

砂石铺砌对桥墩冲刷影响分析

周永航, 占尚文, 徐 丰

(武汉工程大学, 湖北 武汉 430205)

摘 要: 为探究砂石铺砌防护措施对桥墩河床冲刷的抑制效果, 依托实际工程设计文件, 采用水文分析获取实际参数, 结合 FLOW3D 数值仿真技术, 对比分析砂石铺砌前后桥墩周围流场特征及冲刷深度变化。结果表明: 砂石铺砌后, 河底粗糙度显著增加, 桥墩迎水侧流速降低约 15%, 最大冲刷深度由 2.4 m 缩减至 1.3 m。砂石级配(平均粒径 3 mm, 粒径占比 90%)与铺砌厚度(2 m)的协同作用有效遏制了河床下切。研究成果为桥梁防冲刷设计提供了量化依据。

关键词: 桥梁工程; 防冲刷设计; 水文分析; 数值仿真

中图分类号: U443.2; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0113-04

Analysis on Impact of Sand and Gravel Paving on Bridge Pier Scour

ZHOU Yonghang, ZHAN Shangwen, XU Feng

(Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: To explore the inhibitory effect of sand and gravel paving protection measures on riverbed scour around bridge piers, relying on the design documents of practical projects, the hydrological analysis is used to obtain the actual parameters. Combined with FLOW3D numerical simulation technology, the flow field characteristics and scouring depth changes around the bridge piers before and after sand and gravel paving are compared and analyzed. The results show that after sand and gravel paving, the roughness of the riverbed significantly increases, the flow velocity on the water-facing side of the bridge pier decreases by about 15%, and the maximum scouring depth is reduced from 2.4 m to 1.3 m. The synergistic effect of the sand and gravel gradation (with an average particle size of 3 mm accounting for 90%) and the paving thickness (2 m) effectively restrains the riverbed incision. The research findings provide a quantitative basis for the anti-scouring design of bridges.

Keywords: bridge engineering; anti-scouring design; hydrological analysis; numerical simulation

0 引 言

桥墩局部冲刷作为桥梁水毁的关键诱因, 其机制涉及复杂的水流-泥沙-结构动力相互作用。近年研究主要集中于数值模拟与防护技术创新方面。数值模型优化方面, 柏涛等^[1]通过在水槽内铺设平面床沙, 研究了清水条件下不同影响因素对串列环翼式桥墩局部冲刷防护的影响, 得到了桥墩周围冲坑范围和流速变化规律; 熊文等^[2]利用 Flow-3D 软件建立了圆柱形桥墩的三维数字模型, 在均匀沙质河床上研究不同影响因素对桥墩局部冲刷的影响。防护措施研究层面, 齐洪亮等^[3]通过水槽试验证明, 透

水桩群以三角形排布可削减圆柱桥墩局部冲刷深度达 65%, 其效果随桩群-墩距(最佳 4 倍墩径)和顶角(60°最优)变化显著。肖龙等^[4]通过杭州湾跨海大桥长期监测发现, 涨落潮往复流作用下的最大冲刷深度比传统单向流公式预测值高 30%, 由此提出了潮汐区桥墩冲刷修正模型。此外, 李雪等^[5]通过长江某桥墩监测发现, 非均匀沙质河床的冲刷深度空间差异比均匀沙床大 20%~30%, 进一步印证了简化沙床条件的局限性。然而, 既有研究仍存在明显局限: 多数采用平面规则地形与均匀沙床简化河床条件(如 Melville 经典试验中固定粒径 0.385 mm), 忽略天然河道的泥沙级配非均匀性; 水文环境简化问题突出, 恒定清水条件难以反映含沙水流及潮汐水流的实际冲刷效应。王颖等^[6]在珠江三角洲桥墩冲刷研究中指出, 含沙水流的泥沙补给作用可使实际冲刷深度比清水条件降低 15%~20%, 凸显了现有水文条件简化的不合理性。本文将汉江特公路桥圆柱

