

三次元熱移動理論に基づくライニング地中熱交換器のモデル化

福井大学大学院 学生会員 ○柏岡 美咲
 福井大学大学院 学生会員 鈴木 遥介
 福井大学 正会員 寺崎 寛章
 広島工業大学 正会員 福原 輝幸
 株式会社エコ・プランナー 非会員 安本 晃央
 ベルテクス株式会社 非会員 谷口 晴紀

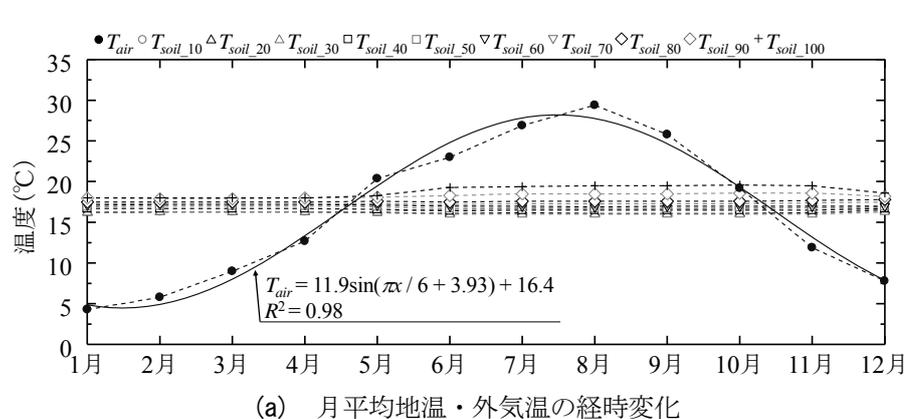
1. はじめに

日本では 2050 年に温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルを目標に、様々な分野で省エネ化を進めている。空調分野においては地中熱を利用した高効率な冷暖房システムに期待が高まっているが、地中熱交換器の設置費用が高額であることが主要因として普及が遅れている。このような背景から筆者らはライニング地中熱交換器(以下、LBHE)の研究開発を行っている。LBHE の特徴として袋状のライニング材を掘削壁に密着させて膨張させるため、熱交換面積と貯水量が大きいことが挙げられる。今後、LBHE を用いた冷暖房システムの普及を考えれば、LBHE の地中採・放熱量を評価するとともに、その利用方法を検討するための解析モデルを構築することが必要となる。

そこで本研究では、地中採・放熱量を左右する地温 T_{soil} (°C) および地盤の有効熱伝導率 λ_{eff} (W/m/K) を詳細に調べ、その結果を基に伝熱解析モデルを構築し、その妥当性を検証したので、その結果をここに報告する。

2. 地温モニタリング概要及び結果

福井県福井市にて 10 m 毎に T_{soil} を 2017 年 7 月から 2021 年 4 月現在まで長期間モニタリングを行っている。



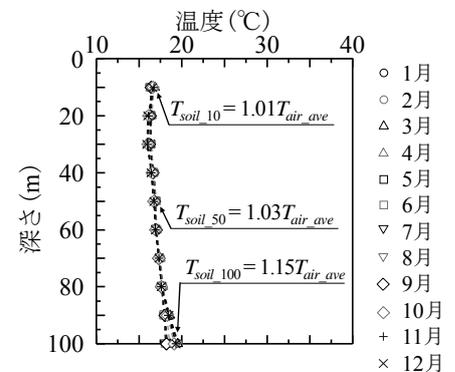
(a) 月平均地温・外気温の経時変化

ここでは代表例として 2019 年度の T_{soil} および外気温 T_{air} (°C) について述べる。図-1 (a) は福井市における T_{soil} および T_{air} の経時変化を示す。なお、 T_{soil} の下添え字の 10~100 は深さを表す。 T_{air} の変化は図中の正弦波形で表わされ、年平均外気温 T_{air_ave} (°C) は 16.4°C であった。 $T_{soil_10} \sim T_{soil_100}$ は T_{air} の影響を受けず概ね一定であり、恒温層は 10m 以深であると考えられる。次に、図-1 (b) の鉛直方向の温度分布に着目すると、近年の温暖化や都市化により世界中の多くの場所で浅層部に地温勾配の逆転が生じているとの報告があるが、福井市の地温は深くなるにつれて上昇しており、その傾向は見られなかった。

3. 熱応答試験 (TRT) およびその結果

熱応答試験(以下、TRT)は福井市にて施工した鉛直長さ 51 m の LBHE を対象に行われた。図-2 に示す装置を用いて試験を行い、そのデータから地盤の λ_{eff} を求めた。試験方法および解析方法の詳細については参考文献 2) を参考にされたい。

図-3 は深さ毎の λ_{eff} および柱状図を示す。図-3 より、深さ 10~40 m 地点の地質は主にシルトおよび砂質シルトで構成され、 λ_{eff} の平均値は 1.37 W/m/K であった。一方、深さ 50 m 地点の λ_{eff} は 2.78 W/m/K と他の深度と比べ



(b) 地温の鉛直分布

図-1 福井市における地温・外気温のモニタリング結果

キーワード：地中熱、LBHE、伝熱解析モデル、熱応答試験、地温

連絡先：〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1 福井大学工学部建築・都市環境工学科 環境水工学研究室 TEL0776-27-8595

