

(26) 動的繰り返し荷重下における堆積軟岩の強度・変形特性

埼玉大学 正員 吉中龍之進
埼玉大学 正員 ○ 長田 昌彦
埼玉大学 堀 涉

STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF SOFT SEDIMENTARY ROCKS UNDER CYCLIC LOADING

Ryunoshin YOSHINAKA, Saitama University
Masahiko OSADA, Saitama University
Wataru HORI, Saitama University

Abstract

It is thought that failure under cyclic loading, in igneous rocks like granite, results from a brittle process involving the cumulative growth of internal cracks. Soft sedimentary rocks breaking down under brittle conditions in the same mechanism, there should be some change on the behavior of pore water pressure during cyclic loading. In order to find this change, the cyclic fatigue experiments were conducted under consolidated and undrained conditions. As a result, it is found that the behavior of pore water pressure was systematically changed and that this change is described by two quantities, that is, Δu which shows the difference between maximum and minimum values in pore water pressure caused by a stress cycle and χ which reflects a lag of phase difference. The internal strength of rocks can be newly defined by the abrupt change of χ . We shall further investigate these two quantities.

1. はじめに

近年、長大吊橋や原子力発電所などの重要構造物の支持地盤として堆積軟岩が用いられることが多い。支持地盤の満たすべき必要条件の一つに動的繰り返し応力、特に地震動程度の周波数および振幅を持つ振動に対してある程度の変形は許容するとしても最終的な破壊に到らしめないこと、があげられる。

動的繰り返し荷重下における岩石の変形・強度特性を支配する内部構造の変化について、Scholz & Kocynski(1979)¹⁾は Westerly Granite を用いた実験からクラックの発生・進展が主な要因であり、それに寄与する3つのメカニズムとして stress-induced cracking, stress-corrosion cracking, fatigue cracking が働くことを指摘しており、Costin & Holcomb(1981)²⁾はこのうち stress-corrosion cracking と cyclic fatigue cracking を仮定してモデル化すると現象をうまく表現できることを示した。さらに児玉ら(1991)³⁾は最大応力および応力振幅を変化させた疲労試験を行ない、Costin らのモデルの適用性を検討している。疲労試験中のクラックの形成が岩石の変形・強度特性に大きく関与しているとすれば、圧密非排水条件下で疲労試験を実施したときのクラックの形成を直接反映する量は外力や変位など系全体の平均量を与えるパラメータではなく内部構造の変化に敏感である間隙水圧であることが予想される。凝灰岩 ($qu = 16 \text{ MN/m}^2$) を用いて圧密非排水条件下で疲労試験を実施した Akai & Ohnishi (1983)⁴⁾は全体としての間隙水圧の挙動は通常の三軸試験で得られるひずみ-間隙水圧曲線とほぼ同じであり、クラック形成時に間隙水圧の変化は明白ではないとしている。しかしながら全体としての間隙水圧の挙動についてのみしか評価されておらず、1 応力サイクルごとの間隙水圧の変化など詳細な挙動については検討の余地を残している。

そこで本論文では圧密非排水条件下での疲労試験の結果をもとに間隙水圧の挙動について検討した結果を報告するとともに、繰り返し荷重下での疲労破壊を予期できる可能性を示す。

2. 試験方法

上に述べたような目的を達成するためには、破壊に到る過程でクラックの形成が変形挙動の主要因であるような脆性的な試料を用いる必要がある。そこでこれまでの静的試験の結果より、 5kgf/cm^2 の拘束圧までは脆性的な挙動を示すことのわかっている新第三紀の凝灰岩（大谷石）を試料として用いることとした。また比較のため、やや延性的な挙動を示すシルト岩も用いた。供試体は直径：高さが2である円柱形（ $\phi 5 \times 100\text{ mm}$ ）に整形し、強制飽和させた。その後圧密非排水条件下での静的三軸試験および所定の拘束圧で圧密したあと、一定の軸差荷重を供試体が破壊するまで繰り返し載荷する疲労試験を実施した。なお、バックプレッシャーとして 5kgf/cm^2 を加え、繰り返し周波数は 0.2 Hz とし、波形は正弦波を用いた。両試料の物理的な性質を表-1 に示し、拘束圧が 5kgf/cm^2 のときの圧密非排水条件下での静的三軸試験結果として応力-ひずみ関係および間隙水圧-ひずみ関係を図-1 に示す。

