

复杂地层高压旋喷桩施工质量的控制

张雨游, 秦浩瑞, 李海军

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

摘要: 高压旋喷桩是一种高效地基处理方法, 其利用高压喷射流将水泥浆液注入地下与土体混合固化形成坚固的桩体, 该技术广泛应用于基坑支护、地基加固和防渗工程等领域。实施高压旋喷桩施工时, 必须根据不同的地质条件调整技术参数和施工措施以保障桩体的质量。阐述了针对复杂地质条件下的高压旋喷桩采用的施工技术及其施工质量控制要点。

关键词: 止水帷幕; 质量控制; 高压旋喷桩; 防渗; 复杂地层

中图分类号: TV223.2+1; TV7; TV52; TV523

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2024)05-0113-05

Control of Construction Quality of High-pressure Jet Grouting Pile in Complex Strata

ZHANG Yuyou, QIN Haorui, LI Haijun

(Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610213)

Abstract: High-pressure rotary jet grouting technology is an efficient method for foundation treatment. It utilizes high-pressure jet streams to inject cement slurry into the ground, where it mixes and solidifies with the soil to form solid pile bodies. This technology is widely used in various fields such as foundation pit support, foundation reinforcement, and anti-seepage projects. During the implementation of high-pressure rotary jet grouting construction, it is essential to adjust technical parameters and construction measures according to different geological conditions to ensure the quality of the pile bodies. This article mainly discusses the construction technology and key points of quality control for high-pressure rotary jet grouting in complex geological conditions.

Key words: Water-stop curtain; Quality control; High-pressure jet grouting pile; Anti-seepage; Complex strata

1 概述

高压旋喷桩技术因具有显著的地基加固和止水效果, 在地基处理领域的应用日益广泛。在复杂地质条件地基的施工过程中, 必须严格控制施工质量, 以确保高压旋喷桩的可靠性。

某引水工程起点位于凉山州大桥水库电站尾水池右岸挡墙, 通过 91.2 km 长的输水管道引水至西昌市第三水厂。其接水点由引渠段、调整段和连接段组成, 总长度为 23.0 m; 厂区埋管段全长 149.2 m。接水点及厂区内的管线为 3 级建筑物, 均采用垂直开挖, 其围护桩采用直径 1.5 m、间距 2.0 m 的灌注桩, 防渗帷幕采用直径 1.0 m、间距 0.75 m、深度为 14~16 m 的高压旋喷桩。

接水点及厂区内管线段的地层主要呈二元结构分布, 其上部为杂填土, 主要由粉质黏土、卵石、块石组成, 局部含有大孤石, 土质不均匀。该层揭露的厚度为 5.5 m, 其下部为安宁河冲洪积 I 级

阶地卵砾石夹砂, 卵砾石的含量大约占 80%, 其粒径主要为 3~8 cm, 少量大于 10 cm, 最大粒径可达 22 cm。卵砾石主要由花岗岩和辉绿岩构成, 卵石的磨圆度较好, 以次圆状为主, 土体以中密状-密实状为主, 局部稍密, 该层揭露的厚度为 23.5 m。地下水类型主要为松散岩类孔隙水, 由河流向阶地补给, 地下水位的埋深为 6~7 m, 该段建基面位于地面线以下 8.3~12.1 m。

针对这种复杂的地质条件, 防渗措施的制定就显得尤为重要。

2 防渗措施的制定

鉴于该施工段地下水位埋深浅、穿越地层的水以强透水为主, 常用的防渗方案包括固结灌浆和高压喷射灌浆。

在复杂地质条件(如岩石、硬土层或含有大量砾石)地层中, 固结灌浆的施工难度较大, 需要采用较大的灌浆压力, 极有可能会引起地面振动, 进而影响到周边建筑物的稳定性; 高压喷射灌浆可

以更快速地穿透这些坚硬或复杂的地质结构,且能够尽量不扰动附近的土体、影响已有建筑物地基加固^[1]。

考虑到该施工段邻近电厂的办公楼、变电站,需要避免地基扰动影响其周围的构筑物,因此,项目部最终决定接水点及厂区内管线段周围的防渗措施采用高压旋喷桩单排咬合形成封闭的止水帷幕。

3 施工技术

3.1 高压旋喷桩的施工工艺

高压旋喷桩注浆技术包括单管法、二重管法和三重管法。在选择高压旋喷桩注浆技术时,需要综合考虑地基的水文地质条件、设计桩径等关键因素。高压旋喷桩注浆技术的适用条件见表1。

