

复杂流场中堤防防冲刷护坡结构形式优化设计

李欢 顾滨

中水东北勘测设计研究有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i5.6988

[摘要] 堤防作为防洪减灾体系的关键屏障,其在复杂流场作用下的安全稳定至关重要。文章聚焦于复杂流场环境下堤防护坡结构的防冲刷设计优化问题。首先,剖析护坡结构在紊动水流、渗流及土体耦合作用下的三大核心受力特性,揭示了其受力环境的复杂性。其次,探讨护坡结构在冲刷作用下的三种主要破坏模式:陡坎蚀退冲刷破坏、剪切蚀退坍塌破坏及浸泡剥蚀破坏,阐明各自的发生机制与演化过程。基于对受力特性与破坏机理的深刻理解,报出复合结构与材料协同设计、透水消能与压力调节型结构、仿生与生态耦合型护坡以及数字化智能监测与自适应调控结构等策略。

[关键词] 复杂流场; 堤防护坡; 防冲刷; 结构优化; 破坏模式

中图分类号: TV871.1 **文献标识码:** A

Optimal Design of Embankment Erosion Protection Slope Structures in Complex Flow Fields by

Huan Li Bin Gu

Northeast Water Resources Survey, Design and Research Co., Ltd.

[Abstract] As a key barrier in the flood control and disaster mitigation system, the safety and stability of dike slopes under complex flow conditions are of utmost importance. This paper focuses on the optimization of scour prevention design for dike slope structures in complex flow environments. Firstly, it analyzes the three primary mechanical properties of slope structures under the combined effects of turbulent flow, seepage, and soil behavior, highlighting the complexity of their stress environments. Secondly, it examines three main failure modes of slope structures due to scouring: steep face erosion and collapse, shear erosion and collapse, and immersion erosion. The mechanisms and progression of each mode are explained in detail. Based on this understanding of mechanical properties and failure mechanisms, several strategies are proposed, including coordinated design of composite structures and materials, permeable energy dissipation and pressure regulation structures, biomimetic and ecologically integrated slopes, as well as digital intelligent monitoring and adaptive control systems.

[Key words] Complex flow; Dike slope; Scour prevention; Structural optimization; Failure modes

引言

堤防是保障江河安澜、保护人民生命财产安全的根本水利设施,但是,河道弯段、汉口、桥梁码头及水工建筑物邻近区域的水流具有强紊动、大流速梯度、螺旋流等鲜明特征,该区域的流场可被称为典型的“复杂流场”。堤防护坡结构在该流场所受的冲刷作用超过均匀稳定流,是堤防失稳乃至溃决的诱因。随着全球气候变化导致极端天气事件频发,流域洪水风险加剧,对堤防工程的安全性和韧性提出了前所未有的挑战。在此背景下,我国“十四五”规划(2021-2025)及后续发展战略中,将水安全、防灾减灾体系建设和生态文明建设置于国家战略高度。国家强调推进水利基础设施体系现代化,提升水旱灾害防御能力,这为堤防工程的提质升级指明了方向,也对护坡结构的防冲刷性能

提出更高要求。

1 复杂流场中护坡结构受力特性

1.1 高强度紊动水流的动水压力与剪切力

复杂流场突出的特征是水流的非恒定性及高度紊动性,护坡结构所受动水荷载远大于常规情况,主流、二次流及漩涡叠加在一起,致使作用于护坡表面的流速、压力在时间及空间上都剧烈波动。数值模拟结果揭示这一点:护坡结构迎流面、转角处以及粗糙单元附近均会形成局部高压区及瞬时负压区,后者产生的脉动压力会对护坡块体施加反复的推拉、掀动作用,从而加速其疲劳松动。水流沿坡面切向流动时所形成的切向剪切力是冲刷作用的驱动力。复杂流场中边界层内的紊动涡旋结构会大幅度增大壁面剪切应力,在水流分离及再附着点,剪切力可达到

