

12 000 kN·m高能级强夯处理湿陷性黄土试验研究*

詹金林 水伟厚 何立军 成小程

(上海现代建筑设计集团申元岩土工程有限公司,上海 200040)

摘要: 对 12 000 kN·m 能级强夯处理湿陷性黄土地基的设计、施工、检测进行系统全面的研究,通过标准贯入试验、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,与同一场地 3 000 8 000 kN·m 能级的处理效果进行对比,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、检测提供参考。

关键词: 湿陷性黄土;地基处理;12 000 kN·m 强夯;检测

12 000 kN·m ENERGY DYNAMIC COMPACTION EXPERIMENT FOR COLLAPSIBLE LOESS

Zhan Jinlin Shui Weihou He Lijun Cheng Xiaocheng

(Xiandai Architectural Design Group, Shen Yuan Geotechnical Co. Ltd, Shanghai 200040, China)

Abstract: A experiment of 12 000 kN·m energy dynamic compaction for collapsible loess was carried out. Through comprehensive analyzing the data of standard penetration test, soil mechanics experiment, cone penetration test, Rayleigh test, static test, and compare with other energy dynamic compaction results of collapsible loess, some results of effective reinforced depth and coefficient of collapsibility were obtained. References for design, construction, and detection of collapsible loess were provided.

Keywords: collapsible loess; foundation treatment; 12 000 kN·m dynamic compaction; detection

强夯法是加固湿陷性黄土的一种经济高效、节能环保的处理方法,在国内数百项工程中得到广泛的应用,并取得良好效果^[1-4]。随着西部大开发的深入,大量基础设施的建设对湿陷性黄土地基处理的要求也越来越高。JGJ 79—2002《建筑地基处理技术规范》^[5]中强夯处理的最高能级为 8 000 kN·m,GB 50025—2004《湿陷性黄土地区建筑规范》^[6]中为 8 500 kN·m,对黄土地区需处理的湿陷性深度超过 10 m 的工程过去均采用分层强夯或挤密灰土桩处理,造价高,工期长。近年来,国内强夯在碎石土地基上的最高能级已经达到 18 000 kN·m^[7],单层强夯的有效加固深度达到了 18~20 m。在黄土地区采用更高能级的强夯,其加固效果如何,工艺参数与碎石土地区有何差别是岩土工程界关心的课题。结合湿陷性黄土地区国家某重点工程,通过多种原位和土工试验,对 12 000 kN·m 能级强夯在该场地的加固效果及相关参数进行研究,得到了一些探索性的规律和结论。

1 场地工程地质条件

试验场地位于甘肃某黄土塬,地形平坦开阔,黄土最大覆盖厚度达 200~300 m。场地地面标高为

1 350.0 m 左右,地下水埋深一般为 29.5~33.5 m。钻孔最大揭示深度 40 m,揭示地层 13 层,第①层为 Q_4 粉质黏土(黑垆土);第②—第④层为 Q_3 粉质黏土(马兰黄土);第⑤—第⑬层为 Q_2 粉质黏土(离石黄土上段)。勘探场区,湿陷性黄土的湿陷程度由上向下逐渐减弱,渐变为非湿陷性黄土。湿陷性黄土的底界埋深为 16 m 左右,包含的地层为②—⑤粉质黏土,即场地内湿陷性黄土为 Q_3 的马兰黄土和 Q_2 顶部的离石黄土。本场地黄土的湿陷等级为 II 级,湿陷类型为自重湿陷性黄土。

2 试验设计

试验区分 12 000, 8 000, 3 000 kN·m 三块区域进行试夯,其中 12 000 kN·m 试验区为 50 m×50 m,五遍成夯工艺,第一、二遍能级为 12 000 kN·m 点夯,呈正方形布置,夯点间距 10 m,间隔跳打,第二遍夯点位于第一遍 4 个夯点之间;第三遍为 8 000 kN·m

* 上海现代建筑设计集团基金资助项目:高能级强夯与预处理动力固结法研究(2004-结-地-03)。

第一作者:詹金林,1977 年出生,硕士,工程师。

收稿日期:2009-11-15

能级的加固夯,夯点位于第一、二遍夯点和第一、二遍夯点中间;四、五遍为3 000 kN·m能级满夯,每遍每夯点夯击1击,夯印搭接1/4。

3 000 kN·m 试验区为四遍成夯工艺,第一、二遍为点夯,夯击能为3 000 kN·m,夯点间距为5 m,呈正方形布置,夯击次数不少于8击。第三、四遍采用1 000 kN·m夯击能满夯,每点1击,夯印搭接1/3。

