がほぼ一定のまま歪が増加する区間を除けば, 試験結果と比較的良好合う．

同じ手法を, 一軸引張強度試験結果 (秋ら, 1995) に適用した．図 4 - 8(b) の近似直線の傾き $(n_1 + 1) / (m_1 + 1)$ は 6.3 となった． n_1 と n_3 は, 福井ら (2003) が, 載荷速度を変化させた一軸引張試験から求めた n の値 39 を採用した．求めた定数を表 4 - 1 に, 計算結果を図 4 - 6 および図 4 - 7(b) の で示す．計算結果と試験結果は, 残留強度領域を除いて比較的良好合っており, 強度の載荷速度依存性も再現できている．

図 4 - 9 には, 大久保・西松 (1986) の応力レベル 77 % での一軸圧縮クリープ試験結果と, 表 4 - 1 に示した 3 通りの定数で計算を行った結果を示す．一軸圧縮強度試験から得られた定数 を採用した計算結果では, 試験開始直後の歪速度が試験結果や他の計算結果よりも小さいが, 破壊寿命についてはクリープ試験で得られた定数 による計算結果とほぼ等しい．一方, 一軸引張強度試験から得られた定数 を採用した計算結果では, 破壊寿命が若干大きい, クリープ開始から破壊までの試験結果をうまく再現できている．

4.4 考察

表 4 - 1 の識別番号 は一軸圧縮クリープ試験結果から求めた (4 - 3) 式の定数である． と は, それぞれ一軸圧縮強度試験と一軸引張強度試験結果から求めた定数である．

定数 n_1 は強度破壊点以前の領域における応力依存性を示すが, 大久保・福井 (2002) にならって n_3 と同じ値とした．現在までのところ n_3 と分離して求める適当な方法は確立されていないが, 可能性のある方法の一つにヤング率の載荷速度依存性を応用した方法がある．大久保ら (2001) で述べたように, n_1 と n_3 が等しければヤング率の載荷速度依存性は生じないはずであり, 両者の差が大きいほどヤング率の載荷速度依存性が顕著となる．残念ながら現在の測定精度ではヤング率の載荷速度依存性から n_3 を精度良く求めることは難しいが, 三城目安山岩の場合, ヤング率の載荷速度依存性が比較的小さいことから (大久保ら, 2001), n_1 と n_3 に大差はないと考えている．

一軸圧縮クリープ試験から m_1 を求めるには, 図 4 - 1(b) と同じ形状をしたクリープ歪速度曲線の傾きを読み取り, 次式から m_1 を計算する．

$$(傾き) = - \frac{m_1}{m_1 + 1} \quad (4 - 17)$$

大久保・福井(2002)では傾きが-0.9であるとして $m_1=9$ と計算した。表4-1のやのごとく $m_1=5$ とすれば,(4-17)式から計算される傾きは-0.83となる。クリープ歪は温度変化や計測用のセンサー・増幅器のドリフトなどによりある程度変動するので、定数と定数、との差が有意かどうかについては確たることはいえない。

クリープ試験から n_3 を求めるには、クリープ寿命がクリープ応力の n_3 乗に反比例することを利用した。また、強度試験から n_3 を求めるには、強度が載荷速度の $1/(n_3+1)$ 乗に比例することを利用した。識別番号～に対応する n_3 は35～39の範囲で変動したが、クリープ寿命のばらつきや強度のばらつきを考えると実験誤差の範囲と考えるのが妥当であろう。

一軸圧縮クリープ試験から m_3 を求めるには、横軸を残存寿命とし、図4-1(b)と似た形状をしたクリープ歪速度曲線の傾きを読み取り、次式から m_3 を計算する。

$$(傾き) = -\frac{m_3}{m_3 - 1} \quad (4-18)$$

大久保・福井(2002)では傾きが-1.018であるとして $m_3=55$ 計算した。逆に $m_3=41$ とすれば,(4-18)式から計算される傾きは-1.025となる。これからもわかるように、クリープ試験結果から m_3 を正確に求めることは困難といえる。

表4-1に示した各試験で得られた定数の値は多少異なっているが、例えば図4-9からわかるように、一軸圧縮クリープ試験で得られた定数と一軸引張強度試験で得られた定数を採用した計算結果は比較的似たものであった。これに対して一軸圧縮強度試験結果から求めた定数を使用すると、1次クリープ段階のクリープ歪が相当に小さくなる。データから定数を求める過程にはある程度の任意性があるが、データの読み取り方などを変えてもとの差は説明し難い。定数が他と異なることは、一軸圧縮強度試験の強度破壊点以前においては、変形の進行を妨げる機構の存在を示唆している可能性がある。現時点では不明な点が多いが、可能性のある機構の一つをレオロジーモデルであらわすならば、図4-10に示すようにコンプライアンスが徐々に変化するばね要素と並列に非線形粘性要素が存在するモデルが考えられる。この非線形粘性要素は、試験片内部の空隙がつぶれるか小さくなっていくときに生じるエネルギー消費過程と結びついている可能性がある。しかしながら、この案を採用するには、一軸圧縮クリープや引張応力下では効果が発揮しないことを説明する必要があり、詳しい検討は今後の研究にゆだねられる。

4.5 まとめ

再掲する(4-3)式が、一軸圧縮強度試験および一軸引張強度試験に適用可能かどうかについて検討した。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1 (\dot{\lambda}^*)^{n_1} (\lambda^* - 1)^{-m_1} + a_3 (\dot{\lambda}^*)^{n_3} (\lambda^*)^{m_3} \quad (4-3)$$

過去に実施した強度試験結果と(4-3)式に基づいた計算結果とを比較・検討したところ、(4-3)式は応力-歪曲線をある程度再現するとともに、強度の載荷速度依存性も再現することがわかった。

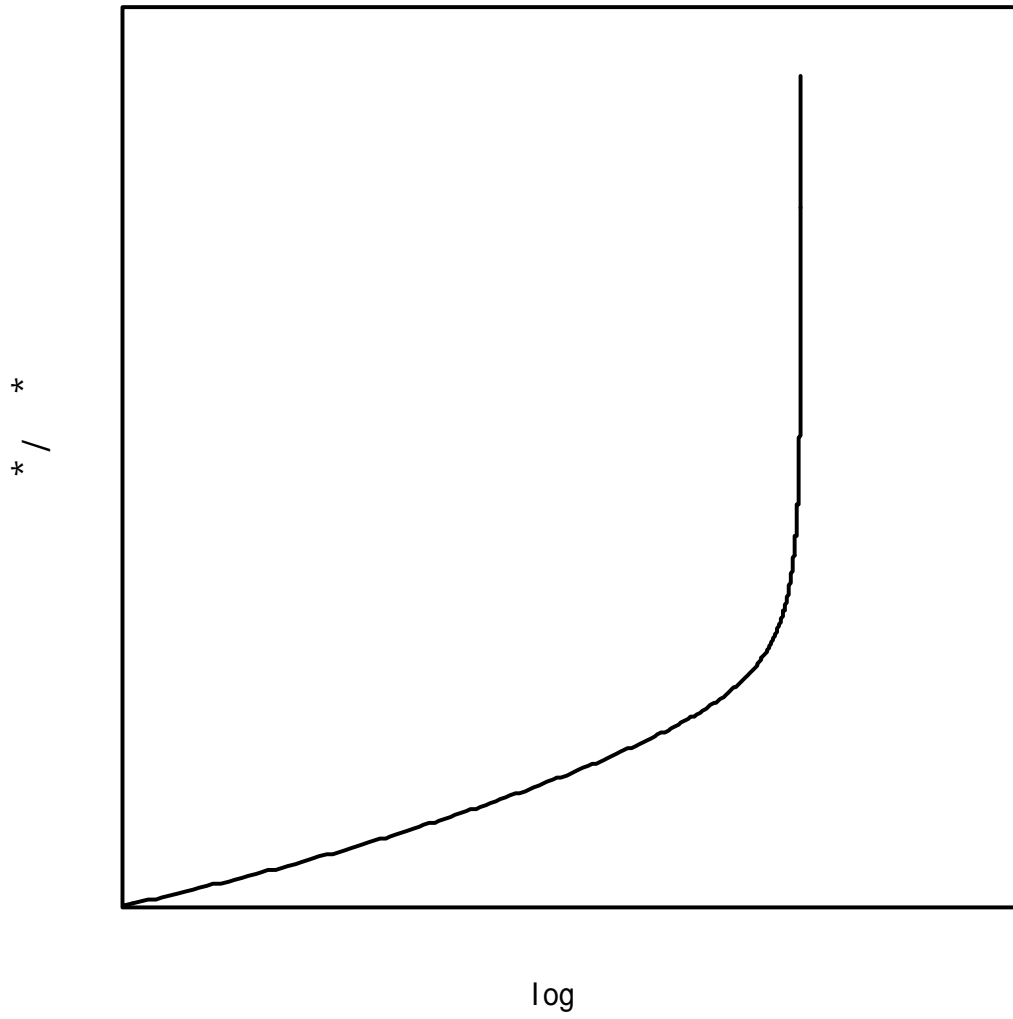
過去に行ったクリープ試験結果に関する検討結果(大久保・福井, 2002)と合わせて考えると、(4-3)式は強度試験とクリープ試験に適用でき、しかも一軸圧縮のみならず一軸引張応力下にも適用できるといえよう。ただし、最初に提案した構成方程式(大久保ら, 1987a)と比べて、(4-3)式右辺の第一項が加わって、より複雑になったため構成方程式中の定数を求めることが難しくなったといえよう。特に、 n_1 と n_3 を分離して求めることは難しく今後の課題として残った。また、今回は検討の対象を一軸応力下に限ったが、三軸応力下への拡張が今後の大きな課題といえる。

表 4 - 1 構成方程式の定数の値。(4 - 3) 式参照。識別番号 の定数は、クリープ試験から求めた値。 と は、それぞれ一軸圧縮と引張強度試験から求めた値。なお、 と の a_3 は計算機によるくり返し計算で求めた。

識別番号			
文献名	大久保・福井(2002)	本研究	本研究
試験方法	一軸圧縮クリープ試験	一軸圧縮強度試験	一軸引張強度試験
a_1	10^{-9}	4×10^{-10}	2×10^{-6}
n_1	35	37	39
m_1	9	5	5
a_3	10^{-8}	10^{-4}	10^{-7}
n_3	35	37	39
m_3	55	41	39

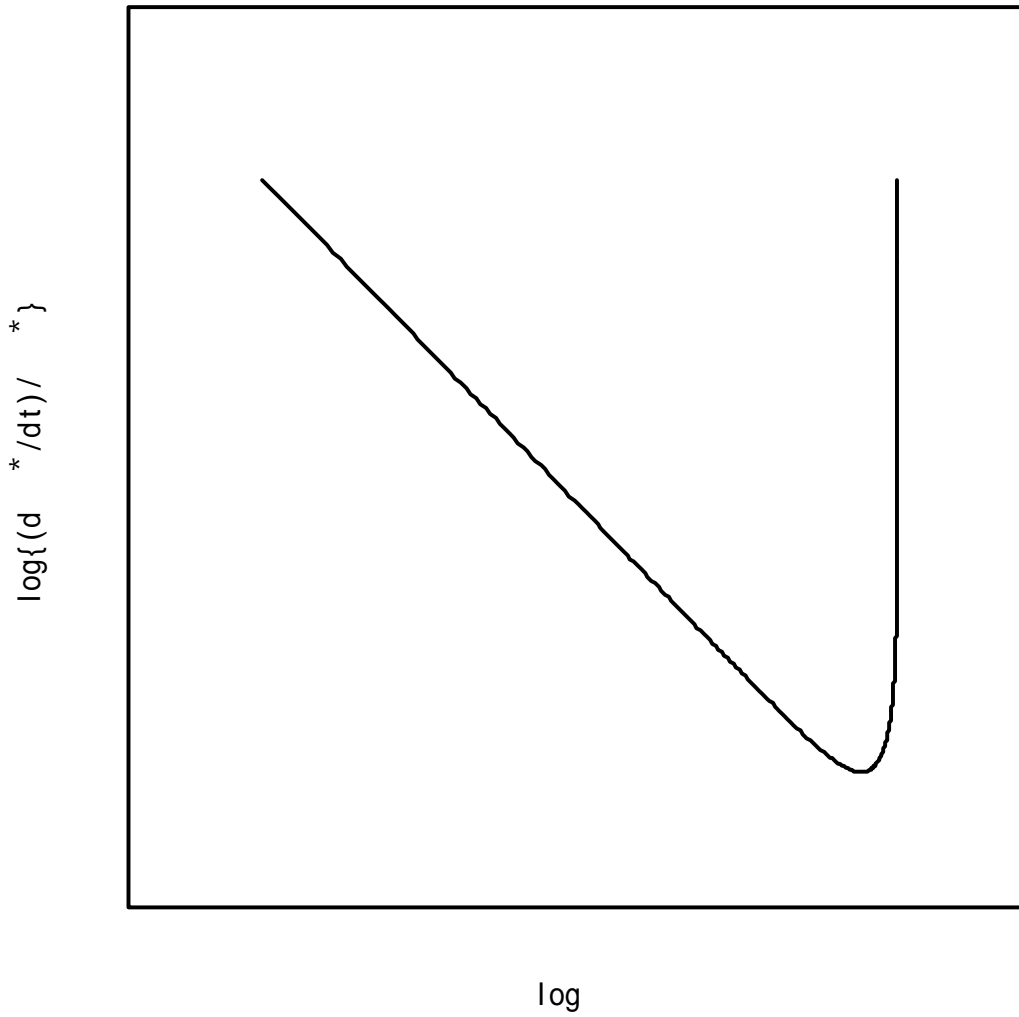
表 4 - 2 構成方程式の検証に用いた公表された試験結果．いずれも使用岩石は，三城目安山岩である．

文献名	大久保・西松 (1986)	福井ら (1993)	大久保ら (1987b)			秋ら (1995)	福井ら (2003)				
試験方法	一軸圧縮	同左	同左			一軸引張	同左				
載荷速度 C (1/s)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴
強度 (MPa)	87.3	82.2	90	94	102	108	3.78	5.96	6.16	6.42	7.12
ヤング率 (GPa)	11	11	11	11	11	11	7.8	16.6	16.5	17.8	17.6



(a) クリープ歪 $\dot{\epsilon} / \epsilon = \dot{\epsilon}$

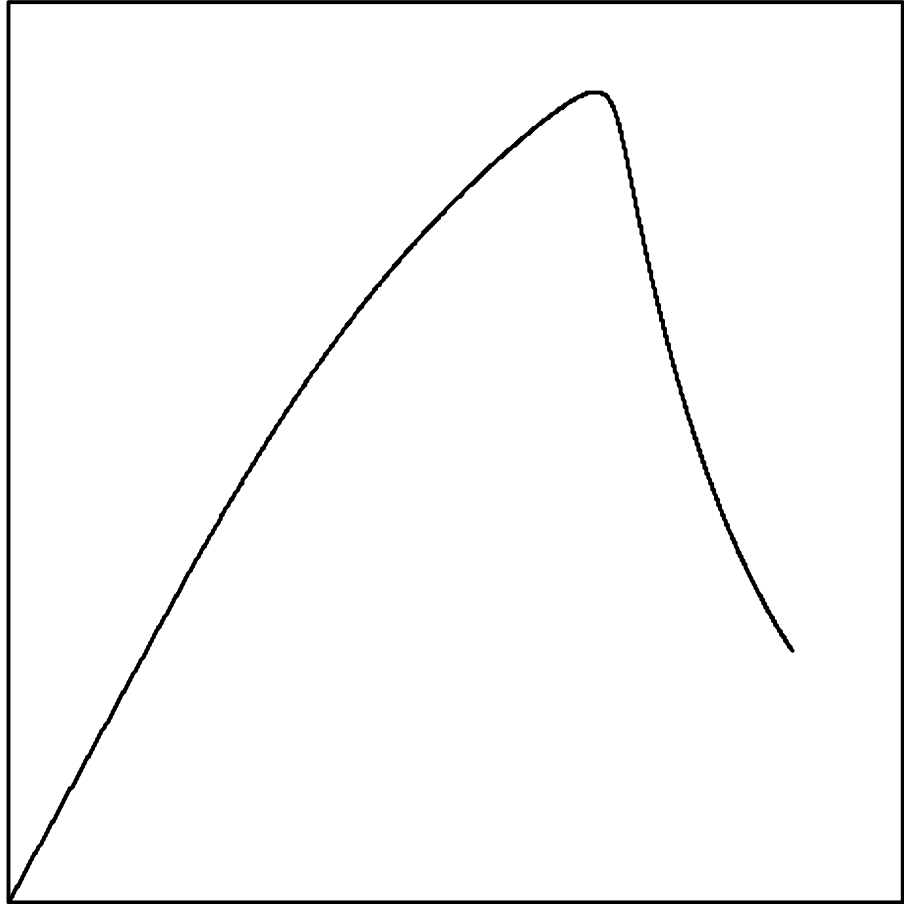
図 4 - 1 クリープ歪と歪速度のマスターカーブ . 横軸の \log は $(\dot{\epsilon})^n \cdot t$.



(b) クリープ歪速度 $(d\varepsilon/dt)/\varepsilon = d\varepsilon/dt$

図4-1 クリープ歪と歪速度のマスターカーブ。横軸の \log は $(\varepsilon)^n \cdot t$ 。

**



**

図4-2 ** - **線図上に描いた応力 - 歪曲線のマスターカーブ。
応力帰還制御を前提としている。

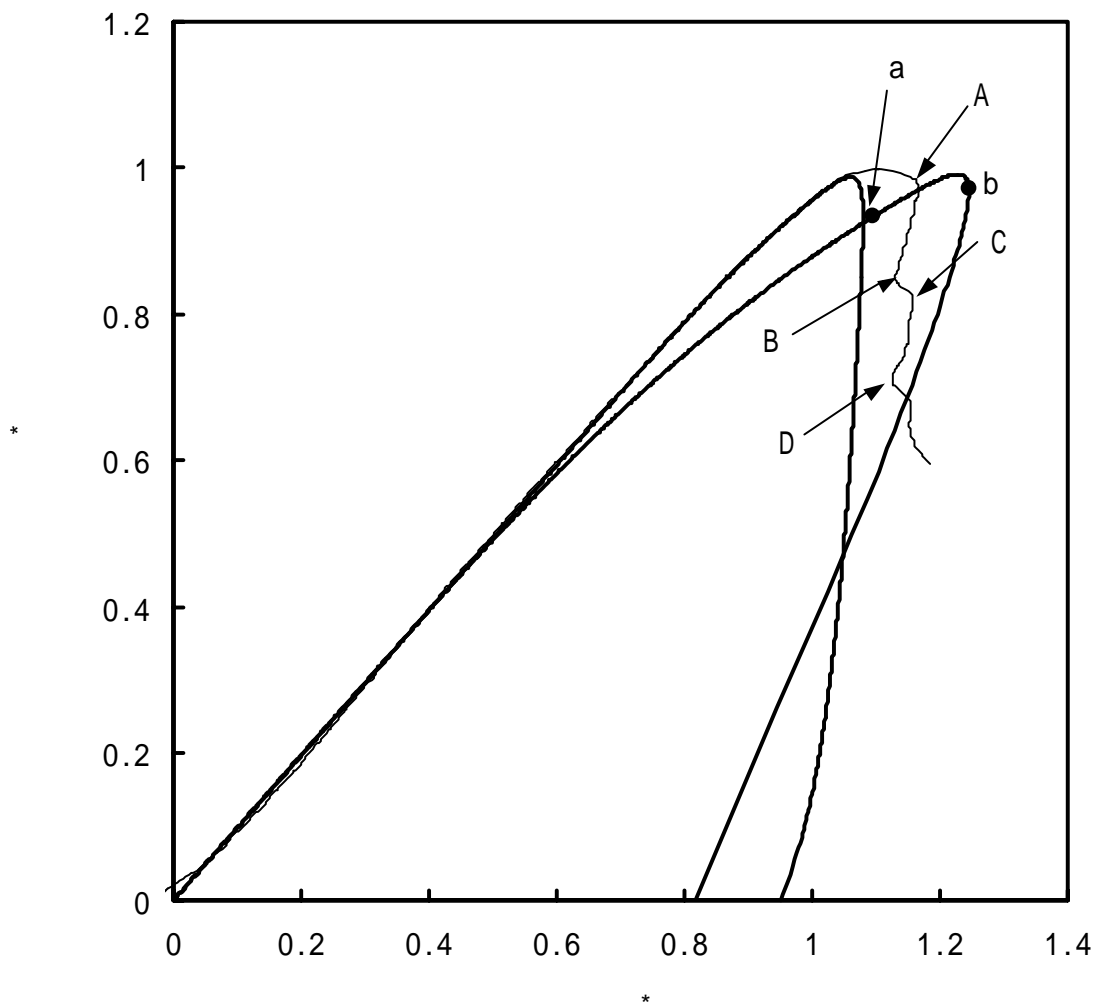


図 4 - 3 一軸圧縮強度試験における応力 - 歪曲線 (大久保・西松, 1986).
 とは,それぞれ表 4 - 1 の定数 と を用いた計算結果 .

