

三軸圧縮状態で繰り返し荷重を受ける飽和軟岩の挙動について

京都大学工学部 赤 井 浩 一

〃 大 西 有 三

〃 吉 田 順

1. まえがき

ダムなどの巨大構造物や道路の基盤、橋梁の基礎岩盤は地震、交通荷重、発破などにより繰り返し載荷を受ける。このような載荷により、材料の強度が通常の静的強度より低下する、いわゆる疲労現象が起こる。こうした疲労現象の研究は、鋼材、コンクリート、土質材料に関してはいろいろ実施されており、特に鋼材ではS-N曲線が有名である。しかし、岩石や岩盤についての研究はいまだその数が限られている。

硬い岩石に対する Scholtz の研究によると、繰り返し載荷による疲労破壊は、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実験は、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、強度特性ならびに間隙水圧挙動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検討を行なった。

2. 実験方法

実験に用いた試料は、多孔質凝灰岩である船生石で、直径5cm、高さ10cmに成型したものを飽和させて用いた。その物理諸量は比重2.65、間隙比0.406、含水比15.3%である。

実験はすべて背圧5kgf/cm²を与え、24時間の圧密をした後、非排水条件で行なった。荷重制御の載荷を行い、圧密圧力まで除荷し、繰り返しの波形にはランプ波を用いた。

それぞれの実験で周波数一定となるように定め0.1, 0.01, 0.001Hzの三段階の周波数を用いた。なお、今回の実験ではすべて圧密圧力10kgf/cm²であり、また時間の制約もあり実験経時時間を最大限 4×10^6 secとして実験を行なった。ため、強度についてはその時点でのものを考えている。

3. 実験結果及び考察

図-1に、最大軸圧156kgf/cm²、周波数0.01Hzでの軸差応力と軸ひずみの関係を、図-2に間隙水圧と軸ひずみの関係を示した。軸ひずみは破壊の直前に急激に増加し、ヒステリシスループの傾きや大きさも大きくなっている。間隙水圧も軸ひずみと同様に初期載荷時に大きく変化した後にはヒステリシスループを描いている。そのループの形は一定しており、初期載荷の曲線の形と似たものになっている。軸ひずみが増加しても軸差応力が上がらない破壊後の部分では、軸ひずみの急激な増加に比べると間隙水圧の減少量は少なく、定ひずみせん断試験で見られる残留状態と同様なものとなっている。

図-3, 4に示したのが、周波数の異なる2つの実験の繰り返し

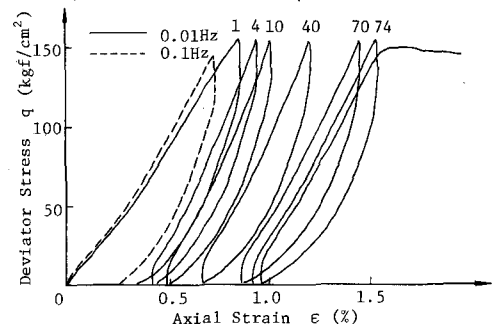


図-1

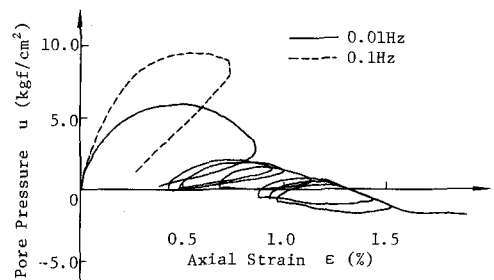


図-2

し、載荷回数と軸ひずみの関係である。いずれも最大荷重時のひずみ（全ひずみ）と除荷時のひずみ（残留ひずみ）がともに同じような傾向を示しており、両方ともクリープと似た挙動であることがわかる。図-5に示すように普通軸で回数をとると遷移、定常、加速の三段階をきれいに示すクリープ曲線と同様なものになっている。残留ひずみもこのような挙動を示すことから、繰返し載荷による影響はクリープと類似していることは明らかである。繰返し載荷/回あたりのひずみ増加量と回数の関係を表わした図-6を見てもクリープの場合に言われている両対数をとった時の線形

