

平成 21 年 3 月 30 日現在

研究種目：基盤研究 (B)
研究期間：2006～2008
課題番号：18360230
研究課題名 (和文) 塩害に伴う地盤変状シミュレーション技術の開発とその低減・修復策の検討
研究課題名 (英文) Development of Numerical Simulator to predict the mechanical behavior of salt-damaged ground and recover techniques
研究代表者 飯塚 敦 (IIZUKA ATSUSHI) 神戸大学・自然科学系先端融合研究環都市安全研究センター・教授 研究者番号：40184361

研究成果の概要：本研究は、塩害に伴う地盤変状をシミュレートする飽和/不飽和土・水・移流拡散連成有限要素解析手法の開発とそれを用いた塩害軽減・修復技術の開発を目的としている。多くの「塩害→植生枯死→砂漠化」の地盤環境変状・地盤環境崩壊プロセスは、「森林の伐採」などによって、降雨などの供給水量と植生からの蒸散水量と地表からの蒸発水量のバランスが崩れ、塩害をもたらすと説明されてきた。一旦、地表面付近に塩分が析出すると、もはや少種の草木を除いて、植生は育成することができず、さらなる地盤の乾燥化を招き、砂漠化に至る。しかしながら、世界の多くの地で問題視される「塩害」は、このような単純なプロセス (一次的塩害) では収まりきらない。森林伐採は人類の生活圏の拡大に伴って生じる。例えば、タイの場合、新たな水田の確保のために森林が伐採された。水田への農業用水の供給は、ため池などの地上水からの供給ばかりでなく、地下水の汲み上げによっても補われている。降雨の少ない乾燥地ほど地下水への依存度は高い。地下水には、もともと希薄であったにせよ、塩分が含まれている。地下水への塩分の溶解は、その上流部もしくは地中深部に存在する塩岩層に起因していることが多い。塩分を含んだ地下水を地表に汲み上げることにより、乾季における蒸発によって塩分濃度が上昇し、さらなる塩害をもたらす。また灌漑水路などの建設は、塩分含有地中水の濃度上昇をもたらす。これまた塩害を引き起こす (二次的塩害)。一方、地下水の汲み上げは、地盤変状をもたらす。農地の機能損失、道路の沈下・陥没などとして現われる。すなわち、塩害の発生と、水路や道路の建設などの人為的力学作用との相互作用が重要となる。この目的を遂行するため、(1)飽和・不飽和状態にある土の透水・力学特性、(2)植生を介しての蒸散などの水循環、(3)降雨による水供給と地表面蒸発などの水循環、(4)地中水に含有している塩分などの移流拡散、(5)地盤の変形・応力・浸透を考慮した数理モデルを組み立てた。この数理モデルのキャリブレーションを行うために、タイのカセサート大学の協力を得て、平成 18 年 11 月 27 日に、バンコクでワークショップを開催した。さらに、タイ東北部のサコナコン、ウドンタニにて、地表塩分濃度の現地測定を行った。さらに、(6)本研究で開発した数値シミュレータを用いて、塩害地盤の代表的な修復法であるフラッシングの効果を実験的に検討できる手法を開発し、(7)塩害防止策として、粗粒材料を用いたマルティング法およびパイリング法を考案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2007 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2008 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：