平均值的数倍。动水压力与剪切力二者联合作用时,突破护坡单元(砌石、混凝土块)的嵌固力或材料本身的抗剪强度,导致单元剥离、位移,最终引发护坡的初始破坏。

1.2 结构内外渗流压力与浮托力

洪水、潮汐及船舶波等流况会造成水位急剧升降,故堤防护坡结构内外形成较大的水力梯度,形成复杂、多尺度的渗流场。具体而言,外部水位快速上升时水流自护坡结构孔隙渗入堤身,水位骤降时堤身内饱和水体不能及时排出,因此会产生指向坡外的渗流压力。该渗流压力有两方面危险的物理效应:第一,它降低土体的有效应力,直接弱化堤坡的整体稳定性;第二,它在护坡结构底部及块体之间产生极大的浮托力,该浮托力会抵消部分护坡单元的自重,因而降低其抵抗水流掀动力的能力。当坡外渗流压力足够大时,土颗粒会被水流直接带走,形成“管涌”或“潜蚀”现象,从护坡结构内部掏空基础,最终导致结构整体塌陷。因此,渗流压力及相应的浮托力实质上是导致护坡结构从内部弱化、失去稳定性的因素。

1.3 冲刷-结构-土体耦合作用下的变形与应力集中

护坡结构的稳定性并非孤立存在,而是其自身、下方土体基础以及外部水流冲刷三者动态耦合作用的结果。复杂流场常在护坡坡脚处造成严重局部冲刷,形成冲刷坑,坡脚支撑因而被削弱甚至彻底破坏。坡脚悬空之后,柔性或半刚性护坡结构就会发生下沉、弯曲、滑移变形,这些变形会破坏结构原有的整体性及密实性:连锁块体之间产生过大的缝隙,内部填料直接暴露于水流冲刷之下。结构变形会导致内部应力重新分布,通常在结构的中下部或变形最剧烈处出现应力集中现象。若该应力集中值超过材料的许用应力,结构就会开裂、断裂。形成恶性循环:冲刷引起变形,变形又增大结构的易损性,结构因此更易于遭受后续水流的破坏,冲刷进一步加剧,结构渐次破坏。

2 护坡结构冲刷破坏的主要模式

2.1 陡坎蚀退冲刷破坏模式

陡坎蚀退冲刷破坏是护坡在强冲刷环境下的一种破坏形式,该模式的初始阶段通常是在护坡表面或坡脚处因局部材料薄弱,或水流直接冲刷形成微小陡坎或阶梯状地形,继而陡坎上下游水流条件发生突变,水流流经陡坎顶时形成冲击射流,直接淘刷陡坎根部,同时陡坎下方又形成强烈回流及漩涡,二者共同作用于陡坎根部,造成其被大量掏蚀。当根部掏空到临界程度时,上方护坡块体或土体因失去支撑,在重力作用下以悬臂梁的形式发生剪切或弯曲断裂,因而坍塌。坍塌的块体被水流带走之后,新的、位置更靠后的陡坎又自然形成。因此整个过程犹如溯源侵蚀,陡坎以溯源侵蚀的方式不断向上游(或坡上)后退,护坡由此被逐层“啃食”,破坏范围层层扩大,终至整个堤防断面都被破坏。

2.2 剪切蚀退坍塌破坏模式

该模式常见于堤防发生漫顶溃决的过程中,或在高含沙水流对非黏性土质坡体的冲刷场景。其核心机制是高速水流产生的巨大剪切力直接作用于护坡或坝体表面。溃口形成阶段坝坡

发生快速剪切侵蚀,坝肩快速向上游蚀退,发展阶段溃口两侧坝体因失稳坍塌逐渐发展拓宽。坝体在漫顶水流冲刷下是否发生快速剪切侵蚀是区分该模式与其他模式的关键。在这种模式下,水流对坡面材料的剥离是以层状或片状方式进行的,而非形成集中的陡坎。只要水流的剪切应力超过坡面材料的临界启动剪切应力,表层颗粒就会被剥离并输运走。随着表层材料不断被侵蚀,坡面整体高程持续下降,坡度逐渐变缓。当侵蚀发展到一定深度,或由于侧向侵蚀导致溃口两侧的边坡变得过陡时,边坡土体会在重力作用下达到极限平衡状态,发生滑塌或坍塌,使得溃口进一步拓宽。

2.3 浸泡剥蚀破坏模式

该模式是以浸泡、剥蚀交替的方式作用于筑坝材料,因此破坏过程发展极缓慢,没有明显的“陡坎”冲刷,这种破坏模式主要与材料的水理性质和周期性水位波动密切相关。具体而言,水位上升或长期浸泡时水分渗入护坡材料(多为黏性土或胶结性较差的材料)的孔隙,使颗粒间的有效联结弱化,土体软化,抗剪强度、抗冲刷能力都大大降低。水位下降或波浪作用时,表层材料容易被相对较弱的水流剥离、带走。形成“浸泡软化-水流剥蚀”的典型循环过程,护坡厚度因而逐次被削薄。与前两种模式相比,浸泡剥蚀破坏的发展速率很慢,破坏形态表现为坡面持续、均匀剥落,极少形成集中的冲刷坑或陡坎,但是也正因如此,其累积效应终将导致护坡失效,内部堤身直接暴露于水流之中,构成严重的安全隐患。

3 复杂流场中堤防冲刷护坡结构形式优化设计

3.1 复合结构与材料协同设计

在复杂流场中进行复合结构及材料协同设计,首先要建立以高强度抗冲刷装甲层为核心的表层防护体系,即采用预制异形连锁混凝土块作为主要防护单元,其几何形状设计为有明确三维嵌固特性的型式,如改进型连锁块或带榫卯结构的异形块体,形成整体性良好、刚度极高的刚性覆盖层,直接、可靠地抵抗高能水流的冲击及剪切作用。在材料选择上,针对流速极高或推移质运动强烈的河段,可在混凝土中掺入高强聚丙烯纤维或碳纤维,显著提升装甲层抗裂与抗冲刷能力;同时,对重型抛石方案,应先按水力计算确定块石的最小粒径及重量,再选用级配优良的大块石,保证其在水流作用下稳定不移。在装甲层之下设计功能明确、层次分明的反滤层体系:先在堤身坡面铺设一层高强度针刺无纺布土工布,作为第一道反滤屏障,其等效孔径 D_{95} 必须根据堤身土体粒径级配曲线严格选定,既能很好地阻留细颗粒土,又具备充分的透水性以释放堤内渗透压力。土工布之上再铺设一层级配碎石垫层,所选碎石粒径要符合层间反滤准则,即垫层与堤身土、垫层与土工布之间的粒径比宜控制在合理范围($D_{15}/d_{85}<5$),从而最大限度地防止土体迁移。

3.2 透水消能与压力调节型结构

构建透水消能与压力调节型结构,一方面,采用格宾石笼作为主体结构单元,石笼网箱需采用高镀锌量且覆塑处理的双扭结六边形金属网材,以确保其在复杂水环境中的耐久性,内部填

充材料则选用粒径大于网孔尺寸且级配连续的坚硬块石, 填充时需保证块石紧密排列并控制空隙率在30%至40%之间, 形成稳定的多孔透水体。在具体铺设时, 格宾石笼应沿坡面分层错缝砌筑, 每层石笼之间以及石笼与坡面之间, 需设置土工布反滤层, 防止堤身土颗粒通过孔隙流失; 同时, 在坡脚处设置体积更大的格宾石笼作为护脚, 以抵抗坡脚冲刷。另一方面, 应用大孔隙率透水混凝土框架, 该框架采用无细骨料或少细骨料的大孔隙混凝土预制而成, 其孔隙率设计需达到25%以上, 形成连通的孔道系统。框架可预制网格状或拱形结构, 在现场吊装铺设于坡面, 并在框架内部填充块石或卵石, 进一步增强消能效果。透水混凝土框架的底部同样铺设符合反滤要求的土工布或级配碎石层。对于干砌块石护坡, 则需选用大块径、形状规则的块石, 由经验丰富的技工进行人工砌筑, 确保块石之间紧密接触、相互锁扣, 砌缝宽度严格控制, 形成稳固的整体结构, 其下部也需设置完善的碎石垫层反滤。

