

高い乾燥密度における土の熱伝導率測定法

締め固め度, 熱伝導率, プローブ法

(株) 複合技術研究所 正会員 石塚真記子

(独) 鉄道・運輸機構 丸山修

(独) 鉄道・運輸機構 青木一二三

(財) 鉄道総合技術研究所 国際会員 小島謙一

(財) 鉄道総合技術研究所 正会員 富永真生

(独) 鉄道・運輸機構 石山民一

はじめに

凍上現象がみられる寒冷地の鉄道路盤を設計するにあたって, 凍結深さを予測することは重要であり, 凍結深さを正確に予測するためには土の熱伝導率を正確に把握する必要がある. 現在のところ, 土の熱伝導率測定にはプローブ法が適用されるが, プローブ法の測定事例の多くは畑や森林など, あまり締め固められていない比較的乾燥密度の低いやわらかな土を対象とした室内あるいは現場であった. しかし, 熱伝導プローブは細い金属管にヒーターと温度計を内蔵した棒状のセンサーで締め固めに弱いという問題点があり, この華奢なセンサーを鉄道路盤を想定した $D=90\%$ 以上の乾燥密度が高く硬い土に埋め込み, 破損することなくプローブ周辺を締め固めることは困難であった. 本研究では, 凍結・未凍結状態の高い乾燥密度における土の熱伝導率を単一プローブ法で測定することを目的として高乾燥密度用モールドを考案した.

高い乾燥密度の土の熱伝導率を測定する場合の問題点: 熱伝導プローブには, ヒーターや熱電対のための金属の単線がパラフィンとともに数本封入されている. プローブを強く曲げるなどして, これらの極めて細い線を切断すればプローブは機能しなくなる. 従来乾燥密度が高い土で測定を行うには, プローブと試料と一緒に締め固めていたが, 締め固め作業中にプローブが破損してしまう可能性が高かった. このため, 金属管の厚みを増してプローブ自体を太く, 丈夫にするなどの方法が用いられてきた. しかし, プローブ径を大きくすれば, データを解析する際の理論式(近似解)の仮定 r_0 が成り立ちにくいと考えられた.

解決策: そこで今回はプローブの直径を大きくしないで済むように所定の寸法・乾燥密度・含水比の供試体を2個にわけて作製し, プローブと熱電対をはさみこむ方法とした. プローブ法では, プローブからの熱拡散が360度の方向に放射状に起こると考えられるので, 2個の供試体の合わせ面がぴったりあうこと, プローブと試料の接触が十分であること, の2点を満たせば問題はないと考えられた. そこで, この方法の有用性を確認するために以下のような試験を行った.

実験手順
試料と供試体作製法: 試料は粒径が小さくプローブとの接触がよいと考えられる稲城砂を用いた(2mm篩通過 $w=17\%$). 作製した高乾燥密度用モールドはアルミ製で組立上がり外寸184mm, 内法160mm角の立方体である(図1(a)-(c)). このモールドは内法で幅160mm, 奥行160mm, 高さ80mmの半割りモールド2個から構成されている.

