

# 降水联合强夯置换在深厚吹填粉煤灰地基加固中的应用

赵永红, 胡耀广, 韩政, 王新涛, 王志强

(中冀建勘集团有限公司, 河北 石家庄 050227)

**摘要:** 近年来, 粉煤灰地基的加固处理受到岩土工程界的广泛重视。秦皇岛某粮油项目场地位于废弃的电厂贮灰场区, 上部分布有 6~9 m 厚的吹填粉煤灰层。为消除粉煤灰层的地震液化, 提高地基承载力, 基于吹填粉煤灰的工程特性和处理后场地的标高要求, 确定了井点降水配合强夯置换的地基处理方法。研究表明: 对表层承载能力低、地下水位高的软弱粉煤灰场地采用强夯加固时, 应先进行降水和低夯击能夯击, 待场地浅层的承载能力提高后, 再以大夯击能对深部地基土进行加固; 加固场地内部应设置轻型井点等可靠的排水通道, 以保证超孔隙水压力的有效消散; 施工时应以夯坑周围不发生明显隆起为终夯控制标准。本文研究结论对粉煤灰地区的加固具有一定的指导和参考意义。

**关键词:** 降水; 强夯置换; 深厚粉煤灰地基; 终夯标准; 地基加固

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)04-0396-08

## Application of combined dewatering and dynamic compaction replacement in the improvement of deep reclaimed fly ash foundation

ZHAO Yonghong, HU Yaoguang, HAN Zheng, WANG Xintao, WANG Zhiqiang

(China Hebei Construction and Geotechnical Investigation Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050227, Hebei, China)

**Abstract:** In recent years, improvement of fly ash foundations has become a focal point in geotechnical engineering. A grain and oil processing project in Qinhuangdao is located in an abandoned power plant ash storage yard, with a 6-9 m thick fly ash layer distributed on the upper part. In order to eliminate the seismic liquefaction of the fly ash layer and improve the bearing capacity of the foundation, a ground improvement method combining wellpoint dewatering with dynamic compaction replacement was used, to meet the requirements of site elevation and properties of the fly ash fill. The results show that dewatering and compaction with low energy should be conducted first when dynamic compaction is used to reinforce weak fly ash sites with low surface bearing capacity and high groundwater level. After the bearing capacity of the shallow layer is improved, the deep soil layer can be improved with large compaction energy. Reliable drainage channels such as light well points should be set up inside the reinforced site to ensure the effective dissipation of excess pore water pressure. During construction, no obvious uplift around the tamping pit should be the final compaction control standard. The findings of this research can provide significant guidance and reference for strengthening measures in fly ash regions.

**Key words:** dewatering; dynamic compaction replacement; deep fly ash foundation; final compaction standard; ground improvement

## 0 引言

我国燃煤电厂排灰渣量在工业废渣排放量中居第4位, 一些沿海发电厂采用湿法排出的粉煤灰填海造地, 形成了大片废弃的粉煤灰贮灰场, 对环

境造成很大的污染, 为利用这些贮灰场地, 必须对其进行适当的加固处理。

有关文献表明, 贮灰场内的粉煤灰厚度和沉积层理具有一定的规律, 粒径及化学组分相对稳定, 经历多年沉积后, 会发生一定程度的自重固结。贮

收稿日期: 2024-04-30

基金项目: 河北省建设科技计划(2022-2046)。

作者简介: 赵永红(1986—), 男, 河北邢台人, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程理论研究与工程实践的工作。E-mail: 1187991408@qq.com。

灰场粉煤灰的颗粒组成类似砂土, 受力类似粉土, 变形接近软黏土, 具有比重轻、容重小、孔隙率大、含水量高、渗透系数大、强度低、压缩变形高的特点, 在饱和疏松状态下极易产生振动液化<sup>[1-4]</sup>。