表1 高压旋喷桩注浆技术适用条件表

序号	注浆方法	适用的水文地质条件	适用桩径 /m
1	单管法	地下水位低,土质均匀地层	≤0.6
2	二重管法	地下水位较高,土质较复杂地层	0.6~1.0
3	三重管法	地下水位高,土质复杂地层	1.0~1.5

由于接水点的水位埋深浅,地质条件复杂,且设计要求的桩径为1.0 m,故最终确定高压旋喷桩施工采用三重管法。

3.2 施工工艺及要求

高压旋喷桩的施工工艺流程主要为:施工准备→桩位测设→试桩→钻机就位→钻孔→下设PVC管→旋喷桩机就位→喷射注浆作业→冲洗机具→桩机移位。

(1)施工准备。查明地下管线或障碍物的位置及埋深,并在相应位置挖探坑并进行标记;清理、平整施工现场,设置排浆沟、泥浆池等临时设施;对设备的性能和状况进行检查,对水泥、外加剂等材料按相关要求进行检查试验。

(2)桩位的测设。首先对控制点进行复核并加密,然后对施工区域内的桩位进行精确的测量定位,设置易于识别且稳固的桩位标志,详细记录测量数据以便于后续核查和验证。

(3)试桩。在实施大规模桩基施工前必须进行桩基试验,依据试验结果对施工技术参数进行优化与调整。

(4)钻机就位。鉴于该工程地质条件的复杂性,最终决定采用履带液压潜孔钻机潜孔锤偏心跟管钻进成孔。将钻机移至测设的桩位,安装平稳后进行水平校正,使机架垂直。为避免钻机在钻进过程中振动发生移位,使用锚固钢筋将钻机固定。

(5)钻孔。钻进过程中,全程跟进Φ150护壁套管。使用偏心钻头在下设护壁套管前钻出比套管外径大的钻孔,潜孔锤同时锤击套管靴,使套管能够与钻孔同步跟进^[2]。使用一台空压机配合吹孔排渣,全程记录孔位、孔深及地层变化情况。

(6)下设PVC管。钻至设计孔深、逐根拆卸钻杆后进行成孔检测。桩位的偏差采用全站仪检测,孔深、孔斜率使用超声波成孔检测仪检测。高压旋喷桩成孔检测情况见表2。

表2 高压旋喷桩成孔检测表

序号	检验项目	质量要求	检验方法
1	桩位偏差	≤50 mm	全站仪量测
2	孔深	设计孔深+150 mm	超声波成孔检测仪检测
3	孔斜率	≤0.5%	

成孔检测合格后,在护壁套管内下设PVC管后将护壁套管拔出。PVC管的作用是防止喷射注浆过程中发生塌孔。成孔后,将钻机移至下一孔位进行钻孔作业。

(7)旋喷桩机就位。将旋喷桩机移至孔位,喷管对准桩位中心后进行水平校正以确保喷管轴线与孔中心线垂直、满足设计要求的垂直度。

(8)喷射注浆作业。按照试桩结果配置水泥浆,将配置好的水泥浆通过筛网过滤后倒入储料罐中,采用压浆泵送浆。

注浆前,检查注浆管系统接头的密封性,确保设备性能稳定。喷管从设计旋喷深度自下而上进行喷射作业。喷射过程中,根据成孔阶段记录的各地层硬度调整喷射压力,确保水泥浆能够有效地与地层土体混合。现场管理人员应时刻监控流量、压力、风量、冒浆量、喷管旋转提升速度等参数,做好实时记录。

