

(93) 繰返し载荷を受ける花崗岩の疲労特性

清水建設(株)技術研究所 正会員 ○石塚与志雄

清水建設(株)技術研究所 正会員 安部 透

北海道大学大学院 児玉 淳一

Fatigue Property of Granite under Cyclic Compressive Load

Yoshio ISHIZUKA SHIMIZU CORPORATION

Tohru ABE SHIMIZU CORPORATION

Junichi KODAMA HOKKAIDO UNIVERSITY

Abstract

Uniaxial compressive cyclic load tests of granite have been performed to investigate a fatigue property of hard rocks. This paper especially discusses about the influence of water saturated condition and stress amplitudes on fatigue behaviors. In experiments, a loading strain velocity-dependence of a static strength and a frequency-independence of a fatigue strength was confirmed in advance of fatigue tests. The obtained S-N curves showed that the fatigue strength of granite in water saturated condition was about 50% of the static strength when 4×10^4 cycles were applied. In a dry condition the fatigue strength was about 60%. Stress amplitudes has no great influence on the fatigue behavior compared with the maximum loading stress. The volumetric strain behavior was observed with primary, steady-state and tertiary stages.

1. はじめに

超電導エネルギー貯蔵施設(SMES)^{1) 2)}においては、超電導コイルに膨大な電磁力が発生するため、その力を地下岩盤で支持することになる。そのため、電磁力に対するSMESの安定性評価、地下空洞設計のためには、長期繰返し载荷に対する立地岩盤の疲労特性の検討が必要となる。ここでは、岩盤の疲労特性の基礎的検討として、室内で稲田花崗岩の繰返し载荷試験を実施し、岩石の疲労特性を検討することにした。

硬岩の疲労特性については、西松³⁾、Attewell⁴⁾、Haimson^{5) 6)}らの研究により、疲労強度は静的強度の60～80%に低下すること、変形特性はクリープ変形特性と同様の傾向を示すことなどが明らかとなっている。筆者ら^{7) 8) 9)}も乾燥状態の稲田花崗岩について一軸・三軸圧縮下の疲労特性を検討するとともにひずみ速度が静的強度に与える影響について調べてきた。その結果、疲労強度の基準となる静的強度を通常強度(ひずみ速度 $\dot{\epsilon}=0.05\%/min$ に対する強度、以下、“通常”の静的強度と呼ぶ)とすると、疲労特性は周波数に大きく依存する(周波数が低下すると破壊回数も減少)が、载荷周波数に対応するひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ における静的強度(以下、“周波数に対応する静的強度”と呼ぶ)を基準とすると破壊回数は周波数に依存しないことが明らかとなった。これにより、高い周波数の疲労試験で長周期繰返し時の疲労強度特性が推定できることを示した。この結果、乾燥状態の稲田花崗岩の疲労強度は、静的強度を基準として一軸圧縮下で60～65、三軸圧縮下で70～75%に低下することなどが明らかとなった。

岩石の疲労特性は、最大载荷応力レベル、周波数とともに岩石中の含水状態、载荷振幅応力などに影響されるものと考えられる。そのため、今回は、含水飽和状態における岩石の疲労特性および载荷振幅が疲労特性に与える影響について検討することにした。また、岩石の疲労破壊・変形機構の基礎的な検討のために、AE計測を行うとともにクリープ試験も実施し、クリープ破壊・変形特性との比較も行うことにした。

2. 実験方法の概要

岩石試験片は既報^{7) 8) 9)}同様、筑波産の稲田花崗岩(寸法 $\phi 50 \times h 100$ mmの円柱供試体)を用いた。試験装置は最大圧縮载荷能力450tを有するMTS社製サーボコントロール試験装置を使用した。試験中、図-1に

示すように、乾燥状態の岩石については2種類の変位計により軸方向ひずみと周方向ひずみを測定するとともに、AEセンサー（共振周波数140kHz、NF社製AE-901U）を直接岩石に取り付けてリングダウンカウント（単位時間内に設定したしきい値（20mV）を超えるピークの数）の発生率と累積値を計測した。また、含水飽和状態の試験は、供試体を水槽内に入れ、試験中も飽和状態を保持できるようにした。飽和状態の岩石については軸方向ひずみのみ測定した。ここで、乾燥状態の岩石はデシケータ内に1週間以上放置したものを、飽和状態の岩石は真空脱気で含水させた後1か月以上水中放置したものを実験に使用した。