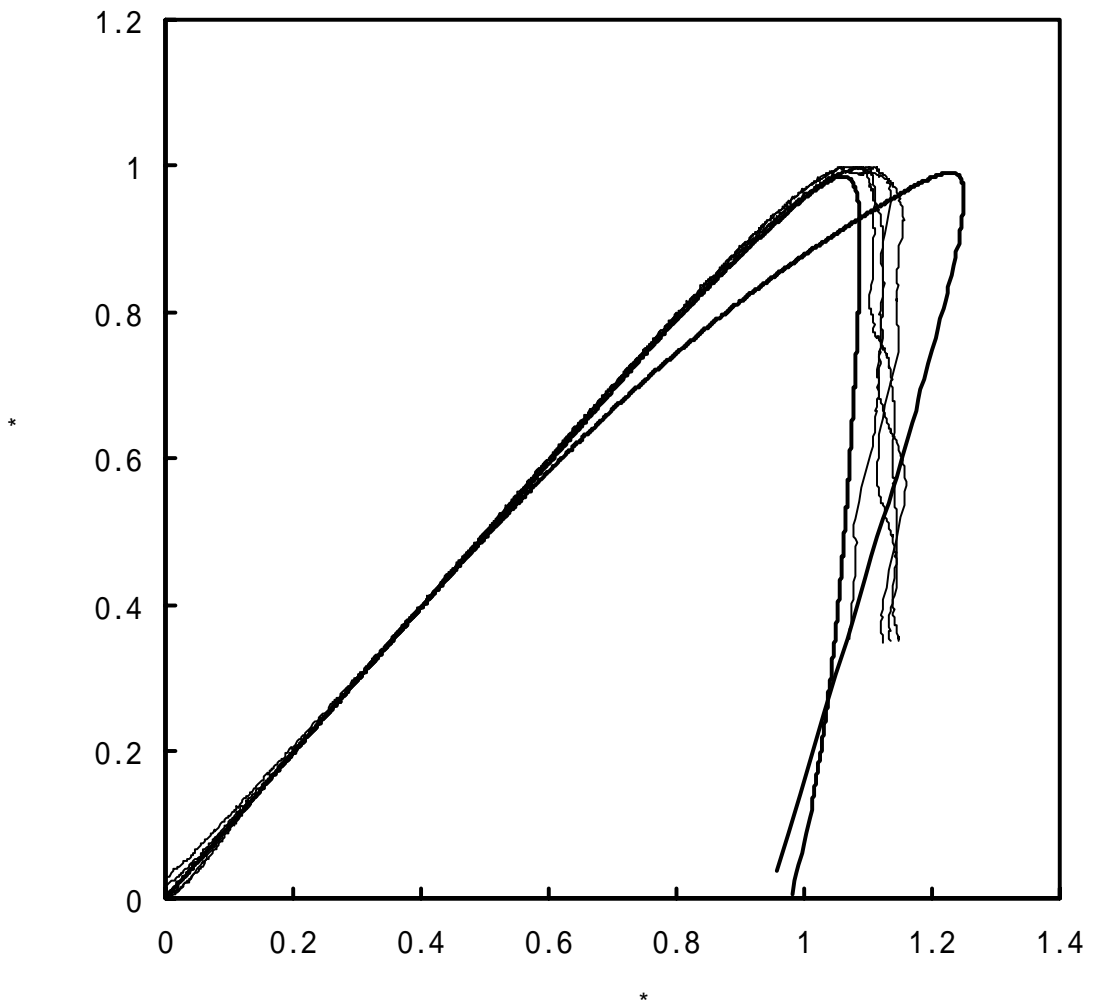
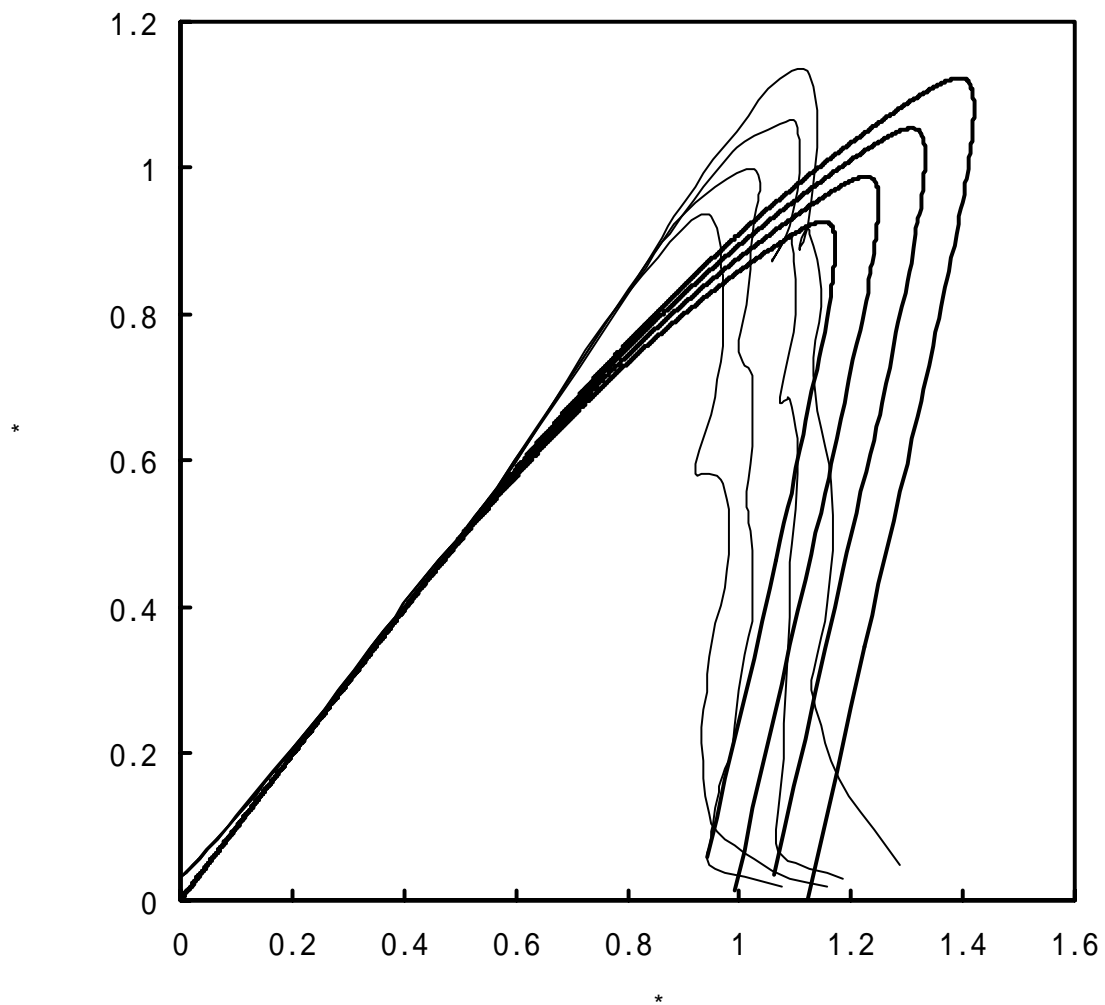
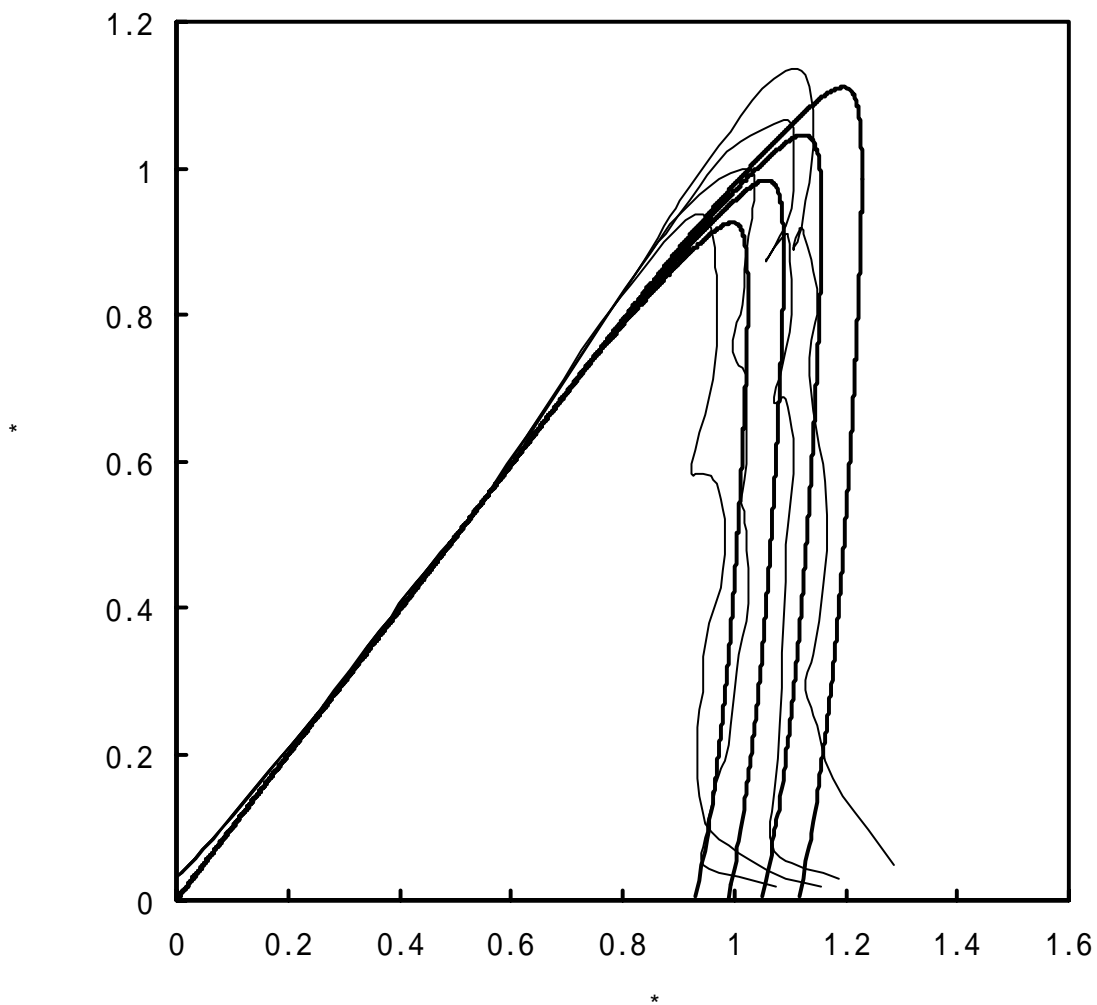


図 4 - 4 一軸圧縮強度試験における応力 - 歪曲線 (福井ら, 1993).
 と は, それぞれ表 4 - 1 の定数 と を用いた計算結果 .



(a) 表 4 - 1 の定数 を用いた計算結果との比較

図 4 - 5 一軸圧縮強度試験における応力 - 歪曲線の載荷速度依存性
 (大久保ら, 1987b).
 載荷速度 C は, 強度の高い方から順に 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6}
 (1/s) の 4 段階 .



(b) 表 4 - 1 の定数 を用いた計算結果との比較

図 4 - 5 一軸圧縮強度試験における応力 - 歪曲線の荷速度依存性
 (大久保ら, 1987b).
 荷速度 C は, 強度の高い方から順に 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6}
 (1/s) の 4 段階 .

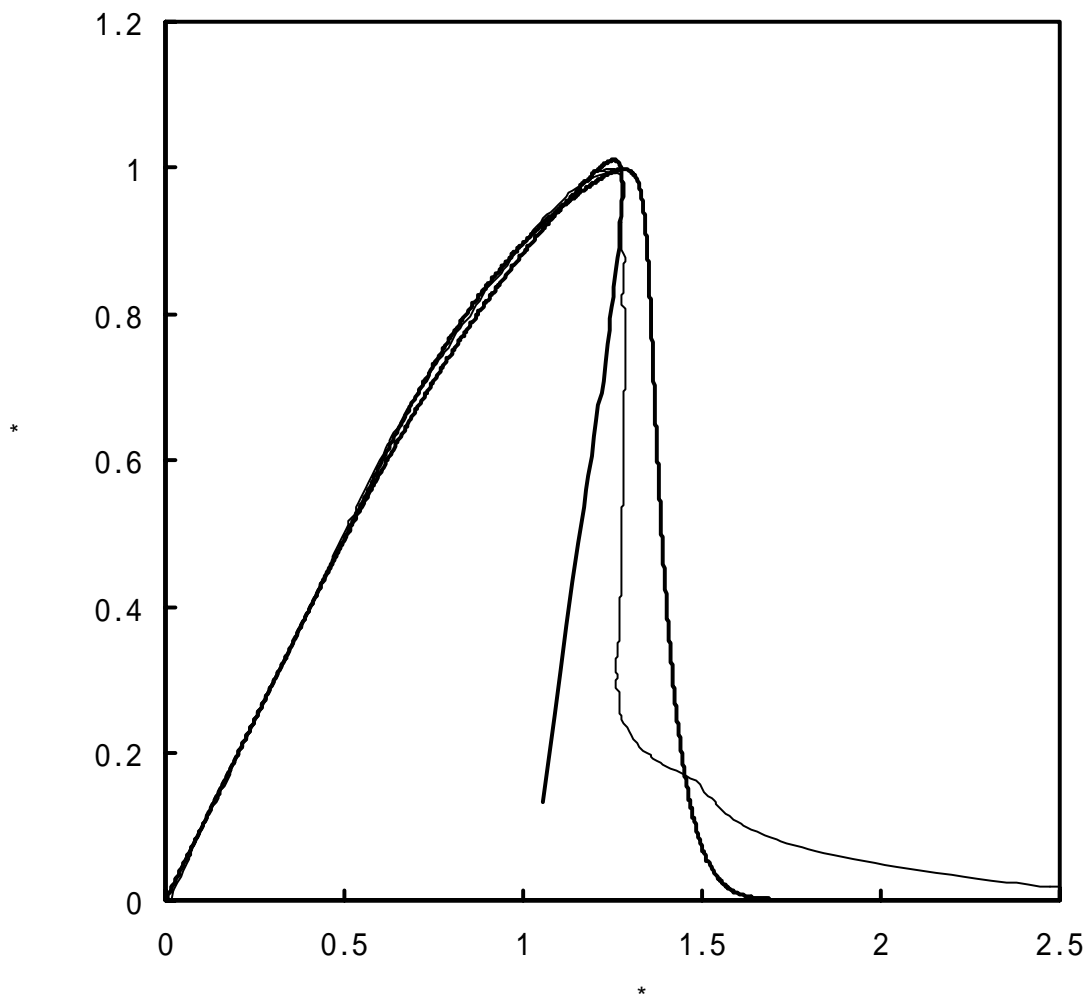
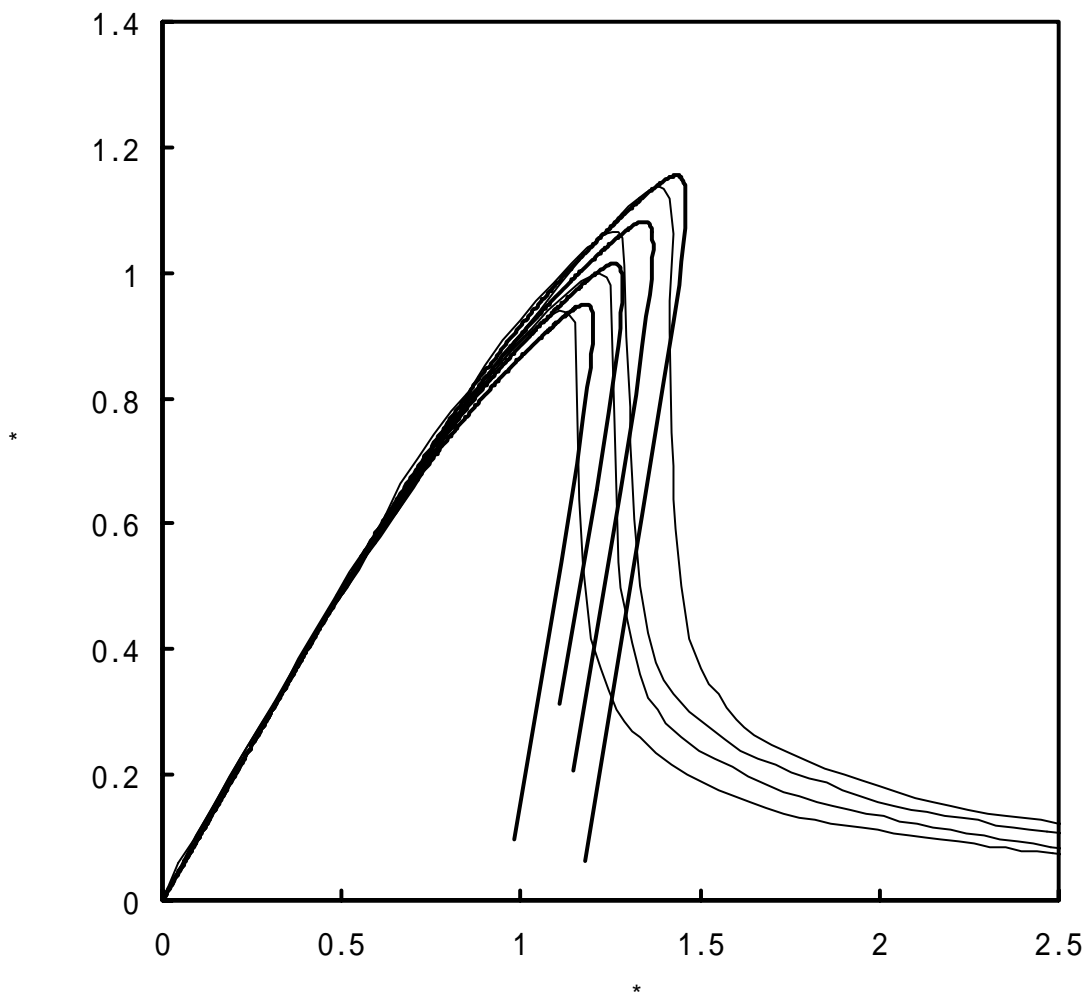
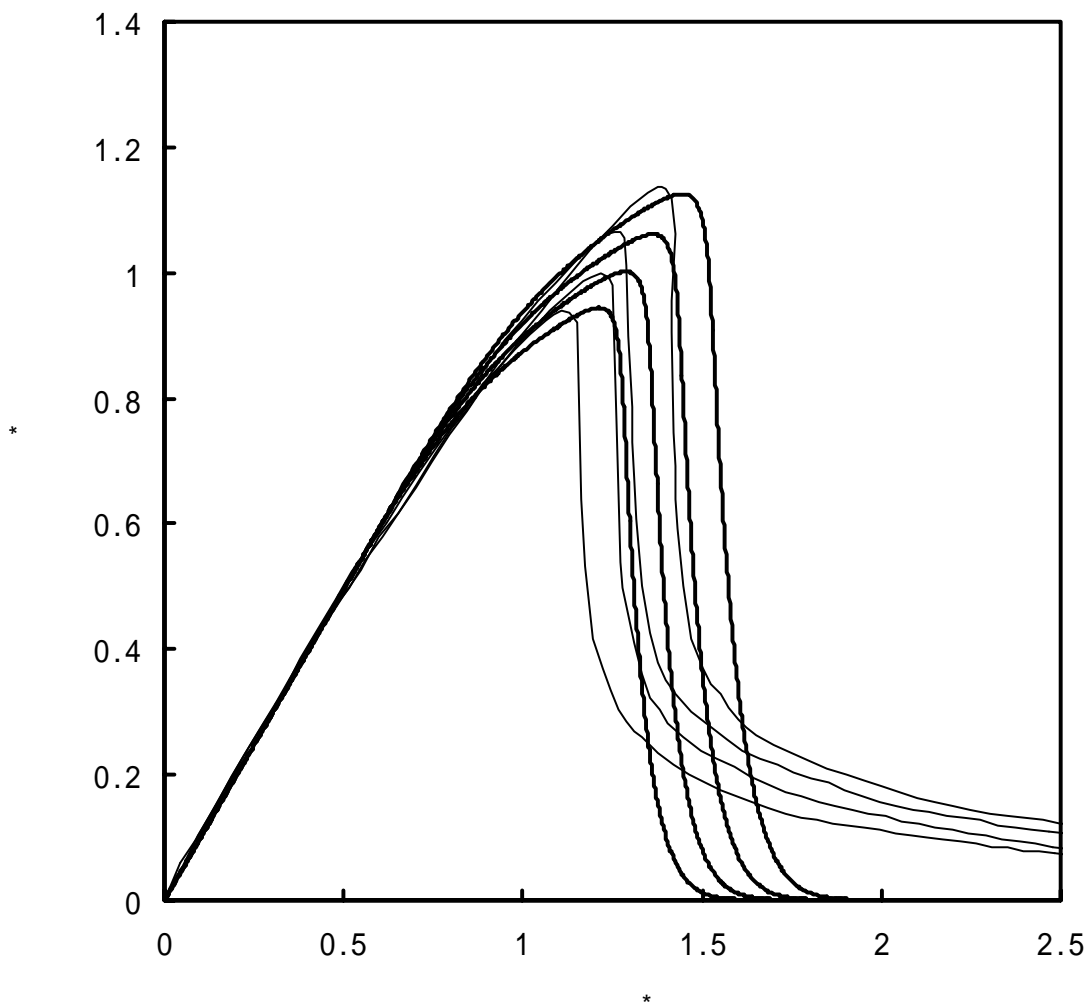


図4-6 一軸引張強度試験における応力 - 歪曲線 (秋ら, 1995).
 とは,それぞれ表4-1の定数とを用いた計算結果.



(a) 表 4 - 1 の定数 を用いた計算結果との比較

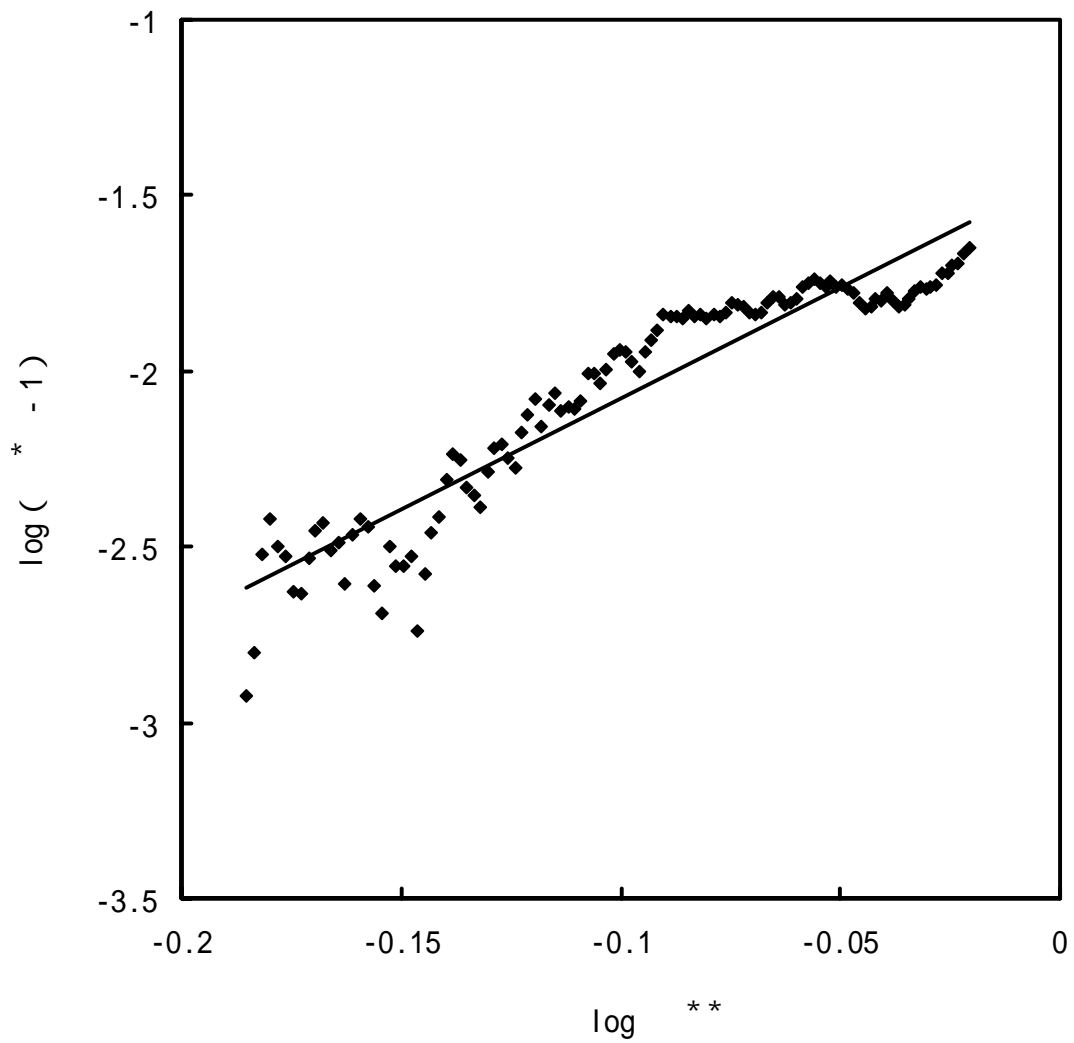
図 4 - 7 一軸引張強度試験における応力 - 歪曲線の載荷速度依存性
 (福井ら, 2003).
 載荷速度 C は, 強度の高い方から順に 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7}
 (1/s) の 4 段階 .



(b) 表 4 - 1 の定数 を用いた計算結果との比較

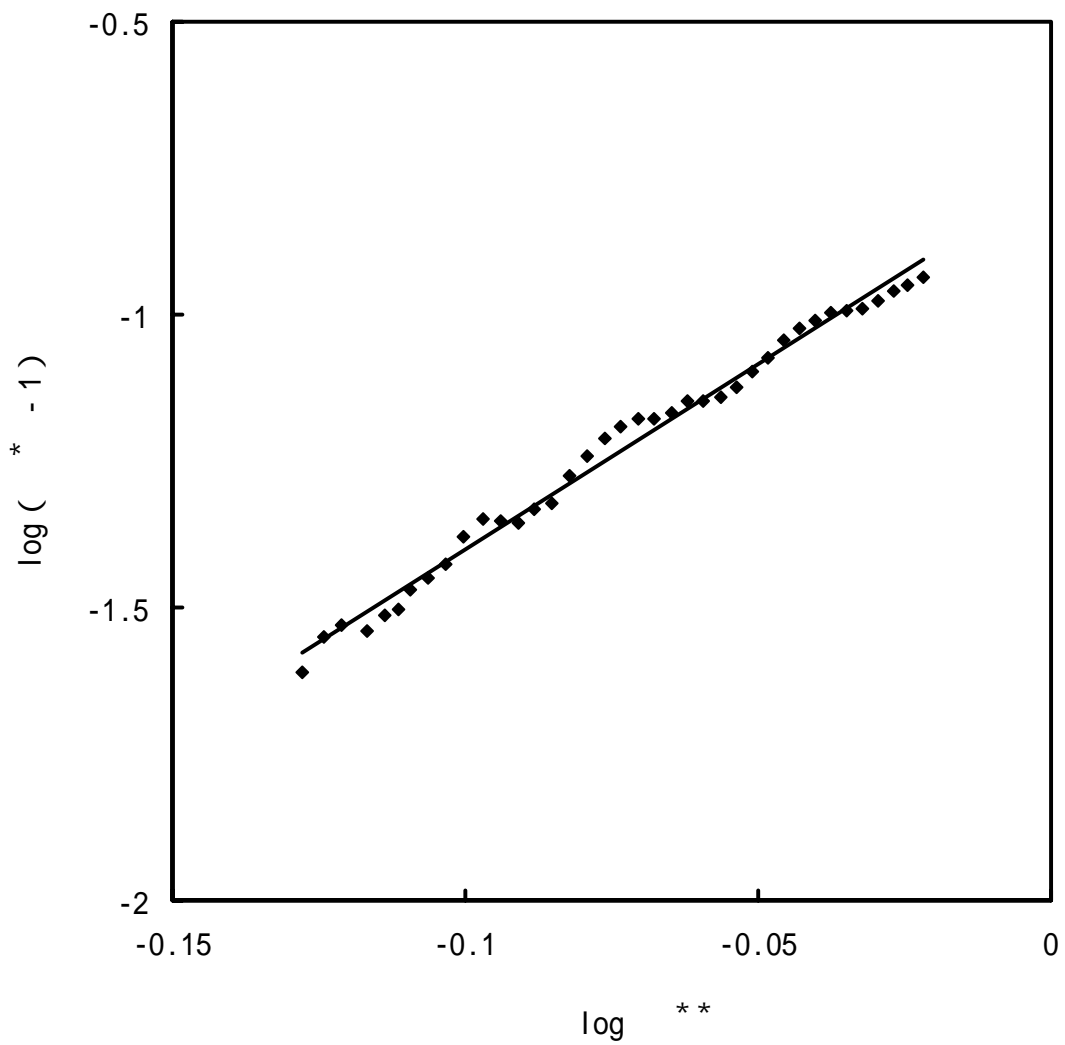
図 4 - 7 一軸引張強度試験における応力 - 歪曲線の載荷速度依存性
(福井ら, 2003).

載荷速度 C は, 強度の高い方から順に 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7}
(1/s) の 4 段階 .



(a) 一軸圧縮強度試験 (大久保・西松, 1986). 試験条件は, $C = 10^{-5}$, $\nu = 0.5$

図4-8 強度試験における $(\sigma^* - 1)$ と σ^{**} の関係. (4-16)式参照.
また, σ^{**} については (4-12) 式参照.



(b) 一軸引張強度試験 (秋ら, 1995). 試験条件は, $C = 10^{-6}$, $\nu = 0.3$

図 4 - 8 強度試験における $(\sigma^* - 1)$ と σ^{**} の関係. (4 - 16) 式参照.
また, σ^{**} については (4 - 12) 式参照.

