

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760375

研究課題名(和文) 地盤内の温度環境を考慮した物質移動 力学連成解析モデルの構築

研究課題名(英文) Developments of predictive models for mass transport and mechanical properties considering subsurface temperature

研究代表者

濱本 昌一郎 (Hamamoto, Shoichiro)

東京大学・農学生命科学研究科・助教

研究者番号：30581946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：熱環境変化による地盤内の物質移動・力学的特性変化把握を目指し、異なる温度環境下で圧密・物質移動試験を実施した。カオリン粘土を用いた圧密試験の結果、温度上昇により試料の圧密降伏応力・圧縮指数およびせん断剛性が増加する結果が得られ、温度上昇により土粒子間のセメンテーション作用が増加したことが理由として考えられた。物質移動特性の温度依存性については、温度上昇による透水係数および溶質拡散係数の増加が確認され、既存の予測モデルを用いて表現可能であることを示した。沖積粘土を用いた溶質移動実験の結果、温度変化が溶質分散特性に与える影響は遅延係数に比べ小さいことが分かった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed at understandings of temperature dependencies on mass transport and mechanical properties of soils, and conducted oedometer tests and solute transport experiments under temperature control using Kaolin and alluvial clays. The oedometer tests using Kaolin clays showed temperature increase enhanced consolidation yield stress, consolidation index, and shear modulus possibly due to an increased cementation between soil particles. Temperature dependency on solute transport characteristic confirmed higher hydraulic conductivity and solute diffusion coefficient for samples at higher temperature. This trend could be expressed by modifying existing predictive models for those parameters. In addition, solute transport experiments using alluvial clays showed that temperature dependency on solute dispersion coefficient was not so significant as compared to retardation factor.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：地盤工学

キーワード：物質輸送係数 力学パラメータ 温度依存性

1. 研究開始当初の背景

地中熱利用のヒートポンプシステムの普及促進や、都市ヒートアイランド・地球温暖化現象の深刻化による地下熱環境の変化は、地盤内物質（水・溶質・ガス）循環および力学（圧密・強度）特性に多大な影響を与える。従って、地盤環境への熱負荷が地盤内物質循環および力学特性に及ぼす影響を正確に把握し、温度環境を考慮した地下物質（ガス・溶質）動態・力学連成解析に資する環境影響評価ツールの開発が急務である。熱環境変化による地盤内の物質動態変化および力学的特性変化は、土の構成要素（間隙水・間隙構造）の変化を介して相互作用しながら同時に生じる。しかし、これらの現象を統一的に把握するための実験的研究は極めて少なく、地盤内の物質動態および力学的特性に対する温度効果について十分理解されていない。また、地盤内のガス・溶質態物質動態や力学（変形）特性は、透水係数・溶質拡散（分散）係数・ガス拡散（分散）係数といった物質輸送パラメータや、圧密試験や三軸圧縮試験等から求まる圧縮指数・膨潤係数・内部摩擦角といった力学的パラメータによって表現される。これら地盤内の物質輸送および力学的パラメータは、地盤内のガス・溶質態物質輸送解析および地盤変形解析を行う上で必要不可欠である。これまで、地盤の間隙率（比）や液性限界など地盤の物理パラメータを変数とする物質輸送・力学的パラメータの予測モデルは数多く提案されているものの、地盤の温度環境を考慮したこれらパラメータの統合的予測モデル構築に関する研究はほとんどなく、これらの予測モデルを組み込んだ地下物質（ガス・溶質）動態・力学連成解析モデルに関する研究も極めて少ないのが現状である。

2. 研究の目的

地盤の熱攪乱が物質移動特性ならびに力学特性変化に与える影響を解明し、地盤内の温度環境を考慮した物質輸送および力学的パラメータの予測モデルを構築することにある。さらに、構築する予測モデルを統合して地盤内の物質移動・力学連成解析モデルを構築し、GHP 導入サイトにおける環境影響評価に適用する。

