

水工建筑工程中的帷幕灌浆施工技术探讨

张 艳

(广州打捞局, 广东 广州 510260)

摘 要 随着水工建筑工程对防渗和加固技术要求的日益提高,帷幕灌浆施工工艺作为关键工程技术的重要性日益凸显。针对传统灌浆方法在复杂地质条件下存在的技术局限性,本研究选取某水坝工程作为典型案例,系统性地开展了帷幕灌浆施工技术的专项研究。通过对灌浆孔钻探、施工前期准备、过程质量控制及后期处理等关键环节的技术要点进行详细分析与归纳,旨在为提升帷幕灌浆施工质量水平及保障工程结构安全提供具有实践指导意义的技术参考。

关键词 水工建筑工程;帷幕灌浆施工技术;灌浆孔钻探;灌浆前准备;灌浆施工控制

中图分类号:TV5

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.26.017

0 引言

帷幕灌浆作为水利工程中的一项核心施工技术,其主要功能在于提升地基的防渗性能与结构稳定性,广泛应用于大坝、隧洞及地下结构等工程领域。随着水利工程规模的不断扩大和技术标准的日益提高,帷幕灌浆技术的重要性愈发显著。通过科学的灌浆方案设计和精准的施工工艺控制,该技术不仅能有效阻隔地下水渗流,降低工程安全隐患,更能显著延长建筑物的服役年限。深入研究帷幕灌浆的施工工艺,系统分析其技术要点与工程应用效果,对于提升水利工程整体建设质量具有重要的实践价值。

1 帷幕灌浆施工技术概述

帷幕灌浆技术通过灌注特定材料来加固土体或岩体结构,在水工建筑工程领域得到广泛应用。该技术的主要功能是提升工程结构稳定性和防渗性能,其核心原理是在地下水位以下的土层或岩层中构建连续的水泥浆或化学材料帷幕,从而有效阻隔水流渗透并控制水土流失。在材料选择方面,水泥浆凭借优异的粘结性能和强度特性成为主流选择,而化学灌浆材料则因其良好的流动性和快速反应特性,更适用于复杂地质条件。通过添加特定外加剂,可显著改善灌浆材料的抗渗性能和收缩特性。在施工过程中,灌浆泵作为关键设备,负责将材料以预定压力注入预设孔道,同时注浆管道的合理设计与布置对确保材料均匀填充至关重要。监测系统可实时采集压力、流量、温度等关键参数,为施工质量和安全提供可靠保障^[1]。

以某地区大型水利枢纽二期工程为例,经实地勘察表明,工程区域覆盖层厚度为 60~90 m,主要由含

土碎石、卵石、冲积岩及细砂等复杂地层构成。为确保工程防渗要求,设计采用帷幕灌浆方案,防渗轴线总长 187.65 m,其中 95 m 段与涵洞存在交叉。经测算,帷幕灌浆总工程量约 23 500 m³,最大钻孔深度达 85 m。在施工过程中,技术人员对上部土层进行了详细检测,发现土质存在显著变化,需根据各土层特性选用相应的灌浆材料和工艺参数,以确保灌浆质量满足设计要求。项目团队制定了详尽的施工方案,确保各项技术参数严格符合设计要求。经科学评估,本工程预计工期为四个月。在施工过程中,将严格执行定期质量检测制度,确保灌浆工艺达到既定标准。基于对现场勘察数据的系统分析,项目组已具备应对施工过程中各类技术问题的能力,为工程顺利实施提供了坚实的保障。

2 水工建筑工程中帷幕灌浆施工工艺

2.1 灌浆孔钻探

1. 钻探设备与技术。在帷幕灌浆施工过程中,通常采用旋转钻机和冲击钻机两种钻探设备。其中,旋转钻机适用于中等硬度岩石及软土层作业,其钻头转速可在 300~600 转/分钟范围内调节,从而有效提高钻进效率。施工时采用水或泥浆作为钻探工作液,既可降低摩擦,又能冷却钻头,工作液流量一般控制在 20~50 L/min,以确保钻孔的稳定性^[2]。

