

(94) 飽和軟岩の疲労破壊挙動—破壊の時間依存性
について—

東京電力 正会員 杉 正
東京電力 正会員 ○森山 真

FATIGUE FAILURE BEHAVIOR OF SOFT ROCKS
---TIME DEPENDENT CHARACTERISTICS OF FAILURE---

Tadashi Sugi, Tokyo Electric Power Company
Makoto Moriyama, Tokyo Electric Power Company

A B S T R A C T

This paper describes some results of experiments of mudstone (Kazusa Group) in terms of mechanical characteristics of fatigue and cyclic loaded deformation.

The experiments were carried out using a triaxial testing machine with mainly cyclic loading tests. Testing conditions were as follows:

Size of specimen; $\phi 5 \times 10$ cm, Method; Consolidated and Un-drained
Lateral stress; 5, 10 and 30 kgf/cm²
Axial stress; 0.7 to 1.2 times of static strength of uni-axial tests
Frequency of cyclic load; 0.5, 0.1 and 0.01 Hz

Major results obtained from the experiments are (1) within a region of frequency of cyclic loading stated above, the numbers of cycles for failure comes to larger as the frequency comes to larger in every failure strength ratio (dynamic strength divided by static one). But, the accumulated durations of loading for failure show almost constant, if the frequency is varied, (2) skeleton curves of duration vs. strain of cyclic loading tests show in the same manner as usual creep tests.

1. まえがき

将来の電力貯蔵技術である超電導電力貯蔵システムにおいては、空洞内の周辺岩盤に1日1サイクルの長周期繰り返し荷重が作用することとなり、岩盤空洞安定性の評価のためには岩盤の疲労・変形特性の把握が必要となる。これらの貯蔵施設を消費地近傍の関東地域に立地を想定した場合、同地域に広く分布する上総層群が立地の対象岩盤と考えられる。

本報告は、飽和した軟岩供試体（泥岩）を用いて側圧をパラメータとした静的三軸圧縮試験ならびに側圧、載荷周波数および載荷荷重レベル等をパラメータとした繰り返し載荷試験を実施し

- (1) 繰り返し載荷に伴うひずみ・間隙水圧の変化
- (2) 静的強度と疲労強度の比較
- (3) 側圧の疲労強度に及ぼす影響
- (4) 疲労破壊の時間依存性

等について検討し、軟岩の強度・変形特性について考察したものである。

表-1 試験軟岩の物理的性質、力学的性質の一部

2. 試料と実験内容

2.1 試料

実験に用いた試料は上総層群国本層

比 重	G s = 2.703	間 隙 比	e = 0.744
自然含水比	w = 25.9%	透 水 係 数	$9 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-7}$
湿 潤 密 度	$\gamma_d = 1.958 \text{ gf/cm}^3$	一 軸 圧 縮	qu = 31~40
乾 燥 密 度	$\gamma_t = 1.550 \text{ gf/cm}^3$	強 度	kgf/cm ²

(第四紀更新世前期)に属するものであり、その物理的性質および力学的性質は表-1に示すとおりである。供試体の飽和は真空負荷により24時間脱気し試験機にセットした後、バックプレッシャーをかけることにより行なった。

2.2 試験機

試験機は、静的三軸圧縮試験および繰り返し載荷試験とも電気-油圧サーボ機構で載荷する中容量振動三軸圧縮試験機を使用した。

2.3 静的三軸圧縮試験

静的三軸圧縮試験は表-2に示す条件で実施した。

2.4 繰り返し載荷試験

繰り返し載荷試験は、図-1に示すように等方圧密終了後、初期軸差応力(繰り返し載荷荷重振幅の約1/2)まで静的に載荷し、その後、初期軸差応力を中心に一定振幅の荷重で繰り返し載荷を行なった。試験条件を表-2に、実施した試験ケースを表-3に示す。

表-2 静的三軸圧縮試験および繰り返し載荷試験の試験条件

供試体寸法	$\phi=5\text{cm}, h=10\text{cm}$
含水状態	飽和状態
排水条件	圧密非排水
圧縮方向	地層に直角
側圧(σ_s)	5, 10, 30kgf/cm ²
静的	載荷速度 0.03%/min
繰り	周波数 0.5, 0.1, 0.01Hz
返	波形 正弦波
し載	載荷荷重 静的最大軸差応力の70~120%
荷	載荷回数 最大 1万回

