

文章编号: 1007-2993(2023)03-0308-06

南昌地区典型厚密砂层 PHC 管桩施工技术研究

邓美成 蔡智 刘涛 田建成 魏海涛

(中航勘察设计研究院有限公司, 北京 100098)

【摘要】 依托南昌地区某桩基工程, 采用静力触探原位试验分析该地区典型厚密砂层地质特征, 结合理论计算及现场试验分析 PHC 管桩的锤击沉桩阻力及设计单桩极限承载力, 对工程桩的设计及施工提出合理建议, 同时总结该地层条件下锤击 PHC 管桩成桩的施工工艺。后续工程桩承载力检测结果表明, 优化调整后的施工技术满足了工程设计要求, 取得了良好的社会效益与经济效益, 可在该区域推广应用。

【关键词】 厚密砂层; 锤击贯入; 静力触探试验; 沉桩阻力; 持力层

【中图分类号】 TU 473.1+3; TU 753.3

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.03.009

Construction Technology of PHC Tube-pile in Typical Thick-dense Sand Layer in Nanchang Area

Deng Meicheng Cai Zhi Liu Tao Tian Jiancheng Wei Haitao

(AVIC Institute Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 100098, China)

【Abstract】 Based on the example of pile foundation in Nanchang, static penetration in-situ test was used to analyze the geological characteristics of typical thick-dense sand layers in the area. Based on theoretical calculations and on-site tests, the hammer sinking resistance of PHC pipe piles and the ultimate bearing capacity of a single pile were analyzed. Reasonable suggestions were proposed for the design and construction of engineering piles, and the construction process of hammer driving PHC pipe piles under this geological condition was summarized. The subsequent pile bearing capacity testing results show that the optimized and adjusted construction technology meets the engineering design requirements and has achieved good social and economic benefits, which can be promoted and applied in this area.

【Key words】 thick-dense sand layer; hammer-driving; static cone penetration test; pile driving resistance; bearing stratum

0 引言

自《先张法预应力混凝土管桩》(GB 13476—92)正式实施以来, 先张法预应力高强混凝土管桩(PHC管桩)凭借施工效率高、单桩承载力高、质量易保证等优势^[1], 广泛应用于东南沿海地区, 且近年来已逐步向内陆地区推广。南昌地区江西省奥林匹克体育中心主体育场工程、昌北红谷滩新区红谷凯旋商业住宅工程等项目应用 PHC 管桩取得较好的工程效果。

南昌位于赣江冲积平原区, 第四系出露范围最为广泛, 各时期冲积层由上至下, 呈颗粒粒度由细至粗的上软下硬“二元”结构^[2], 其中上部为黏性土和粉土, 局部夹淤泥质黏性土透镜体, 下部为砂及砾砂层。

南昌某工程采用桩基方案, 通过工程地质条件分析和静力触探试验, 结合当地技术条件及经验, 对桩基方案进行了经济技术比选分析; 通过不同桩长的单桩静载试验, 对比分析 PHC 管桩在不同持力层的承载力及沉降特性; 总结南昌地区典型厚密砂层地质条件下锤击管桩的常见问题及处理措施, 为类似地区推广使用该工艺提供设计与施工经验。

1 工程概况及地质条件

本工程主要由主厂房和辅助用房组成, 总用地面积约 $2.6 \times 10^4 \text{ m}^2$, 总建筑面积约 $3.4 \times 10^4 \text{ m}^2$, 建筑最大高度为 14.6 m, 采用框架结构、桩基础。

工程场地属赣江河漫滩, 属全新统, 具有完整的松散冲积层, 场地地层自上而下为: ①强夯回填砂, 中密; ②粉质黏土, 可塑; ③粉质黏土, 可塑—硬塑;

