

学位論文題名

低炭素建築実現を目指した基礎杭利用型地中熱ヒート
ポンプシステムの効果的導入に関する研究

(Study on the Ground Source Heat Pump system using concrete foundation
pile as the ground heat exchangers for the low carbon building)

学位論文内容の要旨

東日本大震災以降、地球温暖化問題に加えて電力供給量の問題がクローズアップされ、CO₂排出量のみならずピーク電力量、更には総電力消費量削減が重要なテーマとして位置づけられてきた。この問題の改善には民生用エネルギーの抑制が重要であり、大震災前より取り組まれてきた建物のZEB(NET Zero Energy Building)化も、建物を構成するあらゆるシステムの高効率化と再生可能エネルギーの活用を追求した到達点ともいえる。

その各システムの高効率化においては、熱源は最重要な対象であり、地中熱ヒートポンプ (Ground Source Heat Pump) システムはその熱源の高効率化の一つの手段としてあげられる。GSHP システムは条件がそろった場合には性能の高い熱源方式であるが、発展途上の技術であることもあり、この技術の普及が大きな広がりとなってこない現状がある。また、GSHP システムの普及阻害要因である、導入コストを低減する一つの方式として、基礎杭を地中熱交換器の据え付けに利用する方法があり、この手法であれば元々建物の建築に必要な基礎杭を利用することで掘削費用は不要となり、施工費用を低減しうる有効な手法である。しかしながら、この基礎杭利用型システムの日本における実績はまだ少なく、多くの設計者にとっての有効な選択肢となるまでには至っていないのが現状である。

本研究では、その基礎杭利用型 GSHP システムについて、採用の検討段階から設計、施工、竣工そして実際の稼働に至るまでのプロセスについて、実際の複数プロジェクトを研究対象とし、GSHP システムの導入プロセスを確立する。その上で、GSHP システムを有効な環境対応技術として効果的に導入し、低炭素建築を実現するための実用的な研究とする。

本論文の構成及び各章の内容は以下の通りである。

第1章は序論であり、GSHP システムが持つ課題や現状認識を示し、本論文における研究の目的や、取り組むべき課題、そして論文の構成について示す。

第2章は、基礎杭利用型地中熱ヒートポンプシステムに関する概要を示す。ここではシステムの概要について、構成する要素や稼働のメカニズム、そしてシステムの持つ特徴などを解説する。また、本論文の主テーマである基礎杭利用型に関してまず分類し、それぞれの特徴を示して、地中熱を利用するシステムについて基礎杭利用型以外の方式についても情報を整理しまとめる。これにより、基礎杭利用型と他の地中熱利用システムとの差違を明確にする。

第3章は、地中熱利用技術の現状と本研究の位置付けについてである。ここでは、既往の地中熱に関する研究について整理分類し、内容を分析する。また、国内での研究に加えて、海外論文を分析の対象として、世界的な研究の傾向を明らかにしていく。これらにより、既往の研究に如何にして本研究を積み上げていくかについて検証する。また、GSHP システムの先進地域である欧州における導入事例を実地調査し、技術の進展状況を明らかにし、技術の基礎的な部分についても解説を

加える。既往の研究の分析と、導入実績の検証により、本研究の位置づけについて示す。

第4章は、PHC杭利用型GSHPシステム導入に関する検証である。ここでは、千葉県船橋市立リハビリテーション病院に導入したPHC杭利用型地中熱ヒートポンプシステムについて、コンセプトから設計、施工、竣工に至るプロセスをまとめた。この熱源システムではGSHPシステムを利用した夏季の昼夜間蓄熱を行い、地盤面の蓄熱性を最大限活用して性能向上を図っている。GSHPシステムのパフォーマンスに関しては数値解析と実際の稼働データを基にした分析により検証を行う。また、他熱源方式との比較も行うことで、このシステムの優位性について検証を行う。第5章は、現場打ち基礎杭利用型GSHPシステム導入に関する研究であり、現場打ち基礎杭を地中熱交換器の据え付けに利用したGSHPシステムを導入した福岡市の高校に関してシステムの計画概要から、二次側空調システムの設計概念、そして施工プロセスを概説する。また、杭深さが7mと浅い計画であるが、浅層採熱管が十分に高い性能を発揮した結果を示す。この事例では学校建築へのGSHPシステムの導入であり、省エネルギーシステムとしての導入だけではなく、教育素材としても有効に活用するための設計コンセプトを示し、エコスクールを実現するまでのプロセスに加えて、竣工後の利用状況を検証することで、その結果もたらされる省エネルギー効果についても研究を行う。

