

繰返し荷重を受ける花崗岩の疲労特性に関する研究

石 塚 与志雄
(技術研究所)安 部 透
(技術研究所)児 玉 淳 一
(北海道大学)

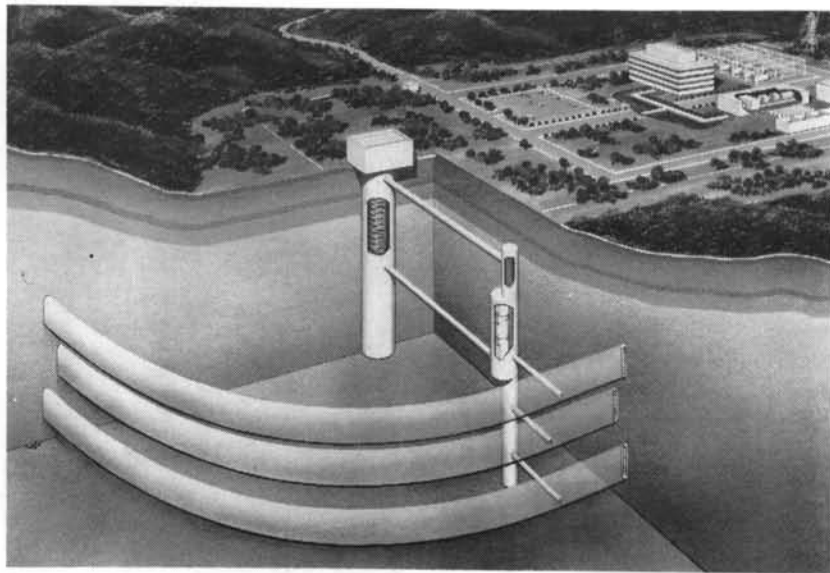
§ 1. はじめに

超電導エネルギー貯蔵施設 (SMES)¹⁾²⁾ (図-1 の概念図参照) 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。また、地下空洞を利用した高圧ガス (天然ガス) 貯蔵³⁾ では、空洞内のライニングを通して高圧 (数十kgf/cm²) が岩盤に繰返し作用する。そのため、SMES、高圧ガス貯蔵の安定性評価、地下空洞設計のためには、長期繰返し荷重に対する岩盤の疲労特性の検討が必要となる。岩盤の疲労特性に与える因子としては、以下のような項目が挙げられる。

- ①地質状況 (不連続性: 亀裂の分布, 方向など)
 - ②岩石固有の疲労特性
 - ③水 (湿度), 温度などの環境条件
 - ④外力: 荷重レベル, 周波数, 振幅など
- 岩盤の強度・変形特性は、①の地質状況に大きく影響

されることから、②の岩石固有の疲労特性の検討を踏まえて、最終的には原位置岩盤においてその疲労特性を検討しなければならない。本研究では、硬質岩盤の疲労特性の基礎的検討として花崗岩を選び、岩石固有の疲労特性について検討する。

硬岩の疲労特性については、1970年代前半より堀部⁴⁾⁵⁾、西松⁶⁾⁷⁾、Attewell⁸⁾、Haimson^{9)~12)}、およびScholz¹³⁾らによって検討が行われてきており、岩石の疲労強度特性も金属材料で適用されるS-N曲線で近似できることが分かっている。また、岩石特有の疲労特性として、繰返しによる岩石の強度低下は岩種により大きく異なること⁹⁾ (繰返し回数10⁵における強度低下は、静的強度を基準として0.85~0.35の範囲で異なる)や、岩石の含水状態⁵⁾、拘束圧¹⁰⁾の有無などの条件により疲労強度が左右されることなどが示されている。既往の疲労試験では、試験時間の関係で0.1~1.0 Hz程度の周波数で実施される場合が多く、長周期荷重による岩石の疲労

図-1 超電導エネルギー貯蔵施設の概念図²⁾

特性を調べた例は少ない。

岩石の疲労特性の周波数依存性については, Attewell⁹⁾による 0.3~20.0 Hz 範囲の疲労試験や, Cho ら¹²⁾の厚肉円筒試験体に内圧を繰返し荷重させた試験(荷重周期: 10, 100, 10000, 10000 sec)などがあり, 同じ荷重応力でも長周期荷重になると破壊回数が少なくなるなどの疲労特性の周波数依存性が指摘されている。しかし, 試験例が少ないことや静的強度自体のひずみ速度依存性が議論されていないなど課題が多い。特に, SMES では 1日1回という長周期荷重になるため, 岩石の疲労特性の周波数依存性をより厳密に把握しておく必要がある。

以上の背景の下, 本研究では, ひずみ速度を変化させた静的試験により岩石強度のひずみ速度依存性を確認した後に, 疲労特性の周波数依存性を調べる。一方, 岩石の疲労特性は拘束圧, 含水状態, 応力振幅などに影響されることから, それらを試験条件としてその影響を定量的に把握する試験を実施する。また, 花崗岩の疲労破壊・変形機構の基礎的な検討のために, AE 計測を行なうとともにクリープ試験も実施し, 破壊性状の検討およびクリープ破壊・変形特性との比較を行なう。

§ 2. 岩石試験の概要

2.1 岩石試験片

日本における代表的な硬岩として, 茨城県筑波地方産の稲田花崗岩を選んだ。稲田花崗岩は, 潜在クラックの配向性に起因して力学的な異方性を示す¹⁴⁾。そのため, 試験では採取岩石ブロックの石目を揃えるとともに, コア採取方向を同一とした。しかし, 異なる時期に岩石ブロックを採取したため採取地点が若干異なることと, 採取時に石目の方向確認をしなかったため, 結果として力学特性が若干異なる 3種類の岩石コアの試験を行なうことになった。そのため, 本研究では 3種類の稲田花崗岩を区別して“稲田花崗岩 A”, “稲田花崗岩 B” および “稲田花崗岩 C” と呼ぶ。各々の乾燥状態の力学特性は表 1 に示すようである。表中の一軸圧縮強度はひずみ速度 $\dot{\epsilon}=8.33 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (通常実施される静的試験の荷重速度) に対応する値である。なお, 稲田花崗岩 A の破壊包絡線

