



大荷载矿石堆场中深厚吹填软土的地基处理及后评价

刘晓鹏，孙新鹏，任增金，李业伟
(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：吹填淤泥形成陆域是资源利用和环境保护方面的优质解决方案，但当前吹填软土形成陆域的工程中，多数为荷载较小的堆场、工业园区道路、绿化区等。以青岛港董家口港区矿石码头工程 20 万吨级散货泊位后方预留堆场区的地基处理工程为例，对该工程的设计、施工及使用后 6 年的情况进行详细阐述，从多个角度展示深厚吹填软土的演变情况，详细介绍土体含水量、孔隙比、抗剪强度等指标在不同时期的变化，对比施工期沉降计算和监测数据，分析不同时期抗剪强度指标下矿石堆存的高度。结果表明，在大荷载矿石堆场中采用吹填软土形成陆域是可行的，通过合理的地基处理方式和有序增加堆存荷载，最终可使矿石堆场达到满载堆存。

关键词：深厚吹填软土；土体含水量；孔隙比；抗剪强度；沉降计算；矿石堆场高度

中图分类号：U652.7

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)03-0178-06

Foundation treatment and post evaluation of deep hydraulic fill soft soil in heavy load ore storage yards

LIU Xiaopeng, SUN Xinpeng, REN Zengjin, LI Yewei

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The reclamation of dredging silt to form land areas is a high-quality solution for resource utilization and environmental protection. However, in the construction of land areas formed by reclamation of soft soil, most of the projects are small load storage yards, industrial park roads, and green areas, etc. Taking the foundation treatment project of the reserved storage area behind the 200 000-ton bulk cargo berth of the Qingdao Port Dongjiakou Port area ore terminal project as an example, we expound the design, construction and 6 years after use of the project in detail, and show the evolution of deep hydraulic fill soft soil during the construction and 6 years after use from multiple aspects. We carry out a detailed introduction to the changes in soil moisture content, pore ratio, shear strength and other indicators during different periods, compare settlement calculation and monitoring data during construction, and analyze the height of ore storage under different shear strength indicators during different periods. The results show that it is feasible to use hydraulic fill soft soil to form land areas in high load ore storage yards. Through reasonable foundation treatment methods and orderly increase of storage loads, the ore storage yard can ultimately achieve full load storage.

Keywords: deep hydraulic fill soft soil; soil moisture content; pore ratio; shear strength; settlement calculation; height of ore storage

随着我国砂石资源供给日益紧缺，吹砂填石形成陆域的方案不再是最优的选择，同时海洋环

境监管也越来越严格，海洋抛泥允许的年倾倒量越来越少。

收稿日期：2023-06-29

作者简介：刘晓鹏（1982—），男，硕士，高级工程师，从事港口工程工程地质、地基处理设计。

为响应《国家创新驱动发展战略纲要》^[1]中“发展资源高效利用和生态环保技术, 建设资源节约型和环境友好型社会”, 吹填淤泥形成陆域是资源利用和环境保护方面的优质解决方案。

随着吹填淤泥形成陆域方法的广泛使用, 有关工程的吹填软土厚度超过 10 m, 深厚吹填软土的处理成为工程中的重点与难点。何洪涛等^[2]通过现场试验, 发现真空预压新技术对沿海吹填土有良好的加固效果; 王鹏等^[3]通过现场试验发现无砂垫层真空预压加固效果接近有砂垫层真空预压, 相较于有砂垫层真空预压, 无砂垫层真空预压更加环保、经济; 李开正^[4]、王荣芳^[5]运用真空联合堆载预压工艺处理道路地基, 发现处理后的软土地基各项指标均有较好改观。除预压工艺外, 董必昌等^[6]运用数值模拟方法对长板-短桩联合工艺进行研究。

然而当前在吹填软土形成陆域的工程中, 多数为荷载较小的堆场、工业园区道路、绿化区等。大面积、大荷载的深厚吹填软土加固处理案例较少。

本文以青岛港董家口港区矿石码头工程 20 万吨级散货泊位后方预留堆场区的地基处理工程为例, 展示大荷载矿石堆场中深厚吹填软土的地基处理方式及加固效果, 详细介绍土体含水量、孔隙比、抗剪强度等指标在吹填初期、浅层加固、深层加固、使用期的变化, 对比施工期沉降计算和监测数据, 同时分析不同时期抗剪强度指标对矿石堆存高度的影响, 为后续类似工程提供宝贵的经验。

