

土石坝渗流特性分析与防渗加固措施研究

焦建华 152625198410042037

摘要：土石坝是我国水利工程体系中应用最广泛的坝型之一，渗流破坏是导致土石坝失事的首要诱因，深入分析渗流特性并制定科学的防渗加固方案，对保障土石坝运行安全具有重要意义。本文结合土石坝渗流的基本原理，分析了不同工况下土石坝的渗流分布特性，梳理了渗流破坏的主要表现形式与诱发机制，进而总结了当前主流防渗加固技术的适用场景与应用要点。研究表明，渗流场的分布规律受坝体材料渗透性、坝地质条件以及水位变化共同影响，不均匀渗流引发的渗透变形是坝体失稳的核心风险；针对不同渗流病害特征，合理选择防渗加固技术并做好施工过程质量控制，能够有效降低渗流风险，延长土石坝服役寿命。

关键词：土石坝；渗流特性；防渗加固；渗透变形

一、引言

我国水利工程建设历史悠久，截至 2023 年，全国已建成各类水库超过 9.8 万座，其中 90% 以上的水库大坝为土石坝。土石坝凭借着材料取材方便、对地基适应性强、施工工艺简单等优势，在中小型水利工程中得到大规模应用，但多数早期建设的土石坝受限于当时的勘察设计水平、施工标准以及长期自然侵蚀影响，普遍存在不同程度的渗流病害问题。据水利部门统计数据显示，超过三分之一的病险水库存在渗流稳定问题，渗流破坏引发的坝体滑坡、管涌甚至溃坝事故，占土石坝失事总量的 40% 以上，严重威胁下游人民群众的生命财产安全。因此，深入分析土石坝的渗流特性，总结行之有效的防渗加固措施，对病险土石坝的除险加固工程具有重要的理论指导与实践价值。

二、土石坝渗流基本原理与特性分析

土石坝渗流本质上是水在坝体与坝基岩土孔隙中的流动过程，其运动规律符合达西渗流定律，即渗流速度与水力梯度成正比，比例系数为岩土体的渗透系数。渗透系数是反映岩土材料透水性能的核心参数，坝体填土颗粒越不均匀、压实度越低，渗透系数就越大，渗流速度也随之提升。从渗流分布来看，均质土石坝的渗流自由面从上游水位向坝体内部逐渐降低，最终以渗出点的形式出现在下游坝坡，渗流场内的水力梯度沿渗流方向不断变化，在坝坡出渗段往往会形成较大的水力梯度，更容易引发渗透变形。

不同坝型结构的渗流特性存在显著差异，对于设置了心墙或斜墙的分区土石坝，防渗体的渗透系数远低于坝壳填料，渗流主要受到防渗体的控制，大部分水

头损失集中在防渗体部位，下游坝壳的渗流水头和水力梯度显著降低，渗流稳定性更好。但如果防渗体出现裂缝或渗漏通道，渗流会直接绕过防渗体渗入下游坝体，导致局部水力梯度骤增，引发坝壳的渗透破坏。从坝基条件来看，如果坝基存在透水性较强的砂砾石层，且未设置有效的防渗处理，渗流会沿坝基快速流动，不仅会增加水量损失，还会在坝基下游出渗口形成较大的渗透压力，引发坝基的管涌或流土破坏。

三、土石坝常见渗流病害与破坏机制

土石坝的渗流病害主要表现为四种形式，分别是坝体渗漏、坝基渗漏、绕坝渗漏和渗透变形。坝体渗漏多是由于填土压实度不足、坝体存在分层碾压的缝隙，或者防渗体开裂造成，表现为下游坝坡出现大面积湿润甚至散浸，严重时会造成集中渗漏通道，带出大量坝体颗粒。坝基渗漏多是因为坝基存在透水性较强的土层、岩溶发育带或者古河道，前期防渗处理不到位导致，渗流沿坝基流动，会不断淘刷坝脚，降低坝体整体稳定性。绕坝渗漏则是由于两岸坝肩与山体结合部位清理不彻底，或者岸坡岩体存在裂缝断层，渗流从坝肩绕过坝体流向下游，长期作用会掏空坝肩填土，导致坝肩失稳。

