

DOI: 10.7672/sjgs2016150109

# 第四系松散土层强夯施工试验研究\*

肖洋<sup>1</sup>, 柳天杰<sup>2</sup>, 李证吉<sup>1,3</sup>

(1. 湖南城建职业技术学院, 湖南 湘潭 411101; 2. 河南工业职业技术学院建筑工程系, 河南 南阳 473000;  
3. 中建四局第五建筑工程有限公司, 贵州 贵阳 550003)

[摘要] 以江西地区某工程第四系松散土层的地基强夯处理为背景, 对强夯施工中夯沉量、深层土层水平位移、孔隙水压力及地下水等情况进行了监测并通过室内土工试验、平板荷载试验及标准贯入试验对该地基的强夯处理进行了检测。结果表明: 该工程地基采用强夯处理后, 加固效果明显, 地基承载力大幅提高。

[关键词] 地基; 强夯; 试验; 监测; 承载力

[中图分类号] TU472.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-8498(2016)15-0109-04

## The Quaternary Loose Soil Dynamic Compaction Construction Testing

Xiao Yang<sup>1</sup>, Liu Tianjie<sup>2</sup>, Li Zhengji<sup>1,3</sup>

(1. Hu'nan Urban Construction College, Xiangtan, Hu'nan 411101, China; 2. Department of Architecture and Civil Engineering, He'nan Polytechnic Institute, Nanyang, He'nan 473000, China;  
3. CCFED the Fifth Construction & Engineering Co., Ltd., Guiyang, Guizhou 550003, China)

**Abstract:** Taking the dynamic compaction treatment of quaternary loose soil of a project in Jiangxi area as the background, the compaction settlement, horizontal displacement of deep soil, pore water pressure and groundwater were monitored, and through indoor soil test, plate loading test and standard penetration test on the foundation, the dynamic compaction treatment were detected. The results show that after it is treated by dynamic compaction, the effect is obvious and the bearing capacity of foundation is greatly improved.

**Key words:** foundations; dynamic compaction; testing; monitoring; bearing capacity

### 1 工程概况

江西某电厂厂址地处江西省抚州市临川区和南城县境内青泥镇周家村, 建设场地以丘陵岗地为主, 地形起伏不大, 自然标高在 65.000~92.500m, 整体地势西南低, 东北高, 厂址用地主要为荒山和混交林, 并有一部分水田、旱地、经济林和水塘。强夯处理地基面积为 43 614m<sup>2</sup>, 在地基处理范围内土层情况如下: 上部为第四系松散层, 主要由冲积及坡积成因的粉质黏土、黏土及中粗砂(Q<sub>4</sub><sup>al</sup>, Q<sub>4</sub><sup>dl</sup>及 Q<sub>2</sub><sup>al</sup>)组成; 下伏基岩为白垩系上统南雄(K22-1)泥岩、泥质粉砂岩及砂砾岩等。

### 2 强夯试夯、监测及检测

#### 2.1 强夯试验及试验施工参数

采用 3 500kN·m 夯击能, 试夯施工面积为 25m×25m, 分 3 遍夯, 1, 2, 3 遍夯击能分别为 3 500,

3 000, 2 500kN·m。第 4 遍满夯, 单点夯击能为 1 000kN·m。第 1, 2 遍点夯夯点按 4m×8m 跳点插夯, 第 1 遍 12~15 击, 第 2 遍 10~12 击, 第 3 遍按点夯夯点 4m×4m 布置, 插在第 1, 2 遍形成的区格中间, 8~10 击; 第 4 遍满夯锤印搭接 0.3D, >4 击。

同时, 在夯击试验中监测深层土体水平位移、孔隙水压力及地下水变化情况, 并对强夯后的地基采用平板荷载试验、标准贯入试验及室内土工试验进行检测。试验区域为 25m×25m, 在该区域内开展静载试验、标准贯入试验, 同时采集土样进行力学试验并设置水平位移监测点及地下水位观测点; 具体布置情况如图 1 所示。

