

土の熱物性値に及ぼす諸要因について

○東北大学 学生会員 田村 展明
東北大学 正会員 朴 燦燦
東北大学 正会員 柳澤 栄司

1.はじめに

地盤の熱的性質を把握することは土を扱う広い分野に関わりがある。廃棄物の地中処理、地熱発電、凍結などは地盤の熱的性質に関係する問題の一例である。しかし、三相系媒体である土の基礎的な熱物性値に関する報告の例はあまり見られない。

既往の研究では、含水比、間隙率、土粒子の形状などの地盤の熱特性に影響する諸因子については数多く研究がなされている。本研究では、地盤の熱物性値の中で土粒子の熱伝導率と熱伝達率（間隙水と土粒子の間）を取り上げ、熱伝導実験と数値解析によりその値の同定を試みた。

2.土粒子の熱伝導率

1) 実験

熱伝導率の実験は阿武隈砂、珪砂、標準砂、関東ローム、青森シラス、九州シラス、カラスビーズに対して行った。実験は図-1のモデル中に試料をつめ、その上部に熱制御機により一定の温度（48℃）を維持できる熱源を置いて熱を加える。一定時間経過後、モデルの窓をはずし赤外線カメラで温度勾配を撮る。各試料に対し、飽和状態と完全乾燥状態の実験を行った。

2) 土粒子の熱伝導率の同定

熱伝導解析は式（1）を用いて行った。

$$\rho_g \cdot c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \lambda_g \cdot \nabla^2 T_g \quad (1)$$

$$\varepsilon = \sum |T_{ei} - T_{gi}| \quad (2)$$

ここで、 ρ は密度、 c は比熱、 T は温度、 t は時間、 λ は熱伝導率である。また、添字 g は地盤全体を意味する。地盤全体の熱伝導率 λ_g は混合モデル¹⁾から求められるが、土粒子の熱伝導率と直列・並列の割合は未知数である。その未知数がある間隔で入力した場合計算される温度勾配 T_{gi} と実験で求められた温度勾配 T_{ei} の差の絶対値の合計を誤差 ε とし、もっとも小さい誤差を与える土粒子の熱伝導率を求める。

3) 結果

図-2と図-3は阿武隈砂に対して飽和と完全乾燥で行った実験と数値解析の結果である。同じ間隙率であれば飽和状態と完全乾燥状態で土粒子の構造は変わらないと考えられるから、両状態

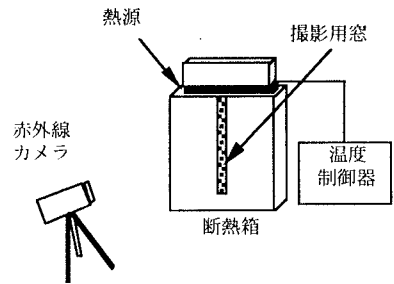


図-1 土粒子の熱伝導率の実験

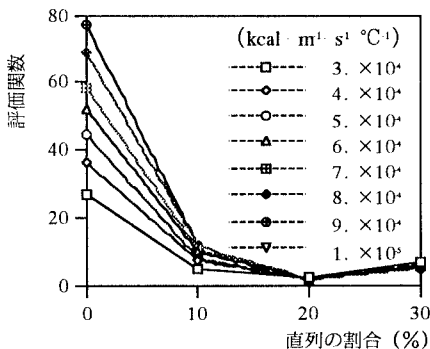


図-2 完全乾燥土の結果

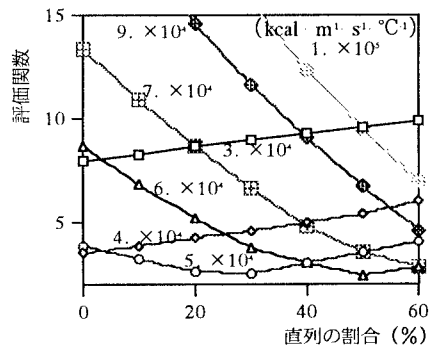


図-3 飽和土の結果

での直列・並列の割合と土粒子の熱伝導率は一定である。完全乾燥の場合、各土粒子の熱伝導率に対して直列の割合が約20%付近で誤差がもっとも小さい。また、飽和状態の結果から同じ割合で誤差がもっとも小さい土粒子の熱伝導率は 4.8×10^{-4} ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) である。表-1は幾つかの試料に対する結果である。

