

固结灌浆在水利工程检测中的研究

高铈涵

中国水电建设集团十五工程局有限公司 陕西 西安 712000

摘要: 固结灌浆是水利工程岩体加固的核心技术,其施工质量直接决定工程结构安全与长期运行稳定性。本文阐述固结灌浆基础理论、应用范围及质量影响因素,系统分析超声波检测法、钻孔取芯检测法等常用检测方法的原理、操作流程及适用场景,梳理检测过程中数据误差、地质复杂、衔接不畅等常见问题,提出针对性解决对策。研究表明,合理选用检测方法、规范检测流程、强化协同管控,可有效提升检测准确性,为水利工程固结灌浆质量控制提供技术支持。

关键词: 固结灌浆; 水利工程; 常用检测方法

引言: 水利工程作为国民经济基础设施,其坝基、隧洞等部位的岩体稳定性至关重要。固结灌浆通过胶结岩体裂隙、提升岩体性能,成为改善岩体稳定性的关键技术,而科学有效的检测工作是保障灌浆质量的核心环节。当前,水利工程地质条件日趋复杂,现有检测方法在实际应用中仍存在诸多问题,影响检测结果的可靠性。基于此,本文围绕固结灌浆相关理论、常用检测方法、检测问题及对策展开研究,旨在完善固结灌浆检测技术体系,解决工程实际检测难题,为水利工程安全运行提供可靠保障。

1 固结灌浆相关基础理论

1.1 固结灌浆的基本原理

固结灌浆是水利工程中改良岩体性能的核心技术,其核心原理是通过专用设备将配置好的灌浆材料,在一定压力作用下注入岩体裂隙、孔隙及松散岩层中,利用材料的胶结硬化特性,将分散的岩体颗粒或裂隙胶结为整体,从而提升岩体的整体性、强度和抗渗性。灌浆过程中,浆液会逐步渗透、填充岩体缺陷,排除裂隙内的水分和空气,经凝结硬化后形成牢固的结石体,与原岩体共同承担荷载,有效改善岩体的力学性能和防渗能力,为水利工程结构安全提供保障。

1.2 水利工程中固结灌浆的应用范围与要求

在水利工程中,固结灌浆应用广泛,主要适用于坝基岩体、隧洞围岩、边坡岩体及泄水建筑物基础等部位,尤其针对裂隙发育、岩体松散、强度不足的地质区域,是必不可少的加固处理手段。其应用要求严格,需结合工程地质条件、结构设计要求确定灌浆参数,确保灌浆质量;施工前需进行现场试验,优化灌浆材料配比和施工工艺;施工中需控制灌浆压力、浆液流量和灌浆顺序,避免出现漏浆、串浆等问题;灌浆后需通过检测验证加固

效果,确保满足工程设计的强度和防渗要求。

1.3 固结灌浆质量影响因素分析

固结灌浆质量受多种因素影响,主要分为三类:(1)地质条件因素,岩体裂隙的发育程度、分布规律、开度大小及岩体渗透性,直接影响浆液的渗透和填充效果,裂隙过宽或渗透性过强易导致浆液流失,影响结石体强度;(2)施工参数因素,灌浆压力、浆液流量、灌浆时间及施工顺序不合理,会导致浆液填充不充分、结石体不均匀;(3)材料性能因素,灌浆材料的配比、凝结时间、强度及流动性,直接决定结石体的质量,材料不合格会导致固结效果不佳,无法达到工程加固要求^[1]。

2 水利工程固结灌浆常用检测方法

2.1 无损检测方法

2.1.1 超声波检测法

超声波检测法是固结灌浆无损检测中应用最广泛的方法之一,其检测原理基于超声波在不同介质中的传播特性差异。(1)均质完整的岩体或结石体中,超声波传播速度快、能量衰减小;(2)灌浆不密实、存在裂隙或空洞的区域,超声波会发生反射、折射和散射,导致传播速度降低、能量衰减增大;(3)通过测量超声波的传播速度、振幅、波形等参数,与标准参数对比,可判断灌浆体密实度、完整性及岩体固结效果。

结合水利工程实际,其操作流程分为四步:(1)检测前准备:清理检测点位杂物、浮浆,确保检测面平整干净;按工程地质和灌浆范围,采用网格布置法确定检测点位,间距控制在0.5-1.0m;校准超声波检测仪,保障仪器精度。(2)耦合处理:在检测面涂抹凡士林、黄油等耦合剂,减少超声波能量损耗,确保探头与检测面紧密贴合。(3)数据采集:将发射探头和接收探头置于检测点位两侧,启动仪器记录传播时间、振幅、波形等数

据,每个点位重复采集3-5次,取平均值避免偶然误差。(4)数据处理与分析:将检测参数与设计标准、规范要求对比,绘制传播速度分布图,分析异常点位规律,判断灌浆体是否存在不密实、空洞、裂隙等缺陷,结合地质资料综合评价岩体固结效果^[2]。

2.1.2 回弹法

回弹法的检测原理基于材料回弹特性与强度的相关性:(1)回弹仪弹击锤在弹簧弹力作用下撞击灌浆体或岩体表面,回弹值与材料抗压强度呈正相关;(2)抗压强度越高,弹击锤受到的阻力越大,回弹值越高,反之则越低;(3)通过测量回弹值,结合换算公式可推算灌浆体抗压强度,进而评价灌浆质量。

该方法适用范围明确,主要用于检测固结灌浆结石体的抗压强度,尤其适合坝基、边坡等部位表面灌浆体的快速检测。实际操作需注意:(1)检测面需平整、干燥,避免浮浆、油污影响结果;(2)灌浆体龄期需达到28天以上,确保结石体强度达到设计强度70%以上,防止回弹值偏低影响推算准确性;(3)回弹法仅能检测表面强度,无法反映内部质量,需与其他方法结合使用。

2.1.3 地质雷达检测法

地质雷达检测法属于电磁检测方法,其原理的核心是:(1)通过发射天线向灌浆体及岩体内部发射高频电磁波;(2)电磁波遇到不同介质分界面(灌浆体与岩体界面、不密实区域、裂隙、空洞等)时,会发生反射和散射,反射波被接收天线记录;(3)不同介质的介电常数、导电率不同,反射波的传播时间、振幅、频率等参数也会存在差异,通过分析这些参数可判断灌浆体完整性、密实度及内部缺陷的位置、大小和形态。

该方法的核心难点是数据解读,结合水利工程实际,解读原则为:(1)识别标准波形,灌浆密实、无缺陷区域,电磁波传播顺畅,反射波振幅小、波形平缓,无明显异常信号。(2)判断缺陷信号,存在不密实、空洞或裂隙时,会出现强反射信号,传播时间延长,波形畸变、杂波增多,其中空洞区域反射波呈“双曲线”特征,裂隙区域呈“连续强反射”特征。(3)量化缺陷参数,通过反射波传播时间和电磁波在灌浆体中的传播速度,推算缺陷埋藏深度,结合反射波振幅和波形宽度,判断缺陷大小和范围。

2.2 无损检测方法

2.2.1 钻孔取芯检测法

钻孔取芯检测法是有损检测中最直接、最可靠的方法,其原理为:(1)通过专用钻孔设备在灌浆区域钻取芯样;(2)通过观察芯样外观、测量芯样参数、开展室

内试验;(3)直接判断灌浆体密实度、完整性、结石体与岩体结合程度及两者力学性能,是水利工程灌浆质量验收的必选方法。

芯样分析是该方法的核心环节,结合工程实际检测要求,主要包括三方面:(1)外观质量分析,观察芯样完整性、连续性,判断是否存在裂隙、空洞、夹泥等缺陷,记录芯样颜色、结构,评价灌浆材料扩散范围和胶结效果;(2)参数测量,测量芯样直径、长度,计算采取率(芯样长度与钻孔深度的比值),通常要求采取率不低于85%,同时测量结石体厚度,判断填充效果;(3)室内试验,将完整芯样送至实验室,开展抗压强度、抗渗、变形模量试验,测定相关参数并与设计值对比,验证是否满足工程要求。

其操作流程包括钻孔布置、钻孔施工、芯样采取、芯样整理、芯样分析和报告编制:(1)钻孔布置结合无损检测异常点位和灌浆关键区域;(2)钻孔深度需穿透灌浆层,进入原岩体不小于0.5m,确保芯样完整反映灌浆效果;(3)钻孔施工中需控制钻孔速度和泥浆配比,避免破坏芯样完整性。

2.2.2 压水试验检测法

压水试验检测法主要用于检测灌浆后岩体的渗透性,其原理基于水力学达西定律:(1)水流在岩体裂隙中的渗透速度与作用水头成正比,与渗透路径长度成反比;(2)向钻孔内施加一定水压,使水通过岩体裂隙渗透,测量不同水压下的渗流量;(3)根据达西定律计算渗透系数,渗透系数越小,说明灌浆效果越好、岩体渗透性越低,反之则灌浆效果不佳。

该方法的核心是参数计算,主要包括两方面:(1)渗透系数计算,当试验段位于均质岩体、水流呈层流状态时,公式为 $k = (Q \times L) / (A \times H)$,其中 Q 为渗流量(m^3/s), L 为试验段长度(m), A 为试验段横截面积(m^2), H 为作用水头(m);(2)透水率计算,透水率 $q = Q / (L \times H)$,单位为 Lu (吕荣), $1Lu = 1L / (min \cdot m \cdot m)$,水利工程通常要求灌浆后岩体透水率不大于 $1-3Lu$,具体按设计要求确定。

其操作流程主要包括:(1)试验钻孔布置,结合灌浆区域地质条件和抗渗要求,布置在关键部位和无损检测异常区域;(2)钻孔冲洗,清除钻孔内杂物、浮浆,避免堵塞岩体裂隙;(3)栓塞安装,确保栓塞严密、防止漏水,保障水压有效作用于试验段;(4)水压施加,分级进行3-4级水压,每级水压稳定后保持30-60min,测量对应渗流量;(5)参数计算,根据测量数据计算渗透系数和透水率,评价灌浆抗渗效果^[3]。

