

多様な不均質性を有する岩盤内における

地下水流動評価手法に関する研究

学位論文内容の要旨

近年, 原子力発電の利用はエネルギーの安定供給, 地球温暖化対策の両面から拡大状況にあり, 原子力発電に伴い発生する放射性廃棄物の処分についても事業者, 規制の両観点から議論が進んでいる状況である. 放射性廃棄物処分施設の安全評価を行う際には, 広範囲にわたる処分場全域において地質環境に不確実性が含まれることや, 数万年以上という一般土木構造物とは異なるオーダーでの性能評価が必要とされることから, 説明性の高い評価手法の適用が望ましいと考えられる. また, 放射性廃棄物処分施設の安全評価にあたっては, 廃棄物が地下水中に溶出し, 処分施設周辺の地下水流れに沿って移行して人間環境に達する際の被ばく線量を評価するシナリオ, いわゆる地下水シナリオと呼ばれるシナリオを基本として評価が行われる見込みである. そのため, 放射性廃棄物処分施設の安全評価を行う際に, 不均質性を有する地盤や岩盤を適切に評価する技術の開発及び向上が今後より重要な課題となるものと考えられる.

以上を背景とし, 本研究では放射性廃棄物処分施設の建設および安全評価を行う際の, 岩盤の地下水流動現象並びに物質の地下水中の移行現象に着目し, それらの現象のモデル化並びに原位置で得られた計測データを用いた解析の実施を目的とする. 岩盤中の地下水流動問題を考える際の岩盤のモデル化手法は, 岩盤自体を不連続媒体としてモデル化する手法と連続媒体と見なしてモデル化する手法に大別されるため, 本研究においても2種類のモデル化手法に着目し, 不均質性を有する岩盤のモデル化技術, 地下水流動評価技術及び物質移行評価技術の開発と向上を目的として検討を行った.

第1章は, 本研究の諸論として, 放射性廃棄物処分施設周辺の地下水挙動評価ならびに安全評価を行うに当たり, 高い精度で地下水挙動を評価するための解析技術の必要性および, その問題点について示すことにより, 本研究の目的とする所を明らかにしたものである. このため, 我が国において実際の放射性廃棄物処分施設を念頭に実施された地下水評価に関する研究とその問題点について示した.

第2章は, 岩盤を不連続と見なして評価する手法の一つである不連続亀裂ネットワークモデル (DFN モデル) の構築手法に着目して検討を行った.

岩盤中の亀裂は, 岩盤の力学的特性及び水理学的特性を支配し, 放射性廃棄物処分の安全性能を大きく左右する要因となるものの, 原位置で取得されるデータに基づき種々の仮定に基づいた整理がなされており, 既往の検討では試行錯誤的な設定が適用されるといった問題があった. こうした背景から, 本研究では原位置の地表踏査およびボーリング調査などにより得られた亀裂特性データに基づき, 各亀裂特性間の関係を考慮した DFN モデル構築手法の整理を行った. 特に, 本研究では亀裂の

半径分布に注目し、原位置で観察した亀裂のトレース長と観測が事実上不可能な亀裂半径の関係を確率理論に基づいて導出し、トレース長の確率密度関数を導出した。本研究で整理した一連の DFN モデル構築手法の導入により、DFN モデルを構築する上で必要となる亀裂特性パラメータの設定方法に関する不確実性が減少し、DFN モデルを用いた岩盤の確率的評価の信頼性が向上すると考える。

第 3 章は、第 2 章で構築手法を検討した DFN モデルと理論式に基づく簡易的な手法を用い、大深度立坑を掘削する際の突発湧水リスクを評価する手法について検討を行った。岩盤中に構造物を建設する際には、亀裂などの不連続構造からの湧水が施工上の問題となる場合が多いため、花崗岩中での立坑掘削工事を例として、亀裂からの突発湧水リスクの簡易評価手法を提案し、さらに工事の事前段階でのボーリング孔による調査の情報量の効果を含んだ突発湧水リスクの評価手法を提案した。さらにリスク低減方策の検討として、事前の亀裂頻度の情報量の影響を考慮した総調査・対策コストの算定手法を提案し、試解析を行った結果、建設工事の事前段階での調査量と施工時の突発湧水リスクの関係を定量的に把握し、コストミニマムを実現する最適な調査量を判定できる見込みが得られた。

第 4 章では、岩盤を連続媒体で表現するものと仮定し、原位置透水試験の結果に基づいて大規模地下水流動解析の際に設定すべきマクロな透水性を意味する“巨視的透水係数”を算定する方法を提案し、数値試験によりその妥当性と適用範囲について検証を行った。さらに、実計測データを例として原位置試験結果に基づく“巨視的透水係数”および分散長の算出を実施した。具体的には、原位置透水試験による透水係数の統計量を入力データとし、確率有限要素法による逆解析を行うことで不均質に分布する“岩盤の透水係数分布”の統計量を推定する手法を取りまとめ、推定した“岩盤の透水係数分布”の統計量に基づき、既往の検討で示されている巨視的透水係数の算出を行った。本手法により、試験のスケールに依存する原位置で取得した透水係数データからマクロな透水性を設定する手法が構築された。

第 5 章では同じく、岩盤を連続媒体で表現するものと仮定し、岩盤中の地下水流動、物質移行問題を解く手法として混合型有限要素法の一つである不連続ガラーキン法および局所不連続ガラーキン法による非定常地下水流動解析及び崩壊項を含む移流分散方程式の弱形式化を行った。さらに局所不連続ガラーキン法と解析解との比較を行うことで数値解の精度検証も実施した。本研究で導入した手法により、従来手法で問題となることの多い数値振動や数値分散について、工学的な範囲でそれらの影響を排除できることを確認した。

