

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210118001

桩顶约束下桥梁大直径能量桩热力响应现场试验*

任连伟¹, 韩志攀¹, 霍继炜², 高宇甲²

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 中建七局第四建筑有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 能量桩是一种绿色新技术, 符合工程建设节能减排与绿色发展理念。为了研究大直径能量桩的热力学特性及结构响应, 依托河南省三门峡灵宝市国道310底董桥台2×2群桩基础, 在大直径灌注桩内埋设换热管形成能量桩。开展了无荷载夏季工况能量桩热响应现场试验, 实测能量桩运行期间出、入水口温度、应力、回温后残余温度、温度变化量-热致应力/轴力关系、桩顶位移等变化规律。试验结果表明: 三组不同流速试验下, 流速增大, 桩身温度、应力有小幅增大; 停止试验后回温5 d后残余温度仍有16%~28%, 7 d后回温残余温度约11%~17%; 桩身最大应力约为3.5 MPa; 能量桩桩顶累积变形-0.98 mm(约仅为桩径的0.81‰); 桩顶在单桩无荷载、无荷载承台群桩约束、单桩逐级加载、恒载承台群桩约束的不同条件下, K_h 值分别为28.6%、37.8%、43.2%和71.4%; 试验流速为0.6、0.8 m/s, 每平方米桩-土接触面积换热量 q_A 分别是0.4 m/s流速下 q_A 的53%和128%。

关键词: 桥梁群桩; 能量桩; 现场试验; 桩顶约束; 热响应特性

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)05-0937-08

Field Test on Thermal Response of Large Diameter Energy Pile under the Pile Top Constraint

REN Lianwei¹, HAN Zhipan¹, HUO Jiwei², GAO Yujia²

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. The Fourth Construction Co., Ltd. of CSCEC 7th Division, Xi'an 710000, China)

Abstract: Energy pile is a new green technology, in line with the concept of energy conservation and emission reduction in engineering construction and green development. In order to study the thermodynamic properties and structural response of energy piles of large diameters, a heat exchange pipe was buried in the large-diameter cast-in pile under the bearing platform to form an energy pile at the site of national G310, Lingbao city, Henan Province, 2×2 pile group foundation of Didong abutment. Field tests on the thermal response of energy piles without loading in summer were carried out to measure outlet and inlet temperature, stress, residual temperature after return temperature, temperature change-thermally induced stress/axial force relationship and pile top displacement during operation of energy piles. The test results show that the temperature and stress of the pile increased slightly with the increase of flow rate under three different flow rate tests. After stopping the test, the residual temperature was still 16%-28% after 5 days of reheating, while the residual temperature after 7 days was about 11%-17%. The maximum stress along the pile was about 3.5 MPa. The cumulative deformation of the pile tip of the energy pile was -0.98mm (about 0.81‰ of the pile diameter). The values of K_h of pile top were 28.6%, 37.8%, 43.2% and 71.4% respectively under different conditions of sin-

* 收稿日期:2021-01-18;修回日期:2021-02-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51922037,51778212)资助

作者简介:任连伟(1980—),男,副教授,博士。主要从事地基基础方面的教学和研究工作。E-mail: renhpu@163.com

gle pile no-load, no-load cap pile group constraint, single pile step-by-step loading, and constant load cap pile group constraint, showing an increasing trend. The q_A at the flow rate of 0.6 m/s and 0.8 m/s was 53% and 128% of q_A at the flow rate of 0.4 m/s.

Keywords: bridge pile groups; energy pile; field test; pile top constraint; thermal response characteristic

引言

能源是现代社会发展不可或缺的物质基础,而绿色能源更是人类社会备受关注的课题。浅层地温能是一种清洁、可持续利用能源,造价低、使用方便、且分布范围广,应用前景可观。能量桩(又称为能源桩、热交换桩等),将传统地源热泵技术和建筑桩基础结合在一起,既能满足桩基力学性能的要求,又能通过桩体埋管内换热液的循环实现上部建筑与浅层地能的热交换^[1-2]。

P.J.Bourne-Webb等^[3-4]实测了加热、制冷两种换热模式下单根能量桩的应力变形关系,初步分析了混凝土灌注桩受力机理及承载力计算方法。路宏伟等^[5]开展了单根摩擦型能量桩现场测试,试验分析了在多级上部结构荷载及不同换热工况下,单根摩擦型能量桩的热力耦合特性。然而,这些研究主要均是针对无承台单根能量桩的,对于含承台能量桩基础的相关研究仍相对较少。L.Laloui等^[6-7]分析了夏季工况下混凝土灌注桩桩身应力、应变变化情况,给出了附加温度应力计算方法,并且研究了桩-筏基础中单根能量桩运行引起的热力耦合特性。K.D.Murphy等^[8-9]研究了夏季工况下,桩端约束对混凝土灌注桩桩身附加温度应力及桩顶位移的影响。桂树强等^[10]研究了夏冬季工况,结构荷载以及桩侧和桩端约束条件下,混凝土灌注桩桩身的应力-应变特性和桩周侧摩阻力变化的一般规律。S.You等^[11-12]研究了CFG能量桩在温度荷载、结构荷载以及热力耦合作用下的结构响应,分析了不同加热功率对土壤综合导热系数的影响。任连伟等^[13]开展冬季工况多次温度循环下微型钢管桩群桩的热力响应现场试验,分析了不同间歇时长情况下桩身温度与应力等变化规律,探讨不同运行模式下的桩基换热性能系数。方金城等^[14]开展群桩基础下单根能量桩热响应特性现场试验,分析了在单根能量桩加热运行工况下,能量桩桩体本身的温度变化及约束应力分布规律;同时分析单桩能量桩运行对地层温度场、承台及其邻近桩体的影响规律。黄旭

