岩石のクリープ試験における サーボ試験機の制御特性*

福井 勝則¹ 大久保 誠介² 西松 裕一³

[UDC 624.131.37]

Controllability of Servo-Controlled Testing Machine in Creep Test of Rock under Uniaxial Compression

by Katsunori FUKUI¹, Seisuke OKUBO² and Yuichi NISHIMATSU³

In this study, the control performance of servo-controlled testing machine applied to creep test was investigated.

Firstly, supposing a linear rock model, the characteristic polynomial of machine-rock system was obtained and examined. It was found that the system is stable in primary and secondary creep regions, but unstable in tertiary creep region.

Secondly, the computer simulation was conducted for tertiary creep region, using a non-linear visco-elastic rock model which was recently proposed by authors. The results of simulation are summarized as;

- 1) The control performance is mainly influenced by natural frequency of testing machine, gain of servo-system and rigidity of hydraulic ram.
- 2) Complete creep curve of Class II rock can be obtained more easily than that of Class I rock.

Finally, Creep testing under uniaxial compression was conducted using Inada-granite, Sanjome-andesite and Kawazu-tuff as rock samples. It is found that the result of the simulation agrees with the result of experiment.

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、岩石の時間依存性挙動を調べる手段として、よく用いられている^{1)~7)}。その理由として、荷重を一定にした試験は、比較的容易に実現できることがまず挙げられる。例えば、実験装置として、死荷重載荷、あるいはアキュムレータを用い荷重を一定に保つよう工夫した油圧式のもの等が用いられてきた⁸⁾。近年、岩石力学の分野において、サーボ試験機がかなり普及してきた。サーボ試験機は、汎用性に優れており、クリープ試験や応力緩和試験等に比較的容易に利用することができる。しかし、サーボ試験機を用いた場合、設定した通りに試験が行なわれているかどうかの検討は意外になされていない。よって、既報⁹⁾においては、サーボ試験機のモデル化を行ない、定歪速度試験および応力帰還制御を用いた圧縮試験時における制御性について議論した。

クリープ試験においても、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付かず、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。よって、得られたデータの信頼性について検討する必要がある。そこで本研究では、サーボ試験機を用いた場合のクリープ試験について、まず岩石の線形粘弾性モデルを用いて、制御性の概要に関して検討した。さらに、最近開発した岩石の非線形粘弾性モデルを用いた計算機シミュレーションによって、詳しく検討した結果について述べる。

2. サーボ試験機のモデル

通常のサーボ試験機では、比例制御を採用していることが多い。よってここでも、簡単のため、比例制御を用いた場合について考えることにする。サーボ試験機のモデル化については、既報⁹⁾を参照されたい。荷重制御時の岩石-サーボ試験機系の制御システムのブロック線図を図1に示す。図中 $E(V)$ は制御信号であり、これとフィードバック信号との差(以降エラー信号という) $Z(V)$ がサーボアンプの入力となる。クリープ試験の場合、 E は一定である。ゲイン定数 $K_a(A/V)$ のサーボアンプで、エラー信号 Z はサーボ弁を駆動するための電流出力 $I(A)$ に変換される。サーボ

* 1988年8月29日受付 12月14日受理

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
ブロック線図

弁の出力流量 Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) は、電流出力 I に対して一次遅れとなるとした。 K_V ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{A}^{-1}$) は、サーボ弁のゲイン定数、 T (s) はサーボ弁の時定数である。 A (m^2) はピストンの受圧面積、 V (m^3) は油圧シリンダの片側の体積、 K (Pa) は油の体積弾性率、 K_P (V/N) は帰還回路のゲイン定数、 P (Pa) は油圧シリンダ出入口の圧力差である。変位 Y (m)、圧力差 P および出力流量 Q は図1のような関係となるとした¹⁰⁾。 F (N) は負荷に加わる力で、 λ (m/N) は負荷のコンプライアンス ($=Y/F$) である。

