

8 000 kN·m 能级强夯处理湿陷性黄土实践研究

薛 玉¹, 韩晓雷¹, 水伟厚², 詹金林²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 上海现代建筑设计集团 申元岩土工程有限公司, 上海 200011)

摘要: 对8 000 kN·m能级强夯地基处理设计、施工、检测进行系统全面的实践研究,通过现场标准贯入试验、室内土工试验、静力触探试验、瑞雷波试验、浸水与不浸水平板载荷试验对强夯处理效果进行综合检测,得出有效加固深度、湿陷性处理效果等结论,为大面设计、施工、检测提供优化数据,供类似黄土地基处理提供参考。

关键词: 湿陷性黄土; 地基处理; 强夯; 检测

中图分类号: TU475. 3; TU472. 31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672—1144(2008)02—0008—03

Experimental Study on Treatment for Collapsible Loess Foundation by Dynamic Compaction with 8 000 kN·m Energy

XUE Yu¹, HAN Xiao-lei¹, SHUI Wei-hou², ZHAN Jin-lin²

(1. College of Civil Engineering, Xi'an Science and Technology University of Architecture, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 2. Shenyuan Geotechnical Engineering Co. Ltd. of Shanghai Xiandai Architectural Design Group Company, Shanghai 200011, China)

Abstract: The design, construction and detection about the foundation treatment by the dynamic compaction with 8 000 kN·m energy are tested and studied systematically. The effects of the dynamic compaction are detected and analyzed synthetically by standard penetration test, soil mechanics experiment, static sounding test, Rayleigh test and plate loading test, and the effective reinforced depth and coefficient of collapsibility are obtained to provide references for the design, construction and detection of the similar loess foundation treatment.

Keywords: collapsible loess; foundation treatment; dynamic compaction; detection

1 概述

强夯法是一种经济高效的地基处理方法,即反复将80~400 kN的锤(最重的达2 000 kN)起吊到8~25 m高处(最高的达40 m),而后自由落下,其动能能在土体中转化成很大的冲击波和高应力,从而提高地基强度,降低压缩性,消除湿陷性,改善其抵抗振(震)动液化的能力等,同时可提高土层的均匀性,减少工后差异沉降。强夯法在处理湿陷性黄土方面具有独特的优点,不但造价低廉,而且施工速度快,在国内数百项工程得到广泛的应用,并均取得较好效果^[1~6]。为研究强夯法在湿陷性地区的适用性,进行了8 000 kN·m能级强夯实践研究,为大面积施工提供优化设计参数,指导施工。

2 场地工程地质条件

本试验场地位于甘肃省庆阳市西峰区董志镇的朱庄与新庄两村之间,场区地貌单元为黄土塬,是我国最大的塬——董志塬,地形平坦开阔,起伏较小,最大黄土覆盖深度可达200~300 m。场地所在属半干旱内陆性季风气候区,地面标高为1 350.00~1 361.30 m,地下水埋深一般为29.5~

33.5 m左右,标高1 320.50~1 327.80 m之间。钻孔最大揭示深度40 m,揭示地层13层,第一层粉质粘土(黑垆土)为Q₄;第二、第三、第四层粉质粘土(马兰黄土)为Q₃;第五、第六、第七、第八、第九、第十、第十一、第十二、第十三层粉质粘土(离石黄土上段)为Q₂。勘探场区,湿陷性黄土的湿陷程度由上向下逐渐减弱,一直渐变为非湿陷性黄土。湿陷性黄土的底界埋深16 m左右,包含的地层为②、③、④、⑤粉质粘土,也就是说场地内湿陷性黄土为Q₃的马兰黄土和Q₂顶部的离石黄土。场地黄土的湿陷等级为II级,湿陷类型为自重湿陷性黄土。

3 设计要求

试验区为40 m×40 m,主夯点间距为8.0 m,采用8 000 kN·m能级强夯加固处理,分四遍进行,第一、二遍能级为8 000 kN·m点夯,夯点的收锤标准以最后两击的平均夯沉量小于5 cm,最后两遍为2 000 kN·m能级满夯,每遍每夯点夯击2击,要求夯锤底面积彼此搭接1/4。