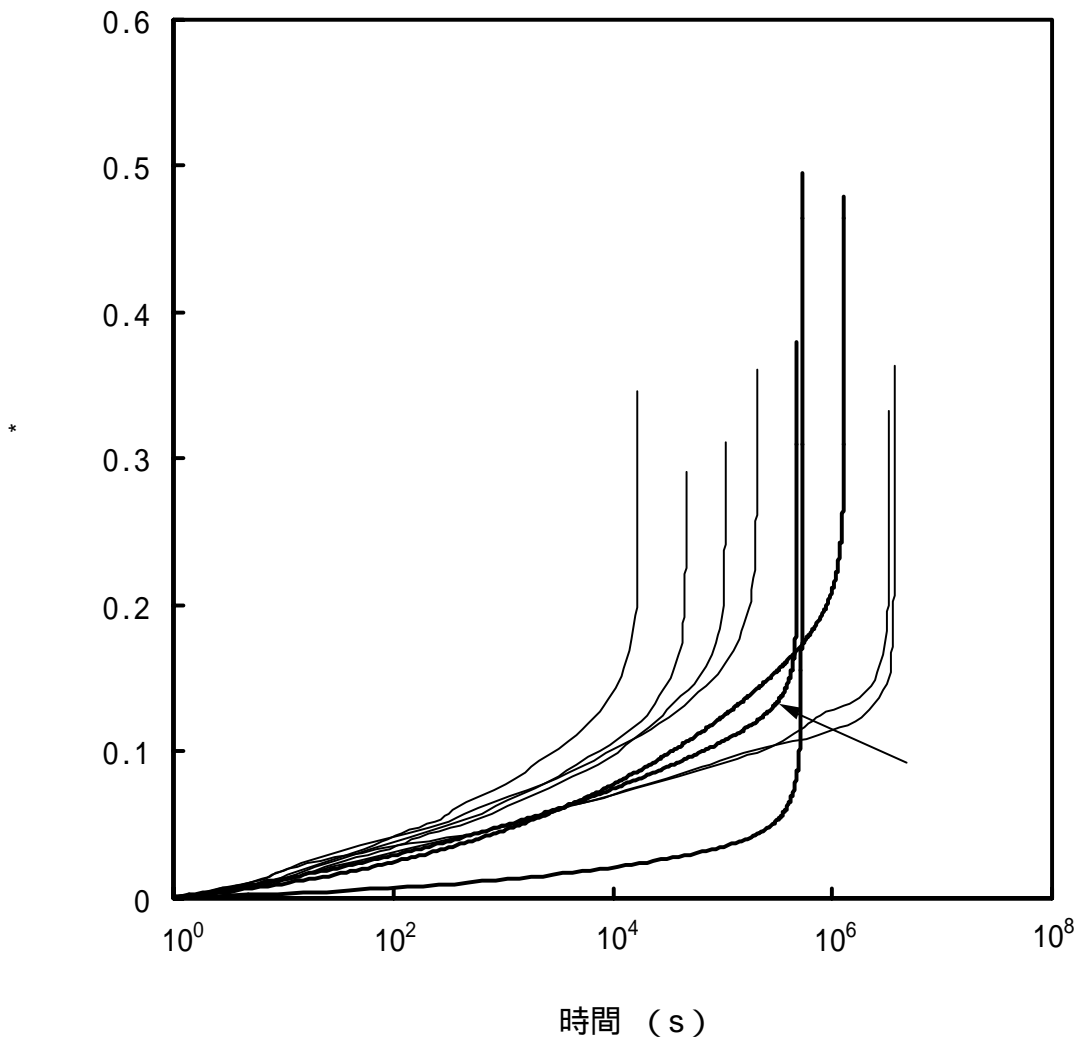


図4-9 クリープ曲線（大久保・西松，1986）．応力レベル77%の一軸圧縮クリープ試験の場合．
 ~ は，それぞれ表4-1の定数 ~ を用いた計算結果．

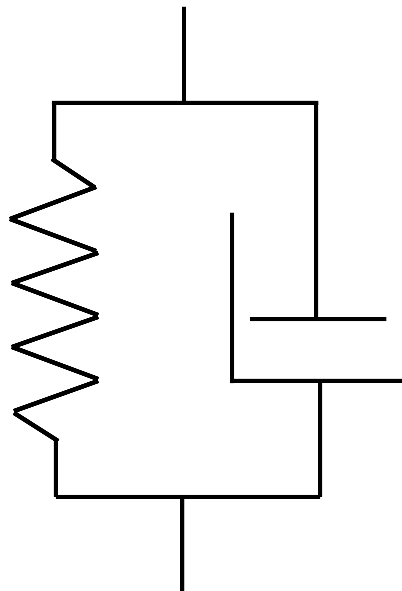


図 4 - 10 ばね要素 と並列に非線形粘性要素 が存在するモデル

5. 可視化ベッセルを利用した三軸圧縮試験

5.1 はじめに

岩石の時間依存性挙動を調べるために、クリープに関する研究が数多く行われてきた。しかし、そのほとんどが一軸圧縮応力下で行われたものであり、三軸圧縮応力下でのクリープに関する知見はいまだに少ない。地下の岩盤は三軸圧縮応力状態であり、地下空洞の長期安定性を評価するためには、三軸圧縮応力下でのクリープ試験結果の蓄積が今後ますます重要になると考えられる。

従来の研究で得られている三軸クリープに関する知見として、Kranz (1980) は、周圧の増加とともに3次クリープ開始点での非弾性体積歪が増加するが、クリープ応力の増加とともにクリープ寿命が減少する点は周圧によらないとしている。また、趙ら (1995) は、最小クリープ歪速度が寿命に反比例し、破壊直前ではクリープ歪速度が残存寿命に反比例するとしている。しかし、これらの試験結果は、クリープ寿命や載荷軸方向の変形特性に関するものがほとんどであり、載荷軸と垂直な方向への変形特性に関しては、ごく少数の定性的な知見しか得られていない (Singh, 1975)。

三軸圧縮応力下における破壊機構の解明も十分に進んでいるとは言い難い。例えば、構成方程式の構築にも必要と考えられる、クリープ破壊直前の変形特性の把握や、クリープ破壊過程と他の載荷条件下での破壊過程との比較などについても過去の研究は少ない (Kranz, 1975)。

一軸応力下と比較して、周圧下でのクリープに関する研究が少ない原因としては、周圧の制御の困難さや、金属製ベッセル内で試験を行うことに起因する変位計測の難しさなどがあげられる。周圧の制御については、Breadthauer 型の周圧ベッセル (山口ら, 1983) やサーボ制御式の周圧維持装置の使用、もしくはアキュムレータを周圧ベッセルと圧力源との間に入れることが試みられてきた。一方、変位計測、特に横変位の測定にはいまだ困難が続きまとう。エンドピースに設置した多数の片持梁式変位計による試験片中央断面の横変位の測定 (斉藤ら, 1998) や、デュアル平均値伸び計 (軸方向) とローラーチェーン型伸び計 (周方向) の組み合わせ (山口ら, 2000) などが試みられてきた。最近になって、大久保・福井 (2002) は透明なアクリル樹脂製の可視化ベッセルを開発し、三軸圧縮強度試験中の試験片の破壊過程を観察することに成功した。また、撮影した写真に画像処理を施すことで試験片の横変位の測定に成功した。

本章では、可視化ベッセルを用いて三軸圧縮クリープ試験を行った結果を報告する。三軸圧縮強度試験では、一定の時間間隔で写真撮影を行えばよいが、クリープ試験の場合には、変形の大きい3次クリープでは短い間隔で写真撮影を行う必要がある。そこで、可視化ベッセルを用いた三軸圧縮クリープ試験を行うにあたり、試験片の変形と連動する写真撮影システムを構築した。また、変位の測定精度の向上および効率化のため、写真による横変位測定をコンピュータプログラムにより自動化した。得られたクリープ試験結果については、特に破壊直前の挙動について重点的に検討を行うとともに、三軸圧縮強度試験での挙動との比較も行った。

5.2 試験方法

5.2.1 試料岩石と試験装置

試料岩石として田下凝灰岩を用いた。試験片は直径 25 mm、高さ 50 mm の円柱形とし、整形後、温度・湿度が管理された試験室内に 2 週間以上放置し自然乾燥させた後、試験に供した。

載荷装置として容量 500 kN のサーボ試験機を用い、周圧は最大圧力 35 MPa のサーボ式周圧発生装置で加えた。荷重は容量 200 kN の歪ゲージ式ロードセルで、軸方向の変位はサーボ試験機に組み込まれている差動変圧器で測定した。三軸ベッセルとして透明なアクリル樹脂製の可視化ベッセルを用いた(大久保ら, 2002a)。このベッセルの許容最大圧力は約 55 MPa であるが、安全率を 5 とし、今回の試験では周圧を 10 MPa 以下に設定した。試験片の撮影には、有効画素数 266 万のデジタルカメラ(Nikon-D1)と望遠系単焦点レンズ(105 mm F2.8D)を用いた。画像の歪曲は画像中央部と端部で最大でも $\pm 0.1\%$ 程度であり、変位の計測にはほとんど影響を与えないことがわかっている。また、ベッセル内の試験片を撮影した場合でも、アクリル製円筒によるゆがみは生じないということもわかっている(大久保ら, 2002a)。

試験では、まず、試験片の上下に同径の鋼製円柱を密着させた後に、全体を熱収縮性チューブで覆った。その後、鋼製円柱とチューブとの隙間に瞬間接着剤を流し込み、硬化を待った。組み立てたベッセルを試験機上に置き、空気抜きを行った後、零点の調整を行った。周圧を設定値まで増加させ安定した後、載荷を開始した。圧縮強度試験は定歪速度 10×10^{-6} /s で行い、クリープ試験では応力速度 1 MPa/s で予め定めたクリープ応力まで応力を増加させた。なお、クリープ試験で破壊が起こらない場合は約 1 日で試験を打ち切った。周圧は 2.0, 3.9, 5.9, 7.8, 9.8 MPa の 5 通りとした。表 5-1 には、クリープ応力レベルを決める際の基準となる、 10×10^{-6} /s の定歪速度圧縮試験で得られた各周圧下での強度と、今回行ったクリープ試験片の本数を示す。

5.2.2 写真撮影と横変位の測定

大久保ら(2002a)は一定時間毎に写真撮影を行い、周圧下での圧縮破壊過程の観察に成功した。クリープ試験では 1 次, 2 次クリープでの変形は 3 次クリープと比べて小さい。そのため、1 次, 2 次クリープでの写真撮影は少なくとも良いが、急激な変形が起こる破壊直前の写真を数多く撮る必要がある。しかし、圧縮強度試験と比較して試験時間が長く、破壊の予測も困難であるため、手動もしくは一定時間毎の写真撮影では、クリープ破壊過程の観察は難しい。そこで、軸歪が一定量増加する毎に写真撮影を行い、破壊直前に歪が急激に増加するときには連続撮影に切り替わるようなシステムを構築し、既存のシステムに組み込んだ。

図 5-1 にシステムの概略図を示すが、組み込んだ写真撮影システムでは差動変圧器の出力が増幅器で増幅され、ついで分解能 16 bit の A/D 変換器を経て、パソコンに送られる。パソコンでは、その入力値が一定量増加する毎に写真の撮影ができるように、パソコンに組み込まれたり出力ボードからカメラへ出力信号が送られる。今回は、周圧 2.0 MPa では軸歪が 5×10^{-4} 程度、周圧 9.8 MPa では軸歪が 15×10^{-4} 程度増加する毎に写真撮影を行い、その間の周圧では適宜撮影間隔を調整した。そして、破壊直前に軸歪速度が急激に増加し、周圧 2.0 MPa で 5×10^{-5} /s 以上、周圧 9.8 MPa

では 15×10^{-5} /s 以上になると連続撮影に切り替わるようにした。連続撮影での撮影速度はカメラのシャッター速度や絞り、記録メディアの容量により若干変化するが、今回は毎秒 1 枚であった。

大久保ら (2002a) はデジタル写真から手作業で試験片の横変位を測定したが、精度の向上と効率化のため、今回は次のようなコンピュータプログラムにより試験片の直径を求めた。まず、メディアンフィルタにより画像のノイズを除去した後、横方向に関して、隣接する画素間の輝度値の差を計算した。その差の絶対値が最大となる点を試験片の端とした。つまり、横方向に関して輝度値の変化が最も激しいところを試験片の端とした。これを試験片の高さ方向に関して約 900 箇所で行った。この際、検出を容易にするため図 5 - 2(a) のように試験片の端の部分に黒色マーカで色をつけた。初期の試験片の上下端面付近はベッセルの上下金属板に隠れて見えないため、試験片の中央約 40 mm の部分について横変位を求めた。なお、撮影した写真はカラーであるが、今回は簡単に測定を行うために白黒画像に変換を行った。

図 5 - 2(a) の試験片で測定した試験片の側面の形状を図 5 - 2(b) に示すが、側面の凹凸が再現できている。試験片の横変位の分解能は約 0.03 mm であるが、上述のようにコンピュータプログラムによる処理・測定を行ったため、測定誤差は分解能と同程度と考えられる。なお、アクリル製円筒の表面に汚れがあると誤差が大きくなるので、試験開始前に円筒の表面の汚れをきれいに拭き取っておく必要があった。

5.3 三軸圧縮強度試験結果

今回行った試験では試験片の変形がかなり大きくなったが、応力、歪ともそれぞれ初期断面積、初期長さを基準とした微小変形の場合の式を用いた。また、本報告では原則として、軸歪は縮む方向を、横歪は伸びる方向を正としたが、図 5 - 3 と図 5 - 8 では見やすいように横歪は縮む方向を正としてある。

各周圧で得られた応力 - 軸歪曲線の例を図 5 - 3 に示す。軸歪は差動変圧器より計測された変位から算出し、応力、歪とも所定の周圧を加えた時点での値を 0 とした差応力、差歪である。いずれの周圧下でも周圧の変動は約 ± 0.01 MPa 以内であり、問題なく制御できた。なお、一軸圧縮試験はベッセルを用いずに行った。周圧の増加とともに、強度が増加し強度破壊点以降の応力の低下が緩やかになっている。

図 5 - 3 で示した試験片のうち、周圧 2.0, 5.9, 9.8 MPa での、試験片の横方向変形の経時変化を図 5 - 4 に示す。周圧が同じでも変形の様子は試験片毎に少し違うが、ここで示したのはその一例である。図では、初期の試験片の高さ方向における各地点での、直径の変化を示した。試験開始から軸歪が 0.048 に達するまでの変化を、軸歪が 0.004 増加する毎に示した。初期の試験片は直径 25 mm の円筒形であるが、側面の研磨を行っていないため、試験開始の時点で ± 0.1 mm 程度の凹凸が見られた。強度破壊点付近に相当する軸歪 0.012 ~ 0.016 までは、いずれの周圧下でも試験片の上部から下部までほぼ一様に膨らんでおり、端面による拘束の影響はあまり見られなかった。その後は、試験片の中央部分の膨らみが顕著となり、周圧 2.0 MPa では最大 2 mm 程度、周圧 5.9, 9.8 MPa では最大 1.5 mm 程度の直径の変化が生じた。周圧 5.9, 9.8 MPa では周圧 2.0 MPa と比べて端面の拘束の影響が大きく、上下端面から約 15 mm 以内における直径の変化は小さかった。一方、周圧 2.0 MPa では試験片上部で 1 mm 程度の直径の変化が生じた。

Peng (1971) は縦横比 2 の試験片で一軸圧縮試験を行い、試験片の中央 3 分の 1 の部分は端面の拘束の影響が及びにくく、横歪の分布がほぼ一様であるという結果を得た。しかし、三軸圧縮試験で端面の拘束の影響や破壊が及ぶ範囲などを調べた実験的研究はほとんどない。そこで、軸歪 0.05 の時点で横変位 0.5 mm 以上の部分を膨張した部分とみなして、その部分の長さを測定した (図 5 - 5 カット図参照)。図 5 - 5 には膨張した部分の長さとの関係について示す。周圧 2.0 MPa では試験片間でのばらつきが大きい、その原因として明瞭なせん断面ができる場合が多く、写真撮影を一方向からしか行っていないためと考えられる。一方、周圧 3.9 MPa 以上では膨張した部分の長さのばらつきは比較的小さかった。いずれの周圧下でも膨張した部分の長さは 20 ~ 30 mm 程度であり、試験片の約半分の部分が、横方向に大きく変形していることがわかる。

従来の研究では試験片中央が最も膨らむと考え、その位置での変位や歪を測定することが多かった (Brace et al., 1966)。しかしながら、可視化ベッセルを用いた今回の試験結果によれば、横歪が最大値をとる高さは試験片ごとにより異なることがわかった。例えば、図 5 - 4(a) では高さ 20 mm の位置で横歪は最大値 (最大横歪) をとる。図 5 - 6 には、周圧 5.9 MPa における試験片中央の横歪と、最大横歪の関係を示す。5 例中、試験片中央の横歪と最大横歪とがほぼ一致するのは 1 例だけであった。周圧下で最大横歪の測定ができるのは可視化ベッセルの利点の一つであり、この最大横歪の方が試験片の破壊進行の程度を示す代表値としてより適切と考えて、以下では主に最大横歪を用いて議論を行うことにした。

図 5 - 3 左側には同図右側に示した試験片における最大横歪の変化を示す。分解能が不足しているため、強度破壊点以前での挙動はわかりにくい、強度破壊点以降は軸歪と同様に、周圧の増加とともに応力の低下が減少している傾向がみられた。

図 5 - 7 には各周圧下での最大横歪と軸歪の関係を示す。図では各周圧下で行った 5 本の結果中で標準的と思われる例を示した。いずれの周圧下でも曲線は強度破壊点付近で屈曲する。この屈曲前の曲線の傾きはいずれの周圧下でも 0.4 前後であった。屈曲後、軸歪 0.02 付近までの傾きは周圧の増加により低下する傾向がみられ、周圧 2.0 MPa で約 2.6、周圧 9.8 MPa では約 1.3 であった。軸歪が 0.02 以上での周圧による傾きの変化は小さく、5 本の曲線はほぼ平行となった。

5.4 三軸圧縮クリープ試験結果

今回構築した写真撮影システムにより、クリープ破壊直前の連続写真撮影を試みた。図 5 - 8(a) には、周圧 5.9 MPa、応力レベル 90 %で行った試験での連続写真の一部を示す。この試験片の軸歪および最大横歪の経時変化と写真撮影を行った時点を図 5 - 8(b) に、試験片の変形の経時変化を図 5 - 8(c) に示す。1 次、2 次クリープ (図中 ~) では試験片は上部から下部までほぼ一様に膨らんでいるが、変形は小さい。で試験片中央部分の膨らみが目立ち始め、その後、軸歪が急激に増加するに従い直径も大きくなっている。試験片の中央約 20 mm の部分では直径がほぼ一定であり、軸歪 0.086 (図中) では 2.5 ~ 3 mm 程度の直径の変化が生じている。一方、上下端面から約 10 mm の部分の直径の増加は非常に小さく、特に下端付近は端面の拘束の影響が大きい。

図 5 - 5 と同様に、試験片の膨張した部分の長さとの関係を図 5 - 9 に示す。なお、同周圧下では応力レベルの違いによる相違が見られなかったため、図には表 5 - 1 で示したすべての試験結果を示した。ばらつきが大きいので確たることはいえないが、周圧の増加にともなって最大値は減

少する傾向がみられた。これは定歪速度試験と同様に、周圧が小さいほどせん断面が顕著であり、一方向から撮影を行ったためと考えられる。なお、各周圧での最小値は20～25 mm程度であり、少なくとも試験片全体の40～50%以上の部分が顕著に膨張することがわかる。

図5-10には、各周圧下での応力レベル95%で行った試験の中で、標準的と思われる軸歪と最大横歪の関係を示す。図ではクリープ開始からの変化を示したが、図5-7と似た傾向を示しており、周圧が大きいほどグラフは下側にきている。なお、応力レベルの違いによる影響はほとんど見られなかった。

図5-11(a)には応力レベル95%でのクリープ軸歪とクリープ軸歪速度との関係を示す。縦軸は最小クリープ軸歪速度で正規化し、各周圧下での結果のうち標準的なものを示す。クリープ開始後クリープ軸歪速度は減少していき、最小値をとった後増加に転じる。クリープ軸歪速度が最小値をとるときのクリープ軸歪の値は周圧の増加とともに増加している。また、周圧9.8 MPaではクリープ軸歪が0.007から0.016の間は歪速度がほぼ一定の定常クリープがみられる。軸歪速度が最小値をとった後は、グラフはほぼ直線的であり、その部分のクリープ歪 ϵ_c とクリープ歪速度との関係は次式で近似できる。

$$\log \frac{d\epsilon_c}{dt} = a_1 \epsilon_c + b_1 \quad (5-1)$$

ただし、 a_1 と b_1 は定数である。

図5-11(b)には応力レベル95%でのクリープ最大横歪（クリープ開始1s後を基準とした値）とクリープ最大横歪速度の関係を示す。縦軸はクリープ最大横歪速度の最小値で正規化し、各周圧下での結果のうち標準的なものを示す。最大横歪に関しても軸歪と同様に、歪速度は最小値をとった後ほぼ直線的に増加しており、破壊直前では(5-1)式での近似が可能である。

図5-12(a)には、周圧5.9 MPa、応力レベル95%での軸歪と残存寿命との関係を示す。残存寿命とは破壊までに残された時間であるが、急激な破壊が起こりにくい周圧下でのクリープ試験で破壊時刻を決めるのは難しい。また、軸歪速度が大きくなるとサーボ試験機の制御が追いつかなくなり、応力が低下する恐れがあるため、結果の整理には慎重を期す必要がある。そこで今回は、いずれの周圧下でもクリープ応力が1%低下した時点を破壊時刻とし、その5s前までの結果について整理を行った。図5-12(a)より、破壊直前では軸歪と残存寿命との関係はほぼ直線的であり、近似的に次式が成り立つことがわかる。

$$\epsilon_c = -a_2 \log T + b_2 \quad (5-2)$$

ただし、 T は残存寿命、 a_2 、 b_2 は定数である。

図5-12(b)には、周圧5.9 MPa、応力レベル95%での最大横歪と残存寿命との関係を示す。グラフは図5-12(a)と非常に似ており、破壊直前では近似的に(5-2)式が成り立つ。また、試験開始から破壊までをほぼ直線で近似できる試験片もあった。

図5-13には図5-12で示した試験片での、軸歪速度および最大横歪速度と残存寿命との関係を両対数グラフ上に示す。軸歪速度、最大横歪速度ともに破壊直前では、残存寿命との間に反比例の

関係があり， a_3 を定数として，(5-2) 式を微分した次式で近似できる．

$$\frac{d}{dt} \frac{c}{T} = \frac{a_3}{T} \quad (5-3)$$

従来の研究結果では，一軸応力下では多くの岩石でクリープ軸歪，クリープ横歪とも破壊直前の挙動が(5-3)式で近似できることが知られている(福井ら，1989；児玉ら，2001)．しかし，三軸クリープ試験で確認された例は少なく，横方向に関して(5-3)式が成り立つという点を指摘したのは成果の一つといえる．

5.5 考察

5.5.1 クリープ破壊直前の軸歪と横歪

クリープ試験は強度破壊点以前の応力 - 軸歪曲線上より開始され，クリープ軸歪の増加とともに図上での位置は徐々に右方向へと移動していく．福井ら(1989)は一軸圧縮クリープでは，クリープ軸歪速度が最小になるときの応力と軸歪の位置は強度破壊点から除荷した線上(除荷曲線上)にのり，破壊1 s 前での位置は強度破壊点以降の応力 - 軸歪曲線上にくるとしている．趙ら(1995)は周圧下でのクリープ試験結果から，破壊10 s 前での応力と軸歪の位置は強度破壊点以降の応力 - 軸歪曲線上にのるとしているが，軸歪0.03で試験を中止しているため，破壊が延性的な場合については確認していない．また，横歪に関しては，クリープ試験結果と応力 - 歪曲線の関係についてほとんど議論されていない．

そこで，図5-14では周圧5.9 MPaでの5本の試験片の応力 - 軸歪曲線および応力 - 最大横歪曲線上に，クリープ歪速度が最小になるときの応力と歪の位置を黒塗り記号で，クリープ破壊5 s 前の位置を白抜き記号で示す．軸歪に関しては，歪速度が最小になるときの歪は強度破壊点での歪と同程度であった．また，従来の知見通りに，かなりのばらつきがあるものの，破壊5 s 前の位置は強度破壊点以降の応力 - 歪曲線近傍にきた．最大横歪に関しても，強度破壊点以前の応力 - 歪曲線上からクリープが開始され，の位置までは歪速度が減少しながらクリープ歪が増加していく．の位置でクリープ歪速度が最小になった後，位置はさらに左方向へ移動し，クリープ歪速度は増加していく．やがて，クリープ破壊5 s 前にに達するが，その位置は強度破壊点以降の応力 - 歪曲線近傍にくる．

クリープ破壊直前(1~10 s 前)の応力と歪の位置が，強度破壊点以降の応力 - 歪曲線の近傍にくるとするのは，従来は比較的脆性破壊をする場合に，しかも軸歪に関してのみ確認されていたが，今回のように破壊が延性的な場合にもあてはまるし，さらに，最大横歪に関してもほぼあてはまるということがわかった．ただし，軸歪，横歪ともにばらつきは大きいし，破壊の何秒前の値を採用するかについても任意性がある．この点については今後の検討を要する．

次に，軸歪と横歪の関係について，クリープ試験結果と圧縮強度試験結果とを比較してみる．まず，図5-15には今回のクリープ試験結果から求めた(5-3)式中のパラメータ a_3 と周圧との関係を示す．軸歪から求めた a_3^z および最大横歪から求めた a_3^x と周圧 p との間には，片対数グラフ上で

