



地下水流における移流分散現象及び気液2相流の数値シミュレーションと透水性の空間分布に関する研究

齋藤, 雅彦

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2001-09-21

(Date of Publication)

2007-08-09

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2570

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002570>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【345】

氏名・(本籍) 齋藤 雅彦 (兵庫県)

博士の専攻分野の名称 博士 (工学)

学位記番号 博ろ第235号

学位授与の要件 学位規則第4条第2項該当

学位授与の日付 平成13年9月21日

【学位論文題目】

地下水流における移流分散現象及び気液2相流の
数値シミュレーションと透水性の空間分布に関する研究

審査委員

主査 教授 川谷 健

教授 森山 正和

教授 田中 泰雄

地下水は欠くことのできない重要な水資源である。しかし、適切な管理を怠れば、高度成長期の無秩序な揚水による地盤沈下に代表されるように、深刻な地下水障害を招く。これに加えて近年では、砒素や鉛などの重金属、あるいは TCE (トリクロロエチレン)、PCE (テトラクロロエチレン) などの有機塩素化合物による土壌・地下水の汚染が多発している。汚染物質による健康被害を未然に防ぐためには、汚染域の拡大を防止するとともに、浄化対策等を講じなければならないが、これらを効果的に実施するためには、地下水ならびに汚染物質の挙動に関する十分な理解が必要となる。

一方、都市部において土地の有効利用を図るために、地下空間の利用が進められている。地下空間の開発にあたっては、大規模な掘削工事を伴うことが多いが、このとき地下水の管理や制御は、工事の成否を左右する重要な要素となる。地下空間の開発に伴う地下水障害を確実に回避するためには、地下水の動きを的確に予測する技術が求められている。

このように、汚染物質の拡散過程を把握すること、あるいは適切な揚水管理や建設工事による影響を予測・評価することは、水資源を開発・保全するため、および施工の安全性を確保するために不可欠である。しかしながら地下水の流れ場の全体像を現場観測によって直接的に把握することは現時点で不可能であり、実際には現象そのものではなく、現象をモデル化することによってその挙動を模擬する方法(シミュレーションモデル)が用いられる。数値シミュレーションモデルは、1970年代以降、電子計算機の急速な性能向上とともに発展し、現在では地下水問題に対する数値シミュレーションの応用に関する研究は、きわめて多岐に渡っている。

本研究では、地下水・浸透流に関するいくつかの問題をとりあげ、これらを解析するための数値解析コードを開発し、数値シミュレーションを応用して地盤内の流れと物質輸送に関する考察を行なった。また、地盤の不均質性に関する理論的考察を行い、これに基づく透水係数の空間分布モデルを提案するとともに、その適用性について検討した。

第1章では、研究の背景として、水資源の確保および地下空間開発の観点から地下水解析の必要性、およびこれに対する数値解析の有効性について述べ、従来の研究と課題について整理するとともに、本研究の目的を示した。

第2章では、地下水汚染の問題をとりあげ、有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析と、SUPG法による移流分散解析を連立させることにより、断面2次元および3次元空間内の密度変化を考慮した数値シミュレーションを行った。これにより、汚染源が飽和領域内に存在する場合、水との密度差が大きくなると鉛直方向の流れが無視できなくなること、また、汚染源が不飽和領域内に存在する場合は、汚染源付近は長期にわたって高い濃度が維持されること、および密度差の影響は時間の経過とともに小さくなることを確認した。加えて、密度差が大きく、鉛直流が無視できない場合は、汚染物質は3次元的に広がるため、拡散防止対策について検討する場合は3次元的な挙動に注意する必要があることを示した。

第3章では、高圧空気飽和岩盤内への侵入過程を把握するため基礎方程式を無次元化し、これに基づく数値解析を実施した。これにより、解析スケールが異なると、空気の圧縮性と飽和度分布の違いによって、相対的な漏気量も異なること、すなわち、漏気量は解析スケールに比例しないことを示した。また、空気圧が周期的に変動する場合は、空気圧の平均値が水圧を下回っていれば、ピーク時

に水圧を上回ったとしても漏気量が急激に増加しないこと、および空気圧の平均値が水圧と等しく、かつ変動周期が十分短ければ、漏気量は平均値に相当する一定の空気圧を作用させた場合とほぼ同等であることを示した。

