

令和 4 年 4 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14883

研究課題名（和文）ポアホール充填材と土壤熱物性の同時推定による地中熱交換器設計法の新開発

研究課題名（英文）New design method of ground heat exchangers by simultaneous estimation of ground and backfill thermal properties

研究代表者

崔 元準（Choi, Wonjun）

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：30817458

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、土壤の均一でない熱物性、極めて細長い地中熱交換器を施工する過程で発生する不確実性に焦点を当て、地中熱交換器の熱性能不確実性をモンテカルロシミュレーションを通じて分析した。地中熱交換器の性能を示すポアホール熱抵抗は、0.14-0.29 mK/Wの非常に広い範囲で変化することを確認した。

そして、地中熱交換器を構成するグラウトの熱物性を推定するとともに、推定値の不確実性を評価するために、ベイズ統計に基づく確率論的な推定法を開発した。これにより、推定された物性値がどの程度信頼できるかについての判断が可能になるため、既存の決定論的推定法に比べより合理的な推定法であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、地中熱交換器の施工過程や熱物性情報の不足によって生じる性能不確実性の範囲を体系的に分析した。同じ構成で熱交換器を施工しても、その熱性能が二倍以上差があることを明確に示した。この結果は、既存の決定論的方法による設計は、非常に大きな不確実性を包含するために確率論的設計法と予測法の使用を必要であることを示唆す。そして、ポアホール構成要素の未知の熱物性推定をベイズ統計に基づいて確率論的に推定できる方法を開発した。今後行われる地中熱エネルギーシステムの確率論的設計方法の開発に寄与する成果だといえる。

研究成果の概要（英文）：This study focused on the uncertainty of the thermal performance of the geothermal heat exchanger due to the uncertainties in ground thermal properties and geometric configuration of heat exchanger. The performance uncertainty was analyzed through Monte Carlo simulations. The results showed that the borehole thermal resistance, which represents the performance of the underground heat exchanger, can be changed in a wide range of 0.14 to 0.29 mK/W due to the uncertainty of the geometry and thermal properties.

In addition, a probabilistic estimation method based on Bayesian statistics was presented to estimate the thermal properties of grout. This method enables us to evaluate the uncertainty of estimated parameters. Through this, it was confirmed that it is more reasonable compared to the existing deterministic estimation method because it is possible to visually and numerically judge how reliable the estimated properties are.

研究分野：建築環境工学

キーワード：地中熱交換器 地中エネルギーシステム 逆問題 モンテカルロシミュレーション ベイズ推定 不確かさ分析

1. 研究開始当初の背景

土壌の大きな熱容量を利用する地中熱利用ヒートポンプの最も重要な構成要素は、土壌と冷媒間の熱交換を可能にする地中熱交換器である。地中熱交換器の規模（深さ、個数）を決定するための従来の設計法は、地中の伝熱速度を示す土壌熱伝導率の情報を必要とするが、土壌熱伝導率は多くの場合未知の状態である。したがって、未知の土壌熱伝導率は土壌熱応答試験（TRT：Thermal response test）を通じて推定される。また、地中熱交換器自体の熱性能を示すパラメータであるボアホール熱抵抗も TRT で推定される。このように推定された 2 つのパラメータを設計に活用して地中熱交換器の深さと個数を決定される。

熱応答試験から得られたパラメータを用いて地中熱交換器の規模を決定する方法論はよく確立されている。しかし、地中熱交換器を施工する現実シナリオで見逃している部分がある。それは、数十から数百本の地中熱交換器からなるボアフィールドを施工する場合、1 つの地中熱交換器に対して TRT を行って推定したボアホール熱抵抗は 1 つのサンプルに過ぎないことである。これは、現実に行われる地中熱交換器施工の固有特性を考慮すると、非常に大きい不確かさがあることを意味する。つまり地中熱交換器施工の特性とは、現場でミックスして打設するグラウトの物性は地下水と接触し、設計意図と変わることがあり、数十から数百メートル深さの極度に細長いボアホールにパイプを挿入する過程で幾何形状を意図通り制御するのはできない。すなわち、パイプがボアホール断面のどこに位置しているかを深さ別に特定することは不可能に近い。したがって、地中熱交換器熱性能の不確かさがどの程度かを評価できる分析法、実験法、推定法が必要である。