今回実施した実験項目とその内容・方法は以下のである。

(1)含水飽和状態が岩石の疲労特性に与える影響： 载荷応力設定の基準となる周波数に対応した静的強度を把握するために、まず、乾燥および飽和状態それぞれの供試体について、载荷ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が静的強度に与える影響を調べる。 $\dot{\epsilon}$ の範囲は $5 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^2 \%$ /minで、繰返し疲労試験における周波数に換算すると $1 \times 10^{-4} \sim 3$ Hzに相当する。

疲労試験は、载荷応力 σ は周波数に対応した静的強度 σ_c を基準とした応力比 $S = \sigma / \sigma_c$ をパラメータとして、図-2に示すように最大载荷応力 S_{max} 、最小载荷応力 S_{min} および振幅 S_a を設定して繰返し载荷を行った。なお、振幅の影響を調べる試験以外は S_{min} をほぼゼロとして試験を行った。なお、载荷周波数は周波数依存性の試験を除いて0.5Hzとした。周波数が疲労特性に及ぼす影響については、前回の試験⁹⁾同様、 S_{max} を静的強度 σ_c の0.8一定として周波数 F を $2.5 \times 10^{-3} \sim 0.5$ Hzの範囲で変化させて破壊に至る繰返し回数 N を求めることにした。つづいて、 S_{max} を変化させた繰返し試験を行い、疲労強度特性（ $S-N$ 関係）を調べた。

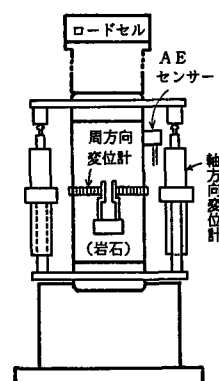


図-1 試験概要
(乾燥状態)

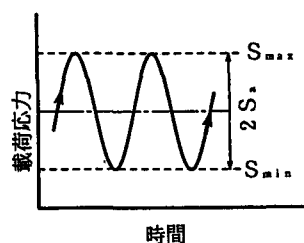


図-2 繰返し载荷状況

(2)応力振幅が岩石の疲労特性に与える影響： 応力振幅 S_a を変化させた試験は、周波数を0.5Hz一定とし、 $S_{max}=0.8$ について $2 S_a=0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4$ の5段階、 $S_{max}=0.7$ について $2 S_a=0.7, 0.5, 0.3$ の3段階について実施した。試験片は乾燥状態の岩石とした。

(3)疲労破壊・変形特性の検討： 繰返し载荷による破壊・変形特性と一定载荷応力による破壊・変形特性の比較のために、载荷応力 $S_{max}=0.9, 0.8, 0.7$ の3ケースについてクリープ試験を行った。なお、試験時間は最大3日間とし、3日を超えて破壊しない供試体を非破壊とした。

以上の実験では、载荷波形は正弦波とし、応力制御で载荷した。なお、繰返し回数 N は最大40,000回（約1日）とし、40,000回を超えても破壊しない供試体は非破壊と扱った。

3. 実験結果

3.1 疲労破壊・変形特性の検討

(1)疲労試験中のAE発生および残留ひずみ： 乾燥状態の岩石の繰返し载荷試験（ $S_{max}=0.8, 0.7$ ）における体積ひずみ（膨張を正）とAE計測結果（リングダウンカウントの発生率と累積値）との関係を図-3に示す。なお、破壊回数 N は、 $S_{max}=0.8$ で47、 $S_{max}=0.7$ で532である。繰返し载荷による体積ひずみの推移は、大きく3段階に分けることができる。第1段階は载荷初期で、载荷と同時に大きく膨張する。第2段階は定常的に体積膨張する領域でほぼ一定速度で変形し、最後の第3段階では急激に体積ひずみが増加して破壊に至る。AEの発生状況は、体積ひずみの推移とよい対応を示し、载荷開始直後に多くAEが計測されるが、体積ひずみの変化が定常になる第2段階では、試験中で最も小さな発生率となる。つづいて、体積膨張が急増する直前からAEも急増し始め、リングダウンカウントの累積曲線の変曲点が現れる。また、 $S_{max}=0.8$ と 0.7 でAEの発生状況を比較すると、第2段階の定常状態における発生率が大きく異なり、 S

