

基于泥沙输移模型的铁路桥基础局部冲刷防护技术优化

宋光辉, 林刚

中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 611730

DOI:10.61369/WCEST.2025040018

摘要 : 在铁路桥梁工程运行过程中, 应对基础冲刷防护工作加大重视, 并要合理优化防护技术。在实际开展防护工作时, 可以运用泥沙输移模型, 确保有效掌握相关数据, 明确水流冲刷情况, 合理采取防护措施, 有效提升冲刷防护效果。本文基于泥沙输移模型的铁路桥基础局部冲刷防护技术展开分析, 以泥沙河道治理工程跨河铁路桥基础防护设计为例, 探讨了泥沙输移模型的应用, 并提出具体的技术优化对策, 希望能够为相关研究人员起到一些参考作用。

关键词 : 泥沙输移模型; 铁路桥基础局部; 冲刷防护技术

Optimization of Local erosion Protection Technology for Railway Bridge Foundations Based on Sediment Transport Model

Song Guanghui, Lin Gang

China Water Conservancy and Hydropower Seventh Engineering Bureau Co., LTD., Chengdu, Sichuan 611730

Abstract : In the operation process of railway bridge engineering, more attention should be paid to the protection of foundation erosion, and the protection technology should be reasonably optimized. In actual protective work, sediment transport models can be used to ensure effective grasp of relevant data, clarify the situation of water flow erosion, take reasonable protective measures, and effectively improve the effectiveness of erosion protection. This article analyzes the local erosion protection technology of railway bridge foundation based on sediment transport model, explores the application of sediment transport model, and proposes specific technical optimization measures, hoping to provide some reference for relevant researchers.

Keywords : sediment transport model; partial foundation of railway bridge; erosion protection technology

引言

对于铁路桥基础, 需要做好局部冲刷防护, 以此来使桥梁工程受到的灾害影响程度得到降低。在实际展开冲刷防护工作时, 需要合理优化防护技术手段, 在此过程中可以对泥沙输移模型加以运用, 可以对不同条件下泥沙输移过程进行模拟, 以此来对水域发生的地形变化加以预测, 为铁路桥基础局部冲刷防护工作提供有力依据, 使桥梁工程基础所受到的冲刷作用得到减轻, 进一步保证基础结构的稳定性, 从而维持铁路桥梁的正常运行。

一、项目背景

堆龙河是拉萨河下游右岸的一大支流, 发源于冈底斯山脉东段南麓, 流经拉萨市堆龙德庆区主城区。堆龙河治理工程正处于堆龙德庆区主城区河段, 此河段两岸建有100年一遇防洪堤, 承担着对堆龙德庆区行政、居民集中住宅区以及商业中心的防洪任务。工程区出露地层主要为第四系松散堆积层, 为河流冲积相砂卵石层, 厚度大于30m。土层在纵、横两个方面上变化不大, 颗粒粒径由上至下逐渐变细, 密实度逐渐变大, 河床属于砂卵石非

粘性土河床。堆龙河属多泥沙河流, 多年平均泥沙总量为约27.2万t/年。工程河段有多座桥梁跨河而建, 其中青藏铁路桥6#桥就建在此处。

二、项目治理任务

堆龙河是拉萨河下游右岸的一大支流, 作为一条纵向穿过拉萨市堆龙德庆区的天然河流, 其所流经的城市区域自然而然的形成了水体景观带, 为提高市民生活舒适度和提升城市环境形象做

出了重要的贡献。河道经过多年运行积累了淤积严重、生活垃圾堆弃、违规生产侵占河道等诸多问题，让河道水体景观带完全失去了，积极的作用，甚至变成了城市的负担。因此，现阶段，需要有效加强堆龙河的治理工作，合理优化河道治理区域跨河重要桥梁的基础的防护设计。在本次项目中，主要治理任务如下，首先要清除多年淤积泥沙，形成自然河道水体景观。其次，需要新建两岸防洪堤，以满足100年一遇防洪需要。最后，需要确保满足汛期上游来水所携绝大部分推移质能够快速通过，不形成淤积等。为了保证工区桥梁的安全运行，需要对铁路桥梁加强安全防护，对桥梁桩基冲刷采取有效的安全防护措施，进一步保证桩基结构的稳定性。对于铁路桥基础局部冲刷，需要做好安全防护工作，有效展开桩基冲刷安全防护，避免对桥梁承载能力产生影响，有效保证桥梁运行的安全性和耐久性。在实际展开防护工作时，需要充分了解铁路桥的实际情况，尤其要对水文条件和地质条件加以掌握，有效获取相关数据，并在此基础上建立泥沙输移模型，对自然地质条件有效掌握，确定防洪影响冲刷深度，有针对性的采取防护技术手段，以此来全面保证桥梁运行安全性。

