

(14) 繰り返し載荷を受ける堆積(凝灰)岩の挙動について

京都大学工学部	大西 有三
京都大学大学院	川西 正夫
京都大学大学院	征矢 雅宏
京都大学工学部	七條 牧生

1. はじめに

近年、原子力発電所や石油備蓄施設などの、大型の構造物が計画、施工される機会が増え、その基礎となる岩盤の挙動に対する関心が高まっているが、岩盤の呈するクリープ現象、疲労現象は、その長期安全性の点から、注目すべき事項であると考ええる。実際の岩盤は、上載構造物による静的荷重のみならず、地震や交通荷重などにより動的荷重をも受けている。これらの荷重の存在は、一定載荷の下で、材料が時間依存変形を起こすクリープ現象や、繰り返し載荷の下で、材料の強度が通常の静的強度より低下する疲労現象が、実際に生じることを保障するものである。しかしながら、こうした現象に関する研究は、主に金属の分野で発達してきたものであり、岩石や岩盤については、いまだその数が限られる。

硬岩に対する Scholz¹⁾の研究によると、繰り返し載荷による疲労現象は、逐次的な内部マイクロクラックの進展によるクリープ的な破壊現象と、繰り返しという載荷行為そのものによる損傷の重複したものと考えられている。したがって、岩石の繰り返し載荷試験は、通常の静的載荷試験では得られない岩石の変形や破壊の特性を現出し、従来から検討事項と目されている、クリープ試験とひずみ速度あるいは応力速度一定試験の間の関係を、明らかにする手段と考えられる。本研究では、飽和軟岩を対象として繰り返し載荷試験を実施し、その変形、強度特性を明らかにすることを目的としている。今回は、実験の結果を報告するとともに、従来の研究との比較を行なう。

2. 実験方法

実験に用いた試料は、多孔質凝灰岩(栃木県産船生石)で、直径5cm、高さ10cm、に成型したものを飽和させて用いた。その平均的な一軸強度は、120 kgf/cm²、比重2.65、間隙比は0.406である。実験はすべて側圧15 kgf/cm²、背圧5 kgf/cm²の圧密非排水のもとで実施し、繰り返し載荷試験は、応力速度 $\dot{\sigma}$ を一定の条件として行なっている。繰り返しの載荷波形を図-1に示す。実験方法は、以下の3つに分かれる。

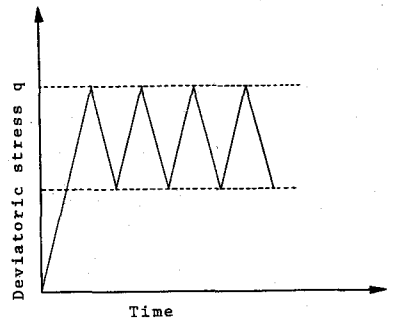


図-1

- ① 応力速度一定 ($\dot{\sigma} = 3.0 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$) のもとで振幅を変化させ、振幅の変化が強度に及ぼす影響を調べる。
- ② 振幅を一定に保ち、応力速度を $\dot{\sigma} = 0.03 \sim 30 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$ に変化させて、応力速度の変化による影響を調べる。
- ③ 繰り返し載荷試験との対比のためにクリープ試験を行なう。

3. 実験結果及び考察

(1) クリープ試験の結果

図-2に、加えた軸差応力と破壊時間の関係を示

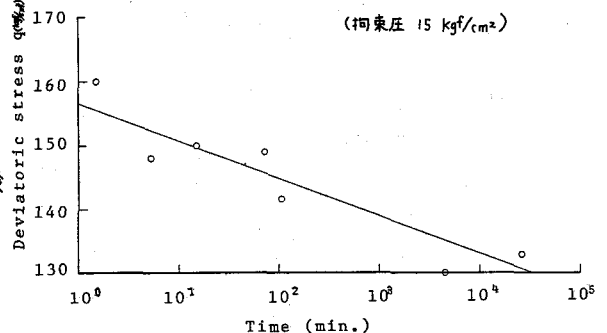


図-2

す。図より軸差応力が130~160 kgf/cm²の範囲では、軸差応力と破壊時間の間に、片対数表示ではほぼ線形性が認められる。

次に定常クリープ開始時間 t_s 、加速クリープ開始時間 t_a 、破壊時間 t_f と、定常クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_s$ との関係を両対数紙上で、図-3に示す。図より $\dot{\epsilon}_s$ とこれらの時間の間には、両対数表示で線形関係が成り立ち、3本の直線はほぼ平行になることがわかる。またその直線の傾きは、0.94である。齊藤²⁾、村山³⁾らは、 $\dot{\epsilon}_s$ とこれらの時間の線形関係より直線の傾きを1に近似して、

