



真空堆载联合预压法加固码头堆场 火山灰软基效果分析

李建忠

(国家能源集团印尼爪哇发电公司, 万丹 西冷 42161)

摘要: 印尼爪哇7号项目厂址分布着一层深厚火山灰沉积软土, 天然含水率115.4%、孔隙比3.21、塑性指数25.5。结合工程实践, 对软土地基处理达到的效果及承载力增长缓慢的原因进行分析。以码头堆场软土地基处理为例, 基于三点法计算工后沉降和固结度, 验证该方法的有效性。通过十字板剪切试验及平板荷载试验数据分析, 验证承载力特征值计算公式的适用性。结果表明, 实测的地表沉降量1 587~2 496 mm、平均2 307 mm, 加固效果显著; 地基固结度达到90%且十字板剪切强度大于20 kPa, 满足设计要求。

关键词: 真空堆载; 加固; 码头堆场; 火山灰; 软土地基

中图分类号: TU 447; U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0165-08

Effect of vacuum surcharge preloading method on strengthening volcanic ash soft soil foundation of wharf yard

LI Jianzhong

(CHN ENERGY Indonesia Java Power Generation Co., Ltd., Serang 42161, Indonesia)

Abstract: There is a deep layer of volcanic ash deposited soft soil in the site of Project 7 in Java, Indonesia, the natural moisture content is 115.4%, the pore ratio is 3.21, and the plasticity index is 25.5. Combining with engineering practice, we analyze the effect of soft soil foundation treatment and the reasons for the slow growth of bearing capacity. Taking soft foundation treatment in wharf yard area as an example, we calculate the post-construction settlement and consolidation degree by three-point method, and verify the effectiveness of this method. Through the analysis of vane shear test and plate load test data, we verify the applicability of the calculation formula of bearing capacity eigenvalue. The results show that the measured ground settlement is 1 587 mm to 2 496 mm, with an average value of 2 307 mm, and the reinforcement effect is remarkable. The consolidation degree of the foundation reaches 90% and the shear strength of the vane is greater than 20 kPa, which can meet the design requirements.

Keywords: vacuum surcharge; strengthening; wharf yard; volcanic ash ; soft soil foundation

印度尼西亚爪哇7号项目建设2×1 050 MW超超临界燃煤发电机组, 配套建设2个1.4万DWT泊位的专用煤码头。由国家能源集团公司、印尼国家电力公司子公司PJBI共同投资组建, 双方出资比例7:3。采用“建设-拥有-运营-移交”BOOT模式。厂址位于爪哇岛西部滨海平原区,

地貌主要为大面积水塘、水沟, 各水塘、水沟之间由堆积的土坝相连, 自然地面高程大部分在-0.92~3.00 m。表面土层主要为高含水量、高压缩性、高灵敏度、地基承载力低的火山灰沉积软土, 地质条件极差。厂址50 a超越概率10%的场地地表水平峰值加速度为0.33g, 对应的地震基本

收稿日期: 2022-06-20

作者简介: 李建忠(1963—), 男, 高级工程师, 从事建筑地基处理、结构工程加固工作。

烈度为Ⅲ度, 场地土类型为软弱土, 建筑场地类别为Ⅲ类。

真空预压法组合加固软基技术先后列入 2010、2017 版《建筑业 10 项新技术》^[1-2], 为沿海软土地区的工程建设做出了巨大贡献。真空堆载联合预压法是处理软土地基的较有效方法之一。在经过室内外试验分析、行业专家评审及设计优化的基础上, 历时两年多完成地基处理面积约 50 万 m^2 , 回填砂料约 215 万 m^3 。该方法在本工程地基处理中大面积应用, 为中国标准、中国技术在海外项目推广发挥了积极作用, 对推进“一带一路”建设具有深远意义。

1 工程地质概况

根据工程勘察报告, 拟建场地上覆地层为第四系全新统人工填土层(Q_4^s)、海陆交互相沉积层(Q_4^{mc})和第四系上更新统冲洪积层(Q_3^{al+pl}), 岩性为素填土、淤泥、淤泥质黏土、粉质黏土、中粗砂、黏土, 下伏基岩地层为火山喷出岩, 岩性主要为玄武岩。

