学位論文題名

岩石中を伝搬する弾性波の速度と減衰に
及ぼす空隙の形状効果の実験的研究

学位論文内容の要旨

本論文では、地表付近の岩盤を伝搬する弾性波の速度と減衰を支配する因子を研究の対象としている。地表付近の岩石を最も簡単にモデル化すると、様々な形状の空隙を含む固体部分と空隙中の気体あるいは液体から構成される多相系の媒質と見なすことが出来る。

クラックを含む岩石では、従来岩石の不均一性と見なされてきた測定値のばらつきには、岩石の内部構造に起因するものもあり、例えば、空隙の数や空隙の形状等が測定値に影響を及ぼすと思われる。この観点から、本研究は弾性波速度、内部摩擦（ Q^{-1} 値）、圧縮強度に及ぼす空隙の形状効果を研究したものである。

この研究は室内実験とその結果の岩盤調査への適用に分かれている。

（室内実験）

室内実験の主要な目的は、岩石中を伝搬する弾性波速度から空隙形状を推定し、 Q^{-1} 値に及ぼす空隙の形状効果を明らかにすることである。

本研究では、岩石の性質に及ぼす空隙の形状効果のみを実験的に検討する。この目的のために空隙を含むモデル物質を作成する必要がある。この場合、岩石とは異なる媒質を利用することも考えられるが限界がある。そこで本研究では、実際の岩石を利用して空隙の形状効果を検討した。しかし、自然状態の岩石の空隙分布は様々であり、同時に他の要因、例えば鉱物組成や粒径等も変化するので形状効果だけをとり出すには、同一の岩石においてクラックや空隙の形状や量を系統的に制御する必要がある。

研究の手段として、いくつかの岩石の性質に着目しクラックの数や形状を変化させる方法を検討をした。その結果、人工的にクラックを生成あるいは消滅させ易い3種類の岩石を選択した。その岩石の特性に応じた方法で岩石内部の空隙やクラックの形状を系統的に

変化させた。即ち、溶結凝灰岩は焼結によって空隙を消滅させ、花崗岩とダナイトは熱応力によってクラックを発生させている。花崗岩では熱破壊により発生した音波をクラックの数として観測した。溶結凝灰岩は高い空隙率の岩石を、花崗岩は低空隙率の岩石を、ダナイトはクラックのほとんど無い緻密な岩石を代表していると見なすことができる。

本研究の大きな特徴は、岩石を用いて、広い範囲の空隙率、空隙形状および広い範囲の破碎度の試料を作成したこと、及びP波速度と Q^{-1} 値の測定から純粋に空隙の形状、量の効果を決定したことである。

これまでに弾性波速度に及ぼす空隙の形状効果の研究は多く、理論としては空隙を含む媒質の弾性定数を計算する二相媒質理論が提案されている。理論の適用に関する研究例は多く、二相媒質理論の有効性はほぼ確立されているといえる。従って、この理論を用いて得られたクラック形状等は信頼できるものと考えられる。

他方、 Q^{-1} 値に関しては、含水状態の岩石の Q^{-1} 値に関する研究は多い。しかし、飽和度が低い状態にある岩石の Q^{-1} 値に及ぼす空隙の形状や量の効果の研究も、岩盤の破碎度との関連で重要であるが、系統的に空隙を変化させる研究は少ない。

室内実験では、人工的に作成したクラックを含む試料の空隙形状を弾性波速度から推定し、 Q^{-1} 値に及ぼす空隙の形状効果を広い範囲の空隙率にわたって明らかにした。

得られた結果を以下にまとめる。

① 飽和度の低い状態の岩石については、 Q^{-1} 値に及ぼす空隙の形状効果は、クラックの扁平度を示すアスペクト比が $1 \sim 10^{-1}$ の大きい空隙は影響が小さく、アスペクト比が 10^{-3} 程度の薄い空隙は影響が大きいことが判った。 Q^{-1} 値の原因はクラック表面の相互の滑りによる摩擦による可能性が高い。

② このクラックによる効果を明確にするため、クラックの状態を表現する量として汎用性の高いクラック密度パラメータ(ϵ)を推定した。 ϵ は $0.1 \sim 1$ の広い範囲にわたっていることが判った。

得られたクラック密度パラメータと Q^{-1} 値の関係は、飽和度の低い岩盤の、広い範囲にわたる破碎度を評価するのに有用である。即ち、クラックの無い緻密な状態では $Q^{-1}=0.001$ 程度であるが、乾燥したクラックが増加する場合には Q^{-1} 値も増加し、 $\epsilon=1$ 程度の破碎度の高い状態では $Q^{-1}=0.006$ 程度までになる。

(岩盤調査への適用)

本研究ではさらに二相媒質理論を実際の岩盤調査に適用する。岩盤調査でも空隙の

形状効果が明確になるような調査例を選択した。岩盤調査での目的は一軸圧縮強度に及ぼす空隙の形状効果について検討し、岩石実験結果との比較から現位置岩盤の強度を直接的に推定することである。

岩石実験によるテストピースの弾性波速度から二相媒質理論を用いて空隙(クラック)のアスペクト比やクラック密度パラメータを推定し、一軸圧縮強度に及ぼす空隙の形状効果を検討した。グリフィスクラック等の考察から、岩石の強度にも空隙の形状効果があることは十分想定されているが、実際の岩石で確認された例は少ない。

実験結果は、クラックの状態を表す汎用的な量であるクラック密度パラメータと一軸圧縮強度との関係に整理した。

得られた結果を以下にまとめる。

① 一軸圧縮強度とクラック密度パラメータとの関係では、空隙率が一定の試料は、クラック密度パラメータが増加するにつれて圧縮強度が減少する。これはアスペクト比が小さくなることを意味し、空隙が扁平になるにつれて強度が減少していることが判った。

