

特集 「技術研究所再整備」

コルゲート管を用いた二重管方式地中熱利用システム

三小田 憲 司 土 屋 貴 史
金 子 正
(本社特殊工法部)

Double Tube Type Geothermal Energy Utilization System using Corrugate Pipe

Kenji Mikoda Takashi Tsuchiya
Tadashi Kaneko

Abstract

Recently, ground source heat pump systems have attracted considerable attention because they are eco-friendly and can be used to conserve energy. In Japan, however, the considerable expense involved in digging to set up an underground heat exchanger has limited their wide-spread use. This report describe a relatively inexpensive underground heat exchange method and the thermal performance of the method by the heat extraction test. We developed an inexpensive double-tube-type underground heat exchanger with a corrugated pipe used as the permanent anchor's protection tube. The underground heat exchanger of double-tube-type structure using a light resin pipe is a new type and construction of this exchanger is easy. Heat extraction test confirmed that the thermal performance of the corrugated tube method was 20% higher than that of conventional methods.

概 要

地中熱を利用したヒートポンプ冷暖房システムは、省エネルギー性や環境保全性に優れているため、最近注目を集めているが、国内では地中熱交換器を設置するための掘削工事費が高いことが、普及を妨げる大きな要因となっている。そこで、永久アンカーの保護管として広く用いられているコルゲート樹脂管を用いて、従来にない樹脂管を用いた二重管構造の安価な地中熱交換器を開発した。従来から広く利用されているダブルU字管を用いた間接熱交換方式とコルゲート管を用いた二重管方式の地中熱交換器をそれぞれ技術研究所敷地内に設置して採熱比較実験を行い、採熱性能について比較した。その結果、コルゲート二重管方式の地中熱交換器の方が、従来型ダブルU字管方式よりも採熱能力が20%高いことが確認できた。

1. はじめに

地中熱利用システムは、省エネルギー性に優れ、CO₂排出量の削減効果やヒートアイランド現象の抑制効果が得られることから、環境負荷の小さい冷暖房システムとして最近注目を集めている。米国や北欧では普及が進んでいるが、国内では地中熱交換器を設置するための掘削工事費が高いことが、普及を妨げる大きな要因となっている。そこで、一定の市場が形成されている永久アンカー工事の掘削技術を地中熱利用システムに応用できれば、従来価格より安価に地中熱交換器を施工できる点に着目した。また、永久アンカーの保護管として用いられているコルゲート樹脂管を地中熱交換器の外管として利用し、その中に水を貯めて、地上ヒートポンプとの循環用配管を挿入した二重管構造の地中熱交換器を開発した。二重管構造の地中熱交換器は、従来方式のU字管を用いた間接熱交換方式の地中熱交換器よりも採熱能力が高いと言われており、コルゲート樹脂管を利用した二重管構造の地中熱交換器を用いれば、安価でなおかつ高効率な地中熱利用方式を実現できる可能性がある。しかし、過去に

行われている鋼管杭やコンクリート杭を用いた二重管構造の地中熱交換器は、一般に400mm～2,000mmの大口徑で、杭内部の水保有量が大きい。コルゲート管方式の場合は、永久アンカー工事で多用される135mmの小口徑に限定される。また、外管が樹脂製のため、鋼管杭よりも熱伝導率が低い。コルゲート樹脂管を用いた二重管方式は、今までに実施されたことのない地中熱利用法であり、その採熱能力を把握するためには、実際に試験を実施して検証する必要がある。そこで、従来方式のダブルU字管を用いた間接熱交換方式とコルゲート管方式の試験体を技術研究所敷地内に設置し、2つの試験体を対象に同じ条件で採熱実験を行った。互いの採熱能力を比較することで、従来方式に対するコルゲート管方式地中熱交換器の優位性が明らかになったので、ここに報告する。

