

# 掘削杭熱交換システムの採・放熱性能に及ぼす 地下水流れの影響

福原輝幸<sup>1</sup>・谷本 智<sup>2</sup>・長尾 泰<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 福井大学教授 工学部建築建設工学科 (〒910-8507 福井市文京 3-9-1)  
teruyuki@anc.anc-d.fukui-u.ac.jp

<sup>2</sup> 広成建設株式会社福岡支店 (〒802-0002 福岡県北九州市小倉北区京町 4 丁目 7 番)

<sup>3</sup> 学生会員 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)

地下水流れと熱交換掘削杭の熱的相互作用を考慮した 3 次元 BHES (Bore-hole Heat Exchange System) モデルの妥当性を検証するために、地下水データを基に被圧帯水層杭周辺の地下水流れを解析し、その顕熱効果を考慮して熱交換杭内の水温分布を計算した結果、3 次元モデルは採熱過程およびその後の水温回復過程とも、実測結果を良好に再現することができた。また、夏期の熱交換杭から帯水層への放熱に伴って発生する温域、および冬期の帯水層からの採熱に伴って発生する冷域の発達・消滅をシミュレーションによって評価するとともに、BHES の採・放熱性能に及ぼす地下水流速の影響を明らかにした。

**Key Words :** BHES, heat transfer, ground heat energy storage, ground water flow

## 1. はじめに

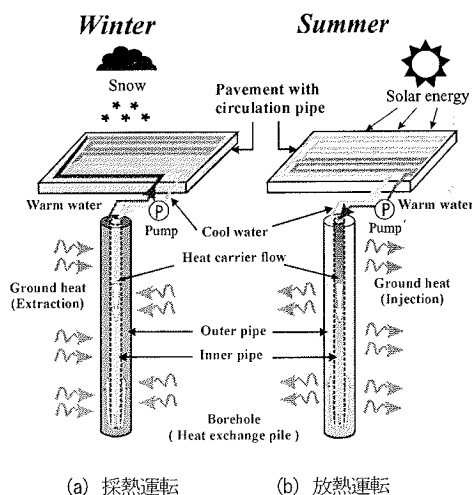
著者らの対象とする地中熱は地表面下 100m 程度までの地盤の熱を意味する。地中熱はエネルギーとしての賦存量が高く、気象条件に依存しない安定した熱源である。15°C前後の範囲にある地中熱は夏期には冷熱源として、冬期には温熱源として、主に路面や屋根面の融雪および冷却に活用されている<sup>1)~5)</sup>。地中熱の採集方法の一つに掘削杭熱交換システム (Bore-hole Heat Exchange System, BHES) がある。熱交換杭 (以下、杭と称す) は直径 56mm の内管と直径 110mm の外管から成る同軸 2 重管であり、一般的に長さは 100m 前後である。

冬期には図-1 (a) のように、外管から出た暖かい流体は、無散水舗装体中に埋設された熱交換パイプを循環する間に放熱して温度を下げ、内管に戻る。その後、内管を下降して外管を上昇する間に、地中熱を収集 (採熱) し、昇温する。こうして暖められた流体は再び無散水舗装体へ向かう。これを採熱運転と称する。一方夏期には同図 (b) のように、外管から出た流体は太陽熱で暖められた無散水舗装体を循環する間に昇温するが、杭に戻り内管から外管を流動する間に地盤へ放熱して温度を下げる。こうして冷やされた流体は再び無散水舗装体へ向かう。こ

れを放熱運転と称する。

BHES は欧米では空調の熱源として利用され、多くの実績をもつが、その大部分は掘削費が安価な点から、岩盤中で施工されている<sup>6)7)</sup>。

我国においては 1993 年より BHES が施工されている



(a) 採熱運転 (b) 放熱運転

図-1 BHES の季節的な熱輸送概念図

が<sup>8)~12)</sup>、帯水層を横切る BHES の温度データが蓄積できているのは、筆者らの知る限り福井大学の事例だけと思われる。従って世界的に観て、帯水層を有する地盤での BHES の施工事例、および BHES の性能に及ぼす地下水流れの熱的影響に着目した研究は、殆どなされていないと考えられる。

地下水流れの熱的影響を無視することができない理由は2つある。1つは地下水流れによって運ばれる熱、すなわち顕熱によって杭の採・放熱能力が変化するならば、それに応じた熱利用設備の設計が経済性の面で必要になるからである。もう1つは杭内流体水温と地下水温度の差から懸念される帯水層の熱汚染である。この点を明らかにするためには杭周辺の地下水温度分布を測定する必要があるが、これは現実的には難しい。従って、信頼ある理論モデルによる伝熱解析が、問題解決への有効な手段の1つと考えられる。Claesson と Hellström<sup>13)</sup>は単一地盤を対象として、地下水からの供給熱を杭に沿って線熱源として与え、地下水流れによる採熱量の増加を解析的に導いた。谷本ら<sup>11)・12)</sup>は、帯水層を横切るような3次元 BHES モデルを構築し、採熱量が地下水流れにより増大することを示したが、このモデルでは、帯水層の地盤温度を一定としていた。このように、地下水流れと杭との熱的相互作用を考慮した BHES の熱解析は、国内外を問わず今までにない。

そこで本研究は、福井市の地下水データ<sup>14)・15)</sup>より、被圧帯水層杭周辺の地下水流れを解析し、その顕熱効果を考慮して計算された杭内水温と実測水温との比較を行い、モデルの妥当性を検証する。さらにシミュレーションによって杭からの放熱に伴って発生する帯水層中の温域、および採熱に伴って発生する冷域の挙動を評価するとともに、地下水流速と BHES の採・放熱性能との関係を明らかにする。

