

大深度地中熱交換装置のシミュレーションモデルの開発

三小田 憲 司

Development of Simulation Analysis Model for Borehole Heat Exchanger

Kenji Mikoda

Abstract

Borehole heat exchangers are utilized for various purposes such as heating and cooling, snow melting, anti-freezing of LNG tanks, freezing of food storehouses, and soil-freezing method. This paper describes an analysis method for single-steel-type and U-tube-type borehole heat exchangers under the water table. An equivalent concentric circle model is used for the U-tube-type analysis model, because it is impossible to separate the inner borehole by a calculational element. To ensure that the analysis method is practical, a circular pipe is connected with 3D-cartesian coordinates by a multilateral element method(MEM). The calculation models are demonstrated through comparisons of calculated heat injections from soil with experimental ones.

概 要

大深度地中熱交換装置は、冷暖房、融雪、LNGタンク凍結防止、食糧貯蔵倉庫の冷凍、土壌凍結方法など幅広い形で利用されている。本報告では、地下水水面下の飽和土壌を想定し、大深度地中熱交換装置の中でも代表的かつ利用度の高い井戸鋼管方式とU字管方式について、解析方法を提示した。U字管方式の解析では、埋設孔形状を忠実に分割することは非現実的なので、等価同心円モデルを適用した。また、解析モデルの汎用性を考慮して、土壌には多角形要素法(MEM)を用いて、扱いやすい直交座標系に連結した計算方法を採用した。既存の実験結果と比較評価した結果、井戸鋼管方式とU字管方式の採熱能力を予測できることが確認された。

1. はじめに

大深度の地中熱交換装置は、地中に埋設した密閉型の装置内に流体を循環させて、土壌と熱のやり取りを間接的に行うものである。一般には、冷暖房目的の土壌蓄熱や土壌熱源ヒートポンプが知られているが、その他にも融雪施設、食糧貯蔵倉庫、養魚場、温水プール、LNGタンクの凍結防止、土壌凍結工法などに利用されている。

大深度地下に固定した熱交換装置の熱出力を評価する上で、解析技術は重要であるが、飽和土壌を対象に流れを考慮した解析を行う必要がある。斎藤らは、熱・水分移動モデルで地中熱交換装置の数値解析¹⁾を行ったが、対象は不飽和土壌であった。地下水揚水方式および地熱方式では、飽和土壌の水分移動を考慮したモデルで解析が行われているが、空間分割幅の粗さや、熱交換器部分の熱特性の違いのため、大深度地中熱交換装置に適用するには、かなりの困難が予想される。本報告では、地下水水面下の飽和土壌を想定し、地下水の流れや自然対流を考慮した解析モデルと計算方法を示し、実験データにより検証した。

2. 計算モデルと数値解法

2.1 大深度地中熱交換装置の分類

Fig. 1に垂直式地中熱交換装置の代表的方式を示す。①

の井戸鋼管方式は、掘削孔壁に沿って鋼管やコンクリート管を埋設し、内部を水槽として利用する方式で、400 mm以上の大口径が多い。②のU字管方式は、100~200 mm位の掘削孔にU字型チューブを挿入した後、埋設孔を埋戻して固定するものである。熱出力はやや小さいが、低コスト方式として米国で冷暖房用にかなり利用されている。③の同軸方式は、内管から不凍液を落下させた後、外管から戻る不凍液を循環ポンプで汲み上げる方式で、融雪目的の事例が国内で増えつつある。④のヒートパイプ方式は、密閉真空容器内に封入した作動流体の相変化によって熱移動する方式で、寒冷地で利用されている。

2.2 計算モデル

本報では、大深度地中熱交換装置の中で検証データの得られている井戸鋼管方式とU字管方式について、解析モデルと計算方法を示した。この2つのモデルの計算予測が可能となれば、多くの事例に適用できると考えられる。

2.2.1 井戸鋼管方式の計算モデル 鋼管内の垂直温度分布については、2~3°Cの差である報告²⁾と、10~20°Cの大きな差が生じたとする報告^{3),4)}があるが、両者の差は利用温度や運転方法によると考えられる。ここでは垂直温度分布を考慮した場合について、定常モデルの条件式を式(1)に、非定常モデルの条件式を式(2)に示した。いずれも風上差分化すれば、送りチューブ出口水温を初期条件として、管軸方向に順次水温を求めることができる。

