

平成 21 年 3 月 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560499

研究課題名（和文）

汚染土壌の凍結融解洗浄のための透水係数変化のメカニズム解明に関する研究

研究課題名（英文）

Study on the mechanism of permeability change due to freeze-thaw effect for remediation of the contaminated soils

研究代表者

伊藤 譲 (ITO YUZURU)

摂南大学・工学部・教授

研究者番号：30281752

研究成果の概要：汚染土壌の浄化修復において将来有望な工法のひとつとして、土の凍結融解現象を利用した工法が提案されている。この工法の普及のためには凍結融解による透水係数増加のメカニズムが解明されなければならない。本研究の結果、①透水係数の増加の要因には、土粒子自体と土の骨格構造の変化の2つの要因があり、それらを定量的に区別することができることが示され、②土粒子自体の変化は、過去に凍結融解や乾燥作用を受けたことのないフレッシュな材料において起こること等が明らかになった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：土木

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：土壌汚染対策、凍結融解、透水係数

1. 研究開始当初の背景

都市再開発事業などに伴い、揮発性有機化合物や重金属等による土壌汚染問題が顕在化してきている。土壌汚染の防止と汚染された土壌の浄化修復は、我々にとって急務の課題となっている。

汚染土壌の浄化修復方法として土壌洗浄が理想的とされているが、現在の技術では粒径の小さい細粒分に対しては適用が困難である。この問題を解決するため凍結融解を利用した土壌洗浄技術が提案されている。

この工法の現場への適用のためには土の凍結融解による透水係数変化のメカニズムを解明する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、凍結融解後の透水係数増

加を支配している物質等を特定して透水係数増加のメカニズムを解明することにある。

今回の研究期間においては、次の2点を目的とした研究を行った。

(1) 細粒土において、凍結融解後に透水係数が増加する現象は、単に土構造が乱されることによるのか、粘土鉱物の変化に起因するのか、又は、間隙水中の有機分などの分解することに起因するのか明らかにする。

(2)(1)の知見を基に、融解後の透水係数増加現象のメカニズムを解明して、透水係数変化を予測できるようにする。

この2点について、研究代表者らがこれまで使用してきた2種類の細粒土(関東ローム、藤森粘土)を用いて実験的研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 試料土

実験には、関東ロームと藤森粘土に様々な前処理を加えた試料を用いた。

① 凍結融解、乾燥処理

関東ロームの自然含水比試料 KA に前処理として凍結融解と炉乾燥処理を与え、それぞれ KB(凍結融解)と KD(炉乾燥)とした。KB は -20°C で 24 時間凍結後、室温にて融解したものであり、KD は 110°C の乾燥炉にて 24 時間乾燥させたものである。

② 水洗い処理

土の間隙物質の影響を調べるため、KA を含水量の 3 倍と 10 倍のイオン交換水で攪拌した後、24 時間放置し上澄みを除去したものを K3, K10 とした。

③ 細粒分試料

KA をイオン交換水で攪拌しながら $75\mu\text{m}$ フルイを通過させ、24 時間放置後に上澄みを除去した。この試料を用いて、荷重を $25 \cdot 50\text{kPa}$ として実験を行ったものを KF, KG とした。

④ 人工アロフェン添加

人工アロフェンの含水比調製試料を作成し、そこに質量比 0.2%の表土とグラニュー糖を添加し、約 2 ヶ月放置したものを試料とした。AR1 は無処理、AR3 は含水比調整、AR8 は微生物と糖添加試料である。

(2) 一次元凍結融解実験

一次元凍結融解実験の供試体はペースト状の脱気試料を内径 100mm のアクリルセル内で段階的に 100kPa まで予圧密した後 25kPa まで除荷し、高さ 80mm に整形したものである。実験の載荷重は原則 25kPa とし、上部より給水可能な状態で、温度勾配 $0.75^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 、凍結速度 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ の条件で下部から上部へと凍結を行った。最終的には、上下部共に -10.0°C まで温度降下させた。その後、融解速度 $1.0^{\circ}\text{C}/\text{h}$ で融解した。

凍結融解前後には供試体温度を 6.0°C に保持して透水試験を行った。また、実験前後の含水比と液塑性限界を求めている。

(3) 圧密透水試験

圧密透水試験では、ペースト状の脱気試料を内径 60mm の圧密リングに流し込み、12 時間以上静置し、12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800kPa まで各段階で 24 時間載荷し、その後、24 時間の変水位透水試験を行った。

