

異なる掘削条件下におけるライニング地中熱交換器の採熱性能

福井大学	学生会員	○鈴木 遥介
福井大学	正会員	寺崎 寛章
福井大学	正会員	福原 輝幸
寒地土木研究所	正会員	齊田 光
ベルテクス株式会社	正会員	谷口 晴紀
株式会社エコ・プランナー	非会員	草間 政寛

1. はじめに

我が国では地球温暖化に加えて、2022年3月には電力不足に陥ったことを社会背景に、積極的な省エネ対策が求められている。民生部門においては地中熱を利用した空調システムは高い省エネ性から注目を浴びているものの、地中熱交換器の施工コストが高額であることが普及を妨げる要因の一つとなっている。筆者らは地中熱交換器長の削減のために、ライニング地中熱交換器（以下、LBHE）の研究開発に取り組んでいる。図-1はLBHEの概要を示す。LBHEは袋状のライニング材、導水管および付帯設備を有するヘッダー部などから構成されており、ライニング材が掘削壁面に密着することや、従来の地中熱交換器よりも貯水量が多いことが特徴である。今後、LBHEを普及させるためにはコストと熱交換性能の両面から最適なLBHEの仕様（長さや直径）を検討することが重要となる。

そこで本研究では、最適なLBHEの仕様を決める前段として、掘削長および掘削ビット径がLBHEの熱交換性能に及ぼす影響を把握することを目的とし、伝熱解析モデルを用いた数値シミュレーションを実施したので、その結果を報告する。

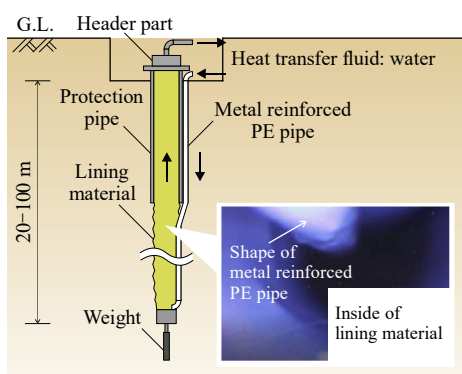


図-1 ライニング地中熱交換器(LBHE)の概要

2. 伝熱解析モデル概要

本研究では三次元直交座標系の伝熱解析モデルを構築した。図-2は本モデルの概要を示しており、モデル構築の際はライニング材が一様に膨張するなどの仮定条件を設けた。また、これまでのLBHEの施工ではライニング材の膨張率は掘削長とともに低下する傾向が見られており、本モデルではその膨張率の変化も考慮した。代表例として、以下にライニング部流体の熱収支式を示す。

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} - (\rho c)_w v_w \frac{\partial T_w}{\partial z} + \alpha (T_s - T_w) \frac{dA_s}{dV_w} \quad (1)$$

ここに、 $(\rho c)_w$: 流体の体積熱容量[J/(m³・K)], t : 経過時間[s], T_w : 流体温度[°C], λ_w : 流体の熱伝導率[W/(m・K)], v_w : 流速[m/s], α : 熱貫流率[W/(m²・K)], T_s : 周辺地盤要素の温度[°C], dV_w : 流体要素の単位体積[m³]および dA_s : 流体要素と周辺地盤要素との接触面積[m²]である。なお、 α は図-2に示すように流体の熱伝達率、ライニング材における熱伝導および周辺地盤における熱伝導を考慮して算出した。ここで、流体のレイノルズ数が2300を超える場合は乱流、2300以下の場合には層流とみなして流体の熱伝達率を算出した。なお、本モデ

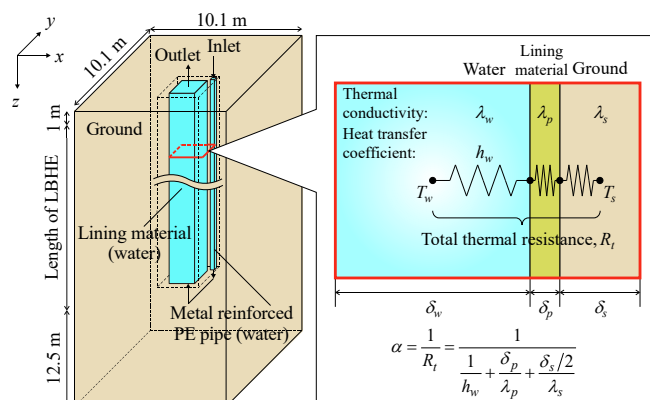


図-2 伝熱解析モデルの概要

キーワード：地中熱，ライニング地中熱交換器，伝熱解析モデル，数値シミュレーション

連絡先：〒910-8507 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

ルの詳細は参考文献 2)を参照されたい。

図-3は空調実験²⁾の代表日(空調実験3日目)におけるLBHEの入口温度および出口温度の実測値と本モデルによる出口温度の計算値の経時変化を示す。実験開始直後は約1℃の差が生じたものの、それ以降の出口温度の計算値は実測値と良好に一致しており、本モデルの妥当性が概ね確認された。

