

中部電力(株)電力技術研究所 正会員 ○河村精一・新実佳朗・東側豊二  
清水建設(株)技術研究所 正会員 石塚与志雄・安部透

1. はじめに 応力振幅を同一とした疲労試験では、周波数が低くなると破壊繰返し回数も低下することが知られている<sup>1) 2) 3)</sup>。また、著者ら<sup>4)</sup>は、0.00025Hz(1周期11.1時間)までの疲労試験を実施し、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、長周期载荷のS-N曲線が推定できることを示した。しかし、長周期(1日1周期)の繰返し荷重が作用すると、応力振幅(疲労)に加えて、クリープの影響も無視できないと考えられる。本研究では、より長周期(1周期11.1時間まで)の疲労試験とクリープ試験を行い、疲労強度の周波数依存性を詳細に検討するとともにクリープ強度と疲労強度との比較を行うことにした。また、含水状態が岩石の長期強度に与える影響についても検討した。

2. 試験概要 岩石は、既報<sup>4)</sup>同様、愛知県東加茂郡足助町から採取した伊奈川花崗岩である。試験は一軸圧縮応力状態で実施した。供試体の含水状態は、気乾(1週間以上デシケータ内で乾燥させたもの)と飽和(真空脱気で岩石内の間隙を水で置換した後1日以上水中に保存したもの)の2条件とした。長周期の疲労試験では、最大応力を0.5Hzの静的強度の0.7として、周波数を0.5~0.00025Hz(2秒から11.1時間の周期)に変化させた。载荷波形は正弦波である。クリープ試験も0.5Hzの静的強度を基準として载荷応力を設定し(応力比で0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5), 約1.3秒で所定の応力まで载荷後、一定応力に保持した。試験時間は、長周期载荷については最大1週間、クリープ試験では3~4日間とした。

3. 試験結果

疲労、クリープ試験の際の载荷応力設定の基準となる静的強度 $\sigma_c$ (MPa)とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ ( $s^{-1}$ )の関係は図-1のようである。気乾、飽和状態それぞれ次式で近似できる。

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

●飽和:  $\sigma_c = 199.5 + 11.84 \log \dot{\epsilon}$  (2)

载荷応力の基準となる0.5Hzの静的強度は、気乾で187.3MPa、飽和で163.0MPaとなる。また、上式から1日1周期(ひずみ速度で $2.5 \times 10^{-8} s^{-1}$ )に対応する強度を求めると、気乾で134.0MPa、飽和で109.3MPaとなる。飽和状態の強度は、気乾状態と比較して13~18%程度低下する。

(1)疲労強度特性の周波数依存性: 载荷応力比0.7(気乾では130.6MPa、飽和では114.1MPa)に対する周波数F~破壊繰返し回数N関係を図-2に示す。FとNの関係は1周期11.1時間と長周期になっても両対数グラフ上で線形関係になり、つぎのような関係を得る。

●気乾:  $\log N = 3.605 + 0.604 \log F$  (3)

●飽和:  $\log N = 2.630 + 0.641 \log F$  (4)

0.1Hz(10秒)と0.0001Hz(2.8時間)で破壊回数を比較すると、気乾では1000回から15回へ、飽和では100回から1回へと大きく低下する。含水状態の影響は大きく、同じ応力比でも1オーダー、飽和の方が破壊に至る回数が小さくなる。

これに対して、破壊に至る時間( $t_r$ )は周波数の低下と

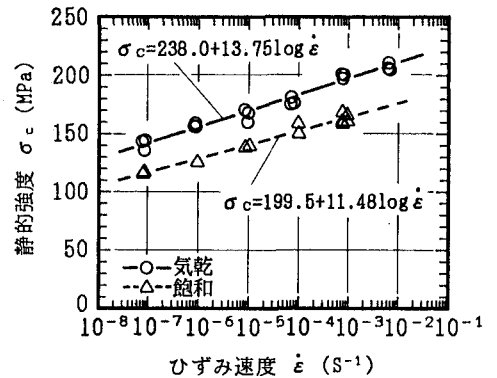


図-1 一軸圧縮強度-ひずみ速度関係

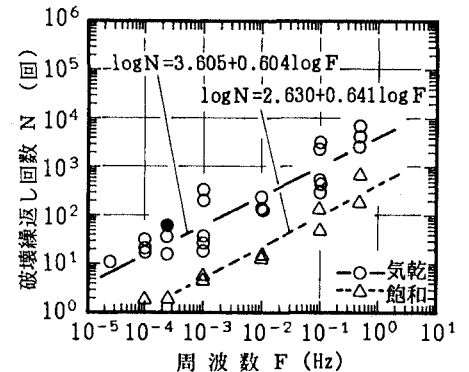


図-2 周波数Fが破壊回数Nに与える影響

ともに長くなる傾向を示す。周波数0.1, 0.01, 0.001Hzに対する応力 $\sigma$ -破壊時間 $t_r$ 関係は図-3(気乾状態)のようであり、次式で表すことができる。

●0.1 Hz :  $\sigma = 190.6 - 15.18 \log t_r$  (5)

