沖積層地盤における掘削杭熱交換方式の 3 次元モデル

福井大学大学院　学生員　谷本　智*
福井大学工学部　正会員　福原輝幸*
山田技研（株）　正会員　渡邊　洋**

1．はじめに　掘削杭熱交換方式（Bore-hole Heat Exchange System，通称 BHES）は，地表面下 100m 前後の地中熱を夏期には冷熱源として，冬期には温熱源として利用するシステムである．本システムは，従来ヨーロッパを中心に岩盤蓄熱（季節蓄熱）システムとして捉えられ，主に空調の熱源に利用されてきたものであり，福井大学の BHES のように帯水層を有する沖積層地盤に適用された事例はこれまでに無い．従って，著者らは BHES と帯水層との熱的相互関係について実験的に[1]，および 2 次元解析モデル[2] により理論的に検討を行ってきた．しかしながら，従来の 2 次元解析モデルでは帯水層の地盤温度を一定としたため，地下水流れからの十分な熱供給がある場合における BHES の採熱特性はつかめたものの，熱交換杭内水温分布の再現計算にあたり，その仮定に限界が観られた[2]．

そこで，本研究では福井大学における BHES の温度計測データを基に 3 次元解析モデルを構築し，数値計算により帯水層地盤と BHES との熱的相互関係を明らかにすることを目的とし，熱交換杭内水温について実測値との比較を試みた．

2．システムの概要　帯水層を有する地盤における BHES の熱利用の概略を模式的に表わしたものが **Fig.1** である．なお，福井大学において 40m および 50m の深さには帯水層（G_1 層（礫），G_2 層（粗砂）と呼称）が存在する．BHES による融雪システムは，熱交換杭（内管（φ56mm）と外管（φ90mm）のポリエチレン製同軸二重管であり，長さは 70m）と循環パイプを有する無散水融雪舗装体とで構成され，0.4kW のラインポンプにより両者の間を流体が循環する．

冬期の場合，舗装体内を通過する間に冷えた流体は内管を下降し，外管を上昇する際に相対的に温度が高い地盤より採熱を行う．温められた流体は再び舗装体へと送られ，舗装体の温度低下を緩和する．

3．解析モデルと解析条件

3.1　熱輸送理論　熱交換杭内管，外管および地下水流れの無い地盤の熱輸送は，それぞれ以下の式(1)～(3)により与えられる．

熱交換杭

$$(\rho c)_W \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_W \frac{\partial^2 T_i}{\partial z^2} - (\rho c)_W U_i \frac{\partial T_i}{\partial z} + \alpha_i (T_o - T_i)\eta_i \quad (1)$$

$$(\rho c)_W \frac{\partial T_o}{\partial t} = \lambda_W \frac{\partial^2 T_o}{\partial y^2} - (\rho c)_W U_o \frac{\partial T_o}{\partial y} - \alpha_i (T_o - T_i)\eta_i + a_1 \left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial x}\bigg|_{x=x_o} + \lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial z}\bigg|_{z=z_o} \right)\eta_o \quad (2)$$

地下水流れの無い地盤

$$(\rho c)_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_G \frac{\partial T_G}{\partial z}\right) \quad (3)$$

ここに，$(\rho c)_W$：流体の体積熱容量，$(\rho c)_G$：地盤の体積熱容量，λ_W：流体の熱伝導率，λ_G：地盤の熱伝導率，α_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，x：水平地下水流れ方向，y：鉛直方向，z：水平地下水流れ直行方向，η_i：内管微小要素の体積に対する周囲面積の比，

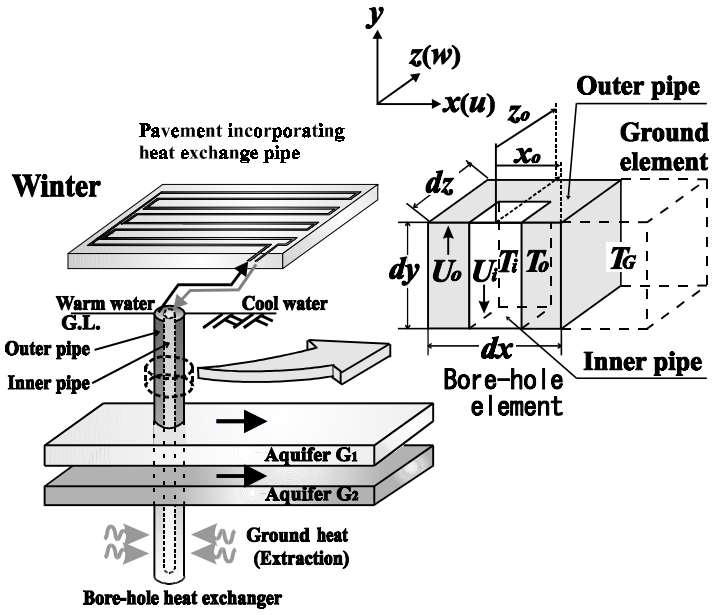

Fig.1　帯水層を横切る BHES の熱移動概念図

キーワード：掘削杭熱交換方式（BHES），地中熱，帯水層，熱移動
＊　〒910-8507　福井県福井市文京 3-9-1　TEL　0776-23-0500 (2809)　FAX　0776-27-8746
＊＊　〒918-8015　福井県福井市花堂南 2-5-12　TEL　0776-36-0460　FAX　0776-36-0623