火山灰沉积软土层结构为: ②淤泥, 青灰、灰黑等色, 流塑状态, 饱和, 含贝壳碎屑, 局部有机质含量高, 层厚 0.70~18.80 m; ②₁ 淤泥质黏土, 灰黑色, 流塑-软塑状态, 饱和, 局部夹朽木, 有机质含量较高, 有腥臭味, 层厚 0.45~6.00 m, 该层主要以夹层或透镜体的形式存在于②淤泥中。

火山灰沉积软土的②淤泥主要物理力学性质指标为: 含水率 130.1%~56.4%、平均 115.4%, 天然孔隙比 1.83~3.65、平均 3.21, 密度 1.35 t/ m^3 , 饱和度 92.2%, 液限 74.4%, 塑限 49.5%, 塑性指数 25.5。三轴 (UU) 黏聚力标准值 6.9 kPa、内摩擦角 8.6°, 地基承载力特征值 30 kPa。

2 真空堆载联合预压方案

本工程地基预处理划分主要建筑区、码头堆场区、护岸区、重件码头及引堤道路区。以码头堆场软土地基处理为例进行分析。

码头堆场长 463 m、宽 324 m, 地基处理面积 15 万 m^2 。划分为 B3-1~B3-6 共 6 个区域。预压分区布置如图 1 所示。

B3-6区 面积3.00万 m^2	B3-3区 面积2.38万 m^2
B3-5区 面积2.90万 m^2	B3-2区 面积2.54万 m^2
B3-4区 面积2.23万 m^2	B3-1区 面积1.95万 m^2

图 1 预压分区布置

地基处理设计要求: 1) 软土地基加固范围内的平均固结度不小于 90%, 工后沉降小于 500 mm, 处理深度内十字板剪切强度不小于 20 kPa; 2) 膜下真空度维持大于 80 kPa, 堆载总高度 6.7 m, 取砂的密度 1.8 t/ m^3 , 则施工荷载为 200.6 kPa。

2.1 施工流程

场地清表、平整→铺设编制土工布→吹填厚 1 m 海砂垫层(第 1 级堆载)→打设塑料排水板、密封墙施工、铺设滤水管→铺设长丝针刺无纺土工布保护层→铺设 2 层密封膜→真空预压→铺设长丝针刺无纺土工布保护层→回填厚 0.8 m 砂保护层(第 2 级堆载)→回填厚 1.5 m 砂(第 3 级堆载)→回填厚 2 m 砂(第 4 级堆载)→回填厚 1.4 m 砂(第 5 级堆载)→满载运行至停泵卸载。

2.2 施工工艺

在场地清表、平整并铺好编织土工布(150 g/ m^2)后用吹砂设备铺设砂垫层, 海砂填筑压实后厚度为 1 m, 确保整平后 100 m 范围偏差为 ± 50 mm。

采用 SPB-B 型防淤堵排水板, 设计间距 1.0 m、梅花形布置。排水板打设前使用静力触探(CPT)对处理区域进行探摸, 共计 63 点, 确定淤泥厚度为 7.2~14.7 m。排水板打设深度为 5.09~12.90 m, 平均 11.00 m, 与淤泥底部保持 0.5~1.0 m 的距离, 避免因排水板穿透淤泥层至③粗砂层后影响排水固结效果。打设时使用板靴, 将排水板回带长度控制在 0.5 m 内。

采用高强聚氯乙烯螺旋型弹性钢丝管, 主管

直径 56 mm、壁厚 3 mm, 支管直径 29 mm、壁厚 2 mm。滤管埋设于砂垫层顶面以下 250 mm, 滤管呈格网状布置, 采用钢丝软管相互连接, 接口密封。密封沟施工采用人工结合机械开挖, 密封沟伸入不透水黏土坝厚度不小于 0.6 m; 挖沟时如遇到塑料排水板时不能剪断, 全部沿沟边向上插入砂垫层中。

密封膜厚度 0.12~0.14 mm, 在工厂热合一次成型。铺设密封膜之前, 先行铺设 1 层无纺土工布 (200 g/m^2), 避免真空膜被砂垫层中的杂物刺破。在膜上再铺 1 层针刺无纺土工布 (200 g/m^2) 以防膜被堆载中的尖利物戳破。

