

# 强夯法在吹砂填海地基加固中的应用分析

曾力娟, 李 强, 于元峰

(北京爱地地质勘察基础工程公司, 北京 100144)

**摘要:**通过强夯法在首钢京唐曹妃甸钢铁公司吹填砂地基处理工程中的应用情况和成功经验, 对强夯设计、施工参数、加固效果进行了分析, 为相似工程提供参考。

**关键词:**吹填砂; 强夯法; 地基处理; 曹妃甸

**中图分类号:**TU472   **文献标识码:**A   **文章编号:**1672-7428(2010)06-0067-04

**Application and Research on Dynamic Compaction Method to Hydraulic Fill Sand Foundation Bed Treatment/**  
**ZENG Li-juan, LI Qiang, YU Yuan-feng (Beijing Aidi Geotechnical Investigation & Foundation Engineering Company, Beijing 100144, China)**

**Abstract:** Analysis was made on the dynamic consolidation design, construction parameters and reinforcement effects by the application and successful experience of hydraulic fill sand foundation treatment with dynamic compaction method in Shougang Jingtang Caofeidian Steel United Company, which could be the reference for the similar projects.

**Key words:** hydraulic fill sand; dynamic compaction method(DCM); foundation treatment; Caofeidian

## 0 引言

首钢搬迁方案于 2005 年年初获国务院批准, 并被列为国家“十一五”重点工程项目, 河北省重点项目一号工程。拟建工程填海面积达 20 万 km<sup>2</sup>, 填海规模居我国首位。

为加快钢铁厂建设的工程进度, 采取边吹填、边开发的模式进行建设。场地上部吹填形成厚度约 5 m 左右的海砂, 由于吹填时间短, 没有经过排水压密, 为欠固结土, 工程力学性质差、承载力低, 并且临近无工程资料可供参考。为了不影响后续工程建设的开展, 选择加固效果好、工期短和造价低廉的地基处理方案尤为重要。

根据曹妃甸钢铁厂建设场区工程地质和水文地质条件的特点, 在前期进行了真空动力固结和强夯法进行试验, 两种方法地基加固效果明显, 但相对真空动力固结法, 强夯法造价低, 工期短, 因此被推荐为首选方案。通过 2006 年以来 3 年多的道路区域及工业厂区地基处理工程实践, 强夯法取得了明显的效果, 现对取得的经验进行总结, 以求对今后的工程施工起到一定的指导作用。

## 1 工程地质条件

### 1.1 地形地貌

拟建厂区地貌上属于滨海浅滩。曹妃甸一带为

滦河三角洲平原海岸, 具有双重岸线特征, 其中内侧大陆岸线为沿滦河古三角洲前沿发育的冲积海积平原。沿岸多盐田, 潮滩发育。外侧岛屿岸线与大陆岸线走向基本一致, 由蛤坨、腰坨和曹妃甸沙岛群构成沙质海滩, 其南端的曹妃甸岛由 12 个沙岛组成, 西南端最大, 最高处有少量沙生植物, 内外岸线间为宽阔的浅水海滩, 低潮时部分出露, 且地形平坦, 东西两侧潮沟最大水深为 2~5 m, 曹妃甸沙岛位居渤海湾北岸岸线转折处, 尤如矶头和岬角紧贴渤海湾深槽(深槽的水深 20~30 m)。

场地进行人工吹填后, 地形基本平坦, 地面高程 2.70~4.23 m, 平均 3.52 m。

### 1.2 地层岩性

根据勘察结果, 曹妃甸地区在深度 20.0 m 范围内的地层主要为人工吹填砂( $Q_4^{\text{ml}}$ )和第四系全新统海相沉积( $Q_4^{\text{m}}$ )的砂类土, 具体的地层主要特征见表 1。

### 1.3 地下水

地下水位埋深 0.5~1.5 m, 平均为 1.02 m。

## 2 强夯试验

### 2.1 试夯参数

为了获取曹妃甸地区强夯参数, 在吹填工作完成后, 在工程场地分别进行了 1500、2000、3000 和

收稿日期: 2010-01-27; 修回日期: 2010-03-04

作者简介: 曾力娟(1982-), 女(汉族), 湖北天门人, 北京爱地地质勘察基础工程公司注册岩土工程师, 岩土工程专业, 从事岩土工程勘察设计工作, 北京市石景山区晋元庄路 23 号, zenglijuan@126.com。

