

引用本文:陈 玉,孔纲强,孟永东,等.埋深条件下含承台能量桩基础换热效率及热力响应现场试验[J].建筑科学与工程学报,2021,38(5):99-106.

CHEN Yu, KONG Gang-qiang, MENG Yong-dong, et al. Field Test on Heat Transfer Efficiency and Thermal Mechanical Response of Energy Pile Foundation with Cap Under Embedded Depth[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(5): 99-106.

DOI:10.19815/j.jace.2021.03066

埋深条件下含承台能量桩基础换热效率及热力响应现场试验

陈 玉¹,孔纲强^{1,2},孟永东¹,王乐华¹,刘红程¹

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室,湖北 宜昌 443002;

2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:依托埋深条件下低承台 2×2 群桩基础,在钻孔灌注桩钢筋笼上绑扎换热管形成能量桩,布置振弦式应变计/温度计以测试桩身温度及热致应变。开展恒定水温($35\text{ }^{\circ}\text{C}$)输入情况下,单根能量桩运行对邻近桩基、承台的热力响应特性试验;实测进/出口水温随时间变化、桩身热致应变等变化规律,分析埋深条件对单根能量桩的换热效率及其对承台和邻近桩体热力响应特性的影响规律,并与无埋深条件下的换热效率、热力响应特性展开对比分析。结果表明:试验条件下,3 m 埋深条件下的换热效率为 2.65 kW ,较无埋深条件下提升了约 68% ,体现出上覆回填土存在一定的持热能力;有/无埋深条件下,桩身热致应力最大值分别出现在桩身中部及桩顶,分别为 1.66 MPa 和 2.14 MPa ;随加热过程的进行,桩端阻力呈现先增大后逐渐下降至稳定值的变化趋势,在加热 24 h 后达到最大值约 20 kPa ,与进/出口温度差变化趋势一致;有/无埋深条件下承台在加热工况均出现了细微的差异变形,在设计承台能量桩结构时应给予一定的考虑;有/无埋深条件下承台最大热致应力值分别为 0.65 MPa 和 2.34 MPa ,对应的最大温度升幅分别为 $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $11.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关键词:能量桩;基础埋深;换热效率;热力响应;现场试验

中图分类号:TU443

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2021)05-0099-08

Field Test on Heat Transfer Efficiency and Thermal Mechanical Response of Energy Pile Foundation with Cap Under Embedded Depth

CHEN Yu¹, KONG Gang-qiang^{1,2}, MENG Yong-dong¹, WANG Le-hua¹, LIU Hong-cheng¹

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the low-cap 2×2 pile foundation under embedded depth condition, heat exchange tubes were tied on the bored pile reinforcement cage to form energy piles, and vibrating wire strain gauges/thermometers were arranged to test the temperature and thermal strain of the pile body. The thermal mechanical response characteristic test of a single energy pile operation to

收稿日期:2021-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51778212)

作者简介:陈 玉(1995-),男,湖北汉川人,工学博士研究生,E-mail:ctgu_chenyu@163.com。

通信作者:孔纲强(1982-),男,浙江磐安人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:gqkong1@163.com。

the adjacent pile foundation and cap under the constant input water temperature ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$) was carried out; the inlet/outlet water temperature changing with time and the thermal strain of the pile body were measured. The heat transfer efficiency of a single energy pile and its thermal mechanical response characteristics of the cap and adjacent piles were compared and analyzed under the condition of with/without embedded depth. The results show that the heat transfer efficiency under the 3 m depth is 2.65 kW, which is about 68% higher than that of no embedded depth in this field test condition, reflecting the existence of a certain heat retention capacity of the overlying backfill. Under the condition of with/without embedded depth, the maximum thermal stress of the pile body appears in the middle of the pile body and the pile top respectively, which are 1.66 MPa and 2.14 MPa. During the heating process, the pile tip resistance increases first and then gradually decreases to a stable value. After heating for 24 h, it reaches a maximum value of about 20 kPa, which is consistent with the change trend of the inlet/outlet temperature difference. Under the condition of with/without embedded depth, the cap shows slightly different deformations in the heating conditions, and certain consideration should be given to the design of the energy pile structure with the cap. The maximum thermally induced stress values of the cap with/without embedded depth are 0.65 MPa and 2.34 MPa respectively, and the corresponding maximum temperature rise is $3.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $11.0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Key words: energy pile; embedded depth of foundation; heat transfer efficiency; thermal mechanical response; field test

