

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.132



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



大直径桥梁能量桩传热特性现场试验和 数值模拟研究

赵志鹏^{1,2}, 王志鹏^{1,2}, 吴迪³, 陈嵘³, 孔纲强⁴

(1. 国网山东省电力公司 经济技术研究院 济南 250021; 2. 山东智源电力设计咨询有限公司 济南 261021; 3. 青岛理工大学 理学院, 山东 青岛 266520; 4. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098)

摘要:针对大直径桥梁能量桩的传热特性,通过现场试验测试了其热交换率与桩土温度场分布,建立大直径桥梁能量桩的三维数值模型,并将数值模拟结果与现场实测数据进行对比,验证所建模型的合理性。基于验证后的模型开展参数敏感性分析,探究桥梁桩基上方桥墩与周围空气的对流换热对大直径桥梁能量桩传热特性的影响机制。结果表明,大直径桥梁能量桩的热交换率可达 -222.28 W/m ,约为常规能量桩的 $1.5\sim 3.9$ 倍;但较大直径也会导致横截面上桩体温度分布不均匀,换热管附近的桩体温度明显升高,比中轴线位置约高 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,与周围空气的对流换热会使桥墩温度下降,进而提高桥梁能量桩夏季工况下的热交换率;当桥墩表面换热形式由自然对流(空气流速 0 m/s)变为强制对流(空气流速 5 m/s)时,桥梁能量桩的热交换率可提高约 22 W/m 。

关键词:大直径桩;能量桩;传热特性;现场试验;数值模拟;对流换热;热交换率

中图分类号: TU473.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2026)01-0080-09

Field test and numerical simulation on thermal performance of a large-diameter bridge energy pile

ZHAO Zhipeng^{1,2}, WANG Zhipeng^{1,2}, WU Di³, CHEN Rong³, KONG Gangqiang⁴

(1. Economic & Technology Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250021, P. R. China; 2. Shandong Zhiyuan Electric Power Design Consulting Co., LTD., Jinan 261021, P. R. China; 3. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, P. R. China; 4. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

Abstract: This study focuses on investigating the heat transfer characteristics of large-diameter bridge energy piles through field tests, aiming to examine the heat exchange rate and temperature distribution of a full-scale large-diameter bridge energy pile and its surrounding soil. Additionally, a three-dimensional numerical model of this energy pile is developed and validated by comparing field measurements with simulation results. With the validated model, a parameter sensitivity analysis is conducted to explore the influence mechanism of convective

收稿日期: 2023-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(52008225); 山东省自然科学基金(ZR2020QE259); 山东智源电力设计咨询有限公司科技项目(ZY-2022-06)

作者简介: 赵志鹏(1989-), 男, 主要从事建筑节能研究, E-mail: zpzjswmtdty@sina.com。

吴迪(通信作者), 男, 副教授, E-mail: wudi2009814@163.com。

Received: 2023-07-17

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52008225); Natural Science Foundation of Shandong (No. ZR2020QE259); Project of Shandong Zhiyuan Electric Power Design Consulting Co., LTD. (ZY-2022-06)

Author brief: ZHAO Zhipeng (1989-), main research interest: building energy conservation, E-mail: zpzjswmtdty@sina.com.

WU Di (corresponding author), associate professor, E-mail: wudi2009814@163.com.

heat exchange between the bridge piers on top of the pile and the surrounding air on the heat transfer characteristics of the large-diameter bridge energy pile. The results indicate that the heat exchange rate of this energy pile can reach -222.28 W/m , which is approximately 1.5 to 3.9 times that of conventional types. However, the larger diameter of the pile leads to uneven temperature distribution across the cross section. Specifically, the temperature near the heat exchange tubes is significantly higher (by around $3 \text{ }^\circ\text{C}$) than that at the central axis. Furthermore, it is observed that convective heat exchange between the bridge piers and surrounding air causes a decrease in the temperature of the piers, thereby increasing the heat exchange rate of the bridge energy pile in summer operation mode. When the heat transfer mode on the pier surface transitions from natural convection (air flow rate of 0 m/s) to forced convection (air flow rate of 5 m/s), the heat exchange rate of the bridge energy pile increases by approximately 22 W/m .

Keywords: large-diameter pile; energy pile; heat transfer characteristics; field test; numerical simulation; convective heat transfer; heat exchange rate

发展清洁绿色能源技术、减少碳排放是各行各业共同追求的目标^[1]。能量桩是一种在桩基结构基础上结合地源热泵技术形成的新型桩基结构,不仅可以实现传统桩基的承载功能,还能实现浅层地温能利用^[2-3]。

