

採取試料を用いた土の熱伝導特性実験の検討

東京都市大学 学生会員○ 秋葉将太 学生会員 片根弘人 正会員 末政直晃
(財)ベターリビング 非会員 久世直哉

1. はじめに

近年、東京を始めとした大都市特有の環境問題として、ヒートアイランド現象が挙げられる。このヒートアイランド現象の主要な要因として、空調等の人工排熱の占める割合はかなり大きい。このような排熱を抑制する施策の一つに、地中熱ヒートポンプを利用した冷暖房システムがある。このシステムは、土壌の莫大な蓄熱能力を考慮し、夏期には土壌をヒートポンプの放熱源として、冬期には採熱源として利用することで、外気への人工排熱の排出を抑制することができ、ヒートアイランド現象の有効な対策として注目されている。

地中熱を利用するにあたり、システムの性能評価のために地盤の熱伝導特性を正確に把握することが重要となる。しかし、原位置での調査には、時間、費用等の面で困難な点が多い¹⁾。本研究は、サンプリングにより得られた試験体で熱伝導特性試験を行い、地盤の熱的物性値を精度良く測定することを目的としている。そこで今回、試料土を用いた熱伝導特性試験のため、現場でのサンプリングの際に用いるシンウォールチューブを取り入れた実験装置を考案した。本論では、実際に現場で採取した試料土で実験を行い、地盤の熱的物性値である有効熱伝導率を定め、現場のデータとの比較を行った。

2. 熱伝導特性実験

ベターリビングのつくば建築試験研究センター敷地内で採取された試料土を用い、熱伝導特性試験を行った。そして、湿潤密度、含水比などのパラメータが熱物性値に及ぼす影響を評価し、現場土の熱物性値を推定した。試験の成果として、土質試験から得られた定数を用いることにより、杭を用いた地中熱利用時における地盤の採放熱量を、サーマルレスポンス試験などを行わずに試算出来ることを目的とする。

2.1 試験装置の概要

試験体は、シンウォールチューブ、アクリル板、エンドキャップ、ウレタンフォーム、真空断熱容器から構成され、試料土の容器であるシンウォールチューブの寸法は、長さ170mm、外径76mmである。また、真空断熱容器の内側の寸法は高さ186mm、内径125mmで、容器上部には断熱材として厚さ20mmのウレタンフォームを5枚重ねたものを設置した。また、試験体の周辺の熱環境を調整するため、試験体の外部に縦400mm、横490mm、高さ310mmの簡易恒温槽を設置している。ヒーターにより約43℃程度に設定した温水を温水槽内に張り、更に上部を断熱シートで覆った。温湿計により恒温槽内の温度、湿度を計測したところ、気温は35~40℃程度、湿度は60~70%に設定することが出来た。図-1に簡易恒温槽の概要図を示す。

2.2 試験条件、試験方法

試料土には、ベターリビングつくば建築試験研究センター敷地内より採取されたローム(GL-2.50m)、粘土(GL-3.00~3.50m)、砂質粘土(GL-5.00~6.00m)、細砂(GL-9.00~10.00m)の4種類を用いた。各試料土の土質試験結果を表-1に示す。すべての試料は粒径2mm以下の細粒土であり、土質試験結果に基づき、供試体の土骨格を再現すべく、間隙比eを調整した。そして任意に土中の水分量(含水比w)を変化させ供試体を作製し、熱伝導特性への土中水分の影響度を評価した。各試料土における実験条件の例として、表-2にローム①の試験条件を示す。ただし、ロームにおいては、土質試験結果よりも間隙比を低く設定してしまったため、間隙比 $e \leq 3.5$ のものをローム①、 $e \geq 3.5$ のものをローム②とした。測定にはK熱電対を使用し、試験体上部より貫入し設置した。測定点は、試料土の中心(0cm)、シンウォールチューブの内壁(3.7cm)、外壁(3.8cm)、熱源である温水、恒温槽内水温、気温の計6点とした。

試験方法は、作製した供試体の任意の点に熱電対を設置した後、供試体温度が室温程度で一定となるまで放置した。また恒温槽で温められている約43℃の温水を、真空断熱容器内に1140g移し、40℃程度になるまで調整した。供試体温度が一定となった後、真空断熱容器を恒温槽内に設置し、測定開始と同時に真空断熱容器内の熱源である温水に

