

强夯法加固沙漠土地基处理试验研究

詹金林, 水伟厚, 梁永辉, 宋美娜

(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: 对内蒙沙漠土进行 8 000 kN·m、6 000 kN·m、4 000 kN·m、3 000 kN·m 能级强夯法地基处理试验, 通过标准贯入试验、动力触探试验和平板载荷试验对强夯后的沙漠土进行检测, 得出各种能级强夯对沙漠地区填方区、挖方区处理后的有效加固深度和承载力。对强夯法处理沙漠土的一些规律进行总结, 给出各种强夯能级能够处理的有效加固深度、夯点间距等设计施工参数, 供类似地质条件下强夯地基处理工程借鉴参考。

关键词: 沙漠土; 强夯; 地基处理;

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Experimental research on treating desert soil ground with dynamic compaction

ZHAN Jin-lin, SHUI Wei-hou, LIANG Yong-hui, SONG Mei-na

(Shenyuan Geotechnical Co., Ltd., Xiandai Architectural Design Group, Shanghai 200011, China)

Abstract: The dynamic compaction tests with 8 000 kN·m, 6 000 kN·m, 4 000 kN·m and 3 000 kN·m energy-levels for treating desert soil in Inner Mongolia were carried out. And then through the standard penetration test, cone penetration test and the static plate loading test on the desert soil after dynamic compaction, for different levels of dynamic compaction of the desert area of fill areas, excavation zone after reinforcing, the respective effective treatment depths and bearing capacities of reinforcement are obtained. Some rules of dynamic compaction treatment on the desert soil are summarized; some construction parameters of dynamic energy level, effective reinforcement depth, spacing, etc. are given, so as to offer for reference in the similar geological conditions for the foundation treatment works with dynamic compaction.

Key words: desert soil; dynamic compaction; ground improvement

1 引言

沙漠地区地基土一般具有以下特点: 颗粒细、孔隙比大、高压缩、未完成自身固结, 物理力学参数相差大且埋深不均, 不经过处理难以满足建筑承载力和变形要求, 对于沙漠地区地基处理常常采用的方法有换填法^[1]、平板振捣压实法^[2]、水坠砂法^[3]、强夯法^[1, 4]。其中强夯法适用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土与黏性土、湿陷性黄土、杂填土和素填土等特殊土地基, 具有加固效果显著, 经济易行, 施工快捷等众多优点。本文对内蒙沙漠土一系列不同能级强夯法地基处理试验进行详细论述, 得出强夯法加固沙漠土的一些经验。

试验场地属波状沙丘地貌, 原始地形起伏较大, 地表砂化较严重, 属风积沙地。场地地层主要由第四系风积粉细砂和冲洪积成因的细砂和中砂组成。

由于场地起伏较大, 按照设计标高整平后存在挖方和填方区, 为提高整个场地的均匀性和地基土的承载力, 设计采用强夯法对场地进行处理, 提高地基土承载力和压缩模量。为对设计参数进行验证和优化, 在现场特进行 3 000 kN·m、4 000 kN·m、6 000 kN·m 和 8 000 kN·m 强夯试验。

2 工程地质条件

场地属波状沙丘地貌, 原始地形起伏较大, 地表砂化较严重, 属风积沙地。场地表面基本覆盖一层植被, 地面标高在 1 310~1 325 m 之间。根据勘察报告, 在勘探深度范围内, 场地地层主要由第四系风积粉细砂和冲洪积成因的细砂组成。地层自上而下依次划分为: 第①层: 粉细砂 (Q_4^{col}), 褐黄色, 风积成因, 成分以石英、长石为主, 层中可见植物根系, 含少量粉土, 松散~稍密状态, 该层沉

积厚度不规律,标贯击数平均值为 9.6 击(未经杆长修正,下同);第②层:细砂(Q_4^{al+pl}),系冲洪积形成,浅黄色~灰白色,成分以石英、长石为主,级配较差,局部混中砂或渐变为中砂层,稍密~中密,稍湿,标贯击数平均值为 16.6 击;第③层:细砂(Q_4^{al+pl}),系冲洪积形成,浅黄色~灰白色,偶夹褐黄色薄层砂,成分以石英、长石为主,级配较差,局部混夹中砂或渐变为中砂层,偶见粗砂,中密~密实,稍湿,标贯击数平均值为 23.2 击;第④层:细砂(Q_4^{al+pl}),系冲洪积形成,浅黄色~灰白色,含氧化铁,少量粗砂,成分以石英、长石为主,级配差,分选较好,局部夹薄层中砂或渐变为中砂层。密实,稍湿。场地内在勘察期间钻探深度内未见地下水,勘探最大孔深 20~25 m。