在复杂地质条件下,冲击钻机展现出显著优势,尤其适用于坚硬岩层作业。该设备通过冲击与旋转相结合的钻进方式实施钻探,其冲击频率可达 1 000 次/分钟,能有效穿透坚硬岩层,最大钻深可达 85 m。施工过程中需定期检测孔壁稳定性,确保孔径符合要求。完成钻探后,采用 1.5 MPa 高压水流进行冲洗,彻底清除

钻屑及杂质，从而保证灌浆孔达到清洁标准。

2. 钻孔质量控制。为确保钻孔作业质量，施工前应进行详细地质勘察，准确掌握土层结构及孔位分布情况。根据地质条件合理选用钻探设备，其中三翼钻头的选用可显著提升钻进效率并增强孔壁稳定性。施工过程中需实时监控钻进速度，将其严格控制在每小时不超过 5 m 的合理范围内，以避免因速度过快导致孔壁坍塌事故的发生。在钻孔施工过程中，应定期检查孔径尺寸，确保其符合设计要求，通常孔径应控制在 150 ~ 200 mm 范围内。为防止孔壁坍塌，施工中宜采用泥浆护壁工艺，并将泥浆密度控制在 1.2 ~ 1.5 g/cm³ 的合理区间，以增强孔壁稳定性。钻孔完成后，应及时进行孔深和孔位测量，要求孔深达到设计深度的 95% 以上，孔位偏差不得超过 ±0.1 m。所有测量数据须完整记录，为后续灌浆质量验收提供依据。

2.2 灌浆前准备

1. 孔内清洗与检查。采用高压水清洗工艺对钻孔进行清理，通过 15 MPa 高压水泵配合专用清洗管道将清水注入孔内，有效清除孔内泥浆、碎石及其他杂质，使孔壁表面达到光滑状态，为后续灌浆创造良好条件。清洗过程需持续 30 min，确保彻底清除所有沉积物，随后进行孔内质量检查。检查通常采用直径 25 mm 的内窥镜作为检测设备，该仪器能够全面评估孔内清洁度与结构完整性。在检查过程中，内窥镜需从孔口逐步深入孔底，详细记录孔壁状况以供分析，并确保孔底不存在明显裂缝或结构缺陷。为确保灌浆材料性能不受影响，孔内水位应严格控制在 20 cm 以内，避免清洗液稀释浆液。清洗作业完成后，必须检测孔内水质，要求浑浊度不得超过 10 NTU。整个清洗及检测流程需在 1 小时内完成，以提高施工效率，为后续灌浆作业创造有利条件。

2. 灌浆材料配制与准备。在灌浆材料配制过程中，水泥的选择至关重要，应选用强度等级不低于 42.5 的普通硅酸盐水泥。根据工程实际需要，必须严格控制水泥与水的配合比，保持 1:0.4 的比例。为确保灌浆材料的流动性和强度性能，需合理选用添加剂，主要采用减水剂和膨胀剂，其中减水剂掺量为水泥重量的 0.5%，膨胀剂掺量为水泥重量的 1.0%，以保证材料在施工过程中的稳定性和抗渗性能。

在配制灌浆材料过程中，首先将干燥水泥与细砂按 1:2 比例充分混合，以提高材料的密实性。随后逐步加入预先计量好的水，搅拌时间不少于 3 分钟，确保材料均匀分散。搅拌完成后需进行流动度测试，控

制流动度在 180 ~ 200 mm 范围内，以满足高压灌浆要求。制备完成的灌浆材料应置于阴凉干燥处储存，防止水分蒸发或污染。使用前需重新搅拌以提升均匀性和流动性。灌浆作业应采用专用灌浆泵，将压力控制在 0.5 ~ 1.0 MPa 范围内，并根据地质条件和孔道深度适时调整，确保材料充分渗入土体，形成有效的防渗屏障^[3]。