(4) 凝固点温度測定

凝固点温度の測定では、所定の圧力で圧密したブロック状試料をポリエチレン袋に入れ、Pt センサーを中心部に挿入したものを用いた。試料は温度調節バスで、 0°C から -5°C まで温度を急降下させ、凍結開始直後の一定温度状態を凝固点として測定した。

(5) 凍結水量測定

凍結水量測定では、内径 100mm、高さ 80mm のアルミニウム製の測定容器を用い

た。実験では予圧密した試料をポリ袋に入れ、脱気密閉した。密閉試料を測定容器に入れ、装置内をエチレングリコールで満たし、 0°C から -5°C まで温度を急降下させ、試料が凍結し始めたら、 -1°C まで温度上昇させた。その後、 -20°C まで段階的に温度降下させ各段階での体積膨張を測定した。

供試体中の不凍水量と凍結水量の計算では、まず湿潤質量 m 、含水比 w 、土粒子密度 ρ_s より土粒子体積 V_s 、水体積 V_w を求め試料土の体積 V を求める。 V_w は氷点以下では凍結水体積 V_{wf} と不凍水体積 V_{wu} に分かれる。ある温度 $T^{\circ}\text{C}$ において $\Delta V_{T^{\circ}\text{C}}$ 膨張したとすると、その時に供試体中の V_{wf} との関係は次のように示される。

$$(\Delta V_{T^{\circ}\text{C}}/V_0) \times V_1 - \Delta V_{T^{\circ}\text{C}} = 0.09 \times V_{wf} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta V_{T^{\circ}\text{C}}$ はエチレングリコール溶液の体積増加、 V_0 は実験容器の体積、 V_1 は V_0 から供試体体積を除いた値である。そして、土粒子体積 V_s などから有効間隙比 e_0 と有効間隙率 n_e は次のように定義した。

$$e_0 = V_{wf}/V_s, \quad n_e = V_{wf}/V \times 100\% \quad (2)$$

4. 研究成果

(1) 凍結融解・乾燥処理

① 透水係数と間隙比

図 1 に凍結融解・乾燥処理の透水係数と間隙比を示す。凍結前の透水係数は KA では $7.6 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 、KB は $9.0 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ とほぼ同じ値を示した。しかし、KD は $7.4 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ となり KA, KB より 100 倍大きくなっていた。融解後では KA, KB, KD ほぼ同じ値まで増加を示した。このとき、間隙比は凍結前、融解後共に KA, KB, KD の順に小さかった。全体的に透水係数と間隙比の関係は間隙比が低下し、透水係数は増加するという傾向が見られた。凍結融解・乾燥処理を与えると凍結前の透水係数が増加した。

② 液・塑性限界

図 2 に凍結融解・乾燥処理の液性限界を示す。KA を凍結融解すると液性限界は低下し

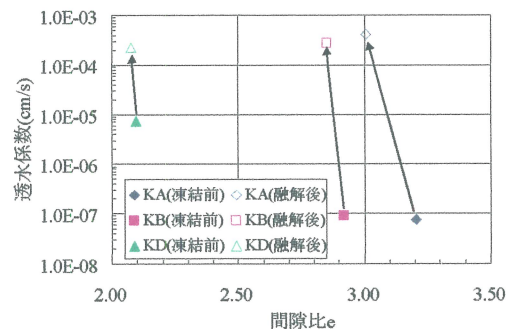


図 1 凍結融解・乾燥処理の透水係数

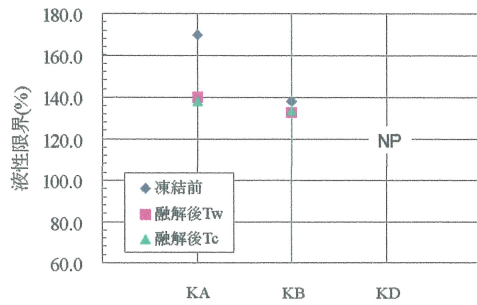


図2 凍結融解・乾燥処理のLLの変化

た。KAの融解後とKBの凍結前の液性限界がほぼ同じとなり、KBを凍結融解してもさらに液性限界が低下することはなかった。KDはNPであった。これより、2回以上、凍結融解を繰り返しても液性限界は低下せず、凍結融解を繰り返しても透水係数の増加は見られないと思われる。

