

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

EXTRACTION OF TERRESTRIAL HEAT BY A BORE-HOLE HEAT EXCHANGE SYSTEM IN AN ALLUVIAL AQUIFER

谷本 智¹・福原輝幸²・森山和馬³

Satoshi TANIMOTO, Teruyuki FUKUHARA, Kazuma MORIYAMA

¹ 学生員 福井大学大学院博士前期課程環境設計工学専攻 (〒910-8507 福井市文京 3-9-1)

² 正会員 工博 福井大学教授 工学部環境設計工学科 (〒910-8507 福井市文京 3-9-1)

³ 正会員 ミサワ環境技術株式会社 (〒729-6202 広島県三次市向江田町 4252-2)

A Bore-hole Heat Exchange System (BHES) has been originally developed for thermal energy storage in rock basin. One of characteristics of the BHES in Fukui University, is that it was built in an alluvial aquifer, and this was the first such system built in Japan. To evaluate the effect of groundwater flow on the thermal performance of the BHES is an important research theme.

This paper describes, both experimentally and theoretically, the thermal behaviors of the fluid in the bore-hole and the surrounding ground temperature in an aquifer (permeable layer) and in an aquitard (semi-permeable layer). The data indicate that the fluid temperature recovery in the bore-hole after shutting off the circulation pump following a snow melting operation was much more rapid at levels with aquifers than at those without. It is concluded that sensible heat associated with groundwater flow contribute substantially to an effective extraction of terrestrial heat by the BHES.

Key Words : Bore-hole Heat Exchange System (BHES), groundwater flow, terrestrial heat, heat transfer

1. はじめに

地表から数 100m までの地盤の熱(地中熱)を抽出するために、内管と外管の同軸二重管から成る掘削杭熱交換システム(Bore-hole Heat Exchange System, BHES と筆者らは呼称)は、ヨーロッパを中心に普及しており、主に空調の熱源に利用されている^{1), 2)}。一方我が国では、筆者らのグループが 1993 年に道路融雪のために BHES (長さ 200m) を広島県三次市の岩盤地帯で最初に導入した。1995 年 7 月からは福井大学内の駐車場融雪に BHES (長さ 70m) が建設され、現在も稼働している。熱交換杭(以下、杭と呼称)の外管は外径 90 mm, 肉厚 4mm, 内管は外径 56mm, 肉厚 3mm のアクリル樹脂である。地盤温度よりも低温の流体が、舗装体内に埋設された循環パイプから出て杭へ流入するとき、流体は内管を下降し外管を上昇する間に地盤から熱を吸収して、昇温する。逆に、地盤温度よりも高温の流体が杭を循環するとき、流体は地盤へ熱を放出して、冷却される(図-1 参照)。福井大学での特徴は BHES を沖積層に初めて適用し

たことである。ここでは、杭内の水温および杭周辺地盤温度を計測し、採熱・放熱に及ぼす地下水流れの影響を調べている^{3), 4)}。盛田⁵⁾は同じく道路融雪のために 1995 年 12 月より岩手県二戸市で、同軸二重管熱交換システム(長さ 151m)を使用した。ここでは、循環方向が BHES と逆であり、流体は外管を下降した後、内管を上昇する。1997 年、建設省は BHES (長さ 100m) を兵庫県村岡町、道の駅「ハチ北」の歩道融雪に⁶⁾、1998 年には、福井県金津町の国道 8 号線の融雪に⁷⁾それぞれ採用した。さらに、1998 年、上村ら⁸⁾は長岡市の国営越後丘陵公園内歩道の融雪に同システム(長さ 25m)を使用した。いずれも、十分に融雪機能を果たしている。

従来ヨーロッパにおける BHES は岩盤で施工され、岩盤蓄熱(季節蓄熱)システムとして捉えられてきた。従って、著者らの知る限り沖積層での BHES の施工事例および地下水流れを考慮した解析は見当たらない。

