

平成 29 年 9 月 1 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289156

研究課題名(和文)凍土方式遮水壁における凍結融解を考慮した長期間安定管理技術の構築

研究課題名(英文) Study on long-term stable management of frozen earth wall considering freeze-thaw problem.

研究代表者

伊藤 謙 (ITO, Yuzuru)

摂南大学・理工学部・教授

研究者番号：30281752

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：福島第一原発において凍土遮水壁の建設されている地盤は砂質土と泥岩層からなり、大量の地下水が流れている。そこで、遮水壁が本当に完成可能であるか、完成後の凍土壁は十分な遮水性を有するのか、余震等で電源が喪失して凍土が融解した場合にはどうなるのか等の疑問が示されていた。

本研究において、これら3点について検討した結果、次のような結論が得られた。(1)従来用いられている限界流速の理論式と数値計算、モデル実験結果が良く一致した。(2)凍土の透水係数を精度よく測定できる実験方法を開発した。(3)凍結融解土の透水係数を新たに開発した実験装置で検討し、凍結融解土の透水係数の予測方法を提案できた。

研究成果の概要(英文)：In Fukushima 1st Nuclear Power Plant, the ice wall was planned to build over the ground with sandy soil and mud stone layers, in which a large quantity of ground water was flowing toward the Pacific Ocean. Therefore, many questions arise whether the ice wall can be completed, whether the frozen ground has small enough permeability and what will happen when frozen soil melts due to power supply lost.

As a result of the research, the following conclusion was obtained.(1) A prediction of limited ground water speed in the ice wall construction by the numerical computation accorded with the theoretical value, and, furthermore, they agreed with the result of the model experiment. (2) The experiment method that had high precision to measure a permeability of the frozen ground was developed. (3) A method to estimate the permeability of freeze-thawed soil was developed by the newly designed horizontal displacement restricted freeze-thaw test system.

研究分野：地盤工学

キーワード：土木環境システム 凍土 凍結融解土 透水係数

1. 研究開始当初の背景

東京電力(株)福島第一原子力発電所において大量に発生している汚染水は、廃炉計画における最も深刻な問題であり、その対策として凍土方式の遮水壁により原子炉建屋を周辺地下水から遮断する工法が実施されようとしている。本工法は世界でも前例が少なく、しかも現場は砂岩と泥岩との互層で大量の地下水流が存在するので遮水壁の完成が懸念される。また、完成後には遮水壁内側において原子炉建屋外への汚染水の漏洩を防ぎながら地下水位を低下させて行くという極めて厳しい管理が行われる予定である。

工事中は、さまざまな懸念を払拭すべく実証実験を行っているが、長期間凍土壁を維持する過程で問題となる凍土壁の透水性や泥岩の凍結融解による透水性変化等の課題について重層的に対応できているとは言えない。本研究は、凍土方式遮水壁で起こりうる諸問題に対応できる長期間の安定管理技術の構築を目指すものである。

2. 研究の目的

(1) 凍結融解土の透水性係数

泥岩や過圧密粘性土においては、凍結時にアイスレンズ(IL)と呼ばれる氷晶が幾層にも成長する。それは地盤における破断を意味し、凍結土が融解するとILの痕跡に水脈が発生し、その発生方向に透水性が高まるものと考えられる。また、凍土の成長期にはILと直交方向に収縮クラック(SC)が発生する。凍結融解土においては、このようにILだけでなくSCの存在も融解後の透水性に大きな影響を与えるものと考えられてきた。

図-1には凍結融解土の状況を示す。(a)は部分融解時の平面図であり、水流はIL痕方向であるが、融解が進むとIL直交方向も考えられる。(b)は完全融解時であり、水流はIL直交方向である。(c)は部分融解時に凍土壁を沿うように流れる水流と(a)のように凍土壁

