

〔 解 説 〕

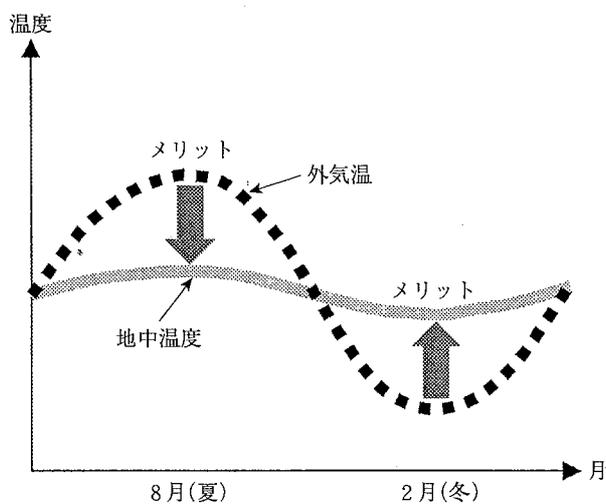
場所打ちコンクリート杭を用いた 地中熱利用空調システム

＜東京大学柏キャンパス環境棟への適用＞

大成建設(株) 関根賢太郎・横井 睦己／東京大学 大岡 龍三／ゼネラルヒートポンプ工業(株) 柴 芳郎
Kentaro Sekine Mutsumi Yokoi Ryozo Ooka Yoshiro Shiba

1. はじめに

第1図に地中温度と外気温の関係を模式的に示す。地中の温度は、地表面および地表面から10mより浅い部分は、外気温や日射・積雪などの影響を受け、年間で大きく変動する⁽¹⁾。しかし、10mより深い部分に関しては、その地域の年間平均気温とほぼ同じであり、1年を通じて安定した温度を得ることが可能である。



第1図 地中温度と外気温の関係

土壌を熱源とする地中熱源ヒートポンプを利用した空調システム（地中熱利用空調システム）は、この土壌の恒温性と莫大な蓄熱能力を活かし、夏季冷房時に土壌をヒートポンプの放熱源（ヒートシンク）、冬期暖房時は採熱源（ヒートソース）として利用することで、熱源機の高効率運転や季節間を通じた排熱の有効利用による省エネルギー・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、都市部における熱汚染（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導入され、その研究例および適用物件は数多くある。我が国でも古くから研究され⁽²⁾、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、欧米が3,000～5,000円/mであるのに対し、日本では、複雑な地盤性状による掘削時間の増加や少ない物件数で掘削機械導入コストの回収を行う必要があるなどの理由により10,000～20,000円/mと非常に高価である⁽³⁾。このことが地中熱利用空調システム導入のための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、我が国の適用物件増加の障害となっている。事実、ボアホール方式用いた8,000m²規模の事務所ビルにおける研究⁽⁴⁾では、回収年数を36～58年と試算している。

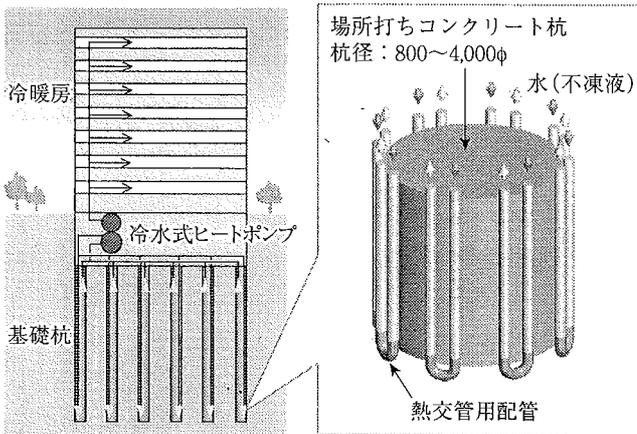
そこで地盤掘削費の削減のため、建物の基礎杭を地中熱交換器として利用するシステムが提案され⁽⁵⁾⁽⁶⁾、モデル建物が各地で試験的に実用化されつつある⁽⁷⁾⁽⁸⁾が、そのほとんどが既製杭（コンクリート杭や鋼管杭）を利用した方式である。しかし近年、都市部の建築物は、既製杭搬入時の交通事情や杭のコスト削減の観点から場所打ちコンクリート杭の採用が多くなっている。

