

令和 2 年 7 月 12 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03307

研究課題名(和文)凍土方式遮水壁の凍土・未凍土境界における遮水性劣化の防止技術の開発

研究課題名(英文) Development of the prevention technology of the permeable deterioration in frozen ground, non-frozen ground border of the frozen ground method water shielding wall

研究代表者

伊藤 譲 (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) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：福島原発の凍土遮水壁は、原子炉建屋への地下水の流入を防ぎ、汚染水の増加を防いでいる。研究者らは凍土遮水壁が長期間維持される場合を想定し、アイスレンズ前面の凍土部分から未凍土方向に乾燥収縮等による水平クラックが成長し、凍土壁正面の未凍土部分に透水係数の極端に大きい領域が発生すると考えた。

それで、研究者らは凍土遮水壁を模し、水平方向に凍結融解を行い、その途中で鉛直方向に透水実験を行うことのできる装置を用いて実験を行ってきた。その結果、細粒土においては凍上性の強弱に関係なく、凍結面が一定位置にとどまっても、間隙比の変化が続き、長期的には遮水性が損なわれる可能性が高まっていることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

福島原発の凍土遮水壁は現在安定しているので、事業者は凍土壁が所定の規模に成長した後は問題がないものと信じているようである。しかし、常温の地盤に構築されて長期間維持される人工凍土の研究事例は極めて少なく、ましてや隣接する未凍土に及ぼす影響が明らかになっているとは言えない。

本研究では、凍土の前面で脱水作用を受け続ける未凍土における脱水による構造変化とそれに伴う遮水性の喪失現象を解明するものであり、その成果は凍土遮水壁の安全性に関わり社会的な意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：The frozen earth wall of the Fukushima Nuclear Power Plant prevents an inflow of the groundwater to the nuclear reactor building and prevents increase of the contaminated water. It is assumed that the earth wall is maintained for a long term. Then a horizontal shrinkage crack by de-hydration due to frost heave occurs in front of the ice lens, and it was assumed that the extremely great increase in hydraulic conductivity might generate in front of the frozen earth wall.

To confirm this hypothesis and to propose the preventive measure to this phenomenon, we developed the experimental device which could freeze-thaw the specimen horizontally and conduct permeability test vertically. The test result shows that even if a frost front remained at the constant position, a change of the void structure continued with time regardless of the frost-susceptibility of the fine-grained soil, and it was considered that the possibility that water shield of the earth wall was spoiled may be increasing.

研究分野：地盤工学

キーワード：凍土 未凍土 遮水 透水係数 凍結融解土 モデル実験

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災による津波の来襲により、福島第一原発の原子炉が被害を受け、高濃度の汚染水の流出が始まった。汚染水の海洋への流出を防ぐためにポンプアップ等の工法に加えて、2013年5月に原子炉建屋の地下を凍土壁で遮断する遮水壁が建設されることとなった。それまでは、人工地盤凍結工法を知る人は限られていたが、今や福島原発の「氷の壁」、「凍土壁」は広く知られることとなった。

凍土壁の採用理由は、実績のある地中連続壁工事と比較して、はるかに小規模なボーリングマシン程度で工事が可能であること、工事により発生する汚染された土砂の処理をする必要性がないこと、他の地盤改良技術と比較して完全な止水性が得られること等であった。

凍土壁は地下鉄等の工事の際に、シールドマシンの発進時における高土圧・高水圧より防護する目的で、比較的短期間の小規模な仮設構造物として用いられることが多かった。これに対して、福島原発の凍土遮水壁は厚さ約2m、深さ30m、総延長1500mの大規模なものである。そこで、事業者は工事に先立ちフィージビリティスタディとして、現地ですべて実際に地下水の流れている地盤を凍結させるなど、実施工における安全性を確認してから本工事に臨んでいる。

しかし、研究代表者らは、細粒土における凍結融解による透水係数の変化、凍土・未凍土境界付近における凍土の透水係数について、これまで十分な研究が行われて来なかったことを懸念し、平成26~28年度、大規模な余震により冷凍機が長期間停止した場合を想定した凍結融解土の透水係数変化のメカニズムと、その評価方法の検討を実施した。その結果、凍結融解土の透水係数の増加レベルにおいては、凍土壁造成前と比較して増加はするものの、ドレーン設備からの揚水等により対応できるレベルであることが分かった。