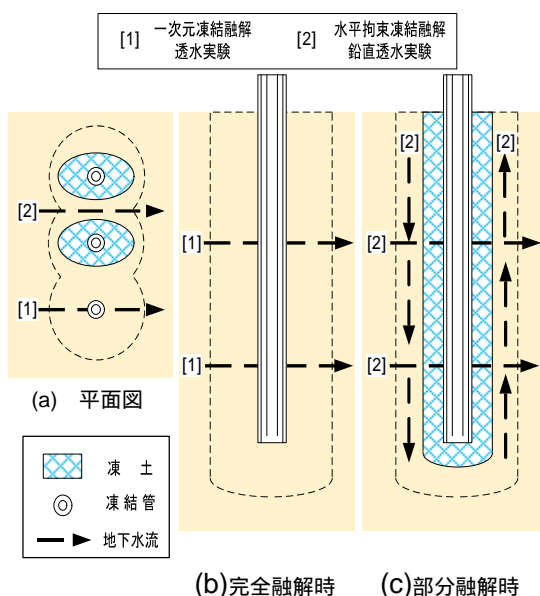


図-1 凍土壁周辺の融解時の水流

の隙間の水流を示す。そこで、このようなさまざまな融解状況における凍結融解土の透水係数を評価できる方法を検討しなければならない。

(2) 凍土の透水性係数

従来は凍土の透水性係数はゼロであると考えられてきた。しかし、今回の凍土遮水壁のように大規模で、停電などの事態が生じる場合には、融解に至らないまでも氷点下0近傍まで透水性が急激に上昇することが予想され、停電などによる凍土厚の減少と合わせて泥岩層の遮水性能の低下が懸念される。

凍土壁の長期間の安全運用のためには、凍土の透水性評価を行い、凍土壁内への地下水流入による汚染水の発生増加を考慮する必要がある。そこで凍土の透水性を評価するため、アイスレンズの成長を抑止した凍土透水試験を現地と類似の地盤材料に対して実施する必要がある。

(3) 凍土壁の成長と凍結融解地盤における地下水流入に関する数値計算モデルの開発

凍土壁造成時の様々な施工条件におけるより正確な限界流速の予測方法の提案を目指して、凍結管の設置条件の違いが限界流速に及ぼす影響について検討しなければならない。

次に、凍土壁完成後長期間にわたる凍土壁からの地下水流入と融解個所の流入・流出量の解析のために、複合物理場(構造、熱、流れ)における相変化を伴う連成数値解析方法の確立を行う。

3. 研究の方法

(1) 凍結融解土の透水性試験

凍結融解後の泥岩の透水性係数変化について、福島第一原発の地盤を構成する泥質層に類似した過圧密粘土試料等を用いて凍上試験と観察を実施する。定性的なメカニズムの解明として、三軸条件で凍上試験を実施し、凍上挙動とアイスレンズ発生状態の偏光顕微鏡観察により凍結融解後の透水性係数の変化を予測する。

凍結融解前後の透水試験では、従来の一次元凍結融解透水試験装置、三軸凍結融解凍結

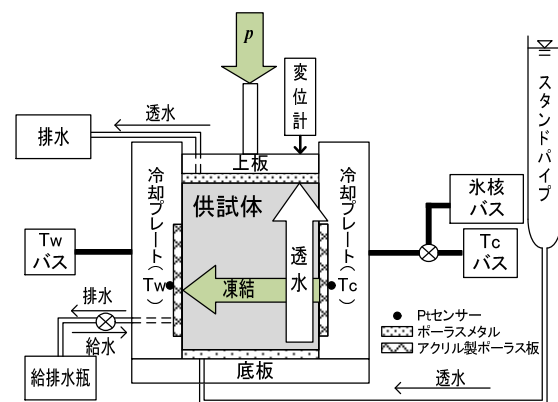


図-2 水平拘束凍結融解鉛直透水実験装置

試験に加えて、図-2 に示す新たに導入した水平変位拘束凍結融解鉛直透水試験装置から直接凍結融解前後の透水係数を求める。

(2) 凍土の透水試験

飽和細粒土が凍結する時、氷点下において液体状態の水分が存在することが知られている。これは不凍水と呼ばれ、土粒子の表面で膜状の構造を有する。不凍水の存在は凍上現象の発生要因でもあり、その不凍水量によって凍上量が影響を受ける。凍土は実質的に透水係数が 0 であると言われているが、0 付近の凍土では凍上現象の例からも明らか通り、一定の大きさの透水係数を有するものと考えられる。ところが、0 付近の凍土の透水係数は温度に敏感であり、正確に測定することは不可能であった。そこで、図-3 に示す特殊な実験装置を用いて、特に 0 付近の凍土の透水係数を求める。