等^[15]对PCC能量桩桩身负摩阻力特性进行研究。徐建等^[16]、郝耀虎等^[17]对不同条件下能量桩热力特性进行数值模拟研究。相关研究成果对能量桩承载特性及热响应研究有着重要作用。

本文依托桥梁承台2×2群桩基础,采用一种分段拼接式的新U型布管方式,对大直径灌注桩热力响应特性进行现场试验以及不同桩顶约束条件下桩身响应研究。实测回温后残余温度、温度变化量-热致应力/轴力关系、对比不同桩顶条件下的 K_s 值、桩顶位移、夏季单位面积换热量分析等。

1 现场试验概况

1.1 工程背景及试验方案

试验依托国道310南移工程三门峡西至豫陕界段底董村中桥工程桩基础;桩基为大直径泥浆护壁灌注桩,2×2群桩基础,与上部承台一体浇筑;桩长25 m、桩径1.2 m,采用C25混凝土。现场土层自上而下依次为黄土状粉土(0~1.8 m)、砾砂(1.8~10.1 m)、粉土(10.1~14.8 m)、细砂(中密14.8~20 m)和细砂(夹卵石层20~29.3 m)。掘出卵石直径较大,地下水位线为地下6.0 m。现场土层分布及物理力学参数如图1所示。

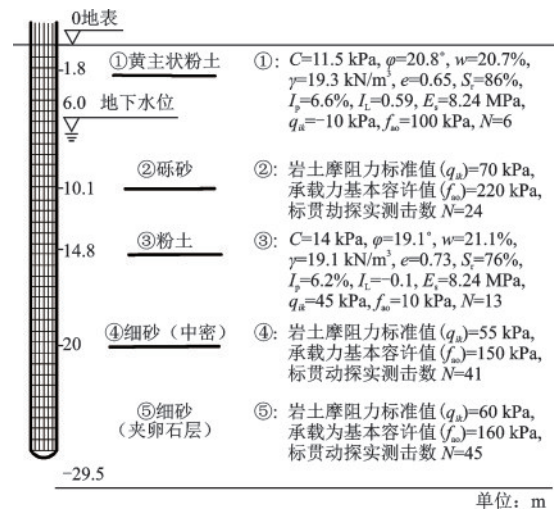


图1 现场土层分布及物理参数

Fig.1 Field soil distribution and main physical and mechanical parameters

1.2 换热管及传感器布置

换热管采用PE管进行布管,根据现场钢筋笼分段下放焊接进行改进,采用串联U型布置,如图2(a)所示,在不影响施工的情况下使布管面积达到最大。振弦式应变-温度计绑扎在钢筋笼上,如图2(b)所示;顶层间隔3.5 m布置振弦式应变-温度计,其余每隔4m对称布置一组振弦式应变-温度计,共6个测点,每个测点深度分别为3.5、7.5、11.5、15.5、19.5、23.5 m。从固定传感器位置将感应线向上布置,试验为笼内绑扎感应线,采用挂钩牵引式将总线从底笼内向上牵引至上层笼,同时进行绑扎。未采用笼外布线是因为在钢筋垂直下放时,钢筋笼与孔壁摩擦易使感应线破坏,造成不可逆损坏。



(a) U行管布置 (b) 传感器及感应线布置

图2 现场施工

Fig.2 Photographs of site construction

夏季试验期间,灵宝市地温较稳定,桩基承台上部桥墩等结构还未施工,无荷载。其结构示意图如图3所示。承台连接4根桩,其中3根为能量桩,分别为EP1、EP2、EP3。EP2内部布置传感器,为本次的试验桩,桩顶受到承台约束。