## 2. 理論モデル

福井大学構内の帯水層を横切る BHES の熱移動の概念図および熱交換杭の計算モデル要素を図-2 に示す。後の2.(5)で詳述するが、熱交換杭は2つの帯水層( $G_1$ 層、 $G_2$ 層)を横切る。解析は3次元直交座標系で行われ、図中の  $x$  軸は地下水の主流方向を、 $y$  軸は鉛直方向を、 $z$  軸は主流横断方向をそれぞれ表す。

### (1) 帯水層中の水分移動

BHES の熱的影響を受けた地下水温度変化の広がりや、水平方向に卓越した地下水流れのために鉛直面よりも水平面内において問題になりやすい。理想的には帯水層中の熱対流を考慮した3次元熱・水分移動解析が望ましい

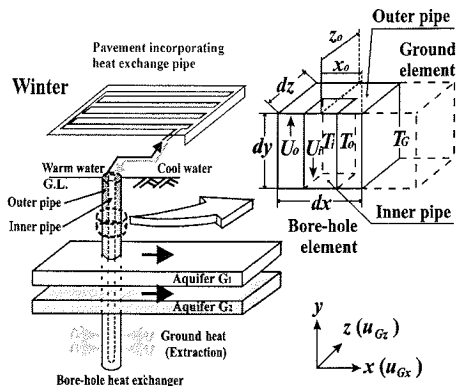


図-2 熱交換杭の計算モデル要素

が、正確な帯水層の物理定数や地盤構造の資料が乏しい状況では、その解の有効性は評価し難い。加えて数十年から数ヶ月の長期環境アセスメントを実施しようとするとき、3次元乱流解析は計算時間がかかり過ぎて現実的ではない。

以上より、熱対流の影響を無視した水平2次元流れを仮定すれば、連続方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial u_{Gx}}{\partial x} + \frac{\partial u_{Gz}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

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。

### (2) 熱輸送理論

#### a) 杭内流体

杭内水温は  $x$  および  $z$  方向に一様であり、自然対流の影響を無視すると、内管および外管流体の熱エネルギー保存則は以下ようになる。

#### 内管流体

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} - (\rho c)_w U_i \frac{\partial T_i}{\partial y} + \alpha_i (T_o - T_i) \eta_{io} \quad (2)$$

#### 外管流体

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_o}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_o}{\partial y^2} - (\rho c)_w U_o \frac{\partial T_o}{\partial y} - \alpha_i (T_o - T_i) \eta_{oi} + a_i \left( \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial x} \Big|_{x=x_0} + \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial z} \Big|_{z=z_0} \right) \eta_{os} \quad (3)$$

式(2)および式(3)の右辺第1項は熱伝導、第2項は杭内流体移動による顕熱、第3項は内管と外管との間の熱移動をそれぞれ表す。式(3)の右辺第4項および第5項は

外管と地盤との間の熱移動であり、杭接触地盤要素のみに付加される。ここに、 $(\rho c)_w$ : 杭内流体の体積熱容量、 $\lambda_w$ : 杭内流体の熱伝導率、 $\lambda_G$ : 地盤の熱伝導率、 $\alpha_i$ : 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、 $\eta_w$ : 内管微小要素体積に対する外管接触面積の比、 $\eta_{oi}$ : 外管微小要素体積に対する内管接触面積の比、 $\eta_{os}$ : 外管微小要素体積に対する接触地盤面積の比、 $x_o$ : 座標中心(内管中央)から外管壁までの  $x$  方向距離、 $z_o$ : 座標中心から外管壁までの  $z$  方向距離、 $a_i$ : 杭隣接地盤における温度勾配補正係数である。

なお、式中のパラメータ  $\alpha_i$  は外管のレイノルズ数によって規定される<sup>12)</sup>。また、 $a_i$  は主に地盤と杭の接触に依存する値と考えられ、1.5<sup>12)</sup>とする。

### b) 地盤

上述したように帯水層中の熱対流を無視し、地下水温度は水平2次元方向にのみ勾配をもつと仮定すれば、地盤中の3次元熱移動方程式は、以下のように表される。

$$\begin{aligned}
 (\rho c)_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial z} \right) \\
 & - a_i \left( \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial x} \Big|_{x=x_o} + \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial z} \Big|_{z=z_o} \right) \eta_{so} \\
 & - (\rho c)_w u_{Gx} \frac{\partial T_G}{\partial x} - (\rho c)_w u_{Gz} \frac{\partial T_G}{\partial z} \quad (4)
 \end{aligned}$$

ここに、 $\eta_{so}$ : 杭接触地盤要素体積に対する外管接触面積の比である。地盤中の熱移動は基本的に右边第1項から第3項までの熱伝導、および右边第4項および第5項の外管と地盤との間の熱移動で支配される。これらに加えて帯水層では、右边第6項および第7項に示される地下水流れの顕熱が付加される。

### (3) 初期条件

初期地盤温度は鉛直方向のみに変化し、水平方向の温度変化が無視できるような時期を選ぶ必要がある。そこで、福井大学内の BHES が3ヶ月稼動しなかった1998年1月2日午前5時(この直後 BHES は稼動)のデータを採用する。深さ70mまでの地盤温度は実測値(図-4参照)が与えられ、それ以深では70mまでの地盤温度分布を基に100mで3℃上昇するような線形外挿値が与えられる。このとき、 $x$  および  $z$  方向に地盤温度は一様とみなし、初期地盤温度が与えられる。