表-1 凝灰岩、シルト岩供試体の物理的性質

岩種 (単位)	比重	湿潤密度 (gf/cm^3)	間隙比	引張強度 (kgf/cm^2)	一軸圧縮強度 (kgf/cm^2)
凝灰岩	2.31	1.754	0.771	5.76	69.5
シルト岩	2.68	1.991	0.712	2.21	34.8

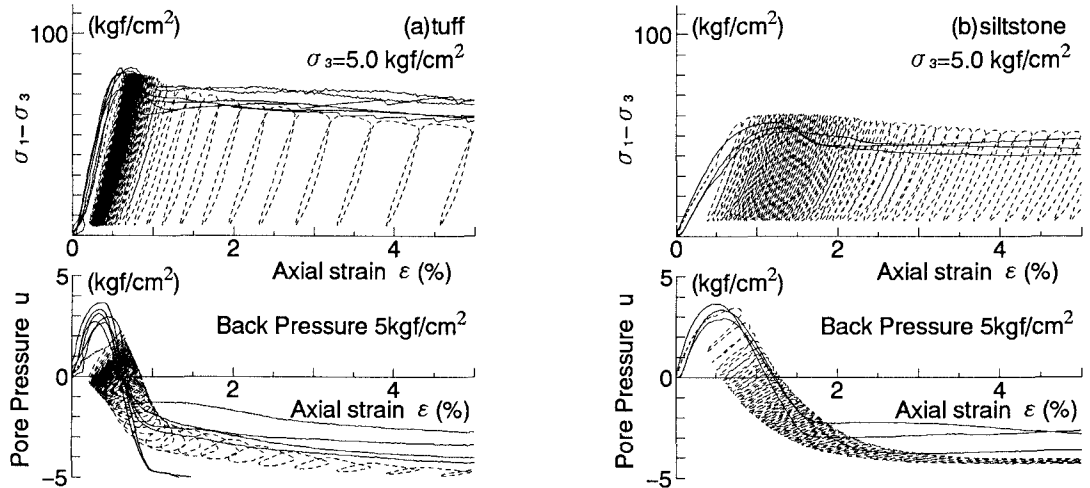


図-1 応力-ひずみ関係および間隙水圧-ひずみ関係
(a) 凝灰岩 (拘束圧 5kgf/cm^2) (b) シルト岩 (拘束圧 5kgf/cm^2)
なお、同じ拘束圧下での疲労試験結果も示してある。

2つの岩石の静的三軸圧縮試験結果を比較して注意すべき点は、シルト岩に比べて凝灰岩のほうがひずみ軟化領域での勾配が大きいこと、およびシルト岩のほうが間隙水圧のピーク後の勾配が小さいこと、すなわち凝灰岩のほうがより脆性的な挙動をしている点である。

3. 疲労試験結果

疲労試験の結果の一例として、図-2(a)に凝灰岩の時刻歴曲線（拘束圧 5kgf/cm²，初期軸差応力 42.8 kgf/cm²，応力振幅 76.1 kgf/cm²の場合）を、図-2(b)にシルト岩の時刻歴曲線（拘束圧 5kgf/cm²，初期軸差応力 34.7 kgf/cm²，応力振幅 52.7 kgf/cm²の場合）を示す。ただし初期軸差応力まで静的に载荷する部分の時間は図を見やすくするために実際にかかった時間の 1/10 をとっている。堆積軟岩に対する破壊の定義は、西ら(1983)⁵⁾ および西(1984)⁶⁾ で述べられているように不明確であるが、本論文では吉中ら^{7) 8) 9)} と同様に所定の応力振幅を保持できなくなったときの応力・ひずみをもって破壊を定義するものとする。図-2の中には破壊点を矢印で示してある。

また時刻歴曲線に示したデータを用いた応力-ひずみ関係および間隙水圧-ひずみ関係を 図-1 の中に静的三軸圧縮試験結果と一緒に示してある。同じ拘束圧下での静的試験結果と疲労試験の包絡線は強度および変形挙動に関しておおそ一致していることがわかる。