② 一軸圧縮強度に及ぼすクラックの形状効果は、二次元的な楕円孔の先端部分の応力集中の考察から、圧縮強度はアスペクト比に比例しクラック密度パラメータに反比例する結果となる。これは、実験結果の一軸圧縮強度とアスペクト比及びクラック密度パラメータとの関係を定性的に説明する。

③ 室内実験結果から、アスペクト比をパラメータとした一軸圧縮強度とクラック密度パラメータとの関係を求めた。他方、現位置岩盤のアスペクト比とクラック密度パラメータを求め、実験結果の関係を用いて岩盤の圧縮強度を推定した。推定された強度の変化は、岩盤強度を反映すると考えられるR.Q.D.の変化の傾向とほぼ一致する。

このことは、現位置岩盤とテストピースのクラックは、推定に用いた弾性波の波長の違いによりクラックサイズは異なるが、圧縮強度に及ぼす空隙の形状効果の関係はクラックのサイズが大きくなっても成り立つ相似性があることを意味している。

以上のように本研究では、実際の岩石を使用しているが、研究の意図は空隙の形状効果を明確にすることであり、空隙の形状効果については、クラックの状態を表現する汎用的な量であるクラック密度パラメータと各種の量との関係を求めるように努めた。

学位論文審査の要旨

主査	教授	岡田	廣
副査	教授	西田	泰典
副査	助教授	前田	亟
副査	助教授	笹谷	努

学位論文題名

岩石中を伝搬する弾性波の速度と減衰に 及ぼす空隙の形状効果の実験的研究

本論文は、岩石又は岩盤中のクラックが弾性波の速度、減衰及び岩石の一軸圧縮強度に及ぼす影響を実験的に論じ、更にそこで得られた結果及び手法の現場データへの応用を試みたものである。本論文は実験の方法、測定量及びその結果にそれぞれ特徴があるだけでなく測定方法自体を通して結果が自然の営みを理解するのに役立つという点が高く評価できる。先ず実験方法から見ていく。岩石の性質はクラックのみでなく構成鉱物に大きく支配される。従ってクラックの影響を調べる場合、それだけが結果に現れるような実験方法、すなわち通常は、岩石に外力を加えて変形させる方法がとられる（これによりクラックの状態が変化する）。これに対し本研究では自然に即した独創的な方法がとられた。すなわち加熱による焼結及び熱破壊を利用する方法である。溶結凝灰岩の加熱により焼結を進めることによってクラックを制御し物性を測定することは、火山地帯で見られる溶結凝灰岩の状態の理解を深めることに寄与する。花崗岩をゆっくり加熱することによって熱破壊を生じさせることは例えば温度変化による風化の機構を再現するものである。従ってこれによりクラックを制御して物性を測定することは、逆に岩石の物性測定から風化を考える基礎データを提供することになる。

またダナイトの急冷による熱破壊はマグマの貫入による岩盤の破壊と関連づけることができる。少し話を広げればプレートの海底での湧出し地帯で生じているであろう水と高温岩体の接触とも関連づけられる。この様に、本研究の第一の特徴はクラックの制御方法に

ある。更に焼結等によってクラックを制御した試料を作ることは、技術的にもかなり難しい作業であり、これを実行できたこと自体も評価できる。

次に測定及び結果について述べる。岩石の弾性波速度測定については多くの研究があり、その多くは主にクラックの形状と速度の関係を議論したものである。本研究では、速度の測定結果は二層媒質理論を通して減衰や破壊強度を考える基礎データとしても用いられている。またクラック制御の方法をふまえ、上で述べたごとく焼結や熱破壊のメカニズムを、得られたクラック形状の分布から議論している。これは、実験方法がユニークであるが故になし得た事であり、本研究の特徴の一つでもある。

減衰についての測定は精度の高い縦振動強振法で行われている。外力によるクラックの制御ではこの測定方法は利用できない。減衰の機構は極めて多様であり、それぞれの機構を定量的に議論するのは容易ではない。本研究の場合には、弾性波速度の解析から得られた結果をもとにクラック構造の変化が減衰にどの様に影響しているかを明らかにした。これは今までの固定されたクラック構造と減衰の関係の議論を一步進めるものである。

また、一軸圧縮強度の測定には現場ボーリングから得られたコアサンプルを用いているが、同時に様々な現位置での測定データが得られている。この試料は人工的にクラックを制御したものではないが、上と同じ解析を行い、クラック形状と一軸圧縮強度の関係が決定された。ここでの大きな特徴は室内実験と同じ手法を用いて現場で得られた速度データからクラック形状を推定し、現場での岩盤の一軸圧縮強度を算出したことである。この結果は現位置での岩盤の破碎度と良い相関を示している。そもそも”岩盤の強度”は非常に恣意的な量であり、工学的な目的に応じて経験的に決められていると言っても過言ではない。例えばN値やRQD（破碎度）等はその典型である。本研究では、現場測定で得られた弾性波速度とクラックの形状の解析から明確に定義された一軸圧縮強度を岩盤について求めたことに意義がある。なお、このような手法による”岩盤の強度”の議論は従来にない新しい試みと思われる。

以上のように本研究の特徴は、実験方法のユニークさから始まり、得られた結果をクラックの構造を通して有機的に結びつけ、自然における各種の過程（焼結、風化等）の理解に役立てると共に現位置データ相互の関連を論じるという点にある。

審査員一同は申請者が博士（理学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。