

水利工程堤坝防渗加固技术应用及其质量控制

李绍云

云南河渠书工程设计咨询有限公司

摘要:在我国水利工程建设和项目维护过程中,堤坝防渗加固工程是减少由堤坝坝体渗漏造成灾害、提升坝体结构稳定性、保障堤坝功能正常运转的重要举措,是我国水利工程项目使用寿命延长、减少重建成本支出和抗灾成本支出的必要工作。本文从堤坝渗漏现象成因、特点及常见渗流分析角度出发,探讨堤坝防渗加固技术要点及其应用,并结合我国当前堤坝防渗加固工作的实际情况提出了水利工程堤坝防渗加固工程质量控制对策,希望为堤坝防渗加固工程的高质量发展提供了理论基础。

关键词:水利工程施工;堤坝防渗加固;质量控制;堤坝渗漏

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.09.071

一、堤坝渗漏现象成因、特点及常见渗流分析角度

(一) 堤坝渗漏现象的一般成因

水利堤坝的渗透现象是由坝内水体对坝体的自然渗透开始,逐渐损害堤坝结构而日益严重成为渗漏现象的。^[1]首先,由于水利堤坝的建筑材料多为土石、水泥、混凝土等具有可渗透性的材料,坝内的水体长期与堤坝内壁接触,会自然形成不同程度的渗透。这种渗透可能导致坝体材料抗剪性能削弱,当水流的冲击使坝体受剪切力时,就可能出现愈演愈烈的变形裂缝现象。坝体的形变进一步影响了坝基稳定性,裂缝内的松散的坝体结构颗粒受水流影响发生移动,致使坝体从内部开始进一步形变。当水体对坝体的渗透现象到这一程度时,水利堤坝的防晒能力就极大下降了,堤坝所能发挥的实际作用开始受到影响,产生了一定的灾害风险,而水资源在渗透过程中的流失也使其蓄水功能受到了破坏。

(二) 堤坝渗漏问题的特点

深刻把握堤坝渗漏问题的特点,有利于创新堤坝防渗加固技术,并对不同情况的堤坝进行防渗加固。

从学理上来看,堤坝渗漏问题涉及水利堤坝建设时的建筑学问题、水利堤坝选址时的地质学问题、研究水体与堤坝相互作用的水文学问题和堤坝整体工程的工程设计问题,具有一定的复杂性。在分析堤坝渗漏问题的成因时,应当充分结合这些学科的理论内容和学科交叉情况进行考虑。

从水利堤坝渗透问题的现象来看,水利堤坝的渗透具有较强的隐蔽性,从其开始渗透到严重危害到堤坝安全和功能被发现并整改之间存在较长的时间延迟。^[2]这是由于水利堤坝的渗透问题常常是在水体和堤坝的相互作用中产生的,问题常现于与水体直接接触的坝体内

壁,如不经专门检查,很难从外部发现渗透现象。

水利堤坝的渗透现象发展到渗漏阶段时常常具有明显的突发性。当水利堤坝与水体的相互作用达到堤坝坝体的质变临界点,在受到室外环境变化、水文情况突变等外来偶然因素的干扰,就会发生严重的渗透问题,且很难以人为方式干预和补救。因此,水利堤坝的渗透现象必须防患于未然。

(三) 堤坝渗流分析的常见角度

堤坝的渗流是由堤坝临水侧和背水侧存在的水头差产生的,其中的有害渗流能够对堤坝产生渗透破坏。因此,有必要研究堤坝渗流问题,对堤坝渗流进行计算,为堤坝渗透现象的研究提供数据基础。

当前常见的堤坝渗流分析角度包括理论解法、数值解法和流网法。^[3]其中,理论解法依托于流体力学和流体力学理论实现。根据已知的定解条件,能够求解渗流的基本微分方程,得到包括渗流流速、比较和渗透压力等在内的精确渗流要素。或将坝内渗流区域分为若干段建立运动方程式,解出渗流要素和浸润线。堤坝渗流的数值计算方法分为有限单元法和差分法。从已有的渗流计算研究来看,建立数学模型描述渗流运动,将其空间分割为若干有限小区域,时间分割为若干时段进行计算的有限单元法是解决复杂渗流问题的最佳方法。将渗流场中势能相等的点连接起来构成的曲线形成的网格称为流网,通过流网能够揭示平面渗流问题中的水力要素或一些较复杂的边界问题。