8 000 kN·m 试验区为五遍成夯工艺,第一、二遍为点夯,夯击能为8 000 kN·m,夯点间距为7 m,呈正方形布置,第二遍夯点位于第一遍4个夯点之间,夯击次数不少于8击。第三遍为点夯,夯击能为3 000 kN·m,点夯间距为7 m,呈正方形布置,一般不少于6击。第四、五遍采用1 500 kN·m夯击能满夯,每点1击,夯印搭接1/3。

3 现场施工参数

12 000 kN·m 试验区锤重为450 kN,落距为26.7 m。第一遍夯8~10击,第二遍夯6~8击,最后两击平均夯沉量不大于200 mm,能级12 000 kN·m;第三遍加固夯能级8 000 kN·m,夯击数4击。第一、二遍强夯夯坑平均夯沉量分别为4.2、3.2 m,整平后场地平均沉降量分别为0.3、0.29 m,第三遍强夯夯坑平均夯沉量为1.7 m,整平后场地平均沉降量为0.23 m。第四、五遍夯击能级3 000 kN·m满夯的平均夯沉量为0.33、0.13 m;试验场地总体平均沉降量为1.28 m。

3 000、8 000 kN·m 试验区强夯后总体平均沉降量分别为0.5、0.9 m。为对比三种夯击能的夯击效

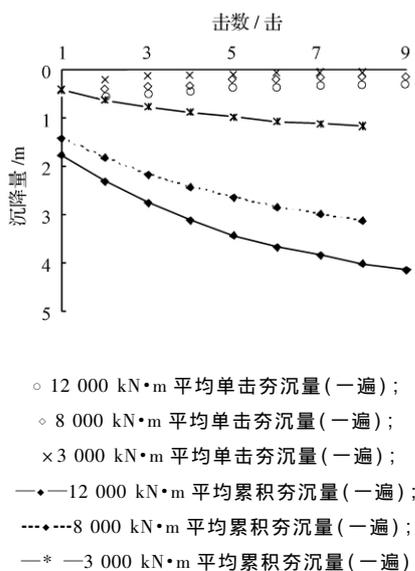


图1 不同能级夯坑累积沉降量-夯击数对比曲线

Fig.1 The comparison curve of settlement and drop number of dynamic compaction

果,图1绘出了3 000、8 000、12 000 kN·m第一遍强夯施工的夯坑累积夯沉量对比曲线。

4 现场测试结果

为评价高能级强夯加固效果,判断有效加固深度,本试验区采用多种检测手段综合测试,检测的内容及工作量见表1。

表1 检测项目与工作量

Table 1 Amount of work for detection			
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 (标贯)	孔	4	夯前1孔、夯后3孔,孔深20 m;取样每米取一个,共80个样;标贯夯前20次,夯后60次,共80次
探井	个	1	井深20 m,取样每米一个,共20个
静力触探	点	4	夯前1孔、夯后3孔,孔深20 m
平板静载试验	点	3	要求承载力标准值不小于250 kPa,压缩模量不小于20 MPa,1个浸水,2个不浸水

4.1 标准贯入试验结果

为使试验结果具有可比性,在夯前、夯后分别进行了标准贯入试验,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可以看出:12 m以内的标贯击数增长较大,12~18 m的标贯击数存在不同程度的提高,但波动较大,因此根据标贯试验判断有效加固深度为12 m。

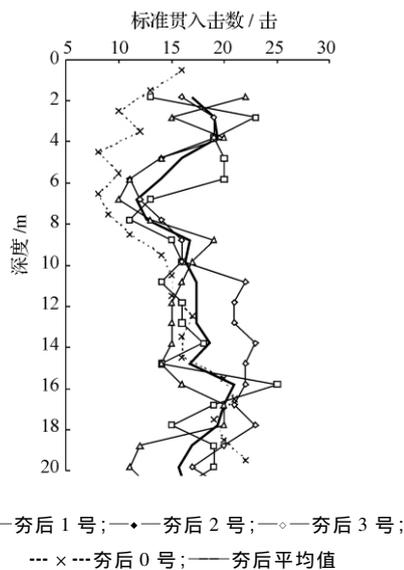


图2 标准贯入夯前夯后对比

Fig.2 The comparison of SPT curve before and after dynamic compaction

4.2 原状土取样及土工试验结果

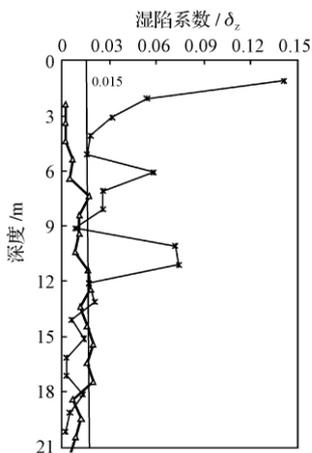
本试验区夯前1孔,夯后4孔(一个探井),取

原状土样 100 件,主要用来分析土的湿陷系数,图 3 为强夯加固前、后的湿陷系数对比曲线,由图 3 可以看出:处理后 12 m 以内湿陷性全部消除。对于以消除黄土湿陷性为目的地基处理,应以湿陷系数为评价指标,因此判定 12 000 kN·m 试验区强夯有效加固深度为 12 m。室内部分土工试验参数统计如表 2 所示,根据室内土工试验的干密度、孔隙比、压缩模量综合判定有效加固深度为 12 m。

