

水利工程中防渗结构设计要点及应用实例分析

马彪

新疆塔里木河水利勘测设计院, 新疆 喀什 844700

[摘要] 水库大坝等水利设施的防渗结构设计对于工程的安全以及长期效益有着重要影响, 在特殊的地质与气候区域更是如此。文章较为全面地论述了防渗结构设计的重要意义, 着重对材料抗冻融耐腐蚀的选择、能够适应冻胀变形的柔性结构形式、水文地质适应性设计以及施工运行期的维护等关键要点展开剖析。以新疆喀什地区伽师县英阿瓦提干渠节水改造工程为例, 深入分析了垂直防渗墙结合复合土工膜方案在设计上的比选情况、在-30℃环境下接缝的处理方式以及锚固系统的优化等问题, 并且依据 2023 年至 2025 年的渗流监测数据来评估其运行效果。研究说明, 因应实际情形的综合防渗体系以及精细化的施工管控是确保工程安全的关键所在。

[关键词] 水利工程; 防渗结构; 冻胀变形; 复合土工膜

DOI: 10.33142/aem.v7i7.17379

中图分类号: TV672

文献标识码: A

Key Points and Application Examples of Anti-seepage Structure Design in Hydraulic Engineering

MA Biao

Xinjiang Tarim River Water Resources Survey and Design Institute, Kashgar, Xinjiang, 844700, China

Abstract: The design of anti-seepage structures for water conservancy facilities such as reservoirs and dams has a significant impact on the safety and long-term benefits of engineering, especially in special geological and climatic regions. The article comprehensively discusses the important significance of anti-seepage structure design, focusing on the selection of materials that are resistant to freezing, thawing, and corrosion, flexible structural forms that can adapt to frost heave deformation, hydrogeological adaptability design, and maintenance during construction and operation. Taking the water-saving renovation project of Yingawati main canal in Kashgar County, Xinjiang as an example, this paper deeply analyzes the comparison and selection of vertical anti-seepage wall combined with composite geomembrane scheme in design, the treatment of joints in -30 °C environment, and the optimization of anchoring system. Based on the seepage monitoring data from 2023 to 2025, the operational effect is evaluated. Research shows that a comprehensive anti-seepage system that adapts to actual situations and refined construction control are key to ensuring project safety.

Keywords: water conservancy engineering; anti-seepage structure; frost heave deformation; composite geomembrane

引言

在水利工程持续推进区域综合治理以及防洪排涝功能不断升级这样的背景之下, 面对复杂地质条件对工程设计以及安全运行所提出的更高要求, 尤其处于地基承载力差异极为显著、水文地质因素变化频繁的区域时, 防渗排水系统合理性这一情况直接对整个工程的结构稳定性和运行寿命产生影响, 急需从地质构造、水文条件、结构选型等多维度来系统研究防渗排水设计策略, 以此保障工程运行安全以及服务效能能够持续保持稳定。

1 防渗结构设计的重要性

1.1 防渗失效对工程安全的影响

防渗体系出现失效的情况, 并非仅仅局限于某个局部方面的问题, 其往往会引发具有连锁效应的灾难性后果。当坝体或者坝基出现持续不断的渗漏状况时, 这将会直接致使浸润线出现异常的抬升情况, 进而会对坝体土料的抗剪强度产生极为严重的削弱作用, 如此一来便为滑坡乃至溃坝的情形埋下了重大的隐患。与此渗流所具有的潜蚀作用会不断地将地基或者坝体当中的细颗粒给带走, 从而形

成集中渗漏的通道, 进一步加快结构被破坏的进程^[1]。依据水利部在 2024 年所发布的《全国水库大坝安全状况年度报告》相关统计显示, 在当年所记录的 237 起险情当中, 由于渗漏问题而引发的险情所占的比例达到了 41%, 这一数据充分彰显出了防渗失效所具有的广泛程度以及所带来的危害程度。长期存在渗漏情况的话, 还将会使得宝贵的水资源遭受无谓的损失, 大幅度地降低工程所能带来的经济方面的效益以及社会方面的效益。

