

清水建設技術研究所 正会員 ○石塚与志雄・安部 透

1. はじめに 超電導エネルギー貯蔵施設(SMES)の概念設計^{1) 2)}によると、貯蔵容量5GWhのSMESでは30～50kgf/cm²の電磁力が分布荷重として、岩盤に1日1回(30年間で約1万回)作用することになる。電磁力に対するSMESの安定性評価のためには、岩盤の長期疲労特性(疲労破壊強度、疲労変形特性など)の検討が必要となる。岩石の疲労特性については、西松³⁾、Haimson⁴⁾らにより、疲労強度は静的強度の60～80%に低下すること、疲労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にされている。筆者ら⁵⁾も岩石(稲田花崗岩)の一軸圧縮下の繰返し载荷試験を実施し、疲労破壊強度は载荷周波数に大きく依存すること、周波数0.5Hzでは疲労破壊強度は70～75%に低下すること、疲労破壊特性は金属材料と同様にS-N線関係で表示できることなどを明らかとした。以上の結果を踏まえ、今回は三軸圧縮下の繰返し载荷試験を実施し、花崗岩の三軸圧縮下疲労特性について検討する。

2. 実験概要 試験片は一軸圧縮繰返し载荷試験同様、筑波産の稲田花崗岩を用い、寸法を $\phi 50, h100\text{mm}$ の円柱とした。実験装置は最大圧縮荷重450tonのMTS社製サーボコントロール試験装置を用い、応力制御により繰返し载荷試験を行った。周波数は0.5Hz、载荷波形は正弦波とし、側圧はSMESの設置深度(200m程度)を考慮して1.96, 3.92, 5.88MPaの3ケースとした。载荷応力は側圧を一定とし、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応力比 $S = (\text{载荷軸差応力} / \text{破壊軸差応力})$ をパラメータとした。応力比 S は0.95, 0.90, 0.85, 0.80, 0.70, 0.50の6ケースとし、繰返し回数 N が40,000回を超えても破壊しない試験片は非破壊と扱った。試験中、変位計により軸ひずみと径ひずみの測定を行うとともに、破壊初生時期を調べるためにAE計測を行った。

なお、静的力学試験結果(一軸および三軸圧縮試験)は表-1に示すようで、破壊包絡線は $\sigma_1 = 200.9 + 2.08\sigma_3$ (MPa)となる。図-1は三軸圧縮下(側圧5.88MPa)の応力-ひずみ関係で、参考のために繰返し試験時の応力比を示す。静的三軸圧縮試験では $S = 0.80$ 付近で体積ひずみが膨張に転ずるようになる。

3. 実験結果

(1) 疲労強度 载荷周波数0.5Hzの一軸圧縮疲労試験では花崗岩の疲労破壊は70～75%に低下し、その疲労特性は金属材料でよく用いられるS-N線で近似でき、次式で表すことができた⁵⁾。

$$S = 1.022 - 0.0576 \log N \quad (1)$$

一方、三軸圧縮下の繰返し試験では応力比が0.80以下になると側圧レベルに係わらず疲労破壊せず、5.88MPa以下の拘束圧下における花崗岩の疲労強度は静的三軸破壊強度の80～85%に低下する。また、疲労破壊特性は、図-2に示すように一軸圧縮下の疲労破壊特性と同様S-N線関係が得られた。三軸圧縮下のS-N線関係は

表-1 静的力学試験結果

側圧 σ_3 (MPa)	$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)	破壊時 軸ひずみ (%)	破壊時 径ひずみ (%)	弾性係数 (MPa)	ポアソン 比
0.00	191.2	0.386	0.195	62.8	0.13
1.96	142.1	0.387	0.380	72.2	0.20
3.92	287.8	0.457	0.486	73.8	0.20
5.88	327.9	0.501	0.515	74.9	0.22
7.84	343.8	0.517	0.506	76.6	0.22

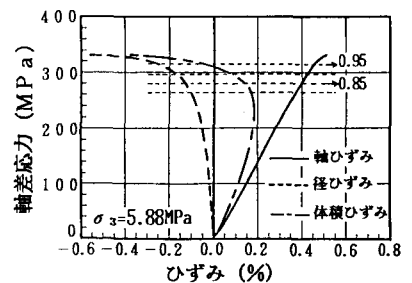


図-1 三軸圧縮試験結果と応力比

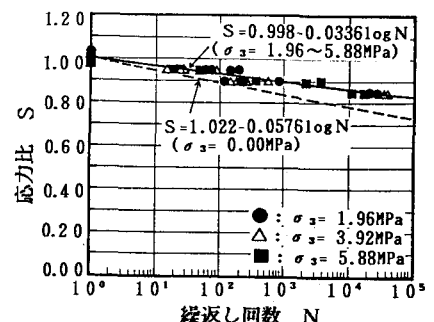


図-2 疲労破壊強度特性

側圧1.96, 3.92, 5.88MPa 間ではほとんど差がなく、次式で表すことができる。

$$S = 0.998 - 0.0336 \log N \quad (2)$$

(2) 疲労変形特性 図-3に側圧 5.88MPa, 応力比0.90時の応力-ひずみ曲線とAE計測結果を示す。この結果は一軸圧縮下の試験で得られた傾向と同様で、破断する直前まではAEの発生も少なく、軸ひずみの変化も緩やかに定常的に推移するが、破断直前になると体積ひずみ、AEが急増し一挙に破壊に至る。

