



粉土强夯法地基处理参数的试验研究

王吉明¹, 龚永康²

(1. 南通宝钢钢铁有限公司, 江苏南通 226002; 2. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 某原料场工程采用强夯法对饱和粉土进行地基处理。针对该工程设计和施工中遇到的强夯参数和地基处理效果等问题进行试验研究, 对该工程区域运用不同的强夯参数, 通过加固过程中的夯坑沉降量、地面隆起量和孔隙水压力监测, 以及加固后土层的静力触探、地基承载力等现场试验, 对不同强夯参数下的加固效果进行对比, 得出适用于该工程粉土地基的强夯参数。

关键词: 粉土; 强夯法; 地基处理; 参数

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)10-0178-06

Test study on foundation treatment parameters of silt soil by dynamic consolidation

WANG Ji-ming¹, GONG Yong-kang²

(1. Nantong Baogang Steel Co., Ltd., Nantong 226002, China;

2. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Saturated silt soil foundation treatment with dynamic consolidation is used in Baogang Steel Co., Ltd. in Nantong city of Jiangsu province. This paper mainly studies the dynamic consolidation parameters and foundation treatment effect in the design and construction process with a series of tests. Different dynamic consolidation parameters are adopted in different project areas, including monitored tamping pit settlement, ground uplift amount, as well as the pore water pressure in the consolidation process. Based on the static cone penetration test and static load test after consolidation process, this paper compares the reinforcement effects under different dynamic consolidation parameters, and at last gets the silt soil foundation dynamic consolidation parameters adapting to this project.

Keywords: silt soil; dynamic consolidation; foundation treatment; parameter

强夯法适用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土和黏性土、湿陷性黄土、素填土和杂填土等地基^[1-2], 但无大规模工程应用强夯法对饱和粉土进行地基处理, 仅有部分学者进行了少量的试验研究^[3-4], 因此缺少对饱和粉土地基的强夯法设计经验。结合某原料场强夯法地基处理工程, 对2个不同区域的不同强夯参数展开对比试验研究, 以期得到饱和粉土地基的强夯法最佳设计参数。

1 工程概况

江苏南通宝钢钢铁有限公司原料场位于厂区

内, 总面积约1.64万m², 内设一次料场, 设计要求地基承载力为150 kPa, 料场地面整平后高程为4.15 m。场地按编号分为A、B 2个加固区域, A区和B区场地土层分布和性质一致。

A区和B区表层1.0 m左右为松软的杂填土, 其下为厚度约5.0 m粉土, 地基承载力为110 kPa, 地下水埋深为1.0 m, 粉土为饱和状态。根据地质情况和地基承载力选择了水泥土搅拌桩、砂实桩、强夯等几种方案, 通过经济可行等方面比选后确定采用强夯法进行地基处理。

收稿日期: 2014-02-25

作者简介: 王吉明(1968—), 男, 工程师, 从事土木工程施工等研究。

2 工程地质

工程场地地貌属长江三角洲冲积平原北翼, 地形尚平坦, 勘探揭露地层属第四纪全新世冲海相交错沉积物, 土层水平分布尚均匀。勘察深度

范围内共分 8 层土, 其土类及土性见表 1。场地地下水属自由潜水, 受大气降水及地表水补给, 近期内年最高水位约在自然地面下 0.2 m, 静止水位一般在自然地面下 1.0 m。

