

考虑热交换作用的桩基承载力特性研究

张 阳¹, 尹铁锋², 范高飞³, 宗文亮²

(1. 中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410000;

2. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315101; 3. 宁波大学 岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211)

摘 要: 针对现行热交换桩承载力设计和计算中无法考虑温度的影响, 通过开展不同温度下土的三轴剪切试验, 获得其 c, φ 值, 再建立热交换桩-土有限元模型, 并利用静载试验结果验证模型的正确性, 进而讨论了桩的运行温度及土的 c, φ 值对单桩极限承载力的影响, 从而对热交换桩加热运行后的承载力特性进行研究。结果表明: 随温度的升高, 黏性土的 c, φ 值均有所降低, 土的强度下降; 桩体在加热运行过程中, 其极限承载力有较大幅度的提高, 且温度越高, 单桩极限承载力也越大; 温升引起的地基土强度降低对单桩极限承载力影响较小。可为热交换桩承载力设计和计算提供理论依据。

关键词: 热交换桩; 黏土; 温度效应; 土体强度; 承载力; 有限元

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2017)03-0203-06

Study on Bearing Capacity of Pile Foundation Considering the Heat Exchange Effect

ZHANG Yang¹, YIN Tiefeng², FAN Gaofei³, ZONG Wenliang²

(1. Sinohydro Bureau 8 Co., Ltd., Changsha, Hunan 410000, China;

2. Ningbo Rail Transit Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315101, China;

3. Institute of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

Abstract: Ignoring the influences of temperature in the current design and calculation of bearing capacity of heat exchanger piles is insufficient, accordingly, in this paper the shear strength test was carried out firstly on the clay at different temperatures, and the c, φ values of the clay are obtained. Then, the finite element model of heat exchanger piles and soil is presented and verified by result of static load test for a single pile. Furthermore, the influence of operation temperatures and values of c, φ on the ultimate bearing capacity of a single heat exchanger pile are discussed. the bearing capacity characteristics of heat exchanger piles after heating operation is analyzed. It is shown that the values of c, φ of the clay are reduced with the rise of temperature, i.e., strength of soil is reduced. During the heating operation, the ultimate bearing capacity of the pile is greatly improved, and the higher the temperature, the greater the ultimate bearing capacity of single pile is. The strength decrease of clay has little influence on the ultimate bearing capacity. The results can provide a theoretical basis for the design and calculation of bearing capacity of heat exchanger piles.

Keywords: heat exchanger piles; clay; temperature effects; soil strength; bearing capacity; finite element

近几年为了拓展地源热泵技术的市场占有率, 在地源热泵领域出现了一种新型的桩基埋管换热器, 也称为热交换桩技术。热交换桩是在建筑物桩基础施工时, 将地埋换热管预先浇注在建筑物的桩体中, 使换热管和桩基础有效结合。热交换桩技术

通过利用可再生的地热能

材料的密实性好,故传热效率高;(3) 热交换桩技术可以节省占地面积,同时缩短工期^[2]。在过去几十年,热交换桩已经在工程中广泛应用,如德国的法兰克福主塔大厦,采用了 112 根钻孔灌注热交换桩^[3];瑞士的苏黎世机场候机大厅,采用了 315 根热交换桩^[4]。

国内外学者从热传递特性和力学特性两方面对热交换桩开展了大量研究。早在 1994 年,Morino K 等^[5]将 U 型管状换热器埋在钢管桩中,利用有限差分法对换热器传热特性进行了数值分析以及试验研究。Pahud D 等^[6]利用数值分析法,对德国慕尼黑机场大楼的热交换桩换热器进行了数值模拟。Laloui L 等^[7]通过现场试验,分析了热交换桩热交换温度场。Hamada Y 等^[8]通过总结热交换桩技术,对摩擦桩桩基建筑物进行地能转换效率的长期观察,试验结果表明,桩埋换热器的效率比较高。张文克等^[9]给出在桩基中埋设螺旋换热管的传热模型,同时通过理论计算得到一维实心圆柱面热传递模型的解析解,最后通过试验进行验证。

Laloui L 等^[7]开展热交换桩的力学特性试验,结果表明,当桩两端约束较强时,桩身因温度产生的应力近似均匀分布。Rosenberg J E^[10]通过室内试验,得出桩身径向温度变形对桩基承载力有显著的影响。Knellwolf C 等^[11]在荷载传递法中加入温度应变,提出了热交换桩的设计方法,但是该方法并未考虑温度对桩周土体的影响。

