

水利工程中的渗流分析与控制技术研究

曾国珺

江西同济建设项目管理股份有限公司 江西 萍乡 337000

摘要：水利工程中，渗流分析与控制至关重要。本文先阐述渗流分析核心内容，包括渗流场特性、渗透压力计算及渗透变形评估；接着介绍防渗、排水、加固与防护等控制技术类型；探讨技术应用考量，如工程适配性、环境影响及效果评估；最后展望发展方向，涵盖分析方法优化、控制技术创新及监测预警融合，为水利工程渗流问题提供全面参考。

关键词：水利工程；渗流分析；控制技术；渗透变形；监测预警

引言：水利工程关乎国计民生，渗流问题影响工程安全与效益。渗流在不同介质中流动状态复杂，渗透压力分布受多种因素影响，还可能引发渗透变形，威胁工程结构稳定。不同水利工程渗流特点各异，且受环境因素制约。深入研究水利工程渗流分析与控制技术，对保障工程安全运行、充分发挥工程效益具有关键意义。

1 渗流分析的核心内容

1.1 渗流场特性分析

研究渗流在不同介质中的流动状态需考虑岩土体的物理性质差异。均质岩土体中渗流呈现相对均匀的流动特征，流速和流量分布较为稳定；非均质岩土体因不同区域渗透性差异显著，渗流会沿高渗透性通道集中流动，形成局部流速加快、流量增大的现象。岩土体中的裂隙发育程度也影响流动状态，密集裂隙网络为渗流提供多条路径，使水流分布更复杂^[1]。分析渗流方向与路径需结合工程结构形态。坝体与地基接触部位因材料性质变化，易形成沿接触面的渗透轨迹；边坡存在的软弱夹层会引导水流顺层渗透，改变原有渗流方向。边界条件对渗流场分布的作用体现在工程结构的约束上，闸坝的防渗帷幕会阻挡部分水流，迫使渗流路径绕行，形成新的渗流场分布形态；渠道的衬砌结构则限制渗流向外扩散，使渗流场主要集中在渠道内部及周边有限范围。

1.2 渗透压力计算

渗透压力的形成机制与水流运动过程密切相关。水流在渗透过程中因克服岩土体阻力消耗能量，这种能量转化表现为对工程结构的作用力。水头差越大，水流运动的能量越充足，产生的渗透压力也相应增大。不同工程部位的渗透压力分布规律各具特点。坝基的渗透压力分布受地基岩土体渗透性影响，在透水层较厚区域压力分布相对均匀，遇局部不透水夹层则会出现压力突变。防渗体两侧因水头差异形成明显的压力梯度，迎水面压

力随水位升高而增大，背水面压力则因防渗体阻隔而显著降低。渗透压力的动态变化与水位波动同步，汛期水位上升时，坝体上下游的水头差扩大，渗透压力随之增强；枯水期水位下降，压力相应减弱。时间推移会使岩土体孔隙结构发生改变，如长期渗透导致的细颗粒流失，可能使局部渗透路径变宽，引起渗透压力重新分布。

1.3 渗透变形评估

评估渗流作用可能引发的工程结构变形需结合具体地质条件。管涌多发生在颗粒级配不均的砂土中，渗流携带细小颗粒通过粗颗粒间隙移动，逐渐形成管状通道，初期表现为局部冒水，随时间推移通道扩大，影响地基承载力。流土常见于黏性土或均匀细砂土，当渗透坡降超过临界值时，土体颗粒被整体掀起并随水流移动，导致地基表面出现隆起或塌陷。接触冲刷发生在不同介质接触面，如坝体与地基的结合部位，水流沿接触面流动时冲刷细小颗粒，使接触面逐渐扩大，削弱结构整体性。各类渗透变形的发生条件与岩土体性质、渗流坡降相关，疏松的砂土在较小坡降下就可能发生管涌，而密实的黏性土则需在较大坡降下才会出现流土。这些变形的发展过程往往从局部开始，逐步向周边扩展，若未及时控制，可能导致工程结构局部失稳，进而影响整体稳定性，加剧安全风险。

2 渗流控制技术的主要类型

2.1 防渗技术

构筑防渗体是阻断渗流路径的基础手段。黏土心墙依靠其低渗透性，在坝体中部形成连续的防渗屏障，施工时需分层碾压确保密实度，控制压实度偏差在允许范围内，避免因孔隙过大影响防渗效果。混凝土防渗墙适用于深层地基处理，通过专用设备在地基中浇筑形成墙体，墙体插入不透水层一定深度，墙体接头采用刚性连接技术，彻底切断地下水的渗透通道。沥青防渗层则具