表-3 繰り返し載荷試験の試験ケース

載荷周波数 側圧(σ_s)(kgf/cm ²) 載荷荷重レベル	0.5 Hz			0.1 Hz			0.01Hz		
	5	10	30	5	10	30	5	10	30
100~120%	●	●	○	○	○	●	-	○	○
90~100%	○	●	○	●	○	○	○	○	○
80~90%	○	-	-	-	○	○	○	○	○
70~80%	-	-	-	○	○	-	-	○	○

※●は2ケース実施, ○は1ケース実施, -は実施せず

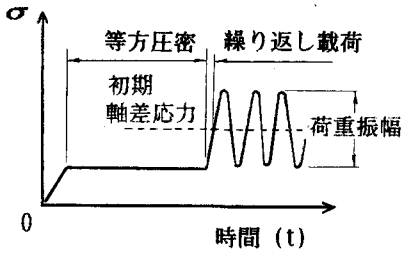


図-1 繰り返し載荷パターン

3. 実験結果と考察

3.1 静的三軸圧縮試験

表-2に示すように静的三軸圧縮試験は、側圧5, 10, 30kgf/cm²の3ケースについて実施した。軸差応力、軸ひずみ、間隙水圧の関係を図-2に示すがこの図より以下のことがいえる。

- ①側圧が高くなるほど供試体は延性的な破壊挙動を示し、最大応力到達後も高い応力レベルを維持しつつ塑性変形がひずみ数%程度まで進行していく。
- ②破壊ひずみの大きさは、1.09~1.88%の間に分布しており、とくに側圧が高い場合は延性的に破壊がおこるため、その値を特定することは困難である。

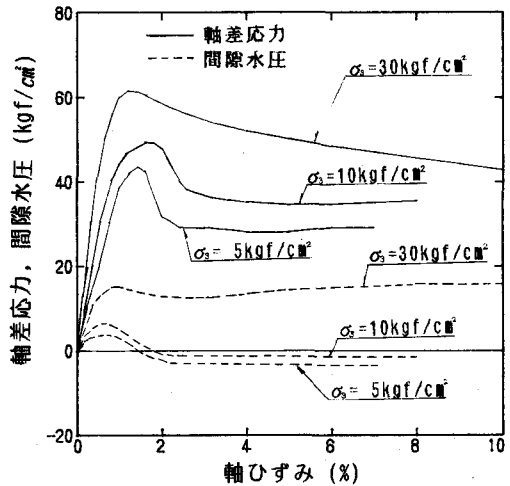


図-2 軸差応力、軸ひずみ、間隙水圧の関係

③間隙水圧の発生傾向は、側圧5, 10kgf/cm²の場合、応力の増加とともに増大し、応力-ひずみ関係が非線形になり始める頃最大になり、その後は次第に減少していき塑性領域にはいるころには負圧になり供試体は体積膨脹を生じている。これに対し側圧30kgf/cm²の場合は、ピークに達した後の間隙水圧の低下はわずかで10kgf/cm²以上の圧力のまま推移する。

3.2 繰り返し載荷試験

繰り返し載荷試験は、表-2に示すように側圧、載荷応力レベル、載荷周波数をパラメータとして実施し繰り返し載荷に伴うひずみ、応力、間隙水圧を測定した。

(1)繰り返し載荷回数とひずみの関係、(2)繰り返し載荷回数と間隙水圧の関係、(3)破壊応力比と繰り返し載荷回数の関係、(4)破壊応力比と繰り返し載荷累計時間の関係をそれぞれ図-3, 4, 5, 6に示す。

3.2.1 繰り返し載荷回数とひずみの関係

図-3は横軸に繰り返し載荷回数を対数で、縦軸に1サイクル中の最大ひずみを表わしたものであるがこれより以下のことがいえる。ひずみの進行は、大きく次の3段階に区分することができる。

