(24) 軟岩の繰り返し載荷時の力学挙動について

京都大学工学部　足立紀尚
大西有三
荒矢雅宏
七條牧生

1. はじめに

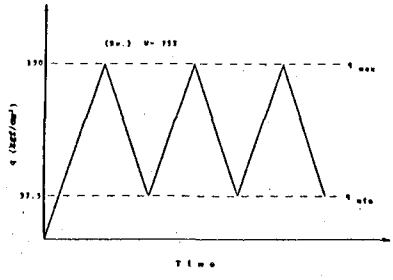
地盤工学で取扱う土質材料は、これまで多くの研究からひずみ速度効果、クリープ現象、応力緩和現象などの時間に依存した挙動を示すことが明らかにされているが、近年における土木構造物の大型化に伴い支持層の時間依存変形が構造物建設時に重要な位置を占めるようになっている。わが国の土壌は、第三紀堆積層や風化花崗岩など、いわゆる軟岩と呼ばれる岩盤が広く分布しており、構造物施工の際に、このような岩盤を取扱う機会が多く軟岩の力学挙動を解明して把握することがとりわけ必要とされている。従来、支持岩盤の長期安定問題は、クリープ変形に対する安全性を評価するのが一般的手法となっており、この評価法として現在では時間依存性を考慮した構成式が設計に取り入れられるに至っている。しかしながら、最近はこのような静的な長期強度を評価するのみにとどまらず、地震動を意識した動的問題にも対処しようとする試みが盛んになされつつある。したがって軟岩の動的変形特性は重要な応用分野を控えた解明の待たれる問題であるが、この種の研究例は非常に少ないのが現状である。

一般に材料の長期強度の問題はクリープと疲労の2つの現象から論じられることが多く、硬岩を用いた室内試験により両者の挙動の類似性や相関性を取り扱った研究例[1][2]がある。その結果、疲労試験における定振動荷重下の岩石の挙動は応力速度、応力振幅に依存してクリープと同様な強度特性、異なる破壊機構が現われることが示された。このようなことから岩石に対する動的試験は疲労の問題として把えれば時間依存性の範ちゅうにはいり、また振動特性を考慮すれば動的変形特性の問題となる。本研究は、堆積軟岩を用いて繰り返し載荷試験、クリープ試験を行ない、その変形強度特性における時間依存性の問題を明らかにすることを目的としている。

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し繰り返し載荷試験、クリープ試験を行なった。実験はすべて側圧15kg/cm²、背圧5kg/cm²の圧密非排水条件のもとで実行した。なお、破壊しなかった場合には1週間で実験を打ち切っている。

(1) 繰り返し載荷試験：載荷波形は三角波、応力速度には $\dot{\sigma}$ = 30, 90, 150 kg/cm²·sec の3種類を設定し、加えた最大軸差応力は80～150 kg/cm²の範囲である。また、最大軸差応力150 kg/cm²の場合には応力振幅を4段階、すなわち100, 75, 50, 25%と変化させて実験した。ここでいう振幅とは、最大軸差応力の何%分をもつかということを表わしており、例えば75%は、最小軸差応力が最大軸差応力の4分の1の値であることを表わす。（図－1参照）



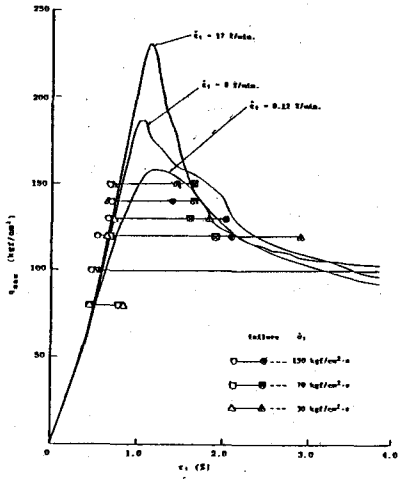
図－1

(2) クリープ試験：載荷速度3 kg/cm²·secで荷重を一定の値にまで上昇させて、クリープ試験を継続した。軸差応力は、60～155 kg/cm²の範囲である。

