

Application of grouting technology in foundation treatment of hydraulic hub engineering

Saizhao Liu

SINOHYDRO BUREAU 7 CO., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611130, China

Abstract

As an important component of water conservancy hub projects, the construction quality of the foundation, its safe operation after investment, and its seepage control grouting treatment are closely related. Therefore, the current requirements for seepage control in foundations are becoming increasingly stringent. In view of this, the article first reviews the application value of seepage control grouting technology in hub foundations. Subsequently, in the section on application points, it systematically analyzes the specific practices and experiences of five different types of seepage control grouting technologies in China's water conservancy hub projects, aiming to provide technical references for engineering and technical personnel engaged in foundation treatment of water conservancy hubs.

Keywords

water conservancy hub project; foundation treatment; grouting technology; application; value; key points

防渗灌浆技术在水利枢纽工程地基处理中的应用

刘赛钊

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国 · 四川 成都 611130

摘 要

地基作为水利枢纽工程中重要组成部分, 工程的建设质量、投入后安全运营性与其防渗灌浆处理有着很大的联系, 因而当前对地基渗流控制的要求日益严格。有鉴于此, 文章首先梳理了防渗灌浆技术在枢纽地基中的应用价值, 随后在应用要点部分, 系统分析了五项不同类型的防渗灌浆技术在中国水利枢纽工程中的具体做法与经验, 旨在为从事水利枢纽地基处理的工程技术人员提供技术参考。

关键词

水利枢纽工程; 地基处理; 防渗灌浆技术; 应用; 价值; 要点

1 引言

随着国家现代化程度的不断加深, 各种现代化技术也在突飞猛进向前发展, 其中水利枢纽工程的地基施工技术也取得巨大的进步, 新的技术有力地支持了水利水电工程的地基建设, 提升了工程的整体质量, 但同时也对地基处理技术提出了更高的、新的要求。为此, 文章基于这一主题相关文献资料研究以及工作实践围绕于防渗灌浆技术在水利枢纽工程地基处理中的应用展开探讨, 以供参考。

2 防渗灌浆技术在水利枢纽工程地基处理中的应用价值

在水利枢纽工程建设中, 坝基与库岸地基常面临岩溶裂隙发育、破碎带发育、砂砾夹层及高水位反复渗流的耦合

作用, 在地基承载与渗流安全方面提出严峻挑战。采用防渗灌浆技术, 可以通过将浆液注入地基裂隙、孔隙及薄弱层, 形成连续或半连续的低渗透固体, 从而削减渗流通道、阻断地下水径流路径、降低渗透系数并减小渗压梯度。根据水工建筑物技术导则指出, 在岩溶地基处理时, 应采用帷幕灌浆、固结灌浆等措施以形成防渗体。此外, 防渗灌浆技术还能提升地基的刚度和固结效果, 通过浆液胶结作用增强地基整体固结体的抗变形能力, 从而为坝体与防渗墙提供稳固基础^[1]。由此可见, 防渗灌浆不仅弥补了传统混凝土、防渗墙、防渗膜方法在裂隙复杂、渗流控制难度大地层的短板, 而且在水利枢纽工程地基处理中具有非常突出的应用价值。

3 防渗灌浆技术在水利枢纽工程地基处理中的应用要点

3.1 高压喷射灌浆在砂砾石地基处理中应用

在砂砾石层或碎石层广泛存在的枢纽工程坝基中, 由于颗粒粗、孔隙大、渗流通道短、地下水压力高, 常规灌浆

【作者简介】刘赛钊 (1992-), 男, 中国河南鲁山人, 本科, 工程师, 从事水利水电施工及管理研究。

难以取得良好密实效果。在砂砾石地基中实施高压喷射灌浆时,需依据详勘成果确定砂砾层厚度、颗粒级配及渗透系数,设计合理孔网布置,孔距一般取 1.0m,孔径约 150mm,孔斜控制在 1% 以内,钻孔时保证孔位精度与垂直度以利喷射装置运行。制浆系统宜采用集中制浆方式,浆液可选水泥—黏土浆或细水泥浆,浆液比重控制在 1.5g/cm³ 以上,通过高压设备以 33—37MPa 水压和 0.2—1.0MPa 浆压喷射,喷浆流量 60—75L/min,喷头提升速度 8cm/min,旋转速度 0.8—1.0Vr/min。施工多采用三管法(浆、气、水)或二管法(浆、水),以自下而上顺序实施 I、II 序孔灌浆,相邻孔间隔不小于 24h,确保相邻固结体搭接形成连续帷幕。喷射中应实时监测注浆压力、浆量及回流量,若冒浆不足则掺加速凝剂并降低提升速度,若冒浆过量则适当提高压力并加快提升,控制浆液扩散半径及帷幕厚度。喷射结束后应立即送注清浆回填孔口至浆面稳定,并冲洗管路防止堵塞。施工质量控制要求孔位偏差 ≤5cm、孔斜偏差 ≤1%,喷射至距桩顶 1m 处减速提升以保证顶部致密性,冒浆比重大于 1.25g/cm³ 且冒浆量不超过注浆量 30%。通过上述参数控制与施工组织,可在砂砾石层中形成由浆液与土、碎石颗粒相互搅拌固结的连续致密体,有效削减地基渗透系数并延长渗流路径,实现坝基防渗与加固同步处理,满足水利枢纽复杂渗流条件下的坝基防渗要求^[2]。

