

投稿論文 (和文)
PAPERS

載荷速度，周波数が岩石の疲労強度に与える影響

石塚与志雄*・安部 透**・神山 博***・河村精一****

長周期繰り返し載荷に対する岩石の疲労強度の評価を目的として、各種岩石について応力速度を変化させた静的試験と繰り返し疲労試験を行った。この結果、圧縮強度は岩種によらず応力速度の関数 ($\sigma = a + b \log \dot{\sigma}$) で近似できること、繰り返し疲労の基準となる最大応力を繰り返し載荷の応力速度に対応する圧縮強度で基準化してS-N曲線を求めると、S-N曲線は周波数に依存しないことが明らかになった。これより、比較的高い周波数の疲労試験でも長周期載荷に対する疲労強度が推定できることを示した。

Key Words : rock, stress rate, frequency, fatigue strength, S-N curves

1. まえがき

将来の電力貯蔵施設として注目されている岩盤内ライニング式による圧縮空気貯蔵ガスタービン発電(CAES-GT: Compressed Air Energy Storage-Gas Turbine)では、空洞内のライニングを通して4~8MPaの高圧が岩盤に繰り返し作用する¹⁾。また、超電導エネルギー貯蔵施設(SMES: Superconductive Magnetic Energy Storage)においては超電導コイルに膨大な電磁力が貯蔵サイクルに合わせて繰り返し発生するため、その力を地下岩盤で支持することになる。5GWhクラスの大型SMESでは、最大で約10MPaの応力を支持しなければならない^{2),3)}。このため、SMES, CAESの安定性評価、空洞設計に際しては、1日1周期という長周期の繰り返し荷重に対する岩盤の疲労特性の検討が必要となる。岩盤の強度・変形特性は、不連続面などの地質状況に大きく影響されることから、最終的には原位置岩盤においてその特性を検討しなければならない。本研究では、岩盤の疲労特性の基礎的な検討として、室内岩石試験により岩石の疲労特性について検討する。

硬岩の繰り返し疲労特性については、1970年代前半より堀部ら^{4),5)}、鈴木ら⁶⁾、西松・ヘルセオヨ⁷⁾、Attewell・Farmer⁸⁾、Haimson・Kim⁹⁾、Haimson^{10),11)}、Cho・Haimson¹²⁾、Scholz・Koczyński¹³⁾らによって研究されてきており、岩石の疲労強度特性も金属材料等で用いられるS-N曲線で近似できることが知られている。岩石特有の疲労特性としては、その疲労強度が岩種によって大きく異なること⁹⁾(繰り返し回数 10^5 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⁸⁾、拘束圧¹⁰⁾の条件により疲労強度が異なることが明らかになっている。軟岩の疲労特性に関する検討は、赤井ら¹⁴⁾、大西ら¹⁵⁾、Akai・Onishi¹⁶⁾、松木・工藤¹⁷⁾および工藤・松木¹⁸⁾らによって行われており、間隙水圧が疲労特性に与える影響や繰り返し疲労過程における変形特性が議論されている。軟岩の疲労強度に及ぼす間隙水圧の影響は顕著であり、間隙水圧の増加とともに疲労強度は小さくなることが明らかとなっている¹⁸⁾。大西ら¹⁵⁾の試験では周波数を0.1, 0.01, 0.001Hzとしているが、既往の疲労試験では、0.1~1.0Hzの周波数範囲で実施される場合が多く、今回対象としているような長周期繰り返し載荷による岩石の疲労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、Attewell・Farmer⁸⁾による0.3~20.0Hz範囲の疲労試験や、Cho・Haimson¹²⁾の厚肉円筒試験体に内圧を繰り返し載荷させた試験(載荷周期: 10, 100, 1000, 10000 sec)などがあり、同じ載荷応力でも周波数が小さく(長周期に)なると破壊回数が減少するなどの疲労破壊の周波数依存性が指摘されている。しかし、試験例や試験岩種が少ないことや疲労強度評価の際に基準となる静的強度自体の載荷速度の効果が検討されていないなど課題が多い。CAES, SMESでは1日1周期と長周期繰り返し載荷になるため、岩石の変形・強度特性の載荷速度効果を検討した上で、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。

以上の事を踏まえて、本研究では、軟岩、中硬岩、硬岩を供試体として選び、まず、含水条件と拘束圧をパラメータとして応力速度が圧縮強度に与える影響について調べるとともに、非弾性体積ひずみを損傷変数として、一定応力速度作用下の岩石の損傷発展について議論する。つづいて、周波数を変化させた繰り返し疲労試験を実施して周波数が疲労強度に与える影響を検討する。

*正会員 工博 清水建設(株)技術研究所 主任研究員
(〒135 江東区越中島3-4-17)

**正会員 清水建設(株)技術研究所

***正会員 工修 中部電力(株)技術開発本部電力技術研究所
研究副主査

****正会員 工修 中部電力(株)土木建築部

Table 1 Physical and mechanical properties of rocks

Rock type	Density (g/cm ³)	Uniaxial Compressive Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Elastic Velocity (km/s)	Porosity (%)
Ohya Tuff	1.47	12.8	1.8	3.09	2.14	36.7
Sanjome Andesite	2.21	103.6	6.2	14.2	3.64	16.0
Inagawa Granite	2.70	169.0	7.5	58.9	4.46	0.6
Inada Granite	2.64	179.0	8.5	55.2	4.85	0.8

Table 2 Anisotropy in mechanical properties of Inagawa Granite

	Uniaxial Compressive Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Elastic Velocity (km/s)
Rift	169.5	56.9	4.46
Grain	193.1	56.7	4.80
Hardway	171.6	56.2	4.87

2. 試験概要

(1) 試験供試体

日本における代表的な軟岩・中硬岩・硬岩として、大谷石（栃木県宇都宮産）、三城目安山岩（福島県須賀川産）、伊奈川花崗岩（愛知県足助産）および稲田花崗岩（茨城県笠間産）を選んだ。各岩石の気乾状態の力学特性を **Table 1** に示す。表中の一軸圧縮強度は載荷速度がひずみ速度で約 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ の時の値である。