另外,根据对钻孔检测过程中取样进行的含水量试验结果看,本场地,地基处理深度范围内,砂土含水量在 2%~5%之间。

3 设计要求与施工参数

3.1 设计要求

按照设计标高整平后,根据原地形图标高与现状对比,各试验区原状地面高程相差较大。其中,3 000 kN·m、8 000 kN·m 试验区强夯施工面标高位于原地面标高,位于挖方区;4 000 kN·m、6 000 kN·m 试夯区位于回填整平区。4 000 kN·m 试验区回填砂厚度大约在 1.5~6.0 m,6 000 kN·m 试夯区回填厚度在 5.0~9.0 m。

表 1 强夯试验设计参数

Table 1 Design parameters of dynamic compaction

试验区 编号	能级 (kN·m)	主夯点间 距/m	设计有效加 固深度/m	地基承载力 特征值/kPa	主夯能级 收锤标准 (最后 2 击平均 夯沉量)
A	8000	8.0	10.5	350	≤ 150mm
B	6000	6.0	9.5	250	≤ 100mm
C	4000	5.5	8.0	250	≤ 100mm
D	3000	5.0	7.0	250	≤ 100mm

根据设计要求,8 000 kN·m 试验区夯点参加级配良好的碎石,粒径≥300 mm 的颗粒含量不宜超过全重的 30%。强夯施工时,清除表层冻土层后换填部分碎石。满夯夯印搭接 1/4。各试夯区设计参数及要求如表 1 所示。

3.2 现场施工情况

(1) 8 000 kN·m (A 区) 施工情况

第一遍夯点情况:根据施工记录第一遍夯点一般在 8 击左右即可达到设计停锤标准,部分夯点夯

击至 12 击,目的是确保加固深度而对部分设计参数的局部调整。第二遍夯点情况与第一遍夯点施工情况基本相同,夯击数为 10 击。第三遍夯点情况与前两遍夯点施工情况基本相同,夯击数为 8 击。

一遍夯点最后 2 击平均夯沉量为 54 mm,平均夯坑深度为 2.0 m,二遍夯点最后 2 击平均夯沉量为 39 mm,平均夯坑深度为 1.3 m,三遍夯点最后 2 击平均夯沉量为 58 mm,平均夯坑深度为 1.8 m。

(2) 6 000 kN·m (B 区) 施工情况

第一遍夯点情况:根据施工记录第一遍夯点在 10 击即可达到设计停锤标准,夯坑深度在 2.5 m 以上,个别夯点夯击至 12 击,目的是观察收锤标准的重复稳定性。第二遍夯点情况:根据施工记录第二遍夯点大部分在 10 击即可达到设计停锤标准。

一遍夯点最后 2 击平均夯沉量为 71 mm,平均夯坑深度为 2.6 m,二遍夯点最后 2 击平均夯沉量为 62 mm,平均夯坑深度为 2.0 m。

(3) 4 000 kN·m (C 区) 施工情况

第一遍夯点情况:根据施工记录第一遍夯点在 8 击即可达到设计停锤标准,个别夯点夯击至 10 击,目的是观察收锤标准的重复稳定性。第二遍夯点情况:根据施工记录第二遍夯点大部分在 8 击即可达到设计停锤要求,个别夯点需要 9 击达到设计停锤标准。

一遍夯点最后 2 击平均夯沉量为 69 mm,平均夯坑深度为 1.6 m,二遍夯点最后 2 击平均夯沉量为 85 mm,平均夯坑深度为 1.4 m。

(4) 3000kN·m (D 区) 施工情况

第一遍夯点情况:根据施工记录第一遍夯点大部分在 8 击左右可以达到设计停锤标准,个别夯点需要 10 击达到设计停锤标准。第二遍夯点情况:根据施工记录第二遍夯点大部分在 8 击即可达到设计停锤标准,个别夯点需要 9 击达到设计停锤标准。

一遍夯点最后 2 击平均夯沉量为 36 mm,平均夯坑深度为 1.05 m,二遍夯点最后 2 击平均夯沉量为 43 mm,平均夯坑深度为 1.0 m。

本次试夯工程主要困难来自现场自然条件,低温造成场地表层冻结,在-20℃~-42℃低温下施工在国内还是比较少见,施工过程中虽然要将冻层挖除,但是从现场施工看还是有较大影响。场地强夯完成后表层即覆盖 2 m 左右砂层进行保护,检测时再开挖出来,防止冻土对深层影响。

