

審査の結果の要旨

氏名 黄 錫鎬

本論文は「地中熱利用空調システムの地中採・放熱量予測モデルの開発に関する研究」を題して、①土壌物性値の推定手法、②地中熱交換器の採放熱量予測モデルを提案し、その適用性および精度を検証することを目的としている。

これまで地中熱利用空調システムにおいて地中採放熱量性能予測モデルに関する研究は多く行われてきたが、多くが円柱座標系の単純な熱伝導モデルに基づいているため、一部の試験的な計算を除き、地下水流れを考慮していない。また、移流現象である地下水流動の効果を有効熱伝導率として考慮しても、長期の挙動予測では大きな誤差を生むと考えられる。さらに、地下水流動を組み込んだモデルでも 2 次元モデルや単純な直交座標系を利用するなどしており、後述する熱交換器の形状が考慮されていないのが現状である。また、熱交換器に関しても等価断面積等の概念を利用しているため、熱交換器形状の特性が再現されていない等の問題点を有する。更に、地中熱空調システム導入サイトの土壌特性を反映させたシミュレーションを行うためにはその地点の熱伝導率や透水係数等の土壌物性値を把握する必要がある。土壌熱物性値を求める手法にはサーマルレスポンス試験やコア抜き検査、揚水試験などがある。しかし、これらの手法は数十万～百万円単位のコストが生じる。地中熱空調システムはコスト的な制約からその普及が伸び悩んでおり、土壌熱物性値把握のためにその都度これらの測定を行うことは合理的ではない。

このような従来の地中採放熱量予測モデルの問題点を踏まえて本論文は、地中の熱、水分移動シミュレーションコードに地中熱交換器モデルを組み込み、より汎用性が高く、精度の高い採放熱量予測モデルの構築を行っている。また、土壌熱物性値計測に関するコスト削減のために、一切の追加調査は行わず、この基礎構造物設計のための地盤調査のみから得られる土壌データから地中熱移動シミュレーションに必要な土壌熱物性値を推定する手法を採用する。

本論文の構成は以下の通りである。

序章では、地中熱利用空調システムの開発に関する背景及び本論文の目的を示している。

第 1 章は地中熱利用空調システムに関する研究や方式をまとめ、地中熱を利用する方式について概説する。更に、地中熱利用空調システムの性能を検討する数値解析方法について既往研究のレビュー及び基礎理論の説明している。

第 2 章では本研究で利用した場所打ち杭併用の熱交換器の最大採放熱量を把握するため

に、模擬負荷を設置した実験を行ってシステム性能を説明している。

第 3 章では地中熱交換器の採放熱量の性能に影響を与える地下水流れの特性を把握する方式について述べた。また、第 2 章で構築した実験設備がある千葉実験所における揚水実験を行って透水係数を把握している。

第 4 章では地中採熱量予測数値シミュレーションのため、そのパラメータになる土壤の熱物性値を把握する手法について述べている。建物基礎設計のため行われる通常の地盤調査データから数値解析に必要な土壤の熱物性値を推定する手法を提案し、フィールド調査および解析を行っている。千葉実験所の土壤の構成は表面から約 7m までの比較的ローム質の多い層と 8~11m の不飽和度状態で粘土質細砂、11~20m の飽和度状態で細砂の 3 層に分類し、それぞれ概略の土壤物性値を求めている。

第 5 章では、第 4 章で提案している土壤物性値の推定手法の比較検証するため、国内外で一般的に使われる土壤のサーマル・レスポンス・テストを行い、同サイトにおける土壤の有効熱伝導率を算出している。

第 6 章では地中熱水分移動シミュレーションコードである FEFLOW に熱交換器内循環水モデルと地表面熱フラックスモデルを組み込み、最熱量予測モデルを開発している。U 字管方式の地中熱交換器に年間計算を行って、熱交換器表面の熱フラックス、土壤の温度変化、熱交換器の出口温度などの結果を得ている。

第 7 章では、第 6 章で開発している数値シミュレーション手法と第 2 章で述べた実験結果との比較解析を行っている。数値解析の計算条件としては第 4 章で提案した推定方式と第 5 章で紹介したサーマル・レスポンス・テストによる有効熱伝達率を利用している。また、地中熱利用空調システムの最適な設計のため、熱交換器の形状や土壤物性値によるシステムの性能に及ぼす影響について検討している。

第 8 章では、全体の総括を行うと共に、今後の課題について述べている。

以上を要約するに、本論文は地中採放熱量の予測精度の向上を図る、①土壤物性値の推定手法、②地中熱交換器の採放熱量予測モデルを提案し、その適用性および予測精度を実験及び数値解析を用いて検討を行っている。本論文で提案した解析手法は、従来のモデルの短所であった地下水流れの影響や熱交換器形状の反映されていない、土壤物性値の推定手法のコスト的な不合理などの問題を解決するものであり、これから地中熱空調システムの普及に大きく寄与し、建築環境工学の発展に寄与するところが大きい。

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。