

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 20 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009 年度 ～ 2011 年度

課題番号：21686044

研究課題名（和文） 塩害メカニズムの解明への地盤工学的アプローチ及び高塩害抑制地盤の提案

研究課題名（英文） Clarification of the mechanism generating salt disaster with geotechnical engineering and proposal of ground improvement resistant to salt disaster

研究代表者

河井 克之 (KAWAI KATSUYUKI)

神戸大学・都市安全研究センター・准教授

研究者番号：30304132

研究成果の概要（和文）：沙漠化の主要因の一つである塩害は、不適切な灌漑などの人為的要因と長期の乾湿繰り返しといった自然要因によって起こるため、地盤に及ぼす複雑な外的要因を考慮した対策が必要となる。本研究では、地盤の変形、地下水流れ、物質移動を同時に表現できるシミュレータの開発を行った。また、解析精度の向上を図るため、ライシメーターを用いた地盤からの蒸発量計測も行い、塩害抑制地盤の提案も行っている。

研究成果の概要（英文）：Salt disaster, triggering salt disaster, is generated by man-made factor, such as exceeding irrigation, and natural factor, such as long-term repetition of preparation and evaporation. Therefore, the countermeasure considering complicated external impacts to the ground is needed. In this study, we developed the soil/water/air coupled F. E. simulator, which can express deformation of the ground, groundwater flow, and mass transfer within the ground. Moreover, monitoring of evaporation with lysimeter tests is conducted for improving analysis accuracy. Finally, the soil stratification resistant to salt disaster is proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2010 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2011 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
総計	17,600,000	5,280,000	22,880,000

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：地盤工学・土壌圏現象・自然災害

1. 研究開始当初の背景

人類と農業の発展は、19 世紀に大きな転換期を迎えた。19 世紀頃までは、世界の農耕地は拡大を続け、それによる食糧増産によって人口増加を支えてきた。19 世紀中頃になると耕作地面積の増加はストップし、灌漑技術の発展や窒素肥料の使用拡大により、収穫量は漸増を続けた。国連食糧農業機関(FAO)はこ

れを緑の革命と呼んでいる。しかしながら、近年、緑の革命による改善の余地がなくなってきており、世界中で収穫量の伸びが落ちこんでいる。一方で、現在、地球上では深刻な砂漠化が問題となっている。砂漠化の影響を受けている土地面積は 3600 万 km² であり、全乾燥地域の 7 割近くを占め、さらに毎年 6 万 km²、九州と四国を飲み込む速度で砂漠地

面積は拡大を続けている。世界の耕作地面積を増加させることはもはやたやすくはない現状にある。本研究は、「塩害によって失われた土地の再生」をキーワードに、耕作地の減少を抑制すべく、砂漠化の主要因のひとつである塩害メカニズムの解明と、解決策の提案を目的としている。

図-1は、申請者らが、タイ東北部で行った塩害調査の様子である。現地は、古来より高塩分濃度の深部地下水を用いた、天日式塩田による製塩産業が盛んである。しかしながら、過度に汲み上げられた地下水が近辺に漏出し、周辺地盤の塩分濃度を高め、植生を枯死させ(図-1(a))、さらに、農業用水のために掘削された地盤で、地下水位が地表面に接近したことで塩害を誘引したという例もある(図-1(b))。また、自然発生の塩害地も多く見られ、長期にわたって降雨・乾燥の繰り返しの晒された地盤で、地表面付近に塩類が集積し(図-1(c))、収穫量に多大な影響を及ぼしている。さらに、タイで問題となっているのが、地盤の陥没問題である。近年、製塩のための地下水汲み上げにより地盤内に空洞が発達し、ある日突然直径十数メートルにも及ぶ陥没が発生するという問題が生じている(図-1(d))。このようなタイで同時に起こっている問題を地盤工学的に解釈すると、塩類集積は地盤浸透問題と地下水による物質輸送問題、陥没は地盤の安定問題とみなせる。また、灌漑という地盤工学的アクションが環境負荷を与え塩害を生み出している。このように、地盤工学的には個別の事象が、同時に起こっており、土/水/溶解物質連成問題として取り扱う必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、これまで申請者らが開発してきた不飽和土の構成モデルをより精緻なものにし、実地盤の挙動予測に耐え得る土/水/溶解物質連成有限要素解析手法の確立を目指すとともに、塩害抑制地盤の構築を目指す。



