

地中熱利用システム設計・性能予測ツールの開発と その応用に関する研究

学位論文内容の要旨

地盤は普遍的に存在し、膨大な熱容量を有しているため、ヒートポンプの熱源や、蓄熱体として優れた特性を持っている。近年、この地盤をヒートポンプの熱源として用いる、地中熱利用ヒートポンプ (Ground Source Heat Pump, GSHP) システムを含めた地中熱利用システム (Ground Thermal Energy System, GTES) が二酸化炭素排出量削減効果をもたらす省エネルギーな暖冷房給湯システムとして世界的に注目されており、今後家庭用のシステムのみならず、大規模な建物に対しても導入が切望されている。我が国においても、地盤が軟弱で基礎杭が必要となる建物が多いため、基礎杭を利用したシステムを中心として将来大規模な GTES の導入が期待できる。また、我が国では大都市が扇状地に位置しており、地盤内に地下水流動が生じる場合も想定されるため、導入の際にはこれらを考慮した設計が必要となる。

本論文では、特に大規模なシステムに有効で、地下水流れも考慮することも可能な間接熱交換型の GTES の設計・性能予測ツールを開発した。まず、GTES の性能予測を行うにあたり重要な要素となる地中温度については、地中熱交換器の本数・配置と地下水流速が影響を与える大きな要因となるため、理論計算および数値計算から導いた独自の演算手法によって、それらを考慮した地中温度計算を行えるようにした。また、建物の基礎杭を地中熱交換器として用いる場合の GTES の性能予測も可能とした。さらに、これらの手法による地中温度などの計算値の実測値への再現性は、実規模の実証実験から得られた実測の温度との比較により確認した。そして、開発したツールを用いて、実際に GSHP システムが導入された建物の設計例と、地下水流れを有する GTES のフィージビリティスタディについて示し、本ツールの GTES 評価への有用性と、GTES の省エネルギー効果への有効性を明らかにした。

本論文の構成および各章の内容は以下の通りである。

第 1 章は、序論であり、GTES の概要とその導入の意義について、二酸化炭素排出量削減効果の観点などから述べた。

第 2 章は GTES の設計手法とツールに関する研究を中心として、GTES について従来行われてきた研究との比較を行った上で、本研究の目的およびその位置づけを示した。

第 3 章では、設計・性能予測ツールの開発の第一段階として、単独垂直型地中熱交換器を有する GSHP システムのツールの概要について述べた。まず、高速演算を可能とするための、無限円筒表面熱流応答理論を応用した地中温度計算手法と、GSHP システムの運転シミュレーション計算手法について示し、その計算結果をもととしたライフサイクル分析の方法について示した。次に、熱応答試験の測定値と比較することで、開発したツールにより計算した熱媒温度変化を検証した。さらには札幌の戸建住宅を例にとり、100 m のシングル U チューブ型地中熱交換器を用いた場合の GSHP システムの性能予測と導入効果の検討を行い、その結果、暖房期間の平均 COP4.6 で GSHP システムの運転を行うことが可能で、対象システムとのコストペイバックタイムは 10 年程度となることを提示した。

第 4 章では、複数埋設管を有する GTES 全体の性能を予測するため、周囲の埋設管について、無

限線源の温度場を重ね合わせる手法の適用が可能であり、これらの温度応答を近似的に短時間で計算する手法を提案した。次に、地中熱交換器の循環回路の相違に対する熱媒温度の計算手法を示した。この計算手法を検証するために長さ 8m、口径 140mm ϕ の基礎杭を格子状に 25 本埋設し地中熱交換器として用いた GSHP システムの採熱・暖房実証実験を行い、熱媒温度ならびに地中温度の実測値と計算値の比較から、ツールによる計算値が実測値をよく再現できる事を確認した。さらには、開発したツールを用いて、鋼管基礎杭を地中熱交換器として用いた GSHP システムの長期運転の検証を行った。