●0.01 Hz :  $\sigma = 203.9 - 17.54 \log t_r$  (6)

●0.001Hz :  $\sigma = 225.6 - 20.59 \log t_r$  (7)

150MPa以上の高い応力レベルでは、周波数の減少につれて破壊寿命が延びるが、応力の低下とともに差が少なくなっていく。

(2)クリープ試験: 表-1にクリープと疲労(0.5Hzの繰返し载荷)の破壊時間(秒)の一覧表を、図-4に $\sigma-t_r$ 関係を図化したものを、図-5に0.5Hzの疲労寿命との比較を示す。载荷応力とクリープの破壊寿命の近似式はつぎのようである。

●気乾 :  $\sigma = 180.6 - 10.98 \log t_r$  (8)

●飽和 :  $\sigma = 149.0 - 10.49 \log t_r$  (9)

0.5Hzと周波数が高い場合の破壊寿命(図-5)はほとんどの応力でクリープより疲労の方が短い、長周期载荷(図-3参照)になると、クリープの方が破壊寿命が短くなる。図-3の疲労試験の $\sigma-t_r$ 関係との比較では、応力が155MPa以上ではどの周波数でもクリープの方が早く破壊するが、応力の低下とともに疲労寿命の方が徐々に短くなっていく。このため、繰返し载荷が1日1周期と長周期となる場合の長期強度は、疲労強度だけでなくクリープ強度からの検討も必要となる。

含水状態が疲労、クリープ強度に与える影響は大きく、载荷応力比が同じ(表-1参照)でも、飽和状態の方が早く破壊する。

例えば、応力比が0.6(気乾では $\sigma=112$ MPa,飽和では $\sigma=98$ MPa)のクリープでは気乾に比べて1/6以下の破壊寿命となる。同一応力ではさらに差が大きくなる。例えば、130MPaの载荷(気乾では $t_r=40000$ 秒,飽和では $t_r=65$ 秒)では1/600の破壊寿命となる。

4. まとめ 長周期载荷試験の結果、花崗岩の疲労破壊回数の周波数依存性は周波数Fと破壊回数Nの間には $\log N = a + b \log F$ の関係が成立し、長周期になると破壊回数は少なくなる。一方、破壊寿命は長周期になると増加し、ある応力以上ではクリープの破壊寿命の方が短くなる。このため、長周期载荷による長期強度の検討では、疲労強度だけでなくクリープ強度からの検討も必要であろう。また、含水状態が岩石の静的強度だけでなく疲労強度、クリープ強度にも大きな影響を与えることが明らかとなった。

【参考文献】

(1) P. B. Attewell et al. (1973): Int. J. Rock Mech. Sci. Vol. 10, pp. 1-9.  
 (2) T. F. Cho et al. (1987): 28th U S Syum on Rock Mech. pp. 805-812.  
 (3) Y. Ishizuka et al. (1990): Proc. of ISRM Int. Symp /Swaziland, pp. 139-146.  
 (4) 河村, 他(1990): 土木学会第45回年次学術講演概要集, III-227, pp. 490-491.

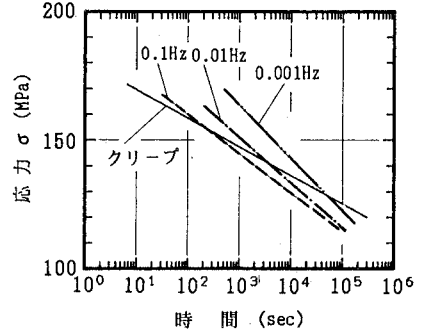


図-3 各周波数の $\sigma-t_r$ 関係

表-1 クリープ・疲労寿命一覧表

応力比 S	気乾		飽和	
	クリープ	疲労	クリープ	疲労
0.9	7 30	22 22 24	1 2 2	8 10
0.8	937 546	150 98 136	214 18 100	52 46
0.7	42019 (317719)	8820 14618 5460	2384 2164	1396 396
0.6	(340399) (347419)	51212 45108 (259202)	56239 51259	8886 8350
0.5		(354946) (353068)	(266179)	95178 157250

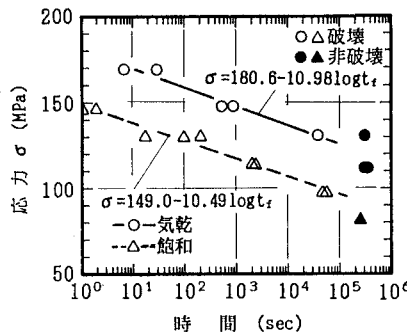


図-4  $\sigma-t_r$ 関係(クリープ)

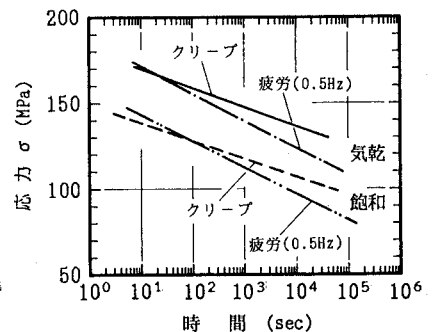


図-5 クリープ・疲労の破壊寿命の比較