强夯能够有效提高这类人工堆积粉煤灰的密实度, 通过强夯的振动和预加变形作用, 地层局部液化后粉煤灰颗粒重新排列, 地基土中的部分孔隙水排出, 使地基土变得密实, 抵抗地震液化的能力提高<sup>[5-9]</sup>。但对地下水位较高的饱和粉煤灰地基强夯时, 地下水会影响夯击能的有效传递, 使强夯对地基土的挤密作用减弱, 有效加固深度减小, 超孔隙水压力的消散时间延长, 会在地基土中产生局部液化、橡皮土等现象, 影响强夯效果<sup>[10-12]</sup>。

为保证粉煤灰地基的强夯处理效果, 必须针对粉煤灰层的颗粒组成、不同的地下水埋深等特点制定可靠的地下水控制方案, 保证强夯过程中超孔隙水压力的有效消散, 针对表层土密实度、场地交工标高等因素, 制定合理的强夯实施方案和终夯控制标准。

## 1 工程概况

某大型粮油项目位于秦皇岛市海港区, 占地面积约为 360 000 m<sup>2</sup>, 原始地貌单元为海岸阶地与浅海接触带, 场地原为电厂湿法排灰形成的贮灰场。建筑场地伸入渤海湾内, 北面与陆地相连, 其余三面通过堆石坝与海水相接, 处理前地面平均标高约为 3.6 m。

### 1.1 工程地质条件

场地上部地层是以粉煤灰为主的人工填土, 其下为第四系全新统海陆交互沉积细砂和陆相冲洪积圆砾与卵石。地基处理影响范围内的地层特性见表 1, 粉煤灰颗粒粒径分布范围见表 2, 粉煤灰填土物理力学参数见表 3, 典型地质剖面见图 1。

### 1.2 地下水

地下水为孔隙潜水, 主要含水层为②<sub>2</sub>、②<sub>3</sub>素填土层、③细砂层、④圆砾层和⑤卵石层。地下水补给来源为大气降水、侧向径流和海水侵入。受潮汐作用影响, 地下水变幅在 3.0 m 左右。

场地稳定地下水位埋深为 2.88~4.28 m, 水位标高为 0.17~0.37 m。

### 1.3 抗震设计参数

场地抗震设防烈度为 7 度, 设计基本地震加速度为 0.10g, 设计地震分组为第 3 组。

### 1.4 液化判别

场地内③细砂层为轻微液化土层, ②<sub>2</sub>、②<sub>3</sub>素填土层为严重液化土层, 液化指数为 19.81~65.91, 该场地为严重液化场地。

表 1 地层特性表  
Table 1 Stratigraphic characteristics

层号	土层名称	层厚/m	地层特性描述
② <sub>2</sub>	素填土	0.50~3.40	浅灰色, 稍湿, 松散, 以粉煤灰为主, 分布较连续, 回填时间为 5~10 年
② <sub>3</sub>	素填土	0.50~7.60	浅灰-灰黑色, 饱和, 松散, 主要以粉煤灰混淤泥为主, 分布连续
③	细砂	0.50~2.80	黄褐色, 饱和, 松散-稍密, 长英质, 均粒, 含贝壳碎屑, 仅部分钻孔有揭露
④	圆砾	0.50~5.80	黄褐色, 饱和, 稍密-中密, 分布不连续
⑤	卵石	25.50~29.40	黄褐色, 饱和, 中密-密实, 粒径为 20~60 mm, 有胶结, 骨架颗粒含量约 53% 以上

表 2 粉煤灰颗粒粒径分布范围  
Table 2 Particle distribution of fly ash

粒径范围/mm	含量平均值/%
20.000~2.000	0.25
2.000~0.500	1.95
0.500~0.250	4.00
0.250~0.075	26.37
0.075~0.050	19.53
0.050~0.010	28.75
0.010~0.005	10.43
<0.005	8.72