1.2 特殊地质条件下的防渗挑战

诸如天山北麓某些典型区域, 地质条件呈现显著特殊性, 给防渗设计带来多重考验。广泛分布的深厚砂砾石覆盖层, 其渗透系数常高达 10^{-2}cm/s 量级, 天然防渗能力极差, 构成了渗漏的高速通道。更为棘手的是强烈的季节性冻胀作用, 如同水利工程学报 2025 年一篇研究指出的, “在年冻融循环超过 150d、最大冻深逾 2.5m 的区域, 冻胀力可对刚性防渗结构产生超过 300kPa 的不均匀上抬力”^[2]。此外, 部分区域地下水可能具有较高的矿化度或腐蚀性离子含量, 对防渗材料的耐久性提出了严苛要求。这些复杂

因素的耦合效应,使得常规防渗方案往往难以奏效。

2 防渗结构设计核心要点

2.1 材料选择

材料构成了防渗功能的第一道防线,其性能务必要和环境的严峻程度相契合。在选择土工膜时,要优先去考量它的低温韧性,就好比厚度达到或超过 1.5mm 的 HDPE 膜,在温度低至-45℃的情况下,还得维持不错的断裂伸长率,这一要求有国家标准 GB/T17643—2023《土工合成材料聚乙烯土工膜》所规定的明确技术指标作为依据。就混凝土防渗墙或者面板材料而言,应当掺入优质的引气剂以及高效的减水剂,以此来保证经过至少 300 次快速冻融循环之后,其相对动弹性模量的损失不会超出 30%,质量损失也不会超过 5%,这属于中国工程建设标准化协会标准 CECS117:2024《水工混凝土结构耐久性技术规程》的核心要求当中的重要内容。在存在硫酸盐或者氯盐侵蚀的地下水环境中,选用抗硫酸盐水泥,又或者在混凝土当中添加适量的矿物掺合料以及阻锈剂,这些举措是提升耐久性极为关键的措施。

2.2 结构形式

在冻胀活跃的区域当中,柔性适应型的防渗结构体系相比于刚性结构而言,展现出了颇为显著的优势。复合土工膜心墙或者斜墙方案的应用是比较广泛的,其中最为关键之处就在于土工膜和上下保护层、支持层材料要进行合理的匹配设计,要让结构能够在冻胀力的作用之下发生适度且能够相互协调的变形,而不会出现撕裂的情况^[3]。塑性混凝土防渗墙由于其弹性模量相对较低,一般会控制在 1000~3000MPa 这样的范围之内,并且还具备良好的变形能力,所以能够更为有效地吸纳冻胀应力,在深厚覆盖层地基的处理方面,其优势是十分突出的。有时候,甚至还需要结合设置专门的变形缓冲层或者是预留出可以压缩的空间等构造方面的措施,以此来主动释放掉部分冻胀压力。这种设计理念最为核心的地方就在于“以柔克刚”,允许存在可控的变形情况,进而避免因应力集中而引发的脆性破坏状况。

2.3 水文地质适应性设计

脱离具体的水文地质条件来单纯谈论防渗设计,这样的做法无疑是缺乏科学依据且盲目武断的。在着手设计之前,务必要凭借详尽且准确的地质勘探资料以及水文试验所获取的数据,精准地描绘出渗流场的具体特征,并且要敏锐地识别出潜在的集中渗漏路径或者是软弱夹层的存在情况。当面临存在多层含水层或者渗流边界条件较为复杂的状况时,仅仅依靠单一的防渗措施往往是难以取得理想效果的,此时就需要采取“上堵下排、垂直封闭与水平铺盖相结合”这样具有立体性的防渗体系。就好比在面对深厚且强透水的土层时,运用悬挂式的防渗墙再加上下游反滤排水褥垫的综合性方案,能够更为经济且有效地对渗