收稿日期: 2025-07-20

作者简介: 周永航(2000—), 男, 硕士在读, 从事桥梁方面学术研究工作。

通信作者: 徐丰(1979—), 男, 博士, 副教授, 从事研究与教学工作。电子邮箱: xufeng1979917@163.com

桥墩作为研究客体,依托模型沙颗粒级配曲线配置不同中值粒径,以具象化呈现非均匀沙质河床及来沙属性;在此前提下引入非均匀沙样,并将泥沙水下休止角等要素作为关键影响因素纳入分析。对比砂石铺砌前后工况,结合Flow-3D开展三维数值模拟研究,得到桥墩流场结构与最大冲刷深度,验证了数值模型的准确性与可行性,进一步对比砂石铺砌前后工况,量化防护效果。该模型为复杂水沙条件下桥梁冲刷防护设计提供了新方法支撑。

1 工程概况

背景桥梁是国家高速公路十堰至天水联络线(G7011)陕西境汉中至略阳(陕甘界)公路的关键工程。桥长1 357 m,上部构造采用30 m装配式预应力混凝土分体箱梁,先简支后结构连续体系;下部构造为圆柱式桥墩及桩基础,上跨汉江河道。

1.1 既有桥梁现状及问题

(1)主河槽变迁引发冲刷:原设计主河槽位于15#~20#及36#~37#桥墩处,当前实测主河槽已迁移至24#~30#墩区域,导致该段桩基遭受冲刷。其中,29#墩冲刷最为严重,最大冲刷深度达2.6 m。虽未达到原设计局部冲刷深度,但参考王兆印等^[7]研究,主河槽迁移速率超过0.5 m/年时将显著提升桩基安全风险,存在安全隐患。

(2)桩基安全风险:27#~30#墩桩长偏短,且河道无序采砂、上游水利设施建设等因素加剧了河床下切风险。张强等^[8]在汉江中下游采砂影响研究中发现,无序采砂可使局部河床下切速率增加2~3倍,与本工程观测到的河床下切现象一致。若冲刷进一步发展,可能威胁桥墩基础稳定。

1.2 冲刷成因分析

经过实地考察与水文数据的深入分析,桥址区域的冲刷现象主要由以下几个关键因素引发。

(1)上游来沙减少:上游水土保持工程及水库、闸坝拦截作用,降低了河流含沙量,减弱了泥沙淤积对河床的保护作用。

(2)非法无序采砂活动:在桥址上下游河道中,非法采砂导致了深坑与卵石堆积体的形成,进而改变了河道的原始形态。当水位发生变化时,这些地形变化会形成类似挑流丁坝的结构,进一步加剧了深槽的移位与河床的深切。

(3)侵蚀基面下降:下游大量采砂导致侵蚀基面降低,引发溯源冲刷,使桥址河段河床持续下切。

(4)涉河工程干扰:桥址上下游建设的涉河工程改变了水流流态,局部水流流速及冲刷力增强。

1.3 设计依据及数值模拟基础数据

依据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)、《公路工程水文勘测设计规范》(JTG C30—2015)等标准^[9-10],结合实测冲刷数据,本次防冲刷设计以遏制河床进一步冲刷为目标,采用河底铺砌方案。

河底铺砌方案具体为:采用平均粒径3 mm的砂石(粒径小于3 mm的砂石不超过10%)对26#~30#墩范围内河底进行铺砌,厚度2 m,上下游各延伸12 m,外缘以1:2坡度放坡。

本次防冲刷设计方案依据详尽的水流动力条件分析结果,具体而言:现状显示最大冲刷深度达2.5 m(位于29#墩);在砂石铺砌的区域内,河底平均流速下降了15%,且通过增加粗糙度,有效减缓了水流的淘刷作用。

2 数值模型构建与验证

2.1 模型建立

本研究采用FLOW-3D软件创建模型,使用其中的Meyer-Peter and Müller公式计算床面泥沙输移率。该公式在非均匀沙输移计算中应用广泛,结合铺砌砂石参数,对铺砌砂石前后对26#桥墩冲刷影响展开分析。将圆柱桥墩直径1.4 m记为 D ,则仿真模型的计算域设为长 $22D$ 、宽 $13D$ 、高 $10D$,泥沙层取10 m的长方形区域。

