

氏名	今井 久
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工乙第 217 号
学位授与年月日	平成 26 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題目	流れ場が変化する地盤浸透流の解析方法に関する研究
論文審査委員	委員長 教授 渡邊 邦夫 委員 教授 川本 健 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

浸透流の数値解析技術は、差分法、有限要素法と主に二つの手法が開発され、地下水資源や石油資源開発、土木工事などに適用されておおよそ半世紀が経過している。この間、解析プログラムも公開され、ほぼ完成された技術と考えられてきた。しかし、放射性廃棄物の地層処分や LP ガスの地下貯蔵など新たな大深度地下利用のニーズに伴い、従来不透水扱いされていた  $10^{-8}$  m/s より小さい透水係数の岩盤などを対象にする解析が必要となっている。このためにこれまで無視されてきた地下空洞表面からの蒸発量など微小な境界流量への対応や、浸透流解析に用いる岩盤の不飽和パラメータの把握が必要となっている。また、放射性廃棄物の地層処分においては 10-100 万年オーダの評価期間となるため、地球温暖化や東日本大震災の経験も踏まえ、地質変動などの長期地質環境変遷を考慮する必要性など、新たな解決すべき課題が発生している。土木工事の観点からは、施工へのより一層の高い安心・安全性の要求など、浸透流解析と連携した施工管理、環境保全に関する浸透流解析のニーズや、地下水挙動とともに地下水質への影響、地盤沈下などへの影響も同時に評価する必要性が生じている。

以上の現代的な課題、ニーズをまとめると、飽和・不飽和の遷移、長期的な境界条件や地質構造の遷移、工事掘削・揚水に伴う解析領域の形状や境界水位の変化などであり、流れ場の変化する浸透事象をより効率的・迅速に解析・評価する問題と整理することができる。これらの問題に対して浸透流解析の適用性向上を図るため、本研究では以下の 4 つのテーマに関して研究を行った。

- ①テーマ 1：地下水流動状況に応じた境界条件の変化への対応方法
- ②テーマ 2：岩盤の不飽和浸透パラメータの評価方法
- ③テーマ 3：掘削工事に伴う地下水影響と地盤沈下を即時に解析・評価する方法
- ④テーマ 4：長期地質環境変遷を考慮する地下水流動解析方法

### 1) 地下水流動状況に応じた境界条件の変化への対応方法

地表の斜面においては涵養部と流出部をあらかじめ把握することは難しく、このために境界条件もある程度仮定して設定せざるを得ない。地下空洞壁面上においても蒸発量と自由浸出面の設定区分においても同様の課題がある。この課題に対し、境界面上における圧力水頭、流量を考慮した収束判定ロジックを考案し、あらかじめ水位固定と流量固定の区分設定が未確定な場合でも境界面上で地山特性を反映した連続的流量分布となる計算

方法を新たに開発した。また、掘削に伴う解析モデルにおける要素や節点を除外し、境界条件対象箇所やその境界値を掘削過程の水圧変化や計算の安定性を考慮して設定可能な計算方法を考案し、その適用性を示した。

## 2) 岩盤の不飽和浸透パラメータの評価方法

土壌の不飽和浸透パラメータの測定実績は多いが、岩盤の不飽和浸透パラメータの測定事例は少ない。また、岩石は硬質で間隙率が緻密であり、透水性が低く、高いサクシオンを生じるため、間隙水圧の測定、不飽和透水係数測定のための微小流量測定など課題が多い。そこで岩石の不飽和浸透パラメータ測定事例を調査整理するとともに、土壌での測定方法を参考に、岩石の不飽和浸透パラメータ測定方法について実験的研究を行った。

第一ステップとして、不飽和状態を測定する方法の特性と解析により不飽和浸透特性を評価するために利用する浸透流解析の適用性を確認する目的で、非定常浸潤試験を実施した。この試験では従来実施されることのなかった、電磁波特性を利用した測定とサクシオン測定ならびに浸透流解析による予測解析の相互比較を行い、各種測定と解析相互の整合性を確認、測定および解析の妥当性を検証した。

第二ステップでは、岩石として砂岩試料を用いて、サクシオンレンジの異なる、土柱法、加圧板法、サイクロメータ法、3種類のサクシオン測定を試み、連続した測定値を得て、従来に例のない広いサクシオンレンジの水分特性曲線測定法を提示した。

第三ステップとし、砂岩の柱状飽和試料を用い、1次元浸透排水条件で、定常試験および非定常試験を実施し、定常試験においては試料内の含水率分布、非定常試験においては試料内サクシオンの経時変化を対象に逆解析的に比透水係数を同定、二つの試験でほぼ同じ比透水係数を同定し、岩石の不飽和浸透パラメータの新たな測定手法を提示した。

## 3) 掘削工事に伴う地下水影響と地盤沈下を即時に解析・評価する方法

河口部沖積層における開削工事においては、遮水・排水工など地下水制御工法設定のための浸透流解析と、地下水対策工による周辺への沈下量影響が求められるが多い。このようなニーズに対し、地下水対策工の浸透流解析で構築した水理地質モデルと浸透流解析を利用した沈下量評価システムを新たに開発し、その適用性・有効性を現地計測結果との対比により確認した。また、水収支計算から粘性土の沈下量を評価できるという新たな解析評価手法の適用性を示した。

## 4) 長期地質環境変遷を考慮する地下水流動解析方法

放射性廃棄物の地層処分においては、廃棄体定置時の安全性と埋戻し後10万年オーダの核種漏洩に対する評価をする必要がある。深部地下水は流動速度が遅く、地質変動の大きい我が国においては、長期の地下水流動評価には地形・地質構造の変形を考慮する必要がありその有効な評価手法は開発されていない。これに対し、地形・地質構造の変化情報から、水理地質モデルを作り、変遷する地下水流動環境を連続的に解析する手法を他に先駆けて開発した。また、この手法を仮想サイトに適用し、その計算結果が想定される間隙水圧や地下水塩分の変遷を適切に表現することを確認した。また、この手法を利用することで圧密変形など、他の問題への適応可能性や解析精度向上に寄与する可能性を示した。

