

王宁勇, 李刚, 熊文, 等. 基于注浆抛石联合防护的桥梁抗冲刷设计方法研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S2): 465-472.

WANG Ningyong, LI Gang, XIONG Wen, et al. Bridge scour protection design method based on combined grouting and riprap protection [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 465-472.

基于注浆抛石联合防护的桥梁抗冲刷设计方法研究

王宁勇¹, 李刚¹, 熊文², 徐浪¹, 祁义保¹, 李迪迪²

(1. 安徽皖通高速公路股份有限公司高界管理处, 安徽 安庆 246000;

2. 东南大学交通学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 桥墩桩基的冲刷是造成桥梁结构破坏的关键因素之一, 研究高效实用的抗冲刷防护手段对保障桥梁安全运营具有重要意义。提出一种基于注浆与抛石联合防护的桥梁抗冲刷设计方法, 并与传统的单一防护方式进行对比分析。通过对 Melville 试验进行数值仿真, 验证了基于 Flow-3D 软件模拟桥梁冲刷过程的准确性。随后分别采用清水冲刷模拟与定床模拟方法, 分析注浆区域的临界切应力启动特征及抛石扰流能力, 进一步探讨联合防护措施在桥墩桩基周边的冲刷控制效果。研究显示, 注浆与抛石联合防护在改变流场结构、降低局部流速、减小冲刷坑深度及优化冲刷形态等方面均表现优越, 明显优于单独注浆或单独抛石的防护形式。联合防护措施可显著提高桥墩桩基在洪水冲刷作用下的稳定性, 对延长桥梁使用寿命具有积极意义。

关键词: 冲刷防护; 抛石; 注浆; 联合防护设计; 数值仿真

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S2.076

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S2-0465-08

Bridge scour protection design method based on combined grouting and riprap protection

WANG Ningyong¹, LI Gang¹, XIONG Wen², XU Lang¹, QI Yibao¹, LI Didi²

(1. Gaojie Management Office of Anhui Wantong Expressway Co., Ltd., Anqing 246000, Anhui, China;

2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

Abstract: Pier foundation scour is one of the leading causes of bridge failure, highlighting the urgent need for practical and effective scour protection strategies to ensure the structural safety and serviceability of bridges under flood conditions. A bridge scour protection design that combines grouting and riprap, was proposed and evaluates its effectiveness compared to single protection approaches. The reliability of scour simulations conducted with Flow-3D was validated by replicating the Melville experiment. Subsequently, clear-water scour simulations were carried out to analyze the critical initiation shear stress of the grouted regions around the pile foundations. In parallel, fixed-bed scour simulations were used to evaluate the turbulence-

收稿日期: 2024-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378135, 52022021, 51978160)

作者简介: 王宁勇(1976—), 男, 工程师, 学士, 主要从事道路养护管理的研究。E-mail: wangny070@ahjkt.com

通信作者: 熊文(1982—), 男, 教授, 博士, 主要从事桥梁抗水、桥梁分析与设计理论、智慧桥梁研究。E-mail: wxiong@seu.edu.cn

modulating effects of riprap based on flow velocity distribution around the pile. A comprehensive simulation of the combined protection method was then performed to assess its impact on scour depth and pit morphology. The comparative analysis revealed that the combined grouting and riprap protection significantly reduced scour depth, altered flow patterns more effectively, and led to more favorable scour pit geometries than either grouting or riprap alone. The integrated use of grouting and riprap provides a promising solution for pier foundation scour protection.

Keywords: scour protection; rock throwing; grouting; joint protection design; numerical simulation

0 引言

桥梁局部冲刷通常发生在桥墩桩基附近, 桥墩桩基的存在会加速水流, 形成旋涡将周围的泥沙带走, 从而引发桥墩桩基周围的冲刷。理论上, 水流对桥梁基础的冲刷作用可分为三部分: 其一为前进水流旋涡冲刷, 即水流遇到桥墩桩基后, 由于断面面积减小、流速增大, 在桥墩桩基两侧形成旋涡, 卷起泥沙形成冲刷坑, 这种情况下可以通过减缓水流能量或改变水流与桥墩桩基的作用方式来缓解冲刷^[1]; 其二为下降水流冲刷, 即水流遇到桥墩桩基后形成向下射流, 对桩基产生垂向冲刷, 此时可通过阻止水流急速下冲或提高泥沙启动切应力来进行处理^[2]; 其三为尾流旋涡冲刷, 即水流绕过障碍物后形成尾涡, 将桥墩桩基后方的泥沙带走, 在此情况下可在桩基下游设置结构性防护设施以改善流态^[3]。

