

# 土石坝渗流控制关键设计要点及工程实践

陈迎巷

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司, 新疆乌鲁木齐, 830002;

**摘要:**土石坝的安全性与耐久性从根本上取决于有效的渗流控制。本研究系统论述了渗流控制的基本理论以及“防渗、排水、反滤”相结合的核心设计原则,深入剖析了防渗体系选型、排水反滤设计及渗流数值模拟等关键环节的技术要点。结合典型工程实践,归纳出涵盖地质勘探、材料选择、施工质量管理至后期运营的全方位方法思路,以期为土石坝渗流安全设计与管理工作提供一定参考。

**关键词:**土石坝; 渗流控制; 防渗体系; 排水体系; 渗透稳定

**DOI:** 10.69979/3060-8767.26.04.042

## 引言

土石坝是常见的水利水电建筑物,渗流控制是保障坝体安全可靠的重要手段;渗流失控可能引发渗透破坏甚至溃坝事件,造成严重危害。因此,如何做好渗流控制工作是坝工设计面临的主要问题。本文旨在阐述渗流问题的重要性,总结渗流研究的发展历程,针对重点问题和技术路线展开分析讨论。

## 1 土石坝渗流控制的基本理论

土石坝渗流控制的基本原理遵循达西定律所描述的准则,即水在多孔介质中流动的速度与所受压力差成正比,且与该介质的渗透系数相关。土石坝及其基础构成一个复杂的渗流水力系统,在上下游存在高程差的情况下,水流从压力高的区域流向压力低的区域,形成浸润线、等势线以及流网。渗流控制旨在人为干预这一自然现象,实现以下三个目标:一是在确保安全的前提下,尽可能减少渗流量,实现水资源的有效节约;二是调整渗流方向及水力坡降,避免因渗压过大导致坝体或坝基土体出现管涌、流土等问题,保障渗流稳定;三是控制坝体内浸润线位置,使其远离下游坝坡,确保下游边坡的整体稳定性及抗滑安全性。在此基础上,总结出“前堵、中截、后排”的理念,即在坝体上游或中部设置防渗措施(如心墙、斜墙、帷幕等)以增加渗径、消耗水头;在渗流出逸处设置良好的排渗反滤设施,使渗水能够通过畅通且受控的路径排出,并利用反滤层防止细颗粒流失。基于此,需依据精确的地质勘探结果和土工试验数据进行设计,并常采用数值计算方法对渗流动态进行详细研究,不断优化设计方案,确保大坝在各种工况下均能保障渗流安全和结构安全。

## 2 土石坝渗流控制关键设计要点

### 2.1 防渗体系设计

防渗体系是土石坝防止渗漏的首道防线,主要功能是尽可能延长渗径、有效降低水头,使进入坝体或基础的水量及水力梯度维持在合理范围内。设计时主要依据现场实际情况,采用经济合理的方式进行防渗,并确保其与基础及两岸良好结合。对于中高坝,通常优先选用垂直或倾斜的中央防渗体,如粘土心墙或沥青混凝土心墙等。在施工过程中,必须确保防渗土料的压实度、渗透率及抗渗强度符合要求,以保证防渗体宽度能够承受设计水位的压力而不发生破坏。此外,心墙与两侧坝壳之间应设置适当的过渡带,避免因两者变形不同步而产生裂缝。当地基存在透水层时,防渗体需向下延伸至足够深度,以起到有效隔断作用,一般采用混凝土防渗墙或灌浆帷幕;防渗墙需满足一定的深度、厚度及柔性等要求,并确保与上部心墙良好结合。在一些中小型工程或特殊条件下,也可采用上游水平铺盖作为防渗措施,但需通过合理计算确定其长度和厚度,并对其长期防渗能力进行评估。

### 2.2 排水反滤体系设计

若防渗体系的作用为“堵”“截”,则排水反滤体系的作用为“导”“护”。它能为已进入坝体或地基的水提供通畅、可控的排出路径,从而降低坝内浸润线,同时防止土颗粒随水流流出。排水方式多样,例如棱体排水(滤水坝趾)可降低下游坝脚处的浸润线,提高下游坝坡的安全性,适用于下游有水的情况;褥垫排水或竖向排水则更有利于迅速排出坝基渗水。无论采用何种