一方、廃炉工程全体の遅れにより、当初は10年以内で撤去される予定であった凍土壁の設置期間が延長されつつある。そうすると、水平方向の変位が拘束された条件下で水平方向に温度差を与え、土を凍結させ続けることになる。

設置期間が長期に渡るという前提に立つと、図1に示すように凍土内のアイスレンズ前面から未凍土方向に乾燥収縮または圧縮破壊による水平クラックが成長する可能性がある。このクラックは未凍土領域まで伸び、さらに、紙面と平行方向にも同様のクラックが未凍土側に伸びていることを示唆する実験結果が報告されている。このような状況下で、何らかの条件によってクラック同士が上下に繋がることになると、未凍土部にクラック網が発達して強力な水道(みずみち)が形成されるものと予想される。

つまり、図2に示すような、粘土や砂から構成される互層地盤に造成された凍土壁において、遮水壁の内側で汚染水をポンプアップする時に、外側より多数の収縮クラックが縦横に発達した未凍結の粘土層を通過して、凍土壁を回り込む地下水流が発達することが懸念された。

### 2. 研究の目的

福島原発では、被災した原子炉建屋を周辺の地下水流から遮断させるために、世界でも例が少ない大規模な凍土遮水壁が建設されている。砂質土と軟岩の互層地盤で被圧地下水の存在する条件下において、長期間に渡り凍土壁の遮水性能を維持しなければならない。本研究の目的は、次の3項目である。

(1)凍土壁に接する未凍土地盤に発生することが危惧される水平クラックの発生条件とそれに伴う凍土壁の遮水性劣化のメカニズムの解明を行う。

(2)未凍土に隣接する0℃付近の高温の凍土の透水係数の測定方法の開発を行う。

(3)(1)(2)の実験結果を踏まえ、凍上・凍結融解を受ける凍土遮水壁の地下水流浸透解析手法の開発を行う。これらの成果を基に凍土遮水壁の凍土と未凍土部分を含めた、長期間運用時における遮水性能の劣化防

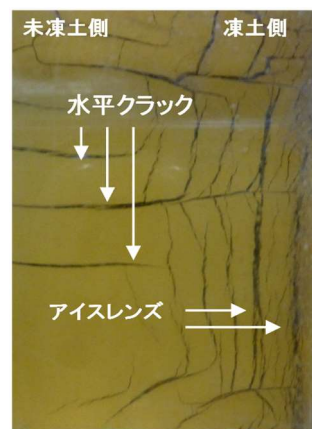


図1:未凍土に発生する水平クラック

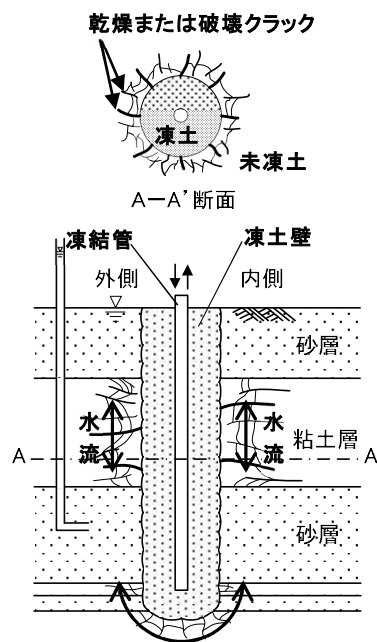


図2:凍土壁周りの未凍結土のクラックのイメージ

止技術の提案が可能となる。

### 3. 研究の方法

(1)本研究のために、**図3**に示す「水平方向変位拘束・水平凍結融解・鉛直透水実験装置（本装置）」を開発した。研究当初は、 $L=8\text{cm}$ の水平凍結融解実験装置を改良して用い、その後 $L=20\text{cm}$ の本装置を設計製作した。本装置では、予圧密圧力、実験圧力、冷却温度等の条件を変化させて、凍結融解中の給排水測定と変推移透水試験の実施が可能である。

また、凍結・凍上により生じる供試体表面の不陸による分布荷重の偏りの影響を解消するために、凍結融解実験中には上部載荷プレート下に、ゴム製のクッションを敷いている。

実験供試体は、実験セル内において所定の荷重で予圧密して作成される。実験は、セルを $0\sim+4^{\circ}\text{C}$ に維持された低温チャンバー内で行われた。