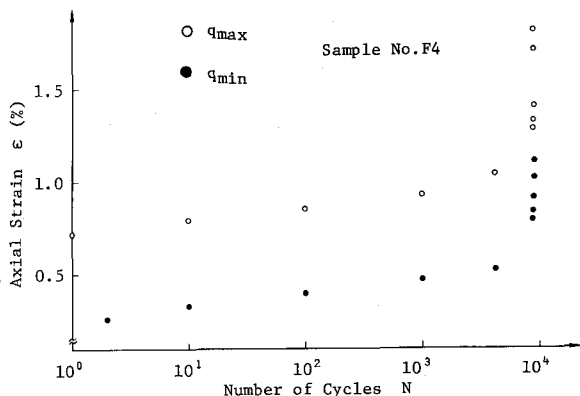


図-3

関係が見られ、破壊する場合には急激に増加するという同じような挙動を示していることがわかる。図-7,8に図-3,4に対応する間隙水圧と回数の関係を示したが、間隙水圧も最大軸圧に対応するもの (u_{gmax}) は、クリープの場合と同じような挙動を示している。除荷時の間隙水圧 (u_{gmin}) は、初期に少し増加し一定となった後に破壊に至る時に急激に減少するというような傾向を示している。そして、その変化量は u_{gmax} の方が大きく、破壊する前には u_{gmax} の方が u_{gmin} よりも小さくなっている。これらはいずれも圧密圧力 10 kgf/cm^2 の場合であるが、圧密圧力 50 kgf/cm^2 の場合にはまるで異なった挙動を示しており、今後いろいろな圧密圧力での実験で検討する必要があると考えている。

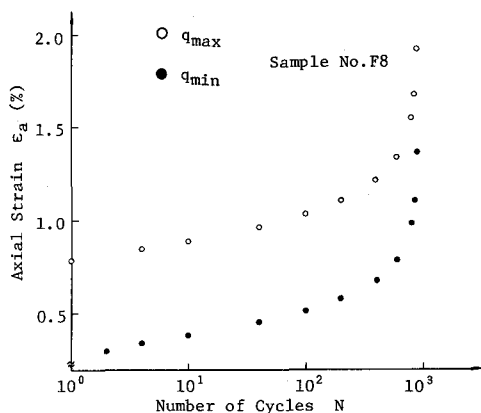


図-4

全ひずみと u_{gmax} の関係を示したのが図-9である。破壊に至る3つのケースでは同じような傾向を示しており、破壊に至らない場合のものととの間に境界を設けられると推察される。この境界の両側でそれぞれひずみと間隙水圧の間に何らかの関係を仮定できると思われ、実験を継続している。

Sample No.	q_{max} (kgf/cm ²)	Frequency (Hz)	Cycles at failure
F3	133	0.1	—
F4	147	0.1	9248
F7	136	0.01	—
F8	144	0.01	952
F11	136	0.001	—
F12	152	0.001	37

