

DOI: 10.11779/CJGE201702018

摩擦型能源桩荷载-温度现场联合测试与承载性状分析

路宏伟², 蒋刚^{1*}, 王昊¹, 洪鑫³, 史春乐⁴, 龚红卫⁵, 刘伟庆²

(1. 南京工业大学城市地下空间研究中心, 江苏 南京 210009; 2. 南京工业大学土木工程学院, 江苏 南京 211800; 3. 江苏中大建设集团有限公司, 江苏 昆山 215300; 4. 昆山市建设工程质量检测中心, 江苏 昆山 215300; 5. 南京工业大学城市建设学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 能源桩集地源热泵技术与建筑桩基于一体, 桩基承载性状受荷载-温度耦合作用而不同于常规工程桩。开展了昆山某摩擦型能源桩工程的荷载-温度现场联合测试, 测试了多级荷载水平与不同换热工况下桩身的温度、应力分布及桩顶位移变化, 整理得到桩身的附加温度荷载、桩身轴力及桩侧摩阻力分布曲线, 分析了摩擦型能源桩荷载-温度作用下的承载性状与荷载传递特征。测试结果表明: 能源桩的温度变化将引起附加温度荷载, 桩身轴力和附加温度荷载分布特征和桩顶荷载作用、桩端约束有关, 承载性状不同于单一荷载作用下的工程桩。加热工况引起桩身上、中部多处出现负摩阻力, 但荷载的增加有利于减小升温引起的负摩阻力效应; 制冷工况下, 桩端附近产生负摩阻力, 能源桩荷载传递特征受荷载-温度耦合作用而改变。设计荷载作用下, 能源桩顶加热时隆起而制冷时下沉, 加热工况引起的桩顶位移在停止加热回温后可基本恢复, 但制冷工况引起的桩顶位移在回温后会致桩顶产生附加沉降, 荷载-温度耦合作用也引起了能源桩沉降性状的变化。

关键词: 摩擦型能源桩; 荷载-温度现场测试; 热交换工况; 负摩阻力; 温度附加沉降

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)02-0334-09

作者简介: 路宏伟(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事建筑节能与绿色建筑研究。E-mail: jscstlh@163.com。

In-situ tests and thermo-mechanical bearing characteristics of friction geothermal energy piles

LU Hong-wei², JIANG Gang¹, WANG Hao¹, HONG Xin³, SHI Chun-le⁴, GONG Hong-wei⁵, LIU Wei-qing²

(1. Research Center of Urban Underground Space, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China; 3. Jiangsu Zhongda Construction Group Co. Ltd., Kunshan 215300, China; 4. K. S.

Construction Engineering Quality Testing Centre, Kunshan 215337, China; 5. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: Geothermal energy pile is the new pile technology that combines the ground source heat pump technology and building pile foundation. Due to the pile as the heat transfer carrier of ground source heat pumps, the bearing characteristics of energy piles are different from those of the conventional engineering piles because of thermo-mechanical coupling. In-situ thermo-mechanical tests on drilled friction geothermal energy piles of a Kunshan project are performed. The temperature, stress distribution of pile shaft and displacement of pile tip are investigated under multi-level loadings and heat exchange cases. The distribution curves of temperature-induced loading, axial force and friction resistance of pile shaft are obtained, and the thermo-mechanical bearing properties and load transfer characteristics of drilled friction energy piles are analyzed. The results indicate that the additional temperature loading is induced in energy pile shaft by temperature change. The characteristics of axial force and the temperature-induced loading of energy piles are affected by pile loading and constraint of pile toe. The bearing properties of the energy piles is not the same with that of the engineering piles by loading only. Under heating condition, the negative friction resistance of pile shaft is produced at the upper and middle parts of pile, but the effect of negative friction resistance decreases by the increasing loading. While under cooling condition, the negative friction resistance of pile shaft is produced near the pile toes. So the load transfer characteristics of energy piles are changed by the thermo-mechanical coupling effect. Under the design working loading, the head of energy piles is uplift under heating case and dropped under cooling case. The displacement of energy pile head at heating process is almost restored after temperature is recovered, but the temperature-induced settlement of energy piles at cooling process

基金项目: 江苏省六大大人才高峰项目(2012-JZ-009); 江苏省建筑节能示范科技项目(2013SF01)

收稿日期: 2015-12-09

*通讯作者(E-mail: g.jiang@njtech.edu.cn)

remains after cooled. So the settlement characteristics of energy piles are changed by the thermo-mechanical coupling effect.

Key words: friction energy pile; in-situ thermo-mechanical test; heat exchange case; negative friction resistance; temperature additional settlement

0 引言

地源热泵由于其环保节能的特点在国内外很多的建筑中得到了应用, 常规的地源热泵系统采用垂直钻孔埋管换热管路, 但钻孔费用较高, 占用土地面积较大, 不利于地源热泵的推广应用^[1-2]。能源桩以建筑桩基作为地源热泵换热管路载体, 将换热管埋置在建筑桩基中, 使其与建筑结构相结合, 在承受上部结构荷载的同时实现浅层地热能的利用。与垂直钻孔埋管相比, 桩基埋管的优点是不需要占用额外的地下空间; 桩的直径也大大超过钻孔的直径, 深度通常会小于钻孔的深度, 从而减少了埋管钻孔的费用, 且由于混凝土的热传导性高于土体, 换热器的换热性能也得到提高^[3-9]。

能源桩技术实现了“一桩两用”, 一方面承担结构正常使用荷载, 另一方面作为中央空调的换热载体, 须额外承受桩身温度变化导致的附加应力与变形。目前国内外针对能源桩的研究主要分为能源桩换热性能分析^[10-11]与能源桩受温度-荷载作用的承载性能分