[定常モデル]

$$c\rho_w G_w \frac{dT}{dz} = U(T_w - T_{po}) \dots\dots\dots(1)$$

[非定常モデル]

$$c\rho_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} - c\rho_w v \frac{\partial T_w}{\partial z} - \frac{U}{\pi r_{pi}^2} (T_w - T_{po}) \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $c\rho_w$ は水の容積比熱(J/m³°C)、 G_w は単位時間流量(m³/h)、 U は管単位長当たりの熱貫流率(W/m°C)、 T_w は水温(°C)、 T_{po} は鋼管外壁温度(°C)、 λ_w は水の熱伝導率(W/m°C)、 v は流速(m/h)、 r_{pi} は鋼管内側半径(m)を表す。

2.2.2 U字管方式の計算モデル 発生熱源となる埋設孔が多数点在するケースが想定されるため、広領域の中で細かい格子分割が要求される。口径100~200mmの埋設孔内部をさらに細かく形状に忠実に分割することは、計算時間の点で非現実的であり、簡便に計算を行うための近似モデルが必要である。そこでBose, Kavanaughらの相似モデル^{5),6)}を用いて、等価モデルとして扱った。

Fig. 2に等価同心円モデルの断面図を示す。原型の送り管と送り管の断面積合計値と等断面積である同心円管に置換して、その際に送り管と送り管の熱干渉の影響を補正したものが等価同心円モデルである。等価同心円管の外側半径 r_{eo} (m)と、原型の送り(送り)管外側半径 r_o (m)との関係は、式(3)で表せる。

$$r_{eo} = \sqrt{2}r_o \dots\dots\dots(3)$$

等価管内の流体平均温度 T_{wa} (°C)を送り管入り口温度 T_{wi} と送り管出口温度 T_{wo} の算術平均値で扱えば、埋戻し材との間の熱収支式は、送り管と送り管の熱干渉の影響を補正した式(4)で示される。

$$c\rho_w G_w (T_{wi} - T_{wo}) = CU_c L (T_{wa} - T_{po}) \dots\dots\dots(4)$$

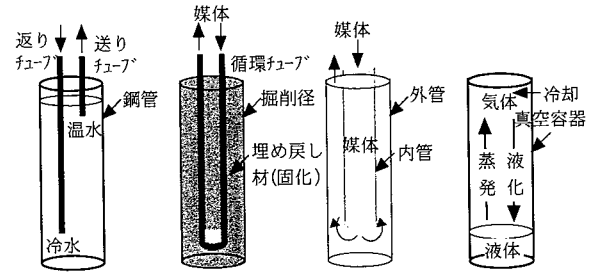
ここで、 U_c は掘削孔壁までの単位長当たり熱貫流率(W/m°C)、 L は埋設管深さ(m)、 C は熱伝達補正係数を表す。

2.3 MEMによる直交座標系への連結

実際の計算は3次元で行っているが、図表現の都合により、本節では水平2次元で記述した。管周辺の格子点をFig. 3①のようにすれば、BCDFEで囲む要素(i,j)の重心位置は、正方形ABCDの重心位置とほぼ等しく、代表点Gとして置換できる。管の中心Aを原点においたFig. 3②で、要素(i,j)の円弧EH上の任意の点をIとすると、線分IGの法線面への方向余弦IJは、Iが円弧EH上を動くに連れて変化するが、Iが円弧EHの中点にある時を代表長さとして近似し、式(5)に示した。

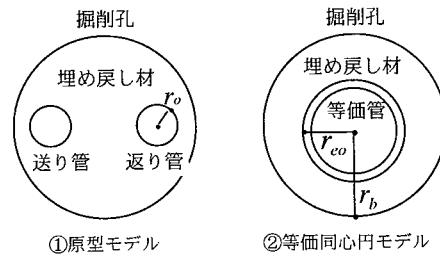
$$\bar{IJ} = \frac{\Delta x}{\sqrt{2}} \cos(\pi/8) - r_b \dots\dots\dots(5)$$

円弧HFに対しても円弧EHと同様に扱えば、要素(i,j)についてMEMが適用できる。そこで、非定常熱伝導方程式にGreenの定理を適用して漸化式で表すと、要素(i,j)の温度 T_{ij} は式(6)で表せる。