采用射流式真空泵抽真空, 泵后真空压力不小于 96 kPa, 膜下真空度大于 80 kPa。每台泵控制加固面积 800~900 m^2 , 共布置 180 台。

3 地基沉降监测

3.1 地基沉降监测数据分析

B3-1~B3-4 每个区域布置 5 个地表沉降观测点、5 个膜下真空度监测点, B3-5 和 B3-6 每个区域布置 6 个地表沉降观测点、6 个膜下真空度监测点。每个区域布置 1 组孔压监测点、1 组分层沉降观测点和 1 个水位观测点。

根据施工进度及监测情况, 卸载时间分为 2 个

阶段, 第 1 阶段 B3-1~B3-3 区同期卸载, 第 2 阶段 B3-4~B3-6 区同期卸载, 两阶段相隔 50 d。各区域实测地表沉降数据见表 1。

表 1 各区域实测地表沉降数据

区域	沉降量范围/mm	平均值/mm	日最大沉降量/mm
B3-1	1 707~2 178	1 938	44
B3-2	2 027~2 486	2 269	50
B3-3	1 587~2 325	1 924	35
B3-4	2 006~2 157	2 098	51
B3-5	1 758~2 403	2 080	81
B3-6	1 770~2 496	2 144	197

从各区域沉降监测数据看, 地表沉降量最大值 2 496 mm、最小值 1 587 mm、平均值 2 307 mm, 加固效果明显。各区域地基不均匀沉降主要发生在堆载阶段, 监测 B3-6 区仅出现 1 个点单日最大沉降量 197 mm。分析认为局部地基软弱加之堆载过程中车辆往返通行所致, 并无地基失稳现象。各区卸载前连续 5 d 沉降速率在 1.0~1.4 mm/d , 均满足小于 2.0 mm/d 要求。

将各区地表沉降观测点沉降量平均值与实测沉降量最接近的观测点进行计算对比, 确定各区沉降观测点为 B3-1-S5、B3-2-S4、B3-3-S5、B3-4-S4、B3-5-S5、B3-6-S4。代表性沉降观测点数据见表 2。

表 2 代表性沉降观测点数据

沉降 观测点	插板阶段				抽真空阶段				填砂加载阶段			
	S/mm	t/d	$v/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	$v_{\max}/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	$v_{\min}/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	s/mm	t/d	$v/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	$v_{\max}/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	$v_{\min}/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	s/mm	t/d
B3-1-S5	70	10	11.5	37	3	611	57	10.2	26	3	1 337	128
B3-2-S4	70	10	20.9	35	1	654	38	8.3	31	1	1 727	167
B3-3-S5	70	10	24.3	32	20	264	18	9.7	25	2	1 476	143
B3-4-S4	70	10	14.5	38	3	750	57	7.4	27	1	1 378	142
B3-5-S5	70	10	15.9	35	4	736	52	8.5	37	1	1 471	138
B3-6-S4	70	10	17.7	35	2	635	42	9.9	21	1	1 648	144
沉降 观测点												
满载联合预压阶段												
4 个阶段的平均 沉降速率/($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)												
B3-1-S5	5.5		26		1		1 919		233		8.2	
B3-2-S4	4.7		21		1		2 216		272		8.1	
B3-3-S5	4.0		19		1		1 950		263		7.4	
B3-4-S4	5.7		33		1		2 145		276		7.8	
B3-5-S5	5.3		36		1		2 079		252		8.3	
B3-6-S4	5.5		16		1		2 169		237		9.2	

注: v 为平均沉降速率; v_{\max} 为最大沉降速率; v_{\min} 为最小沉降速率; s 为累计沉降量; t 为累计加载时间。

由于加固区火山灰沉积软土为欠固结土, 在打设塑料排水板后土层排水路径缩短, 地基土在其自重压力及吹填 1 m 砂垫层荷载作用下, 很快产生一定量的瞬时固结沉降。监测打设排水板阶段地表沉降约 70 mm。

