

## 論文の内容の要旨

論文題目 場所打ち杭を利用した地中熱空調システムに関する研究

氏 名 関根賢太郎

### 1. 研究目的

地中熱空調システムは、夏季冷房時に土壌をヒートポンプの放熱源、冬期暖房時には採熱源として利用することで、季節間を通じた排熱の有効利用を図り、省エネルギーや二酸化炭素排出削減に貢献する空調システムである。また建物からの空調排熱を大気に放熱しないため、都市部におけるヒートアイランド防止にも寄与するものと期待できる。

本システムは、寒冷地である欧米では広く普及し、我が国でも古くから研究され、適用物件もわずかではあるが増えてきている。しかし、地中熱交換器を埋設するための地盤掘削費が非常に高価であることからイニシャルコストの増大を招き、単純投資回収年数の面で従来の空調システムと比較すると不利となり、適用物件増加の障害となっている。

そこで地盤掘削費削減のため、建物の基礎杭を地中熱交換器として利用するシステムが提案され、モデル建物が各地で試験的に実用化されつつある。しかし、その熱的有効性や設計・施工方法、イニシャルコストの詳細な検討を反映した投資対効果などに関しては未解明な部分が多く、手探りの状態で進められているのが現状である。また現在、建物の基礎杭を地中熱交換器として利用するシステムのほとんどが既製杭と呼ばれるコンクリート杭や鋼管杭を利用したものである。しかし、既製杭搬入時の交通事情や杭部分のコスト削減の観点から、近年利用が増加している場所打ち杭を用いた地中熱交換器の導入・検討はなされていない。

本研究は、省エネルギー技術である地中熱空調システムを日本の都市部で利用できる技術として確立することを主目的とし、まず近年、都市部で利用が増加している場所打ちコンクリート杭を地中熱交換器として利用した新たな地中熱利用方式の提案を行い、その熱特性の把握や施工方法の確立を行う。次に都市部で竣工物件数が多い事務所ビルでの採用を目指し、東京を例とし冷房負荷が暖房より多い場合の地中熱利用を含む空調システム全体の設計方法、運転方法およびイニシャルコストを反映した投資対効果などの検討を行った上で、現在広く用いられている空気熱源ヒートポンプを用いた空調システムと比較し、

省エネルギー率(電力量削減率)30%, 単純投資回収年数 10 年以内とした空調システムとして確立することを目的とする。

## 2. 場所打ち杭を利用した地中熱交換器の概要

図-1 に場所打ち杭を利用した地中熱交換器の概要を示す。直径 800～4000mm の場所打ち杭の外周部に樹脂製の U 字型の熱交換用配管を複数本設置する。熱交換用配管は、場所打ち杭の構造用鉄筋(鉄筋かご)に設置されている偏芯防止用のスペーサーに取り付ける。この方式を取ることで、熱交換用配管が構造上決定された杭径内部ではなく杭径

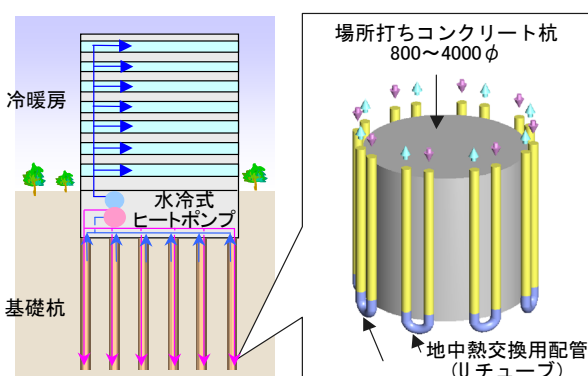


図-1 地中熱交換器の概要

外周部に設置されることとなり、構造設計上の断面欠損を回避できる。また杭外周部に設置することにより、できる限り熱交換用配管同士の熱干渉を抑え、採放熱量を最大化させることを意図している。熱交換用配管の本数は、杭径と地中採放熱量との関係から最適な本数を選択する。熱交換用配管は、樹脂製配管を使用するため半永久的に利用可能である。