#### 2.2 试夯区监测

强夯试验中各遍不同夯击能的强夯击数与平均单击、平均累计夯沉量的曲线如图 2 所示。

由图 2 可知, 随着强夯遍数的增加, 单击夯沉量与累计夯沉量均不断减小; 第 1 遍在 3 500kN·m 的夯击能下初次夯击下沉量达 47.8cm, 第 3 遍在 2 500kN·m 的夯击能下初次夯击下沉量仅为

\* 河南省南阳市科技攻关项目: 膨胀土地区农村建筑地基处理技术研究(GG049)

[作者简介] 肖洋, 讲师, E-mail: 5008916@qq.com

[收稿日期] 2016-05-21; [修订日期] 2016-07-07

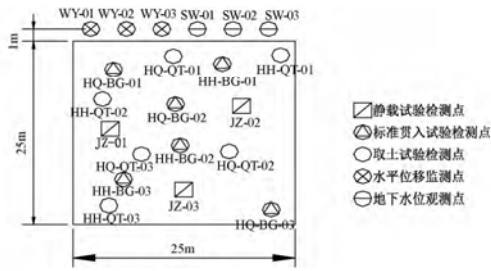


图 1 试夯监测、检测点布置

Fig.1 Monitoring and detection points layout for dynamic compaction test

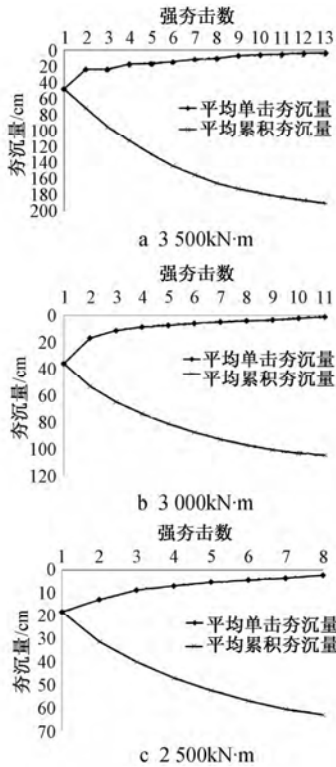


图 2 各能级平均单击、平均累计夯沉量-击数曲线

Fig.2 The average single and accumulated penetration settlement and penetration numbers for every energy level

18.41cm, 缩小了近 3 倍; 且在各遍强夯过程中, 随着夯击数的增加, 单击夯沉量曲线斜率不断减小, 曲线越来越缓。曲线结果表明, 在经过 3 次强夯后, 地基的变形量已经显著减小。

2.2.1 深层土体水平位移监测

测斜仪观测, 主要观测强夯引起的侧斜挤出。地基土深层土体水平位移监测是地基土稳定与深层土体侧向变形最为直接的反映。对于本工程, 主要观测强夯引起的侧斜挤出, 监测设计中, 应在试夯区外 1m 处布设深层土体水平位移监测孔, 试夯区监测点共布置 3 个, 各监测点间距为 1m 左右, 如图 1 所示。

2.2.2 孔隙水压力监测

强夯时, 地基土体受到冲击荷载发生瞬时的压缩和挤密, 孔隙减小, 孔隙水排出, 有效应力增加。如果土体的渗透性较差, 冲击产生的孔隙水压力不易消散, 就会在土层中产生超孔隙水压力, 对地基构成潜在的不稳定因素, 也降低了夯击的效率。通过孔隙水压力观测, 了解夯后土中超孔隙水压力的增长和消散规律, 以确定合理的夯点间距和 2 遍夯击之间必需的间歇时间。为监测孔隙水压力的变化情况, 强夯前预埋设孔压计(振弦式孔压计)测量初始孔压读数后进行强夯并开始测试。各深度位置的传感器分孔埋设, 同时满足不同深度量程需要。在强夯试验期间根据工程实际情况调整孔隙水压力测试频率。试夯区监测点共布置 3 个, 各监测点间距为 1m 左右, 如图 1 所示。