2.3 其他辅助检测方法

2.3.1 声波透射法

声波透射法的检测原理与超声波检测法类似，均基于声波在不同介质中的传播特性差异，但存在明显区别：（1）采用单孔或双孔检测模式，更适用于深孔灌浆检测；（2）双孔模式将发射换能器和接收换能器分别置于两个平行钻孔中，单孔模式置于同一钻孔不同深度；（3）通过测量声波传播时间、波速、振幅等参数，分析灌浆体完整性和密实度。该方法优势是能检测较深部位灌浆质量，适用于坝基深层固结灌浆检测，尤其适合长桩式灌浆体缺陷检测，检测精度高于超声波检测法。

2.3.2 动测法

动测法的检测原理基于岩体及灌浆体的振动特性：（1）对灌浆体及岩体施加振动荷载，使其产生弹性振动；（2）利用传感器测量振动信号的频率、振幅、阻尼比等参数；（3）结合振动理论，推算动弹性模量、剪切模量等力学参数，进而评价灌浆体密实度和岩体固结效果。该方法分为稳态动测法和瞬态动测法，水利工程中常用瞬态动测法，通过锤击等方式施加瞬时振动荷载，快速采集并分析振动信号。其优势是检测速度快、对结构损伤小，适用于大面积快速排查，通常作为辅助方法，与超声波检测法、钻孔取芯检测法结合使用，提高评价准确性和可靠性^[4]。

3 固结灌浆检测过程中的常见问题及解决对策

3.1 检测过程中的常见问题

结合水利工程固结灌浆检测现场实际，检测过程中常见问题主要有四方面：（1）检测数据误差过大，因仪器未及时校准、操作不规范及环境干扰，导致数据离散性大，无法真实反映灌浆质量。（2）复杂地质条件下检测困难，坝基、隧洞等地地质复杂，岩体裂隙不均、含水量差异大，造成地质雷达电磁波衰减严重、压水试验渗流量不稳定，难以获取有效数据。（3）检测与施工衔接不畅，施工单位未及时提供灌浆参数等资料，或检测时机不当，导致点位遗漏、结果失真。（4）检测标准应用不规范，检测人员对SL、GB系列标准理解不深，未结合实际调整参数，检测结果缺乏针对性。

3.2 针对性解决对策

针对上述常见问题，结合工程实践经验，制定以下

针对性解决对策：（1）严控数据误差，检测前严格校准各类检测仪器，定期开展仪器校验维护；规范检测操作流程，明确各方法操作要点，如超声波检测确保探头贴合紧密、回弹法清理检测面并控制检测角度，同时规避环境干扰，选择合适检测时段，对离散性大的数据进行重复检测、合理取舍。（2）优化复杂地质检测方案，提前勘察地质条件，结合岩体裂隙、含水量等参数调整检测方法和参数，如地质雷达检测在高含水量岩体区域加大发射功率，压水试验延长稳压时间，确保获取有效数据；必要时采用多方法联合检测，弥补单一方法的局限性。（3）构建检测与施工协同机制，建立施工与检测单位常态化沟通渠道，施工单位及时提供灌浆参数、施工日志等资料，检测单位结合施工进度制定检测计划，明确检测时机和点位，避免遗漏关键区域，确保检测工作与施工进度同步衔接。（4）强化标准落地执行，加强检测人员专业培训，深入解读相关检测标准，明确不同工程场景下的检测要求；结合工程实际制定专项检测方案，灵活调整检测参数，确保检测工作规范、有序，检测结果符合工程设计和标准要求^[5]。

结束语：本文围绕固结灌浆在水利工程检测中的应用展开全面研究，系统梳理了固结灌浆基础理论，详细分析了各类检测方法的优劣及适用场景，针对性提出了检测过程中常见问题的解决对策，结合工程实际形成了一套贴合现场的检测管控思路。后续可结合更多工程实例深化研究，进一步完善检测技术与标准，推动固结灌浆检测技术在水利工程中实现更高效、精准的应用。

参考文献：

- [1]郭帅帅,毛成宾,张侗侗.固结灌浆在水利工程检测中的研究[J].建材与装饰,2025,21(12):160-162.
- [2]李阳,沈志平.固结灌浆在水利工程检测中的研究[J].现代工程项目管理,2025,4(23):11-12.
- [3]方智畅.水利工程帷幕灌浆质量检测技术与应用分析[J].湖南水利水电,2025(3):78-79+85.
- [4]朱桂权.水利工程固结灌浆质量检测中声波法的应用研究[J].文渊(高中版),2021(12):2431-2432.
- [5]孙经纬.某水利工程引水隧洞固结灌浆质量检测成果分析研究[J].东北水利水电,2025,43(4):60-62.