

双U型桩基埋管换热器原位试验及理论适用性分析

汪大华¹, 赵海丰^{1,2}, 桂树强²

(1.中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074; 2.长江勘测规划设计研究有限责任公司, 武汉 430000)

摘要:以信阳信息大厦能源桩项目为对象,分别采用线热源模型和圆柱面热源模型对双U型埋管能源桩的桩壁温度及桩周温度场进行了计算,并与实测值进行了对比分析。采用有限长热源模型和无限长热源模型对能源桩壁面温度的计算结果表明,有限长热源模型比无限长热源模型具有更高的精度,更适用于能源桩的传热计算。通过各种热源模型对桩周温度场的计算与对比分析表明,有限长圆柱面热源模型对双U型埋管能源桩具有最好的适用性,计算相对误差小于4%。本研究成果基于原位试验得出,对桩基埋管换热器的工程应用具有重要理论意义和现实价值。

关键词:双U型埋管能源桩;线热源模型;圆柱面热源模型;试验验证

中图分类号:TU473.1

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2016)05-0226-05

目前,地源热泵技术由于其节能无污染的优势,使得地热作为一种新能源正被我国大力开发和应用。虽然我国在这方面的研究晚于其他国家,但还是取得了不少研究成果,而且伴随着将其列入新能源发展的十五年规划之中,其发展的势头将会更甚^[1]。能源桩是地源热泵的应用形式之一,由直接在桩基内埋管代替以前的钻孔埋管。这种形式相比于以往的钻孔埋管优势更为明显,不但节省了钻孔所需的费用,同时还节省了钻孔埋管所需的占地空间,对于用地紧张的地域,其优势不言而喻^[2]。然而,针对能源桩这种桩埋管换热器在国内的应用实例并不多,相关的试验验证很少,其适用性还有待更多验证。

笔者针对信阳信息大厦能源桩项目,将2种模型模拟值与原位试验实测值对比,分析了线热源传热模型及圆柱面热源传热模型对双U型埋管能源桩的适用性。线热源模型由Ingersoll和Plass于1948根据Kelvin线源概念首先提出^[3],即将换热器假定为一均匀发热的线热源。自地源热泵系统研究以来,线热源模型即被广泛应用。1947年,Carslaw和Jaeger首次提出柱热源理论模型^[4-5]。圆柱面热源模型是将换热器看成一均匀发热的柱热源,将土壤看成无限大的传热介质,将柱热源放入初始温度均匀的无限大介质中组成。

1 试验基本情况介绍

1.1 项目区基本情况介绍

本试验所依托的建筑主体为信阳宋基产业物流

园信息大厦,该项目位于信阳市西北侧,北临312国道,西临北京大道。该工程为二类高层,占地面积11 985 m²,地下建筑面积10 016 m²,地上建筑面积11 776 m²,共分为地上八层,地下两层。该建筑地下二层为地下车库,地下一层和地上二层为酒店等办公用房,地上三层及以上为酒店客房。拟采用地源热泵中央空调系统来满足商业部分(除地下车库)的夏季供冷与冬季供热。

本项目地源热泵冷热源系统的总冷负荷为2 183 kW,总热负荷为2 181 kW;选用2台高温地源热泵机组,制冷剂为R134a。

地埋换热器系统采用桩基埋管与钻孔埋管相结合的复合理管方式,其中地埋管井数量为360口,地埋管换热器采用de25的并联双U型管,竖直钻孔埋管方式,钻孔管径为130 mm,钻孔有效深度为100 m,埋管间距4 m×4 m。桩基埋管换热器数量为210口,桩基均采用钻孔灌注桩,桩径600 mm,桩基埋管采用3Ude25或双Ude25型管。为了保证水力平衡,对钻孔埋管设置2组集分水器,对桩基埋管设置一组集分水器。