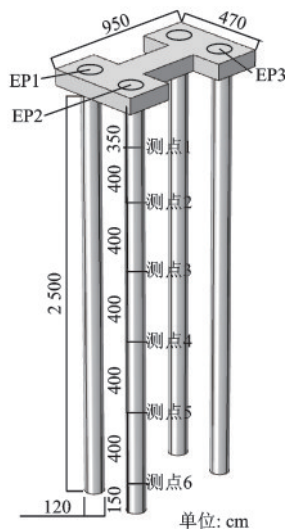


图3 2×2群桩示意

Fig.3 Diagram of 2×2 pile group

夏季试验期间现场土层温度的季节性变化情况如图4所示;由图4可见,7.5 m以下温度基本稳定在16~19℃,7.5 m以上土层温度随季节变化较为明显;同时当天阴晴状况也会影响近地表土层温度。其中日期为7月25日与9月10日的天气为阴天,近地表土层温度相较于8月17日的晴天有所降低。

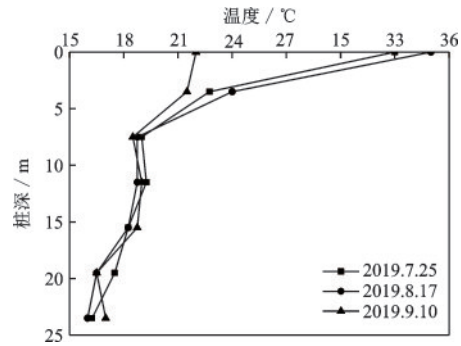


图4 夏季试验期间土层温度分布

Fig.4 Temperature distribution of soil layers during summer experiments

1.3 试验方法及测试过程

试验为夏季工况(TPT),根据不同流速设置三个试验组,每组试验持续7 d,期间每隔20 min记录传感器数据;停止加热回温5 d,期间对回温进行监测,试验方法见表1。

表1 试验方法

Table 1 Test methods

荷载情况	循环模式	入水温 度/°C	流速/ (m·s ⁻¹)	持续时 间/d	试验
		40	0.4	7	试验1
无荷载	夏季循环	40	0.6	7	试验2
		40	0.8	7	试验3

2 能量桩热力响应特性分析

2.1 桩身温度响应

图5为不同工况下出、入水温及温差示意,试验分为三组不同流速试验,流速分别为0.4 m/s(268 L/h)、0.6 m/s(402 L/h)和0.8 m/s(536 L/h), T_{in} 保持在40℃左右; T_{out} 范围在20~28℃,并且随着时间增加, T_{out} 逐渐增大,出、入水口温差 ΔT 逐渐降低,

最后趋于稳定。稳定时流速 0.4 m/s, 出、入水口温差 ΔT 稳定在 15 °C; 流速 0.6 m/s 的 ΔT 稳定在 13.5 °C; 流速 0.8 m/s 的 ΔT 稳定在 12 °C。结果表明, 试验流速越大, 桩体对单位体积的导热液的降温效果越低。这里引入两个量: 单位体积温降 ($\Delta T/V$)、单位时间

温降 ($\Delta T/h$)。假定在 ΔT 趋于稳定后, 液体流出 1 m 的长度所产生的体积为单位 1, 1 s 的时间为单位 1。那么流速为 0.4、0.6、0.8 m/s 单位体积温降分别为 15、13.5、12 °C, 呈逐渐减小的趋势; 单位时间温降分别为 6、7.5、9.6 °C, 呈逐渐增大的趋势。

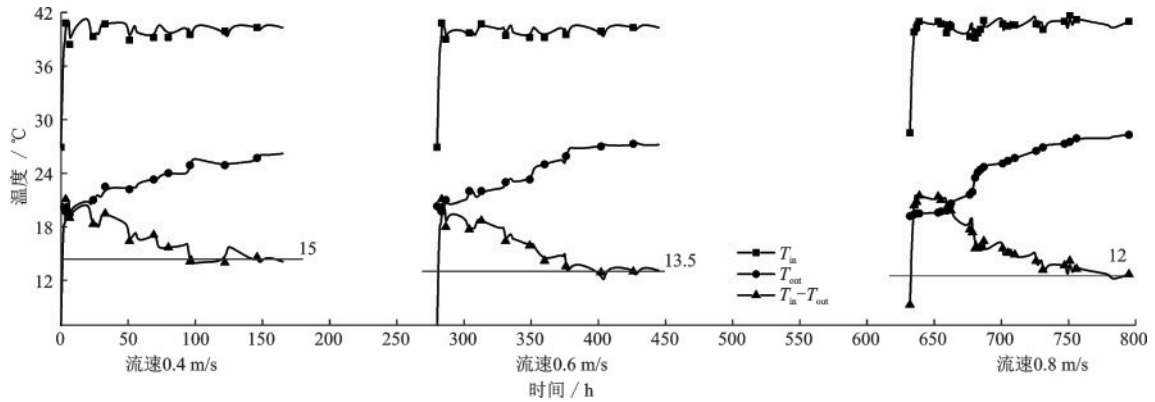


图5 夏季试验出入水温及温差

Fig.5 Outlet and inlet water temperature and temperature difference in summer

图6为桩身温度分布曲线, 第三组试验初期加热管出现故障, 试验被迫中止, 设备维修时间归类到停止加热的回温时间。图中可知, 在桩顶无荷载的条件下(无肋板、路基填土), 桩身 3.5 m 以上受外界天气影响较大, 初始温度达到 25 °C, 较深处桩身初始温度在 15~20 °C。加热阶段桩身受热, 温度增