2. コルゲート二重管方式の提案

2.1 コルゲート二重管方式の位置付け

Fig. 1に、垂直管方式の地中熱交換器を分類した。掘削方式を軸に分類した場合、100～200mm程度の細口徑で、

50～120mの比較的深い掘削深度で行うボアホール方式と、400～2,000mm程度の大口徑で、基礎杭と兼用し10～30m程度の比較的浅い掘削深度で行う杭方式に分けられる。熱利用方法を軸に分類した場合、地中に埋設したU字管の中に水や不凍液を循環させるUチューブ方式と、地中に埋設した外管の中に水や不凍液を貯める二重管方式に分けられる。コルゲート二重管方式では、掘削口径は永久アンカー工事の定型である135mmの細口径に固定して、掘削深度は50～100m程度の比較的深い領域を想定している。従来の分類方法に従えば、コルゲート二重管方式は、ボアホール掘削方式を採用した杭二重管型と位置付けられる。杭二重管型の地中熱交換器については、過去にもコンクリート杭¹⁾や鋼管杭²⁾が実施されているが、コンクリート杭の場合は、杭に亀裂が生じて杭内の水が空になる事態がしばしば生じており³⁾、鋼管杭の場合は、材料費や埋設費用がかかり、外部からの酸素混入による水の腐食も懸念される。これに対して、コルゲート樹脂管は、材料が安価で取付けが容易であり、永久アンカーとしての実績より、地中に長期間放置しても腐食性に対する信頼性が高い。

2.2 コルゲート二重管方式の構成

Fig.2に、コルゲート二重管方式の地中熱交換器の仕様を示す。外径85～95mmで、蛇腹形の高密度ポリエチレン製コルゲート管の中に水（または不凍液）を貯める。コルゲート管内には、長短2本の循環用配管（20Aポリエチレン管または塩ビ管）を挿入する。夏季放熱時は、地上のヒートポンプから短管へ送水し、長管から還水するが、冬季採熱時は、地上のヒートポンプから長管へ送水し、短管から還水する。地中熱交換器の頭部と底部には、試験により350kPaの耐圧性を確認したステンレス製の専用金具を装着した。頭部金具には、送水・還水管口と計測センサー口のねじ止めソケット式の取付け口を装備し、地中埋設後でも簡単に送水・還水管の交換が出来るようにした。掘削孔とコルゲート管の間には、珪砂に熱伝導率の高い粒状炭化ケイ素を10%添加した高熱伝導性充填材で埋め戻す。

2.3 コルゲート二重管方式の採熱特性

Fig.3にコルゲート樹脂管を用いた二重管構造の地中熱交換器の特徴を示す。従来ダブルU字管方式と比較すると、以下の理由により高い採・放熱性能が期待できる。

- 1) 周辺土壌との有効接触面積が大きい。
- 2) 高熱伝導性充填材を管外側に充填することで、熱伝導性が向上する。
- 3) 循環流体の地中での滞留時間が長い。
- 4) コルゲート管が蛇腹形でフィン効果が期待できる。
- 5) U字管方式のような送り側管と還り側管との間のショートサーキットがない。

名称	シングルUチューブ	ダブルUチューブ	同軸管	杭二重管	杭Uチューブ	場所打杭
掘削型式	ボアホール	ボアホール	杭	杭	杭	杭
熱利用法	Uチューブ	Uチューブ	二重管	二重管	Uチューブ	Uチューブ
管断面						
鉛直断面						
外管材	—	—	コンクリート、鋼管	コンクリート、鋼管	コンクリート、鋼管	鉄筋コンクリート
送水管材	ポリエチレン、銅	ポリエチレン、銅	ポリエチレン、塩ビ	ポリエチレン、塩ビ	ポリエチレン、銅	ポリエチレン
孔充填材	珪砂、モルタル	珪砂、モルタル	水、不凍液	水、不凍液	水、珪砂、モルタル	コンクリート
長所	信頼性	信頼性	採放熱能力大	採放熱能力大	本設杭兼用可	本設杭兼用可
短所	掘削費	掘削費	掘削費	漏水腐食対策	漏水対策	施工性難