そこで本研究では、福井大学構内での数年間に亘る杭内水温および杭周辺地盤温度の実測データを基に、沖積層における BHES の採熱量近似計算法について

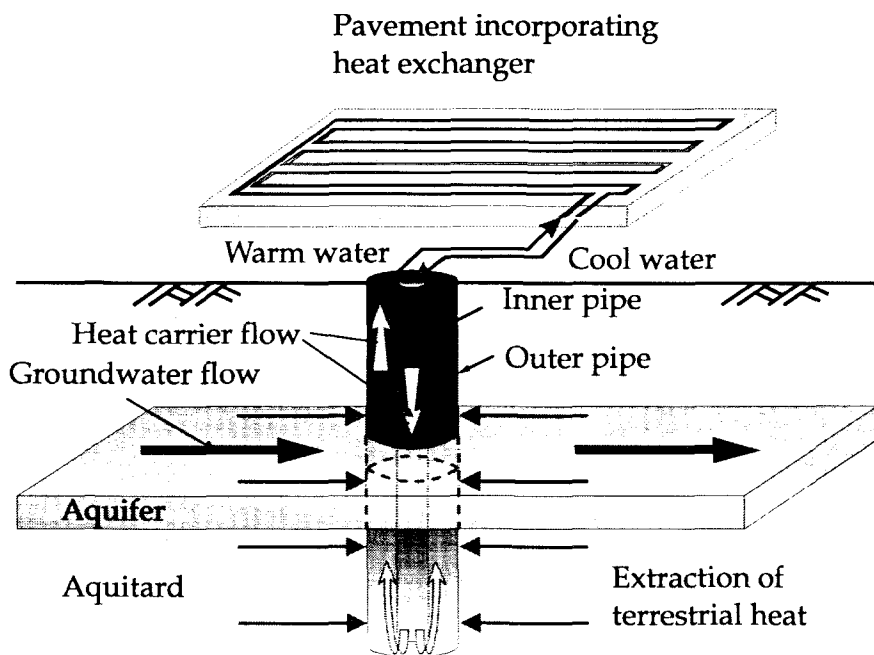


図-1 BHEs の熱移動概念図 (融雪時)

検討を行い、帯水層（地下水流れ）から杭への熱供給特性を考察する。

2. 解析モデルと解析条件

(1) 熱交換掘削杭と地盤との間の熱移動

まず、BHEs の熱エネルギー方程式を構成する上で最も重要な内管と外管との間の熱移動および外管と地盤との間の熱移動を、次のように表現する。

a) 内管と外管との間の熱移動

内管と外管との間の熱貫流フラックス密度 E_i は、外管水温 T_o と内管水温 T_i の温度差に内管の熱貫流係数 α_i を乗じたバルク式で表す。

$$E_i = \alpha_i (T_o - T_i) \quad (1)$$

α_i は外管と内管の流れの状態により変化することが予想され、相対的に小さな外管レイノルズ数 Re_o の関数として表わされる。両者の関係は、後の 3. (1) で詳述する。

b) 外管と地盤との間の熱移動

T_o は日周期変化を伴うために、杭周辺の地盤温度 T_g と T_o の大小関係も周期的に変わる可能性がある。冬期の夜間、低温水の循環により T_g は低下する。その後、午前から午後にかけて T_g が T_o よりも高くなると、 T_g の半径方向分布に変曲点が現れる可能性がある (図-2 参照)。図-2 に従えば、外管を横切る熱フラックス密度 E_o は外管から地盤へ向かうはずである。ところが、式(1)と同じように、外管から十分離れた地盤