实际监测的膜下真空度从抽真空计时至升到 80 kPa 仅用 7~9 d。真空堆载联合预压时间 233~276 d, 满载联合预压 94~135 d。在抽真空阶段 1~2 个月沉降量比较大, 占实测总沉降量的 27% 左右, 满载联合预压阶段 3~4 个月的沉降量占实测总沉降量的 28% 左右。填砂加载阶段沉降量占实测总沉降量的 45% 左右。

从各代表性沉降观测点数据来看, 抽真空阶段平均沉降速率 11.5~24.3 mm/d, 最大 38 mm/d; 填砂加载阶段平均沉降速率 7.4~10.2 mm/d, 最大 37 mm/d; 满载联合预压阶段平均沉降速率 4.0~5.7 mm/d, 最大 36 mm/d。整个联合预压期间平均沉降速率 7.5~8.9 mm/d, 主固结速率逐渐趋于收敛, 总体上反映了各区沉降水平并有一定的代表性。绘制代表性沉降观测点地表沉降与时间关系曲线, 见图 2。

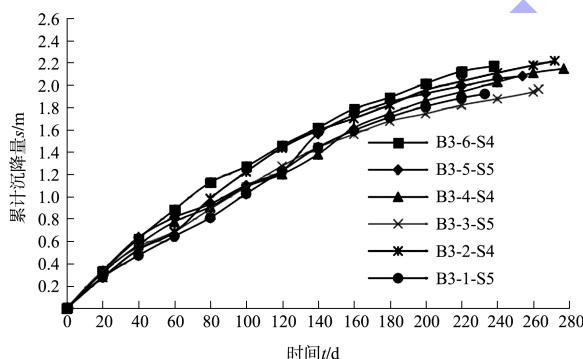


图 2 地表沉降与时间关系曲线

3.2 固结度计算及工后沉降预测

固结度计算采用《建筑地基处理技术规范》^[3]

条文说明 5.4.1 中的三点法, 公式为:

$$s_{\infty} = \frac{s_3(s_2-s_1)-s_2(s_3-s_2)}{(s_2-s_1)-(s_3-s_2)} \quad (1)$$

$$U_t = \frac{s_t}{s_{\infty}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: s_1 、 s_2 、 s_3 为 t_1 、 t_2 、 t_3 时刻沉降量, mm, 其中 $t_3 - t_2 = t_2 - t_1 = \Delta t$; s_{∞} 为最终沉降量, mm; s_t 为某时刻沉降量, mm; U_t 为某时刻沉降固结度, %。

在地表沉降与时间关系曲线上选取恒荷载停载后某起始时刻 t_0 , 在 t_0 之后选用任意 3 个时刻 t_1 、 t_2 、 t_3 , 对应沉降量 s_1 、 s_2 、 s_3 。核查地基预处理监测数据分析报告, 在地表沉降与时间关系曲线上选取的时间间隔 Δt 为 21~25 d, 计算固结度已达 90%~94%。

分析认为, 若选用不同的时间间隔 Δt , 则固结度计算结果会有所不同。以 B3-3-S5 观测点为例, 该区满载时间 120 d, 时间间隔 Δt 分别选取 20、40、60 d, 计算固结度分别为 91%、77%、87%, 可见计算结果差别较大, Δt 取值过小造成地基平均固结度虚高。为了准确判断固结情况, 原则上时间间隔应尽量大, 选取的 t_1 尽量接近恒荷载停载后时刻 t_0 。

各分区满载持续时间 94~134 d, 因此建议取时间间隔 Δt 为 47~65 d。 t_1 、 t_2 、 t_3 时刻选取的沉降量为各监测点平均值。基于三点法计算工后沉降及固结度结果见表 3。

计算结果表明, 有 3 个区域固结度为 88.6%、89.3%、89.6%, 与设计要求 90% 的固结度偏差小于 2%, 满足预压地基工程质量标准。综合分析平均固结度满足了设计要求。最大工后沉降 256 mm, 满足工后沉降 500 mm 的设计要求。

