



砂桩结合塑料排水板 在散货堆场地基处理中的应用

张歆瑜

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 通过砂桩结合塑料排水板在港口工程散货堆场地基处理的选择应用, 分析了该新型地基处理方法的适用条件和优点, 结合工程实例介绍总结了该地基处理方法的设计、计算、施工要点, 对于今后在深厚软土地基上建设重载散货堆场的地基处理的设计研究, 具有一定的借鉴作用和参考价值。

关键词: 砂桩; 深层稳定; 塑料排水板预压; 分级堆载; 砂桩最大打设深度

中图分类号: TU 472

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)04-0188-06

Sand pile combined with plastic drainage plate in ground treatment of bulk cargo yard

ZHANG Xin-yu

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Based on the application of the sand pile combined with plastic drainage plate in foundation treatment of bulk cargo yard, this paper analyzes the applicable conditions and advantages of the new foundation treatment method. Combining with engineering examples, this paper summarizes the design and calculation of the ground treatment method and construction key points, which may serve as reference for the design and research of ground treatment of deep soft soil foundation for the bulk cargo yard.

Keywords: sand pile; deep-layer stability; preloading by plastic drainage plate; classified stacking; biggest sand pile setting depth

目前许多散货码头港口工程后方陆域堆场位于超厚的软土地基上, 而散货堆场荷载具有集度大、面积广的特点, 荷载引起的附加应力沿深度收敛较慢或基本不收敛, 因此堆场常常会发生深层整体失稳的情况, 对软土地基处理不仅需要一定的力度, 也需要达到较深的范围。

对该类堆场地基处理需要一定的力度指的是由于荷载较大并且地基土较差, 需要采用砂桩、碎石桩等复合地基处理方法, 然而陆上进行复合地基桩基的施工, 以现有的施工条件, 能达到效果的处理深度有限, 在大集度重载散货堆场荷载的作用下, 往往无法满足地基加固深度要求, 造成地基深层稳定安全系数不满足

要求。砂桩结合深层塑料排水板的地基处理方法, 将砂桩复合地基处理和塑料排水板预压处理结合起来, 利用砂桩复合地基较大地提高中浅层的软土地基强度, 塑料排水板则利用多级堆料的散货荷载的预压作用提高深层土体的强度, 并且穿过砂桩加固区的塑料排水板能够进一步加强砂桩区的排水作用, 提升砂桩的加固效果。通过该种深浅组合的立体地基处理方法, 充分发挥了两种地基处理方法的优点, 避免使用单一加固方法在深厚软土地基处理安全性不足的缺点, 技术经济性也较好, 成功解决了重载散货堆场深层稳定安全的问题, 并在一些工程应用中取得良好的效果。

收稿日期: 2014-07-17

作者简介: 张歆瑜(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口道路堆场、地基处理、道路桥梁等设计工作。

1 典型工程应用

1.1 工程概况

宁波-舟山港穿山港区中宅散货码头工程位于宁波北仑区郭巨镇贺家一中宅村，该工程建设 1 个 15 万吨级散货接卸泊位^[1]，后方陆域总占地面积 123.06 万 m²，其中包括预留煤炭等散货堆场面积约 91 万 m²。堆场中布置有单条长约 747 m 的斗轮堆取料机 3 条，由西南向东北方向延伸布置，堆场周边布置道路等附属构筑物。拟建堆场区大部分区域为滨海沉积平原，地势较低且地形较平坦，自然泥面高程约 2.7~4.0 m，堆场区西、南面为山地，地形起伏变化大。陆域形成采用吹填砂垫层上覆盖开山土石方，本工程拟建场地拟堆存煤炭，兼顾矿石，场地浅层分布高压缩性淤泥质软黏性土层最大厚度约为 30 m，天然地基承载力特征值仅为 55~65 kPa，而上部回填层和设计堆载最大将达到 260 kPa，并且为大面积堆存荷载，地基需要进行处理以满足设计堆载正常使用要求。工程平面布置如图 1。