(2) 水洗い処理

① 透水係数と間隙比

図3に水洗い処理の透水係数と間隙比を示す。凍結前の透水係数と間隙比はKA, K3, K10の全てにおいてほぼ同じ値となった。融解後の透水係数はKAでは $5.0 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ となった。K3とK10は $5 \sim 6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ となり、KAより約10倍大きくなった。間隙比はKAで3.0, K3では2.7, K10では2.8となりKAよりもK3とK10の方が間隙比の低下が大きかった。

② 液・塑性限界

図4に水洗い処理の液性限界を示す。凍結前の液性限界はKAと比較するとK3とK10わずかに低い。融解後の液性限界は、KA,

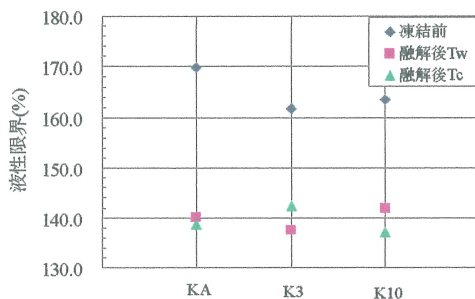


図3 水洗い処理のLLの変化

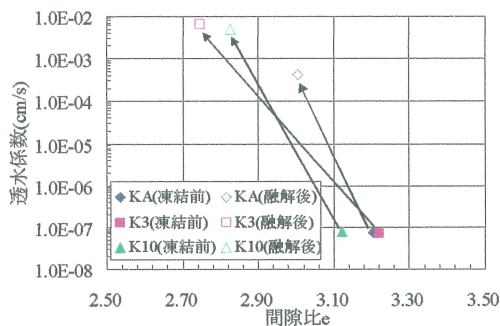


図4 水洗い処理の透水係数

K3とK10全てにおいて、ほぼ同じ値を示した。

(3) 細粒分と実験荷重

① 透水係数と間隙比

図5に細粒分処理の透水係数と間隙比を示す。凍結前の透水係数はKA, KE, KF, KG全てほぼ同じ値となった。融解後の透水係数はKAでは $4.2 \times 10^{-4} \text{cm/s}$, KEでは $6.4 \times 10^{-6} \text{cm/s}$, KF, KGでは $3 \sim 4 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ となり、KAが他に比べて10~100倍大きくなった。KEはKAよりも低い値を示し、KF, KGはほぼ同じ値を示した。このように、実験荷重を大きくしても透水係数は低下する。また、細粒分のみ供試体(KF, KG)では実験荷重を変化させても透水係数の増加には変化はなかった。凍結前の間隙比は、KAとKE, KFとKGにおいてそれぞれ同じ値を示した。融解後の間隙比はKAでは3.0, KEは2.7, KFは3.6, KGは3.2となり、KAよりKE, KFよりKGと実験荷重の大きい方が間隙比は低下した。

② 液・塑性限界

図6に細粒分処理との液性限界の比較を示す。KAとKEの液性限界と比較して、KFとKGの液性限界は凍結融解前後で明らかに高めであった。

(4) アロフェンの影響

図7にアロフェンの透水係数と間隙比を示す。凍結前の透水係数はAR1では $2.4 \times 10^{-6} \text{cm/s}$, AR3とAR8では $7.0 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ となり、融解後には、AR1は $3.7 \times 10^{-6} \text{cm/s}$,

