

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.07.005

红黏土地层静压闭口管桩残余应力模型试验分析

王家全¹, 刘垒雷², 朱庆盛¹, 张昊¹

(1. 广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 在典型的上硬、下软红黏土地层中静压管桩滞留的残余应力对基桩承载特性有较大影响。通过自行设计模型试验设备进行红黏土地层单、群桩静压闭口管桩室内试验, 分析3种桩径下静压单、群桩残余应力的变化规律及时间效应。结果表明, 静压管桩桩身残余应力沿桩身从上到下先增大后变小, 呈折线型分布; 对于典型的红黏土上硬、下软地层, 桩端持力层位于硬塑层和可塑层时, 桩身和桩端残余应力均较小; 当管桩压入到基岩持力层后桩端约束增强, 桩身和桩端残余应力明显增大; 静压单桩完成后静置初期桩身残余应力时间效应比较明显, 减小幅度较大, 复压后而后随着休止时间的延长, 桩身残余应力呈指数型衰减至一较低稳定值; 静载试验时忽略残余应力就将认为整个桩身所受压力偏小, 偏大计算中性面以上侧摩阻力 7.97%, 偏小计算中性面以下侧摩阻力 8.33%和桩端阻力 2.29%。

关键词: 红黏土地层; 静压管桩; 残余应力; 群桩; 时间效应

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)07-1878-09

Experiment on residual stress of close-end pipe piles jacked into layered red clay

WANG Jia-quan¹, LIU Lei-lei², ZHU Qing-sheng¹, ZHANG Hao¹

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China;
2. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract: Residual stress along piles has a great influence on bearing capacity of pipe pile jacked into red clay with an upper soft layer and a lower harder layer. Using self-developed equipment, indoor model tests are conducted to measure close-end single pipe pile and pile group jacked into layered red clay foundation. The variation of residual stress of single pile and pile group and their time effect with three kinds of diameters are analyzed. The results indicate that the residual stress along pile shaft increases first and then decreases from top of the pile to the bottom. The distribution of residual stress shows a broken line. For a typical red clay foundation with a hard top layer soil and soft lower layer, the residual stresses at pile shaft and pile tip are much smaller when the bearing stratum is hard plastic red clay layer or the plastic layer. However, the residual stress will increase when the piles puncture into better bearing layer. In the early stage of completing jacking single pile, the time effect of residual stress at pile shaft performs significantly. The stress value decreases, and exponentially decays to a lower stable value after the single pile being re-pressed as the rest period keeps going. If residual stress being ignored, the pressure value at pile shaft gotten by static load tests decreases. In this test, more than 7.97% of pile side friction above neutral surface is predicted, while less than 2.29% of pile side friction and 2.29% of pile tip resistance below neutral plane is predicted.

Keywords: red clay foundation; jacked pipe pile; residual stress; pile group; time effect

1 前言

预应力混凝土管桩(PHC)以其承载力高、适应性强、生产工业化和施工速度快等优点成为广泛采用的一种桩基形式。采用静压法将管桩压入地基土预定位置, 完成静力沉桩过程, 卸除桩顶压桩力

后, 此时桩身弹性压缩变形由于桩周土的约束作用只有部分恢复, 滞留在桩上的相关应力即为施工残余应力^[1], 包括桩身残余应力、桩侧残余单位摩阻力和桩端残余应力, 其性状与沉桩土层紧密相关^[2]。施工残余应力对桩基承载力性状具有重要的影响^[3-4]。常规的静载荷试验在加载之前将测试仪器调

收稿日期: 2015-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51469005); 广西自然科学基金项目(No. 2015GXNSFAA139270, No. 2015GXNSFAA139257); 广西研究生教育创新计划项目(No. YCSZ2014200)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of China (51469005), the Natural Science Foundation of Guangxi Province of China (2015GXNSFAA139270, 2015GXNSFAA139257) and the Innovation Project of Guangxi Graduate Education (YCSZ2014200).

第一作者简介: 王家全, 男, 1981年生, 博士, 教授, 主要从事加筋结构、细观岩土力学、地基基础等方面的教学与研究工作。E-mail: wjquan1999@163.com

0, 认为桩身弹性变形已完全恢复, 这实际上忽略了施工残余应力^[5], 造成对桩的承载力性状认识误解。对于单桩竖向抗压静载荷试验, 忽略施工残余应力将偏大计算中性面以上侧摩阻力, 偏小计算中性面以下侧摩阻力及桩端阻力, 或将偏大计算桩侧摩阻力及偏小计算桩端阻力; 对于单桩竖向抗拔试验, 相应的结论也易推出^[6-7]。

Rieke 等^[6]、俞峰等^[8]都对砂性土中的 H 型钢桩进行现场试验观测残余应力, Liu 等^[9]通过在中密砂质粉土中进行开口 PHC 管桩足尺试验得到桩端残余应力, 其研究地质条件均为砂性土有别于复杂的红黏土。通过对残余应力研究现状总结发现, 大多学者研究残余应力主要集中于钢桩或砂土地基中, 对黏土地基混凝土管桩残余应力鲜有报道。此外, 相比大量的现场试验研究, 残余应力数值分析研究报道仅一例, 如郑刚等^[10]采用有限元法对静压桩的残余应力进行了数值模拟。

红黏土是特殊土的一种, 工程地质性质特殊, 红黏土地基表现出上硬、下软现象(即地表呈坚硬、硬塑状态, 向下逐渐变软, 成为可塑、软塑甚至流塑状态)^[11]。近年来管桩在红黏土地层得到了广泛应用, 在这种特殊的红黏土地质条件下采用静压管桩必然会受其影响而不同于一般地质桩基。目前, 基于红黏土地质管桩残余应力研究尚未见报道。对于施工残余应力的研究国外开展较早, 国内研究起步晚且报道不多。大多数研究人员主要通过现场试验对一般地质条件下的静压单根开口管桩残余应力加以分析研究, 而对复杂地质条件静压闭口群桩残余应力性状研究涉及甚少。

