

京都大学大学院	学生員	○清水巧巳
京都大学大学院	正会員	高井敦史
京都大学大学院	学生員	山中善行
京都大学大学院	FLORES, Giancarlo	
京都大学大学院	正会員	乾 徹
京都大学大学院	正会員	勝見 武

1. はじめに

地盤の温度は一般的に地表面下 10~20 m より深部では年間を通して 15 °C 程度で安定しているが、近年、地球温暖化の影響や都市化に伴う土地利用の変化を受け、上昇傾向を見せている。地盤内温度上昇に伴う地中汚染物質の動態変化や環境負荷について適切に評価し、環境安全性を確保する必要性が高まっているものの、対流の影響を考慮した地盤中での伝熱特性は十分には検討されていない。そこで本研究は、豊浦砂を充填した鉛直一次元カラムを用い、加熱温度・加熱方向・飽和度をそれぞれ変化させた時の伝熱特性について比較を行った。また、数値解析を行い計算値と実験値の整合性について検討した。

2. 実験方法と解析方法

2.1 供試体 砂試料には、単一粒径で実験によく用いられる豊浦砂を用いた。また、供試体を飽和させる際には脱気水を用いた。実験に使用したカラムはアクリル製で、図-1 に示す通り、内壁 7.0×7.0 cm の正方形断面、高さ 55.0 cm の角柱型である。カラムに豊浦砂を充填する際には、間隙率が一律に 0.4 となるよう 5.0 cm ごとにつき固めた。

2.2 実験方法 外部電源と接続された円盤型の熱源を用いてカラムを加熱し、カラム背面より 5.0 cm 間隔に設置した 9 本の熱電対により各地点での温度を 2 秒ごとに 24 時間計測した。カラム側面からの熱損失を防ぐため、カラムの内壁及び外壁には断熱材を設置した。カラムには豊浦砂を間隙比が 0.40 となるよう空中落下により充填した。比較検討項目として、熱源温度を 40 °C と 70 °C の 2 種類、加熱方向を熱源をカラムの底部に設置し鉛直下方から加熱する場合と、熱源をカラム上部に設置し鉛直上方から加熱する場合の 2 種類、飽和度を 0 % と 100 % の 2 種類を与え、それぞれを変化させた合計 8 パターンでの実験を行った。

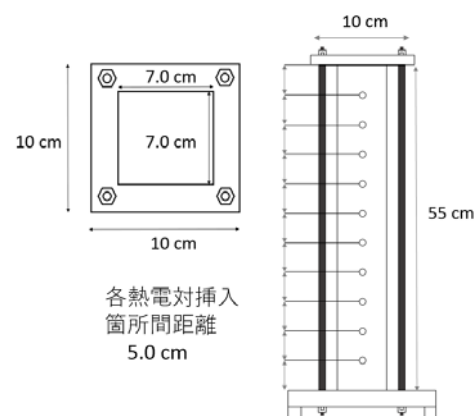


図-1 カラム装置の概要

2.3 解析方法 熱伝導によるエネルギー蓄積の和が、内部エネルギーの変化と等しいとして、一次元場での熱伝導方程式を差分法により計算した。解析モデルでは高さ 100 cm の鉛直一次元場を仮定し、それぞれの端部での温度を熱源温度と 20 °C で固定した。この際、土粒子と水の温度は常に等しいとし、比熱には容積比熱を用いた。豊浦砂の熱伝導率は Tarnawski¹⁾ らにより温度上昇に伴って乾燥時には増加、飽和時には減少することが明らかにされており、これらの変化を線形一次関数で近似し代入した。

3. 結果と考察

3.1 加熱温度による比較 いずれの実験パターンにおいても 70 °C での加熱時の計測温度が 40 °C の時より計測位置に関わらず高い値を示したが、計測位置が熱源から遠ざかるにつれて 2 点間の温度差は小さくなった。こ

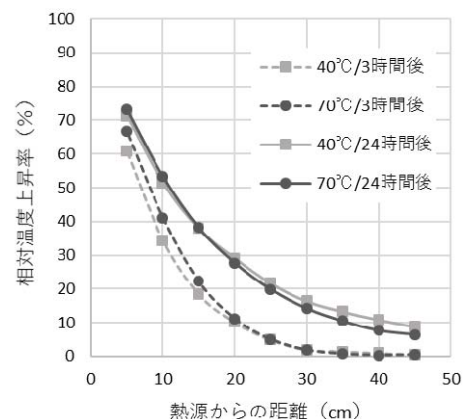


図-2 加熱温度による比較
(底部熱源/飽和砂)

Takumi SHIMIZU, Atsushi TAKAI, Yoshiyuki YAMANAKA, FLORES, Giancarlo, Toru INUI and Takeshi KATSUMI
takai.atsushi.2s@kyoto-u.ac.jp

ここで相対温度上昇率を「熱源温度の増分に対する、各位置での計測温度の増分の比」と定義し、飽和砂を底部より上向加熱したケースについて、3 時間後と 24 時間後の各位置での相対温度上昇率を図-3 に示す。各実験ケースについて相対温度上昇率は加熱温度よりも加熱時間に依存する傾向を見せた。また熱源付近では 70 °C での加熱時の値が 40 °C の時を上回っているが、カラム中央部付近から計測位置が遠くなるほど逆の関係を示した。これは、熱源付近では熱源温度が高い程に熱流束が増大したことにより起ると考えられる。またカラム中央部付近以降では、温度上昇に伴って土粒子の熱伝導率が減少し、土粒子と水の比熱が増大したことにより起ると推察される。