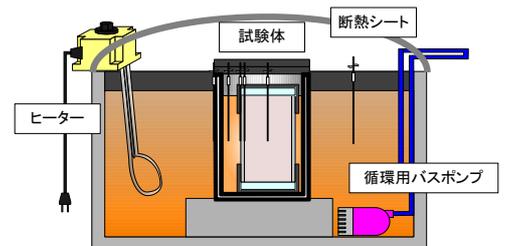


図-1：簡易恒温槽の概要図

表-1：土質試験結果

試料土		ローム (1.00-2.00)	粘土 (2.65-3.35)	砂質粘土 (6.00-6.75)	細砂 (10.00-10.75)
深さ					
湿潤密度	ρ_w [g/cm ³]	1.327	1.384	1.762	1.837
乾燥密度	ρ_d [g/cm ³]	0.588	0.707	1.258	1.375
土粒子の密度	ρ_s [g/cm ³]	2.791	2.78	2.684	2.667
自然含水比	w_n [%]	125.7	95.8	40.1	33.7
間隙比	e	3.748	2.935	1.134	0.94
飽和度	S_r [%]	93.6	90.7	94.9	95.5

表-2：ローム①の試験条件

試料	ローム①	土質試験	試験数					
			①	②	③	④	⑤	⑥
深さ	GL-25							
湿潤密度	ρ_w [g/cm ³]	1.384	1.45	1.15	1.05	0.973	1.00	0.961
乾燥密度	ρ_d [g/cm ³]	0.707						0.707
土粒子の密度	ρ_s [g/cm ³]	2.78						2.78
間隙比	e [-]	2.933	2.33	2.95	2.96	3.04	2.85	2.86
含水比	w [%]	95.8	74.1	62.8	49.9	41.4	38.4	33.5

Keywords：熱的性質、サンプリング、地中熱利用

連絡先：〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1 東京都市大学 TEL03-5707-2202 E-mail:g1181701@tcu.ac.jp

供試体を浸し、上部に断熱材としてウレタンフォームを設置した。そして最後に断熱シートで恒温槽上部を覆い、熱源温水、試料等の温度が一定となるまで約2時間放置した。また、試験毎に熱物性値が既知である寒天供試体で試験を行い、得られた熱物性値と既知である熱物性値から試験法における校正係数を算出し、試験土の試験結果のキャリブレーションを行った。

2.3 試験結果から得た熱伝導率と含水比の関係式

既往の研究より、長谷川ら²⁾や粕淵³⁾における含水比 w と熱伝導率 λ との関係を表す実験式がある。特に、ロームにおいて長谷川らと粕淵の実験式はほぼ同様の関係式を示しており、信頼性は高いと思われる。試験結果から得た含水比と熱伝導率の関係を示したグラフを、線形近似したものを図-2に示す。図より、含水比の上昇に伴い、熱伝導率も上昇する傾向が確認できた。既往の研究に習い、今回得られた熱伝導率において線形近似を行い、近似式を求めた。図-2において、ローム、細砂ともに、長谷川らや粕淵の実験式よりもやや急な勾配を示した。また今回得られた線形近似における実験式は、切片が負の値をとり、乾燥試料における熱伝導率の評価には適していないといえる。そこで、c. 液相と熱伝導率より得られた関係式から液相 $\theta = 0\%$ の値を読み取り、これを乾燥試料における熱伝導率とし、含水比と熱伝導率の関係式の切片とした。図-3に補正後の含水比と熱伝導率の関係図を示す。これにより得られた以下の関係式がローム、細砂における実験式とする。

ローム： $\lambda [W/mK] = 3.82w + 0.241$

細砂： $\lambda [W/mK] = 0.75w + 0.093$

砂質粘土、粘土においては、ロームの分布に近いことからほぼ同程度、もしくは少し高い熱伝導率を示すと思われる。

3. 現場試験による有効熱伝導率の推定^{4), 5)}

ベタリビングのつくば建築試験研究センター敷地内の地盤の有効熱伝導率の推定法として、地質柱状図の物性値により推定する方法と作図法(サーマルレスポンス試験)による推定方法の2通りの方法で評価した。ここでは、その内容は省略し、作図法のみの内容をまとめ、そのデータをもとに地盤の有効熱伝導率について再検討を行った。その結果、作図法によるTBTL所在地の地盤の有効熱伝導率は1.45W/(mK)、1.20W/(mK)となった。

3.1 計算による推定結果の再検討(含水比による熱伝導率の推定)