ここで、理論的検討に便利のように、次のような無次元量を導入することにする。

$$\begin{aligned} E^* &= E / (K_P \cdot F_0) \\ I^* &= (K_V \cdot I) / (A \cdot Y_0 \cdot \omega_n) \\ Q^* &= Q / (A \cdot Y_0 \cdot \omega_n) \\ Y^* &= Y / Y_0 \\ F^* &= F / F_0 \\ \lambda^* &= \lambda / \lambda_0 \\ \omega_n^2 &= (K_a \cdot K_V \cdot K_P) / (A \cdot T \cdot \lambda_0) \\ \zeta^2 &= (A \cdot \lambda_0) / (4 \cdot K_a \cdot K_V \cdot K_P \cdot T) \\ A^* &= V / (2K \cdot A^2 \cdot \lambda_0) \end{aligned}$$

ただし、図2に示すように、 F_0 はクリープ荷重、 λ_0 は岩石の初期コンプライアンスであり、 Y_0 は $F_0 \cdot \lambda_0$ を表わす。 ω_n 、 ζ は、剛性の充分小さい弾性体を負荷とした時の系の固有円振動数、減衰係数比である¹¹⁾。

3. 岩石の線形モデルによる検討

制御性の概略を知るため、まず岩石の負荷特性が図3に示すような線形粘弾性モデルで表わされるものと仮定する¹²⁾¹³⁾。このモデルは、 λ_1 の値いかんにより、一次、二次、三次クリープ特性を近似的に表現する。このモデルの微分方程式をラプラス変換すれば次式が得られる。

$$(\tau^* \cdot s^* + 1) F^* = (\tau^* \cdot s^* + \beta^* \cdot s^*) Y^* \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

図2 荷重-変位曲線の概念図

図3 負荷の線形モデル

$$\tau^* = \eta \cdot \omega_n / (\lambda_0^{-1} + \lambda_1^{-1})$$

$$s^* = s / \omega_n$$

$$\beta^* = (\lambda_0 + \lambda_1) / \lambda_0$$

で、 τ^* は負荷の緩和時間を、 β^* は荷重-変位曲線の傾きを表わす。

岩石の負荷特性が(1)式で表わされる時、図1で示される制御系の特性方程式は次式のようになる。

$$(1 + A^*) \tau^* (s^*)^3 + (1 + A^* \cdot \beta^* \cdot s^* + 2 \zeta (1 + A^*) \tau^*) (s^*)^2 + (2 \zeta (1 + A^* \cdot \beta^* \cdot s^*) + \tau^*) s^* + \beta^* \cdot s^* = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

制御系が安定であるための必要十分条件は、この場合次のようになる¹¹⁾。

- 特性方程式の各項の係数が同一符号を持つ。
- 一次と二次の係数の積の方が、定数項と三次の係数の積より大きい。

一次、二次、三次クリープ領域において、a)、b)の条件がどのようなかについて検討してみることにする。

- 一次クリープ領域 ($\lambda_1 > 0$)

この場合、 $\tau^* > 0$ 、 $\beta^* > 1$ となり、(2)式の特性方程式の各項の係数はすべて正となる。またb)の条件も満たされているので、この領域では、制御系は安定である。

- 二次クリープ領域 ($\lambda_1^{-1} = 0$ 、即ちモデルがMaxwellモデルとみなせる時)

この場合、特性方程式は以下のようになる。

$$(1 + A^*) \tau^* (s^*)^2 + (1 + 2 \zeta (1 + A^*) \tau^*) s^* + 2 \zeta + \tau^* = 0$$

この場合、 $\tau^* > 0$ であるので、各項の係数はすべて正である。二次系の場合、この条件から、制御系は安定であることがいえる。

- 三次クリープ領域 ($\lambda_1 < 0$)

- $\lambda_0 > -\lambda_1$

この場合、 $\tau^* < 0$ 、 $\beta^* > 0$ となり、(2)式の三次の係数は負、定数項は正であるので、制御系は不安定となる。

- $\lambda_0 < -\lambda_1$

この場合、 $\tau^* > 0$ 、 $\beta^* < 0$ となり、(2)式の三次の係数は正、定数項は負であるので、制御系は不安定となる。

以上より、一次、二次クリープ領域においては制御系は安定となり、三次クリープ領域においては、制御系が不安定となる。

4. 岩石の非線形モデルによる検討

4.1 基礎式

前章では、線形自動制御理論により、制御性について定性的に判断してきたが、実際の制御系において、三次クリープ領域でも変位速度があまり大きくない時には安定な挙動を示す。よって以下では、三次クリープ領域について、岩石の力学的挙動の非線形性も考慮した計算機シミュレーションを行なって、制御限界を定量的に検討してみる。図1に示す制御系を微分方程式の形で示すと以下のようになる。