能量桩技术最早于1984年被提出,至今已有40年历史^[4]。目前针对能量桩的热-力耦合特性已开展较多现场测试,如任连伟等^[5]通过现场试验研究了冷热循环条件下PHC能量桩的热力学响应和承载性能特征;Wu等^[6]通过现场试验探究了埋管形式对能量桩热-力学特性的影响规律;You等^[7]通过现场试验分析了温度荷载作用下CFG能量桩的力学特性;Zhang等^[8]基于现场试验研究了PHC管桩型能量桩的长期热力学行为。模型试验具有条件可控、成本低等优点,也被广泛应用于能量桩热-力学特性研究。如刘汉龙等^[9]、王成龙等^[10]通过模型试验研究能量桩内部不同的埋管形式;Ding等^[11]通过模型试验研究了季节性冻土区能量桩传热性能的变化规律。除试验研究外,数值模拟方法也被广泛应用于能量桩的热-力耦合分析中^[12-16]。

桥梁工程中常使用桩基支撑桥梁荷载,但桥梁下方桩基的价值并没有得到完全利用。例如,若将桥梁下方的桩基改造成能量桩,冬季可提取浅层地温能用于桥面除冰,夏季则可将路面吸收的热量储存在地下,实现路面降温^[17-18]。

目前,常规形式能量桩(例如建筑桩基)的直径大多为 $0.4\sim 0.8 \text{ m}$,与其相比,桥梁工程中的能量桩有两个特点:1)桥梁基础的桩径普遍较大,其内部可为换热管埋设提供更大空间,从而获得更高的换热效率,但较大直径可能导致能量桩横截面上温度场分布不均匀,进一步造成大直径桥梁能量桩(桩径大于 1 m)热应力不均匀,影响桩基的承载力特性^[14, 19];2)常规能量桩与周围土体的能量传递以

热传导为主^[14, 16],而桥梁能量桩顶部一般设置有暴露在空气中的桥墩,其与周围流体的换热形式主要为热对流,当能量桩内的换热液体通过桥墩传递到桥面时,气温变化会通过桥墩间接影响能量桩的传热性能。然而,目前针对桥梁工程中能量桩的研究相对较少,已有研究尚未明确上述两个因素对能量桩传热性能的影响机制。因此,需开展相关测试以揭示桥梁工程中直径能量桩的传热特性。

针对上述问题,笔者以江阴市某市政桥梁工程为依托,通过开展现场试验测试大直径桥梁能量桩的热交换率和桩土温度场分布特点,分析其传热特性;建立大直径桥梁能量桩的三维数值模型,将现场实测数据与数值模拟结果进行对比,验证该模型的合理性;基于验证后的模型开展参数敏感性分析,探究桥墩与周围空气的对流换热对大直径能量桩传热特性的影响机制。

1 大直径桥梁能量桩现场试验

1.1 试验场地概况

现场试验在江阴市某市政桥梁项目开展。根据地勘结果,桩深范围 $0\sim 20 \text{ m}$ 内共存在4个土层,土层类型依次为:粉质黏土($0\sim 6.2 \text{ m}$)、含砾石黏土层($6.2\sim 10.3 \text{ m}$)、粉质黏土层($10.3\sim 19.1 \text{ m}$)以及含黏粒砂土层($19.1\sim 34.1 \text{ m}$)。采用KD2热分析仪对各土层土样进行测试,得到不同土层的热传导参数,见表1。混凝土和换热管的参数参考文献[6]中相关材料参数的取值范围。

1.2 大直径桥梁能量桩

在桥头设置5根钻孔灌注桩,桩间距为 5.4 m ,其顶部通过承台连接。在5根桩基中选取1根,在其内部埋设换热管,构成大直径桥梁能量桩。该能量桩长度 $L=20 \text{ m}$ 、直径 $D=1 \text{ m}$,桩基全部埋设在土体内部,桩顶无桥墩。为实现能量桩的传热,混

凝土浇筑前预先在桩体钢筋笼上绑扎聚乙烯(PE)材质的换热管,其外径为 25 mm、内径为 20.4 mm,由 5 根 U 型管串联而成,每根 U 型管长度为 38 m,换热管总长为 190 m(如图 1 所示)。换热管绑扎完成后随钢筋笼一起浇筑在混凝土内。为测试地热交换过程中能量桩的温度分布,在桩体内设置温度传感器并绑扎于钢筋笼上。为监测能量桩换热管内换热液体的温度和流速,在其进出口各设置 1 个温度传感器,同时连接换热管与流量计。为避免桩底部换热管在混凝土浇筑过程中被破坏,设计中在桩底部 1 m 范围内不设置换热管,如图 1 所示。

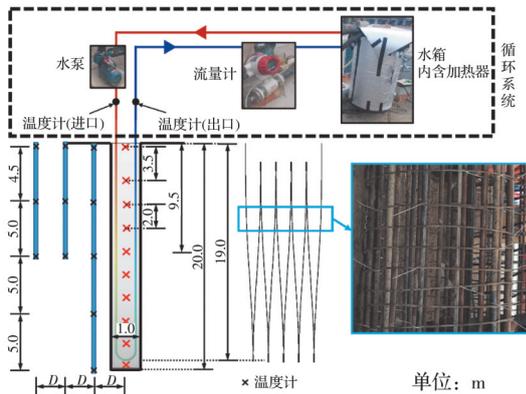


图 1 能量桩的换热管与仪器布置示意图

Fig. 1 Diagram of heat-exchanger pipes and instrument layout for the energy pile

表 1 材料参数表

Table 1 Material properties

材料	厚度/ m	密度/ (g/cm ³)	导热系数/ (W/(m·K))	比热容/ (J/(kg·K))
粉质黏土	6.2	1.88	1.66	2 900
含砾石黏土	4.1	2.03	1.76	2 600
粉质黏土	8.8	2.02	1.85	2 500
含黏粒砂土	>19.1	2.07	1.85	2 500
混凝土		2.50	1.90	1 000
换热管			0.46	