稲田花崗岩 ブロック名	一軸圧縮強度 σ_c (MPa)	弾性係数 E (GPa)
A	192	62.8
B	179	55.2
C	190	54.0

表 1 稲田花崗岩 A, B, C の力学特性

は最大主応力を σ_1 , 最小主応力を σ_3 として $\sigma_1=200.9+2.08 \sigma_3$ (MPa) である。試験片は, 直径 $\phi 50 \text{ mm}$ × 高さ $h 100 \text{ mm}$ の円柱形として, 岩石コア切断後, 平面研削盤で試験片両端面の平行度を 0.05 mm 以内に仕上げた。

試験片の含水条件は乾燥と含水飽和の 2 条件とした。乾燥状態は試験片成形後 1 週間以上デシケータ内で気乾させたもの, 飽和状態は真空脱気により強制含水飽和させた後に 1 月以上水中に放置したものとした。

2.2 試験装置と測定項目

図 2 (a), (b) に乾燥状態と飽和状態試験片の一軸圧縮下の試験概要図を示す。乾燥状態では, 2 種類の変位計により軸方向ひずみ (東京測器社 CDP-5AS; 測定レンジ 2.5 mm, 精度 $\pm 0.025 \text{ mm}$) と周方向ひずみ (MTS 社 632.92-03; 測定レンジ 8 mm, 精度 $\pm 0.04 \text{ mm}$) を測定するとともに, AE センサ (NF 社 AE-901 U; 共振周波数 150 kHz) を直接岩石に取り付けて, リングダウンカウンタ (単位時間内に設定したしきい値 (20 mV) を超えるピークの数) の発生率と累積値を計測した。なお, 前置増幅器と主増幅器の利得は合わせて 40~60 dB とした。また, 飽和状態の試験は試験片を図 2 (b) に示す

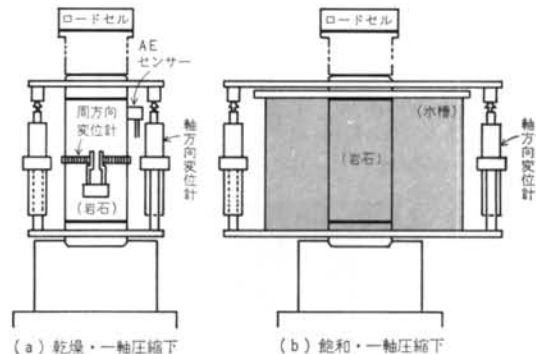
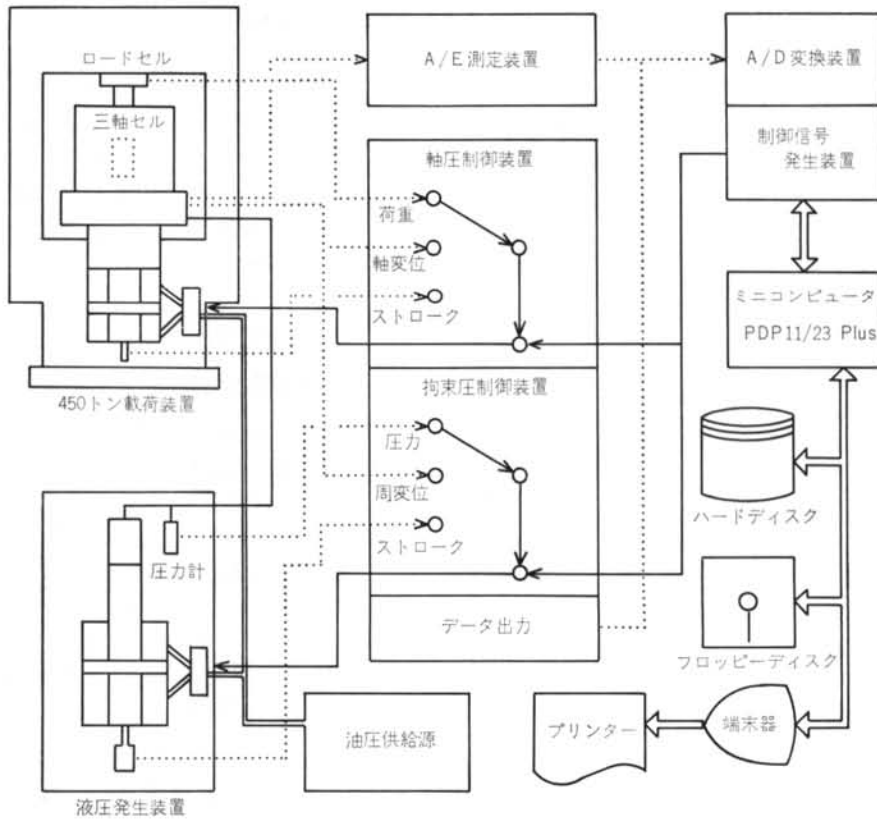


図 2 試験の概要



写真 1 試験装置の外観



図一 3 試験装置のシステム図

ような水槽内に入れることにより，試験中も飽和状態を保持できるようにした．飽和状態では軸方向ひずみのみ測定した．

試験装置は，写真一 1 に示すような最大圧縮荷重能力 450 t を有する MTS 社製サーボコントロール 剛性試験装置（フレーム剛性 10.5×10^9 N/m）を用いた．今回の試験のシステムは図一 3 のようであり，試験の制御および計測データの収録はすべてコンピュータで行なうことが可能となっている．

