

室内試験を用いた八戸ロームの熱伝導率の検討

熱伝導率, ローム, 室内試験

(財) 鉄道総合技術研究所 国際会員 小島謙一
 (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 青木一三
 (財) 鉄道総合技術研究所 正会員 富永真生

1. はじめに

寒冷地において粘性土系地盤に鉄道路盤を敷設するにあたり, 凍上に関する検討が必要となる. 凍上の検討としては, 修正 Berggren 法等から凍結深さを求めることにより実施している. 修正 Berggren 法では地盤等の熱特性を考慮することができるため, 現地土の熱特性を正確に求めることにより適切な検討を行うことが可能となる. しかし, 土の熱特性を得ることは容易ではない. そこで, 比較的簡易な室内試験¹⁾を用いて現地から採取した土(青森県八戸の火山灰土)の熱伝導係数を求めることとした.

2. 実験方法

2.1 概要

熱伝導率測定は単一プローブ法を用い, ロームの熱伝導率を初期温度-10, 20において測定した. 供試体は $16 \times 16 \times 16 \text{ cm}^3$ の大きさとし, 高乾燥密度用モールドを用いて, 現場乾燥密度($1.1 \text{ Mg} \cdot \text{cm}^{-3}$), 現場含水比($w=52\%$)となるように締め固め, 作製した. 単一プローブは供試体の中心に, プローブ長15cmの熱伝導プローブ(熱電対の位置はプローブ両端から7.5cm), 供試体中心から左右5cmの位置に銅-コンスタンタン熱電対2本を埋め込んだ(図-1, 2). これらのセンサーをデータロガー兼コントローラー(Campbell scientific 社 CR10X 他で構成)に接続して測定を行った. 試験は, 初期温度を一定にすることができる恒温チャンバー内で測定を実施した. 測定はプローブの温度, 熱電対の温度, チャンバー内の温度が所定の初期温度で一致し, 経時変化が見られない定常状態を確認した後, 開始した. ヒーターを加熱する時間は2分, 上昇温度は試料が乾かないように2以内とした⁵⁾. 加熱終了後, 次の加熱までの時間は, 温度が十分に回復していると確認した約120分とした. なお, 本手法の詳細については文献1)を参照されたい.



図-1 供試体の中心部
(センサーなし)



図-2 供試体の中心部
(センサー設置部)

2.2 供試体作製と初期温度サイクル

試料は青森県八戸市で採取した火山灰土の攪乱試料用いて, 100cc コアサンブラーで現地から採取した試料の乾燥密度と含水比から決定した密度, 含水比に合わせて調整した. 供試体作製時には試料が乾かないように注意しながら, 手作業で礫などを取り除き, 土塊をほぐし, 高乾燥密度用モールドに現場乾燥密度, 現場含水比となるように充填した. 図-1 は充填後の中心部, 図-2 はセンサー設置面の中心部にプローブ, 熱電対を設置した状態である. 図-1, 2 の面をあわせてセンサーを挟み込み, ビニールテープで接合面を閉じて密閉した. 風除けのパッキン材で供試体とセンサー等のケーブルの一部を覆い, チャンバー内に設置した(図-3 参照). このとき, チャンバーの温度確認用熱電対も別途設置した.

初期温度は, 20 40 -20 -10 20 の順で変化させた. 本試験においては未凍結, 凍結それぞれの熱伝導率をはかることを目的としていることから, 未凍結の状態として20, 凍結の状態として-10を解析対象温度として設定した. 温度サイクル中, 一旦-20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, 供試体の温度が0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. このため, 初期温度-20における測定はとくにっていない. また, 40は未凍結状態の参考値として評価するために設定した温度である. 最後に20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.

Thermal conductivity measurement of high bulk density soil with the single thermal probe method, Kenichi KOJIMA, Railway and Technology Research Institute, Makiko ISHIZUKA, Integrated Geotechnical Institute Limited, Osamu MARUYAMA and Hifumi AOKI, Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency, Masao TOMINAGA, Railway and Technology Research Institute

3. 結果と考察

3.1 三相分布から計算した熱伝導率・文献値から推定した熱伝導率

乾燥密度，含水比，土粒子密度から，供試体の固相 V_s ，気相 V_a ，液相 V_l の体積比がわかる．ここで，鉱物の熱伝導率の平均値 $^{2)} 2.9 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，水の熱伝導率 $^{3)} 0.561 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，空気の熱伝導率 $^{2)} 0.0259 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ と各相の体積比から，熱伝導率を求めると液相が液状水の場合は $1.52 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，氷の場合は $2.5 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ である．しかし，火山灰土の熱伝導率と体積含水率 ($=V_w/V$) の関係を実際に測定した粕淵 $^{4)}$ のデータを線形近似して外挿すると， $=57\%$ で $0.5 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 程度と予想され，三相分布から予想される値の半分程度になると推定できる．

