

# 红粘土地质开口管桩上浮特性的模型试验<sup>\*</sup>

王家全,叶斌,黄柳云,张昊

(广西科技大学 土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006)

**摘要:**针对红粘土上硬下软地层中开口管桩上浮问题,分别进行了三类不同桩径的开口管桩室内沉桩模型试验,研究单桩和群桩静压沉桩试验中上浮量变化规律和土塞效应对开口管桩上浮的影响。结果表明:单桩上浮量主要由静压沉桩引起的管桩弹性压缩经卸荷回弹产生的变形提供;群桩静压上浮与施工顺序、桩间距以及位置有关,先压入的管桩上浮量大于后压入的管桩上浮量,且先压入桩的上浮速度随着后压入桩的桩间距减小而增加;桩位对桩上浮的影响强度顺序由高到低依次是中心桩位、边桩位、角桩位;当开口管桩从硬塑层压入至可塑层一定深度后,由于土塞完全闭塞的影响,导致挤土效应增强,有别于闭口管桩静压至在软硬交界面处出现的短暂上浮量增长休止的状况,开口管桩群桩挤土上浮量表现出显著上升趋势。

**关键词:**红黏土地层;开口桩;土塞效应;模型试验

中图分类号:TU473.1

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)05-1226-08

## Model Test Research on Open-ended Pipe Pile Floating in Red Clay Geology

Wang Jiaquan, Ye Bin, Huang Liuyun, Zhang Hao

(College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, P.R. China)

**Abstract:** In order to solve the floating problem of open-ended pipe piles in the red clay layer that is hard in upper part and soft in lower part, three groups of indoor pile-sinking model tests were carried out on open-end pipe piles of different diameters, and the change rule of floating quantity and the effect of soil plug effect on the floating of open-ended pipe pile in single pile and group pile static pressure pile driving test was studied. The results show that the floating volume of single pile is mainly provided by elastic compression of pile under static pressure and unloading rebound. The floating of the pile group static pressure is related to the construction order, the pile spacing and the position of pipe pile. The floating amount of the first pressed pipe pile is greater than that of the post pressure pipe pile, and the upward floating velocity of the first pressed pile increases with the decrease of the pile spacing of the post pressure pile. The order of the influence of the pile position on the floating of the pile is the center pile position, the side pile position and the angle pile position. When the open-ended pile group is pressed from the hard plastic layer into the plastic layer, the squeezing effect enhanced due to the soil plug closed, and the floating amount of open-ended pile had a significant upward trend, which was different from the closed-ended pile group whose floating growth would temporarily stop.

**Keywords:** red clay soil layer; open-ended pile; soil plug effect; model test

<sup>\*</sup> 收稿日期:2018-03-29(修改稿)

作者简介:王家全(1981-),男,广西南宁人,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

基金项目:国家自然科学基金(51469005);广西自然科学基金(2015GXNSFAA139257, 2015GXNSFAA139270, 2017GXNSFAA198170);广西研究生教育创新计划项目(YCSW2018201)

## 0 引言

随着社会的发展,城市化逐渐加剧,城市地下空间的开发和利用显得尤为重要,而预应力高强混凝土管桩(PHC管桩)作为桩基础形式的一种,越来越多地应用于地下空间工程的桩基础,其有诸多优点,如高承载力、强适应性、短周期施工等。但在沉桩过程中,因挤土作用使桩体受到向上的挤拉力,导致先行施工的管桩产生上浮现象,桩上浮后会对其自身承载性能和后期施工的进度控制产生极大的不利影响,这引起了工程界的高度重视<sup>[1-3]</sup>。张忠苗等<sup>[4]</sup>对温州某广场的管桩浮桩问题进行分析,发现在软土地基中桩上浮对桩周土体的扰动导致桩侧阻、端阻严重下降,即承载力降低。

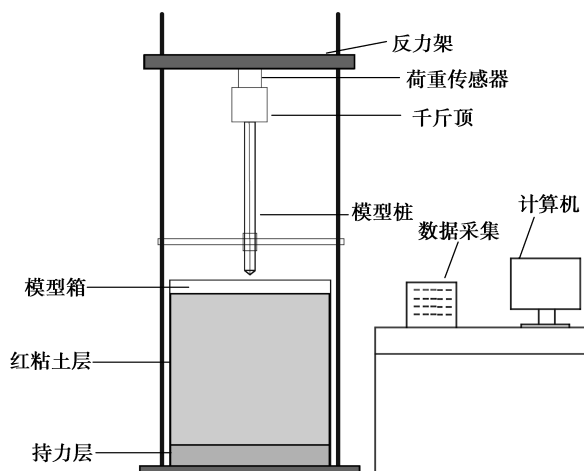
针对这一问题,目前国内外专家从室内试验、工程实例以及数值模拟等方面对桩上浮机理进行了分析。桩上浮的过程即是桩周土体受力运动的过程<sup>[5]</sup>。朱奎等<sup>[6]</sup>根据温州某工程分析桩的上浮机理,并得知桩上浮与桩周土压缩模量、桩日施工数量有关。Poulos<sup>[7]</sup>对在软粘土中对压桩使桩周土体水平和垂直位移,进而引起邻桩产生轴向力和弯矩做了理论分析,并通过模型试验对其影响因素(桩间距、邻近桩贯入深度、桩数)进行研究。Rehkopf<sup>[8]</sup>对东波士顿的某工程运用浅应变路径法对压桩导致周围土体位移进行预测。Massarsch和Wersäll<sup>[9-10]</sup>提出一种计算方法估计压桩导致累积侧向位移量,并运用有限元分析、模型和现场试验进行验证,发现压桩顺序影响土体位移方向。

