

# 岩盤クリープ試験の応力一変位曲線に関する若干の考察

武内俊昭

深田地質研究所

## Some Consideration on Stress-Deformation Curve obtained by in-situ Rock Creep Test

TAKEUCHI Toshiaki  
Fukada Geological Institute

要旨：原位置の岩盤クリープ試験から得られた応力一変形挙動について考察し、3つの応力レベルにおけるクリープ開始点を結んだ線Aおよびクリープが収束した点を結んだ線Bは、それぞれ共に直線となりほぼ同じ勾配を持つことが分った。この挙動について3要素の粘弾性voigtモデルを仮定して説明を試みた。

その結果、直線Aおよび直線Bのそれぞれの勾配とその関係は、3要素voigtモデルでほぼ説明できることがわかった。

また、クリープ変位を生じた後の応力一変位曲線は直線Bを出発して直線Aに漸近し、ある応力になると一致するが、その挙動を説明する一つのモデルを提唱した。

キーワード：原位置岩盤試験・クリープ試験・応力一変位曲線・Voigtモデル

### 1. はじめに

岩盤の変形挙動は、概略的には弾性体としての性質を示ことは知られている。しかし、一方岩盤にはその構成要素からも考えられるように、弾性のほかに塑性や粘弾性的な性質を併せ持つことも知られている。また、岩盤にはさまざまな割れ目が存在し、それらが応力一変形挙動を一層複雑にしている。

実際の構造物を建設する場合に実施される地質調査において、しばしば岩盤変形試験が行われその結果から、建設後の構造物の挙動を予測し、設計に反映しているが、これらの予測に必要な岩盤の性質を試験から適切に求めるため、試験方法の改良や解析方法の工夫がなされている。

とくに、構造物の長期にわたる挙動を予測するために、原位置における岩盤クリープ試験が行われる。

花崗岩の岩盤において実施された原位置岩盤試験において、応力レベルを順次上げ、3段階においてクリープ試験を実施した。このクリープ試験では、加圧板を直径1mのものを使用し、応力 $14\text{kgf/cm}^2$ ,  $21\text{kgf/cm}^2$ ,  $28\text{kgf/cm}^2$ の3つの応力段階でそれぞれ58日間、40日間、30日間の持続荷重を加えてクリープ測定を行った。それぞれはクリープ変位がほぼ収束するまで測定を行っている。

その結果得られた応力一変位曲線には、興味ある特徴が幾つかみられるので、それについて検討し、岩盤の挙動を説明することを試みた。

### 2. 応力一変位曲線の傾向と特徴

図-1に原位置クリープ試験によって得られた応力一変位曲線を示す。

この試験および応力一変位曲線において以下に述べる特徴がみられる。

(1) 最初に応力レベル $5\text{kgf/cm}^2$ で3回の繰り返し加重を行い、各回において応力を0に戻した際に残留変形がみられ、最終的に約150mm程度の残留変位が測定された。

(2) クリープ試験を行った $14, 21, 28\text{ kgf/cm}^2$ の各応力段階において、クリープ変位が始まる最初の点を結んだ線は、ほぼ直線Aで示される。

