

氏 名	齋 藤 玄 敏
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 6 年 3 月 25 日
学位授与根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 資源工学専攻
学 位 論 文 題 目	3 軸シェアシャドウ法による地下き裂の キャラクターゼーションに関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 新妻 弘明
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 新妻 弘明 東北大学教授 松木 浩二 東北大学教授 林 一夫 東北大学教授 中鉢 憲賢

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

地下計測においては、従来の石油・天然ガスなどのエネルギー資源や金属資源の探査に加えて、開発にともなう情報の取得と開発行為へのフィードバック、開発システムの制御・保持・健全性評価といった質的に異なる内容が求められるようになってきている。

地下システムの健全性および性状を定量的に評価するには、岩体中に含まれるき裂の分布・形状・方向・透水性などを正確に計測可能とする技術の開発が必要不可欠である。これは流体の移動路となるき裂が、廃棄物の保管施設においては廃棄物の流出を招く危険性を有することや石油・地熱貯留層においては貯留層の寿命や生産性を左右するためである。

地下構造の弾性的な特性の違いによる弾性波の反射・屈折から地下構造を明らかにする方法は弾性波探査としてよく知られており広く用いられている。しかし、本方法は広範囲の漠然とした地下構造を明らかにすることはできるが、地下深部の限られた範囲のき裂を高精度で測定することは困難である。

一方、地下深部に掘削された複数の坑井間で弾性波の伝搬特性を測定し、き裂を検出する方法は有望な方法として考えられている。これまで坑井間弾性波計測では、縦波の伝搬時間の異常や横波の減衰特性の異常からき裂の存在を推定する方法が提案されており、特に、後者はシェアシャドウ法と呼ばれている。しかし、本方法は坑井間におけるき裂の存在を知ることができるのみである。

本論文は、弾性波のき裂透過特性を利用して、地下き裂の存在のみならず、その方向まで明らか

にできる弾性波計測法である3軸シェアシャドウ法の開発とそれを用いた地下き裂のキャラクターゼーション法の開発を目的としている。

第2章 3軸シェアシャドウ法による地下き裂形状の評価

本章では、固体-液体-固体からなる3層モデルにより地下き裂を透過する弾性波の透過特性を検討し、透過横波の偏波方向、ならびに減衰から地下き裂の方向を評価する3軸シェアシャドウ法を提案した。また、坑井内エアガン（人工震源）の弾性波放射特性をフィールド実験から求めた。坑井内エアガンの弾性波放射特性は円筒型体積変位震源の弾性波放射特性と整合し、水平方向に縦波、水平面から $\pm 45^\circ$ 方向に横波を強く放射する。この結果をもとに3軸シェアシャドウ法を実施する際の検出器と人工震源の幾何学的配置を設計した。

次に、3軸シェアシャドウ法を東八幡平実験フィールドの地下370mに水圧破碎により作成されている人工地下き裂の計測実験に適用し、人工地下き裂方向の評価法のアルゴリズムに主成分分析法を導入し、き裂面方向の解を安定して求めることを可能とした。さらに、得られたき裂面の方向から人工き裂の3次元形状の推定を行なった。

図1に人工地下き裂の3軸シェアシャドウ法による3次元形状の評価結果を示す。3軸シェアシャドウ法による地下き裂の3次元形状は地殻応力の方向から推定されるき裂面の方向ならびに坑井と人工地下き裂の交点におけるき裂面の方向と整合が見られ、本方法の有効性を確認することができた。