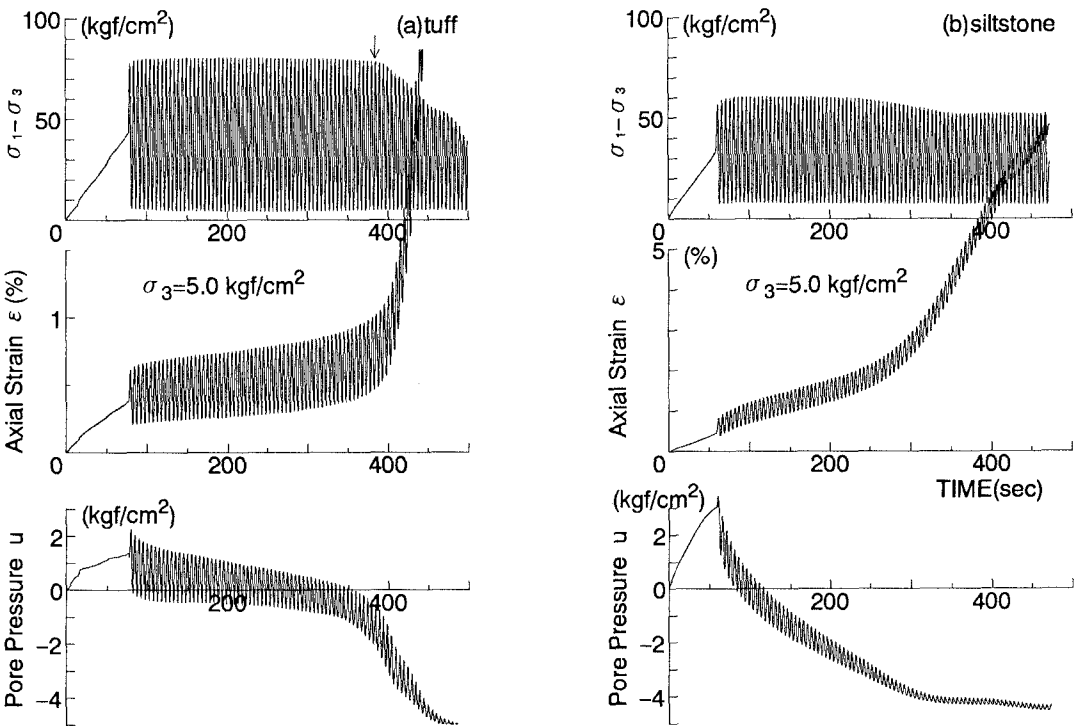


図-2 疲労試験結果 時刻歴曲線
(a) 凝灰岩 (b) シルト岩 図中の矢印は破壊点を示す。

4. 間隙水圧挙動の考察

図-1に示したように全体としてみた間隙水圧曲線は静的試験結果とほぼ等しく疲労試験に対して特記するような顕著な変化はみられない。そこで1 応力サイクルごとの間隙水圧の変化について調べてみる。まず、1 応力サイクルにおける間隙水圧の最大値 (u_{max}) と最小値 (u_{min}) に注目し、その差を

$$\Delta u = u_{max} - u_{min} \dots\dots\dots (1)$$

と表わすことにする。図-2(a)の凝灰岩供試体のデータおよび(b)のシルト岩のデータをもとに、横軸に繰り返し载荷回数 (N) をとり、縦軸に Δu をとると、図-3のようになる。この図からわかるように、 Δu は凝灰

岩供試体では破壊に到るまでに極小値と極大値をとるが、シルト岩供試体では減少傾向からほぼ一定値に収束する。上記の凝灰岩の例はその傾向がかなり顕著な場合であるが、他の凝灰岩供試体、特により高拘束圧下での結果のなかには極大値をとらずシルト岩と同じ傾向を示すものもある。

次に位相に注目する。载荷された応力に対して発生するひずみおよび間隙水圧は、試料が繰り返し応力に対して弾性的に応答しているうちはある一定の位相差をとまって同周期の挙動をすることが予想される。しかし岩石の内部構造に変化が起ったとすると位相差にずれを生じてくると考え、このずれを表わすパラメータを次のように定義する。1 応力サイクルに対して u_{max} と u_{min} を記録したときの軸差応力をそれぞれ σ_{high} および σ_{low} とし、

$$\chi = \frac{u_{max} - u_{min}}{\sigma_{high} - \sigma_{low}} \dots\dots\dots (2)$$