応力一変位曲線が得られている。

この応力一変位曲線は、立ち上がりは急勾配を示すが、次第に勾配がゆるくなり図に示す直線Aに漸近する傾向を示している。

以下これらの応力一変位曲線の傾向や特徴について考察する。

### 3. 応力一変位曲線についての考察

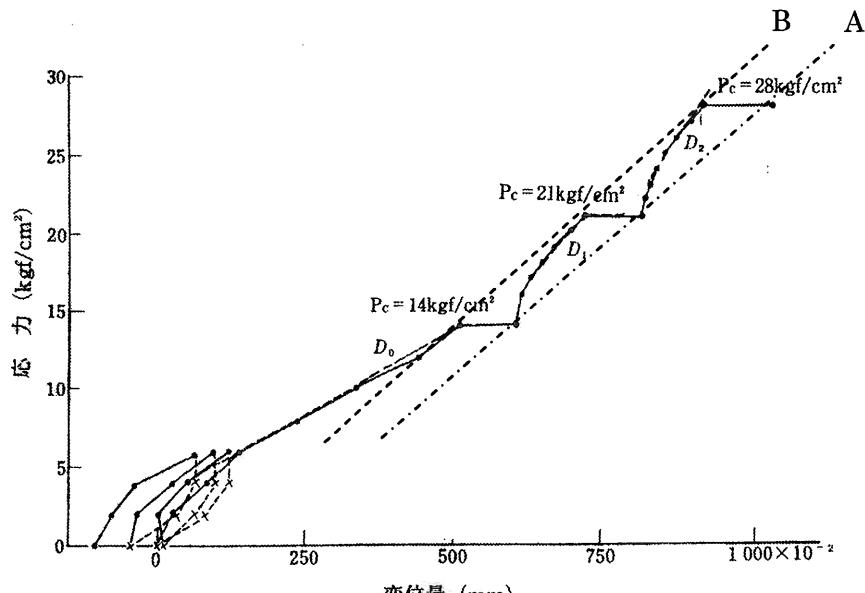


図-1 クリープ試験の応力-変位曲線

(3)  $14, 21, 28\text{ kgf/cm}^2$ の各段階で行われたクリープ試験において、変位が収束した点を結ぶと線Bのような1本の直線となる。そして直線Aと直線Bを比較すると直線Bの勾配がややゆるやかであるがほぼ同じ勾配を示している。

(4) クリープが収束するまでの変位は、 $14, 21, 28\text{ kgf/cm}^2$ の各応力レベルで大きな差はみられない、したがって直線Bは直線Aをクリープ変位量だけほぼ平行に移動した位置にある。

(5) 各応力段階のクリープ試験が終了した後、それぞれ次の応力レベルへは一定のレートで応力を増加させている。これによって $14\text{ kgf/cm}^2 \rightarrow 21\text{ kgf/cm}^2, 21\text{ kgf/cm}^2 \rightarrow 28\text{ kgf/cm}^2$ にいたる2つの

2章の(1)で示した繰り返し荷重による残留変位は、岩盤に存在する開口した割れ目や掘削による応力開放などによるゆるみやが応力を加えることにより密着することによる。この傾向は一般的にもよく見られるものなので、ここでは、2章で示した(2)～(5)について考察を加えたい。

#### 3.1 直線Aについて

直線Aは、クリープ試験を行わずにおよそ $1\text{kgf/cm}^2/\text{min}$ のレートで応力を増大させた場合の応力一変位曲線に相当すると考えられる。つまり、応力は $14\text{ kgf/cm}^2$ から $21\text{ kgf/cm}^2$ あるいは $21\text{ kgf/cm}^2$ から $28\text{ kgf/cm}^2$ までを数分程度で増加させている。この時間は、クリープ応力持続時間(30～58日間)と比べると極めて小さいため弾性挙動とみることが出来る。

また、クリープ変位は、荷重方向の偏差応力によって引き起こされ、したがってせん断弾性係数Gが変位にかかわっていると考えて、この直線Aの勾配から変形係数を求めるときヤング率

## 岩盤クリープ試験の応力-変位曲線

$E_A=2,630 \text{kgf/cm}^2$ , せん断弾性係数  $G_A=1,051 \text{kgf/cm}^2$  が得られる。

さて、この岩盤の力学モデルを図-2に示すような3要素の粘弾性voigtモデルと仮定するとその応力と変位の関係は式(1)のように表される。

上で示した変形係数  $G_A$  は、モデルの  $G_0$  に相当する。つまり、クリープ変位が生ずる応力保持時間に比べて極めて短時間に加えた応力で発生する変位はこの  $G_0$  によって生ずる。

