鋼管杭による土壌採熱実験と採熱量の予測

EXPERIMENTAL STUDY ON HEAT COLLECTION FROM THE SOIL USING
A STEEL PIPE PILE AND ESTIMATE OF THE HEAT COLLECTION RATE

森野仁夫*, 岡 建雄**, 庄子博幸***

Kimio MORINO, Tatsuo OKA and Hiroyuki SYOUJI

For the purpose of using soil as a heat source, we conducted a long-term heat collection experiment employing a steel pipe pile as a heat exchanger with soil. From the experimental data, we confirmed that the quantity of heat collected from the soil per day was to be about 23kWh and the high performance of coefficient (COP=3.3) for the GSHP, in a stationary state. Numerical calculation results agreed well with the long-term experimental results, which showed that the calculation method could estimate the heat collected rate from the soil during a long-term operation of the heat collection system.

Keywords: steel pipe pile, ground coupled heat pump, ground heat collection, simulation
鋼管杭、土壌熱源ヒートポンプ、土壌採熱、シミュレーション

1. はじめに

土壌をヒートポンプの熱源として利用する技術の研究開発は、自然エネルギー利用技術や代替エネルギー開発の一段として位置づけられ、古くから国内外で行われてきた。近年においては1970年代後半から北欧や北米で研究開発が盛んに行われ¹⁾、Boseらは土壌熱源ヒートポンプの技術概念を分類し設計方法をまとめている²⁾。このような経緯を背景に、北欧や北米では空調や給湯を対象としたヒートポンプ熱源としての土壌の利用が積極的に進められている^{3), 4)}。

わが国においては、落藤らが水平管方式、垂直管方式および直膨方式の土壌熱源ヒートポンプについて、空調や融雪を対象にした研究を行っており^{5), 6)}、最近では、土壌の凍結・融解を考慮した実験と理論解析を進めている⁷⁾。西岡らは寒冷地における垂直管方式による土壌採熱ヒートポンプの適用可能性を、北海道各地における実証実験と解析によって明らかにしている⁸⁾。松本らは垂直管方式について降雨や土壌の水分移動を考慮した実験

と解析を行い、土壌のヒートポンプ熱源としての有効性を示している⁹⁾。また、大橋らは建物の地下外壁を利用した方式を提案し¹⁰⁾、竹内・宮本らは比較的温暖な積雪地域を対象として、ヒートポンプを用いずに垂直管で採熱を行う融雪システムの研究開発を行っている¹¹⁾。

しかし、現状においてわが国では土壌熱利用システムが実用化されている例は少なく、北海道や北陸地方などの寒冷地や塩害の被害が大きい地域における空気熱源ヒートポンプの代替としての利用や^{8), 12)}、地下水を汲み上げない点が評価されての融雪用熱源としての利用¹³⁾など、数件の実施例が見られる程度である。

この原因の一つとしては土中へ埋設する熱交換器の設置費用が高く、他のエネルギー供給システムと比較してトータルコストの面で経済的に優位な水準には達していない点がある。この点で、建築基礎に用いられる鋼管杭を土壌との熱交換器として使用することができれば建設コストが軽減され、土壌熱利用システムが実用的な競争力を持ったシステムとして成立する可能性が出てくる。

* 清水建設(株)技術研究所 主任研究員・
博士(工学)

** 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

*** 宇都宮大学工学部建設学科 大学院生・工修

Institute of Technology, Shimizu Corp., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Utsunomiya University, Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Utsunomiya University, M. Eng.

本研究は、このような観点から鋼管杭を土壤熱利用システムの熱交換器とする可能性に着目し、鋼管杭の土壤との熱交換特性を実験的に明らかにすると共に、システムの熱的性能を定量的に評価するための理論解析手法を開発することによって、その設計方法を確立することを目的としたものである。

筆者らは、これまで鋼管杭を土壤との熱交換器とした放熱および採熱方法について実験的な研究を行い、鋼管杭と土壤との熱交換特性を明らかにすると共に、短期の実験結果を基にした放熱量や採熱量の予測方法について報告し¹⁴⁾、また、鋼管杭による土壤採熱システムの比較的長期にわたる熱交換特性について報告して来た^{15)、16)}。

土壤を採熱源として利用する場合、鋼管杭のような土中に埋設した採熱管で採熱できる熱量は、初期には大きな値を示すが土壤の熱応答性が低いいため時間の経過とともに減少し、土壤からの熱回収量と平衡した時点で安定する。したがって、長期にわたって使用する土壤採熱システムの設計に際しては、土壤との熱交換が安定した状態における採熱量を知ることが必要となる。