表 3 粉煤灰填土物理力学参数  
Table 3 Physical and mechanical parameters of fly ash

层号	土层名称	天然含水量 w/%	天然孔隙比 e	重度 γ/(kN/m <sup>3</sup> )	饱和度 S <sub>r</sub> /%	压缩模量 E <sub>s1-2</sub> /MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	标贯击数 N/(击/30 cm)
② <sub>2</sub>	素填土	19.4	2.326	8.8	21.4	8.29	21.6	12.4	1.0~6.0
② <sub>3</sub>	素填土	28.3	1.182	15.2	79.3	4.37	9.4	6.3	0.5~4.0

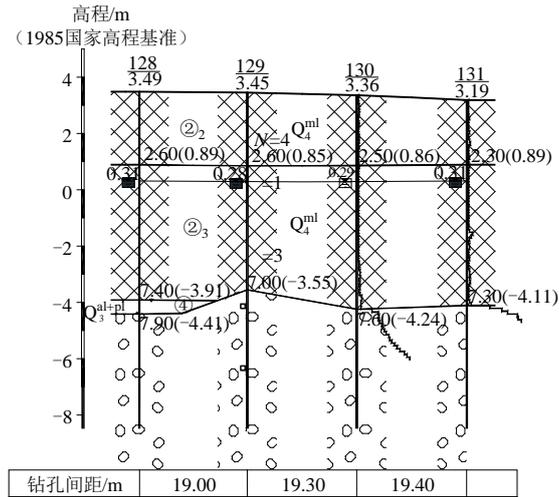


图1 典型地质剖面

Fig. 1 Typical geological profile

## 2 地基处理方案设计

### 2.1 地基处理要求

地基处理后应达到以下要求:

- (1) 地基承载力特征值不小于 120 kPa;
- (2) 场地液化等级不得高于轻微液化;
- (3) 填土②<sub>2</sub>、②<sub>3</sub>层的标贯击数不得小于 8;
- (4) 地基处理后地面平均标高控制在 (3.6±0.2) m。

### 2.2 地基处理思路

根据地基处理要求,需要处理的主要是②<sub>2</sub>、②<sub>3</sub>素填土层,厚度约为6~8 m,主要成分是吹填粉煤灰,部分地段粉煤灰中含有淤泥质土。由表3可知,填土浅层的孔隙比大于2.0,重度仅为8.8 kN/m<sup>3</sup>,地层非常松软,轮胎式施工设备在场内无法移动。同时,②<sub>2</sub>层的标贯击数为1.0~6.0击,②<sub>3</sub>层的标贯击数为0.5~4.0击,且标贯试验时触探杆有自沉现象,表明填土中下部的工程性质很差,是地基处理的重点部位。由表2可见,粉煤灰层的颗粒以粉粒为主,且黏粒的含量较高(约9%)。

强夯法对这种以粉粒为主的粉煤灰层的处理效果较好,且造价低廉。但本项目地下水位埋深约为3.0 m,与海水联系密切,对饱和粉煤灰层强夯时,还会造成地下水浸润段的抬升。为保证强夯加固深度,施工时必须降低地下水位,并在地层中设置可靠的超孔隙水压力消散通道,才能保证强夯的挤密效果。

另外,粉煤灰的孔隙比很大,强夯处理后若②<sub>2</sub>层的孔隙比下降到②<sub>3</sub>层处理前的孔隙比,②<sub>3</sub>层达到中密状态(孔隙比下降约25%),预估处理后

的场地沉降量会达到1600 mm,而场地现标高与处理后要求的地面标高基本持平,因此采用强夯置换法处理比较适宜。强夯置换时在夯坑内填入置换料可防止夯坑过深造成提锤困难,也可通过置换墩对中下部地层进行有效挤密,还能保证处理后的地面标高。

### 2.3 地基处理设计

#### (1) 地下水控制

为达到降低地下水位、减小强夯时粉煤灰层的饱和度、提高有效加固深度、加快超孔隙水压力消散的目的,强夯前需先对施工场地进行降水。

粉煤灰地层的渗透系数为10<sup>-5</sup>~10<sup>-4</sup> cm/s量级,采用在施工区四周设置一圈管井的方式,切断施工区与周边海水的水力联系。管井井点布置在施工区外5.0 m处,井间距为12~15 m,井深为15 m。为防止强夯的侧向挤压破坏井点,井管采用钢制桥式滤水管。

