

P04. 仙台市丘陵部および平野部における地盤の熱応答試験結果

○岡林昌宏（土木地質）・新堀雄一（東北大学）・
前田桂史（東北大学）・高橋達也（土木地質）・
高橋克実（土木地質）・長谷川史彦（東北大学）

1. はじめに

温室効果ガス排出削減の1つの有効な手段として、建築物の冷暖房設備に地中熱利用ヒートポンプシステム（Ground Source Heat Pump: GSHP）を導入することによる省電力化があげられる。一次エネルギー源である化石燃料依存度を低下する政策としての地中熱利用が、アメリカ合衆国や欧州連合加盟諸国で広く実施されており、地中熱利用産業の施工技術や専用市販品市場は、既に成熟の域に達している。

一方、日本国内では、GSHPは一般消費者層にはほとんど認知されていない。また、国政の省エネルギー政策立案および政策決定に関わる当局の間では、GSHPの存在は認知されているが、その省エネルギー効果が社会に与える素晴らしい利益については懐疑的であり、地中熱利用が実際に有効なものであるかどうかを検証しようとする政策がようやく動き出し始めた段階である。

その検証作業政策の1つとして、環境省による「地熱・地中熱等利用事業のうち地中熱利用ヒートポンプシステムにおけるモニタリング機器設置事業」が平成26年度より行われている。仙台市内でこの事業に採択された実施団体・個人および土木地質（株）、（株）コロナ他より構成されるグループは、平成26～27年度の間仙台市内の4か所で熱応答試験（Thermal Response Test: TRT）を行った。

また、宮城県と仙台市の協力により公益財団法人みやぎ産業振興機構が行っている「宮城・仙台富県チャレンジ応援基金事業」のうち産学連携型育成支援事業に、土木地質（株）と東北大学未来科学技術共同研究センターを中心とするグループが採択され、その事業の実施過程において土木地質（株）所在地に設置した構造の異なる3つのボアホール地中熱交換器（Borehole Heat Exchanger: BHE）に対してTRTを行った。

これら2つの事業を合わせて、仙台市内の丘陵部および平野部において、GSHP冷暖房システム用のBHEに対するTRTのデータが得られた。

TRTの結果、地盤の平均有効熱伝導率は、おおむねそれぞれの地点の地盤の地質を反映する値であったが、地下水の流れが存在すると想像される領域においては熱交換率の優位性が見られた。

2. 熱応答試験の実施

平成26年度から平成27年度にかけて仙台市内の図-1に示す地点にてTRTを実施した。



図-1 熱応答試験実施位置。(国土地理院「地理院地図 Globe」(平成28年4月現在試験公開中)に加筆し作成。)

各試験位置における TRT の実施状況を表-1 に示す。

表-1 熱応答試験の実施状況。

試験位置	実施期間	地中熱交換器長さ [m]	地中循環パイプ	掘削方向	ヒーター電力 [kW]	流量 [L/min]	メートル当り加熱量 [W/m]	加熱時間 [hour]	
泉区本田町 土木地質(株)	No1	2015/6/20~29	50	25A シングルU	鉛直	4.0	15	78.0	72
	No2	2015/6/29~7/9	50	25A シングルU	30度	4.0	15	78.0	72
	No3	2015/7/22~31	50	25A シングルU	鉛直	4.0	15	79.5	72
宮城野区栄	2016/1/5~12	64	25A シングルU	鉛直	3.0	13	45.6	72	
宮城野区岡田西町	2014/9/19~26	50	25A ダブルU	鉛直	3.2	19	65.0	72	
青葉区小松島	2014/10/7~14	50	25A ダブルU	鉛直	3.0	16	58.2	72	
泉区高森	2014/9/1~8	50	25A ダブルU	鉛直	3.0	19	60.5	72	

TRT は、全ての試験位置において加熱法により実施した。また、泉区本田町においては加熱法終了直後に回復時法を実施した。

加熱法による試験の実施および解析方法については、長野克則(2011)『IEA ECES(蓄熱実施協定) ANNEX 21 (TRT) 準拠 ボアホール型地中熱交換器に対する加熱法による熱応答試験の標準試験方法 Ver.2.0』¹⁾ に準じて行った。

回復時法の実施と解析については、国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課(2013)『官庁施設における地中熱利用システム導入ガイドライン(案)』²⁾ の方法により行った。