供試体の成形に際しては、採取岩石ブロックの石目を揃えたとともにコア採取方向を同一とすることにより、供試体間のばらつきを極力小さくした。参考までに伊奈川花崗岩の力学的異方性は **Table 2** のようである。表中の Rift, Grain, Hardway は工藤¹⁹⁾ の表記と同様である。今回の試験では、載荷方向を Rift 面に垂直な方向に統一した。供試体は、直径 $\phi 50 \text{ mm} \times$ 高さ $h 100 \text{ mm}$ の円柱形として、岩石コア切断後、平面研削盤で供試体両端面の平行度を 0.05 mm 以内に仕上げた。

供試体の含水条件は気乾状態と飽和状態の2条件とした。気乾状態は成形後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的に含水飽和させた後に1ヵ月以上水中に放置したものとした。

(2) 試験装置

Fig.1(a), (b) に気乾状態と飽和状態の一軸圧縮下の試験概要を示す。気乾状態では、左右2本の軸方向変位計（東京測器 CDP-5AS；測定レンジ 2.5 mm 、精度 $\pm 0.025 \text{ mm}$ ）とチェーン型の周方向変位計（MTS 623.92-03；測定レンジ 8 mm 、精度 $\pm 0.04 \text{ mm}$ ）により、軸ひずみ ϵ_1 と横ひずみ ϵ_3 を測定した。体積ひずみは $\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3$ として評価した。飽和状態の試験は、**Fig.1(b)** に示すように供試体を水槽内に入れ、試験中の供試体表面からの乾燥を防ぐとともに外部との水の出入りを許容する条件で実施した。飽和状態のひずみ測定は軸ひずみ ϵ_1 のみである。三軸圧縮試験では、供試体をメンブレン（材質ミルドネオプレン、厚さ 0.5 mm ）で覆った後に変位計を取り付けてセル内に設置した。変位は一軸下の気乾状態と同様、軸方向と周方向である。荷重はセル内のロードセルで測定した。

試験装置は、最大圧縮載荷能力 450 t を有する MTS 社製のサーボコントロール剛性試験装置（フレーム剛性 $10.5 \times 10^9 \text{ N/m}$ ）を用いた。

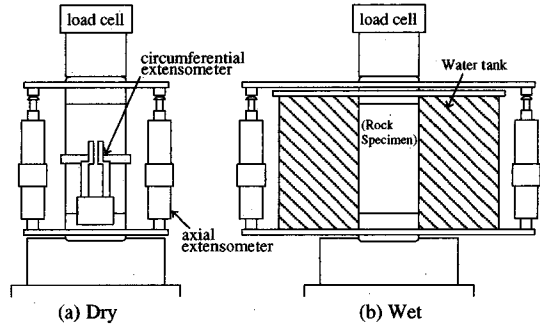


Fig.1 Experimental apparatus in air-dried and wet conditions

(3) 検討項目と試験方法

検討項目は、a) 応力速度が強度に与える影響、b) 周波数が疲労強度に与える影響、および c) 各種岩石の S-N 曲線と疲労限界の3項目である。各試験方法を以下に説明する。

a) 応力速度が強度に与える影響

圧縮強度は疲労試験の載荷応力を設定する際の基準となる。岩石の圧縮強度は一般に載荷速度に依存し、載荷速度の増加とともに強度も増加する^{20), 21)}。この現象は、応力腐食による岩石内部の微小亀裂の伸長とひずみ速度とを関係づけたモデル^{22), 23)}や、これを発展させた連続体損傷モデル²⁴⁾などにより説明されてきている。ここでは、各岩種について載荷時の応力速度 $\dot{\sigma}$ を変化させた試験を行い、含水状態、側圧による圧縮強度の応力速度効果を調べて疲労試験時の基準となる圧縮強度を明らかにする。加えて、非弾性体積ひずみを損傷変数として、一定載荷速度下における岩石の損傷発展特性を検討する。

載荷方法は疲労試験の制御方法と一致させ、応力制御とした一定応力速度で行った。応力速度 $\dot{\sigma}$ の範囲は $10^3 \sim 10^5 \text{ MPa/s}$ である。

b) 周波数が疲労強度に与える影響

疲労試験では、圧縮強度 σ_c を基準として載荷応力比 $S (= \sigma / \sigma_c)$ を定めて、**Fig.2** に示すように最大応力比 S_{max} 、最小応力比 S_{min} および応力振幅比 S_a を設定する。試験では、載荷波形を正弦波、最小応力 S_{min} をほぼ0とした応力制御による片振りで疲労試験を行った。

大谷石、三城目安山岩および稲田花崗岩については、

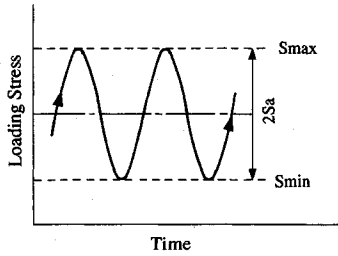


Fig.2 Loading pattern in cyclic fatigue test

S maxを0.8 σ_c 一定として周波数Fを $2.5 \times 10^{-4} \sim 0.5\text{Hz}$ (1周期4000~2sec)の範囲で変化させた。基準となる圧縮強度 σ_c については、一般に行われる静的試験(載荷開始から破壊までの時間が5~15分, ひずみ速度が約 10^{-5}s^{-1} の試験)で得られた圧縮強度(以下“通常の圧縮強度”と呼ぶ)を基準とした場合と、繰り返し疲労の載荷応力速度に対応する圧縮強度(以下“繰り返し応力速度に対応する圧縮強度”と呼ぶ)を基準とした場合の2通りとした。“繰り返し応力速度に対応する圧縮強度”は、最大応力と最小応力の差を1/2周期の時間で除した値を繰り返し疲労試験の応力速度 $\dot{\sigma}$ として、a)の試験で求まる圧縮強度-応力速度関係から求めた。

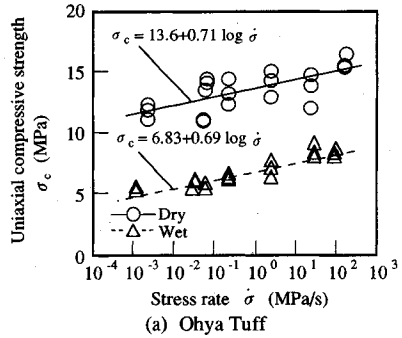
前者の通常の圧縮強度を基準とした試験は、載荷周波数によらず最大応力を同一とした疲労試験であるのに対して、後者は、周波数によって基準となる σ_c を設定するため、周波数により最大応力が変化する。