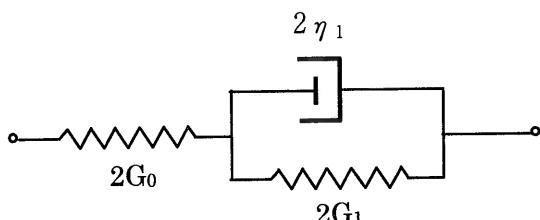


図-2 粘弾性voigtモデル

$$\epsilon = \frac{\sigma}{2G_0} + \frac{\sigma}{2G_1} \left\{ 1 - \exp \left( -\frac{G_1 t}{\eta_1} \right) \right\} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで

$\epsilon$  : 変位

$\sigma$  : 応力

$G$  : せん断弾性係数

$\dot{E}$  : 粘性係数

$t$  : 時間

みると、式(1)の右辺第1項を取り除き、第2項で  $t=\infty$ 、つまり  $\exp(-G_1 t / \eta_1)$  の項を0とみなした場合の応力  $\sigma$  と変位  $\epsilon$  に相当する  $G_1$  を求めることになる。

応力レベルを  $14 \text{kgf/cm}^2$ ,  $21 \text{kgf/cm}^2$ ,  $28 \text{kgf/cm}^2$  の場合についてクリープ収束変位量から、相当する変形係数を求めると次ぎの表-1ようになる。

表-1 クリープ変位から求めた変形係数

応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	クリープ収束 変位量(cm)	$E_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$G_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
14	0.094	10,996	4,398
21	0.100	15,455	6,182
28	0.113	18,317	7,327
	平均	14,922	5,969

直線Aから求めた  $G_A=1,051 \text{kgf/cm}^2$  と表-1に示す  $G_1$  の平均値  $5,969 \text{kgf/cm}^2$  の合成された変形係数  $G'$  を求めると  $981 \text{kgf/cm}^2$  が得られる。

この値は、直線Bの勾配から求めたせん断弾性係数とよく一致している。

このことは、少なくとも応力  $14 \text{kgf/cm}^2$  以上の領域においては、表-1に示されるように、応力レベルにおいて多少の違いはみられるものの、平均的にみる限り岩盤はおおむね線型粘弾性挙動を示していると云える。

### 3.2 直線Bについて

つぎに、30日から60日かけてクリープの変位が収束した点を結んで得られる直線Bは、図-2のモデルを考えた場合、粘性を持ったダッシュポット  $\eta_1$  に並列に存在する  $G_1$  により生ずる変位の収束点を結んだものと考えられる。この直線Bから求めた変形係数は  $EB=2450 \text{kgf/cm}^2$ ,  $GB=980 \text{kgf/cm}^2$  となる。

いま、クリープ試験によって測定された収束変位とそれぞれの応力から、モデルの変形係数を求

### 3.3 クリープ変位収束後の応力-変位曲線について

この応力-変位曲線のもう一つの特徴は、 $14 \rightarrow 21 \text{kgf/cm}^2$  と  $21 \rightarrow 28 \text{kgf/cm}^2$  の2つの過程においてクリープ変位後の岩盤変位が上に凸の曲線を描き、最初急であった勾配が次第にゆるやかになり直線Aに漸近する傾向を示すことである。

