

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

Injection and Extraction of Ground Heat by Bore-hole Heat Exchange System
and Long Period Thermal Interaction between Ground and Bore-hole

福原 輝幸*
(福井大学工学部建築建設工学科)

谷本 智**
(広成建設株式会社)

渡邊 洋***
(山形大学工学部)

大木 政弘***
(村中建設株式会社)

1. はじめに

筆者らはこれまでに、地中熱による道路融雪を介して、掘削杭熱交換システム (Bore-hole Heat Exchange System, BHES と呼称) の地中熱採熱および地盤への放熱特性について岩盤および沖積層で調査・研究を行ってきた^{1)~7)}。BHES の熱交換掘削杭 (以下、杭と記述) は、外管と内管で構成される長さ約 100m から 200m の同軸 2 重管熱交換器であり、外管は外径 90mm (肉厚 4mm)、内管は外径 56mm (肉厚 3mm) のポリエチレン製である。写真-1 は外管設置後の内管挿入を示しており、柔軟性に優れたポリエチレン製の管は施工が容易である。

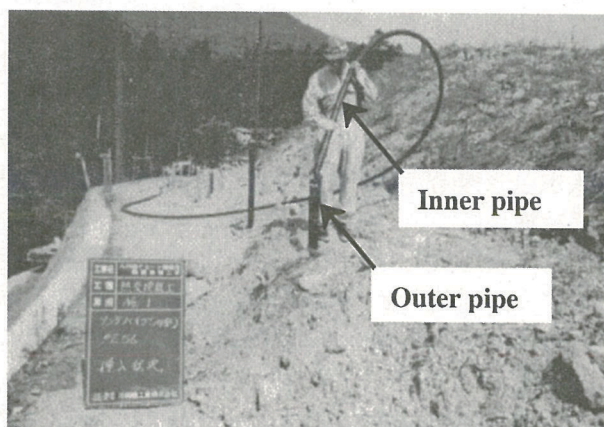


写真-1 熱交換杭外管設置後の内管挿入

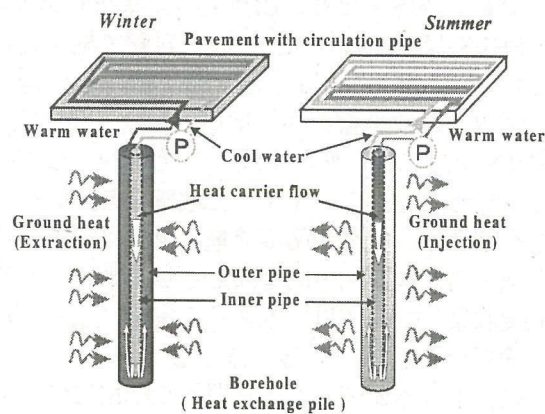


図-1 BHES の熱移動概念図

(キーワード: Bore-hole Heat Exchange System (BHES), injection, extraction, ground heat energy storage)

Teruyuki FUKUHARA (Faculty of Engineering Fukui University)

Satoshi TANIMOTO (kousei Co. LTD.)

Hiroshi WATANABE (Faculty of Engineering Yamagata University)

Masahiro OHKI (Muranaka Co. LTD.)

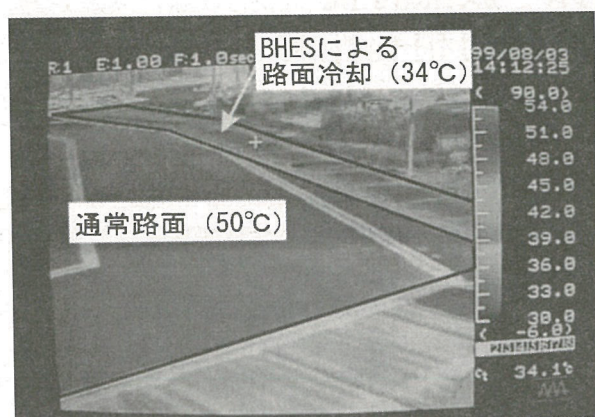


写真-2 夏期における BHES による路面冷却
(道の駅「八千北」: 1999年8月3日)



写真-3 冬期における BHES による歩道融雪
(道の駅「八千北」: 1999年1月8日)

杭と地盤との間の季節的な熱輸送は、図-1に示す通りである。同図左のように杭内流体温度が地盤温度よりも低い場合、流体は内管を下降し、外管を上昇する間に地中熱を吸収(採熱)しながら昇温し、路面を加熱する。一方、右図のように流体温度が地盤温度よりも高い場合、流体は内管を下降し、外管を上昇する間に地盤へ放熱して温度を下げ、路面を冷却する。こうして、地中熱は温熱源あるいは冷熱源として通年利用される。

写真-2 および写真-3は、兵庫県村岡町の道の駅「八千北」における BHES の稼動状況を示しており、前者はサーモグラフィによる夏期の路面冷却、後者は冬期の路面加熱による融雪を表わす。夏期および冬期とも、BHES による路面温度制御の有効性が知れる。

BHES はヨーロッパを中心に岩盤で施工され、主に建物空調の補助熱源としての地中熱抽出に利用されている^{8), 9)}。しかしながら、BHES の杭の長さおよび運転条件は、熱利用の用途と規模、さらには気象条件や地盤条件(地温、熱物性値、帯水層の有無)などにより異なる。そのために、(1)他の BHES とは単純に性能比較ができない、(2)杭への流入水温や稼働時間が気象条件の影響を受けて年毎に変わることから、BHES と地盤との熱的相互作用の特性、についてなお不明な点が多い。例えば、地盤蓄熱量、杭長や循環流量の違いに伴う採熱量の変化、また長期的なエネルギー抽出に伴う採熱能力低下の懸念が代表的な論点として挙げられる。このような問題や懸念の解明は、基礎データがある程度収集した今では、数多くの実験による信頼性の裏付けよりも理論モデルを確立し、数値計算による検討が合理的であると考えられる。

以上より本研究では、長期的な利用に伴う BHES の性能変化を理解するために、手始めとして一様岩盤を対象とし、杭長、循環流量および循環方式が採・放熱量に及ぼす影響および BHES の季節蓄熱効果を数値実験により明らかにした。