排水方式,排水体的透水率均应大于周围土体,且在各种工况下均不得发生淤塞。与之密切相关且极为重要的是反滤层的设计。

反滤层发挥着类似于置于土体与排水体之间或不同土层之间“智能筛网”的功能,它允许水流通过,但能防止被保护的小颗粒土流失。以往采用严格级配的方式,确保相邻两层之间的粒径满足透水性和稳定性要求;在实际工程中,由于土工合成材料(如无纺土工布)具备施工便捷、质量均匀等优势,也被广泛应用于反滤层。反滤层设计应以最不利工况为准则,在防渗体下游、排水体附近以及坝基、岸坡交界处等渗流丰富、梯度较大的区域,通常需设置多层反滤。合理完善的排水反滤设施,不仅能在大坝在较长时期内保持干燥、稳定,还可防止管涌、流土等渗流现象发生,保障大坝渗流安全。

### 2.3 渗流场分析与安全评估

现代土石坝渗流控制设计离不开基于数值模拟的渗流场精细化分析与评价工作。这首先需要进行详尽的地质勘探,并开展必要的室内土工试验,以获取坝基各土层和坝体不同区域对应材料的真实渗透系数等关键指标。随后,采用有限元法等数值手段,构建符合大坝总体布置、分层和地基条件的二维甚至三维渗流计算模型。需考虑各类具有代表性的特殊情形,如水库正常蓄水位、设计洪水位下的稳定渗流状况,以及水库水位迅速下降时出现的瞬时渗流问题,后者是影响上游坝坡稳定性的因素。通过上述分析,得出坝体及地基中浸润线的空间分布、等势线、流网图,以及各截面上的渗流量和任意一点的渗透坡降。这些均为判断设计合理性的依据:浸润线位置应确保不靠近下游坝坡表面;各部位的渗透坡降应小于相应土体的允许渗透坡降,且有较大余量;总渗流量也需达到标准。此外,数值模拟是优化设计的有效手段,可便捷比较不同防渗排水措施的效果,调整尺寸,直至找到最经济且安全的设计方案。

## 3 土石坝渗流控制工程实践路径

### 3.1 土石坝渗流控制工程实践路径

土石坝渗流控制工程实践始于全面细致的地质勘探,这是确保工程成功的基础条件。勘探应准确查明坝址区地层结构、岩性分布、断层裂隙带及其发育程度、地下水补给与排泄关系。主要任务是查明坝基覆盖层厚度、分层及各层渗透性差异、基岩完整性和透水性等。

当在厚层砂卵石覆盖层上采用垂直防渗方法因施工困难及费用高昂而不宜实施时,需对混凝土防渗墙、灌浆帷幕或上游水平铺盖等多种途径进行权衡比较。

方案选择并非孤立进行,需结合坝型选定、坝址处是否有合适料源以及施工水平来确定。若当地有丰富优质的粘土地质,采用粘土心墙防渗可能是最经济且安全的选择;若坝址狭窄或缺乏足够黏性土料,混凝土面板堆石坝或沥青混凝土心墙坝可能更为适宜。从实际操作角度看,一个好的防渗方案需“量体裁衣”,即根据实际情况设计适合该地区天然地基条件的完整防渗排水系统。这要求防渗体(可以是心墙、斜墙或帷幕等)与相对不透水的地质或岩体良好接触并紧密连接,构成封闭的整体防渗圈。同时,制定方案时需考虑施工可行性问题,如防渗墙成槽方法、灌浆施工压力控制、土石料填筑与反滤层铺设的配合等,以确保设计意图能在施工现场准确实施。

### 3.2 材料把控与过程控制

渗流控制效果归根结底取决于每种材料、每一米灌浆以及每一层反滤的质量。对防渗土料质量的把控至关重要,需对其压实度、含水量、颗粒组成及渗透系数进行测试,使其达到设计要求的良好防渗性和较高抗渗强度。对于反滤料和排水料,需通过试验确定其级配是否合理,使其既能顺畅排水,又能保护邻近细颗粒土体,防止管涌和淤塞现象发生。施工过程控制是保证工程质量的关键环节。心墙或斜墙填筑应与两边坝体同步上升,控制好摊铺厚度。