直線関係がみられ、それぞれ次式であらわされる図中の直線で近似できる。

$$\log a_3^z = 0.14 \sigma_p - 3.3 \quad (5-4)$$

$$\log a_3^x = 0.10 \sigma_p - 2.8 \quad (5-5)$$

(5-3)(5-4)(5-5)式より、クリープ軸歪 ϵ^z と最大横歪 ϵ^x の増分に関して次式が成り立つ。

$$\log \left(\frac{d \epsilon^x}{d \epsilon^z} \right) = \log \left(\frac{a_3^x}{a_3^z} \right) = -0.04 \sigma_p + 0.5 \quad (5-6)$$

図5-16には、横軸を周圧として、(5-6)式であらわされる直線を示す。また同図には、圧縮強度試験で強度破壊点を越えてから応力が強度の85%まで低下する間の $d \epsilon^x / d \epsilon^z$ も示す。図より、クリープ試験結果(実線)と圧縮強度試験結果()はおおむね一致しているといえる。つまり、クリープ破壊直前と圧縮強度試験の強度破壊点直後における横歪と軸歪の増分の比がほぼ等しく、両者の周圧依存性も似ているということがわかった。この結果のみから判断すれば、クリープ試験と強度試験(定歪速度試験)における破壊機構の差は、小さいといえる。

5.5.2 クリープ寿命の予測

3次クリープのある時点での残存寿命は、(5-3)式中の a_3 を知るにより推定できる。なお、 a_3 は a_1, a_2 を用いて次式であらわされるため、 a_1, a_2 からでも推定は可能である。

$$a_3 = \frac{\log(e)}{a_1} = a_2 \log(e) \quad (5-7)$$

ただし、 e は自然対数の底である。表5-1には各周圧下で求めたパラメータの値を示すが、周圧9.8 MPaでは破壊が緩やかであり破壊時刻の決定が困難であったため、 a_3 は求められなかった。なお、 a_1, a_2, a_3 はクリープ試験終了後はもちろん、試験中にも一軸圧縮クリープ試験の場合と同様に求めることができる(大久保・西松, 1986)。

児玉ら(2001)は、登別溶結凝灰岩の一軸圧縮クリープでは横歪速度が軸歪速度の2~4倍程度であるとしている。田下凝灰岩で、残存寿命が同じ時点での(最大横歪速度/軸歪速度)を表5-1の値から求めると、周圧2.0 MPaでは2.6程度、周圧7.8 MPaでは1.5程度であり、児玉ら(2001)の結果と近い値であった。また、周圧の増加とともに(最大横歪速度/軸歪速度)が減少することもわかった。

(5-4),(5-5)式を用いることで、任意の周圧下での破壊直前の軸歪速度や最大横歪速度を知ることができる。例えば(5-4)式によると、一軸圧縮クリープでの破壊1s前の軸歪速度は約5

$\times 10^{-4}$ となり，これは過去の試験結果（大久保・秋，1994）と近い値である．また，周圧 9.8 MPa では破壊 1 s 前の軸歪速度は約 10^{-1} /s，破壊の 10 s 前でも約 10^{-3} /s とサーボ試験機による制御が非常に困難であり，周圧 9.8 MPa で a_3 の値が求められなかった原因の一つであると考えられる．

クリープ軸歪に関して（5 - 3）式が成り立つことは，一軸応力下では大久保・西松（1986）が，三軸応力下では趙ら（1995）が確認しており，児玉ら（2001）は一軸応力下ではクリープ横歪に関しても成り立つことを示した．今回，三軸応力下でクリープ横歪に関しても成り立つという点を指摘したが，これは，地震など地下深部での岩盤破壊の予知にも応用できる可能性があると考えられる．

5.6 まとめ

大久保ら(2002a)が開発した可視化ベッセルを用いて三軸圧縮クリープ試験を行ったが，その際，写真撮影方法および横変位の計測方法について改良を加えた．まず，写真撮影システムを従来の試験システムに組み込むことで，歪がある値をとった時点での写真撮影や連続写真撮影を可能にした．これは，手動での撮影や一定時間毎の撮影が困難な長期にわたる試験で特に有効であると考えられる．

今回は1回のクリープ試験で数十枚の写真を撮影したが，コンピュータプログラムによる横変位測定の自動化により，写真1枚から1 s以内に，試験片の高さ方向の約900点での横変位を求めることができた．ただし，初期の試験片の上下端面付近はベッセルの金属板に隠れているため体積測定はできなかった．この問題点はベッセルの改良により解決できると考えており，近日中にベッセルの改良および試験途中での体積測定を実施する予定である．

クリープ試験と圧縮強度試験結果を比較したところ，クリープ破壊直前（5 s 前）の応力と歪の位置は，強度破壊点以降の応力 - 歪曲線の近傍にすることがわかった．また，軸歪と横歪の増分の比についても，クリープ破壊直前と圧縮強度試験の強度破壊点直後ではほぼ同じとの結果が得られた．

三軸圧縮クリープ試験において，3次クリープでは，軸歪速度と同様に，横歪速度も残存寿命に反比例することがわかった．これが成り立つ条件下では，横歪速度の観察結果から破壊時刻を推定できることになる．

表5-1 田下凝灰岩の物性値と、(5-3)式中のパラメータ a_3^z (軸方向)
および a_3^x (横方向) の値

周圧 (MPa)	強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	応力レベル (%)	実験数	a_3^z ($\times 10^{-4}$)	a_3^x ($\times 10^{-4}$)
0	20.5	4.5	-	-	-	-
2.0	29.9	4.9	90	5	9.4	24.5
			95	8		
			95	1		
3.9	32.2	4.9	98	2	17.9	36.0
			100	5		
			85	3		
5.9	36.7	5.1	90	6	35.0	55.8
			95	8		
			100	9		
7.8	39.2	4.9	95	9	57.1	88.8
			100	5		
9.8	40.8	4.7	95	7	-	-

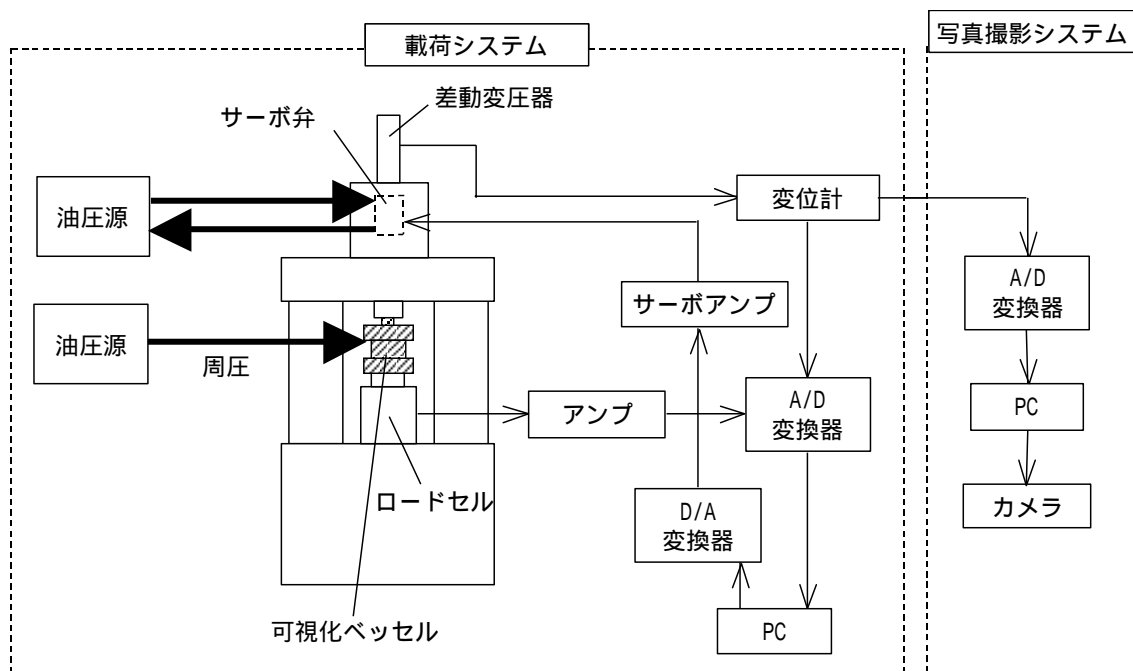
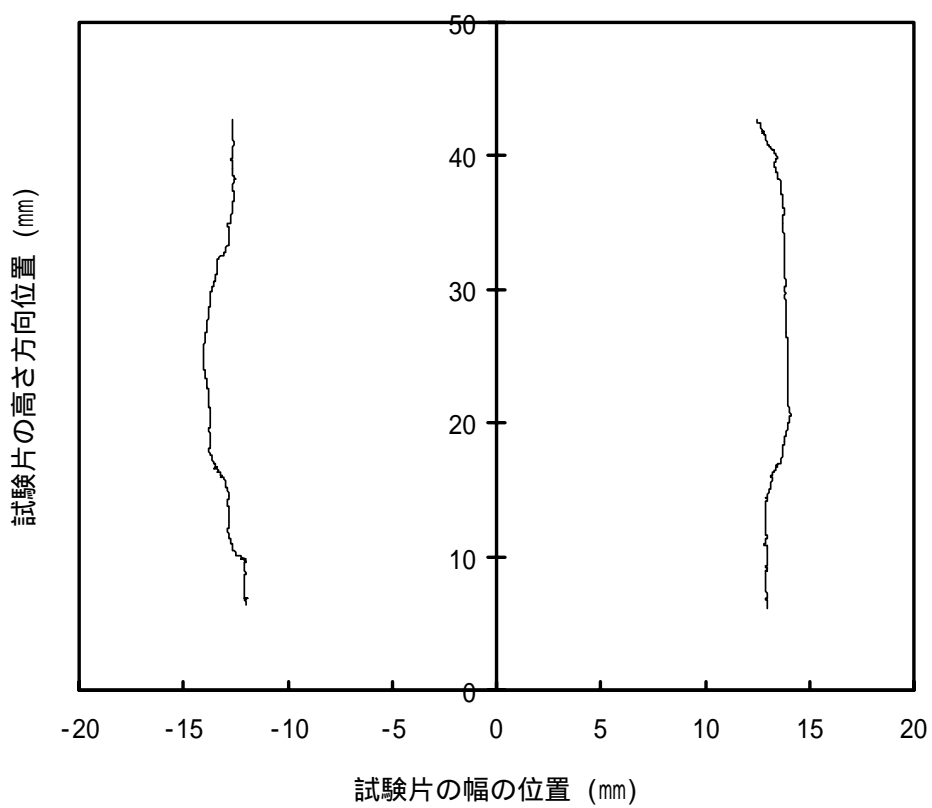


図 5 - 1 载荷および写真撮影システム



(a) 変形した試験片の写真

図5 - 2 試験片の横方向変形



(b) 試験片高さごとの横方向変位

図 5 - 2 試験片の横方向変形

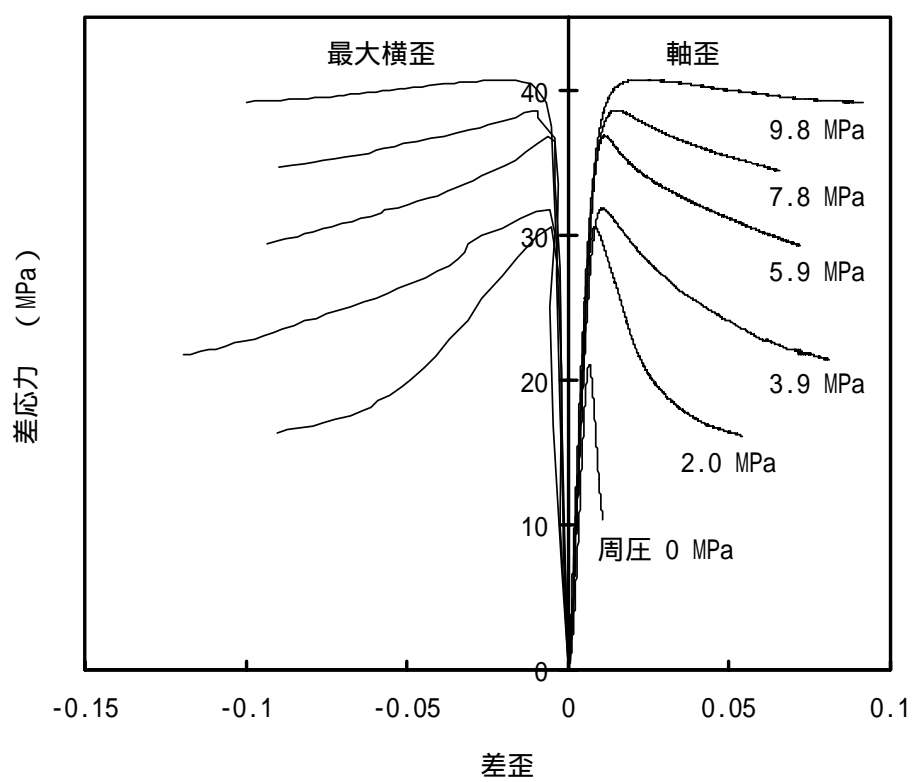
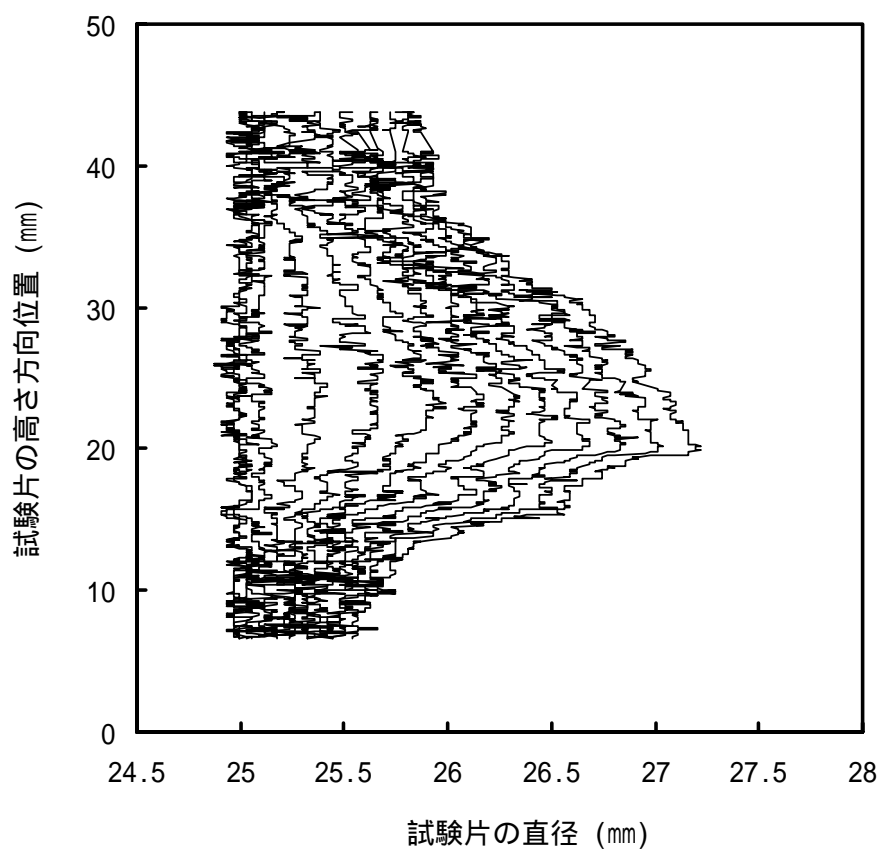
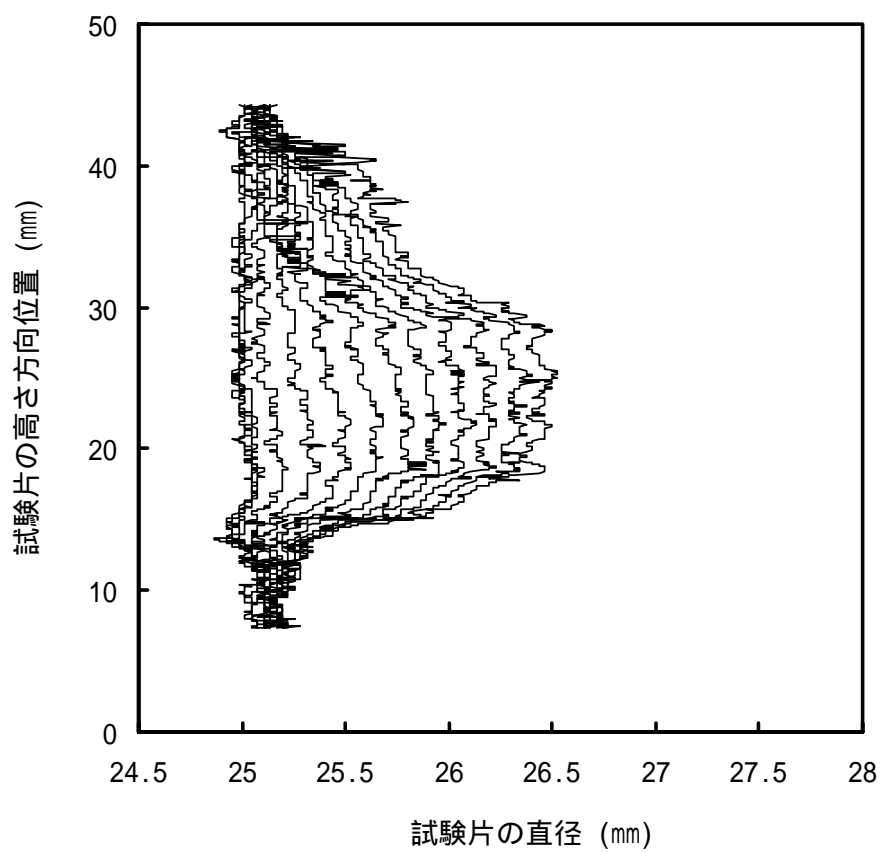


図 5 - 3 三軸圧縮試験での応力 - 歪曲線



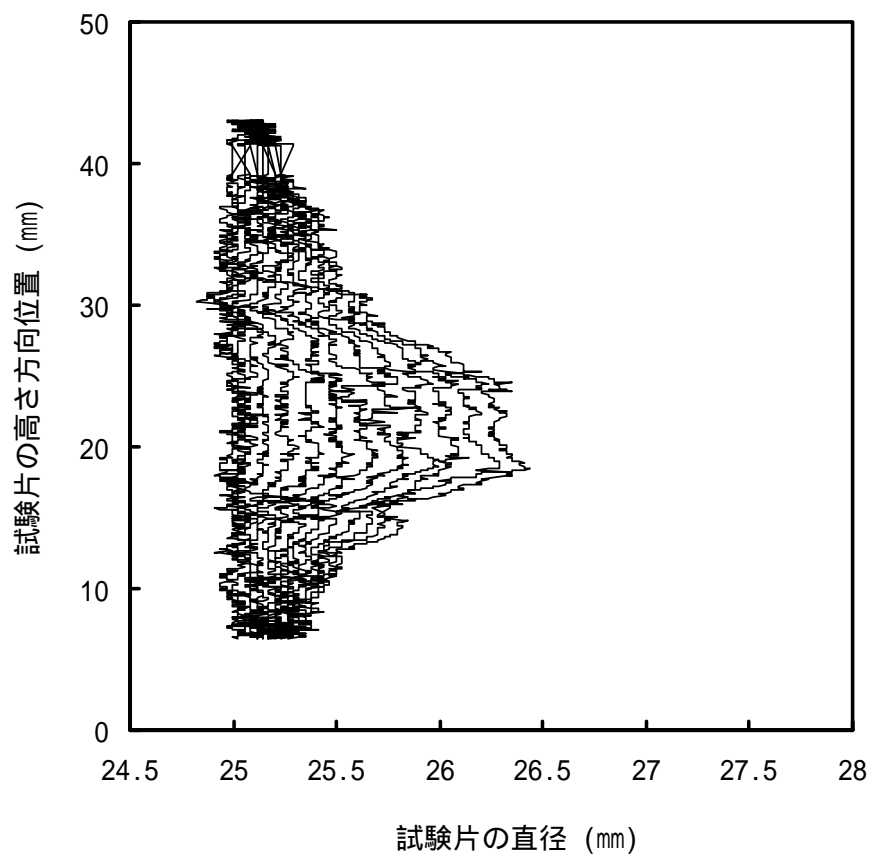
(a) 周圧 2.0 MPa

図 5 - 4 三軸圧縮試験での試験片の横方向変形



(b) 周圧 5.9 MPa

図 5 - 4 三軸圧縮試験での試験片の横方向変形



(c) 周圧 9.8 MPa

図 5 - 4 三軸圧縮試験での試験片の横方向変形

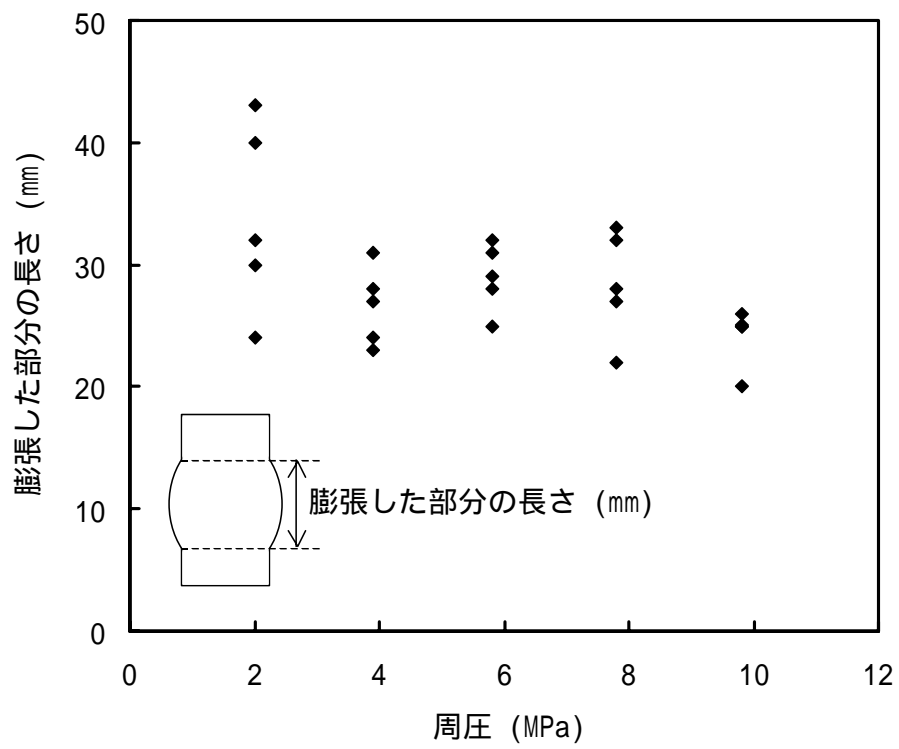


図 5 - 5 三軸圧縮試験での試験片の膨張した部分の長さ

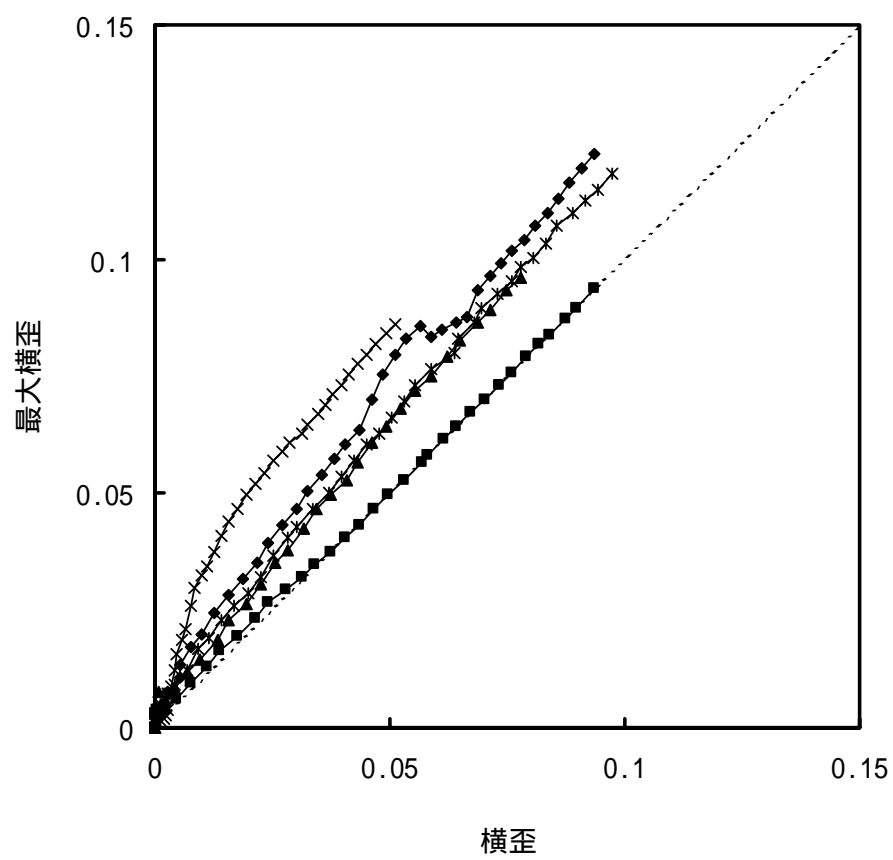


図 5 - 6 試験片中央断面の横歪と最大横歪 (周圧 5.9 MPa)