(a) 塩田近くの竹林



(b) 農業用水路



(c) 自然発生の塩害



(d) シンクホール

図-1 タイ塩害調査

本研究の成果は、自然環境問題に対して包括的な手法を提供するだけでなく、農学、理学へ発信可能な地盤工学的技術として有用であると考えられる。

3. 研究の方法

実務における塩害予測および塩害対策の提案を可能にするために、以下の研究計画を立てた。

(1) 土/水/空気/溶解物質連成有限要素シミュレータの開発

複雑な要因が作用する地盤のモデル化のために、構成モデルとして大野らが提案するSe-Hardeningモデル(大野進太郎, 河井克之, 橋伸也: 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, 63(4), 1132-1141, 2007), 河井らの水分保持特性モデル(河井克之, 汪偉川, 飯塚敦: 水分特性曲線ヒステリシスの表現と不飽和土の応力変化, 応用力学論文集, 5, 777-784, 2002)を, Borja の混合体理論(Borja R I: A mathematical framework for three-phase deformation and strain localization analyses of partially saturated porous media, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 193, 5301-5338, 2004)を用いて, 土/水/空気連成有限要素解析として集約する。さらに, 物質輸送方程式を適用し, 外力, 外水位変化に対する変形予測を精緻に行え, かつ地中水溶解物質移動を表現できるシミュレータを開発する。

(2) 塩害発生シミュレーション

得られたシミュレータを用いて, 微量の塩分濃度を有する地下水が存在する問題を設定し, 地表面への乾湿繰り返しや, 外力载荷による塩害発生の可能性について検討する。さらに, 塩害が生じた地盤の浄化方法や耐塩害性地盤構成の提案を行う。

(3) ライスメーターを用いた蒸発量計測

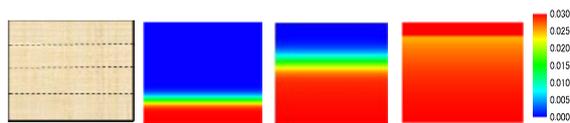
解析で用いているモデルの妥当性および予測精度の向上を図り, ライスメーターを用いた蒸発量計測を行う。(2)で提案する耐塩害性地盤構成の効果についても検討を行う。

(4) 実務への適用

本研究の成果を社会に還元すべく, 東日本大震災で被害を受けた陸前高田市の“一本松”保存対策の効果を生シミュレーションによって検討する。

4. 研究成果

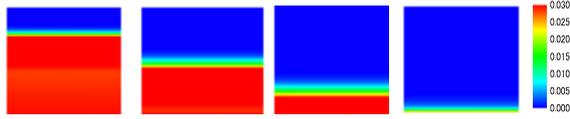
図-2は, 物質移動を表現できる不飽和土/水連成有限要素解析コードDACSAR-U_adを用いた塩害発生シミュレーション結果である。地表面には気候条件を考慮した降雨, 蒸発を流量境界として与えた。その結果, 地下水に含まれる塩分が乾湿繰り返しとともに上昇しているのわかる。また, 地表面に透水性



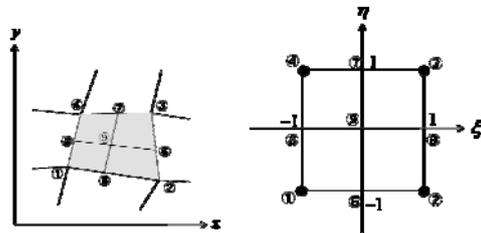
(a)地盤 (b)半年 (c)1年半 (d)2年半
図-2 乾湿繰り返しによる塩分移動



(a)地盤 (b)半年 (c)1年半 (d)2年半
図-3 マルチング地盤における塩分移動



(a)1年 (b)2年 (c)3年 (d)4年
図-4 フラッシングによる地盤浄化



(a)一般座標 (b)局所座標
図-5 9節点四角形要素

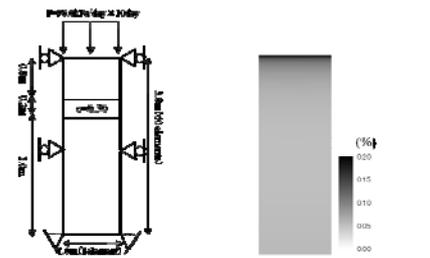
が高く保水性の低い材料を敷き均したマルチング地盤では、蒸発量を抑制することができ、その結果塩害対策として有効であることが分かった(図-3)。さらに、既に塩害の生じてしまった地盤でも、地表面から水を供給するフラッシングによって地盤を浄化できるが、シミュレーション内で水の供給量や時期による効果の違いも表現できた(図-4)。