$\sigma_{\max}=0.8$ の場合の発生率が 0.7 と比較して非常に高い。これは、 $\sigma_{\max}=0.8$ の方が 1 回当たりの繰返し載荷で岩石に大きな損傷を与えていることを示している。

また、繰返し載荷による残留ひずみ（除荷時における非回復のひずみ）の累積は、図-4 の載荷応力振幅を変えた試験（ $\sigma_{\max}=0.8$ で、振幅値 $2Sa=0.0, 0.2, 0.4$ の 3 ケース）の応力-軸方向ひずみ関係に示すように、1 回目の載荷で大きく残留ひずみが発生し、その後、破壊直前まで徐々にひずみが増加していく。1 回目の載荷で生じる残留ひずみは、大きい場合では全残留ひずみの約 50% にも達し、疲労による総変形に大きな比重を占める。

(2)クリープ試験結果との比較： 載荷応力 $\sigma_{\max}=0.9, 0.8$ （基準は通常の静的強度とした）に対するクリープ試験結果（体積ひずみ-時間関係）を図-5 に、 $\sigma_{\max}=0.8, 0.7$ の繰返し試験結果を図-6 に示す。ここで、図-5 の(b)は非破壊の試験結果である。また、クリープ、繰返し載荷試験各々の破壊に至る時間を最大載荷応力毎にまとめて表-1 に示す。これによると、クリープ試験では $\sigma_{\max}$ が 0.9 で 9~77 分で破壊するが、0.8 では 1 供試体が 169 分で破壊した以外は非破壊となるのに対して、繰返し試験では、 $\sigma_{\max}=0.9$ で 4 秒、0.8 で 16~94 秒、0.7 では 10~18 分で破壊し、一定載荷のクリープ試験と比較すると早期に破壊に至る。最大載荷応力が同一でも、一定応力載荷よりも繰返し載荷の方が破壊寿命が短く、繰返し載荷が岩石の損傷に大きな影響を与えている。

つぎに、クリープ変形は図-5(a)に示すように、一般的なクリープ試験で見られる遷移、定常、加速の形態をとる。これに対して、疲労試験時の体積ひずみ（図-6）は前節で記したように、載荷初期の膨張、第 2 段階の定常領域および最後の急激な体積膨張領域に分けることができ、時間軸を無視すれば、クリープ変形と同様である。

