

高压旋喷桩施工过程中桩身开裂原因

祁卫军¹,朱家胜²,崔阳¹,孙骏¹,刘菲菲¹

(1. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001; 2. 浦口区水务局, 江苏 南京 210000)

摘要:为研究堤防防渗墙施工过程中高压旋喷桩桩身开裂问题,以堤身迎水坡潜在滑体为研究对象,借助 AutoBank 有限元模拟高压旋喷桩施工过程中浆液凝固前的静止浆压力对堤身稳定性的影响。通过计算对比施工前和施工过程中的边坡抗滑稳定系数的不同,发现由于堤身土质,灌浆压力、桩身位置等因素影响,险工段堤身出现抬起效应和劈裂效应,此时未凝固的水泥浆液大幅削弱堤身稳定性,堤身边坡的微弱滑移导致桩身在凝固成型前发生开裂。施工过程中应控制合适的浆压力,尽量避免产生抬起效应和劈裂效应,确保高压旋喷桩的桩身完整性。本文研究成果可为堤防防渗工程中高压旋喷桩的设计及施工提供相关借鉴。

关键词:堤防; 防渗工程; 高压旋喷桩; 开裂; 浆压力

中图分类号:TV553 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2022)05-0032-0005

Analysis of crack of high-pressure rotating jet grouting pile in levee anti-seepage engineering

QI Weijun¹, ZHU Jiashen², CUI Yang¹, SUN Jun¹, LIU Feifei¹

(1. Huai'an Water Conservancy Survey Design and Research Institute Co., Ltd., Huai'an 223001, China;
2. Pukou District Water Affairs Bureau, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to find the reason of the crack of high-pressure rotating jet grouting pile in levee reinforcing project, the potential sliding body on the upstream slope of the levee is analyzed. AutoBank FEA is used to simulate the influence of static slurry pressure before slurry solidification on the stability of embankment during the construction of high-pressure rotating jet grouting pile. Differences of anti-sliding stability coefficient of slope between the different working conditions indicates that lifting effect and splitting effect appear in dangerous section due to the influence of soil quality, grouting pressure, pile position and other factors. The unsolidified cement slurry greatly weakens the stability of the embankment body, and the weak slippage of the side slope of the embankment causes the pile body to crack before it is solidified and formed. Appropriate slurry pressure should be controlled during construction to avoid lifting effect and splitting effect as much as possible to ensure the integrity of the high-pressure rotating jet grouting pile. The research results of this paper can provide relevant reference for the design and construction of high-pressure rotating jet grouting piles in embankment anti-seepage engineering.

Key words: levee; anti-seepage engineering; high-pressure rotating jet grouting pile; crack; grouting pressure

由于渗流作用而出现的变形或破坏称为渗透变形或渗透破坏,如土层剥落、地面隆起、在向水流作用下土颗粒悬浮、细颗粒被水带出以及出现集

中渗流通道等^[1]。堤防险情中出现的渗漏或渗透破坏可通过“上堵下排”来改善,众多垂直防渗型式中高压喷浆成墙法具有适用地层范围广,施工机具轻

收稿日期: 2021-10-15

作者简介: 祁卫军(1990—),男,工程师,硕士,主要从事水利工程的设计研究工作。E-mail:543582815@qq.com

便,有利于避免施工干扰的优点^[2]。高压喷射灌浆技术是一种采用高压水或高压浆液形成高速喷射流束,冲击、切割、破坏地层土体,并以水泥基质浆液充填、掺混其中,形成桩柱或幕墙状凝结体,用以提高地基防渗或承载力的施工技术,简称高喷灌浆或高喷。使喷射管做旋转、提升运动,在地层中形成圆柱形桩体的高喷灌浆施工方法叫旋喷^[3]。