③中粗砂, 中密; ④中砂夹粉质黏土; ⑤砾砂, 中密—
密实。场地典型地质剖面见图 1。地基土主要物理力学指标见表 1。

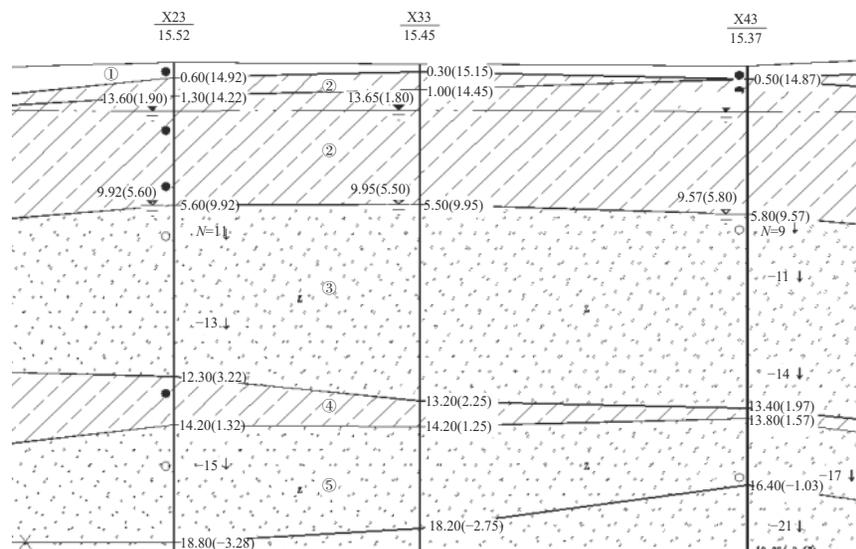


图 1 典型地质剖面图(单位:m)

表 1 地层土体主要物理力学指标表

地层编号	土性名称	层厚/m	含水率/%	孔隙比	塑限指数	液限指数	压缩系数/MPa ⁻¹	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	标准贯入试验/击
①	回填砂	2.20								14
② ₁	粉质黏土	1.50	29.3	0.904	13.9	0.71	0.424	18.3	8.2	14.5
②	粉质黏土	4.00	25.0	0.772	14.0	0.39	0.286	29.6	16.1	15.5
③	中粗砂	7.00								24
④	中砂夹粉质黏土	3.40	26.4	0.801	13.2	0.45	0.294	27.9	14.8	16
⑤	砾砂	4.60								36

2 桩基方案比选

本工程设计桩径为 500 mm, 单桩承载力特征值约为 1100 kN。根据工程地质特点及工程设计要求, 选取反循环钻孔灌注桩、长螺旋钻孔压灌桩及 PHC 管桩三种桩基方案进行技术经济比选。

2.1 桩基类型比选

(1) 泥浆护壁钻孔灌注桩

泥浆护壁钻孔灌注桩工艺成熟, 能穿透厚密砂层, 以砾砂层为桩端持力层, 但场地水系发达, 砂砾层中粗颗粒间孔隙是这类潜隙水的流动通道, 泥浆护壁难度较大, 易产生塌孔现象, 孔底沉渣厚, 成桩质量难以保证, 施工速度慢, 故该方案不予采用。

(2) 长螺旋钻孔压灌桩

长螺旋钻孔压灌桩先钻至桩底标高, 提升钻头同时压灌混凝土, 后振动插入钢筋笼, 形成桩体。该工艺无需泥浆护壁, 施工速度快, 造价低, 但是该区域地下水系发达, 桩间土为砂层, 且同一承台桩间距较

小, 施工过程中容易出现串孔、桩身缩颈、后插钢筋笼底难以振动到位等现象, 工程质量难以保证, 该方案不予采用。

(3) PHC 管桩

PHC 管桩采用静压或锤击的方式贯入土体, PHC 管桩的每延米造价介于泥浆护壁钻孔灌注桩与长螺旋钻孔压灌桩之间; 该桩为预制桩, 单桩承载力高, 现场施工步骤较简易, 施工效率高, 且该区域地质条件以黏土和砂层为主, 无孤石等地下障碍物, 因此桩身质量能够保证。

通过上述方案比选, PHC 管桩的成桩质量较易保证, 且价格居中, 本工程选择 PHC 管桩作为桩基较适宜。

2.2 沉桩方式选择

静压法在软土地基桩基施工中应用较为普遍, 静压机自重及附加配重提供压桩反力, 液压加压桩顶或桩身, 使静压力与沉桩阻力呈动态平衡压桩入土, 在厚密砂层地质中, 常佐以桩端射水, 冲散桩端砂层,