表 1 各土层的物理力学指标

土层序号	土层名称	层厚/ m	含水率 W/%	天然密度/ (t·m ⁻³)	压缩模量 E _{s1-2} /MPa	地基承载力 特征值 f _{ak} /kPa	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 φ/(°)	渗透系数/(10 ⁻⁴ cm·s ⁻¹)	
									K _h	K _v
①	杂填土	0.7~1.3								
②	粉土	3.5~3.8	31.7	1.87	11.4	110	12(UU)	15.4(UU)	3.72	9.05
③	粉土夹粉砂	1.5~3.8	27.4	1.93	15.4	150	5.8(快剪)	25.5(快剪)	8.11	5.63
④	粉砂	7.0~9.5	29.9	1.89	13.5	170	3.5(快剪)	27.7(快剪)	9.55	6.38
⑤	粉砂夹细砂	5.6~9.2	28.8	1.90	17.8	240	2.9(快剪)	27.5(快剪)		
⑥	粉土	3.9~5.9	28.0	1.90	14.7	170	3.5(快剪)	26.9(快剪)		
⑦	粉质黏土夹粉土	4.0~6.6	34.9	1.81	8.0	140	12.9(UU)	8.6(UU)		
⑧	粉砂夹粉质黏土	>12.0	30.2	1.86	14.3	250	7.8(快剪)	22.4(快剪)		

从表 1 和地质资料可知: 场地的浅层 6.0 m 内的第 1 层杂填土和第 2 层粉土的地基承载力低、变形大, 不能满足设计要求, 其中厚度 3.5~3.8 m 的粉土是地基处理应解决的主要地质问题。

3 强夯加固法试验方案设计

强夯法虽然与其他方案相比造价低廉, 强夯法处理砂类土地基经验丰富, 但在饱和粉土地基中使用较少, 缺少相应的参考规范。在工程正式施工前只能通过试验的方法确定强夯施工参数。

进行强夯法地基处理设计的步骤是根据地质情况和场地的使用要求, 确定强夯施工参数, 主要有: 夯击能量、夯点间距、夯击击数、夯击遍数。夯击能量的大小直接影响加固后的地基承载力和影响深度。为了确定合理的施工参数, 在该场地选用 A1 区、B1 区 2 个面积 20 m×20 m 的小区域作为强夯试验区, 位置见图 1。

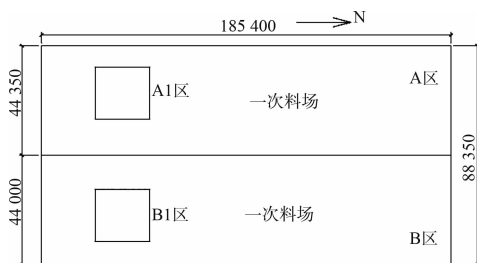


图 1 原料场地基处理试验区平面布置 (单位: mm)

3.1 地基处理目标

1) 根据场地的用途确定地基承载力特征值 $f_{ak} \geq 150$ kPa;

2) 根据表 1 场地的地质情况, 地基的处理深度为 5~6 m。

3.2 试验目的和内容

参考规范^[1-2], 该工程地基土的类型为粉土, 地基处理加固深度为 5~6 m, 夯击能量取 2 000 kN·m 比较合适。选取锤重为 120 kN, 直径 2.0 m 的重锤, 锤底静接地压力为 38.2 kPa, 在规范要求的 25~40 kPa 之间。夯点间距为夯锤直径的 2.5~3.5 倍, 理论计算值为 5~7 m, 取中间值 6.0 m。按规范夯击遍数宜采用 2~3 遍, 该场地为粉土地基, 土的渗透性介于砂性土和黏性土之间, 土层的竖向渗透系数为 9.05×10^{-5} cm/s, 排水性能与砂层相比差, 考虑强夯引起的超孔隙水压消散速度慢, 在饱和粉土层中打塑料排水板。采用 B 型塑料排水板, 三角形布点, 排水板间距 0.9 m, 夯击遍数取 2 遍。

参考规范已基本确定上述施工参数, 但是根据规范无法确定合理的夯击击数和 2 遍强夯之间的时间间隔。另外, 该场的表层为杂填土, 无法确定按夯击能量 2 000 kN·m 处理后的地基承载力