第4章では、大規模掘削工事における地下水低下工法の影響を評価するため、逆解析により難透水層である加圧層を含めた透水係数の推定を試みた。また、平面準3次元有限要素解析により、隣接する帯水層間の透水性の違いや土留壁等の地中構造物の有無が揚水効果に及ぼす影響について検討した。その結果、比較的短時間の定常揚水試験から得られる水頭低下曲線にも加圧層からの漏水の影響は反映されており、逆解析によって加圧層の透水係数を推定することは可能であること、ただし、多くの帯水層定数を一度に推定する場合は、観測値の再現精度や推定値のばらつきについて十分吟味する必要があることを示した。また、施工中の現場にて観測された被圧水頭から逆解析によって透水係数を推定し、観測結果を良好に再現することに成功した。これは、逆解析による推定結果によって漏水性地盤における地下水低下工法の影響を適切に評価することが可能であることを意味する。さらに、漏水性被圧帯水層において揚水を行う場合は、揚水対象地盤のみならず、加圧層とそれに隣接する帯水層の透水性、および地中構造物の存在も無視できないことを明らかにした。

第5章では、透水係数の空間分布に関する理論的考察を行い、これに基づく数値模擬地盤の生成方法を提案するとともに、その統計的性質、周期的性質、および水頭分布・流速分布に関する性質等について検討した。また、従来提案されている透水係数のいくつかの空間分布モデルと本研究で提案したモデル(1/f型モデル)に関する諸性質を整理した上で、各モデルの適用性について考察した。その結果、1/f型モデルによって生成された透水係数分布の確率分布は対数正規分布に従い、従来自然地盤から得られた知見と一致した。また、1次元空間における変動のパワースペクトルは概ね1/f型であること、および2次元等方性地盤ではパワースペクトルは1/f²に比例すること(λは空間周波数ベクトルの大きさ)を示した。水頭分布に関しては、滑らかな曲面ではなくフラクタル曲面と考えられること、および地質学的に同一と考えられる地層内においても、透水係数の空間的ゆらぎによって多様な水位・水頭分布を生じる可能性があることを確認した。流速分布については、水位・水頭分布と比較して不均質性の影響を受けやすく、本手法によって生成された模擬地盤においても、自然地盤においてしばしば観察される局所的な水みちが発生した。

自己相関係数は、ほぼ対数関数となり解析スケールに応じて変化することを示した。これを指数関数モデルで近似した場合の積分特性距離は、解析スケールの0.1倍程度となった。これも自然地盤における観測結果から得られている知見と一致する。さらに、従来用いられている指数関数モデルや自己回帰モデルでは、解析スケールの変化に対して分散が一意的に定まらず、べき乗モデルでは、解像度の変化に対して分散が一意的に定まらないのに対し、1/fモデルではスケールおよび解像度の変化に対して分散は同様に変化し、ほぼ対数関数に従うことを明らかにした。このため解析スケールや解像度の変化に対して分散は一意的に定まり、容易に内外挿することができる。加えて実測によって求められたバリオグラムに対しても、1/f型モデルは良好な再現性を有していることを確認した。

第6章では、第2章から第5章でえられた結論をまとめた。

論文審査の結果の要旨

氏名	齋藤 雅彦		
論文題目	地下水流における移流分散現象及び気液2相流の数値シミュレーションと透水性の空間分布に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	川谷 健
	副査	教授	森山 正和
	副査	教授	田中 恭雄
	副査		
			印
			印
要 旨			
<p>水資源としてまた地盤環境要素として重要な地下水を保全するとともに、地下空間利用・開発の安全を確保するためには、地下水の適切な管理及び制御が不可欠である。しかし、時空間的に大きなひろがりをもつ地下水の挙動を直接的に現場計測のみで詳細に把握することはほとんど不可能である。そのため、地下水の流れ場を適切にシミュレートできる手法の開発、確立が強く求められている。</p> <p>地下水流・浸透流の数値シミュレーションモデルは、近年の計算機の急速な性能向上とともに発展し、強力な解析ツールとしてますます重要性を増してきている。</p>			