由于各地区的地质多样性,影响管桩上浮因素也不完全相同。尤其红黏土地层更为特殊,较其他土层有着显著区别,其土层特征上硬下软。虽然笔者已对红黏土地层的闭口管桩上浮机理及规律进行了相关初步分析<sup>[11]</sup>,但由于开口管桩存在土塞效应,其受力与上浮机理与闭口管桩存在差异;同时对比开口管桩与闭口管桩,由于开口桩造价及等截面积桩体沉降小等优点<sup>[12]</sup>,近年来开口管桩在红黏土地层应用更为广泛。本文通过室内开口管桩试验,模拟开口管桩沉桩过程,研究红黏土地层开口管桩的上浮规律和影响因素,为相关桩基工程设计与施工提供有益参考。

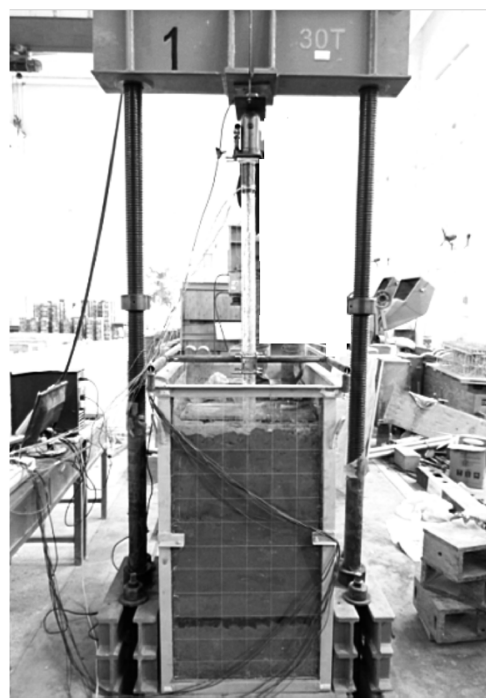
## 1 试验模型

该静压管桩试验装置由4个部分组合而成,分

别为模型箱、反力架、竖向加载系统和数据采集系统组成,如图1所示。



(a) 试验模型装置简图



(b) 试验模型装置实景图

图1 试验模型装置

Fig.1 Test mode device

### 1.1 模型箱

模型箱骨架材料为角钢,其尺寸为60 mm×60 mm×6 mm,箱体长宽高尺寸分别为100 cm、70 cm、130 cm。为填筑土层的精度和试验观察,将模型箱两个相邻的侧面用钢化玻璃制成,其他两个侧面和底面均用钢板焊接制成。钢板与角钢的贴合处采用防水橡胶密封,钢化玻璃与角钢的贴合处涂抹玻璃防水胶粘接。

## 1.2 模型桩

本次试验中,模型桩的直径分为 4.0 cm、6.0 cm、8.0 cm 三种,试验前将模型桩表面用砂纸打磨,以保证桩在贯入过程中与土有一定的摩擦力,从而与实际情况更加吻合。

## 1.3 试验土样

本次试验土样取自柳州市某施工现场典型红粘土层,采用 GDS 静三轴试验仪(如图 2 所示)进行 UU 试验得到红粘土的抗剪强度指标,红粘土相关物理力学参数详见表 1。根据红粘土层的岩土勘察报告及《工程地质手册》相关内容,确定红粘土层的基本结构分布情况:上部土层主要为坚硬及硬塑状红粘土,下部土层主要为可塑及软塑红粘土,分别约占地层总厚度 70%~75%及 25%~30%。



图 2 GDS 三轴试验仪

Fig.2 The GDS triaxial tester

试验采用烘箱对土样进行烘干后,先用小木槌敲碎且过圆孔筛(孔径为 2 mm)并对过筛后的土样含水量进行测定,由测定结果计算并配制试验所需含水量的土样。此外,为保证填筑密实均匀,每层填筑高度控制 30 cm 作为一个填筑周期,每层填筑高度控制 10 cm,并用 20 kg 砝码距填埋土体表层约 40 cm 处自由落体击实,每个填筑周期结束后需对其土层进行环刀试验检测其压实度,然后采用重物堆载法静压固结 2~3 d,接着继续下一层的填筑工作,且在整个填筑过程应做好土样保湿工作。

