

桥梁基础冲刷对结构安全的影响及防护措施

华叙生

江西省公路工程有限公司 江西南昌 330000

摘 要：本文深入探讨了桥梁基础冲刷现象及其对桥梁结构安全产生的多方面影响。阐述了基础冲刷导致桥梁基础承载力下降、结构稳定性降低、构件疲劳损伤加剧等危害。同时，详细分析了水流特性、地质条件、桥梁自身结构形式等影响基础冲刷的因素。在此基础上，提出了包括设置冲刷防护设施、优化桥梁基础设计、加强监测与维护等一系列针对性的防护措施，旨在为保障桥梁结构的长期安全稳定运行提供参考依据。

关键词：桥梁基础冲刷；结构安全；影响因素；防护措施

引言

桥梁作为交通基础设施的重要组成部分，在跨越江河、山谷等障碍物时发挥着关键作用。然而，桥梁基础长期受到水流的冲刷作用，这一现象对桥梁结构的安全构成了严重威胁。随着交通流量的不断增加以及极端气候事件的频繁发生，水流条件变得更加复杂，桥梁基础冲刷问题日益凸显。基础冲刷可能导致桥梁基础的埋深减小、地基土的力学性能改变，进而影响桥梁的整体稳定性和承载能力。一旦桥梁基础因冲刷而出现安全问题，不仅会影响正常的交通运行，还可能引发严重的安全事故，造成巨大的经济损失和社会影响。因此，深入研究桥梁基础冲刷对结构安全的影响，并采取有效的防护措施具有重要的现实意义。

一、桥梁基础冲刷机理与类型

（一）桥梁基础冲刷的定义与基本概念

桥梁基础冲刷的定义与基本概念是研究起点，其价值在于确立统一术语标准，为后续研究与实践提供语言基础。它指水流作用下，桥梁基础周围及底部河床土体被侵蚀、输移，致基础埋置深度减小的过程，区别于自然演变，是桥梁扰动水流引发的局部变形。冲刷本质是水流剪切应力超泥沙抗起动剪应力，且要区分冲刷与淤积，冲刷致埋深减小威胁桥梁安全。精确界定此概念是冲刷计算、监测及评估安全的前提，为桥梁水害防治确立认知与分析框架。

（二）冲刷的主要类型（局部冲刷、一般冲刷、收缩冲刷）

冲刷类型划分是对复杂现象的科学解构，价值是针对不同冲刷采取差异化分析与防护措施。通常分为

局部、一般和收缩冲刷。局部冲刷是水流绕基础结构物时，在周围高流速、强紊流区对泥沙的集中侵蚀，范围小、深度大、发展快，威胁基础稳定。一般冲刷是桥梁压缩河道，桥下断面流速增大致桥址河段普遍下切，降低基础相对埋深。收缩冲刷是河道束窄，束窄段及下游河床被冲刷。清晰辨识与分析三种类型是预测总冲刷深度、评估基础安全的关键，可指导设计与评估，制定防护策略^[1]。

（三）影响冲刷深度与范围的主要因素

分析影响冲刷深度与范围的因素是量化预测风险的核心，价值是分解自然现象为可测量参数，为预测公式与模型奠定基础。这些因素构成复杂系统，水流特性是主导，决定输沙与剪切应力；河床泥沙特性是物质基础，影响泥沙起动与抗冲刷能力；基础结构几何特征是扰动源，影响局部冲刷程度；还有桥墩群干扰、河道形态、洪水过程及河床演变等复合因素。系统性识别与量化研究使冲刷问题走向定量计算，为研究提供核心输入，提升评估准确性与可靠性。

（四）冲刷过程的动态演变特征

研究冲刷过程动态演变特征揭示其非恒定性与时空依赖性，价值是超越静态预测，深入全过程，为桥梁安全监控、预警与应急提供理论支持。冲刷是动态过程，分初始、平衡和动态平衡阶段。初始阶段冲刷深度快速增长，风险高；平衡阶段冲刷速率放缓；动态平衡阶段冲刷深度基本不变。但自然河流中平衡是暂时的，冲刷坑持续调整。理解此特征强调时间因素重要性，提醒关注冲刷达临界值时间，为预测模型与预警系统提供理论支撑，使桥梁安全管理从被动转主动，提升应对洪水能力。

二、冲刷对桥梁结构安全的影响

(一) 基础承载力削弱与稳定性下降

冲刷对桥梁结构最直接、最根本的影响是基础承载力削弱与稳定性下降, 阐明了冲刷从根源上破坏桥梁根基。桥梁基础承载能力和稳定性依赖于周围土体, 冲刷使土体移除、埋深减小, 荷载转移。桩基础冲刷使桩侧摩阻力降低、承载力下降; 扩大基础或沉井冲刷掏空底部土体、削弱抗倾覆和抗滑移能力。承载力削弱非线性, 超过临界值会急剧下降。深入分析此机理为建立数学模型提供理论基础, 助工程师评估剩余承载力, 为决策提供依据^[2]。