8 000 kN·m能级强夯地基有效加固深度不小于10.0 m,地基承载力设计值 $f_{ak} \geq 250$ kPa,压缩模量 $E_s \geq 20$ MPa,

收稿日期: 2008-01-27

修回日期: 2008-03-13

基金项目: 国家重大基础理论研究 973 项目(2002CCC00200)

作者简介: 薛玉(1981—),男(汉族),山东青岛人,硕士研究生,主要从事地基处理,边坡和基坑支护,地基检测等方面的学习和研究。

剩余湿陷量不大于 200 mm。

4 现场施工参数

第一遍, 8 000 kN·m 能级强夯, 共 25 个夯点, 夯点间距为 8.0 m, 按 7~8 击且最后两击平均夯沉量不大于 20 cm 控制。夯坑平均夯沉量为 1.76 m(见图 1), 整个场地平均沉降量约为 44.0 cm。

第二遍, 8 000 kN·m 能级强夯, 共 25 个夯点, 夯点间距为 8.0 m, 按每点 6~8 击且最后两击平均夯沉量不大于 20 cm 控制。夯坑平均夯沉量为 2.15 m(见图 1), 整个场地平均沉降量约为 36.0 cm。

第三遍, 3 000 kN·m 能级加固夯, 共 50 个夯点, 夯点位于第一、二遍夯点之间, 按最后两击平均夯沉量不大于 5 cm 控制。平均击数为 6 击, 夯坑平均夯沉量为 0.58 m(见图 1), 整个场地平均沉降量约为 12.0 cm。

第四、五遍为 2 000 kN·m 满夯, 夯印搭接 1/4。每点 2 击, 两遍满夯后, 整个场地平均夯沉量约为 19.0 cm。

根据夯前、夯后标高测量结果计算, 8 000 kN·m 试夯区整个场地平均夯沉量为 111.0 cm。

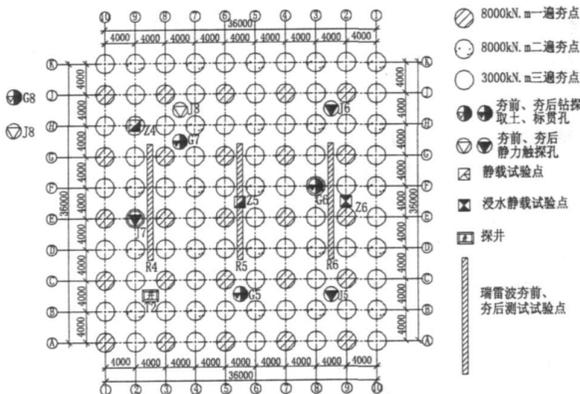


图 1 8 000 kN·m 试验区夯点及检测点布置平面图

5 测试内容及工作量

为准确了解处理效果, 达到不同的处理目的, 本试验区采用多种检测测试, 检测的内容及工作量如表 1 所示, 地基处理检测点布设见图 1。

表 1 检测项目与工作量一览表

检测内容	单位	数量	备注
瑞雷波测试	点	6	夯前、夯后各 3 点
钻探取样 (包括标贯)	孔	4	夯前 1 孔、夯后 3 孔, 孔深 15m; 取样每米取一个, 共 40 个样; 标贯夯前 10 次, 夯后 30 次, 共 40 次。
探井	孔	1	井深 15m, 取样每米一个, 共 10 个。
静力触探	点	4	夯前 1 孔、夯后 3 孔, 孔深 15m。
平板静载试验	点	3	要求 $f_{ak} \geq 250kPa$, $E_s \geq 20MPa$, 1 个浸水, 2 个不浸水。

5.1 标准贯入试验

本次钻探取样按夯前、夯后两次进行, 夯前 1 孔、夯后 3 孔, 夯前、夯后各地层标贯击数~深度曲线如图 2 所示, 通过图 2 得到有效加固深度约 9 m, 浅层 2 m 地基土加固效果尤为明显。

5.2 静力触探

静力触探 P_s ~深度曲线如图 3 所示, 可以看出 2 m 深度范围内的静探 P_s 值变化比较明显, 夯点上的 P_s 值较夯间大, 夯点浅层加固效果明显, 有效加固深度约 9 m 左右。

