

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.02.008



忽略回填料与岩土热物性差异对桩基埋管 换热计算的影响

黄光勤¹, 卢 军², 杨小凤¹

(1. 后勤工程学院 国防建筑规划与环境工程系, 重庆 401331;

2. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 桩基埋管换热器具有桩径大、埋深浅的特点, 适用于桩基埋管特点的系列导热解析解模型被不断提出, 但是该类模型均忽略了回填料与岩土热物性的差异。对于桩径较大的桩基埋管而言, 较大的热物性差异将引起较大的计算误差。建立了区别回填料与岩土热物性差异的导热数值解模型, 对比分析忽略热物性差异对桩基埋管换热计算的影响, 研究表明: 导热系数差异对桩基埋管长时间运行的换热热阻计算影响甚小; 容积比热差异将引起桩基埋管较大的设计容量误差; 桩径越大, 热物性差异引起的计算误差越显著。

关键词: 地源热泵; 桩基埋管; 热物性; 传热模型

中图分类号: TU831.3; TK529 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2015)02-0047-05

Heat transfer calculation influence of pile geothermal ground exchanger ignoring the thermal property difference between grout and soil

Huang Guangqin¹, Lu Jun², Yang Xiaofeng¹

(1. Department of National Defense Architecture Planning & Environmental Engineering of Logistical Engineering University,

Chongqing 401331, P. R. China; 2. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University,

Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Pile geothermal heat exchanger is characterized by bigger pile diameter and shallow buried depth, and current studies presented the analytical solution models only considering soil conduction ignoring the thermal property difference between grout and soil which would induce the calculation error for big pile diameter. A conduction numerical solution model considering the thermal property difference was developed to analyze the heat transfer influence of pile geothermal heat exchanger induced by thermal parameter difference. Results showed that conductivity difference had little impact on the heat transfer when the operation time was long and the difference of specific heat would induce big error of the ground heat exchanger design capacity and the bigger the pile diameter was, the more obvious the calculation error.

Key words: ground source heat pump; pile geothermal heat exchanger; thermal property; heat transfer model

收稿日期: 2014-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(51478058)

作者简介: 黄光勤(1988-), 男, 主要从事建筑节能及可再生能源利用研究, (E-mail)hgq880818@163.com。

Received: 2014-10-14

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51478058)

Author brief: Huang Guangqin (1988-), main research interests: building energy efficiency and the utilization of renewable energy sources, (E-mail)hgq880818@163.com.

桩基埋管是一种高效的浅层地热能利用换热器,具有打孔费用低、初投资小、换热量大等特点^[1],目前被广泛运用于实际工程中。

Morino 等^[2]提出“桩埋管换热器”的概念,并在钢管桩中埋设管状换热器;Pahud 等^[3]提出在混凝土桩基中埋设 U 型管换热器,并在某工程的 500 多桩基中得到运用;Laloui 等^[4]提出地能转换桩的概念,分析了其施工工艺,并开展了现场测试研究。在中国,许多桩基埋管地源热泵项目在建筑采暖空调系统中得到成功应用。上海世博会城市最佳实践区汉堡案例馆采用了 43 个深度 30 m 的并联 3U 型桩基埋管换热系统^[5];贵州省息烽县人民医院病房综合大楼的空调系统设计了 251 口 9~12 m 深的螺旋型桩基埋管换热器系统^[6];贵阳城乡规划展览馆项目共设置 147 个螺旋型桩基埋管换热器;南京朗诗国际街区采用了 1 200 个平均深度 30 m 的桩基进行埋管^[7],作为地源热泵机组的低品位能源换热器;南京某办公综合楼设计了 254 个平均深度 54 m 的并联双 U 型桩基埋管换热器^[8];另外,建筑面积约 5 万 m² 左右的贵阳航空装备业务管理基地及建筑面积约 5.2 万 m² 的贵州大学图书馆均采用了桩基埋管地源热泵系统。