1 工程概况

工程吹填区为青岛港董家口港区矿石码头工程 20 万吨级散货泊位后方预留堆场区, 矿石码头工程自 2010 年初开工建设至 2011 年 12 月底基本完工。由于矿石码头工程施工期间, 航道、30 万及 20 万吨级矿石码头港池等同步施工, 上部淤泥性土均吹填至该区域, 使得该区域内吹填土质基本为淤泥和淤泥质粉质黏土。吹填工作至 2011 年

11 月完成, 2#堆场吹填区软泥区位置见图 1。该工程地基处理面积为 27.5 万 m², 该区域为矿石堆场。工程区在 2014 年 6 月开始进行浅层真空预压, 2016 年 9 月竣工。

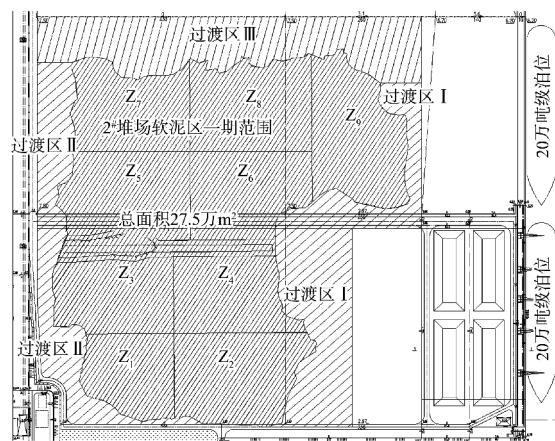


图 1 吹填区软泥区位置

根据地勘资料, 工程区内吹填土厚度约为 16 m, 其中吹填后表层主要为流泥, 流泥以下至 16 m 范围内主要为淤泥。吹填土以下原状土层为淤泥质粉质黏土、粉土及粉质黏土。其中, 吹填初期表层吹填土的物理性质指标见表 1, 吹填土十字板试验结果见表 2。可以看出, 表层土吹填初期含水量多大于 100%, 孔隙比大于 3.0, 8 m 范围内十字板剪切强度很低。

表 1 表层吹填土的物理性质指标

取样点号	含水量 w/%	密度 ρ /(kg·m ⁻³)	孔隙比 e	液限 w_L /%	塑限 w_p /%
Q ₁	123.8	1 450	3.30	48.43	22.98
Q ₂	155.5	1 370	4.07	51.97	24.98

表 2 表层吹填土的物理性质指标

试验深度/m	十字板剪切强度/kPa				
	SZB1 孔	SZB2 孔	SZB3 孔	SZB4 孔	SZB5 孔
1	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00
2	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.22	0.44	0.00	0.22	0.22
4	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
5	43.16	0.65	0.22	0.22	0.44
6	-	0.87	0.22	0.44	0.22
7	-	0.87	0.00	0.22	0.00
8	-	1.09	0.22	0.22	0.22

2 设计原则及标准

2.1 设计原则

1) 遵循整体设计、分期实施的设计思路。综合考虑矿石堆场的整体布置、现状条件、建设周期等因素，按分区实施布置地基处理区块。

2) 技术方案成熟、可靠和便于质量控制。地基处理的技术应成熟可靠，便于监控和质检，并有利于后续工程的建设。

3) 使用荷载分级加载。使用期应控制使用荷载，地基土强度增长经检测能满足加载条件后方可进一步增加使用荷载。

4) 注重过程监控。采取有效的手段监控各区域施工期和施工结束后运营期的后期沉降，必要时采取应对措施。

2.2 荷载条件

本工程区为矿石堆场的一部分，最终使用均载为 270 kPa，最大荷载为 512 kPa。

2.3 设计标准

根据本工程特点、矿石堆场使用要求，本方案地基处理设计确定为：使用期地基整体稳定抗力分项系数不小于 1.2。

3 地基处理设计方案

3.1 浅层地基处理步骤

本方案考虑 2 次插板。先浅层处理，再深层处理，最后表层处理。其中浅层地基处理步骤如下。

- 1) 铺设 1 层 200 g/m² 编织布。
- 2) 视现场超软土分布及晾晒情况，承载能力差的段落加铺 1 层荆笆及 1 层土工格栅。
- 3) 铺设 1 层 400 g/m² 无纺土工布。
- 4) 人工插设塑料排水短板，入土深度为 5 m，预留板头 0.8 m，排水板底弯折 0.1 m 进行封堵并绑扎固定(采用 B 型排水板，间距 0.8 m，正方形布置)。
- 5) 连接 φ43 mm 滤管(2 排排水板连接 1 根滤管)。