2. BHES の熱移動理論

BHES の熱移動理論は、図-2のような軸対称2次元モデルに従う。

(1) 杭と地盤との間の熱移動

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 (W/m^2) 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 (W/m^2K) を乗じたバルク式で表す。

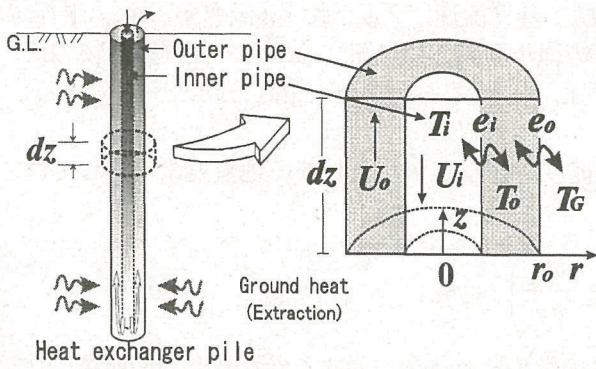


図-2 BHESの熱輸送概念

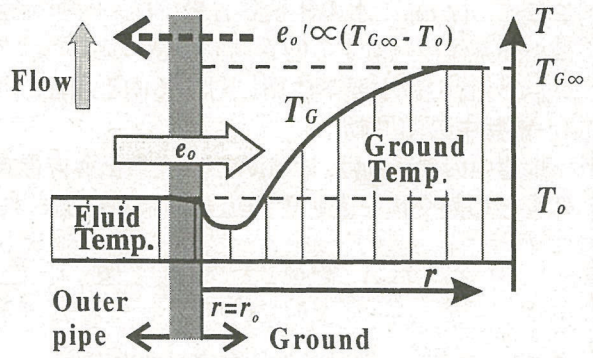


図-3 外管を横切る熱フラックス密度と地盤温度

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

筆者らの採熱試験に基づけば、 α_i は内管と外管のレイノルズ数に比例するので、相対的に値の小さな外管のレイノルズ数 Re_o の関数として、次式で表わされる¹⁾。

$$\alpha_i = a + bRe_o^c \quad (100 \leq Re_o \leq 2400) \quad (2)$$

福井大学のBHESにおいては、 $a = -302$ 、 $b = 227$ および $c = 0.086$ となる¹⁾。

b) 外管と地盤との間の熱移動

外管水温 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_o が T_G よりも高くなると、図-3のように T_G の半径方向分布に変曲点が現れる可能性がある。同図に従えば、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 を乗じたバルク式で外管を横切る熱フラックス密度 e_o' ($=\alpha_o(T_{G\infty} - T_o)$) を評価すると、 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、バルク式よりも次のような熱伝導型が適当と考える。すなわち、

$$e_o = a_1 \lambda_G \left. \frac{\partial T_G}{\partial r} \right|_{r=r_o} \quad (3)$$

ここに、 r ：半径方向の座標、 λ_G ：地盤の熱伝導率、 a_1 ：地盤温度勾配補正係数および r_o ：外管半径である。なお a_1 の値は、地盤と杭の接触状態にも依存すると考えられ、本論文では計算による杭水温分布の再現性が最も良かった $a_1 = 1.5$ を採用する。式(3)による e_o の評価は、盛田¹⁰⁾ および竹内¹¹⁾ らのバルク式とは異なる点である。

c) 内管および外管流体の熱移動

内管および外管流体の熱エネルギー方程式は、図-2の円筒座標系を用いて、式(4)および式(5)のようにそれぞれ与えられる。

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - (\rho c)_w U_i \frac{\partial T_i}{\partial z} + e_i \eta_{io} \quad (4)$$

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_o}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_o}{\partial z^2} - (\rho c)_w U_o \frac{\partial T_o}{\partial z} + e_o \eta_{oo} - e_i \eta_{oi} \quad (5)$$

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_{io} ：内管の微小要素体積に対する内管周囲面積の比、 η_{oo} ：外管の微小要素体積に対する外管外側周囲面積の比、 η_{oi} ：外管の微小要素体積に対する内管周囲面積の比、 t ：時間および z ：鉛直方向の座標である。

d) 地盤中の熱移動

地盤中の熱移動は、式(6)の2次元熱伝導方程式に従う。ただし、外管と接する地盤要素に対しては、外管との熱交換を表わす右辺第3項が付加される。

$$(\rho c)_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial r} r \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial z} \right) - e_o \eta_{Go} \quad (6)$$

ここに、 $(\rho c)_G$ ：地盤の体積熱容量および η_{Go} ：地盤の微小要素体積に対する外管外側周囲面積の比である。

後述するように、モデルの妥当性評価は、温度測点箇所が最も多い福井大学のBHESを対象として、5時間の採熱と、その後の10時間に渡る水温回復を通じて行われる。しかしながら、杭は帯水層を横切るために熱解析において帯水層をどのように取り扱うかが問題となる。帯水層の温度は地下水流れの顕熱により、地下水流れのない地盤温度と異なる挙動を呈する。福井大学のBHESの特徴は、帯水層と接触する地点における杭内水温変化が非常に小さい点にある⁴⁾。これより数時間の採熱に限り、帯水層地盤温度は一定、すなわち、

$$T_G = const. \quad (7)$$

として扱うものとする。

(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-4参照)。任意時刻の杭入口水温は、実測値間の線形内挿値とする。

b) 地盤条件

計算モデルの妥当性評価に際して、地盤の熱物性値は柱状図に従って深さにより変化する⁷⁾。一方、数値実験の対象地盤は全域一様岩盤とし、ここでは我国の代表的な支持岩盤の一つである花崗岩を想定する。花崗岩の熱物性値($\lambda_G = 3.14 \text{ W/mK}$, $(\rho c)_G = 2.18 \times 10^3 \text{ KJ/m}^3\text{K}$)は、参考文献12)から引用される。

c) 地表面

地表面地盤温度は福井大学のBHESと連結する温度制御路面下5cm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。また、任意時刻の地盤温度は、線形変化と仮定した内挿値が与えられる。