2. 研究の目的

本研究は、地中熱交換器の短期熱応答を考慮した高度な設計法の基盤を構築することを目的とし、そのために以下の 3 つの研究項目に取り組む。

- ① ボアホール充填材の熱物性まで推定できる新しい熱応答試験法と推定法の開発
- ② 地中熱交換器熱性能の不確かさを定量的に分析できる方法論の開発
- ③ 推定の不確かさが評価できるベイズ統計に基づく確率論的推定法の開発

3. 研究の方法

① 実験法

熱応答試験の開始後、非常に短い時間でのみしか地中熱交換器自体の純粋な熱応答が計れない。そのため推定に活用するデータ量を増やすためには新しい実験法が必要である。既存の一定熱率を注入する熱応答試験法とは異なり、熱注入率を段階的に変化させる実験法を適用すると、必要とされるデータを追加的に計測できる。

② 実験装置

提案する熱応答試験を実現するためには、注入熱率を自由に調節できる実験装置が必要である。図 3 に示すように、プログラマブルロジックコントローラを利用し、実験条件を自由に変更でき、実験中の外乱も機械的に抑制できる実験装置を開発する。

③ 推定モデル

土壌熱物性の推定に使用される物理モデルは、地中熱交換器内部の伝熱現象を適切に考慮できない。したがって、地中熱交換器の短期挙動が再現できる数値モデルを開発し、ボアホール充填材の推定に活用する。

④ 推定法

ボアホール充填材の推定は、土壌に比べて少ない量のデータを活用せざるを得ないため推定の不確かさが高くなる。ベイズ統計の理論を導入すると、確率論的推定により推定不確かさの評価が可能になるだけでなく、事前分布を適切に定義することにより、比較的少量のデータでより良い推定精度を期待することができる。したがって、本研究では、推定精度の向上と信頼度評価のためにベイズ統計に基づく確率論的な推定法を開発する。

4. 研究成果

① 1 年目の成果

図 1 のように実験条件を自由に変更でき、実験中の外乱も機械的に抑制できる土壌熱応答試験装置を開発した。開発した実験装置は、既存のヒーターのみを装着している装置とは異なり、チラーを用いて熱抽出実験もできる。プログラマブルロジックコントローラを利用し、PID 制御を行うことで、熱応答試験中の外部環境からの外乱を効果的に抑制できることを確認した。飽和多孔性土壌では、地中の自然体流の影響で地中熱利用ヒートポンプの冷房運転（地中に熱注入）と暖房運転（土壌から熱抽出）の性能が異なることがあるため、このような物理現象を実験的に解

明する研究に拡張することも期待できる。

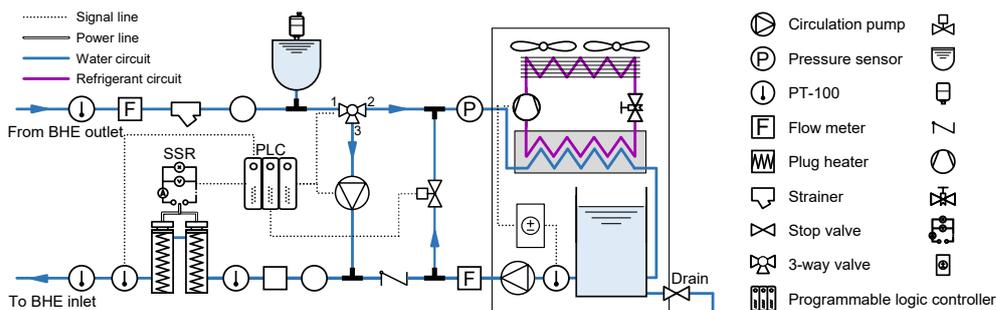


図1 開発したチラー付き熱応答試験実験装置

熱応答試験装置の開発を完了した後、パラメータ推定に用いられる熱応答予測モデルの入力パラメータそれぞれが推定結果に及ぼす影響を確率論的に定量化した。グローバル感度解析方法の中で最も正確であると認められている Sobol 法を使用した。グローバル感度解析の結果は、ボアホール充填材の熱物性推定結果が有する全体不確実性の 30%程度が土壤の初期温度の不確実性に起因するという新しい知見を提供した。この結果は、今まで地中熱ヒートポンプの研究分野では見過ごされていた部分である。