表 2 土工参数对比

Table 2 The comparison of soil parameters

深度/m	干密度/(g·cm ⁻³)		孔隙比		压缩模量/MPa	
	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后
0~2	1.350	1.721	1.076	0.576	10.93	17.75
4~4	1.415	1.599	0.920	0.700	7.61	12.63
4~6	1.365	1.470	0.992	0.848	11.08	12.17
6~8	1.380	1.420	0.968	0.914	12.80	12.98
8~10	1.485	1.475	0.826	0.841	9.61	9.23
10~12	1.415	1.409	0.917	0.922	10.71	13.17
12~14	1.460	1.433	0.859	0.894	16.05	13.01
14~16	1.480	1.513	0.831	0.795	17.50	11.43
16~18	1.475	.495	0.836	0.816	15.02	17.52
18~20	1.425	1.473	0.904	0.843	20.50	16.14



—*— 夯前; —△— 夯后平均
图 3 夯前、夯后湿陷系数对比

Fig. 3 The comparison of coefficient of collapsibility before and after 12 000 kN·m dynamic compaction

4.3 静力触探试验结果

静力触探试验,采用静力触探车型号为 TNKC5090TC,探头为 JMS-15 型双桥探头, JTJWJ-2 型静力触探微处理仪,每 5cm 采集一个 q_c 、 f_s 值。本试验根据静探 q_c 、 f_s 综合判定地基土有效加固深度。

根据静力触探结果,绘制静探 q_c 、 f_s - 深度曲线,如图 4 所示。从图 4 可以看出,14 m 深度范围内的静探 q_c 、 f_s 值提高比较明显,14 m 以下地基土

静力触探值波动变化较大,较原静探 q_c 、 f_s 值变化不明显。因而根据静力触探 q_c 、 f_s 值综合判定试验区有效加固深度为 14 m。表 3 为各地层双桥静力触探实测结果的 q_c 、 f_s 统计值,可以看出,经过处理后有效加固深度内各层 q_c 、 f_s 均提高 30% 以上。

表 3 静力触探参数统计对比

Table 3 The comparison of CPT parameter

地层序号	夯前 q_c /	夯后 q_c /	q_c 提高率/%	夯前 f_s /	夯后 f_s /	f_s 提高率/%
	MPa	MPa		kPa	kPa	
②	1.20	4.70	292	35	129	269
③	3.28	5.38	64	161	247	53
④	1.88	2.43	29	94	129	37
⑤	4.43	5.54	25	222	294	32

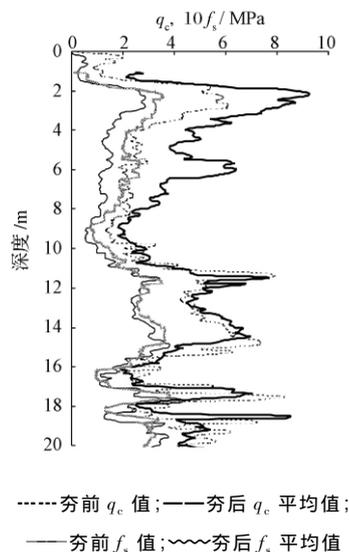


图 4 静力触探夯前夯后对比

Fig. 4 The comparison of CPT curve before and after 12 000 kN·m dynamic compaction

4.4 瑞雷波测试结果

瑞雷波是一种质点在波的传播方向竖向平面内振动,且质点的振动轨迹为逆时针方向转动的椭圆的地震波,振幅随深度呈指数函数急剧衰减,传播速度略小于横波。利用瑞雷波进行加固深度评价是基于面波具有以下特性:1) 在分层介质中,面波具有频散特性;2) 面波的波长不同,穿透深度也不同;3) 面波传播速度与横波传播速度具有相关性。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。

本试验测试采用 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 108.6 N(约 24 磅)大锤人工锤击地面。