d) 解析領域底面

解析領域底面では、地盤温度一定とする。

$$T_G = const. \quad (8)$$

e) 解析領域側面

解析領域側面を横切る熱移動はないとする。すなわち、

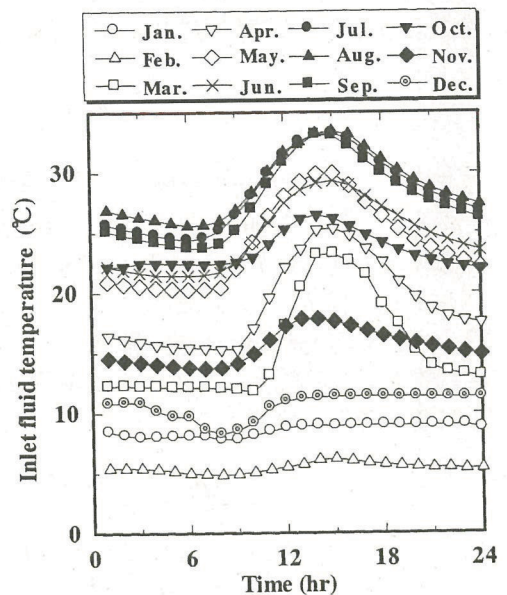


図-4 杭入口水温の月別日変化

$$\frac{\partial T_G}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

ここに、 n : 境界面に対する法線方向を表す。

(3) 初期条件および計算条件

a) 初期地盤温度

気象条件が地盤に及ぼす影響を考慮して、初期地盤温度は福井大学構内での実測値が用いられる。ただし、数値実験では地盤温度を同じにして採・放熱に及ぼす杭長の違いを純粋に評価する目的で、10m以深は全層 16.5℃とする。一方、モデルの妥当性を検証する際には、深さ 70m までは実測値が与えられ、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。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。

b) 計算期間

後の 3. (2) a)~c) の計算に際しては、BHES の稼動頻度が低いために半径方向の温度変化が小さい 4 月を計算開始時期として選ぶ。計算期間はこれより翌年の 3 月までとする。更に後の 4. の蓄熱計算に関しては、4 月から 10 年間に渡る計算が行われる。

c) 計算メッシュ

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変化させ、29 分割される。鉛直方向のメッシュは地表面付近および杭先付近で細かく設定される。分割数は杭長により変わり、杭長 25m で 33、杭長 200m で 41 である。また計算領域に関して、半径方向側面は $r=60\text{m}$ とし、鉛直方向底面は杭先下方 30m とする。ちなみに、杭付近では $\Delta r=0.05\text{m}$ 、杭最遠方では $\Delta r=5.0\text{m}$ 、地表面付近では $\Delta z=0.1\text{m}$ 、最下深では $\Delta z=5.0\text{m}$ である。また、時間間隔 Δt は $2.0 \times 10^{-4} \text{hr}$ である。

3. 計算結果および考察

(1) モデルの妥当性評価

福井大学構内の実験結果と計算結果を比較し、今回提案した数値解析モデルの妥当性を評価した。福井大学において 40m および 50m の深さに帯水層が存在する (後の図-5 および図-6 においてそれぞれ G_1 層、 G_2 層と呼称)。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 時から稼動し始め、路面温度制御 (路面温度が 12℃以上で停止) により午前 10 時に自動停止した。図

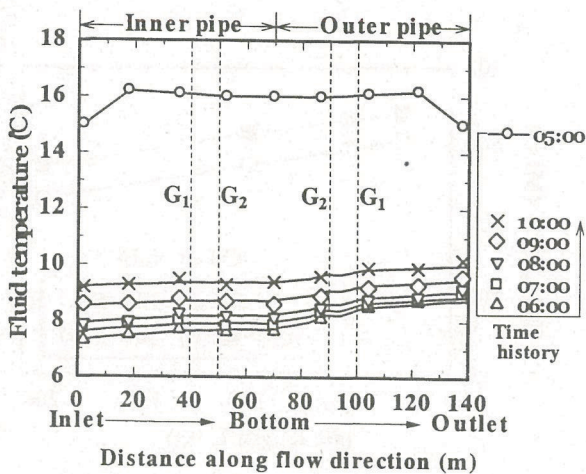


図-5 杭水温分布の経時変化
(1998年1月2日: システム稼動時)

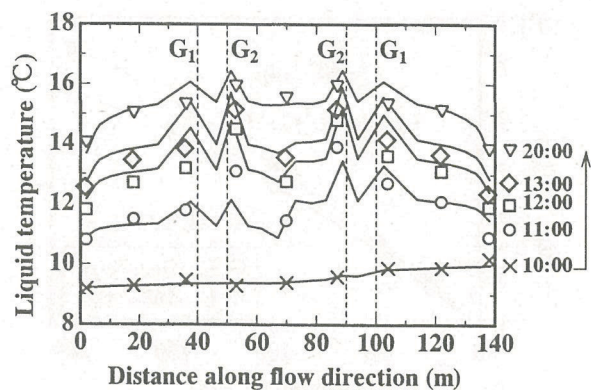


図-6 杭水温分布の経時変化
(1998年1月2日: システム停止時)

—5は、1月2日のシステム稼動開始後の杭内水温分布を1時間毎に示したものである。稼動前の午前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(同じ深さの内管および外管水温は同じ)かつ定常である。稼動後、水温上昇は外管において顕著となる。午前10時に採熱運転は終了するが、この間において実線の計算値はシンボルで示す実験結果を良好に再現する。

図-6は、10:00以降の10時間に渡る杭内水温の回復過程を示す。停止1時間後の11:00では、内管に比べて外管の水温回復は早い。2時間後には内管と外管の水温はほぼ等しくなる。G₁層およびG₂層での水温回復は計算値の方が早い。その他の場所では計算結果(実線)は実測結果(シンボル)を概ね再現している。

以上より、計算結果は水温回復過程初期において、式(7)の地盤温度一定条件のために帯水層でのみ多少昇温が早まるが、システム稼動時では良好に実験結果を再現することができた。