粉煤灰内含有较多的黏粒,施工区内部采用轻型井点降低地下水位,井点管长度为6.0 m。轻型井点在强夯过程中实施不间断抽水,以快速消散超孔隙水压力。为保证强夯时不破坏井点管,井点布置在强夯夯点之间,按大排距、排内小间距的原则布置井点。施工时轻型井点既是降水井,又是超孔隙水压力的消散通道。

当场内地下水位降至地表5.0 m以下后再开始强夯。

#### (2) 强夯设计

##### a) 方案选择

常规强夯施工时,每遍点夯后需推平夯坑才能进行下一遍点夯,最后根据场地设计标高和夯沉量

对场地进行回填压实。

本项目要求地基处理后的场地标高与现标高基本持平,因地层孔隙率很大,预估夯后地面沉降量可达1 600 mm。强夯施工时势必会造成夯坑过深导致提锤困难,使点夯很难达到终夯标准。推平夯坑时有可能破坏施工区内部的井管,过大的沉降量还会造成附近轻型井点管漏气,导致轻型井点排水系统不能不间断排水,影响超孔隙水压力的消散效果,最终强夯效果很难保证。

鉴于此,选用强夯置换进行处理:夯坑达到一定深度后,用山皮土回填夯坑,再继续夯击,这样山皮土置换墩可对深部粉煤灰层进行有效挤密,保证点夯夯时满足夯沉量控制标准,强夯后的地面标高也能满足地基处理要求。

#### b) 实施方案设计

①正式强夯前,先进行1遍1 000 kN·m满夯,每点3击,锤印相切,对表层的松散粉煤灰进行初步夯实,以满足施工设备进场施工要求。

②夯击能:由于吹填粉煤灰层异常松软,大能量夯击的夯沉量很大,会造成提锤困难,后续夯机就无法实施。若夯坑内填土再夯会导致夯坑周围大范围隆起,致使夯击效果减弱甚至丧失。为避免出现上述情况,强夯置换的夯击能施加应先低后高,先用低夯击能对浅部地层进行加固,上部形成较厚的相对硬壳层后,再用大夯击能对深部地层进行加固。

需处理的粉煤灰层厚度约为6~9 m,强夯处理的最大夯击能选择5 000 kN·m,浅层加固时的夯击能选择2 000~3 000 kN·m。

③强夯置换施工遍数:为保证超孔隙水压力的有效消散,减轻地基土的局部液化,防止“橡皮土”现象的产生,强夯置换共进行4遍,完成后进行2遍满夯。

第1~2遍强夯置换的夯击能分别采用2 000 kN·m、3 000 kN·m,夯击2~4击后向夯坑内填入山皮土,再夯击2~4击,用山皮土填平夯坑并压实后结束1遍夯击。这2遍是对浅部地层进行加固,保证后续大能量强夯能够顺利进行。

第3~4遍强夯置换的夯击能采用5 000 kN·m,每点夯击15~20击,夯坑深度为2.0 m左右时向夯坑内填入山皮土后再夯击;当夯坑深度再次达到2.0 m左右提锤较困难时,再次向夯坑内填入山皮土后夯击,当最后2击的平均夯沉量不大于10 cm后停止夯击。这2遍是对深部地层进行加固,消除中下部粉煤灰层的液化问题,保证粉煤灰层加固效果在全深度范围内能够满足设计要求。

满夯的夯击能采用2 000 kN·m,每点3击,锤印搭接1/4。目的是对第3~4遍夯击时扰动的浅部粉煤灰层进行加固,保证浅部地层的均匀性和承载力满足设计要求。

④终夯标准:前2遍低能量强夯置换以加固浅层为主,采用优先控制夯坑周围隆起为终夯标准;后2遍大能量强夯置换以加固深层为主,采用控制最后2击的平均夯沉量为主,兼顾夯坑周围隆起为终夯标准,最后2击的平均夯沉量按不大于10 cm控制。