### (4) 境界条件

#### a) 杭入口水温と循環流量

計算期間中の杭入口水温は30分毎の実測値より与えられ、任意時刻の杭入口水温は実測値間の線形内挿値と

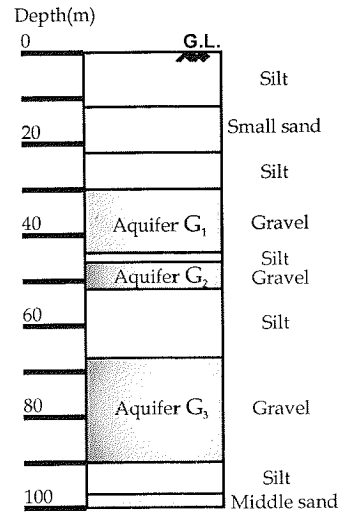


図-3 地盤柱状図

する。循環流量は40ℓ/minである。

#### b) 地表面

地表面温度は、BHESと連結する無散水舗装路面下0.05mに埋められた熱電対の実測値から与えられる。サンプリング間隔は30分である。

#### c) 解析領域底面および側面

地表面下100mの解析領域底面では、地盤温度一定とする。また、座標中心より30m離れた解析領域側面を横切る熱移動はないとする。

### (5) 地盤構成および帯水層の特性

地盤構成は地表から下方100mまでの地盤柱状図を参考にして決定され、地盤は図-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、 $G_2$ 層および $G_3$ 層)、いずれも砂礫である。長さ70mの杭を横切る帯水層は、 $G_1$ 層および $G_2$ 層である。地盤柱状図より推定される帯水層厚は、 $G_1$ 層が14m、 $G_2$ 層が6mおよび $G_3$ 層が23mである。各土壌の熱物性値は文献16)を参考にして与えられる。また、各帯水層の透水係数および動水勾配に関するデータは乏しく、情報は限られたものであり、ここでは福井市の地下水データ<sup>14), 15)</sup>を参考にして、両者の値を決定する。

透水係数  $k$  にはばらつきがあり、 $k=1.5 \times 10^{-4} \text{ m/sec} \sim 3.6 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$  の範囲にあるものの、 $10^{-3} \text{ m/sec}$  のオーダーが大部分を占める。地層構造が $G_1$ 層と $G_2$ 層で同じであることより、 $G_1$ 層の透水係数と $G_2$ 層のそれはほぼ等しいとみなす。

次に、動水勾配の検討を行った。 $G_2$ 層にのみストレーナを持つ井戸は2本しかなかったので、この井戸の自然水位差を井戸間の距離で除した値を代表的な $G_2$ 層の動

水勾配と仮定した。その値は $1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$ の範囲にある。

一方、 $G_1$ 層にのみストレーナを持つ井戸はなかったのが、 $G_1$ 層と $G_2$ 層が一体となっている箇所があることから、 $G_1$ 層の動水勾配は $G_2$ 層のそれに近い値と思われる。

よって、上記の透水係数と動水勾配の積より、地下水主流速 $u_{G20}$ は $5 \times 10^{-4} \text{ m/h} \sim 3 \times 10^{-2} \text{ m/h}$  ( $10^{-2} \text{ m/h}$  のオーダの頻度が高い) の範囲にあると推測される。

なお、計算メッシュおよび時間間隔は参考文献12)を参照されたい。

### 3. 理論モデルの評価

たとえ理論モデルに従って実際の杭内水温分布が再現できたとしても、計算に用いた地下水主流速 $u_{G20}$ が2.(5)において推定した値( $5 \times 10^{-4} \text{ m/h} \sim 3 \times 10^{-2} \text{ m/h}$ )の範囲から大きく逸脱する場合は、モデルあるいはパラメータが適切でないことになる。そこで想定される $u_{G20}$ を用いてモデルの妥当性を調べた。

図-4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り、推定された $u_{G20}$ のデータ中で頻度の高い $10^{-2} \text{ m/h}$ のオーダを考慮して、 $G_1$ 層で $u_{G20}=0.01 \text{ m/h}$ 、 $G_2$ 層で $u_{G20}=0.02 \text{ m/h}$ が与えられる。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(5:00)における水温分布は、横軸中央の70m(杭底)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。6:00~10:00までの採熱運転中の水温上昇は、内管よりも外管で著しい。

図-5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回復過程を示す。停止2時間後の12:00では、内管に比べて外管の水温上昇は早く、この特性は特に $G_2$ 層の位置で顕著である。しかしながら、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。

実線で示す計算結果は、採熱過程ではどの時間帯でも実測値を良好に再現する。一方、水温回復過程では初期に $G_2$ 層での昇温が小さい以外は、計算値は杭内水温分布を良好に再現する。破線は参考のために示した $u_{G20}=0$ における結果である。また他の時期に対しても、上記と同じ $u_{G20}$ を用いた杭内水温の計算結果は良好であった。