0 引言

浅层地温能是一种丰富、清洁且可靠的可再生能源,能量桩将传统地源热泵所需的换热管直接设置在桩基础中,可有效地获取并利用浅层地温能源,达到为建筑物供暖或制冷的目的^[1]。与传统的地源热泵技术相比,能量桩技术具有节省费用、传热性能好及节省用地面积等优点^[2-3],并逐渐应用于路面或桥梁的除冰融雪中^[4-5]。能量桩在运行期间不仅要承担上部建筑物的荷载,还要与周围土体交换热量,其热力学性能也会发生相应变化。针对单根能量桩的换热效率及热力响应特性,相关研究人员开展了一系列研究。通过控制间歇冷却或加热作用下能量桩热性能现场测试可知,能量桩可以提供足够的热交换能力,能量桩的运行对上部建筑结构的影响可以忽略^[6-7]。Chen 等^[8]对能量桩在加热及冷却期间的性能进行了现场试验,结果发现在加热 60 h 后,能量桩对周围土壤的温度影响范围为距离桩中心约 0.5 m 区域。考虑温度循环和上部建筑结构荷载的联合作用,桂树强等^[9]、路宏伟等^[10]实测了不同荷载等级下能量桩的桩身温度、应力分布及桩顶位移变化规律,探讨了热致应力及热致位移等影响规律。结合现场实测结果,费康等^[11]建立了热-力耦合作用下能量桩承载力的简化理论计算方法。这些研究

对了解能量桩的换热性能及热致应力特性具有重要的意义。针对含承台能量桩基础, Ren 等^[12]依托微型钢管桩形成的能量桩研究了间歇循环的加热及制冷作用下的热力响应特性,实测结果表明,能量桩换热效率随着循环加热或制冷次数的增加而略有降低。刘汉龙等^[13]、Fang 等^[14-15]、李任融等^[16]对含承台能量桩基础分别开展模拟加热或制冷工况下的热力响应特性试验,实测了承台及能量桩的热力响应特性,结果表明,能量桩运行将对承台、邻近桩产生一定的影响。

综上所述,既有含承台能量桩基础的研究中,承台都是位于地表,尚未考虑承台上部覆盖回填土时的情况,既有埋深条件下含承台能量桩的换热效率及热力响应测试研究相对不足。因此,本文基于 2×2 低承台能量桩基础,开展 3 m 埋深条件和夏季运行模式下能量桩的热力响应特性现场试验,实测能量桩及承台的热力响应特性,并探讨有/无基础埋深对换热效率及热力响应特性的影响规律,以期为低承台能量桩基础的设计与计算提供依据。

1 现场试验概况

1.1 依托工程背景

现场试验依托三峡大学水科学与工程楼桩基工程,位于湖北省宜昌市。水科学与工程楼包括主楼、

副楼及架空层;主楼为地上 15 层、地下 1 层,副楼为地上 5 层、地下 1 层,架空层为地上 3 层(图 1)。建筑桩基为钻孔灌注桩,在钻孔灌注桩钢筋笼内绑扎换热管形成能量桩,低承台-能量桩系统布置于建筑物后方的空白场地内,现为大楼的停车场地。选取一个低承台 2×2 群桩作为研究对象,能量桩桩长 L 为 18 m,桩顶以下 0~4.5 m 范围内桩径为 1.0 m,桩顶以下 4.5~18.0 m 范围内桩径为 0.8 m;正方形布置,桩间距为 3.8 m,承台尺寸为 5.2 m(长)×5.2 m(宽)×1.2 m(高),承台顶部埋深 3.0 m,桩身及承台混凝土等级为 C40。

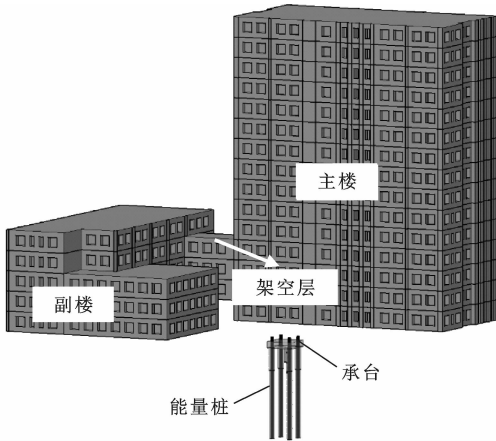


图 1 低承台能量桩基础及建筑物布置

Fig. 1 Arrangement of Energy Pile Foundation with Cap and Building

1.2 换热管及传感器布设

换热管、振弦式应变计/温度计传感器均绑扎在钢筋笼上,周围浇筑混凝土。应变计/温度计采用 JTM-V5000B 型振弦式应变计/温度计。能量桩采用双 U 型埋管形式,换热管为外径 25 mm、壁厚 2 mm 的 PE 管,能量桩换热管及传感器布设实物如图 2 所示。沿桩深方向每间隔 3 m 在 A 桩和 C 桩中对称布置 6 组轴向传感器,其中首组传感器分别距 A 桩桩顶 3 m,距 C 桩桩顶 2 m。在 A 桩底部,对称布置 2 个土压力盒,同时在承台中布置 2 层水平传感器,其底层仪器距承台底部 15 cm,顶层仪器距承台顶部 25 cm,具体布置如图 3 所示。