$$\begin{aligned} I^* &= 0.5 (E^* - F^*) / \zeta \\ 0.5 (dQ^*/dt^*) / \zeta + Q^* &= I^* \end{aligned}$$

$$dY^*/dt^* = Q^* - A^* (dF^*/dt^*)$$

岩石の構成方程式として、以下に示される式¹⁴⁾を用いる。

$$d\lambda^*/dt^* = a (F^*)^n (\lambda^*)^m \dots\dots\dots (3)$$

$$Y^* = \lambda^* \cdot F^*$$

ただし、

$$t^* = t \cdot \omega_n$$

$$a = 1 / ((m-1) \cdot t_F^*)$$

で、 t_F^* は荷重が常に設定したクリープ荷重に保たれる理想的な試験機でクリープ試験を行なった場合の破壊寿命 t_F に ω_n を掛けたものである。理想的な試験機を用いたとすると、(3)式の構成方程式の変位速度と経過時間 t^* の関係は次のようになる。

$$dY^*/dt^* = 1 / (m-1) \cdot (t_F^*)^{1/(m-1)} \cdot (t_F^* - t^*)^{-m/(m-1)} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $t_F^* - t^*$ を残存寿命 T^* と定義する⁶⁾。

$$T^* = t_F^* - t^* \dots\dots\dots (5)$$

この残存寿命は、破壊までの時間を表している。(5)式を(4)式に代入すると、次のようになる。

$$dY^*/dt^* = 1 / (m-1) \cdot (t_F^*)^{1/(m-1)} \cdot T^{*-m/(m-1)} \dots\dots\dots (6)$$

通常、硬岩では、 $m \gg 1$ であるので、(6)式より変位速度と残存寿命は両対数グラフ上で傾きがほぼ -1 の直線となり、実験結果で得られた関係と一致している⁶⁾⁷⁾。

4・2 三次クリープにおける制御限界

前節で示した式に基づいてシミュレーションするにあたり、考慮すべきパラメータとしては、岩石の特性に関わるもの n, m 、試験機の特性に関わるもの A^*, ζ の他 t_F^* がある。 t_F^* の中には、クリープ応力と試験機系の固有円振動数 ω_n の影響が含まれている。サーボ試験機によってクリープ試験を行なった場合、何をもって制御限界とするかには、種々の選択肢があるが、ここでは、実際の荷重が設定荷重に比べて 2% 低下した時をもって、制御限界とすることにして、議論を進める。

三次クリープ領域では、変位速度 dY^*/dt^* が時間の経過とともに大きくなってゆき、それにとまって、設定したクリープ荷重と実際の荷重との間の偏差が大きくなってゆく。制御限界に達した時の変位速度を縦軸に、 ζ を横軸にとり、シミュレーション結果の一例を図 4 に示す。図より、減衰係数 ζ が小さい程、ま

三角形は稲田花こう岩 ($A^* = 0.16$)、円形は三城目安山岩 ($A^* = 0.07$)、四角形は河津凝灰岩 ($A^* = 0.07$) の実験結果を表す。

図 4 クリープ試験の制御限界

た A^* が大きい程、制御限界に達した時の変位速度が大きいことがわかる。三次クリープ領域では、残存寿命が小さくなるにつれて変位速度が大きくなるので、制御限界に達した時の変位速度が大きい程、残存寿命が小さい所すなわち破壊の直前まで信頼できる実験結果が得られる。この意味で、 ζ が小さく A^* が大きい程、制御性が良いといえる。

サーボ試験機を用いた変位速度一定試験あるいは応力帰還制御試験では、 A^* が小さい程、従ってシリンダ内の油の剛性が高い程制御性の良いことが知られている⁹⁾。これは、強度破壊点以降の領域で岩石の負荷能力が急激に低下した時、 A^* が大きいと、油が膨張し、試験片に余分な変位を与えてしまうためである。一方クリープ試験においては、試験機の応答性が追いつかない時、シリンダ内の油が膨張して補う。その程度は、 A^* が大きい程大きい。しばしば試験片に比べて充分コンプライアンスの大きいばねによってクリープ荷重を与えた試験が行なわれることから¹⁵⁾、シリンダ内の油の剛性も含め試験機剛性の小さい方がクリープ試験には有利と言えることがわかった。

