

熱-地下水連成解析における地中熱採熱管のモデル化に関する検討

清水建設 技術研究所 正会員 ○米山 一幸, フェロー会員 百田 博宣

1. はじめに

地中熱を利用したヒートポンプシステムは、高効率で環境負荷の少ない空調システムとして、近年普及が進んでいる。地中熱ヒートポンプシステムの計画・設計では、地盤からの採熱量の予測や採熱管の配置計画、周辺環境への影響評価などを目的に、採熱管周囲の熱挙動を予測するための数値解析が利用されている。特に地下水が豊富な地域では、地盤の熱伝導と地下水流による熱の移流を考慮した熱-地下水連成解析手法が用いられるが、採熱管の径が数十 mm 程度であるのに対し地下水流動については数十~数百 m の広域が対象となることが多く、規模の異なる構造の一体的なモデル化が計算における課題のひとつとなっている。本検討では、地下水解析における井戸のモデル化で用いられる近似的手法と同様の手法により地中熱採熱管をモデル化する方法について、数値解析と理論解の比較により適用性の検討を行う。

2. 地中熱採熱管の近似的モデル化方法

地下水浸透流解析において小口径の井戸をモデル化する場合、井戸が定義される要素(井戸要素)における離散化の粗さを補正するため、無限領域内での放射状流の定常解に基づき、下式により井戸の注水/揚水流量を近似的に計算する方法が用いられている¹⁾。

$$Q = \frac{\rho \cdot 2\pi k L (p - p_b)}{\mu \cdot \ln(r_e / r_b)} \dots (1)$$

ここで Q は井戸流量, ρ , μ は水の密度と粘度, k , p は井戸要素の浸透率と圧力, L は井戸長, p_b は井戸内の圧力, r_b は井戸半径を示す。 r_e は井戸要素の等価半径で、水平方向の要素寸法 dx , dy より下式で設定することが提案されている。

$$r_e = 0.14 \sqrt{dx^2 + dy^2} \dots (2)$$

本検討では、地中熱採熱管周囲の熱伝導について同様の概念を適用することにより、採熱量 q_b を下式より近似的に定義する方法を用いる。

$$q_b = \frac{2\pi\lambda L (T - T_b)}{\ln(r_e / r_b)} \dots (3)$$

λ は地盤の熱伝導率, T , T_b は井戸要素と採熱管表面の温度を示す。

3. 数値解析と理論解の比較検証

上記のモデル化方法の有効性と適用範囲を検討するため、数値解析と理論解の比較検証を行う。数値解析における解析領域は採熱管を中心とする $10\text{m} \times 10\text{m}$ の 2次元領域とし、採熱管(外径 48mm)を実寸でモデル化する方法(実寸モデル: 図1)と、(3)式を適用することにより管径よりも寸法の大きな井戸要素内で近似的にモデル化する方法(近似モデル: 図2)の両方を用いる。近似モデルの井戸要素は正方形とし、寸法 (dx) は 150, 200, 400mm の 3 ケースを設定する。

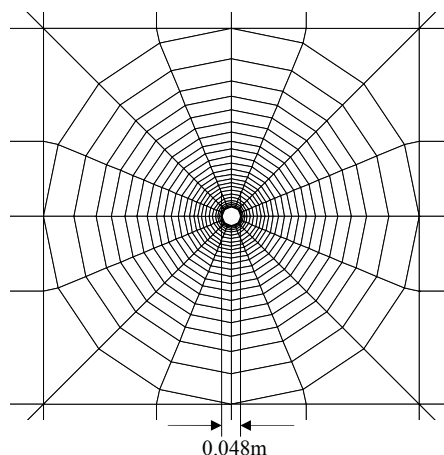


図1 解析モデル(実寸モデル)

