

(6) 岩石の圧縮破壊過程の制御限界
—サーボコントロール試験機の制御特性と関連して—

東京大学工学部	正会員	大久保誠介
東京大学大学院		○ 福井 勝則
東京大学工学部	正会員	西松 裕一

1. はじめに

岩石力学の分野において強度破壊点以降の挙動の重要性が認識されて久しい。例えばトンネル・坑道の掘削後の周辺岩盤には、ゆるみ領域と呼ばれる強度破壊点以降に至っていると思われる領域が存在し、この部分の挙動は、トンネル、坑道の安定性や山はねと深く関係すると考えられている。この強度破壊点以降の挙動を調べるため、サーボコントロール試験機を使用した試験が数多く行われてきた。しかしながら、公表された試験結果を見ると、最も基本的な応力-歪線図についてすら、必ずしも定説がない。

Peng¹⁾は、サーボコントロール試験機を使用して応力-歪線図を求め、歪速度が小さい時の方が、小さい歪でピーク荷重に達し、強度破壊点以降、急勾配で下降すると報告している。一方、Bieniawski²⁾は剛性棒を使用した実験を行い、歪速度が小さい時の方が強度破壊点以降の応力-歪線図の傾きが緩やかとなる結果が得られたと報告している。また、Wawersik³⁾、大久保ら⁴⁾は、歪速度によってさして変化しないとしている。

このように、岩石の強度破壊点以降の時間依存性挙動について矛盾する報告がなされているのは、使用された試験機の影響がなんらかの形で含まれているためではないかと思われる。よって試験装置と試験片の相互関係を十分に検討しなければならないが、サーボ試験機の制御性、適用範囲に関する報告は、極めて少ないのが現状である。そこで本研究では、サーボコントロール試験機の線形モデルを用いて、制御限界と得られたデータの妥当性を検討することを試みた。

2. サーボコントロール試験機のモデル化

通常、岩石の圧縮破壊過程を調べるための制御方式として定歪速度制御がよく用いられているが、本研究では、これを拡張した応力帰還制御の場合について調べてみることにする。応力帰還制御⁵⁾は、次式に従って岩石を負荷する制御方法であり、定歪速度制御では制御できなかったクラスII岩石の強度破壊点以降に対しても、制御することができる特徴を持っている。

$$Y - \alpha \cdot F \cdot \lambda = c \cdot t \quad (1)$$

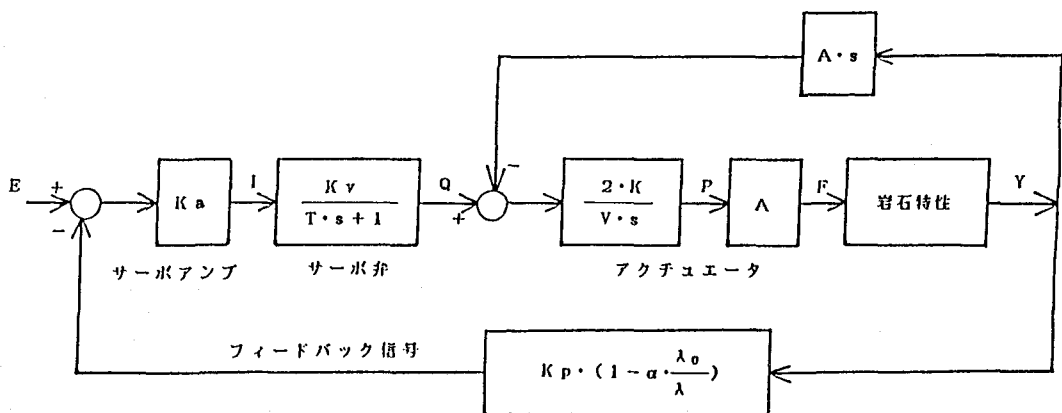
ただしY、F、λ、tはそれぞれ変位、荷重、コンプライアンス、時間であり、α、cは定数である。

モデル化にあたって、次のような仮定を置くことにする。

- a) ピストンは中立点付近にあり、前後シリンダ間の油のめれはない。管路内の油の圧縮性は無視できる。管路、シリンダの剛性は充分大きい⁶⁾。
- b) 可動部分（主としてピストン）の質量は無視できる。
- c) サーボ弁の出力流量は、サーボ弁入力電流に対して一次遅れとなる⁶⁾。