三、泥沙输移模型概述

对于堆龙河治理工程，在对工区桥梁开展冲刷防护工作时，需要有效运用泥沙输移模型，以此来明确泥沙输移情况。通过运用该模型可以有效评估桥梁运行安全性，其主要包括流体动力学模型、泥沙输移模型以及泥沙沉降和侵蚀模型。首先，对于流体动力学模型，其可以对水流运动状态进行模拟，可以有效获取水深、流向以及流速等参数，其对泥沙输移过程具有关键影响。其次，对于泥沙输移模型，主要运用泥沙运动学原理，可以对水流作用下泥沙输移过程加以模拟，主要包括悬移质输移与推移质输移。最后，对于泥沙沉降和侵蚀模型，可以对水流中的沉降与侵蚀过程有效模拟，如悬移质泥沙沉降、河床地形变化、推移质泥沙侵蚀等。对于该模型，其在我国地貌学、水文学、海岸工程以及河流工程等领域的应用十分广泛，可以对不同条件下泥沙输移过程进行模拟，对海岸以及河流等水域地形变化有效预测，为防洪减灾等工作开展提供有力依据。在铁路桥基础局部冲刷防护过程中，通过对泥沙输移模型加以运用，可以有效建立模型，并预测水域影响，对水流冲刷所造成的影响展开预测，合理采取防护措施，从而使铁路桥基础质量得到提高^[1]。

四、基于泥沙输移模型的铁路桥基础局部冲刷防护技术优化对策

在堆龙河治理工程实施过程中，需要运用泥沙输移模型优化铁路桥基础局部冲刷防护技术，可以借助模型的模拟结果，合理制定基础局部冲刷防护方案，使相关防护技术的应用更具有针对性，进一步提升防护效果，从而有效保证铁路桥基础的安全性和稳定性。

（一）铁路桥基础局部冲刷防护技术类型

在堆龙河治理工程开展过程中，为了有效提升铁路桥基础的

局部冲刷防护效果，应合理选择防护技术类型。在此过程中，应做好数据收集与分析工作。首先，在数据收集方面，应对桥梁基础资料有效收集，并获取前期设计文件，了解铁路桥梁的修建状况，掌握历史冲刷情况。其次，在数据分析方面，应结合收集到的数据，深入分析桥梁局部冲刷情况，具体包括以下内容。相关工作人员应运用泥沙输移模型，深入分析地理环境，明确桥梁地理位置，并了解其水文与地质条件。与此同时，应进行水动力分析，具体可以采用计算流体力学方法，对水流动态特性加以模拟，对桥梁基础局部可能受到的冲刷区域准确预测。此外，还需要分析桥梁结构，具体可以展开动力学与静力学分析，对局部冲刷影响风险展开评估。对于冲刷防护技术类型，主要包括以下两种。

1. 主动防护

在铁路桥梁基础局部冲刷防护过程中，应采用主动防护技术，结合数据分析结果，对需要采取的防护措施进行明确，如河道整治、修建工程以及系统建设。与此同时，需要对施工计划合理制定，编制时间表，使工程施工质量得到保证。在此过程中，应对相应的设备与材料加以配置，对专业团队加以组织，确保有效强化施工工作。在主动防护过程中，应对河床高程加大注意，可以对底板、护圈等有效增设，使冲刷水流动力得到减轻，增强桥梁基础的抗冲刷性能^[5]。对于此种防护方式，可以有效达到“减冲”效果，常见防护技术措施如下。

