

氏名	竹内 真司
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 738 号
学位授与年月日	平成 21 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	深層の亀裂性岩盤を対象とした水理地質構造の評価技術に関する研究
論文審査委員	委員長 教授 渡邊 邦夫 委員 教授 桑野 二郎 委員 准教授 小口 千明 委員 准教授 長田 昌彦 委員 准教授 山辺 正

論文の内容の要旨

近年、放射性廃棄物の地層処分やエネルギー備蓄、CO₂ガスの地下貯蔵などの分野において、地下深部までの地下水流動を理解するための技術開発が求められている。このためには、品質管理されたデータに基づいて地下水流動のモデル化および解析を行い、予測結果と実測値に矛盾がないような水理地質構造モデルを提示することが重要である。本論文では、亀裂性岩盤を対象に掘削された深層のボーリング孔を利用して、水理地質構造を構築する上で重要な水理特性を高品質で取得するための水理試験手法と、主要な地下水の流動経路となる水みちの位置を詳細に把握する手法を開発し、現場での適用性を評価した。さらにこれらの手法を適用して、水みちの連続性や地下水流動に対するバリアとなる構造などの水理地質構造を推定する手法を提案した。本論では、主として以下の3点について検討した。

- ① 水理試験手法の開発
- ② 水みち検層手法の開発
- ③ 水理地質構造の推定手法の開発

(1) 水理試験手法の開発

水理試験手法の開発については、1,000mを超える地下深部に掘削されたボーリング孔を用いて、低透水性から高透水性を有する岩盤において品質管理されたデータを効率的に取得し、透水性などの水理パラメータを適切に解析するための技術の開発が課題であった。そこで、複数種類の試験を連続して実施でき、試験区間からの水圧の漏洩の監視が可能な機能等を有する試験装置を開発した。これを用いて試験区間の透水性に相応しい試験方法を選択するというコンセプトに基づく「シーケンシャル試験手法」を開発した。さらに水理特性の解析については、現場において簡易的かつ品質管理された水理パラメータを取得するため、時間微分プロットと直線勾配法を組み合わせた解析が、試験中にリアルタイムで実施可能なシステムを開発した。

開発した一連の水理試験手法を原位置のボーリング孔で適用した結果、深層岩盤の透水性を品質を確保しつつ、効率的に取得できることを確認した。

(2) 水みち検層手法の開発

亀裂性岩盤における水みち検出の手法に関しては、欧米で開発された電気伝導度検層（以下、FEC 検層）について、割れ目の多い岩盤への適用性を検討した。このため、ボーリング孔を用いたフローメータ検層などの従来法と、FEC 検層を同一のボーリング孔で実施した。その結果、FEC 検層は他の検層に比べて3倍程度多くの異常点を検出可能であることを確認した。また、FEC 検層で抽出された水みちを対象に実施した水理試験結果と、FEC 検層結果から数値解析により算出した透水量係数を比較したところ、両者が同等の値を示す孔と異なる値を示す孔があることが分かった。検討の結果、これはボーリング孔近傍のスキンなどが影響していることが示唆され、水理試験の代替手法という観点でのFEC 検層の有効性や留意点などを評価するとともに、水みちの水理特性を適切に把握する手法を提案した。

(3) 水理地質構造の推定手法の開発

(1) および(2)の技術開発の結果をふまえて、水みちの連続性や水理学的な境界などの水理地質構造を推定する手法について検討した。ここでは単一のボーリング孔を利用した方法と複数孔間を利用した方法について検討を行った。

単一のボーリング孔における検討では、水理試験で得られる圧力の時間変化データの時間微分プロットを流量等で正規化することにより透水量係数への変換が可能となることを用いて、異なる区間の水理試験結果を比較し、水みちの連続性などの水理地質構造の推定を行った。これを上記(2)で適用性を確認したFEC 検層によって検出された水みちを対象に、(2)で開発した水理試験手法によって得られた水理試験データに対して上記手法を適用した結果、地質学的に認定された幅の広い割れ目帯の中の特定の水みちが互いに連結し、かつ割れ目帯全体の透水性を表していることが推察された。

また、複数のボーリング孔間を利用した水理試験については、2区間において、10日から14日間の揚水試験とその後の圧力回復試験を実施し、これらによる水圧応答を周辺のボーリング孔に設置した多区間水圧モニタリング装置によって観測した。得られたデータを再現するようなタイプカーブマッチングにより水理パラメータを求め、これに基づいて水頭拡散率を算出した。その結果、多くの区間で流れの次元は2次元よりも低い値を示すことと、孔間に分布する水みちの中でも特に水頭拡散率が高い区間が存在することが分かった。検討の結果、水頭拡散率は伝播速度と良い相関を有する傾向があることから、特定の区間で連続性が顕著に高い可能性が示唆された。また、水圧変化の分布の違いから低透水性の水理地質構造によって囲まれた1キロメートル四方におよぶコンパートメント構造の存在が推定された。