塩害 / 砂漠化 / 地盤変状 / 有限要素シミュレータ / 現地塩害調査 / 水循環 / 構成式 / 地盤力学

1. 研究開始当初の背景

従来、塩害から植生枯死そして砂漠化に至る過程は、地下水浸透ダイナミクスとして取り扱われてきた。多くの「塩害→植生枯死→砂漠化」の地盤環境変状・地盤環境崩壊プロセスは、「森林の伐採」などによって、降雨などの供給水量と植生からの蒸散量と地表からの蒸発量のバランスが崩れ、蒸発作用に起因する地盤内毛管作用が過度となって、地中内の塩分含有間隙水を地表付近に呼び込み、蒸発に伴う脱水により、塩分を析出させ、塩害をもたらすと説明されてきた。一旦、地表付近に塩分が析出すると、もはや少種の草木を除いて、植生は育成することができず、さらなる地盤の乾燥化を招き、砂漠化に至る。しかし、世界の多くの地で問題視される「塩害」は、このような単純なプロセス（一次的塩害）では収まりきらない。例えば、タイの場合、水田への農業用水の供給は、ため池などの地上水からの供給ばかりでなく、地下水の汲み上げによっても補われている。地下水には、もともと希薄な塩分が含まれている。塩分を含んだ地下水を地表に汲み上げることにより、乾季における蒸発によって塩分濃度が上昇し、さらなる塩害をもたらす。また灌漑水路などの建設は、塩分含有地中水の濃度上昇をもたらし、これまた塩害を引き起こす（二次的塩害）。一方、地下水の汲み上げ（農業用水ばかりでなく、塩田にも用いられる）は、地盤変状をもたらす。農地の機能損失、道路の沈下・陥没などとして現われる。人類の生活基盤の確保・整備の観点からは、二次的塩害が深刻である。すなわち、塩害の発生と、水路や道路の建設などの人為的力学作用との相互作用が重要となる。

2. 研究の目的

塩害に伴う地盤変状をシミュレートする飽和／不飽和土・水・移流拡散連成有限要素解析手法の開発とそれを用いた塩害軽減・修復技術の開発を目的としている。本研究は、従来から用いられている移流拡散浸透問題としての取扱いから、地盤の変形・変状をも考慮した解析手法の開発を目的としている。このような解析手法を得ることにより、定量的な塩害の予測、二次的塩害発生の予測を可能

とし、塩害の軽減、防止、修復のための水路や道路、客土埋立てなどの基盤整備の検討に役立たせる

3. 研究の方法

以下のような手順と方法で研究を行った。

- (1)既存の数値モデル体系の整理と整備、
- (2)実地検証フィールドの確保のため、タイにおける調査の実施、
- (3)実現象を説明できる数値モデルの構築とキャリブレーションの実施。すなわち、室内実験、現場データの収集、入力データの同定、地盤-水圏境界モデル、有限要素解析手法のチューンアップである。この内、室内実験および現場計測は次のようである。
 - ①降雨の不飽和地盤内浸透モデル実験：土槽内水位を変動させ、そのときのサクション・含水率の変化を計測した。また、繰り返し水位変動が地盤に及ぼす影響を検討する。実験事実から、不飽和土/水連成有限要素解析と整合性、降雨が地盤の保水状態に及ぼす影響の検討を行った。
 - ②現場データの収集と吟味：タイ東北部の塩害・地盤変状観測データを収集した。
 - ③入力・材料データの同定：実験・計測データを利用して、解析手法に必要な入力・材料データの同定を行った。
 - ④地盤・水圏境界のモデル化と有限要素解析手法のチューンアップを行った。不飽和土・水連成 FEM : DACSAR-U を拡張した。
- (4)現場シミュレーション・ケーススタディの蓄積。
 - ①室内／室外・実験・計測結果のシミュレーションを実施した。
 - ②タイ東北部塩害現場のシミュレーションを実施した。二次的塩害を取り上げ、地盤変状を解析した。
- (5)シミュレーション結果の吟味
本研究課題では、社会基盤を整備する視点から、塩害被害低減、修復技術を検討する。生化学的アプローチからの試みはいくつか成されておられ、このような植生の生態活動を利用した方法も、解析対象に含まれる。
 - ①現場フィールド（タイ側）との成果の突合せ。得られた成果をタイ側に示し、より実効性のある低減・修復技術の開発を目指した。