本申請では、モデルの精緻化、挙動予測精度の向上を目指した。

(1) 土/水/空気連成解析における数値モデル

既往の不飽和土/水連成解析では、4節点四角形要素を用いていたため、変形の計算精度が十分でない場合があった。また、このとき水理条件に関しては、安定した計算を行うためには変形に対して次数を落とす必要があり、要素形状による誤差の存在が無視できなかったため、本研究では図-5に示すアイソパラメトリック要素を導入して、計算精度を高め、なおかつ空気項の影響を考慮することで、より精緻な数値モデルの構築を行った。

地盤内の物質移動は地中水の流れと拡散によって生じるため、浸透問題と組み合わせ考えられてきた。しかしながら、浸透問題を扱う場合は地盤の変形を考慮しないことがほとんどである。ここでは、外力が作用し変形が生じた場合の物質移動に及ぼす影響を検討するために、図-6に示す条件を設定した。その結果、地表面に荷重を載荷することによって、塩分濃度の上昇速度が増している



(a)解析条件 (b)体積ひずみ分布
図-6 外力作用による物質移動解析

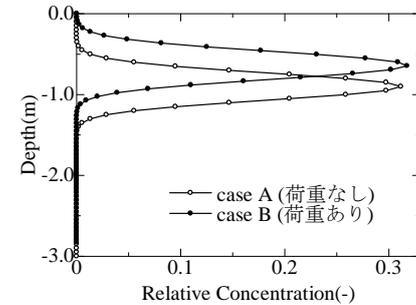
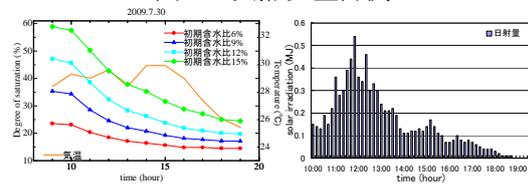


図-7 外力載荷時の濃度深度分布



(a)ライシメーター (b)ウェザーステーション
図-8 実蒸発量計測



(a)土壌の飽和度変化 (b)日射量変化
図-9 実蒸発量と日射量

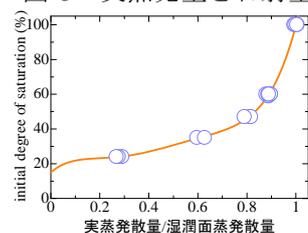


図-10 蒸発量率と土壌飽和度

ことがわかる(図-7)。

(2) 気候条件、地盤構成と蒸発量

シミュレーションにより、地表面からの蒸発が塩分上昇を促進させることがわかった。ここでは、ライシメーターを用いた実蒸発量の計測を行った(図-8)。このとき、地盤の含水状態、気候条件等を考慮に入れている。

図-9より、蒸発量に影響を及ぼす要因として日射量が大きく関わっていることがわかった。また、土壌の含水比に応じて実蒸発量

が異なることが明らかであり、図-10のように可能蒸発量に対する実蒸発量の割合が土壌の飽和度で規定できることも明らかとなった。

(3) 陸前高田の一本松保護シミュレーション
本研究の成果を実務への適用性を検討するため、陸前高田の一本松保護対策の効果について、シミュレーションを行った。2011年3月に発生した東日本大震災の津波によって、陸前高田市の“高田の松原”が甚大な被害を受けた。しかし、奇跡的に押し流されることなく生存した松を、復興のシンボルとして保存しようとする動きが高まり、一本松根圏への海水浸入を抑えるべく、四方への鋼製矢板の打設とともに地下水のくみ上げが行われた。ここでは、図-11に示す解析領域を