3. 研究の方法

本研究は、「1. 熱環境変化による地盤内の物質移動・力学的特性変化把握」、「2. 地盤内の温度環境を考慮した物質輸送・力学的パラメータの予測モデル提案」、「3. 物質移動・力学連成解析モデルの構築および環境リスク評価への適用」の三つから構成される。「1.」では、関東平野沖積地盤を対象として、地盤内の温度環境変化が物質動態・力学的特性に与える影響を室内実験を通して把握する。「2.」では、地盤の物理化学特性に加え地温を考慮して、「1.」の室内実験および個

別試験から得られる物質動態・力学パラメータの予測モデルを提案する。「3.」では、「2.」で提案した予測モデルを組み込んだ物質移動・力学連成解析モデルを構築するとともに、構築した解析モデルを用いて、地中熱利用ヒートポンプシステム導入サイトでの検証および、局所的または中長期的な温度環境変化による重金属類挙動変化予測や圧密・沈下予測など地盤環境リスク評価に適用する。

4. 研究成果

(1) 熱環境変化が地盤内の力学的性質に与える影響

熱環境変化による地盤内の力学的特性変化把握を目指し、温度調整型圧密試験機を実施した。

模擬試料としてカオリン粘土を用いた圧密試験の結果、温度上昇により試料の圧密降伏応力・圧縮指数およびせん断剛性が増加する結果が得られ、温度上昇により土粒子間のセメンテーション作用が増加したことが理由として考えられた。さらに、同じ試料を用いて二次圧密時の温度変化が圧密特性およびせん断剛性に与える影響について調べた結果、特に間隙比の大きい過圧密粘土で温度上昇に伴い間隙比は減少した。またせん断剛性は温度上昇により急激に減少するが、過圧密粘土ではその後上昇するという結果が得られた（図1）。温度上昇による土粒子の吸着水層の減少、水の粘性低下に伴い、粘土粒子間の結合力が増加し、土粒子の再配列に伴う間隙比の減少およびせん断剛性が増加したと考えられた。

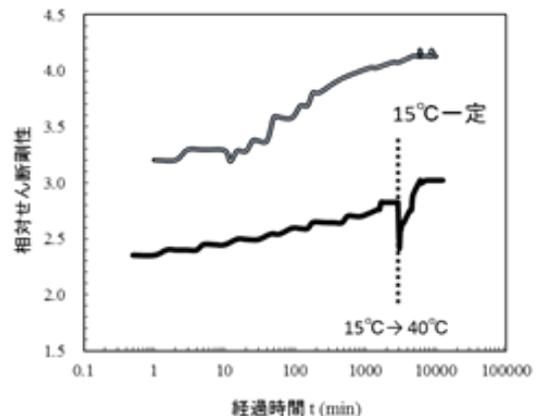


図1. 二次圧密過程中的温度変化がせん断剛性に与える影響

(2) 熱環境変化が地盤内の物質移動特性に与える影響および温度環境を考慮した物質輸送係数予測モデルの検討

図2. に示すような温度調整型溶質移動試験機を用いて、異なる温度環境下で圧密・透水・溶質移動試験を実施し、地盤内の溶質移動を規定する主要な移動係数（透水係数、溶質分散係数、遅延係数）の温度依存性について調べた。トレーサーにはKCl 溶液を用いた。