伊奈川花崗岩については、0.5Hzに対応する強度を基準として、周波数 $2.5 \times 10^{-5} \sim 0.5\text{Hz}$ の範囲で、S maxを0.9, 0.8, 0.7と変化した片振り疲労試験を行い、 $\sigma - N$ 曲線およびS - N曲線の周波数依存性をより詳細に調べる。

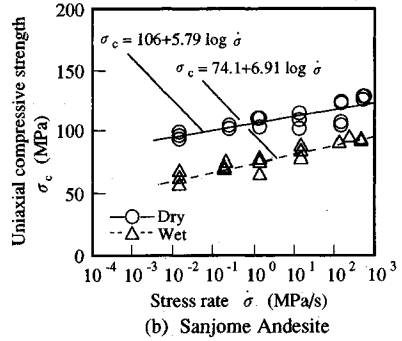
c) 各種岩石のS - N曲線と疲労限界

S - N曲線(応力比-破壊回数曲線)と疲労限界を調べる試験では、周波数を0.5Hz, 基準となる圧縮強度を0.5Hzに対応する圧縮強度として、S maxを0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4と低下させて破壊に至る繰り返し回数Nを求めた。繰り返し載荷方法は、b)の周波数依存性の試験と同様、載荷波形を正弦波とした片振り繰り返し疲労試験である。

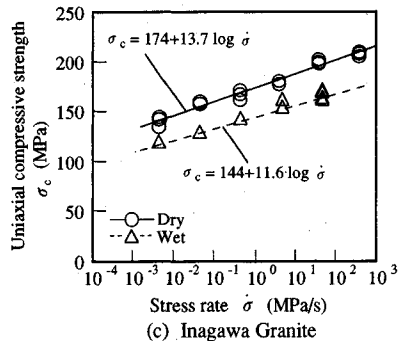
繰り返し回数は、大谷石、三城目安山岩および伊奈川花崗岩については、最大12万回(試験時間約3日間)とし、12万回を超えても破壊しない場合は試験を打ち切った。なお、稲田花崗岩については最大4万回(約1日)までの疲労試験である。気乾状態の疲労試験は4岩種全てについて行ったが、飽和状態の試験は大谷石と伊奈川花崗岩の2岩種である。



(a) Ohya Tuff



(b) Sanjome Andesite



(c) Inagawa Granite

Fig.3 Static strength versus stress rate in air-dried and wet conditions

3. 試験結果と考察

(1) 載荷応力速度が強度に与える影響

a) 応力速度と強度の関係

気乾・飽和状態の一軸圧縮下における大谷石、三城目安山岩および伊奈川花崗岩の圧縮強度 σ_c (MPa)と応力速度 $\dot{\sigma}$ (MPa/s)の関係をFig.3, 三軸圧縮下における伊奈川花崗岩の $\sigma_c - \dot{\sigma}$ 関係をFig.4に示す。今回実施した応力速度 $10^{-3} \sim 10^3 \text{MPa/s}$ の範囲では、岩種、含水条件、拘束圧の有無に係わらず、応力速度 $\dot{\sigma}$ を対数とした片対数グラフ上で線形関係となり、次式で表すことができる。

$$\sigma_c = a + b \log \dot{\sigma} \dots \dots \dots (1)$$

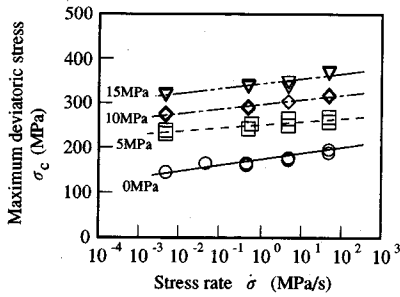


Fig.4 Static strength versus stress rate in triaxial compression test (Inagawa Granite)

ここで, a, bは実験定数である. 上式はひずみ速度で圧縮強度を整理した既往の研究^{20),21)}と同様の形である. 一軸圧縮と三軸圧縮下の近似式をTable 3,4 にまとめて示す. 表中の括弧内の数値は近似式の相関係数である. Table 3のWet/Dryは, 通常の圧縮強度の気乾状態の強度に対する飽和状態の強度の比率である.

気乾状態で圧縮強度の応力速度効果が最も大きいのは伊奈川花崗岩であり, $\dot{\sigma}$ が 10^2 から 10^3 MPa/s と 10^4 減少すると約30%低下するのに対して, 大谷石, 三城目安山岩では約20%の低下である. 気乾と飽和とを比較すると, 伊奈川花崗岩では気乾の82%であるが, 三城目安山岩では67%, 大谷石では44%となり, 強度が低い軟岩ほど水の影響が大きい. 三軸下 (Table 4 参照)では各応力速度ともモール・クーロン則に従って強度は増加するが, 強度の応力速度効果 (式(1)の勾配)は一軸圧縮下と比べて小さくなる.

通常の室内岩石試験では, ひずみ速度が 10^{-5} s⁻¹ 前後(破壊点までの時間が5~10分程度)の載荷速度が選ばれるケースが多い. しかし, 上述のように岩石の強度は載荷速度に大きく影響されるため, CAES, SMESのような長周期繰り返し載荷においては, 圧縮強度の載荷速度効果を考慮して長期強度を議論する必要があるだろう.

b) 非弾性体積ひずみと岩石の損傷

伊奈川花崗岩の応力 σ - 体積ひずみ ϵ_v 曲線をFig.5に示す. 岩石内部の先在亀裂などの収縮, 閉合が終わり(点C), 点Iまではほぼ線形関係を満足して弾性範囲(領域II)であるが, I点から岩石内部の亀裂伸長, 発生に伴う体積膨張が開始するようになる. 点Yを超えると体積膨張が急増して破壊に至る. 他の岩種も同様の挙動を示す. 点C-I間を延長した弾性体積ひずみと実際の体積ひずみとの差である非弾性体積ひずみ ϵ_{iv} (Fig.5参照)は岩石内部の亀裂伸長, 発生による損傷に対応する物理量^{22),23)}と考えられるため, ϵ_{iv} をパラメータとして一定応力速度下における損傷発展を検討する.

