

## 岩石のサブクリティカル亀裂進展に関する研究

### 学位論文内容の要旨

地下空洞や岩盤斜面などの岩盤構造物は、その用途から、長期安定性が要求される場合が多い。このような場合、その設計において岩石の長期強度の予測が不可欠となる。ここで、岩石の破壊プロセスは微視亀裂の発生・伸長とその集積・局所化として説明されることから、岩石の長期強度を予測する上では、最も基本的な要素プロセスである亀裂の低速伸長現象、すなわち、破壊靱性値以下の応力環境における亀裂進展であるサブクリティカル亀裂進展現象を解明することが重要であると考えられる。特に、岩石の時間依存性挙動は、応力状態のみならず温度・湿度などの環境にも依存することから、これらの環境因子をも含めた基礎的検討が必要である。さらに、岩石は、複数の鉱物から構成され、内部に先在クラックや空隙を含んだ複合材料であり、力学的性質に異方性が認められることが多いことから、亀裂進展挙動に及ぼす内部組織の影響を評価することも重要である。

本研究では、載荷条件および環境条件を制御できる破壊力学試験装置を開発し、温度および湿度を制御した環境条件下で破壊力学試験を行い、岩石のサブクリティカル亀裂進展に及ぼす影響因子について定量的分析を行った。特に、大気中でのサブクリティカル亀裂進展への周辺環境の影響および岩石内部組織の影響について調べ、組織依存性と環境依存性を考慮した亀裂進展速度の一般化評価式を明らかにしている。以下、本論文各章の成果を要約する。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を示し、サブクリティカル亀裂進展に関する既往の研究を展望している。

第2章では、サブクリティカル亀裂進展の機構および、岩石のサブクリティカル亀裂進展に関する実験的研究課題について論じている。特に、岩石におけるサブクリティカル亀裂進展の主要な機構である応力腐食現象および、応力拡大係数と亀裂進展速度との関係について述べるとともに、これらに関する既往の研究を考察し、岩石におけるサブクリティカル亀裂進展について解明すべき課題をまとめている。

第3章では、本研究で採用した試験方法である Double-Torsion (DT) 試験法の原理と評価理論について概説するとともに、DT試験の問題点とその解決策について論じている。具体的には、精度・信頼性の高い結果を得るためのDT試験装置・供試体の要件について考察し、これに基づいて、DT試験装置を製作するとともに供試体の作成法を示している。また、試験結果の分析では、等方性岩石と異方性岩石を分類した取り扱いが必要であることを指摘している。

第4章では、等方的な岩石として安山岩を対象とし、そのサブクリティカル亀裂進展の特徴と温度・湿度依存性について論じている。まず、前章で開発した試験装置により一定の環境条

件および載荷条件において試験を行うと、従来法と比較して極めて再現性が高い結果が得られることを示している。また、温度および湿度が高い環境条件下では、亀裂進展が促進されること、特に、亀裂進展挙動が環境中の水蒸気分圧に大きく影響されることを明らかにしている。さらに、これらの実験結果から応力腐食反応における活性化エネルギーを評価するとともに、これに基づいて、温度・水蒸気圧を考慮した亀裂進展速度の予測式を提案している。さらに、提案式による亀裂進展速度の予測値と実験値がよく一致していることを示し、亀裂進展速度の理論予測が可能となることを示している。

第5章では、異方性岩石のサブクリティカル亀裂進展の評価において必要となる、岩石の異方弾性定数の評価法について論じている。具体的には、クラックモデルに基づいた直交異方弾性定数の理論的算定法を示した後、主軸3方向の弾性波速度計測により、岩石の直交異方弾性定数と先在クラックのクラック密度を評価する方法を示している。そして、3種の花崗岩に対して提案する方法を適用し、これらの直交異方弾性定数とクラック密度を同定し、本手法の有効性を明らかにしている。さらに、これらの結果に基づいて、主軸3方向のP波速度のみから直交異方弾性定数を評価する簡易手法も提案している。

第6章では、異方性岩石として花崗岩を対象とし、そのサブクリティカル亀裂進展の特徴と組織・環境依存性について論じている。まず、粒径の異なる3種の花崗岩に対し、亀裂の進行方向および開口方向を考慮した複数の供試体を用いて、一定の環境条件および載荷条件において試験を行うとともに、異方弾性を考慮して試験結果を分析し、亀裂進展挙動の異方性および粒径依存性を実験的に明らかにしている。また、得られた結果を分析し、花崗岩における亀裂進展挙動は先在クラックの配向性とクラック密度に依存すること、その異方性は配向性先在クラックによる活性化エネルギーの見かけ上の変化として説明されること、などを明らかにしている。次に、温度・湿度の異なる条件下で試験を行い、試験環境がサブクリティカル亀裂進展に及ぼす影響を実験的に検討するとともに、それらの結果を応力腐食反応の考えに基づいて分析している。その結果、温度・湿度の高い条件下では、安山岩と同様に、亀裂進展が促進され、亀裂進展挙動が環境中の水蒸気分圧に大きく影響を受けることを明らかにしている。さらに、これらの結果を総合して、組織・環境依存性を含めた亀裂進展速度の一般化表現について考察を加え、先在クラック密度と温度・水蒸気圧の影響を考慮した亀裂進展速度の予測式を提案するとともに、実験値との比較により、その有用性を明らかにしている。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 金子 勝比古  
副査 教授 石島 洋二  
副査 教授 米田 哲朗  
副査 教授 佐野 修 (東京大学地震研究所)

