

III-292

凍土の熱伝導率とその推定

東北大学 正員 ○姚 義 久
同 正員 柳 沢 栄 司

1. まえがき

熱伝導率はその構成物質の熱伝導特性とその含有率から決定されることから、多くの研究者たちによって、その推定モデルが提議されているが、その推定方法についてはまだ未詳な点が多い。就中、凍土の熱伝導率は通常土、氷、空気との相系として考えられているが、不凍水を考慮した4相系として土の熱伝導率を解析した報告は比較的少ない。本研究では、4相系において同一の体積土粒子率の異なる土に焦点を絞り、体積土粒子率、体積含水率、体積含氷率、温度などの影響を比較検討し、不凍水量についての考察を行ない、不凍水量を考慮した熱伝導率の推定モデルの検討を行なった。特に各種構成物質の含有率を考慮した一次回帰式を求め、凍土の熱伝導率を近似的に計算する方法を得たので、以下に報告する。

2. 実験概要

試料土としては、840μを通過した青葉山ローム（粘土分27%、シルト分37%、細砂分36%、液性限界49%、塑性限界23%、比重2.12）及び74μを通過したベントナイト（粘土分85%、シルト分15%、液性限界43.5%、塑性限界52%、比重2.74）である。この試料を水を加え所定の含水比に調節したものを直径10cm、容積10³cm³の試料円筒に所定の乾燥密度で静的に締めつけて作製した。熱伝導率の測定は非定率法であるサーマル・グローブで-5℃、-18℃、-30℃の温度で行なった。不凍水量の決定は二点法¹⁾により行なっているがここでは詳細は省略する。

3. 実験結果及び考察

3.1 体積含水率と熱伝導率の温度依存性

青葉山ロームとベントナイトそれぞれについて、凍土の体積含氷率(V_i/V)と熱伝導率の関係を示すと図-1と図-2の通りである。凍土の熱伝導率は同一の乾燥密度の場合、体積含水率の増大に従って大きくなり、同一の体積含水率に対して、熱伝導率は乾燥密度の大きい方が大きい。温度が低下するに従って、凍土の熱伝導率は増加するが低含水比よりも高含水比の方が増大する割合が大きい。これは体積土粒子率が等しい場合、体積含水率が大きくなると、体積空気率が小さくなり、氷の熱伝導率が支配的になるためである。一方、体積含水率が等しい場合には、体積土粒子率が大きくなると、体積空気率が小さくなり、土粒子の熱伝導率が支配的になるからであると考えられる。

3.2 熱伝導モデルの考察及び熱伝導率の推定

前述したように熱伝導率はその構成物質とその含有率から決定されることから、多くの研究者たちによって、その推定モデルが提議されている。即ち、直列モデル、並列

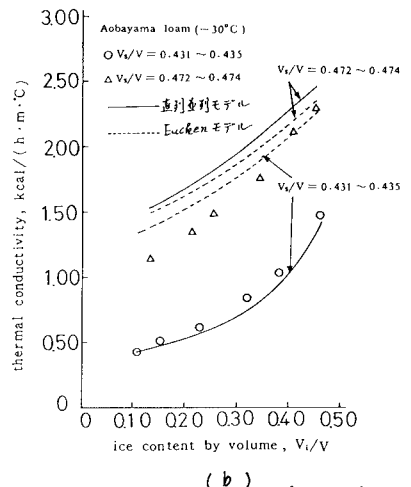
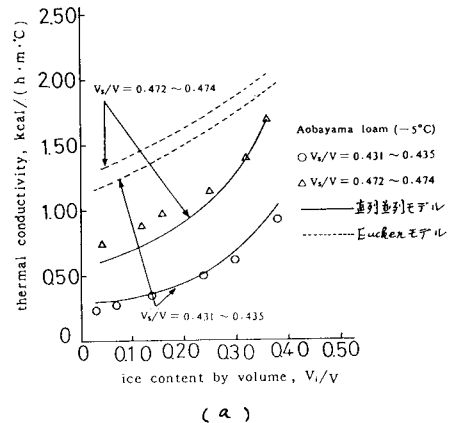