表1 地层岩性主要特征一览表

分层编号	岩土名称	地层描述	稠度或密实度	层厚/m
①	吹填土	浅灰色,主要由粉砂、细砂组成,含较多贝壳碎片,稍湿~饱和,靠近吹填区边缘 近水部位,有呈软塑~流塑状态的粉质粘土,透镜体分布	松散	3.20~5.70
②	淤泥质粉质粘土	灰色,含云母及贝壳碎片,不连续分布	流塑	0.40~2.50
③	粉细砂	深灰~灰色,长石~石英质,含云母及贝壳碎片,均粒,夹粘性土薄层,饱和	稍密~中密	6.00~9.80
④	细砂	深灰~灰色,长石~石英质,含云母及贝壳碎片,均粒,饱和	中密~密实	8.00~16.30

4000 kN·m 四个不同夯击能的强夯试验,试夯参数见表2。

表2 试夯参数

夯击形式	夯击能/(kN·m)	夯点间距/m	夯击遍数	夯击击数	停锤标准(最后2击夯沉量之和)/cm
主夯	1500	5	2	6~9	≤10
	2000	5	2	7~10	≤10
	3000	5	4	8~12	≤10
	4000	6	4	10~15	≤12
满夯	500	1	1		
	500	1	1		
	1000	1	2		
	1000	1	2		

## 2.2 试验结论

(1)通过强夯试验夯后标准贯入、静力触探、面波、浅层平板载荷以及强夯振动地面加速度测试等试验,夯后效果明显,各参数统计见表3。

表3 夯后各指标参数统计

夯击能/(kN·m)	有效加固深度/m	夯沉量/m	地基承载力特征值/kPa	强夯振害最小安全距离/m	夯后吹填土面波速度/(m·s⁻¹)
1500	6~7	0.20	160	20~30	105~123
2000	7~9	0.25	200	30~40	111~126
3000	8~9	0.39	250	40~60	114~129
4000	8~9	0.43	300	50~70	123~140

(2)通过各夯击能下地基土中孔隙水压力观测,夯后0.5 h内可消散超静孔隙水压力的65%~80%,在夯后4 h内已基本消散。因此建议强夯每遍间隔时间不宜少于4 h。

(3)通过场区标贯试验数据计算,强夯影响深度范围内砂层夯后液化现象消除。

## 3 强夯方案选择及施工参数

### 3.1 强夯方案选择

根据强夯试验结果和场地建筑物荷载情况,场区内大部分区域在消除液化后进行复合地基和桩基施工,地基承载力提高至220 kPa,因此场地主要采用3000 kN·m 夯击能进行处理。

道路区域荷载较小,承载力达200 kPa即可,因此采用2500 kN·m 夯击能。

### 3.2 强夯施工

由于上部吹填土形成时间短、含水量大且地下水埋深浅,其天然地基承载力很小,部分区域夯机进入即陷沉,给施工造成极大困难。因此对该土层进行强夯处理,必须首先解决降水、排水问题。

前期场地通过开挖明沟、强力扰动进行排水,地下水经过强力扰动涌出后,场地表层强度便提高很多,然后采用超湿地180推土机进行横纵交错的强力碾压2~3遍。以上步骤完成,经过1~2天的晾晒后,再碾压一遍,即可达到夯机进入不下陷。

另外现场施工中,由于场地是围海造地,水力分选作用导致围堰出水口处积聚了有限范围的厚层粘性土,该范围内吹填土以淤泥质粘性土为主,含水量大,大于液限,水分难以排出。根据此种情况,现场采用了山皮石修道挤入、换土混砂后强夯的方案,较好地解决了地表吹填形成的淤泥质土问题。

强夯参数如下:

(1)夯锤底直径2000~2500 mm,高度1000 mm,夯锤质量20 t;单击夯击能2500~3000 kN·m,提升高度15.0~18.0 m<sup>[1]</sup>。

(2)主夯

夯点间距:5 m×5 m;四个点夹一个点形成梅花形布置,见图1。

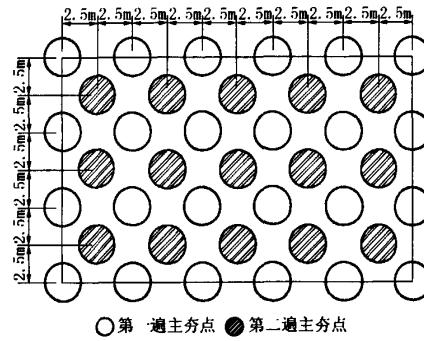


图1 主夯点示意图

夯击遍数:点夯2遍。

夯击击数:第一遍点夯8~10击,第二遍点夯7~9击。

夯锤落距:落距=夯击能/锤重。

停锤标准:最后两击夯沉量之和不大于10 cm。

### (3) 满夯

满夯搭界:1/4 锤底面积,夯击能1000 kN·m;

夯击遍数:1遍;

夯击击数:1击;

每遍夯后间歇时间:3天。

## 4 强夯检测结果及分析

### 4.1 夯前指标

根据各场地夯前场地勘察报告综合统计,上部各层土力学参数见表4。

表4 夯前土层力学参数

岩土名称	标贯 /击	静探 q <sub>c</sub> /kPa	剪切波速 /(m·s <sup>-1</sup> )	压缩模 量/MPa	地基承载力 特征值/kPa
①层吹填土	7.5	2.5~3.6	117	4.2	80
②层淤泥质 粉质粘土	3.2	0.66	110	2.6	60
③层粉细砂	13.5	10.2	152	6.5	130

由夯前各地层物理力学指标可以看出,①层吹填土处于松散状态,③层粉细砂处于松散~稍密状态,并且压缩模量较小,地基承载力较低。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)计算,①层、③层粉细砂处于中等~严重液化状态。

### 4.2 强夯处理

经3000 kN·m 夯击能处理后,场地②层淤泥质粉质粘土厚度小于1.5 m 区域各地层力学参数见表5。

表5 3000 kN·m 夯击能处理后土层力学参数

岩土名称	标贯 /击	静探 q <sub>c</sub> /kPa	剪切波速 /(m·s <sup>-1</sup> )	压缩模 量/MPa	地基承载力 特征值/kPa
①层吹填土	20.2	10.1	165	19.2	220
②层淤泥质 粉质粘土	4.8	1.36	123	4.5	120
③层粉细砂	23.3	15.45	280	20	250

根据夯前勘察和3000 kN·m 夯击能处理检测报告统计,按各参数夯后和夯前比率绘制柱形图2。

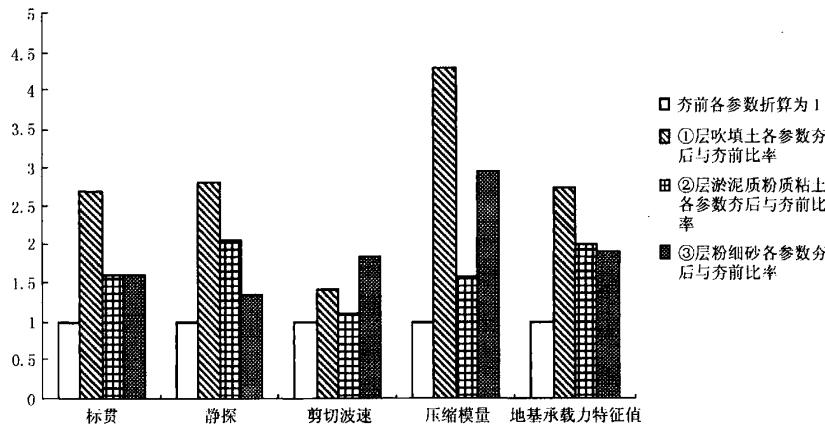


图2 夯前夯后各地层参数比率柱形图

由表4、表5 和图2 可以看出:采用3000 kN·m 夯击能时,各层土的力学性能比未处理前均有明显提高,尤其是①层吹填土提高幅度最大,标贯击数和静探锥头指标提高了150%,地基承载力提高了160%,压缩模量增加了3倍;②层粉粘和③层粉细砂地基承载力提高了90%以上;同时①层吹填土和③层粉细砂消除了液化。

经2500 kN·m 夯击能处理后,场地②层淤泥质粉质粘土厚度小于1.5 m 区域各地层力学参数见表6。

对比表4、5、6 的数据可知:采用2500 kN·m 夯击能时,各层土的力学性能比未处理前均有明显提高,但相对3000 kN·m 夯击能提高幅度较小。根

表6 2500 kN·m 夯击能处理后土层力学参数

岩土名称	标贯 /击	静探 q <sub>c</sub> /kPa	剪切波速 /(m·s <sup>-1</sup> )	压缩模 量/MPa	地基承载力 特征值/kPa
①层吹填土	18.5	8.59	105.6	18.1	200
②层淤泥质 粉质粘土	4.2	1.25	119.5	4.0	100~120
③层粉细砂	21.7	11.26	235.9	18.1	220