## 学位論文題名

### 岩石のサブクリティカル亀裂進展に関する研究

地下空洞や岩盤斜面などの岩盤構造物は、その用途から、長期安定性が要求される場合が多い。このような場合、その設計において岩石の長期強度の予測が不可欠となる。ここで、岩石の破壊プロセスは、微視亀裂の発生・伸長とその集積・局所化として説明されることから、岩石の長期強度を予測する上では、最も基本的な要素プロセスである亀裂の低速伸長現象、すなわち、破壊靱性値以下の応力環境における亀裂進展であるサブクリティカル亀裂進展現象を解明することが重要であると考えられる。特に、岩石の時間依存性挙動は、応力状態のみならず温度・湿度などの環境にも依存することから、これらの環境因子をも含めた基礎的検討が必要である。さらに、岩石は、複数の鉱物から構成され、内部に先在クラックや空隙を含んだ複合材料であり、力学的性質に異方性が認められることが多いことから、亀裂進展挙動に及ぼす内部組織の影響を評価することも重要である。

本研究では、載荷条件および環境条件を制御した破壊力学試験装置を開発し、温度および湿度を制御した環境条件下で破壊力学試験を行い、岩石のサブクリティカル亀裂進展の影響因子について定量的分析を行った。特に、大気中でのサブクリティカル亀裂進展への周辺環境の影響および岩石内部組織の影響について調べ、組織依存性と環境依存性を考慮した亀裂進展速度の一般化評価式を明らかにしている。以下、本論文各章の成果を要約する。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を示し、サブクリティカル亀裂進展に関する既往の研究を展望している。

第2章では、サブクリティカル亀裂進展の機構および岩石のサブクリティカル亀裂進展に関する実験的研究課題について論じている。特に、岩石におけるサブクリティカル亀裂進展の主要な機構である応力腐食現象および応力拡大係数と亀裂進展速度との関係について述べるとともに、これらに関する既往の研究を考察し、岩石におけるサブクリティカル亀裂進展について解明すべき課題をまとめている。

第3章では、本研究で採用した試験方法である Double-Torsion (DT) 試験法の原理と評価理論について概説するとともに、DT試験の問題点とその解決策について論じている。具体的には、精度・信頼性の高い結果を得るためのDT試験装置・供試体の要件について考察

し、これに基づいて、DT試験装置を製作するとともに供試体の作成法を示している。また、試験結果の分析では、等方性岩石と異方性岩石を分類した取り扱いが必要であることを指摘している。

第4章では、等方的な岩石として安山岩を対象とし、そのサブクリティカル亀裂進展の特徴と温度・湿度依存性について論じている。まず、前章で開発した試験装置により一定の環境条件および载荷条件において試験を行うと、従来法と比較して極めて再現性が高い結果が得られることを示している。また、温度および湿度が高い環境条件下では、亀裂進展が促進されること、特に、亀裂進展挙動が環境中の水蒸気分圧に大きく影響されることを明らかにしている。さらに、これらの実験結果から応力腐食反応における活性化エネルギーを評価するとともに、これに基づいて、温度・水蒸気圧を考慮した亀裂進展速度の予測式を提案している。さらに、提案式による亀裂進展速度の予測値と実験値がよく一致していることを示し、亀裂進展速度の理論予測が可能となることを示している。

第5章では、異方性岩石のサブクリティカル亀裂進展の評価において必要となる、岩石の異方弾性定数の評価法について論じている。具体的には、クラックモデルに基づいた直交異方弾性定数の理論的算定法を示した後、主軸3方向の弾性波速度計測により、岩石の直交異方弾性定数と先在マイクロクラックのクラック密度を評価する方法を示している。そして、3種の花崗岩に対して提案する方法を適用し、これらの直交異方弾性定数とクラック密度を同定し、本手法の有効性を明らかにしている。さらに、これらの結果に基づいて、主軸3方向のP波速度のみから直交異方弾性定数を評価する簡易手法も提案している。

第6章では、異方性岩石として花崗岩を対象とし、そのサブクリティカル亀裂進展の特徴と組織・環境依存性について論じている。まず、粒径の異なる3種の花崗岩に対し、亀裂の進行方向および開口方向を考慮した複数の供試体を用いて、一定の環境条件および载荷条件において試験を行うとともに、異方弾性を考慮して試験結果を分析し、亀裂進展挙動の異方性および粒径依存性を実験的に明らかにしている。また、得られた結果を分析し、花崗岩における亀裂進展挙動は先在マイクロクラックの配方性とクラック密度に依存すること、その異方性は先在マイクロクラックによる活性化エネルギーの見かけ上の変化として説明されること、などを明らかにしている。次に、温度・湿度の異なる条件下で試験を行い、試験環境がサブクリティカル亀裂進展に及ぼす影響を実験的に検討するとともに、それらの結果を応力腐食反応の考えに基づいて分析している。その結果、温度・湿度の高い条件下では、安山岩と同様に、亀裂進展が促進され、亀裂進展挙動が環境中の水蒸気分圧に大きく影響を受けることを明らかにしている。さらに、これらの結果を総合して、組織・環境依存性を含めた亀裂進展速度の一般化表現について考察を加え、先在クラック密度と温度・水蒸気圧の影響を考慮した亀裂進展速度の予測式を提案するとともに、実験値との比較により、その有用性を明らかにしている。

第7章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

これを要するに、著者は、岩石の応力腐食反応定数や配方性クラック密度等を定量化するとともに、サブクリティカル亀裂進展の組織依存性と環境依存性を解明しており、岩盤工学ならびに地圏工学の発展に貢献するところ大なるものがある。

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。