是否达到设计要求。通过对场地内 A1 区和 B1 两个试验区进行不同工艺的强夯法施工，进一步优化和确定该区域大面积强夯施工时的工艺参数，主要确定以下内容：

1) 按夯击能量 2 000 kN·m 和 2 500 kN·m 两种夯击能量下的夯沉量、隆起量和孔隙水压力消散情况，确定最佳的夯击击数和时间间隔；

2) 通过对强夯加固后地基进行静力触探和地基承载力检测，确定饱和粉土地基强夯法的加固效果。

3.3 试验区的强夯法施工

在夯击能量 2 000 kN·m 的强夯法现场施工时，发现饱和粉土地基在 2 击施工后，进行第 3 击施工时地基液化。后一击强夯施工后夯沉量在增大，地表隆起量也在增大，第 3 击施工后，总夯沉量大于 30 cm，第 4 击施工后，总夯沉量达 54 cm，规范^[1-2]要求的夯收锤标准为：1) 夯击时夯坑周围出现明显隆起，适当减少夯击击数；2) 夯击时相邻夯坑内出现明显的隆起，如果隆起量大于 5 cm 时，则要适当的降低夯击能量；3) 后一击夯沉量明显大于前一击夯沉量；4) 最后两击平均夯沉量小于 5 cm。现场施工与设计思路不一致，无法进行强夯施工。现场分析主要是由于地下水位高，粉土在动荷载作用下易液化的特性形成上述现象。针对现场场地面积大、降水工作量大的情况，经比选后考虑在表层铺 1.0 m 左右的硬质粒料层（钢厂的废钢渣）后再进行强夯施工。

施工工序为：1) 平整场地，去除表土；2) 打排水板，排水板间距 0.9 m；3) 铺硬质粒料层厚 1.0 m 左右及埋设孔隙水压力计；4) 第一遍强夯；5) 第二遍强夯；6) 振动碾压。参考砂性土地基强夯的施工经验，强夯法对表层 1.0 m 范围内的加固效果较差，采用激振力不小于 400 kN 的振动压路机对硬质粒料层进行振动碾压。具体碾压要求为稳压一遍，振动碾压 4 遍，每遍间隔时间不小于 4 h。振动碾压 1 个来回为 1 遍，碾压

搭接宽度不小于 20 cm，相邻碾压遍间采用正交行驶方向交错碾压。

4 试验监测、检测及成果分析

为了掌握强夯施工对地基的加固效果，对 A1 和 B1 试验区均进行了夯坑沉降量和隆起量监测和地基的孔隙水压力监测。施工结束后 28 d，进行静力触探检测、地基承载力试验。

4.1 夯沉量、隆起量分析

夯坑沉降量和隆起量的观测采用水准仪测量，对 A1 区和 B1 区夯坑的下沉量与隆起量进行了观测，典型曲线如图 2 和图 3 所示。

A1 区和 B1 区的夯击能量存在区别，B1 区的夯沉量与隆起量均大于 A1 区，第 1 遍强夯后，A1 区夯沉量在 0.41 m 左右，B1 区在 0.46 m 左右，A1 区的隆起量在 1.5 cm 左右，B1 区在 2.1 cm 左右；第 2 遍强夯后，A1 区夯沉量在 0.38 m 左右，B1 区在 0.41 m 左右，A1 区的隆起量在 1.3 cm 左右，B1 区在 1.6 cm 左右。