以上の研究により、現代の多様な地下水問題に対する課題を流れ場の変化する地盤浸透問題と捉え、変動する境界条件の設定ロジック、岩盤の不飽和特性評価方法、浸透流解析と連携した地盤沈下評価方法、長期地質変遷に対応する解析方法について研究し、新しい概念の解析・評価手法を開発・提示した。さらに、上記の開発した解析方法を事例および実工事に適用することでその適用性を示し、現代の多様な地下水問題への対応方法を示し、浸透流解析の新しい適用・利用方法を示した。

## 論文の審査結果の要旨

本研究は、最近の社会で必要が大きくなってきた、新たな岩盤や地盤内の浸透流（以下、地盤浸透流と記す）の解析法を開発し、調査法を含めて体系化したものである。浸透流の数値解析技術は、差分法、有限要素法と主に二つの手法が開発されておおよそ半世紀が経過し、ほぼ完成された技術と考えられてきた。しかし、放射性廃棄物の地層処分やLPガスの地下貯蔵など新たな社会ニーズが発生し、例えば、従来不透水扱いされていた $10^{-8}$ m/sより小さい透水係数の岩盤などを対象にする解析が必要となっている。このためにこれまで無視されてきた地下空洞表面からの蒸発量など微小な境界流量への対応や、浸透流解析に用いる岩盤の不飽和パラメータの把握が必要となっている。また、放射性廃棄物の地層処分においては10-100万年オーダーの長期地質環境変遷を考慮する必要性など、新たな解決すべき課題が発生している。土木工事の観点からは、施工への一段と高い安心・安全性の要求から、浸透流解析と連携した施工管理や環境保全に関する浸透流解析のニーズ、さらには地下水挙動とともに地下水質への影響、地盤沈下などへの影響も同時に評価する必要性が生じている。

以上の現代的な課題に対して、下記の4課題を研究の中で、調査・解析方法の体系化を行った。

- ①テーマ1：地下水流動状況に応じた境界条件の変化への対応方法の研究と開発
- ②テーマ2：岩盤の不飽和浸透パラメータの評価方法の研究と開発
- ③テーマ3：掘削工事に伴う地下水影響と地盤沈下を同時に解析・評価する方法の研究と開発
- ④テーマ4：長期地質環境変遷を考慮する地下水流動解析方法の研究と開発

本論文では、得られた研究成果を7章に分けて論述している。

第1章では、新たにクローズ・アップされてきた地盤浸透流に関する現代的問題について説明し、上記4つの問題の解析方法の研究や技術開発を総合して行う事の重要性を論じている。

第2章では従来の研究のレビューを行っている。その中で、地下水の流れの基礎的な性質や地下水流れに関する透水係数などのパラメータの意味を整理し、また従来の解析法を取りまとめている。

第3章では上述のテーマ1の研究を取りまとめている。ここでは、境界条件が変化する場、具体的には、斜面上の境界条件が降雨涵養境界と流出境界が変化する問題を取り上げている。また、地下空洞壁面上の蒸発境界と自由浸出面境界の設定にも取り組んである。これらの課題に対して、境界面上における圧力水頭と流量を考慮した収束判定ロジックを用いる計算方法を新たに開発した。また、立坑などの掘削に伴う解析モデルでは要素や節点を除外して行く計算方法を考案した。さらに、これらの解析方法の妥当性を検証した。

第4章では、上述のテーマ2の研究を取りまとめている。従来、土壌の不飽和浸透パラメータの測定実験は多いが岩盤の不飽和浸透パラメータの測定事例は少ない。そこで岩石の不飽和浸透パラメータ測定事例を調査整理し、より高度な、岩石の不飽和浸透パラメータ測定方法について実験的研究を行った。岩石として砂岩試料を用いて、土柱法、加圧板法、サイクロメータ法を総合して用い、従来に例のない広いサクションレンジの水分特性曲線測定法を提示した。また、蒸発計により微小浸透流量を測定し、不飽和透水係数を評価した。これらは、岩石の不飽和浸透パラメータの新たな測定手法を提示したものである。

第5章では上述のテーマ3の研究を取りまとめている。河口部沖積層における開削工事において、浸透流解析を利用した沈下量評価システムを新たに開発し、その適用性・有効性を現地計測結果との対比により確認した。また、水収支計算から粘性土の沈下量を評価できるという新たな解析手法の適用性を示した。

第6章では上述のテーマ4の研究を取りまとめている。放射性廃棄物の地層処分においては、廃棄体定置・埋戻し後10万年オーダーの核種漏洩に対する評価をする必要がある。深部地下水は流動速度が遅く、地質変動の大きい我が国においては、地形・地質構造の変形を考慮する必要がある。この問題に対して、地形・地

質構造の変化を取り入れ、地下水流動を連続的に解析する手法 (Re-Start System) を新しく開発した。また、この手法により間隙水圧や地下水塩分の変遷を適切に表現することを示した。

第7章は結論であり、全体の成果をまとめている。

本研究を通じて、新しい概念の地下水解析方法を、実際の問題の解決を行いつつ開発した。また開発した解析方法を実際の事例や実工事に適用することでその実用性を示した。全体に見て新規性も高い。本研究者は、以前から地下水解析の研究を続けてきて、国内外の学術誌に7編の査読付き論文を発表した他、国内外の学術講演会に50編以上の発表を行っている。以上の成果を総合的に評価し、学位論文を合格とした。