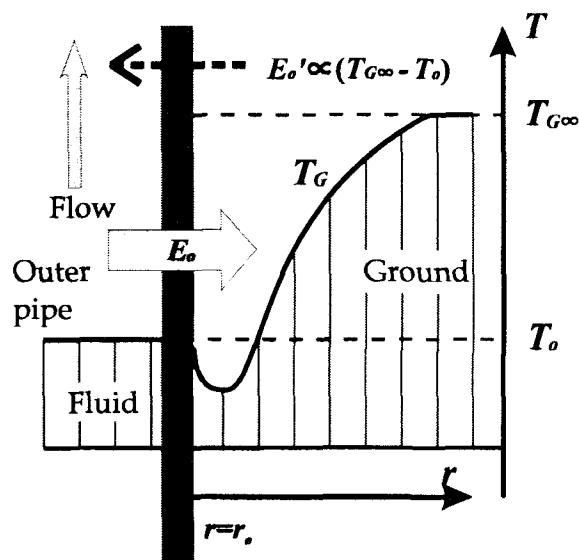


図-2 外管を横切る熱フラックス密度と地盤温度

温度 $T_{g\infty}$ と T_o との差 ($T_{g\infty} - T_o$) に外管の熱貫流係数 α_o を乗じた形で評価すると、図-2 中の熱フラックス E_o' は地盤から外管に向かうことになり、 E_o の方向とは逆になる。また、 $T_{g\infty}$ の代わりに杭近傍の温度境界層中の T_g を用いると、 α_o は杭からの距離により変わる。従って、 E_o をできるだけ普遍的な形で表わすには、次のような熱伝導型が適当と考える。すなわち、

$$E_o = \alpha_o \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial r} \Big|_{r=r_o} \quad (2)$$

ここに、 r : 半径方向の座標、 λ_g : 地盤の熱伝導率お

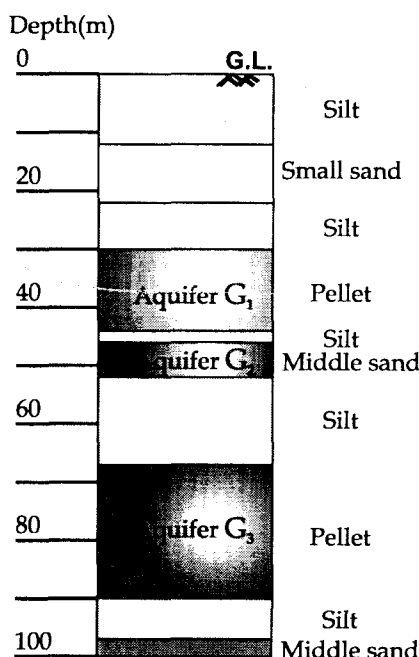


図-3 福井大学における地盤柱状図

および r_o : 外管半径である。係数 a_1 の値は、地下水流速や地盤と杭の接触状態に依存すると考えられる。式(2)による E_o の評価は、盛田⁵⁾および竹内ら⁹⁾のバルク式とは異なり、本解析の特徴の1つである。

内管および外管流体の熱エネルギー方程式は、式(3)および式(4)の円筒座標系でそれぞれ与えられる。

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - (\rho c)_w U_i \frac{\partial T_i}{\partial z} + E_i \eta_i \quad (3)$$

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_o}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_o}{\partial z^2} - (\rho c)_w U_o \frac{\partial T_o}{\partial z} + E_o \eta_o - E_i \eta_i \quad (4)$$

ここに、 $(\rho c)_w$: 水の体積熱容量、 U_i : 内管流速、 U_o : 外管流速、 λ_w : 水の熱伝導率、 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、 t : 時間および z : 鉛直方向の座標である。

c) 地盤中の熱移動

地下水流れの無い地盤中の熱移動は、次の2次元熱伝導方程式に従う。

$$(\rho c)_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial r} r \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial z} \right) \quad (5)$$

