

III-227 長周期載荷に対する花崗岩の疲労強度の推定

中部電力㈱電力技術研究所 正会員 ○河村精一・東側豊二
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 将来の電力貯蔵システムである超電導エネルギー貯蔵やライニング方式の変圧法による圧縮空気貯蔵発電では、電磁力や高圧が長周期で周辺岩盤に繰返し作用することになる。そのため、これらの施設では、長周期載荷に対する岩盤の疲労特性の検討が必要となる。同一応力載荷の場合には、載荷周波数が低くなるに伴い破壊に至る繰返し回数は少なくなり、疲労強度が周波数に依存することが知られている¹⁾。本研究では、これらの基礎的検討として室内岩石試験を実施し、花崗岩の長周期載荷（1日1周期）に対する疲労強度の推定を試みた。

2. 試験概要 愛知県足助町に分布する花崗岩（領家帯新期花崗岩類の伊奈川花崗岩，通称：足助荒目石）を試験岩石とした。この花崗岩の力学的異方性は表-1に示すようである。表中の軸方向R軸，G軸，H軸は工藤³⁾らの表記と同様である。今回の試験は全て一軸圧縮応力状態でい、供試体（φ50mm，h100mmの円柱）に対する載荷方向をrift面に垂直なR軸方向（通常の一軸圧縮強度で169.5MPa）に統一した。

試験装置は最大で450tの圧縮載荷能力を有するMTS社製サーボコントロール剛性試験装置とした。岩石供試体の含水条件は、乾燥と含水飽和の2条件とした。

疲労試験に先立って、まず、①ひずみ速度が静的強度に与える影響（ひずみ速度 $10^{-2} \sim 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ）を把握し、繰返し載荷応力設定時の基準とした。続いて、②疲労強度特性の周波数依存性（周波数0.5～0.00025 Hz）および③S-N曲線、疲労限界の把握

（周波数0.5Hzで最大約13万回まで載荷）に関して疲労試験を実施した。各試験項目毎の試験内容をまとめて表-2に示す。②、

③の繰返し載荷試験では、載荷波形を正弦波とし、最小応力をほぼゼロ一定とし、最大応力を載荷レベルに応じて変化させた。

3. 試験結果と考察

(1)ひずみ速度が静的強度に与える影響： ひずみ速度 $\dot{\epsilon} (\text{s}^{-1})$ と一軸圧縮強度 $\sigma_c (\text{MPa})$ の関係を図化すると図-1のようになり、既往の研究⁴⁾と同様に次式で近似できる。

●乾燥： $\sigma_c = 238.0 + 13.75 \log \dot{\epsilon}$ (1a)

$\sigma_c = 190.7 + 11.49 \log F$ (1b)

●飽和： $\sigma_c = 229.5 + 12.81 \log \dot{\epsilon}$ (2a)

$\sigma_c = 191.6 + 12.08 \log F$ (2b)

ここで、Fは周波数(Hz)であり、式(1b)(2b)は周波数換算したものである。乾燥強度は、0.5Hzで187.3MPaに対して、0.00025Hzでは149.3MPaと40MPa程度低下する。また、1日1周期(1.16×10^{-5} Hz)に対する強度は132.0MPaとなり、一般に使用される静的強度（ひずみ速度 10^{-5} s^{-1} の強度169.3MPa）と比較してかなり小さくなる。

(2)疲労強度特性の周波数依存性： 載荷応力169.0, 147.8, 130.6MPa(0.5Hzの静的強度の0.9, 0.8, 0.7)に対する各周波数(0.5～

表-1 使用花崗岩の力学的異方性

軸方向	一軸圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	P波速度 (km/s)
R軸	169.5	56.9	4.46
G軸	193.1	56.7	4.80
H軸	171.6	56.2	4.87

表-2 試験項目と内容

試験項目	制御方法	試験内容
①ひずみ速度が静的強度に与える影響	一定応力速度で載荷	ひずみ速度換算で $10^{-2} \sim 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ の範囲で静的一軸圧縮試験
②疲労強度特性の周波数依存性	正弦波の載荷波形で繰返し載荷	●載荷レベル3段階（静的強度の0.9, 0.8, 0.7） ●載荷周波数5段階（0.5, 0.1, 0.01, 0.001, 0.00025Hz）
③S-N曲線、疲労限界の把握	正弦波の載荷波形で繰返し載荷	●周波数0.5Hzで応力比0.4まで試験 ●最大で繰返し回数で約13万回（3日間）まで載荷（13万回を超えて破壊しない供試体を非破壊と定義）

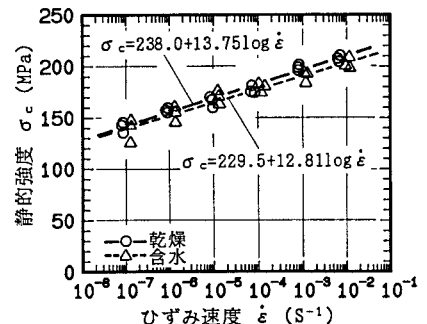


図-1 一軸圧縮強度-ひずみ速度関係

0.00025Hz)の破壊回数Nを図-2（乾燥）に示す。飽和状態の結果もほぼ同様であり、含水条件・载荷応力レベルによらず、いずれの場合も周波数Fが小さくなるに従って破壊に至る回数が低下するようになる。载荷応力130.6MPaにおける関係はつぎのように書ける。