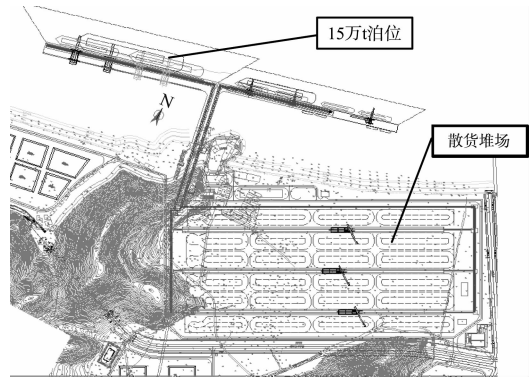


图 1 工程总体平面布置

1.2 主要地质条件

根据勘察报告，拟建场地软弱岩土第②层、④层为淤泥质土，为全新世中期滨海或浅海相沉积软土，沿堆场东向西和南向北沿山脚向海侧逐步增厚，最大迭加厚度约 30 m。该软土层具有含水量高、压缩性高、灵敏度高、易触变等工程特性，其厚度及底板高程变化较大，整个拟建场区软硬不均，场地地基整体均匀性差。典型地质断面见图 2。主要土层物理性质指标见表 1。

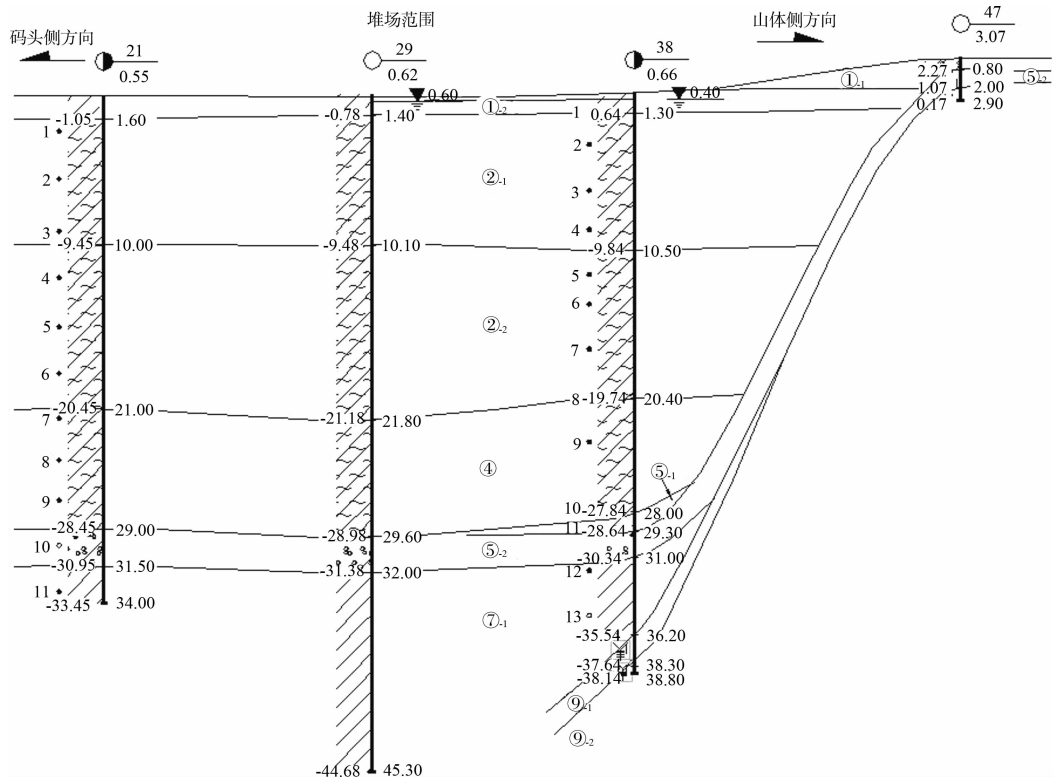


图 2 典型地质断面 (单位: m)

