

室内試験による簡易な地盤熱伝導率調査法の検討

東京都市大学 学生会員 ○石垣拓也

正会員 末政直晃

一般社団法人 地盤工房 非会員 石田直子

1. はじめに

近年、二酸化炭素排出量の削減や、地球温暖化やヒートアイランド現象の抑制につながるとして再生可能エネルギーの一つである地中熱利用が注目されている。地盤の熱的利用には、事前に地下の熱伝導率を把握し適正な設計・評価を行うことが重要である。従来の熱伝導率計測方法としてはサーマルレスポンス試験やボーリングサンプリングによる室内試験などが挙げられるが、これらの方法ではボーリング掘削や設備設置のコストが嵩むこと、また余分な施工時間を要するなどの問題があった。そこで、本研究では宅地地盤の主な地盤調査法であるスウェーデン式サウンディング試験（以下 SWS 試験）を利用した原位置で計測が可能な簡易地盤熱伝導率探査装置の開発を検討している。具体的には、SWS 試験による掘削孔に開発した装置を挿入し、地盤内にて加熱・計測を行い温度変化や電力消費量などから地盤の熱伝導率を調査するものである。ただし、このような装置を開発するにあたり、現場試験で実際に熱伝導率を計測できた場合、現場の土を採取して室内試験を実施し、結果を比較検討する必要がある。そのため、本論文では簡易かつ低コストで、現場の土試料採取と熱伝導率を測定できる室内試験について検討した。

2. SWS 試験の掘削孔を利用した現場試料の採取

本研究では、地盤調査などを行った現場で試料を採取するため、SWS 試験に使用されるロッドの先端に装着可能なサンプラーであるスクロードドライブサンプラー（以下 SD サンプラー）を開発した。SD サンプラーを写真-1 に、概要図を図-1 に示す。サンプラーの全長は 440mm あり、土を取り込むステンレス製のサンプリングチューブは長さ 310mm、内径 29mm、先端部の刃先は内径が 28mm となっている。サンプリングを行う目標深度まで SWS 試験孔を掘削し、その後サンプラーをロッドにつなげて地盤内に挿入する。サンプラーが孔底部に達したら、ロッドにクランプとハンドルを取り付けて重りを載せてロッドが上下に動かないように固定し、その後正回転させる。これにより、試料を中に取り込むサンプリングチューブを、孔底部よりさらに下の地中に押し込み土試料を採取する仕組みになっている。80 回転で 200mm 貫入することができる。また、サンプリングチューブは、先端にシュウが取り付けられるようになっている。シュウは鋼製の刃先で、少し外側に膨らみがあるため、サンプリングチューブ本体の外径 30mm よりも厚みがある。この外側の膨らみ部分によって地盤にサンプリングチューブを貫入する際の周面にかかる摩擦力を低減する役割を持っている。実際に SD サンプラーを用いて採取した試料を写真-2 に示す。



写真-1 SD サンプラー

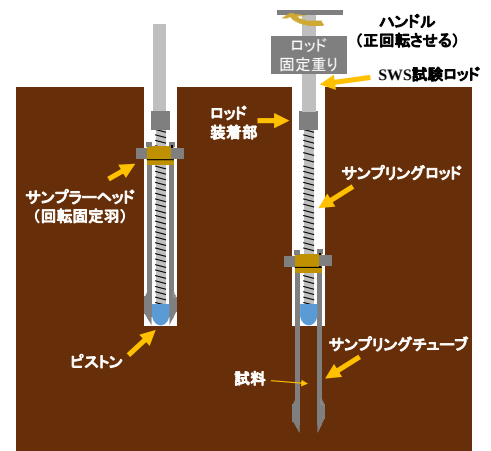


図-1 SD サンプラー 概要図



写真-2 サンプリングチューブから抜いた直後の試料

3. 室内試験による土試料の熱伝導率計測

3.1 簡易恒温槽を用いた熱伝導特性試験

採取試料を用いて、簡易に行える室内試験として既往の研究¹⁾を参考に、簡易恒温槽による熱伝導特性試験を検討した。本試験は、温水を用意し、その中に試料を設置した時の試料と温水の温度変化から熱交換を計測する。その試験結果から、熱平衡に達する時間や温度変化量を求め、熱物性を算定することができる。試験に用いる試料に関しては、東京都市大学世田谷キャンパス敷地内の地盤にて、深度 2m, 3m, 5m の地点から採取した。過去のボーリングデータや採取した試料を調べた結果、含水比が 120%前後の、腐植物が非常に多く含まれた粘土であることがわかった。