2.3 検討項目と試験方法

本研究の検討項目と，それに対応する岩種（稲田花崗岩 A, B, C）および試験パラメータ（拘束圧と含水条件）をまとめて表一 2 に示す．各検討項目の試験方法は以下のである．

(1) ひずみ速度が強度に与える影響

ひずみ速度—静的強度関係は疲労試験の載荷応力レベルを決める際の基準となる．そのため，制御方法は疲労試験と同じ応力制御とし，試験後ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に換算した．ひずみ速度の範囲は $8.33 \times 10^{-7} \sim 3.33 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ($5 \times$

試験項目	岩種	拘束条件	含水条件
① ひずみ速度が強度に与える影響	稲田花崗岩 B	一軸(無拘束) 三軸(側圧 3.92 MPa)	乾燥
	稲田花崗岩 C	一軸(無拘束)	乾燥 飽和
② 周波数が疲労特性に与える影響	稲田花崗岩 B	一軸(無拘束) 三軸(側圧 3.92 MPa)	乾燥
	稲田花崗岩 C	一軸(無拘束)	乾燥 飽和
③ 拘束圧または含水条件が S-N 関係に与える影響	稲田花崗岩 A	一軸(無拘束) 三軸(側圧 1.96, 3.92, 5.88 MPa)	乾燥
	稲田花崗岩 B	一軸(無拘束) 三軸(側圧 3.92 MPa)	乾燥
	稲田花崗岩 C	一軸(無拘束)	乾燥 飽和
④ 応力振幅が疲労特性に与える影響	稲田花崗岩 C	一軸(無拘束)	乾燥
⑤ 一定応力載荷による破壊特性(クリープ試験)	稲田花崗岩 C	一軸(無拘束)	乾燥

表一 2 検討項目と岩種・拘束条件・含水条件

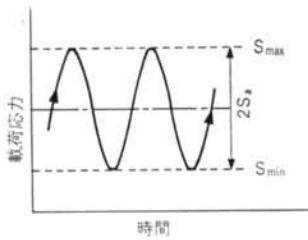


図-4 繰返し荷重パターン

$10^{-3} \sim 2 \times 10^2$ %/min) で、周波数に換算すると $1 \times 10^{-4} \sim 3$ Hz 範囲に相当する。

(2) 周波数が疲労特性に与える影響

疲労試験では、静的強度 σ_c を基準として 載荷応力 σ (応力比 $S = \sigma/\sigma_c$) を定めて、図-4 に示すように最大 載荷応力 S_{max} 、最小 載荷応力 S_{min} および S_a を設定した。疲労特性の周波数依存性については、 S_{max} を 0.8 σ_c 一定、 S_{min} をほぼ 0 として 周波数 F を $2.5 \times 10^{-4} \sim 1.0$ Hz (1 周期 4000~1 sec) の範囲で変化させた。なお、繰返し試験の制御は応力制御とし、載荷波形は正弦波とした。

基準となる静的強度 σ_c は、拘束圧の有無の場合については通常の強度 (ひずみ速度 $8.33 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ に対する強度、以下 "通常の静的強度" と呼ぶ) と 載荷周波数に対するひずみ速度における静的強度 (以下、"周波数に対応する静的強度" と呼ぶ) の 2 通りとした。前者の通常の強度を基準とする試験では、載荷する応力は周波数によらず一定となる。また、後者の場合は(1)の試験結果から、個々の周波数に対して 載荷応力を設定することになる。一方、含水条件の試験に関しては、周波数に対応する強度を基準とする試験のみとした。

(3) 拘束圧または含水条件が S-N 関係に与える影響

S-N 関係 (応力比-破壊回数関係) を求める試験では周波数を 0.5 Hz 一定として、 S_{max} を 0.95~0.30 の範囲で変化させた。三軸圧縮下の疲労試験では、静的三軸圧縮試験から得られる破壊包絡線を基準として 載荷応力比を設定した。側圧は、SMES の設置深度 (200 m 程度) を考慮して 1.96, 3.92, 5.88 MPa の 3 ケースとした。含水条件の影響については、(2)の試験方法と同様とし、最大 載荷応力 S_{max} を変化させた。

繰返し回数は、最大を 40,000 回 (約 1 日) とし、40,000 回を超えても破壊しない試験片は非破壊として扱った。

(4) 応力振幅が疲労特性に与える影響

S_{max} を一定として 応力振幅 S_a を変化させる試験により、応力振幅の影響を調べた。周波数は S-N 曲線を求める試験と同じく 0.5 Hz 一定とし、 $S_{max} = 0.8$ については $2S_a = 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4$ の 5 段階、 $S_{max} =$

0.7 については $2S_a = 0.7, 0.5, 0.3$ の 3 段階とした。含水条件は乾燥状態のみとした。

(5) 一定応力載荷による破壊特性 (クリープ試験)

疲労破壊・変形特性とクリープ破壊・変形特性とを比較するために、載荷応力を $S_{max} = 0.9, 0.8, 0.7$ 一定としたクリープ試験を行なった。含水条件は乾燥のみとし、試験時間を最大 3 日間とした。3 日を超えても破壊しない試験片は非破壊とした。

§ 3. 試験結果と考察

3.1 ひずみ速度が強度に与える影響

図-5、図-6 に拘束条件 (一軸と三軸; 3.92 MPa) および含水条件 (乾燥と飽和) 下の静的強度とひずみ速度の関係を示す。ここで、三軸圧縮下の強度は破壊時の軸差応力とした。拘束圧の有無および含水の有無に係わらず強度はひずみ速度の増加に伴って増大し、ひずみ速度 $8.33 \times 10^{-7} \sim 3.33 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ の範囲では、強度 (MPa) とひずみ速度 (s^{-1}) の関係はひずみ速度を対数軸とした片対数グラフ上で線形関係となり、次式で近似できる。