Fig. 1 地中熱利用方式の分類
Classification of Ground Source Heat Pump System

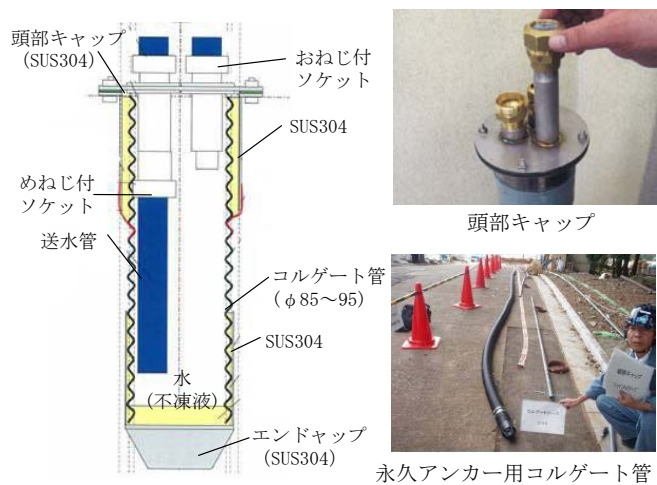


Fig. 2 コルゲート二重管方式の仕様
Specification of Corrugate pipe as Double Tube Type Ground Heat Exchanger

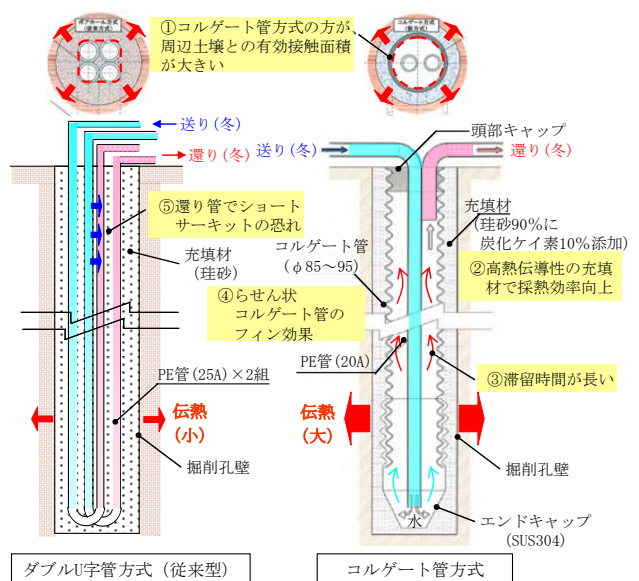


Fig. 3 コルゲート二重管方式の特徴
Feature of Corrugate pipe as Double Tube Type Ground Heat Exchanger

3. 実証実験の概要

3.1 実験施設

Fig.4に実験施設の配置図を示す。実験は技術研究所内の裸地に、従来型のダブルU字管方式とコルゲート二重管方式の地中熱交換器を約9m離して設置した。地上熱源は計測小屋内に設置した循環冷却水槽で模擬負荷を与え、各地中熱交換器と循環冷却水槽を地上配管で接続し、配管には断熱を施した。

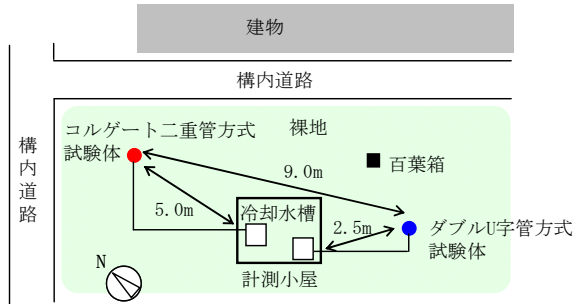


Fig. 4 実験施設の配置
Site of Experimental Facility

3.2 試験体の概要

Fig.5に実験装置の系統図を示す。ダブルU字管方式の試験体は、全長30mのU字管(25A高密度ポリエチレン製、外径33mm、肉厚3mm)2組を掘削孔内に挿入し、空隙部分は珪砂(東北珪砂5号)で埋め戻した。コルゲート二重管方式は、全長30mの蛇腹形コルゲート管(高密度ポリエチレン製、外径85~95mm、肉厚1.5mm)を掘削孔内に挿入した。コルゲート管内には水を注入し、送水管と還水管を挿入した。送水管は管先端がコルゲート管底から500mmの位置に設置し、還水管は管先端がコルゲート管頭から1,000mmの位置に設置した。掘削孔とコルゲート管のあいだの空隙部分は、珪砂90%に対して熱伝導性の高い粒状炭化ケイ素(粒径1.2~2.4mm)を10%配合した高熱伝導性の充填材で埋め戻した。試験体の大きさは、ともに深さ30m、掘削孔径135mmとした。各試験体は、それぞれ定格出力2.2kWの循環冷却水槽2機(循環ポンプ内蔵)に配管接続した。

