

III-228 繰返し荷重を受ける各種岩石の疲労変形特性

清水建設(株)技術研究所 正会員 ○石塚与志雄・安部 透・中谷篤史
中部電力(株)電力技術研究所 正会員 東側 豊二・河村精一

1. はじめに 岩石の疲労特性については、 $S-N$ 曲線や疲労強度など応力に関する研究^{1) 2)}が多いが、超電導エネルギー貯蔵の場合には電磁力を支持する岩盤の強度特性だけでなく、変形特性の検討が必要となる。また、疲労寿命や破壊機構を議論する上でも変形性の検討は重要である。本報告では、各種岩石の疲労試験で得られた変形データの分析を行い、ひずみ、ヒステリシスエネルギーの推移から岩石の疲労特性を検討するとともに、各繰返し载荷におけるひずみ増分を示し、変形性の観点から疲労破壊基準を議論した。

2. 試験概要 硬岩・中硬岩・軟岩として伊奈川花崗岩

（愛知県足助）、三城目安山岩（福島県須賀川）、大谷石（栃木県宇都宮）を使用した。試料は $\phi 50\text{mm}$ 、 $h100\text{mm}$ の円柱

供試体とし、気乾状態の一軸圧縮応力下で試験を行った。各岩石の力学定数を表-1に示す。表中の値は周波数0.5Hzに相当する载荷速度で得られたものである。疲労試験では周波数0.5Hzの正弦波により最大約13万回まで繰返し载荷した。正弦波の最大応力レベルは静的強度（表-1）を基準として0.9~0.5の範囲で変化させた。試験中は軸方向と径方向の変位を測定し、各サイクル時の最大と最小のひずみ値と、代表的なサイクル数（1~10, 20, 30, 50, 100, 200...と破壊直前の10サイクル）におけるヒステリシス曲線を数値データとして収録した。各岩石の $S-N$ 曲線の近似式を表-1に示す。3岩石とも13万回の範囲では疲労限界は存在せず、10万回疲労強度は各々、基準の静的強度の55%、57%、60%である。

3. 試験結果

(1) 応力-ひずみ関係と最大軸ひずみの挙動 図-2に载荷応力レベル0.7の応力-ひずみ曲線を、図-3に各応力レベルにおける最大軸ひずみ $\epsilon_{1\text{max}}$ （最大応力時のひずみ）-繰返し回数関係を示す。

繰返しに伴う最大軸ひずみの変化は、载荷応力レベルが0.9と高い時には载荷開始と同時に大きく変形するが、応力レベルが低くなると各岩石とも定常的に変形（定常領域）した後、破壊直前に急速に変位が増大（加速領域）して破壊に至る。これらの変形性は既往の試験結果^{1) 2)}と同様で、クリープ変形状と類似である。繰返し载荷に伴う弾性係数の変化は、第2回目载荷以降は加速領域に至るまでは大きく変化せず、ほぼ一定と見做すことができる。また、繰返し载荷に伴う残留ひずみは最

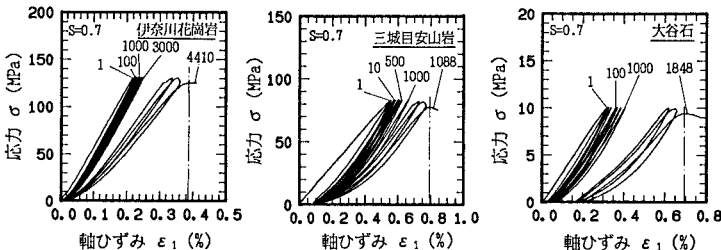
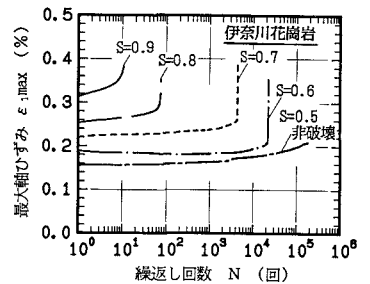


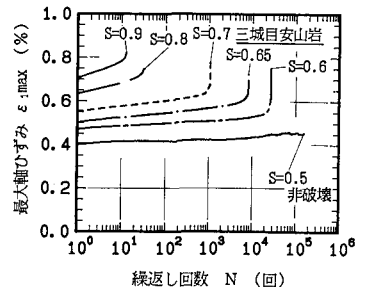
図-2 各岩石の応力-ひずみ関係

表-1 岩石の力学定数と $S-N$ 曲線

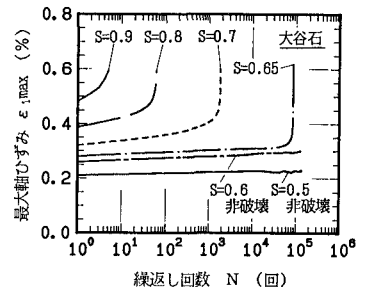
岩石名	一軸圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	$S-N$ 曲線 ($S=a-b\log N$)
伊奈川花崗岩	187.3	62.0	$0.987-0.087 \log N$
三城目安山岩	118.0	14.8	$0.907-0.067 \log N$
大谷石	14.4	3.1	$0.914-0.063 \log N$



