

掘削杭熱交換方式の採熱特性に関する理論的考察

福井大学工学部	学生員	大木政弘*
福井大学工学部	学生員	渡邊 洋*
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***

1. はじめに 地球環境に広く分布する太陽エネルギーや地熱などの自然熱エネルギーの有効利用は、自然環境と人間活動との共生の実現に向けて重要となる。しかしながら、これらは時間的、季節的な供給変動が大きく、熱エネルギー貯蔵技術の導入による需給変動の調整が必要である。掘削杭熱交換方式(BHES)¹⁾は、夏期には太陽熱エネルギーを地盤へ貯蔵し、冬期には地熱を抽出するような熱エネルギーの季節的活用システムである。温度レベルの低い熱エネルギーを扱うBHESを長期に渡り、安定的に稼働させるためには、熱交換杭における採熱・蓄熱的特性の把握が重要となる。

そこで、本研究では BHES の実証実験結果を基に、熱交換杭における冬期地盤からの採熱特性について、数値計算により検討を行う。

2. BHES による季節蓄熱 BHES における季節蓄熱とその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)が埋設された無散水融雪装置、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の両者で構成される。これらは閉回路で連結され、循環ポンプにより循環水(プロピレングリコール)が循環する。循環パイプより戻ってきた循環水は、熱交換杭内管を杭先に向かって下降した後、外管を上昇する。

冬期の場合、冷たい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により舗装体へ放出し、舗装体の温度低下を緩和する。

夏期の場合、循環水は循環パイプ内を循環する間に舗装体に蓄積された太陽熱エネルギーを吸収する。温められた循環水は相対的に温度が低い地盤へその熱エネルギーを熱交換杭より放出し、地盤内に蓄熱する。温度低下した循環水は再び舗装体内部の熱エネルギーを吸収し、舗装体の温度上昇を緩和する。

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伝熱、移流、および熱伝達で支配され、基礎方程式はそれぞれ式(1)、式(2)である。また、地盤内の熱移動は式(3)の熱伝導方程式により与えられる。

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

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_{out}}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_{out}}{\partial z^2} - (\rho c)_w U_{out} \frac{\partial T_{out}}{\partial z} + \alpha_{out} (T_G - T_{out}) \frac{A_o}{V_o} - \alpha_{in} (T_{out} - T_{in}) \frac{A_i}{V_i} \quad (2)$$

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

ここに、 $(\rho c)_w$: 循環水の体積熱容量、 $(\rho c)_G$: 地盤の体積熱容量、 T_{in} : 内管内水温、 T_{out} : 外管内水温、 T_G : 地盤温度、 λ_w : 循環水の熱伝導率、 λ_G : 地盤の熱伝導率、 U_{in} : 内管内流速、 U_{out} : 外管内流速、 α_{in} : 内管の熱貫流率、 α_{out} : 外管の熱貫流率、 A_i : 内管要素の側面積、 A_o : 外管要素

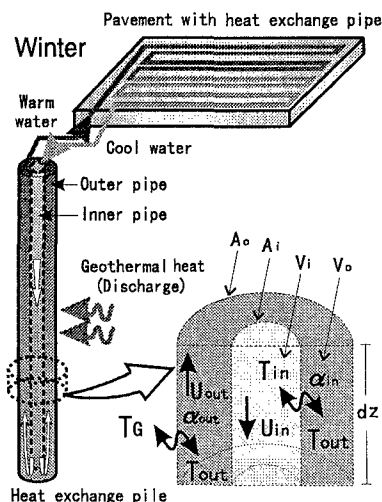


Fig.1 BHES による熱移動の概念図

キーワード: 地熱、季節蓄熱、熱移動、熱交換

* 〒910	福井市文京 3-9-1	TEL 0776-23-0500	内線 2815	FAX 0776-27-8746
** 〒910	福井市文京 3-9-1	TEL 0776-23-0500	内線 2809	FAX 0776-27-8746
*** 〒729-62	三次市向江田町 4252-2	TEL 0824-66-2281		FAX 0824-66-2975

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、である。

3.2 境界条件 地盤表層、解析領域底面および側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。

$$\partial I / \partial t = R_G + R_S - R_U - S + C \quad (4)$$

$$T = \text{const.} \quad (5)$$

$$\partial T / \partial n = 0 \quad (6)$$

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変化率、 R_G ：短波放射エネルギー、 R_S ：大気長波放射エネルギー、 R_U ：地表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 ：外向き放線ベクトル、である。

