

河道生态护岸工程结构稳定性影响因素与加固对策

古扎丽努尔·麦麦提

新疆维吾尔自治区塔里木河流域叶尔羌河水利管理中心, 中国·新疆 喀什 844000

摘要: 随着人们对河流生态治理的理念日益深入, 在满足河道安全防护的同时, 生态护岸工程也成为了兼顾河道生态系统修复的一种重要工程形式。但受到水动力扰动、岸坡地质情况、材料性能和生态环境变化等因素的影响, 护岸结构在长时间运行中易发生变形、沉降甚至部分区域失稳的问题。本文以河道生态护岸工程结构稳定性的相关问题作为主要的研究内容, 通过分析水动力作用、土体新疆维吾尔自治区塔里木河流域叶尔羌河水利管理中心 特性、材料结构性能和生态因素对护岸稳定性的影响机制, 建立包括受力状态、变形特征和风险识别在内的稳定性评价体系, 并针对水动力调控、土体改良、材料优化和生态协同等方面的加固对策进行探讨, 可以为提高生态护岸工程结构的安全性、保证河道治理的效果提供一定的理论参考依据。

关键词: 河道治理; 生态护岸工程; 结构稳定性; 影响因素; 加固对策; 水土耦合

Factors Affecting Structural Stability of River Ecological Bank Protection Projects and Reinforcement Strategies

Guzalinur Maimaiti

Yarkand River Water Conservancy Management Center of the Tarim River Basin, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China Xinjiang Kashgar 844000

Abstract: As public awareness of river ecological management concepts continues to deepen, ecological bank protection projects have emerged as an important engineering approach that not only ensures river channel safety but also facilitates the restoration of river ecosystems. However, influenced by factors such as hydrodynamic disturbances, geological conditions of the bank slope, material properties, and ecological changes, bank protection structures are prone to deformation, settlement, or even instability in certain sections during long-term operation. This paper focuses on the research of issues related to the structural stability of river ecological bank protection projects. By analyzing the mechanisms through which hydrodynamic forces, soil characteristics, material properties, and ecological factors affect bank stability—specifically within the context of the Tarim River Basin in the Xinjiang Uygur Autonomous Region, under the jurisdiction of the Yarkand River Water Management Center—it establishes a stability evaluation system that incorporates force distribution, deformation characteristics, and risk identification. Furthermore, the paper discusses reinforcement strategies addressing hydrodynamic regulation, soil improvement, material optimization, and ecological synergy, thereby providing a theoretical reference for enhancing the structural safety of ecological bank protection projects and ensuring the effectiveness of river management efforts.

Keywords: River channel management; Ecological bank protection projects; Structural stability; Influencing factors; Reinforcement measures; Water–soil coupling

0 引言

河道生态护岸工程是现代水环境治理体系中的重要组成部分之一, 在满足抵抗水流冲刷和保持岸坡稳定时, 也对改善河流生态环境、促进生境的恢复起到重要作用。相较于传统的硬质护岸而言, 生态护岸结构具备材料种类多、环境适应能力强且生态效益好等优点, 但是由于受到自然环境和工程条件的影响, 其结构稳定性表现出一定的复杂性

和动态性。在实际运行中, 随着河道水位的变化、流速的波动以及岸坡土体的渗透特征不断发生改变, 护岸所承受的受力也随之发生变化, 并且材料的老化、结构连接性能降低、植被演替等问题都会影响到整个护岸的稳定性能, 单靠某一因素进行分析无法准确地反映生态护岸失稳机理。为此, 本文分别从影响因素、稳定性评价及加固对策三个方面开展相关研究工作, 旨在为生态护岸工程结构优化和

