

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360193

研究課題名(和文) 塩害・地盤変状発生機構シミュレーションと抑止修復技術の総合化

研究課題名(英文) Numerical simulation of salt damage and ground deformation mechanism and its deterrence/repair methods

研究代表者

飯塚 敦 (IIZUKA, Atsushi)

神戸大学・都市安全研究センター・教授

研究者番号：40184361

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、塩害による沙漠化抑止と修復の技術提案を通して、地盤工学の地球環境問題への積極的な寄与を目的としている。過伐採、過放牧、塩害が沙漠化の三大要因であり、全体の約8割を占めている。森林などの植生伐採に伴う気圏・地圏間の水循環の狂いが原因である。特に塩害による沙漠化は、地下水中の希薄な塩分が高濃度化して地表に析出することにより生じ、ユーラシア大陸などの大陸の広範囲な地域で発生している。このような塩害による沙漠化メカニズムを表現できるFEシミュレータを開発し、さらに、環境負荷の低減を可能とするPS灰や浄水場汚泥のリサイクルによる粒状材料などを活用できる塩害抑止工法を開発した。

研究成果の概要(英文)：This study aims at making aggressive contribution of geotechnical engineering to the global environmental problems, through the technical proposal of desertification deterrence against salt damage. As to desertification, over-logging, overgrazing and salinization are the three major factors, accounting for the approximately 80% of entire desertification. It is caused by the deviation of the water circulation between the aerospace and the ground due to deforestation, especially the desertification due to salinization is caused by high concentration of salinity, basically diluted in the underground water. Such salt damage is observed in a wide range of areas of the Eurasian continent. In this study, a FE simulator which can represent the desertification mechanism by such salt damage is developed and a salt damage deterrence construction method is developed with taking account of utilization of granular materials such as recycling of PS ash and water purification plant sludge.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤力学 塩害・沙漠化 水循環 環境技術 シミュレーション 飽和/不飽和地盤 移流・拡散 抑止・修復技術

## 1. 研究開始当初の背景

ユーラシア大陸地下には、広く岩塩層が堆積していることが知られる。地層褶曲などにより岩塩層が比較的地表近くまで迫出している場合には、表層地下水にまで塩分が含まれていることが多い。典型的な事例をタイ東北部（内陸）に見ることができる。大陸移動前には赤道下の海底であった場所が、プレート移動と地盤隆起に伴って高濃度塩分の集積による岩塩層となった。しかも、地表面下約 100m から、浅いところでは約 40m 深にあって、森林伐採以降の農耕地開墾において、乾期、雨期の乾湿繰返しに伴って地表面への塩の析出と塩害に伴う農業生産の低下を引き起こしている。さらに、細る農業収入を補うために、塩分を含んだ地下水を人為的に汲み上げ、塩田を成して塩を生産している。地下水の汲み上げは深刻な地盤変状をもたらし、塩田で不要となった塩水は農業灌漑路に放出され、塩害を深刻化させている。一方、我が国も同様であるが、特に、東南アジアの国々では、需要の高まる製紙業から排出される PS（ペーパースラッジ）や浄水場発生汚泥の処理は深刻な環境問題となっている。このような汚泥を粘土とまぜ、1300 度程度で焼くと、微細な多孔構造を持つ安定した（重金属などがガラス質で強固に密閉された）多孔質材とすることができる。この多孔質材はレキ材としての透水性と微細多孔構造ゆえの高い保水性を持つ材料となる。この材料の塩害防止・対策工法への利用も考えた。セメント製造の高度化に伴って、低温（1300 度程度）の焼成炉の遊休化が目立つ昨今、このような遊休施設を活用することによって、現地発生環境負荷物質を現地で加工・再利用しながら、塩害といった現地の地球環境問題の解決を図る工学技術を提供するというのも、本研究課題の狙いでもある。このような研究は極めて地盤力学的であって、地盤工学の地球環境問題への積極的な寄与となる。