これより本モデルは、岩盤中の杭の採・放熱特性および季節地盤蓄熱効果の検討に有効であると考えられる。

(2) 採・放熱に及ぼす諸因子の影響

a) 杭長

BHESの設計上、最も重要な因子と考えられるのが杭長であり、杭長 L は25m, 50m, 100mおよび200mの4ケースを選んだ。

図-7は、夏期(7月-9月)における各杭長の総放熱量(E_i)および冬期(12月-2月)における総採熱量(E_e)を示す。なお、循環流量は40/minである。杭長が長くなるに従って採・放熱量は増大する。この特徴を詳しく観るために、単位長さ当りの採・放熱量と杭長の関係を図-8に示す。単位長さ当りの採・放熱量は杭長が長くなるにつれて減少する。この結果は上村ら¹³⁾の指摘と一致する。本計算の場合、単位長さ当りの採・放熱量は杭長の増大とともに線形的に減少する。よって図-7の総採・放熱量は杭長の2次関数で表現できる。すなわち、

$$E = a_2 L^2 + b_2 L \quad (0 \leq L \leq 200) \quad (10)$$

ここに、 E (MJ) は E_i および E_e の総合表示である。係数 a_2 および b_2 の値は、採熱において $a_2 = -0.44$, $b_2 = 316$ であり、放熱では $a_2 = -0.43$, $b_2 = 355$ である。 E_i が E_e より大きいのは、杭流入水温と地盤温度との差が冬期よりも夏期の方で大きいことに起因する。

b) 循環流量

循環流量 Q は、道路融雪において適用される範囲を参考にして、10, 20, 40および60/minが選ばれる。

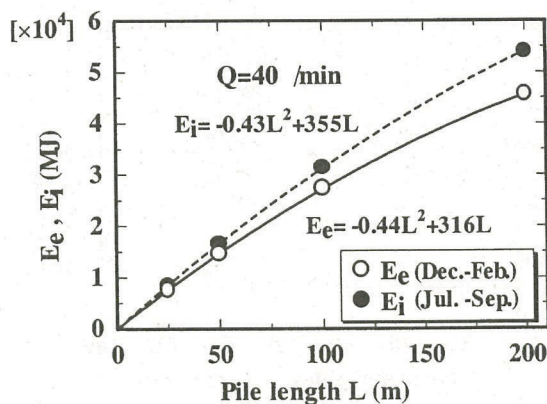


図-7 杭長と総採・放熱量の関係

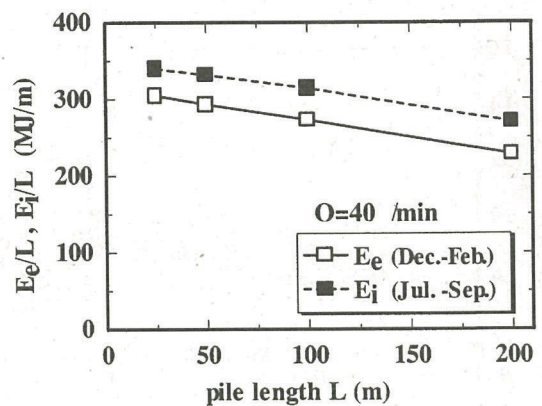


図-8 単位長さ当りの採・放熱量と杭長の関係

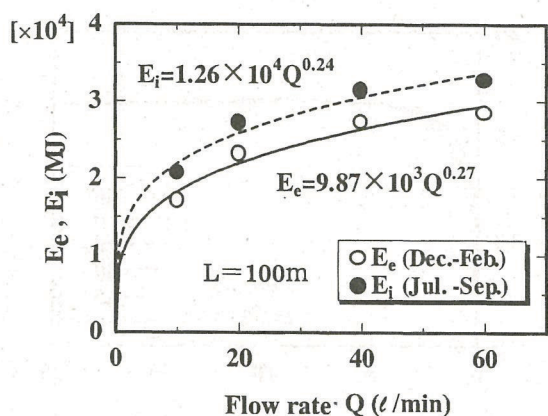


図-9 循環流量と総採・放熱量の関係

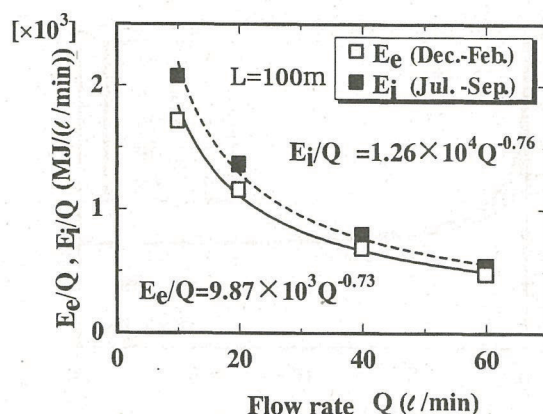


図-10 単位流量当りの採・放熱量と循環流量の関係

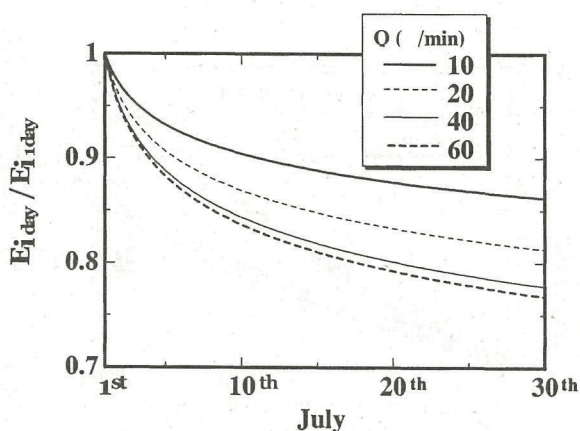


図-11 循環流量毎の放熱量経時変化 (7月)

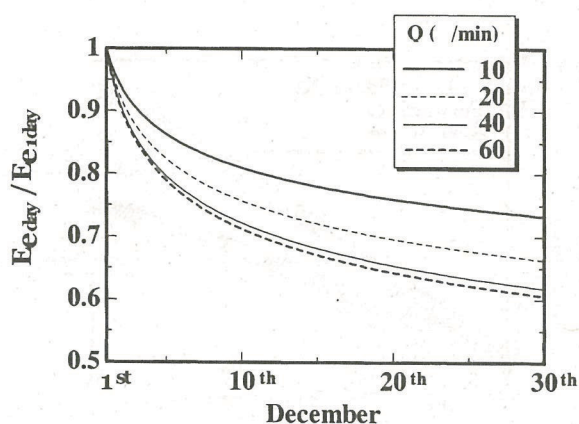


図-12 循環流量毎の採熱量経時変化 (12月)

