

平成 29 年 4 月 24 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14025

研究課題名(和文)凍結土・常温土力学のシームレス化に向けた三相系熱土質力学の新たな展開と実証

研究課題名(英文) New development and validation of three-phase thermomechanics of soils explaining frozen-unfrozen transition behaviour

研究代表者

西村 聡 (Nishimura, Satoshi)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70470127

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：有効応力原理や多元応力記述を拡張し、各種の熱力学的要件と連成調和させる形で、凍結土および非凍結土の挙動をシームレスに扱う合理的な力学記述の提案を行った。根拠となる実験データを得るために、対象を2物質3相系(土・液相水・固相水)に限定したうえで、一連の熱-圧力連成力学試験および凍結土の物理試験を行った。粘土・砂など異なる地盤材料に対し、高圧下での融解による強度減少、低圧下での強度の拘束圧依存性など、凍結土の特徴を合理的に説明できるモデル化理論を示すに至った。この枠組みは、連成シミュレータの開発を通して人工凍結工法の高度化や寒冷地自然災害評価の土台になるものである。

研究成果の概要(英文)：A theory was proposed by which mechanical behaviour of soils at frozen, unfrozen and transitional states is described rationally and seamlessly, by coupling the principle of effective stress, thermodynamic equations, and other physical requirements. A suite of laboratory thermomechanical and physical experiments was conducted by focusing on a two-material, three-phase soil system (soil particles, liquid water and ice). The modelling theory systematically explains some characteristic features of frozen soil behaviour, such as the strength degradation by pressure-melting, apparent confining stress-dependency of the strength, etc., seen in clays and sands. This theoretical framework will allow developing a coupled simulator for advanced prediction of artificial ground freezing impacts and assessing cold-region natural disasters.

研究分野：土質力学

キーワード：凍結土 強度 変形特性 地盤凍結 室内土質試験

### 1. 研究開始当初の背景

土の凍結・融解は、多くの建設過程(トンネル/チルドパイプライン施工・一部の LNG タンク・汚染遮水地下凍土壁など)や高緯度地域の地表過程において、支配的な現象である。しかし、ロシア・北欧・カナダなどの高緯度諸国での研究により、地盤凍結の物理学や凍結土の特性については多くの知見が得られているものの、有効応力に基づく現代の「常温」土質力学にスムーズに連結する統一的な力学的記述法は確立されていない。凍結土は、非凍結の常温土に対して、「同じ土の違う状態」ではなく、異なる土質定数を持ち、全応力で記述する「異なる物質」として扱われるのが通常である。学術的にも、9割の論文は全応力に基づき凍結土を議論している。一方、多くの問題では凍結・融解現象は非定常であり、凍結土と常温土の境界は絶えず変動する。その際、空隙物質の遷移的相変化を通して土の力学特性が連続的に変化する過程を記述する方法がないため、連成支配方程式やソルバーが整備されても、例えば春季の地盤変状(斜面や河岸)や凍結工法に伴う地盤の不可逆変形といった多くの問題は合理的に予測解析する術がない。この状況は研究開始当初も現在も同様である。

### 2. 研究の目的

本研究は上記の背景に鑑み、申請書が過去に提案した凍結土の新しい力学的フレームワークの素案(Nishimura et al., 2009)とその工学的応用の展望(Nishimura et al., 2013)を再訪し、凍結土の力学的記述を常温土質力学にシームレスに連結することを目指したものである。そのための具体的な目標として、以下を設けた。

(1)全応力・空隙液体圧・空隙氷圧を考慮した多元的応力記述フレームワークを構築する。不飽和土力学の2応力変数(基底応力・サクション)記述にインスピレーションを受けた新しいアプローチにより、各種熱力学的要件を自然に満足する記述枠組みを構築する。

(2)温度 - 圧力 - 空隙圧(-ひずみ速度)制御室内試験により上記のフレームワークを実証する。多元変数を制御する高度な室内試験で土の挙動を体系的に観察する。

(3)上記に基づく、シンプルな常温域・遷移域・凍結域統一の数値モデルを提案・例示する。空隙比や過圧密比など「状態」概念を取り入れた具体的な数値モデルを提案し、多元物理法則(i.e. 熱・水理・力)を満たしながら常温土モデル(例えば Mohr-Coulomb や Cam Clay)に漸近する記述を例示する。ただし、本研究では対象を2物質3相系(土・液相水・固相水)に限定し、空隙空気が存在する状況の考慮はその先の課題とする。