⑤2遍强夯置换施工之间的间隔通过监测超孔隙水压力的消散情况进行控制,消散85%以上后进行下一遍施工。

## 3 试验区施工及效果检测

### 3.1 试验区平面布置

大面积强夯前,选取代表性区域布置了试验区,试验区为25 m×25 m,面积为625 m<sup>2</sup>,强夯置换点按4.0 m×4.0 m布置,为保护轻型井点,井点周围的强夯置换点间距增大至5.0 m。试验区外围布置8眼降水管井,每间隔2排强夯置换点布置1排轻型井点,轻型井点排距为9.0 m,排内井点间距为2.0 m,强夯置换点及排水系统平面布置见图2。

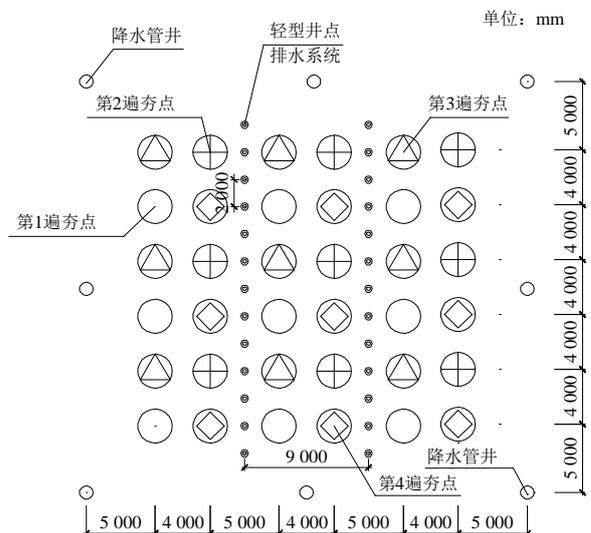


图2 强夯置换点及排水系统平面布置

Fig. 2 Layout of dynamic compaction replacement points and drainage system

施工时在施工区外2.5 m处布置孔隙水压力监测点3个,完成后在强夯置换点及4个置换点的中间位置共布置检测点3个,每个检测点处进行1次标准贯入试验和1次平板载荷试验。监测点和检测点平面布置见图3。

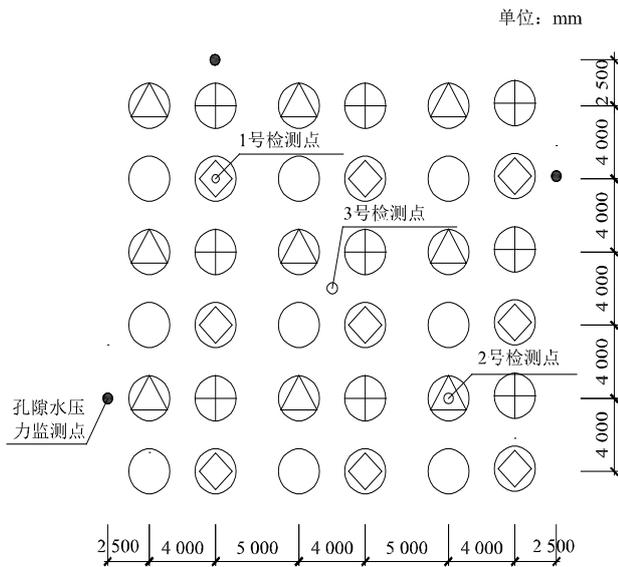


图3 监测点和检测点平面布置

Fig. 3 Layout of monitoring and detection points

### 3.2 试验区施工过程控制

试验区施工时先进行1遍锤印相切的满夯,以满足施工设备进场要求。8眼降水井和轻型井点排水系统施工后进行降水,待场地地下水位降至地面下5.0 m后进行4遍强夯置换和2遍满夯施工。4遍强夯置换的夯击能按本文2.3节的参数和要求进行。