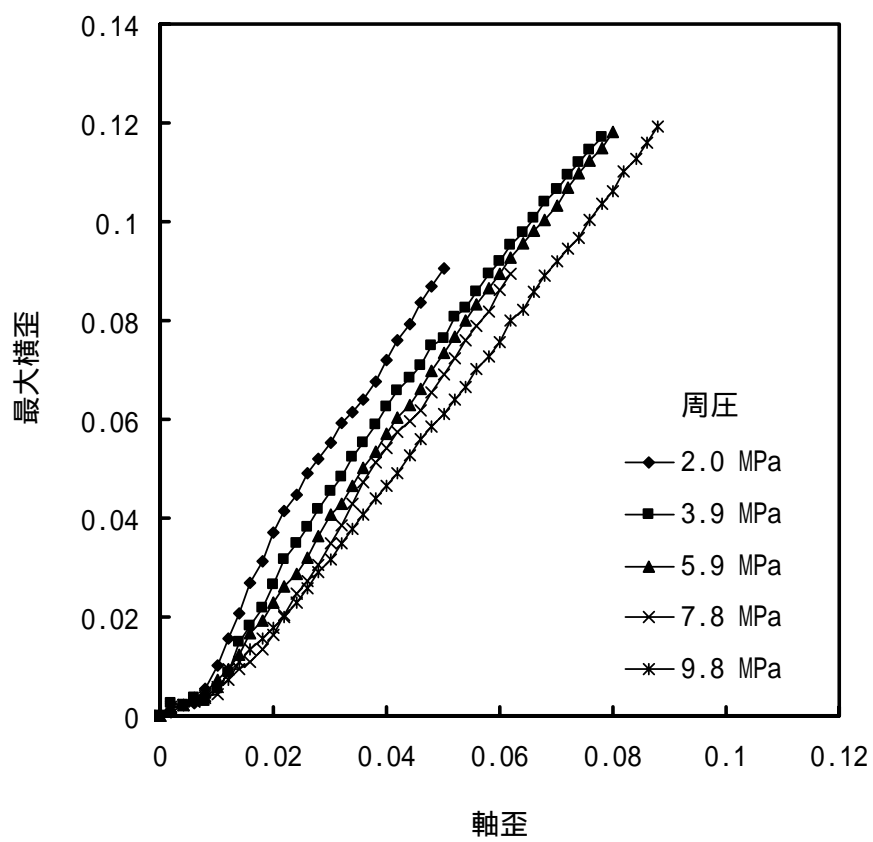
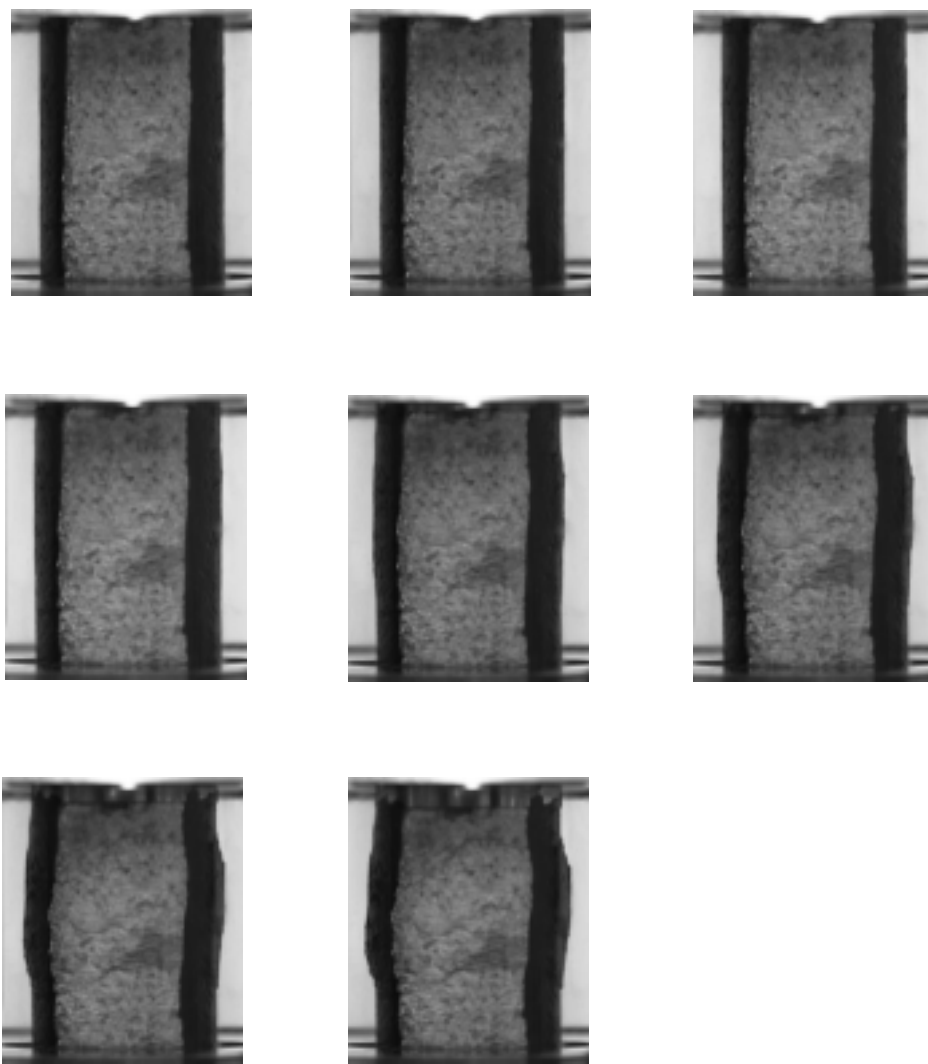
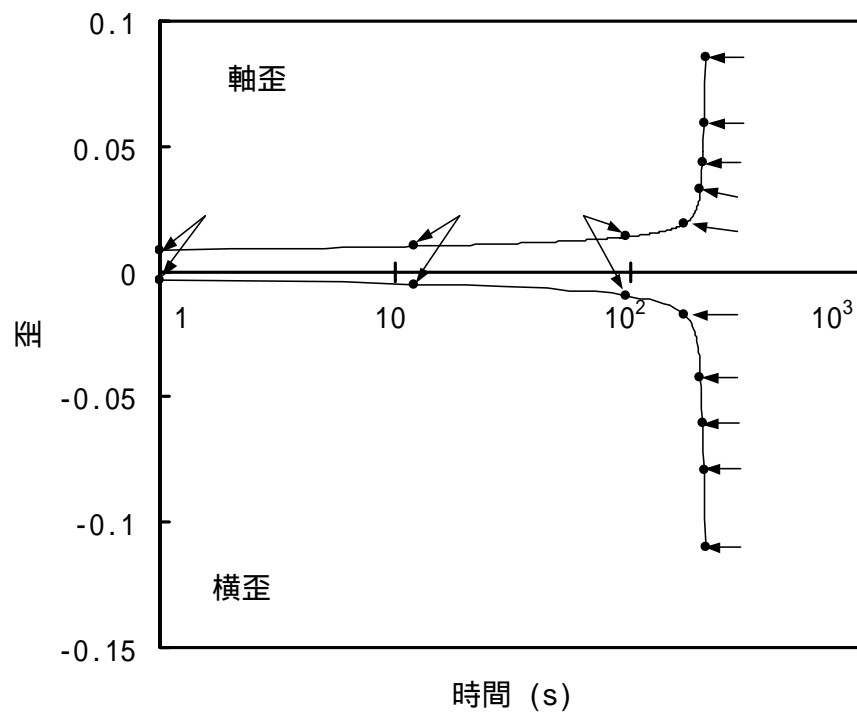


図 5 - 7 三軸圧縮試験での軸歪と最大横歪



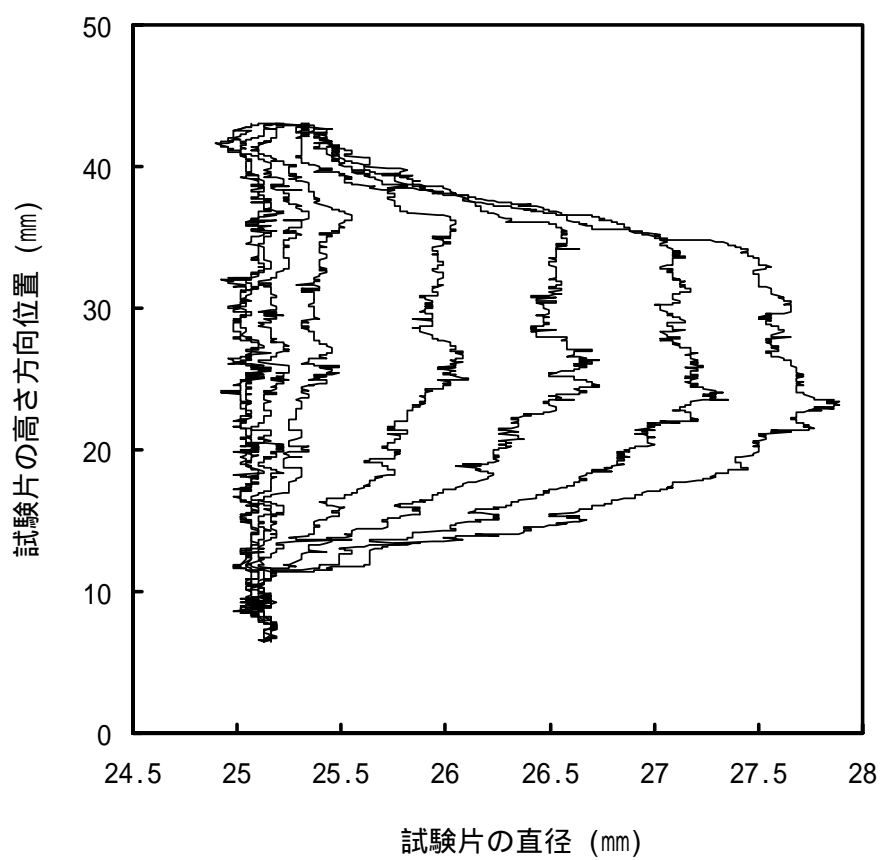
(a) 試験片の連続写真

図 5 - 8 試験片の連続写真と横方向変形
(周圧 5.9 MPa , クリープ応力レベル 90 %)



(b) 軸歪および最大横歪 (~ は図5-8(a)の写真番号と一致)

図5-8 試験片の連続写真と横方向変形
(周圧 5.9 MPa, クリープ応力レベル 90%)



(c) 試験片の横方向変形

図 5 - 8 試験片の連続写真と横方向変形
(周圧 5.9 MPa , クリープ応力レベル 90 %)

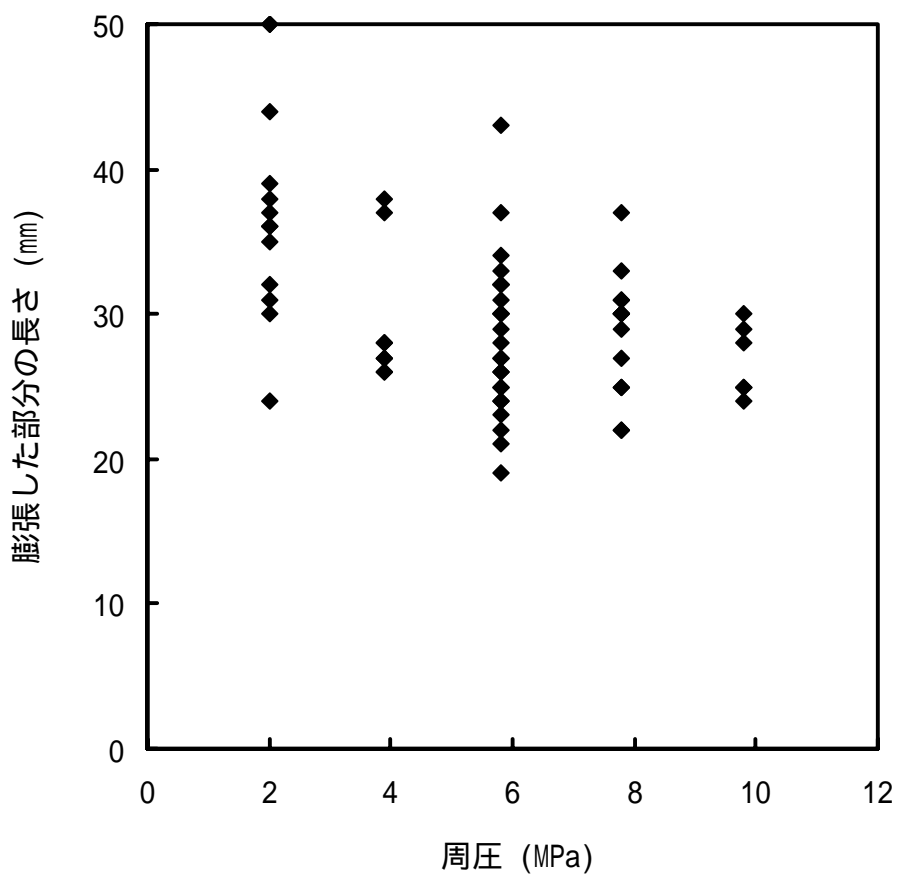


図 5 - 9 三軸クリープ試験での試験片の膨張した部分の長さ

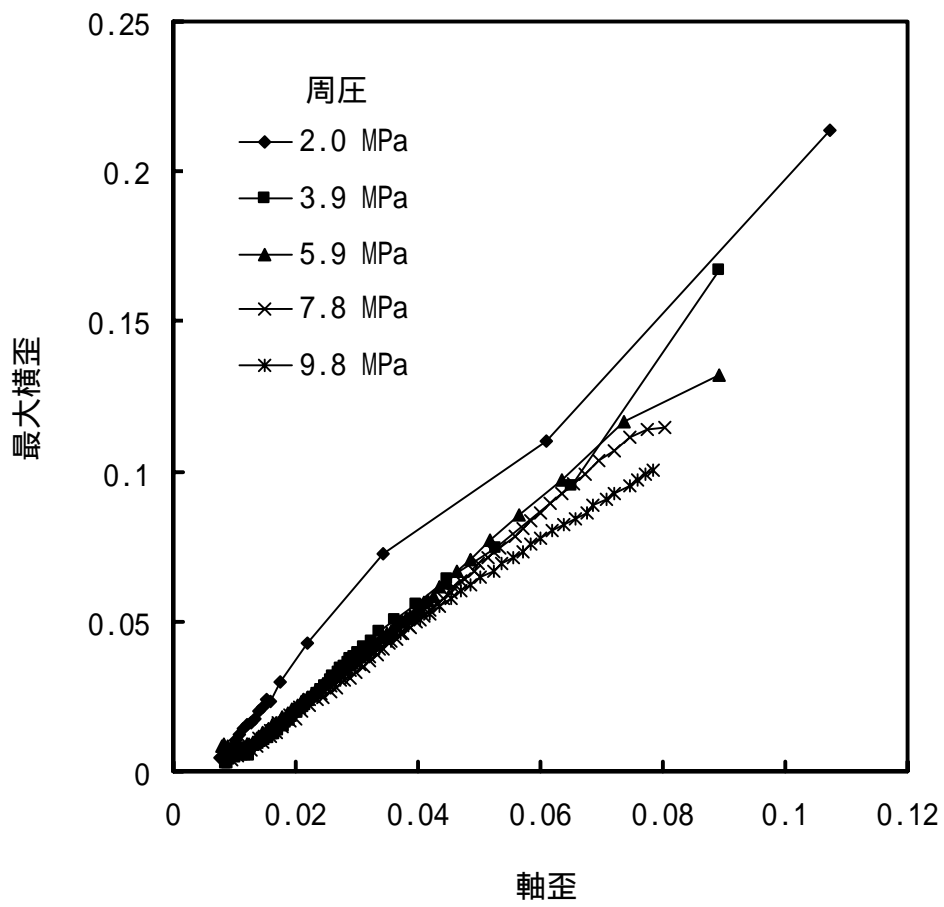
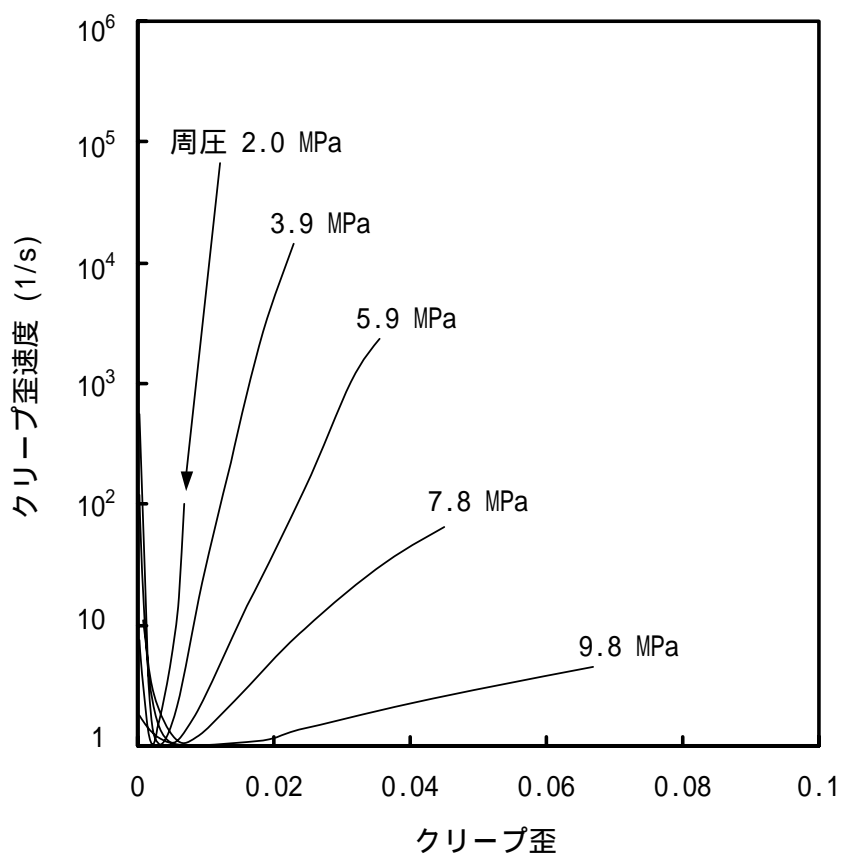
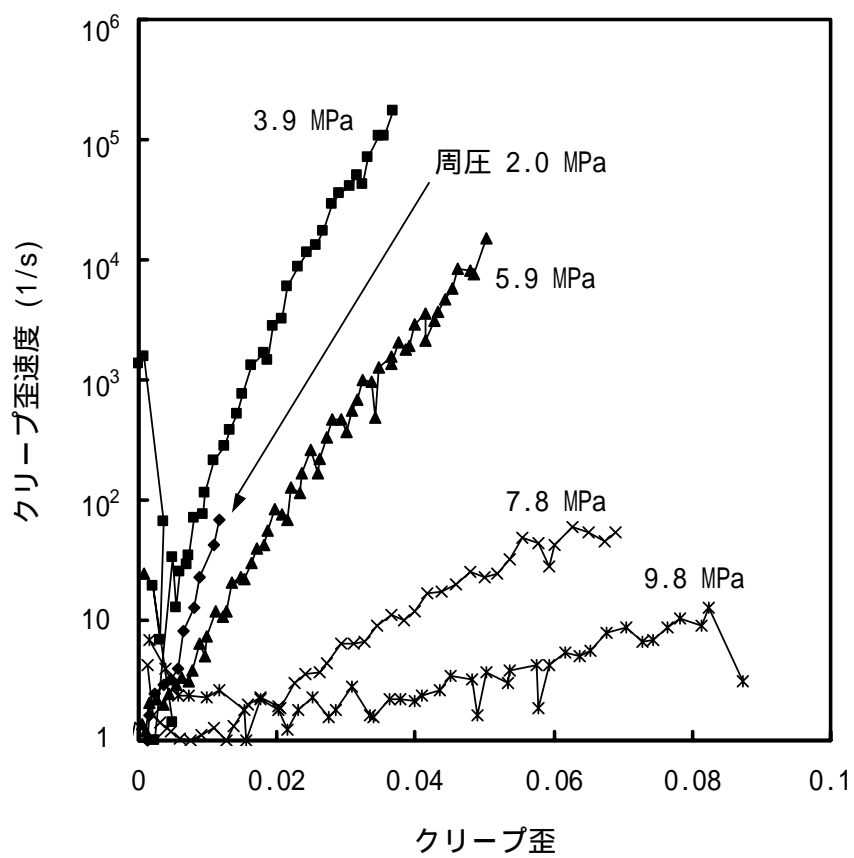


図 5 - 10 三軸クリープ試験での軸歪と最大横歪



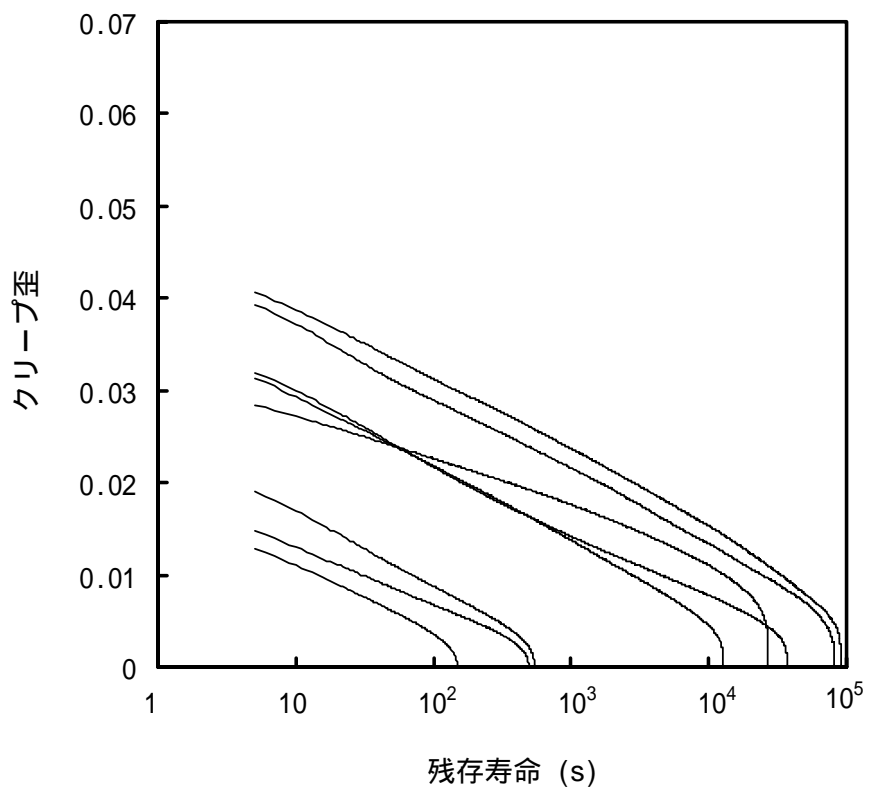
(a) 軸歪

図5-11 クリープ歪とクリープ歪速度



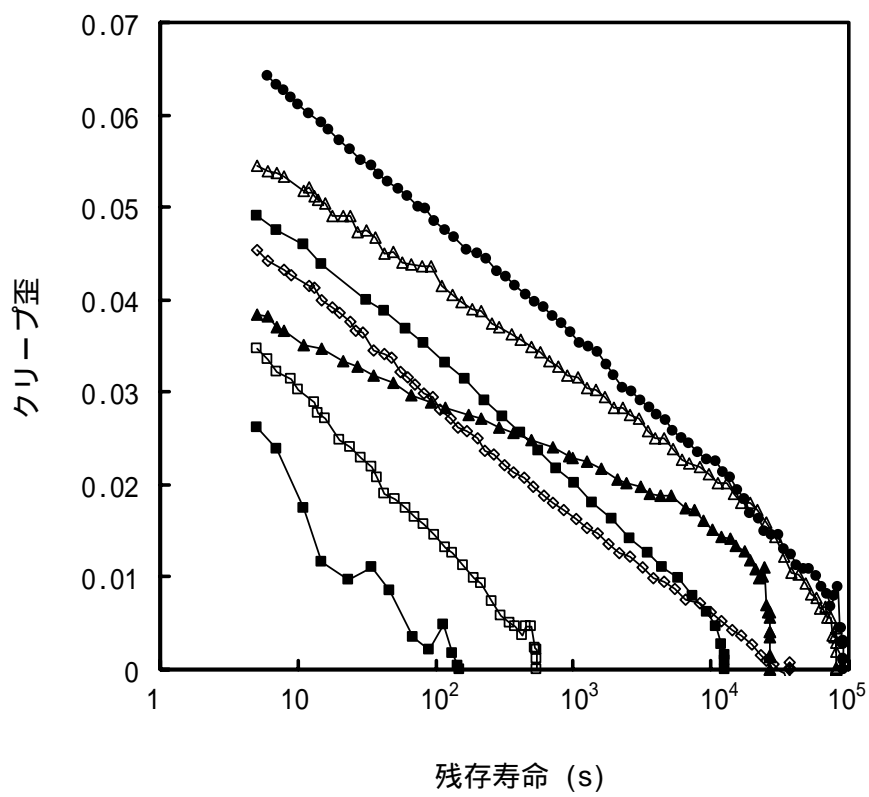
(b) 最大横歪

図5-11 クリープ歪とクリープ歪速度



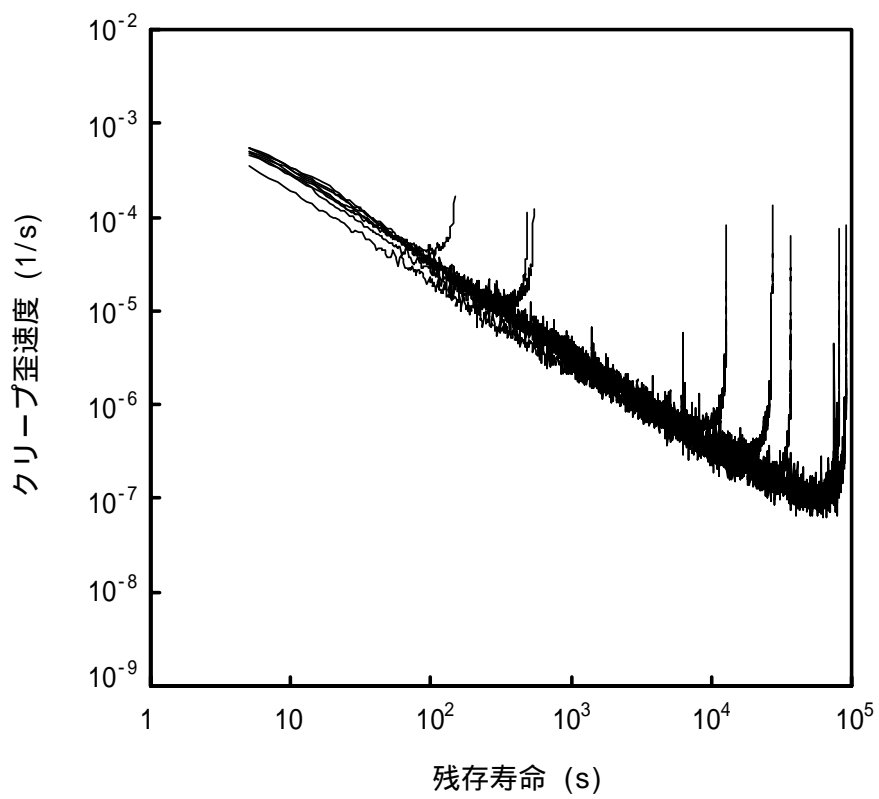
(a) 軸歪

図 5 - 12 クリープ歪と残存寿命
 (周圧 5.9 MPa , クリープ応力レベル 95 %)



