

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：32665

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889056

研究課題名(和文)飽和/不飽和地盤内汚染物質の移動性評価手法の確立

研究課題名(英文)Development of contaminant material mobility expression method in saturated/unsaturated ground

研究代表者

野村 瞬(NOMURA, Shun)

日本大学・理工学部・助手

研究者番号：20705701

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：近年、複雑な環境変化や地盤条件の影響を受けながら拡大する水溶性の汚染物質による土壌汚染被害が拡大している。研究過程では、複合的な要因によって発生する土壌汚染の適切な被害把握・リスク評価に向けた、飽和/不飽和地盤環境下における汚染物質の移動性評価手法の検討を行った。解析領域では、地盤材料を土/溶液/溶解物質/空気混合連続体として整理し、従来の連続体理論に混合体理論を適用し、地盤変形・間隙流体(溶液および空気)運動・溶解物質輸送が同時に評価可能となるモデルを構築した。実験領域では、一次元鉛直カラム試験機を作成し、地盤内流体の移動性評価を間隙水圧計、流量測定器によって計測し、現象の整理を行った。

研究成果の概要(英文)：In recent years, soil contamination due to toxic water-dissolved materials has become one of the most serious environmental problems. Study for mobility evaluation to pollutants in saturated / unsaturated ground has been proceeded. In the analysis area, ground is assumed as soil / solution / dissolved material / air mixture continuum material. Applying the mixture theory to the conventional continuum theory, the theoretical model which ground deformation, pore fluid (solution and air) movement, and dissolved solute transport are evaluated simultaneously has been developed. Additionally, the one dimensional column test device equipping with the pore fluid pressure meter and flow measuring instrument was constructed to confirm the solute movement in the various condition of the ground.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 汚染物質 移流分散現象 密度流

1. 研究開始当初の背景

社会基盤の発達とともに環境問題は多様化し、自然発生的・人為起源的問題の境界さえ不明瞭になっている。特に近年、様々な応力下に晒される汚染物質が都市部の社会生活に多大な影響を与えるケースが頻発し、深刻な環境問題となっている。土壤汚染の対策は、汚染物質の種類・汚染範囲により①掘削除去（汚染物質を掘削し、処分場へ埋設する手法）、②封じ込め工法（覆土・遮水壁により汚染物質の移動を制御する手法）、③原位置除去（地下水揚水、土壤ガス吸引封入により汚染物質を回収する手法）などが存在する。いずれの工法も、汚染物質の除去・修復過程で地盤に力学的なインパクトが付与されるにもかかわらず、土壤汚染問題において、地盤の変形・有効応力変化など地盤の力学挙動の変化が物質移動に与える影響が考慮されることなく、問題解決は地中水と汚染物質特性のみに着目して図られてきた。そのため、各工法は地盤の汚染浄化後の土地再利用を含めた地盤の力学的安定性が考慮された技術評価がなされているとは言い難い。

加えて、産業廃棄物の処分過程においては、自然環境保全や循環型社会への貢献など、「地球にやさしく」というメッセージとともに資源の再利用化（Reuse）、再資源化（Recycle）の重要性が声高に叫ばれて久しいが、産業発展の過程で発生する廃棄物を著しく減容化できる革新的な技術（Reduce）は未だ達成されておらず、わが国において、廃棄物はむしろ恒常的、安定的に排出されているとあってよい状況にある（図-1）。また、東日本大震災の結果、放射性物質を含む汚染物質が吸着した膨大な量の土砂の広大な領域に及ぶ除染作業の手間もさることながら、放射能汚染土砂の有害物質の漏出を抑制しながら、適切に管理する技術が求められている。このように、狭い国土の限られた領域に多量の廃棄物を「安定的」に「長期間」保存する技術の重要性は増してきており、社会・生活基盤を設計し、長年にわたって管理を行うには、地盤で生じる種々の環境変化を適切に考慮した上で汚染物質の移動特性を把握する必要がある。

