

伝熱プローブによる地盤熱伝導率探査法

東京都市大学 学生会員 ○石垣拓也
正会員 末政直晃

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。地盤の熱伝導率などの諸熱物性は地盤含水率などの地質環境特性と密接な関係があるため原位置における計測が望ましいと考えられる。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が挙げられるが、ボーリング掘削や設備設置のコストが高くなること、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）を利用した簡易地盤熱伝導率探査法を検討した。SWS 試験は試験装置や試験方法が簡易であり、低コストで行うことができる試験である。本研究では、SWS 試験による掘削孔に挿入することで、地盤内にて加熱・計測を同時に行うことができる装置を開発した。

2. SWS 試験を利用した原位置熱伝導率探査法の検討

SWS 試験による掘削孔に挿入でき、加熱と計測を同時に行える装置として伝熱プローブ試験装置を開発した。装置構成は伝熱プローブ、簡易温度調節器、電力計となっている。開発した装置を写真-1 に示す。伝熱プローブはステンレスパイプ、熱電対、ヒーターから構成されている。長さ 250mm、幅 20mm の四角柱のステンレスの半分から先端側にヒーターと熱電対が内蔵されており、この部分で加熱を行うことができる。熱電対は温度を調整するためにヒーターより少し先端側の中心に取り付けられており、簡易温度調節器を用いて、設定した温度を保つように電力が自動調整される仕組みになっている。また、そのときの消費した電力量を電力計によって計測し、ヒーターから流れ出る熱量を測定することができる。SWS 試験孔を利用した原位置熱伝導率探査法の概念図を図-1 に示す。

2-1. 試験概要

本試験の試験手順は以下の通りである。まず、SWS 試験に使われるスクリーポイントを用いて計測をする目標深度まで SWS 試験方法に準じて掘削を行う。掘削終了後、試験孔に伝熱プローブを挿入し、伝熱プローブの先端（加熱部）が地盤と密着するように、試験孔の底部から重りなどを載せて更に装置を押し込む。伝熱プローブの打ち込み完了後、装置の熱電対の示す温度を測り地盤の初期温度を確認する。その際、ヒーターの電源は接続しない。このとき熱電対の温度が一定にならない場合は、装置と周囲の地盤の温度が安定するまで 30 分ほど放置時間を設ける。熱電対の示す温度が安定し、初期温度が確認できたらヒーターの電源を接続して電力計により消費電力から熱量を計測する。

2-2. 実地盤による試験の実施

伝熱プローブ装置を用いて、実地盤において試験を実施した。計測は東京都市大学敷地内にて行い、計測する目標深度は 5m とした。計測地点である深度 5m の地盤は、ボーリング調査から有機物、腐植物を多く含んだ粘性土地盤であることがわかっている。測定時の環境条件を表-1 に示す。熱源となるヒーターの温度は、簡易温度調節器により 40°C に設定した。計測は冬季に行ったため、外気温と地表面温度は低い温度を示している。伝熱プローブを試験孔に挿入し、熱電対の示す温度が安定した後、ヒーターの電源を接続し地盤内にて加熱と計測を同時に開始した。電力計による熱量計測は、1Hz サンプリング周期で 1 時間行った。計測した積算熱量 (kWs = kJ) の経時変化結果を図-2 に示す。測定開始から 120 秒後までに積算熱量が急激に増

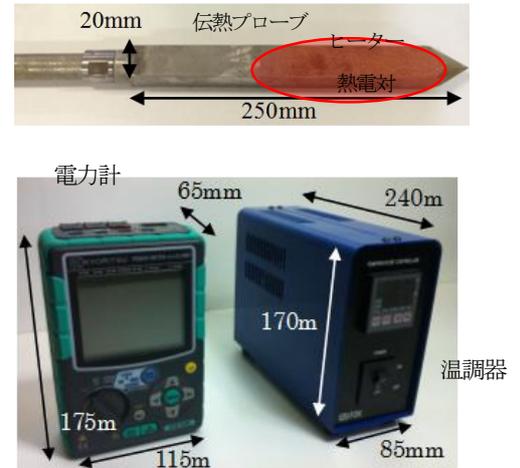


写真-1 伝熱プローブ試験装置

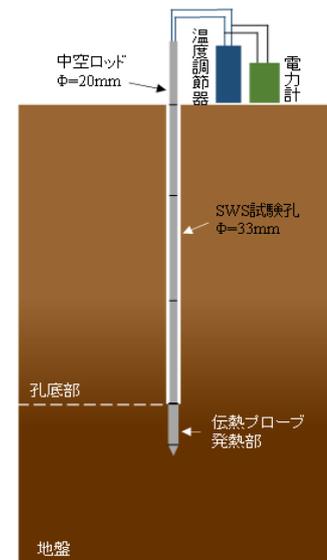


図-1 伝熱プローブによる熱伝導率探査試験 概念図

Keywords : 地中熱, 地盤熱伝導率, SWS 試験

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

加し、その後の積算熱増加挙動は緩やかに上昇した。測定開始直後はヒーターの消費電力が大きいので、熱量も大きく計測されたと考えられる。

3. 熱伝導率算出の試み

従来の TRT で用いられる地盤熱伝導率を算出する数値解析手法として、非定常熱線法がある。非定常熱線法は、無限媒質中に無限長の線状熱源が存在する場合、線状熱源近傍の熱伝導率は線状熱源近傍の温度変化から求めることができる。以下に示す近似式を使う。

