

(続紙 1)

京都大学	博士 (地球環境学)	氏名	小河篤史
論文題目	地中の温度変化が粘土の物理化学特性に及ぼす影響とその社会基盤整備への活用に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>近年、脱炭素社会の実現に向けた再生可能エネルギーの活用促進を受け、地中熱の活用が注目されている。地中熱利用にともなう採熱や蓄熱によって地中の温度に変化が生じることが考えられるが、地盤に温度変化が生じた際の挙動に関しては十分な知見が得られていないのが現状である。一方、温度効果を取り入れて地盤改良技術の高度化や効率化を図る取り組みが進められていることや、地球温暖化に伴う表層地盤温度の上昇が指摘されていることから、温度変化が地盤の物理化学特性に及ぼす影響を明らかにすることの重要性が高まっている。そこで、本研究では温度効果を利用した圧密促進工法に着目し、その社会実装を想定しながら、温度が粘土の物理化学特性に与える影響及び再生可能エネルギーを利用した地盤加熱方法の可能性を迫及した。本論文は6つの章で構成されており、以下に各章の内容を示す。</p> <p>第1章では、研究背景と目的を説明している。脱炭素社会の実現に向けた地中熱利用の促進等の影響を受けて地中の温度に変化が生じやすい環境が醸成されつつあることから、地盤と熱との相互作用を検討することの重要性を述べている。また、温度効果を取り入れた地盤改良技術の高度化や効率化に関する取り組みが進められる中で、経済的な地盤加熱方法の開発が望まれていることを説明している。</p> <p>第2章では、文献調査よりこれまでに得られた知見と課題を示している。まず、圧密と温度の関係についての既往研究を引用し、圧密沈下量や圧密係数は温度変化の影響を受けて変化することを示したうえで、その温度効果は材料依存性が確認されているものの、材料依存性の主要因の特定や一般化には至っていないことを指摘している。一方、我が国には自然由来の重金属等を含む地盤が広く分布していることから、地盤の温度変化によって有害物質が拡散される可能性を示しており、温度変化に起因する地盤の物理化学的な挙動を明らかにすることが、地中熱利用の促進に繋がることを論じている。</p> <p>第3章では、複数種類の工業粘土と自然粘土に対し、異なる温度条件でコンシステンシー試験と圧密試験を実施し、温度が及ぼす影響及びその材料依存性を確認しており、その結果、液性限界の温度依存性は材料によって異なる可能性を指摘している。温度依存性の要因としては、間隙水の粘性係数以外に、粘土に含まれるスメクタイト含有量が影響している可能性を述べ、膨潤性粘土では温度が50°C以上になるとその影響が顕著になることを述べている。圧密試験では、体積変化と温度の関係には明確な傾向が確認されなかった一方、圧密係数の温度依存性は顕著であり、昇温にともなって圧密係数が増大することを確認している。これは、温度上昇に起因して間隙水の粘性が</p>			

低下した結果であり、温度変化に起因する圧密係数の変化率は間隙水の粘性の変化率と概ね等しいことを明らかにした。また、圧密係数は活性度と相関がみられ、種類の異なる粘土であっても、活性度から圧密係数を予測し得ることを示している。さらに、粘土の間隙水が炭酸カルシウム溶液及び人工海水の場合は、蒸留水よりも圧密係数が低下するが、これは間隙水中の2価の陽イオンが粘土粒子を凝集するためと考えられることから、沿岸部と内陸部では温度や上載荷重等の条件が同じであっても圧密速度が異なる可能性があることを明らかにしている。

第4章では、自然由来の重金属等含有土壌が原位置で温度変化を受ける場合を想定し、異なる温度条件で拡散溶出試験を実施して拡散溶出特性に及ぼす温度の影響を評価している。その結果、粘土供試体に含まれる重金属の溶媒側への拡散移動は温度が高くなるほど促進されることを明らかにしている。さらに、溶出フラックスの温度依存性には、供試体の間隙率、間隙水の粘性、物質の初期濃度が関係し、このうち間隙水の粘性の影響が支配的であることを、実験によって示している。さらに、供試体作製時の間隙水の水質を評価したところ、温度が高いほど間隙水に含まれる物質の初期濃度が高くなることが確認されたことから、拡散係数を設定する際には、初期濃度の温度依存性も考慮することで、実地盤における拡散による物質移動をより精緻に評価しうる可能性を指摘している。これらの検討結果に基づき、帯水層に接する粘土地盤が温度変化を受けた際の、粘土地盤から帯水層への拡散による物質移動を評価する際の留意事項を整理して、実務的な解釈を与えている。