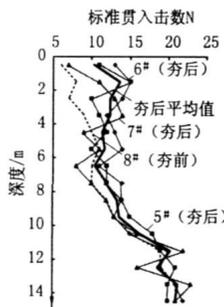


图 2 标准贯入夯前夯后对比曲线

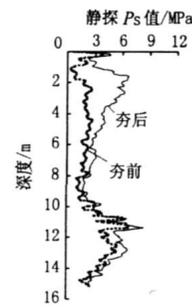


图 3 静力触探夯前夯后对比曲线

5.3 原状土取样及土工试验

本试验区夯前 1 孔, 夯后 4 孔(一个探井), 取原状土样 50 件, 通过统计分析, 强夯加固前、后主要土层主要物理力学指标对比如图 4、图 5 所示。从图 4、图 5 可以看出, 处理后浅层湿陷性全部消除, 压缩模量可增加 3~5 倍。地基土 8 m 处加固效果最为显著, 表层 1 m 土由于满夯后未经碾压, 因此稍有疏松, 压缩模量较深处有所降低。室内部分土工试验参数如表 2 所示, 处理后渗透系数由夯前的 $i \times 10^{-3} \sim i \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 减小为 $i \times 10^{-5} \sim i \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。

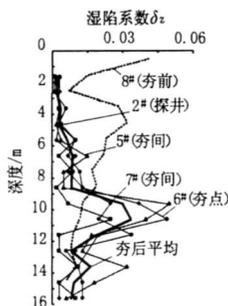


图 4 夯前、夯后湿陷系数对比曲线

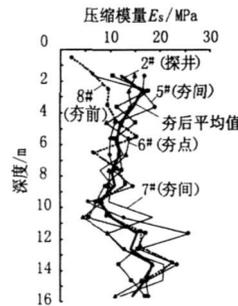


图 5 夯前、夯后压缩系数对比曲线

5.4 瑞雷波测试

通过夯前、夯后单点瑞雷波测试, 对比前后频散曲线变化, 判定强夯有效加固深度。本次测试采用 SRS24 型多功能工程地震仪, 采集参数如下: 道数 24 道; 道距 1 m; 偏移距 15 m; 采样点数 1 024; 采样率 1 ms; 检波器 4.5 Hz; 震源采用 24 磅大锤人工锤击地面。

通过试验夯前、夯后瑞雷波频散曲线如图 6 所示, 浅层波速得到显著增加, 通过波速及深度对比曲线可看出加固深度在 8 m 左右。

表 2 土工参数对比表

深度/m		0~2	2~4	4~6	6~8	8~10	10~12	12~14	15
干密度 ($g \cdot cm^{-3}$)	夯前	1.356	1.385	1.350	1.395	1.370	1.530	1.520	1.540
	夯后	1.676	1.563	1.430	1.378	1.408	1.465	1.443	1.505
孔隙比	夯前	0.996	0.957	1.003	0.938	0.994	0.773	0.783	0.756
	夯后	0.618	0.737	0.896	0.970	0.928	0.853	0.881	0.803
压缩模量 /MPa	夯前	4.33	9.55	13.25	9.03	10.67	12.73	19.28	17.56
	夯后	12.20	15.50	11.70	11.06	9.34	12.90	16.36	15.79

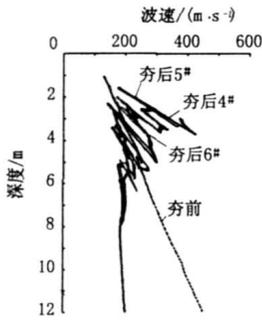
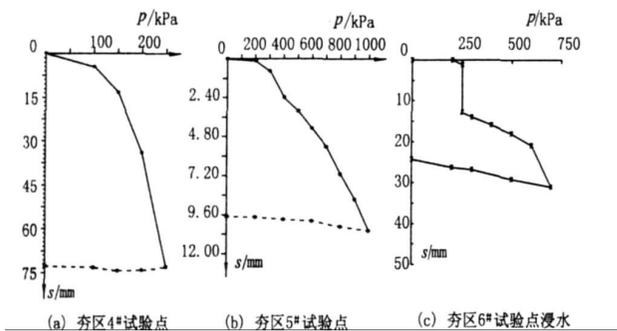


