

水利工程坝体防渗结构应力分布特性及稳定性分析

崔馨心

河南省前坪水库运行中心 河南 郑州 450000

摘要: 防渗结构作为坝体内部或基础中专门设置的低渗透性屏障, 不仅承担着阻隔水流、抑制渗透变形的关键功能, 更在力学层面深刻影响着坝体整体的应力传递路径与分布格局。本文从理论角度出发, 系统探讨防渗结构在坝体中的力学角色, 分析其与周围介质相互作用下的应力分布特性, 并深入阐释该特性对坝体整体及局部稳定性的影响机制。文章首先梳理典型防渗结构形式及其力学属性差异; 继而基于连续介质力学与有效应力原理, 构建防渗-应力耦合的理论框架; 进而从刚度匹配、界面行为、荷载传递路径等维度, 剖析防渗结构引发的应力集中、重分布及潜在失稳模式; 最后, 结合稳定性判据, 提出面向安全性的防渗结构设计原则与优化方向。研究表明: 防渗结构的引入虽可显著改善渗控性能, 但若忽视其力学协调性, 易因模量突变或约束不当诱发附加应力集中, 反而削弱结构整体稳定性。因此, 防渗设计应超越单一渗流控制目标, 走向“渗-力协同”的综合优化范式。

关键词: 水利工程; 坝体; 防渗结构; 应力分布; 有效应力; 界面力学; 稳定性; 理论分析

引言

水利工程的安全性历来是国家基础设施建设的重中之重。坝体作为蓄水、防洪、发电等多功能集成的核心结构, 其失效后果往往具有灾难性。历史经验表明, 渗流问题——包括管涌、流土、接触冲刷及内部侵蚀——是导致坝体失稳乃至溃决的主要诱因之一。为此, 各类防渗结构被广泛应用于不同坝型之中, 以构建可控的渗流路径并维持水力梯度在安全阈值内。然而, 传统防渗设计理念多聚焦于水力学性能, 如渗透系数控制、允许坡降校核等, 而对其在复杂荷载(水压力、自重、地震惯性力等)作用下的力学响应关注不足。事实上, 防渗结构通常由高密度黏土、混凝土、塑性混凝土或灌浆结石等材料构成, 其弹性模量、泊松比、强度参数等力学性质与周边堆石体、砂砾料或风化岩体存在显著差异。这种物理性质的非连续性, 必然导致应力场在防渗结构及其邻近区域发生重分布, 甚至形成局部应力集中区。一旦该区域的有效应力状态逼近材料强度包络面, 将可能诱发开裂、滑移或剪切破坏, 进而破坏防渗功能本身, 形成“渗漏—应力集中—开裂—加剧渗漏”的恶性循环^[1]。因此, 有必要从连续介质力学与岩土工程基本原理出发, 深入理解防渗结构在坝体应力体系中的角色定位, 厘清其应力分布的一般规律与影响因素, 并在此基础上建立与稳定性评价相衔接的设计逻辑。

1 防渗结构的力学属性与分类

1.1 力学属性特征

防渗结构的力学行为从根本上受制于其材料本构关系。在工程实践中, 防渗材料大致可分为柔性与刚性两

类, 二者在变形特性与强度表现上存在本质区别。柔性材料如压实黏土心墙或膨润土-砂混合料, 通常具有较低的压缩模量和较高的泊松比, 表现出良好的压缩适应性, 但其抗拉能力极弱, 几乎可以忽略, 抗剪强度则高度依赖于有效应力状态。相比之下, 刚性材料如混凝土防渗墙、水泥-膨润土塑性混凝土或帷幕灌浆形成的结石体, 则呈现出高弹性模量、低泊松比和优异的抗压性能, 但脆性显著, 抗弯与抗拉能力有限。这种力学属性的分野, 直接决定了防渗结构在外部荷载作用下如何参与整体受力, 以及其内部应力如何分布与演化。

1.2 结构形式与力学边界

防渗结构的布置形式与其所处的力学边界条件密切相关, 进而深刻影响其受力模式。体内式防渗结构, 如土石坝中的心墙或斜墙, 嵌入坝体内部, 两侧均与填筑料接触, 形成双侧约束状态, 在水压力作用下主要承受轴向压缩与侧向挤压。界面式结构, 如面板堆石坝上游的沥青混凝土或混凝土面板, 则仅单侧承受水压力, 另一侧与垫层料接触, 其受力更接近于薄板弯曲问题, 对局部变形和温度应力尤为敏感。而基础式防渗结构, 如深入基岩的混凝土防渗墙或帷幕灌浆带, 其顶部与坝体相连, 底部嵌固于相对刚性的地基中, 整体呈现悬臂梁或部分嵌固梁的力学特征, 弯矩与剪力在其截面中占据主导地位。不同形式对应不同的边界约束与荷载传递机制, 使得防渗结构的应力响应呈现出高度的多样性与复杂性。