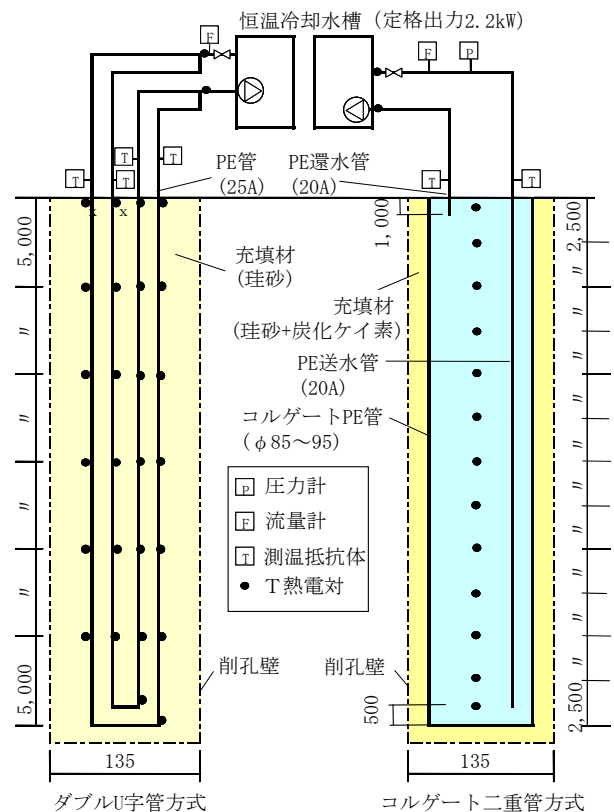


Fig. 5 実験装置の系統図
System Diagram of Experimental Facility

3.3 土壌特性

Fig.6には、過去に技術研究所内の観測井で観測した地下水位(1997~2008年)と土質柱状図を示す。深さ22mまでの土質調査では、表層6m位までは関東ローム層に覆われているが、表層より深い地層は礫層が中心である。地下水位は1~7月は12m程度であるが、8~12月になると8m前後まで上昇する。夏から秋にかけて雨量が多く、冬から春にかけては雨量が少ないことが影響していると考えられる。Fig.7に、U字管方式試験体の管壁表面で測定した垂直温度分布(2010/1/14~31期間平均)を示す。地表から5m間隔で測定した結果、5mより深い地点の温度は日変動もほとんど安定しており、期間平均温度は17.5~18.5°Cであった。



Photo 1 U字管試験体
U-tube model



Photo 2 コルゲート管試験体
Corrugate-tube model

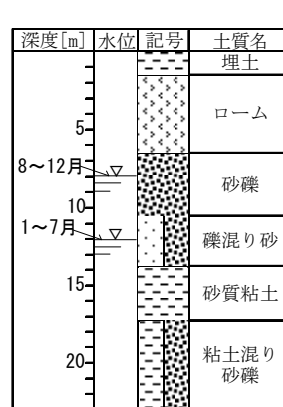


Fig. 6 地質柱状図
Geological Column

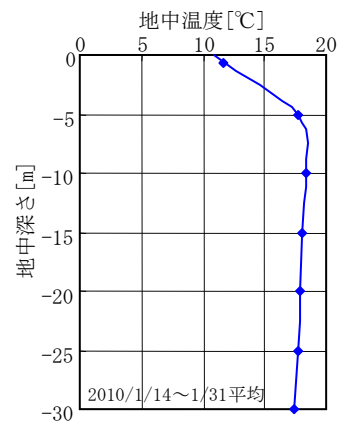


Fig. 7 土壌の垂直温度分布
Vertical Temperature
Distribution of Underground

3.4 実験方法

各試験体への送水温度を調節できる恒温循環冷却水槽2機を用意して、送水温度や循環流量を同じ条件に設定して、採熱実験を行った。計測は、U字管壁温度およびコルゲート管内水温の垂直分布はT型熱電対で測定し、送水・還水温度は測温抵抗体(pt100)で測定した。循環流量は、コリオリ式流量計で測定した。コルゲート管型は、圧力計を用いて管内圧力を測定した。計測データは1分間隔で記録した。Table 1に採熱実験スケジュールを示す。2010年2月23日から試運転を開始し、本実験は3月8日から4月23日まで実施した。運転時間は、オフィスでの運用を想定した1日8時間の間欠運転と平日24時間連続運転の2パターンについて実施した。土日祝日は運転を停止し、地中温度の回復を図った。運転時の地中熱交換器の管入口温度は主に8℃で設定したが、5~10℃の範囲で変化させた実験も行った。循環流量は4~10L/minとした。なおダブルU字管型の循環流量は、U字管2組合計の流量であり、流量調整弁により、各U字管が同等の流量になるようにした。