根据夯点夯沉量施工纪录及夯前夯后标高实测,我司对本场地各能级试夯区整体下沉量进行估算,见下表 2 所示。

表2 各试验区平均夯沉量统计值

Table 2 The average statistical values of sedimentation after dynamic compaction

强夯能级/(kN·m)	整体下沉量/m	备注
3 000	0.7~0.9	挖方区
4 000	0.9~1.1	填方 3~5 m
6 000	1.5~1.7	填方 6~9 m
8 000	1.0~1.3	挖方, 碎石置换

注: 本表建议值仅针对试验区所代表的地质情况, 地质条件差异较大时, 仅供借鉴使用。

4 试夯效果检测

4.1 检测内容

依据设计要求及建设方意见, 本场地 4 个试夯区采用了浅层平板载荷试验、重型动力触探试验、标准贯入试验等手段进行了检测。其中静载试验主要是检测浅层承载力特征值是否满足设计要求, 并尽量做到预估极限值。动力触探试验、标准贯入试验主要是检测强夯有效加固深度及效果。根据静载试验、重型动力触探试验和标准贯入试验综合判断地基处理的加固效果。

现场 6 000 kN·m 试验区, 三个检测点根据设计要求采用标贯试验, 在检测过程中, 发现孔底残砂难以清除干净, 导致试验误差很大, 影响有效加固深度的判别。考虑到重型动力触探试验可得出连续锤击数与贯入深度关系曲线, 减小试验误差, 能够较为准确判断场地的有效加固深度, 以及判断有效加固深度内不同深度的承载力、变形模量等, 故该试验区的检测采用动力触探。

由于本试夯区夯前没有进行动力触探试验, 为了进行夯前、夯后对比, 在邻近试夯区的试夯区外进行 1 组 (3 个点) 动力触探试验。

4.2 现场检测工作量

由于地基处理检测期间露天温度为 -35°C ~ -45°C , 因此把浅层 2 m 的冻砂挖除后再进行夯后

检测。本场地四个试验区的手段检测及检测工作量见表 3~5。

表3 静载试验点点数

Table 3 The number of plate loading test

能级 /(kN·m)	静载试验	
	夯后 (点)	备注
8 000	3 (夯点 1 个, 夯间 2 个)	预估极限荷载 900 kPa
6 000	3 (夯点 1 个, 夯间 2 个)	预估极限荷载 760 kPa
4 000	3 (夯点 1 个, 夯间 2 个)	预估极限荷载 760 kPa
3 000	3 (夯点 1 个, 夯间 2 个)	预估极限荷载 760 kPa

注: 最大加载量为设计要求特征值的 2.6~3.0 倍

表4 动力触探(N63.5)检验点数与深度参数

Table 4 The depth and number of DPT detection

能级 /(kN·m)	动力触探		动探深度 /m
	夯前 (点)	夯后 (点)	
8 000	3	6	12
6 000	2	4	11
4 000	3	6	10
3 000	3	6	9

表5 标准贯入检验点数与深度参数

Table 5 The depth and number of SPT detection

能级 /(kN·m)	标准贯入试验		标贯深度 /m
	夯前 (点)	夯后 (点)	
6 000	1	2	11

4.3 检测结果

4.3.1 载荷板试验结果

本场地地基承载力检测采用 0.5 m^2 承压板进行载荷试验, 检测过程中尽量做到承载力极限值, 根据载荷试验结果分析, 四个试夯区夯后 3 个载荷试验结果汇总表 6~11, 总体上可以看出经过强夯处理后浅层地基承载力满足设计要求。

4.3.2 标准贯入、动力触探试验

通过标准贯入、重型动力触探试验的夯前夯后对比确定各个能级的有效加固深度, 四个试验区域的重型动力触探、标准贯入击数统计见表 7~11 所示。

表6 载荷试验成果汇总表

Table 6 The results of static test

强夯能级	试点编号	f_{ak}/kPa	E_0/MPa	备注	评价	是否满足设计要求
8 000 kN·m	A-JZ1	450	68	夯点	≥ 350	满足
	A-JZ2	450	31	夯间	≥ 350	满足
	A-JZ3	450	37	夯间	≥ 350	满足
	B-JZ1	208	15	夯点	< 250	不满足
6 000 kN·m	B-JZ2	289	15	夯间	≥ 250	满足
	B-JZ3	358	14	夯间	≥ 250	满足
	C-JZ1	380	16	夯点	≥ 250	满足
	C-JZ2	340	52	夯间	≥ 250	满足
4 000 kN·m	C-JZ3	304	22	夯间	≥ 250	满足
	D-JZ1	250	16	夯点	250	满足
	D-JZ2	380	24	夯间	≥ 250	满足
	D-JZ3	380	22	夯间	≥ 250	满足