ここに、 $(\rho c)_G$: 地盤の体積熱容量である。

帯水層地盤に対する解析上の扱いについては、3. (3) で述べることにする。

地表から下方 100m までの地層は学内ボーリング調査により得られた地盤柱状図に従って、図-3 のよ

うに合計 10 層に分割される。帯水層は全部で 3 つあり (G_1 層 (礫)、 G_2 層 (粗砂) および G_3 層 (礫))。地盤柱状図より推定される厚さは、 G_1 層で 14m、 G_2 層で 6m および G_3 層で 23m である。各土壌の熱物性値は文献 10) を参考にして与えられる。

(2) 境界条件

a) 地表面

地表面地盤温度は 30 分毎の実測値が用いられる。また、実測値間の地盤温度は線形変化と仮定した内挿値が与えられる。

b) 解析領域底面

解析領域底面 ($z=100$ m) では、地盤温度一定とする。

$$T_G = \text{const.} \quad (6)$$

c) 解析領域側面

解析領域側面 ($r=10$ m) を横切る熱移動はないとする。すなわち、

$$\frac{\partial T_G}{\partial n} = 0 \quad (7)$$

ここに、 n : 境界面に対する法線方向を表す。

d) 内管入口水温

内管入口水温は 30 分毎の実測値が用いられ、任意時刻においては実測値間の線形内挿値とする。

(3) 初期条件および計算条件

初期地盤温度は深さ 70m までは実測値が用いられるが、それ以深は $3^\circ\text{C} / 100\text{m}$ の割合で上昇すると仮定する。また、初期地盤温度は深さ方向のみに変化し、半径方向には一様とみなす。

計算メッシュは半径方向には杭から離れるに従って大きくなるように、鉛直方向には地表面付近および杭先付近で細かく設定した。また、時間間隔 Δt は $1.0 \times 10^{-4} \text{ hr}$ とした。

3. 実験結果

(1) 掘削杭熱交換器の熱貫流特性

式(3)の右辺第3項に含まれる唯一の未知量 α_i は、 T_i および T_o の時空間分布を基に計算される。その結果、 $\alpha_i (\text{W/m}^2\text{K})$ と外管レイノルズ数 Re_o の関係は、以下ようになる。

$$\alpha_i = a + b Re_o^c \quad (100 \leq Re_o \leq 2400) \quad (8)$$

福井大学の BHES においては、 $a = -302$ 、 $b = 227$ および $c = 0.086$ となる。 α_i が求まれば、外管と地盤との間の熱フラックスを規定する係数 a_1 は、式(4)より

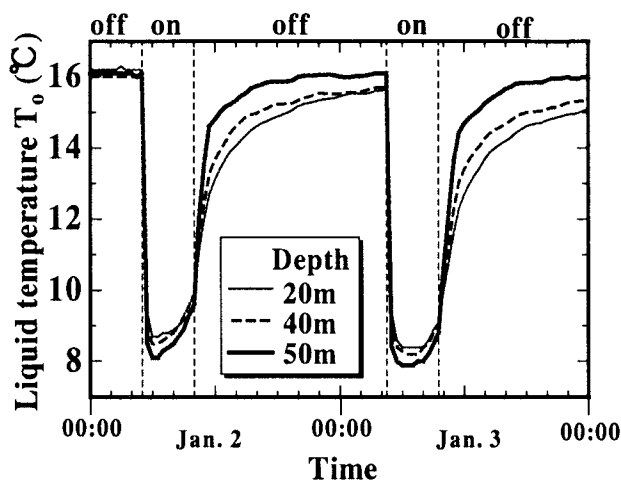


図-4 外管水温の経時変化 (1998 年)

求めることができる。ただし、杭周における地盤温度の半径方向勾配は、次のように近似される。

$$\left. \frac{\partial T_G}{\partial r} \right|_{r=r_o} = \frac{(T_G|_{r=r_o+\Delta r} - T_G|_{r=r_o})}{\Delta r} \quad (9)$$