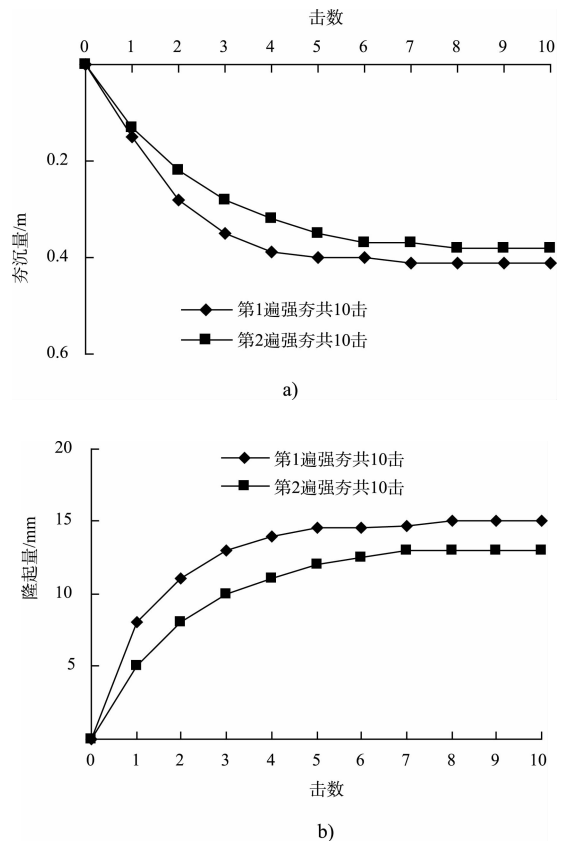


图 2 A1 区夯击能量 2 000 kN·m 的夯沉量与隆起量曲线

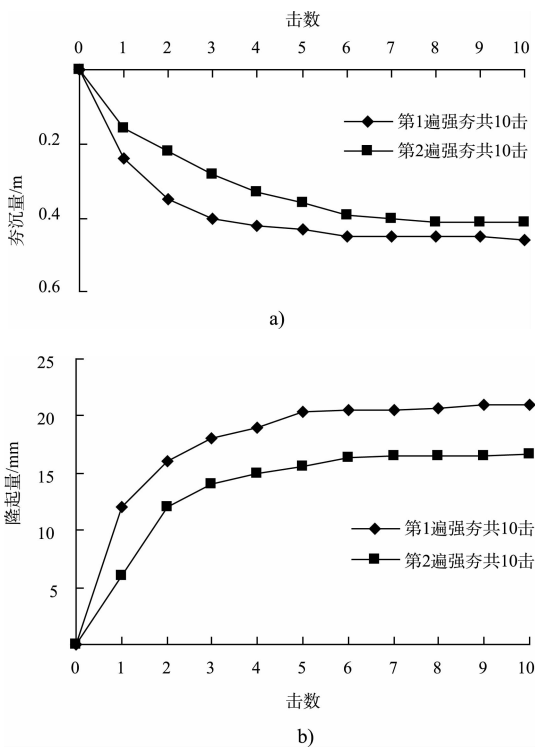


图 3 B1 区夯击能量 2 500 kN·m 的夯沉量与隆起量曲线

从图 2 和图 3 可以看出, 该粉土地基采用夯击能量 2 000 kN·m 和夯击能量 2 500 kN·m 施工, 夯沉量与隆起量均满足规范的收锤标准。

由此得出 2 个试验区的强夯击数及能量 (表 2)。

表 2 试验区强夯击数及能量

A1 区		B1 区			
第 1 遍	4~6 击	1 500 kN·m	第 1 遍	4~6 击	2 000 kN·m
第 2 遍	6~8 击	2 000 kN·m	第 2 遍	6~8 击	2 500 kN·m

4.2 孔隙水压力分析

孔隙水压力的埋设深度分别为 2.0 和 4.0 m (不包括表层硬质粒料层的厚度), A1、B1 区各布置 2 组观测点; A1 区和 B1 区典型的孔隙水压力消散曲线如图 4 所示。