TRT の結果得られた各試験位置における地盤の平均有効熱伝導率と BHE の熱抵抗の値を、試験位置のおもな地質および BHE の構造などとともに表-2 に示す。

表-2 各試験位置における地中熱交換器の構造と熱応答試験結果。

試験位置	主な地質	地中循環パイプ	充填材	孔内水位 GL-m	掘削方向	熱伝導率 W/m-K	熱抵抗 K/(W/m)
泉区本田町 土木地質(株)	No1	シングルU	ガラス粒・水	1.3	鉛直	1.52	0.217
	No2	シングルU	ガラス粒・水	1.5	30度	1.59	0.165
	No3	シングルU	珪砂・ベントナイト・水	0.8	鉛直	1.18	0.141
宮城野区栄	飽和砂質土	シングルU	珪砂2号	2.5	鉛直	2.50	0.14
宮城野区岡田西町	飽和砂質土	ダブルU	発生土埋め戻し	不明	鉛直	2.53	0.070
青葉区小松島	凝灰岩	ダブルU	珪砂5号	8.0	鉛直	1.52	0.065
泉区高森	—	ダブルU	珪砂1号	15.3	鉛直	1.72	0.082

3. 得られた地盤の有効熱伝導率と地質との関係

泉区本田町の土木地質(株)敷地においては、BHE No.3 の設置に先立ち、ボーリングコア採取による地質調査を行った。地質は地表から2メートル未満までは盛土および風化凝灰岩、それより下から深度22メートルまでの間は硬い凝灰岩、それ以深の孔底51メートルまでは固結度が低く締まった砂状を呈する凝灰質砂岩であった。No.1 と No.2 についても、近接した位置にあるので、地質はほぼ同様であると考えられる。

また、宮城野区栄および青葉区小松島の試験位置においては、掘削スライムを基に文献等の地質情報も参考にボーリング柱状図を作成した。宮城野区栄の地質は深度52メートルまで沖積平野の砂礫層、深度54メートル以深は、仙台市東部・多賀城市・利府町周辺地域に出現する硬質な頁岩であった。青葉区小松島の地質は地表から層厚10メートル以下の砂・シルト等よりなる未固結層と、それ以深はおもに軽石質凝灰岩よりなる地質が深度50メートルまで存在した。

米国 International Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA) が GSHP システム設計者・施工者を対象に実施しているトレーニングコースで使用されているマニュアルの中の 1 冊である Salomone ら (1989) による著作³⁾ (以後、「IGSHPA マニュアル」) や、また、欧州の Geo-Education for a sustainable geothermal heating and cooling market (GEOTRAINET) のマニュアル⁴⁾ (以後、「GEOTRAINET マニュアル」) にはドイツ技術者協会 (VDI) (2010) のガイドライン⁵⁾ (以後、「VDI 4640」) からの引用により、地質別の熱伝導率の表が掲載されている。これらの文献より、前述した TRT 実施位置の地質に相当する値を抽出し、まとめたものを表-3 に示す。また、TRT により得られた実測値を試験位置の地質とともに並べて示す。

表-3 地質・岩種ごとの熱伝導率の例 (左) と熱応答試験実測値 (右)。

地質	熱伝導率 [W/m·K]		熱応答試験による実測値 [W/m·K]		
	IGSHPA	VDI 4640	試験位置	地質	有効熱伝導率
飽和砂質土	2.50	2.0 - 3.0	栄	飽和砂質土	2.50
頁岩 (湿潤)	0.9 - 4.0	—	岡田西町	飽和砂質土、頁岩	2.53
凝灰岩	1.0 - 2.5	1.1	本田町(5・22 m)	凝灰岩	0.9 - 1.2
			小松島	主に軽石質凝灰岩	1.52
軽石	0.4 - 0.7	—			
砂岩	1.0 - 5.0	1.9 - 4.6	本田町(23・51 m)	凝灰質砂岩	1.0 - 1.8
粘土岩・シルト岩	1.2 - 3.0	1.1 - 3.4			

宮城野区栄および岡田西町の TRT で得られた地盤の見かけの平均有効熱伝導率は、IGSHPA マニュアルおよび VDI 4640 に掲載されている飽和砂質土の値と良く一致した。

泉区本田町の土木地質 (株) 敷地での TRT では、BHE 孔内に熱電対を設置し、加熱終了後のデータから回復時法により深度毎の見かけの有効熱伝導率を求めた。その結果得られた熱伝導率の深度プロファイルを図-2 に示す。有効熱伝導率の値が安定している深度 5 メートルから、凝灰岩に相当する 25 メートル付近より浅い深度までの間では、3 孔とも各深度毎の熱伝導率は 0.9 ~ 1.2 W/(m·K) であり、VDI 4640 に示される凝灰岩の熱伝導率と良く一致した。また、IGSHPA マニュアルに掲載されている凝灰岩の値の範囲にも収まっている。No.1, No.2 における 30 メートル以深の凝灰質砂岩に相当する深度では、見かけの有効熱伝導率として高い値を示した。この理由としては、凝灰質砂岩が含水飽和状態にあるためではないかと推測される。なお BHE No.2 は 35 メートル以深では見かけの有効熱伝導率が極端に大きな値となっている。この理由として考えられるのは、No.2 は鉛直から 30 度斜めの角度で掘削したため先端部が No.1 から水平方向に約 25 メートル離れて地下水の流動がより卓越した領域に入り、地下水による熱の移流の影響を受けている可能性が高いと推測される。地下水による熱の移流については、