2.2.3 地下水位观测

为配合孔隙水压力观测, 并可通过水位情况控制强夯。强夯过程应控制好含水量, 堆筑区内部如地下水位高度太高, 会影响填土强夯的质量, 因此在强夯施工过程中对填土区内稳定水位进行观测, 以了解水位的变化情况。

2.3 试夯区检测

2.3.1 室内土工试验

土工试验试夯检测取样深度为 8m, 对不同深度土层的物理力学参数指标进行统计, 共取土样 72 组, 提供了土工常规参数: 包括含水率、密度、相对密度、液塑限、孔隙比、压缩模量及抗剪强度等。

2.3.2 平板荷载试验

为了排除承压板周围超载的影响, 平板荷载试验中平板标高处的坑底宽度取承压板直径(或宽度)的 4 倍, 同时施工中尽可能减小坑底开挖和整平对土层的扰动, 缩短开挖与试验的间隔时间。试验中采用分级维持荷载沉降相对稳定法(慢速法)。试验的加荷标准: 试验的第 1 级荷载(包括设备质量)应接近卸去土的自重。每级荷载增量(即加荷等级)一般取被测试地基土层预估极限承载力的 1/8 ~ 1/10。施加的总荷载应尽量接近试验土层的极限荷载。荷载的量测精度应达到最大荷载的 1%, 沉降值的量测精度应达到 0.01mm。

根据  $p-s$  曲线及  $s-lgt$  曲线确定地基土的极限承载力试验值, 评定地基土的承载力设计值是否满足设计要求, 并估计地基土的变形模量  $E_0$ 。

2.3.3 标准贯入试验

标准贯入试验是根据标准贯入试验的击数, 通过夯前、夯后击数对比, 确定地基处理的有效加固深度和加固效果及土的物理状态, 土的强度、变形

参数、地基承载力等进行评价。

### 3 试夯区监测结果分析

#### 3.1 变形观测结果分析

在强夯试验中,根据对沉降点的观测情况以及本次沉降观测的变形观测数据绘制土体隆起变形如图3所示,夯击次数与隆起体积和沉降体积关系如图4所示。

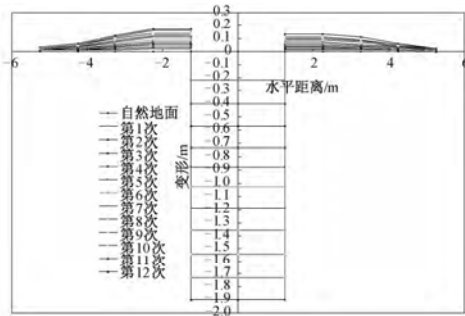


图3 3 500kN·m试验区地面变形曲线  
Fig.3 Ground deformation curves for test zone with 3 500kN·m

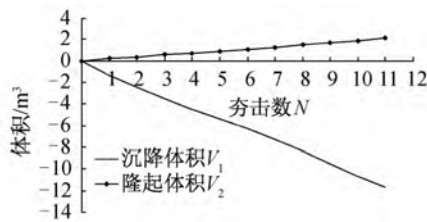


图4 夯击数与隆起体积和沉降体积关系  
Fig.4 The relationship of compaction number with bulge volume and settlement volume

由图3可知,本区域强夯施工中夯坑累计沉降量依夯击次数而不同,随着夯击次数的增加,累计沉降量不断增加,但增加的数值越来越小,10~12击夯坑累计沉降量在1.7~2.4m;距离夯坑中心2.25m处,地面累计最大隆起量在10~16cm。由图4可知,随着夯击次数的增加,地面的隆起体积不断增加,同时沉降的体积数值也越来越大,但隆起体积与沉降体积相比其增加速率远远小于沉降速率,其平均夯实体积比为0.84。