表 3 基于三点法计算工后沉降及固结度

分区	满载时间/d	$\Delta t/d$	s_1/mm	s_2/mm	s_3/mm	s_{∞}/mm	工后沉降/mm	$U_t/$ %
B3-1	105	50	1 371	1 736	1 938	2 188	250	88.6
B3-2	105	50	1 824	2 105	2 269	2 499	230	90.8
B3-3	120	60	1 472	1 762	1 924	2 129	205	90.4
B3-4	134	65	1 481	1 884	2 098	2 340	242	89.6
B3-5	114	55	1 557	1 899	2 080	2 283	203	91.1
B3-6	94	47	1 724	1 984	2 144	2 400	256	89.3

3.3 孔隙水压力(孔压)监测分析

每个区域分别设置了1组孔压监测点,4个点埋深情况:B3-1区为2.0、4.0、6.0、7.5 m,B3-2和B3-3区均为2.0、4.0、6.0、8.0 m,B3-4区为2.5、5.0、7.5、10.0 m,B3-5和B3-6区均为2.0、4.0、6.0、8.5 m。以B3-4区为例,绘制孔压与时间关系曲线见图3。

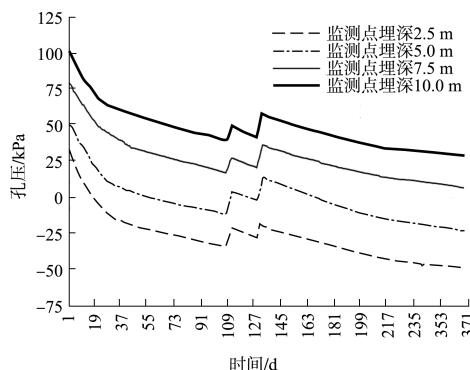


图3 B3-4区孔压与时间关系曲线

由图3可看出,随着抽真空运行,不同深度的孔压值均呈下降趋势。在预压加载期间,荷载的施加引起各监测点的孔压值增高,同时伴随着孔压的消散,负压迅速抵消堆载产生的超孔压,在不同深度的孔压消散规律基本相同。

从各区不同深度孔压监测数据上分析,因荷载的施加引起孔压值增高22.4~31.1 kPa,平均25.8 kPa。预压期间地下水位下降1.92~2.54 m、平均2.29 m,由此引起孔压值消散22.4 kPa。这两项因素引起的孔压变化数值基本相抵,可以认为对推算最终孔压消散值影响较小。各监测点孔压消散值见表4。

表4 各监测点孔压消散值

分区	深度2~10 m各监测点孔压消散值/kPa	孔压平均消散值/kPa	固结度/%
B3-1	80.0、77.8、56.7、65.2	69.9	86
B3-2	73.1、76.5、75.2、79.0	75.9	93
B3-3	78.9、79.1、78.4、77.7	78.5	96
B3-4	80.4、73.6、72.4、72.6	74.8	92
B3-5	78.3、74.9、72.1、68.3	73.4	90
B3-6	79.2、76.1、73.4、70.3	74.7	92

真空堆载联合预压工程中,负压渗流场是引起孔压消散的主要方式。因此,真空度的大小直接影响孔压的最终消散值,而堆载一方面有利于促进孔隙水的渗流,另一方面引起的附加应力能进一步转化为有效应力,达到土体固结目的^[4]。

根据监测数据分析,B3-1~B3-6区真空堆载预压期间膜下平均真空度分别为79.1、79.7、81.8、82.8、83.8、82.0 kPa,平均值达到81.5 kPa。以负压值81.5 kPa作为孔压消散的目标值,推算孔压固结度达到86%~96%,平均91.5%。B3-1区孔压固结度明显低于90%,应与其膜下真空度低于80 kPa有关。从总体上来看,预压处理深度达10 m范围内均达到了预期效果。

孔压消散受到膜下真空度、加固区地下水位、排水板设置深度、堆载时间等多个因素影响,上述方法推算孔压固结度对判定地基固结情况具有一定的参考价值。

4 工后检测及相关问题探讨

4.1 十字板剪切试验及平板荷载试验结果

工后检测采用十字板剪切试验、平板荷载试验,每个区域布置6个十字板剪切试验点、3个平板荷载试验点以及3个钻孔取样室内试验点。十字板剪切试验及平板荷载试验结果见表5。

