

飽和細粒土の透水係数と凍結試験から得られる間隙特性の関係について

堀家直也¹・伊藤譲²

¹ 摂南大学大学院 ・ ² 摂南大学理工学部

1 背景

汚染土壌の浄化には地盤の透水性の把握が重要である。透水性の評価に関して、粗粒土のような粒径の大きな土では間隙比などから推定することが比較的容易であるが、細粒土においては著しく困難である。汚染土壌の浄化には粗粒土だけではなく、細粒土の透水係数を把握する必要がある。この細粒土の透水係数を正確に推定するためには、細粒土の土粒子が持つ複雑な性質を把握しなければならない。

細粒土の土粒子表面では水分子が吸着され拡散二重層(図-1)が形成されていると言われている¹⁾。この半固体状の間隙水は吸着水と呼ばれ、土粒子を覆っている。吸着水は強い吸着作用を受けているために密度や粘性などの性質が通常の水とは異なる。細粒土では土粒子相互がこの吸着水を介して接触するため強度や粘性を有する。そして、水膜の外側には吸着作用を受けていないバルク水(自由水)が存在する。細粒土において、実際の通水に関係している間隙には比較的吸着作用を受けていない自由水に近い水分が存在する。このように、細粒土において間隙量のみから透水係数を評価することは困難であるように思われている。しかし、実際の通水に寄与している間隙つまり有効間隙を評価することができれば、間隙量から透水係数の把握が可能になると思われる。

ところで、土を凍結させると 0 以下の温度でも液体状態を維持する未凍結水が存在する。このような未凍結水が存在する理由は間隙水がバルクの水とは異なった性質を有するためである。

間隙水がこのような性質を持つ要因として、凝固点降下を引き起こす溶質の影響、毛管の影響、土粒子表面の吸着力場の影響等が挙げられる。細粒土のような未凍結水量が多い土は比表面積の多い粘土を多く含んでいる²⁾。これまでの研究から、この未凍結水、凍結水の存在および性質は、強度³⁾、圧密係数⁴⁾と透水係数⁵⁾などの土の工学的諸性質とも関係しているのではないかと考えられている。

粘土-水 電子システム

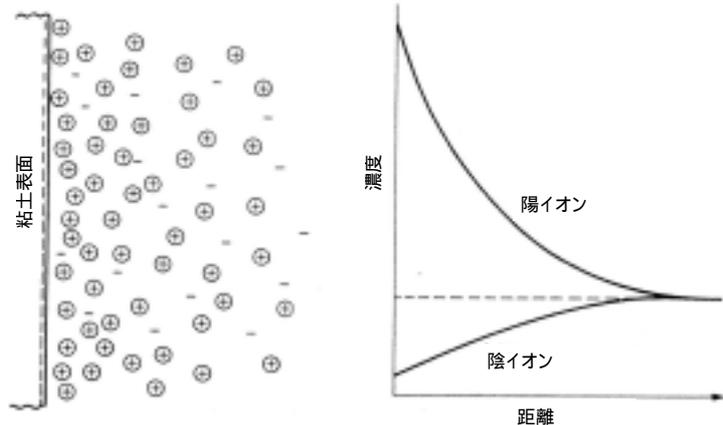


図-1 拡散二重層のモデル¹⁾

2 研究目的

本研究では細粒土の凍結試験の結果から、細粒土の間隙特性を評価することが可能であるか検討を行った。そのため、具体的には次に示すとおり実施した。さらに、細粒土の凍結挙動から透水係数を示すために、本研究の目的を以下に定める。

- (1) 細粒土の間隙水の性質を凍結水量測定試験から把握する。
- (2) 従来の間隙比と新たに定義した凍結間隙比を用いて、さまざまな土の透水係数との関係を調べ、凍結試験から得られる間隙特性と透水係数との関係を明らかにする。
- (3) Kozeny と Carman⁶⁾は間隙比の関数から透水係数を予測できるモデルを提案しているが、細粒土については適用が難しいとされていた。間隙比の代わりに凍結間隙比を用いるとこの予測モデルの適用範囲が広がるのではないかと考えられた。