3. 実験結果および考察

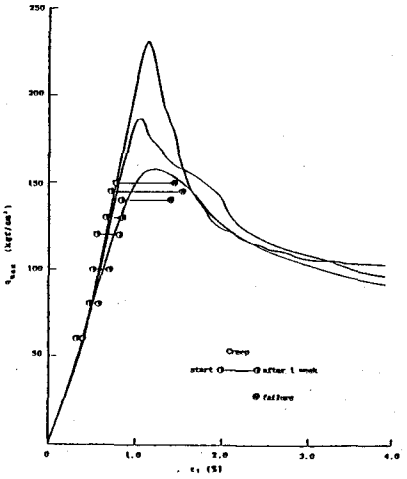
まず、破壊の定義にふれておく。繰り返し載荷試験において最大軸差応力120 kg/cm²以上の場合と100 kg/cm²の場合では、異なる破壊挙動を示す。すなわち、120 kg/cm²以上の場合は、破壊時に加えた繰り返し応力を支え

ることが出来なくなり、ひずみは瞬間的に増大し、明瞭な破壊点が読み取れる。これに対し最大軸差応力100kgf/cm²の場合は、明瞭な破壊点が現われず加えた応力を支え、載荷波形を保ったまま延々と塑性流動を起こす。この場合は、いつ破壊が起こったのか正確にはわからないが、ひずみと時間の関係を普通軸上にプロットすると4%付近でひずみが時間軸に対して垂直にのびるようになるので、4%を軸差応力100kgf/cm²の破壊点と定義した。



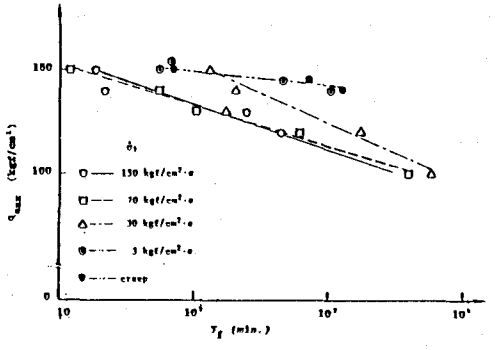
図－2

図－2に3種類の定ひずみ速度せん断試験の結果と、繰り返し載荷の第1回目載荷時の最大ひずみ量及び破壊時のひずみ量を示す。せん断試験の応力－ひずみ曲線から拘束圧が一定の場合には残留強度は、ひずみ速度に依存せずほぼ一定となり100kgf/cm²となることがわかる。これは、先の破壊時の挙動を裏づけている。軸差応力80kgf/cm²の場合は破壊せず、図中には1週間後のひずみ量を記してある。80kgf/cm²で破壊せず100kgf/cm²で破壊することより、1週間以内に破壊を起こす限界応力はこの間にあると思われるが、残留強度を考慮にいれ[2]およそ100kgf/cm²をその限界応力と考える。図中のひずみ速度$\dot{\varepsilon}_1$＝8%/min.，17%/min.は、それぞれ応力速度30kgf/cm²·sec，50kgf/cm²·secの繰り返し載荷試験の第1回目における載荷の線形部分から逆算して求めたものである。1回目のひずみと破壊時のひずみをみると1回目の方は全体として、ひずみ硬化部分のカーブの外側に位置し、破壊時の方は、例外はあるものの、ひずみ軟化部分のカーブの内側にある傾向が表われている。Hainson[1]は繰り返し載荷中の初期と破壊時のひずみ量は応力－ひずみ曲線によって完全に規定できることを実験的に明らかにしており、この実験結果においても多少のずれが見られるものの一応軸差応力が下がるに従って応力－ひずみ曲線に沿うように破壊時のひずみが伸びていることから見てHainsonの結果と同等と見ることができる。このようなことから応力速度に見合うようなひずみ速度でせん断し、応力－ひずみ曲線を得れば、繰り返し載荷によって発生する初期ひずみ、破壊ひずみの荒い推定は可能であると考える。