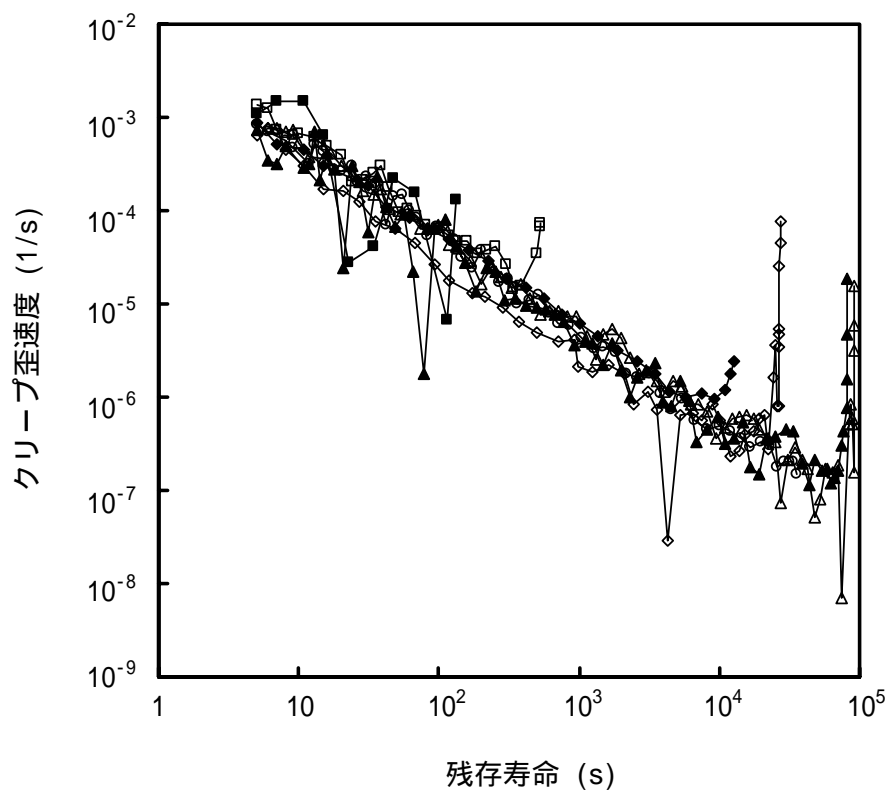
(b) 最大横歪

図 5 - 12 クリープ歪と残存寿命
 (周圧 5.9 MPa , クリープ応力レベル 95 %)



(a) 軸歪

図5 - 13 クリープ歪速度と残存寿命
(周圧 5.9 MPa , クリープ応力レベル 95 %)



(b) 最大横歪

図 5 - 13 クリープ歪速度と残存寿命
(周圧 5.9 MPa, クリープ応力レベル 95 %)

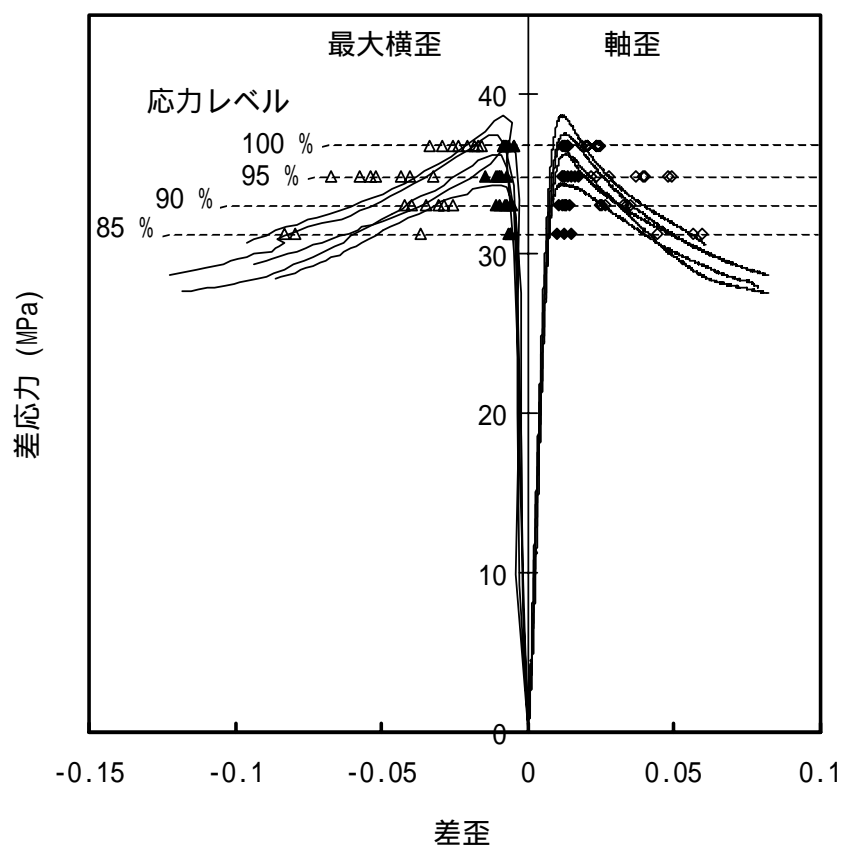


図5 - 14 応力 - 歪曲線上で、クリープ歪速度が最小になる位置(,)と破壊直前(5秒前)の位置(,)(周圧 5.9 MPa)

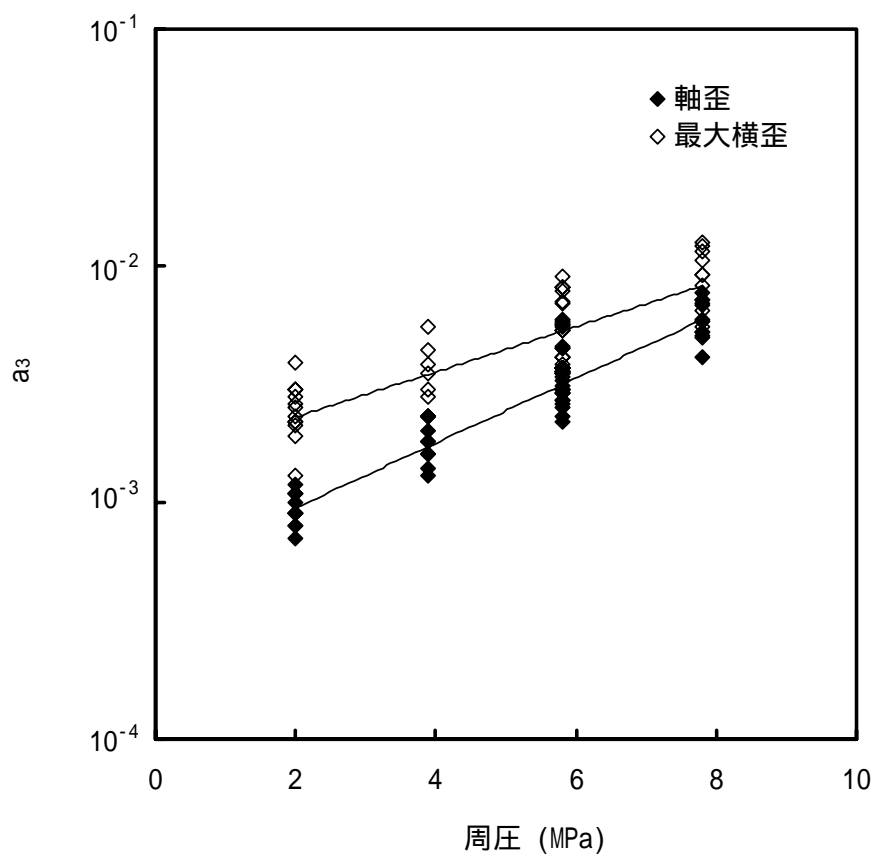


図 5 - 15 (5 - 3) 式中のパラメータ a_3

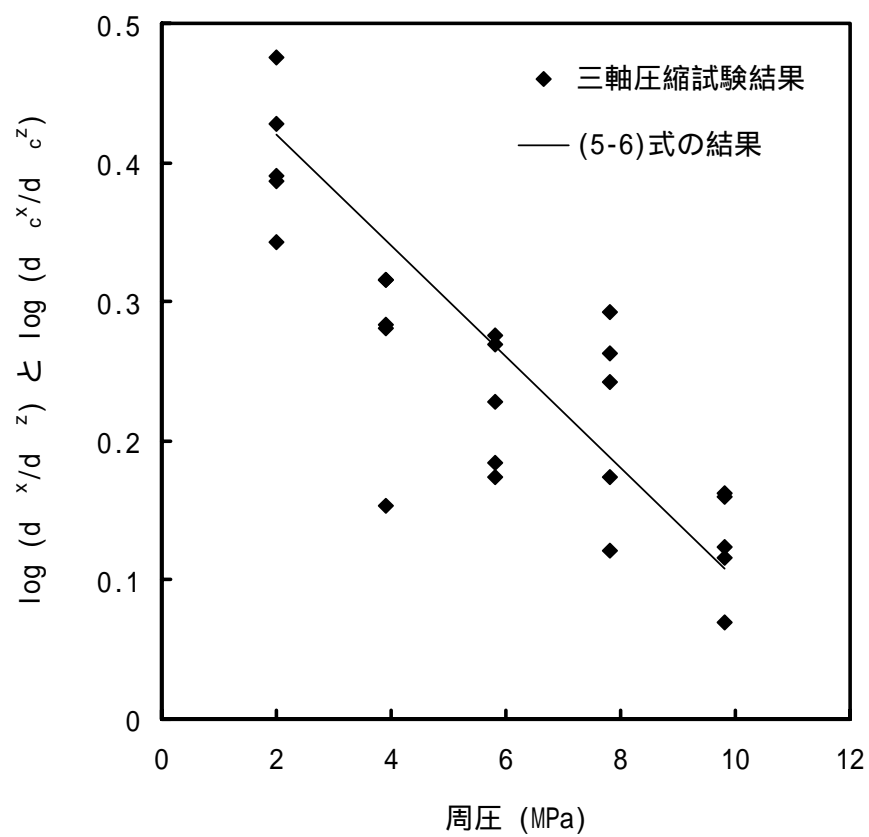


図5 - 16 三軸圧縮試験での $\frac{d_x}{d_z}$ と三軸クリープ試験での $\frac{d_c}{d_c^z}$

6. 中間温度領域におけるクリープ試験

本章では、水が大気圧下で流体として存在する 100℃ 以下でのクリープ試験における温度の影響を調べた結果について述べる。実験方法を述べた後、38、58、78℃ の温度で行ったクリープ試験結果を示す。

6.1 クリープ試験結果

昨年度に引き続き、中間温度領域 (38～78℃) におけるクリープ試験を行った。実験条件を以下に示す。

岩石：稲田花崗岩

環境：湿潤状 20 mm×高さ 40 mm の円柱形

クリープ応力：100 MPa [一軸圧縮強度(190 MPa)の 53 %]

試験期間：約 1 週間

温度は、38、58、78℃ の 3 通りとして実験を行った。実験装置は、油圧式クリープ試験装置を用いた。温度の計測および制御装置に関しては大久保 (2002) を、油圧源とアキュムレータに関しては大久保 (2003) を参照されたい。

実験方法を下記に示す。

- 1) 戻り側ニードルストップ弁と、給油側ニードルストップ弁を締める。
- 2) 圧力源の電源をいれ、油圧を 10.47 MPa (クリープ応力にして 100 MPa) まで増加させる。
- 3) 油圧管路内の気泡が油に溶け込むまで約 1 時間待ち、装置を安定させる。
- 4) 湿潤状態とした試験片を容器にセットし、容器内に水を入れた後、容器温度を設定温度まで上昇させる。
- 5) 手で載荷枠上部のねじを回して試験片に若干荷重をかけ、給油側ニードルストップ弁 2 をわずかに開放して実験を開始する。

各温度条件で 5 本以上実験を行った。

図 6-1 に 38℃ におけるクリープ歪の経時変化を示す。なお、クリープ歪は載荷 1 s 後を 0 とし、図には 6 本の試験結果を示した。ばらつきは見られるものの、経過時間が 1 桁増加するに従い、クリープ歪は $25 \sim 30 \times 10^{-6}$ ずつ増加しており、ほぼ対数クリープ則が成り立っていることがわかる。

図 6-2 に 58℃ におけるクリープ歪の経時変化を示す。10⁴ s までは対数クリープ則が成り立っているが、それ以降、若干下に凸の傾向が見られる。

図 6-3 に 78℃ におけるクリープ歪の経時変化を示す。58℃ と同様に、10⁴ s までは対数クリープ則が成り立っているが、それ以降、下に凸の傾向が見られ、10⁵ s 以降で顕著な傾向が見られる。なお、平成 13 年度に同一条件 (80℃) で 3 本のクリープ試験を行っており、今回の結果とほぼ同様であった。

各温度でのクリープ歪の平均的な経時変化を図 6-4 と図 6-5 に示す。図で 38℃ の結果は 1 週間 (5×10⁵ s) 経過してもほぼ対数クリープ則に従っているが、58℃ と 78℃ の結果は 10⁴ s まで

はほぼ対数クリープ則が成立し、38 に比べ 58 および 78 のクリープ歪は大きくなっている。10⁴ s 以降は、58、78 とともに凸の傾向が見られ、温度が高い方がより下に凸の傾向が大きい。

上記の結果をまとめると次のようになる。

- 1) 経過時間 10⁴ s までは対数クリープ則が成り立ち、温度の影響は大きくない。
- 2) 10⁴ s 以降では、温度が高くなると対数クリープ則よりずれが生じ、クリープ歪の温度依存性は高くなる。

対数クリープ則に従っている場合、経過時間が1桁増加するとクリープ歪速度は1桁減少することとなり、クリープ歪速度は10⁴ s で 10⁻⁹ /s, 10⁵ s で 10⁻¹⁰ /s 程度である。10⁴ s まではほぼ対数クリープ則に従っているため、クリープ歪速度が 10⁻⁹ /s より小さくなってから、温度の影響が顕著に表れている。大久保(1991)は、2次(定常)クリープではクリープ歪速度は温度に敏感に影響を受けるとしており、以下に示す、ボルツマン形の式で歪速度を表わしている。

$$\text{歪速度} = \dots \cdot \exp(- (E - q \cdot \sigma_{cr}) / kT) \quad (6-1)$$

ただし、 σ_{cr} はクリープ応力、 q は定数で、 k はボルツマン定数 (8.3 JK⁻¹mol⁻¹)、 E は活性化エネルギーである。また、実験式である Dorn-Weertman の式もよく使用される。

$$\text{歪速度} = \sigma_{cr}^n \cdot \exp(- E/kT) \quad (6-2)$$

図 6-6~8 に普通軸に描いたクリープ歪と経過時間の関係を示す。ばらつきや雑音が多いため、判読は難しいが、各温度とも上に凸の傾向が見られ、クリープ歪速度は減少しているように見える。大久保(1991)も指摘しているように、厳密にクリープ歪速度は一定となることはなく変化するので、ここでは 10⁵ s ~ 5 × 10⁵ s の 4 × 10⁵ s の区間での平均クリープ歪速度を求めると、38、58、78 でそれぞれ、5 × 10⁻¹¹、9 × 10⁻¹¹、15 × 10⁻¹¹ /s である。今回の実験では、温度のみを変化させているため、(6-1) および (6-2) 式の σ_{cr} を定数とみなすと、次式となる。

$$\text{歪速度} = \dots \cdot \exp(- E/kT) \quad (6-3)$$

両辺の自然対数をとると次式となる。

$$\ln(\text{歪速度}) = \text{定数} - E/kT \quad (6-4)$$

(6-4) 式の歪速度として 10⁵ s ~ 5 × 10⁵ s の区間平均クリープ歪速度を代入し、歪速度の自然対数と 1/(kT) の関係を図 6-9 に示す。図では、3点しかないがほぼ直線関係が見られ、その傾き E (活性化エネルギー) は 25 kJmol⁻¹ である。小玉ら(2003)は圧縮強度や圧裂引張強度の温度依存性を調べた結果、 E は 100 kJmol⁻¹ であったとしているが、中間温度領域に関する花崗岩の実験結果の報告は少なく、この値の妥当性についてはさらに検討する必要があるとの記述をしていることから、得られた 25 kJmol⁻¹ は今後検討の余地が大きい。また、経過時間 10⁴ s まで成立した対数ク

リーブ則に温度依存性がさほどなく、 10^4 s 以降に温度の影響が強くなったことから、対数クリーブ則のもととなる変形現象と、温度の影響が強くなる 10^4 s 以降の変形現象は異なった現象である可能性があり、両者の和としてクリーブ歪が現れたとすれば、後者の歪速度を(6-4)式に入れる必要も感じるが、両者の区別は難しいため、今回は見送った。

中間温度領域におけるクリーブ試験を行ったが、78 という温度において 2 次クリーブのようなクリーブ歪が現れたことは構造物の長期安定性を考えていく上で、重要な事項であるため、今後詳細な検討が必要であると考えます。

6.2 クリープ試験後の試験片の一軸圧縮試験

6.1節で行ったクリープ試験終了後、試験片の目視観察では劣化しているように見えないが、クリープ歪は温度によって変化した。そこで、クリープ試験終了後に一軸圧縮試験を行い、中間温度領域におけるクリープ試験による劣化度合いを調べることにした。

実験条件は以下の通りである。

岩石： 熱クリープ試験使用済み稲田花崗岩

環境： 湿潤状態

試験片： 直径 20 mm × 高さ 40 mm の円柱形

試験機： 容量 1500 kN サーボ試験機 (MTS 社製)

歪速度： 10^{-4} /s

1 週間の中間温度領域におけるクリープ試験後、試験片は温度・湿度が管理された試験室内に 2 週間以上放置し自然乾燥させた後、デシケータに入れ、真空ポンプで 1 日以上デシケータ内部及び岩石の空隙中の空気を除去した。その後ポンプを作動させたまま水を加え、数時間以上保持した後ポンプを止め、1 日以上放置してから試験に供した。

図 6-10 にクリープ試験後の一軸圧縮試験結果を示す。38, 58, 78 での一軸圧縮強度の平均値は 202 MPa, 195 MPa, 190 MPa であり、同一条件での一軸圧縮強度にばらつきはみられるものの、温度が上がるに連れて、一軸圧縮強度が低下する傾向がみられる。

10^{-5} /s の定歪速度試験で得られた稲田花崗岩の一軸圧縮強度 (クリープ試験を行わない通常の試験) は、190 MPa であるので、 10^{-5} /s では載荷速度依存性を考慮すると、一軸圧縮強度は 199 MPa である (大久保ら, 1987b)。

今回の結果とあわせると、38 と 58 の中間的な値であるが、クリープ試験を行うことにより強度が上昇しているか低下しているかは微妙であり、今後の検討課題とした。

図 6-11 に 5×10^5 s 後のクリープ歪と一軸圧縮強度の関係を示す。図では、ばらつきはみられるものの、クリープ歪の増加に従い、一軸圧縮強度が低下している。試験片内部で微視的な亀裂の進展によりクリープ歪が増加していることを考えると、クリープ歪が大きくなると、内部の微視的亀裂が多くなり、それによって一軸圧縮強度が低下したものと考えられる。今回は、1 週間程度の低応力レベルでのクリープ試験であったため、これ以上の考察は難しいが、長期のクリープ試験やもう少し高い応力レベルでの実験を追加し、クリープ歪による強度の変化を調べることは今後重要であると考えられる。

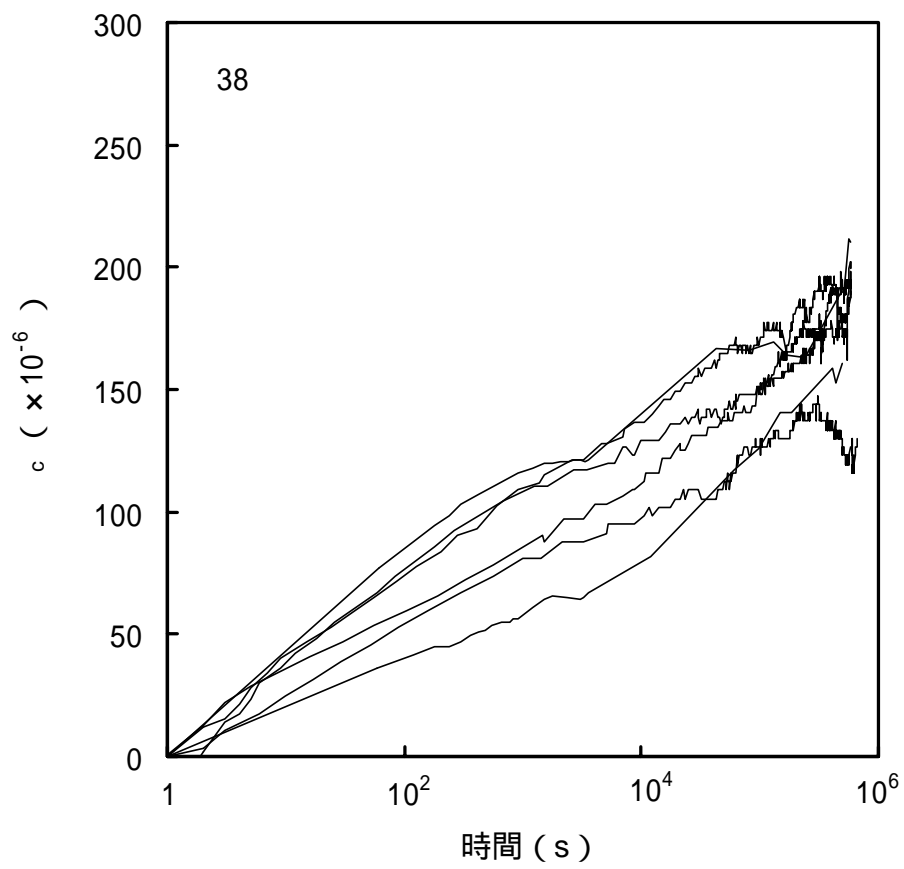


図 6 - 1 片対数グラフに示したクリープ歪の経時変化 (38)

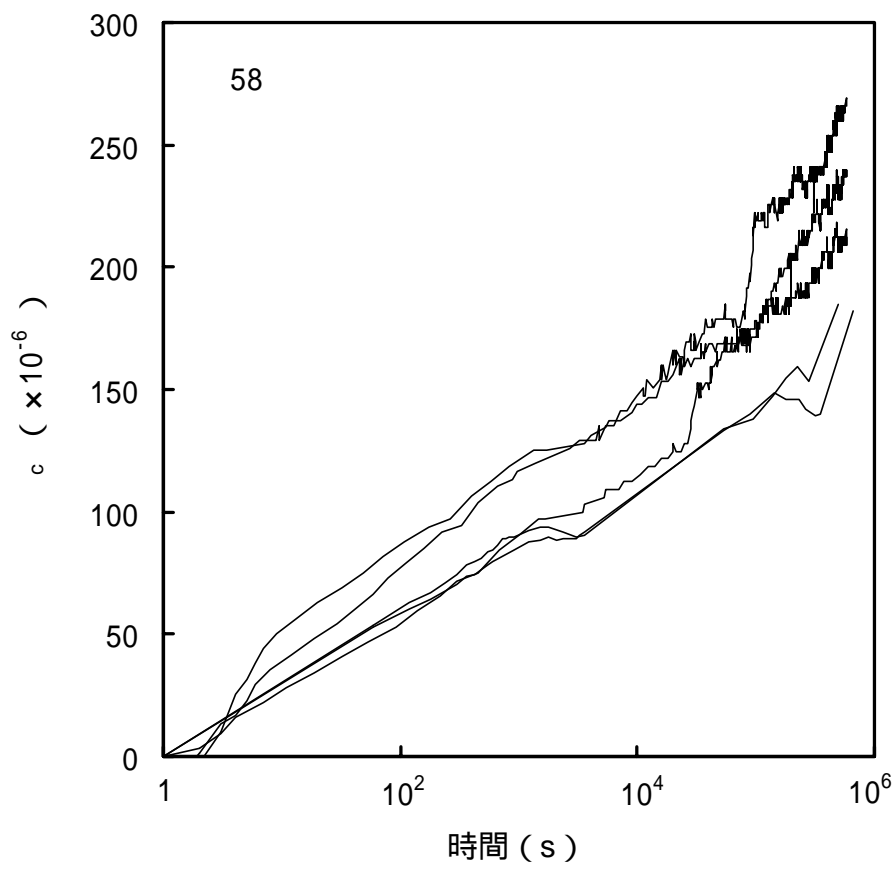


図 6 - 2 片対数グラフに示したクリープ歪の経時変化 (58)