渗透变形是渗流破坏的最终表现形式，主要分为管涌、流土、接触冲刷和接触流失四种类型。管涌多发生在级配不连续的砂砾石土层中，渗流作用力将土体中的细小颗粒从大颗粒的孔隙中带出，逐渐在土体内部形成贯通的渗漏通道，管涌发展初期很难被发现，一旦贯通到上游就会引发坝体快速溃陷，是风险性最高的渗透破坏类型。流土多发生在级配均匀的细粒土中，当渗流的水力梯度超过临界水力梯度时，整个土体表层会被渗流顶起、冲蚀，发生流动破坏，多出现于下游坝坡出渗段和坝基下游出渗口。接触冲刷多发生在两种不同渗透性材料的接触面上，比如防渗体与坝壳的接触面、坝体与混凝土涵管的接触面，渗流沿接触面流动过程中不断带走细小颗粒，逐渐形成集中渗漏通道。接触流失则是发生在防渗层与下卧透水层之间，上层防渗层的细小颗粒被渗流带入下层透水层，逐渐掏空防渗层，引发防渗体失效。

四、土石坝防渗加固常用措施分析

针对不同类型的渗流病害，当前工程中常用的防渗加固技术主要分为坝体防渗加固、坝基防渗处理和下游排水减压三大类，各类技术的适用条件各不相同。

坝体防渗加固中应用最广泛的是混凝土防渗墙技术，该技术是通过专用机械在坝体中开槽，然后浇筑混凝土形成连续的防渗墙体，切断坝体内部的渗漏通道。混凝土防渗墙的渗透系数极低，防渗效果好，适应各种类型的坝体渗流病害，尤

其适用于深度较大的均质土石坝防渗加固，缺点是施工成本较高，对施工设备要求较高，施工过程中对坝体原有结构扰动较大。对于坝高较低的中小型土石坝，高压喷射灌浆防渗技术应用更为广泛，该技术通过高压射流切割破坏坝体原有填土，使水泥浆液与土体混合凝结形成连续的防渗板墙，施工设备简单，成本较低，对坝体扰动小，适用于砂性土和粒径较小的砂砾石坝体，缺点是防渗墙的均匀性相对较差，对于大颗粒卵石地层的处理效果不佳。

坝基防渗处理中，对于透水层厚度不大的坝基，多采用垂直防渗帷幕技术，通过钻孔灌注水泥浆或水泥黏土浆，形成连续的防渗帷幕，切断坝基渗流通道；对于透水层厚度较大的坝基，也可采用防渗墙延伸到不透水层的处理方案，防渗效果更为彻底。如果坝基透水层厚度极大，建设垂直防渗工程成本过高，也可采用上游铺盖加下游排水减压的处理方案，在上游坝脚前铺设黏土铺盖，延长渗径，降低水力梯度，这种方案施工简单，成本低，但防渗效果相对有限，需要配合下游排水减压措施共同使用。

五、结论

渗流稳定是土石坝运行安全的核心控制因素，渗流特性受坝体结构、材料性质、地质条件和水位变化的共同影响，不均匀渗流引发的渗透变形是土石坝失事的主要诱因。在土石坝防渗加固工程中，需要首先通过地质勘察和渗流计算明确渗流场分布特征与病害类型，结合工程实际条件合理选择防渗加固技术，对于深度较大的渗漏病害优先选择混凝土防渗墙，中小型低坝可优先采用高压喷射或劈裂灌浆技术，同时必须配套完善的下游排水减压措施，才能保障渗流稳定。未来随着防渗材料和施工技术的不断发展，新型环保防渗材料和精细化施工工艺将进一步提升土石坝防渗加固的效果，降低工程成本，为病险土石坝的安全运行提供更有力的保障。

参考文献

- [1] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 中国水利水电出版社, 2003.
- [2] 邵长云, 李雷. 我国病险水库土石坝渗流病害及加固技术综述[J]. 水利水电工程学报, 2012(03): 81-86.
- [3] 张家发, 王金龙. 土石坝渗流安全分析研究进展[J]. 岩土工程学报, 2001(06): 750-754.