

混凝土防渗墙厚度对水库渗流稳定性影响分析

扎西旺久¹ 索朗罗布²

西藏自治区水利电力规划勘测设计研究院 西藏 拉萨 850000

【摘要】：混凝土防渗墙作为水库工程中控制渗流的关键结构，其厚度变化直接影响渗流场分布和坝体稳定性。通过理论分析、数值模拟与实测数据验证，系统探讨了厚度不足引发的失稳风险、厚度设计方法、对坝基渗透压的影响机制及未来发展方向。研究表明，科学合理的厚度选择可显著提升防渗效果，并在复杂地质条件下保持良好的适应性。厚度设计正逐步向多维协同、智能预测与可持续模式演进，为防渗工程的安全性和经济合理性提供新的技术路径。

【关键词】：混凝土防渗墙；渗流稳定性；厚度优化；水库安全；数值模拟

DOI:10.12417/2811-0536.25.10.074

引言

水库工程中的渗流问题是影响大坝安全运行的核心因素之一，防渗墙作为关键屏障结构，其厚度直接决定了防渗体系的有效性与稳定性。随着工程建设向复杂地质环境延伸，传统厚度设计方法面临挑战，亟需从渗流控制机制出发，深入研究厚度变化对渗透路径、压力分布及结构安全的影响规律。在此背景下，围绕厚度参数展开系统分析，不仅有助于优化防渗设计标准，也为提升水库工程的整体可靠性提供了理论支持和技术依据。

1 防渗墙在水库工程中的应用现状

混凝土防渗墙作为一种重要的地下连续墙结构，广泛应用于各类水库工程中，尤其在土石坝、软土地基以及覆盖层较厚的坝址区域发挥着关键作用。其主要功能是通过形成一道连续、致密的防渗屏障，有效阻断或减少水库蓄水过程中水体向坝基及周边岩土体的渗透路径，从而提升整体结构的稳定性与安全性。随着我国水利工程建设不断发展，防渗墙的设计理念、施工工艺以及材料性能等方面均得到了显著提升，逐渐形成了以薄壁防渗墙、多墙联合防渗体系为代表的多种技术模式。从应用范围来看，防渗墙已由早期主要用于中小型水库逐步扩展至大型、超大型水利工程，并在高水头、深厚覆盖层等复杂地质条件下展现出良好的适应性。

目前，在长江、黄河等流域的重点水利枢纽工程中，防渗墙已成为控制渗流、保障大坝安全的重要措施之一。尤其是在深厚覆盖层地基上修建的大坝，由于天然地基抗渗性能较差，防渗墙几乎成为不可或缺的关键结构。部分老旧水库在除险加固过程中也普遍采用防渗墙技术来提升其防渗能力，延长使用寿命。从结构形式来看，混凝土防渗墙主要包括直立式、斜

插式、阶梯式等多种类型，其中直立式防渗墙因其施工便捷、防渗效果稳定而被广泛应用。根据墙体厚度的不同，又可分为常规厚度防渗墙和薄壁防渗墙两类，前者适用于高水头、高压渗环境，后者则更注重经济性和施工效率。

近年来，随着高性能混凝土材料的发展，防渗墙的抗压、抗渗及耐久性能不断提升，进一步拓展了其适用范围。在施工技术方面，传统的冲击钻机成槽工艺已被高效、环保的液压抓斗、双轮铣槽机等新型设备所取代，使得防渗墙的深度和厚度控制更加精准。泥浆护壁、接缝处理、墙体浇筑等关键技术也不断优化，确保了墙体的整体性和密封性。针对特殊地质条件，如砂卵石层、软弱夹层等，相关单位还开发出多种复合防渗技术，将防渗墙与其他防渗结构（如帷幕灌浆、高压旋喷桩）结合使用，形成多道防线，提高防渗可靠性。

2 厚度不足引发的渗流失稳风险

混凝土防渗墙作为水库工程中控制渗流的关键结构，其厚度设计直接关系到整个防渗体系的可靠性。在实际工程中，若防渗墙厚度未达到合理标准，将显著削弱其阻断渗流的能力，进而引发一系列潜在的失稳风险。这种厚度不足的问题不仅影响墙体自身的抗渗性能，还会导致周边岩土体渗透压力分布发生变化，加剧渗流路径的集中和渗透坡降的提升，从而诱发管涌、流土等渗透破坏现象。当防渗墙厚度偏小时，其截断渗流的能力下降，使得部分水头压力未能有效消除，水流可能绕过或穿透墙体进入坝基及地基深层。这种情况下，渗流场的重新分布会在局部区域形成较高的渗透梯度，特别是在地质条件复杂、地层不均一的部位，更容易造成渗透压突增，破坏原有土体的应力平衡状态。