第6章は、基礎杭の種別による性能検証であり、基礎杭利用型としては前述したコンクリート充填型のPHC杭を利用した方式に加えて、水充填型のPHC杭利用型方式、そして現場打ち型の基礎杭利用型GSHPシステムについて、性能特性を明らかにして、システム導入時の裏付けとなり得る検証を行う。

第7章は、PHC杭を利用した水冷ビルマルチシステムに関する検討であり、先般竣工した福岡市の商業ビルに関してシステム概要を示すと共に、運転実績も一部示し、システムの特性に関して概説する。それにより、商業ビルにおいてもGSHPシステムを導入することで、建物をエコ化することが可能であることを示す。

第8章は、GSHPシステム設計の標準化に向けた検討であり、これまで示してきた研究を踏まえて、GSHPを企画、立案する際に、設計を適切に且つ簡易に行えるよう、設計のプロセスを一般化してまとめる。そして、プロジェクトのプロセスを示し、ステージ毎の注意すべきポイントなどを示し、業務遂行が円滑に行われるための指針とする。また、GSHPシステムが一般化していくために、これまで触れてきた普及バリア克服するための見解を示す。

第9章は総括であり、これまでの研究の取り纏めについて述べ、今後の基礎杭利用型GSHPシステムの発展に必要な諸課題について示す。

以上により、基礎杭利用型GSHPシステムに関して、各種採熱方式の導入実績の研究を通して、このシステムの導入プロセスを確立し、技術の一般化に繋げる道筋をつけた。更に、このGSHPシステムを導入した結果として、建築を有効に省エネルギー化するための有効な手法について、工学的な見地から論じてきた。本論文で確立した基礎杭利用型GSHPシステムに関する研究成果は、建築設備工学、空気調整工学等、様々な分野での発展、ひいては低炭素建築の広がり、地球環境負荷低減に寄与するものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 長 野 克 則
副 査 教 授 羽 山 広 文
副 査 教 授 瀬 戸 口 剛
副 査 准教授 濱 田 靖 弘

学位論文題名

低炭素建築実現を目指した基礎杭利用型地中熱ヒート ポンプシステムの効果的導入に関する研究

(Study on the Ground Source Heat Pump system using concrete foundation
pile as the ground heat exchangers for the low carbon building)

東日本大震災以降、二酸化炭素排出量の削減に加えて、ピーク電力と総電力消費量の削減は重要な社会的課題となっている。その解決のためには民生用エネルギー消費の抑制が必要であり、全ての建物の Net Zero Energy Building (ZEB) 化はその方策の一つの柱となっている。ZEB において、高効率な冷暖房空調、給湯用熱源システムは最重要要素であり、地中熱ヒートポンプシステム (Ground Source Heat Pump System, 以降 GSHP) がその高効率からプライオリティの高い選択枝として検討されることが多くなってきている。大規模な GSHP は適切な計画、設計、施工、メンテナンス、運用がされてはじめて高い性能を発揮するものであるが、我が国では未だ導入数が少なく統合的なガイドラインが整っていないのが現状である。同時に、地中熱交換器設置コストが普及の大きな障害となっている。コスト低減の一つの方策として、建物基礎杭を地中熱交換器に利用する方法がある。欧州では Energy Pile と呼ばれ、既に数千棟の建物に導入されている。地震国である我が国の建物は欧米に比べて強固な基礎杭を有しており、Energy Pile の普及による省エネルギーのポテンシャルは高いといえる。しかし、長年にわたる地盤温度環境への影響を考慮に入れた適正な採放熱量を定量的に見積もるのが難しいことに加え、計画、設計、施工、メンテナンス、運用に関する情報が不十分であり、またガイドラインも整っていないことから採用に至らないが現状である。