各岩石の非弾性体積ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{iv}$ (単位時間当たりの損傷; 損傷の増加率)を載荷応力レベル σ を関数として, 各応力速度毎に整理すると, Fig.6,7のようにな

Table 3 Relation between compressive strength and stress rate calculated by the least squared method

	Ohya Tuff	Sanjome Andesite	Inagawa Granite
Dry	$13.6+0.71 \log \dot{\sigma}$ (0.72)	$106+5.79 \log \dot{\sigma}$ (0.86)	$174+13.7 \log \dot{\sigma}$ (0.99)
Wet	$6.83+0.69 \log \dot{\sigma}$ (0.93)	$74.1+6.91 \log \dot{\sigma}$ (0.95)	$144+11.6 \log \dot{\sigma}$ (0.99)
Wet/Dry	44%	67%	82%

Unit of Strength : MPa, Unit of $\dot{\sigma}$: MPa/s, () : Correlation coefficient

Table 4 Relation between compressive strength and stress rate in triaxial compression test (Inagawa Granite)

Confining pressure (MPa)	Inagawa Granite (MPa)
0.0	$174+13.7 \log \dot{\sigma}$ (0.99)
5.0	$251+7.46 \log \dot{\sigma}$ (0.89)
10.0	$298+10.4 \log \dot{\sigma}$ (0.98)
15.0	$346+11.2 \log \dot{\sigma}$ (0.94)

Unit of $\dot{\sigma}$: MPa/s, () : Correlation coefficient

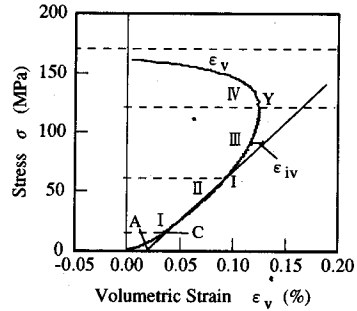


Fig.5 Stress-volumetric strain relationship and inelastic volumetric strain

る. Fig.6は一軸圧縮下の各岩石, Fig.7は三軸圧縮下の伊奈川花崗岩の結果である. 領域III (点I~点Y)における $\log \dot{\epsilon}_{iv}$ と σ の関係は, 岩種, 応力速度に係らず線形関係となり, 載荷応力 σ の関数として次式で表すことができる.

$$\log \dot{\epsilon}_{iv} = c + d \sigma \dots\dots\dots (2)$$

ここで, c, dは実験定数である. 各応力速度に対する定数c, dをTable 5に示す. 載荷速度が増大するとcも増大し, 同じ応力でも載荷速度が大きいほど単位時間当たりの損傷は大きい. 定数cと応力速度 $\dot{\sigma}$ の関係を整理するとFig.8のようになる. 実験定数cは岩種に依存せず, $\log \dot{\sigma}$ と次式のような線形関係にある.

$$c = -6.20 + 0.817 \log \dot{\sigma} \dots\dots\dots (3)$$

一方, 定数dは応力速度に係らず各岩石, 側圧ではほぼ同一となる. 応力増分に対する損傷発展率は載荷速度に係らず一定と言える. 以上から, 一定応力速度下における岩石の損傷発展率は応力速度 ($\dot{\sigma}$) と応力状態 (σ) をパラメータとして表現できる.

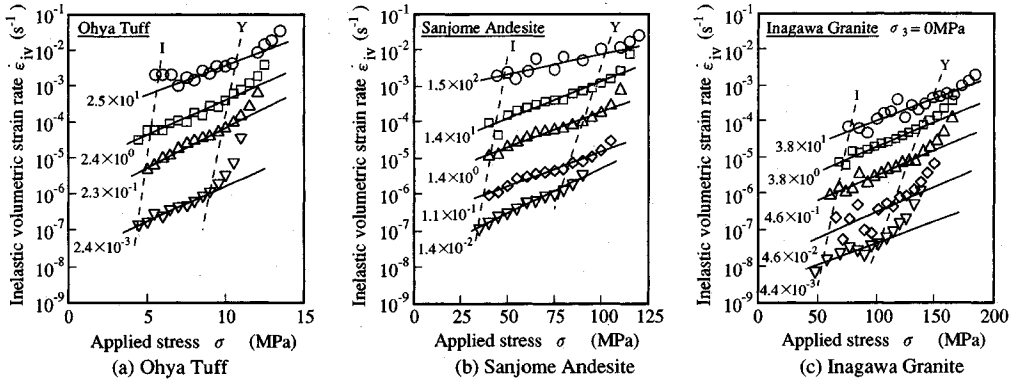


Fig.6 Inelastic volumetric strain rate versus stress for various stress rate

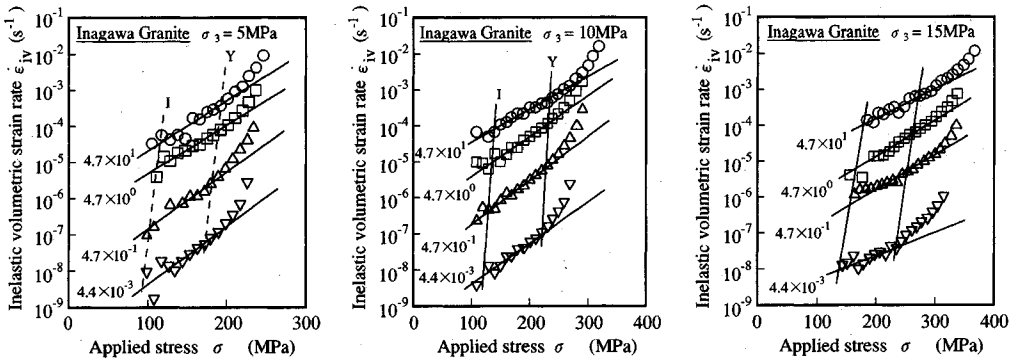


Fig.7 Inelastic volumetric strain rate versus stress in triaxial compression test (Inagawa Granite)

Table 5 Effect of stress rate on inelastic volumetric strain rate : experimental const. c,d (log ε_{iv} = c + d σ)