図－3

次に、図－3に図－2と同じ応力－ひずみ曲線とクリープ試験の場合の初期ひずみ、破壊時のひずみ及び破壊しない場合の1週間後のひずみを示す。このクリープ試験は、繰り返し載荷試験と同じ側圧15kgf/cm²のもとで行なわれたが、実験期間1週間内において軸差応力130kgf/cm²以下で破壊が生じていない。つまり、対象とする材料の破壊の推定というものを考えた場合にクリープ試験よりも繰り返し載荷試験を行なう方が有効であることを示しているという点で興味深い。破壊時のひずみのみについて見ると、図－2，図－3で違いは見られない。

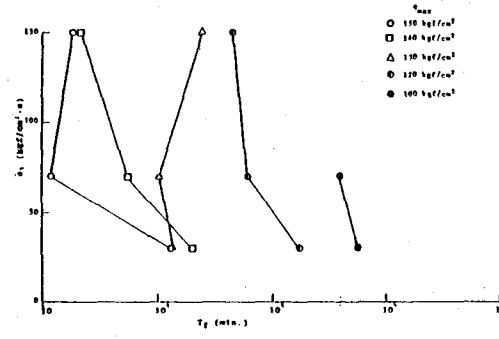


図－4

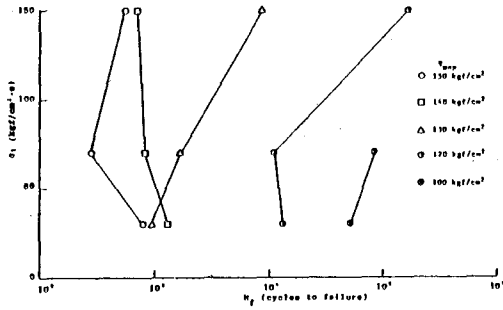
図－4に繰り返し載荷とクリープ試験の応力－破壊時

間の関係を示す。応力速度150 kgf/cm²·sec と70 kgf/cm²·sec の場合は破壊時間にほとんど差が見られず、ついで応力速度30 kgf/cm²·sec，クリープと破壊時間が長くなる傾向がある。応力速度3 kgf/cm²·sec の場合はクリープの破壊時間とほとんど変わらない。応力速度3 kgf/cm²·sec の場合がクリープに相当すると考えると直接クリープと繰り返し載荷を比較することができるが、応力速度が3 kgf/cm²·sec よりも速くなると繰り返し載荷の方がクリープよりも時間的に早く破壊し、また応力速度30 kgf/cm²·sec とそれ以上の70，150 kgf/cm²·sec の破壊時間に明らかな相違があることから破壊は応力速度に依存すると考えられる。応力速度30 kgf/cm²·sec と70，150 kgf/cm²·sec の場合の傾きが異なるのは加えた応力のレベルによって応力速度の影響を受ける程度が違うからである。この図によると軸差応力が小さくなる程、応力速度の影響は軽減される。また、この図からは動的な限界応力と静的な限界応力の相違は、応力速度に依存して生じることになる。しかしながら西ら[4]が泥岩を用いて行なった振動載荷試験によると周波数が0.1～30 Hz の範囲内では動的強度に及ぼす周波数の影響は大きなものではなく、周波数依存性は認められないことになっている。今回の実験結果から得た応力速度依存性は、この西らの実験事実と矛盾しており、今後検討を要する点である。

