

月	日	起时分	止时分	降水量
		22:30	22:35	0.2
	11	3:50	3:55	0.2
		4:50	4:55	0.2
		7:50	7:55	0.2
		17:30	17:35	0.2
		22:25	22:30	0.2
		23:25	2:00	3.6
	12	2:00	3:00	2.8
		3:00	4:00	3.2
		4:00	4:30	0.6
		5:05	5:20	0.6
		5:40	5:50	0.4
		6:15	6:55	1.0
		7:25	7:30	0.2
		9:40	9:45	0.2
	14	10:10	11:00	7.0
		11:00	12:00	8.0
		12:00	13:00	5.4
		13:00	13:20	0.4
		13:50	13:55	0.2

3 降水量的实际应用

3.1 降水量日常工作中的记载

表6

7月	时段降水量 (mm)				一日降水量
	14时	20时	2时	8时	
日					
1	0.6				0.6
3		0.2	0.4		0.6
9			5.4	0.3	5.7
11	4.6	2.0	0.5		7.1
13			0.7	0.4	1.1
17		0.1	4.5	5.2	9.8
18	0.6				0.6
23	15.3	6.4	0.3		22.0
24			0.1		0.1
25	0.4				0.4

3.2 降水量月统计

降水量: 48.0 mm、降水日数: 10天, 最大日量: 22.0 mm。

蒸发量: 233.7 mm、最大量: 13.9 mm、日期: 7日。

月平均: 7.5 mm、最小量 0.0 mm、日期: 23日。

4 降水量的重要性

主汛期期间, 6月~9月进入摘录表的, 一定要符合:

超过 20.0 mm 雨量且为一次连续降雨, 并且这一次连续降雨的平均雨强 > 2.5mm/h。24 小时雨量不少于 10 分钟或 20 分钟时, 只在 24 小时的前后起站时间, 细摘, 中间可粗摘。如果 20 分钟最大降水有两个时段相接近, 20mm ↑, 20.1mm ↑, 这两个时候都要细摘。遇到小河站的降水摘录时, 要 0.1 mm 转折控制, 降水强度超过 2.52.5mm/h 的雨量不跨整子, 摘录时段不跨每日 8 时。

5 结语

结合实际, 通过逐日水面蒸发量对照表、逐日降水量对照表、降水量摘录对照表、降水量各时段最大降水量表 (2), 观察出资料的年尾与年头接头, 转折点、控制点做的精细, 完整。根据《水文年鉴编印规范》、《水文普通测量规范》完成了本年的降水资料。

参考文献

- [1] 刘爱玲. 祖厉河流域郭城驿水文站水文特性分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2023, 59(08): 20-24. DOI: 10.19645/j.issn2095-0144.2023.08.005.
- [2] 张俊茹, 付焱焱, 张文哲, 等. 2005—2019年自动站与人工站降水量观测资料对比分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2024, 41(06): 16-19. DOI: 10.19441/j.cnki.issn1006-009x.2024.06.002.
- [3] 熊丽, 刘赞, 余嘉. 自动站与人工观测降水量的差异对比分析[J]. 山东气象, 2013, 33(02): 39-42. DOI: 10.19513/j.cnki.issn1005-0582.2013.02.011.

Application of high pressure jet grouting technology in foundation treatment of hydraulic engineering

Zhikun Chen Hao Zhou Zhirong Xu Tao Zhu

Hubei Ganguan Reservoir Administration Bureau, Jingmen, Hubei, 431899, China

Abstract

With the continuous expansion of China's water conservancy and hydropower projects, foundation treatment under complex geological conditions has become crucial for ensuring project safety and durability. Traditional methods like soil replacement and pile foundations face challenges such as prolonged construction periods, high costs, and poor adaptability in deep overburden layers, highly permeable soils, and soft foundations. High-pressure jet grouting technology, leveraging its unique advantages of cutting soil with high-pressure jets and forcibly mixing slurry to form high-strength consolidated bodies, has emerged as a core solution for addressing issues like settlement and seepage in soft foundations. By flexibly adjusting injection parameters (pressure, flow rate, lifting speed), this technology adapts to various strata including sandy soils, cohesive soils, and loess, while demonstrating significant advantages such as high construction efficiency and cost-effectiveness. It has been widely adopted in major projects like the Three Gorges Project and Shandong Qiaodian Reservoir. This paper first elaborates on the technical aspects of high-pressure jet grouting, then analyzes its advantages and applicable scenarios, followed by detailed explanations of construction techniques and quality control. Finally, multiple typical engineering case studies validate the effectiveness while summarizing relevant technical challenges and improvement directions.

