



溶解物質の移動を考慮した土/水/空気連成数理モデルと地盤工学への適用

野村, 瞬

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2013-03-25

(Date of Publication)

2013-05-02

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5775

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005775>

※ 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。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 野村 瞬

専 攻 工学研究科市民工学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

溶解物質の移動を考慮した土/水/空気連成数理モデルと 地盤工学への適用

指導教員 飯塚 敦

(注) 2,000字～4,000字でまとめること。

(氏名：野村 瞬 NO.1)

近年、社会・自然環境の変化により地盤に広がった汚染物質が人類・社会環境に影響をもたらす例が増加傾向にある。さらに、将来にわたって被害を定量的に評価し、適切な保護策、地盤浄化計画を構築することが重要視されている。

そこで、本研究では、地盤塩害化被害、土壌・地下水汚染問題をターゲットとして、地盤環境変化に伴う移動性の評価、汚染の定量化、被害抑制手法の模索・検討を行った。

論文の前半、第2～4章では、支配方程式を物理現象の根幹をなす保存則より導出し、実験や材料学をもとに得られた構成式を各保存則に適用することにより、数理モデルの構築を行った。

第2章では、飽和/不飽和の挙動を連続的に表すことのできるモデルに関して議論した。分応力の概念に基づき、地盤を構成する各物質が受け持つ応力について検討した。また不飽和状態では塑性体積ひずみに加え、地盤の含水状態(有効飽和度)も硬化パラメータとして採用できるという事実をもとに不飽和土の降伏関数を記述し、応力-ひずみ関係の導出過程を示した。また、不飽和状態における飽和度-サクション関係を記述するモデルを示した。

第3章では、間隙中の流体移動の記述法を示した。純水と密度が異なる流体にダルシー則を適用する場合、全水頭値は純水を基準としたもので整理する必要があることを示した。さらに、不飽和状態における透過性の低下を記述する手法について議論した。加えて、溶液中の溶解物質に働く分散現象の記述手法を示した。また、既存の流体の運動を記述する手法とその方程式の構造的について記述するとともに、数値解析的にそれらを解く手法を記述した。

第4章では、第2、3章で既述した土骨格と流体の運動をつなぎ合わせる数理モデルの表現方法を検討した。土試料は材料が土粒子・溶液・空気・溶解物質で構成される多相混合体であることを考慮し、互いに相関しあう各相の「運動学的変数」「力の変数」関係を記述するために混合体理論を適用した。固相質量保存則とその他の流体質量保存則をそれぞれ連立させる中で連続条件式を導出した。また、運動量保存則より釣合式、コーシー応力の対称性を導出した。

論文の中盤、第5、6章では、一連の数理モデルを有限要素法へと適用する手法を述べた上で、適用したモデルをもとに簡単な境界値問題を設定し、解析解の妥当性について記述した。

第5章では、構築した数理モデルに基づく支配方程式を、特定の初期・境界条件で解くために有限要素法への適用を行った。数理モデルにおける数値解は弱形式化、空間時間離散化過程を経ると、離散的な多次元一次方程式の近似解として表現される。線形化された支配方程式を連成させ、全体剛性マトリックスを有する土/溶液/空気/溶解物質連成有限要素解析プログラム

(DACSAR-MP_ad)の作成を行った。

第6章では、移流分散現象を構築したシミュレータで表現可能か簡単な境界値問題の厳密解と比較し、解の整合性を検討した。解析プログラムのパフォーマンスは良好であり、物質移動現象を精度よく表すことがわかった。さらに、地盤に荷重が与えられると地盤内の水圧の発生消滅、変形が進む過程で溶解物質がどのように空間内に広げられるか検討を行った。また、溶解物質の比重が純水より著しく大きい場合、その移動挙動にどのような変化が生まれるか検討を行った。

(氏名：野村 瞬 NO.2)

論文の後半、第7～9章では、近年生じている地盤塩害化問題、土壌・地下水汚染問題をいくつかり取り上げ、実現象との比較を行い、被害の定量化に繋げた。また、被害を食い止めるための新たな手法の提案や、実際に行われた浄化技術の検討・検証を行った。

第7章では、タイ東北部で発生している地盤塩害化とその被害抑制手法を検討した。シミュレーションにより、地盤下部に存在していた塩類が、気候条件に従って時間経過とともに地盤上方に塩類が移動し、地表付近で塩類の濃縮が起こり、塩害が発生する様子を再現することができた。またマルチング・改良型マルチングという、地盤改良土を地盤表面・内部に敷設する地盤改良手法により、地盤内の水分移動が変化し、結果的に塩害が抑制できることがわかった。また、フラッシングという人工放水手法により、地盤浄化が可能であることを示し、その適切な放水量、放水時期を検討した。

第8章では、東日本大震災によって発生した大津波による地盤塩害化、土壌汚染被害の調査結果をまとめた。現地調査から仙台・石巻2地点が持つ地盤材料の違いにより、震災以降塩類の移動の様子が異なっていることがわかった。また被害を模擬したシミュレーションにより、仙台では地盤が有するその高い物質移動性より塩類は地盤下部に向けて移流・分散し、その濃度が十分に希釈していることが予想されたが、移動性の低い石巻では塩類が地表付近に留まりその被害が長期化することが予想された。さらに津波の被害を受けた陸前高田市沿岸部、高田の松原に一本だけ残された「希望の松」の保護に向け、その被害シミュレーション、及び震災後に執られた対策の妥当性に関して検討した。検討の結果、対策が講じられず一本松がされていれば、気候条件、分散現象、根圏の吸水作用により塩類は松の根圏に達し、衰弱枯死に至っていたこと、対策として行われた地盤上部からのポンプアップが塩類集積を招き結果的にその枯死を早める結果になったこと、一本松の生存は地盤下部からのポンプアップ、地表面の散水を適度に行うことにより達成されることがわかった。