試料には、模擬試料としてカオリン粘土試料と異なる深度から採取した埼玉県内荒川低地沖積粘土(1.5, 4.6, 17m 深度)を用いた。

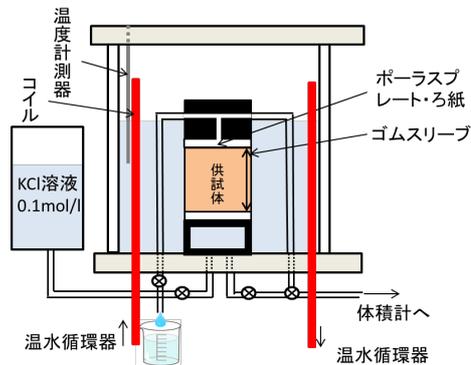


図 2. 温度調整型溶質移動試験装置

カオリン粘土試料を用いて得られた透水係数測定値から、温度上昇により透水係数が増加する結果が得られた。また異なる温度条件下での透水係数については、水の粘性係数の温度依存性を考慮した Kozeny-Carman 式を用いて概ね予測可能であった。同じくカオリン粘土試料を用いて、温度上昇により溶質拡散係数が増大する結果が得られた。溶質拡散係数の温度依存性は、アレニウス式によって表現可能であることが分かった。

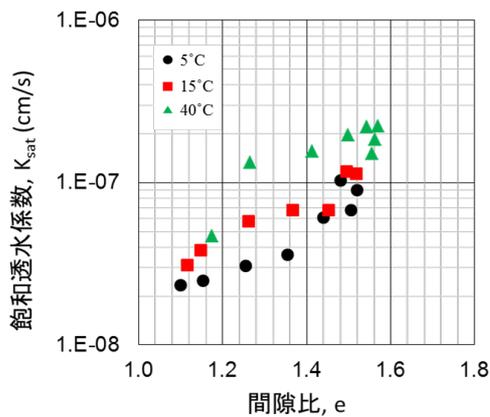


図 3. 温度変化が透水係数に与える影響

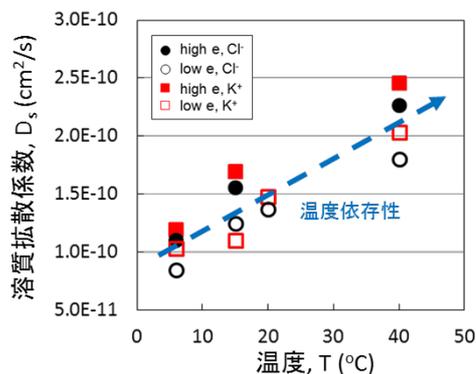


図 4. 温度変化が溶質拡散係数に与える影響

埼玉県内荒川低地沖積粘土を用いた実験の結果、土性の違いが溶質分散特性(溶質分散係数)に与える影響は大きく、粘性質で間隙率の大きい試料程低分散性を示した。温度変化による影響は小さいものの、一部の試料で温度上昇に伴い分散長は増加する傾向が見られた。温度上昇による水の粘性係数低下により、より微細間隙への流体移動が促進された可能性が挙げられるものの、現象解明に向けたさらなる追加実験が必要と考えられる。また、溶質移動試験から得られる遅延係数については温度上昇により低下する結果が得られた。

本研究により、温度環境が地盤内の物質動態・力学特性に与える影響に関する貴重な基礎的データが得られた。透水係数や溶質拡散係数については、既存のモデルを用いて温度環境を考慮した予測モデルの構築が可能であることを示した。一方で、その他の物質輸送および力学パラメータの予測モデル構築。さらに予測モデルを用いて GHP 導入サイトにおける環境影響を行うためには、各種パラメータの温度依存性に関する更なる実験データの蓄積が必要である。

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 8 件)