この実験装置では3段階（凍結前、凍結中＝半凍結、凍結融解後）で透水係数を測定して比較できる。最初に、供試体温度を $+5^{\circ}\text{C}$ 一定とした状態で、鉛直方向の透水試験用給排水系統を開けて未凍結（凍結前）の透水係数を測定した。

次に、未凍結の透水係数を測定した後、凍結過程に入る。高温側（ $T_w$ ）からの給排水が可能で、両端面一定温度のステップ式凍結を行い、凍土・未凍土の境界が一定になるのを待つ。そして、高温側（ $T_w$ ）からの給排水系統を閉じ、鉛直方向の透水系統を開放して、半凍結状態における透水係数（未凍土）を測定した。**図3**は凍結前の透水試験後に、供試体の半分まで凍結させた状態である。鉛直方向にアイスレンズが確認できる。透水試験では、高温側 $T_w$ からの給排水系を閉じ、鉛直方向の透水試験用の系統を開放して、未凍結土の透水係数を測定した。

その後、鉛直方向の透水系統を閉鎖して、供試体全体を凍結・融解させた後に、凍結融解土の透水係数を測定した。このようにして、凍結前、供試体が部分的に凍結した時の未凍土、完全凍結時、完全融解時の透水係数を鉛直方向の変水位透水実験から求めた。

また、実験中には供試体の温度分布（**図3の背面**）、荷重、変位量、給排水量の測定（高温側給排水測定装置）を行い、凍土の成長とクラックの発生状況をインターバルカメラで観測した。

実験中の温度条件を**図4**に示す。凍結前の透水係数測定では $T_w \cdot T_c = +5^{\circ}\text{C}$ で48時間、凍結中（半凍結）時の透水係数測定は、 $T_w = +10^{\circ}\text{C}$ 、 $T_c = -10^{\circ}\text{C}$ で48時間、その後、全体を凍結させてから、凍結融解土の透水係数は $T_w \cdot T_c = +5^{\circ}\text{C}$ で48時間の測定を行っている。なお、凍結中（半凍結）では、試料土断面の未凍土の断面積を温度分布から計算している。

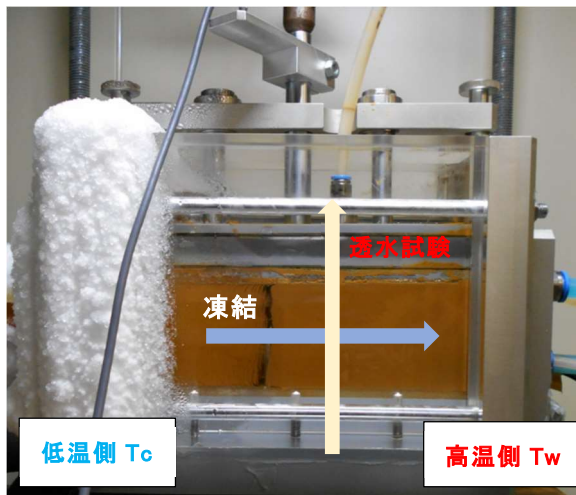


図3：水平凍結融解実験装置

(2)  $0^{\circ}\text{C}$ 付近での凍土の透水係数の推定方法： $0^{\circ}\text{C}$ 付近の凍土の透水試験を実施し、多角的に得られた凍土透水係数と物理定数の相関性を分析し、凍土透水係数の推定手法を構築した。

(3) 凍上・凍結融解を受ける凍土遮水壁の地下水流浸透解析手法の確立：模型試験及び要素試験との連携をとりながら解析モデルの検討を行った。

### 4. 研究成果

(1) 凍土壁に接する未凍土の透水性の変化：一連の実験では、土質の凍上性、上載荷重、実験期間の3点に着目し、凍結前、供試体が部分的に凍結した時の未凍土、凍結融解後の透水係数を測定した。