ここに、熱電対の半径方向の取り付け位置より、 $\Delta r = 0.02\text{m}$ とする。また、

$$T_G|_{r=r_o} = T_o \quad (10)$$

と仮定する。

結果、今回の実験条件内において、 $a_1 = 1.2$ を得たが、 a_1 の特性はさらに検討する予定である。

(2) 杭水温に及ぼす地下水流れの影響

図-4 は、1998 年 1 月 2 日から 3 日までの地表面下 20m、40m および 50m での外管水温を表す。なお 40m および 50m の深さには、 G_1 層、 G_2 層がそれぞれ存在する。BHES は 1997 年 12 月 2 日より 1 ヶ月間停止し、1998 年 1 月 2 日午前 5 時から稼働し始め、路面温度制御（路面温度が 12°C 以上で停止）に従って午前 10 時に自動停止した。融雪システム稼働時（図中の on）においては、舗装体から杭への冷水流入に伴って、杭水温は急激に低下する。しかしながら、流体は外管を上昇する間に地中熱を吸収し暖められ、外管の下部よりも上部において水温は高くなる。そのために稼働停止前の水温は深さ 20m、40m (G_1 層)、50m (G_2 層) の順に高い。しかしながら、システム停止期間（図中の off）中の水温回復（昇温）の速さは深さ 50m、40m、20m の順となり、特に G_2 層と同じ深さの水温は 1 月 3 日の午前 0 時には稼働前の水温近くにまで回復する。1 月 3 日にも同じような挙動が繰り返し観察された。

これより、地下水流れによる杭内流体への供給熱フ

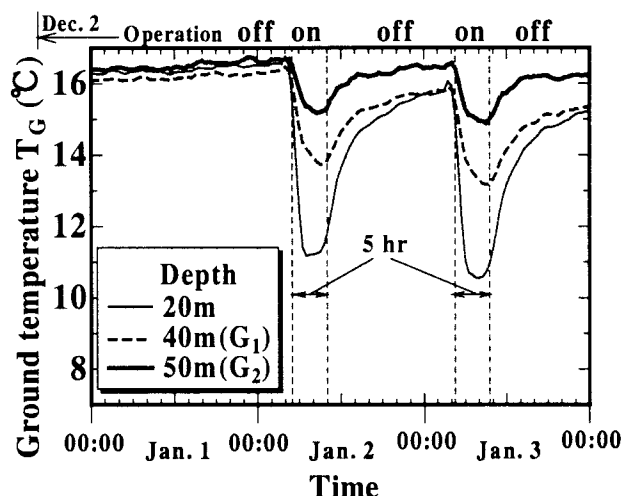


図-5 地盤温度の経時変化 (1998 年)

ラックスは、 G_1 層よりも G_2 層の方で大きいと言える。 G_1 層および G_2 層の初期温度（地下水温度）はほぼ同じであることから、この供給熱フラックスの差違は、主に地下水流速の違いによると推察される。

(3) 杭周辺地盤温度に及ぼす地下水流れの影響

図-5 は、図-4 と同期間における地盤温度の経時変化を示す。システム稼働後、舗装体循環の間に冷却された液体の杭流入に伴って地盤温度は急激に低下する。この傾向は 20m の深さで顕著であり、最大で 4.4°C 下がる。

G_1 層と G_2 層を比較すると、地盤温度低下は前者で最大 2.3°C 、後者で最大 1.3°C であり、 G_2 層の地盤温度は低下し難い。そのため 3. (2) で述べたように、システム停止期間における外管水温の上昇速度が G_2 層で大きいと思われる。地下水流れに対する杭周辺熱電対の向きは不明である。従って、上述の G_1 層と G_2 層における T_G の低下の違いは、地下水流れによる顕熱に加え、熱電対の設置向きにも起因する。