以上の仮定のもとで応力帰還制御方式を採用したサーボコントロール試験機の制御システムを、ブロック線図で表すと図1のようになる。

ここで、理論的検討に便利のように、表1のような無次元量を導入することとし、無次元量には * を肩に付すことにする。ただし、F。(N)は負荷（試験片）の強度を、λ。は初期コンプライアンスを、Y。はλ。・F。をあらわす。ω_nとζとは、それぞれ無負荷時の系の固有円振動数と減衰係数比である。



- E ・・・制御信号 (V)
 I ・・・サーボ弁にかかる電流 (A)
 T ・・・サーボ弁の時定数 (s)
 Y ・・・変位 (m)
 A ・・・ピストンの受圧面積 (m^2)
 F ・・・荷重 (N)
 K ・・・油の体積弾性率 (Pa)
- P ・・・シリンダ出入口の圧力差 (Pa)
 Q ・・・サーボ弁の出力流量 (m^3/s)
 K_v ・・・サーボ弁のゲイン定数 (A/V)
 K_a ・・・サーボアンプのゲイン定数 (m^3)
 V ・・・シリンダの片側の容積 (m^3)
 λ ・・・岩石のコンプライアンス (m/N)
 K_p ・・・フィードバックのゲイン定数 (V/m)

表1 変数の無次元化

$E^* = E / (K_p \cdot Y_0)$
$I^* = (K_v \cdot I) / (A \cdot Y_0 \cdot \omega_n)$
$Q^* = Q / (A \cdot Y_0 \cdot \omega_n)$
$F_d^* = F_d / (K_p \cdot Y_0)$
$\Lambda^* = V / (2K \cdot A^2 \cdot \lambda_0)$
$Y^* = Y / Y_0$
$F^* = F / F_0$
$\omega_n^2 = (K_s \cdot K_v \cdot K_p) / (A \cdot T)$
$\xi^2 = A / (4 \cdot K_s \cdot K_v \cdot K_p \cdot T)$

図1 サーボコントロール試験機のプロック線図

3. 線形モデルによる検討

岩石の負荷特性が図2に示すような線形モデルで表されるものと仮定し^{7,8)}、サーボコントロール試験機の制御性について調べてみることにする。岩石の線形モデルの構成方程式を、ラプラス変換すれば次式が得られる。

$$(\tau^* \cdot s^* + 1) \cdot F^* = (\tau^* \cdot s^* + \beta^{-1}) \cdot Y^* \quad (2)$$

ただし、

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

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

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

である。この場合、図1で表される系の特性方程式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 & (1 + \Lambda^*) \tau^* (s^*)^3 \\
 & + \{1 + \Lambda^* / \beta + 2\xi (1 + \Lambda^*) \tau^*\} (s^*)^2 \\
 & + \{2\xi (1 + \Lambda^* / \beta) + (1 - \alpha) \tau^*\} s^* \\
 & + (1 - \alpha / \beta) = 0 \quad (3)
 \end{aligned}$$

系が安定であるための必要条件は、特性方程式の各項の係数が、同一符号を持つことである⁹⁾。次の3つの場合について、この条件はどのようなことになるかについて検討してみることにする。

$$(1) \lambda_0 \gg \lambda_1$$

この場合は、弾性領域に対応し、 $\beta = 1$ であるので、系が安定であるための必要条件は、次のようになる。

$$\alpha < 1 \quad (4)$$

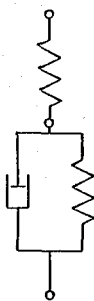


図2 岩石の線形モデル

(2) $\lambda_0 < -\lambda_1$ ($\lambda_1 < 0$)

この場合は、クラスⅠ岩石の強度破壊点以降を制御する

場合に対応し、 β は負となる。定歪速度制御 ($\alpha = 0$) を仮定すれば、 S^* の1乗と2乗の項が正となる条件は、次のように書ける。

$$1 + 2\zeta(1 + \Lambda^*)\tau^* > \Lambda^*/|\beta| \quad (5)$$

$$1 + \tau^*/(2\zeta) > \Lambda^*/|\beta| \quad (6)$$

τ^* は正であるので、 $\Lambda^*/|\beta|$ が1より小さい時、両式は常に成り立つ。したがってシリンド内の油の剛性 Λ^* が荷重-変位曲線の傾きの絶対値より大きい場合には、常に両式が成り立つと言える。 $\Lambda^*/|\beta|$ が1以上の場合には、右辺第2項の大小によって、成立するかどうかが決まる。(5)式では、 ζ が大きいほど有利であるのに対し、(6)式では ζ の小さい程有利であるので、 ζ には適当な設定範囲のあることが分かる。 ζ は、通常0.3から0.8程度に設定されるが⁹⁾、ここでは $\zeta = 0.5$ とすれば、(5)式の方が厳しい条件となり、必要条件は次のようにまとめられる。

$$1 + \tau^* > \Lambda^*/|\beta| \quad (7)$$

すなわち、制御限界は、 $\tau^* (= \tau \cdot \omega_n)$ 換言すれば、負荷の緩和時間 τ と、制御系の固有円振動数 ω_n の積による所の大きいことが分かる。歪速度が大きい程、制御が難しくなる事が、経験的に知られている。(7)式では、歪速度の影響が陽に表されていないが、これは τ^* が歪速度の増加につれて低下するためと思われる。このような傾向を示す測定例を図3に示す。