表-1 試料土の物性値

試料土	記号	密度 g/cm ³	液性限界 %	塑性限界 %	粒度分布		
					砂 %	シルト %	粘土 %
藤森06N	N-C	2.684	48.0	27.9	24.4	54.5	21.1
藤森08P	P-C	2.681	44.6	25.5	26.4	47.1	26.5
藤森08F	F-A	2.688	49.8	21.2	10.3	47.3	42.4
藤森08F凍結融解	F-B		51.1	21.2			
藤森08F炉乾燥	F-D		38.1	22.2			
関東ローム	K-A	2.638	169.8	99.5	6.0	64.5	29.5
関東ローム凍結融解	K-B		137.9	93.3			
関東ローム炉乾燥	K-D		NP	NP			
カオリン5号クレイ	G-C	2.805	39.6	26.1	0.0	57.7	42.3
STカオリンクレイ	S-C	2.720	53.2	40.7	0.0	51.3	48.8
カタルボ	T-C	2.704	31.7	19.7	0.0	73.1	26.9
京橋粘土	B-C	2.676	43.4	22.6	0.5	3.3	96.2
上白	U-C	2.615	44.6	30.4	0.1	6.8	93.1
赤7号	A-C	2.659	49.1	31.4	6.5	2.0	91.5

表-2 未凍結水量の測定方法²⁾

測定方法	測定原理	特徴
カロリーメータ法	水と氷の比熱の違い、および氷の融解潜熱を利用	測定試料に制限がなく、広く利用させる。氷の融解による発熱量の測定が難しい。
NMR法 (核磁気共鳴法)	磁場中の氷と未凍結水のプロトンの緩和時間の違いを利用	測定は迅速だが高価。磁性体を含む土試料では測定が困難。
TDR法 (時間領域誘電率測定法)	氷と未凍結水の誘電率の違いを利用	測定は迅速、未凍土の見掛け誘電率と含水率の間の検量線が必要。
FTIR法 (フーリエ変換赤外分光法)	氷と未凍結水の赤外線吸収係数の違いを利用	測定は迅速だが高価。試料の厚さは0.1mm程度
氷点降下法	土中水の凍結温度が土の含水率に依存することを利用	測定は簡単、装置も安価。温度が低い領域では、精度が悪い。
氷接触法	乾燥した試料を氷板で挟み、所定の温度に置き、含水量の増加を測定	測定は簡単だが、一つの試料に数日間要する。

3 実験方法

3.1 試料土

表-1 に実験に用いた試料土の物性値を示す。用いた試料土は藤森粘土を3種、関東ローム、カオリン粘土を3種、京橋粘土、上白、赤7号である。さらに、藤森08Fと関東ロームは自然含水比状態(以下、記号「A」)であり、その他の試料土は採取後に乾燥および粉碎を行った試料(以下、記号「C」)である。それぞれの試料土は425 μm ふるい通過分である。

なお、藤森08Fと関東ロームについては土粒子の性質を変化させるためにいくつかの前処理を行った。前処理は-20で24時間凍結後に20で融解した凍結融解処理(以下、記号「B」)、+110の乾燥炉で24時間乾燥した炉乾燥処理(以下、記号「D」)である。

3.2 圧密透水試験

圧密透水試験では標準圧密試験(JIS A 1217)と変水位透水試験(JIS A 1216)を行った。試料土にイオン交換水を加え、液性限界の約1.5倍の含水比として練り混ぜてスラリー状試料とした後に、真空ポンプで脱気した。その後、12時間以上養生後、圧密リングに流し込み、加圧板を載せ12時間以上静置した。そして、圧密圧力 $p = 9.8\text{kN/m}^2$ から、荷重増分比 $p/p = 1$ として、 $p = 19.6 \sim 1256\text{kN/m}^2$ まで7段階の載荷において24時間の圧密試験と24時間の変水位透水試験を繰り返した。実際の透水試験から得られた透水係数を k と示し、圧密透水試験から得られた結果から、凍結水量測定試験時の間隙比に対応した透水係数を推定した値を透水係数 k' とする。

3.3 凍結水量の測定方法

(1) 未凍結水量の測定例

凍結土中には、0以下でも液体状態の水が存在する。これを、この報告では未凍結水と呼ぶ。未凍結水の存在理由は、未凍結水がバルクの水よりも低い化学ポテンシャルを有するためであるとされている。その、直接的な原因としては、間隙水中の溶質の存在、毛管の影響、拡散二重層の影響があるとされている²⁾。

現在、凍結水量または未凍結水量の測定には、凍結水と未凍結水の物性値の差に着目して表-2に示すさまざまな方法がある。主な測定方法には、カロリーメータ法やNMR法などがある²⁾。

カロリーメータ法は、水と氷の比熱の違いや氷の融解潜熱を利用したものである。測定では試料土を未凍結水がほとんど存在しないとされる-80まで一旦冷却した後、所定の速度で温度上昇させて、その時の発熱量を測定して未凍結水量を測定する。測定の問題点として、-80まで冷却する方法と発生熱量測定の困難さが挙げられる²⁾。