析^[12]。鉴于静荷载测试仍然是桩基承载性能研究的最可靠手段, Brandl^[3]、Laloui 等^[12]、Bourne-Webb 等^[13]、桂树强等^[14]等相继开展了能源桩的现场荷载-温度作用测试研究, Amatya 等^[15]分析总结了国际上极少的能源桩现场测试结果, 表 1 总结了国内外有限的能源桩的现场测试研究工作。

Ouyang 等^[16]、Knellwolf 等^[17]分别结合 London 试验和 Lausanne 试验的测试结果进一步展开了理论研究。Suryatriyastut 等^[18]、Gashti 等^[19]、Jeong 等^[20]分别开展了能源桩承载性能受温度变化影响的数值模拟分析。

上述有限的现场测试初步表明, 能源桩-土热交换引起的桩侧阻力、桩端阻力及桩顶沉降等性状的变化, 改变了常规荷载作用下能源桩的桩-土荷载传递特征。但上述测试由于工程地质条件、桩型与桩长、热交换工况等条件不一, 测试结果差异大, 对能源桩承载性能的热效应规律及影响因素等认识不统一, 有待于进一步的揭示。

表 1 国内外能源桩现场测试研究概况

Table 1 In-situ tests on geothermal energy piles

主要研究人员	Bourne-Webb 等 ^[13]		Laloui 等 ^[12]			Brandl ^[3]	桂树强等 ^[14]	
试验项目	Main Test pile		T-1	T-6	T-7	—	#168	
桩长/m	23		25.8	30	30	9	12	
桩基类型、桩径/m	单桩, 0.55~0.61		桩筏, 0.96~1.17			桩筏, 1.2	单桩, 0.8 (扩大头 1.2)	
桩基荷载 /kN	1200		—	1183	1088	500~900	1600	1800
土层分布	砂土、颗粒/硬黏土		软土/硬土			黏性—砂性粉土	粉质黏土/泥质砂岩	
桩端土层	硬黏土		砂岩			黏性—砂性粉土	中风化泥质砂岩	
温度变化±ΔT*/°C	-20	+10	+20.9	+18		+7~-14	+24.7	-15.75
轴向最大热荷载/kN	670	-675	-2150	-3060	-2830	-300	2000	1182.6
出现深度位置/m	15	6	约 20	12.5	12.5	4.5	6	6
最大温度应力/(kPa·°C ⁻¹)	177	-329	-104	-153		—	-161	149.46
温度引起桩侧阻力/(kPa·°C ⁻¹)	2.1	-5.9	-1.5	-2.5		2.7**	—	—
	(6~15 m)	(0~6 m)	软黏土	软黏土				
	-4.0	1.5	-0.5	0.5				
	(20~22.5 m)	(6~15 m)	(软土)	(软土)				
		5.4	0.9	5		(4.5~6.5 m 截面)		
		(15~22.5 m)	(硬土)	(硬土)				
桩顶沉降/mm	2.35	-1.63	—	—		—	-0.6	2.8

注: * ±ΔT 为温差, +为升温, -为降温; **简化平均值。

鉴于能源桩热交换过程中桩身温度荷载、轴力与桩侧摩阻力变化等承载性状的复杂性, 本文结合昆山某能源桩工程, 开展能源桩基在多级荷载水平和热交换工况过程中的桩身温度、桩身应力及桩顶沉降的现场测试研究, 以揭示温度-荷载作用对单桩承载性能的影响。

1 试验概况

1.1 工程概况

该工程为江苏昆山某3层办公楼建筑, 建筑面积为2947 m²。拟建场地土层分布见表2。场地下卧有淤泥质粉质黏土软土层, 无良好的浅基持力层, 基础选用钻孔灌注桩基础, 水下砼强度等级C30, 有效桩长为17 m, 桩径600 mm, 设计桩基总数为94根。

表2 拟建场地土层分布特征

Table 2 Characteristics of soil layers in site

土层编号	土层名称	层厚/m	土层状态
①-1	素填土	2.80~3.20	—
①	表土	0.90~1.90	—
②	粉质黏土	0.60~1.50	软塑—可塑
③	淤泥质粉质黏土	0.80~2.00	流塑
④	粉质黏土	3.70~4.90	可塑—硬塑
⑤-1	粉土夹粉砂	4.20~6.30	稍密—中密
⑤-2	粉砂夹粉土	4.70~6.10	中密
⑥	粉土	1.50~2.40	中密
⑦	粉土	> 4.90	密实

该建筑物的暖通空调设计利用土壤源地热泵系统提供建筑物部分夏季供冷与冬季供热的需求, 故结合桩基设计, 采用地源热泵与桩基一体化的能源桩技术, 将部分地源热泵系统的换热管路埋设在钻孔灌注桩内, 选择了其中40根灌注桩作为能源桩埋设换热管路。

能源桩内换热管材为聚乙烯 PE 管, 尺寸为 DN25×2.3 mm, 公称压力 1.6 MPa, 换热管末端距桩底 0.8 m。埋管型式分为双 U 型 (22 根) 和并联双螺旋型埋管 (18 根) 两类。双 U 型埋管换热管路依附于桩内受力主筋绑扎在钢筋笼内侧, 并联双螺旋型埋管换热管路依附于螺旋箍筋绑扎在钢筋笼外侧, 螺距 300 mm。为满足灌注桩钢筋笼混凝土保护层厚度要求, 变更设计将并联双螺旋埋管的能源桩桩径增大至 650 mm, 有效桩长不变。灌注桩钢筋配置与埋管布置如图 1 所示。

根据现场能源桩布置, 选取桩内并联双螺旋埋管的编号#55 能源桩进行荷载-温度现场联合测试。结合桩基施工, 在桩身内埋设了温度传感器和钢筋应力计。其中, 温度传感器采用 A 级 PT100 型铂电阻传感器,