随着运行时间延长,渗透水流持续作用于墙体与地基接触面,可能引起界面冲刷、细颗粒流失等问题,进一步降低防渗系统的稳定性。厚度不足的防渗墙在承受高水头压力时,其结构强度和变形协调能力也面临更大挑战。由于墙体较薄,在施工质量存在偏差或遭遇不良地质条件的情况下,容易出现裂缝、接缝不严密等缺陷,这些缺陷为渗流提供了短路通道,使防渗效果大打折扣。一旦发生渗漏,水流将沿着薄弱部位深入坝体内部,导致孔隙水压力升高,降低土体的有效应力,削弱坝体整体抗滑稳定性,甚至可能引发滑坡或溃坝等严重安全事故。在长期运行过程中,防渗墙还可能受到地下水化学环境的影响而发生侵蚀性破坏。如果墙体厚度较小,其抵御外界侵蚀的能力相应减弱,随着时间推移,墙体材料逐渐劣化,防渗性能逐步退化,最终难以满足设计使用年限要求。

尤其是在含有腐蚀性成分的地层环境中,这一问题更加突出,可能导致防渗体系提前失效,增加后期维护和加固成本。从工程安全角度来看,厚度不足所引发的渗流问题往往具有隐蔽性和累积性特征,初期表现不明显,但一旦突破临界状态,后果往往难以挽回。因此,在防渗墙设计阶段,必须充分考虑水库运行过程中的各种工况组合,确保厚度参数能够满足最不利情况下的防渗需求。应结合具体地质资料,对不同厚度方案进行系统比选,避免因经济性优先而忽视安全性保障,从根本上降低因厚度不足带来的渗流失稳风险。

3 基于渗流控制的厚度设计方法

在水库工程中,混凝土防渗墙的厚度设计是确保其有效控制渗流的关键环节。这一设计过程并非单纯的结构尺寸确定,而是需综合考虑水文地质条件、坝体结构特征、运行工况以及材料性能等多重因素,形成以渗流控制为核心的系统性设计方法。当前,主流设计理念强调通过建立科学合理的渗流场模型,分析墙体厚度对渗流路径、渗透压力分布及破坏临界条件的影响机制,从而实现厚度参数的优化配置。从基本原理来看,防渗墙厚度的设计应满足两个核心目标:一是有效截断或显著延长渗流路径,降低渗透流量;二是控制墙体后方及周边土体中的渗透坡降,避免局部区域出现超过允许值的渗透力,引发渗透破坏。

在设计过程中,必须结合达西定律和连续介质力学的基本理论,构建二维或三维渗流控制方程,并引入边界条件进行数值求解,以此评估不同厚度条件下防渗体系的整体效能。近年来,随着数值模拟技术的发展,基于有限元法(FEM)或有限差分法(FDM)

的渗流场模拟已成为厚度设计的重要工具。通过建立典型断面或整体工程的数值模型,可以直观反映墙体厚度变化对渗流速度、压力梯度及孔隙水压力分布的影响趋势。在此基础上,结合安全系数法或极限状态法,设定合理的厚度下限,确保在各种运行条件下均能满足抗渗稳定要求。该方法还可用于预测不同地层组合下的渗流响应,为复杂地质条件下的厚度差异化设计提供依据。除了数值模拟手段,理论计算方法也是厚度设计的重要支撑。常用的包括等效厚度法、水力梯度控制法、渗透稳定性验算法等

其中,水力梯度控制法广泛应用于实际工程中,其基本思路是在已知上下游水位差的前提下,设定墙体后方允许的最大渗透坡降,进而反推所需墙体厚度,确保渗透力不会突破土体的抗剪强度极限。该方法虽然依赖经验公式,但在工程实践中具有较强的可操作性和实用性。考虑到施工条件、材料特性及长期运行环境的变化,现代厚度设计还引入了可靠性设计理论。该理论通过概率统计方法,将地质参数、施工误差、材料劣化等因素纳入设计变量,采用蒙特卡洛模拟或一次二阶矩法进行风险评估,从而提升厚度设计的适应性和鲁棒性。这种基于不确定性的设计方式,有助于提高防渗体系在复杂环境下的耐久性和安全性。