以上の結果を基に、ここでは帯水層の地盤温度を一定とみなす。

$$T_G = \text{const.} \quad (11)$$

ただし、杭最下部の地盤温度は、 G_3 層の影響を受けていないので、 G_3 層に対しては式 (11) の条件を適用しない。

4. 計算結果

(1) 計算結果と実験結果との比較

図-6 に 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かつ定常である。稼働後、水温は外管において上昇が

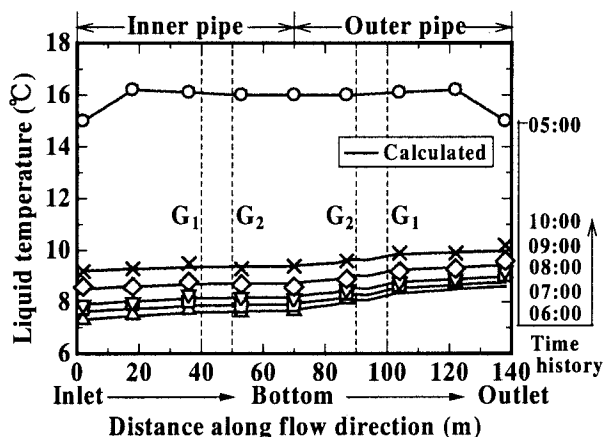


図-6 熱交換杭水温分布の経時変化
(1998年1月2日：システム稼動時)

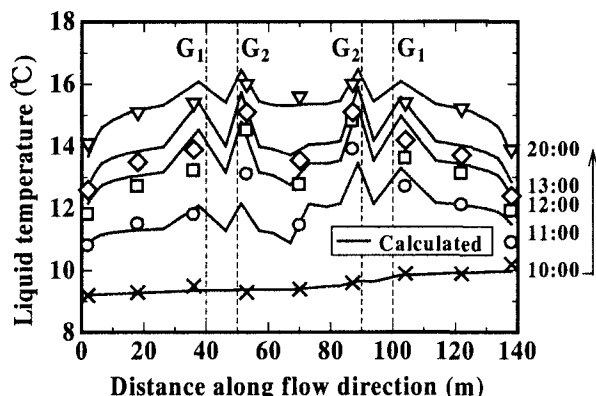


図-7 熱交換杭水温分布の経時変化
(1998年1月2日：システム停止時)

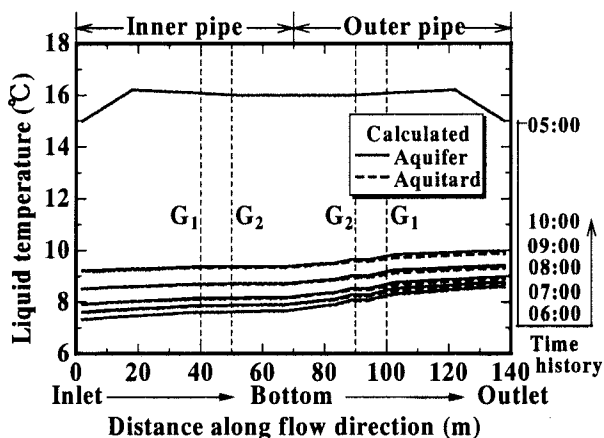


図-8 地下水流れの有無による杭内水温比較
(1998年1月2日：システム稼動時)

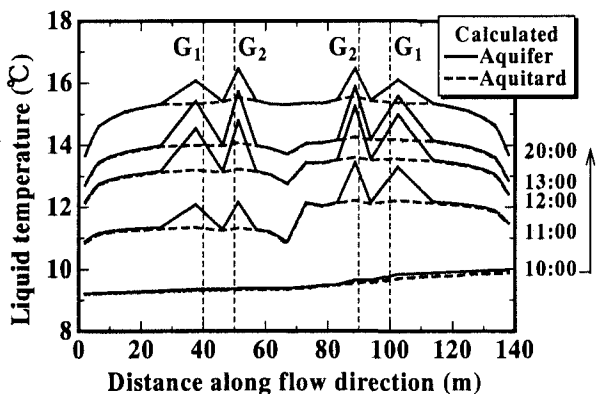


図-9 地下水流れの有無による杭内水温比較
(1998年1月2日：システム停止時)