均匀布置在桩顶以下 3, 10, 16 m 处的位置。钢筋应力传感器为 VWR-16 型振弦式钢筋计, 根据拟建场地的土层分布特征 (表 2), 在土层界面位置布设钢筋计, 同一截面对称平行布置, 分别位于桩顶下 0.5, 3.7, 9.0, 11.1, 13.9, 16.5 m 共 6 组, 温度传感器与钢筋计布置如图 1 所示。另外, 在桩头两正交直径端点对称布置 4 个百分表量测桩顶位移变化值。因条件限制, 未在场地能源桩周土体内布置土体温度测点。

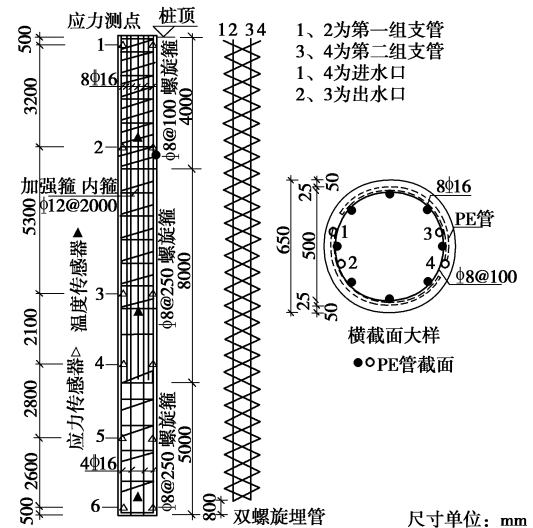


图1 #55 能源桩传感器布置及埋管示意图

Fig. 1 Diagram of energy pile No.55

根据岩土工程勘察资料, 灌注桩初步设计单桩极限承载力特征值为 840 kN, 相应单桩极限承载力约为 1680 kN。

按《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106—2014) 标准^[21], 采用慢速荷载维持法对#55 能源桩进行常规静荷载试验, 桩顶加载为千斤顶反力堆载, 加载至预估设计极限荷载值 1680 kN 时桩顶沉降 9.48 mm, #55 能源桩常规静荷载试验曲线如图 2 所示, 同时整理得到其桩身轴力与桩侧摩阻力分布曲线如图 3, 4 所示, 可以判明#55 能源桩属于典型的摩擦型桩。

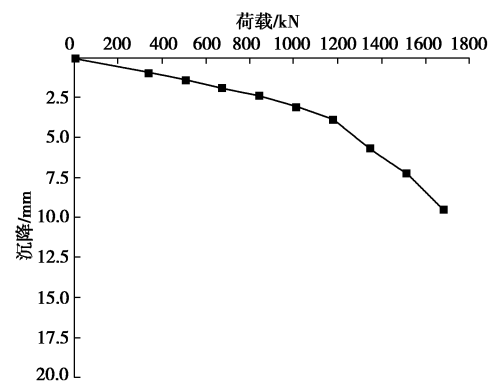


图2 #55 能源桩常规静荷载试验曲线

Fig. 2 Static load test curve of energy pile No. 55

表 3 #55 能源桩荷载-温度联合作用测试方案

Table 3 In-situ mechanical-thermo test schemes of energy pile No.55

桩基试验工况	加热			制冷		
	热响应仪			冰块+保温水箱		
热工仪器	荷载水平 ($P_u\%$)	荷载	热交换时间	荷载水平 ($P_u\%$)	荷载	热交换时间
测试内容	0	0	排热 22 h, 回温 28 h	—	—	—
	25	420 kN	排热 35 h, 回温 30 h	—	—	—
	50	840 kN	排热 45 h, 回温 30 h	50	840 kN	制冷 25 h, 回温 28 h
监测内容与时间间隔	桩身温度		桩身应力、桩顶沉降	桩身温度		桩身应力、桩顶沉降
	5 min		10 min	5 min		10 min

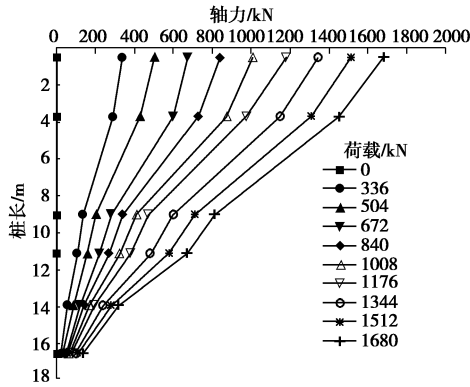


图 3 #55 能源桩常规荷载试验桩身轴力分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of axial force of energy pile No. 55

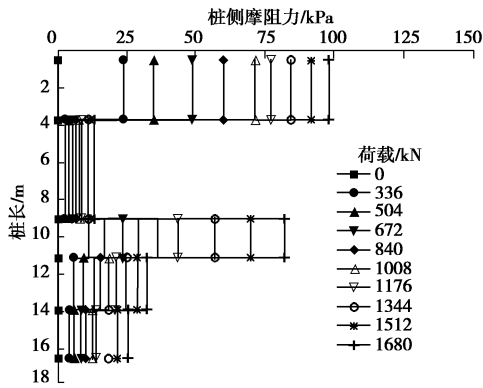


图 4 #55 能源桩常规荷载试验桩侧阻力分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of friction resistance of energy pile No. 55

1.2 荷载-温度联合测试方案

在常规荷载试验基础上, #55 能源桩温度-荷载联合测试主要考虑不同荷载水平与地源热泵排热或取冷不同工况联合作用下的承载性状变化, 联合测试方案见表 3 所示。其中, 地源热泵排热工况即为桩身加热工况, 取冷工况即为桩身制冷工况。

桩热响应测试中, 加热仪器采用山东亚特尔新能源设备制造有限公司的 YTTRT2.0 型热响应仪器, 最大功率 4.5 kW。制冷设备仍利用 YTTRT2.0 型热响应仪, 关闭加热用电加热器, 增加一个保温水箱, 通过