$$\dot{\epsilon}_s \cdot t_s = \text{const.} \quad \dot{\epsilon}_s \cdot t_a = \text{const.} \quad \dot{\epsilon}_s \cdot t_f = \text{const.}$$

という式を提案している。図-3は、軟岩(船生石)においても試料が破壊に至る場合、上の提案式が適用できることを示している。しかし、試料が破壊に至らない場合は、傾向を異にする。図では低い軸差応力($q = 60 \sim 130 \text{ kgf/cm}^2$)の t_s は、直線から離れたものとなっている。

図-4では、応力-ひずみ関係の中でクリープを遷移、定常、加速の3段階に分けることを試みた。図中の実線は、定ひずみ速度せん断試験($\dot{\epsilon}_1 = 0.12\%/min$)の結果である。破線で示したものは応力速度一定で($\dot{q} = 3.0 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$)せん断した結果である。いずれにせよ、この応力-ひずみ曲線の内部でクリープは生じるものとする。図中の○印は定常クリープ開始点、△印が加速クリープ開始点である。○印を連らねた線(一点鎖線)を図に示すように引くと、この線の左側、すなわちこの線と応力-ひずみ曲線で囲まれた部分が遷移クリープ、右側が定常クリープとなる。定常クリープと加速クリープの境界(二点鎖線)は、現在加速クリープ開始点のデータが少ないため定かではないが、これは今後リラクセーション試験などを行なうことにより明らかにするものと提案する。さて、図では軸差応力が150 kgf/cm²ほどになると、定常クリープ開始点と加速クリープ開始点が非常に接近し、ついには1点に重なるように見える。したがって、軸差応力が150 kgf/cm²以上になると、定常クリープは存在しないことになる。このように遷移クリープからすぐに加速クリープに移行する点を図中に太線(定常クリープ限界線と呼ぶ)で示した。

(2) 繰り返し載荷試験の結果

図-5に繰り返し載荷試験の最大軸差応力に対する軸ひずみ $\epsilon_{\max}$ と時間の関係、クリープ試験の軸ひずみと時間の関係を示す。ここではクリープとの比較のために繰り返し回数を時間に換算してある。図より繰り返し載荷試験の場合も、クリープ曲線と同様な軸ひずみ-時間関係が得られ、