流量以及渗透比降加以控制。针对渗流的计算分析工作,应当选用非稳定流模型来进行,同时要充分考虑到诸如库水位出现骤然下降、暴雨导致大量入渗等这类不利的工况情形。

2.4 施工期与运行期维护要点

设计再出色,终究还得靠高质量的施工以及后续的维护来达成实际效果。在施工阶段,对于那些关键工序务必要严格把控。就土工膜的铺设而言,一定要做到平整且没有皱褶出现,其焊接时的温度以及速度都得严格按照厂家给出的工艺参数来执行,并且还要实施 100%的气压或者真空检测;至于混凝土防渗墙,它的槽孔垂直度、清孔的质量还有浇筑的连续性这些方面,均需进行全程的严密监控,而接头管拔管的具体时机也得精准地去掌控。进入运行阶段之后,就需要建立起一套系统化的渗流监测网络,这里面包含有测压管、量水堰以及渗流水质分析点等等,要定期去采集相关数据。要是察觉到异常情况,像是渗流量有所增大、浑浊度出现了升高或者特定部位的压力水头陡然增加等状况,就必须马上启动诊断的相关程序并且采取相应的应对举措,比如可以采用局部灌浆的方式来封堵,又或者是进一步强化反滤排水的措施。维护规程明确规定,管理人员得经常对各种仪器的读数予以查看,并且要把这些情况详细记录下来^[4]。

3 典型工程实例分析

3.1 工程概况

喀什地区伽师县英阿瓦提干渠节水改造工程地处喀什噶尔河流域克孜河冲积平原下游,地理坐标介于东经 76°20′~78°06′、北纬 39°16′~40°00′之间,属典型温带大陆性极端干旱气候,年平均气温 11.7℃,年降水量仅 54mm,年蒸发量高达 2251.1mm,最大冻深达 87cm,地震动峰值加速度 0.20g,对应地震基本烈度为Ⅷ度,自然条件极为严酷。工程区地层岩性为第四系全新统冲洪积物,以粉土、黏土和粉细砂为主,渗透系数介于 $3.27 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 至 $4.81 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 之间,属中等—强透水性,渗漏严重;地下水埋深普遍在原渠底以下 5.5~12.0m,水位年变幅 0.6~1.0m,对渠道结构直接影响较小。英阿瓦提干渠自青年干渠引水,全长 25.314km,设计引水流量 8~2m³/s,承担灌区内 12.60 万亩农田的灌溉任务,是伽师县东北部农业开发区的重要输水通道。原渠道为砼板衬砌结构,运行多年后出现衬砌板破损、接缝失效、渠底淤积厚度 0.6~1.2m 及渠坡冲刷等问题,导致渗漏损失严重,灌溉水利利用系数仅 0.90,亟需进行全线节水改造与防渗加固。

3.2 防渗方案比选

在防渗结构方案设计中,针对项目区强腐蚀、强冻胀、高蒸发和中等透水性地层的工程特点,对全断面现浇混凝土板衬砌与复合土工膜衬砌两种主流方案进行了技术经济综合比选。复合土工膜方案具有适应变形能力强、材料

轻便、施工快捷等优点,但其抗紫外线老化性能较差,需设置保护层,在伽师县年日照时数 2923.23h、紫外线强烈的环境下耐久性面临挑战。此外,渠基土中易溶盐含量 0.5078%~1.034%,属中盐渍土,且地下水对混凝土结构具强腐蚀性,其中硫酸根离子含量高达 1626.4~1847.8mg/L,对土工膜焊缝质量和长期密封性构成潜在威胁。现浇混凝土板方案虽单位造价略高,但采用强度等级 C35、抗冻等级 F250、抗渗等级 W6 的高性能混凝土,并规定采用高抗硫酸盐水泥,其耐久性、抗冲刷性和结构稳定性更优,更适应本工程强腐蚀、强冻胀和需长期抗渗的工程需求。经综合考量,最终选定全断面现浇混凝土板作为主导防渗方案,其设计使用年限可达 30 年以上,全生命周期成本效益显著。