(3) $\lambda_0 > -\lambda_1$ ($\lambda_1 < 0$)

この場合は、 $\beta > 0$ で $\tau^* < 0$ となり、クラスⅡ岩石の強度破壊点以降を制御する場合に対応している。なお τ^* が負値とは応力緩和実験において、応力の低下速度が時間の経過とともに次第に増加してゆくことを意味している。クラスⅡ岩石である稲田花こう岩について、強度破壊点以降で応力緩和実験を行った結果を図4に示す。図4より応力は時間の経過に従って加速度的に減少しているのがわかる。また、この例でも歪速度の増加につれて τ^* が低下することもわかる。

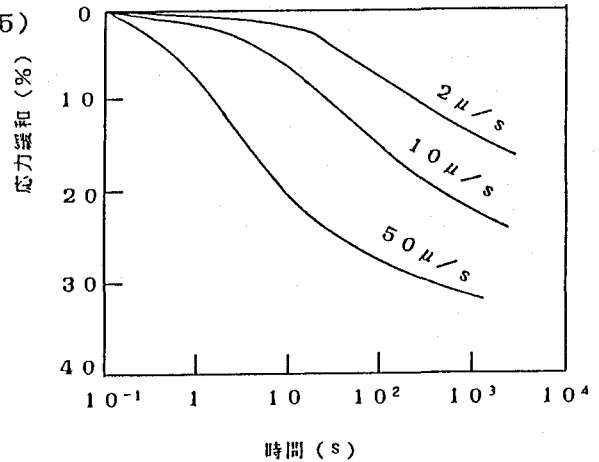


図3 多胡砂岩の応力緩和曲線

定歪速度 2, 10, 50 μ/s にて強度破壊点以降、応力が平均破壊強度の75%となるまで、定歪速度試験を行い、その後、歪を一定に保った。

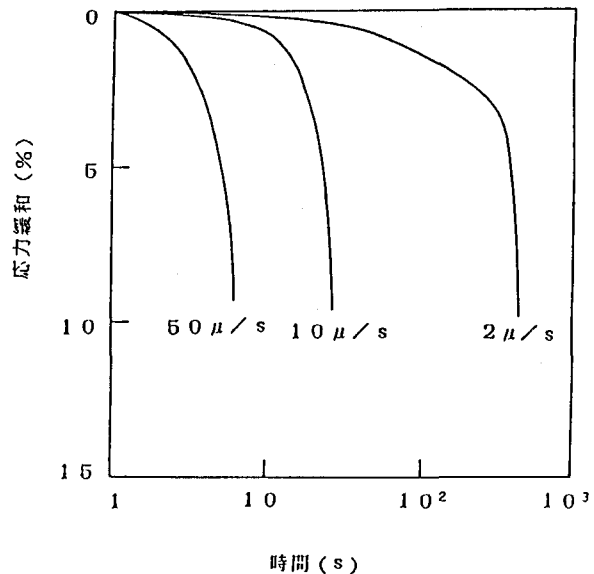


図4 稲田花こう岩の応力緩和曲線

$\alpha = 0.6$ にて制御速度 2, 10, 50 μ/s にて強度破壊点以降、応力が平均破壊強度の75%となるまで、応力帰還制御を行い、その後、歪を一定に保った。