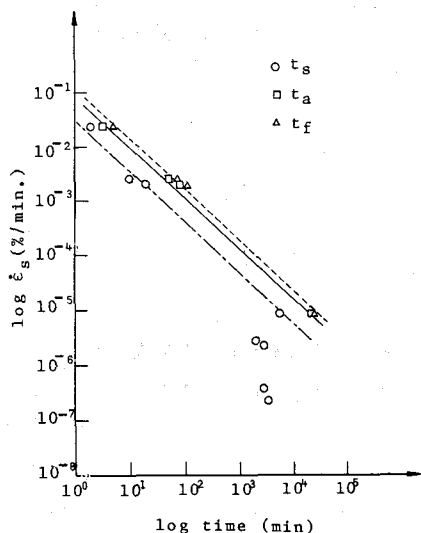


図-3

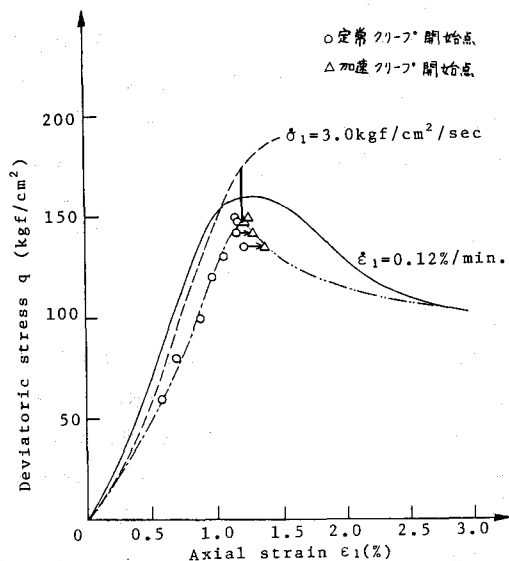


図-4

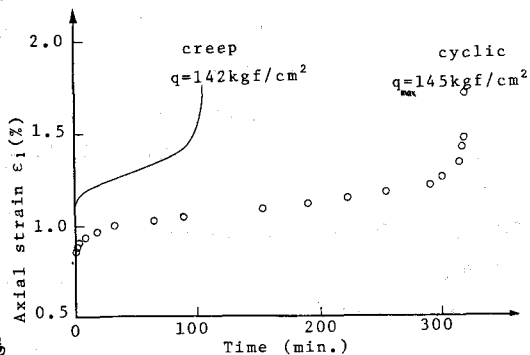


図-5

遷移、定常、加速の3段階が現われることがわかる。次に繰り返し載荷試験とクリープ試験の間隙水圧と軸ひずみの関係を表わしたのが図-6である。繰り返し載荷試験の場合は、 E_{max} に対する間隙水圧を取っている。加えた軸差応力は、両試験とも図-5の場合と同じであり、それぞれ破壊に至っている。両者の挙動は図より類似していることがわかる。図-5、図-6よりクリープと疲労の変形あるいは、間隙水圧挙動の類似性は明らかである。

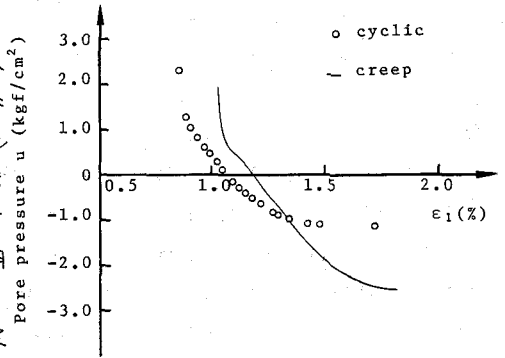


図-6

図-7は、繰り返し載荷試験の定常段階のひずみ速度を、定常クリープひずみ速度と同等のものと見なして $\dot{\epsilon}_s$ とし、この $\dot{\epsilon}_s$ と定常段階の開始時間 t_s 、加速段階の開始時間 t_a 、破壊時間 t_f との関係を両対数表示で表わしたものである。図にはクリープ試験の結果も併記してある。この図より繰り返し載荷試験の場合も $\dot{\epsilon}_s$ と t_s 、 t_a 、 t_f との間には、それぞれ線形関係が成り立ち、3本の直線が引けることがわかる。しかし、クリープ試験の結果と繰り返し載荷試験から求めたこれら3本の直線の間には多少のずれが認められるので、その理由については今後検討を加えていく予定である。