1.3 循环系统

为实现对能量桩内换热液体的循环和温度控制,搭建了温控循环系统,包含循环水泵、保温水箱、制冷机组、电加热器及温控开关等部件。其中,循环水泵选用德国威乐 PW-251EH 型自吸式清水泵,最大扬程为 35 m;电加热器功率范围为 0~6 kW,制冷机组最大制冷功率为 6.9 kW。这两个装置与温控开关相互连接,当保温水箱内水温达到预定值时,系统将自动切断电源,使温控循环系统的温度维持在 5~60 °C 之间。此外,水箱和能量桩外部的循环管路均包裹保温材料,以减少热量散失。温控循环系统的结构如图 1 所示。

1.4 试验方案

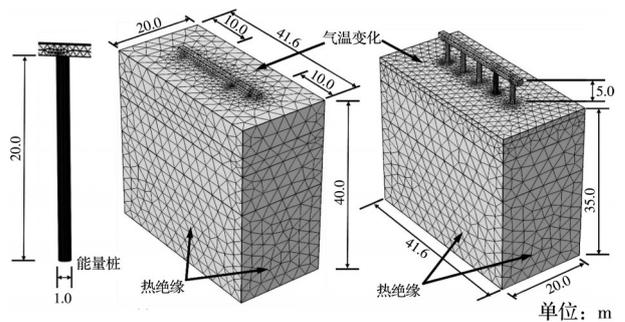
为研究大直径桥梁能量桩的传热性能,开展持续 240 h 的热响应测试。试验中恒定加热功率为 4.8 kW,并以 0.9 m³/h 的体积流量(对应质量流量 0.25 kg/s)使换热液体在 U 形管中循环,以实现大直径桥梁能量桩的加热。该流速设计旨在减少测试所需时间,同时保证在能量桩内部流动的载热流体处于完全湍流状态,因为相较于层流,湍流更有利于提高能量桩的工作效率^[6]。此外,使用纯净水作为换热液体,试验过程中对换热管进出口处的温度以及能量桩桩身温度变化进行实时监测。

2 有限元模型

为研究对流换热对大直径桥梁能量桩传热性能的影响,建立两组有限元模型:第 1 组模型与现场试验保持一致,能量桩顶部无桥墩;第 2 组模型顶部设 5 m 的桥墩,其他条件与第 1 组一致。

2.1 数值模型

大直径桥梁能量桩的三维几何模型与现场试验一致,如图 2 所示。模型包含 5 根桩基,桩长 $L=20$ m、直径 $D=1$ m,桩间距为 5.4 m,桩的顶端由承台连接。为消除模型边界效应,土体最外边界距离桩基的距离均大于 $10D$,且土体高度为桩长 L 的 2 倍,最终土体尺寸为 20.0 m×41.6 m×40 m,如图 2(a)所示。模型选取与现场试验相同位置的桩基,在其内部建立换热管的几何模型,能量桩和换热管的几何模型参数均与现场试验一致。数值模型中土层分布与现场试验一致,各土层的材料参数采用现场实测结果,如表 1 所示。此外,为考虑空气对流换热的影响,第 2 组模型未包含顶部 5 m 范围内的土体,使能量桩上部 5 m 高的桥墩完全暴露在空气中,如图 2(b)所示。两组模型的其他参数均一致。



(a) 第 1 组模型

(b) 第 2 组模型

图 2 数值模型的几何、网格和边界条件示意图

Fig. 2 Diagram of the geometry, mesh and boundary conditions of the numerical model

2.2 数学方程

能量桩和周围土体内的热量传递以热传导为主,模型中固体材料的能量守恒方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = 0 \quad (1)$$

式中: T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; ρ 为密度, kg/m^3 ; λ 为热传导系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; c_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