土壤の初期温度は、熱応答試験で熱注入を行う前に、ポンプを利用して熱源水の循環する方法で測定される。しかし、この方法はポンプからの熱伝達によって温度が上昇する傾向があり、長期間の測定では外部環境との熱交換によって非常に不確実性が大きくなる。本研究で開発した新実験装置は、チラーを用いて地中熱交換器の循環水の温度を下げる方向にも調節できるため、漸近的に正確な地中温度を探索できる。土壤初期温度の不確実性は、既存の 0.7 度から 0.1 度までに減少でき、ボアホール充填材の熱物性の推定不確かさが 24%減少することを確認した(図 2)。

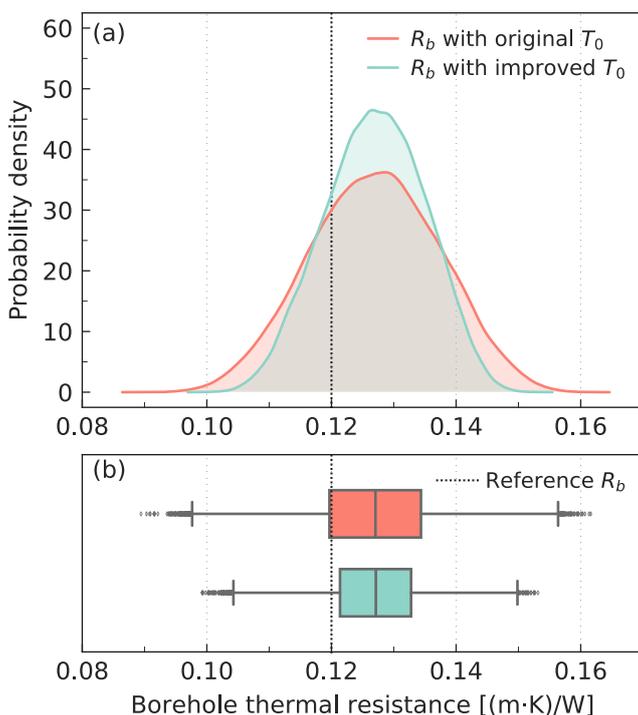


図2 土壤の初期温度の測定精度改善によるボアホール熱抵抗推定の改善

②2 年目の成果

2 年目の研究は、施工過程で制御できない地中熱交換器の幾何形状と正解が分からない地中熱交換器構成要素の熱物性によって熱交換器の性能を代表するパラメータであるボアホール熱抵抗がどの程度変わるかに関する不確かさ分析を行った。現実的な四つのシナリオ設定し、各シナリオに関するモンテカルロシミュレーションを行い、ボアホール熱抵抗の確率分布を分析した。それに加え、二つの熱交換パイプのボアホール内部での位置関係によって変わるボアホール熱抵抗の二次元空間分布を体系的に分析した(図 3)。

パイプがボアホール内部にどのように配置するかに関する幾何学的不確実性、グラウトと土壤

の熱伝導率の不確実性、施工過程で変化するボアホール直径の不確実性まで同時に考慮する最も現実的なシナリオの結果は、ボアホール熱抵抗値が $0.14 \sim 0.29 \text{ m} \cdot \text{K} / \text{W}$ の範囲に分布することを示した。本研究の結果は、現場に複数の熱交換器が設置される場合、個々の熱交換器のボアホール熱抵抗が2倍以上の異なる可能性があることを示す。

さらに、ボアホール熱交換器の構成要素であるパイプとグラウトの熱物性を推定するため、ベイズ統計に基づく確率論的推定法を開発した。4時間以下の短い初期熱応答データを使用して推定する必要がある。従って、地中熱交換器の構成要素の熱物性推定は必然的に不確実性を含む。本研究はボアホール構成要素の熱物性推定に成功し、確率論的アプローチは既存の決定論的な推定法に比べ、合理的な方法であることを確認した。