4. 実験結果

4.1 採熱量の比較結果

Fig.8には、1日8時間の間欠運転を行った週間(TEST-1)の採熱率を示す。採熱率は、水の容積比熱、循環流量、送水と還水の温度差より採熱量を求め、熱交換器の全長で除することにより算定した。コルゲート管方式の方がダブルU字管方式より採熱率が高く、ダブルU字管方式の平均31.8W/mに対して、コルゲート管方式は平均38.6W/mであった。運転開始直後の9時頃は、ダブルU字管方式の採熱率57~64W/mに対して、コルゲート管方式は80~83W/mで35%程度高く、運転開始直後は管内に蓄えていた温水の直接回収ができるコルゲート管方式の方が、特に採熱率が高い傾向が見受けられた。運転中の外気温度は2~16℃と大きく変動しているが、ともに外気温度に関わりなく、安定して地中から採熱できた。

Fig.9には、連続運転を行った週間(TEST-4)の採熱率を示す。連続運転の時も、コルゲート管方式の方がダブルU字管方式より採熱率が高く、ダブルU字管方式の平均25.8W/mに対して、コルゲート管方式は平均29.8W/mであった。連続運転を開始して2日程度経過すると、ともに定常に近い状態に達した。逆に言えば、1日サイクルの間欠運転では、定常状態に達する前の採熱率が高い状態で運転されていることを意味しており、連続運転での平均採熱率は間欠運転の80%程度となった。

Table2に試験別の採熱実験結果を示す。運転時間、循環流量、地中熱交換器への送水温度の設定条件を変えて、採熱試験を行ったが、いずれの試験でもコルゲート管方式の方がダブルU字管方式より採熱率が高い結果が得られた。Table3にダブルU字管方式とコルゲート方式の期間採熱量を比較した。約2ヶ月に渡って、間欠運転と平日

Table 1 採熱実験スケジュール
Schedule of Heat Extraction Tests

試験No.	運転時間	管入口設定温度	循環流量	実験期間	日数
TEST-1	間欠(9~17時)	8℃	6L/min	10/3/08~3/12	5
TEST-2	間欠(9~17時)	8℃	8L/min	10/3/15~3/19	5
TEST-3	間欠(9~17時)	8℃	4~10L/min	10/3/23~3/26	4
TEST-4	連続運転*	8℃	6L/min	10/3/29~4/02	5
TEST-5	連続運転	8℃	8L/min	10/4/05~4/08	4
TEST-6	連続運転	8℃	10L/min	10/4/12~4/16	5

*: 連続運転は、月曜9時から金曜17時までの連続運転とする。

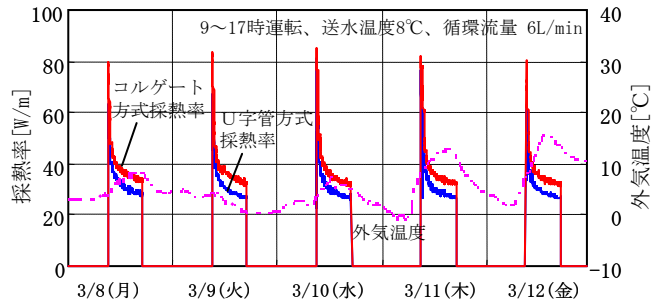


Fig. 8 間欠運転代表日の採熱率 (TEST-1)
Collected Heat from Ground (TEST-1)

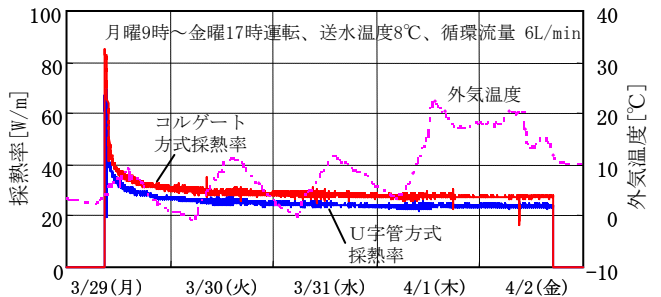


Fig. 9 連続運転代表日の採熱率 (TEST-4)
Collected Heat from Ground (TEST-4)