また別途実施した孔間水理試験結果を用いた水圧トモグラフィ解析や研究坑道掘削に伴う地下水圧モニタリングデータの変化、および地盤傾斜データに基づく解析結果は、上記で推定した水理地質構造の存在と矛盾なく説明ができることが分かった。

論文の審査結果の要旨

本学位論文は、地下深部に発達する亀裂性の岩盤の水理地質構造を調査し把握するための新しい手法を開発し、岐阜県、瑞浪超深地層研究所周辺の岩盤に適用した研究を取りまとめたものである。深層の亀裂性岩盤は、現在大きな問題となっている高レベル放射性廃棄物処分場建設の対象母岩の1つとなっており、安全な処分のためには、まずその水理地質的な性質を的確に評価しなければならない。しかし、このような岩盤中には、透水性の大きく異なる各種割れ目が多数発達し、その評価は極めて難しかった。本研究はこの問題に正面から取り組んだものである。その成果は単に放射性廃棄物処分のみならず、トンネルなどの地下構造物の建設やダム貯水池からの漏水などの問題に適用しうるものである。

筆者は、研究成果を5章に分けて記述している。

第1章では、本研究の背景、つまり放射性廃棄物処分研究の歴史と残された問題について記述し、亀裂性岩盤の水理地質構造の把握が処分の安全性を考える上で不可欠である事を示している。また、従来行なわれてきた水理地質構造評価の調査法を概観し、問題点を抽出している。

第2章では、研究対象となる瑞浪超深地層研究所及び地質について記述し、本研究で用いたボーリング孔などについて説明している。

第3章では、本研究で開発された、単一ボーリングを用いた岩盤の透水性評価システムについて詳述している。この章の主題は2つある。1つは、岩盤の透水量係数の評価法であり、パルス試験やスラグ試験など多様な試験を組み合わせる測定精度を上げるシーケンシャル試験法を提案している。また、従来良く行なわれてきた揚水試験に伴う圧力変動の時間微分の性質が、正確な透水量係数評価に当たって重要である事を実測に基づいて提案した。他の1つは、地下水が流れ易い「水みち」の調査である。従来は、ボーリング孔に沿った鉛直方向流速の場地的変化によって水みち部を検知していたが精度が悪く、個々の水みち位置を確定する事は難しかった。この問題に対して電気伝導度検層を提案し、その適用性を検討した。この方法は、ボーリング孔内の水を脱イオン水で置換した後にボーリング孔に沿って電気伝導度分布を計測するものであり、地下水が孔内に流入する点で電気伝導度が上昇する事を利用している。この測定法の妥当性を検証し、従来の方法と比較して、水みち検知の精度が飛躍的に改良された事を示した。さらに、研究を進展させて、電気伝導度の上昇から透水量係数を求める算定式を提案し、従来の方法と比較して十分な精度で測定できる事を実証した。

第4章では、より大きい岩盤の地下水流れの性質を評価する方法について、実証に基づいて研究した結果を記述している。まず、揚水試験などによる水圧変動の時間微分から、ボーリング孔周辺の流れが、均質に広がる3次元的なものか、割れ目に沿った2次元的なものか、あるいは水みちに沿った1次元的なものかを判別しうる事を述べ、この判別が対象岩盤内の地下水流れを評価する基礎である事を論証している。ついで、複数のボーリングを用いた広域岩盤の透水性評価について研究結果を記述している。まず、複数のボーリング間の水圧応答から、瑞浪超深地層研究所周辺の岩盤には、不透水性の断層などで囲まれた、いわゆるコンパートメント構造が存在している事を明らかにしその構造の地質的性質について論述した。またその構造が、立坑掘削に伴った地下水圧変化が引き起こす岩盤変位を解析することによって検証しうる事を明らかにした。

第5章は本研究で得られた成果を整理した上で、今後さらに研究を発展すべき方向を示唆した。

本研究は、丹念な理論的考察を背景とし、岩盤の水理地質構造の調査・評価システムを開発し、その実用性を瑞浪超深地層研究所周辺で行なわれた多くの野外実験によって検証したものである。その中で、主要な透水経路となる岩盤中の水みちの性質や、広域岩盤のコンパートメント構造など、新しい知見を多数得ることが出来た。記述された研究内容や得られた新知見から、本論文は博士学位論文として十分であり、合格と判定した。