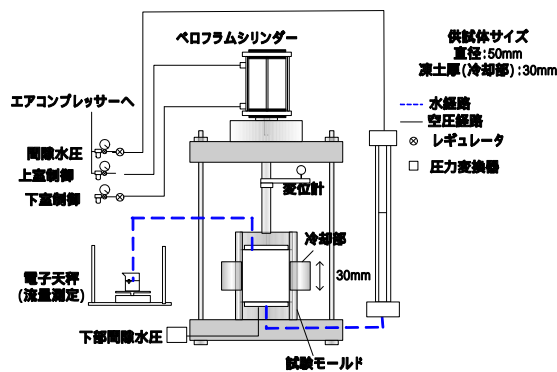


図-3 凍土の透水係数測定装置

(3)凍結融解・水流を受ける土の力学的劣化機構の数理モデル化と地盤の凍結融解・流水侵食複合型崩壊現象を解析可能な応力変形・熱伝導・浸透連成解析手法の開発

凍土壁造成時の様々な施工条件におけるより正確な限界流速の予測方法の提案を目指して、凍結管の設置条件の違いが限界流速に及ぼす影響について検討する。

このため、本研究では、まず理想的な設置条件での図-4 に示す模型実験とあわせて熱伝導・浸透連成 FEM 解析を行い、既往の理論式との整合性を確認した。解析では人工地盤凍結工法のデータに基づく地下水流下で

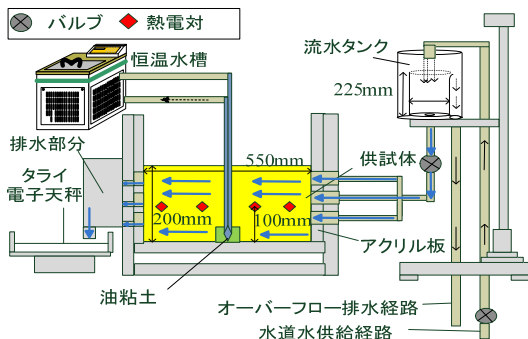


図-4 凍土遮水壁モデル実験装置

の円柱凍土成長に関する数値シミュレーションモデルを開発する。

これにより、既存の限界流速理論式の検証が可能となり、汎用の広域地下水流ソフト等と組み合わせ、連続凍土壁の可否の判定と凍土壁内の地下水圧上昇とそれに伴う盤膨れの検討も可能となる。

さらに、当該理論式が適用できない凍結管配置が複雑な条件（凍結管間隔が均一でない条件、および凍結管が前後にずれて設置された条件）での実験・解析を行う。

4. 研究成果

(1) 凍結融解土の透水係数

凍結融解土の透水係数を一次元凍結融解透水実験および水平変位を拘束した水平方向の凍結融解実験により検討を行った。

凍結融解土の透水係数は地盤の固結の程度ではなく、土被り圧等の上載圧力と凍結融解の方向のみに影響される。

つまり、凍結融解後の透水係数を実験的に予測するには、地盤から採取した試料土を再構成して、一次元凍結融解実験において対象地盤の土被り圧に相当する実験荷重下で凍結融解作用を与えた後に実施する透水試験から求めることができる。その際、供試体の固結の程度である予圧密荷重の影響は小さい。また、この時の凍結速度や温度勾配等の凍上率に影響を与える要因は凍結融解土の透水係数に影響を与えないことは、既往の研究で明らかにされている。

一次元凍結融解実験において得られる凍結融解土の透水係数は予測される下限の値である。これに対して、上限つまり危険側の値は、水平方向変位を拘束した状態で水平方向に凍結融解を行い、鉛直に透水試験を実施することで、凍結時に発生する間隙比分布の偏りの影響が現れた透水係数を求めることができる。

凍結融解土の透水係数変化は土被り圧が一定の値よりも大きい場合には無視できる。

土の間隙比と透水係数の関係は凍結融解前後においてそれぞれ独立しているこ

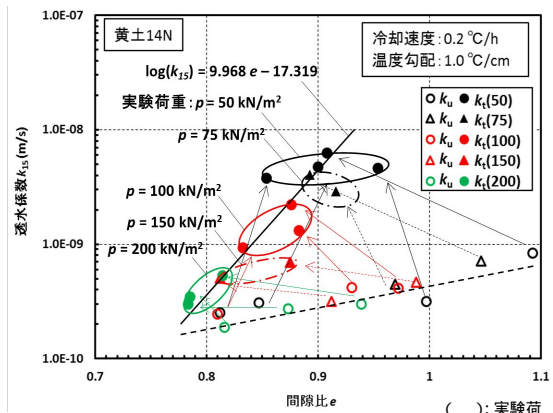


図-5 一次元凍結融解における間隙比と透水係数

とが確認された。(図-5)

## (2) 凍土の透水係数

研究分担者により開発された凍土透水試験法に則り、アイスレンズの発生を許容しない条件下で凍土透水試験を実施した。さらにパルス NMR で計測した不凍水含水比と透水試験の結果を用い、凍土の間隙比を推算し、凍土の透水性に及ぼす影響を検討した。