使桩端穿过厚密砂层。射水需保持桩端开口,且射水后使桩端土扰动,会对桩端承载力有一定折减。对于单桩承载力较大的桩基,静压机压桩反力相应增大,附加配重随之增加,这对于需频繁移机的工程,显得尤为笨重,施工效率低。

锤击法适用于较硬地层,通过桩锤下落冲击力锤击桩顶,打破桩土静力平衡,使桩身下沉。在南昌典型厚密砂层地层中,选择合适的桩机型号,锤击管桩施工工艺能让桩端嵌入砂层持力层,桩端承载力得以保证,且锤击管桩设备轻便,对场地条件要求相对

较低,机械运走方便,施工效率高。

因此在以厚密砂层做为桩端持力层的情况下,PHC管桩采用锤击法较为适宜。

3 锤击沉桩阻力计算及选锤

锤击过程中,冲击动荷载克服锤击沉桩过程中的动态侧摩阻及端阻,沉桩入土。根据地质、施工经验及沉桩阻力分布规律,采用静力触探指标估算沉桩阻力较为方便可信。静力触探试验作为常规的原位测试方法,对砂层原位测试适用性较好^[3]。所选试沉桩区地层柱状图及对应静力触探试验曲线见图2。

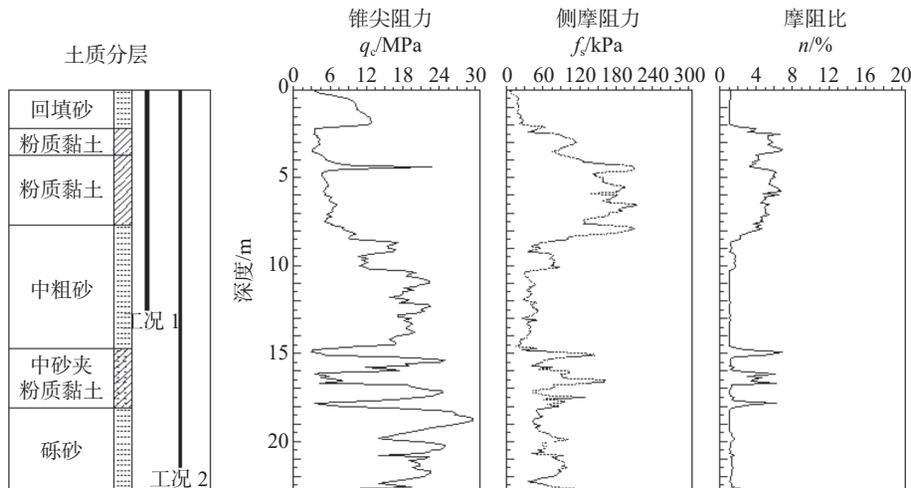


图2 试桩点区地层柱状图及静力触探曲线图

试桩区中粗砂③层厚 7.0 m,砾砂⑤层厚 4.6 m,均可作为桩端持力层,分别对应两种工况^[4]:工况 1,以中粗砂③层为桩端持力层,桩长 12.5 m;工况 2,以砾砂⑤层为桩端持力层,桩长 21.0 m。

锤击沉桩过程中,根据阻力分布,可将桩侧动摩阻力分为柱穴区、滑移区及挤压区,其中柱穴区即为桩周上部晃动产生空隙,该部分不提供摩阻力。静力触探指标估算沉桩阻力公式见式(1)^[5]。

$$P_u = P_h + P_j + P_d = u \sum_0^{l_h} l_{hi} f_{si} + u \sum_0^{l_j} n_i l_{ji} f_{si} + \rho m A_p q_s \quad (1)$$

式中: P_u 为总沉桩阻力,含动态桩周及桩端阻力, kN; P_h 、 P_j 、 P_d 分别为桩周中部滑移区动摩阻力、桩周下部挤压区动摩阻力及桩端动摩阻力, kN; u 为管桩外壁周长, m; l_h 为滑移区土层厚度, m, 取 0.5 ~ 0.6 倍桩长; f_s 为静力触探探头单位侧摩阻力, kPa; l_j 为挤压区土层厚度, m, 取 5 ~ 8 倍桩径; n_i 为挤压区土层桩周冲击系数,黏性土取 2.5 ~ 3.5,砂性土取 2 ~ 3; ρ 为桩尖尺寸效应折算系数,取 0.4 ~ 0.6; m 为桩尖土层冲击