各パラメータを、 $5 < n < 90$, $5 < m < 100$, $0.01 < A^* < 1$, $0.1 < \zeta < 1.0$, $10^2 < t_F^* < 10^{13}$ の範囲で変えてシミュレーションを行なった結果、次の事項がわかった。

- 1) t_F^* の制御性に及ぼす影響は小さい。
- 2) n が小さい程、若干制御性が良くなるが、その程度は小さい。
- 3) m が n とほぼ同じ値を取る時、最も制御性が良い。通常の岩石の場合、 n と m の差は、±15 程度の範囲に収まることが多く¹⁴⁾、この範囲内では、制御性に及ぼす m の影響は小さい。

結局、今回行なったシミュレーションの範囲内では、 ζ と A^* の影響が顕著であり、図 4 に示したように、 ζ が小さい程、また A^* が大きい程、制御限界に達した時の変位速度が大きいことがわかった。

4・3 三次クリープ領域における変位速度と残存寿命の関係

理想的な試験機を用いた時の変位速度と残存寿命との関係は、(6)式で表されるが、実際の試験機ではどのようなかを上記のシミュレーションによって調べてみる。

図 5 に、実際の試験機を想定したシミュレーションにより求めた変位速度 - 残存寿命曲線を示す。図には、(6)式で示される理想的な試験機を用いた時の変位速度 - 残存寿命曲線も示している。図の横軸の残存寿命は、理想的な試験機を用いた場合における破壊寿命 t_F^* を用いて計算した。図 5 (a) はクラス I 岩石、(b) はクラス II 岩石の例である。図 5 より、無次元化した残存寿命 T^* が 10

(a) クラス I 岩石の例
 $n=40$, $m=30$, $t_F^*=10^3$,
 $A^*=0.5$, $\zeta=0.5$ と仮定。

(b) クラス II 岩石の例
 $n=40$, $m=50$, $t_F^*=10^3$,
 $A^*=0.5$, $\zeta=0.5$ と仮定。

点線は実際の試験機を想定したシミュレーション結果、実線は理想的な試験機を用いた場合を表す。

図 5 変位速度と残存寿命の関係 (A^* が無限大となる時を破壊時刻とした場合)

(a) クラス I 岩石の例 $n=40, m=30, t_F^*=10^3, A^*=0.5, \zeta=0.5$ と仮定。
(b) クラス II 岩石の例 $n=40, m=50, t_F^*=10^3, A^*=0.5, \zeta=0.5$ と仮定。

点線は実際の試験機を想定したシミュレーション結果、実線は理想的な試験機を用いた場合を表す。黒丸は荷重が設定値に比べ 2 % 低下した時を表す。

図 6 変位速度と残存寿命の関係 ($\lambda^*=2$ の時を破壊時刻とした場合)

より大きい所では、実際の試験機を用いた場合と理想的な試験機を用いた場合とは、ほぼ一致していることがわかる。このことは、残存寿命が 10 になるまでは、荷重がほとんど低下していないことを間接的に表している。実際に $T^*=10$ の時の応力低下は、0.2 % 程度であり、残存寿命が小さくなるにつれて、理想的な試験機に比べて実際の試験機では、変位速度が小さくなっている。この原因は、変位速度が大きくなり、サーボ試験機が追従できず、荷重が低下することにより起こると考えられる。

ここまでは、理想的な試験機を用いた場合における破壊時刻を用いて、残存寿命を決定してきた。しかし、実際の試験機では、荷重が低下することにより、破壊時刻が遅れる。よって、実験により得られる残存寿命は、この遅れの分だけ大きくなってしまふ。今までは、変位速度が無限大となる時刻を破壊時刻とした。しかし、実際の試験機では、変位速度が無限大になることはない、何らかの基準により、破壊時刻を決定する必要がある。何をもちて破壊時刻とするかには、種々の選択肢があるが、ここでは岩石のコンプライアンスが初期値の 2 倍となった時とし、この時点を残存寿命の原点として、以下の議論を進める。