目前热交换桩的研究主要集中在热传递特性方面,而对桩土的力学特性研究较少,且主要集中在温度对桩体本身的影响,并未考虑到热交换桩周围土性变化对承载力的影响。实际上,当温度变化时,桩体与土体的热膨胀系数不同导致其膨胀或收缩量也不同,土体力学特性也随温度变化而不同,从而可影响热交换桩承载特性。为此,本文首先通过温控试验,得到黏土不同温度下的 c 、 φ 值,再开展热交换桩桩土有限元计算,分析不同运行温度及不同 c 、 φ 值情况下的单桩承载特性,可为热交换桩承载力设计和计算提供参考依据。

1 不同温度下土的抗剪强度试验

采用自行研制的温控静动三轴试验仪,开展黏土黏聚力、内摩擦角试验,仪器相关的详细介绍见文献^[12]。

选取宁波某热交换桩工程场地的典型黏土,在温控动静三轴试验系统上开展不同温度下固结排水剪切试验^[12]。试样的基本物理力学指标如表 1 所示。

表 1 试样基本物理力学指标

$w/\%$	G_s	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$w_l/\%$	$w_p/\%$	$I_p/\%$
38.0	2.71	17.6	44.7	24.4	20.3

1.1 试样制备

(1) 将从现场取得的原状土样装入取土桶(高 20 cm,直径为 8 cm 的圆柱形铅皮桶),并进行蜡封,按土的原来上、下方向装箱,由专人负责运回试验室。

(2) 开封取土桶,按照取土时的上、下方向将土样放在切土盘上,用钢丝锯顺着切土盘侧壁,边转动边切削,制成直径 39.1 mm、高 80 mm 的圆柱形试样。将切削好的试样称量,准确至 0.1 g,同一组原状试样,密度的差值不宜大于 0.03 g/cm³。用切剩下的废土做含水率试验,其差值不宜大于 2%。经测定该土样的天然含水率为 38%。

(3) 将试样套上饱和器,置于真空饱和罐中进行抽真空饱和。饱和后的试样其饱和度 S_r 均大于 95%。

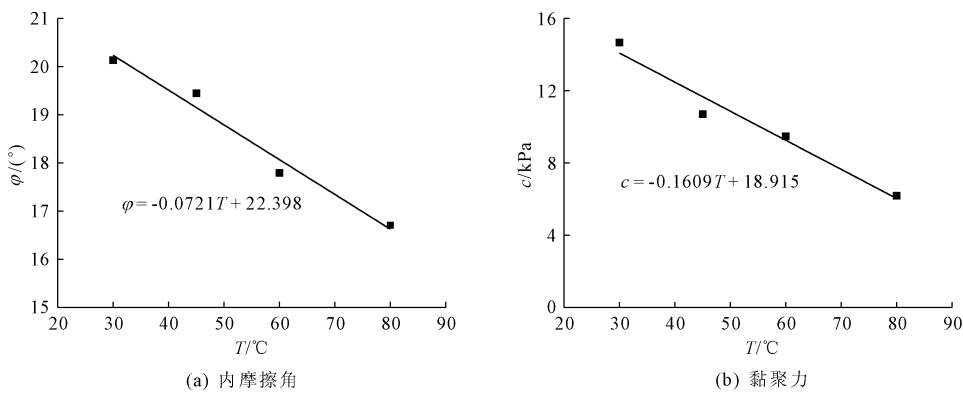


图 1 抗剪强度指标值随温度变化

2 热交换桩 – 土有限元模型

2.1 基本假定

利用 ABAQUS 软件对热交换桩 – 土进行有限元模拟,基本假定如下:(1) 由于桩截面为圆形,可以看作几何轴对称,桩顶施加均匀压应力,桩土模型为二维轴对称(见图 2);(2) 土体均质饱和,采用 Mohr – Coulomb 屈服准则;(3) 桩体采用理想线弹性材料;(4) 不考虑温度引起的孔隙水压力变化;(5) 桩土之间采用相对滑动界面;(6) 土层初始温度均匀分布,设为 15℃;(7) 桩体热源看作理想热源,沿桩中心线均匀分布,热源温度分别为 15℃、30℃、45℃;(8) 文中仅讨论土性变化对桩承载力的影响,桩以及桩土界面参数不随温度变化。