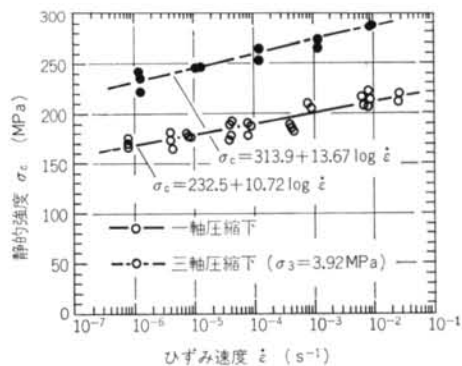


図-5 ひずみ速度-静的強度 (一軸・三軸)

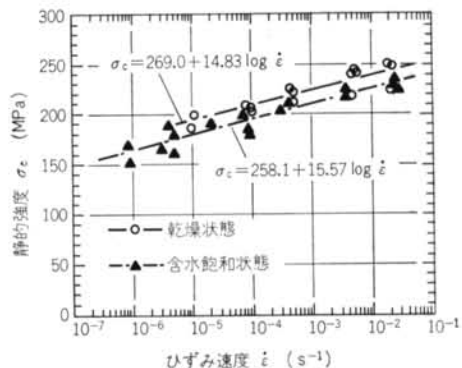


図-6 ひずみ速度-静的強度 (乾燥・飽和)

(a)一軸・三軸圧縮下(稲田花崗岩B, 乾燥)

一軸圧縮下: $\sigma_c = 232.5 + 10.72 \log \dot{\epsilon}$ (1)

三軸圧縮下: $\sigma_c = 313.9 + 13.67 \log \dot{\epsilon}$ (2)

(b)含水条件(稲田花崗岩C)

飽和状態: $\sigma_c = 258.1 + 15.57 \log \dot{\epsilon}$ (3)

乾燥状態: $\sigma_c = 269.0 + 14.83 \log \dot{\epsilon}$ (4)

ひずみ速度が強度に及ぼす影響は Masuda ら¹⁵⁾が報告している結果と同様であり, 通常の静的強度 ($\dot{\epsilon} = 8.33 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$) に対して 載荷速度が 3 オーダー ($\dot{\epsilon} = 4.38 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 周波数 0.5 Hz に相当) 増加すると強度は 15 ~ 20% 増加する. このひずみ速度依存性は, 岩石の疲労強度を検討する上では大きな変化といえる. また, 飽和状態の強度は乾燥状態と比べてひずみ速度によらず 6 ~ 7% (14 ~ 15 MPa) 程度低下する.

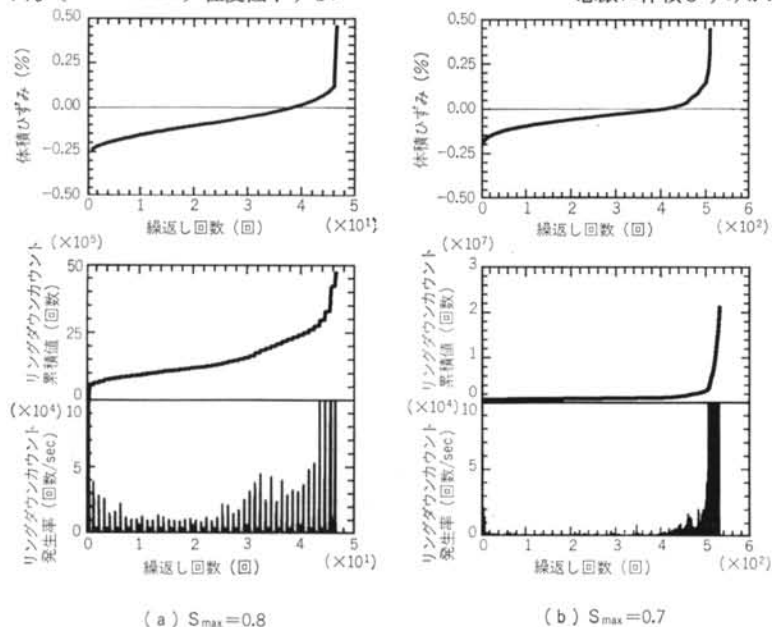


図-7 疲労試験時の体積ひずみと AE 発生状況

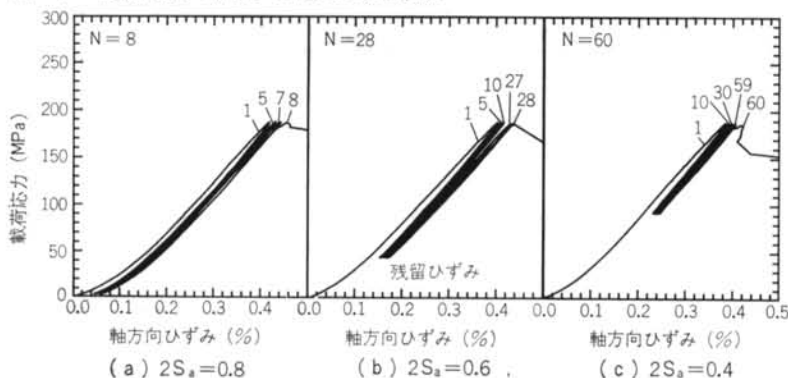


図-8 載荷応力振幅を変化させた繰返し試験結果 ($S_{max} = 0.8$)

3.2 繰返し荷重による疲労試験結果

3.2.1 疲労破壊・変形特性

(1)疲労試験中の AE 発生と残留ひずみ

乾燥状態の稲田花崗岩 C の繰返し載荷試験 ($S_{max} = 0.8, 0.7$) 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ットの発生率と累積値) との関係を図-7 に示す. ここで, 破壊回数 N は $S_{max} = 0.8$ で 47, $S_{max} = 0.7$ で 532 である.