この点で既報¹⁴⁾で示した結果は短期の実験を基にしており、実験的には、土壤熱利用システムの長期にわたる運転特性を明らかにすること、また、解析的には、計算モデル上のいくつかの仮定が、長期の計算においても成立することを実験結果との検証で確認し、土壤熱利用システムの長期性能評価に対する、本計算方法の適用性を実証することが課題として残されていた。

本報では、1993年11月から半年余りにわたって行った長期採熱実験の結果を基に、土壤採熱システムの長期運転特性を明らかにした結果を示すと共に、計算モデルの長期性能予測への適用性を検討した結果について述べる。

2. 実験方法

2.1 実験装置と計測方法

実験装置の概要を図1に示す。鋼管杭は外径600mmφ、肉厚14mm、長さ22.5mの打込み杭で土中に垂直に打設されている。鋼管杭は底部を閉塞して内部に水を封入し、冷凍機への水の循環用に2本の塩化ビニル管(呼び径40mmφ)を、一方はその開口が杭上端から100mm、他方は杭底部から300mmに位置するように設置している。鋼管杭内部の容量は約5.9m³である。実験装置の機器仕様を図1中に示す。冷凍機は低温用ブライン冷凍機で出力は10.5kW(3USRT)、圧縮機入力は3.75kWである。

実験では鋼管杭内部の水を上部から取り出し、下部へ注水するように循環させて冷凍機の熱源水とする採熱運転を行った。採熱運転は9時～17時までを運転時間とし、循環水配管の凍結防止のため鋼管杭内部の平均水温が3℃となった時点で停止するようにして1日サイクルで繰

り返し、休日は採熱を行わず自然状態に放置した。実験期間の循環水量は、実験開始から第2週まで3.6m³/h、第3週と第4週は5.0m³/hとしたが、以降は3.0m³/hで一定とした。鋼管杭内部の水の換水回数は循環水量3.0m³/hにおいて約0.5回/hである。実験は1993年11月25日から1994年6月30日までの約7カ月間にわたって行った。

主な計測点を図1中に示す。鋼管杭内部水温の垂直分布(計測点①～⑫)、冷凍機出入口水温(⑬、⑭)、鋼管杭(⑰、⑱)および冷却塔の出入口水温(⑮、⑯)はT熱電対で計測した。冷凍機(⑲)と冷却塔(⑳)の循環流量は電磁流量計で計測し、冷凍機と冷却塔ならびに冷水循環ポンプと冷却水循環ポンプの消費電力量は積算電力量計で計測した。計測は自動計測で行い、データは5分間隔で記録した。鋼管杭周囲の土壤温度は計測していない。また、参照データとして実験場所から約50m離れた地点の観測孔で実験期間にわたる土壤温度の垂直分布を深度40mまで15点、6時間おきに計測した。

2.2 地盤性状

実験場所の土質は図2の地盤柱状図に示すとおり、シルトと細砂で代表される。ボーリング時の孔内水位はGL-1.8mであり、実験場所の土壤は飽和状態にあると判定される。土質試験によって得られた土壤の物性値を表1に示す。ここにおいて、土壤の密度、土粒子の密度、透水係数、含水比、間隙比は、実測値の加重平均値である。土壤の熱伝導率は、含水比、間隙比と土壤の乾燥密度から、Kersten と Johansen の実験式¹⁷⁾を参考にして求めた。土壤の比熱は含水比と土壤成分の構成比から決定した。熱拡散率は $a = \lambda / (C_p \cdot \gamma)$ の関係から求めた。

3. 計算方法

3.1 基礎方程式

土壌中の熱拡散は、3次元非定常熱伝導方程式に地下水の流れを考慮して(1)式で表現される¹⁸⁾。

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

土壌と鋼管杭内部の水との伝熱量 q_e は、仮想流体温度 T_f ¹⁹⁾ を用いて(2)式より求められる。

$$q_e = 2\pi\lambda(T_f - T_s) / \ln(r_p / (r_p - \Delta r)) \quad \dots\dots\dots (2)$$

鋼管杭内部の水温 t_w は平均温度として扱い、(3)式により n 時点の第1次仮定水温 t'_{wn} を算出し、鋼管杭内部水温が t'_{wn} に $\Delta\tau$ 時間保持されるとして、(1)式より土壌温度分布を計算した後、(2)式より q_e を求めて(4)式により算出する。この過程では収束計算を行っている。

$$t'_{wn} = t_{wn-1} \times (1 - f_w / V_p) + t_i \times f_w / V_p \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$t_{wn} = t'_{wn} - q_e / V_p / \gamma_w / C_{pw} \quad \dots\dots\dots (4)$$