在保温水箱中不断加入冰块, 让冰水在桩内管路中循环达到给桩身降温的目的。

#55 能源桩荷载-温度联合测试中, 桩顶作用力仍利用 RS-JYC 型静荷载测试仪读取。加热工况测试时, 不限制桩身受热膨胀出现的向上位移桩, 直接测读桩顶作用力大小和桩顶位移值; 制冷工况测试时, 因桩身受冷桩顶出现向下位移, 桩顶作用力减小, 与常规静载测试要求一致, 设定容许掉载量为 16 kN, 即时补压至 50% P_u (840 kN), 即制冷工况时桩顶为恒载状态。

1.3 测试结果整理

荷载-温度联合测试中, 桩身不同深度同一截面对称平行布置的钢筋应力计测读数值取两者平均值。但因 50% P_u (840 kN) 荷载作用制冷工况下, 桩顶 0.5 m 处钢筋计故障, 测读数据有较大偏差, 故制冷工况下此截面处桩身截面应力值近似取桩顶作用应力值。

由钢筋应力计测读值计算可得到钢筋应变, 考虑能源桩身受力为弹性状态, 桩内钢筋与混凝土应变一致, 即 $\epsilon_c = \epsilon_s$, 由混凝土应变可计算桩身截面混凝土应力, 桩身轴力即为钢筋和混凝土二者轴力之和。计算中钢筋弹性模量取 2×10^5 MPa, 混凝土弹性模量取 3×10^4 MPa。

2 测试结果分析

2.1 不同工况桩身温度分布特征

根据岩土热物性测试结果, 现场土体平均初始温度为 $18^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ 范围内, 桩顶温度受环境的影响约为 18.53°C 。整理得到加热与制冷工况及不同荷载水平下的桩身温度及进、出水口温度变化曲线如图 5 所示, 进、出水口温度为进、出热响应仪器的水温, 距桩顶距离 2 m 左右。其中荷载水平 25% P_u (图 5 (b)) 和 50% P_u (图 5 (c)) 时的测试分别在前一级荷载水平试验完成后即开始, 桩身温度的初始值略有升高。50% P_u (图 5 (d)) 制冷工况因测试中夜间停止加冰, 桩身温度略有回升, 白天继续加入冰块后, 桩身温度再行