墩前牺牲桩。对于铁路桥梁，应在桥梁基础上游对小直径群桩进行布置，这样以来在上游水流冲刷桥梁基础时，可以通过群桩减小水流速度，降低冲刷力量，扰动水流的冲刷方向，从而减弱水流冲刷对桥梁基础的作用，有效提升防护效果。对于该防护技术，其可以对水流有效消能，使墩前的下降水流得到降低，并可以在桥梁墩部周围有效降低马蹄形漩涡扰流作用，以此来起到扰流效果，确保可以将水流冲刷有效集中于群桩，使桥墩基础得到有效保护。在实际运用该类防护技术时，应对群桩防护效果的影响因素展开分析，具体包括桩大小、数目、排布形式等。在了解各类影响因素后，需要基于泥沙输移模型合理运用牺牲桩，从而使冲刷作用得到降低。

护圈。对于铁路桥梁基础，应在桥墩位置对不同形式的护圈进行设置。通过使用护圈可以有效削弱下降水流，并使马蹄形漩涡所带来的作用得到减轻，从而缓解前进水流对桥墩的冲刷，有效提升防护效果。在分析护圈防护效果后，可以发现在床面下放置护圈，并和河床保持相应距离，可以使漩涡效果得到降低，并使冲刷深度得到降低。基于泥沙输移模型展开分析，护圈位置直接影响到水流冲刷防护效果，通过使用护圈可以使水流分开，具体划分为上下两个部分。对于护圈的上方区域，可以对下降流起到障碍，并削弱下降水流带来的冲击力。对于护圈下方，可以减小下降水流，使马蹄形漩涡得到减轻。在此期间，需要合理选择护圈位置与尺寸，确保可以有效维持护圈防护效果。

环翼式桥墩。对于铁路桥梁，可以在其基础局部位置对相应数量挡板进行加装，其为翼状，可以使水流能力得到削弱。在实际使用环翼式桥墩时，可以借助翼状挡板，使下潜水流大小、方

向得到改变，使漩涡扰流能力得到减弱，使河床颗粒的搬运能力得到降低。在此过程中，应对泥沙输移模型加以运用，充分对比水深与流量，并对挡板进行设置，使其与河床保持合理距离，从而起到显著的防护效果^[3]。

混凝土面板。在铁路桥梁工程项目中，为了能够有效防护基础局部位置，做好防冲刷工作，可以混凝土面板作为具体的防护屏障。具体来说，在桥梁基础局部冲刷防护过程中，应有效平铺混凝土面板，并合理设计防护边缘的坡度，在临水面对雷诺护垫进行铺设，确保可以形成柔性防护面，使泥沙和水流与面板的刚性接触得到隔绝，防止造成相应的破坏问题，确保有效发挥出防护作用。

2. 被动防护

对于铁路桥梁基础局部的冲刷被动防护，需要明确被冲刷对象，合理设置保护层。具体来说，对于桥墩周围，应在河床位置对保护层进行铺设，如铺设碎石，使土体具有的抗冲刷能力得到增强，常见被动防护技术如下。

抛石。对于抛石防护，其应用比较广泛，不仅取材方便，而且工艺比较简单，在实际操作时具有较大的灵活性。通过有效进行抛石，可以使泥沙卷扬起动过程中的水流作用力得到增加，而且通过使用粗糙的石块，可以使底层水流速度得到减缓。但对于此种防护技术，其缺乏整体性，具有较大的工程量，而且运行维护费用相对较大。对此，可以采用抛石替代方法，具体可以采用混凝土铰链、石笼以及硬壳单元体进行防护，使下降水流的冲刷得到有效阻挡，使前进水流对泥沙的携带能力得到减弱。

扩大墩基础防护。在铁路桥梁工程的施工阶段，应在河床下埋入钢围堰，并对下部桩基础进行施工。在完成具体的基础施工后，应在床面对封顶进行预留，并放置桥墩，以此来有效修建防护工程。对于此类防护技术，可以使下降水流的淘刷力得到降低，使冲砂和携砂能力得到减弱^[7]。