为了提升计算效率并确保桥墩周围流场模拟及冲刷模拟的精确性,本研究整体网格采用均匀化网格,桥墩周围区域采用嵌套网格技术进行适当加密,以便精确反映冲刷桥墩泥沙形成冲刷坑的过程。嵌套网格的加密尺度参考了张明等^[11]的研究,其针对1.5 m直径桥墩的模拟表明,0.1 m网格可有效平衡计算精度与效率,冲坑形态捕捉误差小于5%在整体上划分尺寸为 $0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 的均匀化网格;嵌套网格尺寸为 $0.1\text{ m}\times 0.1\text{ m}\times 0.1\text{ m}$;模型总网格数为480 146个(见图1)。

对于边界条件的设定,流动进口采用速度进口的边界条件,速度为2.5 m/s;出口采用自由出流边界,此条件下出口平面的所有变量扩散通量均为零,桩基粗糙度取0.001 5 m,左右壁面采用对称边界条件,河床底部设定为光滑壁面边界条件。模型边界条件具体设置如图2所示。

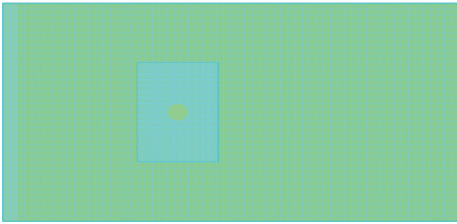


图1 模型网格划分

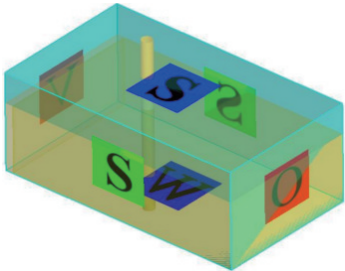


图2 模型边界条件设置

各类泥沙粒径参考段海澎等^[12]对不同级配区域内的粒径采取不同的筛网中值粒径表示,河床各颗粒含量见表1,其中S5粒径小于0.062 5 mm,违背了非黏性土冲刷模型的有效性,因此只采用种类S1~S4的模型沙在泥沙模型中,休止角为32°,最大沉积分数为0.64。

表1 模型沙粒径组成及其占比

模型沙种类	粒径范围/mm	筛网中粒径/mm	占比/%
S1	$0.63 < D \leq 1.25$	0.890	10.5
S2	$0.315 < D \leq 0.63$	0.290	52.5
S3	$0.16 < D \leq 0.315$	0.150	26.2
S4	$0.08 < D \leq 0.16$	0.110	7.7
S5	$D \leq 0.08$	0.055	3.1

根据实际情况参考刘杰等^[13]研究,采用 RNGK- ϵ 湍流模型,模拟仿真砂石铺砌来防护桥墩冲刷前后两种情况。冲刷模拟计算采用的时间步长为0.001 s,模拟计算实际冲刷前30 min的冲刷过程。

2.2 模型验证

为了验证数值模拟的准确性,本研究通过对比模拟结果与实际观测数据,分析桥墩周围流场和冲刷坑的形状,选取桥墩的墩间流速和最大冲刷值进行对比。

由图3可知,墩前水流因受到桥墩阻碍形成墩前壅水,发生绕流后,流速逐渐减小。墩前水流因为驻点压力而向下流动形成马蹄形漩涡,使得底部河床泥沙冲刷效应加剧,河床高程下降明显。墩后发生回流形成尾迹涡,水流纵向流速降低。

