

村中建設	正会員	大木政弘*
福井大学工学部	正会員	福原輝幸**
ミサワ建設技術	正会員	森山和馬***
エスコ	正会員	足立克巳****

1. はじめに 地球環境の保全に向けたエネルギー施策においては、自然熱エネルギーの積極的な利用が必要不可欠となる。掘削杭熱交換方式(BHES)¹⁾は、夏期には舗装体が吸収した太陽熱エネルギーを地盤へ輸送し、冬期には温熱源としての地中熱を抽出するような自然熱エネルギーの季節的活用システムである。これまで BHES はヨーロッパを中心とした岩盤地域での適用が多いが、日本の多くの都市は沖積層上に発達しており、帯水層すなわち地下水流れが BHES の採熱・放熱に影響を与えることが推察される。

そこで、本研究では BHES の実証実験による結果を基に構築した数値計算モデルを使用して、熱交換掘削杭の地中熱採熱特性について帯水層の有無による比較検討を行う。

2. BHES による地中熱利用 BHES における地中熱利用の概略を模式的に表したものが Fig.1 である。本システムは、コンクリート平板(2.5m×2m×0.16m)内部に循環パイプ(φ 15mm 鋼管)が埋設された熱交換舗装体、内管(φ 56mm)と外管(φ 90mm)のポリエチレン製 2 重管からなる熱交換杭で構成される。これらは閉回路で連結され、ポンプにより循環水(ポリプロピレングリコール)が循環する。冬期の場合、舗装体内での放熱に伴い冷えた循環水は内管を下降し、外管を上昇する際に相対的に温度が高い地盤より採熱する。温められた循環水はその熱エネルギーを循環パイプから舗装体へ放出し、舗装体の温度低下を抑制する。

3. 解析モデルと解析条件

3.1 熱輸送理論 熱交換杭内管および外管における熱輸送は熱伝導、移流および熱伝達で支配され、長さ dz の微小要素に対して方程式はそれぞれ式(1)、式(2)で与えられる。また、地盤内の熱移動は式(3)の熱伝導方程式で与えられる。

$$(\rho c)_L \frac{\partial T_{in}}{\partial t} = \lambda_L \frac{\partial^2 T_{in}}{\partial z^2} - (\rho c)_L U_{in} \frac{\partial T_{in}}{\partial z} + \alpha_{in}(T_{out} - T_{in}) \frac{A_i}{V_i} \quad (1)$$

$$(\rho c)_L \frac{\partial T_{out}}{\partial t} = \lambda_L \frac{\partial^2 T_{out}}{\partial z^2} - (\rho c)_L U_{out} \frac{\partial T_{out}}{\partial z} + \lambda_G a_1 \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_o} \frac{A_o}{V_o} - \alpha_{in}(T_{out} - T_{in}) \frac{A_i}{V_o} \quad (2)$$

$$(\rho c)_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial r} r \right) \quad (3)$$

ここに、 $(\rho c)_L$: 循環水の体積熱容量、 $(\rho c)_G$: 地盤の体積熱容量、 T_{in} :

内管水温、 T_{out} : 外管水温、 T_G : 地盤温度、 λ_L : 循環水の熱伝導率、 λ_G : 地盤の熱伝導率、 U_{in} : 内管流速、 U_{out} : 外管流速、 α_{in} : 内管の熱貫流率、 a_1 : 地下水流れによる乱れを考慮した λ_G の補正係数、 A_i : 内管要素の側面積、 A_o : 外管要素の側面積、 V_i : 内管要素の体積、 V_o : 外管要素の体積、 z : 鉛直上向き座標、 r_o : 外管の半径、である。ここで、式(1)の右辺第 3 項と式(2)の右辺第 4 項が内管を横切る熱エネルギーフラックスを、式(2)の右辺第 3 項が外管を横切る熱エネルギーフラックスをそれぞれ表す。