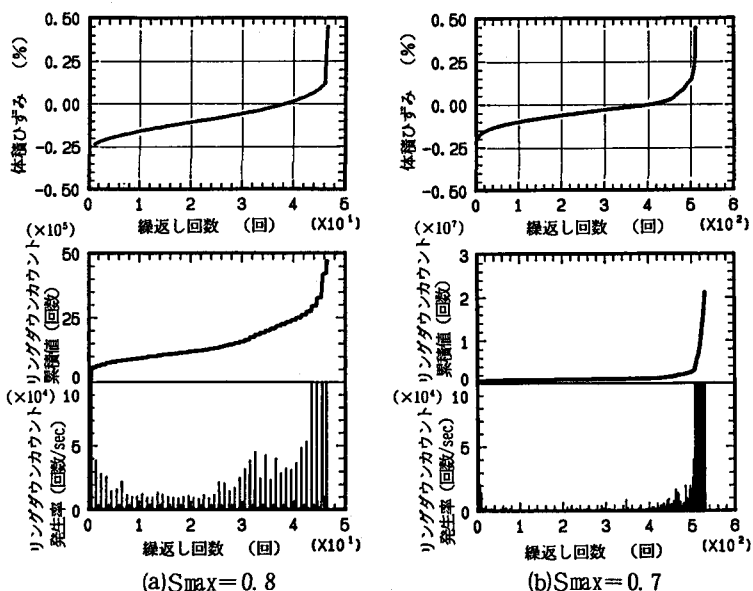


図-3 体積ひずみと AE の関係

3.2 含水飽和状態が岩石の疲労特性に与える影響

(1)ひずみ速度-強度関係：

乾燥状態の静的強度 σ_c は、既報⁹⁾で記したように一軸・三軸圧縮状態ともひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の増加に伴って増大し、ひずみ速度 $5 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^2 \%$ /min の範囲では、 σ_c (MPa) と $\dot{\epsilon}$ (%/min) の関係は、 $\dot{\epsilon}$ を対数軸とした片対数グラフ上で線形となる。今回実施した一軸圧縮下における飽和状態の試験を示すと図-7 のようになる。飽和状態の強度も乾燥状態と同様にひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ で表示することができ、次式で近似できる。

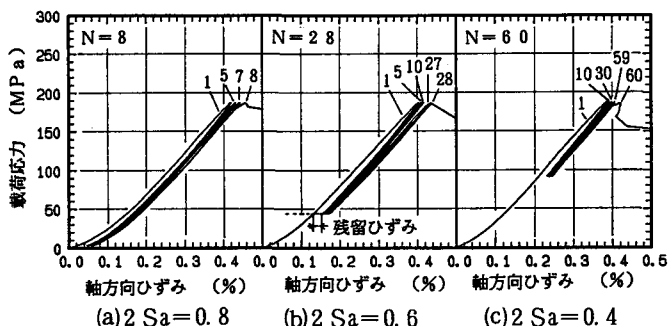


図-4 載荷振幅値を変化させた繰返し試験結果 ($\sigma_{\max}=0.8$)

飽和状態：

$$\sigma_c = 199.3 + 15.60 \log \dot{\epsilon} \quad \text{--- (1)}$$

乾燥状態：

$$\sigma_c = 213.0 + 14.87 \log \dot{\epsilon} \quad \text{--- (2)}$$

飽和状態の強度は乾燥状態と比べて、ひずみ速度の大小によらず6～7% (14～15MPa)程度低下する。載荷周波数0.5Hz($\dot{\epsilon}=26.3\%/min$)の静的強度は、通常の強度よりも約20%増加する。

(2)疲労破壊の周波数依存性：

既報⁹⁾で示したように通常の静的強度を基準とした場合の破壊回数Nは載荷周波数Fに大きく依存するが(一軸圧縮下0.5Hzで約5,000回、 $2.5 \times 10^{-4} Hz$ で約5回)、載荷の基準を“周波数に対応した静的強度”とすると、各周波数における破壊回数には大きな周波数依存性は見られない。同様に、飽和状態についても調べてみると図-8のようになる。乾燥状態と比較して僅かに周波数が小さくなると破壊回数が低下するデータもあるが、大きな周波数依存性は認められなかった。しかし、岩石が水で飽和されていると応力腐食が乾燥状態よりも促進するため、周波数が小さくなると破壊回数も小さくなるものと予想されるが、今回の試験範囲では大きな差はなかった。

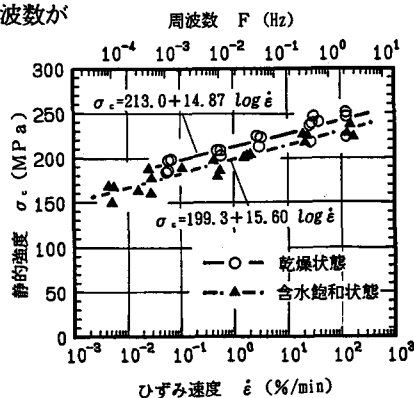


図-7 静的強度のひずみ速度依存性

(3)S-N関係：

載荷周波数を0.5Hzとし、0.5Hzに対応する静的強度(式(1)、(2))を基準として最大載荷応力を変化させて繰返し載荷試験を行い、S-N関係を調べた。乾燥状態と飽和状態それぞれに対するS-N関係を図-9に示す。S-N関係はつぎのように近似される。

$$\text{飽和状態} : S = 0.9532 - 0.10109 \log N \quad \text{--- (3)}$$

$$\text{乾燥状態} : S = 0.9369 - 0.08177 \log N \quad \text{--- (4)}$$

飽和状態の方が乾燥状態に比較して疲労強度の低下の割合がやや大きく、疲労強度(ここでは、40,000回で破壊する応力を破壊強度とする)は、乾燥状態で約60%(静的強度を基準とした割合)に、飽和状態では約50%に低下する。