6) 铺设 1 层 200 g/m² 无纺土工布。

7) 埋设检测仪器，安装出膜装置及真空设备。

8) 铺设 2 层密封膜，试抽真空约 15 d，真空度达到 80 kPa，开始恒载计时。

9) 恒载时间达到 60 d 后停泵卸载。

10) 卸载后应进行地基处理效果检测，选取代表性场区进行十字板及钻孔取土试验。

3.2 深层地基处理步骤

1) 铺设 1.0 m 厚排水砂垫层，要求含泥量不大于 5%。

2) 打设塑料排水板：打设深度 22 m，采用 B 型排水板，间距 0.9 m，正方形布置。

3) 铺设 1 层 200 g/m² 无纺土工布。

4) 埋设检测仪器，安装出膜装置及真空设备。

5) 铺设 2 层密封膜，试抽真空约 15 d，真空度达到 80 kPa 开始恒载计时。

6) 铺设 1 层防刺土工布，之后铺设 0.8 m 风化砂，恒载计时 30 d 后，最后分级加载 4.2 m 厚开山石堆载料。

7) 根据监测数据，加固深度范围内地基平均总固结度达到 80% 后方可停泵卸载。

8) 卸载后应进行地基处理效果检测，选取得代表性场区进行十字板及钻孔取土试验。

3.3 表层处理步骤

回填开山石至地基处理交地高程 8.35 m，并采用强夯法进行地基处理。强夯夯击能 2 500 kJ，点夯 2 遍，正方形布置，夯点间距 3 m，要求夯击数不小于 8 击且最后 2 击夯沉量不大于 5 cm；最后满夯 1 遍，夯击能 1 000 kJ，夯印搭接 1/3。

4 计算分析

4.1 沉降

1) 晾晒期沉降。吹填平均高程约 8.25 m，晾晒后平均高程约 7.50 m。

2) 浅层处理施工期沉降。通过相似工程进行类比，预估浅表层处理沉降量约 1.5 m，推测浅层

地基处理后泥面高程为 6.00 m。

3) 深层处理施工期沉降。按施工期真空荷载 80 kPa, 堆载料高度按 5.0 m 考虑, 沉降经验系数 m_s 取 1.4。经计算, 深层插板施工期总沉降约为 3.30 m, 即深层地基处理完成后吹填土高程为 2.70 m。地基处理最终交地高程为 8.35 m。计算分析地基处理不同阶段陆域高程, 如图 2 所示。

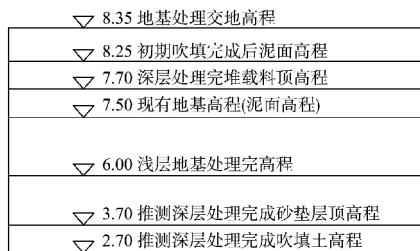


图 2 计算分析地基处理不同阶段陆域高程

表 3 不同堆载高度下地基整体稳定抗力分项系数

堆料高度/m	4	6	8	10	12	14	16
地基整体稳定抗力分项系数	1.556	1.253	1.159	1.149	1.177	1.141	1.1061

4.3 实测沉降与计算值对比分析

经统计, 地基处理自浅层处理开始、包含深层处理插板期间及深层处理预压期间的平均沉降量见表 4。

表 4 施工期间 $Z_1 \sim Z_5$ 区监测沉降量

区号	浅层处理阶段平均沉降量/m	深层处理插板期间平均沉降量/m	深层处理预压期间平均沉降量/m	总沉降量/m
Z_1	0.488	0.910	1.349	2.747
Z_2	0.260	0.860	1.126	2.246
Z_3	0.361	0.830	1.188	2.379
Z_4	0.294	0.860	1.193	2.347
Z_5	0.359	0.810	1.316	2.485

由表 4 可看出, 施工期监测获取的总沉降量数值为 2.246~2.747 m, 与沉降计算值的 4.8 m 差异较大。分析原因为: 1) 浅层处理插板期间沉降量未进行监测; 2) 本工程晾晒时间较长, 预估的表层沉降量 1.5 m 时应包含晾晒期间沉降量 0.75 m; 3) 沉降经验系数 m_s 取 1.4 偏大。

针对总沉降量中缺少部分时间段监测数据,

4) 工后沉降。按 30 年使用期考虑工后沉降量, 其计算结果为: 最大沉降量为 1.67 m, 平均沉降量为 1.15 m。

4.2 堆载稳定性

矿石堆场远期最大荷载达 512 kPa, 可将矿石堆场加载到远期 512 kPa 的最大荷载为一个漫长的施工过程, 在满足场地整体稳定安全分项系数不小于 1.2 的条件下, 依此计算逐级加载至 512 kPa 的合适时间。