3.2 試験装置の概要

試験装置は、供試体（採取試料）、真空断熱容器から構成されている。供試体はサンプリングチューブの中の試料を乱さず、そのまま使用する。供試体の寸法は長さ 150mm、直径 28mm である。また、真空断熱容器の内側の寸法は高さ 300mm、内径 150mm となっている。さらに、試験体の周辺の熱環境を調整するため、試験体の外部に高さ 500mm、内径 315mm の簡易恒温槽を設置した。ヒーターにより、約 45℃に設定した温水を温水槽内に張り、さらに上部を断熱シートで覆った。図-2 に簡易恒温槽の概要図を示す。供試体概要として、測温抵抗体感知部である先端が供試体の中心になるように深度方向に 75mm 挿入する。また、発泡スチロールを用いて、供試体の上下に密着させることで断熱を図った。

Keywords : 地中熱, 地盤熱伝導率, サンプリング

連絡先 : 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学地盤環境工学研究室 TEL 03-5707-2202

3.3 試験条件と試験方法

温度測定には測温抵抗体を使用しており、これを供試体作製時に上部から中心に挿入するとともに、その他に熱源である温水、外気温、恒温槽内水温の計4箇所に設置して温度変化の測定を行った。

試験手順は、まず供試体の温度が室温程度で一定となるまで放置する。約45℃の温水を真空断熱容器内に3000g移し、温度が室温で一定となった供試体を測定開始と同時に真空断熱容器内の熱源である温水に浸す。その後、真空断熱容器の上部蓋を設置し、真空断熱容器を簡易恒温槽内に設置する。最後に断熱シート（ウレタンフォーム等）で恒温槽上部を覆い、熱源温水と供試体等の温度が一定となるまで1時間放置する。試験時の簡易恒温槽の内部状況を写真-3に示す。

3.4 試験結果

試験結果の代表例として、深度3mの地盤から採取した試料の熱伝導特性試験の結果を図-3に示す。測定開始と同時に真空断熱容器内の約45℃の温水に供試体を浸すことで熱源の水温が低下し、同時に供試体の中心に取り付けた測温抵抗体の示す温度が上昇するのを確認できた。また、熱平衡後は、熱源温水の温度と供試体の温度はほぼ水平に推移していく様子から、熱漏れ等がほとんど無く、温水と供試体との間で十分に熱交換ができていていると考えられる。

4. 熱物性値の算定

熱平衡までの温度分布から熱伝導率を算出する。ここでは、深度3m地盤の採取試料の温度経時変化の結果から熱伝導率の算出方法について説明する。実験結果より、初期温度 T_1 、熱平衡温度 T_2 を読み取り、これらの温度差 $\Delta T (=T_2 - T_1)$ を算出し、以下の式に代入する。

$$m_A \cdot c_A \cdot \Delta T_A = m_B \cdot c_B \cdot \Delta T_B \quad (1)$$

(水の失った熱量) = (試料が得た熱量)

深度3m地盤の試料では、供試体の重量が134.554gである。初期温度は、温水が $T_{A1}=43.33^\circ\text{C}$ 、試料が $T_{B1}=22.88^\circ\text{C}$ となる。熱平衡温度は、温水が $T_{A2}=42.08^\circ\text{C}$ 、試料が $T_{B2}=41.98^\circ\text{C}$ となった。これらの値を(1)式に代入することで試料の比熱 c_B を算出することができる。計算の結果、試料の比熱は $6.04[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ となった。