## 3. 実大モデルによる実証実験

提案した地中熱交換器を実際に設置した実大実験装置により、事務所を模擬した年間での実負荷運転実験を行い、採放熱特性・地中温度変動などの把握を行った。

- (1) 実験サイトによる地中採放熱量は、最大 260～280 W/m(U チューブ 1 対当たり 32～35 W/m)、期間平均で 170～190W/m 本(22.5W/m 対)であることを確認した。
- (2) 杭長を 20m とすると 1 本当たり 3.4～3.8kW の熱量が地中から期待できる。6×6m スパン(36 m<sup>2</sup>)で空調面積 60%(22 m<sup>2</sup>)、空調負荷を 100W/m<sup>2</sup>とすると 2.2kW の負荷となるため、杭 1 本で約 2 フロア分の空調を負担することが可能である試算となる。
- (3) 冷房・暖房時の地中熱源ヒートポンプの効率と同じ運転期間を想定した空気熱源ヒートポンプとの効率の比較を行った結果、冷却、加熱 COP 平均は、地中熱源 HP は 4.65(冷却), 4.00(加熱)と空気熱源 HP の 2.87(冷却), 2.71(加熱)よりも 50～60%程度高く、効率の良いシステムであることが確認できた。
- (4) 実験開始時の地中温度を基準温度として、それぞれの年の冷・暖房運転開始時の地中温度を差し引いた基準温度差で比較すると、冷暖房それぞれの期間での採放熱の影響により、冷蓄熱および温蓄熱効果がみられ、地中熱利用による期間蓄熱運転が可能であることを確認した。
- (5) 2003 年, 2004 年とも冷房時の放熱量が暖房時の採熱量よりも多く、採放熱比は 0.51,

0.69 となったが、運転時間や中間期の運転停止などすることにより、採放熱比が 1(放熱量合計=採熱量合計)とならない場合でも、地下水流により地中温度を適正な温度域に保つことができることを確認した。

#### 4. 実建物へのシステムの適用

提案した地中熱交換器を実施適用した物件での施工方法やイニシャルコストの分析、問題点や改良点の検討を行った。システムは、1 階エントランス部分(約 100m<sup>2</sup>)の空調(冷却：2.5kW，加熱：2.8kW)に用いるために、場所打ち杭(直径：1.5m，杭長：18m，1 本)に熱交換用配管(高密度ポリエチレン管 U 字管 20A)を外周に 8 対設置した熱交換杭の施工を行った。結果、地中熱交換用配管を設置しない通常杭と比較すると施工時間および施工人工の増加により、約 1.5 万円/m の増となったが、一般的なボアホール方式と比較すると、単位採放熱当り 72 円/m となり、ボアホール方式の 300 円/m の約 1/4 となった。

#### 5. 地中熱交換器の低コスト化の検討

提案した地中熱交換器のさらなるイニシャルコスト削減を目的に施工方法や工法に適した配管材に関して簡易モデルを用いた施工実験による検討と配管材の熱応力解析を行った。

- (1) 場所打ち杭の鉄筋かごは、杭長に対して搬送しやすいように 10m 以内に分割されたものを繋いで掘削穴に挿入される。そこで、事前に地上部で鉄筋かごに配管を取り付け、鉄筋かごを繋ぐ際に配管も繋ぐ低コスト施工法(配管接続工法)を提案した。
- (2) 低コスト施工法に対応できる配管材および接続方法を施工実験で検証した。結果、耐衝撃性硬質塩化ビニル管(溶剤接着)と金属強化ポリエチレン管(圧縮継手)が施工に適した配管材および配管接続方法であると判断した。
- (3) 耐衝撃性硬質塩化ビニル管を使用した場合、先端形状や拘束点(固定点)を適切にし、かつ必要吸収代を確保できる緩衝材を 2mm 程度先端部に巻き施工することにより、熱応力による応力破壊を防ぐことが可能であることを確認した。
- (4) 耐衝撃性硬質塩化ビニル管を用いた場合は 6,153 円/m となり試験適用時の約 60%のコストダウンとなった。