熱伝導率と含水比の結果より、含水比と熱伝導率との関係は、ローム、細砂において上記の実験式を導くことが出来た。砂質粘土と粘土においては、実験式を導き出すことができていないため、ロームと細砂のみ上記の実験式より熱伝導率を推定し、重み付け平均を行い、地盤の有効熱伝導率を試算した。砂質粘土と粘土においては、変更せずもとの有効熱伝導率の値を使用した。地質の物性値として含水比は明記されていないため、表-1に示した土質試験結果を基に、含水比を推定し、熱伝導率を算出した。対象深度10mにおける計算結果を表-3に、対象深度5mにおける計算結果を表-4にそれぞれ示す。試算の結果、対象深度10mにおいては地盤の有効熱伝導率は1.41W/(mK)、対象深度5mにおいては1.12 W/(mK)となり、作図法とほぼ同程度の値を推定することができた。砂質粘土と粘土における実験式を導き、その値を用いることでさらに高い精度で推定できるものと考えられる。

4. まとめ

本論では、シンウォールチューブを取り入れた実験装置を用いて、実際に現場で採取した試料土で実験を行った。その結果、算出された有効熱伝導率と現場試験で得られた有効熱伝導率の比較を行い、以下の知見を得た。

- ・ローム、細砂ともに、飽和度と熱伝導率には直線関係が見られ、飽和度の上昇に伴い熱伝導率も上昇した。
- ・飽和度の違いによる熱伝導率の分布の傾きを見ると、細砂は微小な飽和度で大きな影響を受ける。
- ・含水比における実験式より推定した地質(ロームと細砂のみ)の熱伝導率を用い、地盤の有効熱伝導率を推定した結果、現場で行われたサーマルレスポンス試験から得られた有効熱伝導率に近い値を示した。

《参考文献》 1) 舘野ら：地中熱設計のためのヒーター埋設型原位置地盤熱伝導率分布探査法の検討、日本地熱学会 平成20年度学術講演会講演要旨案 2) 長谷川寿保ら：サーマルプローブを用いた一点法による土壌含水率測定値の誤差、Grassland Science 46(3・4) p.309-312(2000) 3) 粕淵辰昭：土壌の熱伝導率におよぼす水分の影響 火山灰土壌、沖積土壌、洪積土壌について、日本土壌肥科学雑誌 第43巻 第12号 p.437-441(1972) 4) 成哲俊ら：鋼管杭の径違いによる土壌採放熱に関する実験検討、日本建築学会 2008年 日本建築学会大会学術講演梗概集 5) 成哲俊ら：鋼管杭を利用した直接熱交換式による地中採放熱に関する実験、日本建築学会 2009年 日本建築学会大会学術講演梗概集

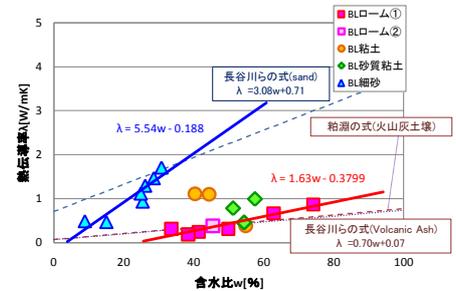


図-2：含水比と熱伝導率の関係

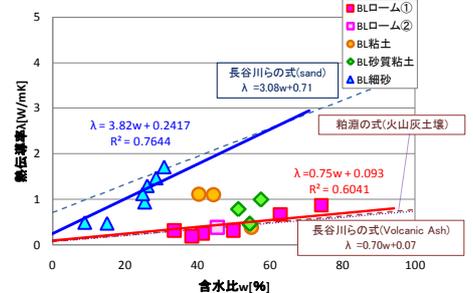


図-3：含水比と熱伝導率の関係(補正後)

表-3：対象深度10mにおける計算結果

地質名	層厚 m	有効熱伝導率 W/(m・K)	含水比 %	重み係数	重み付け熱伝導率 W/(m・K)
ローム	0.95	0.72	78.3	0.095	0.07
粘土	1.50	0.92	90.0	0.150	0.14
粘土	1.20	1.27	99.1	0.120	0.15
砂質土	0.50	1.91	46.1	0.050	0.10
粘土	3.65	1.27	59.4	0.365	0.46
砂質土	2.20	2.23	54.7	0.220	0.49
計算用総深度: 10m		地盤の有効熱伝導率: 1.41W/(m・K)			

表-4：対象深度5mにおける計算結果

地質名	層厚 m	有効熱伝導率 W/(m・K)	密度 kg/m ³	重み係数	重み付け熱伝導率 W/(m・K)
ローム	0.95	0.72	78.3	0.190	0.14
粘土	1.50	0.92	90.0	0.300	0.28
粘土	1.20	1.27	99.1	0.240	0.30
砂質土	0.50	1.91	46.1	0.100	0.19
粘土	0.85	1.27	59.4	0.170	0.22
計算用総深度: 5m		地盤の有効熱伝導率: 1.12W/(m・K)			