第 6 章では本研究の成果を取りまとめた。本研究では、放射性廃棄物処分施設の安全評価を実施することを念頭に、岩盤を不連続媒体として取り扱う手法および岩盤を連続体と近似して取り扱う手法の両者について検討を加えた。前者については主に不連続亀裂ネットワークモデルの構築手法を提案し、後者については、不均質性を含む連続媒体の巨視的な水理特性の評価と、数値振動・数値分散の少ない数値解析手法の適用を行い、不均質性を有する岩盤の地下水流動特性と物質移行特性の評価技術の高度化に資する成果を達成した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 蟹 江 俊 仁
副 査 教 授 三 浦 清 一
副 査 教 授 五十嵐 敏 文
副 査 准教授 松 本 高 志

学 位 論 文 題 名

多様な不均質性を有する岩盤内における 地下水流動評価手法に関する研究

近年、原子力発電の利用はエネルギーの安定供給、地球温暖化対策の両面から拡大状況にあり、原子力発電に伴い発生する放射性廃棄物の処分についても事業者、規制の両観点から議論が進んでいる状況である。放射性廃棄物処分施設の安全評価を行う際には、広範囲にわたる処分場全域において地質環境に不確実性が含まれることや、数万年以上という一般土木構造物とは異なるオーダーでの性能評価が必要とされることから、説明性の高い評価手法の適用が望ましいと考えられる。また、放射性廃棄物処分施設の安全評価にあたっては、廃棄物が地下水中に溶出し、処分施設周辺の地下水流れに沿って移行して人間環境に達する際の被ばく線量を評価するシナリオ、いわゆる地下水シナリオと呼ばれるシナリオを基本として評価が行われる見込みである。

以上を背景とし、本研究では亀裂などの不均質性を有する岩盤内における地下水流動現象に着目し、そのモデル化並びに原位置で得られた計測データを用いた解析手法の提案を通じて、放射性廃棄物処分施設の建設および安全評価を行う際などの長期的な流動予測技術の向上に寄与することを目的とする。岩盤中の地下水流動問題を考える際の岩盤のモデル化手法は、岩盤自体を不連続媒体としてモデル化する手法と、連続媒体と見なしてモデル化する手法に大別されるため、本研究においても2種類のモデル化手法に着目して検討を行った。

第1章は、本研究の諸論として、放射性廃棄物処分施設周辺の地下水挙動評価ならびに安全評価を行うに当たり、高い精度で地下水挙動を評価するための解析技術の必要性および、その問題点について示すことにより、本研究の目的とする所を明らかにしたものである。

第2章は、岩盤を不連続と見なして評価する手法の一つである不連続亀裂ネットワークモデル(DFNモデル)の構築手法に着目して検討を行った。岩盤中の亀裂は、岩盤の力学的特性及び水理学的特性を支配し、放射性廃棄物処分の安全性能を大きく左右する要因となるものの、原位置で取得されるデータに基づき種々の仮定に基づいた整理がなされており、既往の検討では試行錯誤的な設定が適用されるといった問題があった。こうした背景から、本研究では原位置の地表踏査およびボーリング調査などにより得られた亀裂特性データに基づき、各亀裂特性間の関係を考慮したDFNモデル構築手法の整理を行った。本研究で整理した一連のDFNモデル構築手法の導入により、モデル構

築上必要となる亀裂特性パラメータの設定方法に関する不確実性が減少し、当該モデルを用いた岩盤の確率的評価の信頼性が向上すると考える。

第3章は、第2章で構築手法を検討したDFNモデルと理論式に基づく簡易的な手法を用い、大深度立坑を掘削する際の突発湧水リスクを評価する手法について検討を行った。岩盤中に構造物を建設する際には、亀裂などの不連続構造からの湧水が施工上の問題となる場合が多いため、花崗岩中の立坑掘削工事を例として、亀裂からの突発湧水リスクの簡易評価手法を提案し、さらに工事の事前段階でのボーリング孔による調査の情報量の効果を含んだ突発湧水リスクの評価手法を提案した。

第4章では、岩盤を連続媒体で表現するものと仮定し、原位置透水試験の結果に基づいて大規模地下水流動解析の際に設定すべきマクロな透水性を意味する“巨視的透水係数”を算定する方法を提案し、数値試験によりその妥当性と適用範囲について検証を行った。さらに、実計測データを例として原位置試験結果に基づく“巨視的透水係数”および分散長の算出を実施した。本手法により、試験のスケールに依存する原位置で取得した透水係数データからマクロな透水性を設定する手法が構築された。

第5章では同じく、岩盤を連続媒体で表現するものと仮定し、岩盤中の地下水流動、物質移行問題を解く手法として混合型有限要素法の一つである不連続ガラーキン法および局所不連続ガラーキン法による非定常地下水流動解析及び崩壊項を含む移流分散方程式の弱形式化を行った。本研究で導入した手法により、従来手法で問題となることの多い数値振動や数値分散について、工学的な範囲でそれらの影響を排除できることを確認した。

第6章では本研究の成果を取りまとめ、岩盤を不連続媒体として取り扱う手法および岩盤を連続体と近似して取り扱う手法の両者についての知見が整理されている。

これらを要するに、本研究は多様な不均質性を有する岩盤内における地下水流動問題に対し、不均質性に応じたモデル化と解析手法を開発し、岩盤内の地下水流動特性と物質移行特性の評価技術の高度化に、極めて有益な知見を得たものであり、水理学、地下水工学ならびに構造解析学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与するに値するものと認める。