表5 十字板剪切试验及平板荷载试验结果

分区	不排水剪切强度 C_u /kPa	荷载试验 f_{ak} /kPa	公式计算 f_{ak} /kPa	偏差/%
B3-1	23.0	60	60.6	1.0
B3-2	22.7	60	59.9	-0.2
B3-3	21.5	60	57.2	-4.6
B3-4	22.9	65	60.3	-7.2
B3-5	24.2	60	63.3	5.4
B3-6	22.4	60	59.3	-1.2

可以看出,地基处理后②淤泥的不排水抗剪强度 C_u 在21.5~24.2 kPa,比初始不排水抗剪强度5.3 kPa提高了16.2~18.9 kPa。地基处理后土层灵敏度 S_t 值为2.8~3.6,为中等灵敏度。

平板荷载板试验采用开挖到淤泥层顶进行测试, 地基承载力特征值为 60~65 kPa, 比初始地基承载力特征值提高了 30~35 kPa。

采用原位测试成果确定软土地基承载力特征值时, 《软土地区岩土工程勘察规程》^[5]推荐的公式应符合其表 7.2.3 的规定。对于淤泥质土计算承载力特征值采用如下公式:

$$F_{ak} = 10 + 2.2C_u \quad (3)$$

式中: F_{ak} 为承载力特征值, kPa; C_u 为不排水抗剪强度, kPa。

式(3)计算结果见表 5, 公式计算值与试验结果相比偏差范围在-7.2%~5.4%, 适用性较好。

4.2 地基承载力及加固效果

对重要工程, 应在现场选择试验区进行预压试验。根据试验区获得的数据对原设计进行修正, 指导整个厂区的设计与施工。由于受到工期及试桩场地影响, 本工程真空预压试验区运行 51 d 即卸载, 试验获得的数据不足以作为设计修正依据。为此, 在同一厂址主要建筑区 A1-1 区卸载前组织专家评审, 将其成果作为指导整个厂区设计与施工的依据。经论证确定地基处理后②淤泥的不排水抗剪强度 20 kPa 作为施工验收指标。

大面积应用中, A1-1 区预压荷载 127 kPa、固结时间 110 d, 试验结果显示②淤泥的不排水抗剪强度在 21.5~25.0 kPa、地基承载力特征值 70 kPa, 该火山灰质淤泥的力学指标在固结排水过程中的提高符合预期^[6]。

码头堆场预压荷载 200.6 kPa、固结时间 233~276 d, 试验结果显示②淤泥的十字板剪切强度在 21.5~24.2 kPa, 地基承载力特征值 60~65 kPa。与主要建筑物区对比分析发现, 预压荷载增加了 58%、固结时间延长了 112%~151%, 地基强度没有得到进一步提高。主要原因:

1) 依据《水运工程地基设计规范》^[7]表 4.2.4 淤泥土的分类, 对于含水率大于 85%、孔隙比大于 2.4 的淤泥进一步划分属于流泥。从淤泥

土分类上判断②淤泥属于流泥。②淤泥颗粒筛分试验结果显示, 粒径处于 0.002~0.075 mm 的粉粒占总颗粒数量的 85% 以上, 加固后的含水率仍然高达 95.5%。

黏土矿物的种类与含量是影响淤泥性土强度的主要因素, 对于真空预压加固来说, 软土地基加固强度不高的原因是在加固过程中这种颗粒极细的超软土含水率没有降得更低^[8]。

国内黄骅某电厂地基表层吹填土为颗粒极细的流泥, 厚度为 6~7 m、含水率在 120% 左右、孔隙比在 3.3 左右, 通过 150 d 的真空预压, 含水率由加固前的 110%~130% 降低到加固后的 50% 左右, 达到设计的固结度和沉降要求, 不排水抗剪强度为 9 kPa 左右, 不能满足地基承载力要求。

经对比分析可知, 虽然火山灰沉积软土②淤泥的天然含水率、孔隙比等物理力学指标与吹填流泥相近, 但地基加固效果却有所不同。通过长达 200 d 以上的真空堆载预压, 达到了设计的固结度和沉降要求, 不排水抗剪强度大于 20 kPa, 但地基承载力仍然不高、特征值仅为 60~65 kPa。