桥墩与周围环境之间的能量传递以对流换热为主。Bourne-Webb等^[20]通过在混凝土表面设置对流热交换率边界条件来模拟其与空气的对流换热,并验证了该方法的可行性。笔者借鉴此方法,通过在混凝土桥墩表面设置对流热交换率边界条件来模拟其与周围空气的对流换热,该边界条件通过式(2)计算。

$$q_0 = (T_{\text{air}} - T_{\text{pier}}) \times h_c \quad (2)$$

式中: q_0 为桥墩和周围空气的对流换热量, W/m^2 ; T_{air} 为桥墩周围的气温, $^{\circ}\text{C}$; T_{pier} 为桥墩表面温度, $^{\circ}\text{C}$,通过固体材料的能量守恒方程进行计算; h_c 为桥墩混凝土表面与空气的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,其取值与空气流速 V_{air} 有关,按式(3)计算^[20]。

$$h_c = 11 + 4.1V_{\text{air}} \quad (3)$$

能量桩换热管内换热液体的能量守恒方程为

$$\rho_i c_i A \frac{\partial T_f}{\partial t} (+ u_i \cdot \nabla (T_f)) = \nabla \cdot (A \lambda_i \nabla (T_f)) + Q_{\text{wall}} \quad (4)$$

式中: T_f 为换热液体的温度, $^{\circ}\text{C}$; λ_i 为换热液体的热传导系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; u_i 为换热液体的流速, m/s ; ρ_i 为换热液体的密度, kg/m^3 ; c_i 为换热液体的比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; A 为换热管的横截面积, m^2 。

为考虑换热液体与换热管壁之间的对流换热,引入边界热源 Q_{wall} 来计算换热液体通过管壁传递到周围固体的热交换率,如式(5)所示。

$$Q_{\text{wall}} = \lambda_{\text{eff}} l (T_{\text{ext}} - T_f) \quad (5)$$

式中: T_{ext} 为换热管外侧介质(桩体)的温度, $^{\circ}\text{C}$; l 为换热管的内周长, m ; λ_{eff} 为换热壁管的有效热传导系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,按式(6)计算。

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{int}}} + \frac{r_0}{\lambda_{\text{pipe}}} \ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)} \quad (6)$$

式中: r_0 和 r_1 分别为换热管的内径和外径, m ; λ_{pipe} 为管壁的热传导系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; h_{int} 为管道的内部膜阻, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,通过式(7)计算。

$$h_{\text{int}} = \frac{Nu \lambda_f}{d_h} \quad (7)$$

式中: $d_h = 4A/l$ 为水力直径, m ; Nu 为Nusselt数,通

过式(8)计算。

$$Nu = \max(Nu_{\text{lam}}, Nu_{\text{turb}}) \quad (8)$$

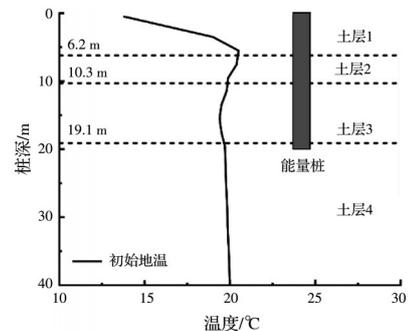
$$Nu_{\text{turb}} = \frac{(f_D/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f_D/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (9)$$

式中: Nu_{lam} 和 Nu_{turb} 分别为层流和湍流的Nusselt数(对于圆形截面, $Nu_{\text{lam}} = 3.66$ ^[21]); Re 为雷诺数; Pr 为普朗特数; f_D 为管壁的摩擦系数,可通过式(10)^[22]计算。

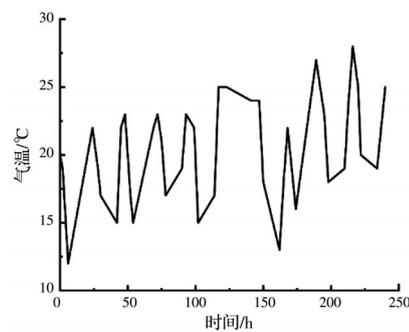
$$f_D = -\frac{1}{1.8 \lg(6.9/Re)} \quad (10)$$

2.3 边界与初始条件

数值模型中土体四周和底面为热绝缘边界,如图2所示。土体顶部为温度边界,该边界温度采用现场测得的气温变化数据(见图3(b))。试验开始前,通过大直径桥梁能量桩上的温度传感器测得初始温度场沿深度的分布,将其作为能量桩和土体的初始温度(见图3(a))。为深入探究对流换热对能量桩传热性能的影响,第2组模型中桥墩边界采用对流边界条件(见式(2)),桥墩外侧的温度同样为现场试验过程中记录的气温。数值模型中换热管内流体的体积流量为 $0.9 \text{ m}^3/\text{h}$,换热管入口处的温度边界采用现场试验实测得到的入口水温(见图4(a))。模型采用瞬态求解,运行时间为240 h。