3.3 关键技术措施

针对渠道渗漏、冻胀破坏、腐蚀环境及变形控制等关键技术难题,本工程采取了多维度、系统性的设计措施。在结构设计方面,渠道内边坡系数取 1:1.75,外边坡 1:1.5,左岸边坡混凝土板下设 40cm 厚砂砾石垫层,渠底及右岸下设 50cm 厚垫层,以提高基床抗冻胀能力并辅助排水。混凝土板纵向每 2.5m 设一道伸缩缝,缝内采用闭孔板与双组份聚氨酯密封胶填缝,其 A 组分与 B 组分分配比为 1:6,以保证接缝在零下 30 摄氏度低温下的柔性和密封性。渠顶设置现浇混凝土水平封顶板,尺寸为 1.5m×0.3m×0.1m,每 1.5m 设沉降缝,缝宽 2cm,采用高压闭孔板填缝,有效约束坡顶冻土位移。在材料方面,明确规定混凝土采用高抗硫酸盐水泥,粗骨料选自天南维其克渠首栏杆大桥上游砂石料场,其压碎指标 9.8%、含泥量 0.51%,细骨料细度模数 2.55,属中砂范畴,均符合抗冻耐腐蚀混凝土用料要求。在地基处理方面,对建筑物基础如农桥、分水闸等,若天然地基承载力不足,其中粉土地基承载力特征值为 110KPa,黏土层为 130KPa,采用换填 1.0m 厚砂砾石垫层处理,换填后地基承载力要求不小于 150KPa。此外,全线每 100m 设置一道混凝土隔墙,深度 0.6m,宽度 0.3m,增强渠道纵向刚度和抗滑稳定性。

3.4 运行效果监测与评估

工程于 2024 年 11 月底完工后,建立了涵盖渗流、变形及环境影响的综合监测体系,包括渠基内埋设的 20 组渗压计、沿线布设的 5 处量水堰以及定期采集的水质化验点。根据 2025 年灌溉期初步监测数据,渠道输水效率显著提升,渗漏损失大幅降低,灌溉水利用系数由改造前的 0.90 提高到 0.92,年节水量达 186.90 万 m³,有效缓解了灌区季节性缺水问题。混凝土衬砌板未见明显冻胀隆起或开裂,伸缩缝密封完好,无渗水迹象。地下水腐蚀性虽强,

对混凝土结构为强腐蚀等级,但因埋深深,位于渠底 5.5m 以下,未对工程构成直接危害。监测也表明,渠道防渗后对地下水补给量有所减少,部分泉水量减小,但根据设计水平年水资源平衡分析,通过渠系优化调配可保障生态与灌溉用水需求。后续将持续监测渗流量、衬砌变形、接缝工作状态及周边地下水位与植被变化,长期评估防渗体系的可靠性及对区域水生态环境的潜在影响,为类似干旱区渠道防渗工程提供实践依据。

4 结束语

水利工程防渗结构设计属于一项综合性很强的系统工程,它融合了材料科学、岩土力学、水文学以及施工技术等多个方面。就克孜尔水库所处的那种特殊地质和气候区域而言,其防渗结构设计的成败很大程度上取决于是否能够对冻胀变形、强透水地层以及材料耐久性等关键挑战有充分的认知并且能够采取有效的应对措施。从实际的情况来看,挑选那些有着高抗冻融以及耐腐蚀能力的材料,去构建可以适应较大变形的柔性防渗体系,同时施行与复杂水文地质条件相匹配的立体化防渗方案,再加上精细化的施工质量把控以及智能化的运行期监测维护手段,这才是打造安全可靠且能够长期发挥作用的防渗屏障必须要走的一条路。克孜尔水库所取得的成功案例,在类似那种极为严苛的环境下开展大型水利枢纽防渗设计工作时,积累了十分宝贵的经验,其中所强调的“依据实际情况来定、刚性和柔性相结合、对整个周期都加以管控”的设计理念,是很有价值的,值得我们去深入地借鉴并加以推广。在未来的研究当中,依然需要持续不断地关注新型防渗材料的研发进展,对复杂条件下渗流、应力以及冻胀相互之间耦合的机理做进一步的探索,还要着力提升智能化监测预警技术的相关水平。

【参考文献】

- [1]李文晖.水利工程变形裂缝修复技术与防渗材料改性研究[J].粘接,2025,52(8):68-70.
- [2]王蓉.水利工程灌区渠道工程防渗技术探讨[J].全面腐蚀控制,2025,39(7):116-118.
- [3]韩伟.复杂地层水利工程混凝土防渗墙施工技术[J].科技创新与应用,2025,15(21):158-161.
- [4]施雷杰.水利工程防渗性能设计与防水材料质量检测方法的协同创新[J].中国品牌与防伪,2025(9):151-153.

作者简介:马彪(1986.8—),毕业院校:新疆塔里木大学,所学专业:农业水利,当前就职单位名称:新疆塔里木河水利勘测设计院,就职单位职务:新疆塔里木河水利勘测设计院/规划室副主任,职称级别:现职称中级,拟聘副高。