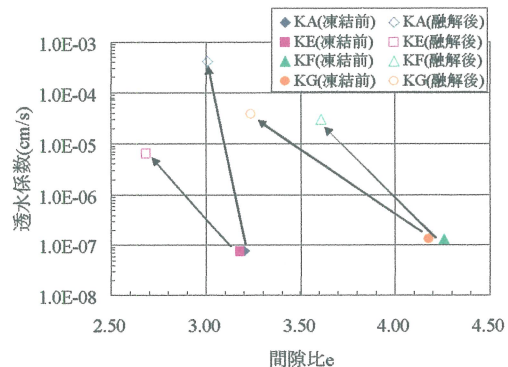


図5 細粒分・実験荷重の透水係数

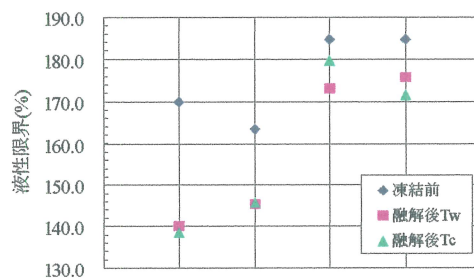


図6 細粒分・実験荷重のLLの変化

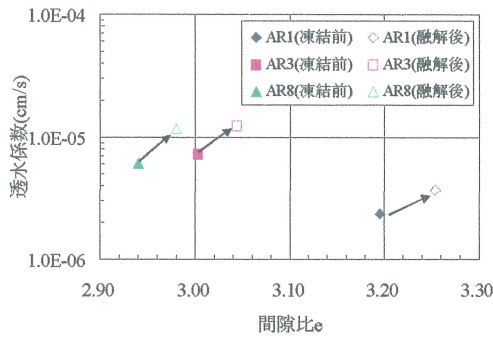


図7 アロフェン添加の透水係数

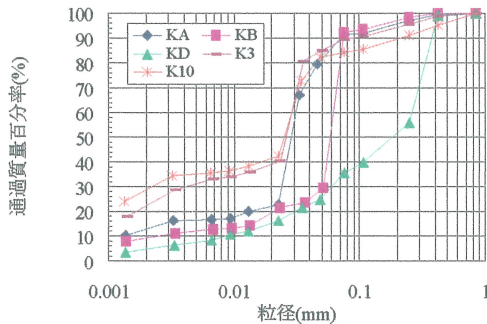


図8 前処理の違いによる粒度分布

AR3 と AR8 では $1.2 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ となった。凍結融解前後共に透水係数は AR1 と比較して AR3, AR8 の方が大きくなった。このときの空隙比は凍結融解前後共に AR1, AR3, AR8 の順に小さくなり、アロフェンの水和反応あるいは有機物の存在により変化する可能性は何えるが、この結果だけでは透水係数との関係は認められない。

(5) 粒度分布の比較

図8に前処理の違いによる粒度分布を示す。KAと比較してKBとKDは粘土分が少なくなり、細砂分が多くなったように見える。また、K3とK10では粘土分が多くなり、細砂分が少なく見える。

(6) 透水係数と空隙比

図9に $e-\log P$ 関係を示す。図より KA から KB, KD へと $e-\log P$ 関係は下方へ移動している。図10に空隙比と透水係数との関係を示す。図では、KA, KB, KD の順に空隙比が小さくなるが、逆に透水係数は増加するため、グラフは全体的に右下から左上方向に並ぶ。このことは、土の空隙量だけが変化したと考えると説明できない現象である。

(7) 凝固点測定

図11に凝固点と空隙比の関係を示す。図に示すように、同じ空隙比でも凝固点異なり、KA, KB, KD へと凝固点が 0°C に近くなっていく。つまり、KA では空隙量は大きい空隙水は土粒子表面力の影響を強く受け、これに対して、KD では空隙量は小さい

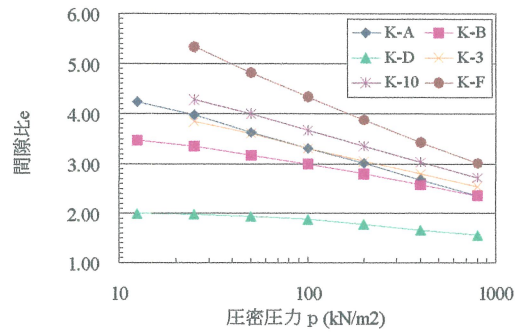


図9 空隙比と圧密圧力の関係

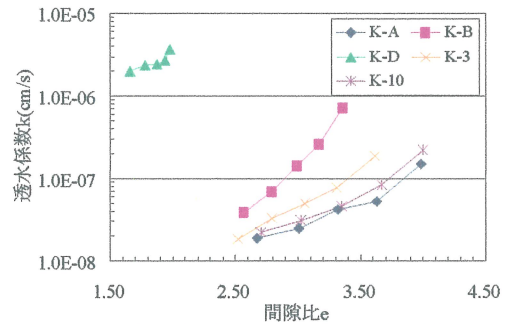


図10 圧密透水試験の e と k の関係

空隙水は土粒子表面力の影響がない重力水に近い状態で存在することを意味する。図10において、同じ空隙比において、KAと比べてKBとKDでは透水係数が格段に大きくなる理由は空隙水の凝固点の違いから裏付けられる。