(a) 初始地温



(b) 气温变化

图3 初始地温与气温变化

Fig. 3 Initial ground temperature and air temperature variation

3 结果分析

3.1 大直径桥梁能量桩热交换率的变化

试验和数值模型的进出口水温如图4(a)所示。在试验最初的3 h内,能量桩进出口水温快速上升,随后增长率逐渐减缓,最终趋于稳定。由于入口水温高于桩体温度,水在换热管内循环到达出口的过程中,部分热量会通过换热管传递到能量桩内,再通过能量桩将热量传递到土体中,因此出口水温始终低于入口水温。随着试验的进行,入口水温不断升高,其与能量桩之间的温差逐渐增大,此时进出口温差也逐渐增大,说明能量桩的换热效率逐渐升高。在试验进行240 h后,能量桩进出口水温分别为38.9、34.6℃,温差为4.3℃,表明能量桩能够有效实现与土体的热交换。为量化大直径桥梁能量桩的热交换率,采用式(11)计算其热交换率的变化。

$$q = (T_{out} - T_{in}) \times c_w \times q_m \times \frac{1}{L} \quad (11)$$

式中: q 为热交换率, W/m; T_{in} 与 T_{out} 分别为进出口水温,℃; c_w 为水的比热容,取4.2 kJ/(kg·℃); q_m 为换热管内流体的质量流量, kg/s。

图4(b)所示为试验与数值模型中大直径桥梁能量桩热交换率随时间的变化规律。在试验开始后50 h内,热交换率迅速增长到约-200 W/m,这

是因为试验刚开始时入口处的换热液体温度迅速上升,此时换热液体与周围桩体之间的温度梯度迅速增大,因此能量桩的热交换率迅速升高。50 h后,换热液体的温度基本稳定,液体和桩体之间温度梯度减小并维持在稳定水平,此时热交换率也随之稳定。从试验开始50 h到试验结束,现场试验中大直径桥梁能量桩的平均热交换率为-222.28 W/m。

常规情况下能量桩的直径大多为0.4~0.8 m,当能量桩直径在此范围内时,其内部通常可设置1~3根U型换热管,根据实测结果,此时能量桩热交换率为-57~-147 W/m^[23-25]。对比可知,大直径桥梁能量桩的热交换率约为常规能量桩的1.5~3.9倍,这归因于大直径桥梁能量桩的直径较大($D = 1$ m),具有足够的空间埋设更多换热管,从而提高换热效率。另外,图4表明试验结果与数值模拟结果吻合较好,后期稳定阶段,二者确定的平均热交换率仅相差6%,表明建立的数值模型能有效模拟换热液体与换热管及周围桩体之间的能量交换过程。

3.2 大直径桥梁能量桩及周围土体温度变化

图5(a)所示为大直径桥梁能量桩桩身温度随时间的变化规律。在施加温度荷载后,桩体温度逐渐升高,随着试验的进行,上升速率逐渐减缓。试验结束时,能量桩桩身温度为36℃左右,相较进口温度降低了2.9℃,但比出口温度高1.4℃,这归因于桩体混凝土和换热管壁的热阻。整个试验过程中,桩体温度变化幅度为17℃。此外,不同深度的桩身温度变化规律基本一致,且不同位置能量桩温度的变化量相差不大,说明能量桩工作时换热管在深度方向上对桩体产生了均匀的加热。

能量桩桩体温度沿深度分布规律如图5(b)所示。在横截面的不同位置,能量桩沿桩深的温度分布规律基本一致,这与Batini等^[13]的研究结果相符。桩底处温度变化量迅速减小,是因为桩底0.5 m范围内未设置换热管。此外,现场试验中,能量桩换热管布设在距离桩中轴线0.4倍桩径处,数值模拟结果显示,该位置的桩体温度高于其他位置($r = 0 \sim 0.4D$),这种现象可归结为换热管对能量桩沿横向的非均匀加热,在Cui等^[26]的研究中也有类似发现。另外,0.3D~0.4D范围内桩体温度差约1.5℃,但0~0.3D范围内桩体温度差仅为0.5℃,说明大直径桥梁能量桩横截面上换热管局部的温度梯度较大,而在其余位置温度分布较为均匀。

图6所示为能量桩沿横截面上的温度分布。能量桩不同横截面上的最高温度均出现在靠近换热

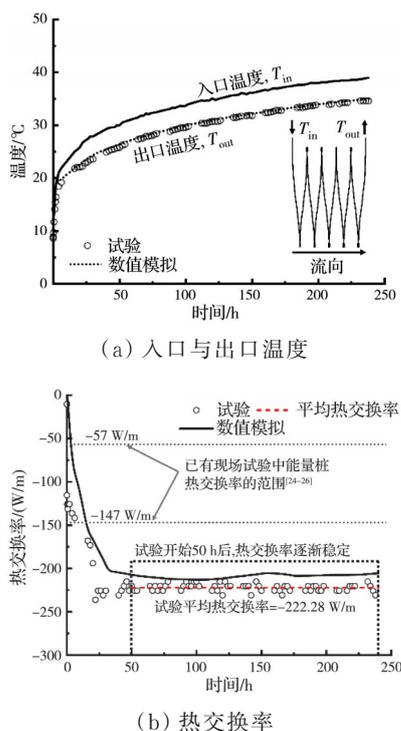
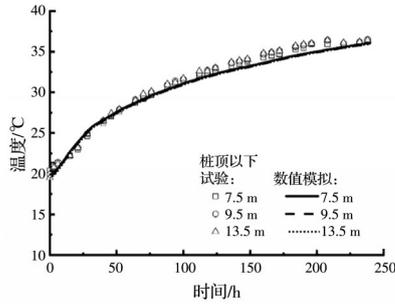
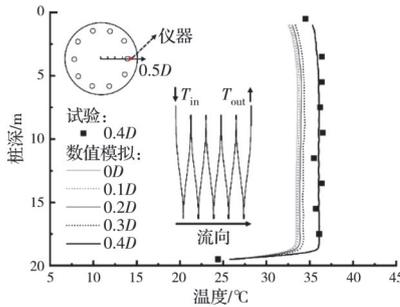