4 厚度参数在典型工程中的实测与验证

在防渗墙工程实践中,设计阶段所采用的厚度参数是否合理,最终需通过现场实测与长期监测数据加以验证。随着监测技术的进步,越来越多的水库工程在防渗墙施工完成后,通过布置高精度传感器、钻孔取样、渗透压观测等方式,对墙体实际厚度及其防渗效果进行系统检测和评估。这一过程不仅为设计理论提供了现实依据,也为后续类似工程的设计优化积累了经验。在厚度实测方面,通常采用钻孔取芯法与地质雷达探测相结合的方式获取墙体的实际厚度数据。钻孔取芯法虽然操作复杂、成本较高,但能直接获取墙体材料样本,具有较高的准确性;而地质雷达则以其非破坏性和高效性被广泛用于大面积厚度检测。

两种方法相互补充,能够较为全面地反映防渗墙在不同深度、不同区段的厚度变化情况,避免因局部偏差影响整体防渗性能。除了物理测量外,厚度参数的有效性还需通过渗流场响应进行验证。通常在水库蓄水运行后,会在坝体及基础关键部位布设孔隙水压力计、渗压计、流量计等设备,实时监测防渗墙前后以及周边岩土体中的渗透压力变化。通过对这些数据的长期记录与分析,可以判断墙体厚度是否足以有效控制渗流路径,防止出现异常渗透梯度或集中渗漏现

象。在部分重点水利工程中,还引入了光纤传感技术进行连续监测。这种技术通过沿防渗墙埋设分布式光纤,可实时获取墙体周围温度、应变和渗压信息,进而反演渗流场的动态变化。相比传统点式监测手段,光纤传感技术具备空间分辨率高、连续性强的优势,有助于更精确地识别厚度参数在实际运行环境中的适应性。

为验证厚度设计的合理性,部分工程采用数值模拟与实测数据对比的方法,将设计阶段构建的渗流模型与运行期间的实际监测结果进行分析比对,评估厚度参数的适用性。若发现显著差异,可追溯成槽精度、混凝土浇筑质量及接缝处理等施工环节,识别影响防渗效果的关键因素。考虑到材料老化、化学侵蚀及地基变形等因素在长期运行中的作用,持续监测与定期评估成为保障防渗体系稳定运行的重要措施。

5 厚度变化对坝基渗透压的影响规律

混凝土防渗墙作为控制水库渗流的关键结构,其厚度变化直接影响坝体及坝基内部的渗流场分布,特别是对坝基渗透压力的变化具有显著调控作用。在实际工程运行过程中,坝基渗透压的高低不仅决定了地基土体的承载能力,还关系到坝体的整体稳定性和安全性。因此,研究不同厚度条件下坝基渗透压的变化规律,对于优化防渗墙设计具有重要意义。当防渗墙厚度发生变化时,其阻断上游水头的能力随之改变,进而影响整个渗流系统的压力传递路径。

较厚的防渗墙能够有效延长渗流路径,降低单位面积上的渗透流量,从而减小坝基内部的孔隙水压力积聚程度。反之,若墙体厚度不足,则可能导致渗流路径缩短,渗透水流更易穿透或绕过墙体,造成坝基局部区域渗透压力升高,形成潜在失稳区。这种压力异常分布往往出现在墙体底部与基础接触带、地层交界面以及地质构造薄弱部位,容易诱发渗透变形或结构滑移。从渗流力学角度分析,坝基渗透压的变化主要受控于防渗墙前后水位差、墙体材料的渗透系数、墙体埋深及其几何形态等因素。其中,墙体厚度通过改变截流面积和渗流阻力,间接调控了坝基中各点的水力梯度。随着厚度增加,墙体对高水头压力的屏蔽效应增强,使得坝基上部土体中的渗透压显著降低,而下部深层区域的压力变化则趋于平缓,整体压力梯度呈均匀化趋势。