て約2倍高く、飽和時の砂礫層のそれよりも高いことから、局所的な地下水流動が存在していると考えられる。

4. 伝熱解析モデルの概要および検証

本モデルは導水部およびライニング部から構成され、三次元直交座標系で表現される。また以下の3つの仮定および条件の下でモデルを構築した。1)ライニング材の凹凸を無視し、鉛直方向に一様に広がっている、2)ライニング部および導水部内の水温は水平方向に一様とみなし、深さ方向にのみ変化する、3)ライニング材および導水管の厚みは無視し、熱貫流率で表現する。なお、紙面の都合上、ここではライニング部流体の熱収支式のみ記載する。

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_w}{\partial t} dV_w = \lambda_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} dz dA_{xy} - (\rho c)_w Q \frac{\partial T_w}{\partial z} dz + q_a \quad (1)$$

ここに、 $(\rho c)_w$ は流体の体積熱容量(J/m³/K)、 V_w は流体要素の体積(m³)、 T_w は流体温度(°C)、 t は時間(s)、 λ_w は流体の熱伝導率(W/m/K)、 A_{xy} は流体要素の xy 面方向の表面積(m²)、 Q は流体の循環流量(m³/s)および q_a はライニング部流体とその隣接地盤要素の貫流熱フラックス(W)を、それぞれ意味する。表-1は解析に用いた熱物性値を示す。なお、地盤の熱伝導率はTRTの結果を用いた。

図-4はTRTにおけるLBHEの出入口水温の実測値および計算値を示す。出口水温においてTRT開始時は計算値(図中の実線)が実測値(図中の○)を下回るが、約3時間経過後の両者の平均差は0.1°C程度であった。したがって、ライニング材の凹凸および厚みを無視した本モデルは一定加熱循環条件下におけるLBHEの出口水温の実測値を良好に再現しており、空調時に重要となる取り出し水温を概ね再現できると考えられる。

5. おわりに

本研究では、福井県福井市の地温のモニタリングおよびLBHEの伝熱解析モデルの構築を行った。その結果、本対象地域における地温は深くなるにつれて単調に増加し、地温の逆転現象は見られなかった。また、地中で屈曲しているLBHEを簡略化した直交三次元伝熱解析モデルはLBHEの出口水温を良好に再現し、地中採・放熱量の評価に有効なツールとなりうることを示された。今後は本伝熱解析モデルを用いて、LBHEの中長期の採・放熱シミュレーションを行う予定である。

謝辞

本研究はみち環境技術協会からの多大な協力を受けて行われた。ここに深甚の謝意を表す。

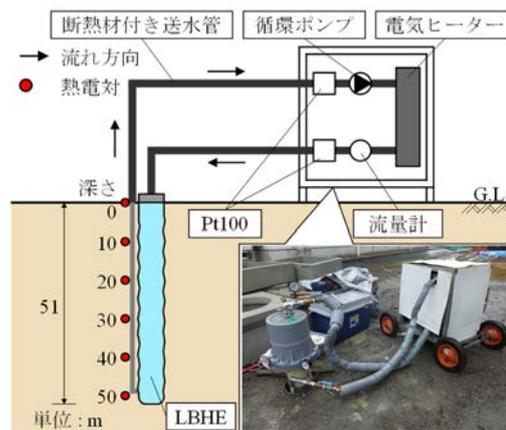


図-2 TRT装置概要

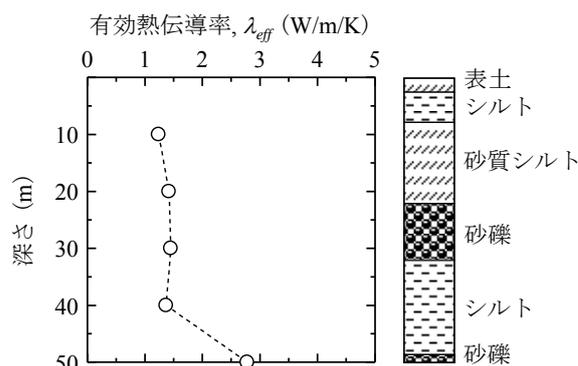


図-3 地盤の有効熱伝導率の鉛直分布および柱状図

表-1 熱物性値

	地盤	水(30°C)
熱伝導率(W/m/K)	TRTの結果	0.62
体積熱容量(J/m ³ /K)	2,352,000	4,163,280
	ライニング部	導水部
熱貫流率(W/m ² /K)	40	40

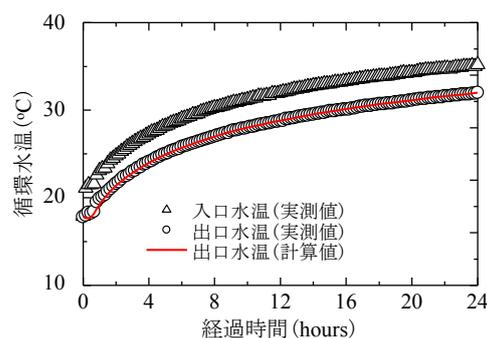


図-4 TRT時におけるLBHEの出入口水温の経時変化

参考文献

- 1) 佐倉保夫：気候変化に伴う地下の熱環境変化，陸水学会誌，Vol.6，pp.35-49，2000。
- 2) 地中熱利用促進協会：一定加熱・温水循環方式熱応答試験(TRT)技術書，(http://www.geopaj.org/wp/wp-content/uploads/trt_draft_20180830.pdf)，2021年3月25日確認。