为更好模拟现场红粘土上硬下软结构的场地特性,本次模型试验土层结构由上至下分别为硬塑层(70 cm 厚)、可塑层(30 cm 厚)和水泥红黏土层(10 cm 厚)共 3 层结构,相应土层含水量如表 1 所示。此外,水泥红粘土层作为管桩桩端持力层,模

拟管桩桩端持力层为基岩的工况,其水泥掺量依据文献[13]确定采取 15%,通过制作立方体试块(100 mm×100 mm×100 mm)量测得到 60 d 龄期的抗压强度为 1.8 MPa,水泥红粘土层的强度可满足试验持力层承载力要求。

表 1 各土层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of each soil layer

土层类别	状态	层厚 /cm	含水率 /%	重度 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^3$ )	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
①层红粘土	硬塑	70	32.2	18.1	49	12.8
②层红粘土	可塑	30	42.8	17.9	33	9.9
③层水泥红粘土	—	10	—	21.0	—	—

## 1.4 压桩加载装置

轴向加载系统为油压千斤与顶与 30 t 钢柱反力架联合施加竖向荷载,通过图 1 所示的方式将千斤顶通过开槽钢板与两根螺杆反向固定悬挂在反力架下方,千斤顶顶端放置压力传感器,通过油压千斤顶的顶推使千斤顶底部产生反压,从而将模型桩静压入土中。试验中,一次压桩行程设计为 10 cm,以 2 cm/min 匀速静压模型桩沉入土体,经过 10 个静压循环后,桩端到达持力层。

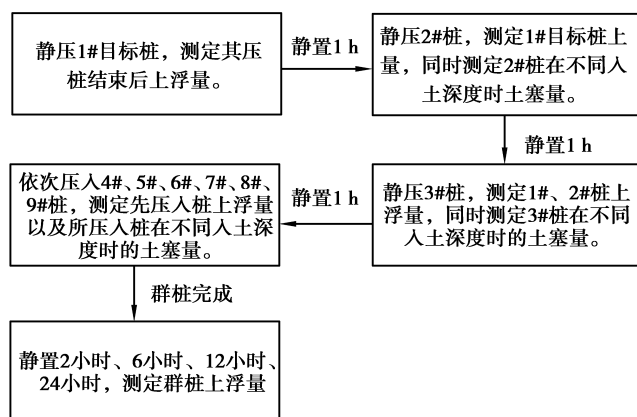
## 1.5 试验工况流程

试验工况流程如图 3 所示。试验分别进行了三类管桩的压桩试验,其中直径 4.0 cm 的管桩定义为 A 类,直径 6 cm 的管桩为 B 类,直径 8 cm 的管桩为 C 类。试验过程中分别观测 3 类不同桩径的开口管桩模型在单桩静压、群桩静压过程中各个桩体的上浮量变化情况,探究其挤土上浮规律;同时观测静压过程管桩土塞增量的变化情况,分析土塞与管桩上浮的内在联系。

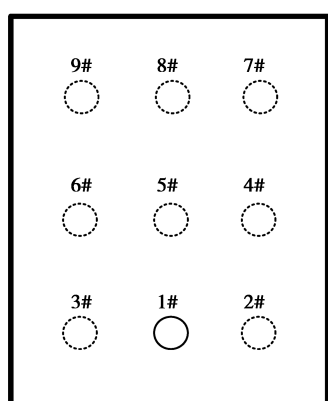
# 2 试验结果与分析

## 2.1 静压单桩上浮分析

图 4(a)为 A、B、C 共 3 类不同直径开口 1#管桩单桩静压结束后累计上浮量变化。从图可知, A1#、B1#、C1#桩在卸荷以后,其上浮量发展先快速增大而后增速变慢,最后趋于平衡稳定。这主要因为压桩过程会导致桩体产生弹性变形和塑性变形,而在卸荷初期,桩体在压桩过程中所积累的部分弹



(a) 试验流程

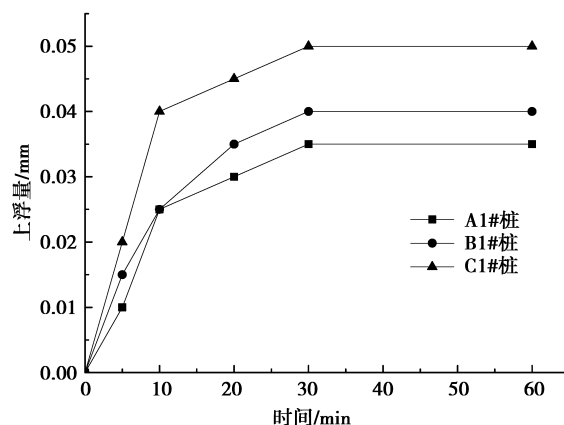


(b) 桩位顺序布置

图3 试验设置及桩位顺序布置示意图

性变形会迅速释放出来,导致桩体的上浮前期增长较快,而后桩体的剩余弹性变形不能充分地抵抗桩周土的约束力,所以其上浮量增长趋势慢慢放缓而达到平衡。由图4(a)分析可知,其桩径越大上浮量越大,分析认为与管桩受到的竖向静压力有关,桩直径越大,管桩受到的静压力越大,其弹性压缩量也显著,卸荷后回弹更充分。

