様式Ｃ－１９

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 15 日現在

機関番号：14501
研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2009～2011
課題番号：21360225
研究課題名（和文）塩害・地盤変状発生機構の解析と環境負荷汚泥焼成物を用いた防止技術の開発
研究課題名（英文）Salt damage / Ground deformation Mechanism and its repair method using porous ceramic particles made from paper sludge
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（和文）：
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．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．一方，東南アジアの国々では，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1300度程度で焼くと,微細な多孔構造を持つ安定した多孔質材とすることができる．本研究課題は，タイ東北部をフィールドに，この多孔質材料を塩害防止・対策に用い，塩害防止と農耕地保全に役立てることを目的とし，1.水収支の狂いによる塩分析出シミュレータの高度化，2.タイ東北部で計測された塩害，地盤変状の解析，3.PS焼成材,浄水場排出焼成材の力学特性の把握,4.塩害防止,農耕地保全の構造体の提案を行った．

研究成果の概要（英文）：
It is well known that salt rock layer is widely deposited under the Eurasian basement. Underground water contains weakly salt where the salt rock layer is occasionally deposited near the ground surface. Such a typical example can be seen in the northeast area of Thailand. Agricultural productivity decreases due to the salt damage of that the salty ground water level gradually rises resulting in appearance of salt crystals on the ground surface associated with annual repeat of rainy and dry seasons. This research project is intended to develop a numerical computation technique to reveal the mechanism of salt damage which will lead desertification. On the other hand, paper sludge discharged from paper manufacture causes a serious environmental problem. Such sludge can be changed to porous stable ceramic materials by burning it at 1300 degrees. This research project also aims at utilizing such materials to protect and repair the salt damage.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2009 年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2010 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011 年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
年度			
年度			
総　計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

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，沙漠化，地盤応答数理モデル，有限要素シミュレータ，多孔質セラミック材，地盤変状，タイ東北部

１．研究開始当初の背景

本研究は，地盤工学の地球環境問題への積極的な寄与を強く意識している．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（サコンナコン盆地およびコラート盆地に岩塩が堆積）．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潅漑路に放出され，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 1300 度程度で焼くと，微細な多孔構造を持つ安定した（有害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．この材料を塩害防止・対策に用いることを，本研究では，念頭においている．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，現地発生の環境負荷物質を現地で加工し，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が，本研究のねらいでもある．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言える．

２．研究の目的

塩害を最初に科学的に取り扱ったのは農学，特に林学，土壌，生態の分野である．しかし，その問題には強く力学的側面が内包されていることから，地盤工学が普遍的力学体系として寄与してゆける．

本研究では，タイ東北部をフィールドに，

(1) 水収支の狂いによる塩分析出シミュレータを高度化する．すなわち，不飽和／飽和土／水／間隙空気／移流・拡散連成解析手法を整備する．

(2) タイ東北部で計測された塩害，地盤変状を解析する．

(3) PS 焼成材，浄水場排出焼成材の力学特性を調べ，この高い透水性と保水特性を利用した，塩害防止，農耕地保全の構造体を提案する．

(4) この構造体は地盤内へ敷設・施工されるが，その形状等の最適解を，1.で開発した解析手法によって検討する．

を目的としている．

３．研究の方法

塩害に関わらず，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解析を試みた．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，塩害が最終的にもたらす沙漠化をとりまく要因の因果関係が図-1 である．上位の問題が下位の問題を引き起こす．

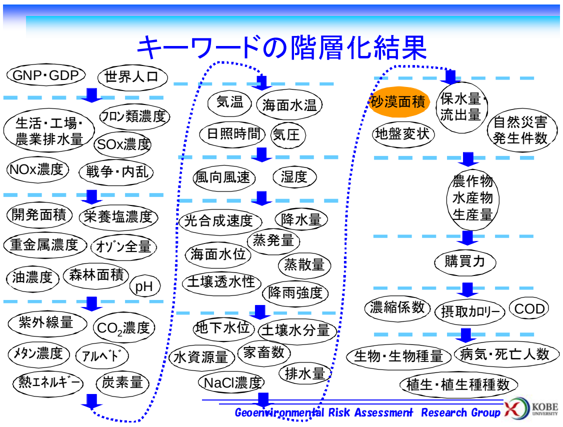

図-1　塩害・沙漠化を取り巻く因果関係

これが広く認知されている地盤環境問題のひとつの正体だろう．塩害の結果は「沙漠化」であるが，この沙漠化をもたらす直接の原因は，図-1 より，「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→沙漠化」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．

具体的な方法・手順は以下の通りであった．

(1) 基礎研究の実施

塩害・地盤変状連成の数理モデルの構築と整備を行う．すなわち，飽和・不飽和土の弾塑性構成モデル（SH モデル）の改良，植生を介しての蒸散などの水循環の表現，降雨と蒸発などの水循環収支モデルの吟味と改良，地中水含有塩分などの移流拡散の表現，地盤の変形・応力・浸透の連成である．

(2) 現地フィールド情報の収集・分析
タイ東北地方を念頭に，カセサート大学と連携し，現地の地盤条件，塩害の実際把握を行う．すなわち，地盤土質の検討，植生状態や地下水分布の把握，地中水塩分含有量の把握，降雨，日射等の気象データの把握である．

(3) PS 焼成多孔質セラミック材の力学特性
一連の室内要素試験を実施し，力学特性を把握する．

(4) 塩害過程シミュレータの開発
飽和/不飽和・土/水連成・弾塑性・移流拡散モデル基づき，有限要素法を用いた数値シミュレータを開発する．これによって，地盤-水圏-気圏境界モデルの吟味，地盤-水圏-気圏境界物質移動モデルの吟味を行い，チューンナップをはかる．

(5) 塩害防止・農耕地保全構造体の検討
環境リサイクル多孔質セラミック材などを用いた塩害防止・農耕地保全効果の検討するために，一連の数値シミュレーションを実施する．これに基づき，塩害防止・農耕地保全構造体の検討を行う．

(6) フィーシビリティーの向上と改善
タイ・カセサート大学と連携を促進し，現地における塩害抑止，塩害修復における本研究成果のフィーシビリティーの向上と改善を検討する．カセサート大学とのワークショップ開催を想定していたが，実際には，国際会議の場で，本研究代表者が基調講演を行い，討議するという成果に結実した．

４．研究成果

(1) 基礎研究

塩害・地盤変状連成の数理モデルの構築と整備を行った．この時，i) 飽和・不飽和状態にある土の透水・力学特性の考慮，ii) 地盤の変形・応力・浸透の考慮，iii) 降雨による水供給と地表面蒸発などの水循環の考慮，iv) 植生を介しての蒸散などの水循環の考慮，v) 地中水に含有している塩分などの移流分散の考慮が必要となる．塩分などは，土中の間隙水に溶解しているものとして，溶存量を定義するものとする．最終的に，図-2 に示す連成場の数理モデルを構築した．構成モデルは，不飽和状態における土の非可逆的力学挙動を表現できる弾塑性 Se ハードニングモデル（SH モデル）を改良した．土の水分保有特性の表現には，飽和度とサクションの関係において，湿潤と乾燥でヒステリシスを考慮できるモデルを用いた．これらを有限要素法を用いて空間離散化し，数値シミュレータを開発した．

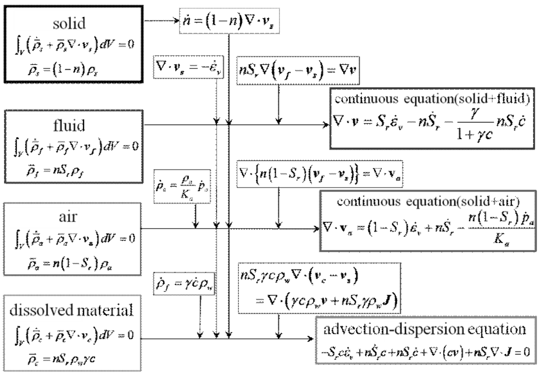

図-2　数理モデルの内容

(2) 現地フィールド情報の収集・分析
タイ東北部では，地表における森林伐採および水田化によって，水収支に狂いが生じ，乾期・雨期の繰り返しに伴い，地下水位の上昇と地表面への塩の析出を生じさせている（図-3）．一度，塩が地表面に析出すると，最早，植生の育成は困難となる．また，塩分溶解地下水を汲み上げて，塩の生産を行うことから，地表面の陥没も発生している．図-4 は現地で，土壌塩分濃度を計測したときの様子である．