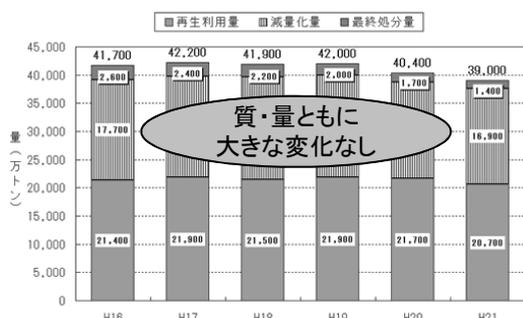


図-1 産業廃棄物量の推移

2. 研究の目的

複合的な要因によって発生する土壤汚染の適切な被害把握・リスク評価を行える手法の開発を研究目的とした。土壤汚染問題は「地盤内物質移流拡散問題」として扱われることが多いが、図-2の模式図からもわかるように、実際はそれらと「地盤の変形-浸透問題」が複雑に絡み合って発生する問題である。研究過程では、現象の本質的な理解に向け、理論解析、実験事実を蓄積する中で、飽和/不飽和地盤における精緻な汚染被害モデルを確立し、論理性・普遍性・客観性を有する問題解決法を提示することを目的とした。

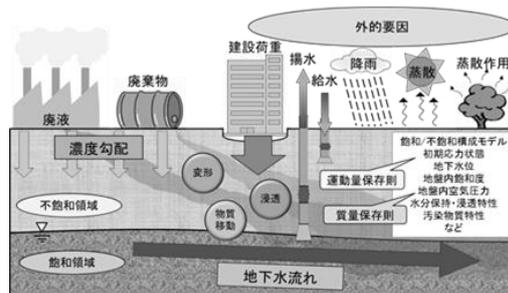


図-2 土壤汚染モデル図

3. 研究の方法

(1) 不飽和土/水/空気/汚染物質連成問題の整理

様々な試験法、構成モデルが集約され、近年になり、不飽和土の力学体系もようやく整理されるに至ってきている。これまで構築してきた数理モデルに、多様な汚染物質の移動特性を盛り込んだ表現方法を模索する中で、既存のコードの高度化を進め、種々の実験、境界条件における問題を再現し、キャリブレーションを進める中で、既存の解析コードを高度化し、その汎用性、信頼性向上に努めた。

また併せて、溶解物質の流入により溶液密度が大きく変化した場合、溶液の運動性がどのように変化するか、理論解析を行う中で検討を進めた。

(2) 土槽実験による汚染物質移動性の把握

複雑な多孔質構造を持つ土試料の間隙を移動する汚染物質の運動には力学的な裏付けがなされていないものも多い。土粒子の配向性や移動方向を様々に変化させた簡単な要素試験を一次元カラム試験器により実施し、未解明である種々の移動性に物理的意味付けを行った。

4. 研究成果

(1) 不飽和土/溶液/溶質/空気連成有限要素解析コードの高度化

地盤材料を土、間隙溶液、間隙空気、溶解物質が入り混じった多相混合体として捉え、各相の質量保存則、運動量保存則、構成式を連成させ、複雑な地盤環境の変化に対する地盤変状を追従し、将来予測を可能にする数理モデルの検討を行った。基礎式には、溶解物質の移動性を把握するための物質移動方程

式も適用されており、地盤内の物質の移動性についても検討可能なものになっている (図-3). また、数値モデルの離散化においては要素形状による計算精度の低下を防ぐため、図-4 に示すアインパラメトリック要素を導入した. 以上の検討により、これまで同時に考慮することが困難であった地盤変形-流体浸透-物質移動を同時に表現することが可能となっている.