簡単のため、以前と同様に $\xi = 0.5$ の場合について考えてみると、 s^* の1乗の項より、次の条件が得られ、これが成り立てば s^* の2乗の項も必要条件を満たすことが分かる。

$$(1-\alpha) |\tau^*| - 1 > \Lambda^* / \beta \quad (8)$$

また、定数項より次式が導かれる。

$$\alpha > \beta \quad (9)$$

したがって、 α は、次の様な設定範囲内に存在しなければならないことがわかる。

$$\beta < \alpha < 1 - (1 + \Lambda^* / \beta) / |\tau^*| \quad (10)$$

4. あとがき

本研究では、応力帰還制御における制御性についての検討を行った。定歪速度試験の制御限界について Rummelら¹⁰⁾は、油圧源の最大吐出量で規定し、いわゆるdynamic rigidityの概念を発表しているが、この概念に沿って計算される制御限界は、実際の制御限界よりはるかに大きい。本研究では、定歪速度試験の制御限界は、岩石の緩和時間、強度破壊点以降の変位-荷重曲線の傾き（除荷剛性）、シリンダ内の油の剛性を含む(7)式で表わされることを示した。剛性試験機を使用し、クラスI岩石の強度破壊点以降を制御する場合の制御限界として、試験機の剛性が岩石の除荷剛性より大きくなければならないということが従来から言われている。(7)式によれば、サーボコントロール試験機では、それよりも τ^* だけ制御性が向上することがわかる。

クラスII岩石の強度破壊点以降を制御する場合の α の設定範囲は、(10)式にまとめられる。これは、すでに経験的に得られている⁵⁾ことと、だいたい一致していることがわかった。

参考文献

- 1) Peng, S.S: Time-dependent aspects of rock behaviour as measured by a servo-controlled hydraulic testing machine, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 10, p.235-246(1973)
- 2) Bieniawski, Z.T: Time-dependent behaviour of Fractured rock, Rock mech., 2, 123-137(1970)
- 3) Wawersik, W.R.: Time-dependent rock behaviour in uniaxial compression. In: New Horizons in Rock Mechanics. Hardy, H.R., Stefanko, R. Proc. 14th Symp. Rock Mech., Penn. State Univ., 1972. New York, p.85-106(1973)
- 4) 大久保誠介、何昌栄、西松裕一：一軸圧縮応力下における時間依存性挙動、日鉱誌（投稿中）。
- 5) 大久保誠介、西松裕一：応力速度のNegative Feed Backを用いた岩石の一軸圧縮試験、日鉱誌, 100, p.1052-1056(1984)
- 6) 竹中利夫、浦田 三：油圧制御, 198-201(1978)丸善。
- 7) 大久保誠介、西松裕一：Class2岩石のComplete Stress-Strain Curves, 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）, 5-6(1985)。
- 8) S.Okubo, Y.Nishimatsu: Uniaxial Compression Testing Using a Linear Combination of Stress and Strain as the Control Variable, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22, 323-330(1985)。
- 9) 増淵正美：自動制御基礎理論（22版）, 36-39(1984)コロナ社。
- 10) F.Rummel & C.Fairhurst: Determination of the post-failure behaviour of brittle rock using a servo-controlled testing machine. Rock Mech., 2, 189-204(1970)。

(6) Optimizing the control of failure process
of rock under uniaxial compression
--- Concerning to the control performance
of a servo-controlled testing machine ---

Seisuke Okubo,
Katsunori Fukui, and
Yuichi Nishimatsu
Department of Mineral Development
Engineering, The University of Tokyo

The time-dependent behavior of fractured rock has an important engineering significance in design of mining excavation and civil engineering structures. Recently servo-controlled testing machine has been widely used in the study of rock fracture. This machine can be used to obtain complete stress-strain curves of most rock specimens.

Peng pointed that a decrease in strain rate increased the slope of the complete stress-strain curve in the post-failure region. Bieniawski pointed that a decrease in strain rate resulted in a flattening of the slope of stress-strain curve in the post-failure region. Such discrepancy is considered to be related to the testing machine performance. But few were available in the literature about this problem. Rummel et al pointed that the limit of controllable strain rate of servo-controlled testing machine was defined by maximum flow rate supplied by the power pack, but it doesn't agree with the experimental results.

In this paper, uniaxial compression testing using a linear combination of stress and strain as the control variable was examined. Using this method, violent fracture does not occur in the post-failure region for both Class I and Class II rocks.

The constitutive equation of rock is assumed as a linear visco-elastic model. Also following assumptions were made in order to simplify the system of servo-controlled testing machine.

- a) The stiffness of the cylinder is very large.
- b) Mass of the piston can be ignored.
- c) Flow rate of a servo valve responds to electric current, as given by
$$(\text{flow rate}) = K_p \cdot (\text{electric current}) / (T_s + 1).$$

Under the assumptions, the characteristic polynomial of the machine-rock system was obtained and the stability of a system was examined to obtain the followings;

- 1) The control performance is influenced by relaxation time of rock, natural frequency of testing machine and the slope of stress-strain curve in post failure region.
- 2) As increase in strain rate decreases relaxation time of rock. With a higher strain rate, a worse control performance would be expected.