3次元 Bore-hole Heat Exchange System 数値解析モデルの検証

福井大学工学部	学生員	長尾 泰*
福井大学工学部	正会員	福原輝幸*

1.はじめに 筆者らはこれまでに沖積層地盤における掘削杭熱交換方式 (Bore-hole Heat Exchange System:以下 BHES と記述)の杭内水温,周辺地盤温度の挙動について検討を行ってきた¹⁾.言うまでもなく杭内水温は地盤の温度場が正確に解かれた時,初めて精度よく計算される.従って地下水流れを含む複雑な熱・水分移動場よりは岩盤のような単純な熱伝導場の方が BHES 計算モデル,特に杭内流体と地盤との間の熱移動を精度よく評価するのにふさわしい.

そこで本研究では我が国において唯一,兵庫県美方郡村岡町道の駅「ハチ北」の花崗岩地盤中に施工されている BHES のデータを用いて,これまで提案してきた数値解析モデル¹⁾の妥当性を検証した.

2. システムの概要 道の駅「ハチ北」における BHES の熱交換杭は,長さ100m,直径146mmの掘 削井中に埋設された内管(56mm,肉厚3mm)と 外管(90mm,肉厚4mm)のポリエチレン製同軸 二重管であり,無散水融雪舗装体と連結する.冬 期の場合,舗装体内を通過する間に冷やされた流 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.なお,ポンプ循環流量は38(l/min)である.



Fig.1 BHES の熱移動概念図

3.1 各境界条件における熱エネルギー基礎方程式

3.解析モデルおよび解析条件

熱交換杭内管,外管および地盤内の熱エネルギー基礎方程式は,それぞれ以下の式(1)~(3)で与えられる. 勢交換杭

内管:
$$(\rho c)_{w} \frac{\partial T_{i}}{\partial t} = \lambda_{w} \frac{\partial^{2} T_{i}}{\partial y^{2}} - (\rho c)_{w} U_{i} \frac{\partial T_{i}}{\partial y} + \alpha_{i} (T_{o} - T_{i}) \eta_{io}$$
 (1)

外管:
$$(\rho c)_{w} \frac{\partial T_{o}}{\partial t} = \lambda_{w} \frac{\partial^{2} T_{o}}{\partial y^{2}} - (\rho c)_{w} U_{o} \frac{\partial T_{o}}{\partial y} + a_{1} \left(\lambda_{G} \frac{\partial T_{G}}{\partial x}\Big|_{x=x_{o}} + \lambda_{G} \frac{\partial T_{G}}{\partial z}\Big|_{z=z_{o}}\right) \eta_{oo} - \alpha (T_{o} - T_{i}) \eta_{oi}$$
 (2)

地盤

$$\left(\boldsymbol{\rho}\boldsymbol{c}\right)_{G}\frac{\partial \boldsymbol{T}_{G}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{x}}\left(\boldsymbol{\lambda}_{G}\frac{\partial \boldsymbol{T}_{G}}{\partial \boldsymbol{x}}\right) + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{y}}\left(\boldsymbol{\lambda}_{G}\frac{\partial \boldsymbol{T}_{G}}{\partial \boldsymbol{y}}\right) + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{z}}\left(\boldsymbol{\lambda}_{G}\frac{\partial \boldsymbol{T}_{G}}{\partial \boldsymbol{z}}\right) - \boldsymbol{a}_{1}\left(\boldsymbol{\lambda}_{G}\frac{\partial \boldsymbol{T}_{G}}{\partial \boldsymbol{x}}\Big|_{\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_{o}} + \boldsymbol{\lambda}_{G}\frac{\partial \boldsymbol{T}_{G}}{\partial \boldsymbol{z}}\Big|_{\boldsymbol{z}=\boldsymbol{z}_{o}}\right)\boldsymbol{\eta}_{Go}$$
(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_i :内管内水温, T_o :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, α :内管の熱貫流率, U_i :内管流速, U_o :外管流速, η_{io} :内管の微小要素体積に対する内管周囲面積の比, η_{oi} :外管の微小要素体積に対する内管周囲面積の比, η_{oo} :外管の微小要素体積に対する内管周囲面積の比, η_{co} :内管の微小要素体積に対する内管周囲面積の比, η_{co} :内管の微小要素体積に対する内管周囲面積の比, a_i :温度勾配補正係数(=1.5), t:時間, x,z:水平方向座標, y:鉛直方向座標である.

*〒910-8507	福井県福井市文京 3-9-1	TEL	0776-23-0500 内線	2809 FAX	0776-27-8746
1910-0307	他开宗他开心又出 2-2-1	IEL	0//0-23-0300 内脉	2009 FAA	0//0-2/-8

3.2 境界条件 表層地盤温度および杭流入水温は 1 時間毎の実測値が用いられ,実測値間は線形変 化と仮定した内挿値が与えられる.解析領域底面 (y=130m)の地盤温度は16.8 で一定とし,解析 領域側面(x=z=14m)を横切る熱フラックスは無 いものとする.

4.解析モデルの妥当性の検証と考察 Fig.2 は 2001年1月1日から2日のシステム稼動時(16:00 ~8:00)における杭内水温を適時示したものであ る.図中の実線は計算値であり,シンボルは実測 値である.稼動前の16:00における水温分布は, 横軸の100mを中心としてほぼ左右対称に近いが, 外管水温は内管水温よりも若干高い.稼動後の翌 日1:00から8:00までは内管よりも外管において 昇温が顕著となる.計算結果は実測値を概ね良好 に再現する.

Fig.3は,システムが停止した8:00以降の5時 間に亘る杭内水温の上昇(回復)過程を示す.回復 過程初期では内管から外管へ移行した直後,すな わち内管底部から外管へ向かう間での昇温が顕著 である.福井大学のBHESでは杭底部が丁度帯水層 の影響を受けているために,この外管底部での著 しい昇温は見出し難かった.その後は時間の経過 と共に同深度の内管水温と外管水温はほぼ等しく なる.水温回復過程においても計算結果と実測値 は概ね良好に一致する.

Fig.4 は,システム稼動中における地盤から採 熱された地中熱エネルギーを融雪面積で除した融 雪エネルギーフラックスの経時変化を表わす.シ ステム稼動直後の2時間を除けば計算結果は実測 値をほぼ再現しており,融雪エネルギーフラック スは平均124(W/m)となる.

5. おわりに 本研究により採熱過程および水温 回復過程の再現計算を通して3次元 BHES 数値 解析モデルの妥当性が検証された.

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, II, 1999.2)谷本智・福原輝幸・渡邊洋:沖積層地盤における掘削杭熱交換方式の3次元モデル,第 55回年次学術講演会, II,2000.



(システム稼動時)