安全运行提供理论支撑。

1 河道生态护岸工程结构稳定性的影响因素分析

1.1 河道水动力作用对护岸结构稳定性的影响机制

河道水动力条件是影响生态护岸工程结构稳定性的主要外部作用因素,在水动力的变化过程中对护岸表面和内部结构体系产生直接影响,会引起荷载分布、土体应力状态以及岸坡稳定条件等发生相应变动^[1]。水流冲刷作用会使岸坡表层土体不断被破坏,若流速较大或者水位经常性涨落,则护岸迎水面易出现局部侵蚀、基础暴露、结构连接松散等情况,从而降低了整个结构的抗变形能力。水流渗透作用则会导致岸坡内部孔隙水压力发生变化,使得土体的有效应力减小,抗剪强度降低而引发滑移现象的发生。对于生态护岸结构来说,除了受到瞬间冲击外,还会存在长期的影响效果,即持续性的水流扰动会对材料性能和结构受力状态造成一定的影响。因此要准确地分析水流的速度、水位变化、冲刷强度以及渗流特征之间存在的联系关系,也是揭示护岸结构失稳机理的基础之一。

1.2 岸坡土体特性与地质环境对结构稳定性的影响因素

岸坡土体特性作为决定生态护岸工程地基稳定与否的一个重要的内在条件,它的物理组成、力学参数及水文特征等直接关系到护岸结构承载能力和变形控制效果。不同种类土体的黏聚力、内摩擦角、压缩性能和渗透能力等均有所不同,致使护岸结构在面临同一外部作用时所呈现的稳定响应也有所不同。黏性土整体连接能力强,但是长时间浸水环境中易软化,砂性土虽透水性能良好,但是由于颗粒迁移易出现局部冲刷等问题。地质环境下地下水的变化、土层分布状态及软弱地基条件等因素也影响着岸坡内应力传递的进程,从而导致护岸结构发生下沉、不均匀变形乃至整体失稳。在此基础上,生态护岸稳定性分析需综合考虑土体性质和地质环境条件,厘清不同地质因素作用下结构安全性能变化路径,以增强工程设计和运行维护科学性。

1.3 生态护岸材料性能及结构形式对稳定性的作用规律

生态护岸的材料性能和结构形式决定着整个工程体系抵御外界扰动的能力,在不同的材料类型及其组合方式下会产生不同的受力特征和稳定的机制。生态混凝土、格网材料、天然石材以及植被覆盖结构其强度、耐久性和对环境的适应性都有所不同,而材料本身的抗压性能、抗冲刷

能力和长期耐候性的优劣直接影响了护岸结构安全水平。结构的形式上,如护岸断面的设计、基础连接的方式以及构件之间的组合状态都会影响荷载的传递途径,如果结构设计不能适应河道水的动力的变化,则很容易产生局部破坏,并逐渐发展成整体稳定的问题。

福建省安全生态水系建设采用生态混凝土护岸,并结合多孔透水材料和植被恢复体系,使得护岸在具有一定的抗冲刷能力,改善水土交换条件、提供植物根系发育空间、提高岸坡表层的稳定性。该项目实践证明,生态护岸材料并不简单地担负着防护的作用,材料内部孔隙结构、材料强度和生态适应能力等因素都会影响到材料的长期运营效果。材料老化、连接部位损耗和环境侵蚀作用等因素将随运行时间的延长而进一步弱化结构的性能,使得护岸稳定性表现出动态变化的特点。为此,生态护岸工程建设需充分综合考虑材料性能和结构特点对结构体系进行优化配置,以达到工程防护功能和生态适应能力相和谐的目的。

2 河道生态护岸工程结构稳定性评价体系构建

2.1 护岸结构受力状态与稳定性评价指标体系分析

生态护岸结构稳定性的评价需基于其受力状态进行准确地表征,在同一分析框架下综合考量水流荷载、土压力、孔隙水压力以及结构自身重量和植物根系的作用,来反映不同环境下结构内部应力传递和变形响应。评价指标的选择不能仅限于传统的抗滑、抗倾覆等力学参数,还应该包括岸坡位移、基础沉降、局部冲刷深度、材料完整性和构件连接情况,使得评价的结果能涵盖结构承载、变形控制和耐久保持的不同方面。考虑到生态护岸受到水文过程和地质环境的影响是不断变化的过程,因此指标体系还要体现出一定的动态性和层次性,对于直接影响到失稳程度的关键指标给予较高的权重,并根据指标之间的相关程度减弱信息重复,从而得到一个结构受力特征清楚、评价边界明确,并且可以反映出生态护岸的实际运行状态的稳定性评价体系。