### 4. 熱交換杭と地下水流れの熱的相互作用に関するシミュレーション条件

ここでは、夏期(6月~9月)の杭から地盤への放熱(放熱運転)と、冬期(12月~3月)の地中熱採集(採熱運転)に関するシミュレーションの諸条件を説明する。

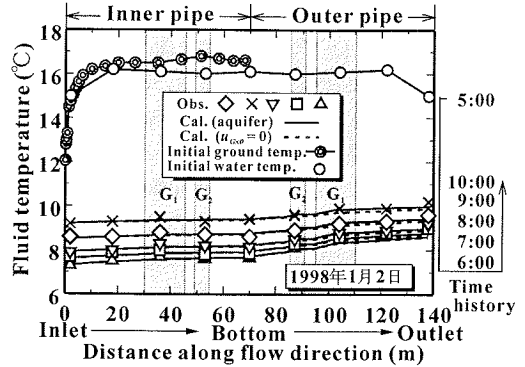


図-4 採熱時の杭内水温分布

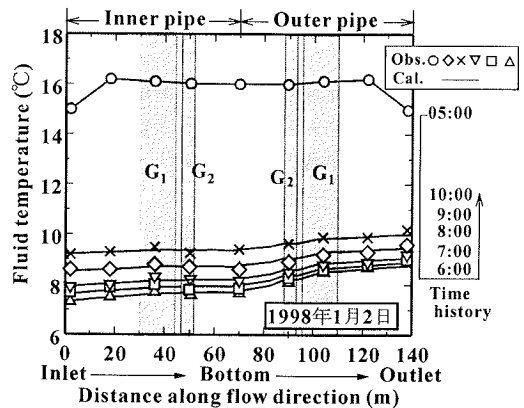


図-5 水温回復過程の杭内水温分布

#### (1) 計算条件

2.(3)と同じようにBHESが3ヶ月間稼働しなかった1998年1月2日午前5時のデータを初期地盤温度として与える。

#### (2) 境界条件

##### a) 杭入口水温

杭入口水温は、福井大学構内BHESの実測データより得られる日変化を1ヶ月にわたり重ね合わせ、それを平均した日変化(アンサンブル平均日変化)が月毎に与えられる(図-6を参照)。

##### b) 地表面

無散水舗装路面下0.05mに埋められた熱電対の実測値より、アンサンブル平均日変化が月毎に与えられる<sup>12)</sup>。

##### c) 解析領域底面および側面

解析領域底面および側面の境界条件は、2.(4)c)と同じである。

#### (3) 運転条件およびその他の条件

運転の内容と稼働期間を示したものが表-1である。1月2日から5月31日まではBHESを稼働させず、6月1

日から翌年5月31日までの1年間に亘り、地下水温度が計算される。その間で、BHESは6月1日から9月30日までは放熱運転、12月1日から3月31日までは採熱運転し、その他の月は移動しないものとする。6月を計算開始時期に選んだ理由は次のとおりである。杭内水温と地盤温度との差は冬期よりも夏期の方で大きく、夏期の温域は冬期の冷域に比べて残存期間が長くなる。従って6月から計算を始めれば、寿命の長い温域については1年間の追跡が可能になる。以下帯水層においては、初期温度(16.5°C)よりも0.5°C温度の高い領域(17°C以上)を温域、0.5°C低い領域(16°C以下)を冷域と便宜上定義する。

なお、BHESは福井大学に準じて、杭長は70m、循環流量は40ℓ/min、内管直径は56mm、外管直径は110mmとする。ただし本シミュレーションでは帯水層は1つとし、地表より30m下に帯水層上縁が位置し、厚さは10mとする。また、地下水主流速  $u_{Gx0}$  は0.005m/h、0.01m/h および0.05m/hを用いる。

## 5. シミュレーション結果および考察

以下では、放熱運転と採熱運転に伴う地下水温度分布の季節変化、および採・放熱性能に及ぼす地下水流速の影響を明らかにする。

### (1) BHESの稼動に伴う杭内水温分布変化

図-7 (a) および(b)は、夏期放熱運転および冬期採熱運転に伴う杭内水温の管軸(y)方向変化である。両図とも地下水主流速  $u_{Gx0}$  を0.005m/h、0.01m/h および0.05m/hと変化させ、夏期は8月15日12時、冬期は1月15日0時における結果である。2つの時刻は、ともに1日の内で杭入口から杭出口までの間の水温変化が大きい時間帯に属する。

最初に放熱運転に伴う水温低下(図-7(a))に注目する。杭に流入した温度の高い流体は、内管を下降する間よりも外管を上昇する間で温度低下が明瞭となる。さらに地下水流れが存在し、流速が速くなると、帯水層を横切る外管の位置で水温低下が特に顕著となり、これが杭出口水温の低下に貢献する。その際、外管水温の低下に付随して、内管水温も若干低下する。

次に、採熱運転に伴う水温上昇(図-7(b))について説明する。図-4と同様に、内管よりも外管で水温は上昇し易い。特に地下水流速が速くなるにつれて、帯水層を横切る外管の位置で水温上昇が顕著となり、これが杭出口水温の上昇に寄与する。

以上、地下水流速が増すにつれて杭と地下水との間の熱交換は促進され、これがBHESの採・放熱量増大

表-1 BHESの運転条件

期間 (月日)	1/2 ~ 5/31	6/1 ~ 9/30	10/1 ~ 1/31	12/1 ~ 3/31	4/1 ~ 5/31
運転 条件	無 稼動	放熱 運転	無 稼動	採熱 運転	無 稼動