2 防渗结构应力分布的理论机制

2.1 有效应力原理的主导作用

根据Terzaghi有效应力原理, 土体或岩体中的总应力 σ 可分解为有效应力 σ' 与孔隙水压力 u 之和:

$$\sigma = \sigma' + u$$

其中, 有效应力 σ' 控制材料的变形与强度。防渗结构的存在显著改变了坝体内部的孔隙水压力场分布。在防渗体上游, 水头高, u 大, 导致 σ' 减小; 在下游侧, 若排水通畅, u 趋近于零, σ' 接近总应力。这种 u 的非均匀分布, 使得同一水平面上的有效应力呈现明显梯度, 从而驱动应力向低 u 区域转移。对于防渗结构自身而言, 其内部孔隙水压力通常较低(因其低渗透性), 故其所承受的荷载主要以有效应力形式体现, 表现为较高的压应力或弯曲应力^[2]。

2.2 刚度差异引起的应力重分布

当两种不同模量的介质相邻时, 在共同变形约束下, 高模量材料将承担更大比例的荷载。设防渗结构模量为 E_r , 周围介质模量为 E_m , 若 $E_r \gg E_m$ (如混凝土墙与堆石体), 则在相同应变条件下, 防渗结构所受应力远高于周围介质。此即“应力吸引”效应。反之, 若防渗结构为柔性材料(如黏土心墙), 其模量低于堆石体, 则在荷载作用下易产生较大压缩变形, 导致堆石体“架桥效应”, 使荷载绕过心墙传递, 造成心墙顶部应力卸载、底部应力集中。这种非线性应力传递路径, 是心墙坝设计中需重点考虑的问题。

2.3 界面力学行为的影响

防渗结构与周围介质的接触面是力学响应的关键区域。理想情况下, 界面完全粘结, 位移连续; 但实际中, 由于施工接缝、材料收缩或水力冲刷, 界面可能存在弱连接甚至脱粘。在剪切荷载作用下, 截面剪应力 τ 可表示为:

$$\tau = k_s \cdot \Delta u$$

其中, k_s 为界面剪切刚度, Δu 为相对位移。当 τ 达到界面抗剪强度(通常由摩擦角与粘聚力决定)时, 将发生滑移。滑移不仅削弱荷载传递效率, 还可能在界面处形成集中渗流通道, 进一步劣化力学性能。因此, 界面的力学连续性与抗剪能力, 是决定防渗结构能否有效参与整体受力的关键。

3 应力分布对稳定性的影响机制

3.1 整体抗滑稳定性

防渗结构对应力场的调控作用, 直接关联到坝体的整体抗滑稳定性。从正面看, 一个设计合理的防渗体系能够有效降低坝体内部的浸润线高度, 从而显著减少潜在滑动面上的孔隙水压力。这不仅提高了滑动面上的有效正应力, 也相应增大了土体或岩体的抗剪强度, 对提

升整体抗滑安全系数具有积极作用。然而, 若防渗结构的刚度过大且与坝体连接不良, 则可能在动力荷载(如地震)或库水位骤变等非稳态工况下, 因惯性力或变形速率的差异而与主体结构产生相对位移。这种相对运动不仅会削弱坝体的整体性, 还可能在接触面处形成新的薄弱带, 反而降低抗滑力, 对整体稳定性构成潜在威胁^[3]。特别是在深厚覆盖层地基上, 若防渗墙未能充分嵌入持力层, 其底部可能成为潜在滑动面的转折点或应力集中区, 需在稳定性分析中予以特别关注。

3.2 局部结构稳定性

除了影响坝体整体稳定性外, 防渗结构自身的局部稳定性同样至关重要。对于悬臂式或部分嵌固的刚性防渗墙, 上游水压力会在墙体内部产生显著的弯矩, 导致迎水面受压而背水面受拉。鉴于混凝土类材料的抗拉强度远低于其抗压强度, 即使是很小的拉应力也可能引发微裂缝。这些裂缝虽初期不影响结构承载, 却会迅速增加渗透性, 使防渗功能大打折扣。在柔性防渗结构如黏土心墙中, 底部区域常因上覆荷载与侧向约束的共同作用而承受极高的竖向与水平应力, 若设计不当, 可能超过材料的屈服强度, 引发塑性流动或剪切破坏。此外, 在极端工况如库水位快速下降时, 防渗面板或薄膜结构可能因内外压差而发生鼓胀甚至屈曲失稳, 丧失其作为连续屏障的功能。这些局部失稳模式虽未必立即导致坝体溃决, 但往往是系统性失效的前兆。

3.3 渗透-应力耦合失稳

最为危险的情形在于渗透力与应力状态之间形成正反馈耦合机制。当防渗结构某处因应力集中而产生初始损伤(如微裂缝)时, 渗流会优先通过该高渗透通道, 形成局部集中渗流。根据达西定律, 集中渗流意味着更高的水力梯度, 从而产生更大的渗透力。该渗透力一方面对颗粒产生拖曳作用, 可能引发管涌或内部侵蚀, 不断扩大裂缝; 另一方面, 它会改变裂缝周围区域的孔隙水压力分布, 进一步扰动有效应力场, 促进更多的变形与开裂。这一过程一旦启动, 便具有自我强化的特性, 发展迅速且难以逆转。因此, 防渗结构的设计不仅要求其在正常工况下满足强度要求, 更必须确保在最不利的复合应力状态下仍能维持结构的完整性, 杜绝成为渗透破坏的起始点。