顕著となり、見かけ上、杭上部における極端な熱のショートサーキットは観られない¹¹⁾。実線で示す計算値は実験結果を良好に再現する。

図-7は、システムが停止した10:00以降の10時間にわたる杭水温の上昇過程を示す。停止1時間後の11:00では、内管に比べ外管の水温回復は速いが、2時間後には内管と外管の水温はほぼ等しくなる。注目すべきは、システム停止直後から内管、外管ともに G_2 層付近の水温上昇が著しいことである。

計算結果(実線)は実測結果を概ね再現していると思われる。しかしながら、 G_1 層と同じ深さでの水温回復は過大に評価されており、地盤温度一定の仮定に限界があると思われる。

(2) 地下水流れによるBHESの熱エネルギー抽出特性

帯水層(G_1 層および G_2 層)を地下水流れのない地盤に置き替えて、計算を行った。その結果が図-8および図-9の破線である。まず図-8において、

帯水層を考慮した結果(実線)と破線とを比較すると、BHESが稼動し始めた直後の水温分布に大きな違いは現れないが、時間経過と共に外管において実線と破線の差は徐々に広がり、実線が相対的に高くなる。

両計算結果の違いは、システム停止時の水温回復を示す図-9で明確となる。地下水流れの影響を無視すると、破線のように帯水層での(特に、 G_2 層の)顕著な水温上昇を再現することは、もはや不可能である。

次に、1996年2月のアンサンブル平均された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の経時変化を計算した。その結果を図-10に示す。帯水層の有る場合(○)と無い場合(●)を比較すると、 G_1 層および G_2 層の存在によって、積算抽出熱エネルギーは1ヶ月間で44%増大する。帯水層の存在はBHESの長期利用に対して有利に作用する。

外管を横切る地中熱フラックス E_o の1日目および

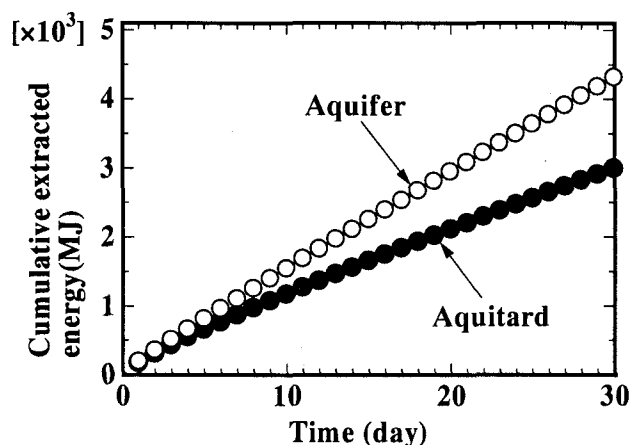


図-10 積算抽出熱エネルギーの経時変化

30 日目の午前 6 時における鉛直方向分布を 図-11 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 G_1 層で 1.39 倍、 G_2 層で 1.44 倍大きくなり、30 日目においてはそれぞれ 2.37 倍、2.50 倍となる。 G_1 層および G_2 層以外の場所で E_o に違いはないことから、帯水層での E_o の違いが 図-10 に示した積算抽出熱エネルギーの差を生んだものと言える。

5. おわりに

本研究では、帯水層を有する地盤中の BHES に関する 2 次元計算モデルを提案し、その有効性を実験結果との比較から検討するとともに、帯水層から熱交換掘削杭への熱供給の影響を評価した。