Table 2 採熱実験結果
The Results of Heat Extraction Tests

No.	運転時間	運転時間 [h/日]	循環流量 [L/min]	送水温度 [°C]	還水温度 [°C]	採熱率 [W/m]
TEST-1	ダブルU字管	8	6.1	8.13	10.37	31.8
	コルゲート管	8	6.1	8.15	10.87	38.6
TEST-2	ダブルU字管	8	8.0	8.13	10.09	36.5
	コルゲート管	8	8.0	8.17	10.50	43.4
TEST-3	ダブルU字管	8	7.0*	8.24	10.51	37.0
	コルゲート管	8	7.0	8.29	10.89	42.3
TEST-4	ダブルU字管	24	6.1	8.10	9.92	25.8
	コルゲート管	24	6.1	8.09	10.19	29.8
TEST-5	ダブルU字管	24	8.0	8.05	9.51	27.2
	コルゲート管	24	8.0	8.08	9.81	32.2
TEST-6	ダブルU字管	24	10.0	8.05	9.28	28.6
	コルゲート管	24	10.0	8.06	9.59	35.6

*: 平均値とする。

Table 3 期間採熱率の比較
The Comparison of Ratio of Corrected Heat from Ground

運転方式	項目	ダブルU字管	コルゲート二重管
間欠運転 (TEST-1~3)	延べ運転時間[h]	125	125
	採熱率[W/m]	33.0	39.5
	採熱比*[-]	1.00	1.20
連続運転 (TEST-4~6)	延べ運転時間[h]	276	276
	採熱率[W/m]	26.7	32.2
	採熱比*[-]	1.00	1.20

*ダブルU字管型を基準にした採熱率

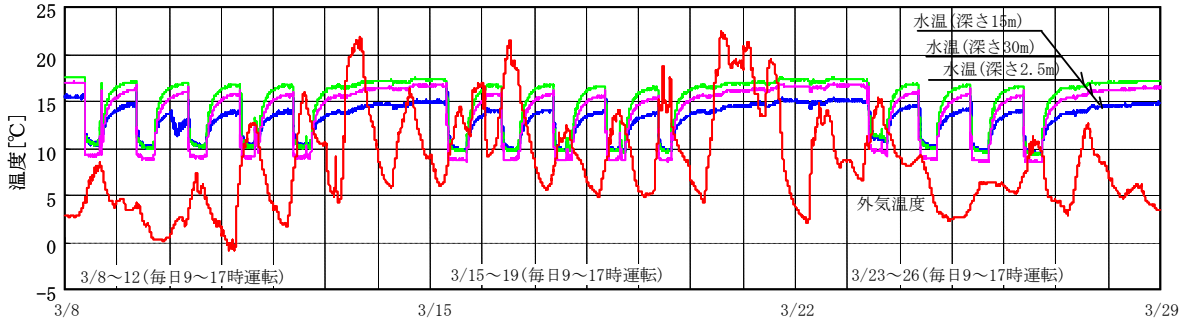


Fig. 10 間欠運転時のコルゲート管内水温と外気温度の変化 (TEST1~3)
Water Temperature in Corrugate Pipe and Outside temperature (Test1~Test3)