そこで、地中熱利用空調システムの都市部での拡張・普及のため、都市部で利用が多い場所打ちコンクリート杭を地中熱交換器として利用するシステムの開発を行った。

2. システム概要

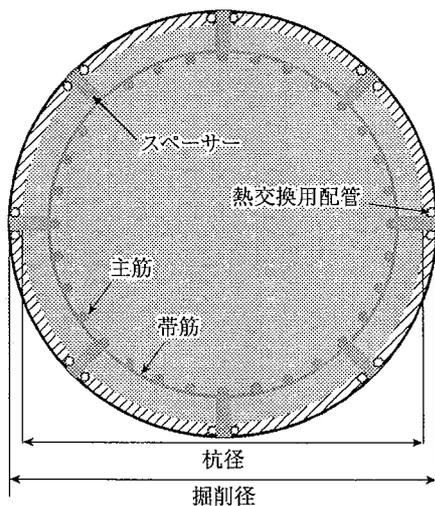
第2図に場所打ちコンクリート杭を利用した地中熱交換器の概要を示す。直径800～4,000mmの場所打ちコンクリート杭の外周部に先端がU字型となっている樹脂製の熱交換用配管（呼径：20～25A程度）を複数本設置する。各杭からの配管をまとめ、循環ポン

プを介して水冷式ヒートポンプ（地中熱源ヒートポンプ）に接続する。この配管内に水（凍結の恐れがある場合は不凍液）を循環させることにより、地中と熱交換を行う。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。また配管材質としては、樹脂製の配管を使用するため半永久的に利用可能である。



第2図 システム概要

第3図に熱交換用配管と鉄筋かごの配置図を示す。熱交換用配管は、場所打ちコンクリート杭の構造用鉄筋（鉄筋かご）に直接取り付けず、掘削孔と鉄筋かごの芯がずれないように鉄筋かごに取り付けられている偏芯防止用のスペーサーに取り付ける。



第3図 熱交換用配管と鉄筋かごの配置図

これにより、熱交換用配管が構造設計で決定された杭径内部ではなく杭径外周部に配置されるため、鉄筋のかぶり厚さ確保と断面欠損による杭径の増加を防止している。また杭外周部に設置することにより、出来

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も意図している。

3. システムの適用

本システムを『東京大学柏キャンパス環境棟』に適用した。本施設は、本郷・駒場キャンパスとともに、東京大学の三極構造の一極を担うとして位置づけられている柏キャンパス内にある。入居する環境学研究系は、新領域創成科学研究科の一翼を担い、環境問題の解決と明日の環境の形成法を研究する学科である。そのため、建物には外ルーバーなどの省エネルギーのための工夫やクールチューブ・ソーラーチムニーなどの自然エネルギー利用技術が積極的に盛り込まれている。そこで、自然エネルギー利用技術の一つとして『場所打ちコンクリート杭を熱交換器とした地中熱利用空調システム』の適用を行った。