目前, 冲刷防护措施主要围绕削弱上述三种冲刷机制进行设计。根据 CHIEW^[4] 的分类, 桥墩桩基冲刷防护手段分为两类: 主动防护与被动防护。主动防护着重于控制冲刷水流, 旨在减少引发冲刷的水流能量; 而被动防护则侧重于改善冲刷对象及桥墩桩基周围的泥沙结构, 从而提高河床材料的抗冲刷能力。TAFAROJNORUZ 等^[5] 将改变桥墩桩基周围水流的防护措施依据布设位置划分为四类, 分别为: 河床上设置绕流构造、桩基上设置附属构造、桩基开缝处理以及其他防护方式。

主动防护措施通常通过设置特定结构改变水流的原有水力特性, 以降低来流强度或改变其流向, 从而减弱向下射流和马蹄形涡旋对桥梁基础的冲刷效应。根据构造设置位置的不同, 主动防护可进一步分为三类, 即在桥墩桩基上设置扰流结构、在河床上布设扰流设施, 以及桥墩桩基本体的自防护措施。桥墩自防护方法主要包括两个方向: 一是通过优化桥墩或桩基的外形, 使其尽可能贴合流线, 减少涡旋的产生与发展, 从而削弱流体对桥墩的冲刷作用; 二是通过增加桩基表面粗糙度, 削弱水流能量, 进而降低流体对基础结构的冲刷强度。被动防护则通常通过在桩基周围

河床铺设保护层或加固层来提高床沙的临界切应力, 从而增强泥沙抵抗冲刷的能力。常见的被动措施包括抛石、石笼、模袋混凝土防护、部分抛石灌浆、扩大桥墩基础范围以及土体加固等方式。

近年来, 组合防护措施成为研究重点, 通常采用主动与被动、或双主动方式相结合来提升防护效率。这类方法一方面可通过结构设计降低水流强度, 削弱下冲流和马蹄形旋涡对桥梁基础的冲刷作用, 另一方面也可提升床沙的临界启动应力, 从而增强整体抗冲刷能力。本研究提出一种基于注浆与抛石相结合的桥梁冲刷“主-被动”联合防护方法, 并开发了基于 Python 与 AutoCAD 交互的随机凸多面体抛石建模工具, 建立了相关联合防护冲刷仿真模型。仿真分析表明, 该联合防护方法在控制流速、降低冲刷深度以及优化冲刷坑形态方面具有良好效果, 具备一定的工程应用前景。

1 联合防护数值仿真实论

1.1 注浆抛石联合防护应用方法

对于保留原桩基础的加固重建桥梁, 由于原桩基周围河床存在冲刷, 因此对于改扩建工程, 对于原桥墩桩基处理是重要一部分内容, 如图 1 所示, 基于注浆抛石的联合防护可按以下步骤进行施工应用: (1) 抽取待处理的冲刷坑内的积水, 并清除冲刷坑内的松散泥石; (2) 在冲刷坑内布设若干注浆管, 围绕桩基布置, 所述注浆管的下端深入冲刷坑底部的土层, 上端伸出河床表面; (3) 在冲刷坑内抛石按粒径分两层填筑, 同时保证上层抛石凸出河床一定高度; (4) 通过注浆管向冲刷坑周围土层和抛石层灌注水泥砂浆; 其中, 对下层土体注浆, 浆液以填充、渗透和挤密等方式将原来松散的土粒胶结成注浆土体处理层; 对抛石层注浆至与河床相同高度, 浆液填充抛石之间的间隙, 两者黏结形成注浆抛石处理层; 注浆抛石处理层形成后, 抛石凸起层相当于嵌入其中, 与注浆抛石处理层连在一起, 形成整体的防护结构。