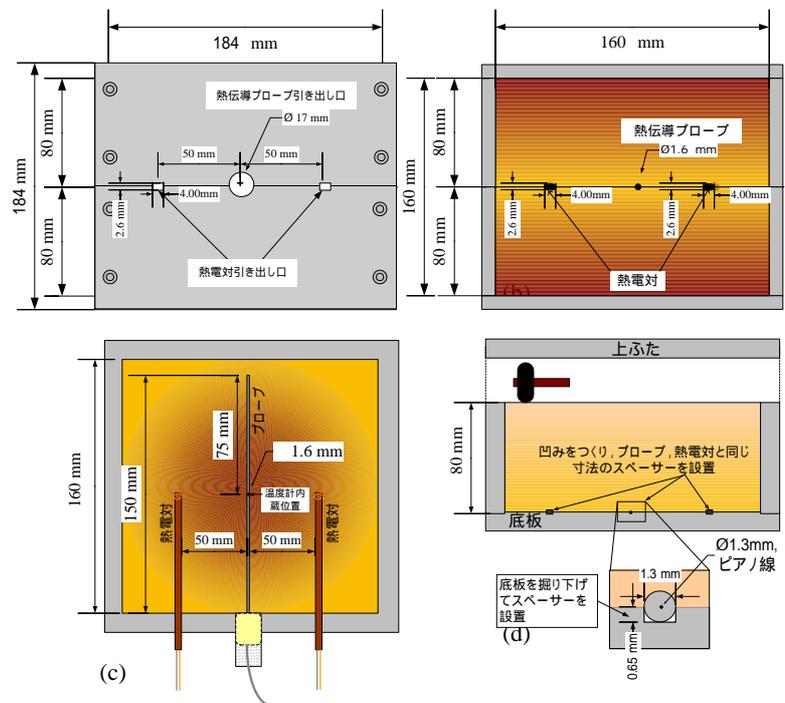


図1 高乾燥密度用モールドを用いた供試体作製

- (a) センサー引き出し面, (b) (a)から見た断面図, (c)センサー設置面上から,
(d) スペースの設置状況

十分な試験を行った.

実験手順

試料と供試体作製法: 試料は粒径が小さくプローブとの接触がよいと考えられる稲城砂を用いた(2mm篩通過 $w=17\%$). 作製した高乾燥密度用モールドはアルミ製で組立上がり外寸184mm, 内法160mm角の立方体である(図1(a)-(c)). このモールドは内法で幅160mm, 奥行160mm, 高さ80mmの半割りモールド2個から構成されている.

Thermal conductivity measurement of high bulk density soil with the single thermal probe method, ISHIZUKA Makiko (Integrated Geotechnology Institute Limited), AOKI Hifumi, MARUYAMA Osamu (Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency), KOJIMA Ken-ichi, TOMINAGA Masao (Railway Technical Research Institute), ISHIYAMA Tamikazu (Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency, Morioka branch)

作製手順は、**図1**-(d)のように、半割りモールドの底板にスペーサーを設置し、 $D=90\%$ (1.6 Mg cm^{-3})となるように、 2cm づつ撒き出して締め固め、上ふたをつける。これを2個作製する。半割りモールドの上ふたを下にして、底板とスペーサーを取り外し、センサー設置面を開ける。センサー設置面に凹みができているので、そこに熱伝導プローブ (Thermal logic 社) 1本、熱電対 (銅-コンスタン) 2本を設置する (**図1** (c))。熱伝導プローブは供試体中心に、熱電対は中心から 5cm の位置に設置する。もう一方の半割りモールドのセンサー設置面を合わせて (**図1** (a), (b)) 熱伝導プローブと熱電対を挟む。合わせ目をビニールテープで目張りする。供試体は風除けをつけて所定の温度に設定した恒温チャンバーに設置し、プローブと熱電対をデータロガー兼コントローラー (Campbell scientific 社 CR10X 他で構成) に接続する。

熱伝導率測定法：熱伝導率は単一プローブ法^{たとえば 4),6)}で測定し、データ解析には比較法^{たとえば 4),5)}を用いた。単一プローブ法とは、熱伝導プローブ1本を供試体へ挿入した状態でヒーターに一定電圧を印加し、プローブの温度変化と自然対数をとった印加時間の関係の傾き s 、プローブに与えた熱量から熱伝導率 k ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)を算出する方法である。比較法とは、熱伝導プローブの熱的な個体差を補正するための方法である。対象となる試料 (今回は土) と基準試料 (今回は水) の温度上昇を比較して補正係数を求め、基準試料の熱伝導率と補正係数の積から対象試料の熱伝導率を求める方法である。

測定手順：今回は1個の供試体を未凍結 20°C のとき、凍結 -10°C 下のとき、各3回づつ熱伝導率測定した。チャンバー温度と供試体の温度が一致して変化がなくなるまで待ち、測定開始した。供試体が曝された温度環境は 20°C 、 -20°C 、 -10°C

20°C である。設定温度を大きく変化させた後、供試体温度が平衡に達するまで $24\sim 42$ 時間程度かかった。また、チャンバー温度を一旦 -20°C に温度を下げた理由は、凍結させるまでの間に凍上が起こり供試体の乾燥密度が小さくなることが予想されたためである。供試体の温度が 0°C を下回るまでの間は一気に冷却することで凍上を防止することにした。最後に 20°C に戻すのは、チャンバー内の結露 (冷却装置に霜がつく) を防止するため、外気温と近いチャンバー温度にしてから扉を開けるためである。試験後、供試体を取り出し、ビニールテープや土の状態を観察し、凍上が起こっていないことを確認した。