図-9は、杭長100mに対する循環流量の総採・放熱量を示す。流量が多いほど多くの採・放熱量を得る。しかしながら、循環流量を40 l/minから60 l/minに増やしてもこの間での E_i および E_e の増加はわずかであり、性能および経済性から観て、 $Q=60$ l/minはもはや有効とは言い難い。同図より、総採・放熱量とも E と Q の間には次式が成立する。

$$E = mQ^n \quad (11)$$

ここに、採熱時 $m=9.87 \times 10^3$ 、 $n=0.27$ であり、放熱時 $m=1.26 \times 10^4$ 、 $n=0.24$ となる。式(11)はまた筆者らが以前行った採熱試験結果¹⁾にも適用できるが、杭長や流入水温が違うために m および n の値は、上述の値とは異なる。

次に、単位流量当りの総採・放熱量を示したものが図-10である。単位流量当りの総採・放熱量は、図中に示すようなべき関数に従って、流量の増加とともに低下する。

システムの安定性は総採・放熱量の大小のみならず、それらの時間変化率の大小にも依存する。このために、採・放熱量の経時変化を調べた。

図-11は、7月の放熱量の経時変化を表しており、縦軸には任意の日放熱量($E_{i,day}$)を1日目の日放熱量($E_{i,1day}$)で除した値が示される。いずれの流量でも、時間の経過に伴い日放熱量は低下しており、時間時間低下率は流量が多いほど顕著となる。

同様に、1二月の最熱量の教示変化を示したものが図-12である。冬期の最熱に於いても、夏期と同じように任意の日採熱量を1日目のそれで除した $E_{e,day}/E_{e,1day}$ の時間低下率は、流量が多いほど顕著

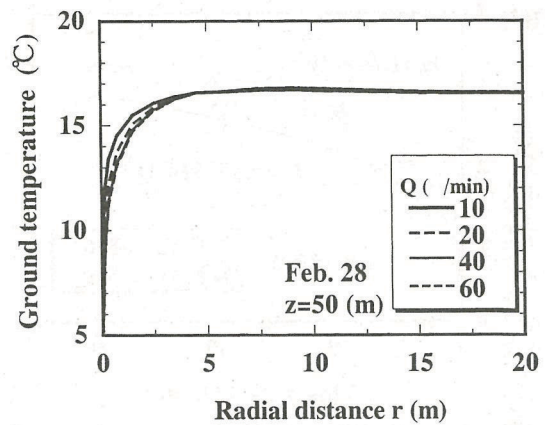
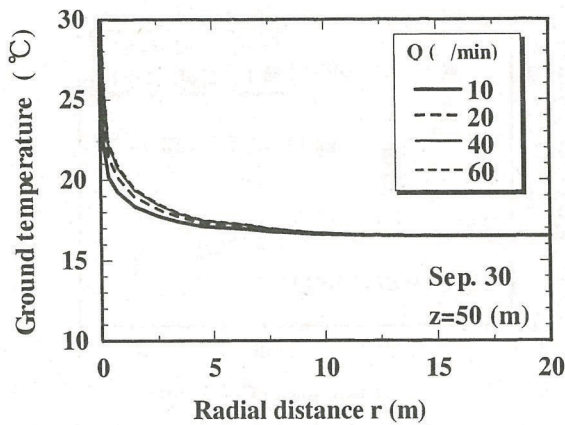


図-13 循環流量毎の半径方向地盤温度分布 (放熱)

図-14 循環流量毎の半径方向地盤温度分布 (採熱)

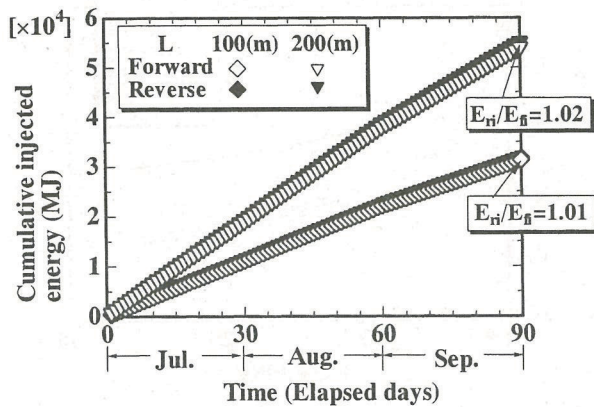


図-15 積算放熱量の経時変化

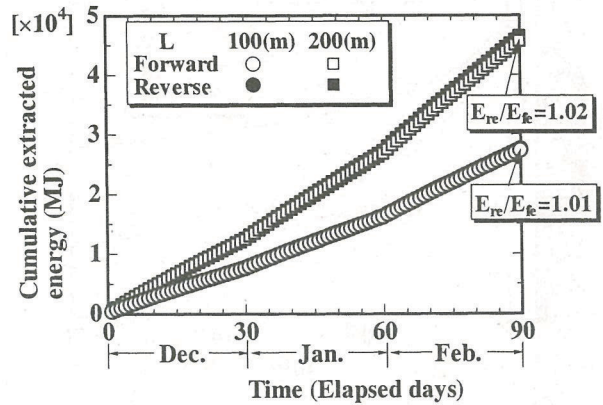


図-16 積算採熱量の経時変化

となる。

図-13は、放熱期間の9月30日および図-14は、採熱期間の2月28日における地表面下50mの半径方向の地盤温度をそれぞれ示したものである。図-13では、杭から地盤への放熱に伴って地盤温度の上昇は、流量の増加とともに大きくなる。図-14からは、採熱に伴う杭周辺地盤温度の低下も流量の増加とともに大きくなる。杭が及ぼす地盤への熱的影響範囲は、冬期では杭から約4m、夏期においては杭から約9mであり、放熱時の方が相対的に広がり大きい。これは後述の図-22で示すように、採・放熱の期間および採・放熱量とも、放熱時の方が相対的に長く、かつ大きいのである。

c) 循環方式

盛田^{11), 14)}による深さ3000mの深層地熱の採熱では、外管から内管へ流体を送る方式(逆循環と呼称)が採用されており、BHESで採用されてきた流体が内管から外管へ送られる方式(順循環と呼称)とは異なる。BHESに適した循環方法を検討するために、杭長100mおよび200mに対して順循環と逆循環の採・放熱量について計算を行った。