系数,砂性土取 1.2 ~ 1.5; A_p 为桩端面积, m^2 ; q_s 为静力触探探头单位端阻力, kPa, 取 2.5 倍桩径范围内土层平均值。式(1)考虑了静力触探的尺寸效应及锤击施工冲击效应。

桩锤冲击力需大于沉桩阻力,各锤型冲击力如表 2 所示。取经验参数最大值计算沉桩阻力(见表 3),工况 1 沉桩阻力为 5080.5 kN,工况 2 沉桩阻力为 6807.5 kN。根据沉桩阻力计算,可选用 D60 锤型,实际选锤可结合现场沉桩施工情况,根据“重锤轻击”原则将锤重等级上调。

表2 桩锤冲击力参数^[6]

锤型	冲击部分质量/t	总质量/t	冲击力/(×100 kN)
D25	2.5	6.5	20 ~ 25
D35	3.5	7.2	25 ~ 40
D45	4.5	9.6	40 ~ 50
D60	6.0	15.0	50 ~ 70
D72	7.2	18.0	70 ~ 100
D80	8.0	17.0	>100
D100	10.0	20.0	>120

表 3 沉桩阻力计算成果

地层编号	土性名称	平均值		n_i	ρ	m	P_{Ti}/kN	P_j/kN	P_d/kN	P_u/kN
		f_{si}/kPa	q_{ci}/MPa							
①	回填砂	22.7	7.72	3						
② ₁	粉质黏土	87.8	1.96	3.5						
②	粉质黏土	176.9	4.51	3.5						
③	中粗砂	58.1	14.47	3	0.6	1.5	1433.4	1094.6	2552.5	5080.5
④	中砂夹粉质黏土	84.3	11.68	3.5						
⑤	砾砂	67.7	19.18	3.5	0.6	1.5	1844.9	1579.3	3383.4	6807.5

4 沉桩后单桩承载力分析

4.1 静力触探指标计算单桩承载力

采用静力触探指标计算单桩竖向极限承载力标准值,按式(2)计算^[6]:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum l_i \beta_i f_{si} + \alpha q_c A_p \quad (2)$$

式中: Q_{uk} 为单桩竖向极限承载力标准值, kN; Q_{sk} 、 Q_{pk} 分别为总极限侧阻力、端阻力标准值, kN; f_{si} 为第 i 层土的探头平均侧阻力, kPa; l_i 为桩周第 i 层土厚

度, m; β_i 为第 i 层土桩侧阻力综合修正系数,黏性土、粉土 $\beta_i = 10.04(f_{si})^{-0.55}$,砂土 $\beta_i = 5.05(f_{si})^{-0.45}$; α 为桩端阻力修正系数,黏性土、粉土取 2/3,饱和砂土取 1/2; q_c 为桩端平面上、下探头端阻力,取桩端平面以上 $4d$ (d 为桩的直径或边长)范围内按土层厚度的探头阻力加权平均值,然后再和桩端平面以下 $1d$ 范围内的探头阻力进行平均, kPa。

由式(2)计算两种工况下单桩竖向极限承载力标准值,计算结果见表 4。

表 4 静力触探指标计算单桩承载力成果

地层编号	土性名称	层厚/m	平均值		β_i	α	Q_{sk}/kN	Q_{pk}/kN	Q_{uk}/kN
			f_{si}/kPa	q_{ci}/MPa					
①	回填砂	2.20	22.7	7.72	1.69				
② ₁	粉质黏土	1.50	87.8	1.96	0.86				
②	粉质黏土	4.00	176.9	4.51	0.58				
③	中粗砂	7.00	58.1	14.47	0.81	1/2	1697.3	1361.6	3058.9
④	中砂夹粉质黏土	3.40	84.3	11.68	0.88	1/2			
⑤	砾砂	4.60	67.7	19.18	0.81	1/2	2089.6	1995.8	4085.5