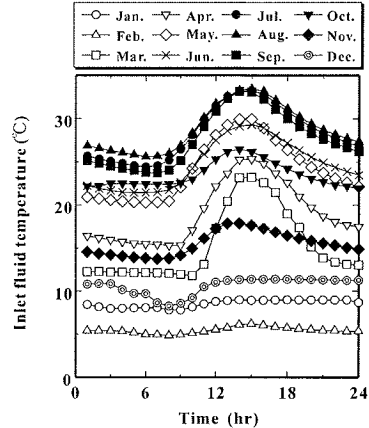
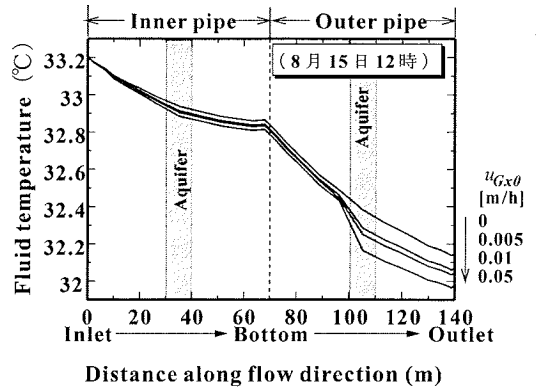
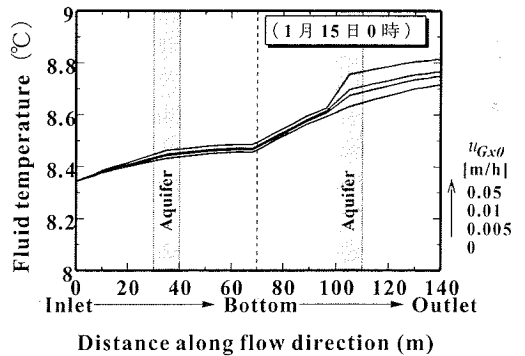


図-6 杭入口水温の月別日変化



(a) 夏期放熱運転



(b) 冬期採熱運転

図-7 杭内水温分布

に寄与することが分かる。

なお、ここには示さないが、図-5 から推察できるように移動停止後の水温回復は、地下水流れが速いほど迅速になることを付記しておく。

## (2) 地下水等温分布

図-8(a), (b) および(c) は、地下水主流速  $u_{GSD}=0.005\text{m/h}$ ,  $0.01\text{m/h}$  および  $0.05\text{m/h}$  に対する地下水等温線を6月20日(放熱運転初期), 9月20日(放熱運転後期), 10月20日(無稼働初期), 11月20日(無稼働後期), 12月20日(採熱運転初期) および翌年の2月20日(採熱運転中期) についてそれぞれ示す。なお、時刻はいずれの月も12:00である。

まず、図-8(a)の  $u_{GSD}=0.005\text{m/h}$  の結果について説明する。6月の杭近傍では、杭からの放熱に伴い地下水温度は、 $22.8^\circ\text{C}$ まで上昇する。温域の広がりには杭上流では0.7m, 杭下流では4.9m, 横断方向では最大1.3mである。9月の杭近傍では、地下水温度は  $23.4^\circ\text{C}$ に上昇する。温域は杭上流では0.8mであり殆ど広がりを見せないが、杭下流では19.2m, 横断方向では最大2.5mとなり拡大する。その後システムが停止した10月および11月の地下水温度は、杭近傍で急激に低下し、温域は流下するとともに、主流方向および横断方向に縮小する。特にこの縮小傾向は主流方向で顕著である。11月では温域は杭下流の10.6mから26.5mの範囲に移動する。冬期の採熱運転が開始された12月において、杭近傍地下水温度は  $12.8^\circ\text{C}$ となる。冷域の広がりには杭上流では0.5m, 杭下流では3.1m, 横断方向には最大0.9mである。2月になると杭近傍地下水温度は  $11.7^\circ\text{C}$ に下がる。冷域の範囲は杭上流では0.7m, 杭下流では10.5m, 横断方向では最大1.7mとなり、12月よりも拡大する。5月になると杭近傍では、採熱の影響が消えて、冷域は消滅する。

次に、福井大学下帯水層の地下水流速に最も近いと予想される  $u_{GSD}=0.01\text{m/h}$  の結果に注目する(図-8(b)を参照)。6月の杭近傍地下水温度は  $22.2^\circ\text{C}$ であり、同時期の  $u_{GSD}=0.005\text{m/h}$  のそれよりも  $0.6^\circ\text{C}$ 低下する。温域は杭上流では0.4m, 杭下流では7.5m, 横断方向では最大1.1mに広がる。9月の温域は先端が杭上流0.4mで変化しないが、後端は杭下流29.5m, 横断方向は最大1.7mとなる。これを同時期の  $u_{GSD}=0.005\text{m/h}$  の温域と比較すると、主流方向には拡大、横断方向には縮小して細長くなる。その後10月の温域は、当然ながら  $0.005\text{m/h}$  のそれよりも下流へ移動する。11月で温域が消滅するのは、地下水流れによる上流からの冷熱の供給(顕熱)に起因する。12月において、杭近傍地下水温度は  $13.2^\circ\text{C}$ であり、 $u_{GSD}=0.005\text{m/h}$  のそれよりも  $0.4^\circ\text{C}$ 上昇する。冷域は杭上流では0.4m, 杭下流では4.2m, 横断方向では最大0.7mの範囲にある。2月の冷域は杭上流では0.4mと変わらないが、杭下流で