表-1

次に周波数の影響すなわち載荷速度の影響を考えてみると、

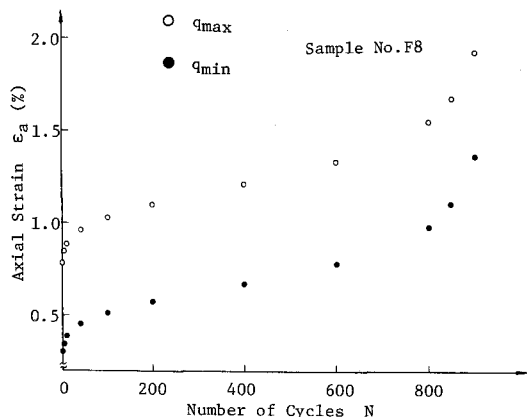


図-5

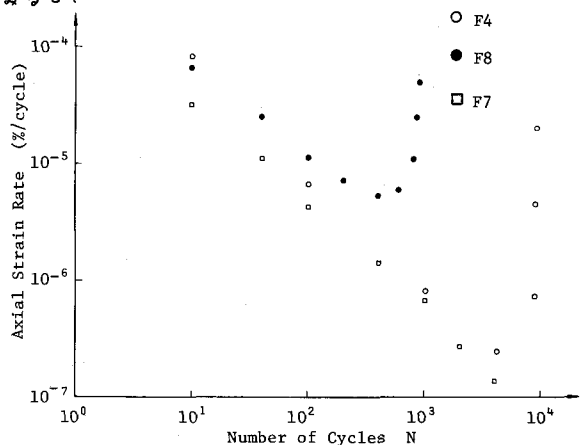


図-6

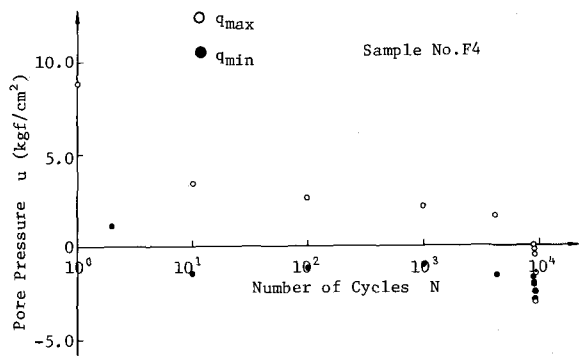


図-7

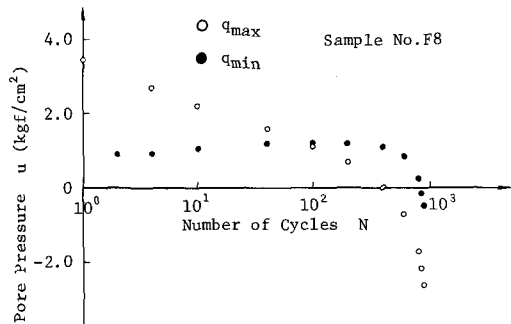


図-8

初期載荷では図-1,2に示すように軸ひずみと間隙水圧がともにかなり異なっていることがわかる。しかし、表-1に示したような結果から、0.001Hzの場合に軸圧が他よりも高いため早期破壊していることを考慮すれば、どの載荷速度でもほとんど強度は変わらない。このことは実験した範囲内では疲労強度が載荷速度によらず一意的に決定できることを示している。また、破壊に至るまでの時間を考えると、これも同波数の影響をあまり受けないと思われる。これらのことより圧密圧力10kgf/cm²での疲労強度は140kgf/cm²前後と推定されこれは通常の定みずみせん断試験強度(ひずみ速度0.12%/min)200kgf/cm²の約70%ということになる。圧密圧力50kgf/cm²の場合にはこの割合が約60%となっていることから、圧密圧力の増加によって疲労強度のせん断強度に対する割合が低減するとも考えられるが、データ不足で確定的なことは不明である。

繰り返し載荷試験と同じ圧密圧力で行なったクリープ試験の結果が図-10,11である。これを繰り返し載荷試験と比較してみると、その最大軸圧がクリープ試験の軸差応力よりも大きい場合に、軸ひずみと間隙水圧が類似した挙動を示している。今回はデータ不足のため量的な比較を行なうことができず、繰り返し載荷試験とクリープ試験の関係を明らかにできなかったが、今後さらに実験を行なうて明らかにしていきたい。

図-12はヒステリシスループの幅を示したものであるが、これはScholtzらによって言われているようにヒステリシスループの面積すなわちエネルギー損失の概略を表わす尺度である。