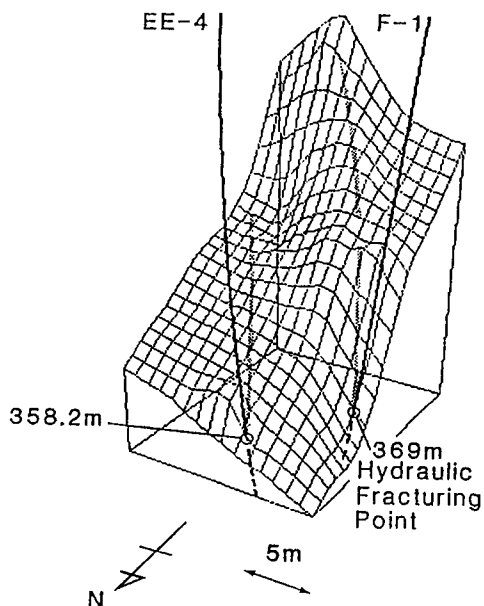


図1 東八幡平実験フィールドに作成された人工地下き裂の3軸シェアシャドウ法による3次元形状

第3章 地下き裂の開口にともなう弾性波挙動の計測実験

本章では、3軸シェアシャドウ法により形状が明らかになった東八幡平実験フィールドの人工地下き裂について、そのき裂開口量を人工的に変化させながら、弾性波伝搬挙動の変化を測定した。すなわち、測定には原理と弾性波の周波数帯域が異なる、透過弾性波の3軸計測（中心周波数200 Hz）、音波検層（中心周波数25kHz）ならびに境界波計測（中心周波数12Hz）の3種類の手法を適用し、き裂の開口挙動に関する情報の抽出を試みた。

透過弾性波の3軸計測実験では、人工地下き裂の開口により透過縦波の到来時間が遅延する現象および透過波の振幅が減衰する現象を見いだした。図2に地下き裂の開口による透過縦波の到来時間の変化を示す。本図において、坑口圧2.5MPaから縦波の到来時間の遅れが顕著になっている。

なお、トランスミッシビティーテストの結果から、人工地下き裂のリオープニングプレッシャーは坑口圧 2 MPa であることが推定されている。また、境界波の計測実験では、地下き裂の開口により分散性が顕著になる対称モードの境界波を実測することができた。しかし、音波検層では、き裂の開口による透過波の伝搬特性の変化は観測されなかった。以上の実験結果から、き裂の開口挙動は弾性波計測により検出可能であり、き裂の開口状態が場所によって異なること、および弾性波のき裂開口検出能が周波数に依存することが考えられる。

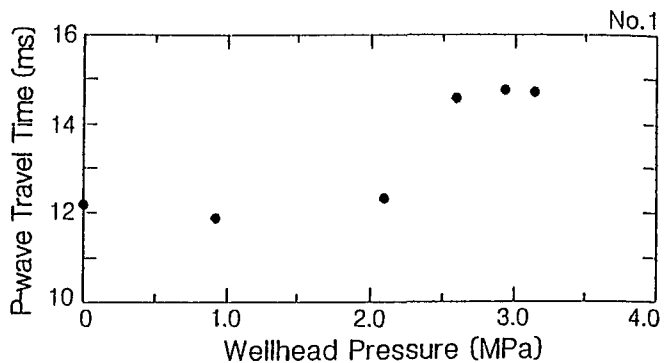


図2 透過弾性波の3軸計測で観測された地下き裂の開口による透過縦波の到来時間の変化

第4章 地下き裂のモデル化と開口挙動のキャラクター化

本章では、マイクロクラックモデルとリニアスリップインターフェースモデルにより地下き裂開口挙動のキャラクター化について検討し、フィールドデータの解釈を行なった。

マイクロクラックモデルによる検討では、縦波到来時間の遅れはき裂近傍のマイクロクラックが加圧によって徐々に開口し低速度帯を形成することによると仮定し、圧力拡散からマイクロクラックのリオープニング帯の厚さを推定した。リオープニング帯は0.6m~1.2mの厚さを有し、き裂と坑井との交点付近では存在が明確ではなく、き裂上部方向に厚く分布していると考えられる。

リニアスリップインターフェースモデルによる検討では、Schoenbergらの理論に東八幡平実験フィールドの弾性定数を当てはめ、それによるき裂開口挙動検出の可能性について検討した。その結果、き裂面接触剛性が数 GPa/m 以内であれば、現有の坑井間弾性波計測システムを用いてき裂の開口挙動を検出することができ、一方、高周波の弾性波では開口挙動を検出できないことが明らかとなった。これは音波検層でき裂の開口挙動を検出できなかった結果と整合する。さらに、本モデルでは水圧破砕点近傍のパスにおける縦波の0.5ms程度以内の遅れは説明できるが、き裂上部で観測された2msの遅れを説明することはできないことが判明した。