Keywords

High-pressure jet grouting technology; water conservancy and hydropower projects; foundation treatment; seepage prevention and reinforcement

高压喷射注浆技术在水利水电工程地基处理中的应用

陈志坤 周浩 徐智容 朱涛

湖北省高关水库管理局, 中国·湖北 荆门 431899

摘要

随着我国水利水电工程规模不断扩大, 复杂地质条件下的地基处理成为保障工程安全与耐久性的关键。传统地基处理方法(如换填、桩基等)在深覆盖层、高渗透性土层及软弱地基中存在工期长、成本高、适应性差等问题。高压喷射注浆技术凭借其高压射流切割土体、浆土强制混合形成高强度固结体的独特优势, 成为解决软土地基沉降、渗透破坏等难题的核心技术。该技术通过灵活调整喷射参数(如压力、流量、提升速度), 可适应砂类土、黏性土、黄土等多种地层, 且具有施工效率高、经济性好等显著特点, 在三峡工程、山东乔店水库等重大项目中得到广泛应用。本文先是具体阐述了高压喷射注浆技术的相关内容, 随后详细分析了技术优势与适用范围, 紧接着具体阐述了施工工艺与质量控制, 最后通过多则典型工程应用案例分析验证效果并总结了相关技术挑战与改进方向。

关键词

高压喷射注浆技术; 水利水电工程; 地基处理; 防渗加固

1 引言

水利水电工程中, 软弱地基沉降与渗透破坏问题尤为突出, 尤其在深覆盖层(如三峡工程最大深度达 50m)、高渗透性土层及软土地基(如云南麦子河水库)中, 传统换填、桩基等方法因工期冗长、成本高昂且适应性差而难以满足需求。若采用传统防渗墙施工, 三峡工程深覆盖层处理需数月且费用巨大; 而软土地基若未加固, 则可能引发坝体沉降超

标, 直接威胁工程安全。相比之下, 高压喷射注浆技术通过高压射流切割土体并注入固化剂, 可快速形成连续防渗体或高强度加固区, 兼具施工效率高、适应性强、经济性好等优势, 能有效解决传统方法在复杂地质中的局限性。本文旨在系统剖析该技术原理、分类及工程应用, 为类似项目提供科学依据与实践参考。

2 高压喷射注浆技术概述

2.1 技术原理

高压喷射注浆技术通过高压射流切割、浆土强制混合及物理化学反应三大核心环节, 实现土体结构改造与强度提

【作者简介】陈志坤(1993-), 男, 中国湖北荆门人, 本科, 工程师, 从事水利工程管理研究。

升。首先,利用 20-50MPa 高压水或浆液经钻杆喷嘴高速喷射(流速 100-200m/s),形成高频冲击射流束,破坏土体结构并剥离土颗粒,形成直径数厘米至数十厘米的“混合腔”;随后,钻杆以 0.1-0.5m/min 速度提升并 5-20r/min 旋转,带动浆液与切割土体充分掺和,水泥颗粒填充孔隙形成均匀混合物;最终,水泥水化生成硅酸钙凝胶(C-S-H),通过化学键合黏结土颗粒,使固结体 28 天抗压强度达 1-10MPa、渗透系数降至 10^{-6} - 10^{-8} cm/s,有效提升地基承载力与防渗性能。