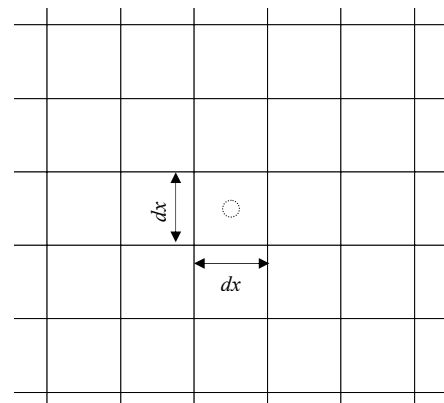


図2 解析モデル(近似モデル)

表1 地盤物性の設定条件

項目	設定値
熱伝導率 λ	5.76 W/mK
比熱 c_p	1.0 kJ/kgK
密度 ρ	1,000 kg/m ³
初期温度 T	10 °C

キーワード 地中熱, ヒートポンプ, 地下水, 連成, 数値解析

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設(株) 技術研究所 TEL. 03-3820-5557

地下水流動を考慮しない場合について、表1の条件における無限中空円筒周囲の熱伝導の理論解²⁾と数値解析結果を比較したものを図3、4に示す。図3は管表面温度一定 ($T_b=20^\circ\text{C}$)、図4は管表面の熱流量一定 ($q_b=100\text{ W/m}^2$) の条件によるもので、 $t^*(=\lambda t/\rho c_p r_d^2)$ 、 $q^*(=q_b r_b/\lambda T_b)$ 、 $T^*(=\lambda(T-T_b)/q_b r_b)$ はそれぞれ無次元化した時間 t 、管壁熱流量 q 、管壁温度 T を示す。 t^* については、設定条件における実時間の換算値を併記した。図3、4より、実寸モデルの解析結果は理論解と良好に一致するが、近似モデルでは非定常の効果が大きい初期の解析結果が理論解から乖離しており、井戸要素寸法が大きいほどその誤差が大きくなる。一方、井戸寸法 150、200mm のケースでは $t^* > 100$ の領域で解析結果が理論解とほぼ等しくなり、長期的な熱的挙動を対象とする場合等では十分な精度が得られる可能性が示されている。

図5は採熱管周囲に地下水流動がある場合の採熱量について、下式に示す積分法による解析解³⁾と数値解析結果を比較したものを示す。

$$Nu = 4\sqrt{2} \left(\frac{-HF'(0)}{2} \right)^{0.5} Pe^{0.5} \dots (4)$$

$$\left(\frac{-HF'(0)}{2} \right)^{0.5} = 0.564$$

ここで、 $Nu (=hl/\lambda)$ は Nusselt 数、 $Pe (= \rho c_p u l / \lambda)$ は Peclet 数を示す (l は代表長さ、 u は代表速度、 h は熱伝達率)。図5より、実寸モデルの解析結果は積分法の解析解とほぼ同様の傾向を示しており、 $Pe > 1$ の範囲では解析解と概ね一致している。一方、近似モデルによる解析結果は $Pe < 10$ の領域では実寸モデルの結果とほぼ一致するが、 $Pe > 10$ の領域では解析解との乖離が大きくなり、地下水流速が早い条件では誤差が大きくなること示されている。

4. まとめ

地中熱利用システムにおける地中採熱管のモデル化に関して、定常熱伝導解を用いた近似的手法の適用性を検討した。数値解析結果と理論解の比較より、一定の条件下では十分な精度を有することがわかり、本手法を実用的に利用できる可能性が示された。

参考文献

- 1) Peaceman, D. W. : Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation, 1978
- 2) Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger : Conduction of heat in solids, 1959
- 3) 木村繁男 他 : 地熱貯留層内に埋設された超大型ヒートパイプへの集熱量評価方法 (第2報), 1988

