

氏名	RANGGA ADIPRIMA SUDISMAN
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 1045 号
学位授与年月日	平成 28 年 9 月 23 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	Experimental Study on the Freezing of Sands and Soft Rocks: Investigation on the Thermo-Hydro-Mechanical Problems (砂及び軟岩の凍結挙動に関する実験的研究：熱・応力・浸透問題としての検討)
論文審査委員	委員長 准教授 長田 昌彦 委員 教授 桑野 二郎 委員 准教授 山辺 正 委員 教授 川本 健

論文の内容の要旨

This study focuses on two main issues; the development of freezing pipe experiment method and the investigation of several rock types under freeze-thawing condition. Both issues are very important and closely related with the artificial freezing ground projects, especially for the freezing of ground with high velocity of seepage flow. Those two issues were investigated by two different experimental approaches. The first experiment focuses on the thermal-flow relation approach and the second experiment focuses on the strain-strength relation approach. Based on the results of these two experiments, a new freezing-flow-deformation experimental design is proposed to simulate the comprehensive thermal-flow-deformation mechanism of sand in freezing condition.

The first experimental study focuses on the flow-thermal relation and the visual observation of heat distribution around a freezing pipe in sand with seepage flow. This experiment aims to understand the effect of seepage flow on the heat transfer behavior and frozen body development in sand under freezing condition due to a vertically buried cooling pipe. Conversely, it also simulates the effect of freezing to the behavior of seepage flow. The method of this experiment combines a head elevation pressure flow test, cooling or freezing processes initiated by the coolant-circulation pipe, and the visual observations of temperature profiles of sand as the heat-transfer medium by infra-red thermograph camera. This method is effective to visualize the thermal distribution during cooling and freezing process and characterize it based on different determining factors and mainly flow conditions. The flow-thermal relation that is obtained from this experiment gives information on how the ice formation reduces flow rate, and reciprocally how the high velocity of water flow prevents the ice formation. From these thermal-flow experiments, it can be concluded that the thermal distribution, freezing effectiveness, and the duration of ice fusion are highly affected by the seepage flow.

The second experimental study focuses on the strain and strength characteristic of soft rock samples under a freeze-thaw cycle through freezing bath submersion experiment. Freezing bath submersion experiment is effective to investigate the thermal-strain relationship of the core rock samples during freezing and thawing in no mechanical loading

regime. Strains of the dry samples are fully caused by the thermal expansion or shrinkage that is governed by their respective material properties. Strains of the wet samples are caused by the combination of the material's thermal properties and the freezing expansion of water inside the pores. The characteristics of strain are confirmed with the results of tensile strength tests. From these strength and strain experiments, it can be concluded that moisture content is one of the most important factors that affects the freeze-thaw deformation characteristic of soft rocks, especially on the strain magnitude and the residual deformation. However, it is difficult to compare the strain-strength characteristic based on rock types and freezing intensity by only conducting a single test on each sample type and condition. In order to obtain the convincing results, the test on more number of specimens for each rock type on each test condition is recommended. Besides, more freeze-thaw cycle is necessary to provide better information on the deterioration process.

In the actual artificial freezing ground project, three physical mechanisms of hydro-thermo-mechanical processes may occur simultaneously. A laboratory experimental method should be able to simulate those sophisticated mechanism that occurs in the real field, and the two experiments those have been conducted and the proposed new design in this study shows that potential. Combination of thermal-flow-deformation observation in a single experiment can be approached based on the methods introduced in this study. The use of 3D Laser Scanner has a great potential to help the research advancement in many laboratory-scale experiment with deformation related topics including freezing deformation topic. It may be able to observe the comprehensive surface deformation on freezing pipe-ground system, not limited only to the sample. Therefore, for the further studies, it is important to investigate the effect of high velocity moving moisture on the deformation characteristic of porous media under freezing and thawing condition. Besides, investigating the effect of seepage flow on the freeze-thaw induced deformation of porous material is also important.

論文の審査結果の要旨

本学位論文審査委員会は、平成 28 年 7 月 27 日に論文発表会を開催し、申請者による発表、質疑応答および論文内容の審査を実施した。発表内容を含む本学位論文審査結果についての概要は以下のとおりである。

福島第一原子力発電所の汚染地下水の漏洩対策として、地盤凍結工法が採用されている。地盤凍結工法は、これまで軟弱地盤等、施工が困難な箇所を補強するための一時的な補助工法として採用されてきたため、長期にわたって稼働させた例がないのが現状である。したがって、長期にわたり本工法を活用しようとした場合、これまではあまり勘案されてこなかった事象への対応が必要になると考えらえる。一方で、液化石油ガス (LPG) の地下貯蔵などのプロジェクトや寒冷地における岩石材料の利用に関連して、硬岩から軟岩に至る幅広い範囲における岩石の熱的性質が研究されている。福島の汚染地下水問題は、表層土から堆積軟岩で構成される地盤構成の中で発生しており、これまでに蓄積された地盤凍結工法のノウハウと、長期的な検討のなされている低温下での岩石の熱的性質の両方を考慮することで、大きな社会問題である汚染地下水問題に貢献しようとするものである。本学位論文では、特に地下水流動がある中での地盤・岩盤の凍結挙動を実験的に評価するとともに、理解しにくい地下での凍結挙動を視覚的に表現することを考慮して研究計画が立てられている。