鋼管杭内部の水の吸放熱量 q_w は、鋼管杭内部の水温変化より(5)式で求め、

$$q_w = V_p \times (t_{wn} - t_{wn-1}) \times \gamma_w \times C_{pw} \quad \dots\dots\dots (5)$$

鋼管杭からの採熱量 q_r は(6)式から求める。

$$q_r = q_e + q_w \quad \dots\dots\dots (6)$$

一方、採熱運転が停止している場合は、鋼管杭内部水温が $\Delta\tau$ 時間前の水温 t_{wn-1} に $\Delta\tau$ 時間保持されるとして、(1)式より土壌温度の分布を求め、(2)式より q_e を計算し、 t_{wn} を(4)式より算出する。

土壌温度の数値解析は、陽解法による差分方程式によって行った。計算方法の詳細は、既報¹⁴⁾を参照されたい。

ここで T : 土壌温度[°C] a : 熱拡散率[m²/h]
 u_r, u_θ : r 方向、 θ 方向の地下水流速[m/h]
 λ : 土壌の熱伝導率[W/mK] r_p : 鋼管杭半径[m]
 T_s : 鋼管杭表面の土壌温度[°C]
 f_w : 循環水流量[m³/h] V_p : 鋼管杭内部の容積[m³]
 t_i : 循環水入口温度[°C] τ : 時間間隔[h]
 γ_w : 水の密度[kg/m³] C_{pw} : 水の比熱[kJ/kgK]
 r, θ, z : 円筒座標系の半径・接線・深さ方向

3.2 計算条件の設定

土壌温度の計算領域は円筒座標系の半径方向に鋼管杭表面から5m、深さ方向に地表面から25.5mの範囲とした。計算条件として、初期土壌温度は、実験場所から十分に離れた土壌温度の記録より計算領域全体にわたって17.0°Cとした。境界条件としての地表面温度は土壌温度と同一の17.0°Cで計算期間中一定とした。採熱運転時の鋼管杭内壁の熱伝達率は、竹内らの文献¹¹⁾を参考に(7)式から求め $\alpha = 58 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とした。

深度 m	土質記号	土質名
3.9		砂質シルト
7.4		瓦礫混り シルト質細砂
16.9		砂質シルト
26.6		シルト
30.0		砂質粘土

図2 土質柱状図

表1 土壌の物性値

属性	物性値
熱伝導率 [W/(m·K)] λ	0.93
密度 [kg/m ³] γ	1700
比熱 [kJ/(kg·K)] C_p	1.88
熱拡散率 [m ² /h] a	1.1×10^{-3}
透水係数 [m/h] k	3.6×10^{-6}
含水比 [%] w	45
間隙比 [-] n	1.4
土粒子の密度 [kg/m ³] ρ	2650

$$\left(\frac{\alpha D}{\lambda_w} \right)^3 = (3.657)^3 + \left\{ \frac{0.75 (RaD/L)^{1/4}}{(1 + (0.492/Pr)^{9/16})^{4/9}} \right\}^3 \quad \dots\dots (7)$$

ここで D : 鋼管杭の直径[m] L : 鋼管杭の長さ[m]
 λ_w : 水の熱伝導率[W/mK]
 Ra : レイノルズ数[-] Pr : プラントル数[-]

計算領域の土壌は表1の物性で均一と想定した。計算において計算時間間隔 $\Delta\tau$ は0.01h、円筒座標系における半径方向の分割幅 Δr は0.025m、 θ 方向の分割幅 $\Delta\theta$ は30°、深さ方向の分割幅 Δz は1.5mとし、水位ポテンシャルは0.01m/mとした。計算において採熱運転中は鋼管杭入口温度と冷水循環流量を計算入力値として与えた。

4. 実験結果および計算値との比較

実験結果の整理では以下に示す記号で各熱量を表した。

QQP: 鋼管杭からの採熱量
 QQG: 土壌からの熱伝導量
 QQW: 鋼管杭内部水の吸放熱量
 QQR: 冷凍機採熱量
 QQC: 冷凍機供給熱量
 QLOS: 陸上部における冷水循環システムの熱損失