除了对于改扩建的桩基处理外, 该防护方法也可用新建桥梁抵抗桩基冲刷, 其具体应用方法与改扩建

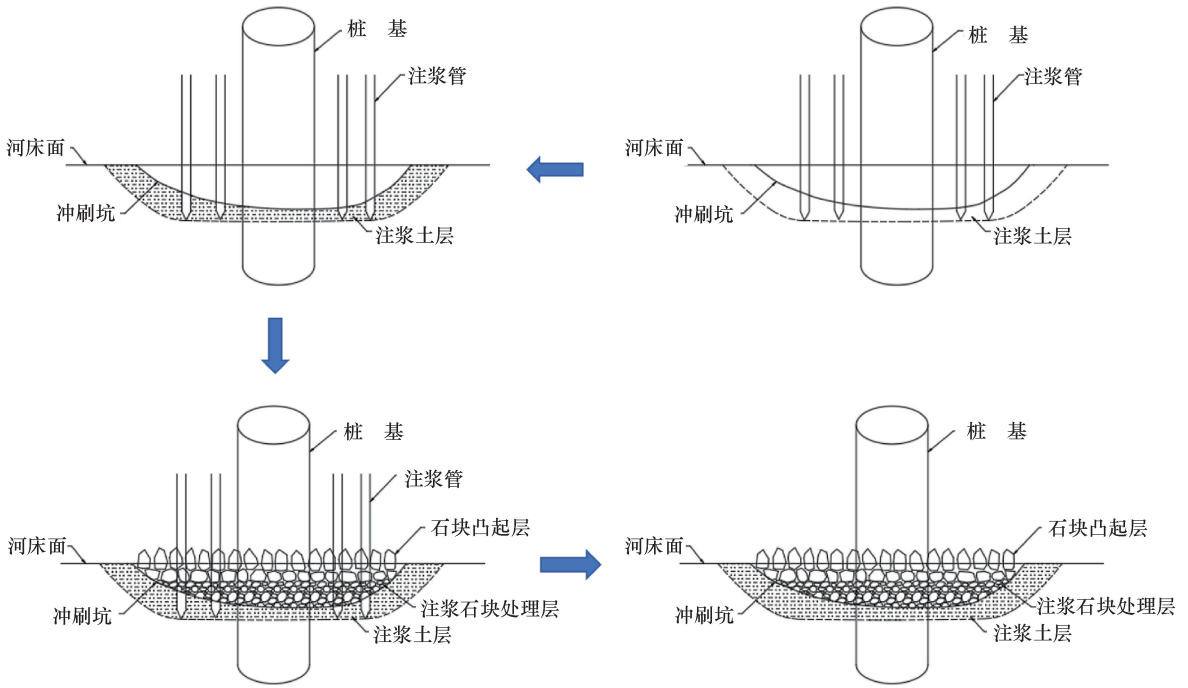


图1 注浆抛石联合防护施工应用流程

桥梁类似, 不同之处在于, 不需要对冲刷坑处理。

1.2 经典试验仿真验证

本文基于 Flow-3D 进行流体分析计算, Flow-3D 将连续性方程和不可压缩黏性流体的 Navier-Stokes 方程作为流体运动的控制方程。考虑到流体为牛顿流体, 结合 Flow-3D 独特的 FAVOR 网格技术, 采用 Melville 试验进行验证, 如图 2 所示。Melville 试验的水槽长 19 m, 宽 0.456 m, 水深 0.15 m, 桩基直径 $d=5.08$ cm, 平均来流流速为 0.25 m/s, 泥沙均粒径为 0.385 mm, 休止角 $\varphi = 32^\circ$ 。

根据模型试验布置和数值模拟要求, 将计算域高度设置为 25 cm (其中床沙厚度为 5 cm), 宽度设置为 $3d$ 即 15.24 cm, 为使上游来流和下游尾流充分发展, 进口和出口距桥墩中心均为 $15d$ 即 76.2 cm。为使水流平顺, 上下游河床均设置 $5d$ 即 2.54 cm 的定床, 数值计算模型布置及边界条件如图 3 所示。

进口边界条件为速度边界, $v=0.25$ m/s; 下游出口边界条件为压力边界, 设置水位 0.15 m; 底面

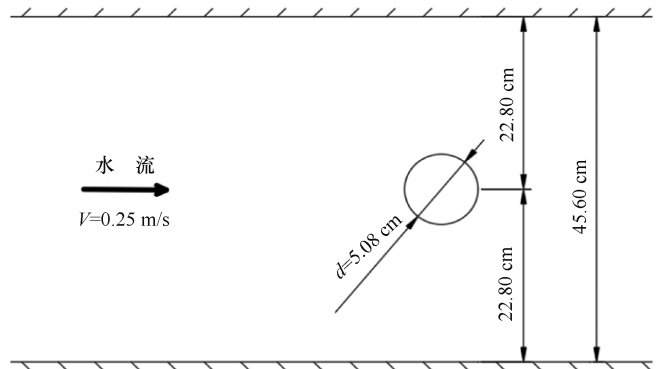
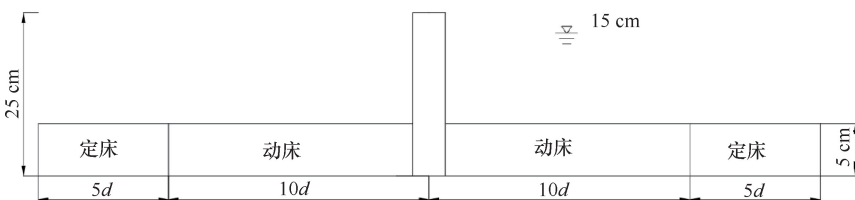
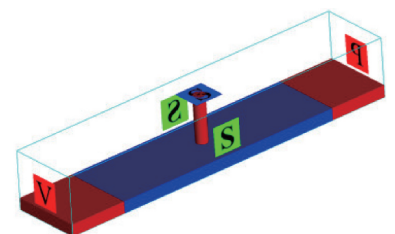


