

学位論文題名

花崗岩の疲労およびクリープ特性に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

近年、圧縮空気の地下貯蔵など岩盤の新しい利用に伴い、長期に亙り負荷を受ける岩盤の強度・変形特性の把握が重要となってきた。本研究は、稲田花崗岩を用いて疲労試験とクリープ試験を実施し、長期的な強度・変形特性に与える応力振幅と載荷周波数の影響、ならびに封圧の効果を実験的に明らかにするとともに、載荷に伴うマイクロクラックの挙動を観察し、変形挙動に関して理論的な検討を加えたものである。本論文は全9章から構成されている。

第1章は序論で、本研究の背景と目的、既往の研究の概要、本論文の構成について述べている。

第2章では、本研究で採用した試験方法に関して、使用した供試岩石、試験装置、試験条件、測定内容と方法について述べている。

第3章では、一軸圧縮応力下で実施したクリープ試験と疲労試験の結果について述べている。

まず、クリープ変形と疲労変形は、ともに遷移・定常・加速の3つの段階を経て進行すること、非弾性体積ひずみがある限界量に達すると、体積ひずみ増加率が減少から増加に転じること、この限界量は最大応力の大きさや試験方法によらないことなどを見いだしている。そして、非弾性体積ひずみは岩石の損傷を表す尺度となり、このひずみと体積ひずみ増加率とからクリープ寿命、疲労寿命が推定できることを明らかにしている。

次に、疲労寿命に及ぼす最大応力と応力振幅の影響を詳細に検討し、最大応力や応力振幅の増加により疲労寿命が減少することを見いだしている。また、岩石の長期強度の推定には、最大応力に加え、応力振幅の影響も考慮する必要があることを示している。

第4章では、5MPaと25MPaの封圧の下で疲労試験とクリープ試験を実施し、疲労特性とクリープ特性に与える封圧の効果を調べるとともに、疲労寿命に及ぼす応力振幅の影響について検討している。

まず、封圧が大きくなるにつれて、疲労強度・クリープ強度が著しく増大し、また繰返し回数や時間の経過に伴う体積の膨張が抑制されるなど、顕著な封圧効果があることを見いだしている。次に、片対数座標軸で表したクリープ強度-破壊時間線図と疲労強度-破壊回数線図はともに右下がりの直線で近似できるが、この直線の傾きは前者の場合には封圧の増大により小さくなるのに対し、後者の場合には封圧の大きさによらずほぼ同じになることを明らかにしている。なお、後者において、疲労強度を静的強度からの応力差で整理すると、この線図は2つの封圧下で同一の直線となるので、静的強度から疲労強度が推定できることを指摘している。

さらに、封圧下においても疲労寿命は応力振幅の影響を受け、応力振幅が大きくなると疲労寿命は短くなることを見いだしている。

第5章では、疲労寿命に与える载荷周波数の影響をみるために、最大応力を次の2通りの方法で与え、長周期载荷における疲労強度の推定を実験的に試みている。

周波数によらず最大応力を同じ大きさとする方法を用いると、疲労寿命は、载荷周波数とともに著しく増加し、両対数座標を用いた破壊回数-载荷周波数線図は右上がりの直線となる。一方、静的試験時の破壊までに要する時間を半周期とみなし、設定周波数に対応する速度の下で得た静的強度に一定の比率を掛け、この値を最大応力とする方法を用いると、含水状態や封圧の下でも破壊回数は周波数に依存せずほぼ一定となる。以上を明らかにした上で、疲労寿命が周波数に依存しない後者の方法を用いた高周波数の下での試験から、実施が困難な低周波数域における疲労強度を推定する方法を提案している。

第6章では、クリープ試験と疲労試験の下で現れるマイクロクラックの挙動を、光学顕微鏡とCCDカメラを用いた2つの方法によって観察している。その結果、クラックは、差応力の増大により数が増すこと、時間の経過とともに次第に開口幅を増しながら最大主応力の方向に徐々に伸長すること、このとき、主に石英内を通ることなどが両試験で共通して見られることを明らかにしている。しかし、クリープ試験では、クラックは開口を続けながら伸長するのに対し、疲労試験では、開閉を繰返しながら伸長するという差異があることを見いだしている。

第7章では、クラックの伸長に基づく力学モデルを用いて岩石の示す非弾性的な変形挙動の解釈を試みている。

まず、圧縮応力場において、屈曲クラックの存在や鉱物の力学的性質の差異により、最大主応力と直交する方向に局部的に引張り応力が発生することを示している。

次に、この引張り応力によりクラックが伸長するときの非弾性的なひずみ量を評価し、この量は、軸方向成分より横方向成分の方が大きくなるため体積は膨張することを見だし、ダイラタンシーは、クラックが開口しながら最大主応力方向に伸長する現象により説明可能であるという従来の説を確認している。さらに、一定応力下と繰返し応力下におけるクラックの伸長則を用い、クリープ試験と疲労試験の下での体積ひずみの挙動をシミュレートして、時間の経過に伴い体積ひずみは膨張し、かつ体積ひずみ増加率は減少するという予測を得ている。また、このモデルによって、体積ひずみ増加の挙動に及ぼす応力振幅、载荷周波数、封圧の影響も検討している。そして、これらの予測結果は定常段階の途中までは実験結果と定性的に一致することを確認している。