图4 能量桩进出口水温与热交换率

Fig. 4 Inlet/outlet water temperatures and heat exchange rate of the energy pile



(a) 桩温随时间变化



(b) 桩温沿深度分布

图 5 能量桩的温度变化

Fig. 5 Temperature variation of the energy pile

管的位置,从换热管位置向桩中心轴线方向,桩体温度逐渐下降。与桩中心轴线处相比,换热管位置附近的温度高 3 °C。桩深 7.5 m 处的横截面平均温度为 33.75 °C,与桩中心轴线处的温度基本相同。已有研究表明^[14, 19],能量桩不均匀的温度分布会导致桩体热应力的不均匀,由此可以合理推测,大直径桥梁能量桩换热管附近的热应力远高于其横截面上的平均热应力。已有研究中常通过将换热管附近的热应力测值乘以横截面面积计算得到能量桩的轴力变化^[27],因此设计时如果利用相同的方法计算大直径桥梁能量桩的轴力,可能会导致结果偏大,从而大幅提高建设成本。

桩深 7.5、14.5 m 两个横截面上温度分布规律十分接近,与图 5(b)得到的结果相符。在换热管下

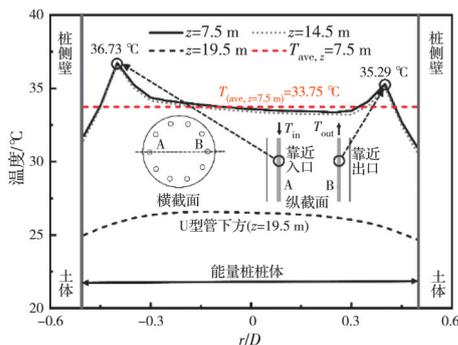


图 6 能量桩横截面的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution on the cross section of the energy pile

方(即 19.5 m 处)桩中心的温度最高,这是因为现场试验中为避免桩底部换热管在混凝土浇筑过程中被破坏,设计时在桩底部 1 m 范围内未设置换热管,因此温度不均匀现象得到缓解。但桩体内部热量积蓄,导致中心位置的温度相对较高。

此外,由于现场试验大直径桥梁能量桩内部换热管数量较多且为串联连接,较长的换热管会导致进出口产生较大温差^[28],靠近换热管入口一侧的桩体温度比靠近换热管出口一侧约高 1.5 °C。因此,大直径桥梁能量桩内的换热管可采用并联连接,以减小其温度分布的不均匀性。

图 7 所示为不同时刻桩周土体温度沿径向的分布规律。试验开始后,土体温度逐渐升高。试验进行到 120 h 时,距离桩轴线 1D 处的土体温度为 22 °C,此后的 120 h 内土体温度继续上升至 24 °C。由于土体存在热阻,距离能量桩越远,土体温度越低。距离桩轴线 1D~2D 范围的土体受能量桩的影响逐渐减小,在 240 h 的加热过程中,距离桩轴线 2D 范围外的土体温度受能量桩的影响几乎可忽略不计。另外,由图 5 和图 7 可知,现场实测得到的大直径桥梁能量桩和周围土体的温度与数值模拟结果基本一致,说明建立的数值模型能较好地模拟大直径桥梁能量桩与周围土体的能量交换。

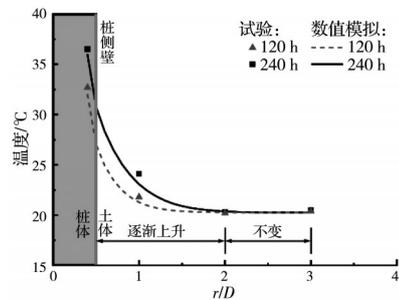


图 7 土体温度分布

Fig. 7 Distribution of soil temperature

3.3 对流换热对能量桩传热特性的影响

不同对流换热条件下大直径桥梁能量桩和桥墩的温度分布如图 8 所示。由于桩体和桥墩的温度高于周围土体和空气的温度,能量桩和桥墩内的热量会逐渐向周围介质传递。但由于桥墩和空气之间对流换热效率高于能量桩和土体之间的热传导效率,桥墩更容易向空气传递热量,导致桥墩的温度低于下方能量桩的温度。当外部空气的流速较大时(5 m/s),强制对流下桥墩内的热量迅速向空气中散失,造成桥墩温度迅速下降,因此,空气流速为 5 m/s 时桥墩温度比空气流速为 0 m/s 时约低 1.7 °C。