この図によると初期載荷の影響の残る部分ではエネルギー損失が大きく、それが減少して定常状態とな

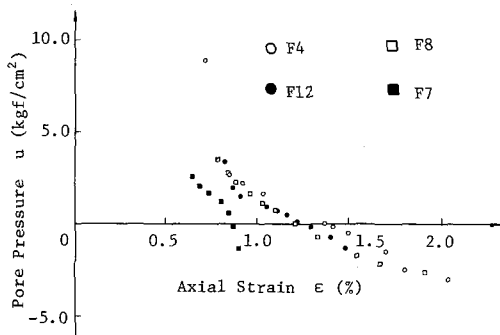


図-9

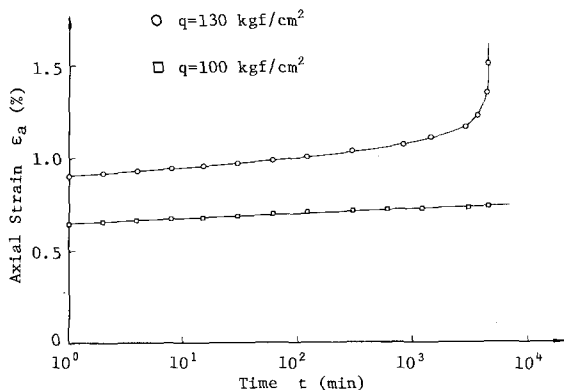


図-10

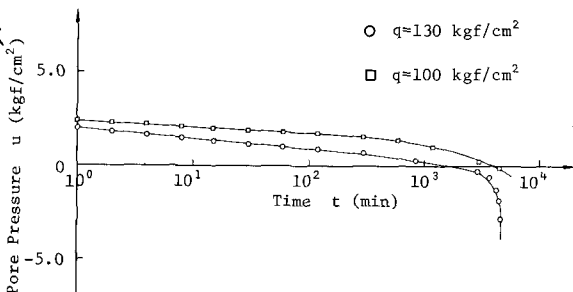


図-11

たところでエネルギー損失は最小となり、破壊する場合にはクラックの集中によるものと考えられるエネルギー損失の増大が見られ、破壊しない場合には一定の値に落ち着くような傾向を見せている。これは、硬岩に対して Scholtz らの得た結果と一致している。

図-13は割線係数 E の変化を示したものであり、これはちょうど図-12で示されている形を逆にしたようになっている。すなわち、 E は初期に増加し、破壊に至る時には大きく減少しており、これはエネルギー損失の場合と同じ考え方で説明されるだろう。また、最大軸圧は一定であるから、 E は1回の載荷あたりのひずみ量の逆数ということになり、このひずみはエネルギー損失と同じ傾向を示す。これら2つの図からみるとエネルギー損失量の変化あるいは割線係数を、変形あるいは破壊に対するパラメーターとして用いることが可能であろう。

ところで、破壊ということが岩質材料を取り扱う場合には大きな問題であるが、今回行った実験では疲労破壊の形状が他の場合と異なっていた。通常、低拘束圧下の三軸圧縮試験では図-14(a)のような形で一つのせん断面が入り、破壊するのであるが、今回の実験

では上部あるいは下部の一方にたくさんのせん断面が表われる図-14(b)のような破壊形状となった。低サイクル試験でも同じ破壊形状を示した。また、間隙水圧の影響を除去して、乾燥試料による実験を行なったがこれと同様な形で破壊した。