表 1 主要土层物理性质指标

层号	岩土名称	天然密度/ (t·m ⁻³)	含水量/ %	压缩模量 E _{s0.1-0.2}	抗剪强度				十字板抗剪 强度指标/kPa	地基承载力 特征值/kPa
					固结快剪		三轴不排水剪			
					φ/(°)	C/kPa	φ/(°)	C/kPa		
① ₋₂	粉质黏土	1.951	28.3	5.32	14.3	22.4	4.8	34.0	47.7	75
② ₋₁	淤泥质黏土	1.732	49.2	2.28	10.6	9.8	0.1	10.0	23.8	55
② ₋₂	淤泥质黏土	1.734	48.2	2.30	11.1	10.4	0.3	9.7	31.7	60
④	淤泥质黏土	1.747	45.9	2.85	11.9	13.0	0.3	13.0	35.7	65
⑤ ₋₁	粉质黏土	1.997	24.5	7.39	15.2	30.0				200
⑤ ₋₃	粉质黏土	1.977	25.7	7.25	15.2	36.8				200
⑥	黏土	1.850	36.7	3.64	13.4	19.4				150
⑦ ₋₁	黏土	1.952	29.3	6.70	13.6	31.5				210

1.3 堆场地基处理方案

软土地基上的散货堆场的地基处理主要以控制整体稳定为目标，增强地基土的强度，根据本工程实际条件（现场有大量的超吹填砂料），在充分比选其他地基处理方案后，初步提出了砂桩复合地基 + 塑料排水板 + 使用期利用矿料分级堆荷的地基处理方案，根据砂桩复合地基及塑料排水板堆载预压的经典计算公式，采用代表性钻孔地质断面和原位软土十字板指标，分析了在设计最大堆料荷载 200 kPa（堆矿高度 8 m）情况下的稳定安全系数（根据散货堆场使用实践经验，一般要求以瑞典圆弧法计算的稳定安全系数大于 1.1）。

根据分析，采用砂石桩复合地基 + 使用期利用矿堆分级堆载预压方案能够满足设计堆矿使用要求。根据不同的地质断面，砂石桩设计桩径 0.6 m，桩体置换率 15% ~ 22%，砂桩基本打穿软土层，长度考虑最长为 28 m，使用期煤炭可一次性达到最终堆高 14 m。堆存矿石时需限级限时堆载，利用矿堆自重，使地基土固结，以矿堆作为

免费的堆载材料在使用期边生产、边提高地基土强度和承载力，最终满足使用要求。矿石首级堆载可达 6 m，待地基稳定后第 2 级堆矿至 7 m，最终堆矿至 8 m。计算分析结果见表 2。

表 2 砂桩复合地基堆场稳定安全系数

钻孔	淤泥质软土层底高程/m	砂桩打设长度/m	置换率/%	堆高 8 m 稳定安全系数
Z3	-10.48	14		1.150
26	-15.46	19	砂桩 15	1.162
35	-21.49	25		1.159
21	-28.45	28	砂桩 22	1.165

注：堆高 8 m 是考虑 7 m 堆矿后强度增长。

而仅采用深层塑料排水板方案，如按设计堆矿荷载（8 m，200kPa）时地基稳定安全系数不能满足要求。采用塑料排水板 + 使用期利用矿堆分级堆载预压方案需要通过使用期严格的加载管理，逐步提高堆场地基强度，最终堆矿高度可达到 6 m。矿石首级堆载 4 m，待地基稳定后第 2 级堆矿至 5 m，最终堆矿至 6 m。计算分析结果见表 3。

表 3 排水板地基处理堆场稳定安全系数

钻孔	淤泥质软土层底高程/m	塑料排水板打设长度/m	稳定安全系数		
			首级堆高 4 m (考虑回填层作用后强度增长)	堆高 6 m (考虑 5 m 堆矿后强度增长)	堆高 8 m (考虑 7 m 堆矿后强度增长)
Z3	-10.48	14	1.280	1.150	0.905
26	-15.46	19	1.260	1.140	0.873
35	-21.49	25	1.200	1.120	0.881
21	-28.15	31	1.190	1.094	0.895