近些年,高压旋喷灌浆技术已被广泛用于各类防渗处理和地基处理。国内学者对高压旋喷桩的应用做了大量研究,贾敬立^[4]提出复杂地质条件下水泥土搅拌桩存在缺陷时,通过原位增设高压旋喷桩保证防渗墙连续性,达到堤防防渗效果;戎雷^[5]通过研究不同地质条件下采用不同组合形式的高压喷射灌浆技术,即双管高压旋喷法、双管高压摆喷直线搭接法、双管高压摆喷折线搭接法等,指出在防渗抢险工程中高压喷射灌浆技术具有很大的适用性优势;汤林伟^[6]从高压旋喷灌浆原理、主要施工工艺及技术措施,施工质量等角度介绍高压旋喷灌浆技术在砂卵石覆盖层中的应用;戚玉亮^[7]通过提出高压旋喷微型钢管素混凝土桩基础加固方法,解决了深度较大的软土地基承载力不足问题。目前对于高压旋喷桩的原理和应用的相关研究较多,但是对于实际施工中出现桩身开裂问题研究较少,本文基于具体工程实例,分析高压旋喷桩施工过程中桩身开裂原因和对堤身稳定性影响,并提出高压旋喷桩设计和施工的改良措施。

1 工程概况

1.1 堤防现状及险情介绍

陈桥河为滁河一级支流,位于浦口区汤泉街道,堤防等级4级。陈桥河现状堤顶高程为13.21~14.75 m(吴淞高程,下同),宽为6.5 m,迎水坡现状坡比为1:2.0~1:2.5,背水坡坡比为1:2.0~1:3.0。堤防背水坡高程10.95 m处建有宽8 m平台。根据该堤防管理单位反映,附近白蚁虽经灭杀,但堤身底

部范围仍存在白蚁穴。

2020年7月陈桥河最高水位达13.00 m,受迎水坡高水位影响,陈桥河右岸堤防背水坡坡脚出现1处渗漏点,渗漏点高程约为7.95 m,且不断有水从坡脚渗出,渗漏情况较为严重。

1.2 工程地质

根据地勘成果,险工段下主要土层分布分别为:①素填土,主要成份为粉土夹粉质黏土组成,局部混少量碎石、植物根系等,填龄大于5年,不均质,分布范围为14.60~7.50 m;②-A粉质黏土,含少量腐殖质,切面稍光滑,无摇晃反应,韧性中等,高压缩性,中等强度,分布范围为7.50~-4.58 m;②粉质黏土,黄褐色~灰色,可塑,局部硬塑,含少量Fe、Mn质氧化物,局部夹少量粉土,干强度中等,韧性中等,中等压缩性,中等强度,分布范围为-4.58 m以下。根据物理试验,②-A粉质黏土含水量 w 为32.9%,液限 w_L 为33.2%,塑性指数 I_p 为15.3,孔隙比 e 为0.981,按规范虽划分为粉质黏土,但其性质已与淤泥质粉质黏土接近。土层主要物理性质指标见表1。

1.3 设计方案

根据②-A土层特点,以渗漏点为中心点,防渗范围向两侧各延伸50 m,即桩号CS3+840~CS3+940段堤防采用高压旋喷灌浆处理,共计100 m。设计采用两管高压旋喷灌浆,单排布置旋喷桩,孔距为0.5 m,设计高压旋喷桩直径为0.6 m,成墙厚度为0.3 m,桩顶高程为13.70 m^[3],桩底高程为5.0 m。设计浆压力为25~40 MPa,进浆量为70~150 L/min,浆液密度为1.35~1.7 g/cm³,回浆密度大于1.25 g/cm³,其余参数均符合设计规范值^[3],堤防防渗兼顾断面见图1。

2 施工中出现的問題及原因分析

经过试桩,确认当浆压力为30 MPa时,满足设计桩径和防渗墙有效厚度要求。险工段进行喷浆

表1 土层主要物理性质指标

土层	含水量 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
①	26.3	19.3	0.796	31.6	18.4	13.2	0.59	(16)	(12)
②-A	32.9	18.4	0.981	33.2	17.9	15.3	0.98	10	8.5
②	24.7	20.4	0.687	35.1	19.2	15.9	0.35	14	8.9