3.3 解析条件 気象データ(気温、風速、全天日射量)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70mまでは実測値を、それ以深は100m当たり3℃上昇の割合で与える。なお、循環流量 Q は40l/minである。Table 1に本解析の計算諸条件を示す。Case-1～3は熱交換杭の長さ L を、Case-3～5は内管の熱貫流率 α_{in} を変化させ、一週間に渡る地盤からの積算採熱量 E をそれぞれ算出した。

3.4 再現シミュレーション Fig.2は採熱試験で得られた熱交換杭流下軸方向の水温分布を各循環流量($Q = 5 \sim 60 \text{ l/min}$)毎に表したものである。また、Fig.3は1996年2月1日における熱交換杭出入口水温を示す。各流量毎の水温分布計算値と出口水温計算値は、それぞれ実測値と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にCase-1～5の計算結果を示す。

まず、Case-1～3における熱交換杭の長さ L と積算採熱量 E の関係においては、 L が増加するに従い E は非線形的に増大し、その増加の程度は緩やかに減少している。

次に、熱貫流率 α_{in} と積算採熱量 E の関係においては、 α_{in} が増加し、内管と外管との間での熱交換が卓越するに従い、 E は 4.7×10^3 から $4.4 \times 10^3 \text{ MJ}$ へと減少しており、内管を断熱することは地盤からの採熱に有利となる。また、Fig.2から判るように循環流量 Q が小さくなるとともに、内管と外管との間における熱交換量は大きくなる。よって、 Q が小さい場合、内管の断熱効果は顕著に現れることが推察される。

5. おわりに BHESにおいて、熱交換杭の長さとお内管の熱貫流率の変化が、地盤からの採熱量に及ぼす影響を数値計算により検討した。その結果、地盤からの採熱量は杭長を長くし、内管を断熱することで有利となることが判った。今後は、長期に渡る地盤からの採熱と地盤への蓄熱について考察する。

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.

Table 1 計算条件

Case No.	L (m)	α_{in} (w/m ² K)	α_{out} (w/m ² K)
1	50	133	29.6
2	200	133	29.6
3	100	133	29.6
4	100	66.5	29.6
5	100	0	29.6

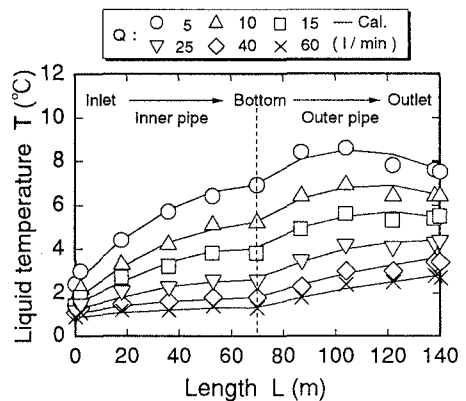


Fig.2 熱交換杭流下軸方向の水温分布

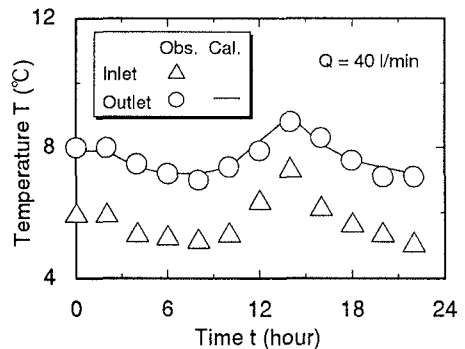


Fig.3 1996年2月1日の再現

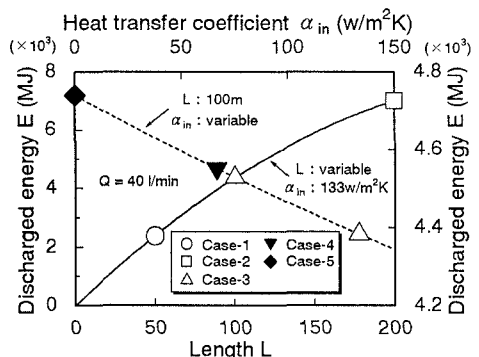


Fig.4 杭長および熱貫流率と採熱量の関係