振幅透過特性から水圧破砕点近傍の人工地下き裂のき裂面接触剛性の評価を行い、き裂の開口挙動の推定を行った。無加圧時におけるき裂面接触剛性は法線方向 2 GPa/m、接線方向 0.6 GPa/m である。この値は、室内実験で得られている値とは2オーダー程度小さいが、これはき裂面がき裂支持剤を介して接触していることや、き裂近傍に存在するマイクロクラックの影響が現れていることに起因するものと考えられる。また、き裂接触状態は加圧開始とともに弱まり、2~3 MPaの間で完全に開口する。これは、トランスミッシビティーテストの結果と整合する結果である。

次に、き裂がマイクロクラックモデルあるいはリニアスリップインターフェースモデルで表される場合、き裂を透過した弾性波は分散性を有することから、実際のき裂とモデルとの整合性を検討するために時間一周波数表現を用いて透過弾性波の分散挙動を解析した。その結果、坑口圧が3 MPaを越えると100～200Hzの間でわずかに時間一周波数分布に変化がみられたが明確ではなかった。これがき裂の開口による分散挙動の変化であれば、き裂近傍は上述の2つのモデルで表せることになる。分散挙動の変化ではない場合は、新たなモデルの検討が必要である。

以上、第3章で示した実験結果は、パスによってはマイクロクラックモデルあるいはリニアスリップインターフェースモデルによって説明することが可能である。しかし、測定値は場所によって大きく異なっており、き裂システムの構造や性状が、き裂上部と下部とでは異なっている可能性が高いと考えられる。

第5章 結 論

本研究では既存地下き裂の形状ならびに性状の新しい計測法である、3軸シェアシャドウ法について、原理、具体的な計測法、信号解析法をフィールド実験と理論解析により詳細に検討した。その結果、本方法により、これまで計測不可能であった地下単一き裂の形状ならびに開口挙動を評価できることを明らかにした。

天然ならびに人工き裂システムの構造計測とキャラクターゼーション法の開発はこれからの地下計測工学、地球工学の最重要課題の一つであり、本論文はそのための新しい方法論を提示したものである。

審査結果の要旨

地下岩体中に存在するき裂の形状と性状の評価は、地下空洞の設計・施工や健全性評価、石油、地熱等の貯留層の評価や制御・保持等これからの地下工学においては特に重要な技術である。著者は、従来計測が困難であった既存地下き裂の3次元形状を、坑井間弾性波計測により明らかにする新たな手法として、3軸シェアシャドウ法を考案し、その具体的計測法を確立するとともに、それに基づく地下き裂性状評価手法について詳細に検討を行った。本論文はその成果をとりまとめたもので、全編5章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、き裂を透過する横波の減衰挙動とその計測法について詳細に検討を行い、それに基づき、3次元地下き裂形状の新しい計測法である、3軸シェアシャドウ法を具体的に提案している。さらに、本方法を用いて、東北大学東八幡平フィールドにおいて実験を行い、当フィールド地下370mに水圧破碎により作成されている、人工地下き裂の3次元形状の計測に世界で初めて成功した結果について述べている。これは画期的な成果である。

第3章では、3軸シェアシャドウ法によりその形状が明らかになった東八幡平地下人工き裂について、その開口変位を人工的に変化させながら、透過弾性波の3軸計測実験、音波検層ならびにき裂を伝搬する境界波の計測実験を行った結果について述べている。このようなフィールド実験は他に類例が無く、き裂の開口により透過縦波が遅延する現象を新たに見いだしている。これは重要な知見である。

第4章では、マイクロクラックモデルならびにリニアスリップインターフェースモデルにより地下き裂のモデル化を行い、その弾性波挙動を理論的に検討することにより、フィールド実験結果の解釈を試みている。さらに、その結果に基づき、地下き裂の開口にともなうき裂面接触剛性の変化挙動の評価を行っている。これは新たな地下き裂性状評価法を提示するものである。

第5章は結論である。

以上要するに、本論文は、透過弾性波の3軸計測による既存地下き裂の形状計測とキャラクターゼーションのための新たな手法を提示したもので、地球工学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。