(9)冲洗机具。喷射作业结束后,在水泥浆储料罐中注入适量的清水、启动高压泵清洗管路以清除残留的水泥浆,避免管路因水泥浆凝固堵塞。

(10)旋喷桩机移位。注浆管完全拔出地面且清洗后,停止电机运行,然后将旋喷桩机移至下一

个桩位,重复上述施工工艺流程。

高压旋喷桩的施工流程见图 1。

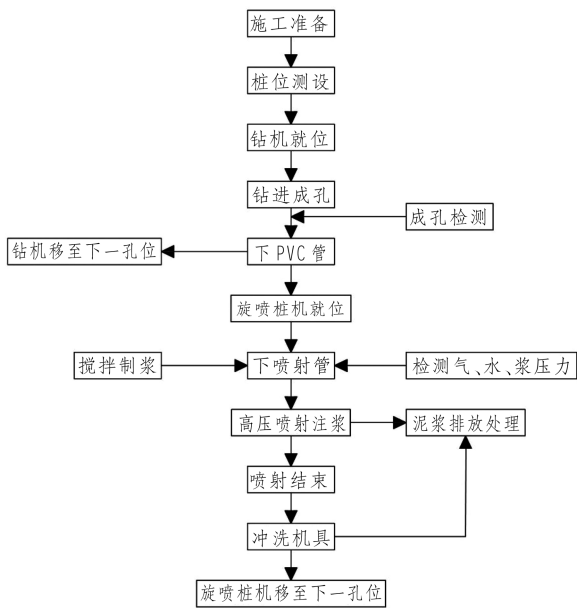


图 1 高压旋喷桩施工流程图

4 质量控制要点

4.1 做好充分的准备工作

(1)设计图纸的审查。施工前,必须对设计图纸进行详细的审查,以确保对设计意图、桩位、桩长、桩径、桩间距等关键参数有清晰的了解,审查图纸中的地质条件、地下水、周围环境特征是否符合现场实际情况。

(2)施工方案的制定。根据设计图纸和现场的地质条件、地下水、周围环境条件选取合适的施工方案,明确施工工艺流程、机械设备配置、人员的安排和施工进度计划等,确保施工过程的全面性和系统性。

(3)原材料的质量控制。对水泥、外加剂等原材料进场时应检查出厂证、检验证、合格证齐全,并按照规定进行抽检试验,待其合格后方可使用。

(4)施工设备的检查与调试。优先采用近 2 年新出品的新设备并检查设备的性能参数是否满足施工工艺要求。对于旋喷桩施工中使用的钻机、高压泵、搅拌机关键设备必须进行专项检查。

(5)施工人员的培训。对全体管理及施工人员进行详细的技术交底培训,确保其熟练掌握施工工艺、操作规程、质量控制要点、常见缺陷形成的原因及处理措施。

4.2 通过试桩确定相关的技术参数

施工前,必须进行生产性试桩以确定施工技术参数。选取具有代表性的不同地质条件地层进行试桩,并需保证试桩能够覆盖全部高压旋转桩的地质条件。每处的试桩不少于 3 根,以排除试桩数据的偶然性。

接水点高压旋喷桩的桩径为 1.0 m,间距为 0.75 m,深入建基面以下 4.0 m。其桩长根据建基面的深度不同设为 14~16 m,桩身水泥采用 P·042.5 级普通硅酸盐水泥。

现场试桩后确定的技术参数为:水泥浆液的水灰比为 1:1、气压力为 0.6~1.0 MPa、气流量为 0.8~1.5 cm³/min、水压力为 35~40 MPa、水流量为 70~80 L/min、浆液压力为 0.2~1.0 MPa、浆液流量为 60~80 L/min、进浆密度为 1.6~1.7 g/cm³、回浆密度为 1.2~1.3 g/cm³、旋转速度为 6~15 r/min、提升速度为 8~15 cm/min。

采集现场的土质进行室内配合比试验,由试验确定的水灰比为 1:1。经计算,每 m 高压旋喷桩的水泥用量为 0.522 t。

高压旋喷桩的水泥用量引用《简明施工计算手册》^[3](第四版)5.10 章节中的计算公式:

$$Q=\frac{1}{4}\pi D^2 h \alpha (1+\beta)$$

式中:Q 为浆液用量,m³;D 为桩的有效直径,m;h 为施工长度,m,即旋喷长度 h 取 1.0 m; α 为变动系数,根据砂土变动系数的最大有效直径取 $\alpha=0.8$; β 为损失系数,配合损失、残余损失和机械故障时,取 $\beta=0.1$ 。

计算每 m 桩水泥浆的用量 $Q=0.6908\text{ m}^3$,水灰比为 1:1 的水泥浆比重为 1.512 t/m³,每 m 桩水泥浆的重量为 1.044 t(即每 m 桩水泥用量为 0.522 t)。

4.3 施工过程中的质量控制要点

(1)勤检测、微纠偏。应提前对安置钻机的地基进行碾压密实并保证稳固。钻进过程中,每钻进 1.0 m 对桩位偏差、钻杆的垂直度进行复测,对出现的偏差应及时进行微纠偏,并在每根钻杆上做好编号进行记录,确保孔深准确。