Stress rate (MPa/s)	Ohya Tuff (0 MPa)		Sanjome Andesite (0 MPa)		Inagawa Granite (0 MPa)		Inagawa Granite (5 MPa)		Inagawa Granite (10 MPa)	
	c	d	c	d	c	d	c	d	c	d
10 ¹	-5.39	0.199	-4.93	0.0205	-5.25	0.0127	-6.10	0.0140	-5.48	0.00825
10 ⁰	-6.40	0.224	-5.71	0.0198	-6.08	0.0138	-6.65	0.0134	-6.93	0.0102
10 ⁻¹	—	—	-6.70	0.0187	-6.89	0.0138	-8.45	0.0159	-7.75	0.00969
10 ⁻²	-7.74	0.194	-7.79	0.0249	-7.92	0.0141	—	—	—	—
10 ⁻³	—	—	—	—	-8.48	0.0114	-9.94	0.0159	-8.92	0.00645
ε _{iv}	5.40 × 10 ⁻⁴		1.24 × 10 ⁻³		3.00 × 10 ⁻⁴		3.36 × 10 ⁻⁴		4.55 × 10 ⁻⁴	

ε_{iv} : Inelastic volumetric strain in area III

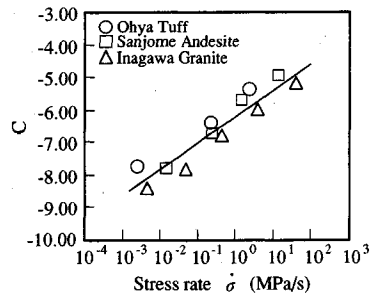


Fig.8 Influence of stress rate on C value

つぎに、領域Ⅲに生じる非弾性体積ひずみを各応力速度について求める(式(2)を点I~Y間で積分)と、その値はσに依存せずほぼ一定値(Table 5 の最下段を参照)になり、損傷が増大して体積膨張が急増するようになる点Y(領域Ⅲ)までの累積損傷は載荷速度によらず一定と推定される。これと式(2),(3)の損傷発展則とを組み合わせることで、任意の応力速度に対する点Yの応力値や破壊時間の評価が可能となる。

(2) 載荷周波数が疲労特性に与える影響

a) 同一最大応力載荷に対する周波数依存性

① 気乾状態

載荷応力の基準を“通常の圧縮強度”として最大応力を周波数によらず同一として実施した片振り疲労試験の結果(破壊回数Nと周波数Fの関係)をFig.9に示す。ここで、基準圧縮強度は Table 1 に示した値である。図中の破壊回数(回)、周波数(Hz)はともに対数で表している。

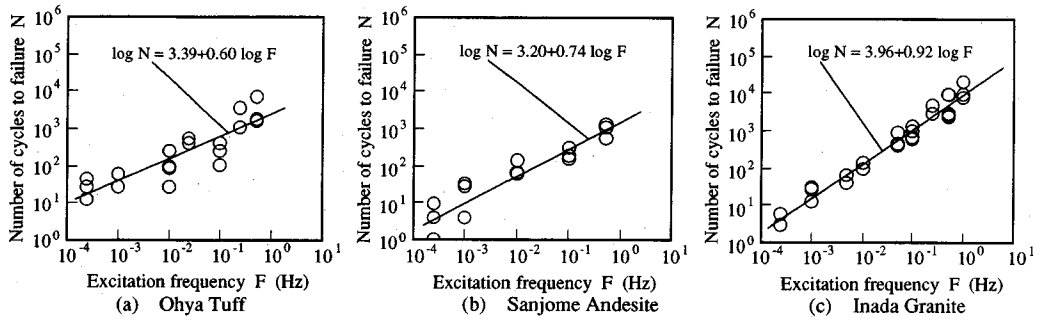


Fig.9 Fatigue life N versus frequency F at same applying maximum stress

最大応力を同一とした場合には、各岩種とも顕著な周波数依存性を示して $\log N$ と $\log F$ は線形関係で表すことができる。この結果は、0.3~20.0Hzで行った Attewell⁹⁾ の実験と同様の傾向であり、 $\log N$ と $\log F$ の線形関係が長周期載荷領域まで成り立つことが明らかとなった。各岩石の近似式 ($\log N = e + f \log F$) は以下のものである。なお、括弧内の数値は近似式の相関係数である。

大谷石 : $\log N = 3.39 + 0.60 \log F$ (0.88).....(4)

三城目安山岩 : $\log N = 3.20 + 0.74 \log F$ (0.94).....(5)

稲田花崗岩 : $\log N = 3.96 + 0.92 \log F$ (0.98).....(6)

各岩種の0.5Hz (1周期2秒) と 2.5×10^4 Hz (1周期4000秒) 載荷に対する破壊回数は、大谷石では、0.5Hzで約1600回が 2.5×10^4 Hzでは16回に、三城目安山岩では約960回が3~4回に、稲田花崗岩では約4840回の破壊回数が4~5回と大きく低下する。三岩種の中では、稲田花崗岩が最も顕著な周波数依存性を示す。

以上は、最大応力を“通常の圧縮強度”の0.8とした場合の結果であるが、最大応力を3段階(0.5Hzに対応する強度の0.9, 0.8, 0.7)変化させ、載荷周波数も 2.5×10^5 Hz (1周期11.1時間) まで試験した伊奈川花崗岩の結果をFig.10に示す。各応力の近似式はつぎのようである。括弧内に近似式の相関係数を記す。

伊奈川花崗岩 (気乾) :

S = 0.9 : $\log N = 1.18 + 0.55 \log F$ (0.96).....(7)

S = 0.8 : $\log N = 2.10 + 0.51 \log F$ (0.93).....(8)

S = 0.7 : $\log N = 3.61 + 0.60 \log F$ (0.94).....(9)

最大応力が変化しても破壊回数N-周波数F関係は同様の傾向を示す。また、1周期11.1時間とCAES, SMESで対象となるような長周期繰り返し載荷となっても $\log N = e + f \log F$ の関係が成立する。

② 飽和状態

飽和状態の繰り返し疲労破壊の周波数依存性試験の結果をFig.11に示す。最大応力は、大谷石が“通常の圧縮強度”の0.8 (気乾で10.1MPa, 飽和で4.56MPa), 伊奈川花崗岩は0.5Hzの繰り返し応力速度に対応する圧縮強度の0.7 (気乾で13.1MPa, 飽和で11.4MPa) である。飽

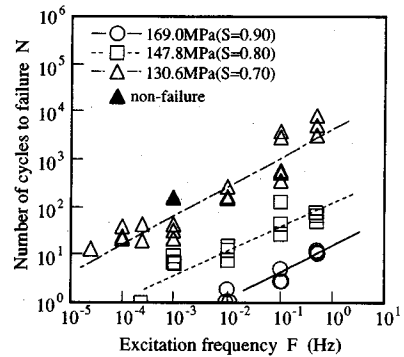


Fig.10 Fatigue life N versus frequency F at three applying maximum stress (Inagawa Granite)