以下に、得られた結果を列挙する。

- (1) 沖積層中の BHES の特長として、地中熱抽出後の杭水温回復は帯水層で速く、地下水流れは地中熱エネルギーの抽出に対して有利に作用する。
- (2) 地表面下 40m および 50m に存在する帯水層を地下水流れのない地盤に置き換えた場合、1 ヶ月に亘る積算抽出熱エネルギーは約 30% 低下する。
- (3) 沖積層での BHES の計算では地下水流れによる顕熱は無視できず、今後は地下水流れと杭流体との熱的相互作用を考慮する必要がある。

参考文献

1) 例えば, Bo Nordell: Borehole Heat Storage Design Optimization the Smartstore Model, Proceedings of 6th International Conference on Thermal Energy Storage, CALORSTOCK '94, pp.245-254, Helsinki, 1994.

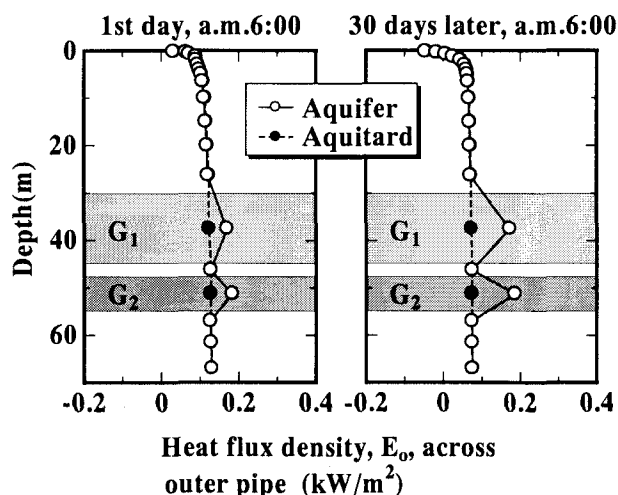


図-11 外管を横切る地中熱フラックスの鉛直分布

2) 例えば, Bjorn Sellberg: Challenge for Energy Storage in the 21st Century, Proceeding of 9th International Conference on Thermal Energy Storage MEGASTOCK'97, pp.7-12, Sapporo, 1997.

3) 大木政弘・渡邊 洋・福原輝幸・森山和馬: 掘削杭熱交換方式の採熱特性に関する理論的考察, 土木学会第 52 回年次学術講演会概要集, VII-37, pp.74-75, 1997.

4) 谷本 智・福原輝幸・渡邊 洋・森山和馬: 掘削杭熱交換システムの採熱に及ぼす帯水層の影響, 第 54 回年次学術講演会, VII-124, 1999.

5) 盛田耕二: 大地と太陽を熱源とするガイア融雪システムの概要, 平成 8 年度積雪対策研究発表会資料集, pp.25-28, 1996.

6) 福原輝幸・渡邊 洋・脇 敬一・阪本信弘・石野圭史郎: 八井谷チェーン着脱場「道の駅ハチ北」における融雪システムの稼動状況-1998 年冬季-, 第 54 回年次学術講演会, VII-123, 1999.

7) 渡邊 洋・清水 亨・宮風 均・福原輝幸: 掘削杭熱交換システムによる国道 8 号線中川峠の無散水融雪-第 2 報-, 第 54 回年次学術講演会, V-171, 1999.

8) 上村靖司・小松崎通雄・梅村晃由・戸井田隆行: 融雪地中熱交換井の性能評価, 日本雪氷学会全国大会講演予稿集, pp.80, 1998.

9) 竹内正紀・宮本重信・木村照夫・坪田諭治: 基礎くい利用地熱融雪法の開発と数値シミュレーション, 空気調和・衛生工学会論文集, No.52, pp.59-69, 1993.

10) 日本機械工学会: 電熱工学資料第 2 版, 日本機械工学会, 1980.

11) 福原輝幸・森山和馬・大木政弘・渡邊 洋: 掘削杭熱交換システムと高熱伝導舗装体による路面融雪, 第 13 回寒地技術シンポジウム, pp.101-106, 1997.

(1999. 9. 30 受付)