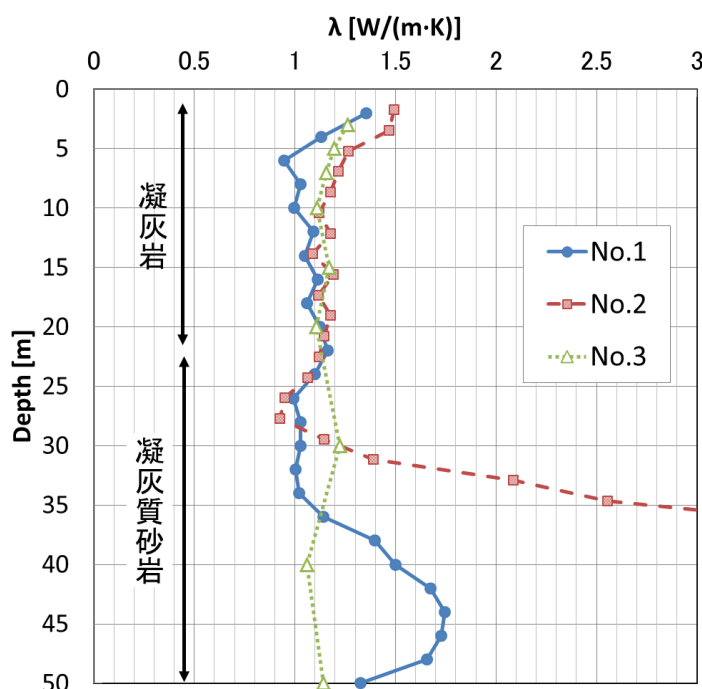


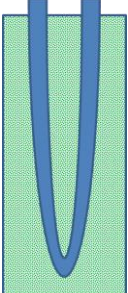
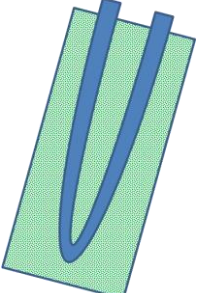
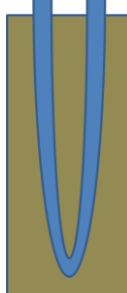
図-2 土木地質 (株) 敷地内に設置した 3 つの地中熱交換器の深度毎の見かけの有効熱伝導率 λ。

Chiasson ら (2000) ⁶⁾ が速い地下水流が BHE を設置した地盤の有効熱伝導率を増大させる事をシミュレーション計算によって示した例などがある。

4. 熱抵抗の値と地中熱交換器の構造との相関

泉区本田町の土木地質 (株) 敷地内では、表-4 に示すとおり、構造の異なる 3 通りの BHE を設置し、構造の違いによる性能の違いを検証した。No.1 と No.2 はボアホールと循環パイプの空隙にガラス粒を充填した。ガラス粒は粒径 2.5~5.0mm の再生ガラス製品「クリスタルストーン・サンド」を使用した。No.3 には米国で主流の充填方法であるベントナイトと珪砂と水の混合物を充填した。また No.2 は、鉛直から 30 度の傾斜で掘削、設置した。

表-4 土木地質 (株) 敷地内に設置した 3 つの地中熱交換器の構造の比較.

地中熱交換器	No.1	No.2	No.3
掘削方向	鉛直	傾斜(鉛直から 30 度)	鉛直
充填材	ガラス粒・水	ガラス粒・水	珪砂+ベントナイト+水
略図			

TRT の結果では、表-2 に示したように、3 通りの BHE はそれぞれ異なる熱抵抗の値となった。

BHE の熱抵抗の値の違いの原因として、1 つには充填材の熱伝導率の違いが考えられる。BHE No.1 と No.2 の充填材であるガラスと水は、物質そのものの熱伝導率は表-5 に示すようにそれぞれおおよそ $0.6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 前後であるので、充填した粗粒ガラスの空隙に水が飽和した状態でも同等の値と考えられる。それに対し、No.3 には、日本国内で市販されているベントナイトと珪砂を水で混合した充填材を作成して使用した。その充填材の熱伝導率は実験室測定の結果、 $1.21 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ となり (表-5)、No.1、No.2 に比べて熱伝導率が高い値となった。この熱伝導率の違いが、BHE の熱抵抗の差に影響したと考えられる。

表-5 土木地質 (株) 敷地内に設置した 3 つの地中熱交換器に使用した充填剤の材料の熱伝導率の比較.