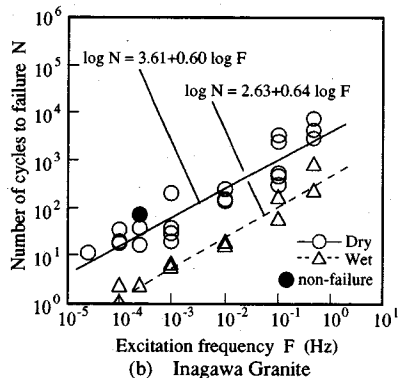
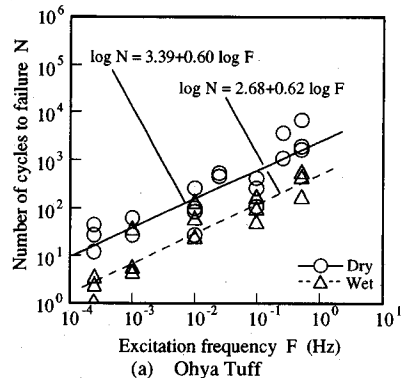


Fig.11 Fatigue life N versus frequency F in wet condition

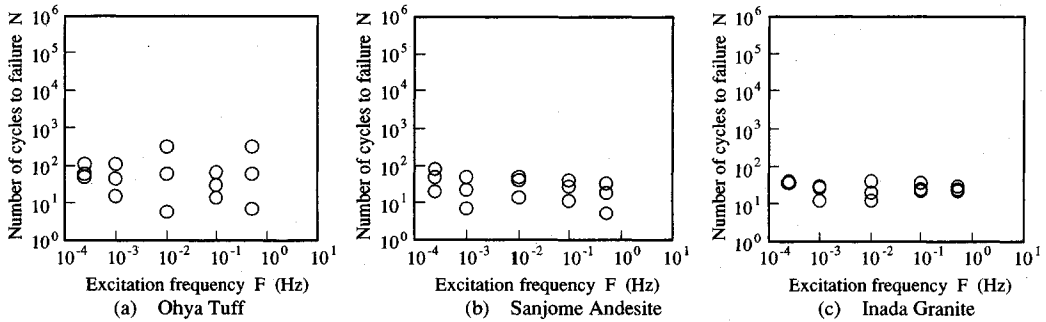


Fig.12 Fatigue life N versus frequency F at same applying maximum stress ratio to static strength

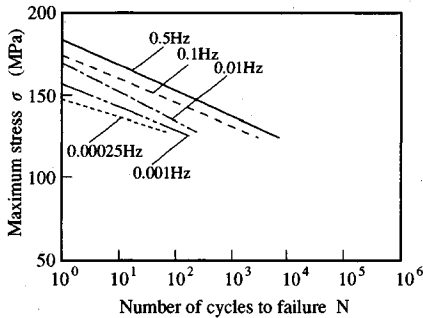


Fig.13 σ -N curves for Inagawa Granite

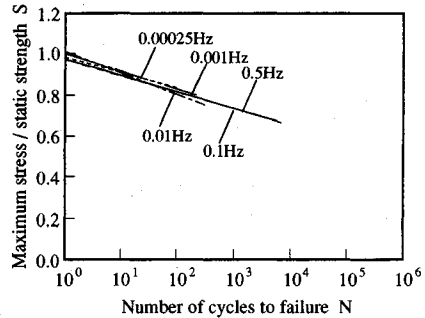


Fig.14 S-N curves for Inagawa Granite

和状態でも破壊回数N一周波数F関係は乾燥状態と同じ傾向を示し、各々つぎのような関係を得る（相関係数を付記する）。

大谷石 : $\log N = 2.68 + 0.62 \log F$ (0.92).....(10)

伊奈川花崗岩 : $\log N = 2.63 + 0.64 \log F$ (0.98).....(11)

含水状態が破壊回数に与える影響は大きく、同じ最大応力比でも飽和状態の方が気乾の約10分の1の回数で破壊に至る。

以上のように、同一最大応力で繰り返し载荷する場合には、含水状態に係わらず破壊に至る繰り返し回数は载荷周波数に大きく依存する。そのため、1日1周期といった長周期に対する応力-繰り返し回数関係を厳密に評価するには、実際に1日1周期の試験を行う必要がある。しかし、これは試験時間の問題で容易でない。

b) 同一最大応力比载荷に対する周波数依存性

“繰り返し応力速度に対応する圧縮強度”を基準として最大応力比を $S = 0.8$ とした場合の破壊回数N一周波数F関係をFig.12に示す。大谷石では大きくばらつくが7~330回の範囲にあり、破壊回数Nの周波数依存性は見られない。同様に、三城目安山岩では5~80回、稲田花崗岩では10~60回の範囲にあり、周波数による破壊回数の変化は認められない。このように、最大応力を繰り返し応力速度に対応する強度を基準として同一応力比で载荷すると、破壊回数は周波数によらず一定値となる。

この結果から、前項の同一最大応力载荷に対する周波数依存性は、応力速度-強度関係が反映した結果と推定される。すなわち、周波数が低下すると繰り返し応力速度も低下して圧縮強度が小さくなる。そのため、同一最大応力でも実質的な応力比が大きくなり、破壊に至る回数が低下すると考えられる。

以上から、疲労試験の周波数を0.5~0.1Hzと比較的高くしても、“繰り返し応力速度に対応する圧縮強度”を基準として载荷応力比Sを設定して試験を行えば、長期载荷に対する破壊回数Nを評価することができる。

c) σ -N曲線, S-N曲線の周波数依存性

伊奈川花崗岩の繰り返し疲労試験結果を、応力 σ -破壊回数N曲線、応力比S-破壊回数N曲線として、各周波数(0.5,0.1,0.01,0.001,0.00025Hz)毎に整理したものを(各周波数毎の試験データを最小自乗法で近似した直線)をFig.13,14に示す。

σ -N曲線 (Fig.13参照)は、0.5→0.00025Hzと周波数の低下とともに、繰り返しに耐える応力は徐々に低下するが、 σ -N曲線の勾配は周波数によらず一定と見做すことができる。この結果は、Cho・Haimson¹²⁾のNiagara dolomiteの厚肉円筒試験片に载荷周期を変化させて内圧を作用させた疲労試験結果と同様である。これに対して、基準とする強度を周波数に対応する圧縮強度とした場合のS-N曲線 (Fig.14参照)は载荷周波数に