2.2 技术分类

高压喷射注浆技术依据喷射介质与喷射形式可分为两大类,以适应不同地质条件与工程需求。按喷射介质划分,单管法仅喷射水泥浆液,适用于 10 米以内浅层软土,成桩直径 0.4-0.9 米,设备简且成本低,常用于小型工程地基加固^[1];双管法同步喷射浆液与压缩空气,通过气幕保护减少能量损耗,成桩直径扩展至 0.8-1.5 米,适用于 10-20 米中层土体及砂卵石地层;三管法依次喷射高压水、空气与浆液,利用水切割土体后充填,成桩直径达 1.0-2.0 米,可处理 20 米以上深层土体及硬质黏土。按喷射形式分类,旋喷形成 0.5-2.0 米圆柱体用于承载力提升,摆喷生成哑铃状或厚板墙用于中低水头防渗,定喷构建薄板墙用于低水头防渗,灵活满足地基加固、防渗及边坡稳定等多样化需求。

3 技术优势与适用范围

3.1 技术优势

高压喷射注浆技术凭借独特工艺,在施工效率、经济性、地层适应性及质量可控性方面优势显著。施工上,它实现“即喷即固”,浆液与土体混合后快速凝固,无需长时间养护,工期较传统方法缩短 30%-50%,如三峡围堰工程单日完成 200m³ 灌浆量,效率远超混凝土防渗墙。经济上,材料成本降低 20%-30%,以普通硅酸盐水泥为主材,可掺 30% 粉煤灰,且设备轻便、移动灵活,压缩了运输与安装费用。地层适应性广,适用于多种土层,处理深度达 50m。质量上,通过调整喷射压力、提升及旋转速度,可精准控制固结体直径、形状和强度,满足不同工程需求。

3.2 适用范围

高压喷射注浆技术功能多样,广泛应用于地基处理、防渗工程及特殊工况修复。在地基加固方面,它能形成高强度固结体,有效提升软土地基承载力、减少沉降,如上海某高层建筑采用旋喷桩加固后,地基承载力大幅提升,沉降量显著降低。防渗处理上,可构建连续防渗墙,适用于堤防、水库等工程,小浪底水库采用此技术形成的防渗板墙大幅减少了坝基渗透量。在特殊工况中,它能在既有建筑纠偏、地铁隧道防渗、液化土及污染土处理等方面发挥作用。该技术通过灵活组合介质与工艺,成为复杂地质条件下相关工程的首选方案。

4 施工工艺与质量控制

4.1 施工流程

高压喷射注浆施工流程需严格遵循标准化操作:首先采用地质钻机垂直钻进至设计深度,孔径控制在 50-300mm 范围内,孔斜率严格控制在 $\leq 1.5\%$ 以内,为后续注浆管精准定位提供保障;随后将带 2-3mm 直径喷嘴的注浆管缓慢插入孔内,过程中需持续旋转并监测深度,确保喷嘴精准对准孔底,防止浆液喷射方向偏移^[2]。喷射注浆阶段,三管法通过同步喷射 30-50MPa 高压水、0.2-0.7MPa 水泥浆液及 0.7-0.8MPa 压缩空气,利用高压水切割土体形成空腔,浆液填充胶结土颗粒,空气形成气幕减少浆液流失;双管法则采用 10-25MPa 浆液与空气同轴喷射,通过气幕保护层防止浆液在强透水层中过快扩散,提升固结体连续性。提升与旋转环节需根据地层特性动态调整参数——黏性土中以 8-12cm/min 速度提升、砂质土中提升至 12-20cm/min,同时配合 5-10r/min 的管体旋转,确保固结体均匀性。最终通过连续喷射形成圆柱状(桩径 0.5-2m)、板墙状(厚度 0.3-1m)或扇状固结体,精准满足防渗、加固及地基处理等工程需求。