2.2 水土耦合作用下护岸结构失稳模式与风险识别

生态护岸结构的失稳不是单一地由外部水流或者岸坡土体性质引起的,是水动力变化、渗流迁移和土体力学性能的衰减三者共同作用后的综合表现^[2]。流固耦合作用下护岸结构与岸坡土体之间的应力传递关系会发生动态调整,导致结构变形特征和稳定状态产生明显变化^[3]。河流水位的升降会使得岸坡内外水的压力差不断发生调整,在水位快速回落时容易导致孔隙水压力消散滞后,土的有效应力

降低而减弱了其抗剪能力；在局部冲刷改变了坡脚约束条件下，原有的受力平衡被打破，结构极易产生滑移、沉降、倾斜以及局部塌陷等形式的失稳。风险识别应该从失稳诱因、发展过程与破坏结果之间建立起联系，以水位变幅、渗透梯度、土体强度衰减、坡脚冲刷以及结构位移为重点判别的参数，并根据各个指标的异常程度来判断风险等级，让隐蔽性较强且逐渐发展的破坏可以在整体失稳之前得以识别，从而为结构稳定状态的判定以及加固的重点划分提供了依据。

2.3 多因素协同作用下护岸结构稳定性综合评价方法

由于河道生态护岸长期处在水文、地质、材料以及生物等环境的作用下，单一指标无法完整的反映结构稳定情况，在进行综合评价时应该以各因素间的相互影响为主导思想，并把外部荷载、岸坡条件、结构性能以及生态等因素作为层级化的评价内容。在评价中，可以按照指标对结构安全的敏感程度来确定权重，并根据实际的状态和稳定的阈值对其进行标准化处理，减小不同量纲带来的判断误差；而对于相关性较强的指标，则需要考虑它们共同的变化所带来的累积效果，而不能单独判断导致的风险被低估的问题。最后将受力评价、失稳模式识别和风险等级划分构成一个连续的评价链，使得综合评价的结果既能反映出目前结构的稳定性，又能明确出主要的风险来源及其薄弱部位，提高评价结果对加固方案的选择、结构参数的调整和运行维护决策的支持力度。

3 河道生态护岸工程结构加固对策与优化路径

3.1 基于水动力调控的护岸结构增强与防护措施

针对水流冲刷、局部淘刷以及水位涨落引起结构受力波动的情况，护岸加固应该以削减水动力扰动、改善岸坡近壁流态和加强薄弱部位防护为主，并根据河道断面形态、流速分布情况以及冲刷强度等合理调整护岸坡比、坡脚高程与防冲范围，使得水流的作用从局部集中转变为相对均衡的状态。在迎流顶冲、弯道凹岸以及坡脚容易被淘刷的地方，可以设置格宾、抛石或者柔性护脚甚至消能构件，来增加结构抵御持续冲刷和瞬时冲击的能力^[4]；而在水位频繁变化处，则要注重排水、反滤与泄压构造的设计，减少因渗透压力积聚而产生的结构变形。水动力调控与结构补强需要相互配合，在控制外部荷载的同时改善护岸受力路径，让加固措施能够覆盖到坡面、坡脚与基础的关键点上，进一步提升结构的整体抗滑、抗冲、抗变形能力。

针对复杂河段运行环境，应结合季节性的水位变化和极端水动力条件下进行结构适应性分析，合理布置不同区域的防护强度，防止由于单一种类的防护措施导致局部刚度突变，提高护岸体系长期运行过程中稳定性和可靠性。

3.2 结合土体改良与材料优化的结构加固技术

由于岸坡土体的强度低、压缩变形大以及护岸材料的耐久性能差都会影响到结构承载的基础，在进行加固设计时，应该考虑土体性能改善和技术手段结合来实现材料性能提升的设计技术体系。针对软弱、松散或者渗透性强的岸坡土层，可以采取压实换填、固化处理、土工格栅加筋、反滤排水等方式提高土体的黏聚力、抗剪强度和变形约束的能力^[5]，并减少细颗粒迁移和不均匀沉降对结构完整性的不利影响；在材料的选择上，要综合考量其强度、抗冲刷性和耐水性以及环境适应性，根据不同的水位分区选用生态混凝土、块石、格网、土工合成材料。

