

氏名（本籍）	ひろせ 剛 ^{ごう} （京都府）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	理工博甲第1号
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当者
学位授与の年月日	平成30年3月24日
学位論文題目	凍結融解作用を受けた飽和細粒土における透水係数変化 の実験的評価
論文審査委員	（主査）教授 伊藤 譲 教授 川野 常夫 教授 熊野 知司

論文の内容の要旨

寒冷地の細粒土地盤において冬季に地表面から冷却されると、土中にアイスレンズ(IL)と呼ばれる氷晶が幾重にも形成される。また、ILが形成される際、IL前面の未凍結土が脱水圧密され、乾燥収縮ひび割れ(SC)が発生する。ILの発生を伴う地盤の隆起は凍上現象と呼ばれ、冬季には道路舗装や鉄道レール等の構造物を打ち上げるなどの被害が発生する。そして、春先の融解時には不等沈下が発生し、凍上被害をより大きくする。一方で、このように有害なイメージのある地盤凍結を積極的に利用した技術として、人工地盤凍結工法(AGF)がある。AGFの利点は含水状態の地盤における飛躍的な強度増加と完全な遮水性の確保である。また、既設構造物と凍着することにより連続した構造を容易に形成することができ、土質の不均質性に関わらず一様な地盤改良が可能であり、工事終了後に地盤汚染等の心配がなく、地中障害物を残さないことも利点である。AGFは1862年頃にイギリスの炭鉱の立坑建設において初めて採用され、その後欧州諸国、ロシア、アメリカ、中国など数多くの国で鉱物資源の採掘やシールドトンネル工事、仮締め切り、支持力壁などに用いられてきた。日本には村山朔朗により1960年代から導入され、シールドトンネルの発進・到達防護、地中接合や近接施工における掘削の補助工法として適用されてきた。

近年、アメリカでは汚染土壌の封じ込め技術としてAGFが利用されている。日本においては福島第一原子力発電所の廃炉事業において凍土遮水壁による汚染水の封じ込めが行われている。凍土遮水壁は原子炉建屋における汚染水の漏水対策が終了するまで長期間の維持管理が必要であり、地震などによる一時的な電力供給の停止により凍土壁の一部または全部が融解した事態に備える必要がある。それは、一旦凍結した細粒土では融解後にはその透水係数が著しく増大することがあるためである。

AGFの今後の展開のためには、細粒土の凍結融解による透水係数変化のメカニズムを正しく理解して予測につなげることが不可欠である。これまで数多くの研究が行われてきた。当初は凍結時のILやSCが融解後に痕跡として残り、水道(みずみち)となり透水係数が増加すると言われてきた。しかし、これに対して、細粒分の含有率および平均粒径が凍結融解土の透水係数に関係しているとの報告や、荷重条件が凍結融解土の透水係数に影響を与えるとの報告等の数多くの定性的な知見が得られている。しかし、凍結融解土の透水係数の予測が可能となるレベルでのメカニズムの解明には至っていなかった。

AGFで構築された凍土遮水壁が融解する過程において、具体的にはIL直交方向とIL方向の水流が問題となる。本研究の目的は凍結融解土の透水係数を実験的に評価する方法を開発することであり、以下の各項目を実験的に明らかにした。

- 1)IL の発生量が凍結融解土の IL 直交方向の透水係数変化に及ぼす影響の解明：凍結融解土の透水係数に影響を及ぼす要因を明らかにするために、一次元凍結融解透水実験（鉛直凍結実験）において IL の厚みや枚数を支配する冷却条件（冷却速度、温度勾配、冷却温度）を変化させ、凍結面を徐々に進行させるランプ式凍結を行った。（第 2 章）
- 2)地盤の固結度および上載荷重が凍結融解土の IL 直交方向の透水係数に及ぼす影響の解明：凍結融解土の透水係数に及ぼす、地盤の固結度および土被り圧の影響を明らかにするために、凍結実験において予圧密荷重および上載荷重の影響を検討した。1), 2)により凍結融解土の IL 直交方向の透水係数を評価する方法を明らかにした。（第 3 章）
- 3)IL 方向の凍結融解土の透水係数を決定する要因の解明：AGF において特徴的な凍結融解土の IL 方向の透水係数に影響を与える要因を解明するために、新たに「水平方向変位拘束凍結融解鉛直透水実験セル」を開発した。予圧密荷重、実験荷重、給排水の有無、凍結融解繰り返し回数等を変化させたランプ式凍結実験（水平凍結実験）を行った。特に、IL や SC の痕跡の透水係数に及ぼす影響を明らかにするために、凍結融解後の供試体から IL 方向と IL 直交方向のサンプルを採取して圧密透水試験から得られた透水係数を比較した。さらに凍結融解土の間隙比分布と透水係数との関係を検討した。（第 4 章）
- 4)凍結融解土の透水係数と IL および SC の痕跡との関係の解明：ランプ式凍結では比較的薄い IL が数多く発生する。AGF の現場では凍結面が停止して、長期間の工事では 1 枚の IL が厚く成長する傾向が認められるので、このような場合における凍結融解後の透水係数変化を明らかにする必要がある。そこで、鉛直凍結実験において凍結面を一定時間同じ位置に維持させるステップ式凍結実験を行い、凍結融解後に IL 方向と IL 直交方向の透水係数を圧密透水試験により比較検討した。（第 5 章）
- 5)凍結融解土の透水係数を予測する方法の提案：操作の簡単な鉛直凍結実験から求まる IL 直交方向の間隙比と透水係数の関係と、水平凍結実験の凍結融解後の間隙比分布から IL に直交する方向の透水係数を予測する方法を提案した。（第 6 章）