表 7 A 区夯前、夯后动探击数统计表
Table 7 The comparison of DPT for district A

深度/m	夯前平均			夯点平均				夯间平均			
	实测 $N'_{63.5}$	修正 $N_{63.5}$	密实度	实测 $N'_{63.5}$	修正 $N_{63.5}$	密实度	提高/(%)	实测 $N'_{63.5}$	修正 $N_{63.5}$	密实度	提高/(%)
3	12	11	密实	21	19	密实	68	16	14	密实	28
4	9	8	中密	26	22	密实	170	22	19	密实	128
5	15	13	密实	30	26	密实	91	26	22	密实	66
6	21	17	密实	31	25	密实	48	28	23	密实	33
7	21	17	密实	32	26	密实	52	30	24	密实	43
8	24	18	密实	35	27	密实	46	32	25	密实	33
9	23	18	密实	35	27	密实	52	33	25	密实	43
10	22	16	密实	36	26	密实	64	35	26	密实	59
11	25	19	密实	38	28	密实	49	36	26	密实	41
12	31	23	密实	41	30	密实	31	38	28	密实	21

表 8 B 区夯前、夯后标准贯入击数统计表
Table 8 The comparison of SPT for district B

深度/m	夯点-6000—SPT2				夯间-6000—SPT5				夯前-6000—SPT9	
	实测 N'	密实度	修正 N	承载力/kPa	实测 N'	密实度	修正 N	承载力/kPa	实测 N'	密实度
1	5	松散	5	150	27	中密	27	300	29	中密
2	7	松散	7	135	30	中密	30	320	5	松散
3	36	密实	35	360	31	密实	30	320	4	松散
4	36	密实	35	360	28	中密	27	300	4	松散
5	37	密实	34	350	31	密实	29	300	3	松散
6	27	中密	25	280	19	中密	17	250	4	松散
7	35	密实	31	330	46	密实	40	400	5	松散
8	40	密实	35	360	52	密实	46	450	4	松散
9	44	密实	37	376	53	密实	45	440	28	中密
10	50	密实	42	416	50	密实	42	420	41	密实
11	53	密实	43	423	52	密实	42	420	43	密实

表 9 B 区夯前、夯后动力触探击数统计表
Table 9 The comparison of DPT for district B

深度/m	夯前平均			夯点平均				夯间平均			
	实测 $N'_{63.5}$	修正 $N_{63.5}$	密实度	实测 $N'_{63.5}$	修正 $N_{63.5}$	密实度	提高/(%)	实测 $N'_{63.5}$	修正 $N_{63.5}$	密实度	提高/(%)
3	5	5	松散	21	20	密实	317	16	15	密实	212
4	2	2	松散	22	20	密实	995	19	17	密实	838
5	2	2	松散	23	20	密实	1143	22	19	密实	1068
6	4	3	松散	24	19	密实	480	23	19	密实	459
7	9	7	中密	25	20	密实	184	23	18	密实	164
8	8	6	中密	23	17	密实	169	23	17	密实	170
9	11	8	中密	22	17	密实	108	23	18	密实	117
10	18	13	密实	24	17	密实	28	24	18	密实	32
11	24	17	密实	28	21	密实	18	29	21	密实	23

表 10 C 区夯前、夯后动力触探击数统计表
Table 10 The comparison of DPT for district C

深度/m	夯前平均			夯点平均				夯间平均			
	实测 $N'_{63.5}$	修正 $N_{63.5}$	密实度	实测 $N'_{63.5}$	修正 $N_{63.5}$	密实度	提高/(%)	实测 $N'_{63.5}$	修正 $N_{63.5}$	密实度	提高/(%)
3	6	5	稍密	15	14	密实	166	11	11	密实	105
4	2	2	松散	18	16	密实	846	16	14	密实	739
5	2	2	松散	23	20	密实	1129	20	18	密实	987
6	3	2	松散	27	22	密实	792	25	20	密实	705
7	9	7	中密	32	26	密实	264	27	22	密实	211
8	10	8	中密	33	25	密实	224	32	24	密实	214
9	13	10	密实	34	26	密实	168	33	25	密实	158
10	19	14	密实	37	27	密实	89	37	27	密实	90