通过以上计算分析, 单纯采用塑料排水板加固本工程软土地基, 由于软土原始强度较低, 一些区域厚度较大, 土体达到一定的固结度后, 土体强度的增长是有限的, 使用期堆载超过土体的极限堆载能力后地基仍然会失稳破坏, 实际并不能达到设计使用堆荷的要求, 堆场只能限载使用。而对于砂桩复合地基, 主要是砂桩在陆上打设, 依据国内现有的技术力量, 能保证质量的有效长度基本在 20 m 左右, 本工程现场常规沉管砂桩试打试验也验证了砂桩的实际有效长度大概在 20~22 m^[2] (图 3), 因此在堆场东北侧深厚软土区域会由于砂桩有效长度不足, 在大集度矿料设计荷载作用下危险滑弧从砂桩下部未加固的软土层穿过 (图 4) 而达不到满足要求的稳定安全系数。

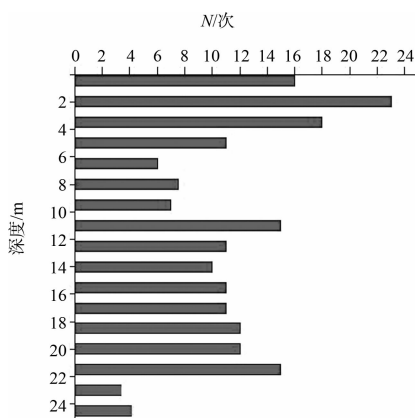


图 3 砂桩成桩后标贯检测值

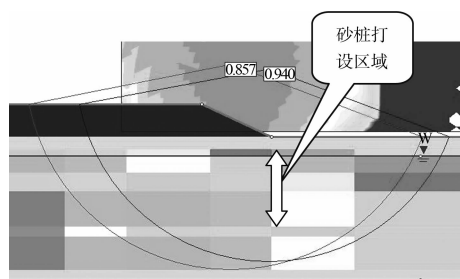


图 4 危险滑弧穿过砂桩底部

针对以上情况, 结合理论计算和现场的试验结果, 设计提出了一种将沉管砂桩和塑料排水板组合起来加固深厚软土地基的地基处理方法, 具体为: 在淤泥质黏土综合厚度大于 20 m 以上的区域, 砂桩最深打设 15~20 m, 砂桩直径 0.6 m,

砂桩材料就地取材采用现场吹填砂层, 在砂桩间隙打设塑料排水板, 排水板基本打穿软土层, 最长打设长度为 33 m, 这样就使得利用砂桩加固中浅层地基、排水板加固深层, 组成立体的加固系统。

1.4 组合地基处理方案计算原理和计算结果

该组合加固方案理论计算, 仍以砂桩复合地基和排水板预压地基经典公式为基础, 但考虑综合作用的影响, 具体沿地基深度方向分为砂桩排水板综合作用区和排水板作用区两个部分, 地基强度的增长主要是抗剪强度的增长^[3-4]。

1) 砂桩排水板综合作用区强度指标。

$$C_1 = C_s + C_p \quad (1)$$

式中: C_1 为砂桩排水板综合作用区抗剪粘聚力; C_s 为砂桩提供的加固后抗剪粘聚力; C_p 为排水板提供的加固后抗剪粘聚力。

$$C_s = \eta(1 - \omega)(C + U_s \sigma \tan \phi_{cq}) \quad (2)$$

$$C_p = \eta(1 - \omega)(C + U_p \sigma \tan \phi_{cq}) \quad (3)$$

该区域另一个抗剪强度指标内摩擦角主要由砂桩复合地基提供:

$$\tan \phi = \eta[\omega \tan \phi_p + (1 - \omega) \tan \phi_{cq}] \quad (4)$$

式中: $\omega = m\mu_p$; ω 与桩土应力比 n 、砂桩面积置换率 m 有关; μ_p 为应力集中系数; ϕ_p 为砂桩内摩擦角; η 为考虑剪切蠕动及其他因素对强度影响的折减系数, 取 0.75~0.90; σ 为分级加载附加应力; C 为原土层粘聚力, 这里采用天然十字板指标; ϕ_{cq} 为加固土体固结快剪内摩擦角; U_s 、 U_p 为地基中某点的砂桩地基固结度、排水板地基固结度。