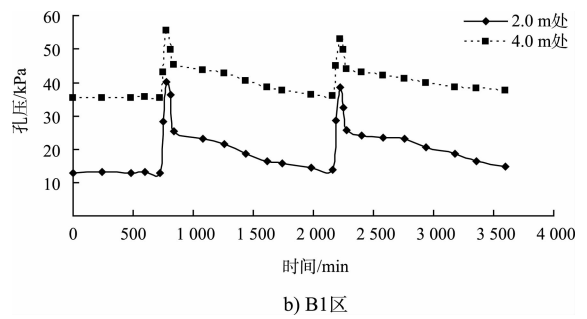
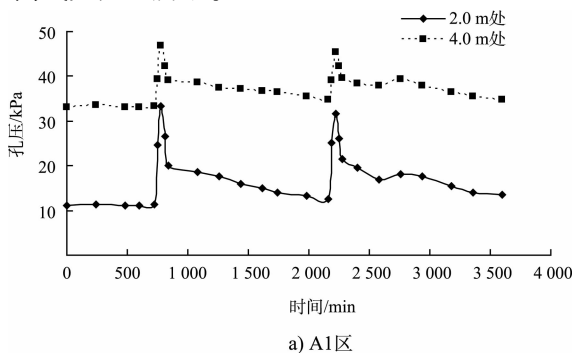


图 4 孔隙水压力消散曲线

从图中可以看出孔隙水压力的消散规律为:

- 1) 消散时间: 第 1 遍强夯后, 孔压在夯后上升, 很快达到峰值, 然后开始消散, A1 区 15 h 内超静孔压消散 85%, B1 区 16 h 内超静孔压消散 85%, A1 区和 B1 区 24 h 超静孔压消散 95%;
- 2) 强夯参数的影响: 因 2 个区域的强夯加固参数接近, 孔压消散规律几乎一致;
- 3) 孔压消散对施工的建议: 对于饱和粉土地地, 孔压消散一般在 15 ~ 16 h 超静孔压消散 85%, 可继续进行第 2 遍强夯施工。考虑施工质量因素, 综合确定粉土地基强夯法施工的时间间隔为 1 d。

4.3 静力触探试验分析

图 6 为强夯前和强夯结束后 28 d 时进行静力触探试验所得结果: A1 区和 B1 区的夯后静力触探 P_s 值均与夯前相比有增长; 强夯后, 强度增长段主要集中在 5 m 深度以内, 5 m 深度以下范围强夯加固效果不明显; A1 区采用夯击能量 2 000 kN·m,

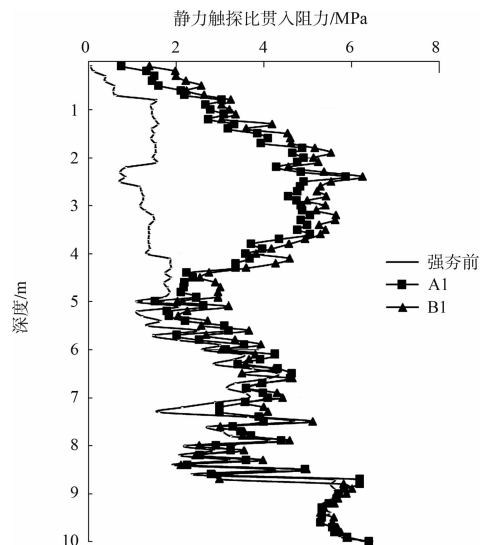


图 6 A1、B1 区典型的比贯入阻力曲线

所得夯后 P_s 值略小于 B1 区采用的夯击能量 2 500 kN·m 所得夯后 P_s 值。

4.4 地基承载力试验分析

在 A1 区和 B1 区分别进行 2 组地基承载力试验, 试验承压板面积为 1.0 m², 2 个区域的 P - S 曲线如图 7 所示。如图 7 所示, A1 区采用的夯击能量为 2 000 kN·m, 经过强夯处理后 28 d 进行 2 组载荷试验, 按文献[5]所得地基承载特征值力分别为 145 kPa 和 160 kPa, 平均值为 152.5 kPa。如图 8 所示, B1 区采用的夯击能量为 2 500 kN·m, 同样经过强夯处理后 28 d 进行 2 组载荷试验, 按文献[5]所得地基承载力分别为 155 kPa 和 170 kPa, 平均值为 162.5 kPa。