疲労試験時の体積ひずみの変化は, 次の 3 段階に分けることができる. 第 1 段階は載荷直後で, 載荷開始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する. 最後の第 3 段階では急激に体積ひずみが増加して, 脆性破壊に至る. AE の

発生状況は体積ひずみの変化とよい対応を示し, 載荷開始直後に多くの AE が計測されるが, 体積ひずみの増加が定常になる第 2 段階では, 発生率が少なくなる. 続いて, 体積膨張が急増する第 3 段階の直前から AE も急増し, リングダウンカウンット累積曲線の変曲点が現われる.

$S_{max} = 0.8$ と 0.7 で AE の発生状況を比較すると, 定常状態である第 2 段階における発生率が大きく異なり, $S_{max} = 0.8$ の場合の発生率が 0.7 と比較して非常に高い. これは, $S_{max} = 0.8$ の方が 1 回当たりの載荷で大きな損傷を岩石に与えていることを示している.

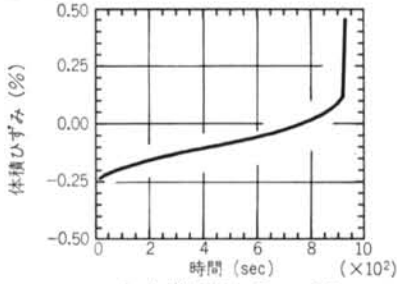
繰返し荷重による残留ひずみ (除荷時の非回復ひずみ) は, 図-

8 の応力振幅を変えた試験 ($S_{max} = 0.8$ で, 振幅値 $2S_a = 0.0, 0.2, 0.4$ の 3 ケース) の応力-軸方向ひずみ関係に示すように, 1 回目の載荷で大きな残留ひずみが発生し, その後徐々に増加していく. 1 回目の載荷で生じる残留ひずみは, 大きな場合には全残留ひずみ量の約 50% にも達し, 疲労による総変形量に大きな比重を占める.

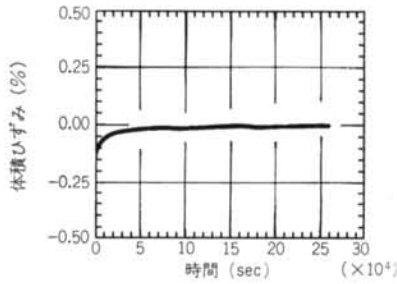
(2)クリープ試験結果との比較

載荷応力 $S_{max} = 0.9, 0.8$ (稲

田花崗岩C)に対するクリープ試験結果(体積ひずみ-時間関係)を図-9に、 $S_{max}=0.8, 0.7$ の疲労試験結果を図-10に示す。図-9(b)は、非破壊の試験結果である。クリープ変形は、一般的なクリープ試験で見られる変形様式と同じく遷移、定常、加速の形態をとる。疲労試験時の体積ひずみは、前節で記したように載荷直後の膨張、第2段階の定常領域および急激な体積膨張領域に

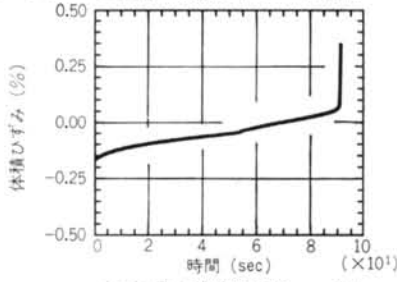


(a) 載荷応力 $S_{max}=0.9$

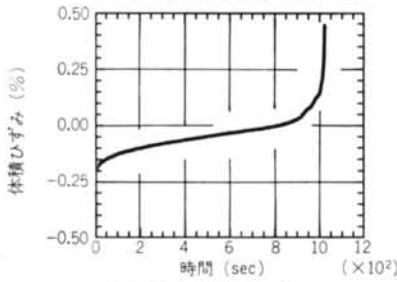


(b) 載荷応力 $S_{max}=0.8$

図-9 クリープ試験時の体積ひずみ-時間関係



(a) 最大載荷応力 $S_{max}=0.8$



(b) 最大載荷応力 $S_{max}=0.7$

図-10 疲労試験時の体積ひずみ-時間関係

大別でき、時間軸を無視すればクリープ変形と同様である。

クリープ、疲労試験の破壊に至る時間をまとめると表

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

*非破壊の定義:

クリープ: 2.6×10^6 sec (3日) まで非破壊

繰返し: 8.0×10^4 sec (4万回) まで非破壊

表-3 破壊寿命

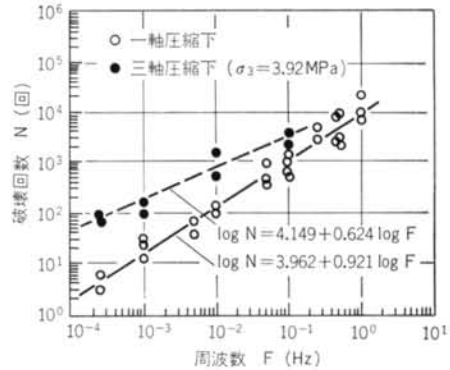


図-11 一軸・三軸下の周波数-破壊回数関係(基準:通常の静的強度)

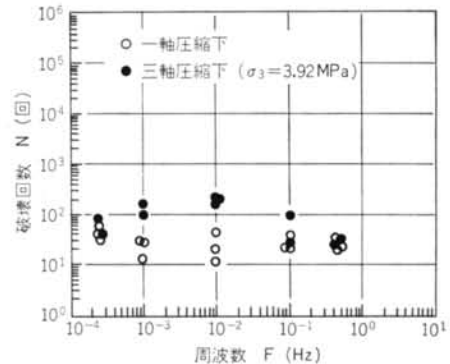


図-12 一軸・三軸下の周波数-破壊回数関係(基準:周波数に対応する静的強度)