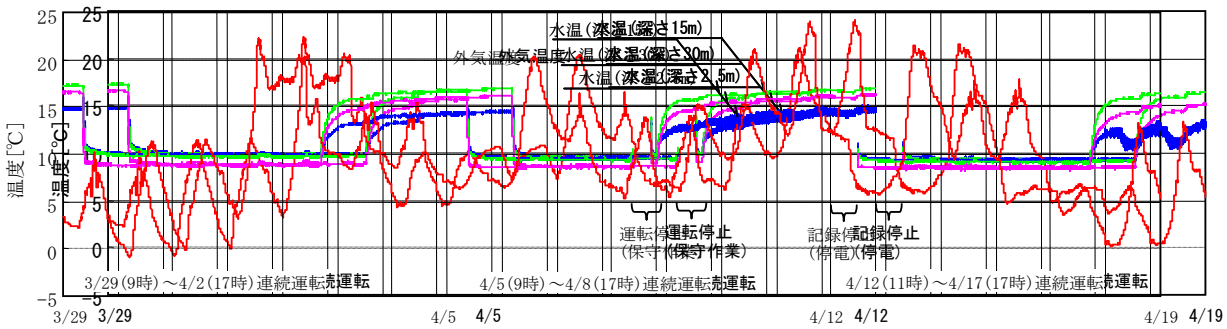


Fig. 11 間欠運転時のコルゲート管内水温と外気温度の変化 (TEST4~6)
Water Temperature in Corrugate Pipe and Outside temperature (Test4~Test6)

連続運転の2パターンで運転した結果、いずれも従来方式のダブルU字管方式を基準としたコルゲート管方式の採熱比は1.20で、採熱能力が20%程度高いことが確認された。

4.2 地中熱交換器内の温度変動

Fig. 10には、間欠運転(TEST-1~3)でのコルゲート方式の管内水温と外気温度の変化を示す。管底付近から冷水を送り、管頭付近から温水を回収する運転方式のため、採熱運転中は深い位置の温度が低い、運転開始直後を除けば管内の垂直温度差は1.0℃程度と小さかった。平日に9時から17時までの運転を継続した場合、翌日9時の運転開始前には前の日の9時にかなり近い状態まで温度回復し、月曜から金曜まで安定した採熱量が得られ、土日の運転停止中にはほぼ温度回復した。期間中に外気温度は大きく変動しているが、管内の温度性状には全く影響がなかった。

Fig. 11には、連続運転(TEST-4~6)でのコルゲート方式の管内水温と外気温度の変化を示す。連続運転においても、採熱運転中の管内の垂直温度差は1.0℃程度と小さかった。平日に24時間連続運転を継続した場合でも、土日の運転停止により、翌週月曜朝にはほぼ温度回復した。採熱運転中に外気温度が氷点下に達することもあったが、安定した採熱運転が行われており、管内の温度性状には外気温度の影響は全くなかった。

5. 数値シミュレーション

5.1 基礎方程式

コルゲート管方式の地中熱交換器の採熱性能を予測するために、数値シミュレーションを行った。解析モデルでは、管内の水温分布を一次元の熱拡散理論で与え、周辺土壌の温度分布を三次元熱伝導方程式で与えて、管壁の表面熱伝達を境界条件として連立した。計算には円筒座標系モデルを用いた。基礎方程式を(1)~(3)式に示す。

送水管の基礎方程式

$$\frac{\partial T_{wi}}{\partial t} = -V_{wi} \frac{T_{wi}}{\partial z} + \frac{\partial^2 T_{wi}}{\partial z^2} + \frac{h_{wi}(T_{wo} - T_{wi})}{c\rho V_{wi}} S_{wi} \quad (1)$$

コルゲート管の基礎方程式

$$\frac{\partial T_{wo}}{\partial t} = -V_{wo} \frac{T_{wo}}{\partial z} + \frac{\partial^2 T_{wo}}{\partial z^2} + \frac{h_{wi}(T_{wi} - T_{wo})}{c\rho V_{wo}} S_{wi} + \frac{h_{wo}(T_s - T_{wo})}{c\rho V_{wo}} S_{wo} \quad (2)$$

周辺土壌の基礎方程式

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\lambda_s}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} \right) \quad (3)$$

ここで、 h は熱通過率、 S はセル表面積、 T は温度、 V はセル体積、 $c\rho$ は容積比熱、 λ は熱伝導率を表し、添え字の s は土、 wi は採熱管、 wo はコルゲート管を表す。土

の熱伝導率は1.5W/mK, 容積比熱は3,250kJ/m³Kで与えた。境界条件は, 側面と底面は断熱境界とし, 地表面は(4)式で与えた。ここで, α は外気の総合熱伝達率, SATは相当外気温度を表す。初期条件として, 地中温度はFig.7の垂直温度分布の実測値を与えた。

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = \alpha(SAT - T_{z=0}) \quad (4)$$