凍土内に水流が存在し、ダルシーの法則に従っていることが確認された。

凍土透水係数は温度依存性があり、その値は常温と比較すると低い、その低下量は試料の種類と温度によって異なる。凍土透水係数は、間隙中に存在する不凍水の存在比(有効間隙比)に依存している。(図-6)

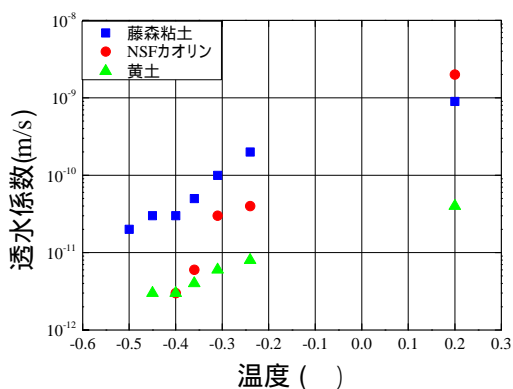


図-6 凍土の透水係数

## (3) 限界流速の数値解析と実験結果

凍結管の設置条件に依らず擬似連成解析の解析結果と模型試験の実験結果から得られた限界流速は概ね一致する。他方、既往の理論式の予測値と実験結果の限界流速には、無視できない誤差が認められる。(図-7)

凍結管間隔が不均一な場合、最大凍結管間隔が同じでも凍結管配置により限界流速に違いが出る。他方、凍結管が前後にずれる場合、上流側か下流側にずれるかで限界流速に差が生じる。

凍結管間隔が不均一な場合の方が、凍結管が前後にずれる場合に比べ、既往の理論式の限界流速の予測誤差は大きくなる。凍結

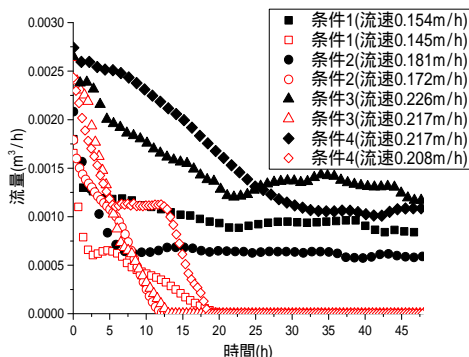


図-7 限界動水勾配

管が前後にずれる場合については、凍結管設置間隔と前後ずれの比を考慮すれば、理論式を補正可能である。

## 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 5 件)

廣瀬剛・伊藤讓：凍結融解作用による透水係数の変化とアイスレンズの痕跡との関係、材料、2018。(掲載予定)

廣瀬剛・伊藤讓・石川達也・赤川敏：凍結融解土の透水係数の実験的予測方法、土木学会論文集 C 分冊、73 巻、2 号、pp.131-140、2017。

廣瀬剛・伊藤讓：飽和細粒土の凍結融解によるアイスレンズ方向の透水係数変化 - 融解後の間隙比分布の影響 -、摂南大学融合科学研究所論文集、第 2 巻、第 1 号、pp.40-50、2016。

伊藤讓・吉田聡志：我が国における地盤改良技術の変遷 5.人工地盤凍結工法とその展開、材料、第 65 巻、第 12 号、pp.883-889、2016。

廣瀬剛・伊藤讓・石川達也・赤川敏・所哲也・大西有三・上田保司：飽和細粒土の凍結融解作用による透水係数変化のメカニズムに関する実験的研究、第 12 回地盤改良シンポジウム論文集、3-3、pp.123-130、2016。

〔学会発表〕(計 21 件)

木村洸太、所哲也、石川達也：凍土の透水性に及ぼす間隙比の影響、第 57 回地盤工学会北海道支部技術報告会、pp.43-48、2017。

Takuto Inoue, Yuzuru Ito, Hideo Sakabe : Remediation of Contaminated Fine-Grained Soil by Freezing and Ion Exchange Effect, Transportation Geotechnics and Geocology (TGG 2017), Saint Petersburg, Russia, 2017。

Go Hirose, Yuzuru Ito : Experimental Estimation of Permeability of Freeze-Thawed Soils in Artificial Ground Freezing, Transportation Geotechnics and Geocology (TGG 2017), Saint Petersburg, Russia, 2017。

木村洸太、所哲也、石川達也：凍土の透水性に及ぼす不凍水量の影響、第 51 回地盤工学会研究発表、pp.867-868、2016。

廣瀬剛・伊藤讓・井上拓人・阪部秀雄：凍結融解現象と陽イオン交換を利用した汚染土の洗浄に関する実験，第 51 回地盤工学会研究発表会，pp.2159-2160，2016.

