

氏名	あん どう けん いち 安 藤 賢 一
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2249 号
学位授与の日付	平成 15 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	工学研究科土木システム工学専攻
学位論文題目	岩盤地下水中の汚染物質の環境への影響評価手法に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 大西有三 教授 渡邊英一 教授 森澤眞輔

### 論 文 内 容 の 要 旨

岩盤地下水中の汚染物質の移行挙動評価については、原位置試験や室内試験、解析的研究と長年にわたって様々な研究が行われている。この中で、地盤統計学を基礎とした研究がなされ、最近では確率統計手法に基づく様々な最適化に関する研究も進んでいる。しかし、調査から評価・解釈を一貫したシステムとして研究されておらず、評価に必要とされる情報と調査される項目の間に整合性が計られていないのが現状である。こうした中、本論文は岩盤中の地下水の流動と汚染物質の移流・拡散現象を評価することを目的とした確率論的なアプローチについての研究を行ったものであり、論文は7つの章から構成されている。

第1章では、本論文の目的が岩盤中における地下水の流動と汚染物質の移流・拡散現象の把握を行うことであると提示し、第2章以下の論文の相互関係を明確にし、その概要を示している。

第2章では、調査で得られる情報と評価に必要な情報を整理し、3章以降の研究の位置づけを明確化する上で最も重要なデータフローダイアグラムを提案し、情報の統合化を図ることに成功した。統合されたフローダイアグラムの有効性を示すために例示として、従来の地下水流動の把握において課題とされている代表値の設定について、確率論を用いた地下水流動評価における基本となる透水試験の信頼性を中心極限定理、モンテカルロシミュレーション、浸透流解析の手法を用いて評価する手法を提案した。

第3章では、連続体モデルによる地下水流動および物質移行の確率論的評価を行っている。具体的には、連続体モデルによる地下水流動評価が困難と予想される亀裂性岩盤を対象に、原位置透水係数データをもとにモンテカルロ法によるインディケータコンディショナルシミュレーションによる確率論的に等しい透水場のモデル化手法を提案した。さらに水頭についてはトレンドの評価方法として、2次の残差方程式よりクリギングによる境界条件を設定する方法を提案した。さらに、フランスの Fanay-Augères ウラン鉱山における花崗岩を対象とした地下水の流動に関わる原位置試験データを用いて、提案した本手法による浸透流解析を行い、実測の水頭および調査トンネルへの湧水量を比較し、提案した解析手法の有効性を検証した。

物質移行挙動についても、原位置で実施されたトレーサー試験の結果を本手法により解析的に評価し、原位置で計測された破過曲線と比較することで、有効間隙率および縦方向、横方向分散長を推定することができた。そして、これらのデータを用いて原位置で得られた破過曲線を再現し、本手法の妥当性を証明した。

第4章では、サイト特性評価において実施される透水試験やその後続くトレーサー試験など一連の原位置試験・調査における整合性を評価する確率論的手法を新たに構築した。ここでは、割れ目の大きさや表面の不均質性による物質移行を評価するための間隙率が地下水量によって支配されると同時に、透水性から求まる間隙率が地下水流動の抵抗に支配されることに着目してその関係を理論的に明確化した。また、パイプモデルを例に用いて単純に透水性から得られる有効間隙率と物質移行から得られる有効間隙率の関係を理論的に示すことに成功し、さらに原位置あるいは岩盤の情報としての透水係数

を基に物質移行の特性について定量的に評価をすることができた。

単純化した理論解によれば、物質の移行を考えた場合の有効間隙率は、割れ目の幅の変動、不均質性、表面の粗度等により増加する。この理論解を第3章と同様、フランスのFanay-Augèresウラン鉱山における花崗岩を対象とした地下水の流動に関わる原位置試験のデータに適用してその理論の正しさを明らかにしている。

第5章では、揮発性汚染物質のガス化、有機物による汚染物質からのガス発生あるいは還元雰囲気下での金属腐食によって発生したガス等の影響を評価するために、信頼性のあるガス移行挙動の評価手法を構築し、ガスの移行挙動における人工のコンクリートと土構造物および周辺岩盤の評価手法の信頼性を向上させることを目的として、これまでの研究成果を統合する意味で、原位置に置いて実験を行い、本研究の有用性を考察している。具体的には、スイスのグリムゼル岩盤試験場（スイス放射性廃棄物処分組合の管理下）において、処分場環境と類似した原位置条件下で模擬的に人工構造物を構築し、周辺の岩盤（花崗岩）を含む系でのガス移行挙動の原位置試験を行った。