3.2 境界条件 地盤表層、解析領域側面および底面における境界条件は、式(4)から式(6)によりそれぞれ規定される。特に、帯水層における境界条件は、実測に基づき帯水層温度が一定と近似できるために、式(6)で与えられる。

$$\partial I / \partial t = R_G + R_S - R_U - S + C \quad (4), \quad \partial T / \partial n = 0 \quad (5), \quad T = \text{const.} \quad (6)$$

ここに、 $\partial I / \partial t$: 地盤表層要素の内部熱エネルギーの時間的变化率、 R_G : 短波放射エネルギー、 R_S : 大気長波放射エネ

キーワード: 地中熱, 帯水層, 熱移動, 熱交換

*	〒910-0859	福井市日之出 3-2-1	TEL 0776-22-0845	FAX 0776-27-1225
**	〒910-0017	福井市文京 3-9-1	TEL 0776-23-0500 内線 2809	FAX 0776-27-8746
***	〒729-6202	三次市向江田町 4252-2	TEL 0824-66-2281	FAX 0824-66-2975
****	〒104-0031	中央区京橋 2-17-1	TEL 03-3564-5801	FAX 03-3564-5806

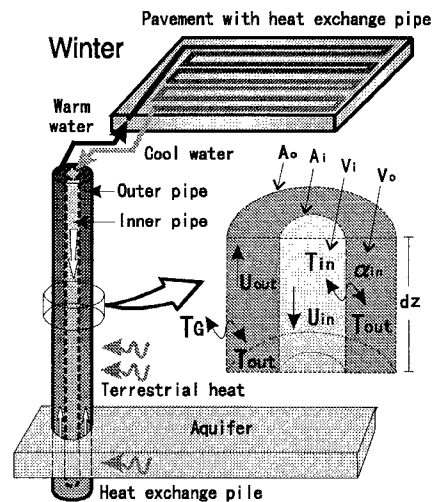


Fig.1 BHES による熱移動の概念図

ルギー, R_D : 地表面長波放射エネルギー, S : 空気移動による顕熱, C : 地中熱伝導エネルギー, n : 外向き法線ベクトル, である。

3.3 解析条件 気象データ(気温, 風速, 全天日射量, 相対湿度)は福井地方気象台(1996年2月の1時間毎)の日原簿より, 内管入口水温は福井大学内施設実測値(1996年2月の1時間毎)より得られた。それらは時間毎にアンサンブル平均され, 計算に使用される。また, 初期地盤温度は70 mまでは実測値を, それで深は100 m当たり3℃上昇の割合で与え, 地盤は福井市内の柱状図を基に構成される。循環流量 Q は40 l/min, 熱交換杭の長さ L は100 mであり, 計算期間は28日とする。計算は帯水層が有る場合と無い場合(帯水層を地下水の無い地層で置き換え)で行われる。

3.4 再現結果 Fig.2は採熱試験¹⁾で得られた熱交換杭($L=70$ m)の流下軸方向の水温分布を各循環流量($Q=5\sim60$ l/min)毎に表したものである。流量が大きい場合には外管における水温上昇が卓越し, 流量が小さくなるにつれ内管と外管の間の熱移動が顕著となる。

Fig.3に採熱試験終了後, 循環を止めた場合($Q=0$ l/min)の熱交換杭内水温の回復過程を1時間毎に示す。2つの帯水層(Aq1, Aq2)(特にAq2)の位置において水温の上昇が卓越し, 帯水層が熱交換杭の採熱に与える影響は大きいことが推察される。

また, Fig.2およびFig.3において計算値の実線と実測値のシンボルは良好に一致しており, 本解析モデルの妥当性が検証される。

4. 計算結果 Fig.4は日採熱量 E_{day} および積算採熱量 E_c の経時変化を表したものである。帯水層が有る場合(○)は無い場合(●)に比べて E_c の時間勾配は大きく, 時間の経過に伴い両者の差は広がる。計算開始28日目の E_c は, 帯水層が有る場合(5450 MJ)が無い場合(3930 MJ)に比べて約39%大きな値となる。これは帯水層が無い場合には E_{day} が時間と共に低減し易いことに起因している。例えば, 1日目に比べ28日目の E_{day} は, 帯水層が有る場合には約34%減少するのに対して, 無い場合には約50%となり, 減少の割合は大きい。