夯坑周围隆起会严重影响强夯置换对地层的挤密效果,夯击过程中以夯坑四周不发生明显隆起为终夯控制标准,若发生较明显隆起就停止夯击,移至下一夯点施工。

施工过程中,8眼降水井和轻型井点排水系统始终保持抽水,以控制施工过程中的地下水位,加速强夯时超孔隙水压力的消散。

### 3.3 超孔隙水压力的消散

现场观察发现,强夯置换过程中,特别是第3~4遍大夯击能置换过程中,粉煤灰层内集聚的超孔隙水压力急剧升高,导致粉煤灰局部液化,地层液化后,一部分地下水裹挟着粉煤灰层内的黏粒等冲破第1~2遍强夯置换在地表附近形成的硬壳层,消散到地表,见图4(a);另一部分顺着强夯形成的裂隙冲至附近的轻型井点管,从井点管周围或井点管中消散,见图4(b),强夯时排水系统的出水明显变浑浊就是超孔隙水压力消散造成的。由此可以看出,强夯置换施工过程中,排水系统的不间断抽水,对强夯后超孔隙水压力的消散非常重要。



(a) 地表处的消散通道

(b) 井点管处的消散通道

图4 超孔隙水压力的消散通道

Fig. 4 Dissipation channel of excess pore water pressure

每遍强夯置换后,通过埋设孔隙水压力计,对地层内超孔隙水压力的消散情况进行监测,超孔隙水压力的消散情况如表4所示。

监测表明:在排水系统保持抽水条件下,每遍夯后3~5 d内超孔隙水压力可消散85%以上,为施工时2遍点夯的间隔时间控制提供了依据。

### 3.4 不同施工阶段的地面沉降量

试验区各施工阶段均产生了较大的地面沉降,或在夯坑内挤入了大量土方。不同施工阶段的地面沉降量见表5。

由表5可以看出,强夯置换填入的土方量主要集中在第3~4遍大夯击能强夯置换时,它是决定强夯置换处理效果的关键环节。

### 3.5 地基处理效果检测

施工结束15 d后,对试验区进行了平板载荷试验和标准贯入试验,并对液化消除情况进行了评价。

#### (1) 标准贯入试验

试验区共进行3点标贯试验,标贯孔深约为8.5 m,进入下层圆砾或卵石时的深度约为8.0 m,每1.5 m左右做1次标贯试验,标贯击数随深度的变化见图5。

由图5可见,处理深度范围内粉煤灰层的标贯击数均大于8击,满足地基处理要求。同时,由于在夯坑内填入了大量山皮土,场地上部土层的标贯击数明显偏高,达到25~50击,约6.0 m深度以下,标贯击数由20多击下降到10~15击。因1~2号检测点位于强夯置换点上(见图3),3号点位于强夯置换点之间,1~2号点上部地层的标贯击数大于3号点,由此可见,夯点之间土的挤密效果要比夯点下的挤密效果差。

表4 超孔隙水压力的消散情况

Table 4 Dissipation of excess pore water pressure

孔号	深度/m	降水前/kPa	第1遍强夯之前/kPa	第1遍强夯时/kPa	第2遍强夯之前/kPa	第2遍强夯时/kPa	第3遍强夯之前/kPa	第3遍强夯时/kPa	第4遍强夯之前/kPa	第4遍强夯时/kPa
1号	10	56.1	11.4	14.7	9.9	15.5	8.9	23.7	10.6	18.4
	8	38.6	19.7	28.0	17.1	66.3	8.1	82.7	19.1	48.3
	6	17.9	1.8	6.4	0.0	23.8	0.0	30.0	3.1	15.2
	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2号	10	53.7	31.9	77.2	37.1	77.1	36.8	111.6	31.9	87.4
	8	33.8	13.2	61.1	18.1	59.5	18.5	85.5	17.9	69.1
	6	14.6	0.0	44.4	2.8	31.8	9.0	50.1	10.6	37.8
	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	0.0	0.6
3号	10	54.1	23.3	35.8	24.7	53.4	29.4	68.7	30.9	114.7
	8	36.3	11.6	28.1	13.9	47.8	21.4	61.5	24.1	87.2
	6	15.8	0.0	8.0	-1.4	16.7	0.5	30.9	4.8	50.3
	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表5 不同施工阶段的地面沉降量