—3 になる。クリープ試験では $S_{max}=0.9$ で 9~77 分で破壊するが、0.8 では 1 試験片が 169 分で破壊した以外は非破壊となるのに対して、疲労試験では $S_{max}=0.9$ で 4 秒、0.8 で 16~94 秒、0.7 で 10~18 分で破壊し、クリープ試験と比較すると早期に破壊する。最大応力 S_{max} が同一でも、一定応力载荷よりも繰返し载荷の方が破壊寿命が短く、繰返し荷重が岩石の損傷に大きな影響を与える。

3.2.2 各種条件下の疲労特性

(1) 疲労破壊の周波数依存性

一軸と三軸圧縮下 ($\sigma_3=3.92$ MPa) における周波数 F と破壊回数 N の関係を 図-11, 図-12 に示す。図-11 は“通常の静的強度”を基準とした場合 (周波数によらず S_{max} を一軸で 142.5 MPa, 三軸で 195.4 MPa 一定) の結果で、周波数が高くなると破壊回数も増大し、Attewell⁹⁾ の実験結果と同様に顕著な周波数依存性 (一軸圧縮下の 0.5 Hz で約 5000 回が 2.5×10^{-4} Hz で約 5 回、三軸圧縮下の 0.5 Hz で約 9000 回が 2.5×10^{-4} Hz で約 80 回) を示す。周波数 F と破壊回数 N は両対数グラフ上でよい相関を示し、次式で近似できる。

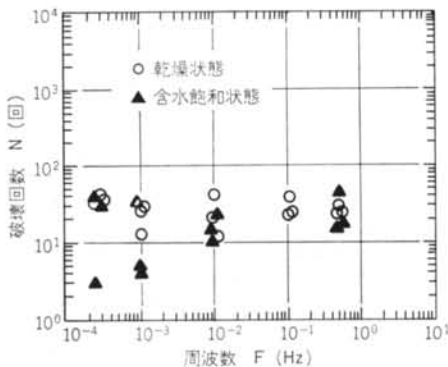


図-13 乾燥・飽和状態の周波数—破壊回数関係 (基準: 周波数に対応する静的強度)

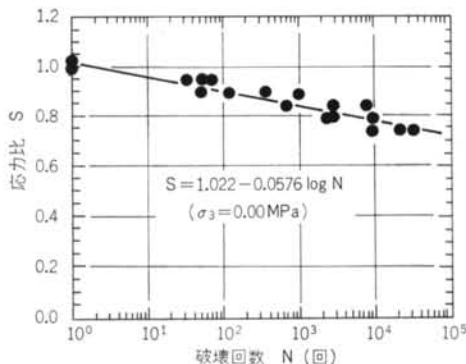


図-14 一軸圧縮下の $S-N$ 関係 (基準: 通常の静的強度)

$$\text{一軸圧縮下: } \log N = 3.962 + 0.921 \log F \quad \dots\dots(5)$$

$$\text{三軸圧縮下: } \log N = 4.149 + 0.624 \log F \quad \dots\dots(6)$$

これに対して、“周波数に対応する静的強度”を基準とした試験 (図-12) では、破壊回数は全周波数領域において一軸で 10~60 回、三軸で 30~250 回の範囲にあり、周波数依存性は見られない。また、飽和状態で“周波数に対応する静的強度”を基準とした試験の結果は 図-13 になる。周波数が低くなると、乾燥状態と比較して破壊回数が低下するデータもあるが、三軸圧縮下と同様、大きな周波数依存性は認められない。このため、周波数を 0.5 Hz と高く設定しても、応力比の設定基準を“周波数に対応する静的強度”とすることにより低い周波数域の疲労強度特性を推定することができる。

(2) 拘束圧が疲労特性に与える影響

周波数 0.5 Hz で“通常の静的強度”を基準とした疲労試験の一軸圧縮下の $S-N$ 関係を 図-14 に、側圧 σ_3 を 1.96, 3.92, 5.88 MPa と変化させた場合の $S-N$ 関係を 図-15(a), (b), (c) に示す。繰返し回数 40,000 回までの範囲では、一軸、三軸に関係なく疲れ限界 (繰返しによる疲労強度が一定値に収束する状態) は存在しなかった。そのため、本研究では 40,000 回で破壊する応力を疲労強度とする。一軸圧縮下の疲労強度は静的強度の 76% となり、 $S-N$ 関係は次式で近似できる。

$$\text{一軸圧縮下: } S = 1.022 - 0.0576 \log N \quad \dots\dots(7)$$

一方、三軸圧縮下の疲労強度は約 85% となり、一軸状態よりも疲労破壊し難くなる。また、1.96~5.88 MPa の側圧範囲では $S-N$ 曲線にほとんど差がなく (図-15(d) に 3 側圧の試験データをまとめたものを示す)、次式で表示できる。

$$\text{三軸圧縮下: } S = 0.998 - 0.0336 \log N \quad \dots\dots(8)$$

また、周波数を同一として、基準を“周波数に対応した静的強度”とした場合の $S-N$ 関係は 図-16 に示すようであり、各々次式で表示される。

$$\text{一軸圧縮下: } S = 0.956 - 0.0709 \log N \quad \dots\dots(9)$$

$$\text{三軸圧縮下: } S = 0.922 - 0.0523 \log N \quad \dots\dots(10)$$

“周波数に対応した静的強度”を基準として疲労強度を求めると一軸下で 63%、三軸下で 68% となり、“通常の静的強度”を基準とした場合よりも 13~17% 程度低くなる。