1.2 场区工程地质条件

场地岩土层构成及特征如下。

(1)杂填土(Q_4^m) 杂色,稍密,以建筑垃圾和粉质黏土为主,含有少量碎石块,偶见大石块。

(2)粉质黏土(Q_4^{al+pl}) 褐黄色,软塑—可塑,含有少量铁锰质氧化物,偶见小姜石,刀切面稍具光泽,无摇震反应,干强度中等,韧性中等。

(3)粉质黏土(Q_3^{al+pl}) 棕黄色,可塑—硬塑,含

有少量铁锰质氧化物及钙质结核,刀切面稍具光泽,无摇晃反应,干强度中等,韧性中等。

(4)泥质粉砂岩(K_2) 紫红色,强风化,较破碎,泥质砂状结构,块状构造,主要矿物成分为石英、长石,含有少量云母碎片,岩心呈短柱状夹碎块状,手掰成碎块状,岩心采取率 60%~80%。

(5)泥质粉砂岩(K_2) 紫红色,中风化,较完整,泥质砂状结构,块状构造,主要矿物成分为石英、长石,含有少量云母碎片,岩心呈长柱状夹短柱状,锤击成块状,岩心采取率 75%~95%。

拟建场地地下水为赋存于填土中的上层滞水和

黏性土层中的少量孔隙水。上层滞水水量较大,地下水补给来源主要为大气降水、地表水,以蒸发及入渗形式排泄;黏性土层中的孔隙水,主要分布在黏性土层中和该层与泥质砂岩接触带中,以点状、片状分布,水量不大。

能源桩测试点地质剖面图详见图 1。

1.3 试验方案

现场测试对能源桩双 U 型埋管换热器分别进行 TRT 测试和 TPT 测试,在测试过程中进行应力应变和温度监测。

双 U 型能源测试桩选择四桩承台(其中同侧的

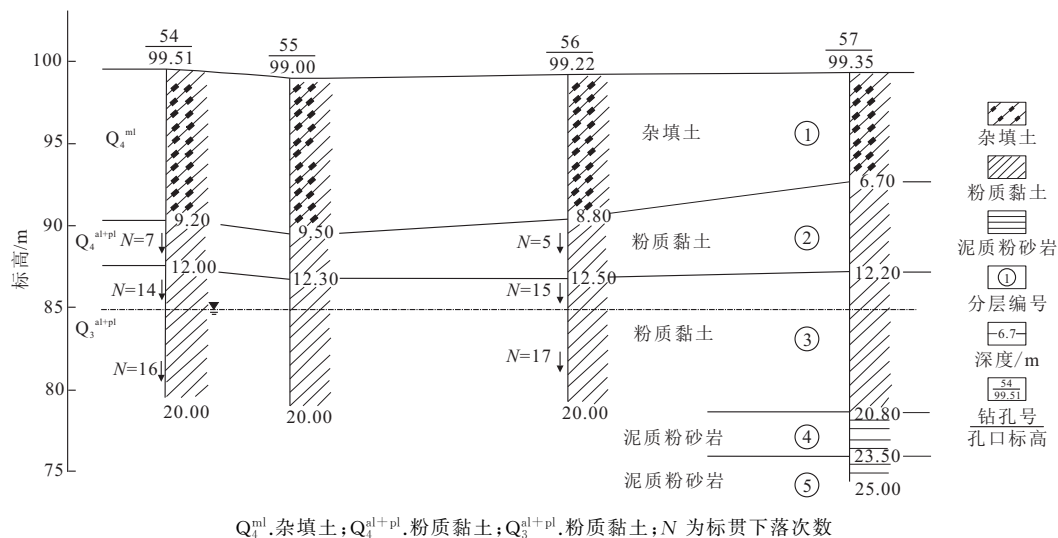


图 1 信息大厦能源桩测试位置地质剖面图

Fig.1 Geological profile of Information Building energy pile test location

两根桩为能源桩,分别定义为 1[#] 桩和 2[#] 桩)为试验对象,能源桩采用双 U 型串联埋管,沿钢筋笼内侧绑扎 De25HDPE 换热管,开展桩基埋管换热性能和结构响应测试。试验的两根能源桩直径 600 mm,桩长 18.5 m,试验桩之间的间距为 1.8 m。在两根试验桩的最外侧且靠近另外一根桩部位布设一组共 4 个 BGK4200 型振弦式应变传感器(可同时测试温度),传感器距离桩顶的距离分别为 3.0, 8.0, 13.0, 18.0 m。在两根桩的中间部位布设一组温度传感器,温度传感器共布设 4 个,距离地面(与桩顶同一平面)的距离分别为 3.0, 8.0, 13.0, 18.0 m。位于桩体里的传感器通过焊接的方式固定在钢筋笼上,然后浇筑混凝土;非桩体上的传感器均采用钻孔埋设,如图 2 所示。