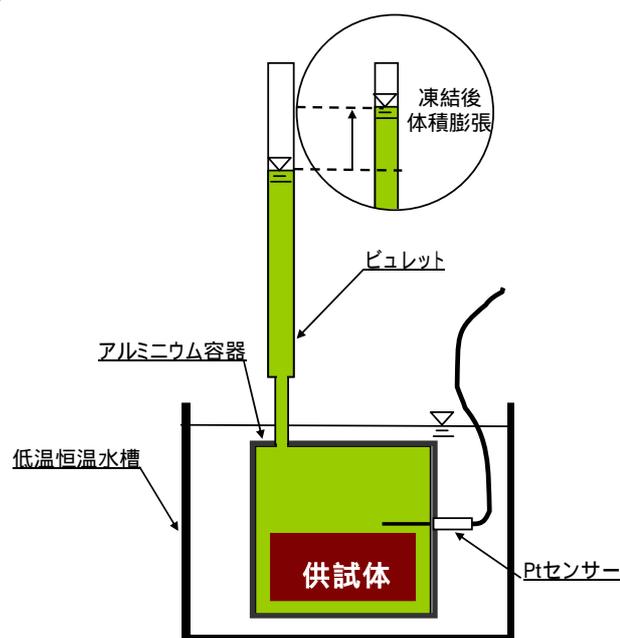


図-2 凍結水量測定のイメージ

NMR 法は、未凍結水中の水素原子プロトンの核磁気共鳴を利用したものである。凍土試料に一定時間磁場をかけた後のプロトンの緩和過程が固体の氷と未凍結水では異なることを利用している。NMR の信号の強さは、氷と未凍結水のプロトンの数により決まり、氷の信号は水と比較して極めて速く減衰するため、検出された信号は未凍結水のプロトンの数に比例することから、未凍結水量を求めている。この方法の問題点は装置が高価であることである²⁾。

(2) 凍結水量測定試験

ここで提案している凍結水量測定試験の特徴は、試料土の凍結時に間隙水が液相から固相への相変化に伴う体積膨張(約9%)を利用して測定していることである。この測定方法では従来の方法よりも簡易な装置での測定が可能である。また、この測定方法は試料土の種類や状態などの制限もなく、飽和していれば測定可能である。しかし、問題点としては実際の測定温度は冷却の媒体であり、供試体の温度を直接測定することはできない。

図-2 に凍結水量測定試験のイメージを示す。図に示すように、飽和した試料土の凍結時の体積膨張を測定する。

供試体作成方法は3.2 圧密透水試験と同様に準備したスラリー状試料を圧密圧力 $p = 19.6\text{kN/m}^2$ から 1256kN/m^2 まで圧密した試料をポリエチレン袋に入れ、アスピレーターで吸引パックしてアルミニウム製円筒容器に入れ、エチレングリコールで満す。

実験では、円筒容器ごと低温恒温水槽で $-1, -3, -5, -7, -10, -15, -20$ の順に温度降下させて、凍結した水分量をピュレットで測定している体積変化から求め、供試体の冷却温度を Pt センサーから求めた。

(3) 凍結間隙比の定義式

上記の測定結果から式(1)を用いて凍結水体積 $V_{wf(T)}$ を求め、式(2)、式(3)から凍結間隙比 $e_{f1(T)}$ 、 $e_{f2(T)}$ を計算した。

$$V_{wf(T)} = \frac{(V_{f(T)} - T \cdot V)}{0.09} \quad (1)$$

$$e_{f1(T)} = \frac{V_{wf(T)}}{V_s} \quad (2)$$

$$e_{f2(T)} = \frac{V_{wf(T)}}{V_s + V_{wu(T)}} \quad (3)$$

ここに、 $V_{wf(T)}$ ：凍結水体積、 $V_{f(T)}$ ：体積変化量、 T ：不凍液の体積膨張係数、 T ：不凍液温度、 V ：容器中の不凍液体積、 $V_{wu(T)}$ ：未凍結水体積とする。

ここで、凍結間隙比において未凍結水の扱いの違いから、本研究では2種類の定義を行う。式(2)で定義される $e_{f1(T)}$ とは土粒子体積に対する凍結水体積の比で示される。式