(8) 凍結水量測定

図12に空隙率と透水係数の関係を示す。図右のグループは図10の100, 200, 800 Paの試料を空隙率(全空隙)で整理し、左のグループは -1°C での有効空隙率を用いて透水係数を整理したものである。全空隙率のグループではグラフではグラフ群が右下から左上へと並んでいるのに対して、有効空隙率グループではグラフ群が左下から右上に並ぶ傾向が見られる。

また、空隙の性質が同じであれば、空隙量に比例して透水係数は大きくなるはずである。しかし、例えば右のグループのKAでは、空隙率が1.1倍増加したのに対して透水係数

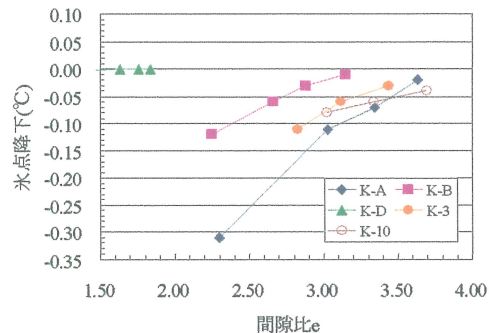


図11 凝固点降下と空隙比の関係

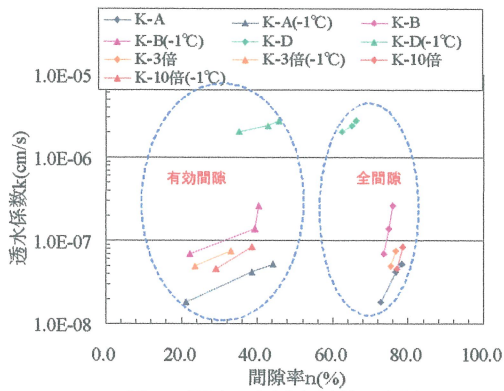


図 12 間隙比と透水係数の関係

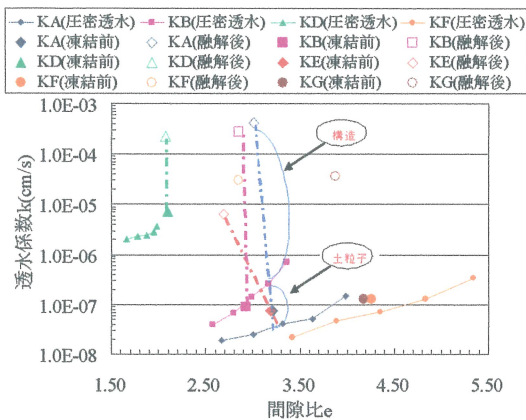


図 13 凍結融解実験と圧密透水試験の関係

は 2.9 倍に増加している。左のグループでは、KA の有効間隙率が 2.1 倍増加したのに対して透水係数は 2.9 倍に増加しており、KB、KD でも同様の傾向が認められた。

つまり、透水係数と関係するのは全間隙ではなく、今回の実験の凍結水量より求めた間隙に近いと考えられる。

(9) 透水係数変化の評価

図 13 に凍結融解実験と圧密透水試験の関係を示す。図では KA, KB, KD と KE について図 1 と図 10 を重ね合わせる。例えば、KA は凍結融解実験での凍結前と融解後の値を結ぶと破線のように変化し、途中で圧密透水試験の KB の e-k 線と交わる。この交点から上部が土構造の変化に、交点から下が土粒子(要素)の変化に起因するものである。両者の割合は、KE の結果が示すように荷重が大きくなると土粒子の変化が相対的に大きくなる。

次に KB については、凍結融解実験の凍結前の値がすでに KB の e-k 線上に位置するので、点線のように透水係数の増分は全て構造変化に起因するものとなる。KD についても KB と同様に構造の変化によるものである。