(2)PVC 管的强度控制。验孔合格后下放 PVC 管,并需确保其强度能防止塌孔,同时要求 PVC 管的脆性较好,能够被高压水泥浆完全切

割、破碎,不影响注浆的效果及范围。

(3)浆液的质量控制。配制水泥浆液时,必须严格按照水灰比控制水泥和水的用量,搅拌机的搅拌时间应不少于5 min。对于每罐水泥浆都要采用比重仪检测其水灰比是否合格。

(4)喷射注浆的质量控制。下喷管前首先检查喷管是否完好、畅通,然后进行试喷试验,待浆、水、气的压力符合设计要求时下管。喷管下至设计深度,先送高压水,再送压缩空气和水泥浆,待水泥浆在孔口返浆后,在桩底旋转喷浆30 s后匀速旋转提升,提升过程中保持连续送浆、中间不间断。将提升速度控制在8~15 cm/min、旋转速度控制在6~15 r/min,上升至桩头,持续搅拌20~30 s。搅拌喷浆至桩顶以上50 cm以保证桩头均匀密实。中途拆卸喷射管时,对搭接段应进行复喷,其复喷的长度不得小于20 cm;因事故中断后恢复施工时,其复喷的长度不得小于50 cm^[4],以实现原有旋喷体的充分搅拌和均匀混合。喷射结束后,随即在喷射孔内进行静压充填灌浆,直到浆面不再下沉为止^[5],以保证桩体的标高。

4.4 异常情况的质量控制

(1)中断注浆的处理措施。当喷射注浆因停电或喷嘴堵塞等原因中断时应立即排除故障,并对中断部分进行复喷。复喷长度至少为50 cm,以确保中断部分与后续喷射部分能够有效搭接,避免形成薄弱环节。

(2)障碍物的处置。当喷射流遇到大块石层或大卵石层时,由于障碍物的存在可能会导致喷射流无法均匀分布,进而影响到加固效果。应根据钻孔情况在障碍物的一侧或两侧增补喷灌孔,或根据实际情况调整邻孔的孔距和相应的参数以解决大块石层或大卵石层的影响,确保成桩效果。

(3)注浆系统异常的处置。当注浆流量保持不变、但浆液压力下降时,首先需要检查注浆系统的各部位是否存在泄露的情况,如果发现泄露应立即进行修复。必要时,需要拔出注浆管检查其密封性能,确保注浆管的密封良好,避免浆液在输送过程中发生泄露而影响到注浆效果。

当注浆压力增大而流量为零时,通常表明喷嘴可能发生堵塞,此时应立即停止注浆操作,拔出喷管进行疏通。疏通后,重新检查喷嘴是否畅通并进行必要的喷射试验以确认其能正常工作。

(4)返浆异常的处置。当孔口出现返浆异常时,即返浆密度低于1.2~1.3 g/cm³或没有出现返浆现象时,应降低喷管的提升速度;相反,如果返浆密度偏高,可以通过增加喷射压力进行调整并适当提高喷管的提升速度。

4.5 施工完成后的质量检测要点

施工后的成桩检测主要包括:直径、渗透系数及中心位置。桩体检测的质量要求、频次及方法见表3。

表3 桩体检查内容表

序号	检验项目	质量要求	检验数量	检验方法
1	桩体直径	≤50 mm	每根	开挖后用钢尺量
2	桩体渗透系数	≤1.0×10 ⁻⁶ m ³ /s	0.5%	钻芯法取样检验
3	桩身中心位置	±50 mm	每根	全站仪量测

5 影响施工质量的成因及采取的预防措施

(1)人为因素的分析和预防措施

①成因分析:技术交底或现场监督管理不到位可能会导致施工过程中的技术参数发生较大的偏差而导致质量不合格。

②预防措施:采用书面材料、现场讲解、操作演示等多种形式进行技术交底,以保证施工人员对工艺流程、质量参数标准等有清晰的理解和掌握;采用班组面试制度,对于经培训后仍不能达到技能合格水平者严禁其入场施工;将责任落实到个人,明确各个岗位的职责,确保现场施工的每项

工作都有专人落实及监督,能够及时发现问题并予以纠正。

(2)施工机械因素的分析和预防措施

①成因分析:桩机设备选择不合理或未定期保养,可能会导致机械在使用过程中出现故障,导致成桩不连续。

②预防措施:根据现场施工条件并结合已有的施工经验进行机械设备的选择;优先采用近2年出品的新设备。施工前必须对设备的性能进行全面排查;对于钻机、高压泵、搅拌机等关键设备必须着重进行专项检查;制定设备保养计划,定期