4. 建築概要

建物名称：東京大学柏キャンパス環境棟

所在地：千葉県柏市柏の葉5-1-5

事業者：(株)とうきょうアカデミックサービス

計画コンセプト・建築設計ディレクション

：大野秀敏+東京大学大野研究室

設計：日本設計・大成建設設計共同企業体

監理：(株)日本設計

施工：大成建設(株) 千葉支店

(株)関電工 千葉支店

建築面積：3,490.36m²

階数：地上7階、地下1階、棟屋1階

延床面積：21,031.77m²

構造：鉄筋コンクリート造（一部鉄骨造）

写真1に建物外観を示す。建物は、足元のコリドーを作る列柱と断熱鋼板パネルと有孔亜鉛メッキ鋼板のルーバーが各面で異なる表情をつくる上層階から構成されている。

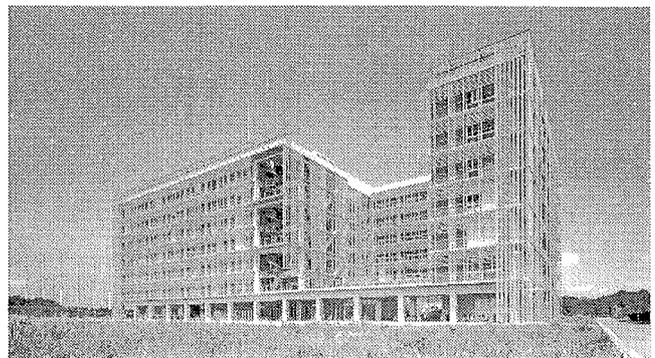
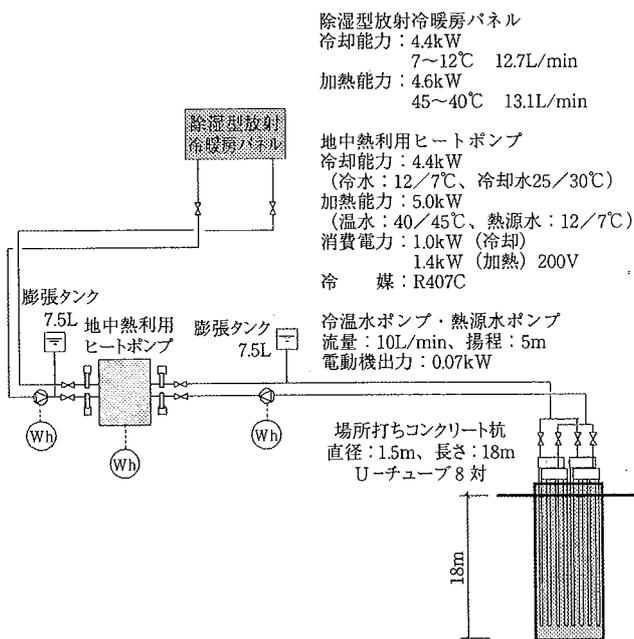


写真1 建物外観

5. システム概要

第4図にシステム図を示す。地中熱利用空調システムは、本施設利用者の接する機会が多い1階エントランス部分(約100m²)の空調に利用することとした。そこで、総本数90本ある場所打ちコンクリート杭の1本を熱交換杭とした。



第4図 システム図

熱交換杭は、直径1.5m×深さ18mの杭周囲に熱交換用配管(高密度ポリエチレン管: PE100 Uチューブ20A)を8対設置した。

地中熱利用ヒートポンプは、冷却: 4.4kW、加熱: 5.0kWとし、二次側負荷処理用として除湿型放射冷暖房パネル(冷却: 4.4kW(顕熱: 2.5kW、潜熱: 1.9kW)、加熱: 4.6kW)を設置した。写真2に地中熱利用ヒートポンプ、写真3に除湿型放射冷暖房パネルを示す。

なおエントランス以外の教室や研究室の空調方式は、個別分散方式(ビルマルチ方式)を採用している。

写真4に熱交換杭施工時の状況を示す。熱交換用配管は、偏芯防止用のスペーサーにインシュロック(ビニル結束紐)で取り付けた。

6. 運転実績

施設は、2006年4月から利用が始まった。そこで本システムの実負荷での運転性能の把握を行った。運転期間および時間は以下の通りである。



写真2 地中熱利用ヒートポンプ

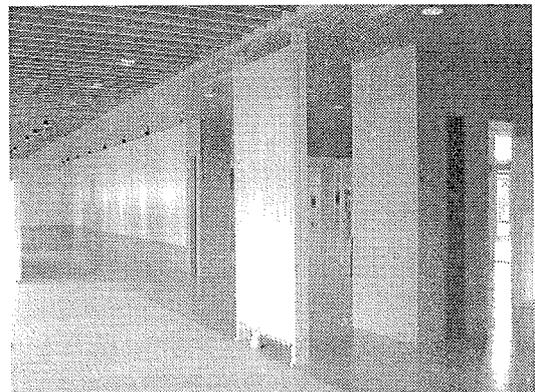


写真3 除湿型放射冷暖房パネル(エントランスに設置)