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi} \frac{d\Delta T}{d \ln t} \quad (1)$$

ここで、 Q は線状熱源の単位長さあたりの熱量、 λ は媒質の熱伝導率である。 $d\Delta T/d \ln t$ は温度上昇速度を示している。本試験では上記の式を参考に、伝熱プローブによる熱伝導率算出を検討した。非定常熱線法を用いるに当たり、必要なパラメータを測定結果、条件から求める必要がある。しかし、本試験では、実時間における温度上昇データは得られていない。そのため、温度上昇速度のパラメータに必要な ΔT (°C) については以下のように検討した。

本装置においては、設定温度を保つために、温調用の熱電対が示す温度が 1°C 下がった時に、その 1°C を上げるために自動で電力が出力される。そこで、計測時間内に温度が下がった回数を熱量変化のデータから読み取り、その合計を計測時間あたりの上昇した温度（パラメータ ΔT ）とした。また、計測時間内の、上昇した温度を読み取る範囲については、計測開始直後は、熱源となるステンレス部分の温度も上昇させるのに必要な熱量が計測されている可能性があるため、ステンレス部分が温まり熱源とみなされるまでの時間を見積もる必要がある。ここでは、計測開始から 600 秒が経過した時点から計測終了までの温度上昇回数を読み取った。各ケースで算出したパラメータと算出した熱伝導率の結果を表-2 に示す。算出された熱伝導率は、0.84[W/mK] となった。計測を行った深度 5m の地盤構成は、有機物を非常に多く含んだ粘土であり、一般的な地盤の熱伝導率から 0.7~1.2[W/mK] になると推測される。本試験で得られた熱伝導率はこの範囲内であることから、妥当な値を算出できていることが期待される。そこで、実際に計測を行った現場の深度 5m 付近の土をサンプリングし、室内試験により熱伝導率を求めた。室内試験として、既往の研究²⁾により確立された、温水熱源を用いた簡易恒温槽による熱伝導特性把握試験を行った。この試験は、熱源である温水とサンプリングした供試体との間で熱交換を行い、熱平衡に要した時間から比熱や熱伝導率などの熱物性を求める試験である。室内試験より求めた熱物性を表-3 に示す。伝熱プローブの結果と室内試験の結果、熱伝導率は共に 0.84[W/mK] となり、ほぼ一致した。

4. まとめ

本研究では、伝熱プローブ装置を開発し、原位置における熱伝導率探査法を検討した。本試験は SWS 試験による掘削孔を利用することで、試験の簡易化と低コスト化を図った。実地盤にて試験を行い、熱量の経時変化を計測できた。計測結果から、非定常熱線理論式を参考に熱伝導率を算出した。算出した熱伝導率は、計測を行った地盤の種類等から、有機物質や腐植土を含んだ粘土地盤の一般的な熱伝導率に近い値となった。また、実際に計測を行った地点から試料を採取し、室内試験から熱伝導率を算出した結果、0.84[W/mK] となり、伝熱プローブによる結果とほぼ一致した。そのため、伝熱プローブによる試験は妥当な熱伝導率を算出できたと考えられる。今後は試験ケースを増やし、試験の妥当性評価のため、熱伝導解析などを行う必要がある。

【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/h22052-1007b.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

表-1 測定諸条件

日付	11/27
掘削深度 m	5
地表面温度 °C	15.6
外気温 °C	14.6
初期地中温度 °C	18.0
熱源設定温度 °C	40.0
計測時間 h	1

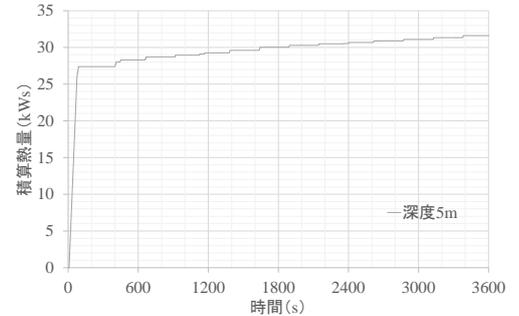


図-2 積算熱量経時変化 まとめ

表-2 算出したパラメータ

熱量 Q (W/m)	71
上昇温度 (°C)	12
温度上昇速度 $dT/d \ln t$	6.697
熱伝導率 λ (W/mK)	0.84

表-3 室内試験結果

	比熱 [kJ/(kg·K)]	熱伝導率 λ [W/(m·K)]
深度 5m 採取試料	12.710	0.841