ここにおいて、QQPは鋼管杭内部の水が熱源水として冷凍機へ供給した熱量であり、冷水循環流量と循環水の鋼管杭出入口における温度差から求めた。QQWは冷凍機の運転・停止に伴う鋼管杭内部水の吸放熱量で、鋼管杭内部の水の熱容量と、計測点①から⑫を容積加重平均した鋼管杭内部平均水温の単位時間当たりの変化から求めた。QQGは鋼管杭内部水への周囲土壌からの熱伝導量であり、直接計測することができなかったため、 $QQG = QQP - QQW$ として求めた。QQRは冷凍機

図3 鋼管内部水温の変動状況(実測値と計算値)

の蒸発器が循環水から採取した熱量で、冷水循環流量と冷凍機の蒸発器出入口温度差から求めた。なお、実験では陸上部における冷水循環系統の熱損失が存在するため、 $QQR = QQP + QLOS$ となる。 QQC は、本システムの熱出力となる冷却水の放熱量で、冷却水の循環流量と冷凍機の凝縮器出入口温度差から求めた。

本報では、採熱実験データのうち1993年11月29日から1994年6月26日までの30週間の実験結果をまとめた。

なお、熱量計算は5分間隔の計測データの1時間毎の平均値を基にして行った。また、図3および図4に示す実験結果と計算値の比較においては、実測値および計測値とも1時間毎の値を示している。

4.1 鋼管杭内部水温の変動

鋼管杭内部の平均水温について、実測値と計算値の変動状況を図3に示す。実測値より鋼管杭内部水温は、採熱運転開始から数日で急激に低下し、採熱運転停止後、また土曜、日曜や長期の運転休止期間に自然回復しているが、採熱運転の繰り返しにより徐々に低下する傾向を見せている。しかし、1週間毎の運転サイクルにおける初日の採熱運転開始直前の水温を見ると、3月以降は7℃程度で、5月の連休以降を含めてほぼ一定値となっており、採熱運転に伴う鋼管杭内部水温の変化のパターンは、3月以降ほぼ定常的な状態となっているものと判断される。

計算値と実測値の差は初期において1～2℃程度となっているが、1994年1月以降は採熱時および採熱停止後とも、また、長期運転停止時の自然温度回復状況を含めて、実測値と良い一致を示している。実測値に対する計算値の誤差は、実験期間全体の平均で-0.032℃であり、その標準偏差は0.3℃であった。

4.2 鋼管杭からの採熱量

鋼管杭からの採熱量と土壌からの熱伝導量の実測値と計算値の変動状況を図4に示す。図において正の値は鋼管杭からの採熱量を示し、負の値は土壌からの熱伝導量を示している。

図4より鋼管杭からの採熱量の実測値について時間当たりのピークの変化を見ると、採熱運転開始直後には20kWと高い値を示しているが、採熱運転の継続にしたがって徐々に低下し、実験終盤では8kW程度となっている。採熱運転パターンを5日運転2日休止としているため運転休止後の採熱量が大きく、週末に向かって徐々に低下していく傾向がある。長期運転休止後は水温が回復しているため運転時間が長くなり1日当たりの採熱量が大きくなっている。採熱運転時間は、実験初期では8時間程度であったが、第3週以降実験終了までは休日明けで5時間程度、それ以外の日は3～4時間程度であった。

鋼管杭からの採熱量の1週間の合計をその週の運転日数で除した1日当たりの平均熱量の変化を図5に示す。週毎の日平均採熱量は第1週には約70kWh/日と高い値を示しているが第4週にかけて急激に低下し、長期運転休止後に一時回復したのち徐々に低下して行き、実験終盤では約23kWh/日で安定した状況となっている。

採熱量の計算値は、時間当たりのピークが実測値と比べてやや小さいものの実測値の変化の傾向と良く一致している。実測値に対する計算値の誤差は、運転時間の平均で-0.41kWであり、その標準偏差は1.9kWであった。図5に示した週毎の日平均採熱量も実験初期を除いて実測値と良く一致している。鋼管杭からの採熱量の実験期間の総計は実測値で3945kWh、計算値で3716kWhであり、実測値に対する計算値の差は-6%であった。