(3) 含水状態が疲労特性に与える影響

稲田花崗岩 C の乾燥および飽和状態に対する $S-N$ 関係を 図-17 に示す。各々の $S-N$ 関係は次のように近似できる。

$$\text{乾燥状態: } S = 0.937 - 0.0818 \log N \quad \dots\dots(11)$$

$$\text{飽和状態: } S = 0.953 - 0.1011 \log N \quad \dots\dots(12)$$

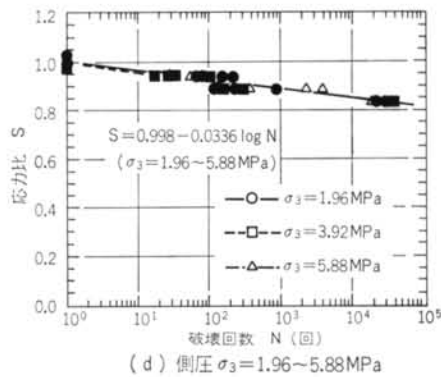
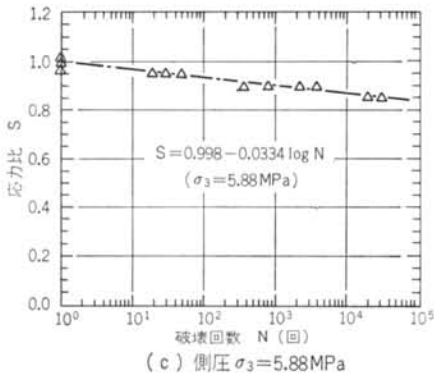
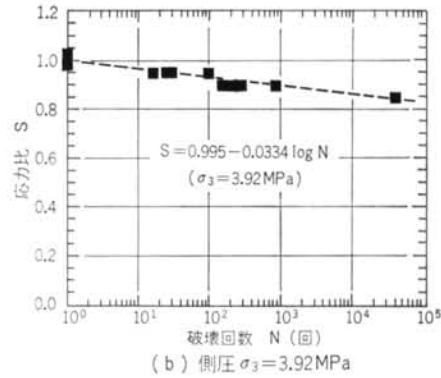
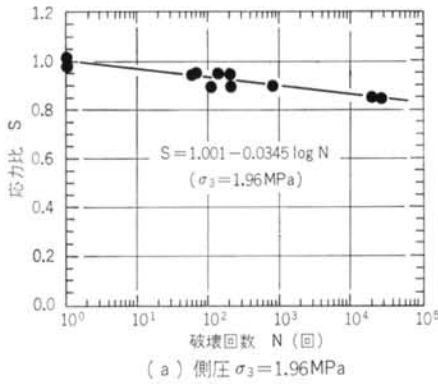


図-15 三軸圧縮下の $S-N$ 関係 (基準: 通常の静的強度)

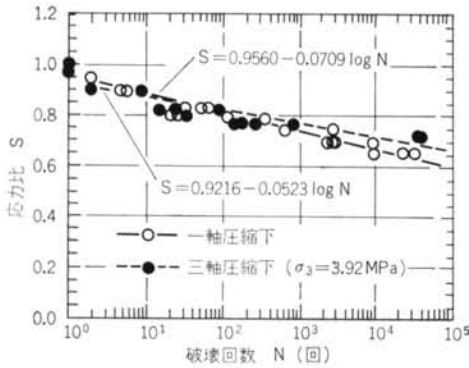


図-16 一軸・三軸下の $S-N$ 関係 (基準: 周波数に対応する静的強度)

最大荷重応力比 S_{\max} が低下するに伴い、飽和状態の方が乾燥状態に比較して破壊回数 N が減少するようになり、疲労強度は乾燥状態での静的強度の56%、飽和状態で49%に低下する。

(4) 応力振幅が疲労特性に与える影響

$S_{\max} = 0.8, 0.7$ に対して、荷重応力振幅 $2S_a$ を変化した試験結果 (応力振幅-破壊回数関係) を図-18に示す。 $S_{\max} = 0.8$ の場合には、 $2S_a = 0.8$ で破壊回数 8

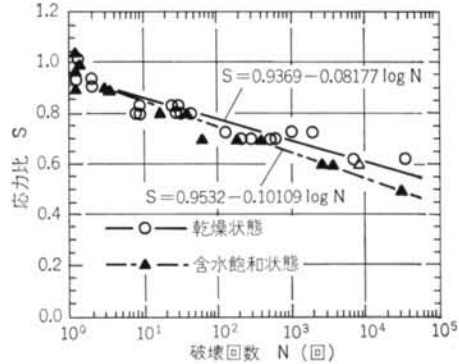
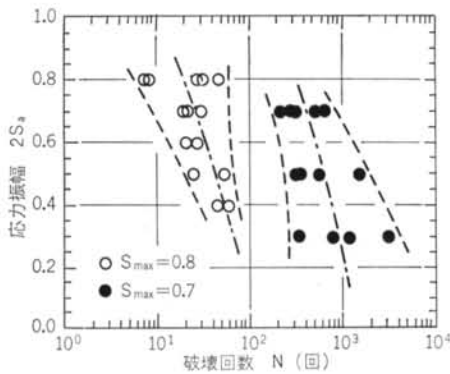


図-17 乾燥・飽和状態の $S-N$ 関係 (基準: 周波数に対応する静的強度)

~47回が0.4では46~60回に、また $S_{\max} = 0.7$ の場合には、 $2S_a = 0.7$ の場合で230~617回が0.3では337~3271回となり、最大荷重応力が同一でも応力振幅が低下すると破壊回数が増加する。この結果を、最大荷重応力が疲労特性に与える影響である $S-N$ 関係と比較すると、 $S_{\max} = 0.9$ の破壊回数が3回程度に対して、 $S_{\max} = 0.8$ で約50回、 $S_{\max} = 0.7$ で約800回と最大荷重応力の方が応力振幅よりも岩石の疲労破壊に大きな影響を