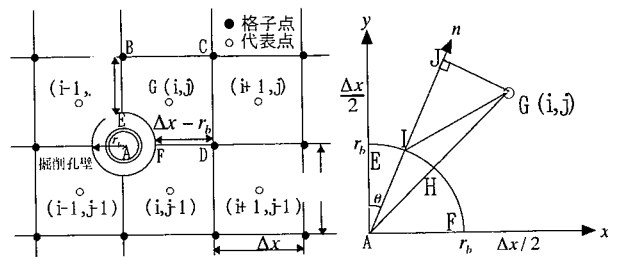


①井戸鋼管方式 ②U字管方式 ③同軸方式 ④水平方式

Fig. 1 垂直式地中熱交換装置の分類
Classification of Vertical Heat Exchangers



①原型モデル ②等価同心円モデル
Fig. 2 U字管方式の等価同心円モデル
An equivalent Concentric Circle Model for U-tube-Type



①管周辺の格子点 ②数学モデル
Fig. 3 管周辺の計算格子点と数学モデル
Grid Point around Pipes and Mathematical Model

$$T_{i,j}^{(N+1)} = T_{i,j}^{(N)} + \frac{\lambda_w \Delta t}{c\rho_w S_{i,j}} \times \{ (T_{i+1,j}^{(N)} + T_{i,j+1}^{(N)} - 2T_{i,j}^{(N)}) + \frac{\Delta x - r_b}{\Delta x} (T_{i-1,j}^{(N)} + T_{i,j-1}^{(N)} - 2T_{i,j}^{(N)}) + \frac{\pi r_b / 2}{\Delta x \cos(\pi/8) / \sqrt{2} - r_b} \times (T_{po}^{(N)} - T_{i,j}^{(N)}) \} \dots(6)$$

ここで、 N は時刻、 $S_{i,j}$ は要素(i,j)の面積(m²)、 T_{po} は掘削孔壁温度(°C)である。こうして掘削孔と外部土壌をMEMを用いて、直交座標系に連結した。

2.4 飽和土壌の支配方程式

飽和土壌のような多孔質体の伝熱現象は、厳密に言えば、1)熱伝導、2)地下水の移動に伴う移流、3)自然対流、4)土中水分の凍結や蒸発に伴う潜熱によって生じると考

えられている。地下水の揚水は伴わないので、吸い込みや湧き出しによる熱移流は生じない。4)は特殊なケースであり、本報では記述から外すことにして、1)~3)を考慮した場合の支配方程式を以下に示す。ただし、地下水の流れはDarcy流に従うものとして扱い、Boussinsq近似を適用した。

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$u = -\frac{k_x}{\mu} \frac{\partial(\rho gh)}{\partial x}, v = -\frac{k_y}{\mu} \frac{\partial(\rho gh)}{\partial y}, w = -\frac{k_z}{\mu} \left(\frac{\partial(\rho gh)}{\partial z} + \rho g \right) \quad \dots\dots(8)$$

$$\rho = \rho_0 \{1 - \alpha(T - T_0)\} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$(c\rho)_s \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_s \nabla^2 T - (c\rho)_m \mathbf{V} \cdot \nabla T \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここで、 \mathbf{V} は地下水流速ベクトル(m/h)、 u, v, w は速度成分(m/h)、 μ は粘性係数(kg/mh)、 k は透過率(m²)、 ρ は密度(kg/m³)、 h は水頭(m)、 α は体積膨張係数を表す。3)を含む連立方程式系は、Poisson方程式の問題に帰着するため、何らかの反復法が必要で、計算時間は長くなることは避けられない。本問題を常温の範囲で扱う限りにおいてはベクレ数は小さく、3)の影響は1)や2)と比べると小さいと予想される。そこで、長期計算が要求されるケースでは、3)を省略した計算でも実用性を大きく損なうことはないと考えられる。

2.5 数値解法

MEMで求めた熱流束を熱伝達境界として、三次元直交座標系で、土壌の熱移動に関する支配方程式を差分化して解析を行った。自然対流を考慮する場合には、式(7)~(10)を差分化して連立し、SOR法で近似解を求めた。自然対流の影響を除外する場合は、地下水動水勾配からDarcy流速を計算して、式(10)の差分式に入力して前進差分で計算した。