2) 涉外工程中遇到工程特性异常突出的同一类黏土, 若按国内相关规范套用, 难以划归某一类一般土或特殊土。该类黏土多分布于第四纪火山活动比较频繁的滨海或浅海地区, 如印度尼西亚的爪哇岛部分沿海等。对应其不同的状态, 却发现有不相适应的物理性质, 有别于一般海相沉积地层^[9]。

火山灰沉积软土主要由火山灰组成, 黏土矿物居多、土颗粒之间结合力较强, 使其具有一定结构强度, 与国内一般沉积软土有一定差别^[10]。火山灰沉积软土中黏土颗粒具有较强的吸水性, 且常温下不易失水, 土的高含水率使得土的孔隙比较大, 进而导致其高压缩性; 土中水分子主要以吸附水、层间水的结构形式存在, 加之火山灰颗粒非常小, 其比表面积较大也容易吸水、不易

失水，造成软土具有高液、塑限和低渗透性的特点。

3) 对于塑性指数大于 25 且含水率大于 85% 的流泥，采用真空预压处理后地基强度有时仍然较低，对具体的场地，需通过现场试验确定真空预压适用性。由于细颗粒土的渗透能力极弱，导致竖向排水通道无法正常发挥作用，使用本法鲜有成功的案例^[11]。本工程通过现场试验及大面积应用，作为一个成功案例，验证了真空堆载联合预压法处理火山灰沉积软土的适用性。

综合分析认为，采用真空堆载联合预压处理火山灰沉积软土地基的难点在于，这种软土淤泥粉粒含量高且持水性能强，延长抽真空时间或者加大预压荷载对提高地基强度收效不大，并且不经济。降低细颗粒土的含水率非常关键。

4.3 火山灰沉积软土地基处理相关问题

1) 如果进一步提高火山灰沉积软土地基强度，必须降低细颗粒土的含水率。目前在吹填流泥处理方面，将真空预压与电渗法联合使用得到了一定应用。对于高塑性、低渗透性的细颗粒土，常规的排水固结法加固效果不佳，电渗法具有工期短、设备安装方便等优点，相关研究逐渐兴起并得到了初步工程推广^[12]。这种真空预压法组合加固技术在处理火山灰沉积软土地基的适用性和经济性方面有待通过试验研究和论证。

2) 由于火山灰沉积软土的特殊性，使用期可能会产生较大的次固结沉降量。地基加固后的排水板作用依然存在，这种情况下考虑塑料排水板存在时，超出设计荷载的部分相当于对地基进行了堆载预压，此时的地基沉降量将大幅增加^[13]。地基主固结结束后，实际沉降将会因次固结沉降的发生而逐渐增加。塑性指数越高、含水率越大，次固结沉降量就会越大。超载预压可减少由于次固结而产生的沉降。

码头堆场原地面平均高程约 1 m，原地表平均沉降 2.3 m 即下降沉至-1.3 m 高程处。设计地坪

高程 1.5 m，包括 0.5 m 厚砂石、1.5 m 厚闭气土。使用阶段地下水位高程约 0.5 m，取砂石密度 2.0 t/m³，填土产生的有效附加荷载为 33.8 kPa。散煤的密度一般为 0.7~0.8 t/m³，设计堆煤高度 16 m，则堆煤均载按 128 kPa 考虑（堆场使用荷载），即得出使用阶段总荷载为 161.8 kPa。

从施工荷载与使用荷载对比分析，码头堆场地基已经属于超载预压，超载比约 1.24。卸载时沉降速率小于 2 mm/d，地基沉降已经趋于稳定，认为不会有较大的次固结沉降。

3) 预压回填过程所含的大量雨水和地下水给平板荷载试验带来及极大难度。实施过程中采用轻型井点降水收效不大，采取了强降水措施。研究表明^[14]，十字板剪切试验确定软土地基承载力时，《软土地区岩土工程勘察规程》推荐公式的适用性最佳。本文采用推荐公式的计算值与试验结果相比偏差在-7.2%~5.4%，所以认为在平板载荷试验受限制的条件下，依据推荐公式计算的地基承载力特征值可供设计参考。