図4 鋼管杭からの採熱量と土壌からの熱伝導量の変動状況（実測値と計算値）

4.3 土壌からの熱伝導量

図4において土壌からの熱伝導量の実測値の変化を見ると、土壌からの熱伝導量は、採熱運転開始と共に鋼管杭内部水温が低下するため急激に増加するが、採熱運転中にも次第に低下を始めていることが分かる。この原因は土壌の熱拡散率が小さいために、冷凍機の運転時間における土壌からの採熱領域が鋼管杭近傍に限られ、採熱による土壌温度の低下速度が、冷凍機の運転による鋼管杭内部水温の低下速度より大きくなり、両者の相対的な温度差が徐々に小さくなって行くことによるものと考えられる。また、採熱運転終了後も周囲土壌からの熱回収は継続しているが、冷凍機運転停止後は鋼管杭内部水温が土壌からの熱回収によって徐々に上昇するため、周囲土壌との温度差はさらに小さくなって行く。このため、土壌からの熱伝導量は時間の経過と共に徐々に低下して

おり、週末の運転休止2日目にはほぼ0に漸近している。

実測値に関して時間当たりの熱伝導量のピークの変化を見ると、採熱運転開始直後は5kW程度を示しており、長期運転休止後にも土壌温度が自然回復しているため大きな値となっているが、採熱運転の繰り返しのともない徐々に低下して行き、第30週では2kW程度となっている。

土壌からの熱伝導量の1週間の合計をその週の運転日数で除した1日当りの平均熱量の変化を図6に示す。週毎の日平均熱伝導量は第1週には約60kWh/日を示しているが第4週にかけて急激に低下し、長期運転休止後に回復したのち採熱運転の継続と共に徐々に低下して行き、実験終盤では約23kWh/日で安定した状況となっている。

図4に示した土壌からの熱伝導量の実測値と計算値を比べると、計算値はピークにおいて実測値よりやや小さいものの実測値の変化と良く一致している。実測値に対

する計算値の誤差は、全時間の平均で-0.14kWであり、その標準偏差は0.78kWであった。また、図6に示す週毎の日平均熱伝導量の計算値も、実験初期を除いて実測値と良く一致している。土壌からの熱伝導量の実験期間の総計は実測値で3837kWh、計算値で3646kWhであり、実測値に対する計算値の差は-5%であった。

実測値を基にした1週間当たりの鋼管杭からの採熱量に対する土壌からの熱伝導量の割合を図7に示す。鋼管杭からの採熱量に対する土壌からの熱伝導量の割合は、採熱運転開始直後や鋼管杭内部水温が回復している長期の運転休止直後を除いてほぼ100%であり、本実験の採熱運転条件では、鋼管杭からの採熱量のほとんどは土壌からの熱伝導量でまかなわれている。

4. 4 冷凍機採熱量と冷凍機供給熱量

冷凍機採熱量と冷凍機供給熱量について、それぞれの熱量の1週間の合計をその週の運転日数で除した、1日当りの平均熱量の変化を図8に示す。

週毎の日平均冷凍機採熱量は採熱初期には80kWh/日程度であり、実験中盤にかけて30kWh/日程度の最低値を示し、実験終盤にかけては33kWh/日程度と若干増加している。冷凍機採熱量と図5に示した鋼管杭からの採熱量の差は循環水が鋼管杭を出た後の冷凍機回りの配管系からの熱損失によるものであり、冷凍機採熱量に対する配管系からの熱損失の割合は2月、3月の寒冷期には10%程度であるが、4月以降の外気温が高い季節には30%に達している。実験終盤にかけて冷凍機採熱量が多少増加したのは配管系統における熱損失の影響を受けたもので、本実験では熱損失が採熱システムの運転にプラスの方向に作用している結果となった。

冷凍機供給熱量の週毎の日平均熱量は、採熱初期には100kWh/日程度であり、冷凍機採熱量と同様に実験中盤に約40kWh/日の最低値を示し、実験終盤では45kWh/日程度に増加した。実験終盤にかけて冷凍機供給熱量が増加したのは、冷凍機採熱量が増加したためである。

4. 5 採熱運転における定常状態の判定

鋼管杭からの採熱量、土壌からの熱伝導量、冷凍機採熱量ならびに冷凍機供給熱量について、それぞれの第30週の日平均熱量を基準とした各週の日平均熱量の割合の変化を図9に示す。

図9より各熱量の比率は第19週以降ほぼ1.0となっており、採熱運転は定常状態になっていると判断される。

定常状態における各熱量の日平均熱量は表2に示すとおり、鋼管杭からの採熱量は23kWh/日、土壌からの熱伝導量は23kWh/日、冷凍機採熱量は30kWh/日、冷凍機供給熱量は40kWh/日となった。各熱量の第1週の日平均熱量と比べた定常状態における値の割合は、鋼管杭からの採熱量がおよそ30%となり、その他の熱量についてはいずれも40%程度となった。