本文拟通过自行设计静压单群桩模型试验设备, 研究基于红黏土地层静压单、群桩施工残余应力变化规律, 揭示静压单、群桩残余应力力学响应及桩身残余应力群桩影响和时间效应, 试验结果可为红黏土地质条件下的静压桩设计与施工提供指导。

2 试验装置及试验内容

该静压管桩试验装置由模型箱、反力架、竖向加载系统和数据采集系统组成。

2.1 模型箱

如图 1 所示, 试验所用模型箱采用角钢作为骨架, 模型箱尺寸为 100 cm(L)×100 cm(W)×130 cm(H)。模型箱底部以及相邻两侧壁板采用厚 6 mm 的钢板, 其中下部钢板和角钢焊接固定, 上部钢板可活动抽出和安装, 抽出时可作为试验前、后期装卸土

进出窗口, 提高试验装卸土效率。模型箱另两相邻侧壁采用 12 mm 厚透明钢化玻璃, 作为沉桩观测窗口。模型箱底部角钢设有钢珠滚轮, 便于模型箱前、后移动以便改变压桩位置, 而加载系统可以左、右移动, 进而实现静压群桩目的。

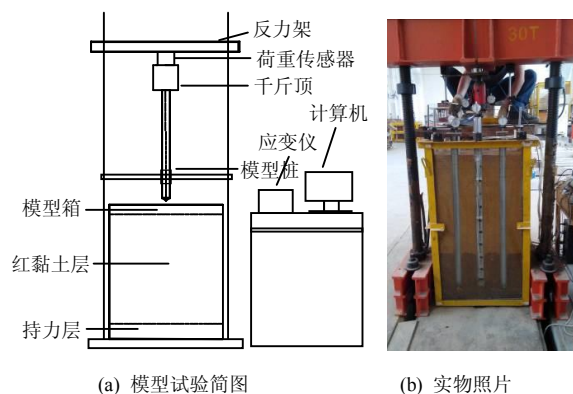


图 1 试验模型装置
Fig.1 Experimental setup

2.2 竖向加载系统

竖向加载系统采用反力架和千斤顶。反力架可上、下自由升降 3.0 m, 配套的两立柱固定在反力槽上; 通过开槽钢板卡住千斤顶的调节螺杆, 从而将千斤顶悬吊在反力架正下方, 并实现左、右位置可移动调节, 千斤顶顶端放置压力传感器, 加载过程中千斤顶推压模型桩入土。试验一次压桩行程设计为 10 cm, 以 2 cm/min 等速率沉入土体, 共分 11 次静压循环到达持力层; 为保证桩体垂直压入, 采用钢套管作为竖向导向装置, 确保整个沉桩加载过程稳定。

2.3 模型桩与数据采集

试验模型桩为半模桩、全模桩, 采用圆形铝管制作, 弹性模量为 70 GPa。模型桩的直径为 2.5、4.0、5.5 cm 3 种, 试验桩长为 130 cm, 入土深度为 110 cm。加工制作每一种直径半模铝管桩 3 根, 全模桩 6 根, 满足含 9 根桩的群桩数量要求。试验前将模型桩表面用砂纸摩擦, 以保证桩在贯入过程中与土有一定的摩擦力。通过电火花数控线切割机床沿其桩长方向对切两半实现半模桩制作。模型桩采用平底闭口型, 通过线切割加工同桩径的 3 mm 厚的圆形薄钢板作为桩底封口, 并通过环氧树脂 AB 胶粘贴封牢。试验模型桩实物图如图 2 所示。

在半模桩内壁粘贴应变片, 采集桩身应变数据。静压沉桩过程中压力传感器、模型桩桩身应变数据均采用静态应变仪记录量测。模型桩压入及桩顶卸

荷整个过程中,应变仪自动定时采集应变读数,并通过如下公式及压力传感器标定曲线将应变值换算为静压桩残余应力和压桩力。

$$T_i = E\varepsilon_i, Q_i = E\varepsilon_i A \quad (1)$$

式中: T_i 为桩身残余应力 (kPa); Q_i 为桩身残余轴力 (N); E 为桩弹模 (kPa); ε_i 为模型桩内壁最底端开始依次编号为 1、2... i 的应变片数值; A 为桩身横断面积。

$$q_s = (Q_{i+1} - Q_i) / A_s, q_{(i+1)-i} = Q_{i+1} - Q_i \quad (2)$$

式中: q_s 为桩侧残余单位摩阻力 (kPa); $q_{(i+1)-i}$ 为桩侧残余摩阻力 (N); A_s 为桩侧表面积。

$$f \approx T_1, F \approx Q_1 \quad (3)$$

式中: f 为桩端残余应力 (kPa); F 为桩端残余阻力 (N)。



图2 模型桩实物图及应变片布置 (单位: cm)
Fig.2 Model piles and strain gauges (unit: cm)

2.4 试验土样及制备

根据柳州市多个典型红黏土地质施工勘察报告及《工程地质手册》^[11]发现,红黏土地层主要表现为上硬、下软的典型结构,即地层上部主要为坚硬、硬塑状红黏土,厚度约占地层总厚度 70%~75%,含水率为 32%~38%;下部主要为可塑、软塑红黏土,约占土层厚度的 25%~30%,含水率为 41%~46%。因此,本次试验的红黏土层总厚度为 110 cm,上部硬塑红黏土约占总厚度的 70%即 75 cm,下部软塑红黏土厚度约占总厚度的 30%即 35 cm,相应含水率分别确定为 35%和 45%。试验模拟红黏土地层详细物理特性参数见表 1。所用试验土样取自柳