加, 其中 7.5 m 处温度增幅最大。停止加热后, 经过 5 d 的回温, 仍有 1~3 °C 残余温度未恢复(约 16%~28%); 相较于 5 d, 7 d 回温残余温度在 1 °C 左右(约 11%~17%)。连续工况下, 由于前一组试验后残余温度未恢复完全, 会导致桩身温度略有减小; 流速增加, 桩身温度有小幅增加。

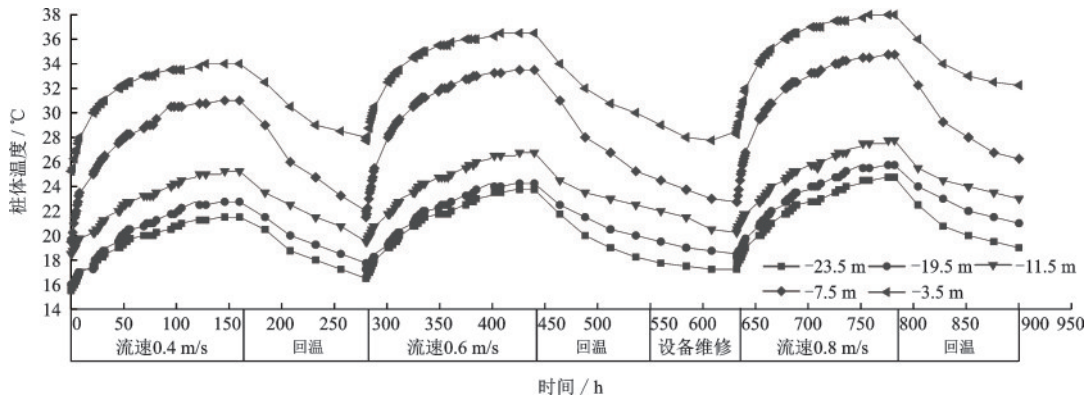


图6 循环试验期间桩身温度变化曲线

Fig.6 Change curves of pile temperature during cycle tests

由于现场条件试验台无法近距离进行能量桩试验, 将换热管通过地埋以及外加保温套的方式对其进行远距离保温, 桩距离试验台约 10 m 的距离, 期间虽然保温措施较好, 但仍有少量温度散失。

2.2 热致桩身应力变化规律

桩身自由膨胀或收缩, 由式(1)计算可得桩身温度变化引起的轴向自由应变 ϵ_{free} ; 由式(2)计算可

得试验期间的观测应变。

$$\epsilon_{free} = \alpha_c \Delta T \quad (1)$$

$$\epsilon_{obs} = \epsilon_i - \epsilon_0 \quad (2)$$

式中, α_c 为钢筋混凝土线膨胀系数, 其值为 $10 \mu\epsilon/^\circ\text{C}^{[18]}$; ΔT 为桩身温度变化值; ϵ_{obs} 为观测应变。

实际工程中, 由于桩周土体以及上部荷载约束, 引起轴向附加温度应力 σ_T , 由式(1)、(2)计算可得 σ_T 。

$$\sigma_T = E(\epsilon_{obs} - \epsilon_{free}) \quad (3)$$

式中, E 为桩体杨氏模量, C25 桩体杨氏模量为 28 GPa^[18]; σ_T 为试验过程中引起的轴向附加温度应力, 约定压应力为正、拉应力为负。

图 7 为不同流速下热致应力随桩身的分布。由图 7 可知, 在桩体温度升高时, 桩身各处随之产生了不同量热致应力。不同工况试验 7 d 后桩身热致应力曲线中 -7.5 m 处应力最大, 这是因为底董桥地下 6 m 为地下水位, 受天气影响较小, 温度较低, 在夏季工况试验下, 桩入水口温差较大, 产生的热应变较大; 流速增大, 桩身的热致应力在稳定后有小幅增长。

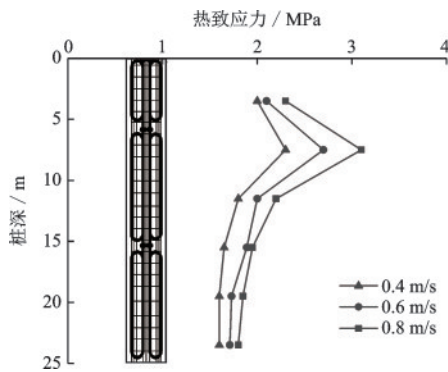


图 7 不同工况下桩身热致应力分布

Fig.7 Thermal stress distribution of the pile body under different working conditions