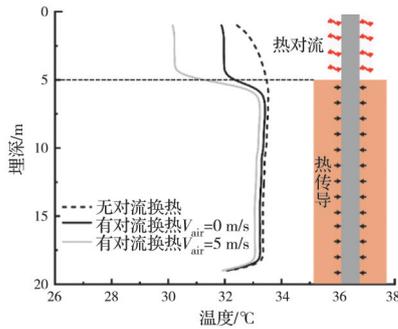


图8 对流换热对桩体温度沿深度分布的影响

Fig. 8 Effect of convective heat transfer on the depth-wise temperature distribution of the energy pile

桥墩与周围空气的对流换热机会显著影响能量桩的热交换率,图9所示为不同对流换热条件下大直径桥梁能量桩热交换率的变化规律。由图9可知,试验进行150 h后,能量桩的热交换率相对稳定,此期间无对流换热能量桩的平均热交换率 q_{ave} 为 -207 W/m 。空气流速为 0 m/s 时有对流换热能量桩的平均热交换率 q_{ave} 为 -216 W/m ,空气流速为 5 m/s 时有对流换热能量桩的平均热交换率 q_{ave} 为 -238 W/m 。这归因于较低的空气温度(相比于能量桩温度)会导致热量由桥墩向周围空气中散失,造成桥墩温度下降(见图8),此时,高温的换热液体与桥墩之间的温度梯度更大,提高了能量桩的热交换性能。当空气流速较大时,桥墩表面的对流换热系数增大,桥墩向周围空气散热的速率提高,因此,空气流速为 5 m/s 时能量桩的热交换率最高,该结果与图8所示桩体和桥墩温度的变化规律相符。

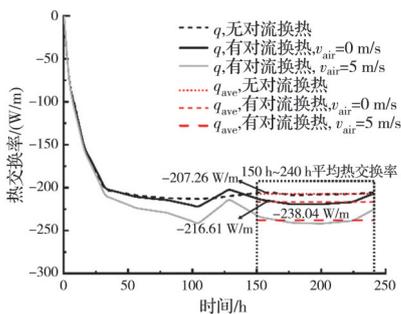


图9 对流换热对能量桩热交换率的影响

Fig. 9 Effect of convective heat transfer on the heat exchange rate of the energy pile

在试验开始的前30 h,由于换热液体与桩体及周围土体的温度梯度较大,不论桩侧是否存在对流换热,能量桩的热交换率都迅速升高到 -200 W/m 左右。由图9可知,试验进行50 h后,当桩侧无对流换热时,能量桩热交换率基本保持稳定。但当桥墩表面存在对流换热时,桥墩和周围空气的对流换热会造成能量桩热交换率的明显波动,在117~147 h

期间,能量桩的热交换率出现明显降低。这是因为此期间气温迅速升高并保持恒定(见图3),此时桥墩与空气的温度梯度减小,导致能量桩向空气中的热量散失减弱。

桩筏形式下的能量桩设计通常不考虑外界气温变化的影响。然而,上述结果表明,当能量桩上方存在桥墩时,能量桩的热交换率会显著受到气温的影响。因此,当桥墩长度较大时,能量桩的设计需考虑当地气温的变化,且应根据不同季节的气温变化采用不同的热交换率设计值。

4 结论

通过现场试验测试大直径桥梁能量桩的换热性能,建立其三维数值模型,研究桥墩与周围空气的对流换热对大直径桥梁能量桩传热特性的影响机制,得到如下主要结论:

1)大直径桥梁能量桩内可设置更多换热管,显著提高其热交换率。现场试验测得大直径桥梁能量桩的热交换率为 -222.28 W/m ,约为常规能量桩的1.5~3.9倍。

2)大直径桥梁能量桩沿桩深方向的温度呈均匀分布,与常规能量桩基本一致,但横截面上大直径桥梁能量桩的温度分布不均匀,换热管附近的桩体温度明显升高,比中轴线位置处的桩体温度约高 $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3)气温较低时,桥墩与周围空气的对流换热会造成桥墩温度下降,而对能量桩的温度几乎无影响。当桥墩外侧空气流速由 0 m/s 增大到 5 m/s 时,桥墩温度约降低了 $1.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4)桥墩与周围空气的对流换热可提高能量桩夏季工况的热交换率,并且空气流速越大,增益效果越明显,当桥墩表面由自然对流(空气流速 0 m/s)变为强制对流(空气流速 5 m/s)时,能量桩的热交换率约提高 22 W/m 。

参考文献

- [1] 江亿, 胡珊. 中国建筑部门实现碳中和的路径[J]. 暖通空调, 2021, 51(5): 1-13.
JIANG Y, HU S. Paths to carbon neutrality in China's building sector [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(5): 1-13. (in Chinese)
- [2] FANG J C, KONG G Q, YANG Q. Group performance of energy piles under cyclic and variable thermal loading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148(8): 04022060.