第 5 章では、大口径の鋼管基礎杭を地中熱交換器として用いた採熱実証実験の結果について示した。まず、直接熱媒（不凍液）を循環させる直接熱交換型と、内部に水を充填し U チューブを挿入して使用する間接熱交換型の実験を行い、その結果の比較を行った。次に、直接熱交換型熱交換器において、開発したツールの還水温度と実測の還水温度を比較し、大口径の地中熱交換器の場合でも無限円筒理論を応用した本ツールの計算が良く実測に合うことを確認した。さらには鋼管内部の熱抵抗値を明らかにするとともに、間接熱交換型地中熱交換器の内部熱移動計算手法を示した。この計算手法を用いて計算した還水温度の変化は実測の還水温度とほぼ同様の結果が得られ、本計算方法が有効であることを裏付けた。

第 6 章では地下水流れを有する地中温度の計算手法の開発概要について述べた。まず、模擬地下水を有する砂層内のサーマルプローブ法による実験から、有効熱伝導率を増大させ設計を行う手法では長期的な GTES の評価を行うにあたっては誤差が生じることを示し、その温度場の計算には、温度応答の重ね合わせを行うことが有効な手段であると考えた。次に、温度応答の計算方法として考えられる、移動線熱源温度応答理論と差分法による数値プログラムによる計算値を実測値と比較し、それらの再現性を確認した。さらには、地下水流れを有する場合の土壌内の線熱源と円筒熱源の温度応答の比較検討を行い、それをもとに地下水流れを有する場合の円筒熱源周囲の温度応答を高速計算できる手法を提案した。この計算によって得られた温度応答については、砂層内に地下水流れを模擬させることが可能なタンクを地中に埋設し、行われた熱応答試験によって得られた実測値と比較・検証された。また、移動線熱源温度応答を応用した、地下水流速の推定方法について提案し、サーマルプローブ法による実験の結果を用いて本手法が地下水流速の推定に効果的であることを示した。

第 7 章では、開発したツールを用いた GSHP システムの設計の実例と GTES についてのフィージビリティスタディである。まず、札幌市立大学の桑園キャンパスにおける鋼管杭を地中熱交換器として用いた GSHP システムについて設計を行い、鋼管杭 51 本に 75 m のボアホールシングル U チューブ型熱交換器 3 本を加えることで、50 kW のベース負荷を十分に賄えることを明らかにし、この結果をもとに施工が実施され、現在運用に至っていることを示した。次に、札幌市の戸建住宅を想定した場合のフィージビリティスタディを行い、地下水流れが及ぼす GSHP システムの性能向上について論じた。さらには、都市排熱を有効利用するエネルギーシステムとして、高度下水処理場を都市中心部に設置し、処理下水を涵養し、下流で涵養した地下水を熱源として利用するシステムを提案し、計算により排熱を有効に回収できる地中熱交換器本数と配列を検討した。

第 8 章は、本研究で得られた結論を総括し、今後の地中熱利用の展望と課題について示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 長 野 克 則

副 査 教 授 繪 内 正 道

副 査 教 授 渡 辺 義 公

副 査 助 教 授 濱 田 靖 弘

学 位 論 文 題 名

地中熱利用システム設計・性能予測ツールの開発と その応用に関する研究

近年、地盤をヒートポンプの熱源として用いる、地中熱利用ヒートポンプ (Ground Source Heat Pump, GSHP) システムを含めた地中熱利用システム (Ground Thermal Energy System, GTES) が省エネルギーな暖冷房給湯システムとして世界的に注目されており、今後家庭用のシステムのみならず、大規模な建物に対しても導入が切望されている。我が国においても、基礎杭が必要となる建物が多いため、基礎杭を利用したシステムを中心として将来大規模な GTES の導入が期待できる。また、特に我が国では大都市が扇状地に位置しており、地盤内に地下水流動が生じる場合も想定されるため、導入の際には地下水流動を考慮した設計が必要となる。