本研究は、地下水流・浸透流解析に関する幾つかの数値解析コードを開発し、これらを用いて数値実験を行い、地盤内の流れと物質移動に関する新たな知見を提供するとともに、地盤内の流れの解析で特に重要な課題である地盤の不均質性を理論的に考察し、これに基づいて透水係数の空間分布を適切に導入できる数値地盤モデルを提案したものである。

第1章で、研究の背景として、水資源の確保および地下空間開発の観点から地下水解析の必要性、およびこれに対する数値解析の有効性について述べ、従来の研究と問題点について整理している。

第2章で、地下水汚染の問題をとりあげ、有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析と、SUPG法による移流分散解析を連立させることにより、2次元および3次元空間内の密度変化を考慮した数値シミュレーションを行っている。そして、汚染源の空間的条件(飽和/不飽和)および密度差が汚染態様に及ぼす影響について検討している。特に、密度差が大きく、鉛直流が無視できない場合は、汚染物質は3次的に広がるため、汚染拡大防止対策では3次的な汚染過程を十分に考慮する必要があることを示している。

第3章で、大規模地下空間での高圧空気エネルギー貯蔵に関わる課題として、高圧空気の飽和岩盤内への侵入過程を把握するため、基礎方程式の無次元化と、これに基づく数値解析を実施している。これにより、解析スケールと漏気量の関係を定量的に評価している。また、空気圧が周期的に変動する場合について検討し、空気圧の平均値が水圧を下回っていれば、ピーク時に水圧を上回ったとしても漏気量が急激に増加しないこと、および空気圧の平均値が水圧と等しく、かつ変動周期が十分短

ければ、漏気量は平均値に相当する一定の空気圧を作用させた場合とほぼ同等であることを示している。

第4章で、大規模掘削工事における地下水低下工法の影響を評価するため、逆解析により難透水層である加圧層を含めた透水係数の推定を試みている。その結果、比較的短時間の定常揚水試験から得られる水頭低下曲線にも加圧層からの漏水の影響が現れることを示している。また、施工中の現場で観測された被圧水頭から逆解析によって透水係数を推定し、観測結果を良好に再現することに成功し、この手法が地下水の管理・制御に関わる情報化施工に適用できる可能性を示している。

第5章で、透水係数の空間分布に関する理論的考察を行い、これに基づく数値模擬地盤の生成方法を提案するとともに、その諸性質について詳細に検討している。また、従来提案されている透水係数のいくつかの空間分布モデルと本研究で提案しているモデル(1/f型モデル)に関する諸性質を整理した上で、各モデルの適用性について考察している。その結果、1/f型モデルによって生成された透水係数分布の確率分布は対数正規分布に従うこと、また、1次元空間における変動のパワースペクトルは概ね1/f型であること、および2次元等方性地盤ではパワースペクトルは $1/\lambda^2$ に比例すること(λ は空間周波数ベクトルの大きさ)を示している。水頭分布に関しては、フラクタル曲面と考えられること、流速分布については、本手法によって生成された模擬地盤においても、自然地盤においてしばしば観察される局所的な水みちが発生することを確認している。

また、1/f型モデルの自己相関係数は、ほぼ対数関数となり解析スケ

ールに応じて変化することを示している。これを指数関数モデルで近似した場合の積分特性距離は、解析スケールの0.1倍程度となり、自然地盤における観測結果から得られている知見と一致すること、さらに、従来用いられている指数関数モデルや自己回帰モデル、およびべき乗モデルと比較して、1/f型モデルではスケールおよび解像度の変化に対して分散は同様に変化し、ほぼ対数関数に従うことを示している。このため、容易に内外挿することができ、従来の空間分布モデルと比較して適用性に優れている。加えて実測によって求められたバリオグラムに対しても、1/f型モデルは良好な再現性を有していることを確認している。

本研究は、2次元・3次元の地下水汚染過程および地盤内の水・空気2相流に関して、解析手法を開発して数値解析を行うとともに、大規模掘削工事における地下水の管理と制御に有効な逆解析手法を提示し、加えて不均質地盤の透水性の空間分布を適切に導入した新しい数値地盤モデルを提示したものであり、地下水流・浸透流解析への数値シミュレーションの適用について重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者 齋藤雅彦は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。