Table 5 Ground settlement in different construction stages

施工阶段	地面沉降量/m	夯坑填土方量/m <sup>3</sup>	夯点数	换算地面沉降量/m
满夯	0.315	—	—	—
第1遍强夯置换	—	135	9	0.216
第2遍强夯置换	—	160	9	0.256
第3遍强夯置换	—	688	9	1.101
第4遍强夯置换	—	538	9	0.861
满夯	0.352	—	—	—
合计	3.101	—	—	2.434

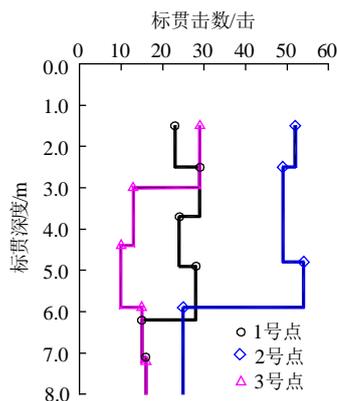


图5 标贯击数随深度的变化

Fig. 5 Blow counts of SPT with depth

3号点4.55m深度处标贯击数偏低(10击),由标贯取出的土样发现,该处土样的粉煤灰中混有的淤泥质土较其他两点多,这是标贯击数偏低的主要原因。

标贯试验后,根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[13]</sup>的规定进行液化评价,液化评价

时地下水位埋深取1.0m,液化判别标贯基准值为7击,地震第3组调整系数为1.05。根据标贯试验结果对粉煤灰层的地震液化指数评价见表6。

表6 土层液化指数评价

Table 6 Evaluation of soil liquefaction index

孔号	实测击数 $N_i$	临界标贯击数 $N_{cr}$	贯入点深度 $d_s$	代表土层液化指数 $I_{IEi}$	钻孔液化指数 $I_{IE}$	液化判别
1号	23	5.97	1.65	0	0	不液化
	29	8.29	2.65	0		
	24	9.83	3.85	0		
	28	11.10	5.05	0		
	15	12.27	6.35	0		
	16	12.98	7.25	0		
2号	52	5.97	1.65	0	0	不液化
	49	8.29	2.65	0		
	54	9.83	3.85	0		
	25	11.01	4.95	0		
	23	12.02	6.05	0		
	25	12.91	7.15	0		
3号	29	5.97	1.65	0	0.79	轻微液化
	13	8.97	3.15	0		
	10	10.60	4.55	0.79		
	15	12.02	6.05	0		
	16	13.06	7.35	0		

由表6可见,处理后1号、2号点已全部消除液化,3号点4~5m深度处稍差,为轻微液化,处理后单孔液化指数由处理前的19.81~65.91降低到0~0.79,液化消除效果非常明显。

## (2) 平板载荷试验

试验区共进行3点平板载荷试验,压板尺寸为1.5 m×1.5 m,压板位于自然地表下0.30 m深处。载荷试验 $Q-S$ 曲线见图6。

由 $Q-S$ 曲线可见,曲线形态基本呈直线状,加载到要求地基承载力特征值的2倍时,最大沉降量不到14 mm,说明地基土还未达到极限状态,地基承载能力还有潜力。地基处理后地基承载力特征值均大于120 kPa,满足处理要求。