- ①繰り返し載荷開始後のひずみ急増段階
 - ②ひずみ漸増段階
 - ③破壊直前のひずみ急増段階
- これは、クリープ試験でみられるものと同じひずみの進行現象である。

繰り返し載荷応力レベルの高いものほど各繰り返し載荷段階におけるひずみの絶対値および1回当たりの増加率が大きいが、破壊ひずみは繰り返し載荷応力レベルの低いものほど大きく静的三軸圧縮試験の破壊ひずみ（ピーク時の値）をうわまわる。

図-3-(a)は繰り返し載荷周波数の違いによる影響を調べるために側圧の同じもの(10kgf/cm²)をまとめたものであるが周波数の低いものほどひずみの進行が速く少ない繰り返し載荷で破壊する傾向にあった。

図-3-(b)は側圧の違いによる影響を調べるために周波数の同じもの(0.1Hz)をまとめたものであるが、側圧の影響は顕著に認めなかった。

3.2.2 繰り返し載荷回数と間隙水圧の関係

図-4は横軸に繰り返し載荷回数を対数で、縦軸に1サイクル中の最大間隙水圧を表わしたものである。側圧5, 10kgf/cm²の場合、繰り返し載荷回数の増大に伴ない間隙水圧は低下していく傾向にあるのに対し、側圧30kgf/cm²

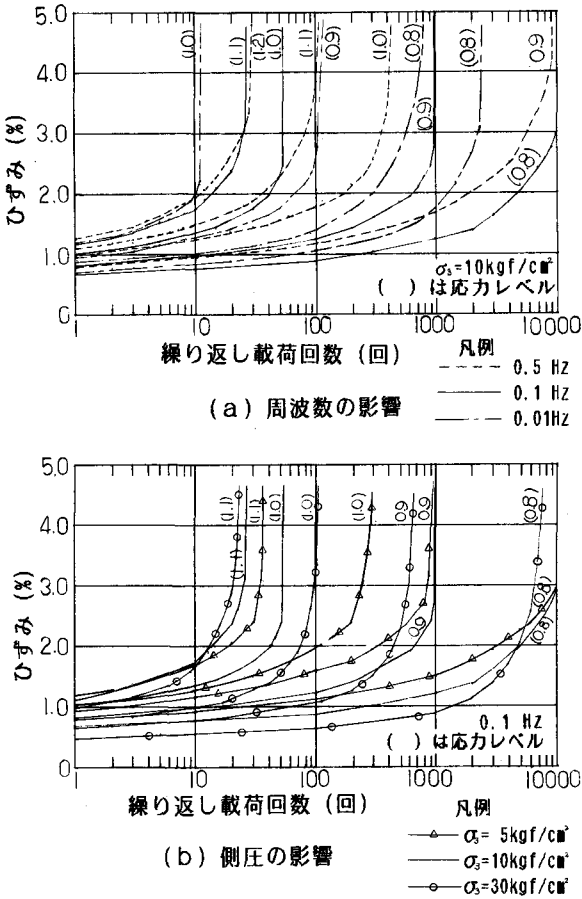


図-3 繰り返し載荷回数とひずみの関係

で繰り返し載荷応力レベルが低い場合は、試験開始直後は低下するが途中から上昇に転じている。また、側圧30kgf/cm²の破壊直前の間隙水圧の値は試験開始時の値より大きく供試体の体積膨脹はほとんどおこっていないものと思われる。このような間隙水圧の発生傾向は静的三軸圧縮試験におけるものとよく対応しており側圧10kgf/cm²以下と側圧30kgf/cm²の間で供試体の破壊形態が変化する傾向であった。