州某正在进行基坑土方开挖的典型红黏土地场,模拟地层①、②土样均取自实际现场对应地层中的硬塑和可塑红黏土土样。试验土样取回后经过平铺晾干、粉碎、加水搅拌、分层填筑、加压固结等过程。管桩桩端持力层采用水泥红黏土模拟桩端基岩,层厚为 15 cm,水泥红黏土养护 60 d 后使用,通过无侧限抗压试验确定其强度为 1.8 MPa,可满足桩底持力层强度要求。

表1 试验各土层物理特性参数指标

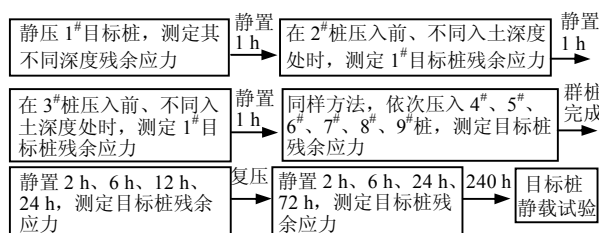
Table 1 Physical property index for each testing soil layer

土层类别	状态	层厚 /cm	含水率 /%	重度 /(kN/m ³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
①层红黏土	硬塑	75	35	18.1	47	13.0
②层红黏土	可塑	35	45	17.9	32	10.0
③层水泥红黏土		15		21.0		

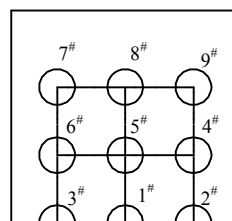
2.5 试验内容

图3为试验流程及压桩顺序布置图。由于压桩数量较多,试验中管桩按直径由小到大依次分为 A、B、C 3 类,分别对应桩径为 2.5、4.0、5.5 cm,压桩顺序以阿拉伯数字表示,桩间距取为 3 倍桩径,如 B3#桩为直径 4.0 cm,第 3 根压入桩。

试验研究分两部分。(1)静压闭口单桩试验,研究 3 种不同桩径管桩在不同压桩深度(即不同桩长)工况的残余应力变化规律;(2)静压闭口群桩试验,研究静压群桩引起的挤土作用对残余应力的影响,其压桩顺序布置如图 3(b)所示。试验过程中,记录好应变、应力及桩顶位移情况。



(a) 试验流程



(b) 压桩顺序

图3 试验流程及压桩顺序布置图

Fig.3 Testing flow chart and the order of jacked piles

3 试验结果分析

3.1 静压沉桩阻力

图4为3种不同直径目标桩(即A1[#]、B1[#]、C1[#])压桩力随贯入深度变化曲线。由图可以看出,3种不同直径试验压桩力曲线变化规律大致相同。在进入硬塑土层20 cm范围内,压桩力稳定在某一定值,分析其原因可能为压桩初始阶段试验土层上部发生轻微隆起以及压桩偏心因素使桩身产生横向晃动等造成桩土接触不紧密,甚至在桩土间形成间隙导致该段桩侧摩阻力非常小,可认为压桩力的变化主要由端阻力引起的。而后压桩力随入土深度增加而不断增大,在距离可塑土层约2D(D为桩径)即入土深度约为70 cm时发生急剧减小,进入可塑土层后压桩力开始缓慢增加,可见在软土层中静压压桩沉桩过程中,端阻力占沉桩阻力比例较小,摩阻力的增加是其压桩力增大的主要原因。在桩端距离持力层3D左右深度时,压桩力开始迅速增加至最大值。该3个目标桩A1[#]、B1[#]、C1[#]桩入土深度均为110 cm,终止压桩力分别为850、1 700、2 800 N。

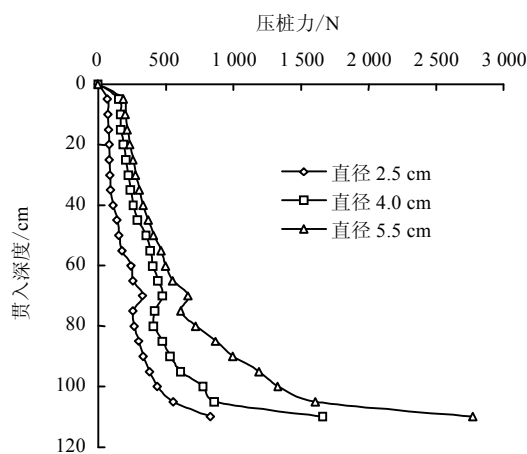


图4 3种不同直径目标桩压桩力随深度变化图

Fig.4 Piling pressure variation with piling depth of three different diameters piles

3.2 静压闭口单桩残余应力分析

图5为3种桩径的目标桩桩身残余应力随压入深度变化曲线,桩身残余应力均为压应力。由图可知,红黏土地层静压桩桩身最大残余应力大小在硬塑层和可塑层中(未压到持力层)随入土深度变化不大,在桩端持力层处达到最大。选择3个不同深度,即分别为入土50 cm(硬塑层)、80 cm(可塑层)、110 cm(持力层)处残余应力为分析对象,其大小为桩顶完全卸荷后读取的瞬时值,可见,在

压入到该3个土层部位时,桩顶卸荷后有残余应力滞留于桩身上,土层表面下10 cm范围内桩身残余应力为0,其原因应是在压桩初期对桩身对中调直时左右轻微晃动导致该段土层与桩身未形成良好嵌固约束。然后,随着桩身截面位置下移,该截面的桩身残余应力开始逐渐增大至某一最大值后又缓慢减小到一定值(即桩端残余应力),呈折线形分布,图中应力值最大点即为折线拐点,同寇海磊等^[12]静压PHC管桩和俞峰等^[8]静压H型钢桩试验得到的残余应力折线型分布模型基本一致。图5中拐点以上折线斜率值大小比拐点以下折线要大,反映出桩侧摩阻力大小不同,斜率越大,摩阻力越大,这与实际上部硬塑土层摩擦强度较大相符合。

