

氏 名	よしむらきみたか 吉村公孝
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2906 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 都 市 環 境 工 学 専 攻
学位論文題目	岩盤の透水性分布把握に関する物理探査技術の適用性研究

論文調査委員 (主査) 教授 大西有三 教授 松岡俊文 准教授 西山 哲

### 論 文 内 容 の 要 旨

近年、地下空間は地下発電所、石油備蓄、地下ダムなど様々な用途で利用され、地下空間の安全性や利用目的に対する適用性の評価のために、地下水涵養や地下坑道掘削時の安定等が検討されている。特に、放射性廃棄物の地層処分事業においては、地下水による放射性核種の移行に関連する地下水流動、母岩の透水性と構造、さらに断層や破碎帯の位置形状、規模および透水性の把握が重要視されている。従来から地表またはトンネル内からの調査において、ボーリング孔を利用した透水試験などで水理場評価が行われてきたが、これらは点あるいは線の情報からの透水場構築であり、空間的な透水場評価を行うには不確実性が大きいことが課題とされていた。さらにボーリング孔は放射性核種の移行経路となりうるため、岩盤の健全性を損ねずに非破壊で広域の透水性を調査する技術が求められていた。

本研究では、このような現状を鑑み、非破壊の地質環境調査技術である物理探査を利用して、岩盤の透水性を把握するために、間隙水で飽和した岩盤中を伝播する弾性波の速度分散特性が岩盤の透水性に関連して生じる現象に着目した。そして具体的な透水場構築手法として、速度分散によって生じる弾性波速度差と原位置の透水試験から得られた透水係数の相関から、透水係数の空間分布を求める手法を提案している。

本論文は、序論および結論を含めて6章で構成されている。

第1章は、序論として、高レベル放射性廃棄物地層処分で地下深部に処分した放射性廃棄物から地下水によって生物圏に放射性物質が流出して被曝するシナリオにおいて、地下水流動が放射性物質の移動に重要な役割を持つことを示している。そして、地層処分の安全評価において地下水流動特性を把握するための物理探査の関わりを示し、本研究の動機、目的および手順を示している。

第2章では、現在広く知られている透水場構築手法について、現状認識と課題について示し、空間的な透水係数分布を推定する現状技術について触れるとともに、透水係数の推定手法について課題を抽出している。この中で、地層処分場から漏出する放射性核種の移行経路として、処分場周辺の岩盤の広がり、さらに優先的な移行経路となりうる断層・破碎帯の位置、形状を把握する調査技術として、非破壊な広域調査技術としての物理探査の優位性と、岩盤の透水性を調査する上での技術的課題を示している。

第3章では、本研究の基本理論となる弾性波速度分散現象について、間隙水で満たされた岩盤中を伝わる弾性波の挙動に関する理論を示し、透水係数の違いと弾性波速度分散の関係による本研究の背景となる理論的裏付けを示している。理論的には弾性波が媒体を通過する際に、媒質と水との相対的な動きの差によって速度分散が生じることを説明するものであるが、堆積岩では主に透水係数と間隙率が弾性波速度を決定するのに対して、結晶質岩のような亀裂性岩盤の理論では、亀裂の開口幅に関連するパラメータが弾性波速度を決定することを示し、本手法による透水場の推定技術の理論的な根拠について、その妥当性を論じている。

第4章では、前章で考察した理論の妥当性を室内実験により実証している。具体的には、異なる温度で加熱処理して透水

係数を変化させた花崗岩、および堆積岩として砂岩、泥岩、珪藻泥岩、凝灰岩、硬質頁岩を用いて、周波数ごとの弾性波速度を室内実験で計測する。その結果、堆積岩では透水係数と間隙率の違いによって、弾性波速度分散が生じることを示し、花崗岩では、亀裂の開口幅に関連するパラメータと透水係数の違いによって弾性波速度分散が生じることを確認している。また、岩石の種類および透水係数の値によって現れる速度分散の特徴が異なることを整理し、他の手法によって計測した各試料の透水係数の値と本手法によって算出される透水係数の値を比較し、両者がほぼ一致することを実証した。さらに、これらの結果からいずれの岩石試料においても、透水係数が増加すると速度変化する変曲点の周波数が低下することを述べ、実際の現場に適用する際に観測できる周波数帯と室内実験で使用した周波数帯との関連に関して考察し、速度変化の特徴から岩盤中の高透水路と低透水路の検出が可能となることを示した。

以上の室内実験の結果から、2本の並行したボーリング孔を用いた弾性波トモグラフィに本手法を用いる新しい調査技術を考案している。実際の現場では限られた周波数帯しか観測できないが、速度構造の相違から透水係数が変化している箇所を抽出することができることを提案する。さらに原位置透水試験を組み合わせた数値実験から定量的な透水係数の分布を把握する調査技術も考案する。これによれば、室内実験で使用した広範囲の弾性波周波数を使用することなく、速度分散が生じる前後の周波数帯で、いくつかの周波数によって弾性波トモグラフィを実施して弾性波速度を計測することで透水係数の違いで生じる各周波数間の弾性波速度差を算出する。次に並行してボーリング孔内で実施した水理試験の透水係数と弾性波速度差の相関を求め、相関関数からボーリング孔間の弾性波速度差を透水係数に変換して空間的な透水係数分布を求めることが可能になる。この手法によれば計測する周波数が少なくてすむことから、計測に要する時間を大幅に短縮することができること、さらに水理試験が困難な距離が離れたボーリング孔間においても、弾性波トモグラフィにともなう不確実性を低減することが可能になり、広域の透水場の構築が可能にすることが示されている。