3.2 帷幕灌浆技术在裂隙岩体或存在断裂带地基处理中应用

在水利枢纽工程中,针对裂隙发育明显或存在断裂带的岩体地基采用帷幕灌浆技术,需从如下几个方面实施具体专业操作。首先,在施工前必须开展详尽的地质探查,对断裂带走向、倾向、倾角、破碎带厚度及裂隙密度进行钻孔取芯、声波检测与压力水试验,以明确灌浆帷幕深度、孔距及孔径设计。依据帷幕灌浆规范要求,地基防渗帷幕下沿宜深入至稳定基岩或隔水层下方,并可按规范中 8~15m 加深原则布置。其次,在钻孔施工阶段,应选择沿坝轴等效位置设排孔,常见布孔方式为两排或三排布置,孔距视裂隙密度而定一般为 1.5~3.0m。钻孔完成后,须进行孔内冲洗、裂隙水压冲洗和简易压水,以清除裂隙内游离物与扰动水,保证浆液与裂隙直接接触并渗入。第三,在灌浆阶段,推荐采用循环式灌浆方法:注入浆液的同时回抽部分浆液,通过循环可监测吸浆量变化及判断裂隙封堵情况。施工初期选用水灰比较大的水泥浆(例如 5:1),待注入速率下降且注入量趋于稳定后,逐级变换至 3:1、2:1 乃至 1:1,最后遇可灌性差岩体时可掺加化学浆液或加细水泥。灌浆段长度一般为 5~6m,最大不超过 10m,且应自下而上或自上而下分段灌注,采用逐段加密原则,即先灌边排孔、再灌中间排孔。第四,在灌浆期间必须严格控制灌浆压力,其值由孔深、岩层特性及上覆荷载情况确定;初级可采用一次升压法迅速提升至设定压力,若注入率过大状况持续,则改为分级

升压法^[3]。灌浆结束标准可依据注入率与维持时间判定,例如当注入率 ≤0.4L/min 维持 60min 或 ≤1L/min 维持 90min 时方可结束。最后,在灌浆完成后,需要对帷幕灌浆效果开展质量检测:钻设检查孔,自上而下进行压水试验,采用单点法或五点法测定透水率 g 值,常规控制为 g ≤1~5Lu。与此同时,还应监测地基是否产生上抬变形情况。

3.3 固结灌浆技术强化软弱土体或变形潜势大的地基处理

在枢纽工程地基处理环节,针对软弱土体或变形潜势大的地基,固结灌浆技术的应用可细化如下:首先,在地质探测阶段,应开展钻探、声波透射、三轴剪切及原地变形模量测试,明确软土层、粉土、淤泥质土或破碎岩体的强度、透水性、空隙结构与潜在变形趋势,并据此划定固结灌浆处理区与孔网布置范围。接着,根据划定的处理区设计灌浆孔网形式(如梅花形布置、矩形布网或加密区集中布孔),确定孔间距、孔深与注浆序列,例如浅层先密布、深层后加压,结合现场地层条件调整孔网加密至 2.5m × 2.5m 或更密。然后,在浆液配比方面,依据土/岩体渗透系数、裂隙宽度、注浆压力及回流情况,选用水泥—粉煤灰—减水剂组合浆液或化学浆液/无收缩浆体,控制其流变特性、凝结时间、强度增长及抗渗性能,确保浆液在注入后能充分渗透孔隙或裂隙并形成连续固结体。其后,在灌浆施工阶段,必须严格控制注入压力、注入速率及累积注入量,同时监测浆液回流、视冒浆情况及注浆量与孔压曲线,通过实时调整注浆压力或泥浆浓度应对浆液漏失、串孔或压力击穿问题;对于浅表弱化层可采用先封闭裂隙(如涂刷封闭浆或聚合物黏结剂)操作,再进行加压注浆^[4]。最后,在固结灌浆完成后,应开展承载力静载试验、变形模量检测、渗透系数测试与声波波速复测,确认处理区地基承载能力、密实性及渗透性能是否达到设计要求,如检测结果不合格,则应实施补加密灌浆或引管灌浆处理。