一方、図-3に示すように点Pから破線の経路を通ってRに到達する場合に比べ、P→P'のようにクリープ変位dcがある場合は、この変位を差し引

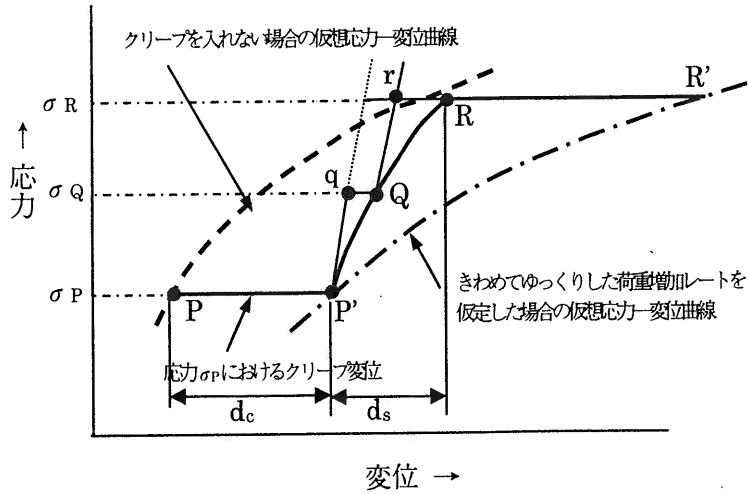


図-3 応力-変位曲線の解釈

いて残りの変位  $d_s$  が応力の増加で生じ、点 Q を通って点 R に到達することができる。つまりクリープによる変位が先取りされているが、点 R では、クリープ変位を生じさせないで短時間で応力を増加させ図-3のような破線で応力を加えた場合と結局同じ変位が生じることを示している。この点 P' から Q を通り点 R に至る傾向について考察する。

図-3における  $P' \rightarrow Q \rightarrow R$  の挙動は、 $1\text{kgf/cm}^2$  の応力増加レートで生ずるものであるため、粘性  $\eta_1$  および弾性係数  $G_1$  は関与していないと考えると、变形係数  $G_0$  に関する何らかのモデルを考える必要がある。

このモデルは、応力が増加するにしたがって弾性係数が増加しある一定の値に収斂するもので、図-4に示すようなモデルが考えられる。このモデルでは、応力が増大するにつれて、 $S_1$  から順次スライダーが外れ、最初バネ  $G_{01}$  が挙動するが、応力が増大するにつれて次々とスライダーが外れて、最終的には  $n$  番目のスライダーが外れ  $n$  個の

バネが直列に結合して、式(2)で示される  $G_0$  に等しくなるモデルである。

$$\frac{G_{01} * G_{02} * G_{03} * G_{04} * \cdots * G_{0n}}{G_{01} + G_{02} + G_{03} + G_{04} + \cdots + G_{0n}} = G_0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

ただし、このモデルには次に示すような条件が必要である。つまり応力が順次増大しながら  $n$  番目のバネが作動した時点以後の応力-変位曲線の勾配は  $G_0$  による勾配に等しくなるが、その時点で同時に変位が図-3に示される  $d_s$  に等しくなることが必要である。

#### 4. 結語

岩盤に応力を加へた場合に発生する変位は、途中のクリープ等の履歴に拘わらず図-1の直線Aと直線Bの間を動き、クリープ測定をした以後も短時間で連続的な応力の増加をするとその挙動は直線Aに近づくことは大変興味ある現象である。

この岩盤は概略的には3要素の voigt モデルで説明できる挙動を示してはいるが、上に述べた直線Bから直線Aに移る過程の挙動を説明できるモデルについては、まだ

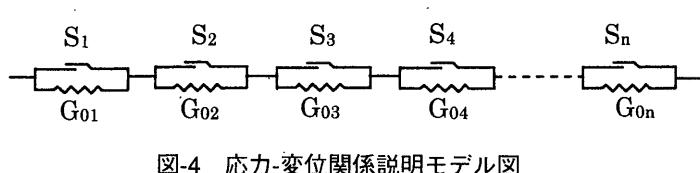


図-4 応力-変位関係説明モデル図

## 岩盤クリープ試験の応力－変位曲線

不明のところが多い。続けて今後の検討が必要である。

### 引用文献

- 武内俊昭・鈴木栄夫・田中莊一(1976)：孔内載荷試験と岩盤の変形に関する特性の研究。土と基礎, vol.24, No.1 pp.35~41  
本州四国連絡橋公団(1993)：本州四国連絡橋・地質地盤調査誌, pp.257  
山下理雄・大西雄三・武内俊昭(1975)：長大橋基礎岩盤としての花崗岩の長期変形特性（その3）  
—載荷試験のシミュレーションと実構造物変位の予測—, 昭和50年度土木学会年次大会講演会講演論文集, pp.491~492