（二）方案制定

伴随着气候的不断变化，以及受到人类活动带来的影响，进而导致桥梁在河岸以及河底会受到局部冲刷，容易损坏桥梁结构，甚至造成桥梁倒塌，影响到铁路交通的正常运输，严重威胁到人们的生命财产安全。对此，需要通过泥沙输移模型全面分析桥梁局部冲刷，并采取有效的安全防护措施^[2]。青藏铁路桥6#桥桥基的防护设计是在工程河段河道治理的基础之上进行的，河道治理工程设计方案直接影响到6#桥桥基防护方案的设计，所以河道治理设计方案与桥梁防护设计方案是密不可分的。首先对全河道进行淤积泥沙进行挖除，在河道狭窄段设置较陡的河底纵向坡降，使过水流速快于河底坡度纵比降较缓河段，其目的是在主汛期工程河段上游来水流量大，携沙能力强，利用较陡的纵坡使河道狭窄段过流流速加大，让汛期洪水所携带绝大部分的推移质迅速通过，以改善该段河道的行洪能力，避免河道泥沙淤积的发生。但是河道狭窄段往往是跨河桥梁选址的重要位置，青藏铁路桥6#桥就建在堆龙河治理工程河道狭窄段，并且桥基附近有河道泥沙大量淤积情况，如果堆龙河河道治理能够达到预期效果，6#桥桥基范围内河道淤沙的清除，并设置河底陡坡用于有效输沙

的设计方案比较执行，那么6#桥桥基的防护设计就显得尤为重要^[3]。

在实际制定安全防护方案时，应从以下几个方面入手。

1. 展开数据计算

第一，桥基流速计算。

工程河道治理后铁路桥6#桥桥基位置河道地坡纵比降为3.8‰，通过建立数学模型计算桥下河道过流速度，得出在汛期此纵坡可有效上游来水所携推移质，有效避免汛期推移质在铁路桥桥基形成淤积情况发生。在桥基附近流速计算时，工程河道流速计算采用欧拉-拉格朗日方法（ELM）追踪方法进行数学模拟计算，对流项采用 ELM 方法处理，空间离散为三角形网格，ELM 追踪示意图与移动最小二乘法（MLS）拟合所需的节点如图1、图2所示。

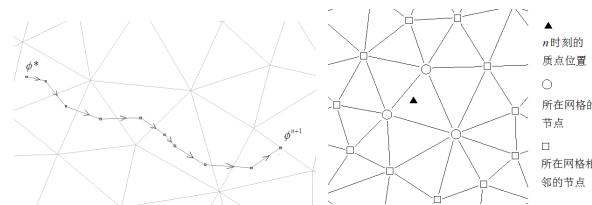


图1 ELM追踪示意图

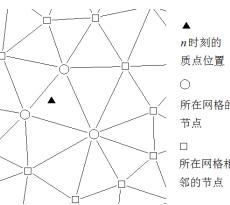


图2 MLS拟合所需的节点

ELM是模型求解中最耗时的部分，其方法的核心是从n+1时刻的质点位置高效精确地沿流线逆向追踪到其n时刻的位置。为兼顾效率和精度通常采用多步欧拉积分法进行分步追踪。

第二，桥基冲刷计算。

6#桥桥基的防护设计既要满足抗冲要求，还要满足防护面过流速度不可高于桥基下游土质河床的补充流速，以防止对下游产生冲刷破坏。工程河段河床属于砂卵石非粘性土河床，根据TB 10017-2021《铁路工程水文勘测设计规范》计算公式要求对桥基进行冲刷计算。

2. 明确防护工作思路

在计算工作结束后，可以有效获取相关数据，并结合堆龙河治理工程的实际情况，合理选择主动防护技术。具体来说，应按照以下思路实施。

第一，改善桥梁结构。对于铁路桥梁，应对其桥墩进行加固，按照具体的结构分析结果，明确可能存在冲刷问题的桥墩，并采取加固措施，对高强度材料加以使用，使桥梁基础抗冲刷能力得到增强。相关施工人员还应做好防护涂层，在桥梁结构表面进行涂覆，使结构表面的抗冲蚀性能得到提升，使冲刷带来的影响得到降低。