図5 鋼管杭からの採熱量（週当たりの日平均値）

図6 土壌からの熱伝導量（週当たりの日平均値）

図7 採熱量に対する土壌からの熱伝導量の割合

図8 冷凍機供給熱量と冷凍機採熱量

図9 各種熱量の変化の割合

なお、本論文で述べる定常状態とは、土壤採熱システムの半年程度の運転期間において、鋼管杭と土壤との熱交換量が安定的に一定と見なせる状態を指している。

4. 6 成績係数

冷凍機供給熱量 (Q_{QC}) と冷凍機採熱量 (Q_{QR}) に関する成績係数 (COP) の変動状況を、冷凍機の蒸発器と凝縮器の出入口平均水温を週平均値として求めた値と共に図10に示す。ここでCOPは、週間の冷凍機供給熱量または冷凍機採熱量を週間の冷凍機消費電力量で除したものである。

冷凍機供給熱量に対するCOPは、運転開始直後は4に近い値を示しているが定常状態では3.3程度となった。冷凍機採熱量に対するCOPは運転開始直後は3程度を示しているが定常状態では2.4程度となった。本実験における冷凍機供給熱量に対するCOPは、低水温熱源での運転にもかかわらず比較的高い値を示した。

この時の蒸発器出入口水温の平均値は、第9週目以降ほぼ安定して約4℃で推移している。一方、凝縮器の出入口平均水温は、放熱に冷却塔を使用しているため外気温の季節的変動の影響を受けて変化しており、第26週以降の凝縮器温度の上昇が、採熱運転が定常状態に達したと推定される第19週以降もCOPの低下傾向が続いている原因となっている。

5. 計算モデルの長期性能評価への適用性

本計算法では、土壤採熱システムの性能評価において、鋼管杭の埋設深度が深い場合には地表面からの外界気象の影響は無視できると仮定しており、また、鋼管杭内部水温を平均値で扱っている。

このような計算上の仮定が成立しなければ、短期の解析において計算値と実測値が良い一致を示しても、長期の解析では実測値との誤差が累積されて現れる可能性がある。本計算方法が、鋼管杭による土壤採熱システムの長期運転性能の評価に対して適用できることを確認するためには、このような仮定が長期の計算においても成立することを実験結果との検証で明らかにする必要があり、また、本報告で得られた結果の一般性についても検討が必要とされる。

5. 1 地表面の境界条件の扱い

本実験において、鋼管杭から水平距離で約50m離れた地点で計測した、土壤温度の垂直分布の変動状況を図11に示す。図11より、外界気象の影響は浅いところに留まっており、地下7m以深の土壤温度は、ほぼ一定であることが分かる。実験期間における各深さの計測点の平均温度は、図11中に示すようになり、また、地下4mの地点では17.2℃の平均値を基準に±1.2℃の等振幅で変動していることから、実験期間中の土壤温度は、4m以深で

表2 定常状態における各熱量の初期値に対する割合

熱量 [kWh/日]	初期値	定常値	定常/初期
鋼管杭からの採熱量	72	23	0.32
土壤からの伝熱量	57	23	0.40
冷凍機採熱量	80	30	0.38
冷凍機供給熱量	101	40	0.40

図10 冷凍機供給熱量に対する成績係数

深さ[m]	1	4	7	10	20	40
土壤温度[℃]	15.2	17.2	17.3	17.3	16.8	16.6

図11 土壤温度の垂直分布

17℃程度の均一温度として取り扱うことができると考えられる。

このような土壌温度の変動状況において、本報告では、地表面における外界気象の変動が、土壌採熱システムの熱的性能におよぼす影響は少ないと判断して、3.2に述べたように地表面の境界条件を設定して計算を行った。

この結果、本報告で示した計算結果と実測値の比較において、鋼管杭内部水温の計算結果は、実測値に対して長期にわたって良い一致を示し、また、鋼管杭と土壌との熱交換量の期間積算値の差は10%以内となり、本計算方法によって、鋼管杭による土壌採熱システムの長期の運転性能の予測が、実用上十分な精度を持って可能なことが確認された。

これは、本実験条件においては、土壌採熱システムの運転性能に与える地表面からの外界気象の影響が少ないことを示唆している。

この理由としては、鋼管杭による土壌熱利用システムでは、鋼管杭が地下深くまで埋設されることから土壌温度の変動を受ける部分が少ないこと、また、地下数mから不易層までの間の土壌温度は、深さに応じた一定温度を中心として、外界気象の年周期の変動に対して時間遅れを伴いながら振動するため、計算において地表面の境界温度として設定する不易層の温度から大幅にずれる期間が短いこと、などが考えられる。