## 2. 研究の目的

広く地球環境問題を扱っている書籍・文献を 100 冊あまり取り寄せ、因果関係に関する記述の分析を試みた。豊田・堀井（2003）による数学的定量化手法を用いた。このようにして得られた、塩害によるものも含む砂漠化の因果関係を階層的に示すと、砂漠化をもたらす直接の原因は、「地・気圏間の水収支」「植生を介する地・気圏間の水移動」「地盤内での水挙動」「地盤内溶解物質の移動」であると認識されていることが分かる。すなわち、「塩害→砂漠化」の地球環境問題に対して、学術的課題は、1)飽和・不飽和状態にある土の透水・力学特性の検討、2)地盤の変形・応力・浸透の考慮、3)降雨による水供給と地表面蒸発などの水循環の検討、4)植生を介しての蒸散などの水循環の検討、5)地中水に含有している塩分などの移流分散の検討となる。

極めて地盤工学的問題であることが分った。

よって、本研究では、タイ東北部を対象に、塩害防止と農耕地保全を目的として、1. 土・間隙水・間隙空気の 3 相連成の数理モデルに溶解塩分の移流拡散を組み込み、水収支の狂いによる塩析出の有限要素 (FE) シミュレータを開発する。2. タイ東北部における塩害および地盤変状を対象に、その発生を数値シミュレーションする。特に、降雨データと気象データに基づく蒸散を入力として、地表面に析出する塩害の発生メカニズムを解き明かす。3. 塩害抑止の技術的可能性として、粒状性材料を用いたマルチングを検討し、PS 焼成材、浄水場排出焼成材などのリサイクル材活用の道を拓く。また、単なるマルチングでは耕作地などの土地利用を阻害するため、マルチング材に覆土をかぶせた改良型マルチングを検討し、有効なマルチング厚を具体的に試算する。これをもって、地盤工学を構造物の設計や施工に役立たせるだけでなく、農学、理学との相互補完型の学際連携を可能とし、地球環境問題への積極的な貢献をはたせる道を切り拓く。

## 3. 研究の方法

これまで、地盤の変形問題と間隙水・空気の浸透問題、物質移動の問題は、各現象を分離し、別々の問題として整理されてきたが、各事象は互いに影響を及ぼし合っていて生じているため、切り離して取り扱うことは適切でない。本研究では各主要因による地盤環境変化をより俯瞰的、総合的に検討できるように、保存則より得られた支配方程式を離散化し、有限要素法による問題解決の手法を開発する。まず、土相・液相・気相・溶媒相それぞれに関する支配方程式を、物理現象の根幹をなす運動量保存則・質量保存則から導出する。そして、それぞれを①地盤変形モデル、②浸透モデル、③物質移動モデルとして体系化し、時間空間の微分で表される支配方程式を導出する。通常、これら複数の微分方程式を同時に解くことは難しく、その厳密解は非常に特殊な条件でしか得ることができないため、より一般的な問題へ応用することを目的として、支配方程式を弱形式化し、有限要素離散化を行った。その結果、問題は土/水/空気/溶解物質連成問題として整理され、最終的に初期値・境界値問題に集約される。具体的には、1. 不飽和状態にある地盤の力学特性を適切に表現できる弾塑性構成モデルを検討する。2. 塩分の地盤内移動を表現するために、地盤内を溶解物質が移動するメカニズムを移流分散現象として整理し、現象を記述する数理モデルを構築する。3. 土/溶液/溶媒/空気連成数理モデルを定式化する。4. 得られた支配方程式を有限要素法による初期値・境界値問題に適用するため、弱形式化、離散化を行い、解析手法のアルゴリズムを開発する。5. アルゴリズムの検証を行うため、種々のベンチマーク問題を設定し、各問題の整理・現

象再現性の検討を行う。6. タイ東北部で発生している地盤の塩害に数理モデルを適用し、塩害発生メカニズム、被害抑制手法、地盤浄化法を検討する。最後に、環境制御における地盤工学のさらなる貢献を意図し、7. キャピラリーバリアによる地盤内の間隙水移動の操作の可能性について検討する。

#### 4. 研究成果

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、被害抑制手法の検討を行った。以下に得られた成果を述べる。

(1) 支配方程式を保存則より導出し、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。

(2) 飽和/不飽和の挙動を連続的に表すことのできる弾塑性構成モデルを考察し、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することにより、不飽和土の降伏関数を記述し、応力-ひずみ関係の導出を行った。