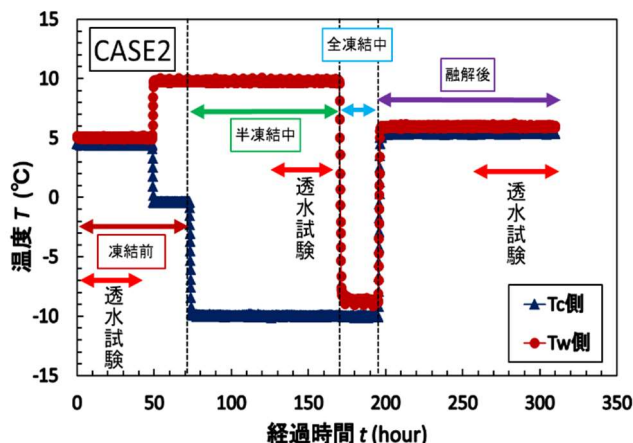


図4：温度の経時変化

この実験は水平方向が変位拘束され、上載荷重が与えられている特殊な実験である。従って、図5に示すように、常に水平方向に排水しながら（図5のプラス方向が排水）鉛直方向に膨張する、自然凍上では考えられない現象が発生している。図のフラットな期間は透水試験を実施するために、水平方向の給排水システムを閉じていたことによる。

このように複雑な凍結融解作用を受ける地盤では、凍結融解の過程で図6に示す複雑な間隙比の分布が発達する。図は凍上性の異なる2種類の土試料（黄土16N：凍上性強い、藤森16N：凍上性弱い）を用いて、予圧密荷重  $P=500\text{kPa}$  で供試体を作成し、実験荷重  $p=100\text{kPa}$  で図4に示すステップ式凍結による凍結融解を行い、先述の凍結前、部分凍結時、凍結融解後の3段階において透水試験を実施した直後である。ILレンズが発達した  $T_c$  から7cmの位置で間隙比はピークになり、その高温側では間隙比が低い領域が発生している。

図7に、このような間隙比分布の異なる2種類の土の、凍結前、部分的に凍結した時の未凍土、完全凍結・融解時の透水係数を比較する。黄土では、図6において半凍結時の未凍土の間隙比が低下しているが、図7(a)黄土では部分凍結時の透水係数は、未凍土よりも2桁高くなっている。

このことは、凍土前面の脱水圧密された未凍土において、微細な収縮クラック等の水道が発達して、透水係数が大きくなったことが原因と思われる。これに対して、藤森では凍土前面の間隙比の低下は僅かであり、その時の未凍土の透水係数は間隙比の低下に応じて僅かに低下しているように見える。

なお、部分凍結時の透水係数の測定において、供試体背面（図3の裏側に多数配置した熱電対センサー）の温度分布から未凍結部分の断面積を計算して、透水係数の計算に用いた。

実験の結果、全体的には荷重が大きくなると半凍結の未凍土における透水係数が小さくなり（図8）、冷却期間が長くなるとさらに低下する現象が確認された（図9）。なお、実験中に収縮クラックの存在は認められたものの、急激な透水係数の増加は認められないケースと、その逆に、収縮クラックの連結が原因と考えられる未凍土の透水係数の増加が認められるケースも稀なことであった（図7(a)）。