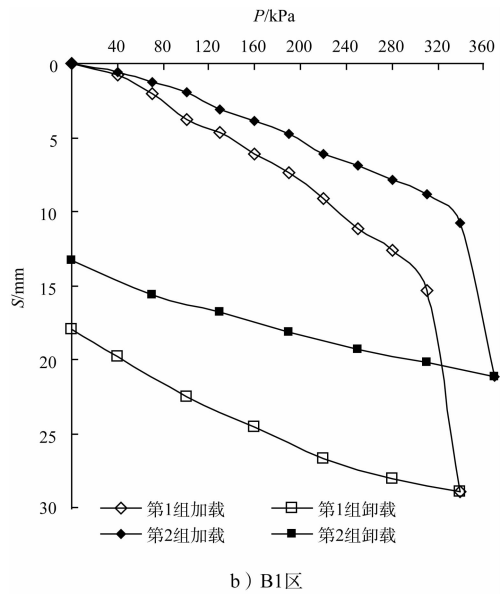
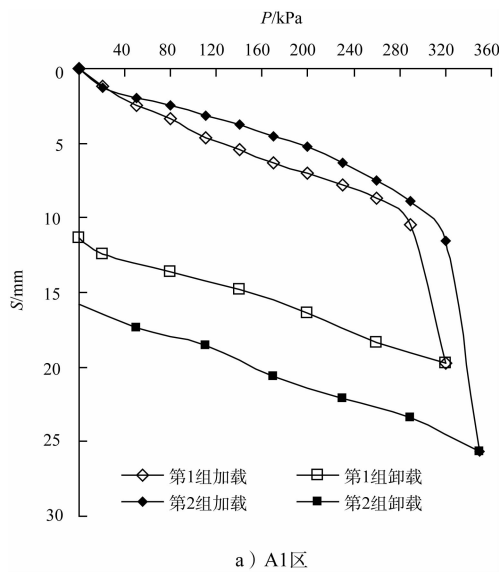


图 7 荷载沉降曲线

从图 7 可以看出, 夯击能量 2 000 kN·m 和夯击能量 2 500 kN·m 两种施工工艺的地基承载力均能满足要求, 夯击能量 2 500 kN·m 的地基处理效果略好, 该工程确定选用夯击能量为 2 500 kN·m。

5 小结

通过 A1 和 B1 2 个试验区的强夯试验, 试验过程中的夯沉量及隆起量测量、孔隙水压力观测, 以及试验后的静力触探试验、地基承载力试验, 采用现场实测的方法得出适于本工程的强夯处理施工参数 (表 3)。

表 3 强夯地基处理施工参数

加固深度/m	夯后地基承载力特征值 f_{ak} /kPa	夯点间距/m	每遍间隔时间/d	强夯数量/遍	每遍强夯击数及能量/(kN·m)	
					第 1 遍	第 2 遍
5~6	150	6.0, 正方形布置	1	2	4~6 击 1 500	6~8 击 2 000
5~6	150	6.0, 正方形布置	1	2	4~6 击 2 000	6~8 击 2 500

采用强夯法对饱和和粉土进行地基处理, 仅是一种尝试性的试验研究, 要想得到更全面的规律性, 须在更多工程实践中进行总结, 以便为类似工程设计提供参考。

6 结论

1) 对于地下水位较高的饱和粉土地基不宜直

接采用强夯法进行地基处理, 应先降水或在表层铺硬质粒料层后再进行强夯施工。

2) 粉土地基采用夯击能量 2 000 kN·m 和夯击能量 2 500 kN·m 施工, 夯沉量与隆起量均满足规范的收锤标准。

3) 粉土地基强夯施工第 1 遍的合理夯击击数为 4~6 击, 第 2 遍的合理夯击击数为 6~8 击。

4) 对于饱和粉土地基, 强夯施工的超静孔压消散一般在 15 ~ 16 h 消散 85%, 24 h 超静孔压消散 95% 左右, 两遍强夯法施工的时间间隔为 1 d。

参考文献:

[1] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范 [S].