図-3 塩害の様子　　図-4 地盤塩分濃度測定

(3) PS 焼成多孔質セラミック材の力学特性
一連の室内要素試験を実施し，力学特性を把握した．PS（white）および浄水汚泥（red）を 1300 度で焼成して得た多孔質セラミック材を試料とした．図-5 に粒径加積曲線を示す．図-6 に三軸排水せん断試験結果の一例を示す．さらに，水分保水特性を調べた．

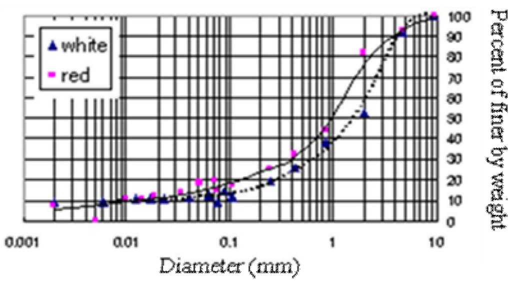

図-5　粒径加積曲線

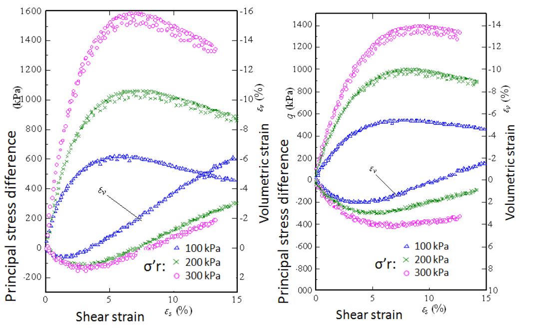

図-6　三軸排水せん断結果(左：PS，右：浄水汚泥，Dr80%）

（4）塩害過程シミュレータの開発
飽和/不飽和・土/水連成・弾塑性・移流拡散モデル基づき，有限要素法を用いた数値シミュレータを開発した．タイ東北部の地盤を想定し，現地の気象条件を入力することにより，地下水に含有されている塩分の上昇をシミュレーションした（図-7）．地表から約 4m 深さに地下水面がある場合，ほぼ 3 年で塩分は地表に析出する結果となった．

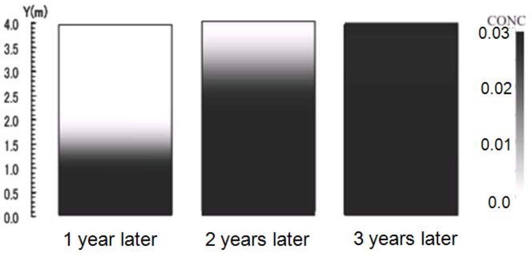

図-7　塩分濃度の上昇

（5）塩害防止・農耕地保全構造体の検討
保水性が低く，透水性が高い焼成セラミック材を用いて，キャピラリーバリアを形成することにより，塩害の進展を抑える方法を検討した．図-8 に示す 2 種類の構造体（マルティングと改良マルティング）を取り上げ，その塩害抑止効果とメカニズムを解明した．現地の気象条件を与えても，十分に塩分上昇を抑止することがシミュレーションにより明らかとなった．

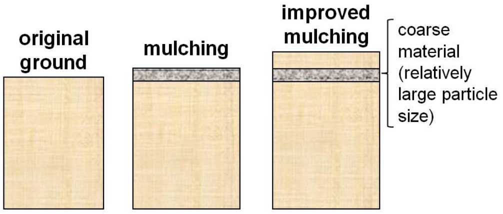

図-8　塩害抑止構造体

さらに，すでに塩害にさらされている地盤の洗浄（フラッシング）を，開発した数値シミュレータによって検討した．

（6）フィーシビリティーの向上と改善
以上の成果は，2012 年 3 月にタイ・パタヤで開催された第 5 回アジア環太平洋・不飽和土国際会議（5th Asia-Pacific Conf. on Unsaturated Soils）において，基調講演として示され，フィーシビリティーの向上と改善が討議された．