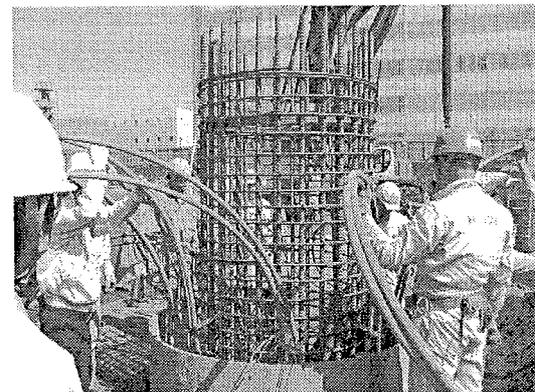


写真4 熱交換杭施工状況

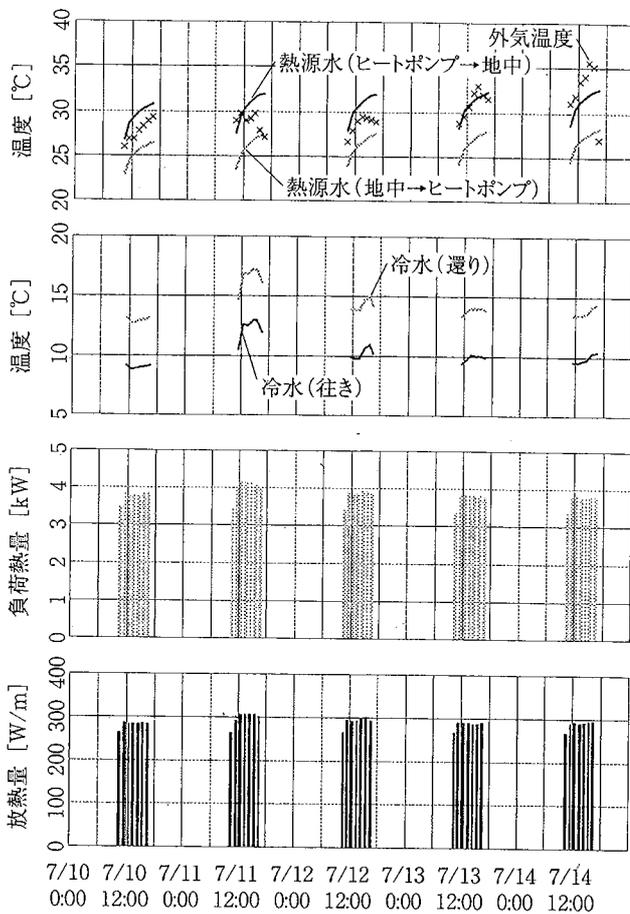
冷房期間: 2006年7月6日~9月30日

運転時間: 月~金 10:00~17:00

(1) 冷房運転状況

第5図に夏期冷房期間(代表週)の運転状況を示す。

熱源水行き(ヒートポンプ→地中)の温度は、26.8℃から32.6℃で運転しており、代表週の運転期間

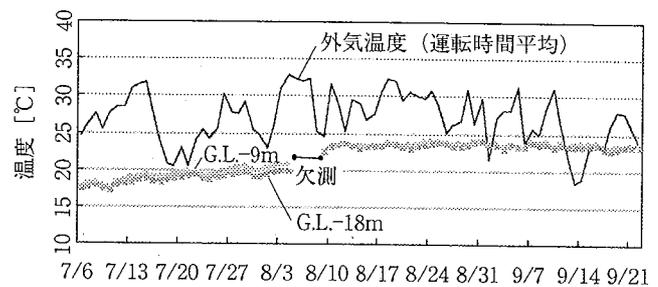


第5図 夏期冷房期間(代表週)運転状況

本当たり熱交換用配管は8対設置しているため、熱交換用配管1対当たりになると約36W/m・対であり、計画時に敷地条件(造成地[盛土])を考慮して行った事前シミュレーション結果とほぼ同じ値となった。