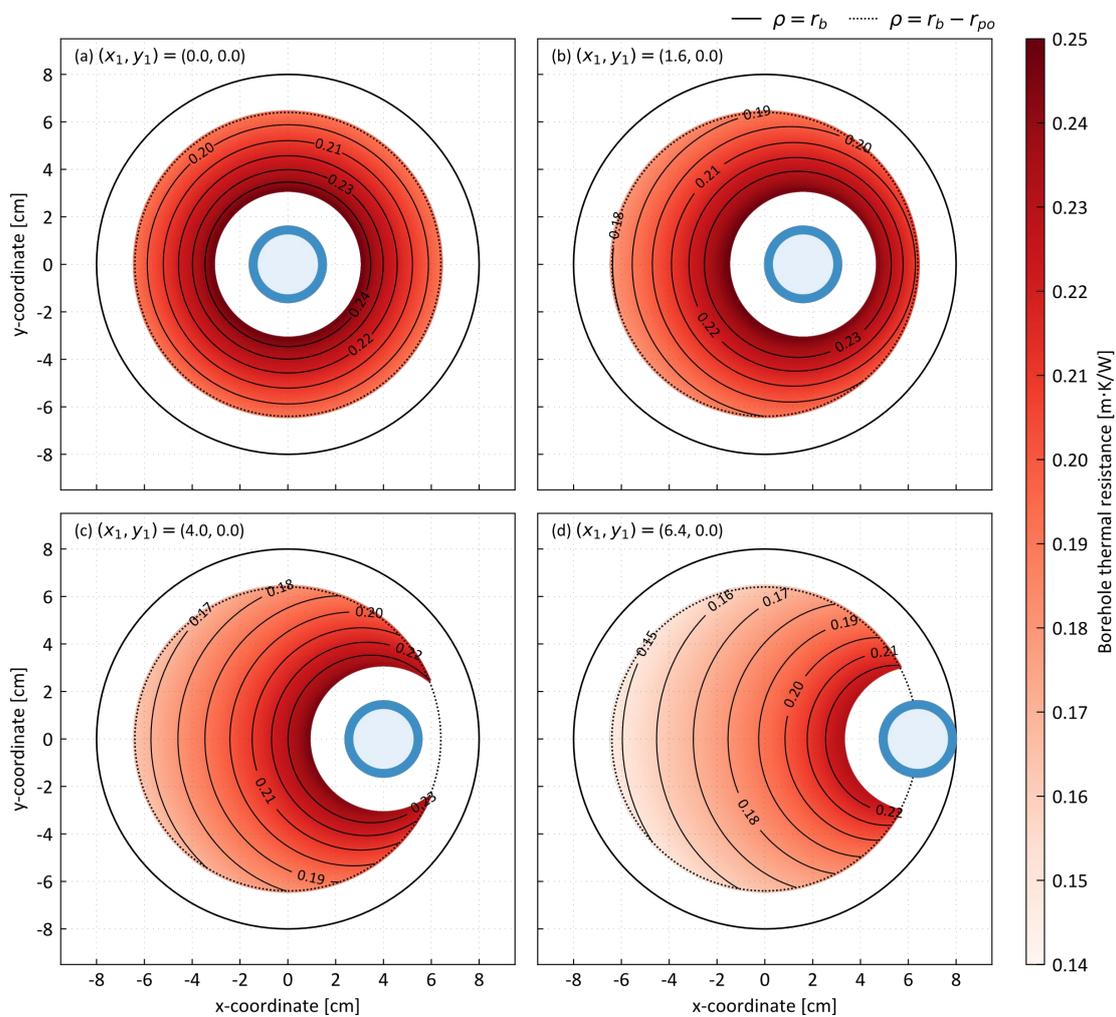


図3 ボアホール熱抵抗の空間分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Choi Wonjun, Choudhary Ruchi, Ooka Ryozo	4. 巻 238
2. 論文標題 Development of chiller-attached apparatus for accurate initial ground temperature measurement: Insights from global sensitivity analysis of thermal response tests	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Energy and Buildings	6. 最初と最後の頁 110841
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.enbuid.2021.110841	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Choi Wonjun, Kikumoto Hideki, Ooka Ryozo	4. 巻 未定
2. 論文標題 Probabilistic uncertainty quantification of borehole thermal resistance in real-world scenarios	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Energy	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 崔元準
2. 発表標題 地中熱応答予測モデルのグローバル感度解析：パラメータ不確かさがボアホール熱抵抗の推定精度に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学科大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------