虽然桩基埋管换热器在实际工程中得到广泛运用,但是,由于其具有桩径大、埋深浅、几何结构较为复杂等特点,其传热过程的研究依然较为欠缺,部分研究工作仍然采用线热源^[9]、圆柱热源^[10]等传热模型,而此类传热模型忽略了回填区域的非稳态传热特征,对孔径小、钻孔深的垂直 U 型地埋管具有较大的适应性,但是对桩径大、埋深浅的桩基埋管换热器适应性较差,甚至得出错误的计算结果。因此,学者们提出了系列用于桩基埋管换热计算的导热解析解模型:“实心”圆柱热源模型^[11-12]、线圈热源模型^[13-15]、螺旋线热源模型^[16-17]。此类模型虽然考虑了桩基埋管回填区域的非稳态传热问题,但是所有导热解析解模型均忽略了回填料与岩土热物性的差异,认为整个传热区域热物性均匀一致,不随空间、时间变化。笔者认为这种假设将对计算结果造成较大的影响。

在实际工程中,桩基埋管桩径一般都较大,可达到 1.0~3.0 m,而埋管间距一般在 5.0~7.0 m,假设间距为 6 m,单个桩基埋管传热区域的所占面积约 $3.14 \times 3^2 = 28.3 \text{ m}^2$,假设桩径为 1.5 m,桩基回填区域的面积约为 $3.14 \times 1.5^2 = 7.1 \text{ m}^2$,约占单个桩基埋管传热区域面积的 25.1%,当回填料与岩土的热物性差异较大时,若采用忽略热物性差异的导热解析解模型进行计算,无疑将导致较大的误差。因此,为了更加科学合理的对桩基埋管换热器进行换热计算,本文以“实心”圆柱热源模型为例,定量研

究忽略热物性差异对桩基埋管换热计算的影响。

1 桩基埋管的传热模型

1.1 忽略回填料与岩土热物性差异的导热解析模型

“实心”圆柱热源模型^[11-12]为一维导热解析解模型,如图 1 所示。模型假设:1)埋管区域为热物性均匀且不随温度变化的无限大介质;2)忽略土壤与回填料热物性的差异;3)螺旋管被假定为具有恒定发热强度 q_H 的无限长圆柱面热源;4)忽略管内水的对流传热及轴向导热。

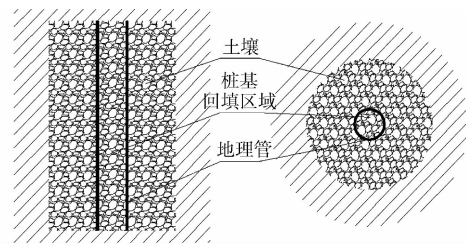


图 1 忽略回填料与岩土热物性差异的解析解模型

Fig. 1 Analytical solution model which ignores the thermal properties difference between grout and soil

根据上述假设,得出一维导热解析解模型的控制方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial t}{\partial \tau} & 0 \leq r < \infty \\ q|_{r=r_p} = q_H & \tau > 0 \\ t = t_0 & \tau = 0, r \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为温度,℃; t_0 为土壤初始温度,℃; q_H 为单位桩深换热量,W; k_s 为导热系数,W/(m·℃); α_s 为热扩散率,m²/s; τ 为时间,s; r 为距回填中心的距离,m; r_p 为桩径,m。

采用柱坐标系下的格林函数法 G

$$G(r, \varphi, z, r', \varphi', z', \tau) = \frac{1}{8[\pi\alpha_s(\tau - \tau')]^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{r^2 + r'^2 - 2rr' \cos(\varphi - \varphi') + (z - z')^2}{4\alpha_s(\tau - \tau')}\right] \quad (2)$$

式中: r, φ, z 分别为计算点的径向值、角度值及竖向值,m,rad,m; r', φ', z' 分别为热源点的径向值、角度值及竖向值,m,rad,m。

认为无限长圆柱热源面由无数条无限长线热源组成,在时间上和空间上对无限长线热源模型的解析解进行积分即可推导得出螺旋型地埋管换热器的一维导热模型的解析解形式

$$\theta(r, \tau) = t(r, \tau) - t_0 = -\frac{q_H}{4\pi k_s} \int_0^\pi \frac{1}{\pi} \text{Ei}\left(-\frac{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \varphi}{4\alpha_s \tau}\right) d\varphi \quad (3)$$