在流速 0.8 m/s 工况下桩身应力随时间变化曲线趋势如图 8 所示, 由图可见, 应力增量初期较为迅速, 48 h 之后应力增长趋势减缓。其中 -7.5 m 处应力变化最大, -23.5 m 处应力变化最小。对比图 6 与图 8, -7.5 m 处温度增量最大, 产生的热致应力最大, -3.5 m 处温度增量其次, 产生的热致应力也仅次于 -7.5 m; -11.5 m 与 -19.5 m 应力变化接近, 相应的温度增量接近。因此可以得出, 热致应力与温度变化值 ΔT 之间存在一定的线性关系关系。

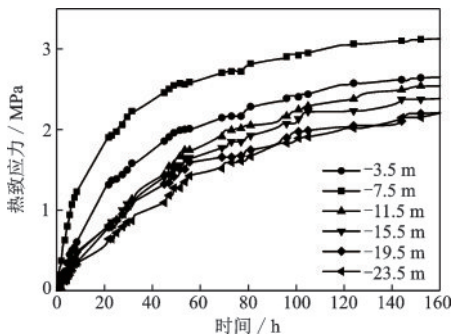


图 8 流速 0.8 m/s 桩身应力随时间变化曲线

Fig.8 Stress curve of the pile with time at a flow rate of 0.8 m/s

图 9 为流速 0.8 m/s 工况下桩身各处热致应力与温度变化量 ΔT 的关系图, 通过直线拟合确定处桩身各处温度变化量 ΔT 与热致应力的关系曲线; 式中系数表示单位温度升幅产生的热致应力的能力, 系数越大, 该能力越强; 其中桩深 7.5 m 处虽然应力最大, 由于温度增幅最大, 因此相应的 $\sigma-\Delta T$ 变化曲线系数减小; 桩深 11.5 m 处应力增幅较大, 但温度增幅较缓, 因此该处 $\sigma-\Delta T$ 变化曲线系数最大。

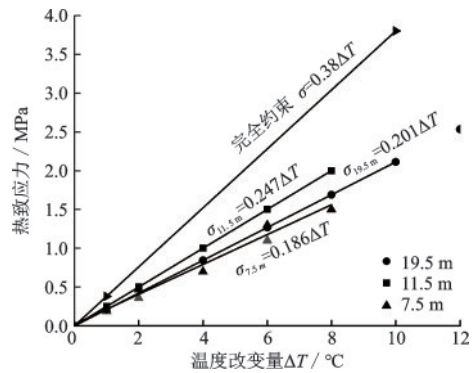


图 9 热致应力与温度改变量关系

Fig.9 Thermo-induced stress and temperature variables

3 桩顶不同约束条件下对比分析

3.1 单桩逐级加载、恒载承台约束下桩身应变响应分析

能量桩是桩基础与地源热泵结合起来的产物, 其首要仍是受到荷载作用, 并在此基础上进行能量桩运行, 考虑热力响应对桩基础结构的影响, 所以研究能量桩热力学特性应该充分考虑桩顶荷载及约束。这里分别对单桩、单桩+荷载、承台约束型群桩、承台约束型群桩+荷载进行对比分析, 根据其他学者已有试验, 流速较接近 0.6 m/s, 本实验选取 0.6 m/s 流速做参照, 对不同桩顶情况下的夏季试验进行对比研究。

不同桩顶情况下, 桩身应变规律较不同。单桩无荷载试验: 经过夏季工况试验后, 桩体膨胀较大, 虽然桩体在温度作用下导致钢筋混凝土的膨胀应变 ϵ_{free} , 但在桩顶位移的释放下, 只有部分的应变不断累计, 该部分即为桩身的热致应力, 热致应力直至停止加热后的回温阶段才能逐渐降低至 0; 单桩加载试验: 在进行相同的夏季工况时, 上部的逐级加载/恒载阻碍了钢筋混凝土的膨胀应变 ϵ_{free} , 桩顶位移减少, 从而桩身累计应变增大, 因此热致应力增大, 但理论上计算的膨胀应变 ϵ_{free} 不变(只与桩身

温度变化有关);承台群桩无荷载试验:虽然夏季试验桩顶向上鼓起,承台无较大阻碍作用,但群桩承台会导致某一桩向上的位移传递给其余桩体,导致约束作用,进而产生类似加载的情况,导致累计应变增大,热致应力增大;群桩逐级加载/恒载试验:该试验为约束、荷载叠加原理,有着更为明显的累计应变与应力。

为使不同桩顶情况的试验更为清晰的反应,在《桩基地热能利用技术规程》^[19]基础上规定以下公式:

$$K_h = \frac{\epsilon_{free} - \epsilon_{obs}}{\epsilon_{free}} \quad (4)$$

式中, K_h 表示实际应变剩余量,表示在荷载/约束作用下,实际应变剩余占总膨胀应变的百分比; ϵ_{obs} 为观测应变; ϵ_{free} 为钢筋混凝土受温度影响的应变,无上部荷载/约束时为实际值,有上部荷载/约束时为理论值; $\epsilon_{free} - \epsilon_{obs}$ 为实际应变,用于计算热致应力。