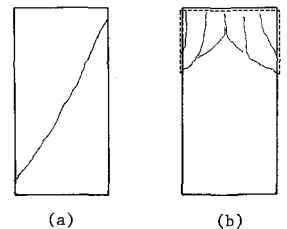
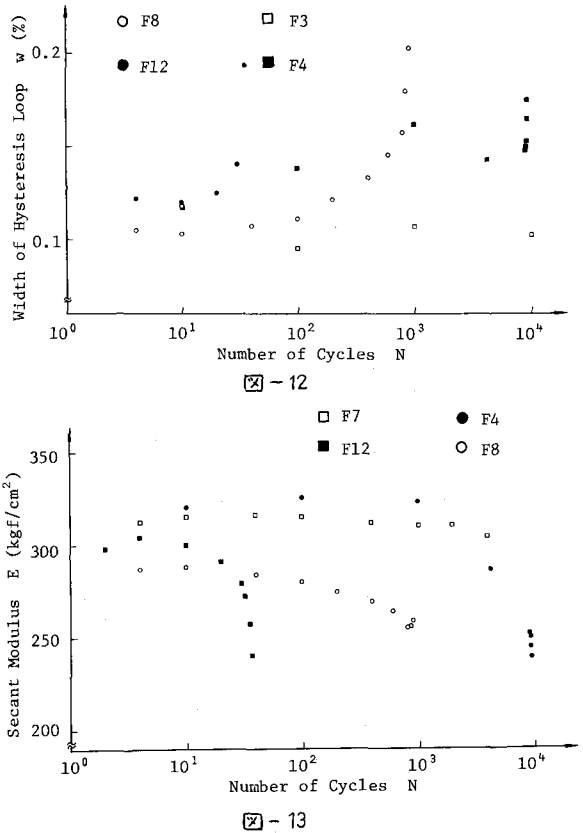
このような破壊形状を示した要因として次のようなものを考える。

載荷により一度伸展したクラックが除荷によって閉じ、次の載荷の時に異なった方向にクラックが伸展する。あるいは、載荷の方向の違いによって除荷時にクラックが異なった方向に伸展するとすればそれが繰り返されることによってクラックの方向性が一定とならない。そのため、一つのせん断面として形成されるの

ではなく、上部あるいは下部のいずれか先に弱面の生じた方が、たくさんのせん断面で滑るために特殊な破壊形状となる。このような要因が考えられるわけであるが、破壊形状が他の試験とは異なっており、クリープあるいは定ひずみ速度せん断と繰り返し載荷試験の関連を考える場合に一つの問題となるだろう。また、今回は圧密圧力50 kg/cm^2 の試験でも同様な破壊形状を示したが、試験数も少ないため今後さらに圧密圧力の大きな実験を行なって明らかにしていきたい。

参考文献

- Hyde, A.F.L. & Brown, S.F. (1976): The Plastic Deformation of a Silty Clay under Creep and Repeated Loading, *Geotechnique* 26, No. 1
- Scholtz, C.H. & Kocyski, T.A. (1979): Dilatancy Anisotropy and the Response of Rock to Large Cyclic Loads, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, No. B10, Sept.



BEHAVIOR OF SATURATED SOFT ROCK UNDER CYCLIC
LOADING IN TRIAXIAL COMPRESSION

KOICHI AKAI
YUZO OHNISHI
JUN YOSHIDA
(Kyoto University)

Foundations of dam, road and bridge are subjected to cyclic loading caused by earthquakes, traffic, blasting, etc. The effects of cyclic loading on several different civil engineering materials such as steel, concrete and soil have been investigated by intensive researches. 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 have been done in the area of rock mechanics. Some of the results are in uniaxial and in dry condition. The influences of combined stresses and pore water have been unknown.

According to Scholtz, cyclic fatigue may be caused by progressive dilatant creep plus additional damage produced by the cycling itself. The former leads to a pronounced loading rate effect on fatigue, the latter to a complex effect of cyclic amplitude on fatigue.

The purpose of this paper is to examine a number of features of rock deformation and fracture that are not well observed in more conventional tests. Soft saturated porous rocks were selected for undrained triaxial tests in the research. Deformation, strength and behavior of pore water pressure under cyclic loading have been investigated. In addition, creep tests were conducted in order to know the relationship between creep, cyclic loading and more conventional constant strain rate or loading rate experiments.