图2 Melville 经典试验模型布置

采用无滑移边界条件, 粗糙高度取 $2.5d_{50}$, 其余为对称边界。选取圆柱竖向为 z 轴方向, 床面为 $x-y$ 面, 水流方向为 x 轴正方向。计算域全部采用结构化正交网格, 为提高计算精度, 准确模拟圆柱体周围的水流紊动, 单元网格尺寸设置为 0.004 m \times 0.004 m \times 0.004 m, 网格总数约为 200 万。模型计算采用基于 VOF 的有限差分法离散控制方程, 湍流



(a) 计算模型



(b) 边界条件

图3 单桩冲刷数值计算模型及边界条件

模型选用 LES 模型, 压力迭代项采用 GMRES 算法。由于 Melville 等的试验中, 前 30 min 冲刷坑发展较为迅速, 随后冲坑随时间发展缓慢, 因此, 本案例取前 30 min 进行数值模拟对比分析。数值模拟冲刷过程中, 垂直水流方向(即 $y-z$ 剖面)桥墩两侧流速分布如图 4 所示。

从图中可以看出, 由于桥墩阻碍, 两侧水流流速增大, 引起剪应力增大, 当超过床沙起动剪应力时, 河床发生冲刷; 同时, 水流在桥墩迎流面下潜, 形成横轴旋涡, 随着时间的推移, 在 100 s 至 600 s 内, 旋涡向两侧发展, 桥墩周围的马蹄涡得到发展, 桥墩两侧冲刷深度发展速度较快; 在 600 s 至 1 200 s 内, 桥墩两侧冲刷深度发展速度相对减缓, 冲刷进一步加剧; 1 200 s 至 1 800 s 内, 桥墩两侧的旋涡和冲刷深度趋于稳定。冲刷深度随时间变化曲线图如图 5

所示, 冲刷深度在前 600 s 时间内发展较快, 前 600 s 的冲刷深度已经达到 1 800 s 冲刷深度的 73.4%, 之后在 600~1 800 s 时间内冲刷深度发展放缓; 由桩基周围冲刷坑形态图可以看出, 冲刷主要发生在桩基两侧, 结合桩基周围的流速分布图来分析, 桩基两侧的绕流流速较大, 这也是形成两侧冲刷的最主要原因。同时, 在本次模拟分析中冲刷 30 min 后最大冲刷深度为 4.003 cm, 与经典试验结果(4 cm)较为接近, 可以认为该模拟方法能够较好模拟桩基周围冲刷发展情况, 如图 6 所示。