また、土壌温度は、地表面における外界気象の変動を受けた結果として形成され、その影響は計測された土壌温度に既に反映されていると考えられることから、深さ方向の土壌温度が均一、あるいは、その垂直分布がほとんど無いと見なせる場合には、鋼管杭による土壌採熱システムの性能計算においては、一般的に、外界気象の影響を考慮しなくても、十分な精度を持った性能評価が可能であると言える。

しかし、外界気象の影響に関する厳密な検証は、実測値を基準として、その変動を考慮した計算との比較で行うべきであり、この点に関しては今後の課題として検討して行きたい。

5.2 鋼管杭内部水温の平均値としての扱い

本計算方法では(3)式に示したように、鋼管杭内部水温を平均温度として扱っている。これは、既報で示した短期実験では、鋼管杭内部の水温がほとんど均一で変化し、顕著な垂直水温の分布が観測されなかったことによる。しかし、今回の実験では既報の実験と比べて、鋼管杭の直径と長さが大きくなり、鋼管杭の容積に対する換水回数が少なくなったため、鋼管杭内部の水温には図12に示すような垂直分布が観測された。

図12は、採熱実験時の鋼管杭内部水温の垂直分布の典型的な変動パターンとして、第14週目の計測結果を示したもので、鋼管杭内部水温の計測点から奇数番号と⑫の

図12 鋼管内部水温の垂直分布とその変動

計測点のデータを示した。換水回数は約0.5回/hであり、計測点①と⑫の温度差は、採熱運転時間において3～3.5℃程度、採熱運転停止後では1.5～3℃程度であり、鋼管杭の長さ方向に直線的な温度勾配を持った温度成層を形成して推移している。

本報告で示した計算では、鋼管杭上下の温度差が最大で3.5℃程度あるものの、鋼管杭内部水温が直線的な温度勾配を示しながら変動しており、温度成層の状況から見て、鋼管杭と土壌との熱交換が深さ方向で均等に行われていると考えられることから、鋼管杭内部水温を平均値として扱っても、交換熱量の積分に関する誤差は小さいと判断して計算を行った。

この結果、本報告で示した計算結果と実測値の比較において、鋼管杭内部水温の計算値は、温度成層を形成した実測値の平均値に対して長期にわたって良い一致を見せ、また、鋼管杭と土壌との熱交換量に関する計算値と実測値との差も十分小さいことから、鋼管杭による土壌採熱システムの長期性能評価において、本計算方法が、十分な精度を持って適用できることが確認された。

これより、実際の現象として鋼管杭内部の水に温度成層が生じて、その深さ方向の温度差が小さく、温度勾配が直線的であるような場合には、鋼管杭による土壌採熱システムの性能予測に対して本計算方法がとっている、鋼管杭内部水温の平均値としての扱いは、妥当ものと判断される。

なお、本計算法が適用できる上下温度差の範囲や、より大きな直径の鋼管杭や地下蓄熱槽などに対する適用性については、今後の検討課題である。

6. まとめ

本報告は、地中に埋設した直径0.6m、長さ22.5mの鋼管杭によって土壌からの採熱実験を行い、鋼管杭と土壌との長期にわたる熱交換特性を明らかにすると共に、既報¹⁴⁾で示した計算モデルの長期にわたる採熱性能の予測に対する適用性を検討したものである。

本研究において得られた結論を要約して以下に示す。なお、ここで示す結論は、本実験条件の範囲で適用されるものである。

1) 実験結果から、

- ① 定常状態における鋼管杭からの採熱量は23kWh/日で、初期採熱量のおよそ3分の1となった。
- ② 定常状態における土壌からの熱伝導量は23kWh/日で初期熱伝導量の約40%となった。
- ③ 定常状態における鋼管杭からの採熱量は、土壌からの熱伝導量によってほぼ100%まかなわれている。
- ④ 冷凍機供給熱量に対するCOPは、定常状態において3.3と高い値を示した。

2) 実験結果と計算結果の比較から、

- ① 鋼管杭内部水温、鋼管杭からの採熱量および土壌からの熱伝導量に関して、計算値は実測値に良好に一致し、本計算モデルが長期の採熱性能の予測に適用できることが確認された。
- ② 実現象として鋼管杭内部の水に温度成層が生じて、その深さ方向の温度差が小さく、温度勾配が直線的であれば、鋼管杭と土壌との伝熱計算においては、鋼管杭内部水温を平均温度として取り扱うことが出来る。