图4(b)是文献[11]中做的闭口管桩单桩静压结束后累计上浮量变化,本次试验与其相比,两者整体变化规律大致相同,上浮量随管径增大而增大。开口与闭口单桩上浮的不同点为:静压开口管桩的上浮量在卸荷后半小时才趋于平衡稳定,而静压闭口管桩的上浮量在卸荷后仅15 min已趋于收敛平衡状态,分析其原因,开口管桩由于土塞效应,管桩内外壁均受到土体嵌固作用,故其上浮收敛需时更长。鉴于开口桩的上浮速率较慢,在实际工程中应间隔足够时间,使其上浮量达到平衡稳定后再进行管桩的复压处理。



(a) 开口管桩

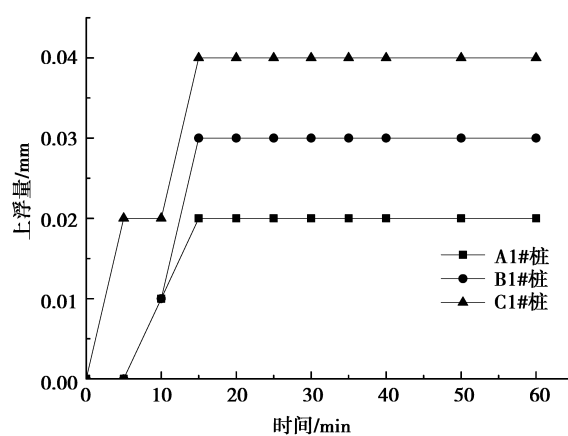
(b) 闭口管桩<sup>[11]</sup>

图4 单桩静压完成后1#管桩累积上浮量变化

Fig.4 Curves of floating amount of 1# pipe piles after completion of single pile static pressure

## 2.2 静压群桩上浮分析

### 2.2.1 静压群桩施工过程中的上浮分析

图5为A、B、C 3类桩径群桩静压沉桩时各单桩累计的上浮量随着后续压入桩沉入深度变化的曲线,由于试验的压桩速度均匀,所以图中斜率越大,反映管桩上浮量增长速度越快。

(1)取1#桩为分析目标桩进行分析。在2#桩压入过程中,1#桩上浮趋势不够明显,是因为2#桩的压入对土的挤压两个方向相对是无侧向的,所以使1#桩的上浮不够明显,当3#桩的压入,使得1#、2#、3#桩整条水平线的土体被相对挤密,导致1#桩的上浮量显著增大。4#、5#、6#桩的压入,对于目标桩1#形成一个包围圈,1#桩的上浮明显且加快。对于7#、8#桩、9#桩的压入,距离1#桩约6倍桩距,其对于1#桩的上浮贡献不大,但是限于模型箱的尺寸,边界效应明显,土体大致往1#桩的方向挤