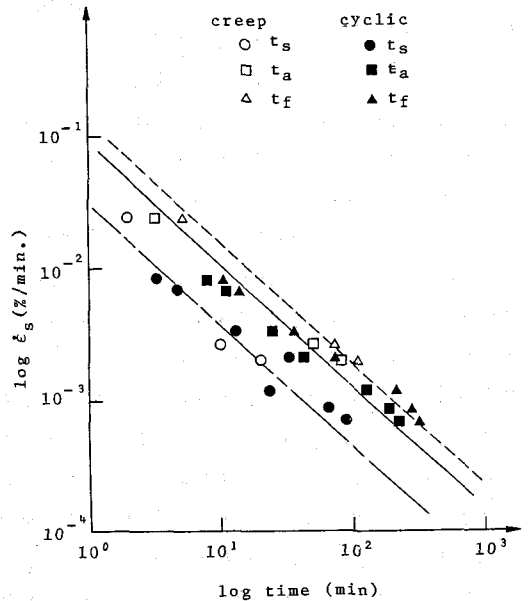


図-7

図-8は、繰り返し載荷試験の最大軸差応力 σ_{max} と破壊時間 t_f の関係を片対数表示で表わしたものである。ここでは、除荷時の最小軸差応力 σ_{min} を0から4段階に上げていくことによって、振幅を徐々に小さくした結果を示してある。図中の ω は振幅を表わし、 $\omega = 1.0$ とは $\sigma_{min} = 0$ の場合の振幅で、それが最大値である。 $\omega = 0.5$ は、 $\omega = 1.0$ の半分の振幅で試験を行なった結果であり、以下はそれぞれ $\omega = 1.0$ の0.25倍、0.1倍の振幅での試験結果である。図中のクリープは、振幅0の場合に相当する。また、繰り返し載荷試験はすべて応力速度 $\dot{\sigma} = 3.0 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$ の条件のもとに行なった。この図から、まずそれぞれの振幅に対して σ_{max} と t_f の対数の関係には、線形性があることが認められる。

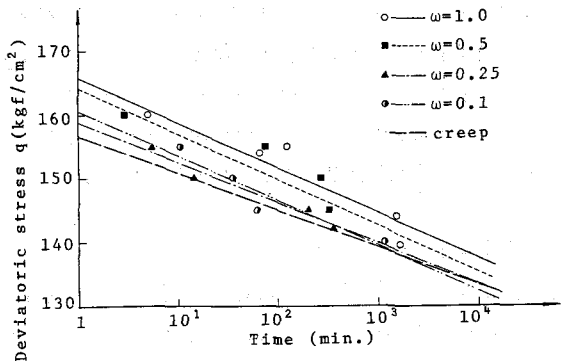


図-8

振幅の影響という点から見ると、振幅が大きくなるほど直線は上方に移動し、振幅0に相当するクリープの直線が、最も下方にある。したがって同一の軸差応力に対し、クリープの場合が時間的に最も早く破壊し、振幅が大きくなるほど破壊時間が遅くなることがわかる。このことから今回の軟岩を用いた実験においては、試料の破壊に対して最も影響を及ぼすものがクリープによる損傷であり、繰り返し載荷の効果とは、このクリープ的な損傷を抑制するに過ぎないものと考えられる。しかし、Scholzが硬岩に対して行なった実験では、繰り返し載荷は試料内の損傷を促進する効果を持ち、振幅が大きくなるにつれて、破壊時間は減少し

ている。Scholzは、繰り返し載荷という載荷行為そのものが、試料の破壊に影響を与えることを最もよく表わす要因として、振幅の大小を考えているが、今回の実験ではそれは明らかにできなかった。

図-8では、振幅の異なる繰り返し載荷試験の結果を破壊時間 t_f を用いて表わしたが、これを破壊までに要した繰り返し回数 N_f に対して整理したのが図-9である。それぞれの振幅に対して σ_{max} と N_f の関係を片対数表示で直線で近似してある。この図を見ると、振幅 $\omega=0.25$ の場合の直線がやや離れているが、他の振幅が表わす直線はほぼ一致している。この結果は、ある σ_{max} の値に対して試料が破壊に至るまでの繰り返し回数は、ほとんど振幅にはよらないで決まってしまうことを表わしている。このように今回の実験では、振幅の大小が試料の破壊に対して及ぼす影響を抽出することができなかったが、この点に関しては今後さらに検討を重ねていきたい。

これまでにした実験結果は、すべて応力速度 $\dot{\sigma}_1 = 3.0 \text{ kgf/cm}^2/\text{sec}$ のもとで行なわれたものであったが、次に振幅一定、 σ_{max} 一定のもとに応力速度を変えた実験結果を示す。図-10は、 $\sigma_{max} = 145 \text{ kgf/cm}^2$ 、振幅 $\omega = 0.1$ の条件下で応力速度と破壊までに要する繰り返し回数を両対数表示で表わしたものである。図中にSTATIC FATIGUE、CYCLIC FATIGUE

