

氏名	たか はし けん じ 高 橋 健 二
学位の種類	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2368 号
学位授与の日付	平 成 16 年 3 月 23 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	水循環系を考慮した地下水数値解析法の研究

論文調査委員 (主査) 教授 大西有三 教授 岡 太郎 教授 大津宏康

論 文 内 容 の 要 旨

地下水は、水循環系の重要な形態であり、それが地表環境や地盤内部の自然環境に与える影響は大きい。近年、地下水開発や地下水汚染に関する広域環境問題、トンネルやダム等の大規模土木工事における環境保全対策では、地下水のみを単独に取り扱うのは十分でないとされている。すなわち、自然環境にとって非常に重要な地下水に対して局所的に対処するのではなく、水循環系の一部として捉えた上で、その挙動を明らかにする必要があるとされる。一方、地盤構造物における地下水問題では、これまで工学的知見を重視する前提で施工されてきたが、近年自然環境保全対策が必要不可欠となるケースも多い。加えて工事による影響を予測し、適切な対策を講じることができるか否かが信頼性の高い施工や経済性を含めた品質向上を実現するための重要課題となっている。

本研究では、地下水を含めた水循環系について着目し、従来の浸透理論を基本とする浸透流解析法と水循環系を対象とした水収支解析法を分析した上で、両者を統合した地下水数値解析法を構築することを目的とする。具体的には地下水を水循環系の要素として捉え、降雨浸透および表流水と地下水の相互現象を再現できる数値モデルを構築し、それらを組み合わせた統合型地下水数値解析法を開発し、さらに実際の斜面降雨浸透問題やトンネル掘削問題に適用することで解析法の検証を行うとともに、本研究で提案する解析法の有効性を論じるものである。本論文は、序論および研究成果のまとめと今後の研究課題を含め、7章から成っている。

第1章は序論であり本論文の研究の背景と目的について論じるもので、環境問題と地下水の関係を述べたうえで水循環系の重要性を示し、さらに本研究の目指す地下水数値解析法が解析モデルや数値解析手法の提案だけでなく、環境保全重視の社会的背景を鑑み、アセスメント要求における有効性や実用性に着目した地下水数値解析であることを述べている。

第2章は既往の地下水数値解析法に関して記述する。特に本研究の主体となる飽和-不飽和浸透流解析、水収支解析であるタンクモデル解析や修正タンクモデル解析法について示し、それら解析ツールの取り扱うデータや解析方法を検討している。また本研究の目的である水循環系を考慮した統合型地下水数値解析の最適手法として3次元飽和-不飽和浸透流解析法の位置付けを示すと共に、降雨量、蒸発散量、表流水等の水収支量を捉えるための手法を示している。さらに本研究で示す統合型地下水数値解析は、浸透流解析と水収支解析の両方を兼ね備えた解析法であることを論じている。

第3章は3次元浸透流解析の地盤モデルの作成法、解析条件、さらに解析結果について記述している。特に、地盤や構造物条件の複雑さだけでなく、3次元浸透流解析を用いなければ評価できない近接交差する構造物の相互影響評価、トンネル拡張掘削の影響評価及び多層帯水層に対する掘削影響検討に関連したトンネル掘削事例を示し、具体的なモデル作成時の留意点や解析条件および解析結果の検証方法をまとめている。また同解析手法の課題や解析限界について言及し、水収支や表流水を考慮した統合型地下水数値解析法を構築するための浸透流解析からみた統合方法について論じている。

第4章は代表的な水収支解析法であるタンクモデル法について示し、同方法を拡張したマルチタンクモデル法による斜面の降雨時推移変動の解析について記述している。マルチタンクモデル法はタンクモデルの特徴である降雨に対する非線形形

答特性を機能的に離散化した3連1次元タンクモデルである。本章ではモデル化の方法について示し、さらにタンクモデル解析法における水循環系や水収支の観点からの地下水挙動の捉え方、実現象の再現性や利便性について論じている。また斜面の解析事例から降雨～地下水位変動や斜面破壊に関して、水循環系を考慮することが如何に重要な因子であることやタンクモデルの援用から精度の高い予測評価が可能であることを明らかにしている。

第5章は水収支解析法として第4章のタンクモデル法をさらに高度に拡張した修正タンクモデル法とSWING法に関して記述している。本章では水収支解析法の課題や解析限界について言及し、水収支や表流水を考慮した統合型地下水数値解析法を構築するための水収支解析からみた統合方法について詳細に論じている。さらに、降雨量から始まる地下水や地表水などの水循環系の相互関係を維持したまま、それらの関係を簡易な水理式で連立させたシステムであるSWING法を開発した。SWING法の利点は簡便に掘削実績を組み入れ、それを基に水環境に対する影響評価や施工に有益な地下水評価が可能なことである。すなわち、施工データを迅速に検証し、かつ将来予測に用いて施工に反映させることができるので、施工と周辺環境を同時に考慮したきめ細かい評価が可能となっており、これは本研究における統合型地下水数値解析法に至る統合方針の初期モデルに相当する。