二、水利工程中的堤坝防渗加固技术要点及其应用

(一) 堤坝防渗加固技术要点分析

1. 降低浸润线

堤坝浸润线是渗透水流表面与坝体横断面的交线,堤坝浸润线以下的坝体处于饱和状态,受到渗透水流的渗透力作用。^[4]堤坝浸润线以下坝体所受的渗透力是渗透水流在水头差作用下作用于单位体积土体内土地上的拖曳力,这种力的方向与渗流方向一致,推动着坝体材料颗粒向前运动,可能引起坝体的渗透变形,不利于坝体斜坡和坝基的长期稳定。严重的渗透变形可能带来流土或管涌危害。此外,堤坝浸润线的位置与形态还深刻影响着坝体的应力、抗剪强度及稳定性。多数堤坝渗流分析研究中均涉及对堤坝浸润线位置的确定。降低堤坝浸润线一直是堤坝防渗加固技术工程中重要的研究课题。

2. 增强堤坝抗滑性能

堤坝滑坡现象是指从堤坝顶部或边缘开始出现裂缝,堤坝顶部一些较大裂缝由两端向堤坝边缘下部逐渐

弯曲,而这些较大裂缝的两侧则会出现众多与其平行的小缝隙。这些裂缝在出现初期发展较为缓慢,而在发展到一定程度后继续发展速度逐渐加快,在较短的时间内即出现显著的拉伸、位移,且其活动具有持续性。当堤坝的缝隙发展到这种程度时,可能出现堤坝与其坝基整体滑动或堤坝局部滑动的滑坡现象。堤坝底部的地面被推挤外移,呈现出圆弧形的地貌状态。

对堤坝发生滑坡的原因的探究为增强堤坝抗滑性能提供了理论基础。长时间高浸润线、高水位的维持对坝体抗剪强度的损害是引起堤坝滑坡的一大原因。高水位条件下,水体对坝体的渗透压力长时间过高,可能引起背水坡与迎水坡之间的平衡失常,若堤坝边坡过陡,则更容易因此出现滑坡。^[5]堤坝建设时未能严格按照设计标准完成施工,铺土过后或碾压不实也可能使堤坝的抗剪强度不能满足抵抗水体渗透压力影响堤坝内外壁平衡的要求。

综上所述,要增强堤坝的抗滑性能,核心在于通过降低堤坝浸润线、严格按照设计标准建设坝体,增强、保持堤坝的抗剪强度。通过加强堤坝的抗滑性能,能够有效防范堤坝滑坡带来的坝体损害,减少坝体损害导致的渗漏现象。

3. 合理运用新型材料提升堤坝防渗水平和安全系数

近年来,材料科学的发展使得我国水利工程建设过程中以运用水泥砂浆注浆材料为主的传统的灌浆加固技术和防渗墙加固技术的应用能够进一步优化防渗加固建设成效,提升水利工程堤坝的坝体强度和防渗性能。不同的新型材料往往在提升土体抗剪强度、结构稳定性方面具有不同效果。要使得这些材料的运用能够起到最大化效果,必须充分研究水利工程堤坝建设选址地区的土体情况,针对各地土体的特殊性审慎研究,通过新型材料搭配方案的虚拟模型拟合和实验数据监测决策最佳的新型材料搭配方案应用于堤坝建设过程中。还要注意到的是,这些新型材料与传统的水泥砂浆材料相比常常具有一定的环境毒性,在规划新型材料的应用时,还必须结合堤坝建设当地的土壤用途来决定,涉居住与耕种用途的土地附近必须严格控制此类新型材料的用量和范围。

(二) 堤坝防渗加固技术的应用

1. 裂缝灌浆防渗加固技术

裂缝灌浆防渗加固技术是一种用于处理土坝坝体不均匀呈现裂缝导致的初始渗漏问题、管用危害和坝体破坏的技术。^[6]依据坝体中裂缝的性质不同,科学研判向其进行灌浆加固的工具和方法,通过钻孔或置入的孔管向裂缝中注入特制的浆液,形成具有一定强度和阻水性能的新“坝体”,将坝体上的裂缝充填起来,压实土层并进一步固化坝体。对于质量较差的堤坝,还可改变其应力条件,使其形态更有利于坝体稳定。该技术的实施效果取决于坝体孔隙度,坝体孔隙越多、体积越大,能

够接受的浆液就越多,采用该技术进行防渗加固的效果就越好。

2. 防渗墙防渗加固技术

堤坝防渗墙防渗加固技术主要包括高压喷射注浆成墙防渗、振动沉模板墙防渗、混凝土置换成墙防渗及垂直铺塑防渗,这些不同类型的防渗墙防渗加固技术应用与不同的堤坝环境、堤坝建筑材料和成本控制方案中。