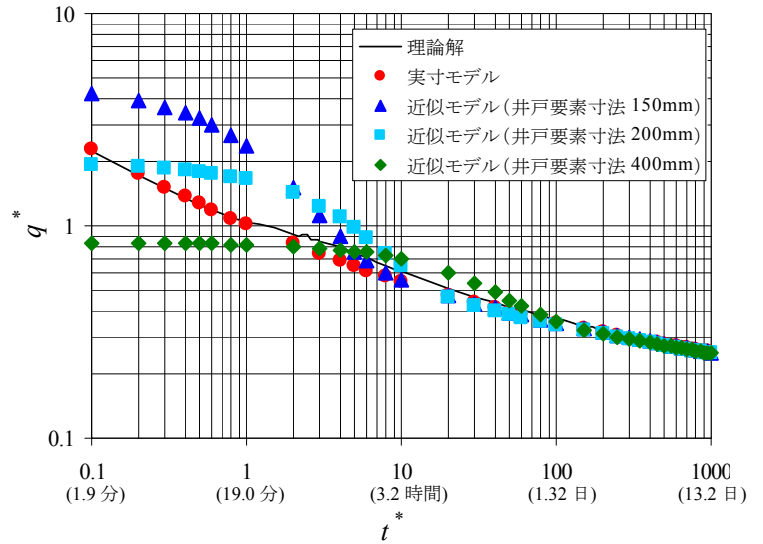


図3 無限中空円筒表面熱流量の比較 (定温条件)

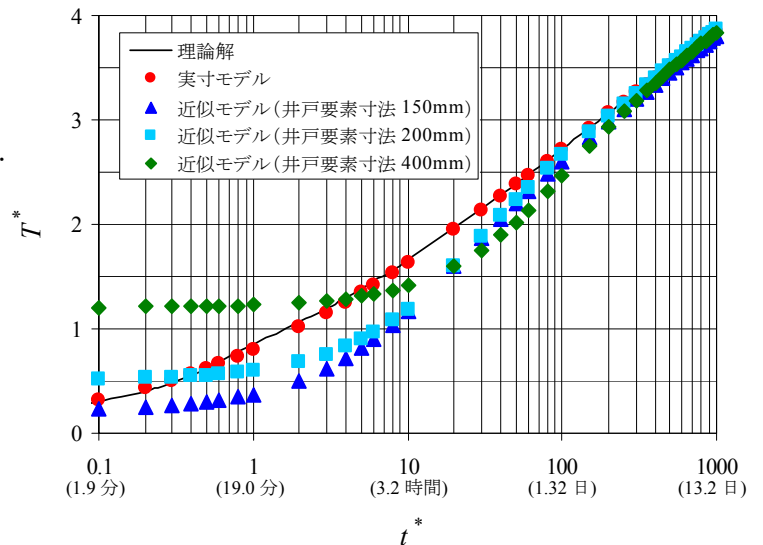


図4 無限中空円筒表面温度の比較 (定流量条件)

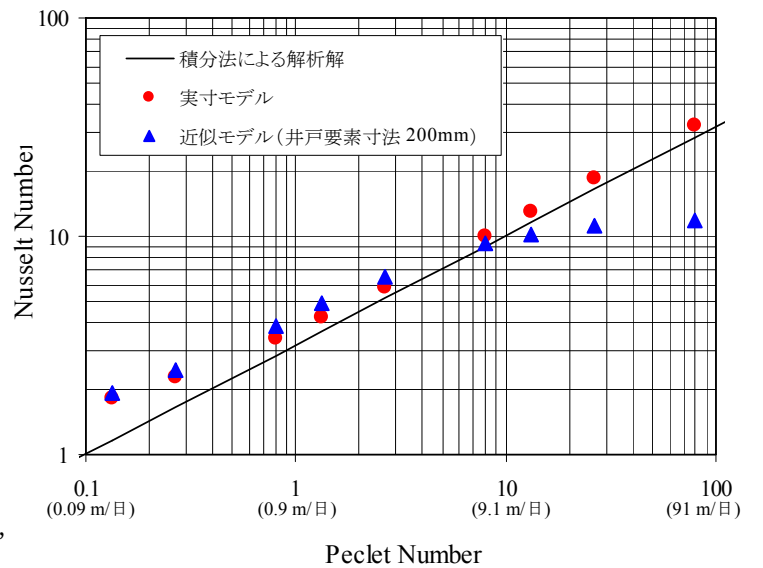


図5 地下水流動による熱流量の比較