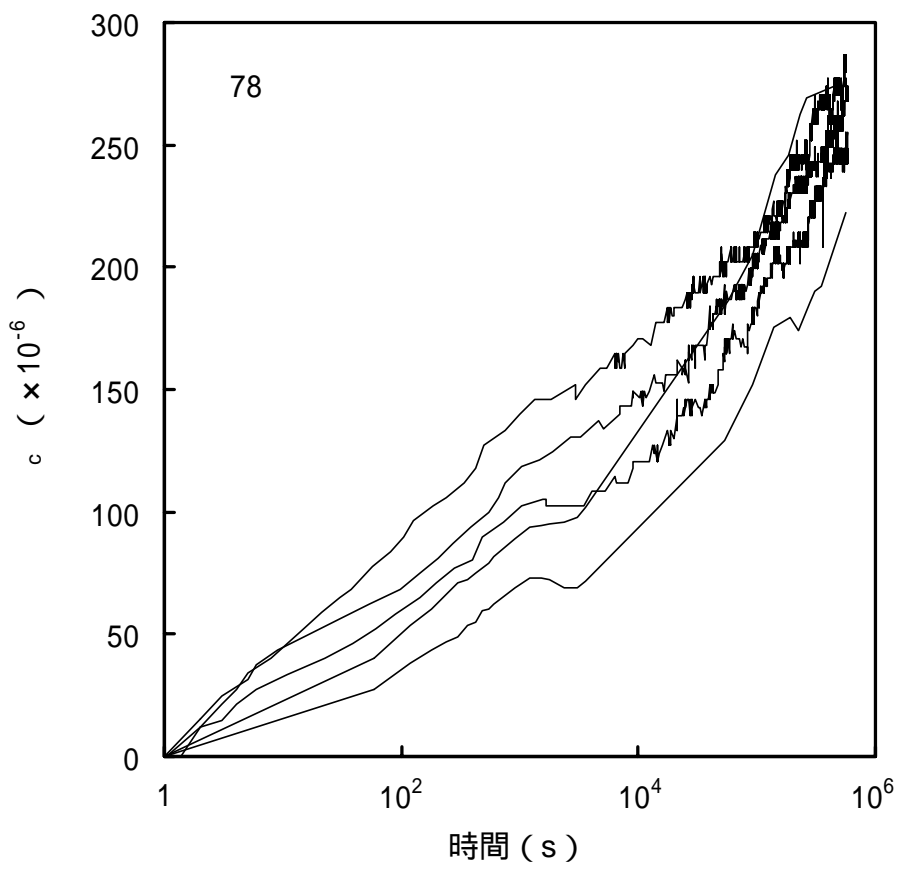


図 6 - 3 片対数グラフに示したクリープ歪の経時変化 (78)

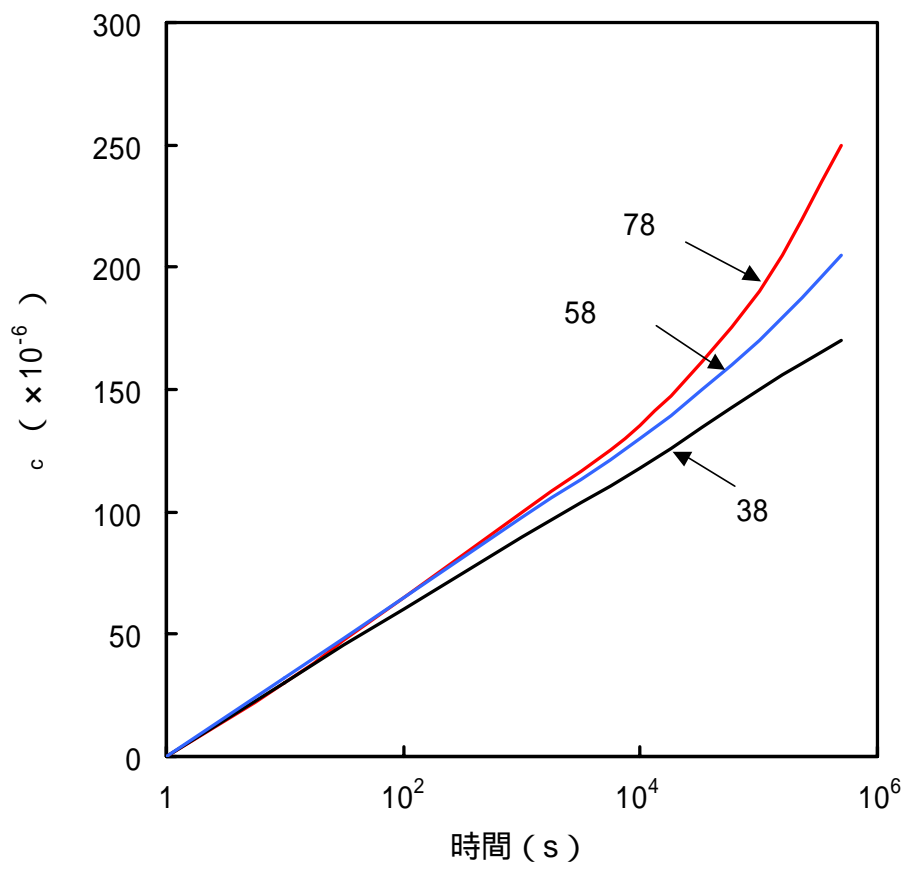


図 6 - 4 クリープ歪の経時変化のまとめ

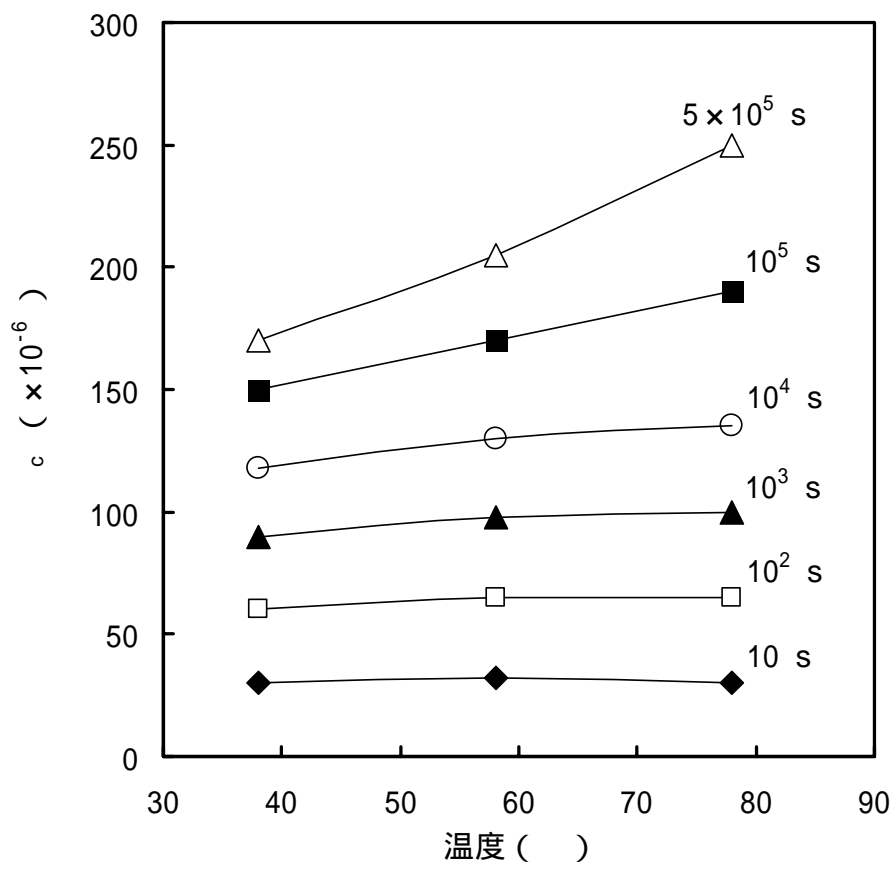


図6-5 クリープ歪の経時変化における温度の影響

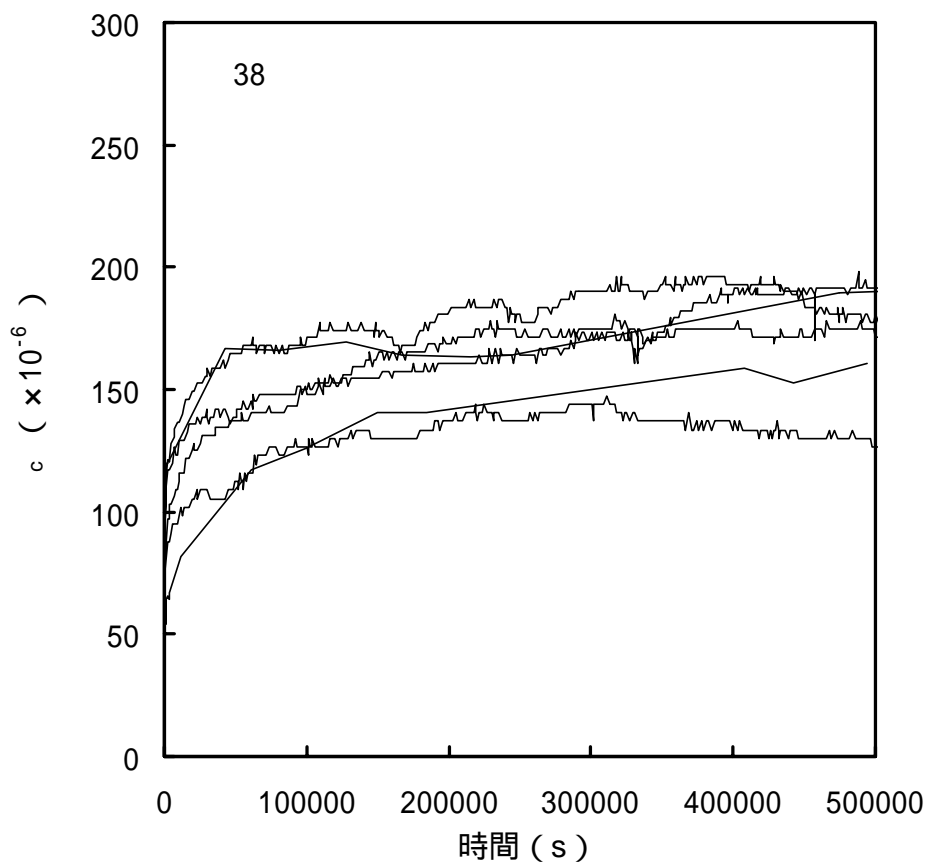


図 6 - 6 普通軸で示したクリープ歪の経時変化 (38)

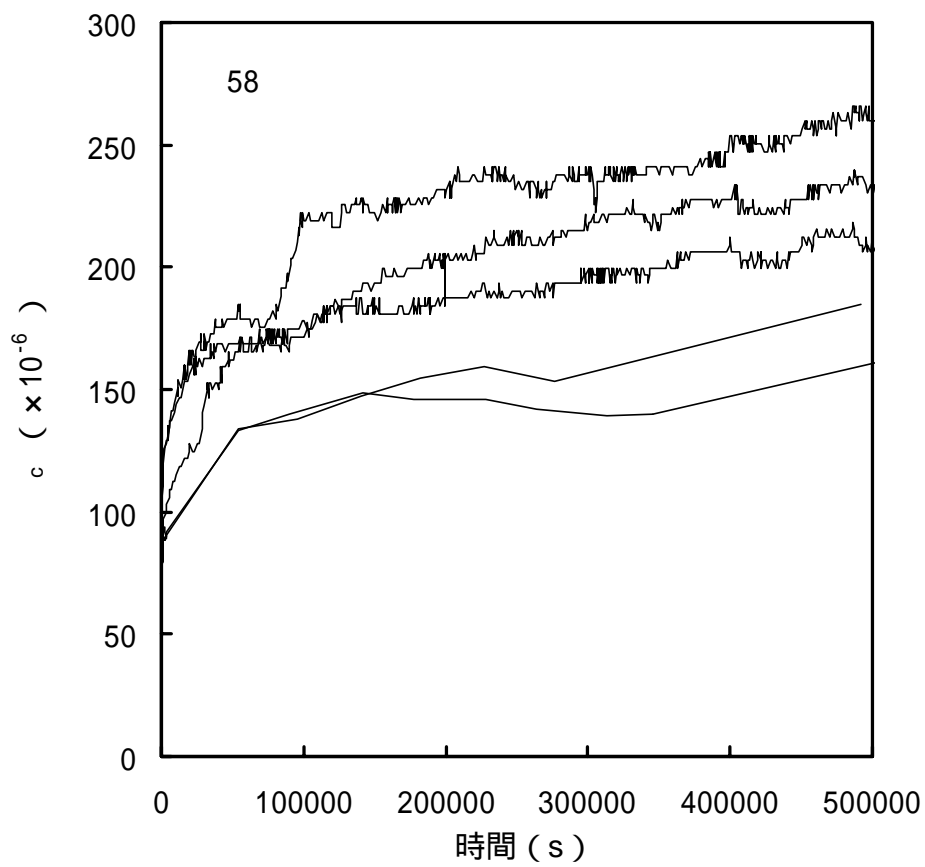


図 6 - 7 普通軸で示したクリープ歪の経時変化 (58)

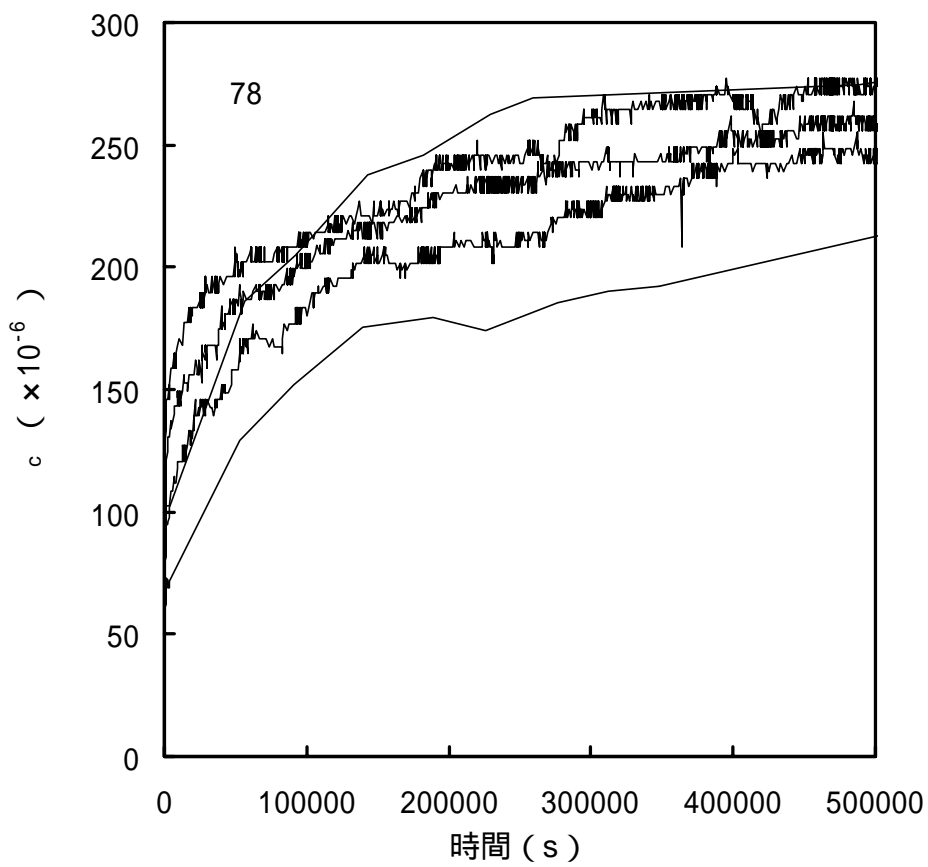


図6-8 普通軸で示したクリープ歪の経時変化(78)

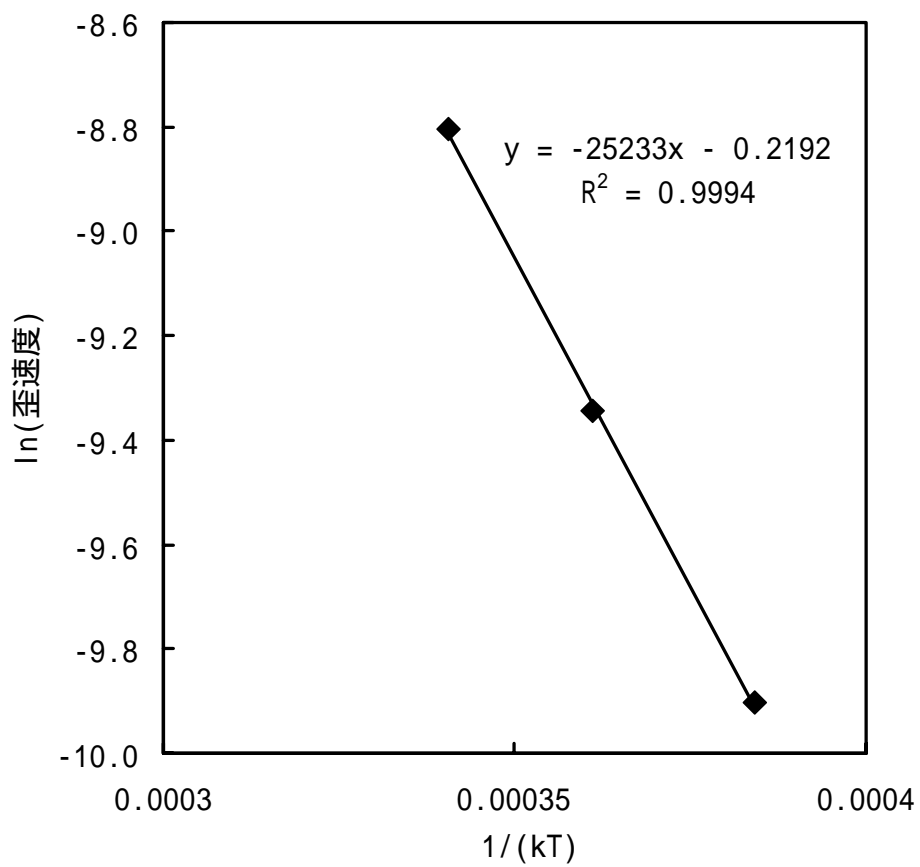


図6-9 10^5 s ~ 5×10^5 s の区間平均クリープ歪速度の自然対数と $1/(kT)$ の関係

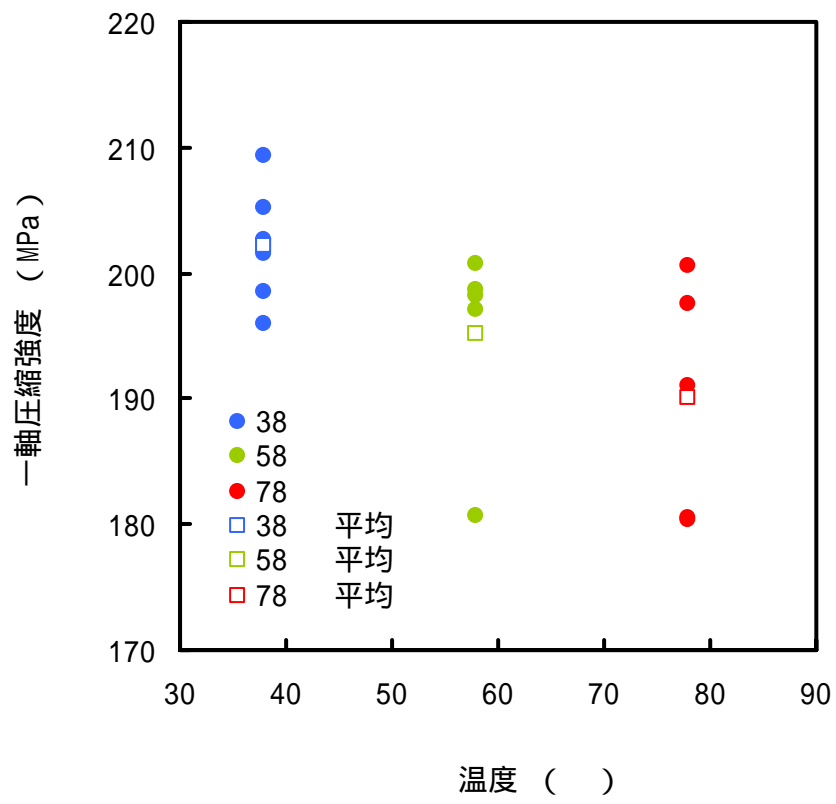


図 6 - 10 クリープ試験後試験片の一軸圧縮強度

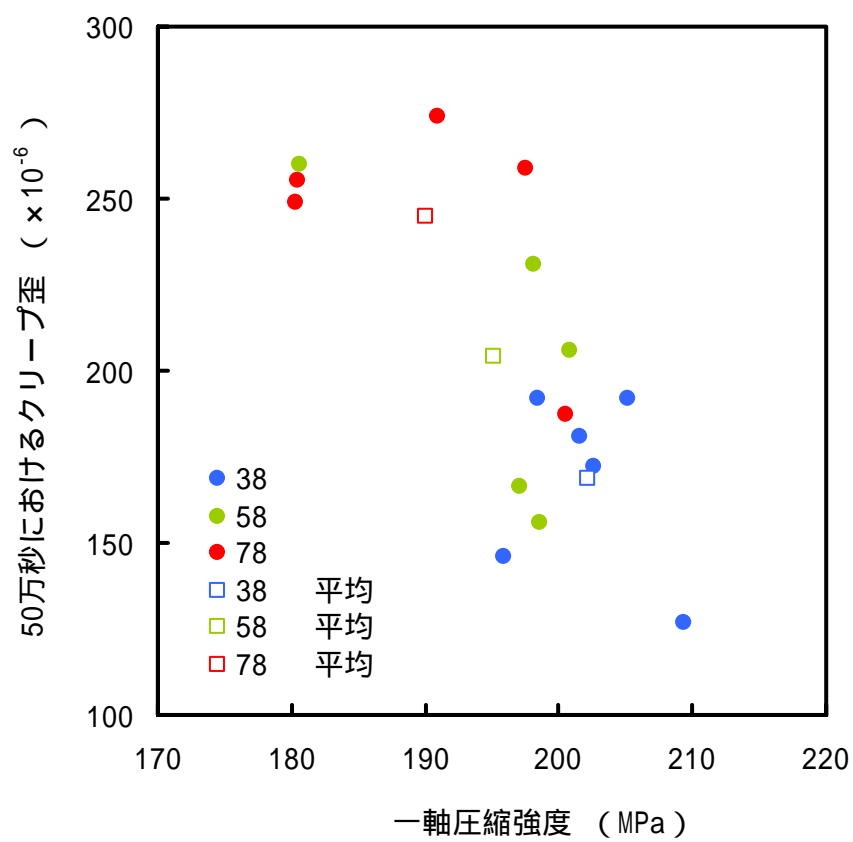


図 6 - 11 5×10^5 s のクリープ歪とクリープ試験後試験片の一軸圧縮強度の関係

7. まとめ

7.1 本年度のまとめ

平成 15 年度（本年度）も，田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行いその結果を第 2 章で述べた．時間の経過に従い、クリープ歪速度は一貫して減少しているが、その速度の減少がどのような傾向であるかは、長期の安定性を考える上で重要である。現在，クリープ試験を開始して 6.5 年経過し，測定結果に年変動が見られるなど，問題点も見られるが，これだけの長期間にわたって試験が継続できることは，当初，予想しなかった．クリープ歪速度の変化に注目し、今後も可能な限り実験を継続していくつもりである．

第 3 章では，結晶質岩用 4 連式油圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験結果について述べた．従来の研究結果が乏しい低応力下での花崗岩のクリープ試験を行った．その結果，気乾状態，湿潤状態のいずれの条件下でもクリープ歪が生じ，その大きさは約 1 週間で $30 \sim 160 \times 10^{-6}$ であることがわかった．しかし今回の試験では，従来あまり例を見なかった，クリープ歪が時間の対数に対して上に凸の曲線を描く試験片が何本かあった．この点は，試験開始直後の変位計測システムが不安定であった可能性もある．1 本でも 4 本でも難易度はさして変わらぬと考えて 4 連式油圧式クリープ試験機を開発したが，実際に試験を行ってみると，4 本の試験片を，1 台の試験機で同時に試験するとわずかながら相互干渉があることがわかった．システムの不安定さが未だに収まらないのも相互干渉が一因である可能性がある．