第9章では、遮水効果をもたらすとされ、その適用例が増加傾向にあるキャピラリーバリアのメカニズムの解明を数値モデルにより試みた。傾斜角度、層厚、降雨量を様々に変えたシミュレーションにより、効果の違いを検討した。検討の結果、各影響因子の影響によりキャピラリーバリアの威力が発揮されていることがわかった。一方で相当量の降雨がもたらされ地盤全体のサクション低下が生じた場合、その効果は薄れ、その効果を恒久的に保持するには人工的な取水や降雨浸透量を制限する必要があることが示唆された。

多岐にわたる地盤環境変化事例を考慮できる数値モデルの構築により、地盤汚染状態の把握、将来の汚染拡大予測、更には具体的な対策法提案に繋がると考えている。

氏名	野村 瞬		
論文題目	溶解物質の移動を考慮した土/水/空気連成数値モデルと地盤工学への適用		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	飯塚 敦
	副査	教授	大石 哲 印
	副査	教授	澁谷 啓
	副査	准教授	河井 克之

要 旨

近年、社会・自然環境の変化により地盤に広がった汚染物質が人類・社会環境に影響をもたらす例が増加している。今後、将来にわたって汚染物質の被害を定量的に評価し、適切な保護策、地盤浄化計画を構築することがますます重要となる。本論文は、地盤塩害化被害、土壌・地下水汚染問題に対して、地盤内溶解物質の移流分散現象を多様な地盤環境の変化の下で表現できる数値モデルの構築を行ったものである。さらに、構築した数値モデルを用いて、地盤環境変化に伴う汚染物質の移動性評価、汚染の定量化、被害抑制手法の検討を行っている。

第1章は序論である。第2～4章では、支配方程式を物理現象の根幹をなす保存則より導出し、実験や材料学の成果と照らしながら、数値モデルの構築を行っている。第2章では、飽和/不飽和状態にある土試料の挙動変化を連続的に表すことのできる数値モデルを検討し、不飽和土の弾塑性構成モデルを選定している。第3章では、流体の移動を支配する移流現象と分散現象を精査し、間隙中の流体移動を整理している。第4章では、第2、3章で述べた土骨格変形の記述と流体の運動をつなぎ合わせる数値モデルを検討している。混合体理論のもとに各相の質量保存則を導出し、各式を連立させ、土骨格の変形を考慮できる新しい連続条件式を導出している。第5、6章では、一連の数値モデルを有限要素法へと適用する手法を述べた上で、境界値問題を設定し、構築した数値モデルの解析解の妥当性について論じている。第5章では、構築した数値モデルに基づく支配方程式を、特定の初期・境界条件で解くために有限要素法への適用を行っている。その結果、土/溶液/空気/溶解物質連成有限要素解析プログラムの作成を行っている。第6章では、簡単な境界値問題を解き、それらを厳密解、実際の現象等と比較することで、解の整合性と妥当性を検討している。これまで検討例のなかった変形と物質移動現象が連成した問題を例示している。第7～9章では、近年生じている地盤塩害化問題、土壌・地下水汚染問題を取り上げ、数値モデルをもとに被害の定量的予測を検討している。また、被害を食い止めるための新たな手法の提案や、実際に行われた浄化技術の効果を検討している。第7章では、タイ東北部で発生している地盤塩害化とその被害抑制手法の検討を行っている。地盤下部に存在していた塩類が、気候条件に従い、地盤上部に集積し、塩害が発生するメカニズムを明らかにしている。さらに、塩害を抑制できる地盤改良手法を提案するとともに、塩害地盤の浄化を人工放水手法(フラッシング)によった場合、その適用法を具体的に検討している。第8章では、東日本大震災によって発生した大津波による地盤塩害化、土壌汚染被害の調査結果を報告している。現地調査から仙台・石巻2地点が持つ地盤材料の違いにより、震災以降塩類の移動の様子が異なることが示されている。さらに、陸前高田市沿岸部の松原に一本だけ残された「希望の松」の保護を目的に、本論文で示された数値モデルを用いて、その被害および保全方法を検討している。第9章では、遮水効果をもたらすとされ、その適用が期待されているキャピラリーバリアの遮水メカニズムを数値モデルにより検討している。降雨強度、斜面傾斜角、層厚などの各影響因子のキャピラリーバリアの機能発現に及ぼす影響を定量的に検討している。最後に、結論をまとめている。

このように、様々な地盤環境変化の下で汚染物質の移動性を考慮できる数値モデルの構築を行った本論文の成果は、今後、地盤汚染状態の把握、将来の被害予測、更には具体的な対策法の提案に繋がることができると、応用性、発展性も高い。

以上、本研究は、地盤内の溶解物質の移動と分散を考慮した飽和/不飽和地盤の力学特性を記述する数値モデルの開発を行ったものであり、地盤環境学の分野で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られる。よって、学位申請者の野村瞬は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。