1.3 现场土性参数

现场土层为回填土,主要为黏土质砂和砂岩层。黏土质砂层中砾石以上颗粒含量(质量分数)为 10%~15%,且砾石含量随深度增加而增加,在约 14.0 m 深度处出现了薄卵石层,在约 17.5 m 深度为砂岩层,适合作为桩基的持力层;桩基嵌入砂岩层约 0.5 m。地下水位为地表以下 4.0 m,桩基础范

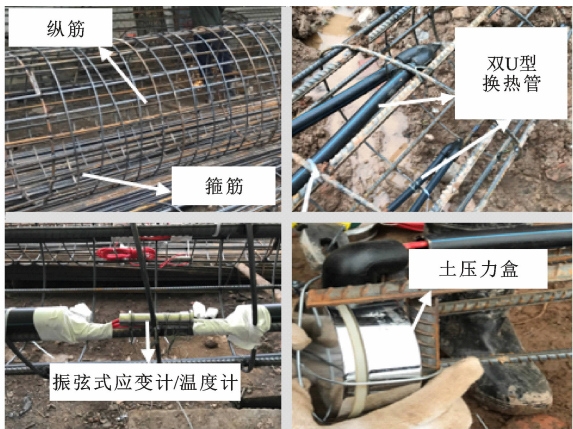


图 2 钢筋笼上换热管及仪器布置

Fig. 2 Arrangement of Heat Exchange Tube and Instrument in Steel Cage

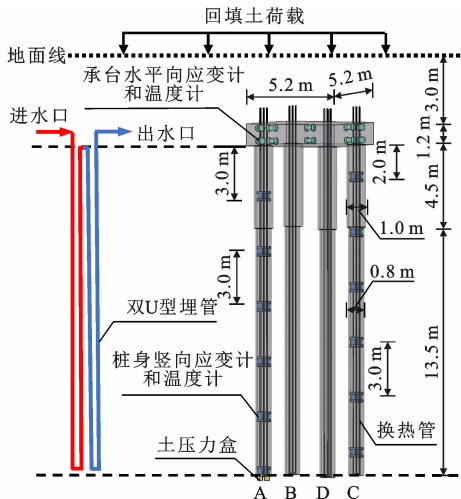


图 3 低承台能量桩基础换热管及传感器布置

Fig. 3 Arrangement of Heat Exchange Tube and Sensors in Energy Pile Foundation with Cap

围内无地下水渗流。具体的土层物理力学参数如表 1 所示。基于 KD2-Pro 热导率仪,测得桩周土体的热物性参数,桩深度范围内的土层平均热导率约为 $1.70 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

对能量桩通入常温水进行循环流动,然后根据

表 1 现场土层基本物理力学性质

Table 1 Physical and Mechanical Properties of In-situ Layered Soils

土层类型	桩深 h/m	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	含水率 $\omega/\%$	压缩系数 α_v/MPa^{-1}	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$
回填土	1	18.17	25.5	0.78	17.10	22.90
	5	19.94	26.1	0.45	25.99	15.79
	9	19.83	26.1	0.40	27.67	12.72
	13	20.04	25.3	0.44	27.23	13.11
	17	20.18	25.9	0.41	26.79	14.24

桩体布设的传感器读取得到的具体数值获得现场含基础土层的初始温度。试验现场四季的土层温度沿桩深方向变化曲线如图 4 所示^[14]。由图 4 可知:受地表大气温度的影响,近地表层土体随季节变化呈现一定的差异;土层温度随着桩深增加而逐渐趋于稳定,在桩深 12.0 m 处的土层温度约为 21.7 °C。

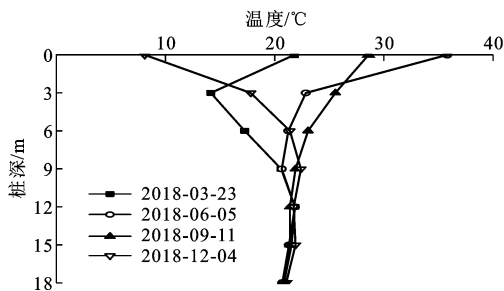


图 4 试验现场土体温度季节性变化

Fig. 4 Seasonal Variation of In-situ Soil Temperature

1.4 试验过程与工况设计

试验模拟能量桩夏季运行模式,借助温控开关控制加热棒的启停,以保证保温水箱中水的温度恒为 35.0 °C;用循环水泵以恒定的循环流速 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 导入 A 桩,将热量释放到桩周岩土体,流经桩体降温后的水再次返回到保温水箱中循环流动。试验时间自 2020 年 10 月 28 日至 11 月 5 日,共 192 h。通过安装在换热管进/出口处的温度计和能量桩内部的振弦式应力计/温度计,测试 3.0 m 埋深条件下低承台能量桩基础的进/出口水温、桩体温度及应变数据,并将试验结果与无埋深条件低承台能量桩基础(上部荷载约 440 kN)^[14]的换热效率及热力响应特性进行对比分析。