表 11 D 区夯前、夯后动力触探击数统计表
Table 11 The comparison of DPT for district D

深度/m	夯前平均			夯点平均				夯间平均			
	实测 $N_{63.5}$	修正 $N_{63.5}$	密实度	实测 $N_{63.5}$	修正 $N_{63.5}$	密实度	提高/(%)	实测 $N_{63.5}$	修正 $N_{63.5}$	密实度	提高/(%)
3	5	5	松散	16	15	密实	223	16	15	密实	227
4	2	2	松散	24	22	密实	1168	24	22	密实	1186
5	2	2	松散	27	24	密实	1336	27	24	密实	1366
6	5	4	松散	29	23	密实	456	28	23	密实	449
7	9	8	中密	30	24	密实	225	30	24	密实	218
8	11	9	中密	30	23	密实	171	30	23	密实	169
9	16	12	密实	32	25	密实	107	30	23	密实	91

5 结 论

(1) 强夯法作为一种经济高效、节能环保的地基处理方法,适用于沙漠土地基处理,加固效果显著。

(2) 对于本试验场地,3 000 kN·m 试夯区有效加固深度不小于 7.0 m; 4 000 kN·m 试夯区有效加固深度不小于 8.0 m; 6 000 kN·m 试夯区有效加固深度不小于 9.5 m,浅层地基承载力特征值不小于 250 kPa; 8 000 kN·m 试夯区有效加固深度不小于 10.5m,浅层地基承载力特征值不小于 350 kPa。

(3) 由于砂土的特性,表层砂土通过满夯加固后仍然存在松动层,松散层厚度一般为 60~80 cm,对于松动层在基础开挖前应进行洒水碾压处理,调高浅层密实度。

(4) 由于冬季检测可能受冻土影响,且砂土中动探检测存在的抱杆、侧壁摩擦增大等影响,实测结果有些偏大,但夯前后相同条件下对比还是比较明显。沙漠中动探检测应分层下套管,清除松砂后再进行动探或标贯,每施打 1 m 跟管 1 m。

(5) 本次地基处理试夯施工时间位于冬季,检测时间位于冬季,露天施工和检测温度为 -22℃~-42℃,因此表层土静载试验结果不同程度受冻土的影响。同样,受冻土层或冻土块的影响,标贯击数和动探击数值可能偏大,由此造成地基承载力和压缩模量估算偏大,对工程偏于不安全,但对于深层地基加固效果,动探试验结果具有较好的指导意义。

(6) 在沙漠地区,对于承载力要求较高、上部结构对变形敏感的区域,夯坑内部回填碎石对提高承载力和压缩模量具有显著效果。

(7) 对于挖方区强夯施工,夯坑较浅,收锤标准比较容易;对于填方区强夯施工夯坑也较深,应严格执行收锤标准。建议二者收锤标准均按最后两击平均夯沉量不大于 50 mm 控制。

(8) 对类似沙漠地区不同回填厚度区域对应不同加固深度要求,所需采用强夯能级的建议如表 12。

表 12 不同加固深度强夯能级建议
Table 12 The suggestion parameter of Dynamic Compaction for sands in desert

加固深度/m	建议强夯能级/(kN·m)
0~5	3 000~4 000 高重建构筑物应加大能级
6~8	6 000~8 000
8~10	8 000~10 000
10~12	10 000~12 000 或分层强夯
12~15	12 000~15 000 或分层强夯

注: 1. 原状土区域,由于土性条件不均匀,强夯能级选择应注意加固后地基的均匀性;

2. 填土厚度较大时,可考虑采用高能级强夯工艺或分层强夯法;

3. 根据经验,分层强夯的效果要略好于高能级强夯,造价较省,但可能受现场回填情况和工作面影响,工期较长。因此,建议进行相应的技术经济比较,选择最经济、高效、工期短的处理工艺。

参 考 文 献

- [1] 史思军,韩小娥. 浅谈沙漠地区的地基处理方法[J]. 西部探矿工程, 2005(10): 16—17.
- [2] 赵军. 平板振捣器压实沙漠地基施工方法[J]. 油气田地面工程, 2005(10): 47.
- [3] 潘江芹. 水坠砂技术在砂土地区地基处理中的应用[J]. 石油工程建设, 2007(5): 43—45.
- [4] 杨丹. 强夯法在沙漠松散地基加固中的应用[J]. 中外建筑, 2007(8): 97—99.