注:表中 c 、 φ 值均为直剪指标。

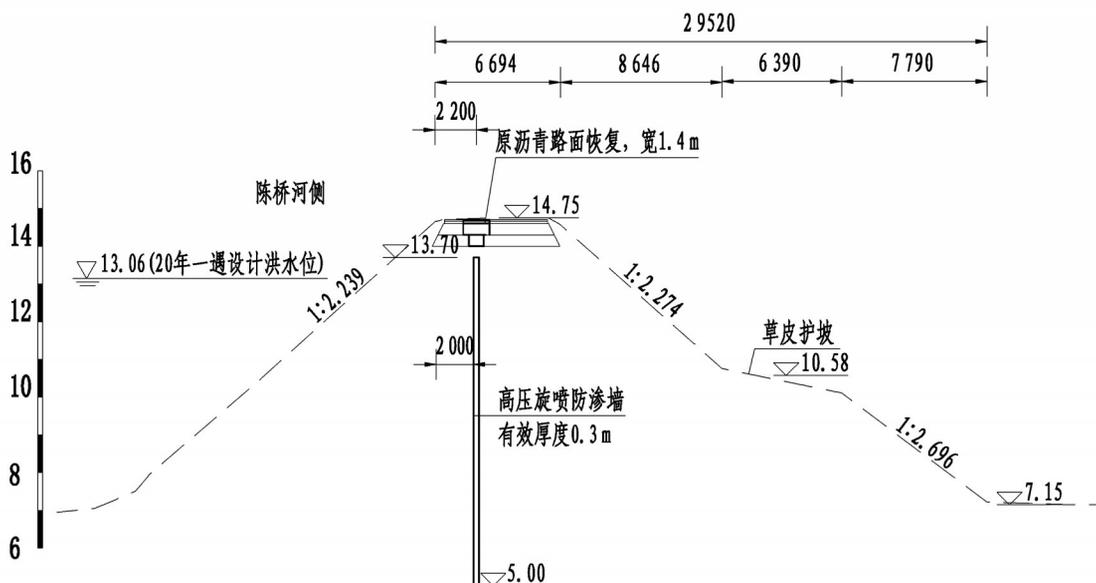


图1 堤防加固断面(高程单位为m,其余为mm)

施工时,具体问题表现为:(1)迎水坡堤肩侧道路出现隆起抬动,与原堤肩相接处出现明显裂缝;(2)灌浆过程中,迎水坡高程10.86 m附近持续出现水泥浆冒出地面情况,此时回浆量减少,低于设计求值;(3)当一序孔完成高压旋喷灌浆后,准备进行二序孔施工时,发现桩中心附近出现开裂,纵缝宽度约有2 cm,布满已施工的险工段,经开挖发现,裂缝沿深度方向开展至少2 m。

注浆能使浆液与地层产生置换、挤密、填充等物理化学变化。旋喷压力、钻机提升速度、旋喷桩施工顺序、被加固土体的渗透系数及模量等都与地表隆起有关^[8-9]。当土体内存在裂隙及其他软弱结构面时,高压注浆会在软弱结构中脉状扩散,注浆浆液更容易对被注岩土体的原有结构进行一定的破坏,形成劈裂效应,浆压力增大到一定程度后,便会出现上抬^[10-11]。高压旋喷灌浆时串浆一般伴随堤身内部劈裂面的形成而产生^[12]。由于高压旋喷浆压力较大,本次施工中出现的均为高压旋喷浆产生的抬起效应和劈裂效应表现。

3 堤身稳定分析

3.1 计算模型

为进一步研究劈裂效应发生时,静止浆液对堤身稳定影响,通过查阅规范^[13]发现,土石坝在劈裂灌浆工程中,由于劈裂灌浆坝体沿轴线劈裂很长,所以浆液未固结时为最不利情况,需要对此工况进行坝体稳定性验算。由于高压旋喷桩施工时较大

的浆压力,堤身内部局部劈裂状态下的静止浆液分布与劈裂灌浆类似,这里借助软件 AutoBank7.7 建立浆液凝固前的堤身内部潜在滑体受力模型,进行有限元分析,对此状态下的堤身进行稳定复核。

施工时高压旋喷桩位于堤顶偏迎水坡侧,以高压旋喷桩为分界线,取发生位移的迎水坡侧堤身为研究对象进行计算,利用 Autobank7.7 的坝面水压力荷载选项,将凝固前的浆压力按三角形分布加载到劈裂缝侧面,并设置荷载的“液体容重”为灌浆容重,此处取设计浆液容重平均值 15 kN/m^3 ,计算断面模型见图2。

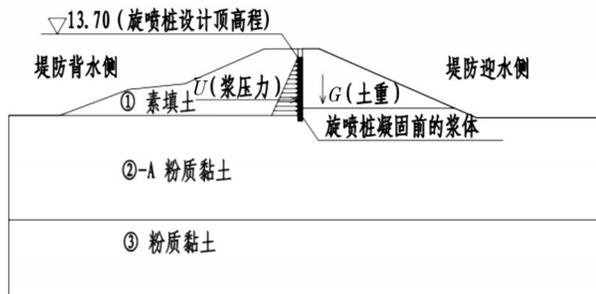


图2 计算断面模型(单位:m)