をもって、位相差のずれを表わすパラメータとする。このパラメータは供試体が弾性的に応答しているあいだは一定値をとり、位相のずれを生じてくると大きく変化する量である。図-2(a) の凝灰岩供試体および (b) のシルト岩のデータをもとに、横軸に繰り返し载荷回数 (N) をとり、縦軸に χ をとると、図-4 のようになる。この図から 凝灰岩供試体の χ ははじめほぼ一定値をとるが、ある点 (図中の矢印) で突如として変化する。この点での繰り返し回数 (N) のときの Δu の変化と比較するとこの回数は Δu が極小値をとる繰り返し回数と一致していることがわかる。一方シルト岩供試体の χ は減少傾向から一定値に収束するが、凝灰岩のように顕著な変化はみられない。 χ の特性は試料が脆性的に挙動するか延性的に挙動するかによって変化すると考えられ、適用にあたっては十分考慮しなければならない。

上記の Δu に相当する量を軸差応力およびひずみについて定義し、それぞれ $\Delta\sigma$ 、 $\Delta\varepsilon$ とする。

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{max} - \varepsilon_{min} \dots\dots\dots (4)$$

横軸に繰り返し回数 (N) をとり、縦軸 (左) に $\Delta\varepsilon$ 、縦軸 (右) に $\Delta\sigma$ をとって図-2(a) のデータをプロットすると図-5 のようになる。 $\Delta\sigma$ はほぼ一定値から減少に転じており、これは先に定義した供試体の破壊に相当する。一方、 $\Delta\varepsilon$ は単調増加から極大値をとり単調減少に転じている。極大値をとる時の繰り返し回数は軸差応力の減少に転じる点および Δu が極大値をとる点と一致している。図中には Δu が極小値を

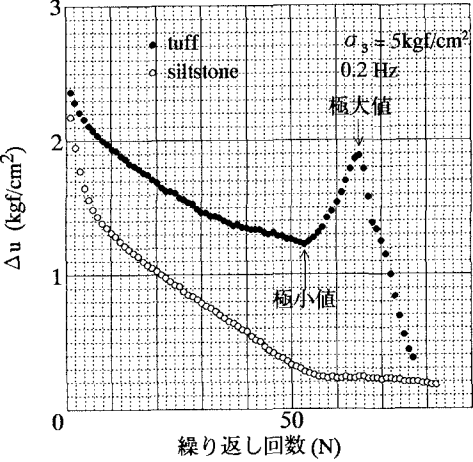


図-3 $\Delta u - N$ 関係

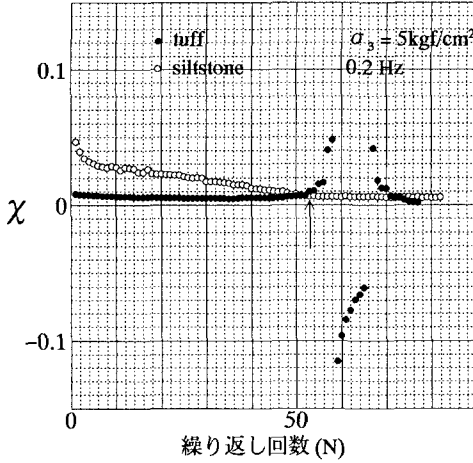


図-4 $\chi - N$ 関係

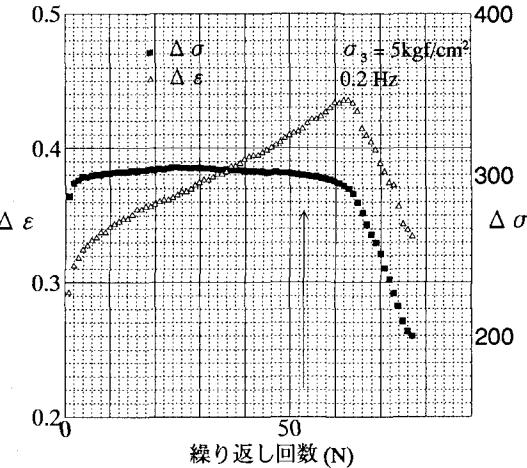


図-5 $\Delta\varepsilon, \Delta\sigma - N$ 関係

とり、 χ が突然変化する点での繰返し回数の位置を矢印で示してある。ここで注意すべき点は先に疲労破壊を定義した繰返し回数よりも矢印で示した回数のほうが小さいこと、つまり最終的な破壊が生じる前にその前兆現象をとらえることである。