Table 6 Fatigue strengths (ratio to static strength) for repetitions of 10,000 and 100,000 cycles

No. of Cycles	Ohya Tuff		Sanjome Andesite		Inagawa Granite		Inada Granite
	Dry	Wet	Dry		Dry	Wet	Dry
10 ⁴ cycles	0.66	0.46	0.64		0.64	0.56	0.68
10 ⁵ cycles	0.60	0.33	0.57		0.55	0.46	0.61
Static Strength (MPa)	12.8	5.77	104		169	139	179

依存せずほぼ一致する。

以上の試験結果から、疲労試験における載荷応力の設定を周波数に対応する圧縮強度とすれば、比較的高い周波数（例えば、0.5Hz）で疲労試験を行っても、その試験で得られるS-N曲線は1日1周期という長周期載荷に対するS-N曲線と同等と考えることができる。

(3) 各種岩石のS-N曲線と疲労限界

載荷周波数0.5Hzで行った疲労試験結果を、0.5Hzの繰り返し応力速度に対応する圧縮強度で基準化したS-N曲線をFig.15に示す。大谷石と伊奈川花崗岩については飽和状態の試験結果も併せて示す。繰り返し回数が10~12万回になると疲労破壊するものや非破壊のものが共存して、疲労限界の有無を確認することができなかったが、各岩石とも繰り返し回数10万回では、破壊回数Nを対数軸とした片対数グラフ上で線形関係（ $S = g - h \log N$, g, hは実験定数）となる。各々の近似式は以下のようである。近似式の相関係数も付記する。

大谷石

(気乾) : $S = 0.914 - 0.063 \log N$ (0.91).....(12)

(飽和) : $S = 0.995 - 0.134 \log N$ (0.97).....(13)

三城目安山岩 : $S = 0.907 - 0.067 \log N$ (0.95).....(14)

伊奈川花崗岩

(気乾) : $S = 0.987 - 0.087 \log N$ (0.99).....(15)

(飽和) : $S = 0.978 - 0.104 \log N$ (0.99).....(16)

稲田花崗岩 : $S = 0.938 - 0.065 \log N$ (0.97).....(17)

1万回および10万回の繰り返し載荷に対する各岩石の応力比と1日1周期載荷に対応する疲労強度をまとめて、Table 6に示す。また、比較のために“通常の圧縮強度”も示す。

気乾状態の疲労強度は岩種によりわずかに差はあるが、10万回の疲労強度は静的な圧縮強度に対する応力比で0.55~0.60となる。これに対して、飽和状態では大谷石では0.33（気乾では0.60）、伊奈川花崗岩では0.46（気乾では0.55）となり、気乾と比べて疲労による強度低下が著しくなる。また、岩石中の水分が疲労強度に与える影響は、Fig.15の大谷石、伊奈川花崗岩の結果からも分かるように、繰り返し回数の増大とともに大きくなる。このように、岩石・岩盤の疲労強度を議論する上では水の存在が重要なパラメータになる。

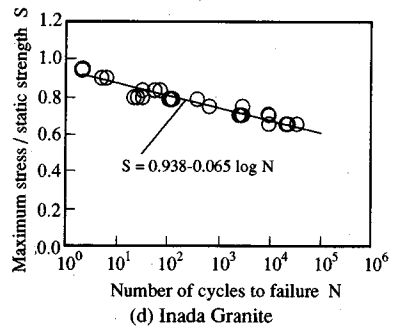
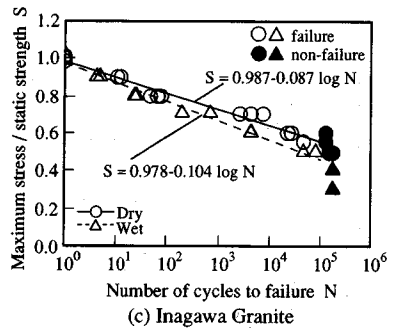
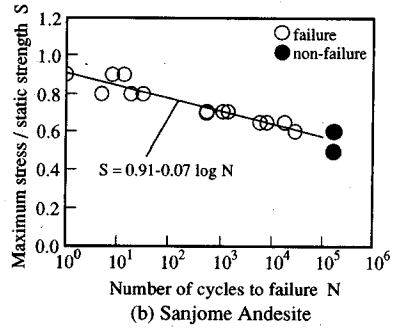
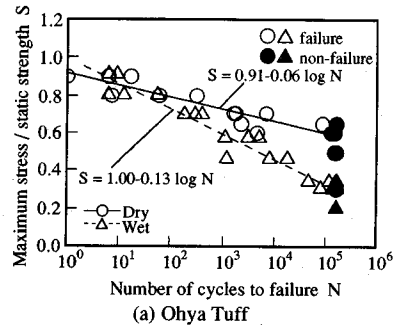


Fig.15 S-N curves in uniaxial compression test in terms of static strength for frequency

4 結 論

本研究では、軟岩、中硬岩、硬岩として大谷石、三城目安山岩、花崗岩を選んで、含水条件と拘束圧をパラメータとして応力速度が静的圧縮強度に与える影響を調べた。つづいて、周波数を変化させた繰り返し疲労試験により岩石の疲労強度特性の周波数依存性を議論し、長周期載荷における疲労強度の推定方法について検討した。本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

(1) 応力速度 $\dot{\sigma}$ が圧縮強度 σ_c に与える影響は、岩種、含水条件、拘束圧の有無に係わらず、既往の研究と同様、応力速度を対数とした片対数グラフ上で線形関係となり、 $\sigma_c = a + b \log \dot{\sigma}$ と表すことができる。

(2) 岩石の損傷変数を非弾性体積ひずみで調べると、一定応力速度下における岩石の損傷発生率は応力速度 ($\dot{\sigma}$) と応力状態 (σ) をパラメータとして表現できる。また、体積膨張が急増する点までの累積損傷は応力速度に依存せず一定となる。

(3) 同一最大応力で繰り返し載荷する場合には、破壊に至る繰り返し回数 N は載荷周波数 F に大きく依存し、 F が小さくなると N は大きく低下する (稲田花崗岩では 0.5Hz で 4840 回が 2.5×10^4 Hz では 4 ~ 5 回)。その関係は $\log N = e + f \log F$ と表すことができる。