第6章はこれまでの研究から得られた知見を基に、水循環系の諸要素を3次元浸透流解析に統合するための統合要素やそれらの統合方法論を示している。具体的には水循環系を考慮するための地表部における表流水と地下水の相互モデル、降雨浸透モデル、および解析境界部の取り扱い方法に着目し、各要素のモデル化について記述している。さらにこれらの要素を統合した地下水数値解析法を構築し、斜面とトンネル掘削問題における適用性について論じている。表流水と地下水の相互モデルでは、3次元地表面における水収支モデル化した表流水流下モデルを構築し、これを3次元浸透流解析に統合した解析法を開発している。この表流水流下モデルを斜面やトンネル掘削問題の解析事例に適用し、降雨時における表流水分布や降雨強度に伴う表流水の集中を再現している。この解析結果から斜面地盤の透水性や降雨浸透能に応じた合理的な表流水やトンネル施工に伴う表流水への影響評価について記述している。降雨浸透モデルについては、従来の浸透流解析では、地面上での境界条件は降雨強度と地盤の浸透能を基に定流量や定水位境界条件としていたが、本研究ではホートン流の概念を導入した降雨浸透モデルを構築し、ホートン流の初期特性が考慮された初期水位変動現象を再現している。また水理地質不連続性について着目し、地表部におけるマクロポアーの概念を適用することで降雨浸透の高速化に関するモデル化を可能にするとともにマクロポアーのモデル化が水収支に関して重要な要素であることを明らかにしている。また、従来の定水位、定流量流入に対して、本研究では境界条件設定法としてタンクモデルを適用することからダイナミックな変動境界を提案している。この変動境界を適用した斜面における解析事例から豪雨時における急激な地下水挙動を高精度で再現している。すなわち、こうした水循環系の要素を表現する数値モデルを3次元浸透流解析に組み込むことから、地下水だけでなく表流水や水収支を考慮した地下水数値解析法が完成している。

第7章は研究成果および今後の課題をまとめたものであり、得られた知見を整理するとともに統合型地下水数値解析法における各統合要素の統合方法や組合せが必要であること、さらに降雨浸透現象におけるマクロポアーの役割や評価方法などの課題について検討している。また、社会問題である地下水汚染に対しても本来は水循環系の問題であり、本研究の水循環系を考慮した統合型地下水数値解析法と地下水汚染に関わる解析コードとの統合も重要な課題であることを示している。

論文審査の結果の要旨

近年の環境保全に対する要求は、問題が起きる前の対応を強く求められており、もはや環境問題は土木工事などの開発行為に対峙するカテゴリーではなく、環境保全を無くして開発は語れず、両者は共存すべきものであることは異論を挟む余地はない。その意味からも現実の水循環系を考慮した実用性を兼ね備えた精度の高い地下水解析法の必要性は高い。本論文は、地下水数値解析法における水循環系の取り扱いを分析し、具体的な水循環現象と地下水との相互作用、これらの現象を再現できる数値モデルの構築、これらを組み合わせることから水循環系を考慮した統合型地下水数値解析法を提案し、さらに降雨時の斜面浸透問題やトンネル掘削問題等を通じて、統合型を適用した場合の有効性を実証している。本論文の主な内容は以下の通りである。

- 1) 既往地下水数値解析法の分析を行い水循環系を背景にした水収支解析法や3次元浸透流解析によるトンネル湧水解析を

取り上げて、それらの解析法の検証、3次元浸透流解析の有効性を検討し、水循環系を考慮した地下水数値解析法のための具体的方法や課題を抽出している。

- 2) 水循環の起源である降雨浸透に伴う斜面問題を取り上げ、水収支に着目したマルチタンクモデルを用いた斜面の降雨時水位変動解析法を開発し、斜面浸透問題を通じて水循環や水収支の観点からの地下水挙動の捉え方、予測精度の検証、解析ツールとしての有用性を示している。
- 3) 水収支解析法に着目し、トンネル掘削問題を通じて水循環系における地下水の捉え方や予測精度を検証し、統合型地下水数値解析法の基本となる水収支量の算定方法を考案した。また水循環系相互作用を維持したまま簡素化した予測解析システム（SWING法）を新たに構築し、この予測システムの有用性を現場にて実証した。
- 4) これまでの知見から、浸透流解析手法を基幹として具体的な統合方法、水循環に必要な数値モデル、および境界条件の設定等に関する方法をまとめ、表流水と地下水の相互モデルとして新たに表流水流下モデルを提案し、これを3次元浸透流解析に統合している。さらにこのモデルを用いて降雨時の地表面で発生する表流水分布や降雨強度に伴う表流水の集中を再現し、実測値との検証も行っている。また、ホートン流の概念を適用した降雨浸透モデルやマクロポアーモデルを提案することで水収支的な予測精度の向上に成功している。さらに、新たな境界条件の設定法としてタンクモデルによる変動効果を統合する方法を開発、豪雨時等の急激な水位変動を伴う解析に有効であることを証明している。
- 5) 研究成果をまとめてハイブリッド型地下水数値解析法として提案し、この解析法を用いて現地観測結果が整備されている事例から解析結果の整合性を評価し、手法の有効性を明らかにするとともに解析上の留意点をまとめている。

以上、要するに本論文は、地下水を水循環系の要素として捉え、地盤工学における従来の地下水に限定された数値解析法を拡張し、降雨浸透や地表水等を包含した地盤の評価が可能な新たな地下水数値解析法を提案したもので、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16年2月17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。