由图5还可以看出,3种桩径的管桩压入50、80 cm处时桩身最大残余应力大小接近,而在110 cm处明显较大。以B1[#]桩为例,压入50、80 cm时桩身最大残余应力较接近,分别为140、180 kPa,可见随着压入深度的增加桩身最大残余应力增加量很小,累积效应较弱,而在压入110 cm时为440 kPa,分别为50、80 cm处的3.14倍和2.44倍,模型桩在压入桩端持力层后桩身残余应力明显增大。分析上述结果主要原因是与本试验土层性质有关,上层为强度较大的硬塑层,下层为较弱的可塑层,入土50、80 cm时桩端分别位于硬塑层和可塑层,前者与后者相比,桩身上部受约束深度范围较小,因而对桩体上身回弹束缚能力也较弱,但桩端持力层强度比后者较大,因而其限制桩端回弹能力较强,当桩侧土和桩端土综合作用时,二者受约束条件相似,从而造成从50~80 cm时最大残余应力变化量很小;模型桩压入到110 cm处后,由于水泥红黏土持力层强度大受压变形小、桩身上部土层约束深度区域达到最大,因此,桩顶卸荷瞬时桩身恢复变形较小,桩身残余应力较大。与寇海磊等^[12]静压PHC管桩桩身残余应力深度累积效应显著(即桩身残余应力随入土深度的增加变大明显)有所不同,主要原因是其试验土层从上到下强度是逐渐增大的,桩周土约束能力是增强的,而本次试验土层为上强下弱。可见桩身残余应力与桩周土性状紧密相关,即桩端上部土层和桩端土分别能提供较大的摩擦力和抗压承载力,则桩身残余应力越明显,桩端残余应力和桩侧残余摩阻力亦如此,可以推测,对于纯端承型桩由于上部土层对其几乎没有摩擦力,自然也没有残余应力。

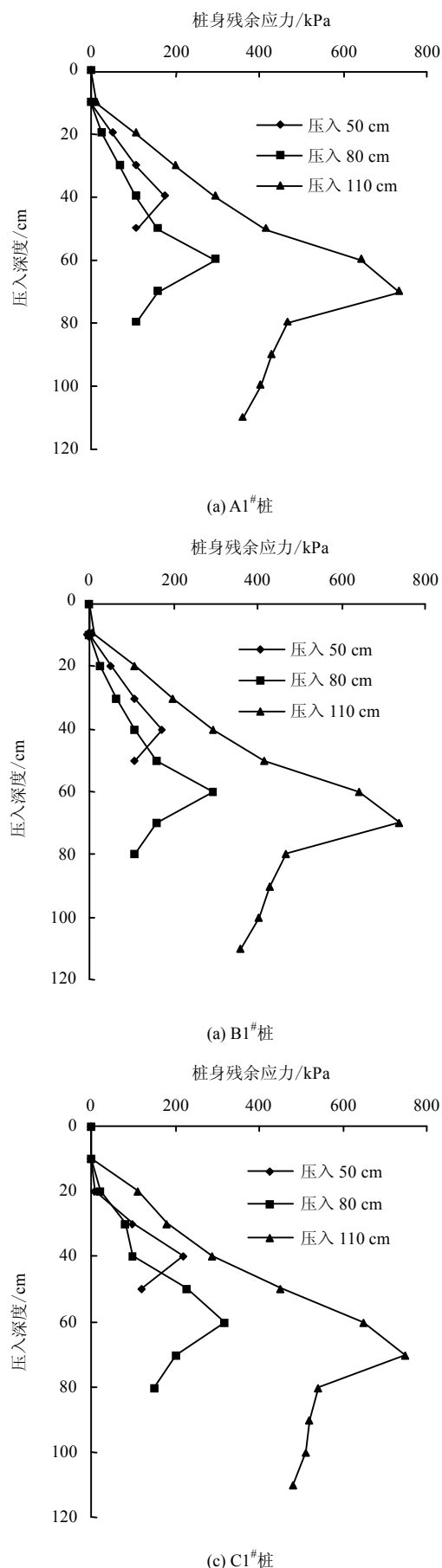


图5 不同直径桩身残余应力随压桩深度变化曲线

Fig.5 Residual stress variation curves with piling depth of different diameters piles

通过对上述3种桩径的桩身残余应力比较分析可知,各直径桩的桩身残余应力分布趋势基本一致,不同压桩深度处桩身残余应力变化不同:桩端位于硬塑层或可塑层中同一深度时,桩身残余应力随着桩径的增大变化不大;压到持力层位置时,桩身残余应力随着桩径增大而明显变小,但计算发现,桩身残余轴力是变大的,此现象与桩径越大桩身残余应力愈小规律并不矛盾,这是因为桩身横截面积的不同。如桩端在入土深度为80 cm处的可塑层中,目标桩A1[#]、B1[#]、C1[#]桩身最大残余应力分别170、170、160 kPa,随着桩径的改变残余应力变化很小;而桩端压到110 cm深的持力层后,A1[#]、B1[#]、C1[#]桩身最大残余应力依次为460、410、360 kPa,其随桩径的变大残余应力明显变小,而对应的桩身残余轴力分别为40.6、71.3、115.2 N,桩径越大相应的桩身残余轴力也越大。由上述现象可知同种地质条件下桩身残余应力对小桩径的静压桩承载力性状影响较大。