第二，做好河道整治工作。首先，需要及时清淤疏浚，当桥梁存在较大的冲刷风险时，需要在其下游有效开展清淤疏浚工作，使河道通畅度得到保证，避免堆积冲刷物。其次，应有效修整河道，按照水动力分析结果，分析河床的冲刷风险，做好修整工作，使水流的动态特性得到优化，从而使冲刷问题得到缓解。

3. 合理采取抗冲刷措施

在该工程的防护工作开展过程中，主要采用主动防护中第四种混凝土面板抗冲措施，可以起到显著的防护效果。

(1) 总布置布置

堆龙河6#桥铁路桥所在位置垂直河道中心线河宽约163m, 6#铁路桥斜跨河道总长度约221m。桥梁防护设计采用钢筋混凝土面板防护附加雷诺护垫, 软硬结合的设计方案进行设计, 即能够输送泥沙又能够铁路桥桥基进行有效的抗冲刷防护。设计如图

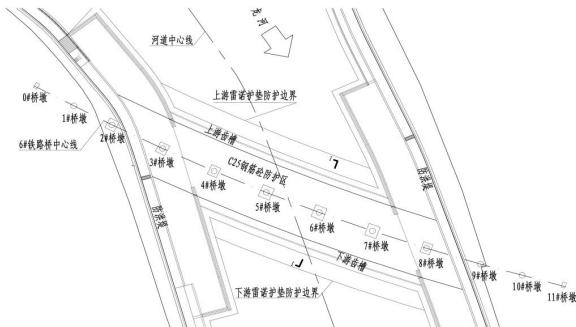


图3 6#铁路桥防护平面布置图

(2) 结构设计

防护面板采用30cm厚钢筋混凝土面板, 对铁路桥中心轴线上、下游各15m范围内进行平铺防护, 上下游防护边缘设置坡度为1:1.5的斜坡钢筋混凝土面板垂裙, 延伸至河床清淤线以下约3m深, 以满足设计从刷深度要求。临水面铺设厚度30cm的雷诺护

垫^[4], 形成相对柔性防护面, 以隔绝汛期大粒径推移质移动与混凝土面板的刚性接触, 避免冲击破坏。

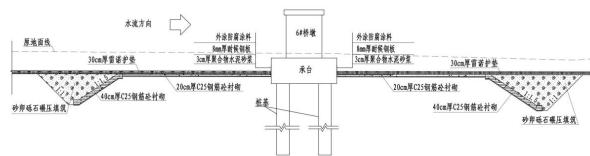


图4 6#铁路桥防护结构设计图

五、结束语

综上所述, 在铁路桥梁基础局部冲刷防护工作中, 泥沙输移模型的应用具有显著效果, 可以有效获取相关数据, 并对水域地形变化加以预测, 确保可以有针对性的采取防护技术, 优化具体的防护措施, 从而使冲刷防护效果得到提升。在此过程中, 需要在模型分析的基础上, 合理制定防护方案, 并采取有效的防护技术措施, 充分运用主动防护与被动防护技术, 提升冲刷防护水平, 进一步保证桥梁基础的稳定性, 维持铁路桥梁的正常运行。

参考文献

- [1] 王会丽. 桥梁桩基冲刷固化土防护技术及措施 [J]. 城市道桥与防洪, 2025, 11(3): 307-310, 315.
- [2] 张诗怡, 张研, 刘畅. 采用固化土防护技术的海上风机单桩基础防冲刷效果数值分析 [J]. 中国港湾建设, 2024, 44(8): 1-8.
- [3] 杨磊, 毛娟龙. 东海大桥桩基冲刷防护工程斜向溜筒抛石船关键技术 [J]. 施工技术, 2021, 50(11): 71-74.
- [4] 韩拓, 张琳鹏, 翟金萍. 某高速公路跨渭河特大桥桩基防冲刷下切防护施工技术要点探讨 [J]. 陕西水利, 2022(2): 152-153.
- [5] 梁发云, 金乐文, 王琛, 等. 中国古代桥梁冲刷防护策略的典型案例与特征分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 65-74.
- [6] 郭佳欣, 拾兵. 桥墩冲刷及其防护技术的研究综述 [J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(4): 84-92.
- [7] 戴治恒. 桥梁群桩冲刷固化土防护效果分析 [J]. 海岸工程, 2025, 44(2): 186-196.