第 1 章では、研究の背景と目的、関連する理論と既往の研究について記述している。高緯度地域に現在も存在している永久凍土に関する情報、地盤凍結工法の概要、福島第一原子力発電所の汚染地下水問題の概要が記載され、これらを踏まえて凍結現象を熱・応力・浸透の連成問題として捉えて全体としての研究計画を立てるとともに、本学位論文で取り扱う範囲を明示している。

第 2 章では、地下水流動の効果を検討しうるように設計した凍結試験装置（自作）の紹介とそれを用いた計測方法の概要が記述されている。凍結挙動を視覚的に表現するために、地盤モデルを薄層とし、側面から赤外線カメラを用いて凍結管（自作）周りの温度分布が観察できるように工夫されている。また水位を変化させることにより、薄層の中を地下水が流れる速さをコントロールしうるシステムを構築している。また開発した装置の検証を兼ねて、流速と凍結管の埋設深さをパラメータとして冷水を循環した場合の側面温度の経時変化が示されており、開発した装置と試験方法により、地下水流速による温度場の 2 次元的变化を取得しうることを示した。

第 3 章では、凍結管内に -20°C に設定したブライン溶液を循環し、凍結管周りの凍結域の形成を第 2 章で説明した方法で観察した結果を記述している。流れのない場合、本装置を用いて凍結管周りに凍結域が形成され、それが上下方向に連続して形成されて上流側と下流側が完全に閉塞されたことを確認している。これに対して、早い流速が存在している場合には完全な閉塞は確認されず、流速の凍結に与える影響が大きいことが示された。このことは、側面の 2 次元温度分布が最低温度到達後も非対称性、すなわち流動が生じていることを示していることから明らかであるとしている。

第 4 章では、ここまで均質な地盤を想定して地下水を流動させてきたのに対して、地盤内に透水性の高い領域が存在している場合の結果について記述している。実際の地盤では、割れ目や高透水ゾーンを介して地

下水が流れていると考えられており、それを模擬した試験である。ここでは粒径の異なる砂を用いてこれを模擬している。また地盤内にシース管付きの温度計を埋設することにより、試料中心での温度が評価できるように試験システムを改善している。これにより、凍結領域が形成される段階において、少し離れた場においても潜熱の放出による温度上昇が確認された。またこの温度上昇は側面での計測においても観測しうることが補足的に示された。高透水ゾーンの影響もまた側面での温度分布によって明確に捉えられ、流速の差異が凍結領域の形成に大きな影響を与えていることが定量的に示された。

第5章では、凍結管周りの冷却と凍結過程を有限要素法による数値シミュレーションで検討している。解析モデルは凍結管を切る2次元断面として、凍結に伴う流速の増加と側面で温度分布を計測することの妥当性について考察を加えている。その結果、数値解析結果は上述の実験結果と整合的であること、また側面での温度分布計測は凡そ試料中心の挙動を忠実に表現していると考えてよいことが示された。

第6章では、各種岩石に対する凍結融解の強度・変形特性への影響について纏められている。ここでの凍結融解試験は、温度計とひずみゲージを取り付けた試料を0℃以下に設定した溶液の中に直接浸漬させる方法で実施している。用いた試料は白浜砂岩、来待砂岩、凝灰岩、花崗岩、石灰岩レンガ、モルタル、ALC(Autoclaved Lightweight Concrete)の7種類であり、それぞれ乾燥、湿潤状態における凍結融解挙動とその後の強度特性の変化について記載している。凍結融解試験より、それぞれの試料における線膨張係数が見積もられたほか、その変形過程は異方的であることが示されている。乾燥試料と湿潤試料の比較では、間隙水の存在と量(間隙率)が変形挙動に大きく影響していることが示された。特に間隙率が大きい試料では、潜熱の放出と吸収の段階が顕著に現れるほか、ひずみ挙動にも違いが現れる。間隙水の凍結が支配的であることを示していると考えられる。圧裂引張強さによる強度特性の比較では、凍結温度が低いほど強度低下が大きいことが示された。

第7章では、地盤の凍結に伴う地表面変形の影響を調べるための装置設計について記述している。福島第一原子力発電所の凍土壁が完成すれば、複数年にわたる稼動が予定されている。地表付近の地下水温は季節変動することが知られており、地下水温の季節変動は凍土壁の周辺での凍結融解現象を生じる可能性が十分にある。このような繰り返し地盤の沈下や凍上を引き起こす可能性もあるため、第2章から第4章に記述した試験装置をスケールアップし、3Dレーザーを用いて変形場を取得する装置を提案した。時間的な制約から未だ論文発表に至る成果は得られていないが、その可能性を示したことは評価に値する。

第8章で、研究成果を取りまとめ、今後の課題を示している。

以上のように、本学位論文は、福島第一原子力発電所の汚染地下水問題への貢献を1つのモチベーションとして、地盤・岩盤の凍結融解挙動の評価と視覚化に実験的に取り組んだものである。全体の研究計画の中の位置づけとしては初期段階にあたるもので、その意味では十分な成果と今後の展望を示したと評価できる。よって論文審査委員会は本論文を博士(工学)の学位論文として価値あるものと認め、合格と判定した。

なお、本論文の内容は、2章と5章の内容を併せて国際学術雑誌 Journal of Cold Regions Engineering に掲載決定しており、第3、4章の内容を同国際学術雑誌に投稿している(査読中)。また6章の内容は、国際プロシーディングス論文 Proceeding of ISRM Congress 2015 に一部が発表され、Proceeding of 9th Asian Rock Mechanics Symposium 2016 で一部が発表予定である。