2 能量桩热力响应特性分析

2.1 换热效率分析

35.0 °C 持续加热 192 h 后 A 桩的进/出口水温及试验期间大气温度如图 5(a) 所示。由于现场试验期间受昼夜温差变化及整体试验设备的保温措施等因素影响,监测得到的各项温度均存在轻微波动。试验期间环境温度基本维持在 21 °C 左右,存在些许波动,但对试验影响有限。由于受最初的加热影响,进水温度经历了快速的上升;后由于温度控制器对水箱温度的控制,进而控制了加热棒的启停,进水温度最终恒定在试验设计的 35 °C。出水温度保持着和进水温度相似的变化规律,并同时达到动态稳定。进/出口温度差最大可达 5.4 °C,在进/出口温度稳定后,二者间的平均温度差为 4.7 °C。

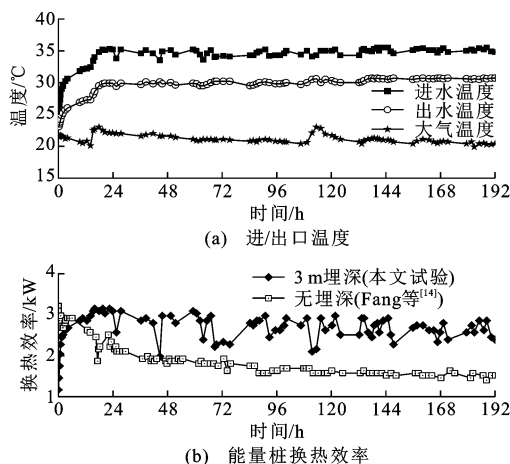


图 5 运行期间进/出口温度、能量桩换热效率

Fig. 5 In/Out Water Temperature of Energy Piles, and Heat Transfer Efficiency

运行期间换热液流速稳定在 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 左右,其换热效率 Q 由式(1)计算可得。

$$Q = \Delta T v \rho C \quad (1)$$

式中: ΔT 为能量桩换热液进/出口温度差; v 为换热液的流速,本文试验为 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为换热液的质量密度,取 $1 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C 为换热液的比热容,取 $4.2 \times 10^3 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 。

有/无埋深条件下低承台 2×2 能量桩基础中单根能量桩的换热效率结果如图 5(b) 所示。由图 5(b) 可知,由于受现场实测环境的干扰,在加热约 96 h 后有/无埋深条件下换热效率均呈稳定的波动变化。本文试验条件下稳定阶段的换热效率值约为 2.65 kW,在相同的试验地层条件下,较 Fang 等^[14]在无埋深条件下的换热效率值 1.57 kW 提升了约 69%。这主要是由于无埋深条件下,上层桩体与大气的热交换更为明显,极易受环境的影响,也更容易出现热的散失;相较之下,上覆 3 m 埋深的土体存在一定的持热能力,可以减少这部分的热损失,进而呈现出比无埋深条件下更大的换热效率。

2.2 桩身热致应力分析

经过 192 h 的加热后, A 桩桩身温度沿桩深的变化规律曲线如图 6 所示。桩身各部位的温度均出现了一定的提高,但各部位的温度升幅却并不均匀,其中桩身中部的温度升幅最大,桩底最小,整体的温度升幅沿桩身先增大后减小。现场试验期间正处于秋季,桩周土壤温度沿深度呈现下降的趋势,因此相较于桩顶,中部更易达到较大的温度升幅。能量桩在靠近桩端有 0.5 m 的桩身处于砂岩层,桩端的热量消散速率较桩身其他部位大,因此桩底产生了最

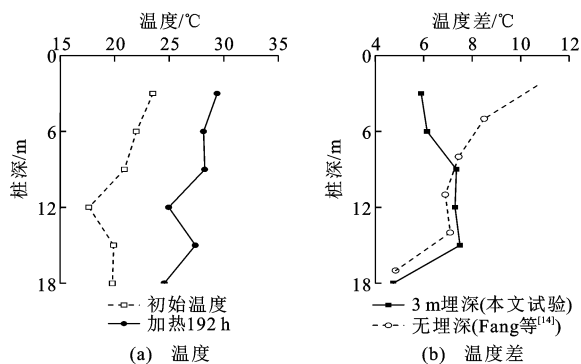


图6 桩身温度沿桩深方向变化规律曲线

Fig. 6 Distribution of Temperature Change Along Pile Depth

小的温度升幅。Fang 等^[14]在进行试验(2018年3月23日至4月1日)时是处于春季时期,沿深度方向土壤温度逐渐上升至稳定,与本文试验时的土壤温度发展趋势相反,因而在桩顶处更易达到较大的温度升幅。在本文和文献^[10]试验过程中,桩身中部及桩端产生了相似的温度升幅。