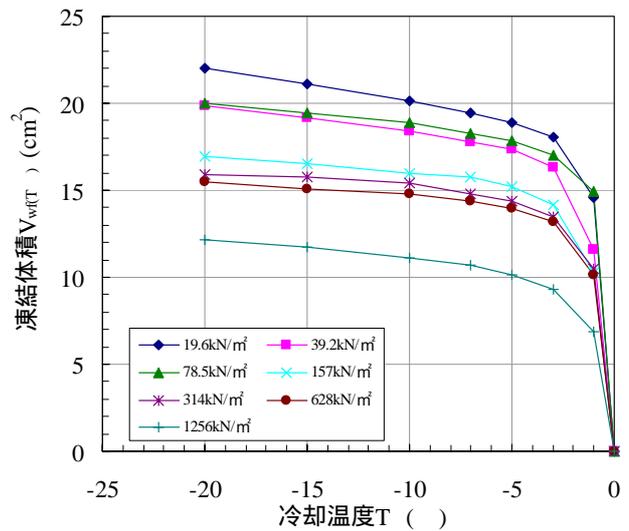


図-3 冷却温度と凍結水体積の関係(藤森 06N)

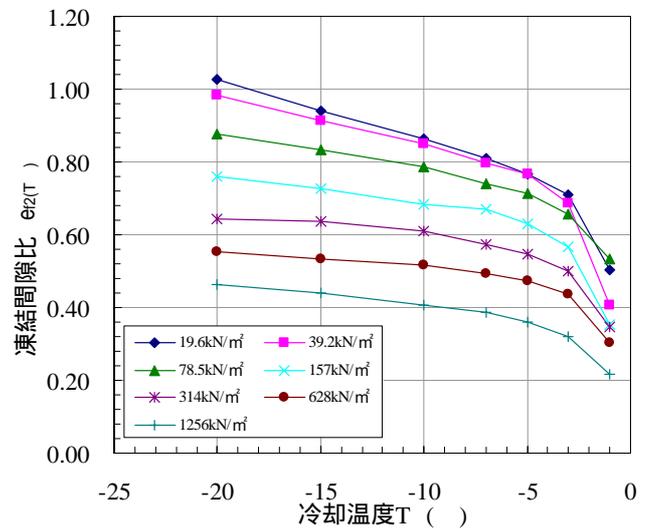


図-4 凍結間隙比 $e_{f2(T)}$ と温度の関係(藤森 06N)

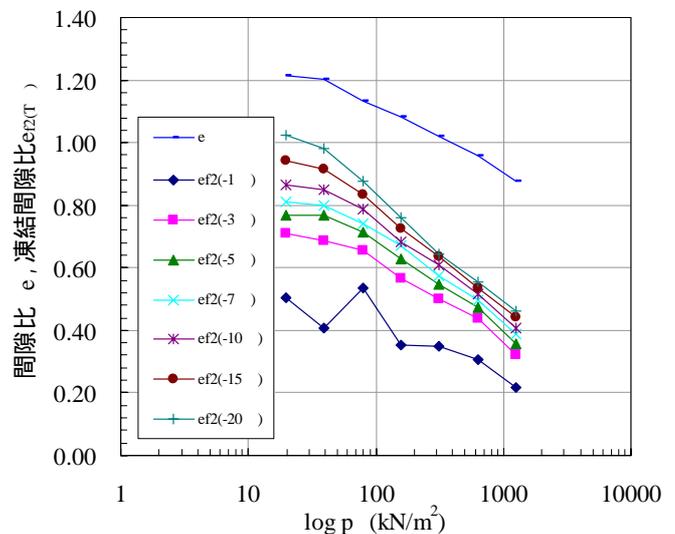


図-5 間隙比、凍結間隙比と圧密圧力の関係(藤森 06N)

(3)で定義される $e_{f2(T)}$ は土粒子体積および未凍結水体積に対する凍結水体積の比で示される．透水係数を評価するにあたり，未凍結水は通水に関しては土粒子と同等であると仮定し，今回の報告では $e_{f2(T)}$ を用いる．

4 実験結果

4.1 凍結水量測定

図-3 に凍結水量測定試験の結果の一例として，藤森 06N の冷却温度と凍結水体積の関係を示す．ここで凍結水体積とはある温度において凍結した(水から氷に相変化した)水分量であり，式(1)から求めたものである．-1 で凍結する水分は水の凝固点温度 0 に近いため，土粒子による吸着作用をあまり受けていない自由水に近い水分であるといえる．一方で，-15 や-20 など凍結する水分は土粒子による吸着作用を強く受けていると考えられる．図より，氷点下温度-1 になると間隙水が急激に凍結して，その後は温度低下に従い徐々に凍結していることがわかる．また，圧密圧力が大きいほど凍結水体積が小さいことがわかる．この凍結水体積を用いて式(2)，(3)から凍結間隙比を算出する．

図-4 に凍結間隙比 $e_{f2(T)}$ と冷却温度の関係を示す．図より， $e_{f2(T)}$ と温度の関係においても，温度低下に従い $e_{f2(T)}$ が増加している．また，図-3 と同様に圧密圧力によって凍結の程度が異なっている．