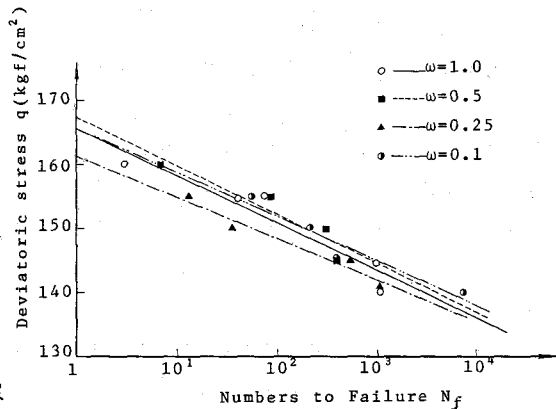


図-9

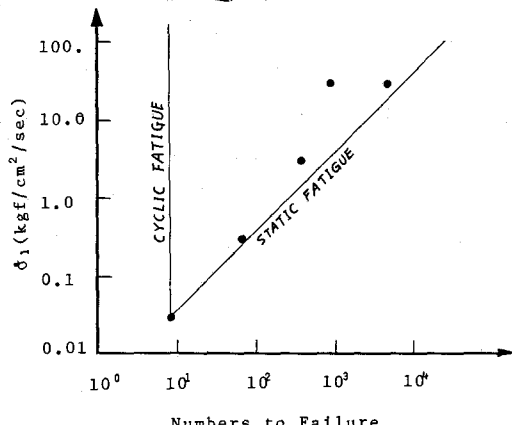


図-10

とあるのは、Scholzによる仮定である。まず第1の仮定として、繰り返し載荷による破壊がまったくクリープ的な破壊であるとするならば、ある一定時間を経て試料は破壊するはずである。したがって、応力速度が10倍になれば、破壊までの繰り返し回数も10倍になる。このことを表わしたのがSTATIC FATIGUEと書いた線である。第2の仮定として、破壊が繰り返し載荷という載荷行為そのものによってのみ起こるものとすれば、破壊は応力速度にはよらずある一定の繰り返し回数で起こるはずである。CYCLIC FATIGUEと書かれた直線はこのことを表わす。Scholzはさらに、この2本の直線で囲まれた範囲内に実験データがあることから、疲労はクリープ的な試料内の損傷と繰り返し載荷による損傷とが重なり合って起こるものと考えている。

さて、図を見るとデータはSTATIC FATIGUE線に沿って分布する傾向を見せており、Scholzの仮定に従うならば、この実験結果はクリープ的な破壊損傷が支配的であることを示す。しかしながらまだデータ不足の感があるので、今後の検討課題であることに変わりはない。

(参考文献)

- 1) Scholz, C.H. & T.A. Kozynski : Dilatancy Anisotropy and the Response of Rock to Large Cyclic Loads, J. Geophys. Res., Vol.84, No.10, 1979, pp.5525-5534
- 2) Saito, M. & H. Uezawa : Failure of Soil due to Creep, Proc. of 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Vol.1, 1961, pp.315-318
- 3) 村山朔郎, 栗原則夫, 関口秀雄 : 粘土のクリープ破壊について, 京都大学防災研究所年報第13号B, 1970, pp. 1-17

(14) MECHANICAL BEHAVIOR OF SEDIMENTARY
ROCK (TUFF) UNDER CYCLIC LOADING

Yuzo OHNISHI
Masao KAWANISHI
Masahiro SOYA
Makio SHICHIJO
(Kyoto University)

Foundations of dams, roads and bridges, underground space like tunnels and chambers are subjected to cyclic loading caused by earthquakes, traffics, blasting, etc.. The effects of cyclic loading on several different civil engineering materials such as steel, concrete and soil have been investigated. A typical phenomenon is so called cyclic fatigue in which a material fails at a stress level lower than its static strength. However, little work in this subject has been done in the area of rock mechanics. The influence of combined stresses and pore water pressure have not been investigated.

It is known that the fatigue curve in cyclic loading is similar to the static creep. The reason why is not well documented theoretically or experimentally. Scholz and Koczynski tried to explain these rock behaviors under cyclic loads with hard crystalline rocks. Their conclusion was that three types of cracking result in dilatancy* stress-induced cracking; stress-corrosion cracking and fatigue cracking. Rock fracture is sensitive to which type is prevalent.

The purpose of this research is to examine a number of features that are not well observed in more conventional test. Soft saturated porous sedimentary rocks (tuff) were selected for undrained triaxial test. Deformation, strength and behavior of pore water pressure under quasi-static and cyclic loading have been investigated. In addition, creep tests were conducted to know the "long-term" strength. The results of these tests are interpreted in view of the complete stress-strain curve.