(2) 地中温度

第6図に冷房期間中の地中温度変動を示す。なお、地中温度測定点は単独で設置しておらず、地中熱交換杭の配管表面に設置した温度センサーで代用した。そのため、運転中の配管温度の影響を受けないようにするため、運転開始直前の9:00の温度をグラフ化した。



第6図 冷房期間地中温度変動

平均温度は、30.6℃であった。一方、地中へ放熱した後の熱源水還り(地中→ヒートポンプ)の温度は、22.9℃から28.2℃で運転し、期間平均温度は26.2℃であり、熱源水往還温度差は平均4.4℃であった。

一方、夏期冷房期間(代表週)での空調運転時間の外気温度は、26.0～35.6℃、平均外気温度は29.7℃であり、熱源水還り(地中→ヒートポンプ)の期間平均温度との差は3.5℃であった。このことから運転期間中は、地中熱の利用により大気を利用した熱源よりも効率の高い運転ができたことになる。冷水(行き)温度は、8.8～13.0℃、平均10.3℃と設計値に比べ若干高いが、冷水(還り)との温度差も約4.0℃であった。

負荷熱量は、夏期冷房期間(代表週)中3.4～4.2kW、平均3.8kWであった。夏期冷房期間(代表週)の負荷熱量合計は、133.5kWh、ヒートポンプ消費電力量は31kWhであり、機器単体COPは4.31とほぼ定格通りの運転を行うことができた。

地中への杭長さ当たりの放熱量は、264～307W/m・本、期間平均で290W/m・本であった。杭1

G.L.-9m(杭深さ方向中央)と-18m(杭最深部)では、大きな差は見られなかった。運転開始時の7/6は17.5℃であった地中温度は、放熱の影響を受け運転開始から徐々に上昇し、運転終了時の9/21は23.5℃となった。このことから、運転開始から終了までの空調排熱の影響で地中温度は約6.0℃上昇したことになる。

空調運転時間の外気温度の平均と地中温度を比較すると冷房期間後半で外気温度が地中温度を下回る日が出現するが、それ以外は地中温度が低く、地中熱利用の有効性が確認できた。

7. イニシャルコスト

本システムのイニシャルコスト把握のために、施工を行った際のコスト把握を行った。

地中熱交換杭施工時に時間・人工などの確認を行い、併せて行った同形状の通常杭との比較を行い、熱交換杭の工事費を算出した。

一般的に用いられるボアホール方式と提案した場所打ちコンクリート杭を併用したシステムの建設費の比較を第1表に示す。一般的なボアホール方式は、シングルUチューブとし、Uチューブ1対当たりの採放熱量は、40W/mあるとした。また、掘削費は10,000円/mとした。提案システムの採放熱量は冷房運転運転実績値の期間平均を用いた。

単位採放熱当たりの提案システムの建設費は50円/Wとなり、ボアホール方式の300円/Wと比較すると約1/6となることを確認した。

8. おわりに

本施設は、今年2年目の夏を迎えている。今回示したデータをもとに、より効率的な運転となるよう調整を行い、今後も長期での運転実績データを蓄積し、本システムの有効性を検証していく予定である。なお本システムは、東京都内の某事務所ビルにて杭本数20本、杭長37mでの適用が決定し、現在施工中である。この施設においても竣工後の運転実績データのフォローを行う予定である。