2 能源桩传热模型

2.1 线热源模型

(1)无限长线热源模型^[2]

无限长线热源模型是将换热器假定为一无限长

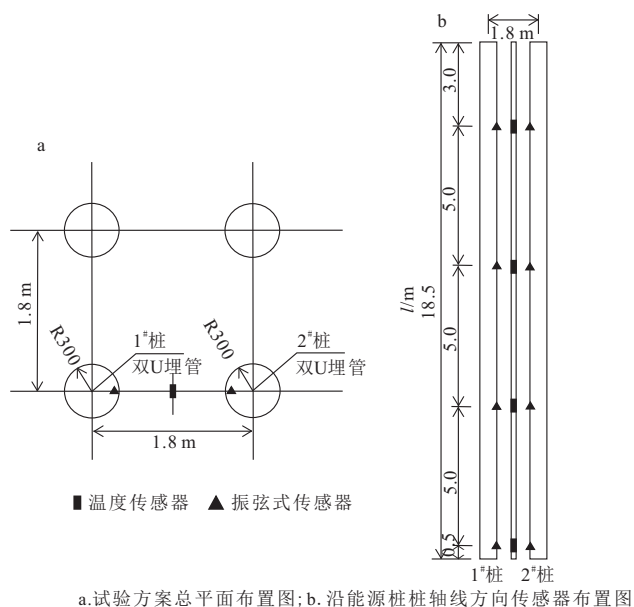


图 2 试验方案布置图

Fig.2 Test plan layout

的热源,将其放置于初始温度均匀的半无限大介质中,线热源单位长度的发热量均匀,为 q_l (W/m),则在 τ 时刻线热源周围的温度场分布的表达式为:

$$\theta_{1,i}(r,\tau) = -\frac{q_l}{4\pi\lambda} Ei\left(-\frac{r^2}{4a\tau}\right)$$

式中: $Ei(z) = \int_{-\infty}^z \frac{e^u}{u} du = \gamma + \ln(-z) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n! n}$; λ 为导热系数; a 为热扩散率; θ 为过余温度; z 为深度; r 为半径; τ 为时间; γ 为欧拉常数, $\gamma \approx 0.577\ 216$ 。

(2) 有限长线热源模型

基于无限长线热源模型存在的问题,曾和义等^[6-7]提出了有限长线热源模型,其温度响应的表达式为:

$$\theta_{1,f} = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \left\{ \frac{\operatorname{erfc}\left[\frac{\sqrt{r^2 + (z-z')^2}}{2\sqrt{a\tau}}\right]}{\sqrt{r^2 + (z-z')^2}} - \frac{\operatorname{erfc}\left[\frac{\sqrt{r^2 + (z+z')^2}}{2\sqrt{a\tau}}\right]}{\sqrt{r^2 + (z+z')^2}} \right\} dz'$$

式中: $r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$; $\operatorname{erfc} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \exp(-\mu^2) d\mu$, 是余误差函数; h 为桩埋深度。

2.2 圆柱面热源模型

(1) 无限长圆柱面热源模型^[8]

此模型将能源桩假定为一无限长的圆柱面热源,埋设在半无限大均匀介质中,单位长度的发热量均匀为 q_l (W/m),其温度响应的表达式为:

$$\theta_{c,i} = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \int_0^{\tau} \frac{1}{\tau-\tau'} \exp\left[-\frac{r^2+r_0^2}{4a(\tau-\tau')}\right] \cdot I_0\left[\frac{rr_0}{2a(\tau-\tau')}\right] d\tau'$$

其中 $I_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \exp(x \cos \varphi') d\varphi'$, 为零阶变形贝塞尔函数。

(2) 有限长圆柱面热源模型^[9]