在桩体温度升高的同时,桩体也随之发生热膨胀变形,由于受到桩侧摩阻力及桩端约束作用,实际测量得到的桩身轴向变形小于无约束情况下自由膨胀的变形。桩身约束应力为限制桩体变形产生的应力,受热膨胀时,轴向约束应力 σ_a 为压力,假定为负值,其计算公式为

$$\sigma_a = E(\epsilon_{\text{Free}} - \epsilon_{\text{Obs}}) \quad (2)$$

式中: E 为混凝土的弹性模量,桩体混凝土强度等级为C40,由《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)取值32.5 GPa; ϵ_{Obs} 为实际观测的应变值; ϵ_{Free} 为试验过程中无约束条件下的桩身应变值。

由于试验过程中未改变桩顶荷载等条件,因此只需考虑自由热膨胀产生的应变, ϵ_{Free} 计算公式为

$$\epsilon_{\text{Free}} = \alpha \Delta T \quad (3)$$

式中: α 为混凝土的热膨胀系数,取 $1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

竖向应变、约束应力沿桩深方向的分布规律曲线如图7所示,其中,埋设在A桩中桩深12 m及15 m处的传感器出现故障,无法测得这2个位置处的约束应变。由图7可知,约束应力在有/无埋深条件下沿桩深的分布规律都同自由应变沿桩深方向的分布规律类似。考虑到自由应变直接与桩身的温度升幅 ΔT 相关,因此约束应力也与温度升幅 ΔT 存在着一定的关系。对于能量桩在3 m埋深条件下的运行情况,桩身中部的温度差最大,其对应的桩身约束应力也最大。在桩顶处,其约束主要来源于低承台结构及上部回填土;在桩身中部,桩侧摩阻力进一

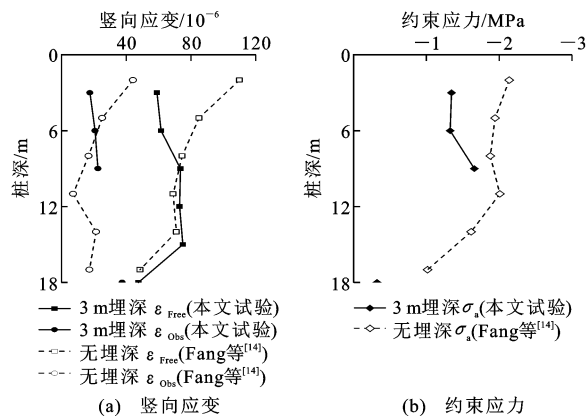


图7 桩身竖向应变、约束应力沿桩深方向分布规律

Fig. 7 Distribution Law of Vertical Strain and Constraint

Stress Along Pile Depth

步对桩体形成约束;在桩底,其处于岩土层,受到的热扰动影响较小,约束应力也较其他部位要小。

在无埋深条件下进行同工况试验时,桩顶的温度差大于桩身中部,这两处的约束应力相当,反映出桩身不同部位受到的约束大小会对约束应力产生影响。将有/无埋深条件下的约束应力进行对比可知,桩顶处的约束应力在无埋深条件下远大于上覆3 m埋深土体,这主要是由于当承台上部无埋深时,桩顶虽然也有约440 kN的塔吊荷载及低承台结构的约束,但桩身上层土壤受环境温度的影响较为明显,受到的热干扰影响较大,因此产生了较大的约束应力;在埋深条件下,承台上部有约3.0 m的回填土覆盖,土壤具有一定的持热能力,抵消了部分热干扰的影响,进而减小了部分约束应力。桩身中部由于受到了桩侧摩阻力的约束,因此有埋深条件下的约束应力略微小于无埋深条件的。桩底受岩土层约束及较小的热干扰影响,使得桩底的约束应力在有/无埋深条件下均对应最小。

能量桩约束应力与温度升幅的关系如图8所示,其中, $\Delta\sigma_{3\text{m}}$, $\Delta\sigma_{6\text{m}}$, $\Delta\sigma_{9\text{m}}$, $\Delta\sigma_{18\text{m}}$ 分别为桩深3, 6, 9, 18 m的约束应力。由图8可知,约束应力 σ 与温度升幅 ΔT 之间存在线性关系。由于本文试验过程中约束应力仅由温度变化产生,因此当温度升幅为0 °C时相应的约束应力也将为0,对应的拟合直线经过原点,拟合直线的斜率越大,约束越强。