5 结论

1) 对于天然含水率大于 85%、孔隙比大于 2.4 的火山灰沉积软土地基，工程性质特殊。应用真空堆载联合预压技术进行加固处理，固结度达到 90%，十字板剪切强度大于 20 kPa，满足设计要求，为建筑新技术在海外项目中推广应用起到了示范作用。

2) 基于三点法计算固结度时，为了能够准确判断软土地基固结情况，应尽量取大的时间间隔并使总时长接近满载时间。对于塑性指数高、含水率大的沉积软土，为避免地面沉降过大，设计时考虑一定的超载是必要的。

3) 在现场进行平板荷载试验受限制的条件下，可依据《软土地区岩土工程勘察规程》的推荐公式，根据十字板剪切试验计算承载力特征值并且适用性较好，可供设计人员参考。

4) 影响火山灰沉积软土地基强度的主要因素是淤泥粉粒含量高且持水性能强。进一步延长抽真空时间或者加大预压荷载对提高地基承载力是不经济的,建议通过试验研究更为有效的真空堆载预压组合加固技术降低含水率。

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部工程质量监管司. 建筑业 10 项新技术(2010) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] 住房和城乡建设部工程质量监管司. 建筑业 10 项新技术(2017) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [3] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [4] 刘运涛, 张云, 蒲晓芳, 等. 真空堆载联合预压加固软基中孔隙水压力消散规律研究 [J]. 水文地质工程地质, 2008(2): 71-75.
- [5] 中国建筑科学研究院. 软土地区岩土工程勘察规程: JGJ 83—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [6] 顾巨红, 宁峥嵘, 刘瑜. 真空预压法处理火山灰质淤泥试验研究与应用 [J]. 施工技术, 2018, 47(24): 125-129, 144.
- [7] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [8] 梁爱华, 孙万禾, 刘爱民, 等. 流泥的工程特性分析研究 [J]. 中国港湾建设, 2011(3): 1-4.
- [9] 陈志杰, 余铁稳. 具火山灰沉积背景的滨海及海相沉积黏土的工程特性研究 [J]. 城市地理, 2016(4): 54-55.
- [10] 王军桥. 印度尼西亚万隆地区火山灰沉积软土工程地质特征研究 [J]. 铁道勘察, 2017, 43(6): 50-52.
- [11] 中国化学工程第一岩土工程有限公司. 真空预压法加固软土地基施工技术规程: HG/T 20578—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [12] 郑凌透, 谢新宇, 谢康和, 等. 电渗法加固地基试验及应用研究进展 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(6): 1064-1073.
- [13] 刘润, 闫澍旺, 武玉斐, 等. 真空预压后塑料排水板对地基承载力及沉降的影响 [J]. 水利学报, 2009, 40(7): 885-891.
- [14] 韩鹏. 十字板剪切试验确定软土地基承载力的研究 [J]. 山西建筑, 2016, 42(11): 92-93.

(本文编辑 王璁)

(上接第 60 页)

参考文献:

- [1] 任效忠. 准椭圆沉箱波浪力的试验与数值研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [2] 任效忠, 于博, 马玉祥, 等. 规则波作用下准椭圆沉箱群墩波浪力试验分析 [J]. 船海工程, 2015, 44(2): 125-129, 135.

(上接第 120 页)

- [14] LIU H, ZHOU J G. Lattice Boltzmann approach to simulating a wetting-drying front in shallow flows [J]. Journal of fluid mechanics, 2014, 743: 32-59.
- [15] QING Y, MA Q, LI R, et al. Influence of channel regulating structures on the transportation and dissipation

- [3] 白景涛, 胡家顺. 椭圆沉箱墩式码头新结构的研究与设计 [J]. 水运工程, 2009(1): 149-154.
- [4] 董中亚. 椭圆沉箱浮游稳定的计算法 [J]. 水运工程, 2011(1): 87-93.

(本文编辑 武亚庆)

of supersaturated total dissolved gas [J]. Advances in civil engineering, 2021(1): 1-8.

- [16] 王琳, 冯镜洁, 李然. 鱼道内过饱和总溶解气体释放规律的试验研究 [J]. 工程科学与技术, 2017, 49(6): 30-37.

(本文编辑 王传瑜)