図-15および図-16は、夏期(7月-9月)における積算放熱量、冬期(12月-2月)における積算採熱量を、順循環と逆循環についてそれぞれ比較したものである。逆循環の積算採熱量(E_{re})および積算放熱量(E_{ri})は、順循環のそれら(E_{fe} および E_{fi})に比べて杭長100mの場合には1%、杭長200mにおいては2%それぞれ増大する。このように、両循環方式による採・放熱量に大きな差は観ら

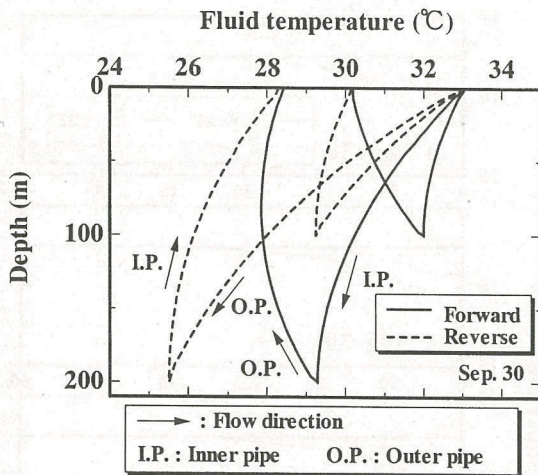


図-17 放熱時における杭内水温分布

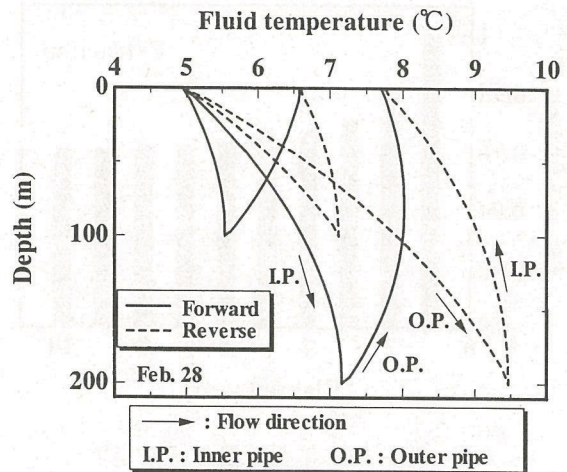


図-18 採熱時における杭内水温分布

れず、循環方式は施工の容易さから決定されれば良い。

図-17は、放熱期間の9月30日における杭内水温分布を、杭長100mおよび200mについて示したものである。杭長毎に順循環と逆循環の水温分布特性を説明する。

まず杭長100mの順循環について述べると、流体は内管を下降する間に外管への熱移動により温度を下げる。その後も流体は、外管を上昇する間に地盤へ放熱し、温度を下げ出口で最低温となる。また、逆循環の場合、流体は外管を下降する間に地盤および内管に放熱し温度を下げ、底部で最低温となる。しかしながら、流体はその後内管を上昇する間に外管からの熱供給により昇温する。

次に、200mの杭長について言及する。順循環の内管水温分布は杭長100mのそれと相似であるが、外管水温分布は異なる。流体は外管を上昇する間に地盤へ放熱し温度を下げ、深さ75m付近で最低温となるが、その後は内管からの熱供給を受け昇温する。一方、逆循環の場合、外管および内管水温分布は100mと同じ挙動が観られる。このように、水温分布は循環方式により異なるものの、出口水温の差は、杭長100mでは0.02℃、杭長200mでは0.11℃であり、いずれも相対的に逆循環の方がわずかに低い温度の流体を抽出できる。

同様に、採熱期間の2月28日における杭内水温分布を図-18に示す。まず杭長100mの順循環において、流体は内管を下降する間に外管からの熱移動により昇温する。その後も、流体は外管を上昇する間に地盤から採熱し、杭出口で最高温となる。また、逆循環の場合、流体は外管を下降する間に地盤から採熱して昇温し、底部で最高温となる。その後、流体は内管を上昇する間に外管への熱移動によって温度を下げる。

次に、杭長200mについて述べると、順循環における内管水温は、杭長100mの場合と同様な挙動となる。一方、外管において流体は、杭を上昇する間に地盤からの採熱により昇温し、深さ約75mで最高温となるが、内管への熱移動によりその後温度を下げる。また、逆循環においては、内管および外管とも杭長100mと同じような分布を呈する。結局、出口水温は杭長100mで0.01℃、200mで0.05℃ほど逆循環の方で高くなる。

4. 採・放熱に及ぼす季節蓄熱の影響

夏期の地盤への温熱貯蔵が次に迎える冬期の採熱に及ぼす影響および冬期の冷熱貯蔵が次の夏期の冷熱源としてどれだけ有効であるかを検討するために、10年間に渡る採・放熱計算を行う。また、比較のために冬期の採熱のみの運転についても計算を行う。

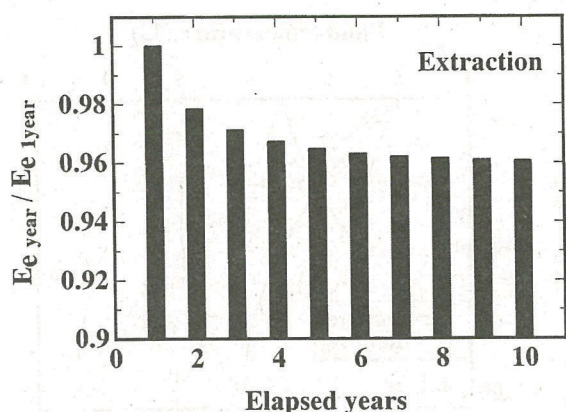


図-19 年採熱量の経年変化

(1) 冬期運転のみによる採熱評価

ここで述べる冬期運転とは、図-4 で示したような12月から2月までの低温流体の杭流入に伴う採熱運転を表す。

図-19 は、冬期運転のみによる年採熱量($E_{e \text{ year}}$)を1年目のそれ($E_{e \text{ 1year}}$)で除した値の経年変化を示す。年採熱量は年毎に減少するが、特に運転最初の5年間での減少が著しい。結局、10年目の年採熱量は1年目に比べて約4%低下する。