(二) 桥梁结构振动特性与动力响应变化

冲刷影响中隐蔽且危险的因素是桥梁结构振动特性与动力响应变化, 揭示了冲刷改变桥梁动力行为。桥梁振动特性取决于质量、刚度和边界条件, 冲刷使基础周围土体流失、刚度降低, 导致结构自振频率降低, 易发生共振, 放大动力响应, 引发疲劳损伤甚至破坏。振型改变影响能量分布, 产生薄弱环节。深入研究推动了基于振动监测的损伤识别技术发展, 可实现无损、实时监测与预警。

(三) 冲刷引发的桥梁沉降与倾斜问题

冲刷长期作用导致桥梁沉降与倾斜, 关系到使用功能和行车安全, 将力学效应转化为几何变形。土体流失或固结压缩使基础沉降, 冲刷不均会导致差异沉降和倾斜。沉降影响行车舒适性和安全性, 产生附加内力; 倾斜改变支座位置, 降低结构承载能力和稳定性。深入分析强调变形监测重要性, 为维修加固提供数据支持。

(四) 极端冲刷条件下的结构失效风险分析

极端冲刷条件下的结构失效风险分析是冲刷影响研究的最高层次, 从概率和后果角度评估桥梁生存能力。极端冲刷指特大洪水时远超平衡冲刷深度的严重冲刷, 会导致基础承载力丧失、桩基屈曲失稳或上部结构倒塌。风险分析结合多学科理论, 评估失效概率和后果, 超越确定性方法局限。其价值在于为防洪设计、风险决策和应急预案提供依据, 是实现桥梁工程“风险可控”的关键环节^[3]。

三、桥梁基础冲刷防护措施

(一) 结构防护措施

结构防护措施的价值在于通过直接改变基础周围的局部几何形态或材料特性, 提升其抗冲刷能力, 是一种被动但行之有效的防护手段。护坦是一种铺设在桥墩或桥台周围河床上的水平或倾斜板状结构, 其核心作用是

增大水流对河床的剪切力作用面积, 从而减小单位面积的冲刷强度, 并防止冲刷坑向基础核心区域发展。护坦的设计需要精确计算其尺寸、埋设深度和边缘处理方式, 以确保其在水流冲击下自身不发生破坏或被淘空。抛石则是将特定级配和重量的块石抛投于基础周围, 形成一个柔性防护层。其价值在于块石之间的空隙可以有效消减水流能量, 同时抛石层能够随着河床的轻微变形而自适应调整, 保持其防护功能。抛石防护的关键在于块石的粒径选择、抛投范围和厚度的确定, 这需要基于水流速度、河床质粒径等参数进行水力计算, 以防止块石被水流冲走。桥墩防护罩, 如各种形状的导流罩或防冲刷套箱, 通过改变桥墩周围的流场结构, 减小高速水流与河床的直接接触, 或引导水流远离桥墩基础。这类措施的价值在于其防护效果明确, 尤其适用于局部冲刷严重的水域。

(二) 水力调控措施

水力调控措施的价值在于从宏观层面改变水流的整体流态, 主动降低水流对桥梁基础的冲击作用, 是一种更具前瞻性和系统性的防护策略。导流坝, 通常建于桥梁上游的河道中, 其作用是引导主流远离桥墩或桥台, 从而减小基础处的行近流速和单宽流量, 从根本上削弱冲刷的驱动力。导流坝的设计需要精确分析河道的整体水流形态, 确定其最优的长度、高度、角度和位置, 以达到最佳的导流效果, 同时避免对河道的整体稳定性和对岸其他工程设施产生负面影响。分流结构, 如丁坝、顺坝等, 通过在河道中设置一系列建筑物, 将部分水流挑离主槽或将其分散, 从而降低桥位处的平均流速。这类措施的价值在于其能够改善整个河段的水流条件, 不仅保护了桥梁, 也可能对河道的稳定和岸坡防护起到积极作用。然而, 水力调控措施的设计和实施远比结构防护措施复杂, 它要求对河流动力学有深刻的理解, 并通常需要借助物理模型试验或数值模拟进行反复验证。其应用价值体现在, 对于大型、重要或跨河桥梁, 尤其是在水流条件复杂、冲刷问题突出的河段, 水力调控措施能够提供一种更为根本和长效的解决方案, 有时甚至是唯一可行的选择^[4]。

(三) 监测与预警技术应用

监测与预警技术应用的价值在于为桥梁基础冲刷风险管理引入了动态、实时的数据支撑, 实现了从“定期检测”到“连续监控”、从“经验判断”到“科学预警”的跨越。传统的冲刷检测多依赖人工水下探测, 频率低、成本高、风险大, 且无法捕捉洪水期间的实时冲刷过程。现代监测技术则通过在桥梁基础附近安装各类传感器, 实现对