本論文は全 7 章で構成されている。以下に第 1 章から第 6 章の概要を記す。

第 1 章では、地盤の凍結融解に関する既往の研究や人工地盤凍結工法（AGF）のさまざまな用途や国内外の施工事例について概説し、本研究の背景と目的を示した。

第 2 章では IL の数量を左右する冷却条件（冷却速度、温度勾配、冷却温度）が凍結融解土の透水係数に及ぼす影響を明らかにするために実施した一次元凍結融解透水実験（鉛直凍結実験）の結果をまとめている。実験の結果、凍結融解土の透水係数に冷却条件や凍上率との関係は認められず、凍結時に発生する IL の枚数や厚みは凍結融解土の透水係数に有意な影響を与えてはいないことが確認された。

第 3 章では地盤の固結の程度および上載荷重が凍結融解土の透水係数に及ぼす影響を解明するために、予圧密荷重および実験荷重を変化させた鉛直凍結実験を行った。実験

の結果、凍結融解土の透水係数は予圧密荷重の違い（固結度）には関係なく、凍結融解時の実験荷重に対応した間隙比と透水係数の値に近づくことが明らかになった。

第2章と第3章より、未凍結土と凍結融解土の関係を間隙比と透水係数とで整理すると、それぞれ異なった土質のような独立した関係にあり、IL 直交方向の凍結融解土の透水係数に影響を及ぼす要因は凍結融解を受ける際の土被り圧等の上載荷重だけである。つまり、凍結融解土の透水係数を予測する際、現場から採取した土が乱されていても、再構成した試料を用いて現場の上載荷重と同じ荷重条件下で凍結融解実験を実施すれば、現場における凍結融解土の透水係数を求められることを意味する。また、凍結融解土の透水係数に対しては冷却速度、温度勾配、最終冷却温度などはほとんど関係しない。

第4章では AGF の現場における水平方向に変位を拘束された状態で水平方向に凍結され、その後部分的に融解した凍土壁において表面に沿うように発生する水流の検討を行った。つまり、水平方向に凍結融解した土の鉛直方向（IL 方向）の透水係数に及ぼす荷重条件、給排水条件、凍結融解の繰り返し回数による影響を実験的に検討した。その結果、IL 方向の透水係数も IL 直交方向と同様に実験荷重に応じた間隙比と透水係数に近づく傾向があり、凍結融解の繰り返し回数が多くなるほど実験荷重に応じた一定の値に収束する。低温側で間隙比の著しい増加が認められる場合では透水係数の増加も顕著であり、間隙比の増加が小さい場合は透水係数の増加が小さいことが認められた。

鉛直凍結実験（IL 直交方向）と水平凍結実験（IL 方向）における凍結融解土の透水係数は後者が大きく、それぞれ未凍結土の値よりも大幅に増加している。しかし、圧密透水試験結果では IL 方向と IL 直交方向の凍結融解土の透水係数に有意な差はなく、凍結融解土の透水係数が未凍結土と同程度になる。この原因の一つとして供試体をセルから抜き出す際の側面の乱れが影響している可能性があった。

第5章では1枚の IL 厚く成長させ、同時に SC を成長させて、IL と SC の痕跡が凍結融解土の透水係数に及ぼす影響を検討した。そのためにステップ式による鉛直凍結実験の結果を分析した。実験の結果、ステップ式とランプ式凍結において凍結融解土の透水係数に有意な差はなく、IL や SC 自体の痕跡は凍結融解土の透水係数に及ぼす影響は小さい。凍結融解後の供試体による圧密透水試験で IL 方向と IL 直交方向の透水係数を比較したところ、両者にほとんど違いはなかった。三軸凍結実験後と鉛直凍結実験後の圧密透水試験による透水係数は同等であり、第5章において心配されていた供試体をセルから押し出す際の乱れの影響は少ないと結論付けられた。

第6章では、IL 方向の透水係数を算出する方法を提案した。水平実験後の凍結融解土の間隙比分布は低温側で増加し、高温側で低下し、このような間隙比分布の偏りが透水係数の変化に影響を及ぼすと考えられた。そこで、IL 方向の間隙比分布を IL 直交方向の間隙比と透水係数の関係式により透水係数分布に換算した。このように予測された透水係数は凍結融解実験後に変水位透水試験で測定された透水係数（測定値）に近い。つ

まり，鉛直凍結実験と透水試験を省略した水平凍結実験とを行うことで，IL 方向の凍結融解後の透水係数を容易に算出することが可能であることが明らかになった。