由于能源桩长度有限,且其长径比远小于钻孔埋管换热器,因而有必要考虑能源桩长度对换热性能的影响,即有限长圆柱面热源模型。其温度响应的表达式为:

$$\theta_{c,f} = \frac{q_l}{8\pi\lambda} \int_0^{\tau} \frac{d\tau'}{(\tau-\tau')} I_0\left[\frac{rr_0}{2a(\tau-\tau')}\right] \exp\left[-\frac{r^2+r_0^2}{4a(\tau-\tau')}\right] \cdot \left\{ \operatorname{erfc}\left[\frac{z-h_2}{2\sqrt{a(\tau-\tau')}}\right] - \operatorname{erfc}\left[\frac{z-h_1}{2\sqrt{a(\tau-\tau')}}\right] + \right.$$

$$\left. \operatorname{erfc}\left[\frac{z+h_2}{2\sqrt{a(\tau-\tau')}}\right] - \operatorname{erfc}\left[\frac{z+h_1}{2\sqrt{a(\tau-\tau')}}\right] \right\}$$

式中: h_1 为桩顶埋深; h_2 为桩底埋深。

3 温度场的解析解及其试验验证

就双 U 型埋管能源桩而言,线热源模型忽略了能源桩的横向尺寸,将能源桩简化为线性热源;圆柱面热源模型将能源桩简化为具有一定横向尺寸的圆柱面热源。综上,笔者分别采用线热源模型和圆柱面热源模型对双 U 型埋管能源桩的换热特性进行比较分析。

3.1 无限长热源模型与有限长热源模型比较

壁面温度是能源桩桩壁与岩土体接触部位的温度,是能源桩向岩土体传递温度的起点,其温度的大小直接影响岩土体的温度场,因而对壁面温度的计算具有重要意义。图 3-a 分别为采用无限长热源模型和有限长热源模型计算的双 U 型埋管能源桩壁面温度与实测值的对比图。有限长线热源模型和无限长线热源模型的计算值较为接近,但计算值与实测值存在较大的误差。有限长圆柱面热源模型与无限长圆柱面热源模型在初始阶段的计算值较为一致,随着时间的增长,两者的差距逐渐增大,且有限长圆柱面热源模型的计算值逐渐趋近于实测值(图 3-b)。

计算结果无论是线热源模型还是圆柱面热源模

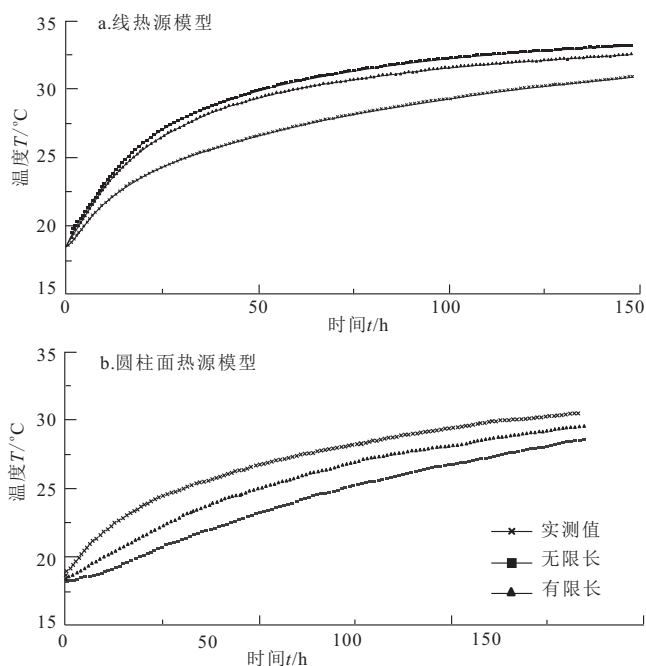


图3 双 U 型埋管能源桩壁面温度解析解与实测值对比

Fig.3 Comparison of analysis solution and the measured value of double U type buried pipe energy pile wall temperature

型,有限长热源模型较无限长热源模型的计算结果均更接近于实测值。由以上分析可知,对于双U型埋管能源桩,有限长热源模型较无限长线热源模型具有更高的精度。

3.2 有限长线热源模型与有限长圆柱面热源模型的比较

(1) 壁面温度对比

图4为有限长线热源模型与有限长圆柱面热源模型计算值与实测值对比图及其相对误差对比图。从计算值与实测值的对比(图4-a)来看,有限长圆柱面热源模型的计算值较有限长线热源模型明显更接近于实测值。从两者的相对误差对比图(图4-b)可以看出,线热源模型计算壁面温度与实测值的相对误差在初始阶段呈抛物线上升,而后趋于稳定,最终相对误差约17%。计算结果显示计算值与实测值的误差较大,这主要与线热源模型的基本假定有关,其将具有较大尺寸的能源桩简化为线热源与实际情况差距较大。圆柱面热源模型壁面温度计算值与实测值的相对误差在初始阶段急剧上升,最大相对误差达到14%,而后逐渐下降直至基本稳定在3.5%左右。原因在于壁面温度实测值通过埋设在桩周的