2) 排水板作用区强度指标。

$$C_2 = \eta(C_s + U_p \sigma \tan \phi_{cq}) \quad (5)$$

式中: U_p 为深层塑料排水板打设区某点的地基固结度。

利用以上的地基强度增长公式抗剪强度指标 C_1 、 C_2 、 ϕ , 分别代入整体稳定圆弧滑动的计算公式, 可得到经加固的深厚软土区的主要稳定安全系数 (图 5)。

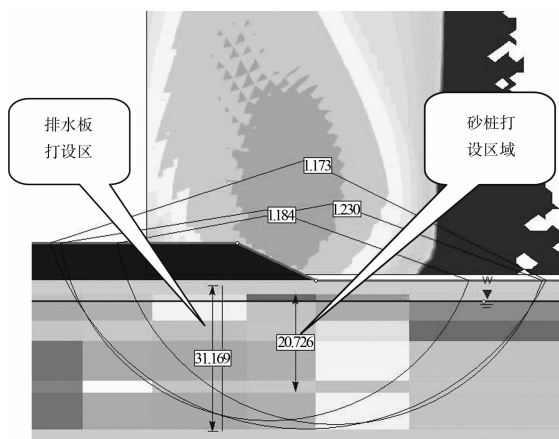


图5 组合地基代表断面稳定安全系数

通过以上的计算表明,采用砂桩+塑料排水板+使用期矿料荷载的分级预压地基处理方法,可很好地解决原采用单一处理方法无法解决的较深厚软土区域的地基稳定问题。使得地基稳定安全系数满足最终设计堆荷要求。

1.5 地基处理方案的确定和实施

根据对整个堆场使用条件和地质的分析,最终采用了以下的地基处理方案:在淤泥质土层底高程 $> -4.0\text{ m}$ 区域,由于西侧、南侧部分堆场临近山体,软土层较薄或缺失,该部分堆场考虑采用 $4\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 能量的强夯置换加固密实回填层。淤泥质土层底高程 $-4.0\sim -11.0\text{ m}$ 区域,软弱土层厚度约 $7\sim 15\text{ m}$,采用沉管砂桩方案。淤泥质土层底高程 $< -11.0\text{ m}$ 区域,软弱土层厚度逐渐增厚,约 $13\sim 31\text{ m}$,采用砂石桩+塑料排水板方案。

具体实施前进行的工艺性施工试验,总结出先跳打打设沉管砂桩,及时定位并紧跟在砂桩间插打塑料排水板的工序措施,并分组流水施工。该工艺措施使排水板在砂桩间土扰动软化恢复加强前顺利插设,防止了砂桩和排水板打设的互相干扰,确保了施工质量和进度。整个地基处理施工从2010年5月开始,于2011年4月结束,共计用砂总量约为 65 万 m^3 ,并通过了质量验收。

2 监检测及建成使用效果

2.1 监检测情况

在堆场地基加固过程中和建成分级堆载期间

及正常使用期间均进行了相应的监检测,砂桩检测方法采用静力触探试验、动力触探试验、标贯试验、钻芯取样,塑料排水板检测方法采用低压脉冲反射法测深技术。施工期监测主要是了解掌握监视地基加固过程中软基变化规律和发展趋势,确定加固效果、控制堆卸载力度和时机,指导安全施工。主要布置面层沉降观测、分层沉降观测、孔隙水压力观测、边桩位移观测、水位观测等。对于地基处理效果的分析,采用了钻孔取样、十字板剪切试验、浅层平板载荷试验,通过监测数据表明设计分层堆载能确保软基的稳定。在堆场使用过程中,监测点孔隙水压力值均未发现突然减小现象,软基未发生剪切破坏,水平位移也基本正常。