### 3.3 动态监测与效果验证

渗流控制工程并非建成即宣告结束,在其整个运行周期内,需对其效果展开跟踪与评估。监测系统的布置应具有针对性,需对所有关键部位进行全面检测。例如,在防渗体下游、坝体内部、坝基以及两侧绕渗处设置一定数量的压力盒,以测定实际浸润线位置及孔隙水压力;在排水棱体尾部、集水井或廊道中安装水位计,用于测量总渗流量及其随时间、水位的变化情况;还需不定期对渗流水质进行取样化验,通过分析其浑浊程度,判断内部是否存在冲刷现象。

监测数据的获取与分析应具备连续性。将现场测量的渗压与设计时的数值计算结果进行对比,能够清晰判断实际渗流场状况是否达到或优于预期的安全要求。若

实测浸润线始终低于设计值,且渗流量较小、水质清澈,则表明防渗排导效果良好;反之,若出现某处渗压过高,或渗流量增大且水质浑浊的情况,则很可能是防渗存在漏洞或局部发生渗漏的预警信号。这不仅是一种被动的安全检查方式,更是一种积极的检测手段,对工程的安全运营具有重要意义。同时,通过大量数据可检验设计理念的合理性,为后续类似项目提供参考。必要时,可依据监测信息及时采取措施排除隐患或调整方案(如控制水库水位变化速率)。

### 3.4 运维管理与适应性提升

土石坝渗流安全性问题贯穿整个服役期,在运营期间进行合理的维护管理并持续改进是必不可少的工作。这要求建立制度化、规范化的巡查及整理分析机制,及时汇总日常观察(如下游坡脚处出现湿渍、沼泽化现象以及渗水量变化等)和仪器观测值,并作出准确判断。每年或每隔一段时间需出具一份渗流安全状况报告。同时,在运营管理过程中,应关注水库运行方式的合理性,避免因泄洪导致库水位急剧下降,使上游坝坡失去保护而引发险情;还需警惕长时间高水位对防渗体造成的负担。一旦监测或检查发现异常情况,应及时开展调查工作,采用进一步勘察、示踪试验、水下探测等方法确定具体问题的位置,如防渗体内裂缝、接缝处问题,排水反滤设施淤塞等。

依据诊断结论,应制定有计划的除险加固措施。例如,对坝体进行加密灌浆以补强防渗系统,增设或修复排水分洪设施以降低浸润线,或处理局部失效的反滤层。更具前瞻性的做法是,随着科学技术的发展和认知水平的提高,对老旧或存在隐患的建筑物进行预防性加固,如将原有的排水设施替换为更可靠的反滤设施,或采用

新材料修补缺陷等。运维管理的最终目标是实现从“被动响应”向“主动预警”,乃至“预知性维护”的转变,通过收集、分析大量信息并不断提升技术水平,使渗流控制能够适应材料老化、环境变化以及更严格的安全生产要求,确保大坝长期安全稳定运行。

## 4 结论

总体而言,土石坝渗流控制是一项涵盖设计、施工及运行全过程的综合性工作。本论文所提出的理论依据、关键技术以及工程应用方案等,构成了一套提升渗流安全性的有效途径。对于复杂地质条件和更高的安全度要求,未来的发展应进一步强化精细化设计、智能化监测预报以及新材料与新技术融合的方式,促使土石坝渗流控制从被动防御向积极防护转变,以实现长期稳定且可靠的安全状态。

### 参考文献

- [1]周创兵,姚池.水工岩石力学研究进展和展望[J].人民长江,2025,56(11):1-9.
- [2]康俊洋,魏玉峰,魏龙,等.松散土体细粒起动临界水力梯度计算模型[J].水文地质工程地质,2025,52:1.
- [3]周扬,李初寅,庞锐,等.基于改进POT模型的土石坝渗流监控指标拟定方法[J].大连理工大学学报,2026,66(1):103-110.
- [4]王卫,甘磊,陆希,等.深厚覆盖层坝基防渗墙随机损伤渗流特性研究[J].水电能源科学,2025(5).

作者简介:陈迎巷(1997.06-),男,汉族,新疆乌鲁木齐人,本科,助理工程师,研究方向:水利工程。