3.3 桩身残余应力群桩及时间效应影响分析

3.3.1 群桩压入过程中桩身残余应力变化

已有研究发现,静压群桩特别是闭口型管桩时,邻桩的沉桩挤土作用会对周围土体造成水平位移、竖向隆起和沉桩结束后桩周土的触变恢复性、固结作用等分别使先压入桩的承载力会有一定程度减小和提高,由此可知,随时间推移和邻桩依次压入等因素必然会对先沉入桩的桩身残余应力产生一定的影响。限于篇幅,本文以静压直径为4 cm的9根群桩为例来阐述群桩及时间效应对桩身残余应力的影响规律,而桩端及桩侧残余摩阻力可由桩身残余应力间接得出。

图6为依次静压同直径的群桩过程中B1[#]目标桩桩身残余应力变化曲线。可以看出,B1[#]目标桩压入110 cm桩底处完全卸荷后桩身残余应力值较大,在开始压入B2[#]桩前时刻,目标桩已静置一段时间(约为1 h,主要是B2[#]桩准备时间),该时刻的目标桩桩身残余应力减小很多,可见在压桩结束后休止初期桩身残余应力减小幅度较大。在图6(a)中B2[#]桩压入30 cm(约1/3桩长,硬塑层内)处时,残余应力变化不大略有减小,压到75 cm处(约3/4桩长,可塑层内)时残余应力减小量增大、压到110 cm桩底处减小量又变小。分析其主要原因是B2[#]桩压入30 cm时产生的挤土上隆位移很快就能释放在土层表面及目标桩上部桩土之间缝隙内,对目标桩残余应力影响很小;B2[#]桩压入75 cm时,桩身挤压土层为全部硬塑层,下部土层产生的水平、竖向挤土位移将对目标桩产生一个上拔力,桩侧土位移相对

桩身开始向上, 即桩侧负摩阻力开始被抵消并逐渐转为正摩阻力趋势, 因此, 桩身残余应力减小幅度很大, B2[#]桩压入 110 cm 时, 桩身增加的挤压土层为全部可塑层, 可塑层的挤压变形位移能力较硬塑层小, 新增上拔力较小使得目标桩桩身残余应力减小不多。

同样, 在图 6(b)中 B3[#]桩开始压桩之前和压入 30 cm 时, 目标桩桩身残余应力均有一定变小, 减小量不大, 当入土达到 75 cm、110 cm 后, 与 B3[#]对称的已压入桩 B2[#]在另一侧起着“顶档”作用, 共同对目标桩挤土上拔, 而目标桩桩身残余应力减小到比较低的水平。

在图 6(c)中 B4[#]桩在压入 30 cm 之前, 目标桩桩身残余应力减小量不大, 当其压入 75 cm 处后,

桩侧上部负摩阻力已转为正值, 桩身残余应力开始转为拉应力变成负值, 桩身下部压到桩端持力层后, 负的桩身残余应力进一步扩大, 约在桩身 70 cm 位置处应力值达到最大, 由分析可知, 在此位置上部, 桩身受到桩侧土产生的正摩阻力作用表现受拉, 下部土层由于上部土层的约束对桩身下部产生一个很大的水平应力而紧握桩体, 在上部土层正摩阻力上拔桩体条件下, 桩身下部受到向下的负摩阻力也受拉, 而桩端残余应力几乎为 0。读取安装在桩顶上的百分表读数, 发现已有 0.20 mm 的上浮量并还有缓慢增大趋势, 说明整个目标桩还处于竖向上浮状态, 可以推测, 目标桩本身因受力不平衡而受到一个向上的合力作用而上浮, 直到桩周土应力释放一定值后桩体受力平衡而稳定。

