

砂の熱伝導率の水分依存性

苫小牧工業高等専門学校 正会員 ○所 哲也
 北海道大学大学院 フェロー会員 石川 達也
 苫小牧工業高等専門学校 正会員 中村 努
 苫小牧工業高等専門学校 学生員 白井 翔也

1. はじめに

北海道では、凍結融解作用が主因と考えられる地盤災害が冬から春にかけて発生する。これら災害の対策を行う上で、熱伝導率などの熱物性値を用いて凍結深さ、地盤内の温度分布を推定する必要があるが、土の熱伝導試験は基準化されておらず、過去の試験データや推定式を用いているのが現状である。土の熱伝導率は、石英含有量と含水比など影響因子が多く、これまで種々の熱伝導モデルが提案されている^{1),2)}が、あらゆる土質に適用可能な推定式は存在しない。そこで、本研究では、熱伝導モデルの構築を目標として、まずは土中の水分状態に着目し、非定常熱線法の一つであるサーマルプローブ法を用い、異なる飽和度の豊浦砂に対して熱伝導試験を実施した。得られた熱伝導率を水分特性曲線と照合して水分依存性を考察する。

2. 試験装置および計測原理

図1に試験装置の概略図を示す。装置は、サーマルプローブ、安定化直流電源、計測機器、パソコン、および恒温水槽で構成されている。図2にプローブの詳細を示す。プローブは、外径30mm、高さ150mmの銅管に、ヒーター線と熱電対(T型)が封入されており、内部は常温で固体のワックスを充填して、ヒーター線と熱電対を絶縁、固定している。プローブの使用にあたり、熱伝導が既知な水(1%寒天ゲル)を用いて、プローブの検定を実施している。

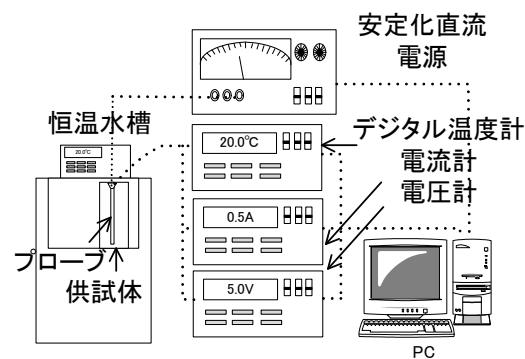


図1 試験装置概略図

サーマルプローブ法は、プローブに一定の熱量を加えたときの温度上昇がプローブに接する試料の熱伝導率に依存することを利用して熱伝導率を求める手法であり、熱伝導率は次式で表される。

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi\Delta\theta} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (1)$$

ここで、 λ : 熱伝導率 (W/m/K) Q : プローブの単位長さ当たりの熱量 (W/m), t_1, t_2 : 時間 (h), $\Delta\theta$: t_1, t_2 間のプローブの上昇温度である。



図2 プローブ詳細図

表1 試験条件

乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.60							
間隙比 e	0.66							
設定飽和度 S_r (%)	0	5	10	15	20	50	80	100

3. 試験条件および試験方法

試験条件を表1に示す。設定飽和度となるように、含水比を調節し、直径72mm、高さ180mmのステンレス容器内に試料を入れ、相対密度 D_r が85%となるように突固めにより供試体を作製した。試験終了後に供試体上部、中部、下部の含水比試験を実施し、含水比のばらつきが小さいことを確認している。試験は、20℃に設定した恒温水槽内に供試体を入れた容器を設置し、熱量 Q が12W/mとなるように安定化直流電源より電圧を送信し、各計測器により温度、電流、電圧値をパソコンにより自動計測する。各飽和度の供試体に対して20分間プローブに通電することで熱伝導試験を実施した。得られた温度上昇と経過時間 ($\ln t$) のグラフから両者の傾き $\Delta\theta/(\ln t_2 - \ln t_1)$ を最小二乗法により算定し、(1)式に代入することで熱伝導率を求めた。