人工地盤凍結工法における凍土に隣接する未凍土の透水係数について実験的に検討した。以上をまとめる。

- ① 凍上性の強い土質（黄土）では、凍結中の未凍土の透水係数が2桁程度大きくなる

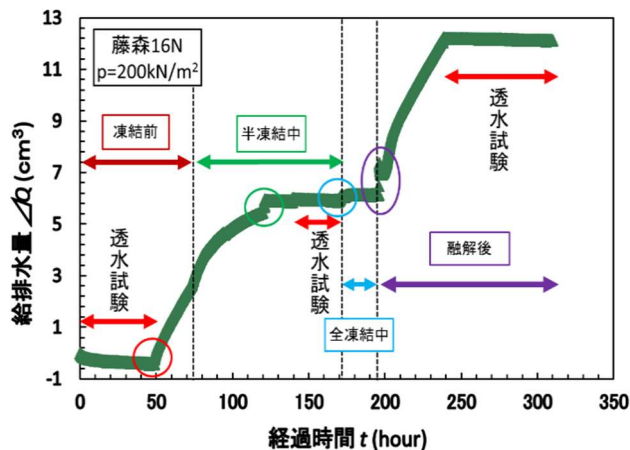


図5 給排水量の経時変化

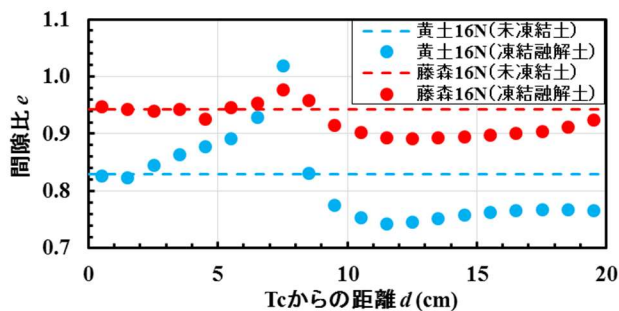
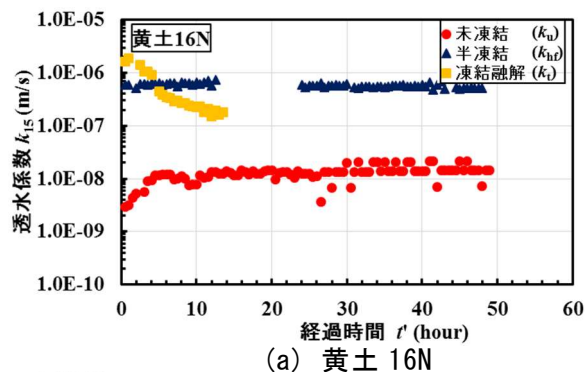
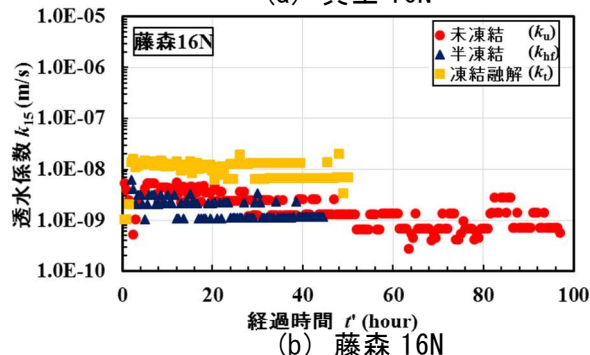


図6 実験後供試体の間隙比分布



(a) 黄土16N



(b) 藤森16N

図7: 未凍結・半凍結・凍結融解後の透水係数

ことがある。その後、融解後には元の値に戻る傾向がある。

黄土においては、凍結中の未凍土において、間隙比が低下しているにもかかわらず透水係数は著しく増加している。この透水係数の増加現象は、収縮クラック以外にあるものとは考えにくく、水道としての役割を担っているものと考えられる。

② これに対して、凍上性の弱い土質（藤森）では、凍結中の未凍土の透水係数に変化がほとんどなかった。また、融解後には凍結融解前の約10倍まで透水係数は増加した。このことは、凍結融解土の間隙比の分布と対比すると興味深い。黄土では凍結面に隣接する未凍土部分で間隙比の低下が著しいが透水係数は増加している。これに対して、藤森では間隙比の低下が小さく、透水係数の変化も認められない。

③ 凍上性の弱い土質（藤森）においては、未凍土の透水係数は、凍結面が止まった状態で低下を続ける結果が得られた。このことは、実験後供試体の含水比分布（間隙比分布）からも裏付けられた。地盤の脱水圧密が均一に生じているだけ

であれば、凍土遮水壁の安全性が増すことにつながる。ところが、インターバルカメラによる観察からも、実験中に薄いクラックが認められ、クラックが脱水圧密により成長することを考慮すると、長期間の運用においてクラック間の連結が生じた場合には、未凍土部分で劇的に透水係数が増加する危険性を無視できない。

④ 以上から、凍土遮水壁を長期間維持する場合には、凍結面を固定することは、脱水圧密による透水係数の低下が期待できるように見える。しかし、脱水圧密の進行は、実験期間内では止まる気配が認められないため、常に安全側に作用するのか、いつか破局的破壊が生じるのかは、今後の課題である。

(2) 0°C付近での凍土の透水係数の推定方法：凍土透水試験を継続して実施するとともに、多角的に得られた凍土透水係数と物理定数の相関性を分析し、凍土透水係数の推定手法を構築した。今回の研究では、凍土中の不凍水量の計測結果から凍土中の透水に有効な間隙を定量化し、透水試験から得られた凍土透水係数と照合し、凍土の透水性の推定手法を検討した。