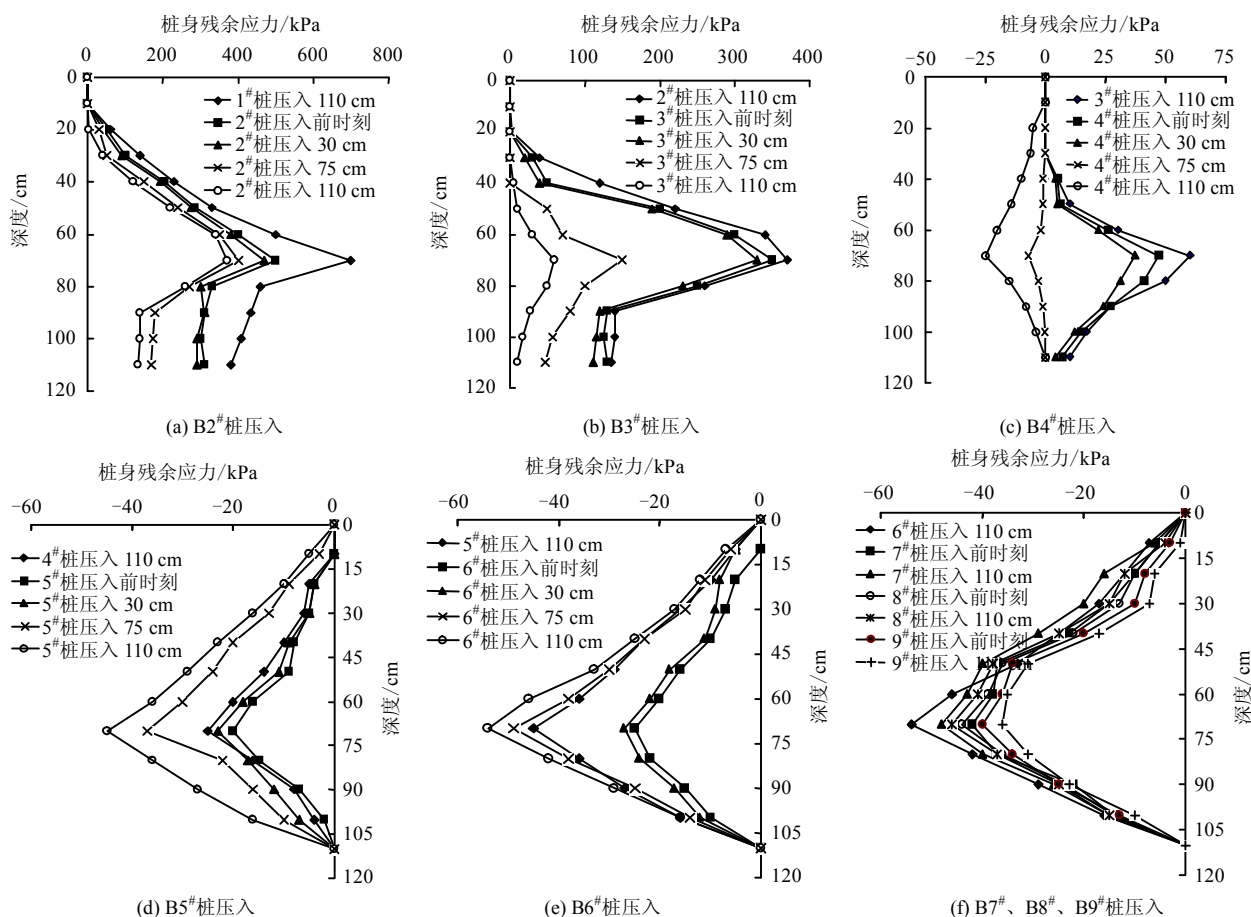


图 6 群桩依次压入时 B1[#]目标桩桩身残余应力变化图

Fig.6 Residual stress variation curves of goal pile #B1 while jacking the group piles in turn

依次静压 B5[#]、B6[#]桩时, 见图 6(d)和图 6(e), 虽然在静置期, 目标桩的桩身残余应力仍有一定程度变小, 在两个静置期减小幅度分别约有 25%、50% (选用桩身最大残余应力值计算得到, 下同), 时间效应比较明显, 由于试验压桩第 1 d 只压入了 5 根桩 (由于光线原因夜间停止试验, 保证试验准确

性), 再静压 B6[#]桩时中间已静置时间有 12 h, 故在这个静置期桩身残余应力减小幅度比较大。但当它们压入土体中, 连同先压入的 B2[#]、B3[#]、B4[#]桩对目标桩 B1[#]进行包围, 挤土效应更为明显, 目标桩负的桩身残余应力不断积累。在 B5[#]、B6[#]压到持力层比开始压之前目标桩桩身残余应力大小增加幅

度分别有 80%、115%，目标桩一直处于被上抬状态，两根桩压入前、后上浮总量分别为 0.38 mm、0.60 mm。

而当 B7[#]、B8[#]、B9[#]桩依次压入过程中（见图 6(f)），目标桩桩身残余应力值呈缩小趋势，分析原因主要是先压入桩（B4[#]~B6[#]）对后压入桩存在一个遮帘作用，并且，B7[#]~B9[#]桩与目标桩的桩间距也较远（ $\geq 6D$ ），造成对目标桩的挤土效应影响较弱，桩周土应力随时间消散的速度大于再挤土产生的。静压 4 cm 直径 9 根群桩完成 24 h 后，监测结果表明，目标桩的桩身残余应力前 2 h 快速衰减，然后一直缓慢变小，24 h 后桩身残余应力几乎为 0，此时，B1[#]桩身总上浮量也达到 0.70 mm，且趋于稳定。此外，其他相对较先压入桩也有不同程度地上浮，鉴于群桩有普遍上浮现象，决定采用复压的方法消除上浮问题，从而保证桩基承载力符合要求。下文就复压后目标桩桩身残余应力时间效应加以探讨分析。

3.3.2 复压后桩身残余应力时间效应

图 7 为静置期间直径 B1[#]目标桩复压前、后桩身残余应力变化情况。由图可知，群桩压完结束 24 h 后 B1[#]目标桩桩身残余应力几乎为 0。其原因可能是桩身上浮量比较大，桩身自身回弹恢复较快，桩周土挤土应力不断消散。复压时稳压 5 s，其压桩力沉桩终止压桩力大小相同，可以看出，复压后目标桩桩身残余应力卸载瞬时值迅速增大，且计算发现，比最初压入结束时大小有一定提高。分析其原因，对于含水率较大的红黏土地层在压桩初期产生了超孔隙水压力。图 8 显示目标桩底端已积蓄约有 3 cm 深的水，可以推测，随着静置时间的延长，超孔隙水压力逐渐消散并通过桩与模型箱内壁缝隙渗透到管桩内部，尽管这种现象与实际（一般可能从桩端渗入到内部）有差别，但对试验结果并无多大影响，这样就使得桩周土体重新再固结，黏聚力恢复，其抗剪强度逐渐增大，因此桩身约束能力提高。如图 7(b)所示，复压结束 2 h 后，B1[#]目标桩桩身残余应力减小幅度较大，随后在静置 24 h 段内，残余应力仍有不同程度减小，但减小速度变缓，72 h 后残余应力开始趋于稳定在一个较低水平，此时桩身上浮量为 0.02 mm，上浮量不明显，由此可知，桩土作用体系处于相对平衡状态。

选取 B1[#]目标桩桩身最大残余应力和桩端处残余应力为研究分析对象。图 9 为 B1[#]目标桩复压后桩身中性点和桩端处残余应力变化情况。在静置初期残余应力急剧减小，后期减小速度放缓，在趋于

稳定时，桩身最大残余应力和桩端残余应力降低幅度分别高达 85.8%、86.3%，降幅明显，二者随时间变化规律基本一致。对其回归曲线拟合分析，如图 9 所示，由图可知，复压后的桩身残余应力呈指数型衰减模式变小。