3.2 加熱方向による比較 カラム全体として、鉛直上方からの加熱時より鉛直下方からの加熱時の方が伝熱が促進される結果を示した。図-3 に飽和砂を 70 °C で加熱した 2 つのケースにおける定常状態でのカラム内温度分布を示す。熱源近傍の計測位置の定常温度は、鉛直上方からの加熱では 52.5 °C であるのに対し、鉛直下方からでは 56.1 °C と 3.6 °C の差を見せた。これは鉛直下方からの加熱時には対流が発生したことにより起ると考えられる。加熱された間隙水が密度差拡大に伴い生じた浮力により上昇傾向を見せ、伝熱の促進がされたと推察される。

3.3 飽和度による比較 いずれの実験ケースについても乾燥砂よりも飽和砂を用いたケースの方が伝熱が促進された。図-4 に鉛直下方より 70 °C で加熱した 2 つのケースの定常状態でのカラム内温度分布を示す。熱源近傍の計測位置の定常温度は、乾燥砂では 41.8 °C、飽和砂では 56.3 °C と 14.5 °C もの差が見られた。これは含水率の増大に伴って熱伝導率が増大したことにより起ると考えられる。一般的に含水比が高まると比熱の大きな水の割合が増え、伝熱の抑制の効果が見られるが、豊浦砂を用いた今回の実験ではその効果を熱伝導率増大の効果が上回ったものと推察される。

3.4 実験値と計算値の比較 図-5 に、飽和砂を鉛直下方より 70 °C で加熱した時の、実験と解析による 3 時間後と 24 時間後の温度分布を示す。計算値の方が実験値よりも、計測位置に関わらず高い値を示すことが分かる。これは本研究で用いたカラムでは、熱電対接続部等の側面からの熱損失が僅かに生じたためであると考えられる。また、解析モデルでは完全な一次元場を仮定した一方で、実験を行ったカラムは厳密には三次元であり、対流の発生により熱源から離れた位置での温度の均質化が促進されたことも、実験値と計算値が乖離した原因の 1 つとして挙げられる。

4. おわりに

試験の結果、豊浦砂は乾燥砂よりも飽和砂の方が伝熱を促進し、鉛直上方からよりも鉛直下方から加熱した時の方が伝熱を促進することが明らかとなった。また熱源から一定以上の距離を持つ位置では、相対温度上昇率は熱源の温度が低いほど高くなることが分かった。実験結果及び解析結果を踏まえ、地盤内温度が 20 °C 前後の地盤では、鉛直深さ 50 cm 以深ではその温度変化がほとんど見られないと推察される。

参考文献

- 1) Tarnawski, V.R., Momose, T., Leong, W.H. Bovesecchi, G. and Coppa, P.: Thermal Conductivity of Standard Sands, Part I, Dry-State Conditions, *Int J Thermophys* 30, pp 949–968, DOI 10.1007/s10765-009-0596-0, 2009

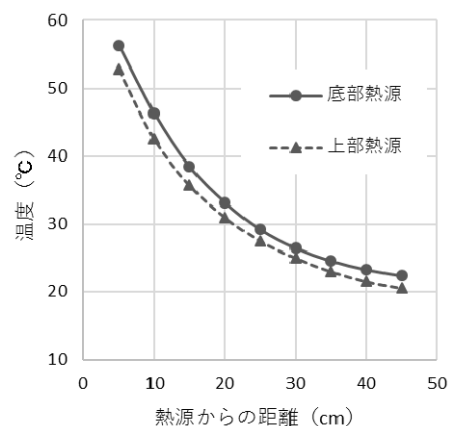


図-3 加熱方向による比較
(飽和砂/70°C)

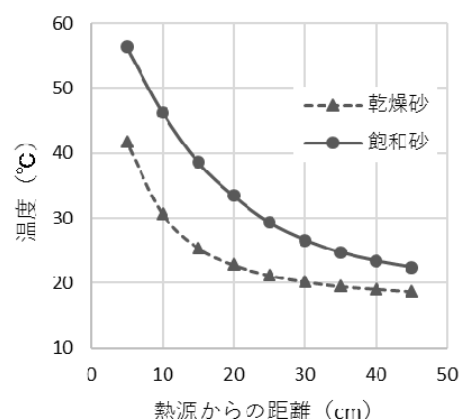


図-4 飽和度による比較
(底部熱源/70°C)

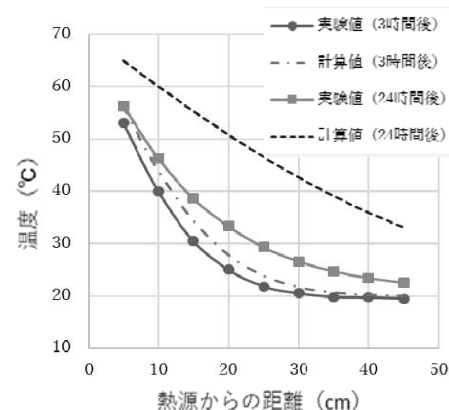


図-5 カラム内温度分布の実験と
計算比較 (底部熱源/70°C/飽和砂)