本研究の結果から、鋼管杭を用いた土壌採熱システムの定常状態における熱交換特性を明らかにすることができ、実験結果との検証により既報¹⁴⁾で開発した計算モデルによって、鋼管杭を土壌との熱交換器とした場合の長期の採熱性能の予測が可能であることが確認された。

これによって、鋼管杭を土壌との熱交換器とした土壌採熱システムの長期にわたる信頼性を持った設計が可能になったと判断される。

しかし、本計算方法の適用範囲については、5章で述べたような、さらなる検討の予知が残されており、今後の課題としたい。

今後の土壌採熱システムの実用化に際しては、数年間にわたる周期的な採熱運転に伴う土壌温度の変動状況を評価することが必要であり、今後は、この点についても検討を進めると共に、鋼管杭を利用した土壌熱利用システムのパラメーター解析を進め、土壌熱利用システムの実用化に向けて努力して行きたい。

謝辞

本研究の実施に当たりご指導をいただいた清水建設(株)技術研究所設備技術研究部小林部長と、実験の実施とデータのまとめにご協力いただいた、清水建設(株)技術研究所設備技術研究部内田泰雄君に、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Ball D.A., Fisher R.D. : Design methods for Ground-Source Heat Pumps, US DOE Rep. CONF-830640-5, 1983
- 2) Bose J.E. et al. : Design/Data Manual for Closed-loop Ground-coupled Heat Pump Systems, ASHRAE, 1985
- 3) Mogensen P. : The European Market, 土壌熱源ヒートポンプ国際論文集, pp.19-28, (財)ヒートポンプ技術開発センター, 1991
- 4) Sanner B., Knoblich K. : Subsurface Cold Storage in Ground Coupled Heat Pump Systems, Proceedings -5th Inter. Conf. on Thermal Energy Storage, pp.2.4-1, 1991
- 5) 長野克則、落藤澄、中村真人、中村卓司、西片一成、若山尚之：水平埋設管による土壌の採熱実験と採熱特性のシミュレーション、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.33-36, 1992.10
- 6) 落藤澄、西岡純二、長野克則、中村真人：垂直埋設管を用いた不凍液循環型ヒートポンプによる土壌採熱の実験と解析、空気調和・衛生工学会論文集, No.51, pp.103-111, 1993.2
- 7) 落藤澄、長野克則、山田健一、中村卓司：土壌採熱における直立式ヒートポンプのシミュレーション、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.737-740, 1990.10
- 8) Nishioka J. : Operating Experience with Ground-Source Heat Pump System, Proceedings -The 3rd International Energy Agency Heat Pump Conf., pp.297-306, 1990
- 9) 松本衛、永井久也、牛尾智秋：ヒートポンプ熱源としての地盤熱利用に関する研究、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.217-220, 1993.10
- 10) 大橋一正、中村准二、片山和夫、佐川祐一郎、石黒邦道、末松英樹：建物を利用した地中熱利用ヒートポンプシステムの試算、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.273-276, 1991
- 11) 竹内正紀、木村照夫、宮本重信、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.59-69, 1993.6
- 12) 岡建雄、藤田尊志：土壌熱利用ヒートポンプシステム、建築設備と配管工事, pp.73-77, 1989.10
- 13) 宮本重信：環境にやさしい融雪をめざして、土木学会誌, VOL.78, No.5, pp.6-9, 1993.5
- 14) 森野仁夫、岡建雄：鋼管杭による土壌放熱・採熱に関する研究、日本建築学会計画系論文報告集, No.404, pp.49-57, 1989.10
- 15) 森野仁夫：土壌採熱システムの採熱量計算と鋼管設置面積の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1087-1088, 1992.8
- 16) 庄子博幸、森野仁夫、岡建雄：鋼管杭による長期土壌採熱量の予測に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.443-444, 1994.9
- 17) Farouki O.T. : Thermal Properties of Soils, Trans Tech. Publications, pp.103-107, 1986
- 18) 河原能久、後迫茂、後藤巖：地下水流水中に設置されたヒートパイプ蒸発部の熱伝達解析、第29回水理講演会論文集, pp.887-892, 1985.2
- 19) 建築学大系編集委員会：建築学大系8, pp.315~316、彰国社、1969

(1994年9月8日原稿受理, 1995年5月29日採用決定)