η_o：外管微小要素の体積に対する周囲面積の比，x_o：中心から外管壁までの x 方向距離，z_o：中心から外管壁までの z 方向距離，a_1：地盤温度勾配補正係数である．

3.2 帯水層中の熱・水分移動　帯水層中の地下水流れは水平 2 次元とし，熱対流の影響は無視して連続式に従うとする．

$$\frac{\partial U_{Gx}}{\partial x}+\frac{\partial U_{Gz}}{\partial z}=0 \tag{4}$$

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．

一方，帯水層地盤における熱輸送は式(5)により与えられる．

$$(\rho c)_G\frac{\partial T_G}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_G\frac{\partial T_G}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_G\frac{\partial T_G}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_G\frac{\partial T_G}{\partial z}\right)-(\rho c)_W U_{Gx}\frac{\partial T_G}{\partial x}-(\rho c)_W U_{Gz}\frac{\partial T_G}{\partial z} \tag{5}$$

3.3 解析条件　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．初期地盤温度は y 方向のみに変化し，x−z 面内では一様とみなす．計算には積分有限差分法を用いる．なお，熱交換杭は **Fig.1** に示すように，周長を同じにした形で矩形要素に置き換える．

4．熱交換杭内水温分布　**Fig.2** は 1998 年 1 月 2 日のシステム稼動時における熱交換杭内水温を 1 時間毎に示したものである．また，図中の実線および破線は，それぞれ 3 次元および 2 次元（帯水層において T_G = *const.*）モデルによる計算値である．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（内管・外管水温は同じ）かつ定常である．稼動後，水温は外管において上昇が顕著となる．計算値において，2 次元モデルは 3 次元モデルよりも高い値を示す．これは，2 次元モデルにおいて，帯水層温度を一定と仮定したことに起因する．しかしながら，両計算結果は実験結果を良好に再現する．

Fig.3 は，システムが停止した 10:00 以降の 10 時間にわたる熱交換杭内水温の上昇過程を示す．停止 2 時間後の 12:00 では，内管に比べ外管の水温回復は早いが，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．両計算結果を比較すると，2 次元モデル（破線）において帯水層（G_1 層および G_2 層）地点での水温回復は過大に評価されるのに比べ，3 次元モデル（実線）では実測値をより正確に再現する．

5．おわりに　以上の結果より，帯水層と熱交換杭との熱的相互関係を詳しく知るためには，３次元解析モデルにより地下水流れを考慮する必要がある．今後は，本解析モデルを用いて BHES が地下水流れに及ぼす熱的影響を検討する．

参考文献　1）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.
2）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.

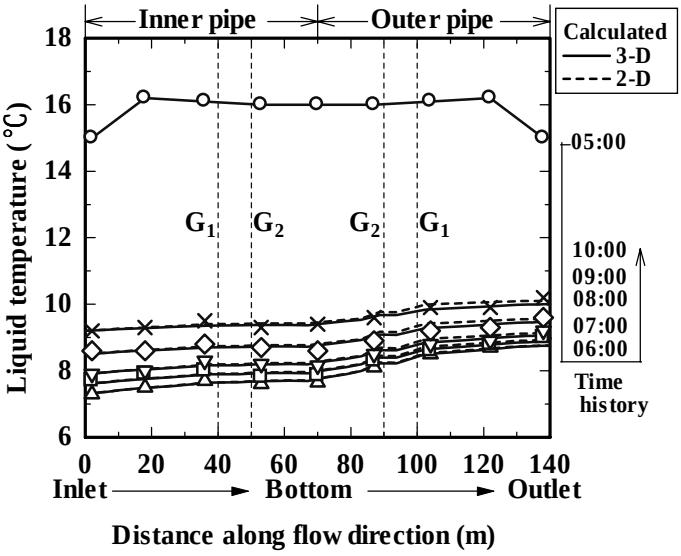

Fig.2　熱交換杭水温分布の経時変化
（1998 年 1 年 2 日：システム稼動時）

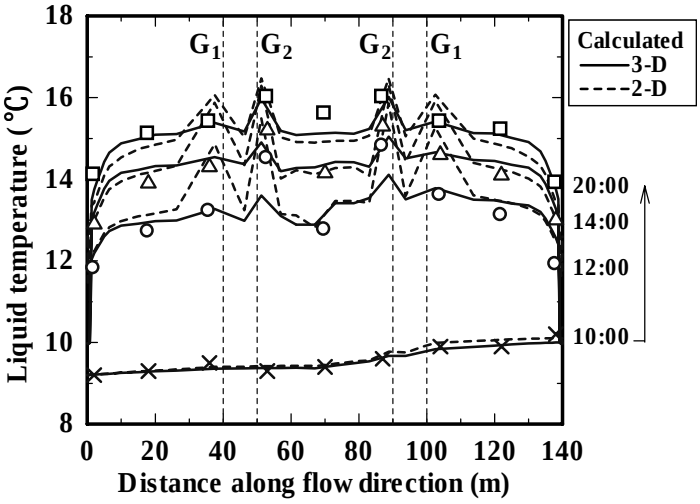

Fig.3　熱交換杭水温分布の経時変化
（1998 年 1 月 2 日：システム停止時）