●乾燥： $\log N = 3.597 + 0.682 \log F$ (3)

●飽和： $\log N = 3.192 + 0.680 \log F$ (4)

また、各周波数における応力-破壊回数（ σ -N曲線）は図-3のような関係となり、既往の研究¹⁾²⁾と同様、長周期になると破壊応力が低下するという周波数依存性を示す。

これに対して、基準とする静的強度をそれぞれ周波数に対応する強度（式(1)(2)）として各周波数の応力比S-破壊回数Nを整理すると図-4のようになり、各周波数のS-N曲線はほとんど一致する。このため、疲労試験における载荷応力の設定を周波数に対応する静的強度とすれば、比較的高い周波数（例えば、0.5Hz）で試験を行っても、その試験で得られるS-N曲線は1日1周期という長周期载荷のS-N曲線と同等と考えることができる。

(3)S-N曲線、疲労限界の把握： 周波数0.5Hzに対応するS-N曲線を図-5に示す。乾燥・飽和とも13万回の繰返し回数内では疲労限界は存在せず、つぎの近似式で表すことができる。

●乾燥： $S = 0.987 - 0.087 \log N$ (5)

●飽和： $S = 0.995 - 0.098 \log N$ (6)

この関係と1日1周期に対応する静的強度（式(1)(2)）から疲労強度を推定すると以下ようになる。参考のために、通常の静的強度に対する低下率を括弧内に示す。

	1万回強度	10万回強度	通常の静的強度
●乾燥：	85.8MPa(0.51)	73.7MPa(0.44)	169.3MPa
●飽和：	79.2MPa(0.48)	67.3MPa(0.41)	165.5MPa

今回使用した花崗岩の1日1周期に対する疲労強度を静的強度と比較すると、静的強度を基準として1万回で48～51%に、10万回で41～44%に低下することになる。

4. まとめ 今回の試験により、0.5Hzと高い周波数でも、基準強度を周波数に対応する静的強度とすれば、長周期载荷時のS-N曲線が推定できることを示した。この結果、1日1周期に対する花崗岩の疲労強度は通常の静的強度を基準として1万回で約50%に、10万回で約40%に低下することが分かった。

岩盤の疲労特性は原位置の地質状況に大きく影響されることから、今回の岩石固有の疲労特性を踏まえて、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。

【参考文献】

- 1) P. B. Attewell & I. W. Farmer: Int. J. Rock Mech. Sci. Vol. 10, pp. 1-9(1973)
- 2) T. F. Cho & B. C. Haimson: 28th U. S. Symp. on Rock Mech. pp. 805-812(1987)
- 3) 工藤洋三：名古屋大学学位論文(1989)
- 4) K. Masuda, H. Mizutani & I. Yamada: J. Phy. Earth, Vol. 36, pp. 291-313(1988)

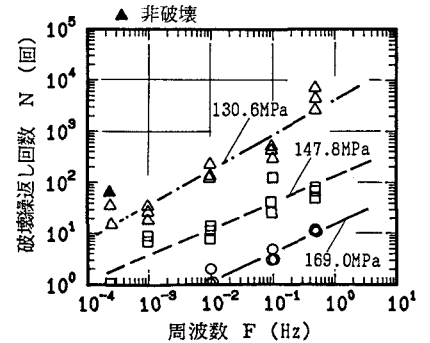


図-2 周波数が破壊回数に与える影響

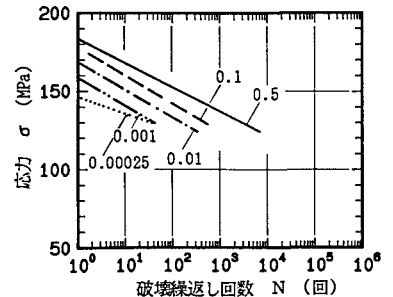


図-3 各周波数のσ-N曲線

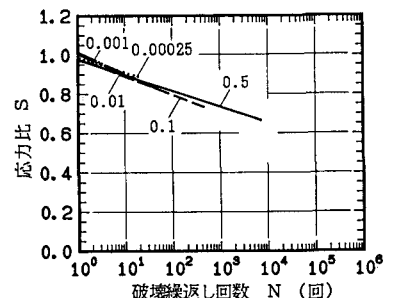


図-4 各周波数のS-N曲線

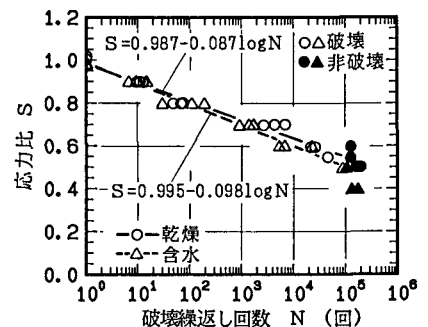


図-5 S-N曲線と疲労限界