3. 計算モデルの検証

濱田らによる井戸鋼管方式およびU字管方式の暖房実験結果⁷⁾と、本モデルの計算結果を比較した。Table 1に実験の概要と管の仕様を示す。実験中に地下水の流れが計測されていないので、濱田らは土壌の熱伝導率の感度解析により補正している。本計算でも補正熱伝導率を使用し、その他の熱物性値等の諸条件については、実験値や定性的な値を使用した。

Table 2に期間採熱率の実験値と計算値を示す。140日間の連続運転における1m当たりの平均採熱率を比較した結果、井戸鋼管方式の計算値は実験値の約104%、U字管方式の計算値は実験値の約102%であり、4%以内の誤差で一致した。過去、大深度地中熱交換装置の採・放熱実験は各方面で行われたが、地下水の流れのデータと詳細な熱物性データの双方を明らかにした実験報告は見当たらないため、地下水の流れの影響についての詳細なモデル検証は、今後の課題である。

Table 1 暖房実験概要と熱交換装置の仕様⁷⁾
Outline of Heating Test and Prototype of Heat Exchangers

実験概要	実施場所：札幌市 実施期間：1993.12/10~4/28 (140日間) 不凍液往き温度：-3.3℃ 循環流量：1.0×10 ⁻⁴ m ³ /s (鋼管) 6.9×10 ⁻⁵ m ³ /s (U字管)
仕様	掘削孔径：110mm 管の長さ：30m 鋼管：SGP80A(外径89.1mm、肉厚4.2mm) U字管：架橋 [®] リフレソ [®] 13A(外径17mm) モルタル埋戻し

Table 2 期間採熱率の比較
Comparison of Heat Injection Ratio in Term

	実測値	計算値	計算値/実測値
井戸鋼管方式	35.6 W/m	37.1 W/m	1.04
U字管方式	27.8 W/m	28.4 W/m	1.02

Table 3 本手法の適用先と評価項目
Main Uses and Items of Evaluation

適用先	利用形態	熱伝導	地下水流	自然対流	凍結	蒸発
冷暖房	冷・温	○	○	△	△*1	△*2
融雪	温	○	○	△	△	×
農業・養殖業	温	○	○	△	×	×
食糧貯蔵	冷	○	○	×	○	×
LNG備蓄	冷	○	○	×	○	×
土壌凍結工法	冷	○	○	×	○	×
廃熱処理問題	温	○	○	○	×	△

評価：○必須、△場合によっては必要、×不要
*1：寒冷地では冬期土壌が凍結する可能性が高い。
*2：高温余剰廃熱を蓄熱利用する場合に生じる可能性がある。

4. 計算手法の適用性

4.1 適用範囲

本手法の主な適用先と評価項目をTable 3に示す。必要評価項目の中で、自然対流の影響は低温時は小さく、高温になるほど顕著である。凍結現象については本報告では除外しているが、多くの文献⁸⁾に紹介されており、必要に応じてモデルに組み込み可能である。その際、凍土と未凍土では熱伝導率が大きく異なるが、土粒子、水、水で構成される3相系の直列-並列型熱伝導モデル^{9),10)}が便利である。水分蒸発に関しては、高温廃熱処理問題など水の沸点を超えた高温媒体を土壌へ投入するケースも考えられるが、気・液二相流モデルの扱いよりも、拡散係数や熱物性値の温度依存性といったパラメーターの問題や、Boussinsq近似の限界などが懸念され、適用範囲外

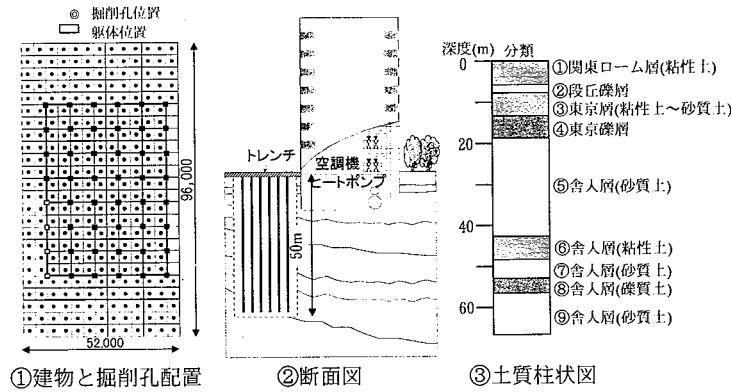


Fig. 4 地中地盤蓄熱の解析ケース
Analysis Case of Underground Thermal Energy Storage

とした。また、本手法は基本的に伝熱現象を扱うもので、汚染物質の除去などの物質移動の解析には適さない。

4.2 適用事例

都内S地区を対象とする地中地盤蓄熱の解析検討例について、Fig. 4に解析ケースの概要を示す。約5,000m²の敷地に約300本のU字管を4mピッチで埋設し、事務所ビルの冷暖房の補助熱源とする計画について検討した。地質柱状図から各地層の物性値を推定し、計算入力条件として与えた。