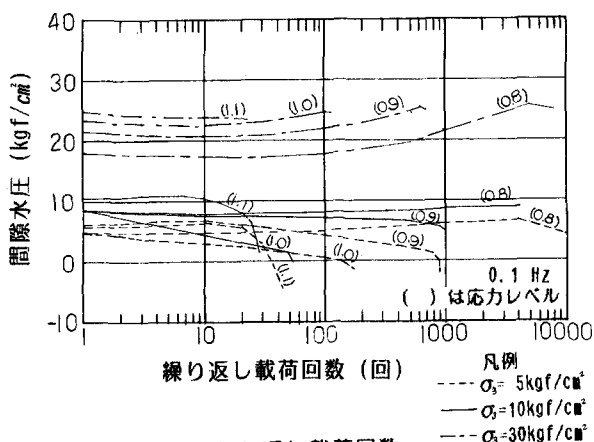
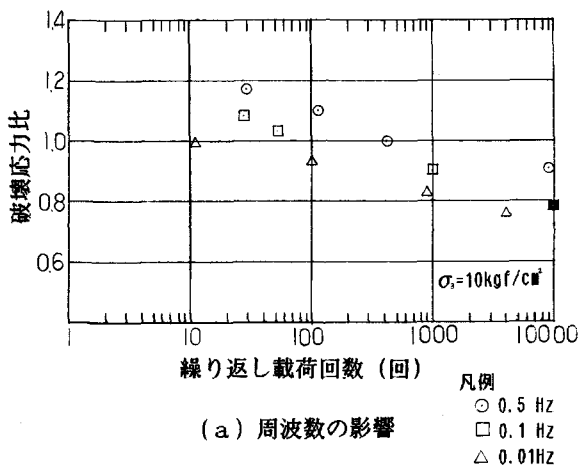


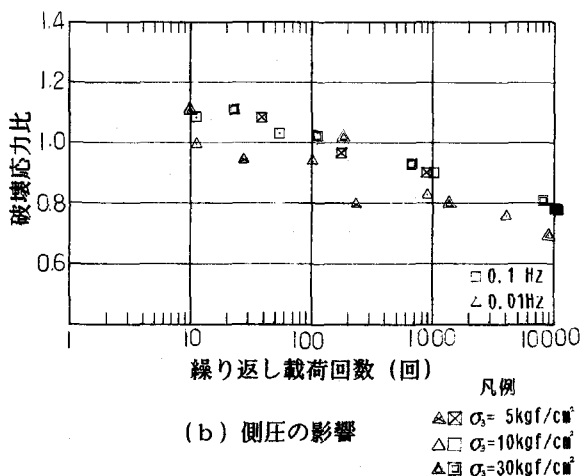
図-4 繰り返し載荷回数と間隙水圧の関係

3.2.3 破壊応力比と繰り返し載荷回数の関係

図-5は縦軸に破壊応力比（静的三軸圧縮試験の最大軸差応力（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ）を1.0とした場合の応力比：以下破壊応力比という）、横軸に繰り返し載荷回数を表したものである。破壊の定義は1載荷当りの軸ひずみが無限大になった時点、すなわち供試体がつぶれた時とした。1万回で破壊しなかったものは非破壊として1万回のところに黒ぬりで表示したこの図より、今回、試験をした軟岩では、破壊応力比と破壊時の繰り返し載荷回数の関係はスムーズな曲線上にプロットされ、破壊応力比の低下に伴ない繰り返し載荷回数が増加していく。



(a) 周波数の影響



(b) 側圧の影響

図-5-(a)は繰り返し載荷周波数の違いによる影響を調べるため側圧一定（10kgf/cm²）で周波数をパラメータとして整理したものである。周波数の高いものほど破壊応力比が大きく周波数依存性がみとめられた。繰り返し載荷回数1万回に対応する破壊応力比を推定した場合0.5Hzで0.9、0.1Hzで0.8、0.01Hzで0.7程度となる。なお、側圧5、30kgf/cm²でも同様の傾向であった。

図-5-(b)は側圧の違いによる影響を調べるため周波数一定（0.1、0.01Hz）で側圧をパラメータとして整理したものである。周波数0.1Hzでは破壊応力比はほぼ同一線上に並び側圧の影響は顕著でなかったが、周波数0.01Hzでは側圧が低いものほど破壊応力比が小さくなる結果が得られた。なお、0.5Hzは0.1Hzの場合と同じ傾向であった。

図-5 破壊応力比と繰り返し載荷回数の関係

3.2.4 破壊応力比と繰り返し載荷累計時間の関係

図-6は縦軸に破壊応力比、横軸に繰り返し載荷累計時間 ($1/f \times$ 繰り返し載荷回数 $\times 1/3600$, f =周波数) を表わしている。