下降,故桩身温度曲线呈间歇性下降特征。

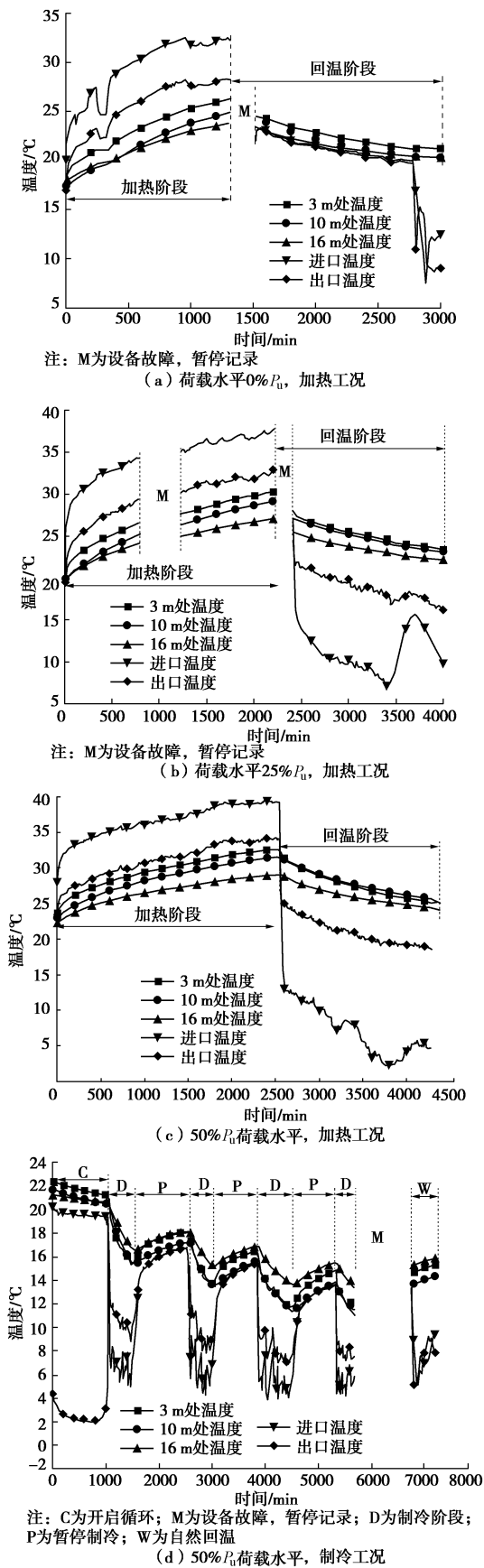


图5 #55 能源桩热交换过程中测点温度变化曲线

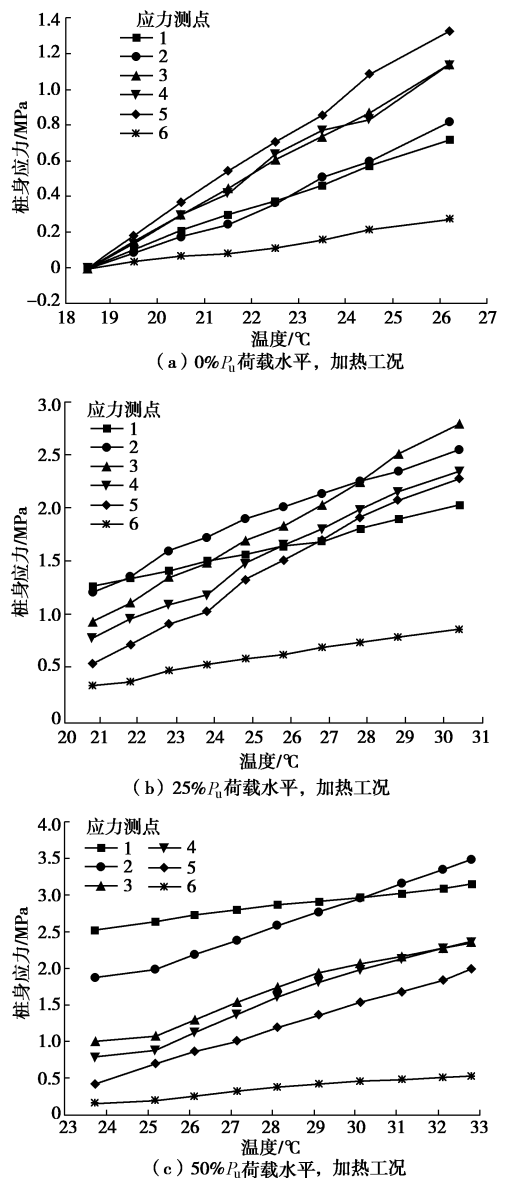
Fig. 5 Temperature curves of energy pile No. 55 in heat exchange cases

从图5中可以看出,桩身受热过程中,进水口最大温差能达到 13.6°C ,出水口最大温差小于进水口,出水口温度与桩顶下3 m处桩身温度比较接近。另外,加热过程中进、出口水温间的温差基本维持在 10°C 左右,进、出水口温差明显小于自然回温阶段。制冷过程中,进、出水口温度显著低于桩身温度,且温差明显。

能源桩加热工况中桩身各测点的温度随时间变化规律基本一致,桩顶温度较桩底稍大。热响应仪器停止加热,桩身温度达到最高,之后处于自然回温状态,最大温差达到 9.6°C 。制冷工况下能源桩身温度逐渐降低(图5(d)),最大温差达到 -10.9°C 。

2.2 桩身应力变化、轴力分布及附加温度荷载

图5所示能源桩桩身受温度变化引起桩身的热胀冷缩温度应力,导致桩身产生轴向拉伸或收缩变形。整理得到不同荷载水平和加热、制冷工况下桩身截面应力随温度变化曲线如图6所示。



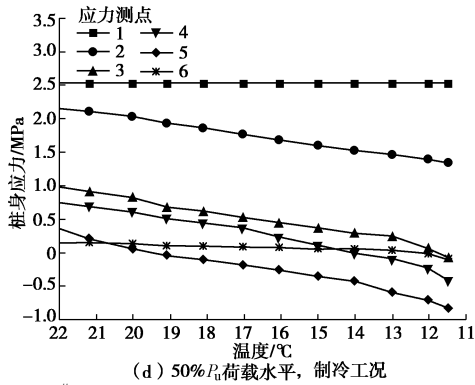


图 6 #55 能源桩热交换过程桩身应力变化曲线

Fig. 6 Stress curves of energy pile No. 55 in heat exchange cases

可以看出, 加热工况下桩身温度变化引起的各截面压应力都随温度的升高呈线性增长, 桩顶截面应力变化相对平缓; 制冷过程中桩身下部出现拉应力, 应力变化也基本呈线性, 桩顶和桩端应力变化最小。

根据图 6 可整理桩身轴力分布曲线如图 7 示和各工况下桩身最大附加温度荷载曲线如图 8 示。图 7(a) 表明无荷载作用时, 加热导致桩身产生轴力分布, 且由于桩端约束效应, 桩身下部轴力大于上部。与图 4 常规荷载试验的桩身轴力分布曲线相比较, 荷载与温度的耦合作用改变了荷载单一作用下的桩身轴力分布特征, 最大轴力出现在桩身中部。在荷载水平 25% P_u (图 7 (b)) 和 50% P_u (图 7 (c)) 时, 桩身中部轴力明显增大, 加热引起的轴力增量 ΔP_T 甚至达到原桩身轴力的 2 倍以上。

制冷工况作用时, 温度下降引起桩身收缩, 使得桩身上部轴力减小但仍为压力, 桩端附近则减小为轴向受拉。

能源桩附加温度荷载分布特征与桩顶荷载作用、桩端约束有关。加热工况下, 桩顶不受荷时 (0% P_u 荷载水平), 附加温度荷载峰值出现在桩端附近, 即主要受桩端土层约束产生。桩顶受荷后 (图 7 (b)、(c)), 附加温度荷载分布为中间大, 两端小, 峰值出现在桩身中部 (图 8)。制冷工况下 (图 7 (d)), 桩身附加温度荷载为拉力, 分布曲线特征与加热工况基本一致, 但方向相反。尽管制冷工况时桩身最大温差达-10.9 $^{\circ}\text{C}$, 大于加热工况时桩身最大温差+9.6 $^{\circ}\text{C}$, 但引起的桩身温度荷载却较加热工况时小 (图 8)。其中 50% P_u 荷载水平制冷工况 (图 7 (d)) 时附加温度荷载峰值为-360 kN, 25% P_u 荷载水平加热工况时附加温度荷载峰值达 620 kN。

与国内外其他现场试验^[12-14]相比较, 在设计荷载作用 (图 7 (c), 50% P_u 荷载水平) 及加热工况下, 文献[13]中桩身附加温度荷载峰值出现在桩身上部, 本文测试结果及文献[12, 14]则出现在中部; 在设计荷载作用 (图 7 (d), 50% P_u 荷载水平) 及制冷工况

下, 文献[13]桩身附加温度荷载峰值出现在桩身下部, 本文测试结果及文献[14]则出现在中部。即在设计荷载作用下, 本文试验中桩身热交换引起的附加温度荷载峰值位置与文献[13]有一定的差异。