図-5 に間隙比 e ，凍結間隙比 $e_{f2(T)}$ と圧密圧力の関係を示す．図より， $e_{f2(T)}$ と圧密圧力の関係は温度低下に従い上方に移動して， e - $\log p$ 曲線に近くなっている．このことから，間隙水は土粒子の外側から徐々に凍結していくことがわかる．また， e - $\log p$ と $e_{f2(-20)}$ - $\log p$ の両曲線が一致しておらず，後者が低くなっている．このことは，-20 での未凍結水の存在を示している．さらに，圧密圧力が大きいほど両曲線の差は広がっている．

このように凍結水量測定からは土中に存在する間隙水の存在形態(吸着水，自由水)を評価することが可能であるといえよう．

4.2 透水係数と間隙比

(1) 透水係数と間隙比

透水試験から得られた透水係数 k と透水試験時の間隙比 e のデータから，凍結水量測定試験時の間隙比 e に対応した値を求め，透水係数 k' とする．これ以降は透水係数 k' との関係述べる．

図-6 に通常の間隙比 e と透水係数 k' の関係を示す．図より，本研究で用いた試料土においては e が増加すると k' は増加するという関係はわかる．しかし，試料土全体を眺めてみると e が与えられると k' が決まるとは一概にはいえない．例えば， $e = 1.0$ のラインにおいて左のグループでは k' は $1.00 \times 10^{-6} \sim 10^{-8} \text{cm/s}$ の範囲に分布する．さらに，これらのグループとは異なり， e が 2.00 を越えている試料土 K-A，K-B が存在している．このことから，通常の間隙比のみからさまざまな土の透水係数を一括して評

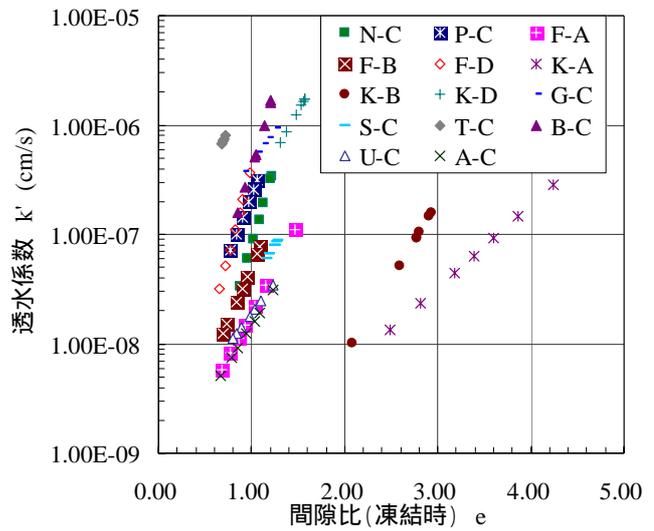


図-6 間隙比 e と透水係数 k'

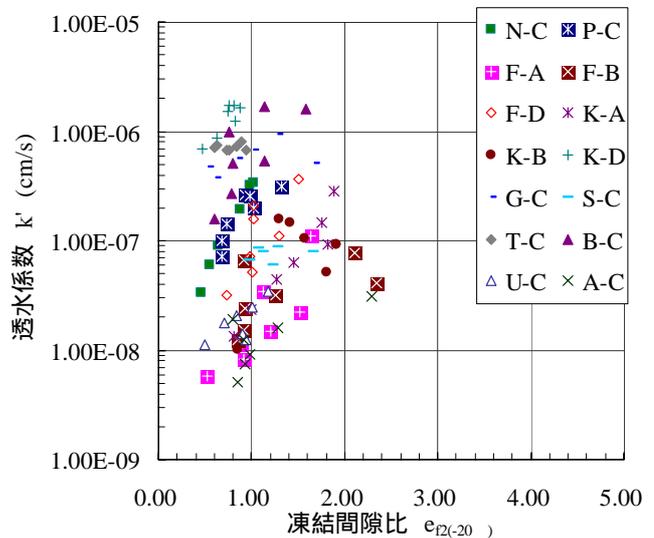


図-7 凍結間隙比 $e_{f2(-20)}$ と k'