新しく定義した残存寿命を用いて、図 5 の結果を書き換えたのが図 6 のシミュレーション結果である。図には、比較のため図 5 に示した理想的な試験機を用いた時の変位速度-残存寿命曲線も示した。図 6(b) に示したクラス II 岩石の場合には、理想的な試験機を用いた場合と現実の試験機を対象としたシミュレーション結果との差が小さいことがわかる。他方、図 6(a) に示したクラス I 岩石の場合には、かなり差が大きいことがわかる。図 6 より、クラス I, II により、差はかなりあるが、両者とも残存寿命が大きい所では、実際の試験機の方が、変位速度が大きく、残存寿命が小さい所では逆に小さくなっている。

前述したように、三次クリープ領域で変位速度が大きくなって行くと、やがてサーボ試験機の応答速度が追い付かなくなり、荷重が設定値より次第に下がってゆく。クラス II 岩石の場合には、一旦破壊が進みだすと、急激に破壊が進行し、多少の応力低下は、変位速度と残存寿命の間に重大な影響を及ぼさないようである。一方、クラス I 岩石では、応力が低下すると、その結果としてコンプライアンスが初期値の 2 倍となるまでの時間がかかなり長くなるものと考えられる。以上の原因によって、図 6 に示した結果が得られるものと思われる。よって、三次クリープにおける変位速度-残存寿命を得るにあたり、クラス II 岩石の方がクラス I 岩石より、有利であるとも言えよう。この結果は、サーボ試験機を用

いた応力帰還制御では、クラス I 岩石の方が、制御性が良いこと⁹⁾と反対であり興味深い。

前節では、制御限界として荷重が 2 % 低下した時とした。荷重が 2 % 低下した時点、図 6 に黒丸で示した。これよりわかるように、クラス II 岩石では問題ないが、他方、図 6(a) のクラス I 岩石では、変位速度-残存寿命曲線において、この制御限界を適用すると理想的な試験機を使用した場合と若干異なる結果が得られる可能性がある。よって、クラス I 岩石の場合、得られたデータの解釈には十分な注意を払う必要があると思われる。

4.4 実験結果との比較

今までは、シミュレーションにより検討を行ってきたが、実験において成り立つかどうかを調べるため、三城目安山岩、河津凝灰岩、稲田花こう岩を用い、クリープ試験を行なった。試験片寸法は直径 2.4 cm、高さ 5.2 cm である。実験装置としては、デジタル制御方式のサーボ試験機を用いた。詳しくは既報⁷⁾を参照されたい。実際の荷重が設定荷重に比べて 2 % 低下した時の変位速度を図 4 に示した。図より、実験結果とシミュレーション結果とほぼ一致していることがわかる。2 % 荷重が低下した時の歪速度は、三城目安山岩、河津凝灰岩、稲田花こう岩でそれぞれ 1.6×10^{-3} 、 4.7×10^{-4} 、 $3.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 程度であり、残存寿命では、0.005~0.1 s 程度となり、かなり歪速度が大きくなっている所まで、サーボ試験機が追従していることがわかる。サーボ試験機の設定ゲイン等により、制御限界となる変位速度が変化することが、図 4 よりわかるが、現在市販されている岩石用サーボ試験機において通常の設定を行えば、多くの場合、制御限界となる歪速度は、 10^{-5} s^{-1} 以上になるとと思われる。一方、著者らは、ここで挙げた以外にもクリープ試験を行なってきており、歪速度が 10^{-5} s^{-1} の時、残存寿命は 1 s 程度であるという知見を得ている⁶⁾⁷⁾。よって、かなり余裕を見込んで残存寿命が 1 s まではデータとして信頼できうと思われる。

以上の議論では、制御限界として、実際の荷重が設定荷重に比べて 2 % 低下した時とした。この数字を 1, 5, 10 % にすると、図 4 に示した 2 % の場合に比べて、縦軸の変位速度は大ざっぱに 0.5, 2, 4 倍程度になることがシミュレーション結果からわかっている。よって、データの使用目的等により、制御限界を 2 % 以外に設定した時にも図 4 は、利用できる。