图 10 为不同桩顶情况下应变曲线图,反应了不同桩顶情况下的夏季工况能量桩桩身应变分布曲

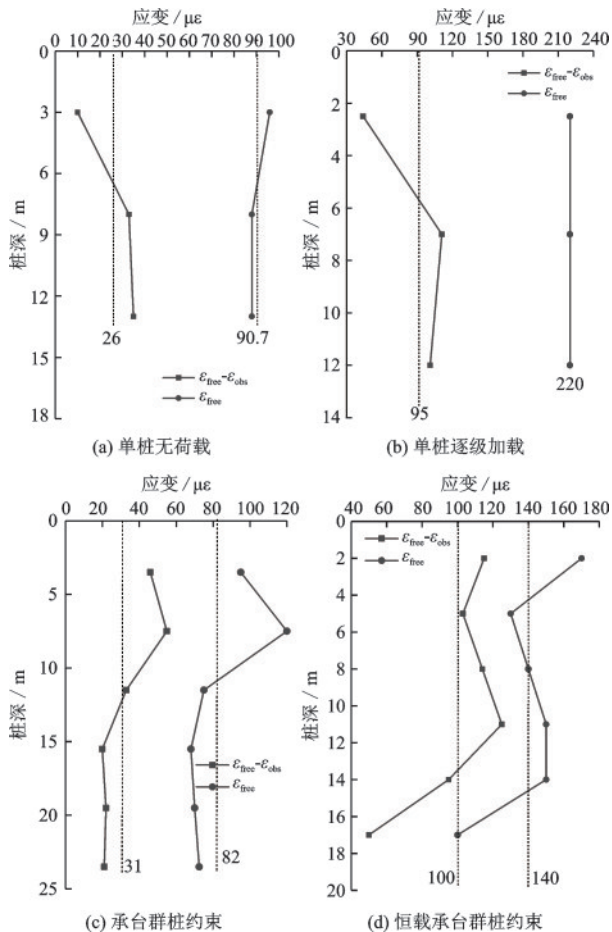


图 10 不同情况下能量桩应变、应力变化曲线
Fig.10 Variation curves of strain and stress under different conditions

线,其中虚线为应变平均值,图 10(a)为程晓辉等^[11-12]试验的无荷载 CFG 桩,经计算 K_h 值为 28.6%;图 10(b)为桂树强等^[10]试验的逐级加载灌注桩,经计算 K_h 值为 43.2%;图 10(c)为本文承台 2×2 无荷载群桩,经计算 K_h 值为 37.8%;图 10(d)为方金城等^[14]试验的低承台 2×2 恒载群桩,经计算 K_h 值为 71.4%。对比不同试验下的 K_h 值可知:(1)在单桩无荷载、无荷载承台群桩约束、单桩逐级加载、恒载承台群桩约束的不同条件下, K_h 值分别为 28.6%、37.8%、43.2%、71.4%,呈递增的趋势,表明桩顶荷载作用下增大了桩身实际应变,同时实际应变与热致应力为一次线性关系,从而增大桩身热致应力;(2)承台约束与荷载同时作用时,桩身应变、应力累积量更大;相较于逐级加载 (37.8%~28.6%),恒载约束下更为明显 (71.4%~43.2%)。

3.2 应力分析

图 11 为夏季工况下桩身最大热致应力与温差关系曲线,其中横坐标为温度改变量,纵坐标为热致应力 (MPa)。试验分别对应不同的桩顶条件,对温度变化量与热致应力进行一次拟合。通过对不同桩型的分析可知,程晓辉等^[11-12]在北京测试的 CFG 桩桩身附加温度应力对温度的响应系数相对桂树强信阳桩^[10]较小,原因是信阳桩上部有荷载,受热膨胀效应有荷载抑制,应力较大,从而系数较大;方金城试验^[14]相较于本文较大,原因是方金城试验桩上部有荷载作用,膨胀效应受到抑制,导致系数偏大。

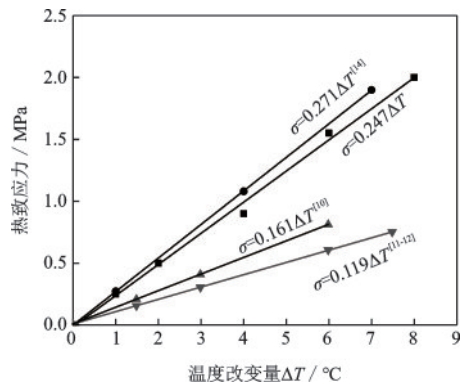


图 11 夏季工况下桩身最大热致应力与温差关系曲线
Fig.11 Relationships between maximum thermal stress and temperature difference of the pile body under the working condition in summer