(6)適用性の拡大

地盤工学分野から他の分野との連携を目指し、森林保全、地盤内水質改善への適用性を検討した。

(7)成果物のまとめ

本研究成果を報告書としてまとめた。

4. 研究成果

本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- (1) 塩害を、砂漠化に至らしめる地球環境問題として捉え、その要因分析を行った。これによると、シミュレータとして考慮すべき要因として、地・気圏間の水収支、水収支における植生影響、土壌内部での水移動、地盤内溶解物質の移動が挙げられる。これらを、地盤力学用に翻訳すると、1)飽和・不飽和状態にある土の透水・力学特性の考慮、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考慮、4)植生を介しての蒸散などの水循環の考慮、5)地中水に含有している塩分などの移流分散の考慮となることを明らかにした。これに基づき、
- (2) 飽和・不飽和状態にある土の透水・力学特性を明らかとし、一般的な変形を考慮できる浸透方程式、輸送方程式を導いた。
- (3)飽和・不飽和状態にある土の力学特性を記述する構成方程式（弾塑性構成モデル）を開発した。
- (4)植生を介しての蒸散などの水循環、降雨による水供給と地表面蒸発などの水循環を調べるために、室内模型実験を実施した。この計測結果を用いて、開発した有限要素シミュレータのキャリブレーションを行った。
- (5)このように開発された数値モデルおよび有限要素シミュレータの実際問題への適用性を検討するために、タイのカセサート大学の協力を得て、平成18年11月27日に、バンコクでワークショップを開催した。
- (6)最後に、本研究で開発した有限要素シミュレータを用いて、塩害地盤の代表的な修復法であるフラッシングの効果を定量的に検討できる手法を開発し、塩害防止策として、粗粒材料を用いたマルチング法およびパイリング法を考案した。

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39件)

- ① 河井克之、山田竜太郎、飯塚敦、橘伸也、大野進太郎：植生の吸水作用が地盤の安定性に及ぼす影響，応用力学論文集，土木学会，Vol.11，pp.443-450，2008.9

- ② 金澤伸一，橘伸也，河井克之，大野進太郎，飯塚敦：不飽和土/水連成有限要素解析における空間離散化手法の検討，応用力学論文集，土木学会，Vol.11，pp.331-338，2008.9
- ③ Masrouri, F., K. Bicalho and K. Kawai : Laboratory hydraulic testing in unsaturated soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, doi:10.1007/s10706-008-9202-7, 2008.
- ④ 河井克之，飯塚敦，霜永勝之，橘伸也：植生の吸水作用が地盤に及ぼす影響，応用力学論文集，土木学会，Vol.10，pp.375-382，2007.9
- ⑤ 大野進太郎，河井克之，橘伸也：有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル，土木学会論文集，Vol.63/No.4，pp.1132-1141，2007.
- ⑥ Kawai, K.，Iizuka, A.，Hayakawa, E. and Wang, W.， Non-uniform settlement problem of compacted soil caused by the deformation characteristics of unsaturated soil on wetting, *Soils and Foundations*, JGS, Vol.47, No.2, pp.195-206, 2007.4
- ⑦ 前野詩朗・小川 誠・道奥康治：鉛直2次元モデルによる多孔質堰を通過する流れの解析，土木学会論文集 B, Vo.63, No.1, 16-28, 2007.1
- ⑧ 藤川和彦，飯塚敦，河井克之，ピパット ポンサー・ティラポン：物質移動を考慮した不飽和土/水連成問題の数値モデルと有限要素解析手法，応用力学論文集，土木学会，Vol.9，pp.377-384，2006.9
- ⑨ 大野進太郎，飯塚敦，太田秀樹：非線形コントラクタンシー表現を用いた土の弾塑性構成モデル，応用力学論文集，土木学会，Vol.9，pp.407-414，2006.9
- ⑩ Zhao, C.，Nishiyama, T. and A. Murakami: Numerical modelling of spontaneous crack generation in brittle materials using the particle simulation method, *Int. J. for CAE and Software: Engineering Computations*, Vol.23, No.5, pp.566-584, 2006.