(3) 間隙中の流体移動の数理モデルを検討した。まず、純水と密度が異なる流体にダルシー則を適用する際の全水頭値の考え方を整理した。また、不飽和状態における透過性の低下を記述する手法を検討した。加えて、溶液中の溶解物質に働く分散現象の記述手法を検討した。最後に、既存の流体の運動を記述する手法とその方程式の数理構造を整理し、有限要素法を用いて数値解析的に解く手法を考案した。

(4) 土骨格と流体の運動を連成させる数理モデルを検討した。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連立させる中で連続条件式の導出を行った。また、運動量保存則より釣合式、コーシー応力の対称性を示した。

(5) 一連の数理モデルを有限要素法へと適用する手法を開発した。飽和/不飽和状態の土骨格の力学特性を記述する弾塑性構成モデルを込みこんだ初期値・境界値問題を設定し、厳密解と比較を通して、数値解析解の妥当性について検討した。

(6) 構築した数理モデルに基づく支配方程式を、与えられた初期・境界条件で解くために有限要素法の適用を図った。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、土/溶液/空気/溶解物質連成有限要素解析シミュレータを開発した。

(7) 構築したシミュレータで地盤内の塩分移動や集積などの現象をうまく表現できるかどうかを検討するため、簡単な境界値問題を設定し、厳密解との比較を通して、数値解析解の妥当性を検証した。開発したFEシミュレータ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できることがわかった。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散、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大きい場合、その移動挙動（密度流）にどのような変化が生まれるか検討を行った。

(8) 地盤の塩害化問題、土壌・地下水汚染問題をいくつか取り上げ、実現象との比較を行い、被害の定量化を試みた。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を行った。

(9) 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た。開発したFEシミュレータにより、地盤下部に存在していた塩類が、気候条件により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れ、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、地盤内の水分移動を変化させることができ、結果的に塩害が抑制できることを定量的に示した。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、放水時期に関して検討した。

(10) 廃棄物処理場において、排水を促進し、遮水効果を期待できることから、その適用が期待されているキャピラリーバリアについて、開発した解析手法を用いて、そのメカニズムの解明を試みた。降雨量、斜面傾斜角度、層厚を様々に変えた数値シミュレーションを行うことにより、キャピラリーバリアの効果の違いを検討した。その結果、降雨強度が弱い場合、もしくは斜面傾斜角度小さいときは、上部の細粒土層と粗粒土層の境界で斜面に直交する方向に正の動水勾配が生じ、層間で水収支がほとんど生じなくなり、これによってキャピラリーバリアが発揮されることを明らかにした。また一方で、降雨強度が大きくなり地盤全体でサクシオン低下が生じた場合、斜面傾斜角の低下により斜面方向の移流速度が減少したときには、キャピラリーバリアの効果が薄れることがわかった。キャピラリーバリアの効果を恒久的に保持する方法を検討した。

このように得られた成果をそれぞれ論文や報文にまとめて、順次に公表している。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕 (計 17 件)

- 1) 金澤伸一, 豊嶋拓馬, 河井克之, 橘伸也, 飯塚敦: 土/水/空気連成有限要素法を用いた締固め土の力学挙動の解析, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68, No.2, I\_291-I\_298, 2012.  
DOI:10.2208/jscejam.68.I\_291
- 2) 河井克之, 坂本諭, Phommachanh,V., 飯塚敦: 土/水/空気連成有限要素解析による締固め特性に及ぼす土質定数の影響の検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68, No.2, I\_299-I\_306, 2012.  
DOI: 10.2208/jscejam.68.I\_299
- 3) Sugiyama, Y., S. Nomura, A. Iizuka, K. Kawai, S. Tachibana, S. Kanazawa and T. Takeyama: Salt damage and soil contamination caused by the East Japan Earthquake and Tsunami, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol. 62, pp.141-147, 2014  
doi:10.11345/nctam.62.141
- 4) 杉山友理, 河井克之, 田中博之, 飯塚敦: 土/水/空気三相連成モデルによる間隙圧係数 B 値の解釈, 土木学会論文集 A2 ( 応 用 力 学 ) , DOI: 10.2208/jscejam.70.I\_145, Vol. 70, No. 2 p. I\_145-I\_153, 2014  
doi:10.2208/jscejam.70.I\_145
- 5) 川勝拓哉, 河井克之, TIWARI Binod, 飯塚敦: 降雨時における傾斜地盤内空気の挙動について, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.71, No.2 (応用力学論文集 Vol.18), I\_171-I\_180, 2015  
[http://doi.org/10.2208/jscejam.71.I\\_171](http://doi.org/10.2208/jscejam.71.I_171)
- 6) 金澤伸一, 橘伸也, 飯塚敦: 盛土構造物の排水能力に対する解析的検討, 土木学会論文集 A2( 応 用 力 学 ) , DOI: 10.2208/jscejam.71.I\_429, Vol.71, No.2 (応用力学論文集 Vol.18), p.I\_429-I\_436, 2015.  
[http://doi.org/10.2208/jscejam.71.I\\_429](http://doi.org/10.2208/jscejam.71.I_429)
- 7) Kawai,K., Viradeth,P., and Iizuka,A.: Soil/water/air coupled F. E. simulation of phreatic surface generation process within a river levee, Japanese Geotechnical Society Special Publication (The 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering), Vol. 2, No. 49 p. 1714-1717, 2015  
DOI: <http://doi.org/10.3208/jgssp.JPN-078>
- 8) Kawai, K., Iizuka,A. and Kanazawa,S.: Expression of mechanical characteristics in compacted soil with soil/water/air coupled F.E. simulation, Proc. Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, Vol.1, pp.1129-1132, 2013  
<file:///C:/Users/AI2012FEB/Downloads/1129-1132.pdf>
- 9) Phommachanh,V., Matsuo,N., Ienaga,K., Kawai,K., Iizuka,A. and Tiwari,B.: Application of soil/water/air coupled F.E. code to predict seepage and deformation on sandy slope, Proc. International Conference on Unsaturated Soils: Research and Applications (UNSAT2014), Vol.1, pp.621-627, 2014  
CRC Press 2014  
Print ISBN: 978-1-138-00150-3  
eBook ISBN: 978-1-315-74958-7
- 10) Nomura,S., Sugiyama,Y., Kawai,K. and Iizuka,A.: Derivation of mass transfer model for unsaturated soil and its applications, Proc. International Conference on Unsaturated Soils: Research and Applications (UNSAT2014), Vol.2, pp.1179-1187, 2014  
CRC Press 2014  
Print ISBN: 978-1-138-00150-3  
eBook ISBN: 978-1-315-74958-7
- 11) Sugiyama, Y., H. Tanaka, K. Kawai and A. Iizuka: Expression of the pore-pressure coefficient B with numerical simulation, Proc. 14th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), pp.403-408, 2014  
CRC Press, ISBN 9781138001480
- 12) 佐藤武斗, ポムマチャン ヴィラデス, 河井克之, 飯塚敦: 土/水/空気連成解析手法による異なる含水比の締固め地盤の品質評価, 都市安全研究センター研究報告, 第 17 号, pp.31-38, 2013  
<http://www.rcuss.kobe-u.ac.jp/publication/report/no17.pdf>
- 13) 杉山友理, 田中博之, 飯塚敦, 河井克之: 間隙気体の溶解を考慮した不飽和力学モデル, 都市安全研究センター研究報告, 第 18 号, pp.32-39, 2014  
[http://www.rcuss.kobe-u.ac.jp/publication/report/Contents18\\_Indiv.pdf](http://www.rcuss.kobe-u.ac.jp/publication/report/Contents18_Indiv.pdf)
- 14) 田中琢, 飯塚敦, 河井克之: 土/水/空気/溶解物質連成有限要素解析プログラムを用いた塩害抑制手法の検討, 都市安全研究センター研究報告, 第 18 号, pp.44-53, 2014
- 15) 松尾直人, 飯塚敦, 河井克之: ベルセロ法を用いた高容量テンシオメータの開発, 都市安全研究センター研究報告, 第 19 号, pp.59-66, 2015  
<http://www.rcuss.kobe-u.ac.jp/publication/Year2015/Contents19.pdf>
- 16) 中村翔一, 河井克之, 飯塚敦: 土/水/空気連成解析によるキャピラリーバリアシステムの性能評価, 都市安全研究センター研究報告, 第 19 号, pp.67-74, 2015  
<http://www.rcuss.kobe-u.ac.jp/publication/Year2015/Contents19.pdf>
- 17) 吉富力, 妹川賢司, 飯塚敦, 河井克之, ロハニ タラニディ: 弾塑性動的地盤モデルのためのパラメータの同定, 都市安全研究センター研究報告, 第 19 号,