第5章では、再生可能エネルギーである太陽熱を活用した地盤加温技術の適用可能性を検証するため、太陽熱温水器を利用した屋外地盤加温実験を、1.5メートル四方の鋼製土槽に充填した軟弱粘土に対して行っている。実験の結果から、同加温技術は対象地盤の温度を周辺地盤に比べて季節を問わず10～15°C上昇しうることを明らかにしている。また、熱源配置間隔を適切に設定することで、熱源に囲まれた範囲の地盤を一様に加熱できることを明らかにしている。ここで得られた加温結果と第3章で得られた圧密係数の温度依存性を考慮し、加温圧密促進工法の適用性について議論し、加温圧密は適用条件によっては既存の圧密促進工法と同等の効果を得ることができることを示すとともに、その際に目安となる費用対効果を論じている。さらに、加温圧密工法の付加価値向上のための機能拡張についても紹介しており、圧密完了後、加温に用いた熱源を熱交換器として利用することでライフサイクルコストに優れた工法になり得ることを述べている。

第6章では、上記の結果を総括し、得られた成果と今後の展開について述べている。本研究で得られた成果は、粘土地盤の温度変化に起因して生じる諸現象を明らかにしており、今後の地中熱活用の促進や温度効果を利用した新しい地盤改良技術の開発に寄与することが期待されると結論づけている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

近年、脱炭素社会の実現に向け、地中蓄熱や温度圧密等の再生可能エネルギーを活用した地盤技術の開発が積極的に行われており、温度変化が地盤の物理化学特性に及ぼす影響の解明は喫緊の課題となっている。本論文は、温度効果を利用した圧密促進工法に着目し、その社会実装を想定しながら、温度が粘土の構造と溶出挙動に与える影響を評価するとともに、再生可能エネルギーを利用した地盤加熱方法の可能性を論じている。また、得られた成果に基づき、提案する地盤加温技術の社会基盤整備への適用性を検証している。本研究によって得られた主な成果は以下のとおりである。

第一に、粘土の種類によらず間隙水の粘性係数と単位体積重量の変化によって圧密速度の温度依存性を整理できること、粘土の活性度と圧密係数に良好な相関があることを、実験的に明らかにした。これらの成果は、評価に時間を要する粘土の圧密特性とその温度依存性を、簡便な室内試験で比較的容易に予測しうることを示唆するものであり、学術的意義が極めて高い。さらに、間隙水質の違いによって圧密係数に差があることを明らかにしており、沿岸部と内陸部では温度圧密の効果に違いがある可能性を初めて述べており、実務的にも意義深い。

第二に、粘土からの重金属等の拡散溶出の温度依存性を明らかにした。我が国には自然的原因で重金属等を含有する地質が広く分布しており、溶出特性と温度の関係を明らかにしたことは今後の地中熱利用の普及を図る上で有意義である。これまで、掘削した土砂の溶出特性に与える温度の影響に関する検討事例はあるものの、未掘削の地下を対象とした濃度勾配による拡散輸送の評価事例は過去に無く、学術的な価値は高い。さらに、溶出フラックスや拡散係数の温度依存性にも言及しており、地盤加温時のリスク評価の考え方を定量的に取りまとめた点も価値がある。

第三に、地盤加温のために再生可能エネルギーである太陽熱を用いた新しい地盤加温技術を提案している。本論文では、太陽熱を用いた地盤加温実験を約1年にわたり実施し、その適用性を検証した点に新規性がある。実験の結果、太陽熱を利用することで、季節に関わらず地盤温度を非加熱の状態よりも10～15°C程度高めうることを示した。得られた結果は、土壌汚染の浄化処理の高度化など、様々な地盤環境技術への応用も期待でき、地盤改良技術の発展に寄与するものと評価できる。

以上の成果より、本論文は温度変化が地盤の物理化学特性に及ぼす影響とその活用に関する科学的知見を示しており、学術的・社会的意義は大きく、地球環境学の発展に大きく寄与した。よって、本論文は博士（地球環境学）の学位論文として価値あるものと認められる。また、令和4年2月10日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公開可能日：令和4年 10月 1日以降