Fig.5は地盤から外管に流入する熱エネルギーフラックス密度 E_f (>0)の鉛直分布を, 計算開始1日目と28日目の6時において示したものである。1日目の帯水層が有る場合の E_f (○)は無い場合のそれ(●)に比べて第1帯水層Aq1で小さく, 第3帯水層Aq3で大きい。1日目と28日目の E_f を比較すると, 帯水層の位置において(○)は殆ど変化していないのに対して, (●)は3層共に減少するので, 3層共に(○)が(●)より大きくなる。これは(○)では帯水層の温度が一定であるのに対して, (●)では時間の経過に伴い熱交換杭の採熱により地盤温度が相対的に低くなるためである。ただし, 帯水層以外では E_f (○と●)に大きな違いはなく, E_f は平均37%減少する。

以上より, Fig.4に示す熱交換杭の日採熱量および積算採熱量の違いは, 帯水層における採熱量の違いに起因する。

5. おわりに 帯水層の存在は, BHESの長期運転に伴う採熱量や地盤温度の低下を抑制する有効な要素であり, 少なくとも福井を含む北陸以西の沖積層でのBHESの使用は有利であることが判る。

参考文献

- 1) 大木・渡邊・福原・森山: 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.

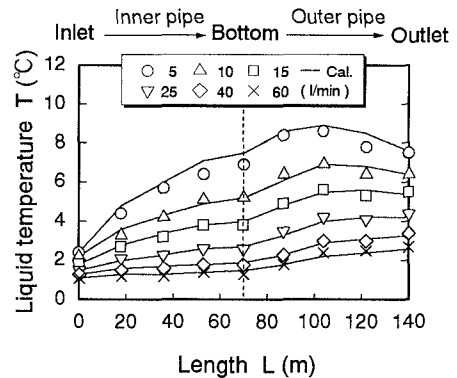


Fig.2 熱交換杭流下軸方向の水温分布

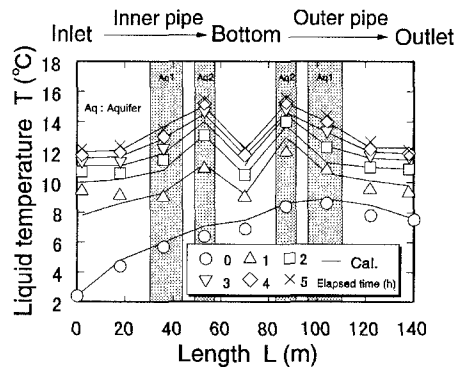


Fig.3 熱交換杭内の水温回復過程

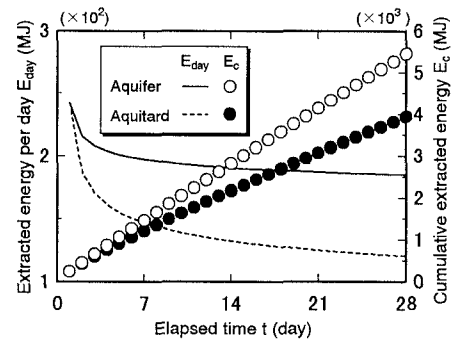


Fig.4 日採熱量と積算採熱量の経時変化

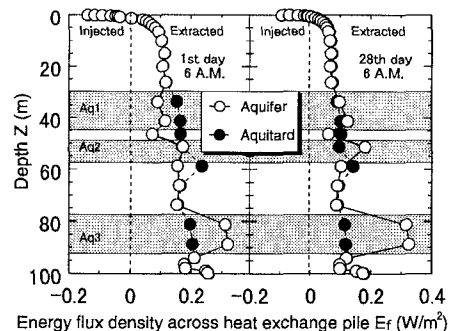


Fig.5 地盤から外管に流入するフラックス密度