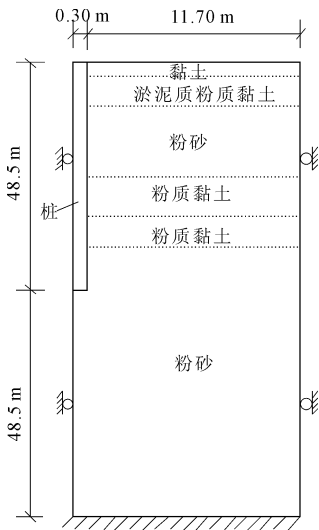


图 2 桩土模型及边界条件

2.2 有限元模型的建立

(1) 创建几何模型。根据 Karthigeyan S 等^[13]和 Mroueh H 等^[14]的研究,模型中土层深度可根据桩长(48.5 m)按 1:2 来确定,土层宽度可根据桩径(0.6

m)按 1:20 来确定,故土层厚度为 97 m(2L),水平宽度为 12 m(20D)。

(2) 桩土本构模型及材料特性。采用 ABAQUS 中的主、从接触算法来模拟桩 – 土之间的相互接触,其中桩体表面设为主控面,土体表面设为从属面,桩土接触采用 Mohr – Coulomb 摩擦罚函数的形式。桩土表面的接触压力为土层静止侧压力,摩擦系数根据实际工程地质勘察报告中的桩基参数栏取值。

材料参数如表 3 所示,除 c 、 φ 值外其余参数均不随温度变化,表 3 中土层 c 、 φ 值根据实际工程地质勘察报告取值, c 、 φ 值的变化规律根据第一节不同温度下土的抗剪强度试验结果规律进行取值。

(3) 初始条件和边界条件。力学边界条件见图 2,土层底部水平、竖直方向位移均为 0,两个侧面水平位移设为 0。土体顶面、侧面和底面温度边界为热辐射边界,热辐射系数均为 0.85。

以自动读取热分析的结果。

2.3 模型验证

为了验证有限元模型的正确性,将某热交换桩工程 26 # 灌注桩静载试验结果(设计单桩竖向抗压

承载力特征值为 1 725 kN,试验终至荷载 3 450 kN)与有限元模型计算结果进行比较^[15],计算中不考虑温度作用,计算参数如表 3 所示。

表 3 热力分析中的材料参数

土层	层厚 /m	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	泊松比	弹性模量 /MPa	有效重度 /(kN·m ⁻³)	比热容 /(kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数 /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	线膨胀系数 /(℃ ⁻¹)
黏土	3.0	19.4	13.7	0.375	4.66	8.9	1.52	1.51	5×10 ⁻⁶
淤泥质粉质黏土	5.4	13.4	9.8	0.394	3.20	8.0	1.50	1.42	5×10 ⁻⁶
粉砂	17.1	10.2	21.8	0.315	12.21	9.5	1.24	1.81	5×10 ⁻⁶
粉质黏土	9.6	19.5	16.4	0.351	7.60	9.2	1.39	1.60	5×10 ⁻⁶
粉质黏土	6.4	35.4	20.6	0.333	9.96	10.2	1.43	1.66	5×10 ⁻⁶
粉砂	7.0	18.2	32.4	0.306	23.28	10.7	1.26	1.87	5×10 ⁻⁶
桩	48.5	—	—	0.200	30000.00	15.2	0.97	2.94	1×10 ⁻⁵

单桩竖向抗压静载试验 $Q-s$ 曲线与有限元模型计算曲线对比如图 3 所示,由图 3 可以看出,当桩顶荷载加载到 3 450 kN 时,桩顶沉降量为 16.1 mm,数值模拟时的桩顶沉降量为 16.4 mm,二者基本一致,从而验证了模型和计算参数的可靠性。

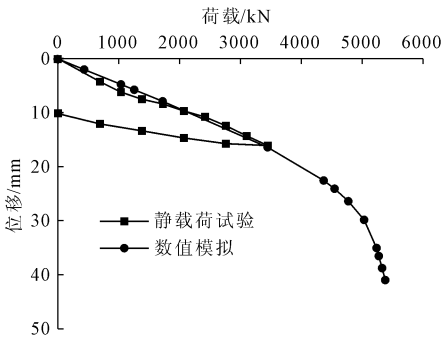


图 3 原位试验与数值模拟 $Q-s$ 曲线对比图

3 单桩承载力特征分析

3.1 计算工况

考虑桩基使用阶段桩顶初始荷载为 1 725 kN,即单桩竖向抗压承载力特征值^[16],土壤初始温度为 15℃。在 30℃、45℃热源作用下持续加热 4 个月,得到相应的桩侧摩阻力和桩身轴力。然后,继续加载以模拟单桩竖向抗压承载力静载荷试验,开展土壤初始温度下、升温土性参数不变、升温土性参数变化三种计算工况,讨论温度、黏聚力和内摩擦角随温度变化情况对热交换桩承载力的影响。其中土体黏聚力和内摩擦角随温度变化的规律,根据第一节