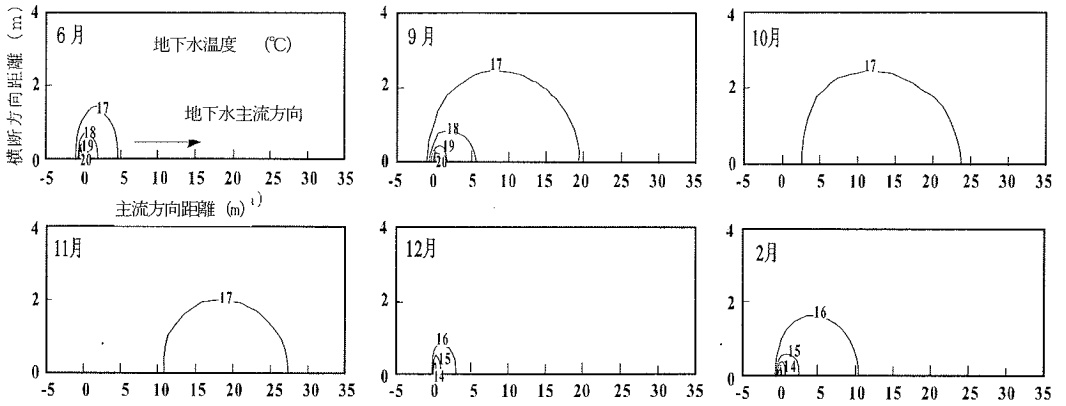
は15.0m, 横断方向では最大1.2mとなる。この時点の冷域も  $u_{GSD}=0.005\text{m/h}$  のそれと比較すれば主流方向には長く、横断方向には短くなる。なお冷域は、採熱運転停止後20日経過した4月20日の時点で消滅する。

最後に、 $u_{GSD}=0.05\text{m/h}$  の地下水温度分布について述べる(図-8(c)を参照)。この程度に地下水流速が速くなると温域および冷域の広がりには、杭上流では0.2mの範囲に限られるようになり、杭下流および横断方向にのみ注目すればよいと考えられる。6月の杭近傍地下水温度は  $20.0^\circ\text{C}$ となり、同時期の  $u_{GSD}=0.01\text{m/h}$  のそれよりもさらに  $2.2^\circ\text{C}$ 低下する。温域は杭下流では11.4m, 横断方向では最大0.4mの範囲となる。9月の温域は杭から18.6m下流に達し、横断方向は最大0.5mとなり、 $u_{GSD}=0.01\text{m/h}$  のそれと比べて主流方向では10.9m, 横断方向では1.2mそれぞれ縮小する。また、地下水流速が速くなると杭付近で等温線が密集するようになる。10月20日の時点で温域は既に消滅し、 $u_{GSD}=0.01\text{m/h}$  に比べて温域の寿命は短くなることより、地下水の顕熱の影響がより顕著となる。12月における杭近傍地下水温度は  $14.8^\circ\text{C}$ となり、 $u_{GSD}=0.01\text{m/h}$  のそれよりも  $1.6^\circ\text{C}$ 高くなる。冷域の広がりには、杭下流では4.2m, 横断方向では最大0.3mに達する。2月になると冷域の広がりには杭下流では8.1m, 横断方向には最大0.3mとなり、 $u_{GSD}=0.01\text{m/h}$  のそれと比較すると、横断方向では1/4, 主流方向では1/2にそれぞれ縮小する。その後、冷域は採熱運転停止後20日経過した時点で既に消滅する。以上より、地下水流速が速くなるに従って温域および冷域は横断方向には縮小されるが、主流方向には必ずしも単調的に引き伸ばされることはなく、縮小する可能性もある。また、採・放熱運転が地下水流れに及ぼす熱的影響は、本シミュレーションの条件下では、採熱および放熱運転終了後2ヶ月以内で消滅する。