《桩基地热能利用技术标准》(JGJ/T 438—2018)给出了单根能量桩热致应力的简化计算公式,即

$$\sigma = E\alpha\Delta T \quad (4)$$

式中: E 取32.5 GPa; α 取 $1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

由式(4)可知,约束应力与桩身温度升幅的拟合

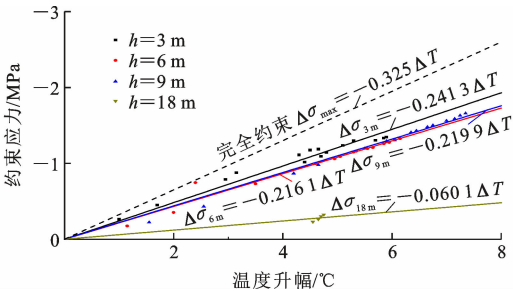


图 8 桩身约束应力与温度升幅关系曲线
Fig. 8 Curves on Constraint Stress of Pile Versus Temperature Rise

直线斜率存在着上限,即由于温升产生的热膨胀变形被完全约束,对应于本文拟合曲线斜率的上限值为 0.325。桩顶由于低承台及上覆回填土的限制作用,斜率值最大,所受的约束也最大,对应的约束应力占完全约束的 74.2%,桩侧阻力提供的约束比顶部荷载要小。随着桩身长度的增加,低承台及上覆回填土对桩身的影响作用减弱,桩侧阻力的约束作用增加,桩身中部 6.0 m 与 9.0 m 处的斜率值相当;由于岩土层约束及较小的热干扰,桩端对应的斜率值也最小,仅为 0.060 1,为完全约束的 18.5%。有/无埋深条件下桩身热致应力最大值分别出现在桩身中部和桩顶,为 1.66 MPa 和 2.14 MPa,分别为完全约束应力的 85.0%及 74.2%。

不同桩深处轴向约束应力与完全约束应力的比值分布如图 9 所示。本文试验条件与李任融等^[16]及 Bourne-Webb 等^[17]的试验条件接近:李任融等^[16]试验桩为桩筏结构中的能量桩,上部荷载为约 3 500 kN 的 8 层建筑物荷载,其桩顶约束力为完全约束应力的 44.3%;Bourne-Webb 等^[17]在桩顶施加了 1 200 kN 的荷载作用,桩顶约束应力占完全约束应力的 96.7%。约束应力关于温度升幅的斜率最大值均出现在桩顶附近,这也与本文的试验结果较为接近。Fang 等^[14]在无埋深条件下的试验结果则与桂树强等^[9]及 Laloui 等^[18]的试验桩 1(桩顶无建筑物荷载的试验)结果较为接近,斜率最大值均出现在桩身中部。桂树强等^[9]由于未设置筏板,桩顶约束仅占完全约束的 21.0%,桩身中部这一比值增加到 53.7%。Laloui 等^[18]研究发现,在桩顶无荷载条件下,桩身中部约束应力出现了最大值,占完全约束的 35.6%。Fang 等^[14]虽然也设置了低承台结构,且承台上部设置有约 440 kN 的塔吊结构荷载,但其上部未有回填土覆盖,能量桩上部土壤受环境温度影响较为明显,且在能量桩运行过程中会产生

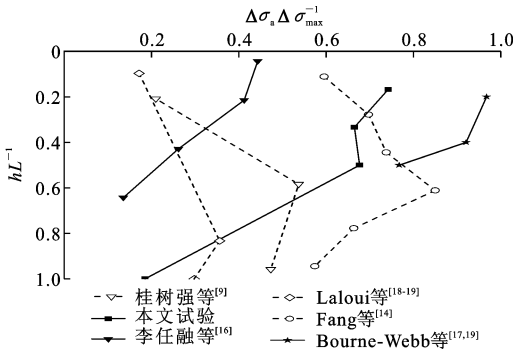


图 9 归一化能量桩约束应力值
Fig. 9 Normalized Restraint Stress of Energy Pile

较大的热消耗,进而减小了桩侧阻力的约束,导致最大约束应力出现在桩身中部。上述约束分布现象与 Amatya 等^[19]提出的建筑荷载-温度联合作用下,能量桩约束应变分布的简化模型较为接近。该简化模型表明:桩顶无约束时,桩身中部处约束应变较大;桩顶存在约束时,约束应变最大值位于桩顶附近^[19]。因此,桩顶荷载对桩身约束应力分布有一定的影响,在实际设计时应特别注意。

2.3 桩端土压力分析

试验运行 192 h 所对应的 A 桩桩端土压力随时间的变化曲线如图 10 所示。由图 10 可知,随着能量桩的运行,桩端土压力呈现出先增加后减小至稳定的趋势,其最大值约为 20 kPa,出现在加热 24 h 后。这一趋势与能量桩进/出口的温度差变化趋势一致。能量桩运行时加热阶段对应于桩端土压力的增加,在温度稳定时桩端土压力出现一定的下降并最终趋于稳定。