図一八 応力振幅を変化させた場合の破壊回数
与えるといえる。

§ 4. 結 論

本研究では、繰返し载荷試験により花崗岩の疲労特性について検討した。今回の研究で得られた結果をまとめると、以下ようになる。

(1) ひずみ速度が岩石強度に与える影響：花崗岩の静的強度 σ_c は、拘束圧の有無または含水条件（乾燥・飽和）に関係なく、载荷ひずみ速度を $\dot{\epsilon}$ とすると $\sigma_c = a + b \log \dot{\epsilon}$ の関係を示し、ひずみ速度が大きくなると強度は増加する。

(2) 周波数が疲労特性に与える影響：周波数によらず同一の応力を作用させた場合（通常の静的強度を基準とする場合）には、周波数が高くなるに従い破壊回数は増大し、顕著な周波数依存性を示す。しかし、载荷周波数のひずみ速度に対応する強度を基準として同一応力比の疲労試験を行なうと、破壊回数は周波数によらずほぼ一定値を示す。そのため、周波数を 0.5 Hz と高く設定しても载荷応力設定の基準を“周波数に対応する静的強度”

とすることにより、長周期载荷の岩石の疲労強度特性を推定することができる。

(3) 疲労変形特性：繰返し荷重による変形は、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直後の遷移領域、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。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疲労試験の方がはるかに短く、繰返し荷重が岩石の損傷に大きな影響を与えている。

(4) 岩石の $S-N$ 関係：今回の繰返し回数 40,000 回の範囲内では、拘束圧の有無または含水条件によらず花崗岩には疲れ限界が存在せず、応力比を S 、破壊回数を N とすると、 $S = c - d \log N$ で近似できる。しかし、強度低下の割合は拘束圧の有無または含水条件によって異なる。5.88 MPa までの拘束圧では側圧に依存せず、一軸状態よりも 5% 程度大きくなる。また、試験片が含水飽和になると乾燥に比べて 7% 程度小さくなる。

(5) 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、繰返し荷重の影響が低減して破壊回数が増加する。しかし、応力振幅の疲労強度への影響は、最大载荷応力が疲労特性に与える影響と比較すると小さい。

今後の地下空洞利用の多様化に伴い、岩盤はこれまで以上に様々な応力変化や環境変化に曝されることが予想される。従来の岩盤構造物では、SMES や高压ガス貯蔵施設のように荷重が長周期繰返しで岩盤に作用することはなかったため、岩石・岩盤の疲労について議論されることは少なかった。本研究では岩石の疲労特性については検討したが、岩盤の疲労特性は地質状況に左右されることから、最終的には原位置試験でその特性を把握する必要がある。

＜参考文献＞

- 1) 未来工学研究所：“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, NEDO 委託調査成果報告書)” 未来工学研究所 (1985年)
- 2) 朝エンジニアリング振興協会：“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)” エンジニアリング振興協会 (1986年)
- 3) T. Lindbo, H. Sandstedt & P. Karlsson: “Storage of Natural Gas in Lined Rock Cavern—Pilot Plant” Proceedings of International Conference on Storage in Rock Cavern (1989) pp. 367~370
- 4) 堀部富雄, 小林良二, 池見保祐：“砂岩の疲労試験” 材料 第17巻, 第181号 (1968年) pp. 914~918
- 5) 堀部富雄, 小林良二, 池見保祐：“岩石の疲労試験” 第3回岩の力学国内シンポジウム講演論文集 (1970年) pp. 29~34
- 6) 鈴木光, 西松裕一, R. ヘルセオヨ：“繰返し圧縮荷重下における岩石のレオロジー的性質に関する研究 (第1報)” 日本鉱

業会誌 Vol.86, No.987 (1970年) pp.413~418

- 7) 西松裕一, R.ヘルセオヨ: "岩石の疲労寿命に及ぼす平均応力および応力振幅の影響" 材料 第20巻, 第209号(1971年) pp.68~72
- 8) P.B. Attewell & I.W. Farmer: "Fatigue Behaviour of Rock" International Journal of Rock Mechanics and Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol.10 (1973) pp.1~9
- 9) B.C. Haimson & C.M. Kim: "Mechanical Behavior of Rock under Cyclic Fatigue" Proceedings of 13rd U.S. Symposium on Rock Mechanics (1972) pp.845~863
- 10) B.C. Haimson: "Mechanical Behavior of Rock under Cyclic Loading" Proceedings of 3rd Congress of International Society of Rock Mechanics, Vol.3, No.2-A (1974) pp.373~378
- 11) B.C. Haimson: "Effect of Cyclic Loading on Rock" Dynamic Geotechnical Testing (ASTM STP-654), ASTM (1978) pp.228~245
- 12) T.F. Cho & B.C. Haimson: "Effect of Cyclic Loading on Circular Openings; Results of a Laboratory Simulation" Proceedings of 28th U. S. Symposium on Rock Mechanics (1987) pp.805~812
- 13) C.H. Scholz & T.A. Koczyński: "Dilatancy Anisotropy and Response of Rock to Large Cyclic Loads" Journal of Geophysical Research, Vol. 84, No. 110 (1979) pp. 5525~5534
- 14) 工藤洋三: "花崗岩内の微小欠陥の配向と力学的異方性" 名古屋大学学位論文 (1989年)
- 15) K. Masuda, H. Mizutani & I. Yamada: "Effects of Water on Time-Dependent Behavior of Granite" Journal of Physics of the Earth, Vol.36 (1988) pp.291~313