有较好的柔韧性,能适应坝体的微小变形,铺设时需与基层紧密结合,采用热熔贴合工艺消除层间空隙,防止出现空鼓导致防渗失效^[2]。采用防渗帷幕需根据岩土体特性选择合适的灌浆材料,对裂隙发育的地基可注入水泥浆液,填充裂隙形成整体防渗结构;对渗透性较强的砂层则采用化学浆液,通过渗透胶结作用降低孔隙率。灌浆过程需控制压力和注浆量,采用分段式注浆工艺确保浆液均匀扩散,形成封闭性好的防渗屏障,减少水流在岩土体中的渗透空间。

2.2 排水技术

设置排水系统需结合工程结构特点合理布局。坝体排水孔通常沿坝高间隔布置,孔内放置透水管,透水管表面开设梅花形孔洞增强集水能力,周围填充级配砂石,使坝体内部的渗水通过排水孔集中排出,降低坝体浸润线高度。地基排水廊道多建于坝基下游侧,廊道壁开设进水孔,孔口安装滤网防止颗粒堵塞,收集地基中的渗透水并通过集水井排出,有效减少作用在坝基上的渗透压力。反滤层由多层不同粒径的砂石料组成,相邻层级间粒径比控制在合理范围,靠近渗流出口的一层采用细颗粒材料,防止土体颗粒被带出,外层则用粗颗粒材料保证排水通畅。优化排水布置方式需兼顾效率与安全,排水设施应避免结构受力关键部位,采用数值模拟方法验证开孔位置对结构强度的影响,避免因开孔过多削弱结构强度。排水路径的设计应短捷顺畅,减少水流在排出过程中的阻力,同时避免排水过程中对周边岩土体造成冲刷,确保排水系统长期稳定运行。

2.3 加固与防护技术

对易发生渗透变形的部位进行加固需针对性选择技术措施。在砂土边坡或地基中铺设土工合成材料,选用具有耐酸碱性能的复合土工膜,利用其抗拉强度和整体性约束土体颗粒移动,增强土体的抗渗能力和结构稳定性。材料铺设时需保证连续性,接头处采用搭接或焊接处理,搭接长度满足规范要求,避免出现渗漏通道。坡面防护可采用干砌石、浆砌石等方式,块体尺寸根据水流速度确定,覆盖在边坡表面形成保护层,分散水流对坡面的冲刷力,减缓土体流失。接缝处理是防止渗漏的关键环节,在混凝土结构的施工缝、伸缩缝处设置止水带,止水带采用遇水膨胀型材料,与混凝土紧密结合,确保接缝处的水密性。对运行过程中出现的裂缝,及时采用嵌缝材料填充并进行表面封闭,选用与基层材料相容性好的密封胶,阻止水流渗入加剧裂缝扩展。这些加固与防护措施相互配合,形成多层次的防护体系,抑制渗透破坏从局部向整体发展。

3 渗流分析与控制技术的应用考量

3.1 工程类型适配性

不同水利工程的渗流特点差异显著,需针对性选择分析方法与控制技术。水库的渗流主要集中在坝体与坝基,坝体挡水形成的水头差大,渗流路径长且复杂,数值模拟方法能较好地反映三维渗流场分布,控制技术可优先采用混凝土防渗墙结合坝体排水孔,兼顾防渗与降压需求^[3]。堤防工程沿江河分布,渗流多表现为堤身渗漏与堤基管涌,渗流分析需重点关注堤内外水位差引发的渗透坡降,控制技术适合采用防渗膜铺设与减压井结合,适应堤防长距离、多段面的结构特点。渠道的渗流以侧面渗漏为主,影响输水效率,渗流分析可采用简化的二维计算模型,控制技术选用沥青防渗层或混凝土衬砌,直接减少水量损失。隧洞渗流受围岩渗透性影响大,高压水头下易出现裂隙渗漏,分析时需考虑岩体裂隙网络的分布,控制技术采用帷幕灌浆封堵裂隙,配合排水孔降低洞内渗透压力。技术应用需与工程功能相匹配,确保在满足安全要求的同时,符合工程运行的实际需求。

3.2 环境因素影响

水文条件的变化直接改变渗流动力,汛期水位骤升使坝体上下游水头差增大,渗流强度随之增强,需在分析中加大对高水位工况的模拟比重,控制技术可临时加密排水设施提升排水能力。地质构造中的断层、破碎带是渗流集中通道,分析时需细化该区域的岩土体参数,控制技术采用针对性的灌浆处理,封堵构造中的渗水路径。气候特征中的降雨会增加地表入渗,使边坡岩土体饱和度上升,渗流分析需纳入降雨入渗系数,控制技术可在边坡表面增设截水沟,减少雨水渗入量。岩土体性质随时间发生的变化也需纳入考量,长期渗流可能带走细颗粒导致渗透性增强,分析模型需预留参数调整空间,控制技术实施后定期检查防渗体完整性,及时修补因岩土体变形产生的裂缝。动态调整机制应贯穿分析与控制全过程,根据环境因素的变化灵活调整技术方案,确保应对措施的有效性。