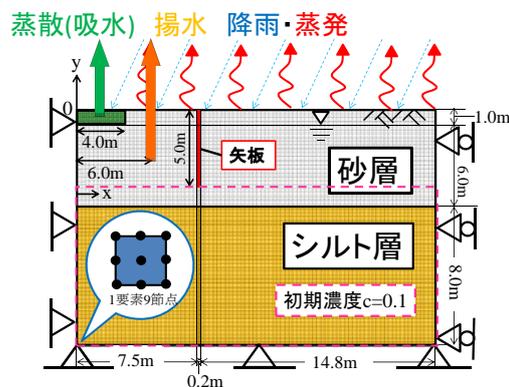


図-11 一本松保護解析条件

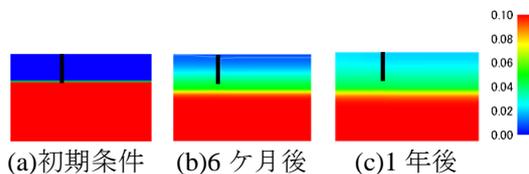


図-12 地盤内塩分濃度(自然条件)

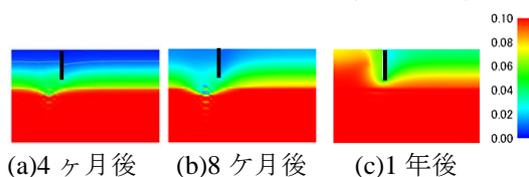


図-13 地盤内塩分濃度(揚水の効果)

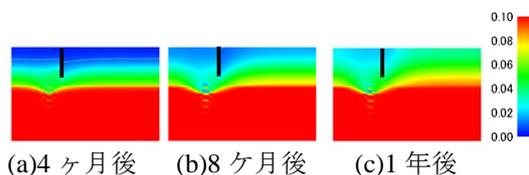


図-14 地盤内塩分濃度(深部からの揚水)

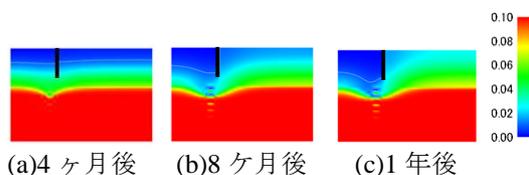


図-15 地盤内塩分濃度(フラッシング効果)

設定し、東北地方の気候条件を蒸発量、降雨量として与え、将来的な予測を行った。図-12は気候条件のみ与えた場合の結果であり、矢板の効果を検討したものであるが、地表面への塩分上昇が確認される。図-13は矢板に加え、ポンプアップの効果を検討したものであるが、塩害発生時期を遅らせることには効果があるものの持続可能な対策とはならないことが分かる。図-14ではさらに深部からの揚水、図-15はさらに地表面から定期的なフラッシング(真水の供給)を行った場合の解析結果得る。結果、一本松保護のためには地下深部からの定常的な揚水とともに、定期的に大量の水を要することが明らかとなり、一本松保護が難しいことが確認された。

結局、一本松保護は断念せざるを得なかったが、本研究の成果を確認することはできた。この経験が、他の塩害事例に対して将来的な予測、対策の検討に適用できるものと考える。

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2件) (総計11件)

- ① 野村瞬, 河井克之, 角井駿祐, 橘伸也, 金澤伸一, 飯塚敦, 飽和/不飽和地盤内における水溶性物質移動モデルの構築, 土木学会論文集 A-2, 査読有, Vol.67, No.2, pp.231-240, 2011
- ② 河井克之, 野村瞬, 大野進太郎, Thirapong Pipatpongsa, 橘伸也, 金澤伸一, 飯塚敦: 耐塩害性地盤構造及び塩害地盤浄化手法の検討, 応用力学論文集, 査読有, Vol.12, pp.421-428, 2009.

[学会発表] (計3件) (総計24件)

- ① Nomura, S., K. Kawai, A. Iizuka, S. Tachibana and S. Kanazawa: Mathematical model of soil/water air coupled problem for unsaturated soils considering mass transfer within pore-water, Proc. 5th Asia-Pacific Conf. on Unsaturated soils, pp.287-292, 2012.
- ② Kawazu, J., K. Kawai, S. Kanazawa and A. Iizuka: Mechanical behaviors and water retention characteristics of micro-porous ceramic particles produced by burning sludge, Proc. 5th Int. Conf. on Unsaturated Soils, pp.277-282, 2010.
- ③ Nomura, S., K. Kawai, S. Kanazawa and A. Iizuka: Study of stratification resistant to salt damage, Proc. 5th Int. Conf. on Unsaturated Soils, pp.1133-1139, 2010.

〔その他〕
ホームページ等
<http://www2.kobe-u.ac.jp/~kkawai/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河井 克之 (KAWAI KATSUYUKI)
神戸大学・都市安全研究センター・准教授
研究者番号：30304312

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし