

# 不同能级强夯法处理新近吹填粉细砂地基 现场试验

# 周宝江,邵 旭

(中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300222)

摘要:某矿石码头堆场表层由新近吹填形成的松散粉细砂组成,地下水位及黏粒含量均较高。为验证强夯法进行地基 处理的可行性以及优化施工参数,拟在处理厚度为6和9m的两个区域设立施工试验区,分别采用2000和4000kN·m的夯 击能进行强夯试验,施工同时监测夯击过程中孔隙水压力、夯沉量等变化情况,施工完成后进行现场标准贯入试验和荷载 试验,并给出单位面积夯击能与夯沉量的双曲线关系式。结果表明,孔隙水压力消散时间约为2d,每一点夯的最优夯击数 为7~8击;处理后的地基承载力较处理前显著提高,且达到了设计文件中200kPa的承载力要求。

文章编号: 1002-4972(2024)09-0238-07

# Field test on recently reclamation silty fine sand foundation treated by different energy levels of dynamic compaction

ZHOU Baojiang, SHAO Xu

(CCCC FirstHarbour Consultant Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The surface layer of an ore wharf yard is composed of loose silty fine sand by recently reclamation, and the underground water level and mud content are relatively high. In order to verify the feasibility of foundation treatment by dynamic compaction method and optimize the construction parameters, we set two testing areas with treatment thicknesses of 6 m and 9 m, carry out 2,000 kN·m and 4,000 kN·m energies of dynamic compaction in test areas, and at the same time monitor pore water pressure and dynamic compaction settlement in the construction process. After the completion of the treatment, we carry out SPT and load test, and give the formula of the hyperbolic relationship between dynamic compaction energy and tamping volume. The results show that the dissipation period of pore water pressure is about two days, and the optimal number of each dynamic compaction point is seven to eight. The bearing capacity of the foundation is significantly improved, reaching the design bearing capacity of 200 kPa after the dynamic compaction.

Keywords: recently reclamation; dynamic compaction; pore water pressure; load test

某矿石码头堆场通过吹填造陆形成,吹填土 质主要以粉细砂为主,由于吹填时间短、地下水 位高、吹填粉细砂松散且厚度变化在 6~9 m, 必须经过地基处理才能作为堆场使用。对于新近吹填

作者简介:周宝江 (1972—),男,硕士,高级工程师,从事岩土工程勘察与检测。

收稿日期: 2024-01-30

0.001

粉细砂处理效果的研究,谢万东等<sup>[1]</sup>进行5 MN·m 能 量的强夯试验性施工,强夯后的粉细砂地基满足地 基承载力特征值不低于 150 kPa 的要求:程佳等<sup>[2]</sup> 对高水位砂土地区的强夯法地基处理设计、施工、 检测进行全面介绍,提出处理高水位砂土地区地 基时的强夯施工参数并详细论述地基夯实后的检 测方法和内容;李富春等[3]针对强夯法加固吹填 粉细砂土层时细粒中粉粒及黏粒含量对加固效果 的影响问题,采用模型试验的方法,得出不同种 类试验土体在强夯时的夯沉量、超静孔隙水压力 及静力触探变化情况:张军舰等[4] 对山东半岛海 岸带滨海饱和粉细砂在强夯动力荷载作用下土体 压缩性进行了研究: 陈宗坤<sup>[5]</sup> 对滨海吹填砂地基 进行了强夯法和降水强夯法两种方法处理后进行 对比试验。还有其他一些学者进行了强夯法处理 粉细砂地基的研究[6-10]。

本工程场地表层由新近吹填形成,地下水位 高且吹填厚度不均匀,较以往工程场地情况更复 杂,采用强夯法进行处理,尚需要进行现场试验 研究,通过现场试验确定施工工艺的各种参数、 检验处理效果。在不同厚度的粉细砂吹填区设立 2个试验区,采用不同能级的夯击参数进行施工工 艺参数试验,验证不同能级的强夯在处理不同厚 度的粉细砂时的孔隙水压力、夯沉量及地基承载 力变化情况及处理效果。

# 1 试验区概况

# 1.1 强夯前的工程地质条件

根据钻孔资料揭露,试验区的表层土主要为 吹填形成的粉细砂,颗粒分析试验表明,粉粒含 量超过30%,黏粒含量达3%,试验1区的厚度约 为6.0m,试验2区的厚度约为9.0m。吹填层下 的原始土层为密实的粉细砂;试验区的地下水位 较高,基本在地表以下0.2~0.3m,现场施工见 图1,吹填粉细砂的颗粒级配曲线见图2。



粒径/mm 图 2 吹填粉细砂的颗粒级配曲线

0.01

0.1

#### 1.2 试验区设计

1

2个试验区的强夯施工参数及监测检测项目设 计见表1, 夯点布置见图3。

试验区	面积/ m <sup>2</sup>	点夯夯击能/ (kN·m)	普夯夯击能/ (kN・m)		夯点 间距/m	布置 形状	第1遍 夯点数	最后两击夯 沉量之和/cm	设计夯 击数/击	第2遍 夯点数	最后两击夯 沉量之和/cm
		()	( / /		1 472.00	/2 0.		our of the second	цжа	<i>34 Million</i>	or the firmer
试验1区	900	2 000	50	0	5	正方形	49	<12	11~12	36	<10
试验2区	900	4 000	80	0	6	正方形	36	<20	12~13	30	<15
试验区		点夯 间隔	设计夯 击数/击	普夯 遍数	普亥 搭持	F锤印 接面积	孔隙水 力试验	压 夯坑变形 /组 试验/组	夯沉量 试验/项	标准贯。 试验//	人 荷载 、 试验/组
试验1区	孔隙	水消散 90%	11~12	2	锤底面	ī积的 1/4	2	2	1	3	3
试验2区	孔隙:	水消散 90%	12~13	2	锤底面	i积的 1/4	2	2	1	3	3

表 1 强夯施工参数及监测检测项目设计

注:标准贯入试验及荷载试验在普夯完成后14d后进行。



# 2 试验过程

2.1 试验区施工

试验区布置完成后,首先进行场地整平,在 试验区边缘进行挖沟排水,沟深约0.8m,在地下 水位适当降低后,按照设计的参数要求进行 第1遍点夯施工,夯击过后,夯坑内有水渗出, 进行夯坑排水,排水完成后,再整平场地,进行 第2遍点夯,再对有积水的夯坑进行排水,整平 场地后进行普夯。

#### 2.2 监测项目布置

在强夯施工开始之前,进行监测仪器的埋设, 每个试验区共埋设2组钢弦式孔隙水压力计,埋 设深度均分别为2.5、3.5、4.5、5.5、6.5 m,试 验2区增加1组埋设深度为9.0 m的探头。在每 遍点夯过程中,选取孔隙水压力计附近夯点,选 用手持式频率计进行观测,在夯击期间,每进行 1次夯击时,采取1个读数,在点夯间歇期,每天 进行孔隙水压力观测。

每个试验区选取两个夯点进行夯坑沉降和夯 边地形测量,在每个夯坑在地表沿夯坑的2个相 互垂直方向上分别埋设5个微型沉降标,各沉降 标距夯点中心的距离分别为2.5、3.5、4.5、5.5、 6.5 m, 每夯击1下, 进行夯坑沉降和微型沉降标 高程的测量。

强夯施工结束后 14 d 分别进行标准贯入试验 和荷载试验检测。

# 3 孔压与夯坑测试结果分析

3.1 孔隙水压力观测结果及分析

试验1区和2区分别采集附近每个夯点每夯 击时孔隙水压力的增加值以及孔压消散情况,通 过孔隙水压力的变化,分析不同夯击能的影响深 度、影响距离以及遍夯间隔时间。

3.1.1 不同夯击能的影响深度分析

孔压增量-深度变化曲线见图 4。可以看出, 点夯时,所有深度的孔隙水压力均受到夯击的影 响,孔压增长随深度变化很明显。试验 1 区深度 2.5 m 的孔压增量达到 12.0 kPa, 6.5 m 处孔压增 加减小到 2.0 kPa,说明夯击能对孔隙水压力的影 响在 2.5~6.5 m,随深度逐渐递减。试验 2 区, 所有埋设深度的孔隙水压力均受到夯击能的影响, 孔压增量最高达到 32.2 kPa,相对于试验 1 区孔压 增大明显,这与夯击能由 2 000 kN·m 增加至 4 000 kN·m 有直接关系,同时也可以看出试验 2 区的 9.0 m 处孔隙水压力升高约为 6.0 kPa, 说明夯击 能影响深度可以达到 9.0 m, 但影响强度明显 降低。



图 4 点夯孔压增量-深度关系曲线

# 3.1.2 夯击能的影响距离分析

孔压增量-距离关系曲线见 5。可以看出,孔 压增长均随距离的增加而减弱;试验 1 区孔压增 量在 5.0 m 处达到 12.3 kPa,超过 5.0 m 孔压变化 明显降低,8 m 距离时,已经衰减到不到 4.0 kPa, 可以认为,夯击能影响范围主要集中在 5.0 m 范 围之内;试验 2 区,2.5 m 处孔压增量最大达到 43.0 kPa,6 m 处的孔压增量为 7.0~22.0 kPa,超 过 6 m,孔压增量明显下降,可以认为,试验 2 区 的夯击能有效影响距离为 6.0 m。





图 5 点夯孔压增量-距离关系曲线

3.1.3 遍夯间歇时间判定

孔压增量-时间关系曲线见图 6。可以看出, 2次孔隙水压力的迅速增长是 2次夯击的结果,但 在强夯结束后孔压迅速消散,从孔压消散速率和 趋势上看,2个试验区基本一致,在1~2 d 的时间 内,孔压消散基本可以达到 90%以上,通过综合 分析,确定的 2 个试验区的遍夯间歇时间均可以 认为:第1遍与第2遍点夯的间歇时间为 2 d,第 2 遍点夯与普夯的间歇时间为 2 d。



图 6 孔压增量-时间关系曲线

# 3.2 夯坑沉降与隆起测量结果及分析

在夯击过程中,在试验1区和2区夯击过程 中选择典型夯坑进行夯沉量和隆起观测,观测夯 坑沉降和夯坑周边隆起的变化,典型的夯坑沉降 与隆起曲线见图7。



对比试验1区与2区的夯坑沉降,可以看出, 试验2区的夯坑沉降达到1.20~1.30 m,大于试验1 区的0.80~0.90 m,这符合试验2区夯击能大、 软土厚度相对大的特点;同时从以上夯坑沉降与 隆起曲线可以看出,夯坑周边地表变化主要表现 为隆起,但地表的隆起量很小,隆起量普遍在 5.0 cm 以内。在夯击能的作用下,夯边周边土体 受到震动影响,地表表现出沉降或隆起现象,距 夯坑越远,地表变形越小,夯边隆起变形主要发 生在2.5~3.0 m 距离范围内,夯点间距取5~6 m, 应该是适宜的。当点夯到第7和第8击时,夯沉 量就已经满足设计对夯沉量的要求,因此可以控 制每个夯点的夯击数取7~8 击。 3.3 地表总夯沉量与单位夯击能的关系

在试验区每遍强夯前、后及普夯前、后对试 验区进行边长为 5 m 的地形方格网测量,数据统 计结果见表 2,同时统计 2 个试验区的总夯击能和 单位面积夯击能见表 3。

表 2 总夯沉量

	-			
计论区		总夯		
风型区	1 遍点夯	2 遍点夯	普夯	沉量/m
试验1区	0. 245	0.120	0.027	0. 392
试验2区	0.311	0.143	0.059	0. 513

表 3 夯击能量						
试验区	工序	总夯击能/ (MN・m)	単位面积夯击能/ (kN・m・m <sup>-2</sup> )			
	1 遍点夯	686.0	762			
试验Ⅰ区 (松散土厚厚度6m)	2 遍点夯	504.0	560			
	普夯	212.0	260			
	1 遍点夯	1 008.0	1 120			
试验2区 (松勘+E厚座0 m)	2 遍点夯	840.0	933			
(14版上)公序反 7 Ш)	普夯	339.2	377			
这一点边去去将你是去过你						

注:每遍夯击数以7击计算。

根据土的压缩性质,可以认为地基土的压缩符合双曲线模型,双曲线函数模型为:

$$s = \frac{E}{a_{\rm f} + b_{\rm f} E} \tag{1}$$

式中: *E* 为夯击能, *s* 为夯沉量, *a*<sub>f</sub> 为模型参数。 式(1)经变化,可以调整为:

$$\frac{E}{S} = a_{\rm f} + b_{\rm f} E \tag{2}$$

分别绘制试验1区和2区的单位面积夯击能/ 夯沉量与单位面积夯击能的关系曲线见图8。可以 看出,单位面积夯击能与单位面积夯击能/夯沉量 之间拟合相关系数接近1,夯沉量与夯击能的相关 关系可以用图中拟合函数表达。





# 图 8 单位面积夯击能/夯沉量与单位面积夯击能的关系曲线

#### 4 试验效果检验结果

4.1 标准贯入击数比对分析

在试验结束 14 d 后,分别在 2 个试验区各布置 3 个标准贯入孔进行处理效果比对分析,其中 1 个标 准贯入孔位于夯点上,另 2 个位于夯点间,夯前和夯 后的标准贯入击数随深度变化对比曲线见图 9。



图 9 夯前和夯后的标准贯入击数随深度变化对比曲线

由图9可以看出,加固后表层第1个标准贯 入击数值相对较小,加固后较加固前有增加,但 变化不大,后期须对表层进行碾压处理,除去表 层以后,试验1区6m以上土层强度增长较大, 从原始的标准贯入击数不到 10 击, 增长到 20 击 左右,对于6m以下的原土层,标准贯入击数基 本没有变化,说明试验1区对于6m以上的松散 粉细砂起到了处理效果。另外对于夯坑和夯间的 试验,表层标准贯入击数基本一致,深度1.2 m 以下到6.0 m 以上, 夯坑稍大于夯间, 并不十分 明显。试验2区9m以上土层强度增长较大,从原 始的标准贯入击数不到10击, 增长到20~30击, 尤其在 3~5 m 深度范围内, 增加尤为明显。对于 9 m 以下的原土层,标准贯入击数基本没有变化, 说明试验2区对于9m以上的松散粉细砂起到了 处理效果。另外对于夯坑和夯间的试验,表层标 准贯入击数基本一致, 深度 1.2 m 以下到 9.0 m 以上, 夯坑稍大于夯间, 并不十分明显, 2个试验 区表现趋势基本一致。

# 4.2 荷载试验比对分析

在试验结束后 14 d 后,分别在 2 个试验区布 置 3 组荷载试验进行效果检验,荷载试验结果对 比见表 4,对应的荷载试验曲线见图 10。可以看 出,处理后 2 个试验区的荷载试验曲线性质基本 一致。经过分析,处理后的地基承载力特征值可 以达到 220~260 kPa,均能满足设计对地基承载力 使用要求。

#### 表 4 荷载试验结果对比

	试验区	最大加 载量/kN	最大沉 降量/mm	圆形荷载 板面积/m <sup>2</sup>	承载力特 征值/kPa	特征值对应 沉降/mm
_		540	32.61	0.5	270	8.0
	试验1区	540	42.52	0.5	230	8.0
		540	39. 19	0.5	220	8.0
	试验2区	540	34.33	0.5	260	7.6
		540	41.06	0.5	250	7.5
		540	43.36	0.5	240	7.8



# 5 结论

 本文对2个试验区不同强夯参数进行试验 监测与检测,对于高水位新近吹填的粉细砂,经 强夯加固后地基承载力明显增加,深度1.2m以 下夯坑土强度稍大于夯间土。

2) 采用 2 000 kN·m 的夯击能的处理影响深 度可以达到 6 m, 采用 4 000 kN·m 的夯击能的处 理影响深度可以达到 9 m。

 3)对于2种夯击能,每遍的最佳夯击数控制 在7~8击即可,不必要达到设计要求的11~13击, 对设计参数起到了优化的作用。  4)虽然夯击能不同,但孔隙水压力消散时间 无明显区别,2d内基本可以完全消散,做好夯坑 排水,既可以进行下一遍施工。

5) 总夯沉量和单位面积夯击能可以用双曲线 函数关系表达。

# 参考文献:

- [1] 谢万东,陈建宇,何汉艺.高含泥量水力冲填粉细砂地 基强夯处理效果[J].水运工程,2023(9):223-228.
- [2] 程佳, 张春辉, 贾亚会, 等. 强夯法处理高水位砂土地基的应用研究[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2023, 22(4): 6-9, 103.
- [3] 李富春,张璟泓,周红星,等.粉粒及黏粒含量对强夯加
   固粉细砂土层效果的影响[J].人民长江,2022,53(8):
   186-191.
- [4] 张军舰,李鹏,殷坤宇,等.基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究 [J].水文地质工程地质,2022,49(1):117-125.
- [5] 陈宗坤.强夯及降水强夯法在某码头地基处理中的应 用研究[J].中国水运,2017(3):67-68.
- [6] 胡瑞庚,水伟厚,时伟,等.大型储罐粉砂地基强夯工程试验研究[J].青岛理工大学学报,2018,39(5):19-23,29.
- [7] 金晖. 连云港吹填淤泥地基的强夯法加固研究[J]. 水运工程, 2007(4): 70-74.
- [8] 郭慧平,杜青丽.强夯法在粉砂土地基施工中的应用[J].包钢科技,2008(2):74-75,84.
- [9] 蔡仙发, 唐彤芝, 蔡新, 等. 新型降排水强夯加固冲填沉
   积土地基研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019,
   47(1): 100-106.
- [10] 宋志刚, 唐益群. 吹填土固结速度影响因素的分析[J].路基工程, 2010(3): 18-20.

(本文编辑 王璁)

(上接第237页)

- [8] 管健安. 基于 CORS 系统精密定位服务若干技术问题 研究[D]. 西安:长安大学, 2010.
- [9] 胡在凰,杨崇,温浩. CORS 支持下的 GNSS 高程测量精 度实证研究与加密改善效果模拟评估[J]. 测绘通报, 2022(S2):63-67,76.
- [10] 苏中球.基于广西似大地水准面精化模型的库区高程

系统探讨[J]. 广西水利水电, 2014(4): 7-9, 15.

- [11] 李海文,张燕,罗满建,等.广西区似大地水准面精化的研究[J].地理空间信息,2009,7(2):144-146.
- [12] 李毅. 广西似大地水准面精化在高程测量中的应 用[J]. 电子测试, 2018(21): 97-98, 138.

(本文编辑 王传瑜)