冲刷深度、河床地形、水流速度等关键参数的连续、自动采集。例如,声学多普勒流速剖面仪可用于测量三维流速场,而声呐或时域反射计技术则可以实时监测冲刷坑的深度变化。这些数据通过无线传输技术实时发送至监控中心。预警系统的核心在于建立冲刷深度与桥梁结构安全状态之间的关联模型。当监测数据表明冲刷深度已接近或超过预设的安全阈值时,系统能够自动触发不同级别的预警信号,通知管理部门采取相应措施,如限制交通、封闭桥梁或启动应急抢险预案。监测与预警技术的应用价值是革命性的。它使得管理者能够掌握桥梁基础在任何时刻,特别是在危险洪水期间的真实安全状况,为应急决策提供了第一手、最可靠的信息。这极大地降低了因信息滞后或缺失导致桥梁突发性垮塌的风险,保障了人民生命财产安全。

(四) 防护措施实施中的关键问题与优化方向

防护措施实施中的关键问题与优化方向的价值在于对现有防护技术体系进行批判性审视,识别其在实际应用中面临的挑战,并指明未来技术发展的路径,从而推动整个领域的持续进步。当前防护措施实施中存在若干关键问题。首先是设计理论的局限性,许多冲刷深度计算公式基于简化的水力学模型和室内试验数据,对于复杂自然河流条件下的预测精度有限,导致防护设计可能过于保守造成浪费,或偏于不安全留下隐患。其次是施工质量控制难题,尤其是水下抛石、护坦铺设等作业,其最终成型质量难以精确检测和保证,直接影响防护效果的持久性。再次是长期维护与适应性不足,许多防护措施在建成后缺乏有效的监测和维护,其性能会随时间推移而退化;同时,面对气候变化导致的水文条件变异,既有防护措施的适应性也面临考验。针对这些问题,未来的优化方向应聚焦于以下几个方面:一是发展高精度的数值模拟技术,结合现场实测数据,建立能够更真实反映复杂水流-结构-河床相互作用的冲刷预测模型,提升设计的科学性与经济性。二是研发新型防护材料与结构,如自适应性强的柔性防护系统、具有生态功能的透水结构等,以提高防护措施的耐久性、环境友好性和对复杂工况的适应能力。三是构建全生命周期的防护管理体系,将设计、施工、监测、维护、评估等环节集成到一个信息化平台中,实现基于数据驱动的精细化、智能化管理^[5]。

结语

桥梁基础冲刷对桥梁结构安全的影响广泛且复杂,从结构动力特性改变到沉降倾斜问题,再到极端条件下的结构失效风险,每一个方面都对桥梁的正常使用和安全构成了严重威胁。同时,桥梁基础冲刷防护措施为应对这些问题提供了有效的手段,结构防护措施、水力调控措施、监测与预警技术应用以及对防护措施实施关键问题的研究与优化,都在保障桥梁安全方面发挥着重要作用。未来,随着桥梁建设向更复杂的水文环境和更大跨度的方向发展,桥梁基础冲刷问题将面临更多的挑战。一方面,需要进一步深入研究冲刷机理,特别是在极端水文条件和复杂地质条件下的冲刷过程,以提高对冲刷影响的预测精度。另一方面,要不断创新和完善防护措施,结合先进的材料科学、信息技术和工程技术,开发出更高效、更环保、更具适应性的防护技术。此外,加强多学科交叉融合也是未来桥梁基础冲刷研究的重要方向。桥梁工程与水力学、岩土力学、材料科学、信息技术等学科的深度融合,将为解决桥梁基础冲刷问题提供更全面、更科学的方法和手段。在实际工程中,应充分认识到桥梁基础冲刷问题的严重性,将冲刷影响分析和防护措施纳入桥梁设计、施工和运营的全过程。通过建立健全的监测和预警体系,及时掌握桥梁基础的冲刷状况,采取有效的防护和修复措施,确保桥梁的长期安全和稳定运行。只有这样,才能更好地保障桥梁在各种复杂环境下的安全使用,为交通运输事业的发展提供坚实的支撑。

参考文献

- [1] 李俊龙.城市桥梁基础对既有地铁区间结构的影响分析[J].智能城市,2022(003):008.
- [2] 高辉,张旭梁,施卫星.弃渣区桥梁深桩基施工防护措施及安全性分析[J].结构工程师,2019,35(1):6.DOI:10.3969/j.issn.1005-0159.2019.01.029.
- [3] 王顺意.水流作用下圆柱桥墩局部冲刷特性与防护措施研究[D].西南交通大学,2020.
- [4] 郭瑞雪.浅基础桥梁安全性评价及加固分析[J].交通科技与管理,2022(2):0102-0104.
- [5] 汪坤,孙晓旭.探讨钢结构桥梁的常见病害及防护措施[J].2020.