最後に、繰返し回数に対して χ の変化する点での軸差応力をプロットすると図-6 のようになる。データのばらつきが大きくはっきりとしたことは言えないが、疲労破壊を定義した軸差応力に関する S - N 曲線に対応する曲線が得られる。この曲線は個々のデータから明らかなように S - N 曲線よりも若干原点側に位置する。今回の実験データのばらつきは主に凝灰岩自体の強度のばらつきを反映している。強度のより一定した試料を用い、これらのパラメータと内部構造の変化の関係について検討することを今後の課題とした。

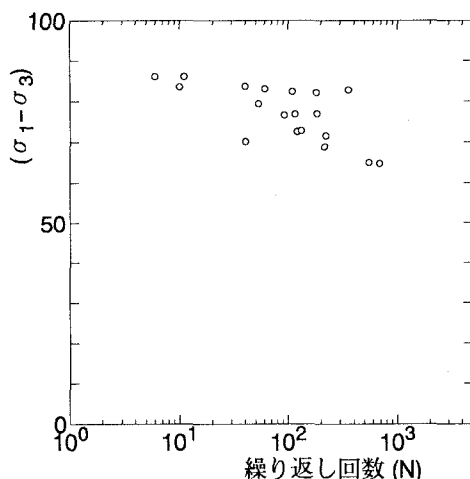


図-6 χ で定めた破壊強度 - N 関係

5. まとめ

凝灰岩およびシルト岩を試料として静的三軸圧縮試験と疲労試験を実施した。動的繰返し荷重下の堆積軟岩の強度・変形特性については全体としては既往の研究を追認するものであったが、1 応力サイクル中の応力・ひずみ・間隙水圧の挙動を調べることにより次のような結果が得られた。

- 1) 1 応力サイクル中の間隙水圧の最大値と最小値の差 Δu は極小値と極大値をとり、それぞれ内部破壊点と疲労破壊を表わす点に対応している。
- 2) 位相差のずれを表わすパラメータ χ の変化は Δu の極小値に対応して内部破壊を明確に決定できる。 χ の変化は脆性的に挙動する試料に対してより顕著である。

上記に示したパラメータについてはさらに詳細な検討が必要であるが、岩石中の内部破壊を表現していることが証明できれば繰返し荷重を受ける堆積軟岩の最終的な疲労破壊を事前に予想できる量として有用である。

参考文献

- 1) Scholz, C.H. and Koczyński, T.A. : Dilatancy anisotropy and the response of rock to large cyclic loads. *J. Geophys. Res.*, **84**, pp.5525-5534, 1979.
- 2) Costin, L.S. and Holcomb, D.J. : Time-dependent failure of rock under cyclic loading. *Tectonophysics*, **79**, pp.279-296, 1981.
- 3) 児玉 淳一, 石島 洋二, 石塚 与志雄, 安部 透, 中谷 篤史 : 花崗岩の疲労破壊に及ぼす応力振幅の影響, 第 23 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.292-296, 1991.
- 4) Akai, K. and Ohnishi, Y. : Strength and deformation characteristic of soft sedimentary rock under repeated and creep loading. *Proc. 5th ISRM*, pp.121-124, 1983.
- 5) 西 好一, 岡本 敏郎, 江刺 靖行 : 各種荷重条件下における泥岩の強度-変形特性とその統一的解釈, 土木学会論文報告集, No.338, pp.149-158, 1983.
- 6) 西 好一 : 繰返し荷重下における泥岩の強度-変形特性, 土木学会論文報告集, No.352, pp.41-50, 1984.
- 7) 吉中 龍之進, 荻野 亥一郎, 鈴木 雅章 : 動的繰返し三軸試験による堆積軟岩の強度特性, 土木学会第 43 回年次講演会, III, pp.676-677, 1988.
- 8) 吉中 龍之進, 荻野 亥一郎, 星 文高 : 三軸圧縮試験による軟岩の動的強度特性, 第 24 回土質工学研究発表会, pp.1081-1082, 1989.
- 9) 吉中 龍之進, 荻野 亥一郎, 上田 幸男 : シルト質軟岩の動的強度・変形特性, 土木学会第 45 回年次講演会, III, pp.488-489, 1990.