図-20 a)~d)は、地表面下50mにおける地盤温度の半径方向分布の経年変化を、5月、8月、11月および2月においてそれぞれ示したものである。システム稼動により、杭近傍地盤温度はd)のように著しく低下するが、システム停止後、地盤温度はa), b), c)のように上昇する。しかしながら、システム停止期間中に杭周辺の地盤温度は、元の状態まで回復せず経年的に低下するが、その時間低下率は年とともに小さくなる。結果、10年目のシステム稼動直前である11月の杭近傍地盤温度は、初期のそれよりも約0.5℃低い16℃まで低下する。このような杭近傍地盤温度の低下特性に起因して、図-19に観られるような年の経過に伴う採熱量の鈍化が生じたものと推察される。ちなみに、図では判別し難いが、低温域は年の経過とともに徐々に杭遠方へと広がる。

以上の結果から、春から夏期の日射による地表面からの熱供給だけでは、地温の回復は不十分であり、長年に渡り冬期のみシステムを稼働させると、杭近傍地盤温度および地中熱採熱量の恒常的な低下が懸念される。

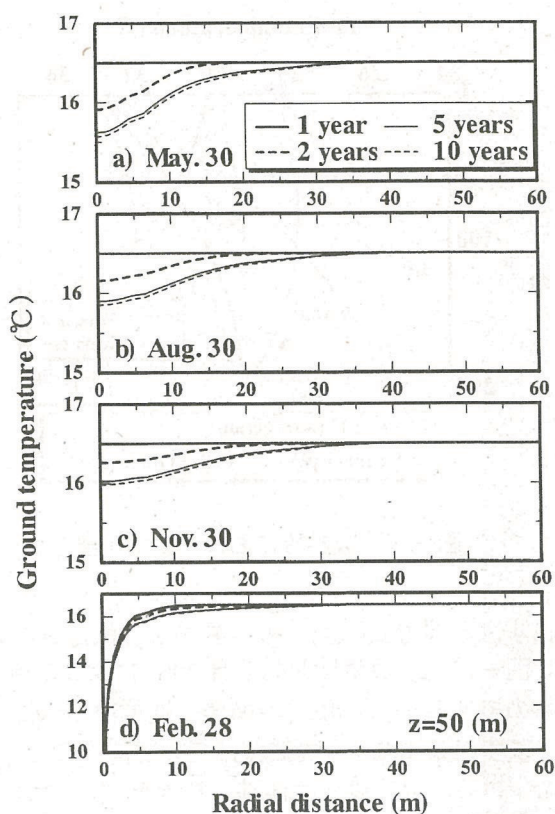


図-20 地盤温度の経年変化 (冬期運転)

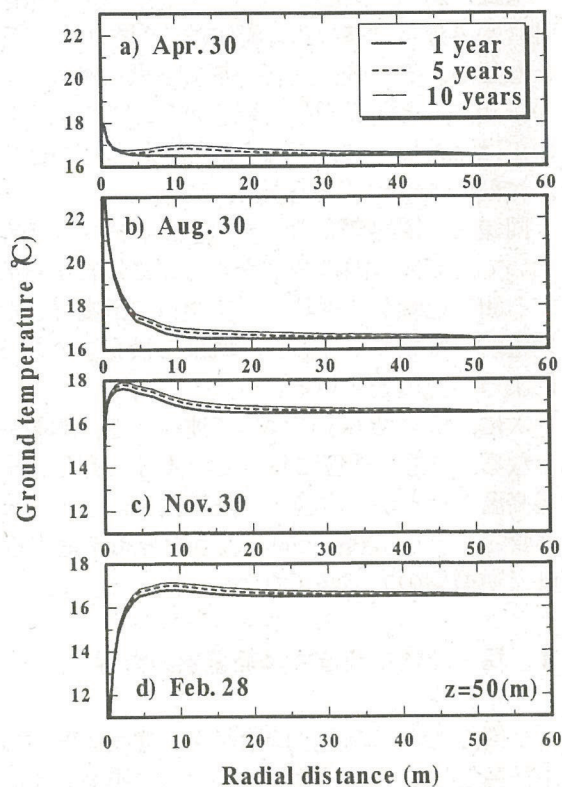


図-21 地盤温度の経年変化 (通年運転)

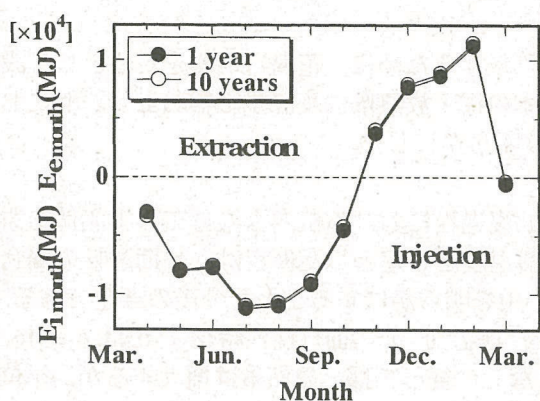


図-22 10年間に渡る採・放熱量の月別変化

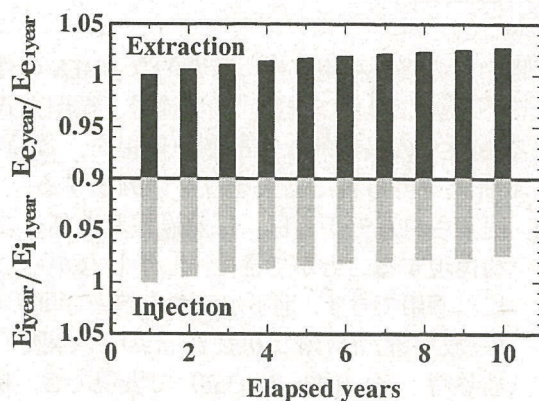


図-23 年採・放熱量の経年変化

(2) 通年運転による採・放熱評価

4. (1)において、冬期のみ運転では採熱能力および地盤温度は経年的に低下することが判った。そこで、冬期運転のみによる慢性的な地盤温度低下を防ぐために、ここでは夏期およびその前後の期間における余剰温熱の地盤への放熱を加えた通年運転による採・放熱特性を調べる。実際には、図-4のような水温を有する流体が、連続的に杭内に流入する。