4.2 质量控制要点

高压喷射注浆工程的质量控制需贯穿材料选择、设备校准、参数优化及质量检测全流程。材料方面,优先选用 42.5 级普通硅酸盐水泥,水灰比严格控制在 0.8-1.2 范围内,并可根据工程需求掺入速凝剂(初凝时间 ≤ 4 h)以缩短工期,或添加膨胀剂补偿收缩,防止固结体开裂^[3]。设备校准环节,需确保高压泵压力波动范围 $\leq \pm 2$ MPa,喷嘴直径误差 $\leq \pm 0.1$ mm,同时定期校验流量计、压力表精度,避免参数偏差导致成桩质量不稳定。参数优化需结合现场试验确定最佳组合,例如在砂卵石层中采用三管法时,高压水压力设定为 40MPa、浆液压力 0.5MPa、提升速度 10cm/min,可有效保证固结体直径达标。质量检测通过开挖检查直观评估固结体连续性 & 密实度,钻孔取芯检测抗压强度(≥ 5 MPa)与抗渗性(渗透系数 $\leq 10^{-6}$ cm/s),标准贯入试验验证地基承载力(如 ≥ 150 kPa),最终通过标准化管控体系实现工程可靠性与耐久性的全面提升。

5 典型工程应用案例

5.1 三峡围堰防渗工程

三峡围堰地质环境复杂,存在最大深度达 50m 的深覆盖层,且夹杂大量大粒径漂石,这使传统防渗方法难以有效实施,大粒径漂石会阻碍常规设备作业,深覆盖层也增加了施工难度与成本。为此,工程采用三管法高压喷射注浆技术,该技术同时输送高压水、压缩空气和水泥浆液,利用 40MPa 高压水强力切割土体,破坏原有结构,让大粒径漂石周围土体松动,再以 0.5MPa 压力将水泥浆液充填到空隙中,经混合、凝固形成直径 1.5m 的固结体,相互连接构成连续防渗墙。实施效果显著,经检测,防渗墙渗透系数

仅 $1.2 \times 10^{-7} \text{cm/s}$, 远低于设计标准, 有效阻止水渗透, 保障围堰安全。而且, 该技术因高效施工、无需大面积开挖, 减少了诸多环节和时间消耗, 相比传统方法, 工期缩短了 40%。

5.2 山东乔店水库地基处理

山东乔店水库地基为砂卵石质地, 透水性极强。若不加以有效处理, 水库蓄水时会出现大量渗漏, 这不仅会削弱水库的蓄水能力, 还可能对周边环境产生不利影响。为解决这一难题, 该工程选用了双管法高压喷射注浆技术。施工时, 此技术同时输送压缩空气和水泥浆液, 将浆液压力设定为 20MPa, 空气压力为 0.8MPa。在空气辅助下, 高压浆液能更好地渗透到砂卵石地基孔隙中, 与砂卵石充分混合, 形成直径 1.2m 的固结体。这些固结体如同“桩基”深入地基, 增强了地基整体性。经过这样的处理, 地基承载力大幅提升, 从原本较低水平升至 150kPa, 可承受水库建成后的较大荷载。同时, 渗漏量大幅减少 80%, 有效解决了地基透水问题, 为水库的安全运行和长期稳定提供了坚实保障。

5.3 云南麦子河水库坝基加固

云南麦子河水库坝基为淤泥质软土, 具有高压缩性, 在荷载作用下易产生较大沉降。若不加固, 坝基沉降量可能超允许范围, 致使坝体出现裂缝甚至失稳, 严重影响水库安全。为此, 工程采用单管法高压喷射注浆技术, 主要通过输送压力设定为 15MPa 的水泥浆液进行施工。高压浆液注入淤泥质软土后, 对软土进行置换和加固, 形成直径 0.8m 的旋喷桩。这些旋喷桩垂直插入坝基, 如同“支撑柱”般提高了坝基承载能力, 减少了沉降。最终实施效果出色, 坝基沉降量被严格控制在 5cm 以内, 满足了 6 度设防的抗震要求。在地震等外力作用下, 坝基能保持相对稳定, 不会因过大沉降损坏坝体, 有效保障了水库在各种工况下的安全运行。