- [3] 吴迪, 刘汉龙, 孔纲强, 等. 预埋与绑扎埋管形式能量桩承载特性研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(4): 1109-1116.
WU D, LIU H L, KONG G Q, et al. Study on bearing characteristics of energy piles with embedded tube and tied tube [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(4): 1109-1116. (in Chinese)
- [4] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. Géotechnique, 2006, 56(2): 81-122.
- [5] 任连伟, 任军洋, 孔纲强, 等. 冷热循环下PHC能量桩热力响应和承载性能现场试验[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 529-536, 546.
REN L W, REN J Y, KONG G Q, et al. Field tests on thermo-mechanical response and bearing capacity of PHC energy pile under cooling-heating cyclic temperature [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 529-536, 546. (in Chinese)
- [6] WU D, LIU H L, KONG G Q, et al. Thermo-mechanical behavior of a full-scale energy pile equipped with a spiral pipe configuration [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, 58(11): 1757-1769.
- [7] YOU S, CHENG X H, GUO H X, et al. Experimental study on structural response of CFG energy piles [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 96: 640-651.
- [8] ZHANG G Z, CAO Z M, LIU Y P, et al. Field test and numerical simulation on the long-term thermal response of PHC energy pile in layered foundation [J]. Sensors, 2021, 21(11): 3873.
- [9] 刘汉龙, 王成龙, 孔纲强, 等. U型、W型和螺旋型埋管形式能量桩热力学特性对比模型试验[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊1): 441-447.
LIU H L, WANG C L, KONG G Q, et al. Comparative model test on thermomechanical characteristics of energy pile with U-shape, W-shape and spiral-shape [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup 1): 441-447. (in Chinese)
- [10] 王成龙, 刘汉龙, 孔纲强, 等. 不同埋管形式下能量桩热力学特性模型试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(1): 85-91.
WANG C L, LIU H L, KONG G Q, et al. Model tests on thermal mechanical behavior of energy piles influenced with heat exchangers types [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(1): 85-91. (in Chinese)
- [11] DING X M, PENG C, WANG C L, et al. Heat transfer performance of energy piles in seasonally frozen soil areas [J]. Renewable Energy, 2022, 190: 903-918.
- [12] GASHTI E H N, UOTINEN V M, KUJALA K. Numerical modelling of thermal regimes in steel energy pile foundations: A case study [J]. Energy and Buildings, 2014, 69: 165-174.
- [13] BATINI N, ROTTA LORIA A F, CONTI P, et al. Energy and geotechnical behaviour of energy piles for different design solutions [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 86: 199-213.
- [14] ABDELAZIZ S, OZUDOGRU T Y. Non-uniform thermal strains and stresses in energy piles [J]. Environmental Geotechnics, 2016, 3(4): 237-252.
- [15] GHASEMI-FARE O, BASU P. Influences of ground saturation and thermal boundary condition on energy harvesting using geothermal piles [J]. Energy and Buildings, 2018, 165: 340-351.
- [16] MORADSHAHI A, FAIZAL M, BOUAZZA A, et al. Cross-sectional thermo-mechanical responses of energy piles [J]. Computers and Geotechnics, 2021, 138: 104320.
- [17] KONG G Q, WU D, LIU H L, et al. Performance of a geothermal energy deicing system for bridge deck using a pile heat exchanger [J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(1): 596-603.
- [18] WU D, KONG G Q, LIU H L, et al. Performance of a full-scale energy pile for underground solar energy storage [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 27: 101313.
- [19] KONG G Q, FANG J C, LV Z X, et al. Effects of pile and soil properties on thermally induced mechanical responses of energy piles [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 154: 105176.
- [20] BOURNE-WEBB P J, BODAS FREITAS T M, COSTA GONÇALVES R A. Thermal and mechanical aspects of the response of embedded retaining walls used as shallow geothermal heat exchangers [J]. Energy and Buildings, 2016, 125: 130-141.
- [21] CHURCHILL S W. Friction-factor equation spans all fluid-flow regimes [J]. Chemical Engineering Journal, 1997, 84(24): 91-92.
- [22] HAALAND S E. Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow [J]. Journal of Fluids Engineering, 1983, 105(1): 89-90.
- [23] HAMADA Y, SAITOH H, NAKAMURA M, et al. Field performance of an energy pile system for space heating [J]. Energy and Buildings, 2007, 39(5): 517-524.
- [24] LUO J, ZHAO H F, GUI S Q, et al. Study of thermal migration and induced mechanical effects in double U-tube energy piles [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 91: 1-11.

- [25] GAO J, ZHANG X, LIU J, et al. Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers: A case study [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(17/18): 2295-2304.
- [26] 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.
- [27] AMATYA B L, SOGA K, BOURNE-WEBB P J, et al. Thermo-mechanical behaviour of energy piles [J]. *Géotechnique*, 2012, 62(6): 503-519.
- [28] GAO J, ZHANG X, LIU J, et al. Numerical and experimental assessment of thermal performance of vertical energy piles: An application [J]. *Applied Energy*, 2008, 85(10): 901-910.

(编辑 朱备)