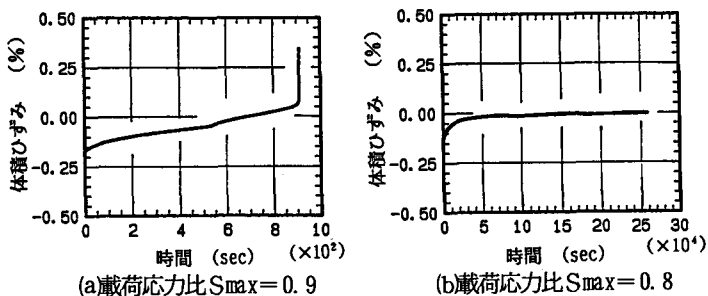


図-5 クリープ試験の体積ひずみ-時間関係

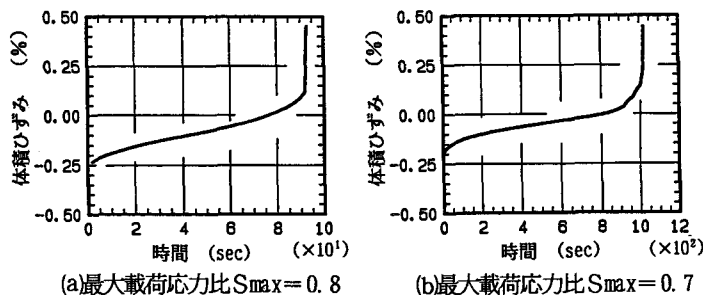


図-6 疲労試験の体積ひずみ-時間関係

表-1 破壊寿命

載荷応力 S	クリープ試験 sec	繰返し試験 sec (回数)
0.9	540 900 4620	4 (2) 4 (2) —
0.8	10140 非破壊*) 非破壊*)	16 (8) 56 (28) 94 (47)
0.7	非破壊*) 非破壊*) 非破壊*)	574 (287) 578 (289) 1064 (532)
0.6	— — —	非破壊*) 非破壊*) —

*非破壊の定義：
クリープ： $2.6 \times 10^5 sec$ (3日)まで非破壊
繰返し： $8.0 \times 10^4 sec$ (4万回) "

3.3 応力振幅が岩石の疲労特性に与える影響

载荷応力振幅を変化させた場合 ($S_{max}=0.8$ において振幅を $2S_a=0.8, 0.6, 0.4$ の3ケース) の応力一軸方向ひずみは図-4に示したようで、振幅レベルで破壊に至る回数 N に差があるものの、疲労変形特性には大きな差はない。すなわち、载荷初期に大きく変形した後は徐々に変形 (定常的な変形) し、破壊直前に大きく変形して破壊に至る。

つぎに、振幅値が疲労破壊寿命に与える影響を調べるために、縦軸に振幅値 $2S_a$ 、横軸に破壊回数 (対数軸) N をとって図化すると図-10のようになる。試験結果は大きくばらつくが、振幅値が小さくなると破壊回数が増加する傾向を示す。しかし、前節で示したような最大载荷応力レベル (S_{max}) が破壊回数に与える影響 ($S-N$ 関係) と比較すると、応力振幅が疲労強度に与える影響は小さい。