充填材	熱伝導率 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	温度条件	出典
ガラス (ソーダ)	0.55 - 0.75	常温	理科年表 ⁷⁾
水	0.561 - 0.673	0 - 80 °C	理科年表 ⁷⁾
珪砂+ベントナイト+水 (重量比 8:1:6)	1.21	常温	実測値

一方、BHE No.1 と No.2 は充填材が同じであるにもかかわらず熱抵抗の値が 3 割近く異なる結果となった。ボアホール内におけるパイプの配置と充填材の熱伝導率の違いが BHE の熱抵抗に及ぼす影響について Hellström ^{8), 9)} は、充填材の熱伝導率が小さい場合は上りと下りのパイプの配置の違いが BHE の熱抵抗に大きな差を生み出すことを示した。BHE No.1 が鉛直で No.2 が傾斜

しているという違いによって、ボアホール内でのパイプの配置に違いが生じたことにより熱抵抗の値が大きく異なる結果となった可能性が推察される。つまり、傾斜孔とした No.2 ではUパイプ設置時にセントライザーを付けていないため、パイプが孔壁に接触し、熱抵抗が低くなった可能性が考えられる。また、透水性の高い粗いガラス粒を充填していることで、傾斜している No.2 においては、孔内のガラス粒の空隙を上下に動くような水の熱対流による影響が大きく現れている可能性も考えられる。Sanner (2011)⁴⁾ は、水はその熱容量の大きさから対流による熱輸送に適しているが、地中では対流を計算するためには非常に多くのパラメーターを考慮しなければならず複雑であるため、熱伝導のような単一パラメーターで解析的に計算することは困難で、数値シミュレーションによる計算が必要であると述べている。Gustafsson (2010)¹⁰⁾ らは、スウェーデンで多く採用されている岩盤を鉛直に掘削したボアホールに充填材として水を満たしその水中にUパイプを挿入した BHE の構造に関して、水の熱伝導のみから求められる BHE の熱抵抗の値は 0.15 ~ 0.2 K·m/W と計算されるはずであるが、多くの測定結果において 0.06 ~ 0.08 K·m/W という値が得られていることについて、対流を取り入れた数値モデルシミュレーションによる説明を試み、実験室模型実験によるシミュレーションの検証を行い、ほぼ近い結果を得たという報告を行っている。

5. 結論

仙台市東部の宮城野区内の2地点で実施した TRT により得られた地盤の平均有効熱伝導率は 2.5 W/(m·K) に近い値であった。これらの地点は地下水位が高く、飽和砂質土層の厚い沖積平野であり、米国 IGSHA マニュアルやドイツ VDI 4640 に地質別にまとめられた熱伝導率の表中の「飽和砂質土」の値と良く一致するものであった。

一方、仙台市の長町-利府線断層帯より西側の丘陵地の地質は、層厚 20 メートル未満の薄い第四系の未固結層の下に新第三系の凝灰岩などの岩盤が存在する。泉区本田町、泉区高森、青葉区小松島で得られた地盤の平均有効熱伝導率は 1.1~1.7 W/(m·K) と、米国 IGSHA マニュアルやドイツ VDI 4640 に地質別にまとめられた熱伝導率の表中の「凝灰岩」「砂岩」「シルト岩」の範囲におおむね収まる値であった。

仙台市内の丘陵部および沖積平野部の計 5 か所で実施した TRT の結果は、おおむね地質に対応する文献値と合致する有効熱伝導率の値を示した。

但し固結度の低く間隙率の大きい軟岩地盤は地下水の存在により熱的物性の取り得る値の幅が広がる。これまでに発行されてきた米国 IGSHA マニュアルや欧州 GEOTRAINET マニュアルでは BHE の設計には地下水の流れによる熱の移流の効果は取り入れられていなかった。一方、日本では、BHE の設計、および、地中熱利用ポテンシャルを評価するには、土質・岩種の地質情報のみならず、水文地質学的情報も把握することが必要であるとの研究が、新堀ら (2002)¹¹⁾、内田ら (2010)¹²⁾ 他により報告されており、本報告において実施した TRT の結果は、それらへの 1 つの裏付けとなる。近年では北米においても、Dehkordi and Schincariol (2014)¹³⁾ など、BHE の設計に地下水の動きを取り入れることが重要であるとの考えが提案されている。また、天満ら¹⁴⁾ は仙台東部の沖積平野部を表層部の第四系とその下の岩盤の第三系に分けてシミュレーション計算を行い第四系における地下水の流動の影響を示したが、本 TRT 結果では長町-利府線断層帯より西の第三系の丘陵地帯においても砂岩など透水性の高い岩種の層で地下水の流れがあれば熱の移流の効果が見られ、さらに、BHE 内部における対流の影響の可能性も示された。

