

## 審査の結果の要旨

氏名 崔元準

本論文は「**Experimental and Numerical Study on Thermal Response Test for Design Accuracy Improvement of Vertical Closed-loop Ground Heat Exchanger** (垂直密閉型地中熱交換器の設計精度向上のための熱応答試験に関する実験的、数値的研究)」を題とする。地中熱利用ヒートポンプの核心となる構成要素である地中熱交換器の設計パラメータを得るために行われる熱応答試験 (TRT: Thermal response test) を研究対象とし、現実的な観点から TRT の誤差を招く要因の改善する実験法と推定法の開発を行ったものである。

本論文は大きく TRT の結果に影響を及ぼす要因として外部環境との外乱、地中自然対流を序論で挙げ、問題点分析、対策提示、結論の順で構成されており、全ての内容を全 9 つの Chapter で報告している。

Chapter1 では、研究背景及び研究目的を提示し、本論文の構成を示している。

Chapter2 では、研究の基になる工学知識、そしてそれに伴う問題点を述べている。地中の熱・物質輸送モデル、地中温度応答モデル、地中熱交換器の設計法を述べた後、熱応答試験法を逆問題の観点からの問題点を明確にしている。

Chapter3 では、建てられた実験装置に関する詳細な説明と実験不確かさの分析を行った。

Chapter4 では、TRT の地上実験装置で起きる熱交換に関する解析モデルを導出し、パラメトリックスタディと感度解析を行った。解析結果は、地上熱交換と関わっているパラメータの内、優先的に管理すべきパラメータ、安定的な実験結果のための TRT 設定値に関する知見を与える。

Chapter5 では、既存の無限線状熱源理論に基づいた TRT の解析法が外乱によって影響された場合の適用性とその限界を明らかにすることを目的としている。Chapter4 で導いた解析モデルを数値モデルの境界条件として結合し、外乱により影響された TRT を数値的に生成した。36 ケースの数値的 TRT データを無限線状熱源で解析し、外乱が推定挙動に及ぼす影響、そして推定誤差を統計的に明らかにした。

Chapter6 では、外乱に影響された TRT データを安定的に推定するための対策の推定法を開発した。開発した推定法は、変動する注入熱量率を考慮するた

めに重ね合わせを適用した無限線状熱源モデルと準ニュートン最適化手法に基づいたものである。複雑で詳細な外乱に関する分を必要とせず、注入熱量率のパルス化だけで早い収束と推定安定性の確保ができることを現場の TRT データを用いて確認した。

Chapter7 では、飽和多孔質地層で TRT を行うとき、地中で地下水の自然対流が生じるので、注入熱量率によって TRT 結果が変わることを実験的に分析した。注入熱量率は 45~80 W/m 程度であり、アメリカ空調衛生学会 (ASHRAE) の提示基準である 50~80 W/m に近い範囲であっても、TRT 結果は注入熱量率に依存することを既存の TRT ガイドラインと地中熱交換器設計法に基づいて考察した。

Chapter8 では、Chapter7 で行った単一注入熱量率を用いた複数回の TRT が、地中温度回復まで長時間が必要なため適用性の問題があり、また温度回復期間中に地中条件が変わるために注入熱量率だけの性能依存性を把握において不確かさが大きくなるという問題点を指摘した。その問題点を克服するための対案として多重熱量率 TRT 法とパラメータ推定法を開発した。開発法は数値的 TRT を用いて検証した後、実際の TRT に適用して有効性を確認した。

Chapter9 では、以上の結果をまとめ総合的に議論するとともに、今後の課題を整理している。

本研究は、TRT の推定精度に影響及ぼす要因である外乱要素と地中自然対流を分析し、地中熱交換器の設計精度を向上させることを目的とする。理論的、数値的、実験的手法を用いた分析は、安定的な TRT 実験と推定のための洞察を与えると同時に、対案的な解析法を開発・提示した。本研究の結果は、TRT のガイドラインの修正、既存 TRT 法の改善に貢献できる大事な情報を示したものであり、新たな TRT 解析法は、地中熱利用ヒートポンプの設計精度改善のために使用できる成果と評価される。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。