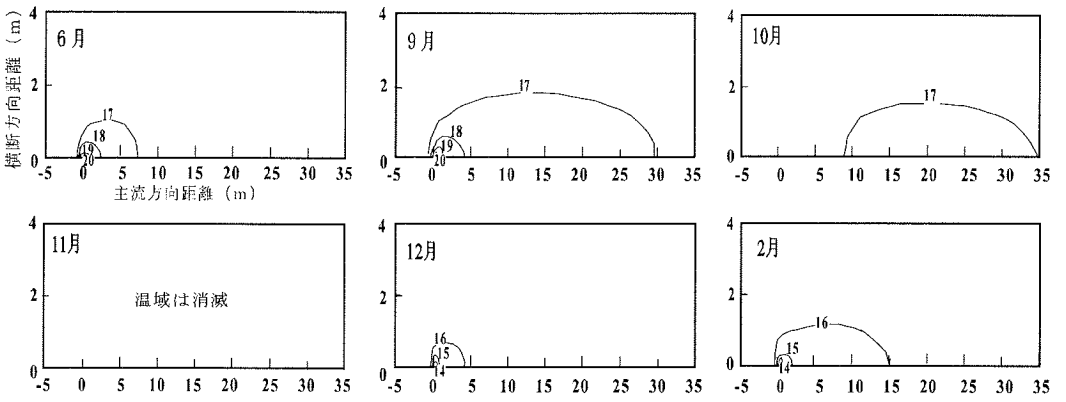
## (3) 採・放熱量と地下水流速

### a) 積算採・放熱量に及ぼす地下水流速の影響

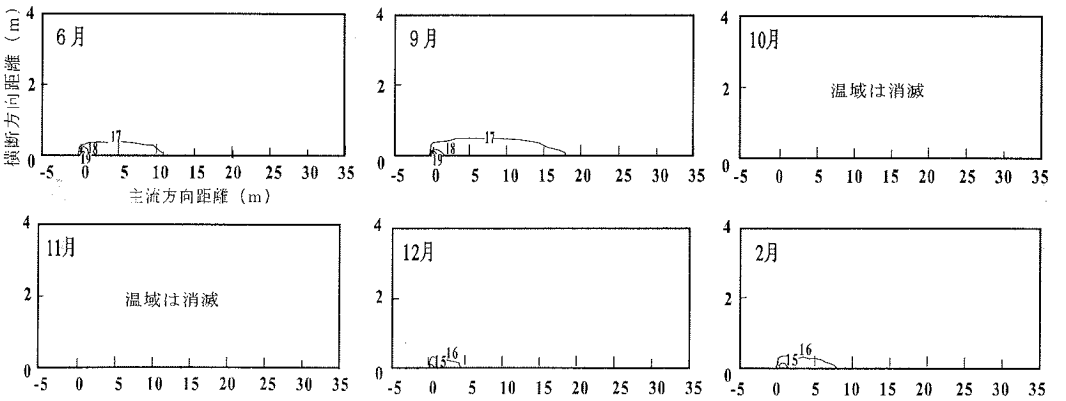
採・放熱量に及ぼす地下水流れの影響を評価したものが図-9である。縦軸は、帯水層があるときの積算採・放熱量  $E_c$  および  $E_r$  を、帯水層がないとき(岩盤)での積算採・放熱量  $E_{c0}$  および  $E_{r0}$  で無次元化した値(採熱比  $E_c/E_{c0}$  および放熱比  $E_r/E_{r0}$ )であり、横軸は無次元地下水流速 ( $u_{GSD}/k$ )、すなわち動水勾配を選ぶ。●が放熱、▲が採熱を表す。採・放熱比とも、地下水流速が増すにつれて増大するが、その増加率は次第に小さくなる。福井大学の地下水流速に近いと予想される  $u_{GSD}=0.01\text{m/h}$  の場合、放熱量は地下水流れがない場合に比べて20%、採熱量は19%それぞれ増大する。ここで、流速が増すにつれてBHESの採・放熱性能が向上する理由について、もう少し考察を加える。杭周辺に形成される温域は放熱運転の性能を、また冷域は採熱運転の性能を低下させる。従って



(a)  $U_{Gx0} = 0.005 \text{ m/h}$



(b)  $U_{Gx0} = 0.01 \text{ m/h}$



(c)  $U_{Gx0} = 0.05 \text{ m/h}$

図-8 異なる地下水主流速に対する地下水等温線図 (縦、横軸ともに0が杭の位置)

5. (2) で述べたように、地下水流速の増加に伴って採・放熱運転中の杭近傍地下水温度の下降・上昇が抑制され、杭上流の冷域・温域が縮小すること、採・放熱量が増大することの間には強い相関がある。そこで杭上流の冷域・温域の広がりや杭近傍地下水温度を規定するパラメータとしてペクレ数  $Pe$  を選び、 $E_e/E_{e0}$  および  $E_i/E_{i0}$  と  $Pe$  の関係を図-9 に併記する。 $Pe$  は杭直上流の要素における顕熱フラックスと熱伝導フラックスの比である。同図より  $Pe$  の増大に伴う採・放熱性能の向上は、 $Pe \leq 5$  で著しいことが分かる。

### b) 月別採・放熱量に及ぼす地下水流速の影響

連続的な採・放熱運転による採・放熱性能の時間的減衰が、地下水流れによって如何に抑制されるかを評価する目的で、月別採・放熱量と地下水流速の関係を調べた。その結果を図-10 に示す。まず6月から9月までの放熱期間に注目する。各月とも放熱量は地下水流速が速くなるにつれ増大する。月別で見ると、放熱量は6月、7月、8月の順に増大し、9月に減少する。この放熱量の経月変化は、図-6 で示したように杭入口水温が6月、7月、8月の順に上昇し、9月に下降することと一致する。

次に、12月から3月までの採熱期間に注目する。採熱量は1月、2月、12月、3月の順に小さくなる。また各月とも  $u_{Gx0}$  が大きいほど採熱量は増大する。杭入口水温は2月、1月、12月、3月の順に低くなるので(図-6 を参照)、採熱量は2月で最大となることが当初予想されたが、それ以前(12月から1月にかけて)の採熱運転によって杭周辺の地盤および地下水が冷やされるために、2月の採熱量が1月の採熱量よりも小さくなったと推察される。

## 6. おわりに

本研究によって、地下水流れと熱交換掘削杭の熱的相互作用を考慮した3次元 BHES モデルの妥当性を検証した。さらに夏期放熱運転と冬期採熱運転によって杭から季節的に発生する温域および冷域の発達・消滅を検討し、地下水流速が BHES の採・放熱性能に及ぼす影響を明らかにした。

本研究を通して以下の結論を得た。

- (1) 地下水データを基に被圧帯水層杭周辺の地下水流れを解析し、その顕熱効果を考慮して杭内水温分布を計算した結果、3次元 BHES モデルは採熱過程およびその後の水温回復過程とも、実測結果を良好に再現できることが分かった。
- (2) 杭近傍地下水温度は地下水流速が速くなるにつれて、放熱運転に伴う上昇、採熱運転に伴う下降が抑制される。その結果、冬期では帯水層での杭内水温上昇が、夏期では帯水層での杭内水温低下が顕著となり、こ