第8章では、クリープ試験と疲労試験で得られた強度・変形特性を両者の対比の下で総括するとともに、2・3の考察を行っている。

まず、クリープ試験と疲労試験の下で伸長するクラックの挙動には多くの共通点があるために、両変形には類似点が多いという解釈を与えている。次に、クラック同志の干渉効果やクラックの境界面への接近は、応力拡大係数の増加をもたらし、クラックの伸長速度を増加させることを示し、これらの効果により、クリープ試験と疲労試験で見られる体積ひずみ増加率が減少から増加へ転じる現象を説明し得るという見解を提示している。

第9章は結論で、本研究で得られた主な結果をまとめ、今後の課題について述べている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 島 洋 二  
副 査 教 授 中 島 巖  
副 査 教 授 石 川 博 將

## 学位論文題名

### 花崗岩の疲労およびクリープ特性に関する基礎的研究

材料は、大きさが静的強度以下であっても負荷応力を長期間受けると破断に至るのが普通である。このため、長年にわたり使用する構造物の安定性を評価するには、材料の長期的な強度・変形特性を把握することが重要となる。この目的で、応力を周期的に変動させる疲労試験や応力を一定に保つクリープ試験が実施されるが、近年、地下利用の多様化に伴い、岩盤についても、この種の試験の重要性が再認識されている。

本研究は、稲田花崗岩を供試体として、繰返し応力下および一定応力下における岩石の強度・変形特性の詳細を明らかにするとともに、負荷に伴う岩石内部のマイクロクラックの挙動を観察し、クラックの挙動と変形挙動の関連性について理論的な解釈を与えたもので、評価すべき成果は以下の4点に要約される。

第一の成果は、一連の疲労試験とクリープ試験の実施に際して、体積ひずみの測定を行い、長期的な強度・変形特性を明らかにしていることである。まず、両試験において、時間の推移に伴う体積ひずみの増加率は減少から増加に転じること、このときの非弾性体積ひずみの値は負荷した最大応力の大きさや試験方法によらず一定になることを見いだしている。そして、この非弾性体積ひずみは、岩石の損傷を表す尺度となり、寿命の予測に用い得ることを指摘している。次に、疲労寿命に及ぼす最大応力と応力振幅の影響を詳細に検討し、最大応力や応力振幅が大きくなるほど体積ひずみ増加率は大きくなり、疲労寿命は短くなること、両者を比較すると、前者の影響の方が強く現れることなどを明らかにしている。さらに、封圧の作用の下では、体積ひずみが抑制され、疲労強度、クリープ強度とも著しく増大することを確認している。

第二の成果は、疲労特性に及ぼす載荷周波数の影響を明らかにしていることである。所与の周波数に対する応力比を決める際の静的強度は、破壊に至る時間が半周期になるような一定の応力速度下の静的試験で求める。このような方法を用いると、含水状態や封圧の下でも、疲労寿命は載荷周波数に依存しなくなることを明らかにしている。これは、高周波数の下での試験から実施が困難な低周波数域における疲労強度が推定できることを意味する貴重な知見である。

第三の成果は、載荷に伴う花崗岩内部のマイクロクラックの挙動の観察に成功していることである。疲労試験、クリープ試験のいずれにおいても、差応力が増加する最初の載荷過程においては、開口型のマイクロクラックが増加すること、載荷開始以降の過程では、数の増加は止まるが、個々のマイクロクラックは次第に開口幅を増しながら最大主応力方向に伸長すること、このとき主に石英粒子を通ることなどを顕微鏡観察を基に明らかにしている。また、疲労試験においてクラックが開閉を繰返しながら伸長する様子をCCDカメラで捉えるのに成功している。

第四の成果は、加速段階の直前までの疲労変形やクリープ変形に関して、マイクロクラ

ックの力学的な挙動に基づいた解釈に成功していることである。まず、圧縮応力場においても最大主応力方向に伸びた開口型のクラックが石英粒子内に発生することを、応力解析に基づき予測している。次に、クラックの伸長則を用い、クリープ試験と疲労試験の下でのひずみの経時変化をシミュレーションし、応力振幅、載荷周波数、封圧がひずみの経時変化に及ぼす影響に関して、加速段階の直前までの実験結果とシミュレーションの予測は、互いに一致することを確認している。

これを要するに、著者は、花崗岩の疲労特性とクリープ特性の詳細を実験的に明らかにし、長周期載荷における疲労強度の予測方法を提示するとともに、疲労変形とクリープ変形を載荷に伴うマイクロクラックの挙動に基づいて解釈するなど、有益な多くの新知見を得たものであり、資源開発工学ならびに岩石力学の進歩に貢献すること大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。