4.2 单桩静载试验

静载试验是确定单桩竖向极限承载力的最可靠方法。在两种桩端持力层工况下,经休止期后对

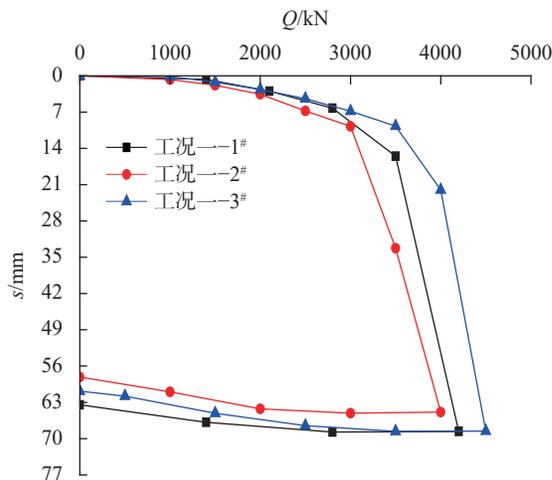
PHC 管桩进行单桩静载试验,采用压重反力装置,慢速维持荷载法分级加载,所得静载荷试验成果见表 5, $Q-s$ 曲线见图 3。

表 5 静载荷试验成果

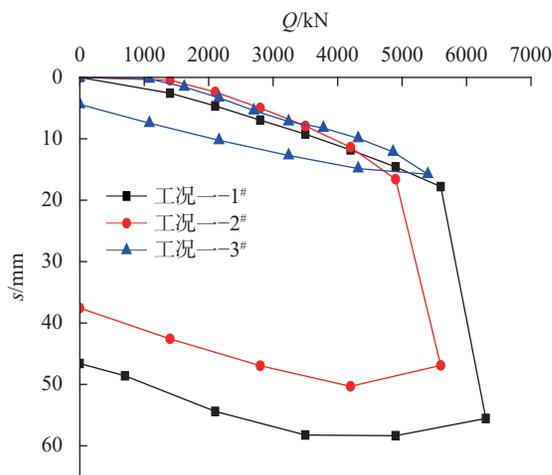
序号	桩号	桩长/m	桩径/mm	沉桩方式	锤击数/击	桩端持力层	极限承载力/kN	沉降量/mm
工况1	1#	12.5	500	锤击	792		3500	15.48
	2#	12.5	500	锤击	825	③中粗砂	3500	33.25
	3#	12.5	500	锤击	804		4000	22.01
工况2	1#	21	500	锤击	1496		5600	17.79
	2#	21	500	锤击	1362	⑤砾砂	4900	16.59
	3#	21	500	锤击	1405		5400	15.77

对比表 4、表 5 数据可知,静力触探指标计算结果较为保守^[7]。根据静载试验,以中粗砂③层为桩端持力层(工况 1)满足设计提出的单桩承载力要求。

以中粗砂③层作为桩端持力层,在保证工程安全、质量可靠的前提下,有效地降低了工程施工难度,减少了桩头破损和截桩的数量,降低工程造价。项目建成



(a) 工况 1



(b) 工况 2

图3 单桩静载试验 Q-s 曲线图

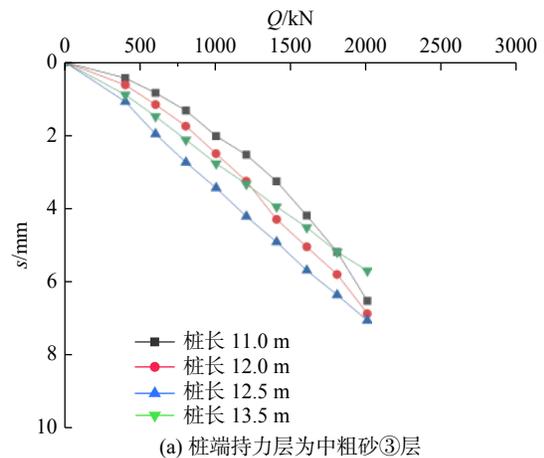
使用已 5 年, 目前建筑物使用状况良好, 主体结构墙体上未出现开裂变形及建筑物倾斜等现象。

收集该地区类似地层 PHC 管桩工程案例, 将桩端采用不同深度的砂层持力层的 PHC 管桩静载试验结果汇总(见图 4), 汇总数据显示, 以中粗砂③层为桩端持力层单桩承载力特征值不小于 1000 kN, 且其 Q-s 曲线呈缓变形, 有较大的承载力余量; 以砾砂⑤层为桩端持力层单桩承载力特征值不小于 2250 kN。进一步证明了结论的合理性。