図－4の軸差応力をパラメータに取り、応力速度と破壊時間の関係を表わしたのが図－5である。図は全体的に左に傾いており、また軸差応力が140 kgf/cm² 以上になるとその度合いが大きくなっている。応力速度70 kgf/cm²·sec と150 kgf/cm²·sec は必ずしも同じ方向に傾いていないが、少なくとも30 kgf/cm²·sec とこれら2つの速度との間には違いがある。図－5を破壊時間ではなく破壊回数に対してプロットしたのが図－6である。軸差応力130 kgf/cm² 以下と140 kgf/cm² 以上とは図の示す傾向が異なり、応力レベルが上がると応力速度に依存する程度が大きくなることがわかる。

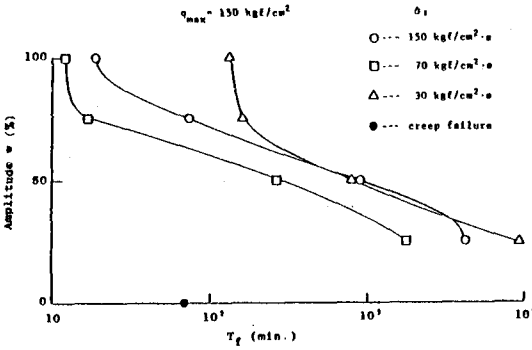


図－ 5



図－ 6

図－7に最大軸差応力150 kgf/cm² の応力振幅と破壊時間の関係を示す。Shola[3]が硬石膏を用いて示した実験結果は図－8に示すように破壊時間が振幅に対してピークを持つものであるが、本実験結果はいずれの応力速度でも振幅が小さくなるに従って単調に破壊時間が増大する。図－8において、破壊時間が振幅に対してピークを持つことは、はじめ振幅0のクリープ状態から徐々に振幅を増やすと平均軸差応力の低下に伴ないクリープのような一定荷重下で発達するクラックの進展が抑制され破壊時間が長くなり、そしてその後振幅が増大するとヒステリシスループの面積が次第に大きくなり、これに対応した繰り返し載荷によるクラックの進展が促進され、この促進されるクラックの発達と抑制されるものとの兼ね合いで破壊時間はピークを持つようになり、さらに振幅が増大すると繰り返し載荷によるクラックの進展が卓越して破



図－ 7

壊時間が短くなると説明される。このような考え方に立つと、振幅の0から100%までの変化に対して破壊時間は必らずピークを持つことになるが実験結果はそのようにはならない。図-9はScholzの考え方に従い繰り返し載荷中に平均軸差応力に見合うクリープ応力が加わっているものと考え、縦軸に平均軸差応力をとり繰り返し載荷中のクリープの効果をみたものである。この図は図-7と逆で、平均軸差応力が131.5 kgf/cm² が振幅100%の場合であり、131.5 kgf/cm² が振幅25%に相当する。振幅25%の場合を繰り返し載荷の効果がほとんどない、クリープに準じた載荷がなされていると考えると平均軸差応力が131.5 kgf/cm² で、破壊するにしてもその時間が長くなるのは、先に示したクリープ試験の結果において130 kgf/cm² で破壊しなかったことからみて妥当な結果である。このことをわかりやすくするために図-10には縦軸に平均軸差応力、横軸に軸ひずみを取りクリープと繰り返し載荷の場合の等時間曲線を示す。図中の○印は応力速度30 kgf/cm²·sec, 最大軸差応力150 kgf/cm² の各振幅に対応する平均軸差応力である。△印は軸差応力120, 130, 150 kgf/cm² のクリープである。これらの平均軸差応力と軸ひずみの関係を等時間曲線としてプロットした。まず図中の120 kgf/cm² のクリープとそれ以下の場合を比べると、平均軸差応力が下がり振幅が大きくなる程変形が速く進み繰り返し載荷の振幅の影響が表われている。しかしながら振幅25%に相当する平均軸差応力131.5 kgf/cm² の場合は、t = 40×7 min. まで130 kgf/cm² のクリープの場合と変形がほとんど同じであり、振幅の影響及び繰り返し載荷との最大荷重の差異をほとんど感じさせない。このような結果から振幅が小さい範囲内での繰り返し載荷はScholzのように最大荷重が同一のクリープと比較するよりも平均軸差応力が同一のクリープと比較する方がより長い寿命の推定ができるように思われる。