高压喷射注浆成墙防渗是一种通过高压喷射灌浆机设备将特制水泥浆液施加20Mpa以上的高压力冲击受喷击土体结构,利用巨大的压力破坏土体原有的结构,通过喷出的水泥浆液流的冲击力和离心力使土体颗粒与水泥浆液均匀结合形成一种新的混合体。这种新的混合体静置一段时间后,其中的土体颗粒和水泥浆液便能够共同硬化形成所需形状的固结体。这些固结体又彼此紧密咬合成具有整体性的防渗墙,就实现了高压喷射注浆成墙。该方法常见于对堤坝接触带和地基覆盖层等位置的防渗加固,使用的材料主要是水泥,辅以一些能够增强水泥强度的化学物质,材料相对廉价易于获得且环境友好,所利用的设备也相对简单方便管理。

振动沉模板墙技术是对传统挖土开槽建造连续防渗墙方法的优化。传统的挖土开槽建造连续防渗墙的方法由于释放了地基应力,需通过泥浆固壁法保障墙体达到设计厚度、避免断墙现象出现。振动沉模法施工建造连续防渗墙对泥浆固壁法依赖性相对较低,无开槽塌孔、断墙现象。其施工时主要发挥作用的是强劲的垂直激振力。施工人员首先在空中腹钢模板中预注入一定量的浆液,振动沉模施工时将空腹钢模板沉入地层,在垂直激振力作用下对钢模板进行提拔,浆液就会在振动力和重力的作用下从模板下方注入到孔槽内。而空腹钢模板正为浆液的成型提供了护壁作用,将造槽、护壁和灌注三个程序连续起来形成一种新工艺。这种新工艺与传统工艺相比,在灌注阶段灌注更充分,受振动作用的影响将与槽孔直接相连的存在透水可能的孔隙一次性完善充填,防水性能更好。该技术常用于处理较低等级的、土壤原生环境较复杂的堤坝。

混凝土置换成墙防渗是一种首先由施工人员对堤坝中需进行防渗加固的路段开挖槽道,在槽体内利用泥浆护壁法进行加固。再向槽体中均匀灌注适量混凝土,利用振动作用和捣压压力使其充满槽体中的缝隙。混凝土凝结硬化后,就在槽体中形成了连续的具备防渗性能的混凝土墙。该技术通过改变土石类堤坝的土体结构优化了其结构物理学性能,具有施工简单、使用寿命长的优势,是当前堤坝防渗加固的主流技术之一。

对于水利堤坝工程中堤坝出现渗漏、结构变形等需要整改的质量问题的情况,可使用垂直铺塑防渗法对其进行处理。与混凝土置换成墙法相似,这一技术在施工初期也须先在堤坝结构中开挖槽段并采取泥浆护壁措施。其后,在槽体上均匀铺设与槽壁垂直的土工膜,再

利用具有强劲防水性能的特殊填料回填槽段。该技术同样具有施工程序简单、防渗效果好、材料和工程成本低廉的优势，常用于处理河流堤坝和水库堤坝。

三、水利工程堤坝防渗加固工程质量控制对策

(一) 依据地质勘探及现场考察结果做好堤坝潜在险情预案工作

依据我国“实事求是”“具体问题具体分析”的一般工作思路，在水利工程堤坝防渗加固工程开始施工之前，相关的工程管理人员和专业技术人员必须做好地质勘探工作和现场实际情况考察工作，记录下施工当地土壤湿度、土壤颗粒结构、水文条件、气候、温度等与堤坝防渗加固工程密切相关的地质信息，了解好堤坝附近的建筑分布、人员活动等人文社会信息。依据探查得到的地质信息预测堤坝建成以后当地的气候、水文条件是否可能使堤坝受到明显的水体伤害出现浸透现象甚至更严重的滑坡现象，如果存在这种可能，是由什么因素造成的，能否通过人为干预解决这一问题。以这些预测结果为依据，进一步完善堤坝建设方案和堤坝潜在问题的处理预案。如，若堤坝选址地区土壤结构复杂，土层中存在大量裂缝和透水层，在堤坝施工时就应选择能够使灌浆材料深入到这些裂缝中的振动沉模板墙技术做好防渗加固措施。而若当地雨量充沛，或降雨季节性较强，则要在设计堤坝的建设方案时着重设计导流设施，选取强度更大的建筑材料构建坝体提升其抗剪强度，以保障在丰水期能够顺利降低堤坝的浸润线，提升堤坝的抗滑性能。依据探查得到的人文社会信息预测堤坝投入使用后是否可能受到周围地区人民群众活动的影响，若出现质量问题导致渗透或滑坡可能产生的社会危害。以对人文社会信息与堤坝关系的预测成果为依据，决定堤坝建设的附属工作。