(a) 伊奈川花崗岩



(b) 三城目安山岩



(c) 大谷石

図-3 $\epsilon_{1\text{max}}-N$ 関係

初の除荷時に大きく発生するが、定常領域における残留ひずみの累積は極めて小さい。

(2)ヒステリシスエネルギーとひずみ増分の推移 1 サイクル当たりのヒステリシスエネルギーH（図-4参照、載荷エネルギーから弾性回復エネルギーを除いたエネルギーで、岩石の損傷に対応するエネルギーである）の推移を図-5に示す。これによると、各岩石とも定常領域では1サイクル当たりのヒステリシスエネルギーは繰返し回数の増加とともに徐々に減少していき、加速領域で急激に増大する。ヒステリシスエネルギーの推移から、定常領域では1サイクル当たりの損傷は徐々に減少していくことが明らかとなった。

クリープ問題では定常クリープひずみ速度と破壊に至るまでの時間との間には両対数紙上で逆比例関係があることが知られている³⁾。同様に、疲労変形について最大軸ひずみの増加率($\dot{\epsilon}_1 \max$)と繰返し回数Nの関係を整理すると図-6のようになる。定常領域では、クリープ変形と同様に($\log \dot{\epsilon}_1 \max$)と($\log N$)とは逆比例し、最大軸ひずみ増分は繰返しの増加に伴い小さくなって極小値を取る。各応力レベル毎の $\dot{\epsilon}_1 \max$ の極小値は図中の直線($\dot{\epsilon}_1 \max = cN^{-d}$ 、次式)で近似できる。

$$\text{花崗岩} : \dot{\epsilon}_1 \max = 0.0198 N^{-0.995} \quad (1)$$

$$\text{三城目安山岩} : \dot{\epsilon}_1 \max = 0.0540 N^{-1.109} \quad (2)$$

$$\text{大谷石} : \dot{\epsilon}_1 \max = 0.0265 N^{-0.724} \quad (3)$$

この直線より下方は疲労破壊しない領域に対応する。そのため、上式から求まる限界ひずみ増分が疲労破壊の基準となる。実際のひずみ増加率が限界ひずみ増加率より小さければ、疲労破壊しないことになる。

4. まとめ 岩石の疲労試験を行い、その変形性について検討した。

この結果、疲労変形はクリープ変形特性と類似であること、定常領域では1サイクル当たりの損傷が繰返し回数の増加とともに減少していくことをヒステリシスエネルギーから明らかにした。また、最大軸ひずみの増加率と繰返し回数の関係からひずみによる疲労破壊の基準を提示した。

【参考文献】

- 1) 堀部・小林・池見：第3回岩石の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.23～28(1970)
- 2) B. C. Haimson: 3rd Cong. Int. Soc. Rock Mech., Vol. 3, No. 2-A, pp.373～378(1974)
- 3) 例えば，赤井・足立・西：土木学会論文集，第282号，pp.75～87(1979)
- 4) K. Akai & Y. Ohnishi: Proc. Int. Cong. Rock Mech., pp.121～124(1983)

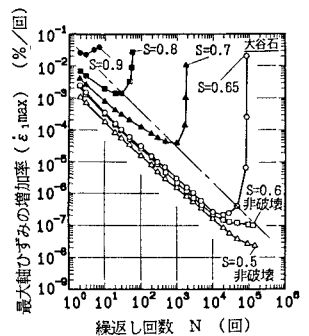
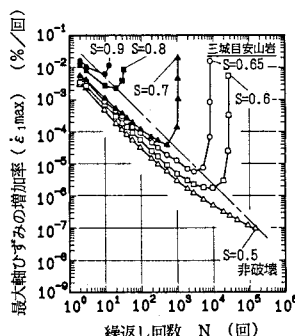
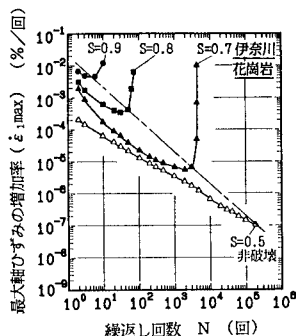
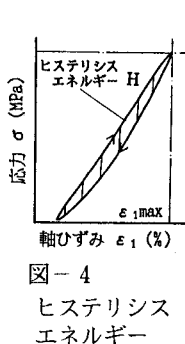


図-6 各岩石の最大軸ひずみ増加率-繰返し回数関係

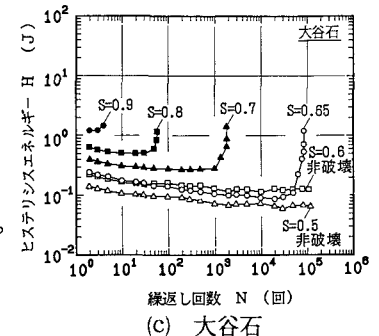
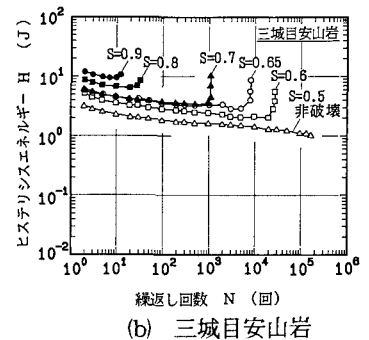
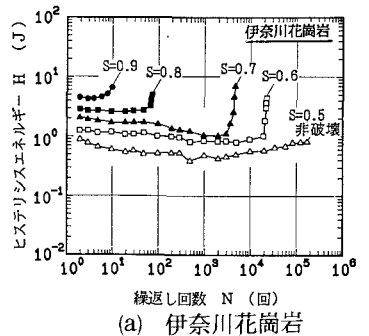


図-5 ヒステリシスエネルギーの推移