そこで、本論文は二酸化炭素排出量とピーク電力量の削減に有効な大規模 GSHP において、普及の障害となっている導入コストを大幅に低減し得る基礎杭利用型を研究対象として、計画段階から設計、施工、メンテナンス、運用に至るまでのプロセスについて数例のプロジェクトを対象に詳細な分析を行い、基礎杭利用型 GSHP を導入した建物の省エネルギー性、および環境負荷とコストの低減効果を明らかにするものである。併せて、本技術の普及のために必要不可欠な地盤温度環境への影響を考慮に入れた採放熱量の定量的な見積りと統合的な導入プロセスのガイドラインの提案を行うことを目的としている。最終的には基礎杭利用型 GSHP による低炭素建築の実現と普及を目指すものである。

本論文は 9 章から構成される。

第 1 章は序論であり、大規模 GSHP が持つ課題や現状を示し、解決すべき課題と研究の目的を示している。

第 2 章は、基礎杭利用型 GSHP の分類を示し、構成要素とメカニズム、従来方式と比べた優位点や

特徴を説明している。

第3章は、基礎杭利用型 GSHP の世界的な状況と本研究の位置付けを行っている。国内外の既往の研究についてレビューを行うと共に、欧州の基礎杭利用型 GSHP の計画、設計、施工技術、稼働後の状況について現地調査を行い、欧州での計画・設計方法、施工プロセス、稼働実績について報告している。

第4章は、関東圏の大規模病院建物に導入した既成コンクリート (PHC) 杭利用型 GSHP の検証である。ここでは、本プロジェクトの計画から設計、施工、コミッションングに至るプロセスをプロジェクトマネジメント論の観点からまとめている。地盤の熱容量を活かした空調用と給湯用ヒートポンプの併用運転方法について、実測と数値計算から省エネルギー性を明らかにしている。さらに、これが給湯ヒートポンプの効率改善に加えて冷房排熱を安定的に地中に放熱できるため空調用ヒートポンプの効率改善と都市のヒートアイランド現象の緩和に貢献していることを示している。

第5章は、九州にある大規模学校建物に導入された現場打ち基礎杭利用型 GSHP の検証である。ここでは深さ (基礎杭長さ)7m と浅い層に敷設されたにも関わらず地下水が豊富な地盤のため、単位長さ当たり高い熱交換性能が得られたことを定量的に示している。また、学校における環境建築と環境教育にも言及している。

第6章は、基礎杭種別による地中熱交換性能の検証である。基礎杭としては PHC 杭中空部にモルタル、または水を充填した2種類の PHC 杭利用型に加え、現場打ち杭利用型の計3種類を対象に、実証試験と数値解析からそれぞれの放熱性能を明らかにした上で、規模算定の設計プロセスに有益な資料をまとめている。

第7章は、九州の商業建物に導入された水充填による PHC 杭利用型 GSHP の事例検討である。空調機として汎用の水冷ビル用マルチエアコンを採用して低コスト化を図っている。運転実績から高い省エネルギーが得られたことから、本方法が温暖地の商業建物に対して普及の可能性が高い方式であることを示している。

第8章では、GSHP プロジェクトの計画から設計、施工、メンテナンス、運用、コミッションングに至るプロセスを明確に分類した上、統合的な基礎杭利用型 GSHP 導入プロセスのガイドラインの提案を行っている。

第9章は総括であり、本研究の成果をまとめている。最後に、基礎杭利用型 GSHP 利用による低炭素建築の貢献と、普及への課題を述べている。

これを要するには、筆者は、基礎杭利用型 GSHP システムに関して、計画段階から設計、施工、メンテナンス、運用に至るまでのプロセスについて詳細な分析を行い、基礎杭利用型 GSHP の省エネルギー性、および環境負荷とコストの低減効果を明らかにすると共に、適正な採放熱量の定量的な見積りを行い、統合的な導入プロセスのガイドラインの提案を行っている。中でも、3種類の基礎杭利用型 GSHP を採用した建物を対象に、規模算定の設計プロセスに有益な資料をまとめているのが特徴である。その上で、低炭素建築実現のための基礎杭利用型 GSHP の貢献と普及への課題をまとめている。

本研究で得られた基礎杭利用型 GSHP システムに関する研究成果は、建築設備工学、空気調整工学をはじめ、建設工学、環境工学の進展と省エネルギー、二酸化炭素排出量の削減、地球温暖化防止に貢献するところ大である。

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。