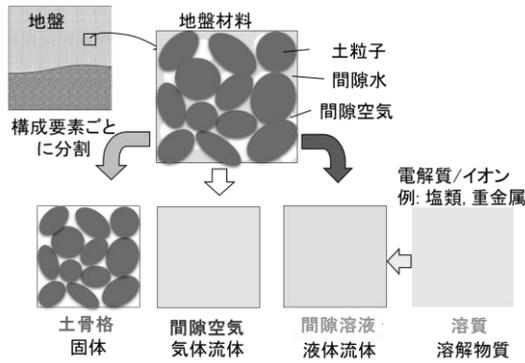


図-3 多相混合体地盤材料モデル

<p>土骨格相</p>	<p>・釣合式:</p> $\sigma_{ij,j} + \rho_s g_i = 0 \quad \sigma_{ij} = \sigma'_{ij}$ <p>・有効応力式:</p> $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij}^N + p_i \delta_{ij}$ $(\sigma_{ij}^N = \sigma_{ij} - p_a \delta_{ij}, p_i = s S_i)$ <p>・構成式:</p> $\dot{\sigma}'_{ij} = D_{ijkl} \dot{\epsilon}_{kl} - c_{ij}^s \dot{S}_e$ <p>・変位-ひずみ関係:</p> $\dot{\epsilon}_{ij} = -\frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i})$
<p>間隙溶液相</p>	<p>・固相-溶液相連続条件式:</p> $\dot{\epsilon}_i S_i - n \dot{S}_i - n S_i \frac{\gamma}{1+\gamma c} \dot{c} - \bar{v}_{i,j} = 0$ <p>・ダルシー則(溶液):</p> $\bar{v}_{i,j} = -K_{w,ij} h_{,j}$ <p>・溶液水頭:</p> $h = \frac{p_f}{\rho_w g} + \frac{\rho_f}{\rho_w} z$
<p>間隙空気相</p>	<p>・固相-気相連続条件式:</p> $v_{a,i} = (1-S_i) \dot{\epsilon}_i + n S_i \frac{n(1-S_i) \dot{p}_a}{p_a + p_w}$ <p>・ダルシー則(空気):</p> $\bar{v}_{a,i} = -K_{a,i} p_{a,i}$
<p>溶解物質相</p>	<p>・物質輸送方程式:</p> $\dot{c} = -(1+\gamma c) \left(\frac{c_j \bar{v}_{j,i}}{n S_i} + J_{i,j} \right)$ <p>・フィック則:</p> $J_i = -D_{ij} c_{,j}$

図-4 数値モデルにおける支配方程式群

(2) 溶液密度変化を考慮した物質移動性の評価手法の開発

近年、重金属類による汚染など、高密度溶液による土壌汚染例が数多く報告されており、溶液密度と間隙水の密度差を考慮して現象を整理する必要性が指摘されている. 溶質の溶解量が溶媒に対して無視できない場合、溶液密度は溶質の溶解量によって逐次変化するため、これらの方程式は互いに従属な関係になり、領域の運動表現は陰解法などの複雑な計算手法が必要になる. 溶液密度により逐次変化する全水頭の表現手法を図-5 のように整理し、現象を矛盾なく表すことのできる数値モデルの検討を行った. 一次元鉛直方向における検討を構築した数値モデルによって行った結果、溶質の流に流入に伴う密度

変化により、物質の鉛直方向における運動性が卓越することを定性的に説明できることを明らかにした. さらに、二次元場における検討を行うため、方程式に繰り返し計算による収束計算を伴った有限差分法を適用した. 離散化を経て構築した数値モデルにより、物質が領域に分散しながらも自重により下方の間隙水を押しよせながら鉛直下向きに運動していく様子を、図-6 のように表現することができた. 当該研究に関しては、今後、本手法の適用性や数値モデルのさらなる高度化に関して実験、理論解析を進める中で検討を行う予定である.