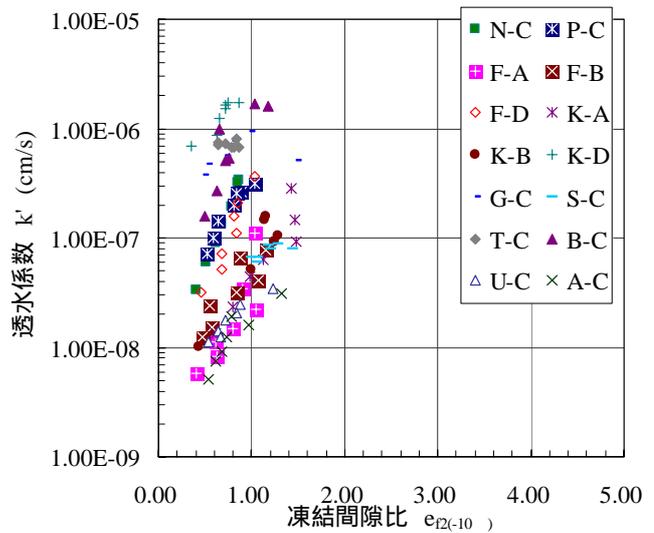


図-8 凍結間隙比 $e_{f2(-10)}$ と k'

価することは、既往の研究⁷⁾で示されていたとおり困難であることが確認された。

(2) 透水係数と凍結間隙比 $e_{f2(T)}$

図-7 に-20 の凍結間隙比 $e_{f2(-20)}$ と透水係数 k' の関係を示す。図より、通常の間隙比 e 用いた図-6 ではグループから離れていた試料土 K-A, K-B が $e_{f2(-20)}$ を用いると一つのグループに集まっていることがわかる。つまり、 e と比べて $e_{f2(-20)}$ を用いると試料土全体の関係が強くなる。しかし、プロットのバラつきが大きく、 $e_{f2(-20)}$ から透水係数を推定することは困難である。

次に、図-8 に-10 の凍結間隙比 $e_{f2(-10)}$ と透水係数 k' の関係を示す。 $e_{f2(-10)}$ を用いると、 $e_{f2(-20)}$ を用いた図-7 と比較しての $e_{f2(-10)}$ 範囲がさらに狭まり、 k' との関係が強くなっている。しかし、図-7、図-8 においても、凍結間隙比から透水係数を推定できるとはいえない。

図-9 に-1 の凍結間隙比 $e_{f2(-1)}$ と透水係数 k' の関係を示す。図-7、図-8 と比較すると全てのデータがさらに移動して右上がりに集中することがわかる。 $e-k'$ では大きくグループから外れていた試料土 K-A, K-B も一つのグループにまとまり、 $e_{f2(-1)}$ を用いることによって試料土全体としての関係がみられる。また、 $e_{f2(-20)}$ - k' の関係および、 $e_{f2(-10)}$ - k' の関係と比較すると $e_{f2(-1)}$ - k' の関係から-1 で凍結する水分量が、より透水係数に関係しているといえよう。

これらの結果からここで定義を行った凍結間隙比 $e_{f2(T)}$ を用いることによって、さまざまな試料における透水係数を評価できる可能性が示された。さらに、その関係は間隙水の凍結温度によって異なり、今回示した範囲では-1 で凍結した水分量を用いた凍結間隙比 $e_{f2(-1)}$ と透水係数 k' の関係を用いると、さまざまな土においても $e_{f2(-1)}$ が大きくなれば k' は大きくなるという関係がみられた。

(3) 透水係数と間隙比関数

図-10, 11 に透水係数 k' と間隙比関数 $e^3/(1+e)$ の関係を示す。図-11 は図-10 の間隙比の範囲を $e = 2.00$ とした。これは、図-10 で示される左のグループにおいても試料ごとの分布の違いを見るためである。図-10 より、試料土ごとにみると、 $e^3/(1+e)$ と k' の関係は比例関係に近いものである。この結果は、これまでの研究結果と同じであった⁶⁾。しかし、試料土全体を眺めるとプロットが 2 つのグループに分かれ、試料土全体と $e^3/(1+e)$ の関係は示されない。

次に、図-11 では、試料土ごとには k' との比例関係は示すことが可能であるが、試料土全体と k' の関係は強いものではない。つまり、この間隙比関数ではさまざまな土の透水係数を一括して評価することは難しい。

図-12 に-1 の凍結間隙比を用いた凍結間隙比関数 $e_{f2(-1)}^3/(1+e_{f2(-1)})$ と透水係数 k' の関係を示す。図-10 では間隙比の範囲が試料 K-A において $e = 15.00$ までと幅広く分布していたが、図-12 にはすべての試料土が $e = 2.00$ の範囲内にあることがわかる。図-11 に比べて図-12 では