人工構造物の構築においては、施工可能性を評価すると共に、第3章で示した水頭を対象にしたクリギングにより不均質性の評価が可能となった。室内試験においては、長期的かつ精度の高い実験を行うことにより、二相流および二相流+力学連成解析に必要な入力データを取得することができた。また解析では、人工の構造物の飽和過程を二相流解析コードで解析することで、人工構造物の再冠水挙動に対する二相流概念の有効性を示すことに成功した。

さらに、ガス移行概念としての水-ガス-応力連成概念を構築し、解析コードの適用性について評価する手法を提示した。そして、従来の解析コードで評価できないフィンガリング等の局所的な不均質性から起こる複雑なガス移行現象については、第4章で示した新たなアプローチを提案した。

第6章では、各章での成果を基に、より実用化する上での課題を明確にし、その課題解決に向けた検討方法と将来への展開を提示して、岩盤中の地下水流動および物質の移行について、現地における調査と相関をとった統合的な評価が本研究により可能となることを示した。特に第5章のガス移行挙動については、より正確な解析の評価を行うために、実験後の人工構造物の解体調査を踏まえ、現実的なデータ取得を提案した。さらに、室内試験データを充実することにより本手法の一般化が可能となることを示している。

第7章は結論であり、低透水性の岩盤における地下水流動と汚染物質の移行挙動についてより正確な評価を行うため、原位置試験としての透水試験やトレーサー試験の実施、移行概念の構築や解析コードの構築に極めて有効な手法をまとめるとともに、地下水中の汚染物質の環境への影響評価手法についての総括を行っている。

## 論文審査の結果の要旨

岩盤地下水中の汚染物質の移行挙動に関しては、長年にわたって研究が行われ、最近では確率統計手法に基づく様々な最適化に関する研究も進んでいる。こうした中、本論文は岩盤中の地下水の流動と汚染物質の移流・拡散現象を把握することを目的として、確率論的なアプローチに関する研究を行ったものであり、その主な内容は次の通りである。

- 1) 従来の地下水流動の把握において、透水係数は透水試験の代表値として平均値を用いているか、あるいは個別の透水係数を確率論的に直接用いていた。しかし、代表値としての十分な測定数の設定や代表値の算定方法が明確になっていない等の課題があった。本研究では、確率論を用いた地下水流動評価における基本となる透水試験の信頼性を中心極限定理、モンテカルロシミュレーション、浸透流解析の手法を用いて評価する手法を提案した。
- 2) 亀裂性岩盤の地下水流動の把握において、透水係数の推定にモンテカルロ法によるインディケータコンディショナルシミュレーションを適用し、さらに水頭についてはトレンドを考慮した2次の残差のクリギングを適用した境界条件を設定する手法を提案した。さらに、その手法をフランスのFanay-Augèresウラン鉱山における花崗岩を対象とした地下水の流動に関わる原位置試験で得られたデータに適用して、原位置データと比較することにより本手法の有効性を実証した。また、物質移行評価では、トレーサー試験を対象に物質移行解析を行い、有効間隙率および縦方向、横方向分散長を推定することを可能にした。その結果、亀裂性岩盤の地下水流動把握において、詳細なデータを必要とせず、取り扱いが容易である確率論を基にした本手法の実用性を示すことに成功した。
- 3) 亀裂性岩盤の地下水流動及び物質移行をパイプネットワークによりモデル化し、物質移行を評価する間隙率と透水性を

評価する間隙率との関係を確率論的アプローチにより見いだした。同一の透水性を有する岩盤においても物質移行を考えた場合の有効間隙率は、割れ目幅の変動、不均質性、表面の粗度等により増加することを確認した。結果、物質移行における遅延現象を透水係数の不確実性を用いて理論的に評価することを可能にした。

- 4) 汚染物質の移行に関する実験的研究として、岩盤空洞中に人工構造物を構築し、周辺岩盤からの湧水による人工構造物の飽和および、内部からのガス注入による水およびガスの移行挙動を評価するとともに、実験結果と解析を比較することにより再冠水挙動に対する二相流概念の有効性を示した。さらに、実験の結果を用いてガス移行挙動における水-ガス-応力の連成作用を評価する方法を提示した。

以上、要するに本論文は、岩盤地下水中の汚染物質の影響評価手法の一つである確率論的な手法を用いて、不均質かつ複雑な物質移行挙動を、より精確に解析するための理論的および実用的な新たな方法を提案した研究であって、学術上、実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15年1月31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。