3.2 计算结果

为更直观对比分析高压旋喷灌浆前后堤身迎水坡稳定,选取灌浆前(工况1)与灌浆后浆液凝固前(工况2)进行计算,由于施工期水位较低,两种工况计算均不考虑渗透压力。

堤防等级为4级,采用瑞典圆弧法计算抗滑稳

定计算时,施工期安全稳定系数不小于1.05。经计算,工况1边坡稳定系数 $F_s=1.056$,满足规范要求,见图3;工况2边坡稳定系数 $F_s=0.956$,小于规范要求值,根据计算结果,堤身将发生滑动,见图4。

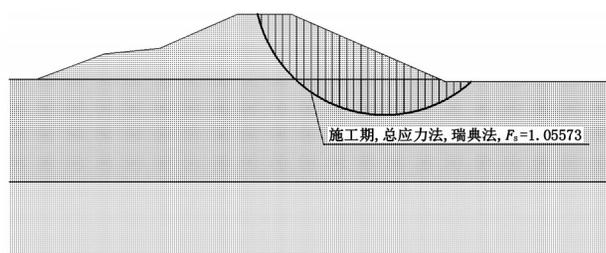


图3 灌浆前迎水坡施工期稳定计算结果(工况1)

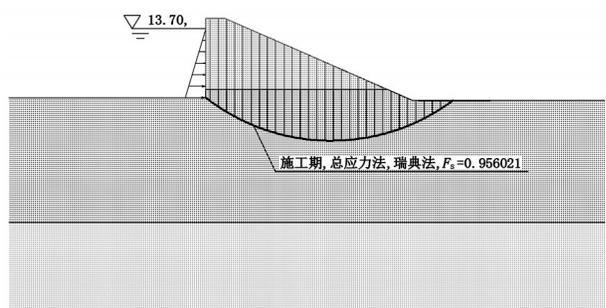


图4 浆液凝固前迎水坡稳定计算结果(工况2)(单位:m)

3.3 相关分析

(1)之前白蚁穴的存在等因素,②-A土层孔隙比较大,堤身内部土质疏松;同时加上高压旋喷桩施工时浆压为30 MPa,高压浆液形成高速喷射流束,冲击、切割、破坏地层土体,迎水坡与堤肩裂缝均有返浆,此时堤身出现劈裂效应,路面出现抬起效应。

(2)局部堤身出现劈裂情况后,浆液在凝固前,由于自重影响,对迎水坡堤身产生水平推力,同时浆液由于浆压力的影响也会从其他地方孔洞流出,堤身内部部分土体同时受到渗透压力和浮托力的影响,土体实际抗剪指标下降,堤身的稳定性降低,迎水坡局部堤身发生微弱位移,桩身在凝固成型前发生开裂。

(3)高压旋喷灌浆不同于大坝的劈裂灌浆,由于桩体是按序间隔施工,劈裂的纵缝不能在同一时刻完全贯通堤防,实际施工当浆液凝固时,对抗滑不利的侧向浆压力消失,取而代之的是对堤身抗滑有利的黏聚力,此时高压旋喷桩可增加堤身稳定性,这点也可从工况2抗滑稳定系数小于1.0,堤防却没有大面积滑动看出。

4 处理方案

本次工程中发生上述情况后,施工单位重新试桩,在保证成墙厚度的前提下降浆压力,同时将桩中心线由原先偏迎水坡侧移动至堤防中心线位置,增大潜在滑体质量与整体性。在此基础上,也可适当增大相邻钻孔施工间隔时间^[9],增加速凝剂管路^[14],通过深层搅松处理^[15]的方式,使回浆通道保持畅通,避免出现劈裂效应,确保成桩质量和防渗效果。

施工完成后采取开挖方式检查成墙效果,开挖后发现重新施工的防渗墙桩身完成没有裂缝,搭接厚度满足设计要求,防渗墙具有较高的一致性和连续性,后续检测结果也同样表明最终成桩满足设计要求。