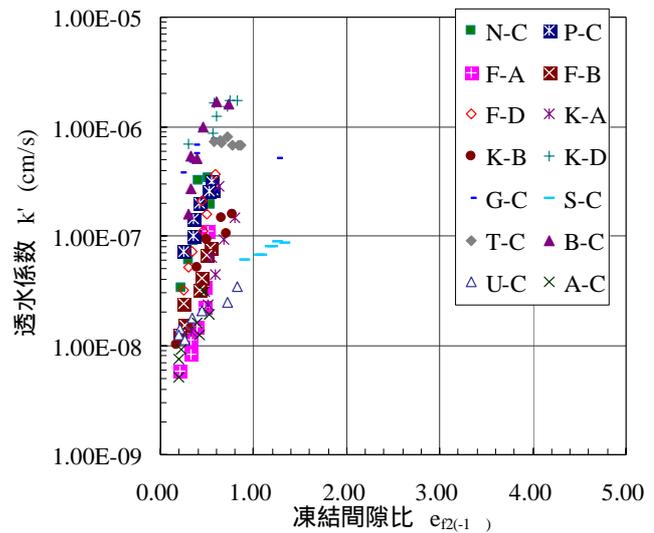


図-9 凍結間隙比 $e_{f2(-1)}$ と k'

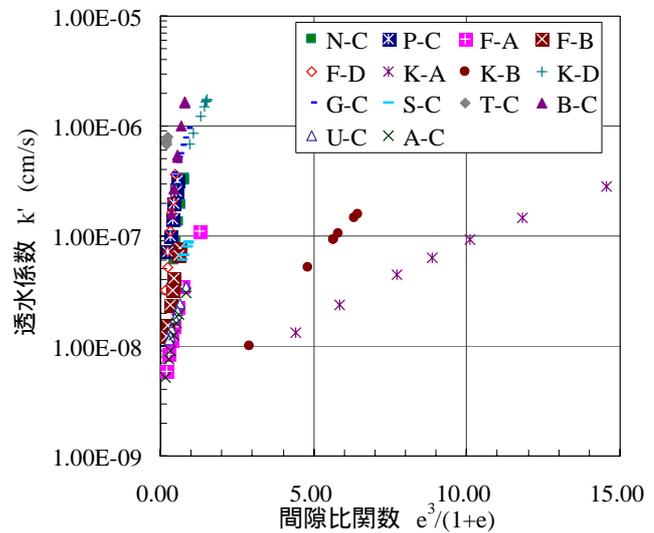


図-10 間隙比関数と k' ($e = 0.00 \sim 15.00$)

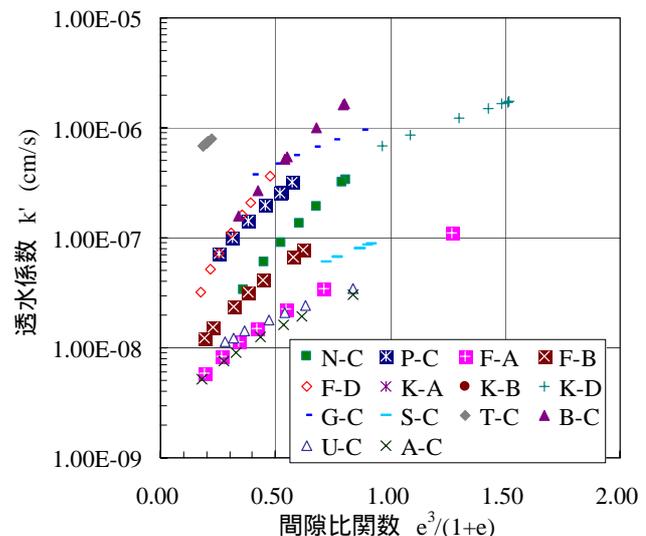


図-11 間隙比関数と k' ($e = 0.00 \sim 2.00$)

プロットが全体的に集まっており、図-9では確認できなかった試料土全体と凍結間隙比関数の関係が認められた。ただし、今回用いた試料土のG-Cの一部、S-Cにおいてはこれらの関係とは違う傾向があることがわかる。

このことから、凍結間隙比を用いた凍結間隙比関数からさまざまな土の透水係数を一様に評価できる可能性があるといえる。

4.3 凍結挙動と透水係数の関係

図-9、図-12に示したように、凍結間隙比、凍結間隙比関数を用いることによって、通常の間隙比では示されなかった試料土全体を通じた透水係数との関係が示された。さらに、今回の研究で測定した温度範囲では-1℃までに凍結する水分量が透水係数に最も関係している結果となった。