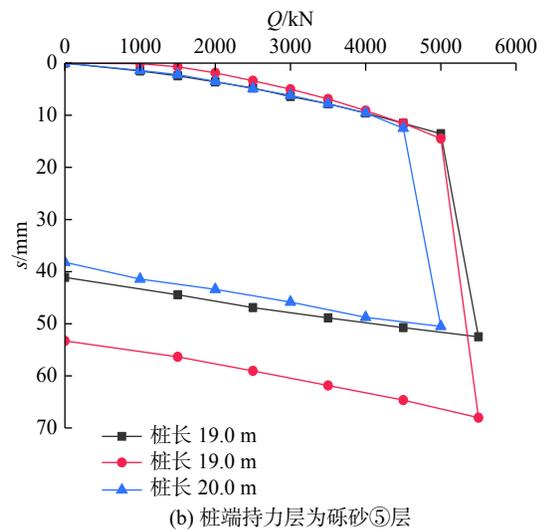
5 锤击管桩施工常见问题及处理措施

5.1 桩位偏差及桩身倾斜

桩位偏差及桩身倾斜都是造成废桩的主要原因。对于桩位偏差, 除了做好桩点放样、保护及复测外, 在锤击管桩对点时也需注意控制定位。造成桩身倾斜人为原因多为施工班组未调整桩架平直。机械原因是桩帽在长期使用下开裂, 在锤击沉桩过程中使桩头朝开裂方向偏移, 在打桩前需检查桩机机械情况,



(a) 桩端持力层为中粗砂③层



(b) 桩端持力层为砾砂⑤层

图4 工程案例 PHC 管桩单桩静载试验 Q-s 曲线图

必要时可停机检修。此外还有地层原因, 南昌地区“上软下硬”地质, 遇到较硬层, 易使桩端错位, 上部粉质黏土桩端刺入时可采用压锤或轻提锤的方式沉入, 待进入硬砂层后便可连续跳锤冲击。

5.2 累积损伤下管桩破损

在桩锤反复冲击荷载的作用下, 管桩的桩头承受荷载, 桩身递进传递荷载, 桩底挤压土体释放荷载, 在这一过程中, 由于管桩自身质量隐患及锤击施工技术措施原因, 可能会造成桩头、桩底破损及桩身断裂等问题。在管桩施工前需检查管桩的质量, 检查桩端、桩身是否存在破损、裂缝; 管桩内腔是否规整, 若不规整, 表明管桩离心过程中存在模板固定不牢、跑浆等问题; 管桩外壁以青灰色为宜, 泛白或表面有蜂窝、麻面等现象的管桩需谨慎使用。同时需控制以下施工技术措施:

(1) 终锤标准的确定

软土地基采用“以控制标高为主, 以贯入度为辅”, 这是因为摩擦桩的桩端阻力可忽略不计。南昌地区典型厚密砂层地质, 根据对沉桩阻力及成桩承载

力的分析, 桩端阻力提供的单桩承载力比例较高, 桩端能否进入预定持力层是施工重点, 采用“以贯入度为主, 以控制标高为辅”的停打标准较为适宜。

(2) 锤垫、桩垫及桩尖的使用

锤垫将桩锤冲击力均匀传递至桩帽上部, 桩垫将桩帽冲击力由桩帽下部均匀传递至桩顶, 两者的合理选用能够保护桩锤和桩顶免遭破坏, 确保桩身完整的情况下沉桩至设计标高。目前常采用锤垫多为纸垫或拼合板垫, 该类型桩垫在使用一定时间后, 便会变形丧失弹性, 需勤更换。

在贯入度距收锤标准较大而桩顶破损时, 除管桩质量原因外, 需考虑锤垫、桩垫老化问题。桩身缺陷不太严重, 低应变检测结果显示在 III 类桩以上时, 可对缺陷成桩采取处理措施: 1) 管桩烂底多发生于开口桩底遇密实砂层时, 当桩长及桩端持力层均满足设计要求时, 可采用高压注浆填芯法处理; 2) PHC 管桩浅部断裂发生在桩顶以下 6 m 内, 采用人工挖孔, 钢护筒+钢筋笼接桩处理较为经济; 3) 深部断裂发生在桩顶以下超过 6 m, 应采用补桩处理。