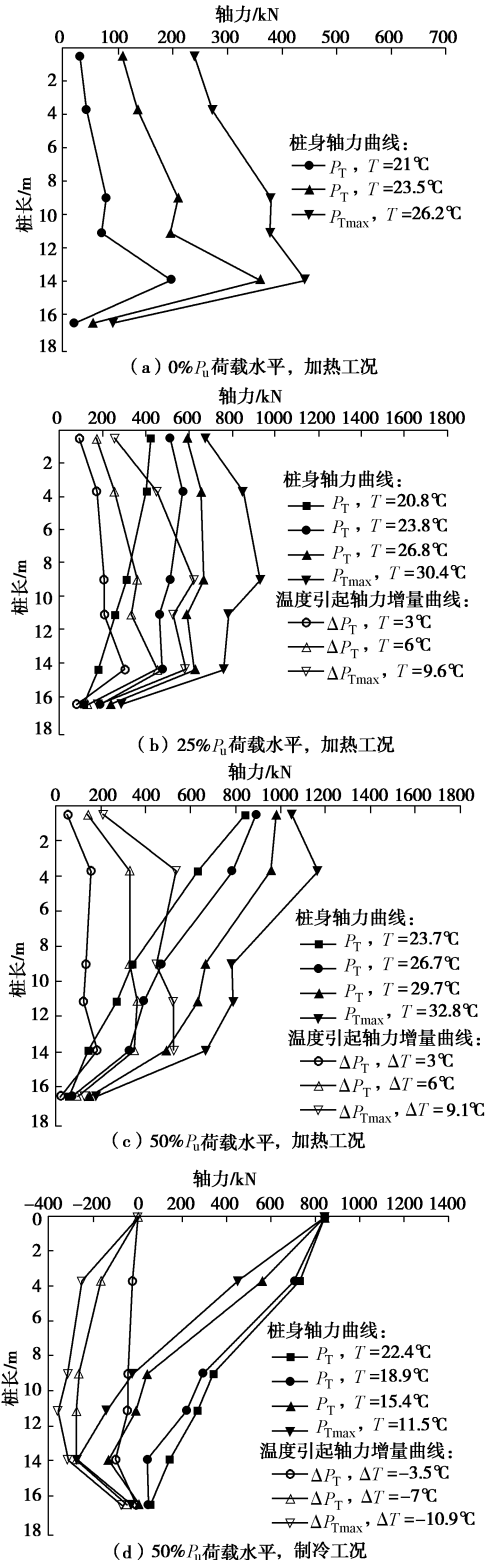


图 7 #55 能源桩桩身轴力 P_T 与附加温度荷载 ΔP_T 分布

Fig. 7 Distribution of axial force P_T and additional temperature loading ΔP_T of energy pile No. 55

需要注意的是制冷工况下桩身下部会出现受拉荷

载(图7(d)),对能源桩的承载性能影响有待进一步研究。

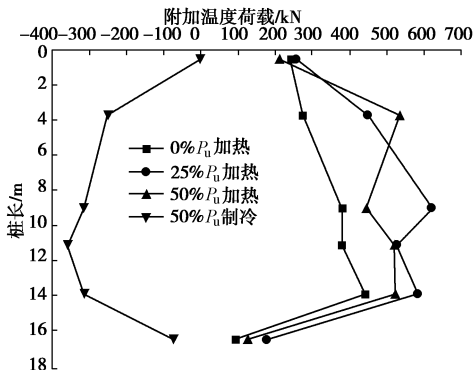


图8 #55 能源桩最大附加温度荷载分布曲线

Fig. 8 Loading curves of maximum additional temperature of energy pile No. 55

2.3 桩侧摩阻力分布特征

能源桩在荷载-温度耦合作用下,附加温度荷载的产生和桩身轴力的变化,必然引起沿桩身的荷载传递性状的变化,即桩-土侧摩阻力的变化。#55 摩擦型能源桩在不同荷载水平和加热、制冷工况下的桩侧摩阻力分布结果如图9所示。

与图4 能源桩常规荷载试验桩侧摩阻力分布比较,由图9(a)、(b)、(c)可看出,加热工况下,能源桩受热产生膨胀变形都会引起桩侧负摩阻力作用,且在桩身多处出现,桩顶作用荷载水平较小时(图9(a)、(b)),荷载水平0% P_u 和25% P_u 时,桩侧负摩阻力范围较大,当桩顶作用50% P_u 的荷载水平时(图9(c)),桩身中下部桩侧负摩阻力值的大小和分布范围都明显减小,说明桩顶荷载作用有利于减小加热引起的桩身负摩阻力效应,桩侧负摩阻力的分布区域与大小随着荷载水平的增加而减小。

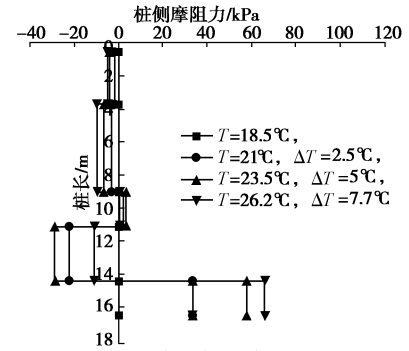
在制冷工况能源桩承担设计荷载(图9(d),50% P_u 荷载水平)时,温度降低引起桩身收缩,桩侧阻力值较单一荷载作用明显增大,但桩端附近产生负摩阻力作用,因而图7(d)中桩端轴力基本接近于0,使得能源桩的承载性能表现为纯摩擦特征。

与国内外其他现场试验^[12-14]相比较,在加热工况及设计荷载作用下(图9(c),50% P_u 荷载水平),文献[12]中桩侧负摩阻力出现在桩身上部近中部区域,本文测试结果与文献[13]中出现在上部近桩顶区域,但本文测试发现在桩身中部也出现较小的负摩阻力分布,呈现出负摩阻力的多分布区域,与文献[13]测试特征有一定的差异。