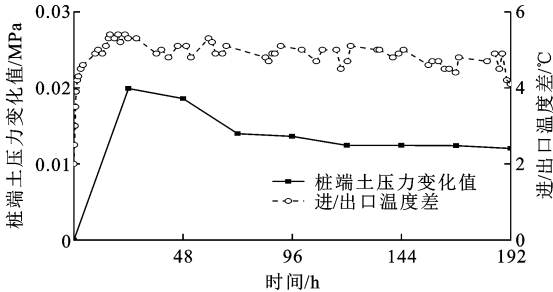


图 10 桩端土压力随加热时间的变化曲线
Fig. 10 Curves on Soil Pressure of Pile Toe Versus Running Time

图 11 为桩端土压力变化值 ΔP 与进/出口温度差的关系曲线。由图 11 可知,桩端土压力变化值与进/出口温度差呈现出一定的正相关关系。这可能是由于能量桩在夏季工况运行期间,桩身受到温度上升的影响产生一定的热膨胀变形,引起桩端土压

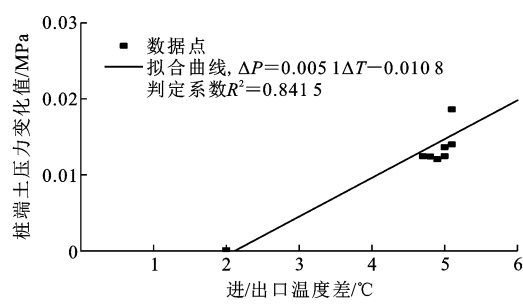


图 11 桩端土压力与进/出口温度差关系曲线
Fig. 11 Curves on Pressure of Pile Toe Versus In/Out Water Temperature Difference

力的上升;在正常稳定运行期间,由于热损失及桩身温度是进/出口温度的均值,进/出口温度差较加热阶段有一定的降低,导致桩端土压力的下降并最终趋于稳定。

3 承台热力响应结果与分析

能量桩在加热 192 h 后,承台顶部及底部各测点的温度升幅及约束应力的变化情况如图 12 所示。由图 12(a)可知,能量桩在加热工况下,承台产生了一定的温度增加,约为 3.6 °C,这一温度升幅小于无埋深条件下的 11.0 °C,这是由于无埋深条件下承台上部直接与大气环境进行了部分热量交换,受环境的影响较大,因此出现了较大的温度升幅。承台中部及非加热桩对应角承台部位温度升幅相对较小,仅 0.2 °C,说明能量桩短期的运行热量传递及影响范围有限,对角桩几乎不产生热致影响。由于上覆回填土的影响,承台结构的顶层和底层的温度升幅差异不大,体现出土体具有一定的持热能力。

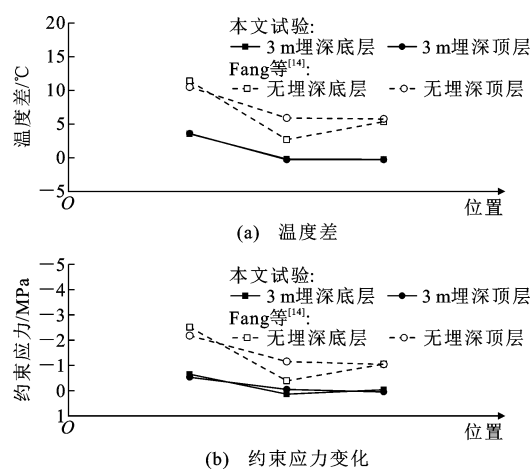


图 12 承台温度及应力变化图
Fig. 12 Distributions of Temperature and Horizontal Stress of Pile Cap

3 m 埋深条件下的约束应力小于无埋深条件下承台的约束应力,这是由于无埋深条件下未覆盖回填土,直接“裸露”于大气环境中,热干扰影响产生了较大的约束;3 m 埋深条件下能量桩运行时,承台产生了 0.65 MPa 的约束应力,承台中部及对角桩的约束应力分别为 0.13 MPa 及 0.04 MPa,说明能量桩的运行导致承台出现了细微的差异变形。无埋深条件下的试验工况下,这种不平衡倾斜现象更明显,能量桩运行部位对应的承台约束应力约为 2.34 MPa,大于承台中部的 1.15 MPa 及非运行能量桩对应承台部位的 1.04 MPa。因此,在低承台能量桩基础设计时,要注意能量桩在夏季运行模式下出现的承台压应力。