通过测试绘制夯前、夯后瑞雷波频散曲线如图 5 所示。从频散曲线形态看,12 000 kN·m 试夯区

6.0 m 以内之字形拐折较多,说明在横向和竖向均具有不匀性。夯后波速分层明显,故可通过频散曲线拐点判定强夯有效加固深度为 9~13 m。

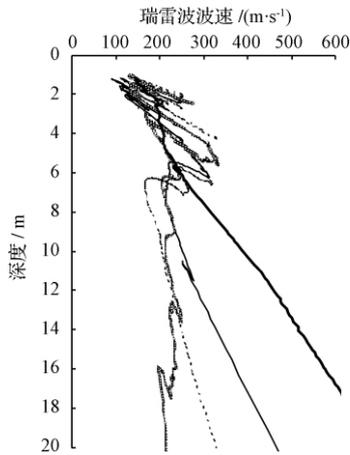


图 5 试验区夯前夯后瑞雷波频散曲线
Fig. 5 The comparison of Rayleigh before and after 12 000 kN·m dynamic compaction

4.5 平板荷载试验测试结果

本次夯后共进行 3 组平板荷载试验,试点编号分别为 1 号(位于夯间,浸水荷载试验)平板荷载试验,按照 GB 50025—2004《湿陷性黄土地区建筑规范》进行 2 号、3 号(位于夯点,不浸水荷载试验)。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 2 m、直径 130 mm 的浸水孔,内填小粒径卵石,加速浸水。荷载板面积为 1.0 m×1.0 m。平板荷载试验 Q-s 曲线如图 6 所示。浸水荷载试验先不浸水加载至 250 kPa,下沉稳定后,再向荷载板四周沟槽及浸水孔连续浸水 10 d,坑内水头不小于 200 mm,附加下沉稳定后继续浸水,并加载至 500 kN,浸水后荷载板下沉 2.37 mm,下沉量很小。

静载试验各点的承载力特征值汇总见表 3。

表 3 静载试验成果汇总
Table 3 The results of static test

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	备注
1 号	500	11.22	≥250	浸水
2 号	500	1.98	≥250	不浸水
3 号	500	1.62	≥250	不浸水

4.6 有效加固深度的判定

强夯的有效加固深度从起夯面算起,有效加固深度的判定以处理后满足设计所需的深度为标

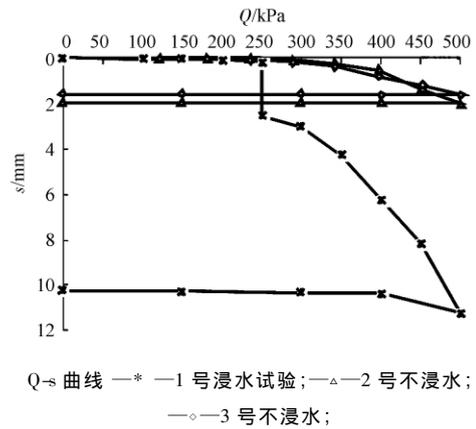


图 6 平板荷载试验 Q-s 曲线
Fig. 6 The comparison of static test curve

准^[8]。对于以处理湿陷性黄土为主的强夯地基处理应以所消除湿陷性土层厚度为主进行判定。本场地试夯区采用了土工试验、标贯、静力触探、多道瞬态面波测试和荷载试验等五种手段,按消除湿陷性、地基承载力、压缩模量和有效加固深度四个标准综合评价强夯的有效深度为 12 m。

5 结 语

- 1) 本湿陷等级为 II 级的自重湿陷性黄土地基经过 12 000 kN·m 能级强夯处理后,承载力特征值不小于 250 kPa,压缩模量不小于 20 MPa。
- 2) 根据各项试验结果综合判断,12 000 kN·m 强夯有效加固深度为 12 m,累计夯沉量在 4.0~4.5 m,消除黄土湿陷性深度和效果明显。
- 3) 强夯后黄土地基的检测建议采用钻孔、探井取土试验判断湿陷性,静力触探试验判断加固深度,静载试验判断承载力。

参考文献

- [1] 王铁宏. 新编全国重大工程项目地基处理工程实录 [G]. 北京:中国建筑业出版社, 2005.
- [2] 水伟厚. 冲击应力与 10 000 kN·m 高能级强夯系列试验研究 [D]. 上海:同济大学, 2004.
- [3] 王铁宏,水伟厚,王亚凌,等. 10 000 kN·m 高能级强夯地面变形与孔压试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 759-762.
- [4] 王铁宏,水伟厚. 高填方碎石土地基 16 000 kN·m 能级强夯试验研究 [C]// 第十届土力学及岩土工程学术会议论文集:下册. 北京:中国建筑业出版社, 2007:43-48.
- [5] JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范 [S].
- [6] GB 50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范 [S].
- [7] 詹金林,水伟厚,何立军. 18 000 kN·m 能级强夯处理深厚填海碎石试验研究 [J]. 工业建筑, 2010, 40(4): 96-99.
- [8] 王铁宏,水伟厚,王亚凌,等. 强夯法有效加固深度的确定方法与判定标准 [J]. 工程建设标准化, 2005(3): 27-38.