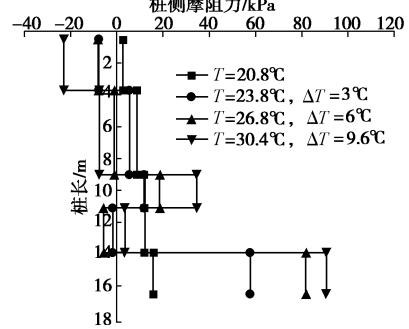
2.4 桩顶位移变化

图10给出了桩顶位移与温度变化的时间过程曲线。从图10(a)、(b)、(c)中可以看出,在桩顶作用设计荷载(荷载水平50% P_u)时,加热工况都将引起桩顶隆起,但加热停止后随桩身温度的自然降低,

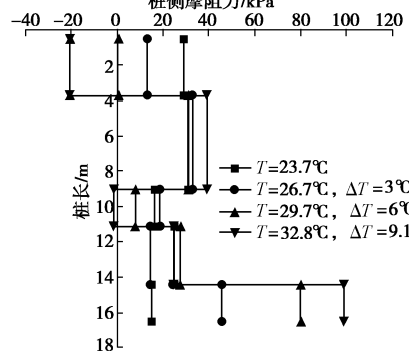
基本都恢复到荷载作用时的稳定沉降。说明工程桩用于能源桩设计时,能源桩承担荷载不超过其设计荷载,可不考虑地源热泵排热工况对其沉降的影响。



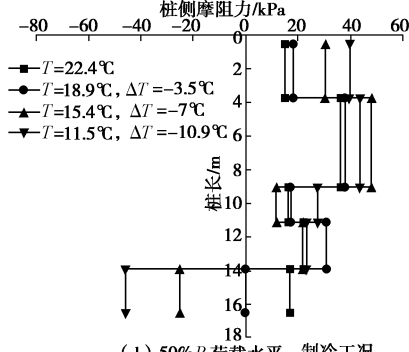
(a) 0% P_u 荷载水平, 加热工况



(b) 25% P_u 荷载水平, 加热工况



(c) 50% P_u 荷载水平, 加热工况



(d) 50% P_u 荷载水平, 制冷工况

图9 #55 能源桩热交换过程桩侧摩阻力分布

Fig. 9 Distribution curves of friction resistance of energy pile No. 55

但图10(d)制冷工况下的桩顶沉降曲线表明,能源桩温度降低时,桩顶产生沉降,但停止制冷后桩身温度自然恢复过程中,尽管桩顶沉降会有所恢复,却不能完全恢复到原荷载作用状态,即温度降低导致

能源桩出现温度附加沉降。本文试验中能源桩制冷工况设计荷载（荷载水平 $50\%P_u$ ）作用下温度附加沉降数值较小，但其变化幅度却达到了原荷载作用下沉降值（2.47 mm）的 22.6%，文献[14]也发现有相同的现象。因此，能源桩工程设计中有必要加以关注。另外，地源热泵制冷工况的周期性作用是否会导致能源桩在长期使用过程中桩顶沉降的累积，有待进一步的现场观测和研究。

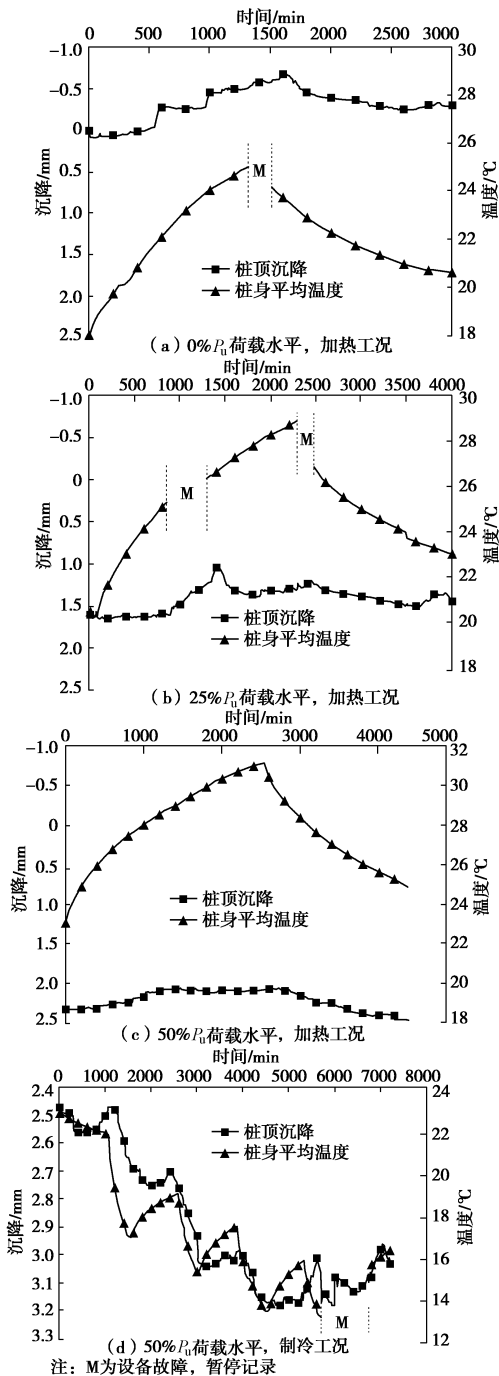


图 10 #55 能源桩桩顶位移 - 温度 - 时间过程曲线

Fig. 10 Displacement-temperature-time curves of energy pile No. 55

3 结 论

针对摩擦型灌注桩作为能源桩的一体化设计，在

桩内同步埋设了温度和钢筋应力传感器，开展了摩擦型能源桩在多级荷载水平（ $0\%P_u$ ， $25\%P_u$ ， $50\%P_u$ ）以及桩身加热与制冷等热交换工况下的荷载-温度联合测试，测试结果表明：