Fig. 5に基本的な採・放熱能力について解析した結果を示す。冬期採熱運転を4ヵ月行い、2ヵ月間休止の後、夏期放熱運転を4ヵ月行うという条件で、1年間計算した。冬期採熱能力および夏期放熱能力は、運転開始後ともに減衰し、期間平均の冬期採熱率は19.6W/m、夏期放熱率は21.7W/mとなった。不易層温度は約16°Cなので、夏期放熱率が冬期採熱率より大きなことから、冬の蓄冷効果が認められたといえる。期間中に得られた総熱量は、冬期1,584GJ、夏期1,756GJで、これは高層建築物の冷暖房熱源の需要を賅うのに必ずしも十分な値ではないが、高熱伝導性の埋戻し材料導入や水蓄熱併用など、効率と量の両面から現在効果的な対策を検討中である。

5. まとめ

飽和土壌を想定し、地下水の流れや自然対流を考慮した井戸鋼管方式およびU字管方式の大深度地中熱交換装置の解析手法を示した。要点を以下に記す。

- 1) 装置群の伝熱解析では、小さな発生熱源が点在しているため、計算要素数が肥大化しやすい。U字管方式では、この問題を解決するための相似モデルとして、等価同心円モデルを適用した。
- 2) 解析モデルの汎用性を考慮して、円管と土壌をMEMで接続して、直交座標系に連結した計算方法を採用した。
- 3) 既存の実験結果と計算値を比較した結果、井戸鋼管

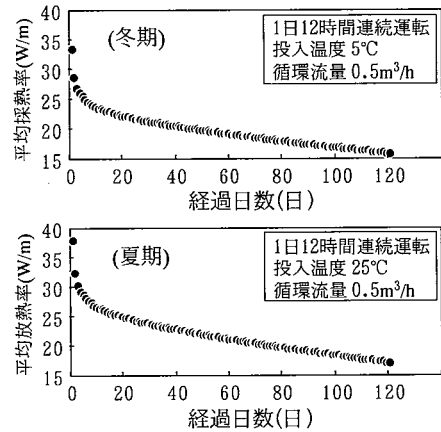


Fig. 5 解析結果
Results of Calculation

方式の誤差は約4%、U字管方式の誤差は約2%で、実験値と計算値はほぼ一致した。

4) 本解析手法の適用可能範囲を掲げるとともに、事例として地中地盤蓄熱の解析ケースを示した。

参考文献

- 1) 斎藤, 山口: ボアホールエネルギー貯蔵システムの性能解析に関する研究, 第33回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp.145~146, (1996)
- 2) 森野: 鋼管杭における土壌熱利用システムに関する研究, 宇都宮大学博士論文, p.78, (1995)
- 3) 竹内, 他: 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)
- 4) 田中, 宮川, 岡, 渡辺: 長期蓄熱システムの研究—長期土中蓄熱水槽の熱性能—, 空気調和・衛生工学会学術論文集, No.52, pp.437~440, (1986)
- 5) Bose et. al.: Design/data manual for closed-loop ground-coupled heat pump systems, ASHRAE, pp. 2.15~2.35, (1985)
- 6) Deerman, Kavanaugh: Simulation of vertical U-tube ground-coupled heat pump systems using the cylindrical heat source solution, ASHRAE Transactions, No.1, pp. 287~295, (1991)
- 7) 濱田, 落藤他: 垂直埋設U字管を用いた地中蓄熱型冷暖房システムの実験と解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No.61, pp.45~55, (1996)
- 8) 例えば, 木下: 凍土の物理学, 森北出版, (1982)
- 9) 宮崎, 粕淵: 土の物理学, 土壌物理研究会, pp.279~293, (1979)
- 10) 長野, 落藤: 凍結・融解による土壌の熱物性の変化と熱伝導率モデル, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 52, pp.91~102, (1993)