图 6 试验区夯前~夯后瑞雷波频散曲线

5.5 平板载荷试验

本次夯后共进行 3 组平板载荷试验, 分夯间、夯点进行, 试点编号分别为 4[#]、5[#]、6[#], 其中 4[#]、5[#] 为不浸水载荷试验, 6[#] 为浸水载荷试验, 检测点布置见图 1。由于强夯处理后地基土渗透系数显著减小, 因此在浸水静载试验点四周打设 8 个深 4 m、直径 130 mm 的浸水孔, 内填小粒径卵石, 加速浸水。载荷板面积为 1.0 m × 1.0 m, 最大加载量按设计要求地基承载力特征值的 2 倍加载, 即不小于 500 kN。静载试验在强夯施工完成一周时进场测试。平板载荷试验 $P \sim s$ 曲线如图 7 所示。浸水载荷试验先不浸水加载至 500 kPa 稳定后, 再向载荷板四周沟槽及浸水孔灌水浸泡, 整个浸水静载试验历时 12 d 完成, 浸水期间保持载荷板底部压力为 500 kPa, 浸水后载荷板下沉 4.133 mm, 可看出已完全消除地基土的湿陷性。

图 7 夯区各试点平板载荷试验 $P \sim s$ 曲线

按规范公式: $E_0 = I_0(1 - \mu^2) \frac{Pd}{s}$ 计算 5[#]、6[#] 试验点的变形模量分别为 48.7 MPa、112.2 MPa。静载试验各点的承载力特征值和变形模量汇总见表 3。

表 3 静载试验成果汇总表

试验点号	最大加载量/kN	最终沉降量/mm	地基承载力特征值/kPa	变形模量/MPa	备注
4 [#]	504	70.03	100	11.2	不浸水
5 [#]	504	10.59	500	48.7	不浸水
6 [#]	504	30.93	300	112.2	浸水试验

6 结 论

通过本次系统性、全面的强夯试验, 得到以下结论:

(1) 经过 8 000 kN·m 能级强夯处理后, 本场地地基承载力特征值不小于 250 kPa, 压缩模量不小于 25 MPa, 满足设计要求。

(2) 根据试验结果综合分析判断, 本区域强夯有效加固深度 ≥ 8 m, 基本满足设计要求。

(3) 对以处理湿陷性黄土为目的设计, 8 000 kN·m 能级有效加固深度可达 8 m 左右, 处理湿陷性黄土效果显著。

(4) 主夯点能级 8 000 kN·m, 间距 8 m, 单点夯击 8~10 下, 所有参数满足设计需要。

(5) 经过强夯处理后的黄土, 浅层地基土承载力不再是问题, 主要是有效加固深度的问题。

(6) 4[#] 点因试坑受降水影响过于潮湿, 且试验点附近积水较多, 造成试坑底部周边土含水率过高而软化, 造成沉降过大 70 mm ($s \geq 0.06 b = 42$ mm), 试验结果未能真实反映地基承载力情况。根据本试验区另两个载荷试验点试验结果及 3 000 kN·m、12 000 kN·m 试夯区载荷试验情况判断, 本区地基承载力特征值 ≥ 250 kPa。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范(JGJ79-2002)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1992: 18-21.
- [3] 王铁宏, 水伟厚, 王亚凌, 等. 10 000 kN·m 高能级强夯时的地面变形与孔压试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 759-762.
- [4] 水伟厚, 王铁宏, 王亚凌. 10 000 kN·m 高能级强夯作用下孔压测试与分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 78-81.
- [5] 水伟厚, 王铁宏, 王亚凌. 碎石回填地基上 10 000 kN·m 高能级强夯标准贯入试验[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1309-1312.
- [6] 水伟厚, 王铁宏, 王亚凌. 碎石回填地基在 10 000 kN·m 高能级强夯前后土性变化研究[J]. 建筑施工, 2005, 27(6): 35-37.