

学位論文要旨

Experimental investigation on macroscopic fracturing and fault reactivation of granite under pore fluid pressure

(間隙水圧下における花崗岩の巨視的破壊および断層再活性に関する実験的研究)

氏名 末吉 和公

地熱発電をはじめとする地下資源開発において、岩体における流体移動を理解することは重要である。特に地熱開発の分野では、近年のエネルギー需要の増加に伴い、涵養型地熱発電システム (EGS: Enhanced Geothermal System) の実用が期待されており、運用に向けた注水試験が行われている。しかし、岩石への注水によって誘発地震の発生が懸念されており、そのリスク評価が極めて重要と認識されている。そこで本研究では、間隙水圧下にある岩石の破壊実験および断層を含む岩石への注水実験を行い、巨視的破壊の予兆現象や注水によって起こりうる誘発地震の特徴を調べ、資源開発におけるリスク評価に寄与する要因を議論した。以下に主な研究成果を示す。

(1) Chapter 2. Frequency characteristics of acoustic emission in the fracturing process of thermally cracked granite

岩石の力学的・水理学的特性は岩体中の微小亀裂に大きく影響されることが指摘されている。一方で、岩石の変形過程は亀裂の生成・伸展に伴い発生する微小破壊音 (アコースティックエミッション, AE) の発生から推測されており、室内実験によって岩石の破壊前には低周波数高振幅の AE が発生することが示唆されている。このような破壊前の予兆現象も微小亀裂に影響される可能性がある。そこで本研究では、未加熱の稲田花崗岩と熱処理によって既存亀裂を生成させた稲田花崗岩について三軸圧縮変形試験をおこない、三軸圧縮変形中に測定された AE の周波数特性を解析し、微小亀裂の存在による破壊の予兆現象への影響を調べた。载荷中に発生した AE は異なる周波数帯 (0.25, 0.5, 1, 2 MHz) をもつ圧電素子を用いて記録した。実験後に、収録した各 AE の波形データに対してフーリエ変換を行い、スペクトルが最大となるときの周波数 (peak frequency) とスペクトルの最大値 (peak amplitude) を計算した。実験結果から、いずれの花崗岩試料においても変形の進行に伴って低い周波数が卓越した AE が増加することが明らかとなった。これは発生源となるクラックが大きいほど AE の周波数帯域が低周波となることを示しており、このことは先行研究と整合的である。一方で、熱処理によって既存亀裂を増加させた試料では、peak frequency が低く、peak amplitude が大きい AE がほとんど発生しないことが分かった。AE の発生源となる亀裂が大きいほど、peak

amplitude が大きくなることが予想されているため、この結果は先行研究とは矛盾しているように思われる。このような周波数特性の違いは試料の既存亀裂の有無の違いによるものと考えられる。すなわち、既存亀裂がほとんど存在しない岩石の場合、破壊前には亀裂の形成、急激な成長に伴って peak frequency が低く、peak amplitude が大きい AE が卓越するが、既存亀裂の成長によって岩石の変形が進行する場合は、通常破壊前にみられるような peak frequency が低い場合 peak amplitude が大きい AE が発生せず、既存亀裂の有無によって破壊前の予兆となる AE の周波数特性が異なると考えられる。このことから、既存亀裂が多く存在する場合は破壊前であっても振幅が大きい AE が発生しないことを示しており、対象となるエリアの岩体の既存クラック量から振幅が大きい地震、すなわち大規模な地震が発生しやすいのか見積もることが可能となるなど、岩体の安全性評価への活用が期待される。

(2) Chapter 3. The possibility of repeating fault reactivation of thermally cracked granites during water injection

地熱フィールドにおける原位置での注水試験から、注水速度の変化によって地震が誘発される可能性が示唆されている。また、室内実験においても注水速度が大きい場合は地震性の不安定すべり（スティックスリップ）、小さい場合はクリープ現象が誘発されることが確認されており、誘発地震発生メカニズムを考察する上で注水速度は重要である。しかし、資源開発の現場において安全の指標となるような「注水速度と誘発地震の大きさ」の関係については未だ不明瞭なままである。そこで本研究では、断層を模したプレカット試料及びプレカット試料について試料底面からプレカット面へ到達するボアホールを導入した試料を用いて注水試験をおこない、注水によって発生するすべりのメカニズム及び大きさと注水速度との関係について調べた。弾性波速度トモグラフィーやモーラー・クーロン則に基づく断層沿いの水圧の解析結果から、断層内の間隙水圧上昇速度がある閾値を超える場合はスティックスリップが発生することが明らかとなった。また、断層への水の供給速度は断層近傍岩石の水理拡散係数によって支配されるため、近傍岩石に間隙水圧が存在する場合、すべり発生後であっても繰り返しスティックスリップが発生する可能性があることが分かった。このことは、資源開発の現場において注水を停止したとしても、残留する間隙水圧やその拡散速度によっては誘発地震が発生することを示しており、誘発地震の発生は注水体積に依存するという従来の安全基準を覆す結論が得られた。