2.3 灌浆施工控制

1. 灌浆压力控制。灌浆压力的设定需综合考虑地质条件、材料特性及施工要求。针对复杂地质环境（如含土碎石层与细砂层），初始灌浆压力宜控制在 0.5 MPa。为确保浆液有效渗透，施工过程中应逐步提升压力，每次增幅宜保持在 0.1 ~ 0.2 MPa 范围内，以避免浆液回流或管路堵塞。施工时须采用压力传感器进行实时监测，确保压力稳定可控。在施工过程中，需通过压力传感器实时监测灌浆压力，确保压力保持稳定。施工现场应设置多个压力监测点，分布于灌浆管路的不同位置，以便及时发现异常情况。所有监测数据须如实记录于施工日志中，为后续分析调整提供依据。当监测数据显示压力波动超过 0.3 MPa 时，必须立即停止灌浆作业，对灌浆管路和孔道进行全面检查，确认无堵塞或漏浆现象后方可继续施工。

在灌浆材料的选择方面，建议优先选用高流动性材料以降低灌浆压力。对于水泥浆材料，水灰比应严格控制在 0.4 ~ 0.5 之间，以确保其在较低压力条件下仍保持良好的流动性能。针对化学灌浆材料，则需根据其特性调整灌浆压力，通常宜控制在 0.3 ~ 0.6 MPa 范围内。灌浆作业完成后，需实施压力回填工艺以确保孔道填充密实。回填压力应分级递减，标准工作压力控制在 0.2 MPa，避免因压力骤降导致填充材料沉降或产生裂隙。施工过程中须全程监控，确保各阶段压力调节符合设计规范，从而达到最佳防渗效果。

2. 灌浆流量监测。流量监测需采用专业流量计，主要包括电磁流量计和超声波流量计两种类型。电磁流量计适用于导电性液体，可实时监测灌浆材料流量，确保流量稳定；超声波流量计则通过测量声波传播速度变化来确定流体流量，适用于多种灌浆材料。在实际施工过程中，灌浆流量应控制在每分钟 100 L 的标准值。为确保灌浆作业的均匀性和连续性，监测系统需配备实时数据采集装置，将流量数据实时传输至中央控制中心供施工人员监控。数据采集频率建议设置为每秒一次，以便及时响应流量波动情况。

在工程施工过程中，需将实时流量监测数据与预

设目标值进行对比分析,并及时记录所有偏差情况。当实际流量低于设定值时,应检查灌浆设备运行状态、材料黏度及管道通畅性;若流量超出允许范围,则可能导致材料浪费或灌浆质量缺陷,此时需调整灌浆压力或更换相应规格的管道。监测系统须具备自动报警功能,当流量超出预设阈值时立即发出警示,以便施工人员及时采取纠正措施。同时,应定期对流量监测仪器进行校准,确保测量数据的准确性。

3. 灌浆时间控制。灌浆时间的控制需综合考虑灌浆材料特性、地质条件和施工环境等因素。在实施过程中,必须严格监测材料的初凝和终凝时间。通常情况下,水泥浆的初凝时间为 60~120 min,终凝时间为 240~360 min。为确保灌浆质量,施工前应进行材料试验,以准确掌握其在特定环境下的凝固特性。

在实际施工过程中,通过合理控制灌浆速率和压力参数,可有效管理灌浆作业时间。灌浆速率通常设定在 0.5~2 m³/h 范围内,具体数值需根据地质条件和孔径尺寸确定。通过调节灌浆泵的流量,能够精确控制灌浆时间。同时,施工过程中必须严格监测灌浆压力,其标准值应保持在 0.5~1.5 MPa 之间。压力过高或过低均会显著影响灌浆质量^[4]。