式中: $\theta(r, \tau)$ 为 τ 时刻时在距离回填中心 r 处的土壤或回填料的过余温度,℃; $t(r, \tau)$ 为 τ 时刻时在距离

回填中心 r 处的土壤或回填料的温度, $^{\circ}\text{C}$; $Ei = \int_{-\infty}^x \frac{\exp(u)}{u} du$, 为指数积分函数。

1.2 区别回填料与岩土热物性差异的导热数值模型

在分析导热解析解模型的基础上, 考虑土壤与回填料热物性的差异, 建立了相应的导热数值解模型, 该模型将换热区域分为两部分, 即: 回填料区域和周边的岩土区域。如图 2 所示, 其它假设条件与导热解析解模型相同。一维导热数值解模型的控制方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial t}{\partial \tau} & r_p \leq r < \infty \\ \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{1}{\alpha_g} \frac{\partial t}{\partial \tau} & 0 \leq r < r_p \\ q|_{r=r_p} = q_H & \tau > 0 \\ t = t_0 & \tau = 0, r \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: α_s 、 α_g 分别为土壤和回填料的热扩散率, m^2/s 。由于该模型中圆柱面热源所在的介质非单一介质, 热物性存在差异, 格林函数法不能用于该模型的求解, 故通过数值解法, 模拟计算埋管区域的温度场。

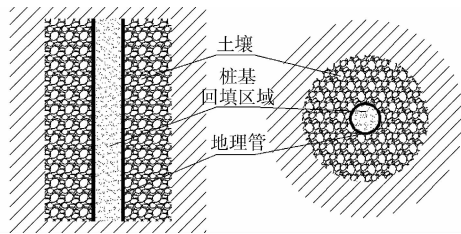


图 2 区别回填料与岩土热物性差异的数值解模型

Fig. 2 Numerical solution model which considers the thermal properties difference between grout and soil

采用基于有限元分析方法的 Comsol Mutiphysics 模拟软件求解上述区别热物性差异的桩基埋管非稳态换热问题。网格划分时, 按照软件中自带的“Arithmetic Sequence”(网格尺寸按照线性比例增长或减少)网格分布规律对模型进行离散, 保证在热源处的网格密集, 远离热源处的网格密度小, 以适应热源处的大温度梯度情况, 如图 3 所示。

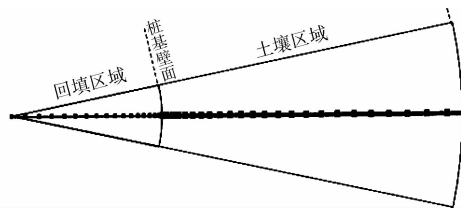


图 3 数值模型网格划分

Fig. 3 Grid generation of numerical model

为了定量分析忽略回填料与岩土热物性的差异, 定义壁面综合热阻 R_z

$$R_z(\tau) = \frac{t_b(\tau) - t_0}{q_H} \quad (5)$$

式中: R_z 为壁面综合热阻, $\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$; t_b 为能源桩壁面温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

定义区别热物性差异与忽略热物性差异的壁面综合热阻相对误差 δ

$$\delta = \frac{R_{z,q} - R_{z,h}}{R_{z,h}} \times 100 \quad (6)$$

式中: $R_{z,q}$ 和 $R_{z,h}$ 分别代表区别热物性差异和忽略热物性差异的壁面综合热阻, $\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

为了分析数值解模型的正确性, 在忽略热物性差异的情况下, 分别采用解析解和数值解法计算壁面综合热阻, 计算条件为: $D_p = 1.5 \text{ m}$, $k_s = k_g = 2.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$, $c_{p,s} = c_{p,g} = 2000 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。计算结果如图 4。