检查和维护设备,确保设备处于良好的工作状态。

(3)施工材料因素分析和预防措施

①因素分析:水泥原材料的质量不合格或储存不当,可能会导致成桩质量较差,防渗能力无法满足设计要求的结果。

②预防措施:对进场的材料进行严格的检查及试验,确保其符合设计要求和施工标准;合理规划材料的存储仓库,确保材料在存储过程中不受潮、变质或污染。存储仓库应保持干燥、通风良好并采取必要的防护措施;合理组织物资进场,水泥应尽量做到当月进场、当月使用完毕,其进场存放的时间不能超过三个月。

(4)施工环境因素分析和预防措施

①成因分析:地质条件复杂可能会导致软弱地层中的桩径偏大、坚硬地层中的桩径偏小,进而影响到成桩质量。

②预防措施:施工前开挖探坑复核地质条件;对于地质情况复杂的部位可使用钻探复测;试桩试验必须覆盖高压旋喷桩的全部地质类型;施工过程中应根据地质条件的变化及时调整旋喷压力、提升速度等参数,确保成桩质量。

6 结 语

针对复杂地质条件地层中的高压旋喷桩施工,在其成孔阶段必须灵活地选择成孔工艺,适合的成孔技术是有效解决成孔难题的关键。在喷射注浆阶段,应根据地层的硬度和深度变化适时调

整喷射压力,以确保水泥浆与土体的充分混合,进而保障成桩的质量。同时,通过实时监控施工流程、严格执行水泥浆配比等质量控制措施,可以确保施工中的各个环节符合相关技术规范和质量要求。这些综合性施工策略的实施,能够确保高压旋喷桩施工的顺利进行,为类似复杂地质条件下进行高压旋喷桩施工作出示范,为未来类似工程的施工提供宝贵的经验。

参考文献:

[1] 王康,黄禄厅,程帅,等.浅析采用高压旋喷桩替换水泥搅拌桩作支护桩止水帷幕效果[J].智能城市,2019,5(14):166-167.

[2] 石飞轮.潜孔锤跟管钻进技术在卵石层高压旋喷灌浆工艺中的应用[J].钻探工程,2006,50(10):27-28.

[3] 朱国梁.简明施工计算手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2004.

[4] 陈果.孤石密集砂砾石覆盖层围堰高喷防渗墙施工[C].2021 水利水电地基与基础工程技术创新与发展,2021.

[5] 周明辉.浅谈高压旋喷桩在抛石围堰止水的应用[J].科技创新与应用,2014,4(22):172.

作者简介:

张雨游(1986-),男,四川峨眉人,工程师,从事水利水电与市政工程施工技术与管理工
秦浩瑞(2000-),男,四川眉山人,技术员,学士,从事水利水电与市政工程施工技术与管理工
李海军(1997-),男,四川南充人,助理工程师,从事水利水电与市政工程施工技术与管理工

(编辑:李燕辉)

(上接第 86 页)

参考文献:

[1] 严自勉.大中型水利水电工程施工用缆索起重机的选用和布置问题[J].发电技术,2003,24(3):51-55.

[2] 严自勉.国产重型缆索起重机的发展与现状[J].制冷空调与电力机械,2004,25(3):61-68.

[3] 杨钦,李承铭. ANSYS 索结构找形及悬链线的模拟[J].土木建筑工程信息技术,2010,2(4):61-65.

[4] 顾志刚,王章忠.小湾水电站左岸大坝混凝土施工[J].水利水电技术,2009,40(10):76-79.

[5] 陈启湘,蔡扬.构皮滩电站国产 30 t 缆索起重机技术特点与应用[J].水利电力机械,2007,29(10):19-21.

作者简介:

何 潇(1999-),男,四川广元人,助理工程师,硕士,从事建设工程项目施工技术与管理工
范道林(1978-),男,黑龙江齐齐哈尔人,副高级工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工
方俊麒(1967-),男,四川宜宾人,副高级工程师,从事水利水电工程项目施工质量监督工
宁德奎(1980-),男,云南宣威人,工程师,从事水利水电工程施工技术与管理工
刘晓军(1984-),男,四川省眉山人,工程师,从事市政工程施工技术与质量管理工作。

(编辑:李燕辉)