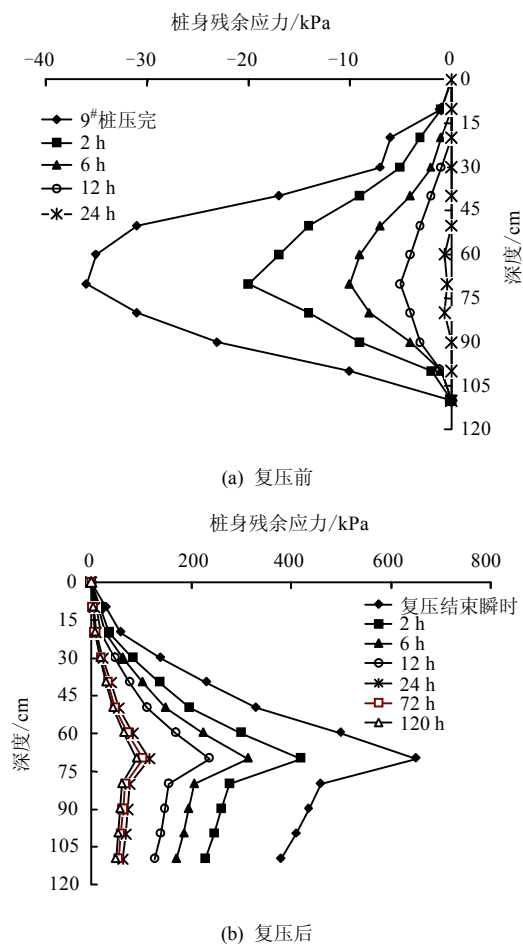


图 7 B1[#]目标桩复压前后桩身残余应力变化情况
Fig.7 Residual stress variation curves of goal pile #B1 before and after being re-pressed



图 8 桩端孔隙水渗入情况
Fig.8 Infiltration of pore water around pile tip

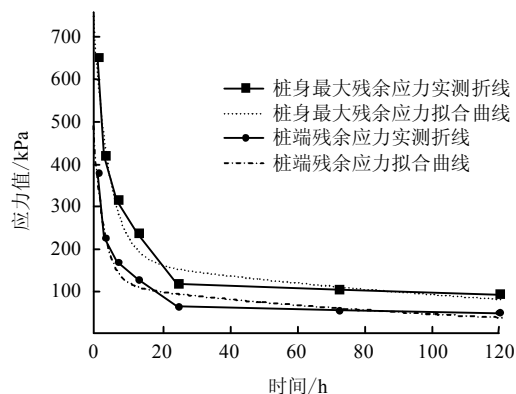


图9 复压后静置期间 B1[#]目标桩桩身中性面和桩端处残余应力变化情况

Fig.9 Variation curves of residual stress at pile neutral surface and pile tip of goal pile #B1 after being re-pressed

3.3.3 残余应力对桩的承载力性状影响

B1[#]目标桩复压结束休止 240 h 后, 其桩身残余应力值较稳定地处于一较低水平, 认为桩周土再固结基本完成, 可以对其进行竖向抗压静载试验。采用慢速维持荷载法加载, 加载力的大小通过压力传感器实时反馈获知, 沉降量由安装在桩顶上的两个百分表平均计算得出。静载试验每级加载 200 N, 分 10 级加载, 最大加荷载量 (2 000 N) 为终止压桩力的 1.17 倍, 此时桩顶沉降量为 0.86 mm, 前几级加载沉降变化微小, 最后一级沉降突增 0.5 mm, 卸荷后桩顶沉降值为 0.68 mm, 发现桩体中部已发生轻微挠曲, 判断桩体破坏。为研究残余应力对桩基承载力性状影响规律, 图 10、11 分别给出了 B1[#]桩达到单桩竖向抗压极限承载力值时桩身应力和桩侧摩阻力分布图, 显示了忽略和不忽略静载前残余应力影响时桩身受力差异。由图可以看出, 桩身残余应力对桩身受力性状影响是存在的。桩身残余应力均为压应力, 整个桩身类似被施加了预应力, 不考虑它整个桩身所受压力偏小; 而对于桩侧残余摩阻力, 桩侧中性面以上为负, 以下为正, 桩端残余阻力也为压应力, 忽略残余摩阻力和残余端阻力, 就会偏大估计桩侧上部摩阻力和偏小估计桩侧下部摩阻力 (或偏大估计整个桩侧摩阻力), 桩端阻力也被偏小估计。对于 B1[#]桩, 忽略桩身残余应力将偏小估计中性面处的桩身应力 3.46% 和桩端残余应力 2.33%, 或偏大估计中性面以上侧摩阻力 7.97%, 偏小估计中性面以下侧摩阻力 8.33% 和桩端阻力 2.29%。以上分析只是针对抗压桩, 同理, 对于抗拔桩相对应的结果易分析得出。因此, 正视残余应力的存在, 对桩的实际受力性状认识更为全面, 进而对桩基的优化设计及施工具有积极的指导作用。

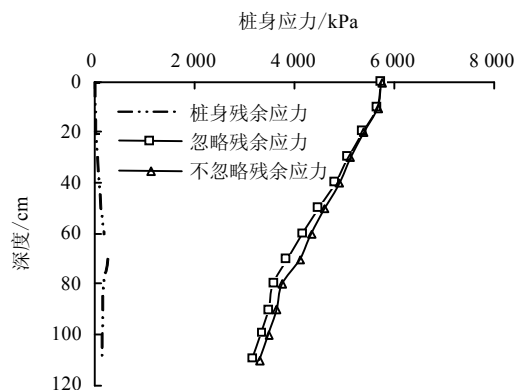


图10 竖向抗压承载力极限值时桩身应力分布
Fig.10 Distributions of stress in pile shaft as the vertical compressive bearing capacity reaches its limit