### 3. 研究の方法

まず、提案する力学的モデル化アプローチ

の構想と理論的背景を再整理し、研究参画者(分担者・学生)と共有するとともに、北海道大学・苫小牧高専の装置を改変し、T(温度)-p(全応力)- $p_l$ (空隙液体圧)-ひずみ速度制御三軸試験などの特殊試験を安定的に行う設備を整備した。凍結した試料の変形を正確に計測するため、 $-15^{\circ}\text{C}$ で作動する局所変位計を導入するなど、凍土の室内試験では画期的な手法も導入した(図-1)。笠岡粘土を土質試料として選択し、その凍結時・非凍結時挙動や力学パラメタの同定を2年間の研究期間を通して包括的に行った。具体的には、実験室では( )NMR(核磁気共鳴)を用いた、種々の温度・圧密応力に対する不凍水分量の計測、( )非凍結時の、限界状態定数を含む基本的な変形・強度パラメタの同定、( )種々の凍結前・凍結後圧力・温度・ひずみ速度の組み合わせによる凍結時変形特性・強度の定量化、( )せん断中に温度・ひずみ速度を任意に変化させた場合の変形応答の観察、を行った。その際、非凍結状態で圧密を行い、そのまま拘束圧下で急速凍結を行うことで、空隙水の内部移動を抑制し凍結試料の均一性を保つとともに、凍結試料のひずみ履歴が明確になるような新しい実験手法を考案し適用した(図-2)。この手法については、5節[雑誌論文]などに詳細に記した。

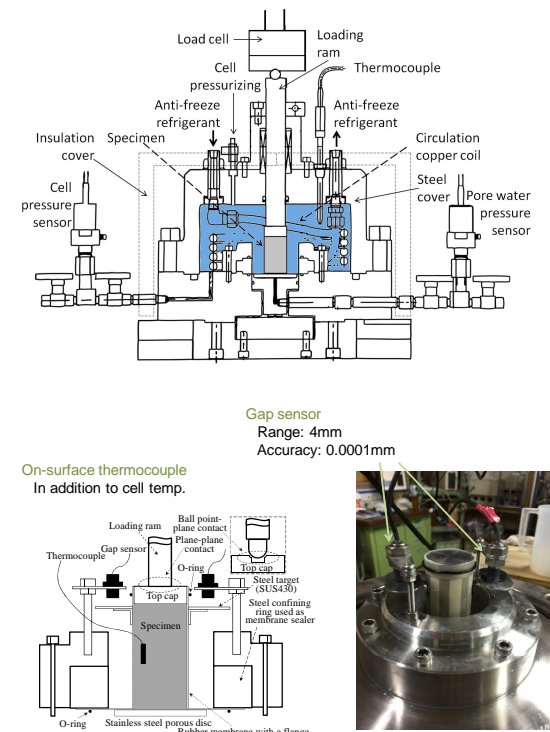


図-1 開発した局所変位計付凍結土 - 非凍結土三軸試験装置

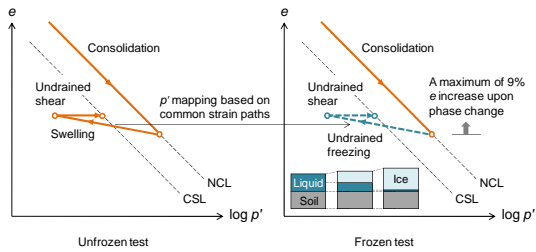


図-2 凍結 - 非凍結平行試験による凍結土中の有効応力の推定

実験的研究がある程度の進捗に示すにしたがい、それと並進する形で理論構築に着手した。Ladanyi & Morel (1990)の理論を採用し、凍結時/非凍結時の有効応力 - ひずみ経路関係の唯一性を仮定することで、凍結 - 非凍結平行試験(前述の( )と( ))から凍結試料中の有効応力と、その限界状態での値を推定し、実験結果の解釈を行った。これにより、凍土に対する限界状態線を定義した。これを Clausius - Clapeyron 則・不凍水曲線(水分保持関数)などの熱水理モデルと連成する形で、実験における力学状態変化を合理的に記述する方法やそのための応力空間を構築した。また、既往の文献に報告されている多数の試験結果を吟味・整理し、それに照らすことで上記理論の妥当性を検証した。この理論的研究については5節[学会発表]に詳しく記した。