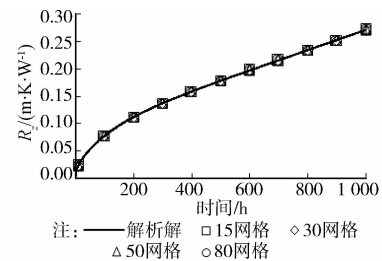


图 4 数值模型的验证

Fig. 4 Validation of numerical model

由图 4 可知, 忽略热物性差异的数值解与解析解所计算的结果吻合程度高, 说明本文提出的数值解模型在理论上的正确性。同时发现, 在一定范围内, 网格数量对模拟结果的影响很小, 网格数量从 15 变化到 80, 其模拟结果几乎没有明显变化。综合考虑模拟耗时及误差情况, 采用网格数量为 50 的离散方案。

2 结果及讨论

2.1 导热系数差异对换热的影响

图 5、图 6 分别给出了桩直径 $D_p = 1.5 \text{ m}$, $k_s = 2.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$, $c_{p,s} = 2000 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$, $c_{p,g} = 2000 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 的情况下, 不同回填料导热系数的壁面综合热阻及其相对误差的变化曲线。分析可知, 在热流作用时间小于 250 h 期间, 壁面散发的热量既向岩土区域传递, 也向回填料区域传递, 故壁面综合热阻受回填料及岩土导热性能的综合影响, 回填料与岩土导热系数差异越大, 壁面热阻计算结果区别越大。随着热流作用时间的持续增加(作用时间大于 250 h), 回填料区域的温度场趋于稳定, 蓄热达到饱和, 热量主要向岩土区域传递, 而岩土区域热物性参数相同, 故计算结果差异越来越小, δ 趋近于 0, 说明当回填料与岩土仅存在导热系数差异, 其它热物性大小相同时, 采用导热解析解模型确定桩基埋管换热器的设

计容量引起的误差甚小,可忽略不计。

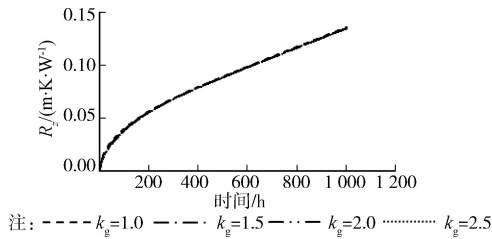


图 5 不同回填料导热系数下的壁面综合热阻
Fig. 5 Wall comprehensive thermal resistance under difference grout conductivity

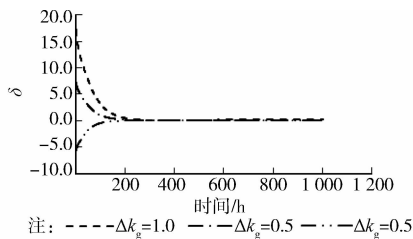


图 6 导热系数差异引起的误差
Fig. 6 Error induced by difference of conductivity

2.2 容积比热差异对换热的影响

由图 7 及图 8 可知,回填料容积比热的大小对壁面综合热阻影响较大,计算条件为: $D_p=1.5\text{ m}$, $k_s=2.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$, $c_{p,s}=2\ 000\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{C}^{-1}$, $k_g=2.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$ 。在回填料导热系数相同的情况下,回填料容积比热越大,吸收相同热量时,温升越小,故壁面温度越低,壁面综合热阻越小。

随着热流作用时间的增加,相对差异逐渐减小,且趋于稳定,当回填料与岩土容积比热相差 $-500\sim 500\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{C}^{-1}$ 时,采用忽略热物性差异的导热模型计算结果与区别热物性差异情况下的壁面综合热阻相差 $2.8\%\sim 3.0\%$,当容积比热差异值为 $1\ 000\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{C}^{-1}$ 时,壁面综合热阻相差 6.2% 。说明当回填料与岩土容积比热存在较大的差异时,导热解析模型计算的综合热阻具有较大误差,对桩基埋管设计容量具有较大的影响。

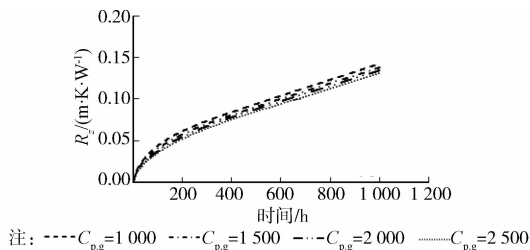


图 7 不同回填料容积比热下的壁面综合热阻
Fig. 7 Wall comprehensive thermal resistance under difference grout specific heat