3.3 仿生与生态耦合型护坡

实施仿生与生态耦合型护坡, 第一, 从仿生形态的结构单元入手, 把护坡表层混凝土砌块设计成有不规则凸起、凹陷或开孔的三维复杂形态, 以红树林气生根的粗糙表面及珊瑚礁多孔结构为蓝本, 开发仿生消浪块体, 其表面布置规则或不规则的凸起肋条及凹槽, 水流流经时能主动破坏边界层, 诱导生成微尺度涡旋, 将主流动能转化为紊动能并耗散为热能, 降低作用于坡面的有效剪切力。更重要的是, 在结构骨架设计中借鉴植物根系网络的原理, 采用树状分叉的混凝土梁柱体系作为三维空间骨架, 提高坡面整体稳定性。第二, 将硬质工程结构与软质生态要素做耦合: 在预制混凝土砌块或仿生结构单元中预留植生孔或植生槽, 孔槽内填入富含有机质、混有乡土植物种子的营养基质土, 所选植物宜为根系发达、耐水湿、固土能力强的乡土物种, 如芦苇、香蒲、菖蒲及适宜品系的柳树等。植物生长过程中根系会自然穿透植生孔并锚入坡面土体, 形成根-土相互缠绕的复合体, 根系的加筋作用及根际分泌物的胶结作用都会提高土体的抗剪强度及抗冲刷能力。

3.4 数字化智能监测与自适应调控结构

构建数字化智能监测与自适应调控结构, 第一, 要在护坡结构的关键部位预埋各类传感器, 在坡脚、坡面中部、结构连接处及堤身内部等应力集中、变形敏感区域预埋光纤光栅应变传感器、土压力计和位移计, 监测护坡结构的应力应变状态及整体变形。同时, 在坡面不同高程及堤身内部埋设孔隙水压力计监测渗

流场变化, 在迎流顶冲点布置流速流向仪或水流冲击力传感器, 直接测量外部水流荷载。所有传感器都应满足长期稳定性、防水性的要求, 并通过有线或无线网络接入现场数据采集单元。第二, 构建基于物联网的数据传输系统, 现场采集的数据由4G/5G或光纤网络实时、自动地传送到云端数据中心。在此基础上开发护坡结构的数字孪生模型, 该模型以高精度地理信息系统数据、结构设计参数及实时监测数据为输入, 借助有限元或计算流体力学方法, 建立与物理实体几何、力学特性都严格对应的虚拟模型, 再用实时监测数据对数字孪生模型做在线同化更新, 因此能评估护坡结构不同工况下的实时安全状态: 结构稳定性、渗流稳定性、整体变形情况, 根据预设的阈值及演化规律, 对冲刷破坏、渗透破坏、结构失稳风险进行分级预警。

4 结束语

面对日益严峻的洪水威胁和复杂流场带来的挑战, 传统的堤防护坡设计理念与结构形式正面临深刻的变革。本报告通过系统分析复杂流场下护坡结构的受力特性与冲刷破坏模式, 明确了其失效的关键力学机制。基于此, 提出的复合协同、透水消能、生态耦合及智能自适应四位一体的优化设计方向, 为构建新一代堤防护体体系提供了清晰的思路。展望未来, 堤防工程的发展必然是传统水工技术与新材料、生态学、信息技术深度融合的过程。将这些优化设计理念付诸实践, 并结合具体工程条件进行因地制宜的创新, 将是提升我国防洪减灾能力、保障江河长久安澜、促进人水和谐共生的关键所在。

[参考文献]

- [1]董传乐. 中小河道治理工程中堤防选型及稳定性研究[J]. 福建建材, 2025, (03): 72-75.
- [2]辛晓东. 太榆退水渠改扩建工程堤防护坡型式比选[J]. 山西水利科技, 2024, (02): 24-26.
- [3]汤超. 跨河现浇箱梁与堤防护坡同时施工技术要点分析[J]. 四川水泥, 2023, (07): 224-226.
- [4]张志学. 新疆某河流域堤防工程设计初探[J]. 云南水力发电, 2017, 33(05): 86-87+90.
- [5]李雅婷, 王聘环. 大潮差粉砂底质环境下海堤的防冲刷措施[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(04): 59-62.

作者简介:

李欢(1980-), 男, 汉族, 湖北省鄂州市人, 本科, 高级工程师, 水利水电工程水工结构勘察设计。