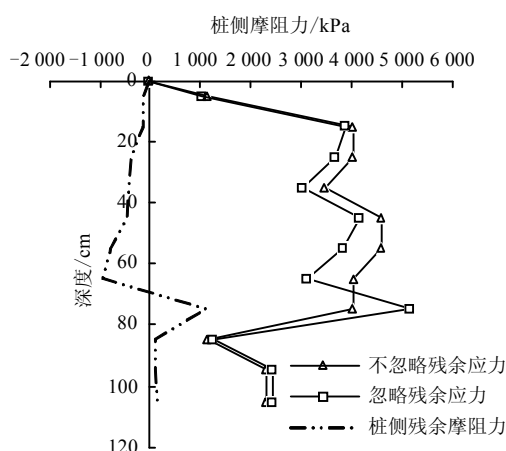


图11 竖向抗压承载力极限值时桩侧摩阻力分布图
Fig.11 Distributions of pile side friction as the vertical compressive bearing capacity reaches its limit

4 结 论

(1) 对于典型的红黏土上硬、下软地层, 桩端持力层位于硬塑层和可塑层时, 管桩受到土层约束不大, 桩身残余应力增加变化不大, 桩端残余应力数值亦较小; 当管桩压入到基岩持力层后桩端受约束嵌固增强, 桩身、桩端残余应力均明显增加。

(2) 相同地质条件下, 静压管桩达到桩端持力层后, 桩径越小, 桩身残余应力越大; 未压到持力层时, 残余应力与桩径关系不大, 其数值均较小。

(3) 静压群桩过程中, 随着邻桩入土深度的增加, 使得先压入的目标桩桩身残余应力不断减小, 直到改变方向增大至一较大值, 桩体因此受力不平衡而产生上浮。

(4) 静压单桩完成后静置初期桩身残余应力时间效应比较明显, 减小幅度较大, 后续群桩压入过程中各个静置期内, 桩身残余应力均有不同程度减小, 群桩压完结束后, 由于上浮量的持续增大, 残余应力不断减小接近 0 值。

(5) 静置期间桩周土体再固结, 桩周约束增强, 复压后目标桩桩身残余应力比刚最初压入结束时值大小有一定提高。随着休止时间的延长, 桩身残余应力呈指数型衰减模式至较低稳定值。

(6) 忽略残余应力就会对桩身受力性状造成认识偏差。对于 B1[#]桩, 忽略桩身残余应力将偏小估计中性面处的桩身应力 3.46%和桩端残余应力 2.33%, 或偏大估计中性面以上侧摩阻力 7.97%, 偏小估计中性面以下侧摩阻力 8.33%和桩端阻力 2.29%。

(7) 影响静压管桩残余应力因数很多, 除桩径、桩长、桩周土性质, 还有压桩速率、压桩顺序、桩型和桩间距等。由于室内模型试验尺寸较小、重塑土物理力学性质发生改变等原因, 本文只是基于室内模型试验总结出静压单群桩残余应力一般变化规律, 有待于实际现场的进一步检验。

参考文献

- [1] 俞峰, 谭国焕, 杨峻, 等. 粗粒土中预制桩的静压施工残余应力[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1527—1536.
YU Feng, THAM Leslie George, YANG Jun, et al. Post-installation residual stresses in preformed piles jacked into granular soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(12): 1527—1536.
- [2] FELLENIUS B H. Determining the true distributions of load in instrumented piles[J]. **American Society of Civil Engineers**, 2014: 1455—1470.
- [3] POULOS H G. Analysis of residual stress effects in piles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 113(3): 216—229.
- [4] FELLENIUS B H, ALTAE A A. Critical depth: How it came into being and why it does not exist[J]. **Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering**, 1995, 113(2): 107—111.
- [5] POULOS H G. Analysis of residual stress effects in piles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 113(3): 216—229.
- [6] RIEKE R D, CROWSER J C. Interpretation of pile load test considering residual stresses[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1987, 113(4): 320—334.
- [7] POULOS H G. Analysis of residual stress effects in piles[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 113(3): 216—229.
- [8] 俞峰, 谭国焕, 杨峻, 等. 静压桩残余应力的长期观测性状[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2318—2324.
YU Feng, THAM Leslie George, YANG Jun, et al. Observed long-term behavior of residual stress in jacked pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(8): 2318—2324.
- [9] LIU J, ZHANG Z, YU F, et al. Case history of installing instrumented jacked open-ended piles[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, 138(7): 810—820.
- [10] 郑刚, 张文超. 静压桩残余应力数值模拟及其对桩承载性状影响分析[J]. 建筑科学, 2007, 23(7): 20—23.
ZHENG Gang, ZHANG Wen-chao. Numerical simulation of the residual stress for jacked pile and its effect on the pile bearing capacity[J]. **Building Science**, 2007, 23(7): 20—23.
- [11] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
The committee of China Geological Handbook. China Geological Handbook[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [12] 寇海磊, 张明义, 白晓宇. 层状地基中 PHC 管桩的静压残余应力试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1328—1336.
KOU Hai-lei, ZHANG Ming-yi, BAI Xiao-yu. Field performance of residual stresses in jacked PHC pipe piles in layered ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(7): 1328—1336.
- [14] XIAO Y, LIU H L, DESAI C S. New method for improvement of rockfill material with polyurethane foam adhesive[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, ASCE, 2015, 141(2): 02814003.
- [15] 南京水利科学研究院. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
Nanjing Hydraulic Research Institute. SL237-1999 Specification of soil test[S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999.
- [16] 中华人民共和国建材行业标准. JC 936-2004 单组分聚氨酯泡沫填缝剂[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2004.
People's Republic of China Building Materials Industry Standard. One-component polyurethane foam[S]. Beijing: China Building Materials Press, 2004.
- [17] 沈珠江, 徐刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学研究, 1996, 2: 143—150.
SHEN Zhu-jiang, XU Gang. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading[J]. **Hydro-Science and Engineering**, 1996, 2: 143—150.

上接第 1868 页