(1)地源热泵排热或取冷运行工况将引起的能源桩桩身温度变化，能源桩受热或受冷都将导致桩身产生附加温度荷载，其大小与温度变化基本呈线性关系。

(2)荷载与温度的耦合作用改变了摩擦型能源桩的荷载传递特征和承载性状。能源桩的桩身轴力和附加温度荷载分布特征和桩顶荷载作用、桩端约束有关。加热工况引起的桩身轴力增量甚至达到原桩身轴力的 2 倍以上。制冷工况下桩身下部会出现受拉荷载。

加热与制冷工况下，摩擦型能源桩的热胀冷缩均会导致桩身出现负摩阻力分布。加热工况下，摩擦型能源桩在桩身上部与中部等多处出现负摩阻力，但荷载的增加有利于减小温度引起的负摩阻力效应；制冷工况下，桩端附近产生负摩阻力，桩身上部侧摩阻力效应增大。

(3)荷载与温度耦合作用将引起摩擦型能源的桩顶位移变化，即桩顶在加热时隆起而制冷时下沉。加热工况引起的桩顶隆起在回温过程中基本可恢复，可忽略地源热泵排热工况对桩顶沉降的影响；但制冷过程中桩身温度降低会导致能源桩产生温度附加沉降，本文测试结果其增幅达到了设计荷载作用沉降值的 22.6%。

摩擦型灌注桩能源桩的多级荷载水平与不同换热工况的承载性状测试表明：能源桩温度变化的热胀冷缩效应，使得其荷载-温度耦合承载性状与荷载传递规律、桩顶沉降特征等已不同于单一荷载作用下的工程桩，是否会导致能源桩温度附加沉降的累积，是否影响上部结构的正常使用？还有待更深入的研究。因此，简单套用常规工程桩的设计方法，难以充分保证能源桩的安全性与经济性。

致 谢：现场测试得到了西安建筑科技大学硕士研究生黄芸，南京工业大学交通学院硕士研究生王彬彬、陈 根、徐新丽，城市建设学院硕士研究生陈艳秋、陈 曦等的协助与支持，一并致谢！

参考文献：

[1] 何满潮, 徐能雄. 地热能开发利用技术新进展与发展趋势[J]. 地 热 能, 2004(1): 7 - 15. (HE Man-chao, XU Neng-xiong. New progress and development trend of geothermal energy development and utilization technology[J]. Geothermal Energy, 2004(1): 7 - 15. (in Chinese))

[2] LUND J, SANNER B, RYBACH L, et al. Geothermal

- (ground-source) heat pumps—a world overview[J]. *GHC Bulletin*, 2004, **25**(3): 1 - 10.
- [3] BRANDL H. Energy foundations and other thermo-active ground structures[J]. *Géotechnique*, 2006, **56**(2): 81 - 122.
- [4] 徐伟. 中国地源热泵发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (XU Wei. Report on China ground-source heat pump[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [5] 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. (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. (in Chinese))
- [6] 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*, 2013, **35**(12): 1 - 7. (LIU Han-long, KONG Guang-qiang, CHARLES W W Ng. Review of the applications of energy pile and development of PCC energy pile technical[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(12): 1 - 7. (in Chinese))
- [7] 黄旭, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 循环温度场作用下PCC能量桩热力学特性模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, **36**(3): 667 - 673. (HUANG Xu, KONG Gang-qiang, LIU Han-long, et al. Experimental research on thermomechanical characteristics of PCC energy pile under cyclic temperature field[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, **36**(3): 667 - 673. (in Chinese))
- [8] 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 - 24.
- [9] ABDELAZIZ S L, OLGUN C G, MARTIN J R. Design and operational considerations of geothermal energy piles[C]// *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*. Dallas, 2011: 450 - 459.
- [10] 陈忠购, 赵石娆, 张正威. 内置并联U形埋管能量桩的换热性能研究[J]. *工程力学*, 2013, **30**(5): 238 - 243. (CHEN Zhong-gou, ZHAO Shi-rao, ZHANG Zheng-wei. Heat transfer analysis of energy piles with parallel connected u-tubes[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, **30**(5): 238 - 243. (in Chinese))
- [11] 仲智, 唐志伟. 桩埋管地源热泵系统及其应用[J]. *可再生能源*, 2007, **24**(2): 94 - 96. (ZHONG Zhi, TANG Zhi-wei. Energy pile geothermal heat pump system and its application[J]. *Renewable Energy Resources*, 2007, **25**(2): 94 - 96. (in Chinese))
- [12] 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.
- [13] BOUME-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.
- [14] 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 Test for structural responses of energy pile to heat exchanging process[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(6): 1087 - 1094. (in Chinese))
- [15] AMATYA B L, SOGA K, BOUME-WEBB P J, et al. Thermo-mechanical behaviour of energy piles[J]. *Géotechnique*, 2012, **62**(6): 503 - 519.
- [16] OUYANG Y, SOGA K, LEUNG Y F. Numerical back-analysis of energy pile test at Lambeth College, London[C]// *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*. American Society of Civil Engineers. Dallas, 2011: 440 - 449.
- [17] KNELLWOLF C, PERON H, LALOUI L. Geotechnical analysis of heat exchanger piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, **137**(10): 890 - 902.
- [18] SURYATRIYASTUTI M E, MROUEH H, BURLON S. Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, **16**(5): 3344 - 3354.
- [19] GASHTI E H N, MALASKA M, KUJALA K. Evaluation of thermo-mechanical behaviour of composite energy piles during heating/cooling operations[J]. *Engineering Structures*, 2014, **75**: 363 - 373.
- [20] JEONG S, LIM H, LEE J K, et al. Thermally induced mechanical response of energy piles in axially loaded pile groups[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, **71**(1): 608 - 615.
- [21] JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 2014. (JGJ 106—2014 Technical code for testing of building foundation piles[S]. 2014. (in Chinese))