今後も環境配慮型建築などに本システムを積極的に提案し、省エネルギーと地球環境保全に対して貢献していく予定である。

本研究の一部は、平成15・16年度(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構『エネルギー使用合理化技術戦略的開発 エネルギー使用合理化技術実用化開発大都市における基礎杭を利用した地中熱空調システムの普及・実用化に関する研究(研究代表者東京大学大岡龍三助教授)』によった。

第1表 熱交換方式によるイニシャルコスト比較

熱交換方式	ボアホール (シングルUチューブ)	本システム (Uチューブ8対)
採放熱量[W/m]	40	290
掘削コスト[円/m]	10,000 (配管設置込み)	-
配管費[円/m]	2,000	4,995
配管施工費[円/m]	-	1,955
杭工事費(増分)[円/m]		7,614
コスト計[円/m]	12,000	14,564
採放熱量当たり[円/W]	300	50

〔謝辞〕

除湿型冷暖房放射パネルの導入に際しては、ピーエス(株)殿のご協力を得た。ここに感謝の意を表す。

<参考文献>

- (1) 渡辺 要：暖冷房設計用地中温度，空気調和・衛生工学会，第38巻，第2号，1964年2月号，pp.23-32
- (2) 長野克則・落藤 澄・他：土壌熱源ヒートポンプシステムに関する研究(第1～4報)，空気調和・衛生工学会論文集，No.54(1994-2)，pp.55-66，No.56(1994-10)，pp.25-34，No.58(1995-6)，pp.1-11，No.60(1996-2)，pp.39-49

- (3) (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構：地球熱利用システム 地中熱利用ヒートポンプシステムの特徴と課題(2004)，pp.7
- (4) 相賀 洋・石野久彌・三小田憲司・富家貞男：ボアホール地中熱交換器を用いた地中地盤蓄熱システムの性能評価に関する研究，日本建築学会計画系論文集，No.555(2002-5)，pp.77-84
- (5) 森野仁夫・岡 建雄：鋼管杭による土壌放熱・採熱に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，No.404(1989-10)，pp.49-57
- (6) 竹内正紀・宮本重信・木村昭夫・坪田論治：基礎くい利用地熱融雪法の開発と数値シミュレーション，空気調和・衛生工学会論文集，No.52(1993-6)，pp.59-69
- (7) 濱田靖弘・窪田英樹・中村真人・横山良太郎・落藤 澄・長倉香織・斎藤 央・圓山彬雄・照井康穂：空調用エネルギーパイルシステムに関する研究，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(2001)，pp.353-356
- (8) 加賀久宣・宮本重信・西畑正一・多田幹男・小林一郎・竹内正紀・大岡龍三：基礎杭利用地熱空調システムの研究開発(その1) 実大実験システムによる性能検証，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(2001)，pp.345-348
- (9) 関根賢太郎・大岡龍三・横井睦己・柴 芳郎・黄 錫鎬・南有鎮：場所打ち杭を用いた地中熱空調システムの普及・実用化に関する研究(第1報) 実験による熱特性の把握とフィージブルスタディ，空気調和・衛生工学会論文集，No.107(2006年2月)

〔筆者紹介〕

関根賢太郎

大成建設(株) 技術センター 技術企画部 企画室 課長
〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1
TEL：045-814-7221 FAX：045-814-7250
E-Mail：kentaro.sekine@sakura.taisei.co.jp

大岡龍三

東京大学生産技術研究所
都市基盤安全工学国際研究センター 准教授
〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1
TEL：03-5452-6435 FAX：03-5452-6432
E-Mail：ooka@iis.u-tokyo.ac.jp

横井睦己

大成建設(株) 設計本部 設備計画グループ
シニア・エンジニア
〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1
TEL：03-5381-5253 FAX：03-3340-2964
E-Mail：yokoi@arch.taisei.co.jp

柴 芳郎

ゼネラルヒートポンプ工業(株) 開発部 次長
〒459-8001 名古屋市長区大高町巳新田121
TEL：052-624-6368 FAX：052-624-6095
E-Mail：yoshiro.shiba@zeneral.co.jp