結果と考察

稲城砂の実測値 (\square)、水 $0.561 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (\blacksquare) ならびに氷 $2.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (\bullet) の文献値を**図2**に示す。稲城砂の熱伝導率は、 20°C で $0.85 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、 -10°C で $1.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ であった。**図3**に 20°C の場合の温度上昇と時間の関係を示す。3回の結果がよく一致しており、プローブと試料の接触状態が安定していたことがわかる。

まとめ

稲城砂を $D 90\%$ に締め固めて、単一プローブ法で熱伝導率を、 20°C 、 -10°C 環境下で測定することができた。熱伝導プローブの破損はなく、プローブ周辺も十分に高い乾燥密度で供試体を作製し、測定することができた。この方法は乾燥密度が低い試料についても適用することが可能¹⁾であり、熱伝導率の乾燥密度依存性に関する研究を行う上で、また熱伝導プローブのみならず、あまり頑丈ではない各種センサー類の測定値の乾燥密度依存性を検証する上でも有用な手法であると考えられる。

今後の課題

粒調砕石を締め固めた供試体の熱伝導率を測定する、高乾燥密度用モールドの合わせ目におけるセンサー表面と土、土と土の接触状況について、感圧式フィルムなどを利用した検証を実施し、接触抵抗を定量化する、土の熱伝導率の乾燥密度依存性を実験的に解明する、スペーサーの形状を変え、サーモ TDR を用いた高い乾燥密度における体積熱容量、比熱、熱伝導率を直接測定する、のほか各種水分計などのセンサー類を高い乾燥密度から低い乾燥密度まで幅広い条件下で使用し、センサー測定値の乾燥密度依存性の検証を行う。

<文献> 1) 小島ら(2005)：「室内試験を用いた八戸ロームの熱伝導係数の検討」, 第40回地盤工学研究発表会 (函館), (社)地盤工学会 (投稿中), 2) 宮崎(2000)：「環境地水学」, 東京大学出版会, p. 76, 3) 国立天文台：「理科年表」, 丸善, p54, p56, 4) 粕淵(1982)：「土壌の熱伝導に関する研究」, 農技研報 B, 33, p. 1~54, 5) 望月(2002)：「砂および粘土の熱伝導率の水分・塩類濃度依存性に関する研究」, 東京大学・大学院 博士論文, 6) July et. al. (1991)：「Soil Physics」5th ed., p. 183, John Wiley & Sons, Inc., 7) 中野ら(1995)：「土壌物理環境測定法」, p.207, 東京大学出版会

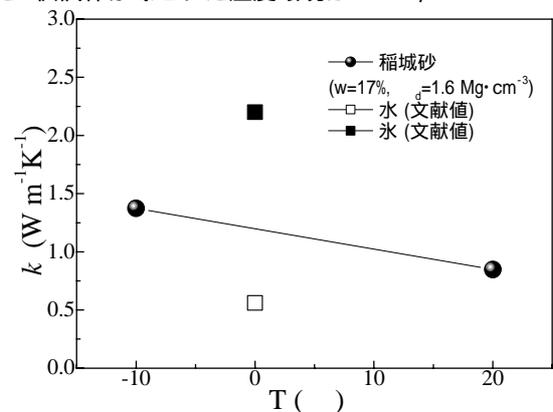


図2 熱伝導率と初期温度の関係

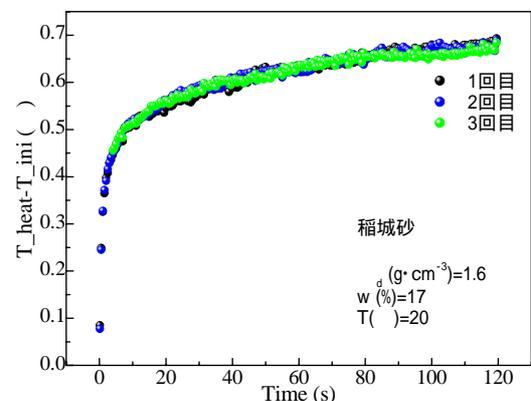


図3 温度上昇と時間の関係 (20°C の場合)