3.2 実験結果

実験結果を図-4，5 に示す．測定結果の解析法に関しては文献 1) を参照されたい．図-4 はヒーター加熱時の温度上昇，加熱終了後の温度低下の一例である．本検討においてはグラフ前半のプロットを用いて，加熱過程から熱伝導率を計算した．図-5 は熱伝導率と温度の関係である．図中には，3.1 で求めた推定値もあわせて示した．八戸ロームの熱伝導率は 20°C で $0.4 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ， -10°C で $1.5 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (\square) であり，未凍結の供試体よりも凍結した供試体の熱伝導率は大きい．原因は，本供試体の含水比が大きいことから，水と氷の熱伝導率が $0.561 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ から $2.2 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ へと大きく変化することで，土全体の熱伝導率も急激に大きくなったと考えられる．また， 40°C における熱伝導率は $0.5 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ であり， 20°C の場合の熱伝導率と大きな差がないことがわかった．実際に単一プローブ法で測定した本実験結果と，3.1 で述べた推定値を比較すると，未凍結状態では，三相分布から計算した値 (\square) より実測値が低く，既往の結果から外挿した値 (\triangle) と大差ないことがわかった．また，凍結状態において，凍上を起こさない供試体 (乾燥密度が不変) では，熱伝導率が極めて高くなることがわかった．本試験では -10°C の熱伝導率は， 20°C における熱伝導率の約3倍となった．

4. まとめ

新しく考案した室内試験から攪乱試料を用いて現場乾燥密度，現場含水比を再現した供試体を再構成し，熱伝導率を測定した．熱伝導率は， 20°C で $0.4 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ， -10°C で $1.5 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ となり，未凍結の供試体よりも凍結した供試体の熱伝導率は大きいことがわかった．一方， 40°C における熱伝導率は $0.5 \text{ W m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ で， 20°C の場合とあまり差がないことがわかった．

今後は，同一土の不攪乱試料を用いて熱伝導率を測定し，攪乱土と不攪乱土の熱伝導率についての評価を行う，データロガー内蔵型の温度計を用いて，センサーケーブルから熱が侵入することによる誤差を検討する，より詳細な熱環境と温度変化について，サーモ TDR による熱伝導率，体積熱容量，比熱を直接測定してロームの熱特性を解明することを予定している．

<文献>

- 1) 石塚ら(2005): 「高い乾燥密度における土の熱伝導率測定法」，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
- 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) 中野ら(1995): 「土壌物理環境測定法」，東京大学出版会



図-3 チャンバー内に設置した供試体

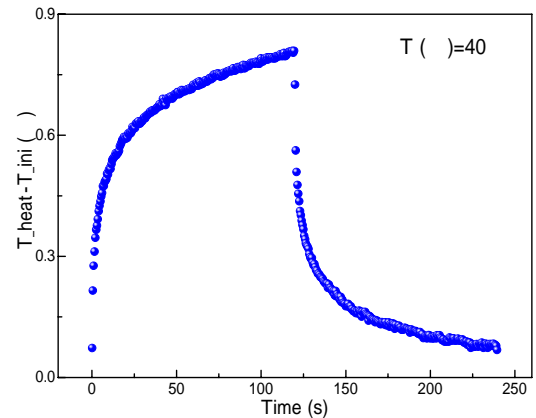


図-4 熱伝導率測定中の温度変化

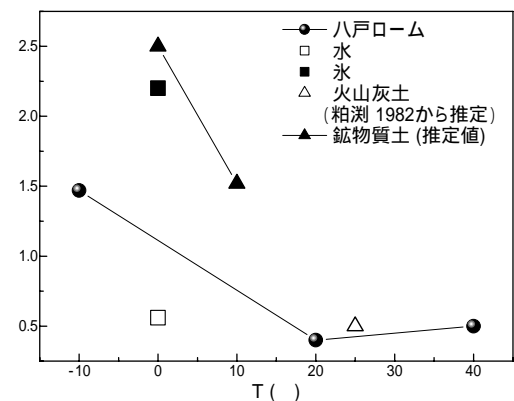


図-5 八戸ロームの熱伝導率と初期温度の関係