3. 土粒子と間隙水の熱伝導率

1) 実験

図-4の断熱タンク中の高温の水を一定の水頭を保ちながら、阿武隈砂を入れた実験モデルの中に流す。一定の時間経過後、センサーにより各地点の間隙水の温度を測る。また、その時試料から排出された間隙水の量を測り、平均間隙流速を求める。

2) 土粒子と間隙水の熱伝導率の同定

土を土粒子と間隙水の二相系で考えた熱移動式(3)、(4)を用いて解析を行う。実験により求めた温度勾配と平均間隙流速を条件として逆解析を行い、土粒子と間隙水間の熱伝導率を同定した。

$$(1-n)\rho_s c_s \frac{\partial T_f}{\partial t} = n\lambda_s \nabla^2 T_s - \alpha A (T_s - T_f) \quad (3)$$

$$n\rho_f c_f \left\{ \frac{\partial T_f}{\partial t} + \left(v_x \frac{\partial T_f}{\partial x} - v_y \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) \right\} = n\lambda_f \nabla^2 T_f - \alpha A (T_f - T_s) \quad (4)$$

ここで、 n は間隙率、 V は間隙流速、 α は熱伝達率、 A は単位体積当りの土粒子の表面積である。また、添字 f と s は間隙水と土粒子を表している。

3) 結果

図-5は土粒子と間隙水の熱伝導率実験及び逆解析から得られた結果である。土粒子の熱伝導率は前述の実験から同定された結果を用いた。間隙流速は水頭を変えながら、 $0.024 \sim 0.47$ (cm/s) の範囲で行った。

式(5)の球体で行った熱伝達実験から得た経験式²⁾による値も記入した。また、式(5)の値と比較すると熱伝達率は、各流速で約1.9~2.4倍大きい。その差は間隙流速が速いほど大きい傾向を示している。

$$\alpha = \frac{\lambda_f}{d} \left\{ 2 + 0.52 \left(\frac{v \cdot \rho_f \cdot d}{\mu} \right)^{0.5} \left(\frac{c_f \cdot \mu}{\lambda_f} \right)^{0.33} \right\} \quad (5)$$

ここで、 d は球体の直径、 μ は水の粘性係数である。

図-5をみると間隙流速が速くなるにつれ熱伝達率は大きくなる。 0.024 と 0.47 (cm/s) の場合を比べると、熱伝達率の差は約 0.7 ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) に達する。

4. まとめ

以上から、一般的土粒子の熱伝導率は約 4.8×10^{-4} から 7.2×10^{-4} ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) の間で分布することが分かった。また、土粒子と間隙水間の熱伝達率は、間隙流速が大きくなるにつれ大きくなる。また、実地盤の間隙流速が $0.1 \sim 10$ (m/day) であることを考えると、地盤での熱伝達率は約 0.4 ($\text{kcal} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) 以下であることが言える。

<参考文献>

1. 土質工学会編：土の凍結 - その制御と応用，土質工学会，pp.41-58，1982.
2. オーム社：伝熱工学の学び方，北山直方，pp.164-185，1982.
3. 共立出版社：地下水水文学，山本莊毅，pp.75-88，1992.

表-1 土粒子の熱伝導率

試料	熱伝導率 $\text{Kcal m}^{-1} \text{s}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$
阿武隈砂	4.8×10^{-4}
標準砂	6.0×10^{-4}
珪砂	6.1×10^{-4}
青森シラス	7.2×10^{-4}
九州シラス	6.0×10^{-4}
関東ローム	5.4×10^{-4}
ガラスビーズ	2.8×10^{-4}

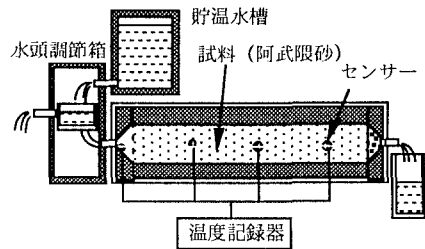


図-4 熱伝達率の実験

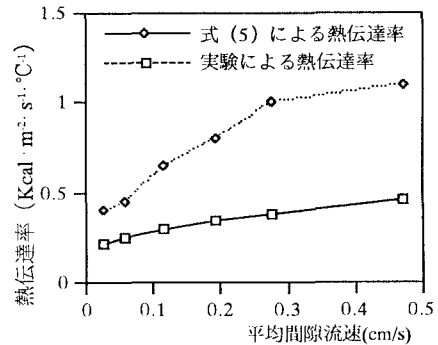


図-5 間隙流速変化による熱伝達率