次に熱伝導率 λ の算出について説明する。以下の式を用いることで算出できる。

$$\lambda = (W \cdot r) / (A_f \cdot \Delta T) \quad (2)$$

ここで、 W は仕事率であり、熱容量を熱平衡に達するまでの時間で除した値である。また、 r は試料の半径で、 $r=1.4\text{cm}$ である。 A_f は試料の周面積であり $A_f=2\pi rh$ で求めることができる。以上のような計算を深度3m地盤試料の結果から計算すると、仕事率は、

$$W = \frac{15.52[\text{kJ}] \times 1000}{1200} = 12.93[\text{J} / \text{s}] \quad (3)$$

となり、この値を(2)式に代入すると、

$$\lambda = \frac{12.93 \times 0.014}{2\pi \times 0.014 \times 0.15 \times (41.98 - 22.88)} = 0.718[\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})] \quad (4)$$

となり、試料の熱伝導率を算出することができる。

採取した各深度の試料それぞれについても同様に試験を実施し、熱物性値を算出した。各試料の熱物性値をまとめたものを表-1に示す。結果として、どの深度の試料も熱伝導率については $0.7 \sim 0.8[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 程度となった。この値は、有機物や腐植物など多く含まれた地盤（有機質土など）の一般的な熱伝導率 $0.7[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ²⁾とほぼ一致しており、今回用いた試料は腐植物が非常に多く含まれた粘土であったため、妥当な値であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、地盤の熱伝導率を測定するために原位置計測が可能な装置の開発と、比較検討のための簡易な室内試験の検討を行った。本報告では、簡易・低コストの室内試験として、簡易恒温槽を用いた熱伝導特性試験を検討し、実地盤から土試料を採取し試験を行った。試験結果から、試料と温水とで熱漏れ等無く熱交換ができており、試料の熱伝導率についても妥当な値を算定できたといえる。そのため、本試験の活用が可能であると考えられる。

〈参考文献〉1) 片根弘人：地中熱利用のための地盤材料における熱伝導特性試験の検討，東京都市大学修士論文(2011)，2) 環境省 平成22年度環境事業実証事業 ヒートアイランド対策技術分野 地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム 実証結果報告書 <https://www.env.go.jp/policy/etv/pdf/list/h22/052-1007b.pdf>, 2015/8/26 参照，3) 神宮司元治ら：ボーリング孔を利用した非定常線状熱源法による熱伝導率検層法，日本地熱学会誌 第32巻第3号 (2010) p185～191

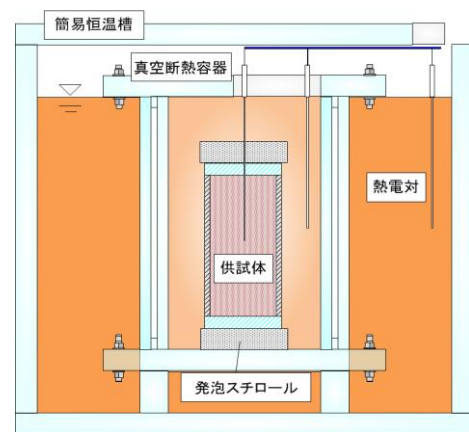


図-2 簡易恒温槽 概要図



写真-3 試験時 簡易恒温槽内部状況

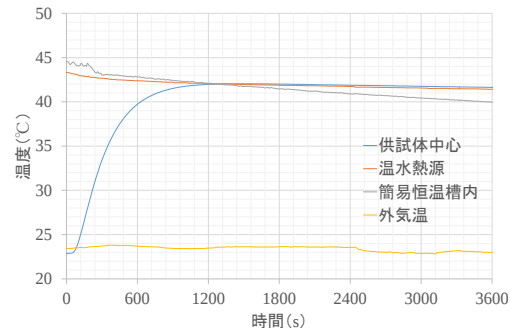


図-3 深度3m地盤採取試料 温度経時変化

表-1 各深度の採取試料 熱物性値

	比熱 [kJ/(kg·K)]	温度差 ΔT[℃]	熱量 Q[kJ]	熱伝導率 λ[W/(m·K)]
深度2m試料	10.896	17.1	25.423	0.759
深度3m試料	6.04	19.1	15.522	0.718
深度5m試料	12.710	18.7	12.059	0.841