3.3 桩顶位移

能量桩在运行过程中,由于桩体温度变化引起

桩身热胀冷缩,引起桩顶位移变化。地层在 20 m 以下细砂夹卵石层,有较大卵石出现,打桩至 26 m 便较难进行,不考虑桩端产生位移;因此,桩体受冷收缩,仅产生桩顶的下降,可根据桩身实测应变大致估算桩顶位移,如式(5):

$$s = -\sum(\epsilon_i \Delta L_i) \quad (5)$$

式中, s 为桩顶位移,桩顶沉降为正、隆起为负;将桩体沿长度划分为数段等应变桩段, ΔL_i 为各桩段的长度; ϵ_i 为各桩段的实测应变。

图 12 为能量桩试验期间桩顶位移随时间变化曲线,试验初期桩顶位移较大,这是因为试验初期桩体与入水口温度的温差最为明显,桩身温度、热致应力、桩顶位移增幅较大;经过 7 d 运行后,桩顶位移增幅逐渐稳定,最终达到 -0.98 mm(桩径的 0.81%)桩顶位移。相较于低承台夏季试验^[14]桩顶位移的 -0.6 mm(桩径的 0.6%)较大,原因是因为上部荷载约束作用,导致热膨胀受阻。

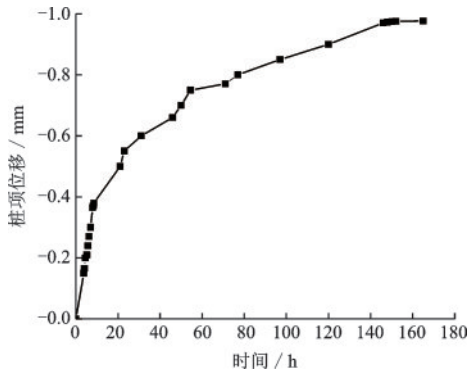


图 12 桩顶位移随时间变化曲线

Fig.12 Pile top displacement curves with time

4 换热性能分析

《桩基地热能利用技术规程》^[19]指出:直径 0.3~0.5 m 桩径的能量桩可获得 40~60 W/m 的热量;桩径大于 0.6 m 的能量桩,每平米与地基土接触面积约可获得 35 W 的热量,通过入口、出口水温 t_{in} 和 t_{out} ,导热液的比热容 c_w ,以及各个工况下流速换算的质量流速 m_w ,得出换热功率 Q ^[19]。根据桩径大小将换热量用 q_L 、 q_A 区分,桩径在 0.3~0.5 m 的能量桩每米单位长度换热量用 q_L 表示,桩径大于 0.6 m 的能量桩每平米桩-土接触面积换热量用 q_A 表示。

能量桩换热量 q_L 、 q_A 计算公式如下:

$$Q = c_w m_w (t_{out} - t_{in}) \quad (6)$$

$$q_L = Q/L \quad (7)$$

$$q_A = Q/A \quad (8)$$

式中, Q 为换热功率(W); q_L 为单位长度换热量(W/m); q_A 为每平米桩-土接触面积换热量(W/m²); c_w 为换热液的热容(J/(kg·K)); m_w 为换热液的质量流速(kg/s); t_{out} 为出口处循环液温度; t_{in} 为入口处循环液温度; L 为热交换体长度; A 为桩-土有效接触面积。

结合实际钢筋笼上换热管布置形式,本文布管区实际长度约为 18 m,有效地基土接触面积为 67.8 m²。试验导热管内直径 15.4 mm,三种流速 0.4 m/s(268 L/h)、0.6 m/s(402 L/h)和 0.8 m/s(536 L/h),换算的质量流速 m_w 分别为:0.074 5、0.111 8、0.149 0 kg/s。

不同工况下每平米与地基土接触面积换热量如图 13 所示。由图 13 可知,不同流速下的 q_A 变化明显,当流速从 0.4 m/s 变化为 0.6、0.8 m/s 时,从 $q_{A,0.4m/s} = 95 - 10.4x + 0.7x^2$ 变化为 $q_{A,0.8m/s} = 217 - 25.9x + 1.65x^2$, q_A 分别增大了约 53%、128%,也就是说在消耗电量相同的情况下(非固定温度的试验状态),流速越大,带来的热量就越大。但是流速不能无限增长,门阀全开的状态为最优(水泵此区间耗电基本相同);能量桩投入使用时,该状态收益最高,但是长期不间断使用能量桩会导致地热难以恢复,采用间断式运行为宜。

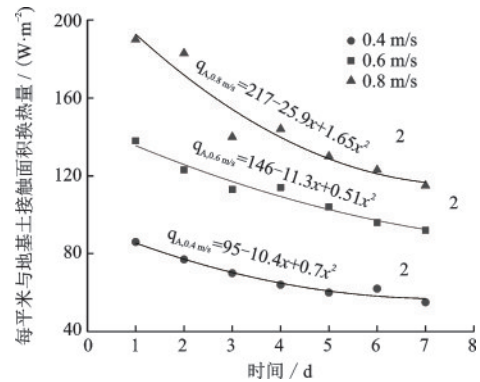


图 13 不同工况下能量桩每平米换热量

Fig.13 Heat transfer per square meter of the energy pile under different working conditions