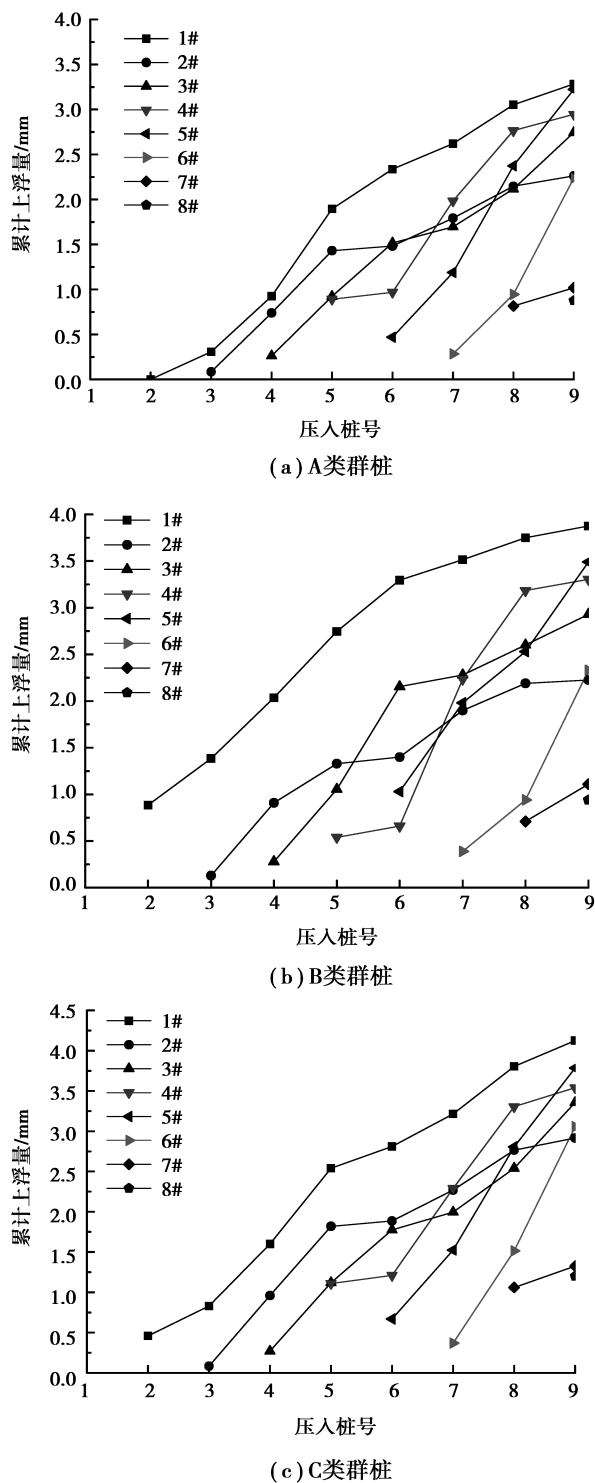


图5 单桩累计上浮量随后压入桩沉入变化图

Fig.5 Curves of pile floating cumulative amount with the following piles driving

压,1#桩的上浮依然增加。最终 A1#、B1#、C1#桩累计上浮量分别为 3.64 mm、3.88 mm、4.13 mm。

(2)取 2#桩为分析目标桩进行分析。3#桩的压入,2#桩的上浮较小,这是因为 1#桩的存在对新压入的 3#桩产生遮帘作用<sup>[15]</sup>,导致 1#桩后的土体

隆起减小,以至于 2#桩的上浮不够明显。4#、5#、6#桩的依次压入对 2#桩的上浮影响逐渐减弱,其原因与目标桩 2#的距离有关。7#、8#、9#桩对于 2#桩的上浮影响与 4#、5#、6#桩对于 2#桩的影响趋势是一样的,这是因为压桩循序是一致的。但是上浮量减小,原因:①4#、5#、6#桩的遮帘作用,②7#、8#、9#桩到 2#桩的距离较 4#、5#、6#桩距离更长。最终 A2#、B2#、C2#桩累计上浮量分别为 2.26 mm、2.23 mm、2.91 mm。

(3)取 3#桩为分析目标桩进行分析。3#桩的位置与 2#桩的位置一致,都为角桩。4#、5#、6#桩以及 7#、8#、9#的压桩顺序相对 3#桩的距离为由远到近。所有 3#桩的上浮趋势与 2#桩上浮部分趋势相反。最终 A3#、B3#、C3#桩累计上浮量分别为 2.74 mm、2.93 mm、3.36 mm。

(4)取 4#桩为分析目标桩进行分析。5#桩和 6#桩的依次压入,距离由近到远,4#桩的上浮增量由快变慢。图 5 中可以看出 6#桩对 4#桩的贡献过少,这是因为先压入的 5#桩的遮帘作用明显。7#桩的压入,4#桩的上浮明显,不仅是因为 7#桩与 4#桩的距离较近,且因为 7#桩与已压入的桩及模型箱内壁形成了包围圈,8#桩、9#桩的压入,4#桩上浮减缓与距离有关。最终, A4#、B4#、C4#桩累计上浮量分别为 2.95 mm、3.31 mm、3.54 mm。

(5)取 5#桩为分析目标桩进行分析。5#桩为中心桩,6#、7#、8#、9#桩中的每根桩压入,5#桩的上浮量都显著增大。原由有以下几个方面:①每根桩与目标桩 5#距离都较近;②每根桩都与已压入的桩形成一条直线,在该线上,与压入的桩对目标桩 5#具有顶挡作用,例如 6#桩与 4#桩对 5#桩的顶挡作用。最终 A5#、B5#、C5#桩累计上浮量分别为 3.22 mm、3.49 mm、3.79 mm。

(6)取 6#桩为分析目标桩进行分析。6#桩上浮的主要原因主要与目标桩的距离有关,上浮明显。最终 A6#、B6#、C6#桩累计上浮量分别为 2.24 mm、2.33 mm、3.01 mm。

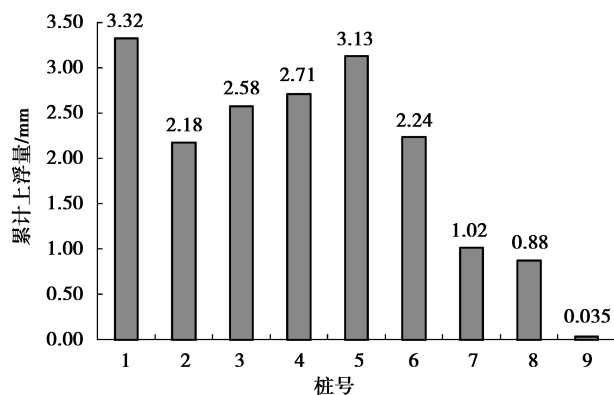
(7)取 7#桩为分析目标桩进行分析。7#桩为角桩与 4#桩上浮部分趋势相似,原因为 7#桩后续压桩数量较少(2 根)。A7#、B7#、C7#桩累计上浮量分别为 1.02 mm、1.11 mm、1.33 mm。

