

沖積層地盤における BHES のモデル化

広成建設（株）
福井大学工学部

正会員 谷本 智*
正会員 福原輝幸**

1. はじめに 掘削杭熱交換方式（Bore-hole Heat Exchange System, 通称 BHES）は、熱交換杭により地表面下 100m 前後の地中熱を夏期には冷熱源として、冬期には温熱源として利用するシステムである¹⁾。熱交換杭（以下、杭と呼称）は、杭内管および外管で構成される同軸の 2 重管である。BHES は、ヨーロッパや北欧を中心に普及し、その殆どは岩盤で施工されている。しかしながら、日本において BHES を適用した際には、地盤中に存在する帯水層を杭が横切ることになり、地下水流れが BHES の採・放熱能力に大きな影響を与える²⁾。

従って本研究では、福井大学構内の沖積層に設置された BHES の実測温度データを基に 3 次元解析モデルを構築し、帯水層における杭と地下水流れとの熱的相互作用を数値計算により明らかにする。

2. 解析モデルと解析条件

2.1 熱輸送理論 杭内管、外管および地下水流れの無い地盤の熱輸送は、Fig.1 を参考にそれぞれ以下の式(1)~(3)により与えられる。

杭内管

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - (\rho c)_w u_i \frac{\partial T_i}{\partial z} + \alpha_i (T_o - T_i) \eta_i \quad (1)$$

杭外管

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_o}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_o}{\partial y^2} - (\rho c)_w u_o \frac{\partial T_o}{\partial y} - \alpha_i (T_o - T_i) \eta_i + a_i \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial x} \Big|_{x=x_0} + \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial z} \Big|_{z=z_0} \right) \eta_o \quad (2)$$

地下水流れの無い地盤

$$(\rho c)_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial z} \right) \quad (3)$$

ここに、 $(\rho c)_w$ ：流体の体積熱容量、 λ_w ：流体の熱伝導率、 λ_G ：地盤の熱伝導率、 α_i ：内管の熱貫流率、 T_i ：内管水温、 T_o ：外管水温、 T_G ：地盤温度、 u_i ：内管流速、 u_o ：外管流速、 t ：時間、 x ：水平地下水主流方向、 y ：鉛直方向、 z ：主流直交方向、 η_i ：内管微小要素の体積に対する周囲面積の比、 η_o ：外管微小要素の体積に対する周囲面積の比、 x_0 ：中心から外管壁までの x 方向距離、 z_0 ：中心から外管壁までの z 方向距離、 a_i ：杭隣接地盤での温度勾配補正係数である。

2.2 帯水層中の熱・水分移動 帯水層中の地下水流れは水平 2 次元とし、熱対流の影響は無視する。

連続式

$$\frac{\partial u_{Gx}}{\partial x} + \frac{\partial u_{Gz}}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

ここに、 u_{Gx} ： x 方向の地下水流速、 u_{Gz} ： z 方向の地下水流速である。

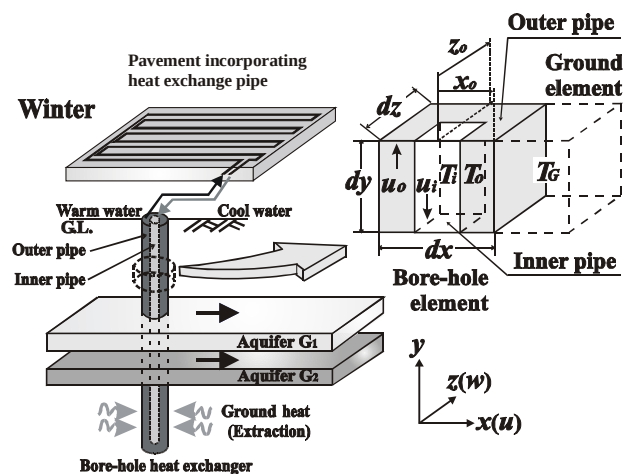


Fig.1 帯水層を横切る BHES の熱移動概念図

キーワード：掘削杭熱交換方式（BHES）、地中熱、帯水層、熱移動

* 〒732-0056 広島県広島市東区上大須賀 1-1 TEL 082-264-1711 (代) FAX 082-264-3801
** 〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1 TEL 0776-23-0500 (2809) FAX 0776-27-8746

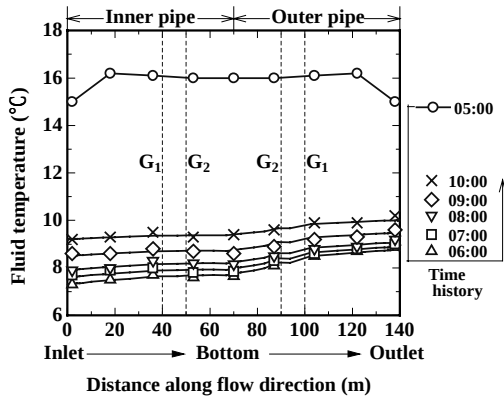


Fig.2 杭水温分布の経時変化
(1998年1月2日：システム稼働時)