~ s 曲线结果见图 5~图 7。

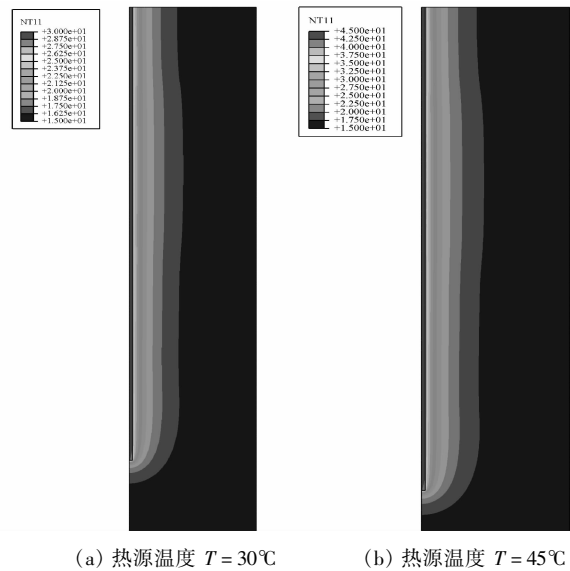


图 4 桩土温度分布云图

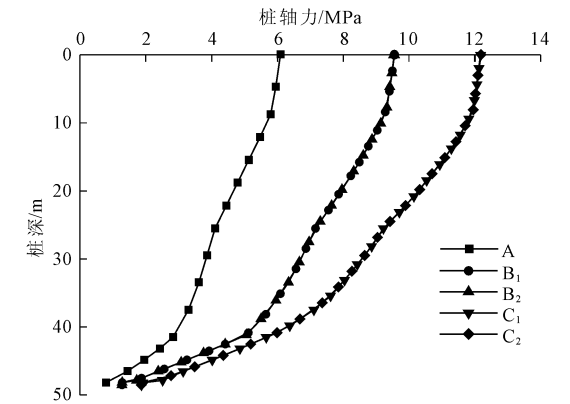


图 5 不同温度下的桩身轴力对比图

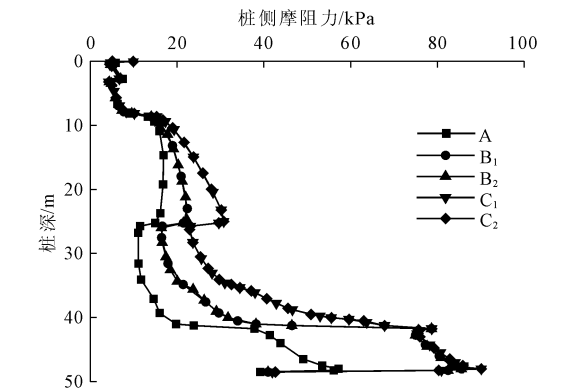


图 6 不同温度下的桩侧摩阻力对比图

各工况下的桩身轴力计算结果如图 5 所示,由图 5 可以看出:15℃下桩身最大轴应力为 6.1 MPa;30℃下 B_1 和 B_2 工况桩身最大轴应力分别为 9.56 MPa 和 9.55 MPa;45℃下 C_1 组和 C_2 组桩身最大轴应力分别为 12.19 MPa 和 12.17 MPa。因此,温度升

高,桩身产生较大温度应力,土体 c, φ 值降低对桩身轴应力的影响较小。

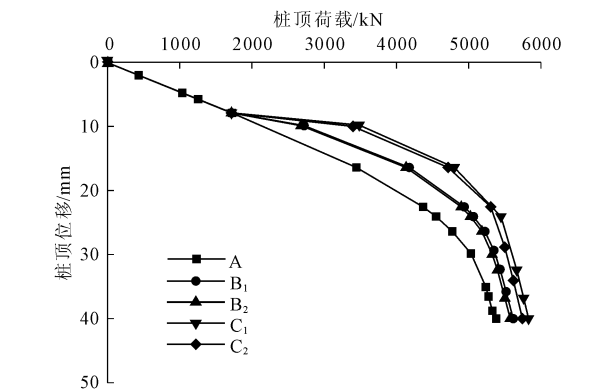


图 7 不同温度下的载荷-沉降曲线对比图

各工况下桩侧摩阻力如图 6 所示。由图 6 可知,30℃下 B_1 和 B_2 工况、45℃下 C_1 和 C_2 工况桩侧摩阻力曲线较接近;与 A 工况相比,随温度升高,桩侧摩阻力增大。尽管温度升高导致土体 c, φ 值的降低,但对桩侧摩阻力影响不大。