2.2 建成使用效果

中宅散货堆场于2012年6月18日投入试运行,截止2014年5月,已进行了23个月的安全、可靠运行。其中,2012年6月18日至2012年12月31日共靠泊接卸外轮48艘次,接卸量475万t,吞吐量954万t;2013年1月1日至2013年12月31日共靠泊接卸外轮122艘次,接卸量1278万t,吞吐量2416万t。堆场经过分级堆载已完全达到了设计堆荷标准,进入正常使用期,从堆场、斗轮机基础使用情况看,堆场及斗轮机整体沉降较均匀,堆场承载力满足了工程设计要求,砂桩结合排水板的综合地基处理方法取得了较好的效果。

3 结语

1) 在深厚软土地基上建设重载散货堆场,由于高集度、大面积的荷载需要地基软土强度有较大的提高,并且引起的控制危险滑弧作用较深,因此单纯采用一定深度的砂桩复合地基或塑料排水板往往难以满足堆场的稳定安全系数的要求。

2) 采用砂桩结合塑料排水板综合处理方法,利用砂桩复合地基加固中浅层地基,塑料排水板结合预压处理砂桩无法有效打穿区域的软土地基,采用该立体的地基处理方法加固了整个软弱地基

层，确保了高集度设计荷载下的地基稳定安全系数满足正常使用要求。

3) 采用该地基加固方法，计算中可分别按砂桩排水板综合作用区和排水板作用区分别考虑地基的加固作用，并且在排水板和砂桩竖向重叠的区域计及共同作用，主要是地基固结部分的影响。

4) 砂桩结合排水板综合处理方法，具体实施时必须按先打设沉管砂桩、定位后马上跟进深层排水板施工的工艺工序，以免砂桩打设时间过久后桩间土固结及定位困难，造成排水板施打失败。

5) 砂桩结合塑料排水板作为一种较新的地基加固方法在舟山港中宅散货堆场得到了成功的应用，初步总结了该设计方法的理论计算方法、施工工艺和工序，在地质条件相近的鼠狼湖矿石码

头堆场工程中也正在实施，证明了该法具有广泛的推广应用价值。

参考文献：

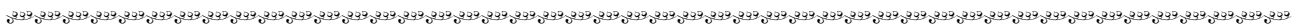
[1] 中交第三航务工程勘察设计院. 宁波-舟山港穿山港区中宅煤炭码头工程施工图设计(相关设计部分)[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2010.

[2] 上海港湾工程质量检测有限公司. 宁波-舟山港穿山港区中宅煤炭码头工程砂桩、塑料排水板工艺性试验标贯检测阶段报告[R]. 上海: 上海港湾工程质量检测有限公司, 2010.

[3] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[4] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 179 页)

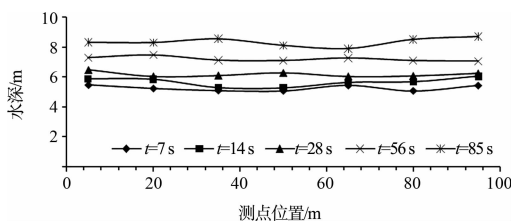


图 6 闸室水面

4 结论

1) 闸墙长廊道侧支孔充水初始期间自上游至下游支孔流量逐渐减小，旋即演化为逐渐增大，且随着输水时间的延续，上、下游支孔流量的相对差异趋向逐渐扩大。

2) 闸墙长廊道侧支孔输水不均匀性对闸室自由表面的主要影响表现为长波波动，优化闸墙长廊道侧支孔输水形式应以降低闸室长波波幅为要点。

参考文献：

[1] 张瑞凯, 须清华. 船闸廊道复合管不稳定流数学模型和试验验证[J]. 水利水运科学研究, 1987(3): 1-11.

[2] 杨朝东, 宣国祥, 张瑞凯. 船闸复杂分散输水系统输水数学模型研究[J]. 水利水运科学研究, 1997(3): 189-199.

[3] Stockstill R L, Neilson F M, Zitta V L. Hydraulic calculations for flow In lock manifolds[J]. J Hydr Div: ASCE, 1991, 117(8): 1 026-1 041.

(本文编辑 郭雪珍)