1. Mon, E. E., S. Hamamoto, K. Kawamoto, T. Komatsu, and P. Møldrup. 2013. Temperature effects on geotechnical properties of kaolin clay: Simultaneous measurements of consolidation characteristics, shear stiffness, and permeability using a modified oedometer. Journal on Geological and Earth Sciences, 1, 1-10, 2013. (査読有)
2. Mon, E. E., S. Hamamoto, K. Kawamoto, M. Oda, and T. Komatsu. 2013. Effect of temperature change on shear modulus of kaolin clay in the secondary compression stage. 18th Southeast Asian Geotechnical & Inaugural AGSSEA Conference, 29-31. (査読有)
3. 鴨志田剛久, 濱本昌一郎, 川本健, 榊利博, 小松登志子. 2013. 異なる水分条件を有する砂の熱特性: 粒子の粒径・形状, および石英含有率の影響, 土壌の物理性, 11, 11-16, 2013. (査読有)
4. Mon, E. E., S. Hamamoto, T. Saito, K. Kawamoto, and T. Komatsu, 2012. Thermo-mechanical characteristics of a clay. Proceedings of Annual International Conference on Geological and Earth Sciences, 78-81. (査読有)
5. Hamamoto, S., P. Møldrup, K. Kawamoto, T. Komatsu. 2012. Maxwell's Law Based Models for Liquid and Gas Phase Diffusivities in Variably-Saturated Soil. Soil

- Sci. Soc. Am. J., 76: 1509-1517. (査読有)
6. 齋藤広隆, 濱本昌一郎, 小松登志子, 2012. 地中熱利用と地盤環境, 農業機械学会誌, 74: 1-6. (査読有)
 7. Mon, E. E., A. Sharma, K. Kawamoto, S. Hamamoto, T. Komatsu, S. Hiradate, and P. Moldrup. 2012. The pH dependency of 2,4-D adsorption and desorption in Andosol and kaolinite, Soil Sci. 177:12-21 (査読有)
 8. Dissanayaka, S., S. Hamamoto, K. Kawamoto, T. Komatsu, and P. Moldrup. 2012. Thermal properties for peaty soils under variable saturation: Effects of the liquid phase impedance factor and volume shrinkage, Vadose Zone Journal. doi: 10.2136 /vzj2011.0092. (査読有)

〔学会発表〕(計 8 件)

1. 有原萌恵, 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 地盤内の溶質分散特性の温度依存性に関する研究, 第 10 回地盤工学会関東支部発表会 Geo Kanto, 東京, 平成 25 年 10 月 4 日.
2. 濱本昌一郎, 齋藤健志, 植木崇, 立石佳祐, 松倉重雄, 小松登志子, 地盤への熱負荷が地温・地下水質に与える影響, 第 10 回環境地盤工学シンポジウム, 東京, 平成 25 年 9 月 17 日.
3. 新屋陽理, Ei Ei Mon, 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 二次圧密時の温度変化が粘土の圧密特性およびせん断剛性に与える影響, 第 48 回地盤工学会研究発表会, 富山, 平成 25 年 7 月 25 日
4. 有原萌恵, 濱本昌一郎, 川本健, 小松登志子, 温度変化が地盤内の溶質分散特性に与える影響, 第 19 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会, 埼玉, 平成 25 年 6 月 13 日.
5. Mon, E. E., S. Hamamoto, K. Kawamoto, M. Oda, and T. Komatsu. Effect of temperature change on shear modulus of kaolin clay in the secondary compression stage. 18th Southeast Asian Geotechnical & Inaugural AGSSEA Conference. Singapore. 平成 25 年 5 月 29 日
6. Mon, E., S. Hamamoto, K. Kawamoto, T. Komatsu, and P. Moldrup, Temperature effects on the solute diffusion process in kaolin clay, 日本地球惑星科学連合大会, 幕張, 平成 25 年 5 月 20 日
7. Mon, E. E., S. Hamamoto, T. Saito, K. Kawamoto, and T. Komatsu, Thermo-mechanical characteristics of a clay. Annual International Conference on Geological and Earth Sciences. 2012. Hotel Fort Canning, Singapore. 平成 24 年 12 月 3 日
8. Mon, E.E., 濱本昌一郎, 齋藤健志, 川本健, 小松登志子, Temperature effects on hydro-mechanical characteristics of Kaolinite.

日本地球惑星連合大会, 幕張. 平成 24 年 5 月 20 日.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等
無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

濱本 昌一郎 (HAMAMOTO SHOICHIRO)
東京大学・農学生命科学研究科・助教
研究者番号: 30581946