(4) 繰り返し載荷応力速度に対応する圧縮強度を基準として、同一最大応力比で繰り返し載荷すると、破壊に至る繰り返し回数は周波数 (0.5 ~ 0.00025 Hz) によらず一定値となる。同様に、繰り返し載荷の応力速度に対応する圧縮強度を基準とした場合の $S-N$ 曲線も周波数に依存せずほぼ一致する。このことから、長周期繰り返し載荷における疲労強度は、0.5 Hz と比較的高い周波数の疲労試験でも、基準となる圧縮強度を繰り返し応力速度に対応する強度とすることにより評価できる。

(5) 今回実施した大谷石、三城目安山岩、花崗岩は全て 10 万回の繰り返し回数の範囲では $S = g - h \log N$ と表すことができる。3 岩種の気乾状態の 10 万回疲労強度は静的圧縮強度の 0.55 ~ 0.60 であるが、飽和状態になると強度低下 (大谷石では気乾で 0.60 に対して飽和では 0.33) が著しくなる。このため、長期的な疲労強度を評価する際には水の有無を十分考慮する必要がある。

まえがきでも述べたように、岩盤の疲労特性は不連続面などの地質状況に影響されるため、今回の試験結果を踏まえ、最終的には原位置においてその特性を評価する必要がある。

最後に本研究を行うにあたり、数多くの試験の実施、データ処理に際して多大な御協力をいただいた清水建設 (株) 技術研究所の中谷篤史氏に心から謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会エネルギー土木委員会編：圧縮空気貯蔵発電システム (CAES) と土木技術—その現状と技術課題—, 土木学会, 1990.
- 2) 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.
- 3) (財) 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.
- 4) 堀部富雄・小林良二・池見保紘：砂岩の疲労試験, 材料, 第17巻, 第181号, pp.914~918, 1968.
- 5) 堀部富雄・小林良二・池見保紘：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, pp.29~34, 1970.
- 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, pp.413~418, 1970.
- 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, pp.68~72, 1971.
- 8) Attewell, P.B. & Farmer, I.W.: Fatigue Behaviour of Rock, Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract, Vol.10, pp.1~9, 1973.
- 9) Haimson, B.C. & Kim, C.M.: Mechanical behavior of rock under cyclic fatigue, Proc. of 13rd U. S. Symp. on Rock Mechanics, pp.845~863, 1972.
- 10) Haimson, B.C.: Mechanical behavior of rock under cyclic loading, Proc. of 3rd Congress of International Society of Rock Mechanics, Vol.3, No.2-A, pp.373~378, 1974.
- 11) Haimson, B.C.: Effect of cyclic loading on rock, Dynamic Geotechnical Testing (ASTM STP-654), ASTM, pp.228~245, 1978.
- 12) Cho, T.F. & Haimson, B.C.: Effect of cyclic loading on circular openings; results of a laboratory simulation", Proc. of 28th U. S. Symp. on Rock Mechanics, pp.805~812, 1987.
- 13) Scholz, C.H. & Koczyński, T.A.: Dilatancy anisotropy and response of rock to large cyclic loads, J. Geophys. Res., Vol.84, No. 110, pp.5525~5534, 1979.
- 14) 赤井浩一・大西有三・吉田順：三軸圧縮状態で繰り返し荷重を受ける飽和軟岩の挙動について, 第14回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.26~30, 1982.
- 15) 大西有三・吉田順・征矢雅宏：飽和軟岩の繰返しせん断試験とクリープ挙動について, 第17回土質工学研究発表講演概要集, pp.649~652, 1982.
- 16) Akai, K. & Onishi, Y.: Strength and deformation characteristics of soft sedimentary rock under repeated and creep loading, Proc. Int. Congr. Rock Mech., pp.121~124, 1983.
- 17) 松木浩二・工藤裕之：不飽和含水状態にある岩石の封圧下における繰返し疲労特性—封圧下において繰返し圧縮荷重を受ける岩石の力学的挙動に関する研究 (第1報)—, 日本鉱業会誌, Vol.102, No.1186, pp.849~854, 1986.

- 18) 工藤裕之・松木浩二: 飽和含水状態にある岩石の繰り返し疲労特性におよぼす間隙水圧の影響—封圧下において繰り返し圧縮荷重を受ける岩石の力学的挙動に関する研究 (第2報) —, 日本鉱業会誌, Vol.104, No.1201, pp.157~161, 1988.
- 19) 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.
- 20) Masuda, K., Mizutani, H. & Yamada, I.: Experimental study of strain-rate dependence and pressure dependence of failure properties of granite, *J. of Phys. Earth*, Vol.35, pp.37 ~66, 1987.
- 21) Masuda, K., Mizutani, H. & Yamada, I.: Effects of water on time-dependent behavior of granite, *J. Phys. Earth*, Vol.36, pp.291~313, 1987.
- 22) 佐野修・工藤洋三・水田義明: 岩石の破壊挙動の時間依存性に関する統一的解釈, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.1~5, 1989.
- 23) Kranz, R.K.: The effects of confining pressure and stress difference on static fatigue of granite, *J. Geophys. Res.*, Vol.85, No.B4, pp. 1854 ~1866, 1980.
- 24) Costin, L.S.: A microcrack model for the deformation and failure of brittle rock, *J. Geophys. Res.*, Vol.88, No.B11, pp.9485~9492, 1983.

(1992.3.23 受付)

EFFECTS OF STRAIN RATE AND FREQUENCY ON FATIGUE STRENGTH OF ROCKS

Yoshio ISHIZUKA, Tohru ABE, Hiroshi KOYAMA and Seiichi KOMURA

Fatigue tests have been performed on soft to hard rocks to study the method for evaluation of a strength of rock against long-term loading. The dependence of the static strength on stress rate can be expressed as $\sigma = a + b \log \dot{\sigma}$. In cyclic loading fatigue tests which with maximum stress ratio normalized by the compressive strength corresponding to cyclic loading stress rate, the S-N curve is independent on the excitation frequency. Experimental results indicate that the fatigue strength such as S-N curve under the long-term cyclic loading can be evaluated through fatigue tests at a relatively short frequency of 0.5Hz by using the static compressive strength corresponding to the cyclic loading stress rate.