各工况下单桩 $Q-s$ 曲线如图 7 所示,取桩顶位移为 40 mm 时对应的荷载作为单桩极限承载力。由图 7 可知:常温下单桩极限承载力为 5 379.6 kN;30℃下 B_1 和 B_2 工况单桩极限承载力分别为 5 614.6 kN 和 5 575.0 kN;45℃下 C_1 和 C_2 工况单桩极限承载力分别为 5 829.6 kN 和 5 743.8 kN。与 A 工况的 $Q-s$ 曲线相比,随着温度的升高,单桩承载力有明显提高,且温度越高,单桩极限承载力也越大;温度升高导致土体 c, φ 值的降低对于单桩承载力的影响较小。

4 讨 论

本文对热交换桩承载力进行了初步的理论研究,尚存在一些不足之处:

(1) 温度升高会导致孔隙水压力,桩土界面接触发生变化,这些均会对单桩承载力产生很大的影响,而本文是在假定孔压、桩土界面接触不随温度变化的基础上进行的研究,虽然简化了求解过程,但可能对模拟结果会产生一定的影响。

(2) 土层中天然温度场浅层处受环境温度影响

减小,温度对黏聚力的影响更为明显。

(2) 尽管温度升高导致土的黏聚力、内摩擦角减小,但其对单桩承载力的影响不大。

(3) 随着温度的升高,单桩极限承载力有较大幅度的提高,其原因在于加热导致桩土膨胀,桩周侧压力增加,使桩侧摩阻力以及桩端承载力均有不同程度的提高。由此可见,加热对提高热交换桩单桩承载力具有积极的影响,在设计过程中可以适当提高其承载力特征值。

参考文献:

- [1] Laloui L, Nuth M, Vulliet L. Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006,30(8):763-781.
- [2] 刘汉龙,孔纲强,吴宏伟,等.能量桩工程应用研究进展及 PCC 能量桩技术开发[J].岩土工程学报,2014,36(1):176-181.
- [3] Quick H, Meissner S, Michael J, et al. Innovative foundation systems for high-rise buildings[C]//The 1st Intelligent Building Middle East Conference.[s.l]:[s.n], 2005.
- [4] Pahud D, Hubbuch M. Measured thermal performances of the energy pile system of the dock midfield at Zurich Airport [C]//Proceedings European Geothermal Congress. [s.l]:[s.n],2007.
- [5] 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.
- [6] Pahud D, Fromentin A, Hadom J C. The duct ground heat storage model (DST) for TRNSYS used for the simulation of heat exchanger piles[C]//Laboratoire Systemes Energetiques

(LASEN), Lausanne:[s.n], 1996.

- [7] Laloui L, Nuth M, Vulliet L. Experimental and numerical investigations of the behavior of a heat exchanger pile[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2006,30(8):763-781.
- [8] Hamada Y, Saitoh H, Nakamura M, et al. Field performance of an pile GHE system for space heating[J]. Energy and Buildings, 2007,39(5):517-524.
- [9] 张文克.桩埋管地热换热器的传热模型研究[D].济南:山东建筑大学,2009.
- [10] Rosenberg J E. Centrifuge modeling of soil structure interaction in thermo-active foundations[D]. Boulder: University of Colorado at Boulder, 2010.
- [11] Knellwolf C, Peron H, Laloui L. Geotechnical analysis of heat exchanger piles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011,137(10):890-902.
- [12] 刘干斌,范思婷,叶俊能,等.温控动三轴试验装置的研制及应用[J].岩石力学与工程学报,2015,34(7):1345-1352.
- [13] Karthigeyan S, Ramakrishna VVGST, Rajagopal K. Influence of vertical load on the lateral response of piles in sand [J]. Computers and Geotechnics, 2006,33(2):121-131.
- [14] Mroueh H, Shahrouh I. Numerical analysis of the response of battered piles to inclined pullout loads[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009,33(10):1277-1288.
- [15] 任文峰,王星华,陈剑华.软土地区 PHC 管桩承载力试验研究[J].水利与建筑工程学报,2012,10(1):60-63.
- [16] 海彬,侍克斌,周峰.浅析钻孔扩底灌注桩在深厚软基中承载力的稳定验算[J].水利与建筑工程学报,2009,7(1):115-116.

(上接第 147 页)

- [17] 黄志全,张瑞旗,王安明,等.基于 FLAC^{3D}的桩锚支护结构变形分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):68-72.
- [18] 吴丽华,陶辰.深基坑支护降水