(3) 凍上・凍結融解を受ける凍土遮水壁の地下水流浸透解析手法の確立：模型試験及び要素試験との連携をとりながら①～④の検討を続けた。①マイクロモデルを利用した数値実験による水平クラックの発生条件の明確化、②前述のマイクロモデルからマクロモデルへのアップスケーリング方法の提案、③凍上・凍結融解や水平クラックの発生に伴う凍土壁の遮水性の劣化を考慮可能な3次元熱伝導・浸透連成解析プログラムの開発、④熱物性値及び透水性の異なる凍土壁存在互層地盤における地下水流の浸透状況の把握と新規開発解析手法の適用性の検証を行った。

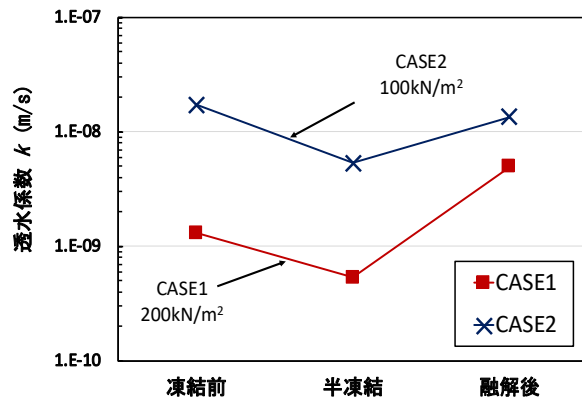


図8 藤森粘土における荷重の影響

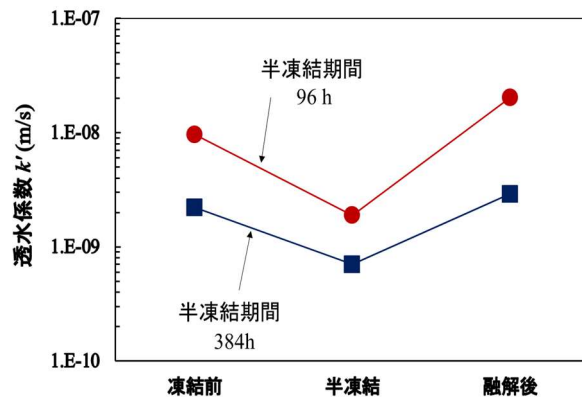


図9 藤森粘土における凍結時間の影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 HIROSE Go, Ito Yuzuru	4. 巻 67
2. 論文標題 Relationship between the Trace of Ice Lens and the Permeability Change by Freeze-Thaw Effect	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 28 ~ 33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.2472/jsms.67.28">https://doi.org/10.2472/jsms.67.28</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 HIROSE Go, ITO Yuzuru, ISHIKAWA Tatsuya, AKAGAWA Satoshi	4. 巻 6
2. 論文標題 EXPERIMENTAL PREDICTION OF PERMEABILITY OF FREEZE-THAWED FINE-GRAINED SOIL	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 156 ~ 166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.2208/journalofjsce.6.1_156">https://doi.org/10.2208/journalofjsce.6.1_156</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 広瀬剛, 伊藤譲, 石川達也, 赤川敏, 所哲也, 大西有三
2. 発表標題 細粒土の凍結時に未凍土部分で生じる収縮クラックの透水係数に与える影響について
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tokoro, T., Ishikawa, T.
2. 発表標題 Water, heat and electric current flow in saturated and unsaturated sandy soil
3. 学会等名 7th International Conference on Unsaturated Soils (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tokoro, T., Ishikawa, T.
2. 発表標題 Measurement for permeability of frozen soil by transient pulse method
3. 学会等名 4th International Symposium on Transportation Soil Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tokoro, T., Ishikawa, T.
2. 発表標題 Measurement of unfrozen water in unsaturated soil with pulse NMR
3. 学会等名 7th Asia-Pacific Conference on unsaturated Soils (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塚本光佑, 伊藤謙
2. 発表標題 飽和細粒土における工学的性質を把握するための凍結水量の測定方法
3. 学会等名 第13回材料学会地盤改良シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	所 哲也  (Tokoro Tetsuya)  (40610457)	北海学園大学・工学部・准教授    (30107)	