第5章では、原位置実験結果の考察し、本研究で開発した手法の有用性を実証する。具体的には破碎帯を含む花崗岩を対象に、孔間距離1.5mの短区間のボーリング孔を利用して、前章の透水係数分布構築手法を適用し、異なる周波数による弾性波トモグラフィと原位置透水試験との組み合わせによって、ボーリング孔間の破碎帯形状と空間的な透水係数分布を求めている。次に、本手法による透水係数分布構造を検証するために、新たなボーリングと透水試験を実施して弾性波トモグラフィから求めた空間的な透水係数値と原位置透水試験の値が、 $10^{-8} \sim 10^{-11} \text{m/sec}$ の範囲で、ほぼ同じ値であることを確認している。さらにスケールを拡大した場合の適用性を確認するために、同地区の孔間距離70mのボーリング孔間において空間的な透水係数分布を求め、本手法による透水場の推定が可能であることを実証する。また本章では、広域の地質環境調査でこの手法を適用するための計測装置の開発結果にも言及し、長距離にわたって弾性波を伝播させることを目標として、磁歪材を振動子にした高エネルギーの孔内震源装置を製作し、孔間距離400mのエネルギー伝播性能が可能であることを示している。そして、同試験場で平行に配列している複数のボーリング孔を利用して、堆積岩地域においても、本手法による空間的な透水場構築が可能であることを示している。

第6章では、本研究の結論をまとめ、本手法による孔間弾性波トモグラフィで岩盤の透水場を推定するという新しい付加価値を与え、本研究の工学的な有用性を論じると共に今後の検討課題について考察する。今後の検討課題としては、地球統計学による確率論的な手法の併用、さらに広範囲におよぶ調査法構築の可能性を示し、また、電磁波を用いた物理探査手法との組み合わせにより、塩分濃度が高い地下水が分布する場所での長期的な地下水変動予測技術へ適用するための方法を具体的に提案し、最後に本研究のまとめを記している。

## 論文審査の結果の要旨

わが国の放射性廃棄物の地層処分事業では、地下水による放射性核種の移行に関連する地下水流動の把握、母岩の透水性と構造、さらに断層や破碎帯の位置形状、規模および透水性を知ることが重要であるが、従来のボーリング孔を利用した透水試験による水理場評価は、点あるいは線の情報からの透水場構築であり、広域にわたる空間的な透水場の評価法においては不確実性が大きくなるという課題があった。本研究はこのような現状を鑑み、間隙水で飽和した岩盤中を伝播する弾性波の速度分散特性が岩盤の透水性に関連して生じるという現象に着目し、ボーリング孔間トモグラフィの技術において複数の周波数の弾性波を用いることで、岩盤の弾性波の速度構造から透水場の構造を推定する新しい調査技術を構築することに取

り組み、その成果をまとめたものである。本論文の主な内容は以下のとおりである。

(1) これまで岩石試料において速度分散が存在することは示唆されていたが、結晶岩あるいは堆積岩といった岩石の種類ごとに、その分散特性の性質を確認されていなかった。本研究において、異なる温度で加熱処理することで透水係数を変えた花崗岩および、砂岩、泥岩、珪藻泥岩、凝灰岩、硬質頁岩などの堆積岩からなる岩石試料を用いた弾性波の速度分散現象に関する室内実験を実施し、いずれの試料においても、周波数が大きくなるにつれ弾性波速度が増大するという分散現象を確認し、岩石の種類あるいは透水係数の値の相違による分散特性の特徴をまとめた。さらに他の手法によって計測した各試料の透水係数の値と、速度分散の値から求めた透水係数の値がほぼ一致することを確認した。この結果に基づいて、本計測手法の根拠となる理論を考察し、弾性波が通過する際に媒質と水の相対的な動きに差ができることから速度分散が現れ、さらに分散が発生する速度と透水係数とを結びつける関係式の妥当性を実証することで、岩盤の速度構造を透水場に変化することの理論的根拠を与えた。

(2) 実際の破碎帯を含む花崗岩からなる岩盤を対象に、本手法による透水場の推定技術の実証実験を実施した。具体的には従来から実施されている弾性波孔間トモグラフィの技術に複数の周波数を用いることを提案するもので、現場において測定できる周波数帯が限定されていることから、各周波数の速度値の相対的な相違を利用して透水場の構造を推定する手法を考案し、ボーリング孔内の透水試験との整合性から本手法の調査技術としての実用性を実証した。また、弾性波トモグラフィに含まれる不確実性を低減するために、ボーリング孔内の原位置透水試験との組み合わせによる透水場構築手法を実施し、広域調査に向けた本手法の適用性を高めることを可能にした。

以上、要約すると本論文は、これまで実施されている孔間弾性波トモグラフィにおいて、複数の周波数を用いることにより速度構造から透水場の構造を推定するという新しい調査技術を構築するものであり、岩石試料を用いた実験により理論的な根拠を確立し、さらに実際の現場において、これまで困難とされていた広域の透水場の推定を実証したものであり、今後の岩盤工学の分野の発展に関し、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年2月7日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。