5.3 挤土效应导致管桩上浮及成桩困难

锤击管桩属挤土桩, 黏性土挤土效应主要影响范围半径为 $0.5 \sim 1.5D$ (D 为管桩直径), 次影响范围半径为 $3 \sim 5D$; 群桩打入后, 砂性土主要影响范围半径为 $4D$, 次影响范围半径为 $4D$ ^[8]。在打桩后期, 场地挤土效应明显^[9], 会导致成桩上浮, 待沉桩施打困难等现象, 挤土效应趋势如图 5 所示。

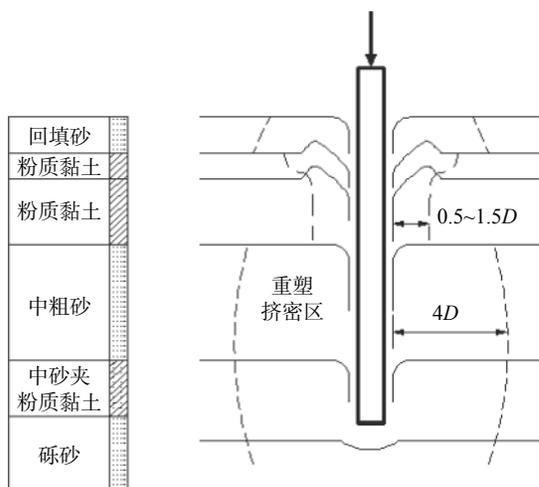


图 5 典型厚密砂层地质锤击管桩挤土效应示意图

合理安排打桩顺序是减轻管桩挤土效应的有效措施, 整体上需考虑施工区域四周是否有建筑物, 邻

建筑物侧先打, 同时需避免最后集中在中间区域; 局部以“先密桩, 后疏桩”为打桩原则。

6 结论

(1) 根据设计提出的桩基承载要求, 结合建设场地“上软下硬”、下部赋存多层厚密砂层的工程地质特点, 经技术经济比选, 确定采用 PHC 管桩方案, 锤击沉桩施工工艺。

(2) 根据可选桩端持力层将 PHC 管桩分为两种工况: 工况 1, 以中粗砂③层为桩端持力层, 桩长 12.5 m; 工况 2, 以砾砂⑤层为桩端持力层, 桩长 21.0 m。针对两种工况分别进行原位静力触探试验和试桩。并根据静力触探指标计算两种工况对应的沉桩阻力, 选取相应的沉桩设备。

(3) 采用静力触探指标对 PHC 管桩单桩承载力进行了计算, 计算结果和最终的单桩静载试验数据均表明, 采用工况 1 (以中粗砂③层为桩端持力层), 桩长 12.5 m, 即可满足设计承载力要求。

(4) 总结了 PHC 管桩在厚密砂层应用中的工程质量问题, 分析了施工质量问题发生的机理, 并提出了相应质量控制措施。

参 考 文 献

- [1] 邢皓枫, 赵红崑, 叶观宝, 等. PHC管桩工程特性分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 36-39.
- [2] 刘细元, 马振兴, 杨永革, 等. 南昌市地下水特征及其应急水源地分析[J]. 资源调查与环境, 2006, 27(1): 33-38.
- [3] YU H S, MITCHELL J K. Analysis of cone resistance: review of methods[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1998, 125(9): 140-149.
- [4] 张忠苗, 喻君, 张广兴. 根据不同桩长对比试验优化设计桩持力层的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S2): 4251-4257.
- [5] 《桩基工程手册》编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.
- [6] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [7] 许巍, 梁书亭, 戴国亮. 预应力管桩设计中的若干问题讨论[J]. 工业建筑, 2005, 35(S1): 489-491.
- [8] 李晓柱, 孙海. 锤击管桩挤土效应现场试验研究[J]. 土工基础, 2015, 29(5): 62-66.
- [9] 施建勇, 彭劫. 沉桩挤土效应研究综述[J]. 大坝观测与土工测试, 2001, 25(3): 5-9.

收稿日期: 2022-03-21