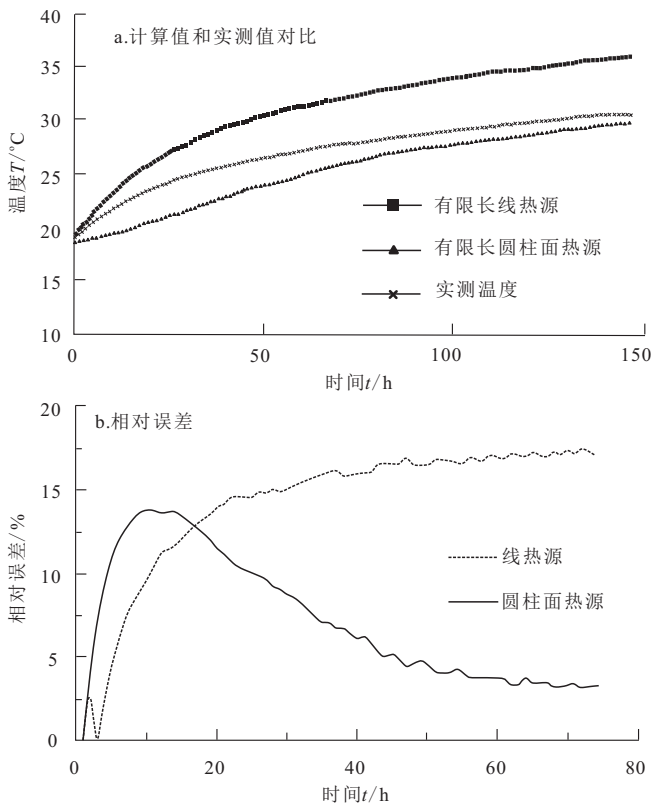


图4 双U型埋管能源桩有限长热源模型计算值与实测值及其相对误差对比

Fig.4 Comparison of calculated and measured values, and their relative errors of double U type buried pipe energy pile finite length heat source model

温度传感器获取,在初始阶段,温度首先由埋设在桩周的循环液埋管提供,而后向四周传热,因而壁面的温度最高,且其向桩内传热使桩内温度均匀需要一个过程,而圆柱面热源模型将温度均匀地赋值给能源桩,假定了能源桩温度相等而不考虑桩内温度的传递过程。传热模型与实际情况的差异是造成初期计算值与实测值差距较大的主要原因,随着时间的增加,桩内温度基本稳定,计算值与测试值的相对误差逐渐降低。

综上所述,在传热过程初期,无论是线热源模型还是圆柱面热源模型,对能源桩壁面温度的计算结果均存在较大的误差。随着传热时间的增长,有限长圆柱面热源模型的解析解与实测值逐渐接近并趋于稳定,相对误差小于4%,适宜作为双U型埋管能源桩壁面温度计算的理想模型。

(2) 周边温度场对比

图5-a为TRT试验结束时,双U型埋管能源桩周边温度场解析解与实测值的对比图,可以看出,自桩周壁面开始,有限长圆柱面热源模型计算的桩周温度场更接近实测值。从相对误差对比图(图5-b)来看,线热源模型在壁面处的相对误差约14%,而后随着距离的增加逐渐减小;圆柱面热源模型在壁面处的相对误差约4%,而后随着距离的增加而减小。从两个模型相对误差的比较来看,圆柱面热源模型的相对误差更小,且误差值较小,适宜作为双U型埋管能源桩周边温度场的计算模型。