据标贯数据计算采用2500 kN·m 夯击能夯后①层吹填土和③层粉细砂消除了液化。

### 4.3 淤泥质土影响

施工中发现,同样采用3000 kN·m 夯击能处理,局部区域由于②层淤泥质粉质粘土厚度较厚,对②层淤泥质粉质粘土和③层粉细砂强夯效果影响较大。经统计场区内矿石料场区②层淤泥质粉质粘土

大于1.5 m 强夯检测结果,各地层力学参数指标见表7。

表7 ②层厚度大于1.5 m 区域夯后土层力学参数

岩土名称	静探 $q_s$ /kPa	剪切波速 $/(m \cdot s^{-1})$	地基承载力 特征值/kPa
①层吹填土	8.24	138	220
②层淤泥质粉质粘土	1.32	121	60~80
③层粉细砂	10.3	215	160~200

由表7数据可以看出,经3000 kN·m 夯击能处理后,各层土力学指标相对夯前指标都有提高,但相对②层淤泥质粉质粘土小于1.5 m 区域,指标提高幅度较小。

由于局部区域②层淤泥质粉质粘土厚度过大,消弱了夯击能向③层粉细砂的传递,导致下部粉细砂强度提高受到影响。②层淤泥质粉质粘土由于其处在超饱和状态,粘粒含量较高,排水条件不好,强夯效果不理想。

## 5 结论及建议

(1) 相对其它地基处理方法,强夯法具有设备简单,施工方便、施工期短、施工费用低等特点,经济效益显著。

(2) 通过场地强夯,加速了上部吹填土地基固结,减少了工程建设周期,确保了土建工程的顺利进行;强夯施工应在围海造地6个月之后进行,利于设备进入,效果良好。

(3) 通过夯前夯后标准贯入试验、静力触探试验、面波测试结果的对比,淤泥质土小于1.5 m 的区

(上接第66页)

## 4 P7 破碎带特大涌水处理效果检查与结论

采取一系列技术措施后,集水井井壁再无渗水,集水井具备正常排水功能,泥岩坝基中发育的不良地质构造带已处理完毕。这次处理是很成功的。通过这次对P7 破碎带特大涌水处理,收获以下几点经验体会:

(1) 对于特大涌水的处理方案应遵循以排为先、降低压力,再逐渐封堵、降低渗流的规律,从而合理施用堵排结合的思想;

(2) 由于泥岩特性比较特殊,在较大压力下容易劈裂,故在压力选用上应合理,特别在压水压力的选用上更要慎重;

域,强夯影响深度能达10 m,夯后影响深度范围内各地层力学指标均有提高,地基承载力提高100%以上,同时消除了场地液化现象,强夯效果显著,处理地基的均匀性较好。

(4) 对于采用天然地基的料场等大范围堆载区域,经强夯处理后,应该按照分级堆载的原则,待前期预压荷载下地基土的强度增长满足下一级荷载下地基的稳定性要求后再加载,防止加载过快造成地基破坏。

(5) 对于局部淤泥质土较厚的区域,工程设计时应根据荷载及建构筑物情况考虑其不利影响:

①道路区域,可以采用换填法进行处理;

②采用增加排水沟、袋装砂井等方式增加排水通道,加速软土固结;

③可以通过复夯,即采用普通强夯锤2遍点夯后,填平夯坑再次进行复夯,根据淤泥土厚度情况确定夯击次数,达到提高地基承载力的效果;

④也可采用真空堆载预压法或真空动力固结法进行地基处理,能够取得更好的效果。

## 参考文献:

- [1] JGJ 79-2002, 建筑地基处理技术规范[S].
- [2] 白李妍. 强夯法和强夯置换法在深厚人工填土层中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(12): 39~41.
- [3] 刘世奇, 陈静曦, 潘冬子. 强夯法处理湿陷性黄土地基的效果分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, 31(6): 19~21.
- [4] 陈昌富, 李树伟, 张晓欣. 某试验区吹填软基处理工程监测数据[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(7): 46~49.

(3) 由于基础岩石近水平状发育,坝基中的排水不是很通畅,故建议基础帷幕形成后在幕后增加排水孔,以减少挡水建筑物的扬压力。

## 参考文献:

- [1] 王福平, 蔡刚, 王立民, 等. 通化桃园水利枢纽工程特殊坝段帷幕灌浆工艺技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(8).
- [2] 李茂芳, 孙钊. 大坝基础灌浆[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [3] 孙钊. 大坝岩石基础灌浆施工技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [4] 白永年, 吴士宁, 王洪恩. 土石坝加固[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [5] DL/T 5148-2001, 水工建筑物水泥灌浆施工技术[S].