図-1 体積含水率と熱伝導率の関係

モデル、直列並列混合モデル及び Eucken モデルなどであるが、3相系の式を4相系に拡張して考え、4相系における直列並列混合モデル及び Eucken モデルの熱伝導率の計算式を求め、凍土の熱伝導率を計算した。

$$K_1 = \frac{1}{\frac{\alpha}{K_s} + \frac{\beta}{K_w} + \frac{\gamma}{K_i} + \frac{\delta}{K_a}} \quad (\text{直列モデル})$$

$$K_2 = \alpha K_s + \beta K_w + \gamma K_i + \delta K_a \quad (\text{並列モデル})$$

$$K_3 = \frac{1}{\frac{\sigma}{K_1} + \frac{1-\sigma}{K_2}} \quad (\text{直列並列モデル})$$

$$K_4 = K_s \frac{1 - 2 \left\{ \beta \frac{K_s - K_w}{2K_s + K_w} + \gamma \frac{K_s - K_i}{2K_s + K_i} + \delta \frac{K_s - K_a}{2K_s + K_a} \right\}}{1 + \left\{ \beta \frac{K_s - K_w}{2K_s + K_w} + \gamma \frac{K_s - K_i}{2K_s + K_i} + \delta \frac{K_s - K_a}{2K_s + K_a} \right\}} \quad (\text{Eucken モデル})$$

K_s, K_w, K_i, K_a = 土粒子, 水, 氷, 空気の熱伝導率
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ = 土粒子, 水, 氷, 空気の各体積比

σ = 直列並列の割合

直列並列モデルでは、計算に際して各物質の熱伝導率は一定であると仮定すると、直列並列の割合 σ は凍土の熱伝導率から逆算することができる。このパラメータ σ は実際には土の状況によって変化するので、各体積土粒子率 α 、体積含水率 β 及び温度 θ の三変数による一次式の回帰分析を行なった。この回帰式の相関係数は青葉山ロームで 0.96 とベントナイトで 0.85 であり、相関が高く、凍土の熱伝導率の指定に応用することができる。この結果得られた回帰式は次のようなものである。

$$\sigma = 1.027 - 2.015\alpha - 0.021\gamma - 2.256 \times 10^{-3}\theta$$

(青葉山ローム, 凍土)

$$\sigma = 0.218 - 0.374\alpha - 0.027\gamma - 1.574 \times 10^{-3}\theta$$

(ベントナイト, 凍土)

σ は絶対値である。図-1 及び 図-2 を見ると、同一の体積土粒子率に対して、Eucken モデルによる計算値は、体積含水率が大き

くなるに従って直列並列モデルによる計算値に近くなる傾向が見られるが、全体的には直列並列モデルの方が近似度が高い。また、Eucken モデルによる計算値は体積土粒子率の大きい方がよく直列並列モデルによる計算値に合っていることが分かる。即ち、土粒子の熱橋のつながりが良いほど、両者はよく一致している。

4. あとがき

今回の試験結果をまとめると以下のようになる。1) 凍土の熱伝導率を指定する場合には4相系で考えることができる。2) 4相系の Eucken モデルは実験値との乖離が大きい。直列並列モデルの近似計算に用いられる σ は α, γ, θ の一次回帰式で求められる。本研究をするに当たり、中央開発促進委員会 平塚實成には研究面でもお世話になったことを記し謝意を表します。参考文献：1) 堀義久・柳沢栄司“土の伝熱特性”昭和61年2月土の凍結に関するシンポジウム発表論文集, 冊 75~80, 土質工学会。2) 土質工学会：土の凍結—その制御と応用—冊 52~53

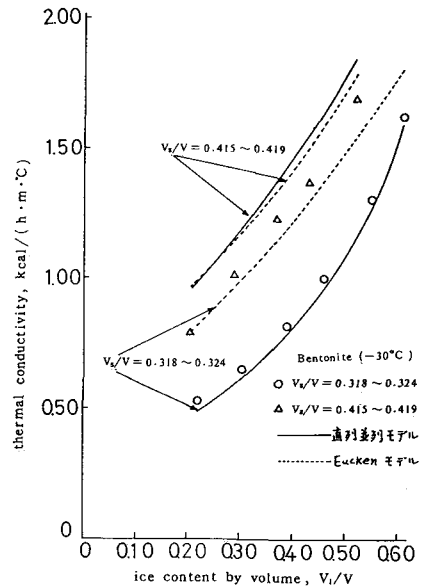
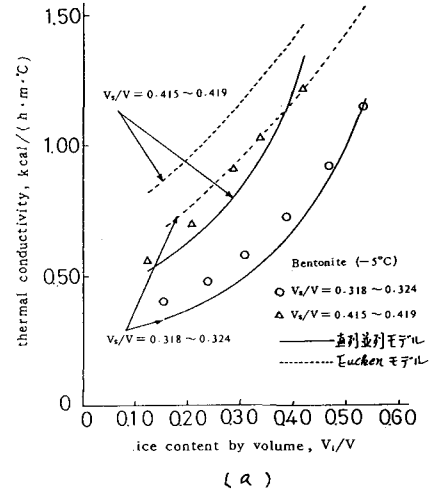


図-2 体積含水率と熱伝導率の関係