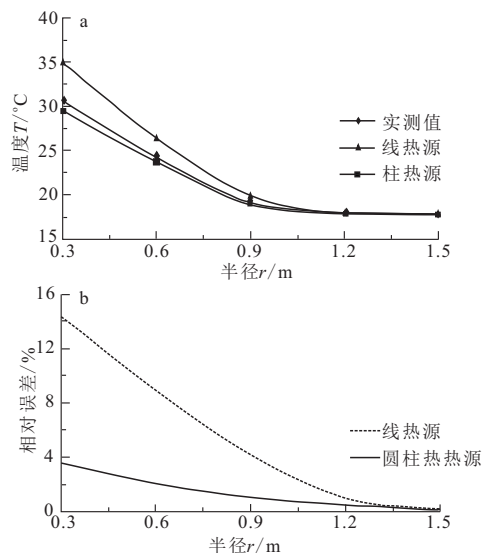


图5 双U型埋管能源桩周边温度场计算值与实测值对比(a)及相对误差(b)

Fig.5 Comparison of the calculation of the temperature field and the measured value chart and the relative error chart (b) of double U type buried pipe energy piles around

综合上述壁面温度和桩周温度场的分析成果,有限长圆柱面热源模型较其他热源模型具有更高的精度且计算误差较小,更适宜作为双 U 型埋管能源桩温度场的计算模型,可作为推荐使用的计算模型。

4 结 论

(1)对于双 U 型埋管能源桩,有限长热源模型较无限长线热源模型具有更高的精度。

(2)在传热过程初期,无论是线热源模型还是圆柱面热源模型,对能源桩壁面温度的计算结果均存在较大的误差。随着传热时间的增长,有限长圆柱面热源模型的解析解与实测值逐渐接近并趋于稳定,相对误差小于 4%,适宜作为双 U 型埋管能源桩壁面温度计算的理想模型。

(3)圆柱面热源模型的相对误差更小,且误差值较小,适宜作为双 U 型埋管能源桩周边温度场的计算模型。

(4)有限长圆柱面热源模型较其他热源模型具有更高的精度且计算误差较小,更适宜作为双 U 型埋管能源桩温度场的计算模型,可作为推荐使用的

计算模型。

参考文献:

- [1] 窦斌,高辉,周刚,等.我国发展增强型地热开采技术所面临的机遇与挑战[J].地质科技情报,2014,33(5):208-211.
- [2] 刁乃仁.地理管地源热泵技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [3] Ingersoll I L R, Plass H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump[J]. ASHVE Transactions, 1948, 6(1):119-122.
- [4] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of heat in solids[M]. 2th ed. Oxford: Oxford Press, 1959.
- [5] 贾力,方肇洪,钱兴华,等.高等传热学[M].北京:人民教育出版社,2003.
- [6] 曾和义,刁乃仁,方肇洪,等.地源热泵竖直埋管的有限长热源模型[J].热能动力工程,2003,18(2):166-169.
- [7] Zeng H Y, Diao N R, Fang Z H. A finite line source model for boreholes in geothermal heat exchangers[J]. Heat Transfer-Asian Research, 2002, 31(7):558-567.
- [8] Carslaw H S, Jaeger J C. Conduction of heat in solids[M]. Oxford UK: Clarendon Press, 1947.
- [9] 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, 53:2539-2601.

In Situ Test and the Analysis of Theoretical Applicability of Double U Type Pile Buried Tube Heat Exchanger

Wang Dahua¹, Zhao Haifeng^{1,2}, Gui Shuqiang²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Survey Research Institute of the Three Gorges Co. Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: The energy piles project of Xinyang Information Building is taken as a case for the comparative study on the line and the cylindrical heat source models for the double-U-type buried pipe energy pile. The temperature field of the pile and soil around the pile was obtained respectively by the two analytical models above, which are compared with in situ measured values. It indicates that the pile surface temperature calculated by finite line heat source model has a higher accuracy than the values calculated by infinite line heat source model, and the former model is more suitable for the heat transfer simulation of energy piles. However, the finite cylindrical heat source model has a better applicability for double-U-type buried pipe energy piles than the finite and infinite line heat source model and the infinite cylindrical heat source model, with the relative error less than 4%. The result of this research is based on the in situ test, and has important theoretical and practical value for the engineering application of the buried pipe heat exchanger of pile foundation.

Key words: double U type buried pipe energy pile; line heat source model; cylindrical heat source model; experimental verification