综合以上分析,在强夯挤压作用下,夯坑周边土体被挤出;夯实体积比在0.75以上,夯实效果显著,且地面隆起不大,说明主夯点间距4.0m基本合适。

#### 3.2 强夯水平位移监测结果分析(见图5)

根据强夯水平位移监测结果,主要位移发生在1~2m深度范围内,距离夯坑中心2.25m处,最大平均水平位移不到30mm,整体水平位移较小,3 500kN·m能级强夯基本不存在侧斜挤出,且位移

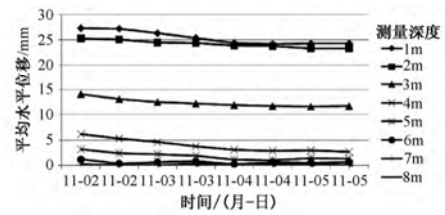


图5 强夯水平位移监测结果  
Fig.5 The horizontal displacement monitoring results for dynamic compaction

主要发生在6m深度范围内。

#### 3.3 孔隙水压力及水位监测结果分析

根据施工过程中监测绘制1~3号点孔隙水压力和超孔隙水压力历时曲线,如图6所示。

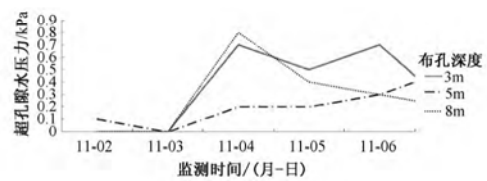


图6 孔隙水压力和超孔隙水压力历时曲线  
Fig.6 Duration curves of pore water pressure and excess pore water pressure

从监测结果来看,整个施工过程中,超孔隙水压力变化很小,最大超孔隙水压力仅为5.3kPa,另外在水位观测中并未观测到地下水位的出现;整个强夯过程中不存在孔隙水压力消散的问题。因此确定各遍夯之间的间隔期为2d。

### 4 试夯区检测结果分析

#### 4.1 平板荷载试验结果分析

典型平板荷载试验检测点结果如图7,8所示。

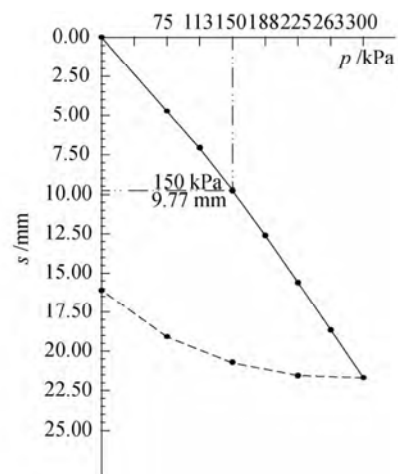


图7 典型平板荷载试验p-s曲线  
Fig.7 The p-s curve for typical plate loading test

平板荷载试验结果表明:地基经过强夯处理后承载力能够满足设计要求的150kPa,变形模量能够

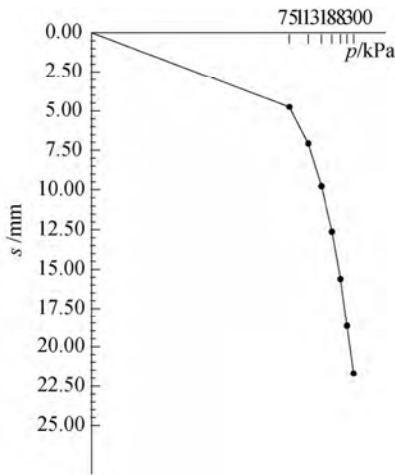


图8 典型平板静载试验  $s-1gp$  曲线  
Fig. 8 The  $s-1gp$  curve for typical plate static loading test