(二) 施工选材注重注浆材料性能

从堤坝防渗加固技术的应用情况来看，浆液的材料性能直接决定了堤坝防渗加固工程的质量。因此，要对堤坝进行防渗加固工程的质量控制，必须在施工选材时注重对注浆材料性能的强化。传统的水利工程堤坝在建筑时通常采用水泥砂浆作为浆液注入到土体结构中形成防渗层。然而，普通的纯水泥砂浆在抗渗性能、抗剪强度和抗压强度方面都不能满足当代水利工程堤坝应对日益复杂的气候变化或人为活动带来的水文状况突变，可能出现堤坝工程顺利完成，但受材料强度影响堤坝使用寿命的现象。

材料科学的发展为水利工程堤坝防渗加固浆液选择提供了新的可能。一方面，普通的水泥砂浆与特殊化学物质的结合极大提升了其强度和稳定性，另一方面，新型高聚物注浆材料有利于增强注浆过程的可控性，在填补土体结构中的裂缝时具有显著的应用价值。从国内外堤坝防渗材料的最新研究成果来看，已有成品高聚物注浆材料能够投入水利工程堤坝建设使用。以水作为固

化剂的聚氨酯注浆材料能够同时兼顾防渗效果和加固效果；脲醛树脂注浆材料抗压强度超过5MPa，具有高抗压性能和显著的加固效果。

(三) 专业技术人员全程监理堤坝防渗加固工程施工情况

在我国水利工程堤坝建设过程中，常常存在堤坝的实际建设工作由学历水平相对较低、对堤坝防渗加固理论认识不足普通工人完成的现象，在施工过程中就可能存在忽视堤坝建设过程中工程标准严格性和重要性，导致堤坝工程建设质量不均衡的问题。为缓解这一问题，在水利工程堤坝施工过程中，对堤坝防渗加固技术了解较深刻的专业技术人员应当通过分片负责，轮岗值守的方式全程监理堤坝施工过程中的防渗加固施工情况。对于工人施工过程中存在的问题，必须绝不姑息地指出并及时调整，保障整个堤坝建设过程能够保质保量地完成。同时，对于水利工程堤坝建设过程中部分对技术掌握程度要求较高的精密环节，如灌浆施工期间实时调节灌浆压力和浆液稠度等工作，应当由专业技术人员持续观测、严格按照国家标准进行精确调整，及时处理施工过程中可能出现的突发状况。

四、结语

从堤坝对我国经济、社会、生态的多重重要影响来看，做好堤坝防渗加固工作，严格控制堤坝防渗加固工程质量，防范堤坝渗透问题及其可能引起的更为严重的滑坡问题给周边造成人身、财产、生态伤害势在必行。而由高质量堤坝防渗加固工程提升的堤坝蓄水、防洪减灾等效益也是满足周边地区用水安全的有效策略。在我国现代化发展的当代深入研究水利工程堤坝防渗加固工作和质量控制方法，能够更好地确保水利工程建设能够满足其运行需求，为社会的发展提供更有利的水文条件。

参考文献

- [1] 尚现军, 孙夕明. 水利工程施工中堤坝渗漏原因以及防渗加固技术的探讨[J]. 砖瓦世界, 2021(2): 219.
- [2] 王甲超. 水利工程施工中堤坝渗漏原因以及防渗加固技术的探讨[J]. 商品与质量, 2020(22): 294.
- [3] 王小茹, 张世安. 水利工程施工中堤坝防渗加固技术探析[J]. 东北水利水电, 2023, 41(11): 14-16, 49.
- [4] 王红军. 水利工程施工中堤坝防渗加固技术的运用[J]. 砖瓦世界, 2023(23): 219-221.
- [5] 冯亮, 张君启. 简析水利工程施工中堤坝防渗加固技术[J]. 建材发展导向(上), 2021, 19(4): 248-249.
- [6] 徐立军. 水利工程施工中堤坝防渗加固技术应用及质量控制[J]. 中国科技纵横, 2022(6): 91-93.