〔学会発表〕(計75件)

- ① 金澤伸一，T.Pipatpongsa，竹山智英，橘伸也，飯塚敦，陰解応力積分法を導入した地盤構成式の検討，第5回地盤工学会関東支部発表会「Geo-Kanto 2008」，日本大学理工学部船橋キャンパス「Nihon University Funabashi Campus」，2008年11月1日，350-355
- ② Honda, M.，Ohno, S.，Iizuka, A.，Kawai, K. and Ohta, H. : Calculation of undrained shear behaviour of unsaturated soils, 12th International Conference of International Association for Computer Methods and

- Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India, October 1-6, 2008
- ③ Ohno,S., Takeyama,T., Pipatpongsa,T., Ohta,H. and Iizuka,A.: Analysis of embankment by nonlinear contractancy description, Proc. 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Kolkata, India, pp.1097-1100, 2007.12.10-14.
 - ④ Honda,M., Iizuka,A. and Kawai,K. : An application of performance-based design concept to design of compacted ground, Proc. 1st International Symposium on Geotechnical Safety & Risk, ISGSR2007, October 18-19, 2007, Shanghai, China
 - ⑤ Iizuka,A., Kawai,K., Tachibana,S., Honda,M., Fujikawa,K., Pipatpongsa,T. and Wang,W., The salt disaster problem and its mathematical modeling, Proc. 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils, April, pp.347-352, Nanjing, China, 2007.4.21-22.
 - ⑥ Kawai,K., Iizuka,A. and Tachibana,S. : The influences of evapo-transpiration on the ground, Proc. of the 3rd Asian Conference on Unsaturated Soils, April, pp.359-364, Nanjing, China, 2007.4.21-22.
 - ⑦ 杉田 芙紗子、飯塚敦、河井克之、T. Pipatpongsa、地球環境問題の階層的整理と砂漠化問題の位置付け「Desertification in the stratified structure of terrestrial environment problems」、第42回地盤工学研究発表会, pp.1-2, 名古屋国際会議場, 2007年7月4-6日
 - ⑧ T. Pipatpongsa, T. Takeyama & H. Ohta, Accuracy Assessment of Implicit Integration for Mohr-Coulomb Yield Criterion, JSPS International Symposium on Environmental Engineering and the Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering (SIDE 2006), University of the Philippines Diliman, December 7-8, 2006
 - ⑨ Iizuka, A., Hirata, M., Ohta, H. and Yokota, Y., Soil cantilever reinforced by geosynthetics and pre-stressed steel bars, Proc. of 8th International Conference on Geosynthetics, IGS, pp.1213-1218 (CD-ROM), Yokohama, 2006.9.18-22.
 - ⑩ Honda, M., Iizuka,A., Ohno,S., Kawai,K. and Wang,W., An evaluation method for the volume change characteristics of compacted soil, Proc. of the 4th International Conference on Unsaturated Soil, International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Canadian Geotechnical Society, Carefree, Arizona, pp.837-848, 2006.4.2-6.

[その他]

- ① 道奥康治, 貯水池深層の酸化還元条件と水理学的・生物化学的熱塩諸現象, 混相流, 2008.
- ② 飯塚敦, 地盤環境解析学—まずは小さな一歩から—, 研究紹介, 神戸大学最前線, 神戸大学, Vol.8, pp.22-23, 2007.9
- ③ Pipatpongsa Thirapong・飯塚敦・河井克之: タイ東北部の塩害調査と「ジグソー・ピース作戦」, 論説, 地盤工学会, 土と基礎, Vol.55, No.3, Ser.No.590, pp.22-24, 2007.3

ホームページ:

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/rcuss-geo-env/top1.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

飯塚 敦 (IIZUKA ATSUSHI)

神戸大学・自然科学系先端融合研究環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)

神戸大学・自然科学系先端融合研究環都市安全研究センター・助教

研究者番号: 30304132

道奥 康治 (MICHIOKU KOJI)

神戸大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 40127303

村上 章 (MURAKAMI AKIRA)

岡山大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号: 80157742

里深 好文 (SATOBUKA YOSHIFUMI)

立命館大学・工学部都市システム工学科・教授

研究者番号: 20215875

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

東京工業大学・学術国際情報センター・准教授

研究者番号: 10401522

高原 利幸 (TAKAHARA TOSHIYUKI)

金沢大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号: 20324098

(3)連携研究者

なし