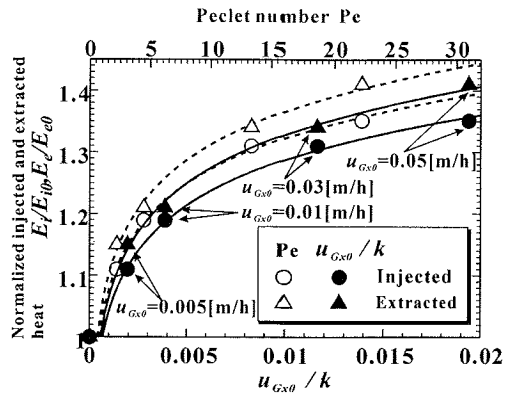


図-9 採・放熱比と無次元地下水流速比およびペクレ数の関係

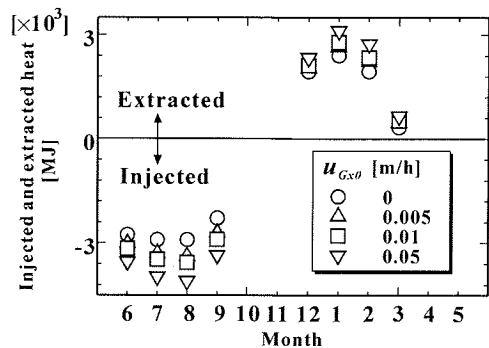


図-10 月別採・放熱量と地下水流速との関係

- れが BHES の採熱および放熱性能向上に貢献する。
- (3) 地下水流速が速くなるにつれて温域および冷域の横断方向の広がりや縮小する。一方、主流方向の広がりや縮小は地下水流速が速くなるに従って拡大するもの、同時に地下水流れの顕熱の影響を受けて拡大は止まり、やがて縮小することになる。また、移動停止後の温域・冷域の寿命も短くなる。
  - (4) 杭 1 本から季節的に発生する温域および冷域は、BHES の移動停止後2ヶ月以内に消滅することから、長年に亘る BHES の季節移動に起因する恒常的な地下水温度の上昇・下降は発生しない。
  - (5) 地下水流れは、BHES 移動停止中の杭内水温回復を促進させる。
  - (6) 帯水層を横切って杭が挿入される場合、地下水流速や帯水層厚さなどの条件によっては、採・放熱性能の増大に伴って掘削費(掘削長)の削減が期待できる。

最後に、本研究を進めるに際して、(株)ミサワ環境技術に多大な協力を得た。記して謝意を表します。



## 参考文献

- 1) 森山和馬, 林拓男, 福原輝幸, 渡邊 洋: 掘削杭熱交換方式による地中熱エネルギー利用と路面融雪システム, 土木学会第 50 回年次学術講演会概要集, CS-70, pp. 140-141, 1995.
- 2) 大木政弘, 渡邊 洋, 福原輝幸, 森山和馬: 掘削杭熱交換方式による地盤蓄熱と路面温度制御, 水工学論文集, 第 41 巻, pp. 587-592, 1997.
- 3) 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講演論文集, pp. 101-106, 1997.
- 4) 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.
- 5) 谷本 智, 福原輝幸, 森山和馬: 掘削杭熱交換システムの採熱に及ぼす地下水流れの影響, 第 16 回日本雪工学会大会論文報告集, pp. 89-90, 1999.
- 6) Bjom, S.: Challenge for Energy Storage in the 21<sup>st</sup> Century, Proceeding of 9th International Conference on Thermal Energy Storage, MEGASTOCK'97, pp. 7-12, Sapporo, 1997.
- 7) Gunnel, N., Anna, G., Göran, H., Bengt, R. and Jan, S.: Ground Source Heat Pump Systems for the Conservation of Electrical Heat, Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference on Thermal Energy Storage, pp. 233-237, Stuttgart, Germany, 2000.
- 8) 森山和馬, 林拓男: 低温地熱を利用した無散水融雪システムについて, 全地連「技術フォーラム'94」講演集社, pp. 381-384, 1994.
- 9) Seiji, K.: Snow Engineering Recent Advances and Developments, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Snow Engineering, pp. 409-416, Trondheim, Norway, 2000.
- 10) 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—第二報—, 土木学会第 54 回年次学術講演会梗概集, V-171, 1999.
- 11) 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.
- 12) 福原輝幸, 谷本 智, 渡邊 洋, 大木政弘: 熱交換掘削杭の採・放熱特性および地盤との長期熱的相互作用, 土木学会論文集, No.638/VII-20, pp. 103-113, 2001.
- 13) Johan, C. and Göran, H.: Analytical Studies on the Influence of Regional Groundwater Flow on the Performance of Bore-hole Heat Exchanger, Proceedings of 8<sup>th</sup> International Conference on Thermal Energy Storage, Vol. 1, pp. 195-200, Stuttgart, Germany, 2000.
- 14) 福井市企業局: 平成 4 年度計 34 号地下水源開発調査業務委託 (解析編) 報告書, 1991.
- 15) 福井市企業局: 平成 4 年度計 34 号地下水源開発調査業務委託 (資料編) 報告書, 1991.
- 16) 例えば, 斎藤直輔, 新田尚: オーク境界層の気候, 朝倉書店, 1981.

(2003. 5. 14 受付)

## INFLUENCE OF GROUNDWATER FLOW ON HEAT EXTRACTION AND INJECTION PERFORMANCE OF BORE-HOLE HEAT EXCHANGE SYSTEM

Teruyuki FUKUHARA, Satoshi TANIMOTO and Satoshi NAGAO

The proposed heat transfer theory of the Bore-hole Heat Exchange System (BHES), incorporating the thermal interaction between a bore-hole heat exchange pile and groundwater flow, could reproduce the measured fluid temperature distribution along a heat exchange pile during the operation and in the following fluid temperature recovery period. From the numerical simulation, the proposed model predicted the enlargement and disappearance of groundwater temperature variation associated with the operation of heat injection and extraction, and showed that the surviving period of the temperature variation is shorter than two months after ceasing the operation. Finally it was seen that the performance of heat injection and extraction is remarkably improved with the increase in the Peclet number,  $Pe$ , at the upstream side element contiguous to the heat exchange pile for  $Pe \leq 5$ .