防渗墙厚度的变化不仅影响坝基渗透压的空间分布,还对其时间响应特征产生显著作用。在水库初次蓄水阶段,由于土体处于非饱和状态,渗流场的建立

过程较为迅速,导致坝基内部渗透压上升速率较快,若此时防渗墙厚度偏小,难以有效延缓水流渗透路径,容易使局部区域出现压力骤升现象,增加结构冲击风险。较厚的墙体则能够通过延长渗流路径、降低渗透流速,使坝基土体在水荷载作用下逐步完成饱和与应力调整过程,从而减缓渗透压的上升速率,避免因瞬时高压引发的剪切变形或结构失稳问题。而在工程长期运行阶段,厚度较大的防渗墙能够持续发挥对渗透水流的抑制作用,维持较低的稳态渗透压水平,减少孔隙水压力的累积效应,有助于提升坝基土体的抗剪强度和整体承载能力。

6 未来防渗墙厚度设计的发展方向

防渗墙厚度设计正逐步向精细化、智能化、系统化方向演进,以适应多样化的工程需求和技术进步。当前,厚度设计主要依赖于水力梯度控制、渗透稳定性验算以及数值模拟等手段,但在面对非均质地基、多场耦合作用及长期服役性能变化时,仍存在一定的局限性。未来的设计方法将更加注重多因素协同分析,结合渗流-应力-温度场耦合模型,构建更贴近实际运行状态的物理机制。在此基础上,引入不确定性分析与风险评估理论,使厚度参数的选择不仅满足规范要求,还能应对地质条件变异、材料性能退化等潜在影响。智能化技术的发展为厚度设计提供了新的思路。

通过大数据分析 with 机器学习算法,可以对已有工程的监测数据进行深度挖掘,识别厚度与渗流响应之间的非线性关系,从而建立更具适应性的厚度预测模型。数字孪生技术的应用也正在兴起,借助虚拟仿真平台实现防渗墙从设计到运行全过程的动态模拟,为厚度参数的实时调整提供技术支持。在施工工艺方面,厚度设计的可实施性将成为重要考量因素。新型成槽设备的精度提升使得变厚度墙体的施工成为可能,未来可根据坝体结构特征与地层变化,在同一防渗体系中采用差异化厚度布置,实现局部加强与整体协调的统一。高性能混凝土、自密实混凝土及抗侵蚀复合材料的研发与应用,为减少防渗墙厚度依赖提供了新的解决方案。通过提升材料本身的耐久性和抗渗透性能,能够在不增加墙体厚度的情况下满足更高的安全要求,从而有效降低资源消耗和碳排放。环境友好与可持续发展的理念正促使防渗墙设计模式发生深刻变革,从单纯依靠增加厚度来提高安全冗余的传统思路,转向探索轻型结构与绿色材料的结合路径。

在确保优异防渗效果的前提下,采用低碳环保材料不仅能够减轻工程对自然资源的压力,还能显著降低施工过程中的能耗和污染排放,推动防渗工程向更

加绿色、可持续的方向发展。监测与反馈机制的不断完善也为优化厚度设计奠定了坚实基础。借助光纤传感、无线遥测等先进技术,可以实现对防渗墙运行状态的实时监控和长期数据积累,动态评估其厚度有效性及其对渗流控制的影响。基于这些数据,建立“设计—施工—监测—反馈”的闭环管理模式,有助于及时发现潜在问题并进行针对性调整,确保防渗体系在整个生命周期内持续稳定运行。

7 结语

防渗墙厚度对水库渗流稳定性具有决定性影响,

合理设计能够有效控制渗透路径、降低坝基压力并提升整体安全性。随着数值模拟、监测技术和材料性能的不断进步,厚度设计方法正朝着智能化、精细化方向发展。

未来的设计将更加注重多因素耦合分析与动态反馈机制的应用,在保障工程安全的同时实现绿色低碳目标。技术手段的持续优化将进一步提升防渗体系在复杂地质条件下的适应能力,为水库长期稳定运行提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 刘志强.混凝土防渗墙在水利工程中的应用与发展趋势[J].水利科技与经济,2022,28(4):55-59.
- [2] 陈晓峰.高土石坝防渗墙厚度优化模型研究[J].岩土力学,2021,42(7):123-129.
- [3] 孙立军.渗流场与应力场耦合作用下防渗墙性能分析[J].工程力学,2020,37(10):88-95.
- [4] 黄建国.水库大坝渗流稳定性评价方法综述[J].水利水电技术,2023,54(2):45-50.
- [5] 赵文斌.基于 FLAC3D 的防渗墙厚度敏感性分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(3):67-73.
- [6] 周海涛.复杂地质条件下防渗墙设计参数研究[J].水电能源科学,2022,40(5):91-96.