满足设计要求的 10MPa。

#### 4.2 标准贯入试验结果分析

根据标准贯入试验结果绘制各检测点夯前夯后标准贯入击数,其典型点夯前夯后标准贯入击数对比如图9所示。

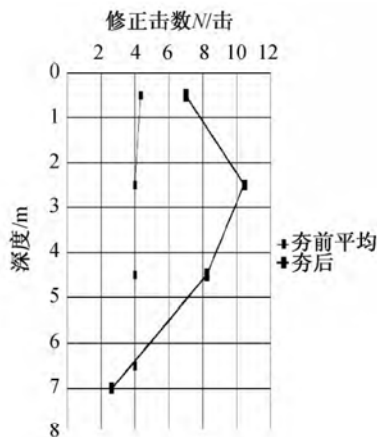


图9 典型夯点夯击前后标准贯入击数对比  
Fig. 9 Comparison of standard penetration number before and after compaction of typical compaction points

贯入试验结果表明:6m 以上夯后标准贯入击数相比于夯前有较为显著的提高,有效加固深度可以判定为6m。

#### 4.3 土工试验结果分析

根据土工试验结果强夯前、后地基土的干密度、孔隙比及压缩模量统计如表1所示。

从土工试验结果分析来看,经强夯处理,在6m范围内的土层均得到一定程度上的加固,满足设计要求。

表1 3 500kN·m 试夯区夯前、夯后主要参数平均值统计  
Table 1 The main parameters' average values before and after compaction in test area

深度/m		0~2	2~4	4~6	6~8
干密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	夯前	1.70	1.75	1.75	1.74
	夯后	1.87	1.86	1.82	1.76
孔隙比	夯前	1.05	1.10	1.04	0.98
	夯后	0.98	0.91	0.97	0.98
压缩模量/ MPa	夯前	4.71	5.63	5.16	5.37
	夯后	12.04	11.54	11.42	9.56

## 5 结语

根据平板荷载试验、标准贯入试验及室内土工试验结果综合分析,本项目所采用的地基处理方法是适宜的。经过相应工艺的强夯处理后,场地地基土力学性能得到明显改善。根据试验结构可以得到如下结论。

1) 静载试验结果表明经处理后的地基承载力特征值可以满足设计要求的 150kPa、变形模量  $E_0$  可以满足设计要求的 10MPa。土体深层位移结果表明强夯对周边 5m 以外建筑物的影响可以忽略不计。

2) 结合各试验结果,该松散土层夯击能为 3 500kN·m 时,强夯加固有效深度为 6m。结合现场施工参数和变形观测结果,具体施工参数建议为:第 1 遍夯单点击数为 10 击,且最后 2 击平均夯沉量  $\leq 10$ cm;第 2 遍夯单点击数为 8 击,且最后 2 击平均夯沉量  $\leq 8$ cm;第 3 遍夯单点击数为 6 击,且最后 2 击平均夯沉量  $\leq 5$ cm;各遍夯间歇期建议为 2d。

根据现场实际情况,在施工期间尚应加强天气预报观测,强夯施工后的夯坑在降雨之前及时推平、回填,避免降雨形成集水坑对夯坑浸泡;遇降雨在坑内形成积水区域,应挖出坑内软泥,露出新鲜土层方可回填干燥土;强夯施工在降雨过后,至少必须经过 1 周的晾晒,待浅层地基土干燥后方可继续施工,以保证地基处理加固效果;施工过程中应确保施工安全。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范: JGJ79—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [2] 王铁宏. 全国重大工程项目地基处理实录 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] 年廷凯, 李鸿江, 杨庆, 等. 沿海下卧软弱夹层碎石回填地基 15 000kN·m 高能级强夯试验 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (3): 689-694.
- [4] 王宗文. 强夯法在文莱达摩拉岛软弱夹层地基处理中的应用与研究 [J]. 施工技术, 2016, 45 (1): 56-58.
- [5] 詹金林, 水伟厚, 何立军. 强夯法地基处理设计及夯后检测 [J]. 施工技术, 2008, 37 (S1): 124-128.
- [6] 张宏博, 厉超, 宋修广, 等. 强夯加固粉土地基地面振动衰减规律研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2015 (5): 1289-1295.