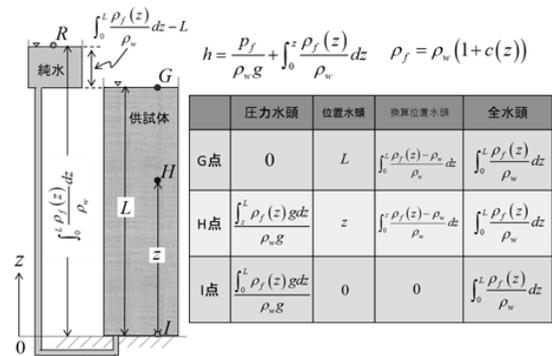


図-5 溶液の全水頭整理手法

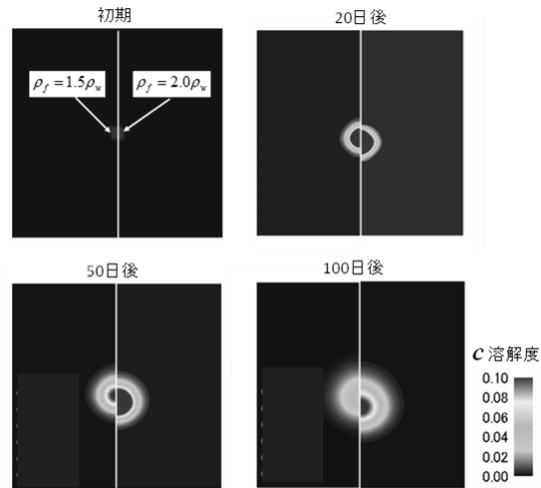


図-6 密度増加による溶液の運動性変化

(3) 一次元カラム試験装置による地盤内流体の運動性の把握

重金属に代表される多くの地盤内汚染物質は、物質ごとに基本的な化学特性が異なり、吸脱着・生成/分解など特殊な汚染形態を有するものが多い. 様々な汚染形態を持つ汚染物質に対して移動性の評価ができるよう、図-7 のような一次元カラム試験器を作成した. 当該試験器の模式図は図-8 のとおりである.

試験試料として8号珪砂を使用し、定水位透水試験により浸透特性を把握した. 透水試験の結果、試験試料の透水係数は提案されている値とほぼ一致することが分かり、試験土槽および流量計測装置の精確性を確認する

ことができた。さらに、試料の締固め度（乾燥密度）を変化させて同様の検討を行ったところ、間隙比の現象に伴う透水性の低下は無視できないものであることが分かった。その結果、一般的な透水係数ではなく、間隙比変化を適切に追従することができる数値モデル（Kozeny-Carman 式など）を適用する必要があることがわかり、今後の検討課題とした。

加えて、前述したように、溶液自身の自重により物質の移動性が水平方向に比べ、鉛直方向に卓越することが明らかになっており、当該試験器で現象の再現を試みた。しかしながら、物質溶解による溶液圧の上昇が想定より少なく、定性的な評価は部分的に可能であったものの、構築した圧力測定環境では詳細な現象の把握まで至ることはできなかった。今後、計測精度の向上を図るとともに、コラム試験器を任意の角度に傾斜させ、重力が受け持つ作用を適宜変化させることで、傾斜角による移動性の差異を評価する手法を検討するなどし、多様な地盤環境における物質輸送現象の変化を表現する手法開発に努めたいと考えている。



図-7 一元鉛直コラム試験装置

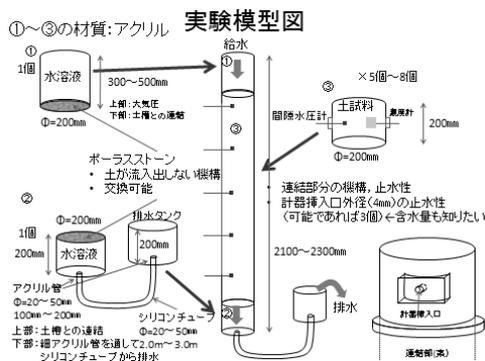


図-8 実験装置模式図

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〕（総計 4 件）

- ① 野村瞬，前野賀彦：地盤内密度流の表現

手法と適用性の検討，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol. 70, No. 2, pp735-742, 2015.（査読あり）

- ② 檜達也，野村瞬，河井克之，飯塚敦：キャピラリーバリアにおける変形特性およびその性能に及ぼす各主要因，都市安全研究センター研究報告，神戸大学都市安全研究センター，Vol. 17, pp61-68, 2013.（査読なし）

〔学会発表〕（総計 6 件）

- ① 野村瞬，前野賀彦：溶液密度の影響を考慮した地盤内物質移動現象の表現方法，第 49 回地盤工学研究発表会講演集，北九州国際会議場（福岡県・北九州市），2014. 7. 15.
- ② 田中琢，杉山友理，野村瞬，飯塚敦，河井克之：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講演集，北九州国際会議場（福岡県・北九州市），2014. 7. 15.
- ③ S. Nomura，Y. Sugiyama，K. Kawai，A. Iizuka: Derivation of mass transfer model for the unsaturated soil and its applications, 6th international conference unsaturated soils, Sydney (Australia), 2014. 7. 4.
- ④ Y. Sugiyama，S. Nomura，K. Kawai，M. Mimura: Factors influencing on the performance of the capillary barrier system, 6th international conference unsaturated soils, Sydney (Australia), 2014. 7. 4.
- ⑤ 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，日本大学生産工学部（千葉県・習志野市），2013. 9. 4.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野村 瞬 (NOMURA, Shun)

日本大学・理工学部・助手

研究者番号：20705701