黑龙江同抚堤防工程在粉砂土岸坡的防护上采用了三维加筋生态护坡，结合土工材料的加筋效果和植被的恢复，用加筋层提高土体的整体性，并且在植物根系的辅助作用下表层土体的稳定能力得到了进一步的提高，粉砂土岸坡的抗变形性能得到了有效的提高。该工程实践证明，对于土体强度不够的地区，单一的材料防护很难满足其长期稳定的需要，而土体改良和生态材料的协同配置可以优化荷载传递路径并增强护岸结构的耐久性。对连接节点、坡脚基础和材料交界面这些应力集中处，也需要加强锚固和搭接构造以降低局部松动扩展为整体失稳的危险，从而在土体、材料和结构之间形成一个稳定持续的受力体系。

3.3 面向生态功能协同的护岸结构优化设计策略

生态护岸结构优化不应仅追求较高的工程强度为目标，而在结构的安全、岸坡防护与生境维持间寻求协调的关系，使得加固措施既能保证稳定又能不给河岸生态过程造成过大的阻隔。可在设计时根据水位的变化范围、岸坡土壤情况和植物适生特点进行结构的功能分区，在常水位以下加强坡脚抗冲和基础约束，在水位涨落带上使用有孔隙连通性的柔性护岸材料，在较高岸坡上布置合适的植物群落和生态基质，让不同的区段发挥相应的防护或生态作用，并且结构构造中要留出一定的排水、透水和根系生长的空间，限制刚性材料的连续铺设范围，防止局部封闭导致水土交换受阻；对于植被的选择也要考虑其根系固土能力和构件承载特征，协调植物生长和结构变形之间的关系，从而构建一个工程稳定性与生态功能互相适配的护岸体系^[6]。在优化设计的过程中，还要考虑到护岸结构全生命周期内

功能衰减的问题,通过对材料耐久性、生态恢复的需求以及运行维护条件来统筹设计参数,从而使工程结构能适应长期的环境变化。生态功能与工程性能的协同优化不仅能帮助提升河道治理的效果,也能减少后期维护的成本,增加生态护岸工程的综合效益。

4 结语

河道生态护岸工程结构稳定性是在水动力条件、岸坡地质环境、材料性能以及生态等因素综合作用下形成的,且其稳定状态呈现多因素耦合和动态演变的特点。而水流冲刷、渗流等则是影响结构受力变化的主要原因,土体性质、材料特征直接影响着护岸抗变形的能力,在此基础上,建立稳定性评价体系可以进行护岸结构受力状态、失稳模式、风险水平等方面的综合分析,并根据水动力调控、土体增强、材料优化、生态功能需要等方面采取相应的加固措施,以提高河道生态护岸工程整体稳定性和运行可靠性。

参考文献:

[1] 假冬冬,陈萌,李锬等.黄河下游多因素耦合作用

生态护坡破坏机制研究进展[J].水科学进展,2024,35(5):853-864.

[2] 张晨,钱亚俊,张桂荣等.基于流固耦合的河道土质岸坡护岸结构优化数值分析[J].岩土工程学报,2020,42(S2):56-60.

[3] 程虎,李蒙,杨劭等.水陆交错带护坡植物固土抗蚀能力比较分析[J].中国水土保持科学(中英文),2024,22(3):56-63.

[4] 黄良誉.新型石笼网垫生态护岸特性研究[D].四川大学,2023.

[5] 刘延飞.粉细砂河岸稳定性及生态护岸防护效果数值模拟[D].长沙理工大学,2023.

[6] 李旭.根土复合体的水作用特性模拟及岸坡稳定性分析[D].四川大学,2023.

作者简介:古扎丽努尔·麦麦提(1987-),女,维吾尔族,新疆伽师县,本科,文章方向:水利工程。