帯水層中の熱輸送方程式

$$(\rho c)_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial z} \right) - (\rho c)_W u_{Gx} \frac{\partial T_G}{\partial x} - (\rho c)_W u_{Gz} \frac{\partial T_G}{\partial z} \quad (5)$$

3. 計算結果

3.1 杭内水温の再現計算

Fig.2は1998年1月2日のシステム稼働時における杭内水温を1時間毎に示したものである。杭を横切る帯水層は地表面下40mおよび50mにある（それぞれ、G₁層、G₂層と呼称）。また、図中のシンボルは実測値を、実線は計算値を示す。稼働前の午前5時（05:00）における水温分布は、横軸の70mを中心として左右対称であり、内管および外管水温は等しい。稼働後の6:00～10:00までの水温上昇は外管において顕著となる。計算結果は実験結果を良好に再現する。

Fig.3は、システムが停止した10:00以降の10時間にわたる杭内水温の上昇過程を示す。停止2時間後の12:00では、内管に比べ外管の水温回復は早い、時間の経過とともに内管と外管の水温はほぼ等しくなる。この特徴を計算結果は概ね再現する。

3.2 地下水流れによるBHEsの熱エネルギー抽出特性

Fig.4は、アンサンブル平均された1998年2月の気象条件と流入水温の日変化を基に、1ヶ月に亘る積算抽出熱エネルギー E_e の経時変化を計算した結果である。帯水層の有る場合（○）とG₁層およびG₂層を地下水流れの無い地盤に置き換えた場合（●）を比較すると、前者において E_e は1ヶ月間で24%増大する。

外管を横切る地中熱フラックス E_o の1日目および30日目の午前6時における鉛直方向分布をFig.5に示す。1日目の帯水層における E_o （○）は帯水層でないと仮定したときの E_o （●）よりもG₁層で1.23倍、G₂層で1.40倍大きくなり、30日目においてはそれぞれ2.18倍、2.64倍となる。G₁層およびG₂層以外の場所で E_o に違いはないことから、Fig.4に示した積算抽出熱エネルギーの差は地下水流れによるものと言える。

4. おわりに ここで提案した3次元解析モデルにより、帯水層はBHEsの地中熱抽出に対して有利に作用することが明らかとなった。今後は、本解析モデルを用いて両者の熱的相互関係を長期間にわたり検討する予定である。

参考文献 1)谷本智・福原輝幸・渡邊洋：沖積層地盤における掘削杭熱交換方式の3次元モデル，第55回年次学術講演会，VII，2000。
2)谷本智・福原輝幸・森山和馬：帯水層中における熱交換掘削杭の熱エネルギー抽出特性，水工学論文集，第44巻，pp.241-246，2000。

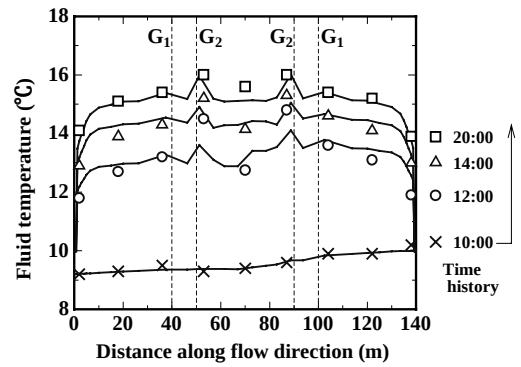


Fig.3 杭水温分布の経時変化
(1998年1月2日：システム停止時)

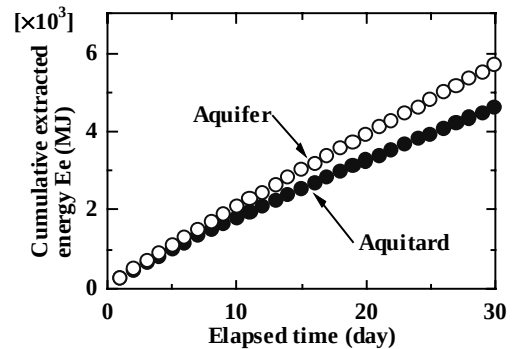


Fig.4 積算抽出熱エネルギーの経時変化

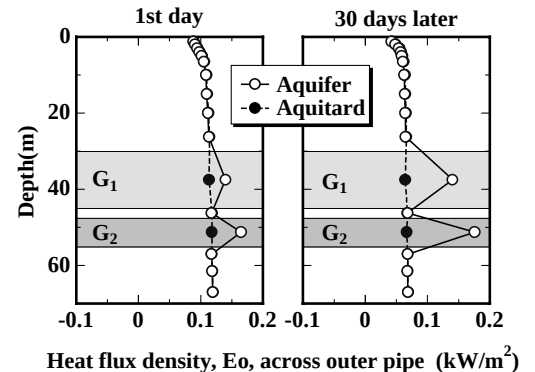


Fig.5 外管を横切る地中熱フラックスの鉛直分布