第 4 章では，昨年度提案した構成方程式が，一軸圧縮強度試験および一軸引張強度試験に適用可能かどうかについて検討した．過去に実施した強度試験結果と構成方程式に基づいた計算結果とを比較・検討したところ，構成方程式は応力 - 歪曲線のある程度再現するとともに，強度の載荷速度依存性も再現することがわかった．また，過去に行ったクリープ試験結果に関する検討結果と合わせて考えると，構成方程式は強度試験とクリープ試験に適用でき，しかも一軸圧縮のみならず一軸引張応力下にも適用できるといえよう．すなわち，昨年度提案した構成方程式は，クリープ試験と強度試験の両者に適応可能であることがわかった．ただし，従来の構成方程式と比べて，より複雑になったため構成方程式中の定数を求めることが難しくなったといえよう．構成方程式の精密化は，比較的簡単であるが，精密化にともなって実用性が薄れる懸念がある．なお，今回は検討の対象を一軸応力下に限ったが，三軸応力下への拡張が今後の大きな課題といえる．

第 5 章では，可視化ベッセルを用いて三軸圧縮クリープ試験を行った結果を述べる．試験を実施する前に，写真撮影方法および横変位の計測方法について改良を加えた．まず，写真撮影システムを従来の試験システムに組み込むことで，歪がある値をとった時点での写真撮影や連続写真撮影を可能にした．これは，手動での撮影や一定時間毎の撮影が困難な長期にわたる試験で特に有効であると考えられる．研究成果の一つとして，三軸圧縮クリープ試験において，3 次クリープでは，軸歪速度と同様に，横歪速度も残存寿命に反比例することがわかった．これが成り立つ条件下では，横歪速度の観察結果から破壊時刻を推定できることになる．従来は観測し難かった，周圧ベッセル内の試験片の挙動が容易に目視・撮影できるようになったメリットは大きく，この装置を応用した研究はまだまだ続ける価値が大いにあると考える．

第 6 章では，中間温度領域におけるクリープ試験結果を述べる．経過時間 10^4 s までは対数クリ

ープ則が成り立ち、温度の影響は大きくないが、経過時間 10^4 s 以降では、温度が高くなると対数クリープ則よりずれが生じ、クリープ歪の温度依存性は高くなることがわかった。40 から 80 の中間温度領域におけるクリープ試験は、雑駁な表現ではあるが、中途半端な温度であり、予想外に困難を覚えた。本年度も実験方法・装置に細かい改良を加えながら実験を行ったが、残念ながら、定量的な議論をするにはデータの質、量とも不十分な段階である。今後も試験方法と機器の見直しを進める必要があると感じた。

7.2 10 年間（平成 6 年度～平成 15 年度）のまとめ

本研究は、巨視的観点からの長期岩盤挙動の評価の確立を目指したものであり、この主旨を実現するために平成 6 年度よりこの委託研究は始まった。10 年間の長きにわたりご援助、ご助言をいただいた核燃料サイクル開発機構の皆様方には心より御礼を申し上げたい。下記に、この 10 年間にわたる研究の概略を述べるとともに、表 7-1 に表として経緯をまとめた。

平成 6 年度は、比較的小さな荷重を簡便に加えられる、空圧式クリープ試験機に関する検討を中心に行った。また、今後検討するための岩石試料として稲田花崗岩を選定し、入手するとともに非破壊検査を実施した。

平成 7 年度の研究範囲は、以下に列挙するように平成 6 年度に比べてかなり広がった。平成 6 年度に始めた空圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験を引き続き行った。今後検討を進める予定の稲田花崗岩の基礎物性を把握するため一軸圧縮試験と一軸引張試験を実施した。本研究では、将来、花崗岩の長期クリープ試験を実施する予定であるが、それに先立って、既存のサーボ試験機を用いた短期間クリープ試験を行った。大きな荷重を長期間にわたって加え続けることができる油圧式クリープ試験機の改良と試用を行った。従来の実験結果をまとめ、どのような挙動を再現することが構成方程式に期待されるかを調査し、ついで非線形構成方程式基礎式の紹介とその解析解について述べた。堆積岩の長期時間依存性挙動も今後検討する予定であり、その準備段階として 3 種類の砂岩について予備的検討を加えた。

平成 8 年度の研究範囲を大別すると、クリープ試験、強度試験、周圧維持装置の開発、構成方程式の検討の 4 つになる。平成 6 年度に始めた空圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験を引き続き行った。さらにサーボ試験機を用いた短期間クリープ試験と、油圧式クリープ試験機を使用した中期クリープ試験を行った。強度試験として、一軸圧縮試験、一軸引張試験および圧裂引張試験を行った。従来よりしばしば使用されてきた油圧式周圧維持装置についてまず検討した。ついで、より小型で安価に製作できる空圧式周圧維持装置の開発と試用を行った。平成 7 年度は 1 次元の構成方程式評価用プログラムを報告書に添付したが、平成 8 年度は 2 次元有限要素法プログラムを添付しその使用方法について解説した。また、構成方程式に含まれるパラメータの求め方と、いくつかの岩石におけるパラメータの値について述べた。

平成 9 年度は、従来の結果を踏まえた上で、クリープ試験、圧縮試験および引張試験などを行った。まず、従来より引き続き行っている田下凝灰岩の長期クリープ試験の結果を述べた。ついで、稲田花崗岩の中期クリープ試験を実施した結果を述べた。気乾状態でのクリープ試験結果は比較的多く報告されているが、湿潤状態での結果は比較的少ない。しかしながら、これまでの本研究結果から、湿潤状態ではクリープ変形が進みやすい事がわかっている。そこで、湿潤状態でのクリープ

に注目して試験を行った。また、2つの様式の周圧維持装置を検討した。一つは油圧式でもう一つは空圧式である。油圧式は従来より良く使用されてきた様式であるが、長期にわたって使用されることが予測されたため計測システムの安定性と耐久性には十分留意を払って改造した。油圧維持装置の信頼性、使い勝手を調べるとともに、周圧下における岩石の基礎データを得るために、この油圧式周圧維持装置を用いて三軸圧縮試験を行った結果を述べた。さらに、この時点までに、一軸引張試験における完全応力歪曲線を求めることに成功していたので、試験途中で除荷・載荷を行い、さらに詳しく一軸引張応力下での岩石の挙動を検討した。ピーク強度以降の領域での除荷・載荷試験は、著者の知る限りではこれまで報告されていなかった。また、コンプライアンス可変型構成方程式に関して検討した結果についても報告した。この構成方程式は比較的簡単な形をしているが、従来の多くの構成方程式が適用できない強度破壊点以降の領域まで用いることができる。この構成方程式を組み込んだ2次元および3次元有限要素法プログラムを開発し、比較的簡単なモデルを用いた計算を行った。

平成10年度は、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行い、試験期間は600日程度に達した。サーボ試験機を使用した中期クリープ試験機も行った。使用した岩石は白浜砂岩である。興味深いことに、白浜砂岩では、クリープ応力レベル17%でもかなりのクリープ変形が見られた。これまでの経験ではこのような岩石はなかった。また、低い応力レベルにおいては、応力レベルによってクリープ歪の進展があまり違わなかった。この点もわれわれがこれまで使用してきた岩石と異なっている。3種類の岩石を用いた三軸圧縮試験結果を行った。結果は常識的であり、試験装置は順調に稼働していると言える。ただし、岩石試験片のシールが試験の途中で破損することがあった。一軸引張応力下での除荷・載荷試験を行った。岩盤内構造物の設計において、岩石の引張応力下での挙動は圧縮応力下での挙動と同じ位重要であり、殊に大規模な構造物の場合には重要性が増す。そこで、サーボ試験機を用いて一軸引張応力下での試験を行った。使用した岩石は6種類である。完全応力歪曲線を求めるとともに、除荷・載荷試験によって非弾性歪の大きさについても検討をした。

平成11年度は、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。試験期間は900日程度に達しており、従来の報告がほとんどない長期間のデータを採取できた。また、結晶質岩用多連油圧式クリープ試験機の開発と試用についても述べた。さらに、可視化周圧ベッセルの開発と試用についても述べた。時間依存性を考慮した一面せん断試験について述べた。せん断試験結果は、岩盤内構造物の設計の際に重要であるが、未だに試験方法が確立されていない。そこで、正確な変位と荷重の制御が可能なサーボ試験機を用いて、一面せん断試験を行い、主としてせん断応力下での岩石の粘弾性的(時間依存性)挙動を検討した。緩み領域の強度回復に関する基礎的検討結果について述べた。これまでの岩盤内構造物の使用期間は、比較的短期であった。この研究で目指すのは、最大10万年程度の長期にわたる岩盤内構造物の安定性である。このように長期間にわたる場合には、一旦緩んだ(破壊した)岩石の強度が増す可能性がある。この強度回復がわずかでも期待できると、岩盤内構造物の長期安定性は飛躍的に増す。この点に関する基礎的な検討はこれまで殆どなされていない。この現象を検討するには、長期にわたる試験が必要であり、早期に研究に着手する必要があると考えて、基礎的な考察と簡単な実験室実験を実施した。最後に、地圧データベースに関して述べた。

平成12年度は、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。試験期間は約1300日に達し、従来の報告がほとんどない長期間のデータを採取できた。平成11年度に開発した結晶質岩用多連油圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験を行った。低応力レベルにおける時間依存性とヤング率

の載荷速度依存性について検討するため、50 %割線ヤング率の載荷速度依存性に特に注目して定歪速度試験などを行ったが、結果をみると、三城目安山岩などにおいては顕著なヤング率の載荷速度依存性がみられたが、稲田花崗岩などでは検知できなかった。平成 11 年度に開発した可視化周圧ベッセルを使用した周圧下での予備試験を行った。さらに、地圧データベース構築に向けた基礎資料の収集を行った。

平成 13 年度は、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。長期にわたる試験にもかかわらず、目だったトラブルもなく順調に試験結果が得られた。平成 11 年度に開発した結晶質岩用多連油圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験を行った。試験機の再調整に、若干手間取ったが、その後は順調に稼動した。ただし、花崗岩のクリープ歪が小さいので、変位センサーと歪アンプについてはさらなる精度向上が望ましいことがわかった。低応力レベルにおける構成方程式について検討した。少なくとも湿潤状態では、比較的低レベルにおいても岩石が粘弾性的性質を示すことは、従来の認識とやや異なると思われる。そこで、これまで行ってきた実験結果を総合的に検討して、低い応力レベルに対して適用できる構成方程式を提案した。平成 11 年度に開発した可視化周圧ベッセルを使用した周圧下での試験を行った。周圧下で試験片が徐々に横に膨らんでいく様子や、いくつかの亀裂が徐々に進展していく様子の観察に成功し、周圧下での挙動解明の有力な手段となりえることが判明した。最後に、40 から 80 の中間温度領域におけるクリープ試験に関する予備的検討を行った。

平成 14 年度は、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。試験期間は 5 年を越え、従来の報告がほとんどない長期間データの採取を継続した。実験結果をみると、特に目立った異常などはなく順当と思われた。また、結晶質岩用 4 連式油圧式クリープ試験機を使用したクリープ試験を行った。機器の再検定と若干の改良を行い、気乾状態および湿潤状態での花崗岩のクリープ試験を行った。理論的な検討の一環として、高応力レベルにおける破壊現象の再現に重点を置いて開発されたコンプライアンス可変型構成方程式と、平成 13 年度の報告書で述べた低応力レベルでのクリープ現象を再現する目的で開発された構成方程式とを組み合わせ、岩石の 1 次クリープから 3 次クリープまでの挙動を再現できるかどうかを、これまで行ってきたクリープ試験結果を参照しながら検討した。さらに、可視化ベッセルを用いて周圧下でのクリープ試験を行った。定歪速度試験では一定時間毎に写真を撮れば良いが、クリープ試験では変化の激しい 3 次クリープにできるだけ多くの写真を撮る必要がある。そこで、3 次クリープ中での変化に着目して、軸歪が一定量増加する毎に自動的に写真撮影を行うシステムを構築し、軸歪および横歪の測定を行った。最後に、中間温度領域におけるクリープ試験を行った。実験方法・装置に細かい改良を加えながら実験を行ったので、その経緯と実験結果について述べた。

平成 15 年度も、田下凝灰岩のクリープ試験を引き続き行った。クリープ試験を開始して 6.5 年経過し、測定結果に年変動が見られるなど、問題点も見られるが、クリープ歪速度の低下傾向等に注目し、今後も実験を継続していく価値が大いにあると考える。結晶質岩用 4 連式油圧式クリープ試験機を使用して、従来の研究結果が乏しい低応力下での花崗岩のクリープ試験を行った。その結果、気乾状態、湿潤状態のいずれの条件下でもクリープ歪が生じ、その大きさは約 1 週間で $30 \sim 160 \times 10^{-6}$ であることがわかった。ついで、平成 14 年度提案した構成方程式が、一軸圧縮強度試験および一軸引張強度試験に適用可能かどうかについて検討した。その結果、構成方程式は強度試験とクリープ試験に適用でき、しかも一軸圧縮のみならず一軸引張応力下にも適用できることがわかった。

また、可視化ベッセルを用いて三軸圧縮クリープ試験を行った。従来は観測し難かった、周圧ベッセル内の試験片の挙動が容易に目視・撮影できるようになったメリットは大きく、この装置を応用した研究はまだまだ続ける価値が大いにあると考える。最後に、中間温度領域におけるクリープ試験を行った。経過時間 10^4 s までは対数クリープ則が成り立ち、温度の影響は大きくないが、経過時間 10^4 s 以降では、温度が高くなると対数クリープ則よりずれが生じ、クリープ歪の温度依存性は高くなることがわかった。

表 7 - 1 長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎研究

	1994 年度	1995 年度	1996 年度	1997 年度	1998 年度	1999 年度	2000 年度	2001 年度	2002 年度	2003 年度	実施内容のまとめ
1) 力学特性試験											1) 力学特性試験 稲田花崗岩, 諫早砂岩, 平島砂岩, 白浜砂岩の各種力学的物性値の把握を行った
a. シュミットハンマー・弾性波速度試験	稲田花崗岩	諫早砂岩 平島砂岩 白浜砂岩	諫早砂岩 平島砂岩 白浜砂岩								
b. 一軸圧縮試験		稲田花崗岩	同上								
c. 一軸引張・圧裂引張試験		稲田花崗岩	同上								
d. 三軸圧縮試験			周圧装置の検討	諫早砂岩, 平島砂岩, 白浜砂岩 周圧 5.5, 11, 16.5 MPa							
2) クリープ試験											2) クリープ試験
a. 空圧式クリープ試験(長期)	装置の紹介 凝灰岩の例	田下凝灰岩 No.1 応力 30 %				田下凝灰岩 No.2 応力 30 %					a. 長期クリープに向く空圧式試験機を開発し, 6 年以上にわたる田下凝灰岩のクリープ試験を実施した
b. 油圧式クリープ試験(中期)		試験装置の改良と試用	稲田花崗岩 気乾と湿潤	稲田花崗岩 低応力	白浜砂岩 低応力						b. 中期クリープ(1週間~1月間程度)用の油圧式試験機を開発し, クリープ試験を実施した
c. サーボ試験機(短期)		稲田花崗岩 1日程度	諫早砂岩, 平島砂岩, 白浜砂岩								c. 短期クリープ(1週間程度まで)用のサーボ試験機によるクリープ試験を実施した
d. 熱クリープ試験							装置の開発と試用	圧力源の改良 稲田花崗岩	階段状に温度を変化させた試験 稲田花崗岩	稲田花崗岩 温度 40, 60, 80	d. 中温度領域(常温~100)のクリープ試験装置を開発し, 熱クリープ試験を実施した
3) 新規試験方法の開発と結果											3) 新規試験方法の開発と結果
a. 周圧装置			油圧式および空圧式の検討								a. 油圧式および空圧式の周圧装置の検討を行った
b. 間隙水圧の測定装置			予備調査	機器類の性能評価試験	間隙水圧の制御装置の開発						b. 機器の性能評価試験を実施し, 間隙水圧の制御装置の開発を行った
c. 引張下での除荷・載荷試験				稲田花崗岩 三城目安山岩 田下凝灰岩	諫早砂岩 平島砂岩 白浜砂岩						c. 一軸引張下で除荷・載荷試験を行い, 亀裂進展に伴うコンプライアンスと非弾性歪の変化を求めた
d. 可視化ベッセル						ベッセルの開発と試用	堆積軟岩(土丹)	横ひずみの測定方法の開発 田下凝灰岩	クリープ試験と破壊直前までの連続写真		d. 三軸圧縮試験時に試験片を観察できるベッセルを開発し, 定歪速度試験・クリープ試験などにおける横歪・体積歪を画像から求めた
e. 4連油圧式クリープ試験機						装置の開発と試用	載荷方式の改良と予備試験	稲田花崗岩 湿潤, 50 %	稲田花崗岩 気乾と湿潤	稲田花崗岩 湿潤, 60 %	e. 長期クリープに向く4連式の油圧試験機を開発し, 稲田花崗岩のクリープ試験を実施した
f. 一面せん断試験						三城目安山岩					f. 一面せん断試験を実施し, 一軸圧縮・引張強度の載荷速度依存性との関係を調べた
g. 緩み領域の強度回復	クリープ寿命と定応力速度試験の載荷速度依存性	コンプライアンス可変型構成方程式の提案	構成方程式の定数の検討および、二次元 FEM プログラムの開発	二次元 FEM による計算と寸法効果・三次元 FEM プログラムの開発	亀裂進展を考慮した引張応力下への拡張	強度回復の提示と予備試験	低応力レベルの時間依存性とヤング率の載荷依存性	低応力レベルの構成方程式の提案	広範囲の応力レベルに適用可能な構成方程式の提案	広範囲の応力レベルに適用可能な構成方程式の求め方	g. 支保後方の緩み領域が時間の経過とともに強度が回復することを提示し, 強度回復実験を実施した
4) 構成方程式											4) 構成方程式 適用範囲の広い構成方程式を開発し, その定数を求めるとともに, FEM の計算も行った
5) 地圧データベース						地圧データベースの試作	地圧データの収集				5) 地圧データベース 地圧に関する文献調査を行い, 地圧のデータベースを構築した

参考文献

- Brace, W. F. B., Paulding, Jr. W. and Scholz, C. (1966): Dilatancy in the Fracture of Crystalline Rocks, *J. Geophys. Res.*, Vol.71, No.16, pp.3939-3953
- 趙顯, 大久保誠介, 福井勝則 (1995): 周圧下での三城目安山岩のクリープ, *資源と素材*, Vol.111, No.8, pp.543-548
- 秋哲淵, 大久保誠介, 福井勝則 (1995): 一軸引張応力下での三城目安山岩のクリープ, *資源と素材*, Vol.111, No.1, pp.31-36
- Chugh, Y. P. (1974): Viscoelastic Behavior of Geologic Materials under Tensile Stress, *Trans. Soc. Min. Eng. AIME*, Vol.256, No.3, pp.259-264
- Cristescu, N. D. (1993): A General Constitutive Equation for Transient and Stationary Creep of Rock Salt, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.30, No.2, pp.125-140
- Cruden, D. M. (1970): The Form of the Creep Law for Rock under Uniaxial Compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.8, pp.105-126
- 福井勝則, 大久保誠介, 西松裕一 (1989): 一軸圧縮荷重下での岩石のクリープ特性, *資源と素材*, Vol.105, No.7, pp.521-526
- 福井勝則 (1990): 複数の荷重条件下における岩石のクリープ及び遅れ破壊, 東京大学博士論文, pp.60-217
- 福井勝則, 大久保誠介, 西松裕一 (1993): 強度破壊点以降での岩石のクリープ特性, *資源と素材*, Vol.109, No.5, pp.361-366
- 福井勝則, 大久保誠介, 岩野圭太 (2003): 一軸引張応力下での三城目安山岩と田下凝灰岩の載荷速度依存性, *土木学会論文集*, No.729, pp.59-71
- 児玉淳一, 石塚与志雄, 安部透, 石島洋二 (1992): 一軸圧縮下における花こう岩の疲労・クリープ特性と長期強度, *資源と素材*, Vol.108, No.3, pp.182-186
- 児玉淳一, 後藤龍彦, 藤井義明, 吉田豊, 板倉賢一 (2001): 自然乾燥状態および湿潤状態における登別溶結凝灰岩のクリープ変形とクリープ寿命, *資源と素材*, Vol.117, No.9, pp.718-724
- 小玉齋明, 藤井義明, 藤田泰之, 石島洋二 (2003): 水中における稲田花こう岩と白浜砂岩の変形・破壊挙動に対する温度の影響, *資源と素材*, Vol.119, No.8, pp.461-468
- Kranz, R. L. (1979): Crack Growth and Development during Creep of Barre Granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.16, No.1, pp.23-35
- Kranz, R. L. (1980): The Effects of Confining Pressure and Stress Difference on Static Fatigue of Granite, *J. Geophys. Res.*, Vol.85, No.B4, pp.1854-1866
- 熊谷直一, 伊藤英文, 笹嶋貞雄 (1986): 岩石の長年クリープ実験 巨大試片 27年間・小試片 10年間の結果, *材料*, Vol.35, No.392, pp.484-489
- Lajtai, E. Z., Schmidtke, R. H. and Bielus, L. P. (1987): The Effect of Water of the Time-Dependent Deformation and Fracture of a Granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.24, No.4, pp.247-255
- Liao, J. J., Yang, M. T. and Hsieh, H. Y. (1997): Direct Tensile Behavior of a Transversely Isotropic Rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.34, No.5, pp.837-850

- Nova, R. and Zaninetti, A. (1990): An Investigation into the Tensile Behaviour of a Schistose Rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.27, No.4, pp.231-242
- 大久保誠介, 西松裕一 (1984): 応力速度の Negative Feed Back を用いた岩石の一軸圧縮試験, *日本鉱業会誌*, Vol.100, No.1161, pp.1052-1056
- 大久保誠介, 西松裕一 (1986): 三城目安山岩と河津凝灰岩のクリープ特性と構成方程式, *日本鉱業会誌*, Vol.102, No.1181, pp.395-400
- 大久保誠介, 西松裕一, 緒方義弘 (1987a): 非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション, *日本鉱業会誌*, Vol.103, No.1191, pp.293-296
- 大久保誠介, 何昌栄, 西松裕一 (1987b): 一軸圧縮応力下における時間依存性挙動 - 岩石の post-failure Region での挙動 (第1報) -, *日本鉱業会誌*, Vol.103, No.1189, pp.177-181
- 大久保誠介 (1991): 岩石のクリープ, *資源と素材*, Vol.107, No.5, pp.245-252
- 大久保誠介 (1992): 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*, Vol.108 No.8, pp.601-606
- 大久保誠介, 金豊年 (1993): 非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤挙動のシミュレーション, *資源と素材*, Vol.109, No.3, pp.209-214
- 大久保誠介, 秋哲淵 (1994): 気乾状態と湿潤状態での田下凝灰岩ならびに大谷凝灰岩の一軸圧縮クリープ, *材料*, Vol.43, No.490, pp.819-825
- Okubo, S. and Fukui, K. (1996): Complete Stress-Strain Curves for Various Rock Types in Uniaxial Tension, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.33, No.6, pp.549-556
- 大久保誠介 (1997): 長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究, サイクル機構技術資料, PNC TJ1602 97-004
- 大久保誠介, 福井勝則 (1997): コンプライアンス可変型構成方程式の定数について, *資源と素材*, Vol.113, No.7, pp.561-564
- 大久保誠介, 福井勝則, 許江 (2001): 岩石のヤング率の載荷速度依存性, *資源と素材*, Vol.117 No.1, pp.29-35
- 大久保誠介 (2002): 長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究, サイクル機構技術資料, JNC TJ7400 2001-010
- 大久保誠介, 福井勝則 (2002): 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*, Vol.118, No.1, pp.36-42
- 大久保誠介, 福井勝則, 羽柴公博 (2002a): 岩石の三軸圧縮試験用可視化ベッセルの開発と試用, *資源と素材*, Vol.118, No.3/4, pp.165-170
- 大久保誠介, 福井勝則, 羽柴公博 (2002b): コンプライアンス可変型構成方程式の拡張とクリープ試験結果による検討, *資源と素材*, Vol.118, No.12, pp.737-744
- 大久保誠介 (2003): 長期岩盤挙動評価のための巨視的観点による基礎的研究, サイクル機構技術資料, JNC TJ7400 2002-011
- Parsons, R. C. and Hedley, D. G. (1966): The Analysis of the Viscous Property of Rocks for Classification, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.3, pp.325-335
- Peng, S. D. (1971): Stresses within Elastic Circular Cylinders Loaded Uniaxially and Triaxially, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.8, No.5, pp.399-432

- 斎藤敏明, 村田澄彦, 今村雅弘, 笹尾春夫 (1998) : 岩石の三軸圧縮試験における強度破壊点以降の横方向変形, 資源と素材, Vol.114, No.12, pp.901-908
- Singh, D. P. (1975) : A Study of Creep of Rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.12, No.9, pp.271-276
- Wijk, G., Reh binder, G. and Logdstrom, G. (1978) : The Relation between the Uniaxial Tensile Strength and the Sample Size for Bohus Granite, Rock Mechanics, Vol.10, No.4, pp.201-219
- Wilkins, B. J. S. (1987) : The Long-Term Strength of Plutonic Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.24, No.6, pp.379-380
- 山口勉, 大久保誠介, 西松裕一, 小泉昇三 (1983) : 三城目安山岩の一軸圧縮荷重下および周圧下におけるクリープ実験 - 岩石の破壊および変形における時間依存性の研究 (第2報) -, 日本鉱業会誌, Vol.99, No.1150, pp.1029-1034
- 山口勉, 大久保誠介, エンリコ マラニーニ, 成田孝 (2000) : 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, Vol.116, No.2, pp.91-96