図-6-(a)は周波数の違いによる影響を調べるため側圧一定 (10kgf/cm^2) で周波数をパラメータとして整理したものである。繰り返し載荷回数で示した図では周波数依存性が認められた破壊応力比も繰り返し載荷累計時間になおして表示すればほぼ同一線上にプロットされ、周波数の影響は顕著に認められない。すなわち、破壊は繰り返し載荷回数よりも供試体に載荷されている累計時間に左右されクリープ挙動と同様の傾向をもつものと思われる。なお、側圧 5, 10kgf/cm^2 でも同様の傾向であった。

図-6-(b)は側圧の違いによる影響を調べるため、周波数一定 ($0.1, 0.01\text{Hz}$) で側圧をパラメータとして整理したものである。周波数 0.1Hz では破壊応力比はほぼ同一線上に並び側圧の影響は顕著でなかったが、周波数 0.01Hz では側圧が低いものほど破壊応力比が小さくなる結果が得られた。なお、 0.5Hz は 0.1Hz の場合と同じ傾向であった。

4. まとめ

上総層群の泥岩について繰り返し載荷を中心とした試験により以下のことが把握できた。

①今回実施した繰り返し載荷周波数の範囲 ($0.5, 0.1, 0.01\text{Hz}$) では、載荷回数で比

較した場合、周波数の高いものほど破壊応力比が大きく周波数依存性が認められたが、載荷累計時間で比較した場合は周波数の影響は認められなかった。

②繰り返し載荷に伴うひずみの進行は、クリープ試験のものと同じ傾向であった。

③繰り返し載荷周波数が $0.5, 0.1\text{Hz}$ の場合は、側圧の影響は顕著に認められないが、 0.01Hz (長周期) の場合は破壊応力比が小さくなる傾向が認められた。

しかし、超電導電力貯蔵システムは、岩盤に1日1回の長周期で繰り返し荷重が作用することから、繰り返し載荷周波数を1ランク下げた 0.001Hz での試験およびクリープ特性試験ならびに他の地点より採取した試料について更に実験を行なっていく予定である。

〔参考文献〕

超電導エネルギー貯蔵システムに関する調査研究報告書, ENAA, 1985- プ3 他

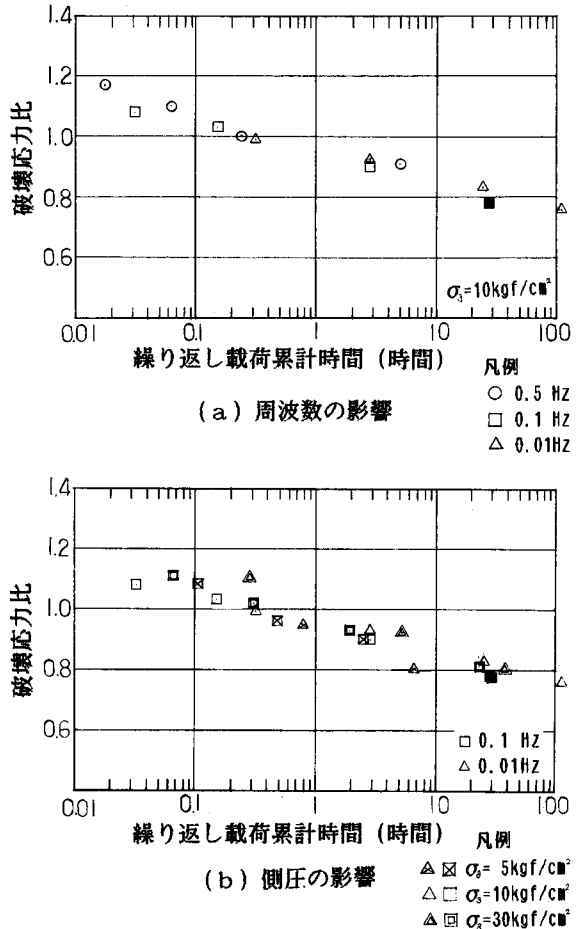


図-6 破壊応力比と繰り返し載荷累計時間の関係