#### 4. 研究成果

質の高い室内実験結果が十分な数量得られるとともに、理論構築も順調に進み、先掲の目的を概ね満たす成果が得られた。2年間という限られた研究期間であったため、種々の土質材料に対して体系的に実験を行い、理論を適用・検証することができなかつたため、今後もその作業を進めていく予定である。本助成期間中には、実験で扱った笠岡粘土のデータに加え、先述の通り、既往文献に見られる砂やその他の土質のデータを参照して理論の妥当性を概ね検証することができた。これらの成果は5節に掲げる発表論文等にそれぞれ詳しく記載されているが、以下に研究成果のハイライトを示す。

先述のLadanyi & Morel (1990)の理論にしたがい、凍結土中の有効応力として推定される量を横軸にとり、限界状態線を示したものが図-3である。凍結土の強度を全拘束応力に対して示すデータは従来より豊富に存在するが、土骨格応力のみ抽出して示した例はこれが初めてである。このデータは線形関数として定式化し、一連の物理式・関数(Clausius - Clapeyron 式、凍結曲線、土骨格圧縮曲線、多相ひずみ適合条件、Bishop 応力条件など)と連成することができる。この過程で、具体的なモデル化や仮定が必要となり、その妥当性については詳しい議論を5節の文献に記載した。そのような定式化の結果、凍結土が

有する特徴的な挙動の多くを合理的に記述できる枠組みが構築された。低温下での高強度や凍結前有効応力の影響などはもちろんのこと、凍結後の圧力付加による融解・強度減少なども自然な形で記述することができた(図-4・図-5)。また、これまでの実験的研究のほとんどは一定温度・一定ひずみ速度など定常条件下で実施されてきたが、本研究では変形の途中で温度やひずみ変化が任意に変化する際の応答を観察し、その時々々の応答が定常条件の実験から得られる応力 - ひずみ曲線群と一致することを示した(図-6)。この挙動は、 $e - de/dt - q - p' - s$ (間隙比 - 間隙比速度 - 偏差応力 - 有効応力 - サクシオン等価応力)空間において状態境界面を定義することで自然と記述できる。今後は「フレームワーク」から具体的な変形「モデル」の構築へと研究の軸足を移す予定である。

本研究の成果の意義としては、凍結土・非凍結土を統一的に扱うモデル化のプラットフォームを構築したことにより、ほとんどの実現象がそうであると考えられる凍結/非凍結境界が変動する境界値問題の厳密な数値解析が可能となったことが挙げられる。このような試みはNishimura et al. (2009)やその他の研究者により試みられていたが、定式化の妥当性は凍上試験など間隙水移動に関する試験のみによって検証されており、強度・剛性といった力学試験結果に照らして評価された試みはほとんどなかった。今回の研究はそのような検証を行ったのみならず、その具体的な道筋まで示すものであり、今後の凍結土の連成解析・実験を合理化するものと期待する。

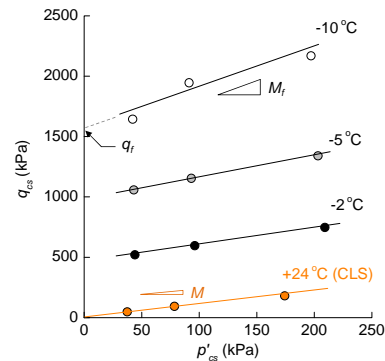


図-3 推定された有効応力に基づく凍結土の限界状態線(笠岡粘土)