4. まとめ

今回の実験結果を項目毎にまとめると以下のようになる。

(1) 疲労破壊・変形特性: 繰返し载荷による岩石の変形は、载荷開始直後 (特に、1回目の载荷) と破壊直前に大きく発生する。疲労変形はクリープ変形と同様に载荷初期の遷移領域、ほぼ一定速度で変形する定常領域および急激に破壊に至る加速領域の3領域に分けることができる。また、繰返しによる残留ひずみは1回目の载荷時に大きく発生する。また、破壊寿命をクリープ試験と比較すると、最大载荷応力が同一でも、繰返し载荷の方がはるかに短く、繰返し载荷が岩石の損傷に大きな影響を与える。

(2) 含水飽和状態が疲労特性に与える影響: “周波数に対応した静的強度” を基準とした疲労試験を $2.5 \times 10^{-3} \sim 0.5 \text{ Hz}$ の周波数範囲で行うと、破壊回数は乾燥状態と同様に周波数依存性を示さない。また、飽和状態の疲労破壊特性も $S-N$ 関係で近似することができるが、疲労強度は静的強度の約50%に低下し、乾燥状態 (約60%に低下) よりも大きく低下する。

(3) 応力振幅が疲労強度に与える影響: 最大载荷応力が同一でも応力振幅が小さくなると破壊回数が増加する傾向を示す。しかし、応力振幅が疲労強度特性に与える影響は、最大载荷応力と比較すると小さい。

これまで、硬岩の代表として稲田花崗岩を用いて、各種条件下 (拘束圧の影響、含水飽和状態、周波数、振幅値) の疲労破壊特性について検討してきたが、岩石の疲労特性は、岩種によって大きく異なるものと予想される。そのため、今後は他の岩石についても疲労特性を調べていきたい。

【参考文献】

- 1) 超電導エネルギー貯蔵システムに関する調査研究(3), NEDO-P-8408(1985)
- 2) 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 1985-73(1986)
- 3) 西松ら: 材料, 第20巻, 第209号, pp. 68~72(1970)
- 4) Attewell P. B. et al.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 10, pp. 1~9(1973)
- 5) Haimson B. C.: National Academy of Sciences, pp. 373~378(1974)
- 6) Haimson B. C. et al.: 28th US Symp. on Rock Mech. pp. 805~812(1987)
- 7) 石塚・安部: 第22回土質工学会発表会, No. 349, pp. 915~916(1987)
- 8) 石塚・安部: 土木学会第24回年次学術講演会, III-147, pp. 320~321(1987)
- 9) 石塚・安部・児玉: 第23回土質工学会発表会, No. 435, p. 1141~1142(1988)

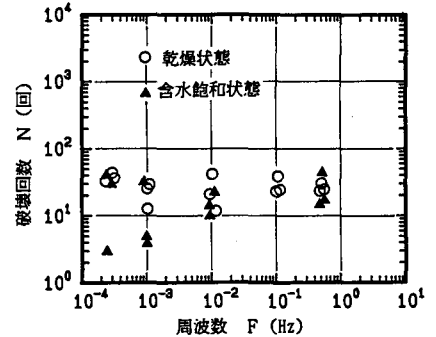


図-8 破壊回数と周波数の関係

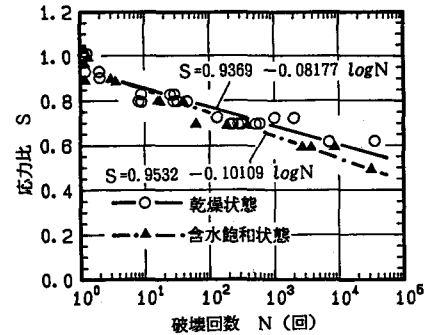


図-9 S-N関係 (乾燥・飽和状態)

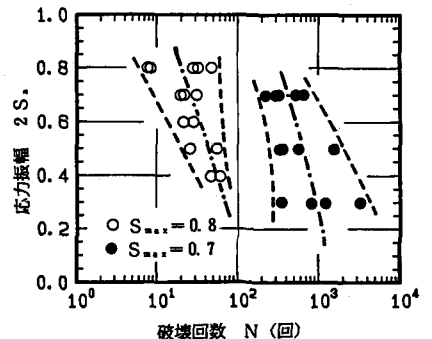


図-10 応力振幅を変化させた場合の破壊回数