[2] JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S].

[3] 徐尧, 刘媛. 某机场强夯工程试验研究[J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2002, 16(3): 280-282.

[4] 甘厚义. 强夯法处理饱和粉土、粉质黏土地基的试验研究[J]. 建筑科学, 1994(6): 37-43.

[5] JTS 133-1—2010 港口岩土工程勘察规范 [S].

(本文编辑 郭雪珍)

.....

(上接第 168 页)

5.3.2 主要施工要点

采用高压水枪结合人工清除桩内淤泥, 清空深度达到损伤或断裂位置 2 ~ 4 m 以下。采用吊锤法和钢尺测量 3 ~ 5 m 范围内管桩倾斜情况及其偏位情况。在桩前侧用钻机钻孔清除桩身前侧土体, 有利于用较小的水平拉力回复桩位。选择可靠的反力结构, 安装手拉葫芦, 拉桩移位; 严格控制拉桩移位的速率, 通过若干个行程将管桩拉至复位。在桩侧的孔穴内, 灌入 5 ~ 25 mm 碎石和砂性土填充, 人工插捣致密, 较大幅度地增加桩侧和桩底的土体强度和变形模量, 提高桩底土的抗偏荷载能力。用强光电筒和线坠复测已纠偏的管桩垂直度。桩内填芯前清洗管桩内壁, 然后在管桩内下放钢筋笼, 下端焊 5 mm 的钢挡板做底模, 内浇 C40 掺 12% UEA 的微膨胀混凝土。对所有已做纠偏加固处理的管桩进行高、低应变检测, 以确定桩基承载力是否满足使用要求, 以便进行下一步施工。

5.4 现场试验检测

对该船坞工程的坞室底板和水泵房四周倾斜管桩采取纠偏加固技术处理, 并对其一一进行高、低应变检测。如 1# 坞坞底板 II 11-e-7 管桩断裂位置在桩顶以下 5.7 m, 对其采取 3.1.3 所述方法加固处理后, 桩身完整性检测结果为 II 类桩, 单桩极限承载力达到 4 052 kPa, 满足设计要求的承载力。设计单位对检测结果审核后得出如下结论: 倾斜、损伤、断裂的 PHC 管桩经纠偏加固技术处理后满足使用要求。

6 结语

1) 软土地基上施打 PHC 管桩前必须非常重视挤土效应的问题, 以免出现因沉桩不合理造成土体强度降低。对流塑状软土的基坑, 挖土应均衡分层进行, 采用分级放缓坡开挖, 以免出现滑坡对桩基产生破坏。

2) 对倾斜桩纠偏扶正后应认真检查管桩在断裂处是否发生错位, 采用高光探照检查、钢筋探查和线锥检查等方法。若发生错位现象只可采取补桩或其他可靠处理方法。

3) 在纠偏加固处理损伤、断桩时, 在灌注桩芯混凝土前, 纠偏扶正的钢丝绳拉力不允许放松, 灌芯完成 24 h 后才可放松手拉葫芦, 放松时观察桩是否有反弹现象, 如有反弹应适当延长放松时间。

参考文献:

[1] 王忠平. PHC 管桩桩基整体偏位处理实例分析[J]. 结构工程师, 2005(4): 60-63.

[2] 曾文. PHC 管桩桩身缺陷的填芯补强[J]. 建筑技术, 2010, 41(10): 907-909.

[3] 岑仰润. 预应力管桩施工质量问题处理[J]. 浙江建筑, 2005(4): 41-43.

[4] 曾国熙, 周镜, 刘金砺, 等. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995.

[5] 赵鸿生. 管桩断桩加固补强施工技术[J]. 探矿工程, 2005(6): 11-12.

(本文编辑 武亚庆)