これは、-1℃までに凍結する水分量は比較的吸着作用を受けていない自由水に近い水分であり、この水分は実際の

通水に関係している水分に近いといえる。さらに、-20℃までに凍結する水分量と透水係数の関係は-1℃までの関係に比べてばらつきが大きい。これは-20℃で凍結する水分量は密度や粘性などの性質が異なる。そのため、通水現象にはあまり関係ない水分も含まれているといえよう。今回の実験において-1℃で定義される凍結間隙比 $e_{f2(-1)}$ は通常の間隙比に比べて有効間隙に近い指標であり、凍結間隙比からさまざまな土の透水係数を説明できる可能性が示された。

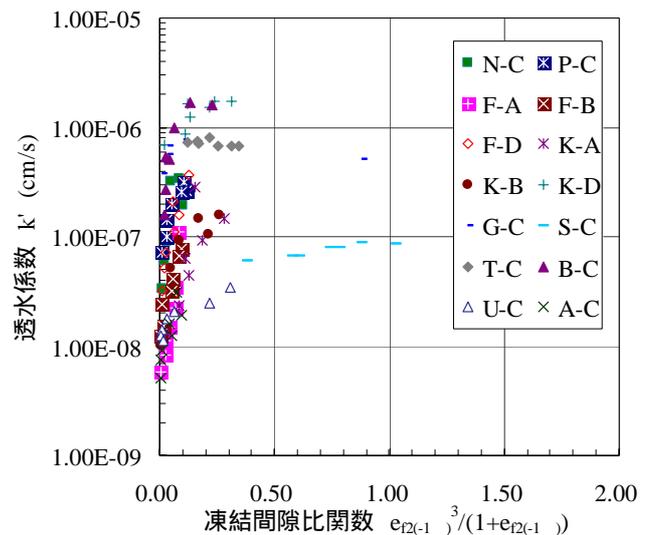


図-12 凍結間隙比関数と k'

5 まとめ

これまでの研究結果を以下の項目にまとめる。

- (1) 細粒土の間隙水の性質を、凍結水量測定試験から得られる凍結挙動によって把握できた。
- (2) 飽和細粒土の透水係数 k を評価する方法として凍結試験から求めた凍結間隙比 $e_{f2(T)}$ という指標が示された。
- (3) ここで定義を行った凍結間隙比 $e_{f2(T)}$ 、凍結間隙比関数 $e_{f2(-1)}^3 / (1 + e_{f2(-1)})$ を用いることによって、通常の間隙比 e 、間隙比関数 $e^3 / (1 + e)$ からは把握できない、実際の通水現象に直接関係している間隙(有効間隙)、および透水係数 k を評価できる可能性が示された。
- (4) 今回の実験で行った温度の範囲では、-1℃で凍結した水分量と透水係数 k の関係が最も強く、氷点温度に近い温度で凍結する水分量が透水係数 k に関係していると考えられる。
- (5) 現在の凍結水量測定試験の冷却温度の範囲では-1℃以上の計測は行われていないため、今後はさらに氷点温度に近い温度での実験を行う必要がある。さらに、溶質の性質による影響も考慮する必要がある。

参考文献

- (1) James K. Mitchell & Kenichi Soga: Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, Inc., p.154, 2005.
- (2) 土質工学会: 土の凍結-その理論と実際-, 2章 土の低温特性, pp.21-78, 1994.
- (3) 伊藤・堀家: 粘性土の凍結時の挙動から強度特性を知る方法, 第45回地盤工学研究発表会, 2010.(発表予定)
- (4) 堀家・伊藤・嘉門: 飽和細粒土における凍結試験と圧密特性との関係, 土木学会全国大会 第64回年次学術講演会, 2009.
- (5) 堀家・伊藤: 飽和細粒土の透水係数を支配する間隙の評価方法について, 土木学会全国大会 第65回年次学術講演会, 2010.(発表予定)
- (6) Kozeny, J., Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden, Wien, Akad. Wiss., Vol.136, Part 2a, p.271, 1927.
- (7) James K. Mitchell & Kenichi Soga: Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley & Sons, Inc., pp.251-262, 2005.
- (8) 東万里子, 古川晶大, 堀家直也: 細粒土の工学的性質と凍結挙動との関係に関する研究, 摂南大学卒業論文, 2008.
- (9) 田中輝佳, 辻村光: 土の凍結特性から透水係数などの工学的諸性質を推定する方法, 摂南大学卒業論文, 2009.
- (10) 荒木亨, 大林真澄: 誘電率を利用した土壤水分計による凍結水分量と一軸圧縮強さとの関係, 摂南大学卒業論文, 2009.

謝辞

本研究の一部には日本学術振興会科学研究補助金(基盤(C))No.22560501の一部が使用されています。ここに記して感謝の意を表します。