3.3 技术实施效果评估

评估渗流分析结果与实际状况的吻合度,需对比分析计算得出的渗透坡降、浸润线位置与现场监测数据,差异较小时说明分析方法适用,差异过大则需重新审视岩土体参数选取或边界条件设定。控制技术的应用效果可从多方面衡量,渗漏量减少程度通过对比技术实施前后的实测渗流量判断,如渠道采用衬砌技术后,输水过程中的水量损失明显降低。渗透压力降低幅度需监测关

键部位的压力数值,坝基设置排水廊道后,基础混凝土底板所受压力应呈现稳定下降趋势。结构稳定性改善情况可通过观察边坡位移、坝体沉降等指标,技术实施后这类指标的变化幅度应控制在安全范围内。评估过程需结合工程运行阶段的不同需求,初期重点关注技术对渗流的直接控制效果,长期则需考察技术的耐久性,如防渗体是否出现老化、排水系统是否发生堵塞,确保控制效果持续稳定。通过全面评估,为后续技术优化提供依据,使渗流分析与控制更贴合工程实际。

4 渗流分析与控制技术的发展方向

4.1 分析方法的优化

探索更精准的渗流数值模拟技术需突破传统单一场分析的局限。多场耦合理论的应用将渗流与应力场紧密结合,考虑岩土体在渗流作用下的变形对孔隙结构产生的影响,以及结构变形反过来改变渗流路径的相互作用。模拟过程中引入动态参数,如岩土体渗透系数随孔隙水压力变化的函数关系,使计算结果更贴近工程实际^[4]。针对复杂地质条件,如断层破碎带、岩溶发育区,数值模型需细化网格划分,捕捉局部渗流的突变特征。通过引入人工智能算法优化计算过程,缩短模拟时间,提高对复杂工程条件下渗流规律的把握能力。分析方法还需增强对非稳态渗流的模拟能力,如暴雨入渗、水库水位骤变等工况,精准预测渗流场的瞬时变化,为工程应急处置提供技术支撑。模拟结果可生成可视化动态图谱,直观呈现不同时刻渗流场的分布特征,便于工程人员理解和应用。

4.2 控制技术的创新

研发新型防渗材料需兼顾性能提升与工程适用性。高性能防渗膜在保持柔韧性的同时提高抗穿刺能力,表面可设计特殊纹理增强与基层的摩擦力,减少铺设过程中的滑移风险。膜材配方中加入抗老化成分,延长在紫外线下的使用寿命。智能化排水系统集成自动调节功能,根据监测到的渗流量自动调整排水阀门开度,实现按需排水,避免能源浪费。排水设备的传感器可感知水流含沙量,当数值超标时自动启动过滤装置,防止细颗粒流失堵塞管道。绿色环保技术的应用体现在材料选择与施工工艺上,采用可降解的灌浆材料,在完成防渗功能后逐步融入自然环境,减少化学残留。施工过程中采

用低扰动工艺,如非开挖技术铺设防渗体,保护周边植被与土壤结构,维持生态系统的完整性。新型材料还可具备自修复功能,在微小破损出现时自动愈合,延长维护周期。

4.3 监测与预警融合

将渗流监测技术与分析、控制体系结合需构建闭环运行机制。监测设备布设覆盖工程关键部位,传感器实时采集渗透压力、渗流量、水位等数据,通过无线传输网络汇聚至数据处理中心。处理中心将监测数据与预设阈值对比,超出范围时自动触发分析模型的参数调整,使模型能实时反映工程当前的渗流状态。动态预警系统根据调整后的模型输出风险等级,当识别出管涌、流土等隐患前兆时,及时发出警示信息,指导现场采取针对性控制措施。预警阈值可根据工程运行阶段动态更新,如初期运行时设置较严标准,确保结构安全稳定;运行成熟后适当放宽,减少误报。监测与预警的融合还需实现控制措施的自动联动,如监测到某区域渗透压力骤升时,系统可远程启动该区域的备用排水设备,快速降低风险,提升工程渗流安全的保障水平。这种融合机制使分析、监测、控制形成有机整体,实现从被动应对到主动防控的转变。系统还可积累历史数据,通过趋势分析预判潜在风险,为长期维护提供决策支持。

结束语

水利工程渗流分析与控制技术,是保障工程安全稳定运行的核心要素。随着工程需求提升与环境变化,需持续优化分析方法、创新控制技术、融合监测预警。通过多维度研究与实践,构建更科学、高效、智能的渗流防控体系,以适应复杂多变的工程状况,为水利事业可持续发展筑牢坚实根基。

参考文献

- [1]张振文.防渗漏技术在水利工程中的应用分析[J].科技创新与应用,2023,13(14):189-192.
- [2]牛家盈,李斌.水利工程施工中的危险源识别及控制研究[J].水上安全,2024(23):109-111.
- [3]徐晓波.水利工程渗流控制技术与设计要点[J].工程建设与发展,2024,3(6):55-57.
- [4]刘霞.水利工程中的土石坝渗流控制技术研究[J].科海故事博览,2025(9):109-111.