

東北大 正 松本 順一郎
 " 学 大 保 俊治
 " 学 谷 津 龍太郎

1. はじめに

土の熱伝導現象は土のもつ複雑さを反映し多くの要因から構成され、相互に影響し合っている。影響因子としては(1)含水量(2)乾燥密度及び空隙率の固相を構成する土粒子の熱伝導率(3)土の粒度、構造、組成(4)土粒子及び空隙の配列状態(5)温度などである。

本研究では、土中に水分移動が起るめように、迅速に測定を行なう非定常法⁽¹⁾によって土の熱伝導率を測定し、水分の影響を中心としてその特性を検討した。

2. 実験装置及び方法

図1に装置の主要回路を示す。図中a-b部のヒーターは抵抗温度係数の小さなマンガニン線(φ0.3mm)を用い、c点での温度を求める為に、銅-コンスタン熱電対(φ0.1mm)を用いた。含水比、乾燥密度を調整した試料を試料箱(図中の卓線部)に詰めて恒温槽に入れた。試料温度が均一になった後に、定電圧でヒーターに通電し、経過時間とc点の温度上昇から熱伝導率を算出した。図2に実験に用いた3種類の土の粒径加積曲線を示す。

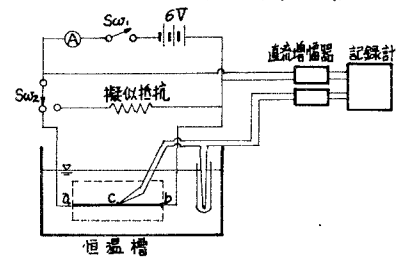


図-1 実験装置

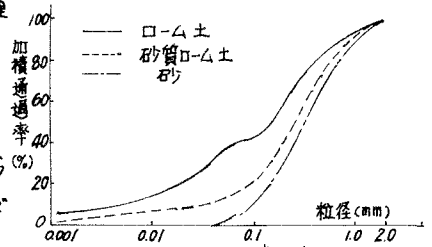


図-2 粒径加積曲線

3. 実験結果と考察

含水比と熱伝導率との関係を図3～図5に示す。これらの図から、含水比及び乾燥密度の増加に伴って熱伝導率も増加する傾向が認められる。高含水比状態での熱伝導率は乾状状態のそれに比べ6～7倍程度であり、含水比が熱伝導率に大きく影響すると思われる。

砂の場合、図3より含水比14%以下で熱伝導率と含水比の関係はほぼ直線的で、14%以上では含水比が増加してもその影響は少ないと認められた。一般に、粗粒土では含水分の多くは粒子と粒子との接触部にリンギングに保水される。その故に、低水分状態で水分は土粒子間の熱橋の役を演じ、熱伝導に有効な熱橋が完成した後では水分が増加しても熱伝導にさほど影響しないと考察される。最適含水比(W_{opt})は14.6%であり、熱橋は最適含水比付近で最も有効に働くと考えられる。

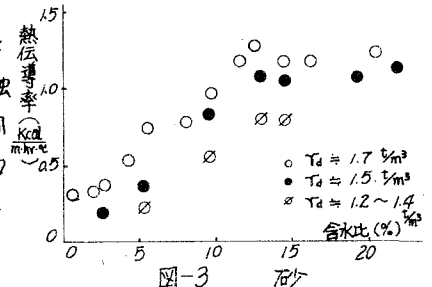


図-3 砂

ローム土の場合、図5より、低含水比状態で水分の影響は顕著には認められず、含水比20%以上で水分の影響が大きくなると思われる。この低含水比状態での現象は、ローム土の比表面積が大きくなり、熱橋が有効に働くまでに多くの水分を必要とすることから生じると考えられる。しかし、土粒子表面における保水のミクロな実態は大変複雑であり、土の組成、構造により異なり、土の保水機構が熱伝導に大きな影響を及ぼしていると思われる。($W_{opt} = 29.1\%$)

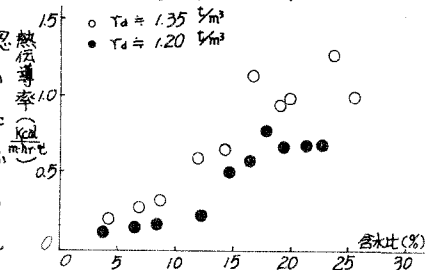


図-4 砂質ローム土

砂質ローム土の場合、砂とローム土との中間的挙動を示すと思われる。図4より、含水比8%以下(A域)で水分の影響は小さく、含水比8%~18%(B域)で熱伝導率は増加し、それ以上の含水比(C域)では水分の影響はほとんどないと思われる。(Wopt=18.6%)

熱伝導率に及ぼす水分の影響について、P.V. Vershinin⁽²²⁾は(i)低含水状態では、すべての土は水分増加とともに直線的に増加し、増加傾向は粗粒土ほど大である。(ii)高含水状態では、粗粒土で増加率は漸減し、中粒土では直線のまま、細粒土では尻上りになる」と報告している。本実験結果では、土の熱伝導率は水分の増加によりA域→B域→C域へと遷移し、その遷移の様子は土の粒度、組成、構造等により異なると思われる。

図6~図8に飽和度と熱伝導率との関係を示す。これらの図より水分が空隙を充満するに従い、熱伝導率がどのような挙動をするかを知ることができた。低飽和状態で熱伝導率は小さく、中飽和状態で大きくなり、完全飽和状態へ近づくにつれて増加率は徐々に小さくなる傾向が認められた。また、(1)含水量(乾燥密度及び空隙率)の2因子の代わりに飽和度を考えることにより熱伝導率を把握できると思われる。そこで、回帰曲線としてロジスティック曲線を仮定し、その適用性について若干検討した。

$$k_e = \frac{k_{e \max}}{1 + a e^{-b S_r}} \quad (1)$$

k_e : 熱伝導率 ($\frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}}$) S_r : 飽和度(%) $k_{e \max}$: 最大熱伝導率

$$(1) \text{式を变形して, } \ln \left(\frac{k_{e \max}}{k_e} - 1 \right) = a + b S_r \quad (2)$$

$k_{e \max}$ は実験結果より、砂で $1.30 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}}$ 、砂質ローム土で $1.35 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}}$ 、ローム土で $1.10 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}}$ とし (2) 式を最小自乗法で回帰し、(1) 式中の定数 a, b を決定した。図9にローム土の例を示す。

砂では

$$k_e = \frac{1.30}{1 + 5.24 e^{-0.0591 S_r}} \quad (3)$$

砂質ロームでは

$$k_e = \frac{1.35}{1 + 18.5 e^{-0.072 S_r}} \quad (4)$$

ロームでは

$$k_e = \frac{1.10}{1 + 19.5 e^{-0.0594 S_r}} \quad (5)$$

(3)(4)(5) 式で熱伝導率 k_e と飽和度 S_r との相関比はそれぞれ $\eta = 0.96, 0.97, 0.98$ である。3種の土とも飽和度と熱伝導率との関係にはよい相関があると思われる。土の熱伝導率は飽和度によりある程度予測しうると推察される。

4. まとめ

(1) 砂の熱伝導率は $0.195 \sim 0.257 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}}$ 、砂質ロームで $0.116 \sim 0.137 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}}$ 、ロームで $0.099 \sim 0.107 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}}$ である。

(2) 土の熱伝導率は飽和度によりある程度予測しうると推察し、その推定式を示した。

(参考文献) (1) Cardew and Jeager: Conduction of Heat in Solids, (2) 八幡: 土壌の物理 (1975)