井上拓人・伊藤讓・廣瀬剛・阪部秀雄・芮大虎：凍結融解とイオン交換を利用した洗浄技術の特性について，第 71 回土木学会年次学術講演会， -78，pp.155-156，2016 .

伊藤讓・廣瀬剛・石川達也・赤川敏・所哲也・大西有三：凍結融解繰り返しによる飽和細粒土のアイスレンズ面方向の透水係数について(2) 土木学会第 71 回年次学術講演会， -315，pp.629-630，2016 .

廣瀬剛・伊藤讓・石川達也・赤川敏・所哲也・大西有三：凍結融解繰り返しによる飽和細粒土のアイスレンズ面方向の透水係数について(1) 土木学会第 71 回年次学術講演会， -314，pp.627-628，2016 .

井上拓人・伊藤讓・廣瀬剛・阪部秀雄：凍結融解とイオン交換反応を利用した汚染土壌の洗浄技術，平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会， -25，2016 .

山添稜也・石川達也・伊藤讓：凍結方法の違いによる凍土壁造成時の限界流速についての検討，第 56 回地盤工学会北海道支部技術報告会，pp.279-284，2016.

Tetsuya Tokoro, Tatsuya Ishikawa, Satoshi Akagawa: Temperature dependency of permeability coefficient of frozen soil, Proceedings of GEO Vancouver 2016, Vancouver, 2016.

Jun Zhang, Da-hu Rui, Ying-fei Wu, Yuzuru Ito, Hong-bo Zhao : Freeze-thaw Effects on Soil Permeability and the Soil Flushing Remediation, The 10th International Symposium on Cold Regions Development (ISCORD2016) , Session 4, IC-007, 2016.

Go Hirose, Yuzuru Ito : Experimental study on the permeability change of fine-grained soil by freeze-thaw effect , The 10th International Symposium on Cold Regions Development (ISCORD2016) , Session 6 , IC-013 , 2016 .

廣瀬剛・伊藤讓・石川達也・赤川敏・所哲也・大西有三：飽和細粒土の凍結融解前後におけるアイスレンズ面方向の透水係数変化に関する実験，土木学会第 70 回年次学術講演会， -281，pp.561-562，2015 .

所哲也・石川達也・赤川敏・伊藤讓・佐々

木飛翔・大西有三・廣瀬剛，上田保司：飽和凍土の透水係数の温度依存性，土木学会第 70 回年次学術講演会， -279，pp.557-558，2015 .

山添稜也・石川達也・伊藤讓：凍土壁造成における限界流速に関する基礎的実験・解析，土木学会第 70 回年次学術講演会， -276，pp.551-552，2015 .

伊藤讓・石川達也・赤川敏・所哲也・大西有三・上田保司・廣瀬剛：過圧密粘土の凍結融解による透水係数変化に関する実験，第 50 回地盤工学会研究発表会，448，pp.895-896，2015 .

廣瀬剛・伊藤讓・石川達也・赤川敏・所哲也・大西有三：飽和細粒土の凍結融解前後における熱流直角方向の透水係数変化に関する実験，平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会， -13，2015 .

山添稜也・石川達也・高橋優紀・浦崎拓人：凍土壁を有する地盤の浸透流予測に対する連成解析手法の適用，第 55 回地盤工学会北海道支部技術報告会，pp.211-214，2015.

高橋優紀・石川達也・所哲也・木次谷一平・浦崎拓人：凍結融解作用を受ける地盤の透水性に及ぼす凍結方法及び凍上性の影響，第 55 回地盤工学会北海道支部技術報告会，pp.167-172，2015.

21 高橋優紀・山添稜也・石川達也・所哲也：砂質土凍土壁の遮水性に及ぼす凍結条件の影響，第 49 回地盤工学会研究発表会，427，pp.853-854，2014 .

〔その他〕 なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

伊藤 讓 (ITO, Yuzuru)  
摂南大学・理工学部・教授  
研究者番号：30281752

### (2) 研究分担者

石川 達也 (ISHIKAWA, Tatsuya)  
北海道大学・工学研究科・教授  
研究者番号：60359479

### (3) 研究分担者

所 哲也 (TOKORO, Tetsuya)  
苫小牧工業高等専門学校・准教授  
研究者番号：40610457

### (4) 研究分担者

大西 有三 (OHNISHI, Yuzo)  
関西大学・環境都市工学部・客員教授  
研究者番号：30026348