このように、一次元凍結融解実験と圧密透水試験から土の透水係数増加の要因を土構造変化と土粒子変化とに分けて評価できる。

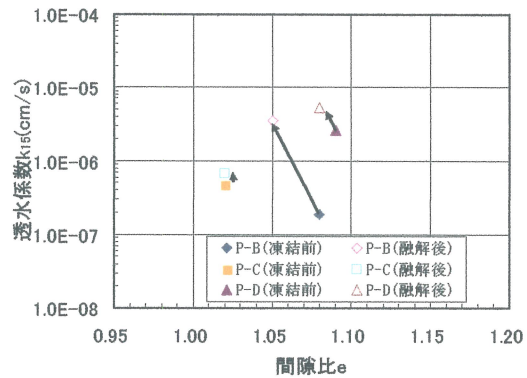


図 14 藤森 P の間隙比と透水係数

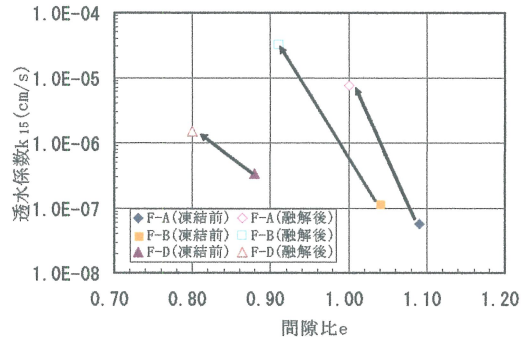


図 15 藤森 F の間隙比と透水係数

(10) 実地盤への適用性

図 14 に 2008 年に同じ箇所では採取された藤森粘土の乾燥試料 (P) と図 15 にフルイ通過させた自然含水比試料 (F) の凍結融解前後の透水係数の変化を示す。

これらの図より、室内試験において乾燥作用を受けた試料ではなく、一度も乾燥作用を受けない試料を用いるべきであることがわかる。

(11) まとめ

- ① 凍結融解による透水係数変化の要因を土粒子の変化と土構造の変化とに分けて定量的に評価する方法が示された。
- ② このような透水係数変化は、1 次元凍結融解試験、圧密透水試験等の室内試験から予測可能であることが明らかとなった。
- ③ 透水係数変化のメカニズムについて、関東ロームのように液性限界、粒度試験、微視的観察からある程度の説明が可能な土もあるが、藤森粘土等ではこれらの実験から確認することが困難である。しかし、凝固点温度と凍結水量から求めた有効間隙比の変化を用いると、一般的な土において土粒子自体の性質が変化していることを確かめることができることがわかった。
- ④ さらに、凝固点温度測定と凍結水量測定から透水係数以外の工学的性質を説明することが可能であることが示唆される結果が得られている。

- ⑤ 凍結融解による土粒子の変化とは、今回の実験では粘土鉱物ではなく間隙水中の物質である可能性が高い。凍結作用により、土粒子に絡み合った物質が分離されていると考えられるが、現段階では十分な根拠は得られていない。

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 1 件)

玉崎千明, 伊藤譲, 嘉門雅史, 細粒土における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研究, 日本材料学会第 8 回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 75-78, 2008. 11. 20, 査読付き

[学会発表] (計 5 件)

伊藤譲, 玉崎千明, 高田頼行, 凍結融解による関東ロームの物性値変化と透水係数との関係, 平成 19 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2007. 5. 26, 大阪大学

玉崎千明, 藤田雄三, 凍結融解土の透水係数に及ぼす前処理などの影響, 第 62 回土木学会年次学術講演会, 2007. 9. 14, 広島大学

玉崎千明, 伊藤譲, 嘉門雅史, 凍結融解による関東ロームの透水係数の諸要因, 平成 20 年度土木学会年次学術講演会, 2008. 5. 24, 近畿大学

伊藤譲, 玉崎千明, 嘉門雅史, 凍結試験から飽和細粒土の透水係数を評価する方法, 第 43 回地盤工学研究発表会, 2008. 7. 9, 広島市

伊藤譲, 玉崎千明, 嘉門雅史, 凍結融解による関東ロームの透水係数変化のメカニズム, 第 63 回土木学会年次学術講演会, 2008. 9. 10, 東北大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 譲 (ITO YUZURU)

摂南大学・工学部・教授

研究者番号: 30281752

(2) 研究分担者

嘉門雅史 (KAMON MASASHI)

京都大学・地球環境学堂・教授

(3) 連携研究者

なし