載荷回数と弾性係数の関係を一軸および三軸圧縮下(側圧 5.88MPa)について図-4, 5に示す。これによると、弾性係数は共に載荷回数の増加に伴い徐々に低下する傾向を示すものの、破壊直前まではほぼ一定値を示し、破壊直前に大きく低下する。その傾向は一軸と三軸とでほとんど差はない。繰返し載荷による体積ひずみの推移は図-6のように、破線は一軸圧縮下、実線は側圧 5.88MPaの場合の体積ひずみで、膨張を正としている。体積ひずみの変化は大きく3段階に分けることができる。第1段階は載荷初期で、載荷と同時に大きく膨張する。つぎの第2段階ではほぼ一定速度で定常的に膨張し、最後の第3段階ではAE発生に対応して急激に増加し始め、破壊に至る。この傾向は岩石のクリープ変形特性と同様である。

4. おわりに 今回の花崗岩の三軸圧縮下繰返し載荷試験により以下のことが明らかになった。

- (1) 疲労破壊特性は三軸圧縮下においても一軸同様、S-N線図で表すことができる。疲労破壊強度は 5.88MPa までの拘束圧では側圧に依存せず静的強度の80~85%に低下し、一軸圧縮下の強度低下(70~75%)よりも低下率は小さくなる。
- (2) 疲労変形特性はクリープ変形特性と同様の傾向を示す。疲労損傷は一軸圧縮疲労試験と同様、破壊直前に大きく進行し、ぜい性的に破壊する。

今回の試験では周波数を 0.5Hz一定とした。SMESでは1日1回と長周期載荷となるため、今後は長周期下の疲労特性についても検討していきたい。

〔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) 西松裕一ら: 材料, 第20巻, 第209号, pp.68~72(1970)
- (4) Haimson B.C.: National Academy of Sciences, pp.373~378(1974)
- (5) 石塚与志雄ら: 第22回土質工学研究発表会講演集(1987)

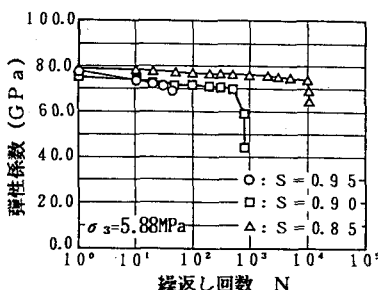
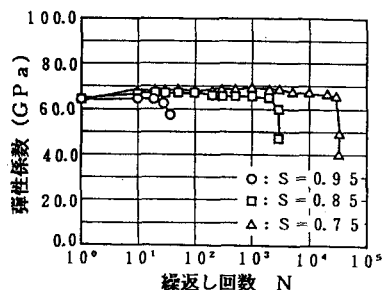


図-4 一軸圧縮下の弾性係数の変化

図-5 三軸圧縮下の弾性係数の変化

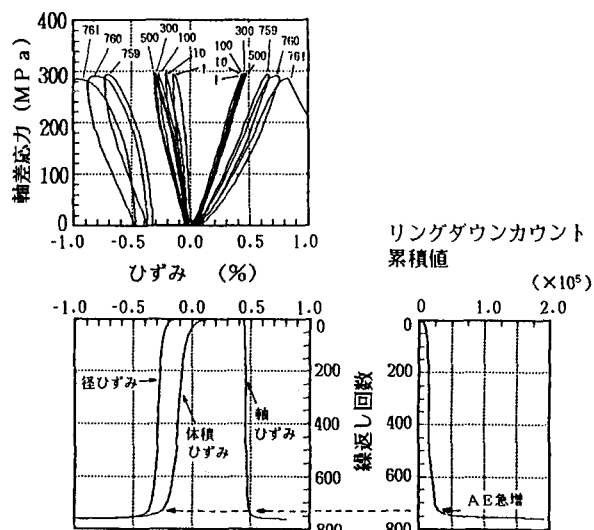
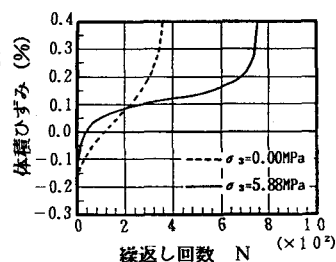
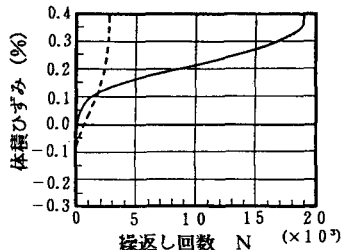


図-3 繰返し載荷試験結果(側圧5.88MPa, S=0.90)



(a) 応力比 S = 0.90



(b) 応力比 S = 0.85

図-6 体積ひずみの変化