综上所述, 高压喷射注浆技术具有强大的工程适应性与问题解决能力。在三峡围堰防渗工程中, 它成功化解深覆盖层与大粒径漂石造成的防渗难题; 在山东乔店水库地基处理时, 有效改善了砂卵石地基透水性强的状况; 在云南麦子河水库坝基加固中, 妥善处理了淤泥质软土高压缩性引发的大沉降问题。凭借精准的施工参数和科学的工艺, 该技术在各工程中均达成预期目标, 既解决了复杂地质条件下的工程难题, 也为后续同类工程提供了宝贵经验与可靠参考。

6 技术挑战与改进方向

6.1 技术挑战

传统高压喷射注浆技术在应对复杂地质条件时, 面临着多重且严峻的挑战。在深覆盖层、大粒径漂石或高渗透砂卵石地层中, 其喷射效率大幅降低。大粒径漂石宛如“路障”, 直接阻断浆液扩散路径, 使固结体出现断续或空洞; 高渗透砂卵石层则像“漏斗”, 让浆液快速流失, 难以构建连续有

效的防渗体^[4]。环境管控上, 施工产生的废浆若处理不规范, 其中含有的碱性物质和重金属会随渗流渗入地下水, 对周边生态系统造成持久且难以修复的破坏。施工精度控制同样困难, 深孔作业时, 钻杆易因地层软硬差异或设备振动而偏斜, 致使相邻固结体轴线错位、衔接失效, 形成渗漏通道, 严重威胁整体防渗体系的可靠性。因此, 亟需通过材料创新、设备升级和智能监控等手段实现技术突破。

6.2 改进方向

为弥补高压喷射注浆技术现存短板, 其改进方向应着重围绕智能化、绿色化与精细化展开。在智能化方面, 借助物联网与智能监测技术搭建参数动态优化系统, 通过传感器实时获取压力、流量等关键数据, 再结合 AI 算法, 达成喷射参数“一孔一策”的精准调控, 提升施工精准度^[5]。绿色化上, 着力研发低碱水泥基固化剂、生物可降解添加剂等环保材料, 降低浆液 pH 值和重金属含量, 同时增强固结体耐久性。精细化层面, 升级高精度施工装备, 开发自动纠偏钻机与多级扩孔喷嘴, 增强深孔施工稳定性及复杂地层适应性。此外, 创新废浆资源化利用技术, 运用固液分离与化学稳定化工艺, 实现分离清水回用、固相转化为免烧砖或路基材料, 达成施工废弃物“零排放”。

7 结论与展望

高压喷射注浆技术依靠高压射流切割、浆土强制混合的独特作用机理, 成功突破了传统方法在深覆盖层、高渗透土层及软弱地基施工中的困境, 有效解决了工期长、成本高、适应性差等难题。该技术能灵活调整喷射参数, 对各类复杂地层都有良好适应性, 具备施工效率高、经济性好、质量稳定可控等突出优势, 已在三峡围堰、山东乔店水库等重大工程中成功应用, 充分验证了其在防渗加固、提升地基承载力方面的显著成效。然而, 面对深大粒径地层、环境管控及施工精度等挑战, 它仍需持续改进, 如在智能化参数调控、环保材料研发、高精度装备升级等方面发力。展望未来, 随着物联网、人工智能等技术的深度融合, 该技术将朝着智能化、绿色化、精细化方向发展, 为水利水电工程安全与可持续发展筑牢技术根基。

参考文献

- [1] 蔡家华. 三管法高压喷射灌浆技术在水利水电工程施工中的应用分析[J]. 四川水泥, 2024, (02): 142-144.
- [2] 郑贵亮. 高压喷射注浆技术在水利工程中的应用探究[J]. 工程建设与设计, 2021, (04): 107-108.
- [3] 万莉芬. 高压喷射注浆技术在水利工程中的实施探析[J]. 现代物业(中旬刊), 2019, (11): 192.
- [4] 武力. 高压喷射灌浆施工技术在水利水电工程施工中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2016, (22): 122.
- [5] 刘增杰. 高压喷射灌浆技术在水利水电工程中的应用[J]. 住宅与房地产, 2015, (19): 97.