

ライニング地中熱交換器および周辺地盤の伝熱特性

福井大学	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	草間政寛
株式会社ホクコン	非会員	谷口晴紀
ミサワ環境技術株式会社	正会員	田中雅人

1. はじめに

日本では近年、再生可能エネルギーが注目されており、利用に時間・場所的制限が少ない地中熱の利用に期待が高まっている。しかしながら、既存の地中熱交換器(例えばWU-tubeなど)は掘削費用が高く、それが地中熱利用普及の妨げになっている。このような背景を踏まえ、当該研究室では熱源コストを削減するために水道の管更生に使用されるライニング材(表面被覆材)を応用した新たな地中熱交換器(Lining Borehole ground Heat Exchanger, 以下LBHE)の開発を行っている(図-1を参照)。LBHEの主な特徴として、熱交換性が高く、また内部に貯水させることで蓄熱機能を有することが挙げられる。

本研究では地中熱交換器の性能指標である熱抵抗および周辺地盤の伝熱特性を調べることを目的として、熱応答試験(Thermal Response Test, 以下TRT)を行ったので、その結果の一部をここに報告する。

2. Thermal Response Test (TRT) 概要

本研究では9月7日から9月13日に株式会社ホクコン(福井県福井市今市町)敷地内にてTRTを行った。

図-2はLBHEおよびTRTで使用した加熱装置の概要

を示す。本試験では電気ヒーターを用いて一定出力(4kW)で加熱させながら水を循環させ、加熱中および加熱後のLBHEおよび周辺地盤の熱応答を評価した。また、測温抵抗体でLBHEの出入り口温度、流量計で循環水の流量、熱電対で掘削壁面の地温および外気温度を1分毎に測定した。なお、流量は20L/min、加熱時間は60時間以上、加熱後の地温モニタリング時間は72時間以上とした。

本研究ではケルビンの線源理論に基づく作図法¹⁾により、得られたデータの解析を行った。作図法では加熱中の循環水平均温度 $T_f(^{\circ}\text{C})$ および加熱後の地温 $T_g(^{\circ}\text{C})$ は深度方向および時間によらず熱交換量を一定とした場合、それぞれ以下の式(1)および式(2)で表される。

$$T_f = \frac{q}{4\pi\lambda_{eff}} \left(\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right) + qR_b + T_0 \quad (1)$$

$$T_g = \frac{q}{4\pi\lambda_{eff}} \ln \frac{t_a + t_p}{t_a} + T_0 \quad (2)$$

ここに、 T_0 : 初期地盤温度($^{\circ}\text{C}$)、 q : 単位長さ当たりの放熱量(W/m)、 λ_{eff} : 地盤の有効熱伝導率(W/m/K)、 α : 熱

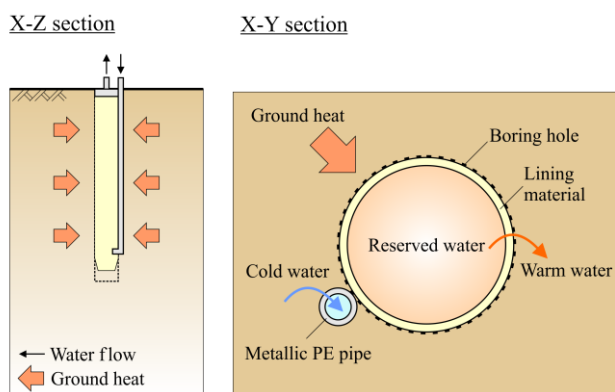


図-1 LBHE 熱交換概念図(採熱時)

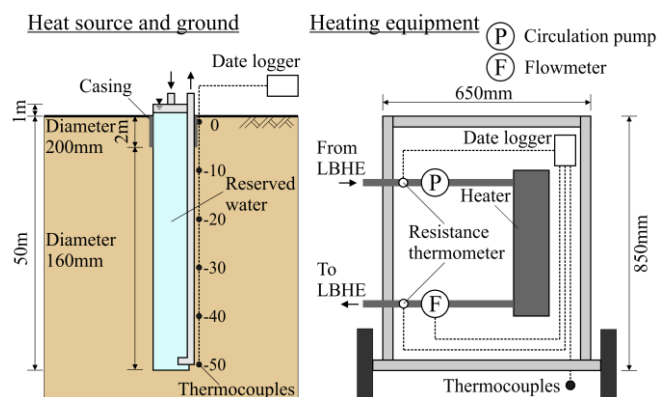


図-2 TRT 概要

キーワード: 地中熱, ライニング材, 熱応答試験, 熱抵抗, 有効熱伝導率

連絡先: 〒910-8507 福井市文京 3-9-1 福井大学工学部建築建設工学科 環境水理学研究室 TEL 0776-27-8595

拡散率(m^2/s), t :経過時間(s), r_b :掘削壁面半径(m), γ :オイラー定数, R_b :地中熱交換器の熱抵抗(mK/W), t_a :加熱後経過時間(s), t_p :加熱時間(s), $(t_a+t_p)/t_a$:ホーナー時間(-)である. ただし, 式(1)は $t \geq 5r_b^2/\alpha$ を満たす経過時間で適応可能である. 式(1)より平均的な λ_{eff} を, 式(2)より深度ごとの λ_{eff} を, 逆解析的にそれぞれ算出した(循環時法および回復時法).