5.2 数値シミュレーションの精度検証

Fig.12に, 1日8時間の間欠運転を行ったTEST-1における還水温度の実測値と計算値を示す。運転開始直後の1時間を除くと, 実測値と計算値の差は0.1℃程度で良く一致し, 採熱量に換算した場合の差は4%程度となった。Fig.13に, 24時間連続運転を行ったTEST-4における還水温度の実測値と計算値を示す。計算値の方が実測値よりやや温度が低いが, その差は0.3℃未満で比較的良く一致し, 採熱量に換算した場合の差は11%程度となった。各運転パターンにおける実験値に対して, 計算値は概ね一致しており, 本プログラムはコルゲート式地中熱利用システムの採熱性能を実用上有用な精度で予測できることを確認した。

6. 実物件への適用

技術研究所新本館では, 冷暖房熱源として地中熱源ヒートポンプシステムを導入する。Photo3に示すように, その一部にコルゲート管方式の地中熱交換器を採用した。設置場所は, 新本館の南側に約12m離れた地点で, 埋設深さ100mと深さ50mの2本設置した。運用時の性能を評価するために, 循環流量, 送水・還水温度を計測し, 代表する1本では, コルゲート管内の垂直温度分布(8点)を測定するとともに, 地中熱交換器の周囲0.5mと1.0mの地点にそれぞれ深さ30mの観測井を設置して, 周囲の温度変動を計測する予定である。測定データは, 中央監視室にて自動計測を行う計画になっている。

7. まとめ

永久アンカー工事で用いられるコルゲート樹脂管を利用して, 従来にない樹脂二重管構造の地中熱交換器を開発した。技術研究所敷地内で採熱実験を行い, 従来型のダブルU字管方式地中熱交換器と採熱能力を比較した結果, コルゲート二重管方式の方が採熱率は20%高いことを確認した。またコルゲート二重管方式の地中熱交換器について, 解析モデル化して数値シミュレーションプログラムを作成し, 実証試験データと検証した結果, 十分な精度で採熱量を予測できることを確認した。従来方式より安価に設置可能で, 採熱効率も高いコルゲート二重管方式の地中熱利用ヒートポンプシステムは, 技術研究所新本館に導入して, 今秋より運用する予定であり, 今後運用実績評価を通して, 信頼性の向上につなげたい。

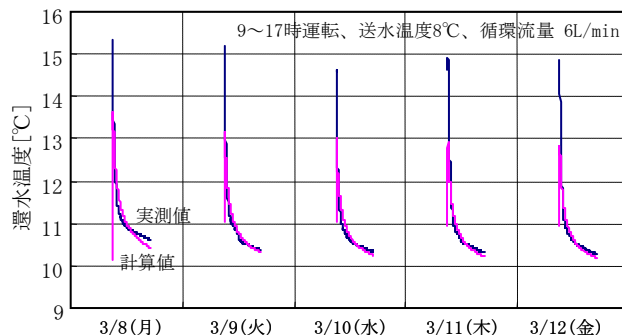


Fig. 12 計算値と実測値の比較 (間欠運転TEST-1)
Comparison between Experimental and Computed Results for Outlet Temperature (TEST-1)

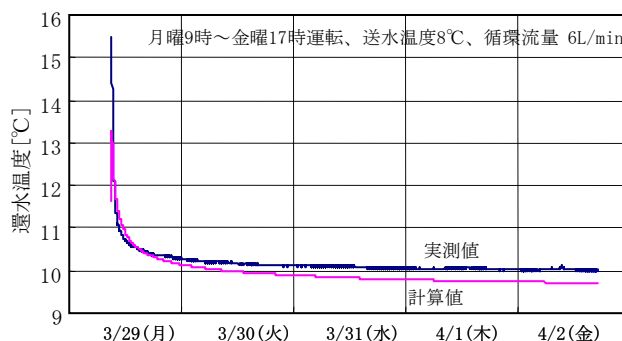


Fig. 13 計算値と実測値の比較 (連続運転TEST-4)
Comparison between Experimental and Computed Results for Outlet Temperature (TEST-4)



Photo 3 新本館でのコルゲート地中熱交換器施工状況
Example of construct on the Underground Heat Exchanger

参考文献

- 1) 森野, 他: 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第404号, (1989)
- 2) 竹内, 他: 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Mo. 52, (1993)
- 3) 梅田 正浩: コンクリート杭を熱交換杭に兼用したシステムでの漏水対策, 福井県雪対策・建設技術研究所年報地域技術第18号, (2005)