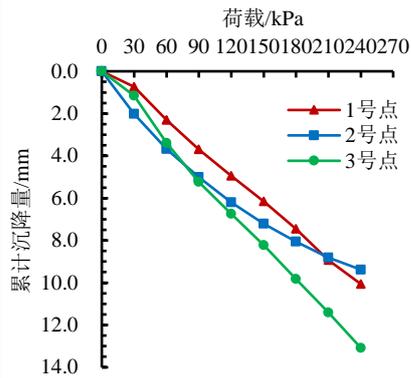


图6 载荷试验 $Q-S$ 曲线

Fig. 6  $Q-S$  curves of static loading test

## 4 结论

通过本项目的设计和施工,可得到以下结论:

(1) 对于深厚吹填粉煤灰地基,因其孔隙比大,地下水埋深浅,采用强夯置换配合井点降水的加固方法可取得良好的处理效果。强夯置换施工时,应在粉煤灰层内设置轻型井点等可靠的排水通道,并保证排水系统不间断抽水,以确保超孔隙水压力的有效消散。

(2) 对上部承载能力很低的软弱粉煤灰场地采用强夯加固时,强夯遍数不宜少于4遍。夯击能量不能按常规的强夯工艺顺序(先大能量点夯,再低能量满夯)施工,而应先以低夯击能夯击,提高场地上部地层的承载能力,满足强夯基本施工条件后,再以大夯击能对地基深部进行加固,才能保证强夯的总体处理效果。

(3) 对深厚吹填粉煤灰地基采用强夯法加固时,应以夯坑周围不产生明显隆起为终夯控制标准。

## 参考文献

[1] 宋泽华,梁友春,林广岩. 贮灰场粉煤灰工程特性和地

基加固技术——粉煤灰地基的粉体喷射搅拌桩处理[J]. 粉煤灰综合利用, 1996(3): 18-23.

SONG Zehua, LIANG Youchun, LIN Guangyan. The engineering character & foundation treatment technology of stored-flyash-field flyash—The cement dry jet mixing pile practiced on flyash foundation[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 1996(3): 18-23.

[2] 衣平, 娄国充. 粉煤灰地基的处理及应用[J]. 粉煤灰综合利用, 2002(3): 3-4.

YI Ping, LOU Guochong. Treatment and application of fly ash foundation[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2002(3): 3-4.

[3] 史春乐, 俞仲泉, 杨涛, 等. 粉煤灰在地基处理工程中的应用[J]. 水利水电科技发展, 1997, 17(2): 30-33.

SHI Chunle, YU Zhongquan, YANG Tao, et al. Application of fly ash in foundation treatment engineering[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1997, 17(2): 30-33.

[4] 陈忠清, 高彦斌, 吕越, 等. 碱渣-粉煤灰基地聚合物固化软黏土的强度及渗透性研究[J]. 地基处理, 2024, 6(2): 134-145.

CHEN Zhongqing, GAO Yanbin, LV Yue, et al. Study on strength and permeability of soft clay stabilized by fly ash based geopolymer with soda residue[J]. Journal of Ground Improvement, 2024, 6(2): 134-145.

[5] 滕圣康, 王金璟, 徐士龙, 等. 高真空击密法加固水力吹填粉煤灰地基的试验[J]. 水运工程, 2004, 366(7): 9-12.

TENG Shengkang, WANG Jinjing, XU Shilong, et al. Test of hydraulic fly ash fill by high vacuum densification method[J]. Port & Waterway Engineering, 2004, 366(7): 9-12.

[6] 王国辉, 胡建敏, 陈军红. 预排水水力固结法加固吹填粉土地基试验研究[J]. 工程勘察, 2009(增刊 2): 274-281.

WANG Guohui, HU Jianmin, CHEN Junhong. Experimental study on strengthening dredger-fill silt foundation by pre-drainage dynamic consolidation method[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(S2): 274-281.

[7] 董炳寅, 水伟厚, 秦劲杰. 中国强夯40年之技术创新[J]. 地基处理, 2022, 4(1): 1-16.

DONG Bingyin, SHUI Weihou, QIN Shaojie. Technological innovation of dynamic compaction in China for forty years[J]. Journal of Ground Improvement, 2022,