3. 実験結果

図-3はLBHE循環水の入口水温 T_{f-in} ($^{\circ}\text{C}$), 出口水温 T_{f-out} ($^{\circ}\text{C}$), 外気温 T_{air} ($^{\circ}\text{C}$), および放熱量 q (W/m)の経時変化を示す. T_{f-in} および T_{f-out} は T_{air} の影響を受けずに緩やかに上昇した. ここで q は以下の式(3)により算出した.

$$q = (\rho c)_w Q (T_{f-in} - T_{f-out}) / L \quad (3)$$

ここに, $(\rho c)_w$:水の体積熱容量($\text{J}/\text{m}^3/\text{K}$), Q :循環水流量(m^3/s)および L :地中熱交換器長さ(m)である. q は $\pm 5\text{W}/\text{m}$ 程度変化するものの, 概ね $88\text{W}/\text{m}$ を推移した. なお, 後述する循環時法による解析の際は平均放熱量を用いた.

図-4は循環時法の解析結果を示す. 図中の直線近似区間は実験開始から60時間までの範囲で式(1)の適応範囲を満たし, かつ最も相関係数が高い区間を求めて解析を行った. R_b は図中の直線近似区間において, $\lambda_{\text{eff}} = 1.53\text{W}/\text{K}/\text{m}$ を用いて式(1)から測定時間毎に算出した. その結果, R_b の平均値は $0.012\text{mK}/\text{W}$ となり, 一般的な地中熱交換器の一例として岡林ら²⁾が算出した硅砂充填のWU-tube地中熱交換器の熱抵抗(約 $0.065\text{mK}/\text{W}$)より約82%小さくなった. これはLBHE循環水の熱交換表面積がWU-tubeに比べ大きく, 放熱量が大きくなったためと考えられる.

表-1は回復時法の解析結果を示す. 循環時法と同様に実験開始から加熱後72時間までの範囲で最も相関係数が高くなる区間を求めて解析を行った. $z = -10 \sim -40\text{m}$ の λ_{eff} の値より, 同深さの地層は粘土およびシルトであることが考えられる. なお, $z = -50\text{m}$ の λ_{eff} は他の深度のそれよりも高い値となり, これは礫層($\lambda_{\text{eff}} = 2.0^3$)中の地下水流動が活発であることに起因すると推察される.

4. おわりに

本研究は, LBHEの熱抵抗および周辺地盤の伝熱特性を明らかにすることを目的としてTRTを行った.

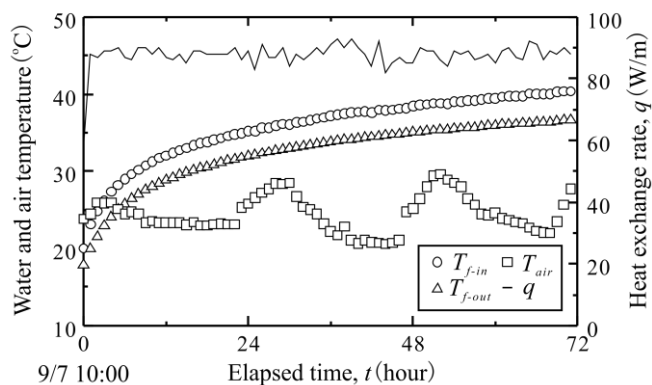


図-3 LBHEの流体温度および放熱量の経時変化

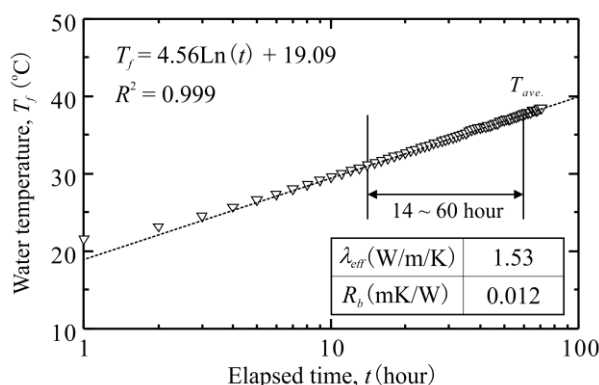


図-4 循環時法の解析結果

表-1 回復時法の解析結果

深さ z (m)	有効熱伝導率 λ_{eff} (W/m/K)	相関係数 R^2
-10	1.24	0.999
-20	1.44	0.997
-30	1.52	0.998
-40	1.37	0.998
-50	2.70	0.993

その結果, LBHEの熱抵抗はWU-tubeよりも約80%程度低減することが分かった. また周辺地盤の有効熱伝導率 λ_{eff} は地下水流動に大きく左右され, 本試験地では深さ50m付近の λ_{eff} は浅層部の約2.2倍となった.

謝辞

本研究はNEDOによる平成29年度ベンチャー企業等による新エネルギー技術革新支援事業(フェーズC)の助成を受けて行われた. ここに深甚の謝意を表する.

参考文献

- 1) 藤井光: 講座「地中熱ヒートポンプシステム」温度応答試験の実施と解析, 日本地熱学会誌, Vol.28, pp.245-257, 2006.
- 2) 岡林ら: 仙台市丘陵部および平野部における地盤の熱応答試験結果, 日本地下水学会2016年春季講演会, P04, 2016.
- 3) 北海道大学地中熱利用システム工学講座: 地中熱ヒートポンプシステム, 株式会社オーム社出版, p.92, 2007.