5 结语

高压旋喷桩施工过程中受堤身土质、灌浆压力、桩身位置等各方面因素影响,堤身出现局部劈裂效应和路面抬起效应;在浆液凝固前,受静止浆压力影响,堤身稳定性降低,迎水坡发生局部微弱滑动,导致桩身在凝固成型前发生开裂。施工过程中应控制浆压力,尽量避免产生劈裂效应,确保高压旋喷桩完整性。

参考文献:

- [1] 李广信,张丙印,于玉贞. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [2] 张家发,李思慎,王文新. 长江重要堤防垂直防渗工程[J]. 人民长江,2002,33(8):37-39.
- [3] DL/T 5200—2019. 水电水利工程高压喷射灌浆技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2020.
- [4] 贾敬立. 黄河下游堤防截渗墙施工缺陷桩处理方案分析[J]. 人民黄河,2020,42(10):51-53.
- [5] 戎雷,唐经华. 高压喷射灌浆技术在堤防渗漏抢险中的应用[J]. 水利水电技术,2015,46(5):18-20.
- [6] 汤林伟. 关门岩水库围堰三管法高压旋喷灌浆施工质量控制[J]. 技术与市场,2018,25(9):53-54.
- [7] 戚玉亮,王洪兵,骆干. 高压旋喷微型钢管素桩在深厚软土填石地基加固中的应用研究[J]. 广州建筑,2018,46(2):28-31.
- [8] 臧延伟,张栋樑,罗喆. 盾构下穿铁路地基加固施工参数优化[J]. 铁道建筑,2006(5):70-73.
- [9] 唐智伟,赵成刚. 注浆抬升地层的机制、解析解及数值模拟分析[J]. 岩土力学,2008,29(6):1512-1516.
- [10] 候艳娟,张顶立,陈峰宾. 隧道施工下穿建筑物注浆抬

- 升机制及预测研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2011, 30(12): 2407-2415.
- [11] 朱晓刚. 含水层水平帷幕注浆段地表隆起及房屋开裂变形的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [12] 游红江. 帷幕灌浆施工中串浆处理措施分析[J]. 现代矿业, 2017(10): 229-230.
- [13] SL564—2014. 土坝灌浆技术规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [14] 皇新波. 深水土石围堰高压旋喷防渗墙施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2018(5): 123-126.
- [15] 文海家, 姜命强. 防渗墙建造的高压旋喷工法及质量控制[J]. 水力发电学报, 2008, 27(2): 89-92.

(上接第19页)

3.3 工程措施与生物措施相结合

在遵循自然发展规律的前提下, 采用部分工程和生物手段, 恢复生态系统的结构和功能, 将因人为干扰而退化的河流恢复到原始未受干扰的状态或适宜的状态, 重现一个自然、可自我调节的生态系统, 与所在的生态景观形成一个完好的连续体, 以促进河流生态系统的稳定和良性循环。

针对江苏平原沙土区丰、沛2县, 以投入成本最小化、生态效益最大化以及适宜度最大化为目标, 结合不同河段不同区位的不同治理任务, 形成生物措施与工程防护措施相结合, 乔、灌、草相嵌套的多目标、多层次、多用途的水土保持措施体系。

3.4 建立多部门联防联控机制

在未来的平原沙土区生态河道水土保持建设中, 区域尺度与流域尺度的山水林田湖草沙系统治理是水土保持的重要任务和新发展方向, 需要打破传统的部门、资金、政策分隔等各自为政的弊端, 多部门联防联控, 共同努力促进山水林田湖草沙的系统保护和恢复; 注重法律法规在系统治理中

的重要地位, 建立健全相关法律法规, 强化大众法律意识; 力争在山水林田湖草沙综合治理体制机制上取得新突破, 并积极争取国家、地方等重大项目和政策支持。

参考文献:

- [1] 张少波. 浅谈丰县城护城河的治理[J]. 江苏水利, 2019(3): 44-46, 51.
- [2] 张洋, 彭瑶, 刘竞妍, 等. 江苏省水土流失重点防治区划分[J]. 水土保持通报, 2014(2): 300-306.
- [3] 高晓琴, 姜姜, 张金池. 生态河道研究进展及发展趋势[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008(1): 103-106.
- [4] 赵晨程, 高玉琴, 刘钺, 等. 基于云模型的生态河道建设评价[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 183-189.
- [5] 高士佩. 淮河入江水道生态综合评价与治理对策研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [6] 王玲玲, 姜兆宇, 韩建军, 等. 长江浦口段江滩复绿对河道行洪能力的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 316-321.