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８件）（総計１２件）

① Honda,M., Ohno,S., Iizuka,A., Kawai,K. and Ohta,H.: Theoretical evaluation of the mechanical behavior of unsaturated soils, International Journal of Geotechnical and Geological Engineering, Springer, Vol.29, No.2, 2011, 171-180
② 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 A2（応用力学論文集），Vol.14, 2011, 231-240
③ 野村瞬，河井克之，金澤伸一，橘伸也，飯塚敦：土/水/空気/溶解物質連成問題の定式化とその応用，神戸大学都市安全研究センター研究報告，第 15 号, 2011, 21-28
④ 柴田昌輝，河井克之，尾崎早希子，金澤伸一，橘伸也，飯塚敦: 締固め方法の違いが締固め土構造物の品質に及ぼす影響，応用力学論文集, Vol.13, 2010, 363-370,
⑤ 田中麻穂，河井克之，金澤伸一，橘伸也，大野進太郎，飯塚敦，竹山智英: 築堤シミュレーションにおける設定条件が盛土内応力分布に及ぼす影響，応用力学論文集, Vol.13, 2010, 423-430
⑥ 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, 土木学会, Vol.12, 2009, 421-428
⑦ 河井克之，柴田昌輝，金澤伸一，橘伸也，大野進太郎，飯塚敦，本田道識：土/水連成有限要素プログラムを用いた静的締固めシミュレーション，応用力学論文集，土木学会，Vol.12, 2009, 429-436
⑧ Pipatpongsa,T., Takeyama,T., Ohta,H. and Iizuka,A.: On the vertex singularity of the Sekiguchi-Ohta model, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Science Council of Japan, Vol.57, 2009, 89-94

〔学会発表〕（計７件）（総計１６件）

① Iizuka,A., Kawai,K., Nomura,S., Tachibana,S., Ohno,S. and Pipatopongsa,T. : The role of unsaturated geomechanics in

desertification due to salt damage, Keynote Lecture, Proc. 5th Asia-Pacific Conf. on Unsaturated Soils, 2012, 31-44

② Nomura, S., Kawai,K., Iizuka,A., Tachibana,S. and Kanazawa,S.: 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, 2012, 287-292

③ Kawazu, J., Kawai, K., Kanazawa, S. and Iizuka, A.: Mechanical behaviors and water retention characteristics of micro-porous ceramic particles produced by burning sludge, Proc. 5th Int. Conf. on Unsaturated Soils, 2010, 277-282

④ Nomura, S., Kawai, K., Kanazawa, S. and Iizuka, A.: Study of stratification resistant to salt damage, Proc. 5th Int. Conf. on Unsaturated Soils, 2010, 1133-1139

⑤ Kawai,K., Iizuka,A., Kanazawa,S., Fukuda,A., Tachibana,S. and Ohno,S. : Stress-strain and water retention characteristics of micro-porous ceramic particles made with burning sludge, Proc. of the International Symposium on Prediction and Simulation Methods for Geohazard Mitigation, Kyoto, 2009, 339-345

⑥ Kawai,K., Iizuka,A., Tachibana,S. and Ohno,S. : Impacts of plant-induced uptake on the stability of the earth structure, Proc. 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE), Egypt, Vol.1, 2009, 526-529

⑦ Kanazawa.S., Kawai,K., Ohno,S., Tachibana,S., Pipatpongsa,T., Takeyama,T. and Iizuka,A. : A finite element simulator for mechanical behavior of unsaturated earth structures exposed to evaporation and moisturization, Proc. 4th Asia-Pacific Conf. on Unsaturated Soils, 2009, 711-718,

〔図書〕（計１件）

① Ohta,H., Iizuka,A. and Ohno,S.: Chapter 13 Soil Mechanics "Constitutive Modelling for Soft Cohesive Soils", Geotechnics and Earthquake Geotechnics towards Global Sustainability, ed. by Susumu Iai, Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering Vol 15, ISBN9789400704695, Springer 2011, 231-250

〔その他〕
ホームページ等
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・准教授
研究者番号：30304132

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

橘　伸也（TACHIBANA SHINYA）
埼玉大学・地圏科学研究センター・助教
研究者番号：90432567

竹山　智英（TAKEYAMA TOMOHIDE）
東京工業大学・理工学研究科・助教
研究者番号：00452011

金澤　伸一（KANAZAWA SHIN-ICHI）
中央大学・理工学部・助教
研究者番号：20580062
（2010 年から参加）

(3)連携研究者

なし