[学会発表] (計 10 件)

- 1) 杉山友理, 野村瞬, 飯塚敦, 河井克之, 橘伸也, 金澤伸一, 竹山智英: 東日本大震災の津波による地盤塩害及び土壌汚染調査・分析, 基調講演, 第 62 回理論応用力学講演会(NCTAM2013), OS20-01, 2013.3 東工大
- 2) 佐藤武斗, Phommachanh Viradeth, 河井克之, 飯塚敦: 数値計算による異なる含水比で締固め度の等しい締固め地盤の品質評価, 第 48 回地盤工学研究発表会 (富山), 講演概要集 DVD, 地盤工学会, pp.391-392, 2013.7
- 3) 松尾直人, 家永康平, Phommachanh Viradeth, 河井克之, 飯塚敦: 土/水連成有限要素法を用いた降雨時斜面安定に関する各種要因の検討, 第 48 回地盤工学研究発表会 (富山), 講演概要集 DVD, 地盤工学会, pp.1959-1960, 2013.7
- 4) 杉山友理, 野村瞬, 飯塚敦, 河井克之: 土壌種類に起因する塩類の移動性の違い, 第 68 回土木学会年次学術講演会, 土木学会, III 部門, pp.373-374, 2013.9
- 5) 田中博之, 杉山友理, 河井克之, 飯塚敦: 液相への間隙空気溶解を考慮した室内要素試験シミュレーション, 第 49 回地盤工学研究発表会 (北九州), 講演概要集 DVD/352, 地盤工学会, pp.703-704, 2014.7
- 6) 中谷奈央, 河井克之, 飯塚敦, Viradeth Phommachanh: 土/水/空気連成モデルによる降雨浸透解析, 第 49 回地盤工学研究発表会 (北九州), 講演概要集 DVD/447, 地盤工学会, pp.893-894, 2014.7
- 7) 川勝拓哉, 家永康平, Viradeth Phommachanh, 飯塚敦, 河井克之: 降雨浸透シミュレーションにおける浸透能の影響について, 第 49 回地盤工学研究発表会 (北九州), 講演概要集 DVD/448, 地盤工学会, pp.895-896, 2014.7
- 8) 田中琢, 杉山友理, 飯塚敦, 河井克之, 野村瞬: タイ東北部における塩害抑制手法の検討, 第 49 回地盤工学研究発表会 (北九州), 講演概要集 DVD/445, 地盤工学会, pp.889-890, 2014.7
- 9) 吉富力, 河井克之, 飯塚敦, Lohani Tara Nidhi: Albany 珪砂の弾塑性構成パラメータの同定, 第 50 回地盤工学研究発表会 (札幌), E-02, pp.447-448, 2015.9 (平成 27 年 9 月)
- 10) 川勝拓哉, 大川紀郁, 河井克之, 飯塚敦: 降雨時の傾斜地盤内における空気圧の挙動について, 第 50 回地盤工学研究発表会 (札幌), E-07, pp.2101-2102, 2015.9 (平成 27 年 9 月)

[その他]

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

飯塚 敦 (IIZUKA, Atsushi)  
神戸大学・都市安全研究センター・教授  
研究者番号: 40184361

### (2) 研究分担者

河井 克之 (KAWAI, Katsuyuki)  
近畿大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 30304132  
(平成 24 年度～平成 26 年度まで)

ピパットポンサー ティラポン  
(PIPATPONGSA, Thirapong)

京都大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 10401522

橘 伸也 (TACHIBANA, Shinya)  
神戸大学・都市安全研究センター・講師  
研究者番号: 90432567

竹山 智英 (TAKEYAMA, Tomohide)  
神戸大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 00452011

金澤 伸一 (KANAZAWA, Shin-ichi)  
福島工業高等専門学校・准教授  
研究者番号: 20580062