(8)取 8#桩为分析目标桩进行分析。8#桩为边桩,只有 9#桩的压入对周围土体产生挤压,其上浮量小。最终 A8#、B8#、C8#桩累计上浮量分别为 0.88 mm、0.94 mm、1.2 mm。

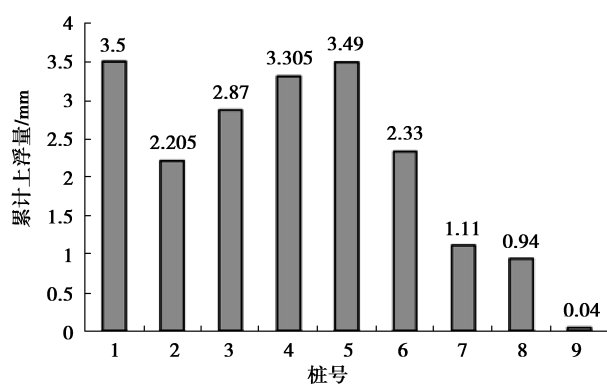
(9)取 9#桩为分析目标桩进行分析。9#桩为角桩,为最后压入桩。上浮量主要是有卸载后的回弹变形引起的,上浮不明显。A9#、B9#、C9#桩累计上浮量分别为 0.035 mm、0.04 mm、0.05 mm。

### 2.2.2 群桩静压施工后上浮总量分析

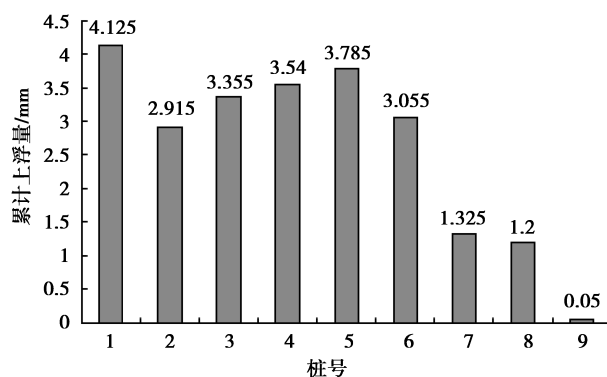
将 3 类管径的模型桩在群桩静压过程中的各单桩上浮量绘制成如图 6 的柱状图,可以看出,虽



(a) A类群桩



(b) B类群桩



(c) C类群桩

图 6 静压群桩结束后各单桩累计上浮量

Fig.6 Each single pile cumulative floating amount after pressuring pile group

大小而成倍数性变化,但总体而言,还是呈现出了规律性的特征:①1#桩作为最先压入且处于水平中心位置的桩,上浮量最大;②5#桩作为中心桩,虽然压入顺序较为靠后,但由于处于中心位置,受沉桩挤土效应影响严重,其上浮量在其余 8 根桩中处于领先位置;③2#、3#桩作为角桩,虽率先压入土中,但其上浮量小于作为边桩的 4#桩,2#桩上浮量亦小于另一边桩 6#桩,表明在群桩压入过程中,边桩受挤土作用影响的上浮量要略大于角桩。以上开口管桩的上浮规律与笔者做的闭口桩的群桩上浮趋势的规律<sup>[10]</sup>基本一致,也与文献[4]中的软土地基现场试验所得结果相一致,区别在于具体上浮数值的不同。

### 2.3 静压单桩上浮增量与土塞高度增量的关系

因为开口桩与闭口桩的区别主要为土塞效应<sup>[14]</sup>,且由于广西红黏土地层上硬下软的特殊性,有必要探讨管桩上浮与土塞效应的关系。

图 7 为 A、B、C 共 3 类桩径群桩静压过程中,目标桩(1#桩)上浮量随后续压入桩沉入深度变化曲线。从图中容易看出,由于位置不同,导致各后续压入桩对目标桩(1#桩)上浮量增长的贡献也不同,总体上显现出规律性的增长趋势:①对于 A、B 两类桩径模型桩,开口桩在红粘土中土塞规律可参考文献[16],2#~9#桩在压入到 70 cm 深度前,土塞闭塞率 *IFR* 值较大,特殊是在 30 cm 深度前 *IFR* 值处于在 50%~65%之间,此时管桩内土塞高度上涨速度较快,抵消了部分挤土效应对目标桩上浮量的影响,目标桩上浮量只有少量增大;②当 2#~9#桩持续压入至 70~90 cm 深度段时,土塞闭塞效应值 *IFR* 值降为零,管桩处于完全闭塞状态,此时的开口管桩实际上与闭口管桩无异,从而导致群桩挤土上浮现象显著增大,引起了目标桩上浮量的急速增加;③当 2#~9#桩压桩至 90~100 cm 深度段时,*IFR* 值稳定在 20%左右,使得管桩处于非完全闭塞状态,重新成为了开口管桩,因此目标桩上浮量亦减小。同时,由于此时土塞闭塞值较小,模型桩上浮量依然大于 0~70 cm 深度段时的上浮量值。对于 C 类模型桩(桩径 8 cm),目标桩上浮增量依然呈现出类似的规律,区别在于上浮增量峰值集中于 80~90 cm 段,结合文献[16]对 C 类模型桩土塞效应的分析,发现在此深度范围内,C 类管桩才处于