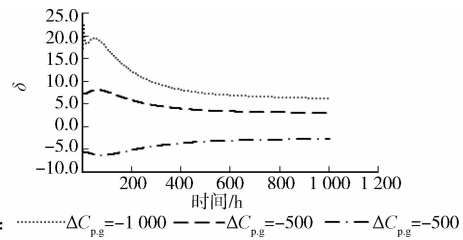
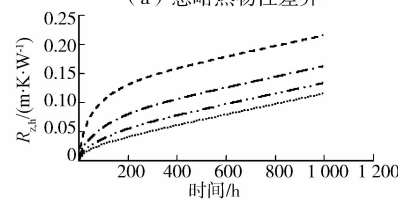
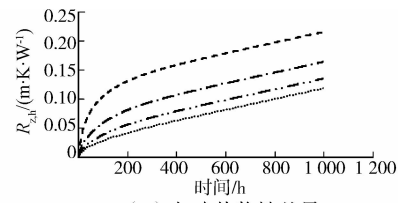


图 8 容积比热引起的误差
Fig. 8 Error induced by difference of specific heat

2.3 桩径大小对换热的影响

图 9 及图 10 给出了不同桩径下的壁面综合热阻和误差,计算条件为: $k_s=2.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$, $c_{p,s}=2\ 000\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{C}^{-1}$, $k_g=1.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1}$, $c_{p,s}=2\ 200\text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{C}^{-1}$,回填料的热物性为常用混凝土的热物性参数。由图可知,不同桩径对应的壁面综合热阻差距较大,由于回填料导热系数远小于岩土导热系数,桩径越大,传热性能较小的回填料所占换热区域面积越大,故壁面综合热阻越大。当采用导热解析模型计算壁面综合热阻时,回填区域的热物性与岩土热物性取值相同,此时引起的误差见图 8 所示,桩径越大,回填料区域占整个换热区域的比例越大,热物性差异对换热效果的影响越大,由模型引起的计算误差越大。



注: --- $D_p=0.5\text{ m}$ - · - $D_p=1.0\text{ m}$ — $D_p=1.5\text{ m}$ $D_p=2.0\text{ m}$

图 9 不同桩径下的壁面综合热阻

Fig. 9 Wall comprehensive thermal resistance under difference pile diameter

3 结论

目前,对于桩基埋管的换热计算,以导热解析模型为主,但该类模型忽略了回填料与岩土热物性的差异,认为回填料与岩土的热物性一致。本文以“实心”圆柱热源导热解析模型为例,建立区别回填料与岩土热物性差异的导热数值解模型,讨论了热物性

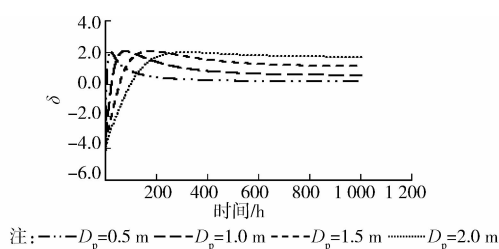


图10 忽略热物性差异引起的误差

Fig. 10 Error induced by thermal property difference

差异对模型计算结果的影响,得出以下结论:

1)在其它条件相同的情况下,回填料与岩土导热系数差异对短期换热热阻具有较大影响,当热流作用时间较长时,导热系数差异引起的模型计算误差可以忽略。

2)在其它条件相同的情况下,回填料与岩土容积比容的差异对模型计算结果影响较大,将较大程度地影响桩基埋管设计容量的确定,应根据热物性差异大小,对导热解析模型确定的桩基埋管换热器设计容量设计进行适当的修正。

3)桩径越大,因回填料与岩土热物性差异引起的模型计算误差越明显,将扩大热物性差异引起的计算误差。

参考文献:

- [1] 桂树强,程晓辉,张志鹏. 地源热泵桩基与钻孔埋管换热器换热性能比较[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(3):151-156.
Gui S Q, Cheng X H, Zheng Z P. Comparative analysis of heat exchange performance of energy piles and borehole heat exchangers in GSHP system [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(3):151-156. (in Chinese)
- [2] Morino K, Oka T. Study on heat exchanged in soil by circulating water in a steel pile [J]. Energy and Buildings, 1994, 21(1):65-78.
- [3] Pahud D, Fromentin A, Hubbuch M. Heat exchanger pile system for heating and cooling at Zurich Airport [J]. IEA Heat Pump Centre Newsletter, 1999, 17(1):15-16.
- [4] Laloui L, Moreni M, Vulliet L. Behavior of a bifunctional pile, foundation and heat exchange [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40:388-402.
- [5] 梅挺. 与桩基结合的地源热泵埋管施工技术[J]. 建筑机械化, 2012(Sup1):95-97.
Mei T. Construction methodology on ground heat pump pipes linked with pile foundation [J]. Construction Mechanization, 2012(Sup1):95-97. (in Chinese)
- [6] 居发礼,檀姊静. 息烽县人民医院病房综合大楼空调设计[J]. 暖通空调, 2013(12):121-125.
Ju F L, Tan Z J. Xifeng people's hospital building air conditioning design [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2013(12):121-125. (in Chinese)
- [7] 程洪涛. 低能耗建筑技术在南京朗诗国际街区的应用[J]. 建筑科学, 2006(6):84-86, 71.
Cheng H T. Application of low energy consumption architecture technology in Nanjing Landsea international block [J]. Building Science, 2006(6):84-86, 71. (in Chinese)
- [8] 王琰. 南京某办公综合楼地源热泵+蓄能空调系统的设计研究[J]. 建筑科学, 2010, 10:266-273.
Wang Y. A ground source heat pump+energy storage air conditioning system design research of office building in Nanjing [J]. Building Science, 2010, 10:266-273.
- [9] 卢军,黄光勤,徐永军. 定热流响应实验确定岩土热物性方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(2):98-104.
Lu J, Huang G Q, Xu Y J. Analysis of ground thermal properties determination applying thermal response test under condition of constant heating flux [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(2):98-104. (in Chinese)
- [10] 黄光勤,卢军,陈鹏. 瞬态热流岩土热响应测试[J]. 太阳能学报, 2013, 34(10):1787-1794.
Huang G Q, Lu J, Chen P. Transient heating flux soil thermal response test [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2013, 34(10):1787-1794. (in Chinese)
- [11] 石磊,张方方,林芸,等. 桩基螺旋埋管换热器的二维温度场分析[J]. 山东建筑大学学报, 2010(2):177-183.
Shi L, Zhang F F, Lin Y, et al. The 2-D thermal analysis of the coil ground heat exchanger inside piles [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2010(2):177-183. (in Chinese)
- [12] Man Y, Yang H X, Diao N R, et al. A new model and analytical solutions for borehole and pile ground heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(13/14):2593-2601.
- [13] 李新,方亮,赵强,等. 螺旋埋管地热换热器的线圈热源模型及其解析解[J]. 热能动力工程, 2011(4):475-479, 499.
Li X, Fang L, Zhao Q, et al. Coil heat source model for embedded spiral tube-based geothermal heat exchangers and its analytical solutions [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011(4):475-479, 499. (in Chinese)
- [14] Cui P, Li X, Man Y, et al. Heat transfer analysis of pile geothermal heat exchangers with spiral coils [J]. Applied Energy, 2011, 88(11):4113-4119.
- [15] Zhang W K, Yang H X, Lu L, et al. Investigation on heat transfer around buried coils of pile foundation heat exchangers for ground-coupled heat pump applications [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(21/22):6023-6031.
- [16] 李新. 蓄热量桩的传热研究与工程应用[D]. 济南:山东建筑大学, 2011.
- [17] Li M, Lai A C K. Heat-source solutions to heat conduction in anisotropic media with application to pile and borehole ground heat exchangers [J]. Applied Energy, 2012, 96:451-458.