4 面向稳定性的防渗结构设计原则

4.1 刚度协调原则

为避免因模量突变引发的应力集中, 防渗结构的弹性模量应尽可能与周围介质相匹配。对于必须采用刚性材料的场合, 如深覆盖层地基中的防渗墙, 可选用掺入

膨润土、粉煤灰或其他柔性掺合料的塑性混凝土,以适度降低其弹性模量,增强其变形适应能力。对于柔性防渗结构如黏土心墙,则可通过精确控制压实度与最优含水率,在保证低渗透性的前提下,调节其刚度,使其既能有效承担荷载,又不至于因过度柔软而引发架桥效应或底部应力过度集中。

4.2 应力路径优化原则

防渗结构的几何形态设计应致力于引导荷载沿平顺、连续的路径传递,避免应力突变。例如,心墙宜采用上窄下宽的梯形断面,通过底部加宽来分散巨大的竖向与侧向压力;防渗墙的顶部应避免刚性直连,可设置柔性过渡段、齿槽或键槽,以缓解由水压力偏心引起的弯矩集中;斜墙的坡度不宜过陡,以免产生过大的垂直分力,导致墙体内部压缩应力过高^[4]。这些几何优化措施,本质上是通过调整结构形态来主动调控内部应力流,实现力学性能的最优化。

4.3 界面强化原则

防渗结构与坝体或地基的接触界面,是力学与水力性能的关键控制面。为提升界面的整体性与抗剪能力,应在接触面设置专门的反滤层或级配良好的过渡料。这类材料不仅能够有效阻止细颗粒被渗流带走,防止接触冲刷,其自身具备一定压缩性和颗粒嵌挤效应,还能在界面发生微小相对位移时提供缓冲,提高界面的剪切刚度与峰值强度,从而增强防渗结构与主体之间的协同变形能力,确保荷载的有效传递。

4.4 多重防线原则

将全部防渗期望寄托于单一结构之上,风险过于集中。更为稳健的设计策略是构建“主防+辅排”的多重防线体系。主防渗体(如心墙或防渗墙)负责拦截大部分水头,而完善的排水系统(如坝体内部的褥垫排水、下游的棱体排水或竖井排水)则用于疏导残余渗水,显著降低主防渗体下游侧的水压力。这种组合不仅大幅减小了主防渗体两侧的水力梯度与荷载差,改善了其受力状态,也为主防渗体万一出现局部损伤提供了冗余安全保障,体现了工程设计的韧性思想。

4.5 极限状态校核原则

防渗结构的设计必须经受住各种极端工况的考验。

因此,应在设计阶段系统校核其在正常蓄水、校核洪水、地震作用以及库水位骤降等极限状态下的应力响应。校核内容应涵盖最大主拉应力是否超过材料抗拉强度、最大剪应力是否低于抗剪强度,以及变形是否在允许范围内。所有校核均应基于有效应力原理进行,并留有足够的安全裕度,以应对材料参数的不确定性与未来环境荷载的可能变化。

5 结语

本文从理论层面系统探讨了水利工程坝体防渗结构的应力分布特性及其对稳定性的影响机制。研究表明,防渗结构不仅是水力屏障,更是力学构件,其应力状态由有效应力原理、刚度差异与界面行为共同决定;刚度突变是引发应力集中的根本原因,柔性及刚性防渗结构各有其典型的应力分布模式与潜在风险;防渗结构通过改变孔隙水压力场影响坝体整体抗滑稳定性,但其自身也可能因弯曲、剪切或屈曲而发生局部失稳;渗透-应力耦合效应可能触发正反馈破坏机制,要求防渗结构在最不利应力状态下仍保持完整性;面向安全性的防渗设计应遵循刚度协调、应力路径优化、界面强化、多重防线与极限状态校核等原则,实现“渗控”与“力学稳定”的双重目标。未来,随着智能材料与自感知技术的发展,防渗结构有望从被动屏障向主动调控系统演进,但其设计根基仍在于对基本力学规律的深刻把握。唯有将渗流控制与结构力学有机融合,方能构筑真正安全、持久的现代水利枢纽。

参考文献

- [1] 龚定松,王彪.水利水电工程防渗排水结构优化设计与实施技术[J].工程机械与维修,2025,(02):100-102.
- [2] 王毅,缪成美,薛亚民,等.水利工程中防渗结构多类型材料单轴试验研究[J].水电站机电技术,2021,44(01):104-107.
- [3] 袁东.基于BIM技术的水利工程坝体稳定性和应力分析探讨[J].科技资讯,2021,19(29):66-68.
- [4] 雷海林,张万栋,张汉康.基于有限元方法的水利工程坝体稳定性监测研究[J].水利科技与经济,2024,30(03):152-157.