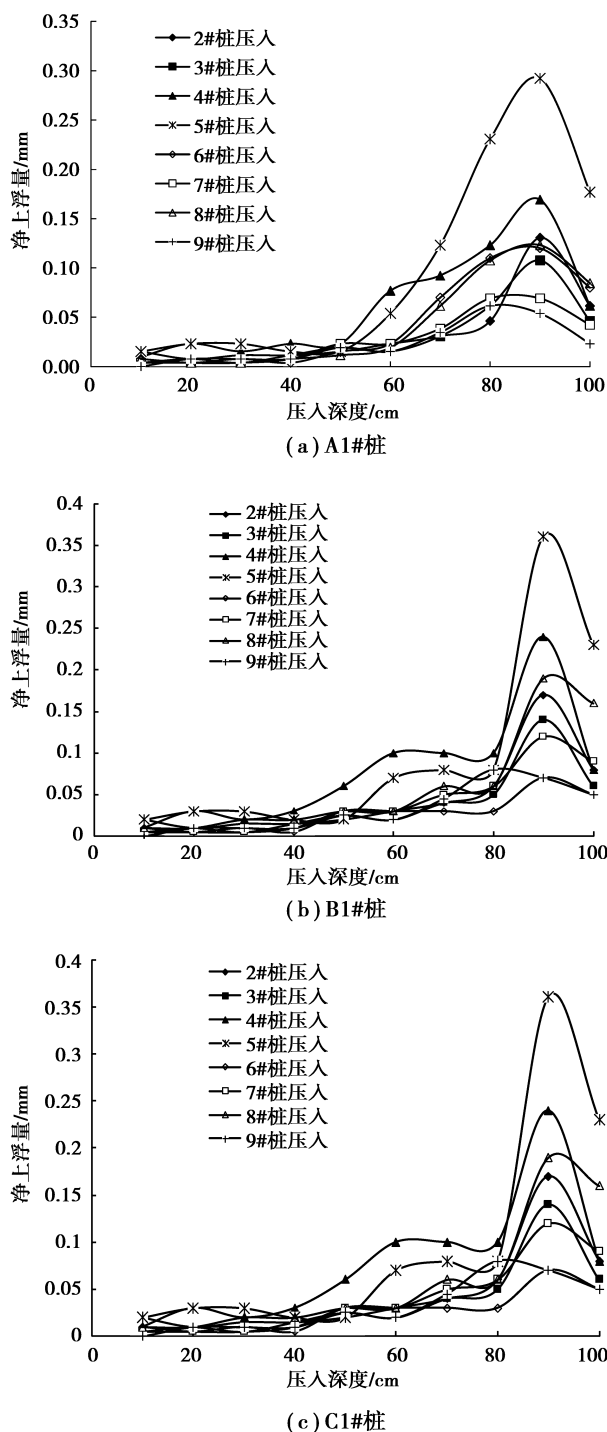


图7 1#目标桩上浮量随后压入桩沉桩深度变化曲线

Fig.7 Curves of 1# goal piles' floating amount with the following piles' driving

完全闭塞状态,相比A类和B类管桩在70~90 cm段处于完全闭塞状态,C类管桩由于管径的增大,其进入土层达到闭塞的深度也增加。此外,这也间接说明,土塞闭塞率 $IFR$ 值的大小,一定程度上决定了群桩挤土上浮的剧烈程度。笔者在对静压闭口管桩群桩上浮现象的研究中得出,闭口管桩群桩

静压至软硬土层交界处一定范围内,桩上浮的增长趋势会出现短暂的休止<sup>[11]</sup>。显然,开口管桩静压过程中由于土塞的影响,在桩沉桩深度70~80 cm以前,由于管桩未完全闭塞,管桩的上浮增长基本处于休止状态,仅有微量增长,管桩土塞完全闭合后,管桩上浮量开始急速增加,管桩大部分上浮量主要来源于沉桩进入红粘土可塑层管桩土塞闭塞后的阶段。

### 3 结论

(1)单桩静压开口管桩卸荷后桩体上浮增长先快后慢进而达到平衡,与闭口管桩相比,两者上浮量均随管径增大而增大,但静压开口管桩上浮稳定所需时间比静压闭口管桩更长,原因为开口管桩存在土塞效应,管桩内外壁均受到土体嵌固作用,故其上浮收敛需时更长。

(2)从压桩过程中桩体的动态上浮增量得知,先压入桩的上浮增量随着后压入桩体依次累积,成非线性增长;桩间距越小,先压入的桩上浮速度越快;在桩间距相同的情况下,中心桩的上浮速度远快于边桩和角桩。

(3)从压桩后桩的上浮总量反应出桩的直径越大,在其他相同条件下桩的上浮量越大;在桩径相同的情况下,桩位的影响强度顺序由高到低依次是中心桩位、边桩位、角桩位,这与压桩过程中的动态上浮速度相符。