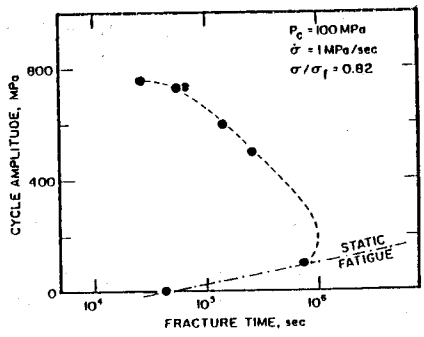


図 - 8

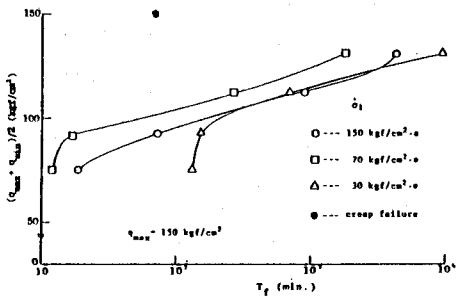


図 - 9

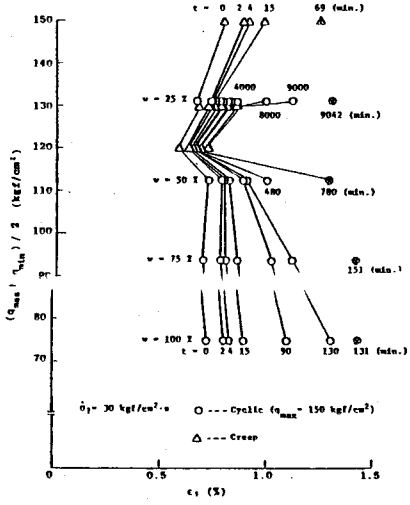


図 - 10

(参考文献)

1) Haimson,B.C. & C.M.Kim: Mechanical Behavior of Rock under Cyclic Fatigue,Rock Mechanics,3,1971,pp. 845-863

2) Scholz,C.H. & T.A.Kozynski: Dilatancy Anisotropy and the Response of Rock to Large Cyclic Loads,J. Geophys.Res.,Vol.84,No.B10,1979,pp.5525-5534

3) 足立紀尚：堆積軟岩の力学挙動に関する研究，京都大学博士論文，1979

4) 西好一，江刺靖行：泥岩の力学特性に関する研究（その4） 振動荷重下における強度－変形特性，電力中央研究所，研究報告 382014

(24) MECHANICAL BEHAVIOR OF SOFT SEDIMENTARY ROCK UNDER REPEATED LOADING

Toshihisa ADACHI
Yuzo OHNISHI
Masahiro SOYA
Makio HICHIJYO
(School of Civil Eng., Kyoto Univ.)

Foundations of dams, roads and bridges, underground space like tunnels and chambers are subjected to cyclic loading caused by earthquakes, traffics, balsting, etc.. The effects of cyclic or repeated 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 nor experimentally. Scholtz and Koczynski tried to explain these rock behaviors under cyclic loads with hard crystalline rocks. Their conclusions was that three types of cracking results in dilatancy stress-induced cracking; stress-corrosion cracking and fatigue cracking. Rock failure or fracture is sesitive 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 rock(tuff) were selected for consolidated undrained triaxial test. Deformation, strength and behavior of pore pressure under quasi-static and repeated 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 complte stress-strain curve.

In order to check the existence of complete stress-strain curve, triaxialtests with variable stress rate and strain rate are performed. It was found that the bahavior pointed out by Scholtz on crystalline rock is quite different from our tuff. The reason why is now under investigation by using weathered ganites.