キーワード 熱伝導率, 不飽和土, 水分特性曲線

連絡先 苫小牧工業高等専門学校 〒059-1275 北海道苫小牧市字錦岡443 TEL 0144-67-8062

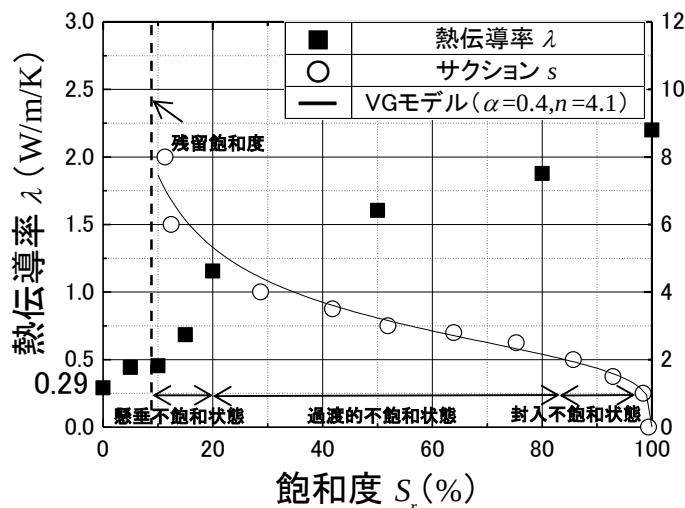


図3 熱伝導率と水分特性曲線

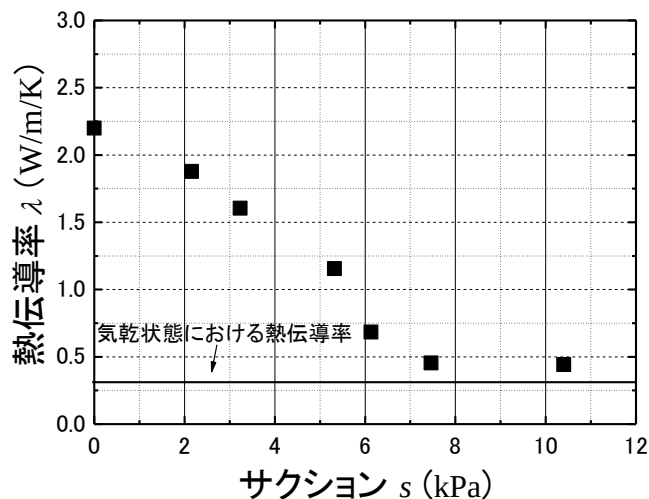


図4 熱伝導率とサクション関係

4. 試験結果

熱伝導率と飽和度の関係を図3に示す。土中の水分状態と熱伝導率の関係を調べるため、同密度で別途実施した保水性試験より得られた水分特性曲線³⁾とVGモデルによる近似曲線を併せて示す。土中における熱は、土粒子(固相)、水(液相)、空気(気相)に沿って伝達されるが、空気の熱伝導は、土粒子、水と比較すると無視しえるほど小さいため、土の熱伝導率は含水量と比例関係になると考えられる。しかし、図を見ると含水量の増加による熱伝導率の上昇は一律ではなく、水分特性曲線と対比から不飽和土内における水分の存在状態に依存する傾向にある。土中水の存在状態は、気泡が離散的に存在している封入不飽和状態、主にメニスカス水で存在する懸垂不飽和状態、封入不飽和状態と懸垂不飽和状態の間を遷移する過渡的不飽和状態に分類される⁴⁾。このため、次にこれらの土中水の存在状態から熱伝導率の水分依存性を考察する。

気乾状態($S_r=0\%$, $\lambda=0.29$ W/m/K)から残留飽和度までは、含水量増加による熱伝導率の上昇は極めて小さい。これより、間隙水は土粒子表面に存在する極めて薄い吸着水と主に土粒子の接点にメニスカス水として存在し、これらの間隙水は伝熱に寄与しないと考えられる。懸垂不飽和状態においては、熱伝導率の変化が大きく、この状態で伝熱に寄与する間隙水が連続したと考えられる。過渡的不飽和状態から封入不飽和状態を経て飽和状態に至るまでは、既に伝熱に寄与する間隙水が連続しており、含水量の増加に比例して熱伝導が増加したと考えられる。以上より、熱伝導率は不飽和土内における水分の存在状態に依存していると言える。

熱伝導率と水分特性曲線との関係をより詳細に調べるため、熱伝導率とサクションの関係を図4に示す。残留飽和度以下の高いサクションにおいては、気乾状態からの熱伝導率の増加はほとんどない。一方、残留飽和度より飽和度が高い領域のサクションでは、熱伝導率はサクションの減少と比例関係にある。前述のように、飽和度と熱伝導率の関係は、土中水の存在状態に依存してその増減傾向が変化した、サクションとの関係は状態に依存しない傾向にある。このことは、残留飽和度以上において、熱伝導率はサクションの関数として表現可能であることを示唆しており、熱伝導率の推定には水分特性曲線を考慮する必要があると考えられる。

5. まとめ

サーマルプローブ法により得られた豊浦砂の熱伝導率の水分依存性は、水分特性曲線により説明される不飽和土内の水分の存在状態と対応しており、残留飽和度以上においては、熱伝導率とサクションに一義的な関係が見られた。今後、水分特性曲線の傾向が異なる試料を用いて、データの蓄積を行う予定である。

参考文献 1) Johansen, O.: Thermal conductivity of soils, PhD thesis, Trondheim University, Norway, 1975. 2) Kersten, M, S: Thermal properties of soils, University of Minnesota, Institute of Technology, Engineering experiment station, Bulletin, No.28, 1994. 3) 瀬川ら：不飽和粒状路盤材の力学挙動評価のための中型不飽和三軸試験機の開発，第52回地盤工学会北海道支部技術報告会，pp.27-34，2012. 4) Kogo et al: Theoretical aspects of constitutive modeling for unsaturated soils, Soils and foundations, Vol.33, No.4, pp.49-63, 1993.