(4)当开口管桩从硬塑层压入至可塑层后,由于土塞闭塞的影响,导致挤土效应增强,有别于闭口管桩静压至在软硬交界面处出现的短暂上浮量增长休止状况,管桩土塞完全闭合后,开口管桩群桩挤土上浮量表现出显著上升趋势。

### 参考文献 (References)

- [1] 张忠苗, 张乾青, 贺静漪, 等. 浙江某高层预应力管桩偏位和上浮处理实例分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2919-2924. (Zhang Zhongmiao, Zhang Qianqing, He Jingyi, et al. Example analysis of sloping and floating upward prestressed pipe pile with treatment of a high-rise building in Zhejiang province[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2919-2924. (in Chinese))
- [2] 马时冬. 关于预应力高强混凝土管桩的桩体上浮问

- 题[J]. 工业建筑, 2003, 33(3): 78-80. (Ma Shidong. The problem of pile shaft floating up for PHC tubular pile[J]. Industrial Construction, 2003, 33(3): 78-80. (in Chinese))
- [3] 周晓龙, 萧凡, 廖红, 等. 软土地区预应力管桩施工质量事故分析及处理[J]. 工业建筑, 2015, 45(10): 191-195. (Zhou Xiaolong, Xiao Fan, Liao Hong, et al. Analysis and disposal of construction quality accident for prestressed concrete pipe piles in soft soil area [J]. Industrial Construction, 2015, 45(10): 191-195. (in Chinese))
- [4] 张忠苗, 辛公锋, 俞洪良, 等. 软土地基管桩挤土浮桩与处理方法研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 549-552. (Zhang Zhongmiao, Xin Gongfeng, Yu Hongliang, et al. Study on floating pipe piles and disposal measures in soft soil foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 549-552. (in Chinese))
- [5] 张永刚, 李俊才, 邓亚光, 等. 管桩水泥土复合桩挤土效应现场试验[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 601-606. (Zhang Yonggang, Li Juncai, Deng Yaguang, et al. Field test on soil compacting effect of composite pile made up of jet-mixing cement and PHC pile [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 601-606. (in Chinese))
- [6] 朱奎, 魏纲, 徐日庆. 软土地基预制桩施工时桩上浮现象研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1564-1568. (Zhu Kui, Wei Gang, Xu Riqing. Research on pile floatation in prefabricated pile construction in soft soil foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1564-1568. (in Chinese))
- [7] Poulos H G. Effect of pile driving on adjacent piles in clay [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(6): 856-867.
- [8] Rehkopf J C. Prediction and measurement of ground movements due to pile driving in clay: a case study in East Boston [D]. Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [9] Massarsch K R, Wersäll C. Cumulative lateral soil displacement due to pile driving in soft clay[A]//Sound Geotechnical Research to Practice, Geotechnical Special Publication (GSP 230), Geo-Congress 2013 [C]. San Diego, California, United States, Book News, Inc. 2013: 463-480.
- [10] Wersäll C, Massarsch K R. Soil heave due to pile driving in clay [A]//Sound Geotechnical Research to Practice, Geotechnical Special Publication (GSP 230), Geo-Congress 2013 [C]. San Diego, California, United States, Book News, Inc. 2013: 481-499.
- [11] 王家全, 张昊, 刘垒雷, 等. 红粘土地层闭口管桩上浮模型试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(2): 324-331. (Wang Jiaquan, Zhang Hao, Liu Leilei, et al. Model test research on close-end pipe pile floating in red clay geology [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(2): 324-331. (in Chinese))
- [12] 张晓健. 开口桩和闭口桩性状研究与分析[J]. 工业建筑, 2007, 37(增1): 883-885. (Zhang Xiaojian. Study on properties of open-ended and closed-ended piles [J]. Industrial Construction, 2007, 37(Supp.1): 883-885. (in Chinese))
- [13] 赵振亚, 申向东. 水泥红黏土力学性能试验研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(5): 139-140. (Zhao Zhenya, Shen Xiangdong. Study on mechanical behaviors of red clay cement [J]. Yellow River, 2012, 34(5): 139-140. (in Chinese))
- [14] Paik K, Salgado R, Lee J, et al. Behavior of open-and closed-ended piles driven into sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(4): 296-306.
- [15] 吴晓峰, 王浩, 文新伦. 软土中已打入桩对土体位移的遮帘作用研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2208-2212. (Wu Xiaofeng, Wang Hao, Wen Xinlun. Analysis of sheltering effects of previously driven piles on soil displacements in soft soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2208-2212. (in Chinese))
- [16] 王家全, 彭泰, 黄柳云, 等. 红黏土地层开口管桩土塞效应模型试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(12): 73-77. (Wang Jiaquan, Peng Tai, Huang Liyun, et al. Model test research on soil plug effect of open-ended pipe pile in red clay ground [J]. Industrial Construction, 2016, 46(12): 73-77. (in Chinese))