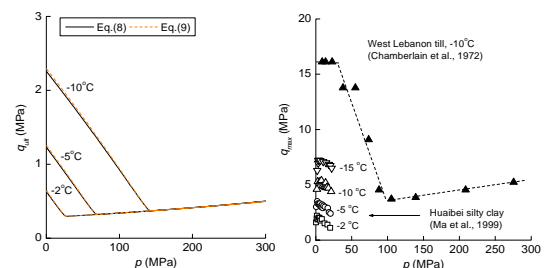


図-4 提案する定式化で再現可能な挙動例: 圧力融解による高压下での強度減少

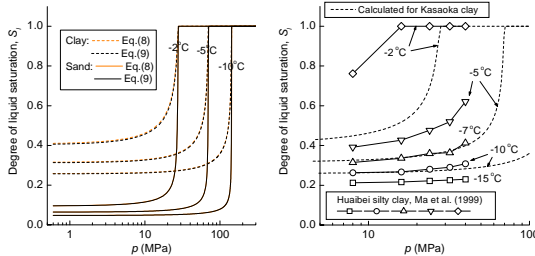


図-5 提案する定式化で再現可能な挙動例：高压下での間隙氷融解

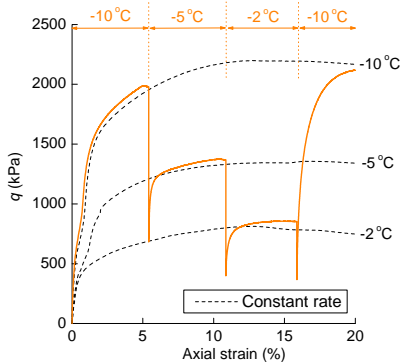


図-6 非定常温度下での凍結土のせん断挙動の例

#### <引用文献>

Nishimura, S. et al.: THM-coupled finite element analysis of frozen soil: formulation and application, *Geotechnique*, Vol.59, No.3 159-171, 2009.

Nishimura, S. et al.: Development of predictive framework for geothermal and geotechnical responses in cold regions under climate changes, *Proceedings of the 18th ICSMGE, Paris*, 3391-3394, 2013.

Ladanyi, B. and Morel, J.-F.: Effect of internal confinement on compression strength of frozen sand, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, No.1, 8-18, 1990.

#### 5. 主な発表論文等

##### 〔雑誌論文〕(計3件)

Wang, J., Nishimura, S. and Tokoro, T.: Interpretation of mechanical behavior of frozen clay through state concept, *Soils and Foundations*, 査読有り, Vol.51, No.2, 2017 (ページ未定)  
DOI:10.1016/j.sandf.2017.03.003

Wang, J. and Nishimura, S.: Interpretation of mechanical behavior of frozen clay through parallel tests of frozen and unfrozen soils, *JGS Special Publication*, 査読有り, Vol.5, No.2, 155-160, 2016.  
DOI:10.3208/jgssp.v05.042

Wang, J. and Nishimura, S.: Mechanical behavior of frozen clay under constant- and varying-temperature and strain rate shear, *JGS Special Publication*, 査読有り, Vol.1, No.2, 6-11, 2015.  
DOI:10.3208/jgssp.JPN-08

##### 〔学会発表〕(計7件)

西村 聡・王 金元・佐々木飛翔、一般的な応力・ひずみ履歴をもつ飽和凍結土のせん断強度とその記述、公益社団法人地盤工学会第52回地盤工学研究発表会、2017. 7月12~14日発表予定、名古屋国際会議場(愛知県・名古屋市)

西村 聡・王 金元・佐々木飛翔、THM連成解析における凍結土力学モデルのフレームワーク：温度・拘束圧効果について、公益社団法人地盤工学会第57回北海道支部技術報告会、2017. 2月3日、北見工業大学(北海道・北見市)

Wang, J. and Nishimura, S.: A new approach to interpret strength characteristics of frozen clay under effects of temperature, strain rate and confining pressure, *公益社団法人地盤工学会第51回地盤工学研究発表会*、2016. 9月15日、岡山大学(岡山県・岡山市)

Wang, J. and Nishimura, S.: Interpretation of mechanical behavior of frozen clay through parallel tests of frozen and unfrozen soils, *International Mini Symposium Chubu*, 2016. 5月25日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

Wang, J. and Nishimura, S.: Mechanical behavior of frozen clay under effects of temperature and strain rate, *公益社団法人地盤工学会第50回地盤工学研究発表会*、2015. 9月1日、北海道科学大学(北海道・札幌市)

Wang, J. and Nishimura, S.: Mechanical behavior of frozen clay under constant- and varying-temperature and strain rate shear, *6th Japan-China Geotechnical Symposium*, 2015. 8月31日、北海道科学大学(北海道・札幌市)

Nishimura, S.: Theme lecture on "Data interpretation and geotechnical imaging", *6th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, 2015. 11月16日、Buenos Aires (Argentina)

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

西村 聡 (NISHIMURA, Satoshi)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：7 0 4 7 0 1 2 7

### (2)研究分担者

所 哲也 (TOKORO, Tetsuya)

苫小牧工業高等専門学校・環境都市工学

科・助教

研究者番号：4 0 6 1 0 4 5 7