5 结论

(1)能量桩停止加热后,经过 5 d 的回温,仍有 1~3 °C 残余温度未恢复(约 16%~28%);相较于 5、7 d 回温残余温度在 1 °C 左右(约 11%~17%)。连续工况下,由于前一组试验后残余温度未恢复完

全,会导致桩身温度略有减小;流速增加,桩身温度有小幅增加。

(2)能量桩运行期间桩深7.5 m处虽然应力最大,由于温度增幅最大,计算得出相应的 $\sigma\text{-}\Delta T$ 变化曲线系数最小,关系曲线为: $\sigma_{7.5\text{m}}=0.211\Delta T$;桩深11.5 m处应力增幅较大,但温度增幅较缓,因此该处 $\sigma\text{-}\Delta T$ 变化曲线系数最大,关系曲线为: $\sigma_{11.5\text{m}}=0.289\Delta T$ 。

(3)试验初期桩顶位移较大,这是因为试验初期桩体与入水口温度的温差最为明显,桩身温度、热致应力、桩顶位移增幅较大;经过7 d运行后,桩顶位移增幅逐渐稳定,最终达到 -0.98 mm (桩径的 0.81%)桩顶位移。

(4)对比不同试验下的 K_b 值可知:在单桩无荷载、无荷载承台群桩约束、单桩逐级加载、恒载承台群桩约束的不同条件下, K_b 值分别为 28.6% 、 37.8% 、 43.2% 、 71.4% ,呈递增的趋势,表明桩顶荷载作用下增大了桩身实际应变,实际应变与热致应力为一次线性关系,从而增大桩身热致应力;承台约束与荷载同时作用时,桩身应变、应力累积量更大;相较于逐级加载,恒载约束下更为明显。

(5)当流速从 0.4 m/s 变化为 0.6 、 0.8 m/s 时,从 $q_{A,0.4\text{m/s}}=95-10.4x+0.7x^2$ 变化为 $q_{A,0.8\text{m/s}}=217-25.9x+1.65x^2$, q_A 分别增大了约 53% 、 128% 。

参考文献:

- [1] Brandl H. Energy foundations and other thermo-active ground structures [J]. Géotechnique, 2006, 56 (2): 81-122.
- [2] 刘汉龙,孔纲强,吴宏伟. 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.
Liu H L, Kong G Q, Ng C W W. Applications of energy piles and development of PCC energy pile technical [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 176-181. (in Chinese)
- [3] Blurne-webb P J, Amatya B, Soga K, et al. Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles [J]. Géotechnique, 2009, 59(3): 237-248.
- [4] Bourne-webb P J, Amatya B, Soga K. A framework for understanding energy pile behaviour [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, 2013, 166(2): 170-177.
- [5] 路宏伟,蒋刚,王昊,等. 摩擦型能源桩荷载-温度现场

联合测试与承载性状分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39 (2): 334-342.

Lu H W, Jiang G, Wang H, et al. In-situ tests and thermo-mechanical bearing characteristics of friction geothermal energy piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 334-342. (in Chinese)

- [6] Laloui L, Nuth M, Vulliet L. Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile [J]. International, 2006, 30(8): 763-781.
- [7] Laloui L, Donna A D. Understanding the thermal mechanical behaviour of energy piles [J]. Proceeding of the ICE - Civil Engineering, 2011, 164(6): 503-519.
- [8] Murphy K D, McCartney J S, Henry K S. Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations [J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(2): 179-195.
- [9] Murphy K D, McCartney J S. Seasonal response of energy foundations during building operation [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2015, 33: 343-356.
- [10] 桂树强,程晓辉. 能源桩换热过程中结构响应原位试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1087-1094.
Gui S Q, Cheng X H. In-situ tests on structural responses of energy piles during heat exchanging process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (6): 1087-1094. (in Chinese)
- [11] You S, Cheng X H, Guo H, et al. In-situ experimental study of heat exchange capacity of CFG pile geothermal exchangers [J]. Energy & Buildings, 2014, 79(4): 23-31.
- [12] You S, Cheng X H, Guo H, et al. Experimental study on structural response of CFG energy piles [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 96: 640-651.
- [13] 任连伟,徐健,孔纲强,等. 冬季工况多次温度循环下微型钢管桩群桩热力响应特性现场试验 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(11): 2053-2061.
Ren L W, Xu J, Kong G Q, et al. Field tests on thermal response characteristics of micro steel pile group under multiple temperature cycles in winter conditions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41 (11): 2053-2061. (in Chinese)
- [14] 方金城,孔纲强,孟永东,等. 低承台 2×2 能量桩基础单桩运行热力耦合特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 317-324.
Fang J C, Kong G Q, Meng Y D, et al. Thermo-mechanical coupling characteristics of single energy pile operation in 2×2 pile-cap foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 317-324. (in Chinese)

(本文责编:苏泽云)

(下转第960页)