4 结 语

(1)含承台的能量桩基础在 3 m 埋深条件下换热效率稳定阶段约为 2.65 kW,较相同试验工况无埋深条件下的换热效率 1.57 kW 提升了约 69%,体现了上覆回填土具有一定的持热能力。

(2)有/无埋深条件下桩身热致应力最大值分别出现在桩身中部和桩顶,为 1.66 MPa 和 2.14 MPa,分别为完全约束应力的 85.0% 及 74.2%。

(3)桩端土压力随着加热过程的进行先增大后下降至稳定值,与进/出口温度差变化趋势相近,二者间存在一定的相关性。加热 24 h 后,桩端土压力最大值约为 20 kPa。

(4)有/无埋深条件下承台在加热工况均出现了细微的差异变形,在设计承台能量桩结构时应予以一定的考虑;有/无埋深条件下承台最大热致应力值分别为 0.65 MPa 和 2.34 MPa,对应的最大温度升幅分别为 3.6 °C 和 11.0 °C。

参考文献: References:

[1] 余 闯,潘林有,刘松玉,等.热交换桩的作用机制及其应用[J].岩土力学,2009,30(4):933-937,948.
YU Chuang,PAN Lin-you,LIU Song-yu,et al. Working Mechanism and Application of Heat Exchanger Piles[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(4):933-937,948.
[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 Han-long,KONG Gang-qiang,WU Hong-wei. Applications of Energy Piles and Technical Develop-

- ment of PCC Energy Piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 176-181.
- [3] 钱七虎. 利用地下空间助力发展绿色建筑与绿色城市[J]. 隧道建设: 中英文, 2019, 39(11): 1737-1747.
- QIAN Qi-hu. Underground Space Utilization Helps Develop Green Buildings and Green Cities[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1737-1747.
- [4] 党政, 关文, 程晓辉, 等. CFG 能源桩用于混凝土路面除冰降温的试验研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(2): 19-30.
- DANG Zheng, GUAN Wen, CHENG Xiao-hui, et al. Experimental Study on CFG Energy Pile for Concrete Pavement Deicing and Cooling[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(2): 19-30.
- [5] 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.
- [6] PARK S, LEE D, LEE S, et al. Experimental and Numerical Analysis on Thermal Performance of Large-diameter Cast-in-place Energy Pile Constructed in Soft Ground[J]. Energy, 2017, 118(1): 297-311.
- [7] 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.
- [8] CHEN Y H, XU J, LI H, et al. Performance of a Prestressed Concrete Pipe Energy Pile During Heating and Cooling[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2017, 31(3): 06017001.
- [9] 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 Shu-qiang, CHENG Xiao-hui. In-situ Tests on Structural Responses of Energy Piles During Heat Exchanging Process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1087-1094.
- [10] 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 Hong-wei, JIANG Gang, WANG Hao, 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.
- [11] 费康, 朱志慧, 石雨恒, 等. 能量桩群桩工作特性简化分析方法研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(12): 3889-3898.
- FEI Kang, ZHU Zhi-hui, SHI Yu-heng, et al. A Simplified Method for Geotechnical Analysis of Energy Pile Groups[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(12): 3889-3898.
- [12] REN L W, XU J, KONG G Q, et al. Field Tests on Thermal Response Characteristics of Micro-steel-pipe Pile Under Multiple Temperature Cycles[J]. Renewable Energy, 2020, 147: 1098-1106.
- [13] 刘汉龙, 黄旭, 孔纲强, 等. 桩芯介质对管式能量桩换热效率的影响[J]. 中国公路学报, 2019, 32(1): 1-11.
- LIU Han-long, HUANG Xu, KONG Gang-qiang, et al. Influence of Pile Core Medium on Heat Transfer Efficiency of Tubular Energy Pile[J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2019, 32(1): 1-11.
- [14] FANG J C, KONG G Q, MENG Y D, et al. Thermo-mechanical Behavior of Energy Piles and Interactions Within Energy Pile-raft Foundations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, 146(9): 04020079.
- [15] 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 Jin-cheng, KONG Gang-qiang, MENG Yong-dong, et al. Thermal-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.
- [16] 李任融, 孔纲强, 杨庆, 等. 流速对桩-筏基础中能量桩换热效率与热力耦合特性影响研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增1): 264-270, 298.
- LI Ren-rong, KONG Gang-qiang, YANG Qing, et al. Study on Influence of Flow Velocity on Heat Transfer Efficiency and Thermal Coupling Characteristics of Energy Piles in Pile-raft Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S1): 264-270, 298.
- [17] BOURNE-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]. Geotechnique, 2009, 59(3): 237-248.
- [18] LALLOU 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.
- [19] AMATYA B L, SOGA K, BOURNE-WEBB P J, et al. Thermo-mechanical Behaviour of Energy Piles[J]. Geotechnique, 2012, 62(6): 503-519.