在实施灌浆作业过程中,须持续监测孔内压力与流量参数,确保其维持在预设范围内。如发现流量异常或压力波动,应立即调节灌浆速度,以避免因速率过快导致材料渗透不充分,或过慢引发材料过早凝固的问题。施工期间,操作人员需详细记录每个灌浆孔的注入时间与注入量,确保各孔灌浆时间保持均衡。为确保最佳灌浆效果,单孔灌浆时间应控制在 30~90 min 范围内。环境温湿度对灌浆作业具有显著影响,当气温超过 30℃ 时,水泥浆的初凝时间将明显缩短。在此工况下,需相应提前灌浆作业时间,确保在材料凝固前完成灌注施工。

2.4 灌浆后处理

1. 孔道封闭与恢复。在封闭孔道施工阶段,应选用具有优异流动性和粘结性能的水泥基专用封闭材料,确保与孔壁形成牢固结合。材料配比采用水泥与水按 1:0.4 的比例配制,并掺入适量减水剂以提高流动性。施工过程中需严格控制注浆压力在 0.2~0.5 MPa 范围内,以避免孔道内产生气体或材料分层现象。封闭作业完成后,必须进行不少于 72 小时的养护处理。为确保封闭材料强度符合设计要求,须待灌浆工序完成后实施孔道修复。修复材料应选用与设计标准相符的土壤或混凝土,确保与周边土体紧密结合。施工时需

先彻底清理孔道内杂物,以保证修复材料充分填充。材料配比按水泥与骨料 1:1 的比例配制,并添加适量水以保持适宜流动性。采用分层填充工艺,每层厚度控制在 30 cm 以内,逐层夯实至密实度不低于 95%。修复完成后须进行为期六个月的沉降监测,确保修复区域稳定性。

2. 养护措施。为确保帷幕灌浆施工质量,需在工程完成后实施规范的养护措施。灌浆作业结束后应立即封闭孔道,采用适宜的密封材料防止水分蒸发。封闭后需保持孔道周围湿润环境,通过洒水或喷雾方式控制每日补水量在 50~100 L 范围内,持续养护 7 天以促进水泥充分水化。

为确保灌浆材料的性能稳定,养护温度应严格控制在 15~30℃ 范围内,避免因温度过高或过低导致强度下降。当环境温度低于 15℃ 时,须采取保温措施,使用保温材料对灌浆区域进行包裹,以维持恒温状态。在高温条件下,灌浆完成后应立即覆盖塑料薄膜或湿麻袋,防止水分过快蒸发。养护期间需定期进行强度检测,确保材料达到设计强度要求。通常情况下,28 天后需进行抗压强度测试,其标准值应达到 30 MPa,以保证灌浆质量符合设计要求^[5]。

3 结束语

在水工建筑工程中,帷幕灌浆施工工艺作为关键防渗技术发挥着不可替代的重要作用。通过规范的施工准备流程、精准的技术实施以及严格的质量控制措施,可有效提升工程的安全性能和耐久性能。随着新材料和新技术的不断涌现,帷幕灌浆施工技术将朝着智能化、环保化的方向持续发展。行业从业人员需要密切关注技术创新与标准规范的更新迭代,从而推动水利建筑工程的高质量发展,保障水资源的安全利用和可持续发展。

参考文献:

- [1] 刘建忠. 水工建筑工程施工中帷幕灌浆施工技术分析[J]. 城市建设理论研究(电子版),2024(21):122-124.
- [2] 谭韬. 水工建筑施工中帷幕灌浆技术的施工工艺与优化建议[J]. 工程技术研究,2023,08(24):89-91.
- [3] 罗坤城. 水工建筑工程中的帷幕灌浆施工技术研究[J]. 工程技术研究,2023,08(21):80-82.
- [4] 唐振东. 水工建筑工程施工中帷幕灌浆施工技术分析[J]. 冶金管理,2022(23):71-72.
- [5] 司利斌,郭雷. 帷幕灌浆施工技术在水利工程大坝基础防渗加固处理中的应用研究[J]. 价值工程,2025,44(11):128-130.