地基处理完成后, 硬壳层总厚度为 5.65 m, 硬壳层厚度有效提高了地基稳定抗力分项系数。

按地勘资料中土体的固结快剪指标进行推算, 在不同堆载高度下地基整体稳定抗力分项系数见表 3。

通过对加固后钻孔数据进行梳理, 该部分钻孔原吹填土顶面平均高程约为 4.0 m, 与施工前原吹填土顶面高程 7.5 m 相减, 推测施工期总沉降量约为 3.5 m。

沉降计算值扣除 0.75 m 晾晒期沉降后, 总沉降量约为 4.15 m, 剩余的 0.65 m 差值则主要体现在沉降经验系数 m_s 选取上。现行 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》^[7]采用 $e-p$ (孔隙比-应力)曲线进行沉降计算, 土体沉降量体现为孔隙与颗粒体积总和的差值, 从理论上看, 若室内试验土体具备足够的代表性, 大面积堆载中土体也不会有过大的侧向挤压变形, 排除细颗粒沿排水板流失情况后, m_s 取值略大于 1 即可。

5 地基处理加固效果检测及堆场使用后评价

5.1 地基处理加固效果检测

经检测^[8], 地基处理前吹填土层主要为流泥和淤泥; 浅层处理后, 吹填土层范围内主要为淤泥、淤泥质黏土及淤泥质粉质黏土; 深层处理后,

吹填土层范围内主要为黏土和粉质黏土。地基处理后,物理力学性质提高明显。0~16 m 范围内土质及其物理力学性质变化情况见表 5。

深层处理后十字板剪切试验、标准贯入试验及

原状孔取土室内试验结果表明:地基处理深度范围内土体的含水量、孔隙比、液性指数、压缩系数指标均变小;密度(湿)、剪切强度指标均增长明显,压缩性降低、强度增加,土质改善较为明显。

表 5 吹填层范围内土体加固前后物理力学性质指标变化

阶段	土层名称	天然含水率 w/%	天然密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	孔隙比 e	直剪试验		十字板剪切强度		压缩模量 $E_{s0.1-0.2}/MPa$
					固快黏聚力 c_{eq}/kPa	固快内摩擦角 $\varphi_{eq}/(^{\circ})$	原状土 c_u/kPa	扰动土 c'_u/kPa	
地基处理前	① ₁ 流泥	106.4	1 450	3.300	-	-	0.2	-	-
	① ₂ 淤泥	77.6	1 530	2.000	10.7	11.0	13.0	4	1.95
浅层处理后	① ₁ 淤泥	62.4	1 585	1.754	-	-	-	-	1.42
	① ₂ 淤泥质黏土	44.1	1 730	1.234	6.3	14.9	-	-	2.13
真空联合堆载预压后	① ₁ 黏土	38.6	1 789	1.079	-	-	22.4	-	2.82
	① ₂ 粉质黏土	26.4	1 929	0.765	19.4	22.3	25.6	-	4.89

5.2 堆场使用后评价

该堆场自 2016 年 9 月投入使用,主要堆存铝矾土,2017 年开始堆存煤炭和焦炭,堆高一般为 12 m,堆场均载为 120 kPa,迄今为止使用状态良好。

2023 年 4 月,青岛港董家口港区港投万邦矿石码头工程拟启用该部分堆场,由于需要新建流程化作业系统,对该堆场进行了再次勘察测量工作。

通过对《青岛港董家口港区港投万邦矿石码头

工程岩土工程勘察报告(前方堆场与皮带机廊道)》^[9]进行分析,从位于原软泥区范围内布置的 75 个钻孔来看,场地内未发现淤泥及淤泥质土等软土,原吹填土层范围内绝大部分土体为粉质黏土,物理力学性质与表 5 中①₂ 粉质黏土性质较为接近,物理力学参数对比见表 6。

堆场使用 6 年后,原吹填土层顶高程平均值约为 3.6 m,即场地平均沉降量约 0.4 m。该数值与表 6 中两层土体采用孔隙比变化计算出的沉降量 0.42 m 基本一致。

表 6 吹填层范围内土体使用 6 年后物理力学性质指标变化

试验时间	土层名称	天然含水率 w/%	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	孔隙比 e	直剪试验			
					固快黏聚力 c_{eq}/kPa	固快内摩擦角 $\varphi_{eq}/(^{\circ})$	直剪快剪黏聚力 c'_{eq}/kPa	直剪快内摩擦角 $\varphi'_{eq}/(^{\circ})$
2016 年	① ₂ 粉质黏土	26.4	1 929	0.765	19.40	22.3	15.80	9.3
2023 年	① ₂ 粉质黏土	25.4	1 945	0.718	19.50	21.8	21.77	11.0