5. 考察およびまとめ

今回使用したサーボ試験機のモデルにおいて、制御性を表わすパラメータは、シリンダ中の油のコンプライアンス A^* 、円固有振動数 ω_n 、減衰係数 ζ である。これらのパラメータがわかると、図 4 より、制御限界となる変位速度を簡単に求めることができる。試験機の諸元が明らかな場合には、式よりこれらは計算できる。しかし、実際には不明なことが多いと思われるので、以下にこれらを比較的簡単に求める方法について述べる。 ω_n の求め方は、既報⁹⁾に示している、ここでは省略する。 ω_n と ζ を求めるには、まず、コンプライアンスが λ' のダミー試験片を用いて、荷重制御により、周波数応答特性を調べる。得られた周波数特性をボード線図にプロットし、二次遅れ系のボード線図¹¹⁾と比較し、円固有振動数 ω_n' 、減衰係数 ζ' を求める。ここで得られた ω_n' 、 ζ' と ω_n 、 ζ との間には次の関係が存在する。

$$\omega_n'^2 = (A^{*'} + 1) \cdot (\omega_n')^2$$

$$\zeta'^2 = (\zeta')^2 / (A^{*'} + 1)$$

ただし、

$$A^{*'} = V / (2K \cdot A^2 \cdot \lambda')$$

である。よって、上式より簡単に ω_n 、 ζ を求めることができる。

また今回、試験機の枠剛性について考慮しなかった。荷重が一定に保たれていれば、枠剛性の影響は全く現われてこない。しかし、破壊直前において荷重は低下してくるので、試験機枠の変形が減少し影響が現われてくる。この影響は、 A^* の影響と似ており、枠剛性が小さい程、制御性は良いと考えられる。

岩石の完全応力-歪線図の重要性については、多くの議論がなされてきており、発表された結果も多数にのぼっている。他方、完全クリープ曲線とも言うべき、一次クリープより三次クリープまでのクリープ歪の経時変化に関する研究結果は、極めて少ない。本研究は、このような観点に立って最近普及してきたサーボ試験機を使用して完全クリープ曲線を得ようとした時について検討した。まず、線形モデルを用いて、制御性の検討をした結果、一、二次クリープでは、岩石-試験機の制御系は安定であり、三次クリープでは不安定であることがわかった。しかし、線形モデルを使用したのでは定性的にしか判断できないので、非線形粘弾性モデルを用いて計算機シミュレーションを行なった。その結果、減衰係数 β が小さい程、ピストン内の油のコンプライアンスと岩石の初期コンプライアンスの比 A^* が大きい程、制御性が良いことがわかった。また、三種類の岩石を用いて実験を行なった結果、図4に示した計算結果は定量的にも妥当であることがわかった。

次に変位速度と残存寿命の関係について検討した。岩石のコンプライアンスが初期値の2倍になった時を便宜上破壊時刻とみなし、変位速度-残存寿命の関係を示したのが、図6である。残存寿命が大きい所では、理想的な試験機を用いた場合に比べて実際の試験機を用いた方が、変位速度が大きくなる。一方、残存寿命の小さい所では、実際の試験機を用いた方が、変位速度が小さく

なる。この傾向は、クラスⅠ岩石の方が著しく、クラスⅡ岩石の方は、理想的な試験機で行なった時とあまり変わらないことがわかった。

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. Svm. 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) 大久保誠介・西松裕一：日鉱誌, **102** [1181], p. 395~400 (1986)
- 7) 福井勝則・大久保誠介・西松裕一：一軸圧縮荷重下での岩石のクリープ特性, 資源・素材学会誌, **105** [No. 7] p. 521~526 (1989)
- 8) R. D. Lama, V. S. Vutukuri : Handbook on Mechanical Properties of Rocks - Testing Technique and results -, **3**, p. 231~237, (1978) Trans Tech Publications
- 9) 大久保誠介・福井勝則・西松裕一：日鉱誌, **104** [1200], p. 63~67 (1988)
- 10) 竹中利夫・浦田暎三：油圧制御, p. 198~201, (1978) 丸善
- 11) 増淵正美：自動制御基礎理論 (22版), p. 36~39, p. 127 及び p. 160~162, (1984) コロナ社
- 12) 大久保誠介・西松裕一：日本鉱業会研究・業績発表講演会講演要旨集 (昭和60年度春季大会), p. 5~6 (1985)
- 13) S. Okubo, Y. Nishimatsu : Int. J. Rock Mech. Min. & Geomech. abstr., **22**, p. 323~330 (1985)
- 14) 大久保誠介・何昌榮・西松裕一：日鉱誌, **103** [1189], p. 177~181 (1987)
- 15) 下村弥太郎・高多明：日鉱誌, **77** [880], p. 868~873 (1951)