本論文では、特に建物の基礎杭を用いる大規模建物のシステムに有効で、地下水流れも考慮することも可能な間接熱交換型の GTES の設計・性能予測ツールの開発を行っている。そして、開発したツールを用いて、実際に GSHP システムが導入された建物の設計例等について示し、本ツールの GTES の設計・性能予測への有用性と、GTES の省エネルギー効果への有効性を明らかにしている。

本論文の構成および各章の内容は以下の通りである。

第 1 章は、序論であり、GTES の概要とその導入の意義について述べている。

第 2 章は、従来の研究について述べ、本研究の目的およびその位置づけを示している。

第 3 章では、設計・性能予測ツールの開発の第一段階として、単独埋設管を用いる GSHP システムのツールの概要について述べている。まず、高速演算を可能とするための、無限円筒表面熱流応答理論を応用した地中温度計算手法と、GSHP システムの運転シミュレーション計算手法について示し、その計算結果を基にしたライフサイクル分析の方法について示している。次に、模擬負荷暖房実証実験等の測定値と比較することで、開発したツールにより計算した熱媒温度変化や、予測した性能について検証を行っている。

第 4 章では、複数埋設管を有する GTES 全体の性能を予測するため、周囲の埋設管について、無限線源の温度場を重ね合わせる手法の適用が可能であり、これらの温度応答を近似的に短時間で計算する手法を提案している。次に、地中熱交換器の循環回路の相違に対する熱媒温度の計算手法を示している。この計算手法を検証するために、複数埋設管を用いた GSHP システムの採熱・暖房実

証実験を行い、熱媒温度ならびに地中温度の実測値と計算値の比較から、計算値が実測値をよく再現できる事を確認している。

第5章では、大口径の鋼管基礎杭を地中熱交換器として用いた採熱実証実験の結果について示している。まず、直接熱媒(不凍液)を循環させる直接熱交換型と、内部に水を充填しUチューブを挿入して使用する間接熱交換型の実験を行い、それらの採熱量の比較を行っている。さらには間接熱交換型地中熱交換器の内部熱移動計算手法を示しており、この計算手法を用いて計算した還水温度の変化は実測の還水温度とほぼ同様の結果が得られ、本計算方法が有効であることを裏付けている。

第6章では地下水流れを有する地中温度の計算手法の開発について述べている。まず、模擬地下水を有する砂層内のサーマルプローブ法による実験から、地下水流れを有する場合の温度場の計算には、温度応答の重ね合わせを行うことが有効な手段であると考察している。次に、温度応答の計算方法として考えられる、移動線熱源温度応答理論と差分法による数値プログラムによる計算値を実測値と比較し、それらの再現性を確認した上で、地下水流れを有する場合の土壌内の線熱源と円筒熱源の温度応答の比較検討を行い、温度応答を高速計算できる手法を提案している。この計算によって得られた温度応答については、砂層内に地下水流れを模擬させることが可能なタンクを地中に埋設し、行われた熱応答試験によって得られた実測値と比較・検証している。

第7章は、開発したツールの応用例である。まず、札幌市立大学の桑園キャンパスにおける鋼管杭を地中熱交換器として用いたGSHPシステムについて計算を行い、この結果に従って実施設計・施工が行われ、現在運用に至っていることを示している。さらには、高度下水処理水の地下涵養を応用したエネルギーシステムの提案を行った上で、このシステムの導入効果の検討を行っている。

第8章は、本研究で得られた結論を総括し、今後の地中熱利用の展望について述べている。

これを要するに、筆者は特に大規模なシステムに有効で、地下水流れも考慮することも可能なGTESの設計・性能予測ツールを開発すると共に、このツールを用いたGSHPシステムの具体的な計画手法と応用例、そして二酸化炭素排出量削減効果、ライフサイクルコストなどを明らかにしている。これは建築設備工学および都市環境工学の進展に寄与するところ、大なるものがある。

よって筆者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格があるものと認める。