3.4 低压灌浆 + 分段锁闭技术在基础施工期渗水控制中的应用

在枢纽工程地基施工期,为控制基坑渗水与承压水释放,常采用低压灌浆 + 分段锁闭技术实现动态防渗控制。施工初期在基坑外围或坝肩布置灌浆孔网,孔距与排距一般为 2~4m,按梅花形或棋盘形布置,具体依据地质条件、承压水头及渗透系数确定。灌浆采用低压注入方式,压力控制在 ≤3MPa,以防止浆液扰动地层或诱发裂隙扩展。浆液多采用水泥浆或水泥—砂浆体系,其水灰比经现场试验确定,以确保在低压条件下注入均匀、流动性与稳定性兼顾。初期灌浆形成外围注浆帷幕后,随基坑开挖推进实施环向分段锁闭灌浆。锁闭段通常按地质条件划分,每段 5~10m,沿基坑边缘或围堰布设,通过依次封闭渗透通道构建连续闭合的防渗体系。施工过程中同步监测地下水水位、孔隙水压力与渗流量变化,依据监测数据动态调整注浆顺序与压力等级,

确保注浆区间压力均衡、防止反向渗流或局部冒浆。监测点布设于灌浆孔群周边与基坑底部,数据异常时应及时降低注浆速率或暂停锁闭作业。灌浆完成后,采用孔压水试验、出浆流量监测及返浆量记录等方式进行效果检测,必要时取样测试浆体固结强度及渗透系数。当浆液稠度与流量达到设计要求,且渗透系数较原状降低一个数量级以上,即可判定注浆段合格。该技术可在施工期形成连续防渗屏障,有效降低基底渗透量、抑制承压水涌出、控制泥浆扰动,为基坑开挖与后续主体施工提供稳定的水文地质条件。

3.5 化学浆液注浆技术在微裂隙、高渗透岩体中的精细防渗应用

在岩体裂隙密集、渗透赋存度高的枢纽工程中,采用化学浆液注浆技术以实现精细防渗需从以下几个关键环节逐项落实。首先,在裂隙探测与孔网布置阶段,应借助声波、钻芯与干钻前水压试验等方法明确裂隙网络分布、缝宽、渗透系数及贯通性状,然后依据裂隙缝宽小于2mm、渗透系数大于 10^{-4} m/s的判定条件,按步距1.0~1.5m、孔深达基岩透水层底线布设注浆孔,并优先采用三序施工方式(先序、次序、末序)以保证浆液覆盖连续帷幕。其次,在浆液配比与室内外试验阶段,应选用低粘度、高扩散性的化学浆液(如硅溶胶、水玻璃系列、微细水泥-活性粉体浆等),通过实验确定胶凝时间(一般控制在10~15min以兼顾扩散半径2.0~2.5m以内)和固结抗压强度(对试芯常要求 ≥ 1 MPa以上)等参数。配比试验中还需测定浆液密度、渗透衰减系数、浸润扩散距离与固化体体积变化^[5]。再次,在脉冲压力注入实施阶段,应采用可变压脉冲灌浆法,先以较低压力运行使浆液进入细微裂隙,待出现回流或压力反弹后切换至设计注浆压力;注浆过程中需控制单孔注浆量、注浆压力幅度及段长(段长常为0.5~1.0m),并设定“吸浆停止”(即连续3次不吸浆或注浆率 ≤ 0.02 L/(min·m))为段结束条件。随后,在注入完成后应进行回流监测与修补灌浆:利用观察

孔或钻孔取样结合电阻率探测技术监测浆液是否回流至孔口、固结体是否形成闭合屏障,并对回流率高、浆液散失严重或渗透系数仍超标区域实施补充灌浆。最后,在浆液固化阶段与后期质量检测方面,应控制浆液固化时间及环境水位状态,待固化体达预定强度后开展压水试验或水头差监测以判定防渗效果,并依据检测结果调整修补程序。整个流程中,需同步严格监控浆液的粘度、扩散半径、固化前后渗透率变化,以及施工当时的水位和孔内静水压力条件。

4 结语

综上所述,对于水利枢纽工程而言地基的地位更是举足轻重,地基处理中防渗灌浆施工技术的应用会在很大程度上影响着工程的整体质量和使用寿命。对此,上文从中国水利枢纽工程地基处理中防渗灌浆技术的应用价值出发,结合实际工程经验与技术实践,梳理了高压喷射灌浆、帷幕灌浆、固结灌浆、低压分段锁闭灌浆及化学浆液注浆五项关键技术要点。希望从事枢纽工程地基处理的技术人员借鉴上述方法,提升施工管理与技术实施水平,以满足复杂地质条件下防渗需求。

参考文献

- [1] 季晓冬.布尔津山口水利枢纽工程基础帷幕灌浆施工技术[J].四川水利, 2023, 44(3):67-70.
- [2] 李娟,李发权,邵晓妹,等.混凝土裂缝修补技术在汉江兴隆水利枢纽工程中的应用[C]/2023水利水电地基与基础工程技术创新与发展.2023.
- [3] 石海峰.水利枢纽工程防渗方案及施工技术研究[J].四川水泥, 2024(4):135-137.
- [4] 李琪.水利枢纽工程中的混凝土防渗技术及施工方案研究[J].建筑技术开发, 2025, 52(2):31-33.
- [5] 高庆广,范宇.水利枢纽工程中的混凝土防渗技术及施工方案研究[J].现代装饰, 2025(15).