図-21 a)~d)は、地表面下50mにおける地盤温度の半径方向分布の経年変化を4月、8月、11月および2月についてそれぞれ示す。4月および8月の地盤温度分布をみると、この間の杭への流入水温が高いため、地盤温度は杭近傍で最も高くなる。逆に11月および2月では、流入水温が低いため地盤温度は杭近傍で最も低くなる。4月、11月および2月の地盤温度分布には変曲点が現れる。11月の3m地点の変曲点は、低水温流体の流入によって杭近傍地盤温度が急激に低下することにより発生したと考えられる。4月の3m地点の変曲点は、3月以降の高水温流体の流入によって杭近傍地盤温度が急激に上昇したためである。

最後に、図中に示す1年目、5年目および10年目の地盤温度分布を比較する。分布形状に違いはないものの、各月とも地盤温度は年の経過とともに徐々に上昇することが知れる。

次に、システムの時間的安定性を評価するために、月採熱量 ($E_{e\text{ month}}$) および月放熱量 ($E_{i\text{ month}}$) について1年目と10年目で比較したものが図-22である。図中の●は1年目の月採・放熱量を、○は10年目の結果を示す。1年目および10年目ともに、3月から10月までは放熱期間であり、7月に $E_{i\text{ month}}$ の最大値を示す。11月から2月までは採熱期間であり、2月に最大値が現れる。1年目に比べて10年目の $E_{i\text{ month}}$ は放熱期間の4月および5月において増大し、他の月では減少する。4月および5月に観られる $E_{i\text{ month}}$ の増加は、1年目の初期地盤温度が、これ以前の冬期における採熱の影響を受けていないために生じたものである。これに対して、採熱期間では冬季の各月とも10年目の $E_{e\text{ month}}$ は1年目のそれよりも増大する。

図-23は年採熱量 ($E_{e\text{ year}}$) および年放熱量 ($E_{i\text{ year}}$) の経年変化が示している。ただし両値は、1年目の年採熱量 ($E_{e\text{ year}}$) および年放熱量 ($E_{i\text{ year}}$) でそれぞれ無次元化される。冬期運転のみの場合を示した4.1の図-19の結果とは逆に、年採熱量は年毎に上昇しており、10年間で約3% (1140MJ) の増加となる。年放熱量は年毎に低下し、10年間で約3% (1290MJ) の減少となる。1年目から10年目までの流入水温に違いはないことから、年採熱量の増加および年放熱量の減少は、図-21に観られた地盤温度の経年的な上昇に起因する。

ただし、今回の結果は1本の杭に対する結果であり、群杭の $E_{i\text{ year}}/E_{i\text{ year}}$ および $E_{e\text{ year}}/E_{e\text{ year}}$ は、単独杭のそれらとは異なることが推察される。

5. おわりに

地中熱の長期利用に伴う時間的な BHES の性能変化を理解するために、花崗岩地盤を対象として設計に不可欠な因子（杭長、循環流量、循環方式）が杭 1 本の採・放熱量に及ぼす影響および岩盤における BHES の長期的な季節蓄熱効果を、数値実験により明らかにした。

本研究で得られた結果を以下に列挙する。

- 1) 提案されたモデルは、採熱過程およびその後の水温回復過程における杭内水温分布の実測値を概ね再現することができた。しかしながら、帯水層地盤温度を一定とした仮定は、長期運転の場合には適用できず、地下水流れと杭との間の熱的相互作用を明らかにすることが今後の課題である。採・放熱量 E (MJ) は、杭長 L (m) の 2 次関数として $E = a_2 L^2 + b_2 L$ ($0 < L < 200$) (採熱時: $a_2 = -0.44$, $b_2 = 316$, 放熱時: $a_2 = -0.43$, $b_2 = 355$) で表現でき、杭長が長くなるに従って採・放熱量は増大するが、単位長さ当りの採・放熱量は逆に杭長の増加とともに減少する。
- 2) 循環流量 Q (ℓ/min) と採・放熱量の関係は $E = mQ^n$ (採熱時: $m = 9.87 \times 10^3$, $n = 0.27$, 放熱時: $m = 1.26 \times 10^4$, $n = 0.24$) と近似でき、 Q の増加に伴う E の増分は小さくなる。従って、単に循環流量（循環ポンプ）を大きくするだけでは、採・放熱効果は上がらない可能性がある。
- 3) 冬期および夏期のそれぞれ 3 ヶ月間における逆循環の採・放熱量は、順循環のそれらよりも杭長 100m の場合には 1%、杭長 200m においては 2% 大きくなる程度で、両者に大きな差はない。
- 4) 冬期運転のみによる地中熱採熱を長年に渡り行くと、春から夏期の日射による地表面からの熱供給では地温の回復は不十分であり、杭近傍地盤温度は年毎に低下する。
- 5) 毎年同じ条件下で 10 年間に渡る路面温度制御の通年運転を 10 年間に渡り行くと、1 年目に比べて 10 年目の年採熱量は約 3% 増加するが、逆に年放熱量は約 3% 低下する。
- 6) 以上より地中熱の長期利用に際して、採・放熱のバランスおよび地盤熱環境変化を事前に評価することは、地中熱安定利用の観点から重要である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 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) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.

- 10) 盛田耕二：マグマからの熱抽出をめざして－坑井内同軸熱交換器（DCHE）方式の開発－，地下水学会誌，第36巻第3号，pp.243-257, 1994.
- 11) 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.56-69, 1993.
- 12) 日本機械工学会：伝熱工学資料第2版，日本機械工学会，1980.
- 13) S. Kamimura：Snow Engineering Recent Advances and Developments, Proceedings of the 4th International Conference on Snow Engineering , pp.409-416, Trondheim, Norway, 2000.
- 14) 盛田耕二：坑井内同軸熱交換器方式による地熱エネルギー抽出に関する研究，博士論文，1994.