#### 6. 地中熱交換器形状の最適化の検討

場所打ち杭を熱交換器として利用する場合、計画地の土壌条件や杭間隔・杭長などを考慮して杭周囲に配置する熱交換用配管の本数や配管内の流速などを考慮した最適な熱交換器形状を決定する必要がある。そこで作成した地中熱移動シミュレーションに基づく採熱量予測モデルを用いて、実際に本システムの採用検討を行った物件をモデルとして地中熱交換器形状の最適化の検討を行った。

- (1) 杭周囲の配管を 4 対・8 対・16 対とした場合、冷房時に地中熱交換器出口温度が平均して低く、暖房時に高い 8 対がヒートポンプ効率を考えると最も適した形状となった。
- (2) 8 対で管内流速をパラメータとした場合、管内流速が最も早いケースで地中熱交換器

出口温度が運転期間中低く、ヒートポンプ効率を考えると最も適している結果となった。しかし、流速を早くした場合は、配管の摩擦損失水頭が増え、ポンプ動力が増える結果となり、ポンプの初期投資およびランニングコストが増えることが懸念される。配管内の流速は  $Re$  数が乱流( $Re > 2100$ )となる流速にし、循環水と地中の温度差が大きくなるような計画が必要である。

- (3) 地中熱交換用配管の埋設長さを約半分の 18m とした場合、地中熱交換器出口温度の期間平均は 37m に比べると冷房時高く、暖房時に 2.5~3℃ 低くなり、ヒートポンプ効率を下げる原因となる。

## 7. システムの最適運転手法の検討と各種評価

場所打ち杭を熱交換器として利用した地中熱空調システムと他の熱源を用いた空調システムとのフーズビリティスタディを行い、ライフサイクルなどの各種評価を行った。さらに、地中熱空調システムの運転月や運転時間を考慮した運転手法に関する検討も併せて行った。比較を行う空調システムは、熱源機器を台数分割して設置した中央熱源方式とし、一般的な空冷ヒートポンプを設置した空冷システム、空冷ヒートポンプを台数分割した 1 台を基礎杭利用の地中熱交換器で地中と熱交換を行った熱源水を利用する水冷ヒートポンプに置き換えた地中熱システム、同じ水冷ヒートポンプを用いて、熱交換を冷却塔で行う冷房専用機とした水冷システムの 3 システムとした。地中熱システムは、運転時間・月の違いで 2 ケースの設定とした。

- (1) 空冷システム、水冷システムと比較すると地中熱システムが最も省エネルギーとなり、空冷システムと比較すると 6~7% の削減効果となった。
- (2) 地中熱システムの運転方法は、6~8 月の 3 ヶ月間、9~18 時までの運転よりも、6~9 月、10~17 時の運転を行うことでさらに省エネルギーとなる。ただし、暖房時との採放熱量のバランスを保つ範囲で運転期間を長く、1 日の運転時間を短く、外気温度が高い時間帯に運転することが望ましい。
- (3) 6~9 月、10~17 時の運転とし、低コスト施工法(配管接続工法)を用いた地中熱システムの単純投資回収年数は 8.0 年となり、開発目標とした 10 年以内を達成した。
- (4) 空冷システムと比較すると地中熱システムは、 $LCCO_2$  が冷房運転期間を 6~9 月、運転時間を 10~17 時にした場合は、7.1% の削減、同様に  $LCE$  も 7% の削減効果があることを確認した。これより地中熱システムは地球環境保全の立場からも有効なシステムであると言える。

今後、日本の代表的な都市の土壌性状や冷暖房負荷・建物規模などを考慮したシステムの検討や竣工物件の継続的なデータ収集による運転実態のフォローなどを行うことにより、信頼性やシステムの認知度を高め、普及を図っていきたい。