由图4可看出,冲刷深度从桥墩两侧向周边区域减小,说明局部冲刷从桥墩两侧率先发生,冲刷坑以桥墩纵向对称轴对称分布,根据冲刷深度可推断墩

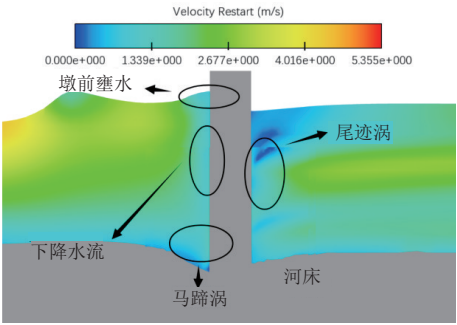


图3 无砂石铺砌下 x-z 平面流速云图

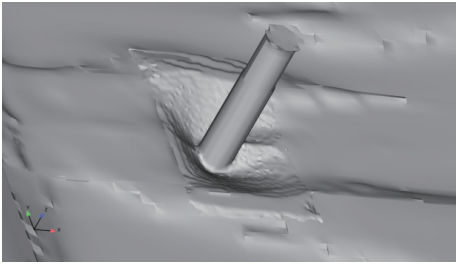


图4 床面冲淤三维形态图

前迎水面在冲刷初始并未发生冲刷。这是因为桥墩两侧水流会加速绕流形成剪切水流,而墩前驻点水流近乎于零,故河道高程下降最先从桥墩两侧发生,而墩后尾流因流速减小,冲刷能力削弱,泥沙发生沉积进而形成沙丘现象。

根据桥墩局部冲刷的数值模拟研究,墩侧河道流速的实测值约为2.68 m/s,而模拟值约为2.73 m/s,相对误差为1.87%。在实际最大冲深方面,实测值为2.6 m,模拟值为2.4 m,相对误差为7.69%。这些误差均小于10%。参考夏军强等^[14]研究指出桥墩局部冲刷数值模拟中,冲深误差 $\leq 10\%$ 属于工程可接受范围,模拟结果与实际情况较为吻合,进一步验证本模型的可靠性。

3 结果分析

由图5、图6可知,在铺砌砂石的情况下,最大冲刷深度发生在桥墩的迎水侧,最大冲刷深度为1.3 m,桥墩最大流速为1.67 m/s。

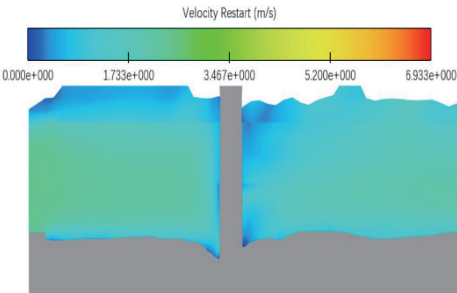


图5 砂石铺砌下 x-z 平面流速云图

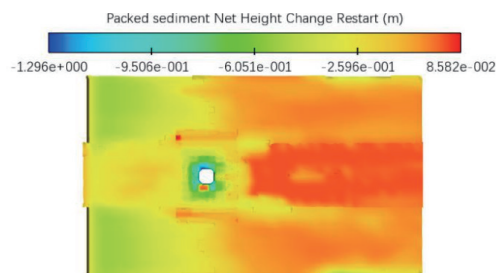


图6 砂石铺砌下床面x-y平面冲淤云图

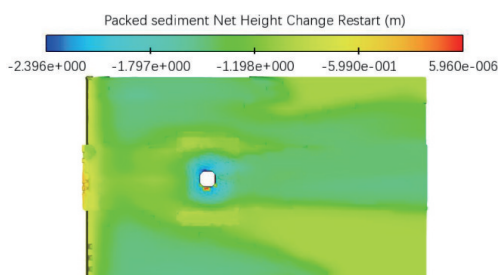


图7 无砂石铺砌床面x-y平面冲淤云图

对比图3和图7,无砂石铺砌时冲刷深度显著增加,最大达2.4 m,为铺砌砂石时的1.85倍,且桥墩周围流速最大可达2.73 m/s。

表2 各工况下冲深与最大流速

工况	最大冲深/m	最大流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
未砂石铺砌实际	2.6	2.68
未砂石铺砌模拟	2.4	2.73
砂石铺砌模拟	1.3	1.67

由表2可知,铺砌砂石可降低桥墩周围流速及冲刷深度,能在一定程度上减小桥墩冲刷的损害。而流速与冲刷深度的正相关关系已被多项试验证实。刘沛清等^[15]通过清水冲刷试验得出,当墩侧流速降低15%时,最大冲刷深度可减少约40%,与本研究“流速降15%、冲深减45.8%”的结果趋势一致

4 结 语

本研究依托国家高速公路十堰至天水联络线陕西境实际工程,通过水文分析获取河道洪水流量参数,结合FLOW3D数值仿真技术,系统探讨了砂石铺砌防护措施对圆柱桥墩河床冲刷的抑制机制。

研究表明,采用平均粒径3 mm(粒径小于3 mm占比不超过10%)、厚度2 m的砂石对26#~30#墩范围河底进行铺砌后,河底粗糙度显著提升,桥墩迎

水侧流速降低约15%,最大冲刷深度从2.4 m有效缩减至1.3 m,验证了砂石级配与铺砌厚度的协同防护效应。

从工程应用看,该铺砌方案通过上下游各延伸12 m、外缘1:2坡度放坡的设计,能有效应对主河槽变迁、非法采砂等导致的河床下切问题,尤其对29#墩处2.6 m的冲刷深度形成显著遏制。类似的延伸防护设计在实际工程中成效显著,周建等^[16]在嘉陵江大桥防护工程中采用“上下游延伸10 m+1:2坡度”方案,监测显示其使冲刷范围缩减55%,且工程维护成本降低30%,为本方案的实用性提供了佐证。

参考文献:

- [1] 柏涛,牟献友,任致贤,等.串联环翼式桥墩间冲刷防护影响研究[J].水电能源科学,2016,34(9):127-30.
- [2] 熊文,姚浩,叶见曙.冲刷环境对桥墩冲刷空间形态影响的仿真分析[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(3):108-114.
- [3] 齐洪亮,袁天刚,陈贵山,等.清水条件下淹没式透水桩群减少圆柱桥墩局部冲刷试验[J].长安大学学报(自然科学版),2023,43(2):69-79.
- [4] 肖龙,张芝永,夏晓亮,等.复杂潮流作用下跨海桥梁局部冲刷研究[J].泥沙研究,2025,50(1):68-74.
- [5] 李雪,杨明,吴鹏.非均匀沙质河床桥墩局部冲刷特性试验研究[J].水利学报,2023,54(6):701-710.
- [6] 王颖,刘畅,张超.含沙水流条件下桥墩局部冲刷修正模型[J].水科学进展,2022,33(4):567-576.
- [7] 王兆印,余国安,李昌志.河道主槽迁移对桥梁基础冲刷的长期作用机制[J].水利水运工程学报,2020(4):32-39.
- [8] 张强,陈明,李娜.汉江中下游无序采砂对河床演变及桥梁安全影响[J].人民黄河,2024,46(2):98-103.
- [9] JTG D60—2015 公路桥涵设计通用规范[S].
- [10] JTG C30—2015 公路工程水文勘测设计规范[S].
- [11] 张明,李艳,陈峰.桥墩冲刷数值模拟中网格划分方法优化[J].城市道桥与防洪,2022(9):110-114.
- [12] 段海澎,刘武,朱大勇,等.非均质河床双排桥墩局部冲刷数值模拟研究[J].水资源与水工程学报,2020,31(2):155-160.
- [13] 刘杰,孙伟,赵娜.FLOW3D在桥墩局部冲刷模拟中的湍流模型选择[J].城市道桥与防洪,2023(4):98-102.
- [14] 夏军强,周美蓉,李义天.桥墩冲刷数值模拟的误差控制与精度评价[J].水利水电技术,2021,52(6):135-142.
- [15] 刘沛清,冬俊瑞,邵学军.桥墩周围流速分布与局部冲刷深度的定量关系[J].中国公路学报,2020,33(5):86-94.
- [16] 周建,赵小星,王从锋.山区河流桥墩冲刷防护的延伸范围优化设计[J].桥梁建设,2022,52(2):89-95.