由表 6 可以看出,吹填土(粉质黏土),固结快剪指标基本未发生变化,直剪快剪指标则有较大提高。抗剪强度的提高表示目前堆场可进一步增加堆载强度,由竣工时测算的堆载 6 m 提高为 2023 年时可堆载 10 m。同时,随着堆载荷载的提高,抗剪强度将进一步提高,最终可以实现堆场满载运行。

6 结语

1) 大荷载矿石堆场中采用吹填软土形成陆域是可行的。本工程吹填完成后,地基土基本上为零强度的流泥,经地基处理,土质完成流泥→淤泥→黏土/粉质黏土的转变。

2) 新近吹填土的沉降较难计算准确,计算时应重点关注吹填晾晒时间,同时须根据土体压缩

过程中的状态和计算方法的具体情况选取沉降经验系数 m_s , 不宜盲目取大值。

3) 深层处理后十字板剪切试验、标准贯入试验及原状孔取土室内试验结果表明: 地基处理深度范围内土体的含水量、孔隙比、液性指数、压缩系数指标均变小; 密度(湿)、剪切强度指标均增长明显, 压缩性降低、强度增加, 土质改善较为明显。

4) 矿石堆场初期运行, 应考虑限制堆载高度或堆存其他荷载较小的散货, 在地基土强度增长至堆存能力相适应后, 可进一步加载。有序增加堆存荷载, 可以促进土体固结, 提高土体抗剪强度, 最终使矿石堆场达到满载堆存。

5) 大荷载矿石堆场中采用深厚吹填软土地基, 应充分考虑其工后沉降量, 建议适当提高交地高程作为预留沉降量。

参考文献:

- [1] 中国政府网. 国家创新驱动发展战略纲要 [EB/OL]. (2016-05-19) [2023-07-15]. https://www.gov.cn/zhengce/2016-05/19/content_5074812.htm.
- [2] 何洪涛, 焦淑贤, 何汉艺, 等. 真空预压新技术加固吹填超软土的现场试验研究[J]. 水运工程, 2019(9): 265-272.
- [3] 王鹏, 梁爱华, 刘爱民, 等. 吹填深厚超软土地基加固现场试验研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(7): 57-61, 84.
- [4] 李开正. 真空联合堆载预压处理深厚软土效果分析[J]. 北方交通, 2016(4): 88-91.
- [5] 王荣芳. 真空堆载联合预压在温州围垦区市政道路中的应用[J]. 北方交通, 2023(1): 45-48.
- [6] 董必昌, 张明轩, 张鹏飞, 等. 长板-短桩工法处理吹填土地基承载性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2021, 45(2): 303-307.
- [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] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 青岛港董家口港区 2#回填区临时堆场一期软基处理检测报告[R]. 天津: 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 2016.
- [9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 青岛港董家口港区港投万邦矿石码头工程岩土工程勘察报告(前方堆场与皮带机廊道)[R]. 天津: 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 2023.

(本文编辑 王璁)

(上接第 170 页)

3) 该场地中等以上液化的面积占比约 35%, 而轻微以上占比达 75%。对于液化处理无特殊要求的无建筑物区, 加固前后 SPT 的测试结果表明, 虽然插板预压联合降水强夯无法从根本上消除砂土液化, 但是在预压荷载和动力固结作用下, 土体的物理力学指标有显著提升, 其液化指数明显下降, 对于改善场地抗液化性能有一定的作用。

参考文献:

- [1] 孙长帅, 杜姜开林. 无填料振冲法在孟加拉国吹填粉细砂场地地基处理中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(4): 240-241.
- [2] 孙长帅, 秦秀娟, 黄香林. 孟加拉国 Patuakhali 地区基本地质条件及岩土工程问题初探[J]. 山西建筑, 2019, 45(4): 64-66.
- [3] 王宗文, 尤苏南, 刘晓岗. 降水联合强夯法在吹填土地

基中的应用[J]. 建筑技术, 2014, 45(7): 634-637.

- [4] 王磊, 杨昌斌, 李亚阁. 南亚强震区液化吹填砂土强夯法地基处理试验研究[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(7): 373-374.
- [5] SEED H B, LEE K L. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading [J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1966, 92(6): 105-134.
- [6] KUERBIS R, VAID Y P. Sand sample preparation: the slurry depositon method[J]. Soils and foundations, 1988, 28(4): 107-118.
- [7] KOHJI T, SEED H B. Simplified procedures for the evaluation of settlements in clean sand. National technical information service[R]. California: UCB/EERC-84/16, 1984.
- [8] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程抗震设计规范: JTS 146—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [9] 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.

(本文编辑 王传瑜)