3. 計算条件および計算結果

本計算では掘削長 L [m]および掘削ビット径 d_b [mm]がLBHEの単位長さ当たりの熱交換量 q [W/m]に及ぼす影響を考察する。表-1は計算条件を示しており、暖房利用を想定してLBHEの入口温度は5℃一定とし、初期地温および気象条件には空調実験で計測した実測値を与えた。地盤の有効熱伝導率は一般的な1.5 W/(m・K)とし、 L はこれまでのLBHEの施工実績を、 d_b は実際の施工事例を基に設定した。なお、 q は地中との熱交換がほぼ定常の状態に近づいたと考えられる24時間経過後のLBHEの出口温度を用いて算出した。

図-4は q の計算結果を示す。一部のケースを除いて、 L が長くなるほど q は減少しており、これは L に伴いライニング材の膨張率が低下し、単位長さ当たりの熱交換面積が減少するためと考えられる。一方、 $d_b=120$ mmの $L=30$ m、 $d_b=140$ mmの $L=70$ m、 $d_b=160$ mmの $L=100$ mにおいては、本計算条件下ではライニング部流体の流れが層流から乱流に切り替わるため、 q はそれぞれ2%、7%および9%上昇し、 d_b が大きいほどその上昇率は高かった。これは熱交換面積が増大した状態で熱伝達率が向上したためと考えられる。なお、ライニング部流体の流れは $d_b=100$ mmでは常に層流、 $d_b=180$ mmでは常に乱流となり、層流または乱流同士のケースを比較すれば、 d_b が大きいほど熱交換面積が増大するため、 q は増加した。

以上より、本計算条件下においては $L=60$ m以下の場合には $d_b=180$ mm、 $L=70-90$ mの場合には $d_b=140$ mm、 $L=100$ mの場合には $d_b=160$ mmで q は最も大きくなった。なお、本計算条件下における q の最小値($d_b=100$ mmの $L=100$ m)と最大値($d_b=180$ mmの $L=20$ m)には37%の差が生じるものの、国土交通省のガイドライン³⁾で推奨されている掘削長の設計値を参考に、 $L=50$ m以上に着目すれば、 d_b および L が q に及ぼす影響は約20%以下であった。

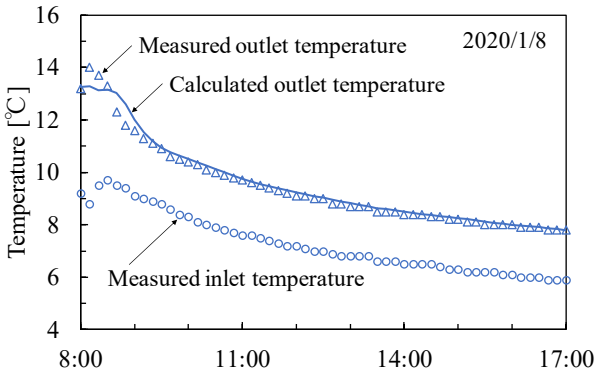


図-3 LBHEの出入口温度の経時変化

表-1 計算条件	
項目	値
計算時間	24 h
LBHEの入口温度	5℃
循環流量	20 L/min
地盤の有効熱伝導率	1.5 W/(m・K)
掘削ビット径	100-180 mm ※20 mm 毎
掘削長	20-100 m ※10 m 毎

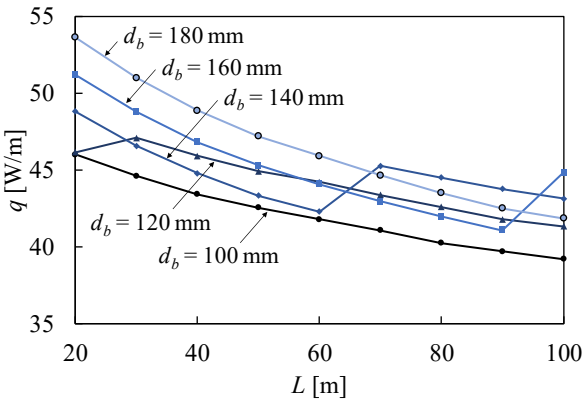


図-4 LBHEの単位長さ当たりの熱交換量

4. おわりに

本研究では数値シミュレーションにより、掘削長および掘削ビット径がLBHEの熱交換性能に及ぼす影響を検討した。その結果、掘削長が短く、掘削ビット径が大きいほど単位長さ当たりの熱交換量が大きくなる傾向があるものの、掘削長が50 m以上の場合にはそれらが単位長さ当たりの熱交換量に及ぼす影響は約20%以下であった。

謝辞

本研究はNEDOの助成事業(JPNP10020)およびJSPS科研費JP21J14777の助成を受けて行われた。また、みち環境技術協会から多大なご協力を頂いた。ここに深甚の謝意を表する。

参考文献

1) 首相官邸HP：電力需要ひっ迫警報 (<https://www.kantei.go.jp/jp/pages/20220322denryoku.html>)，2023年3月29日確認。
2) 鈴木達介，寺崎寛章，福原輝幸，齊田光，草間政寛，谷口晴紀：数値シミュレーションに基づくライニング地中熱交換器の採熱性能評価，日本地熱学会誌，Vol. 44，No. 4，pp. 155-166，2022。
3) 国土交通省：官庁施設における地中熱利用システム導入ガイドライン(案) (<https://www.mlit.go.jp/common/001016159.pdf>)，2023年3月29日確認。