2 联合防护分项措施分析

2.1 注浆模拟分析

床层剪切应力是指流体对充填床层表面所施加的切应力, 其大小可以通过湍流特性与流场参数综合

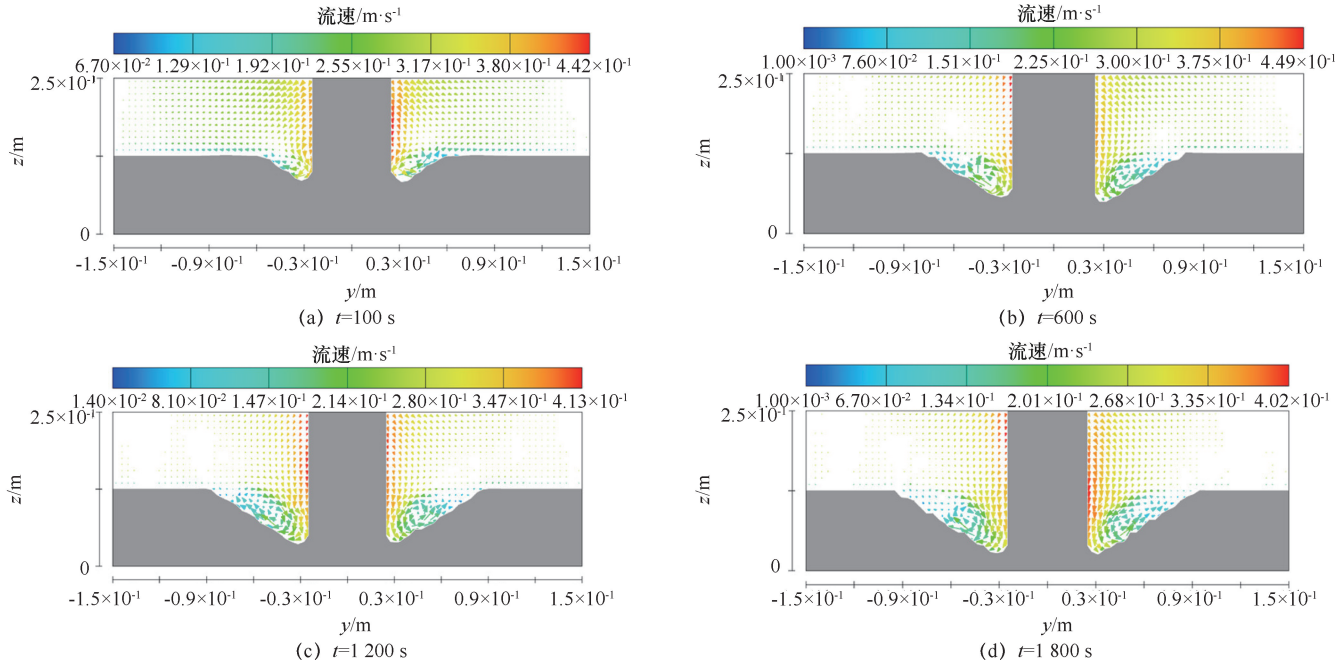
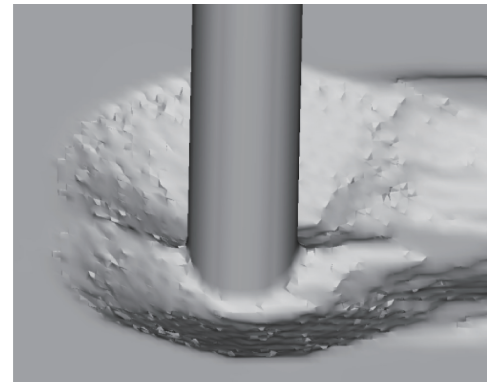
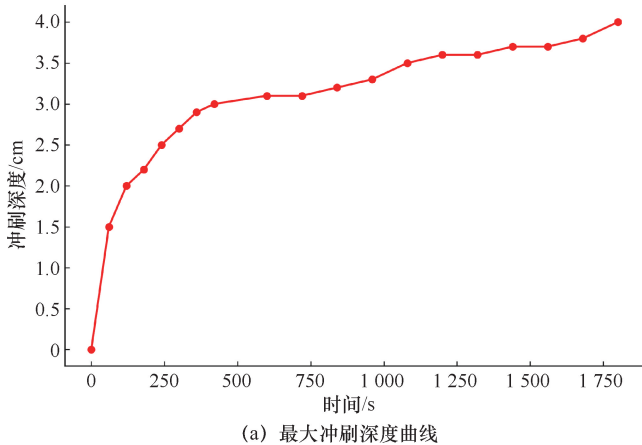


图 4 $y-z$ 剖面不同时刻流速分布



(b) 冲刷坑形态

图 5 冲刷深度随时间变化

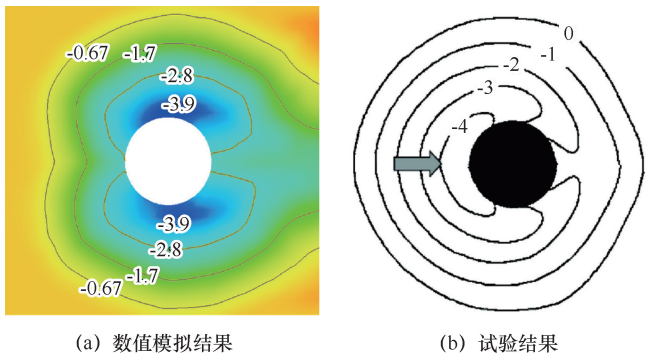


图6 数值模拟与试验冲刷深度等深线对比

估算。在三维流动模拟中,通常采用基于壁函数的模型进行近壁剪应力计算,相关参数包括剪切速度、流体黏性、壁面距离及粗糙度等。粗糙度可与泥沙的中值粒径及经验系数相关联。

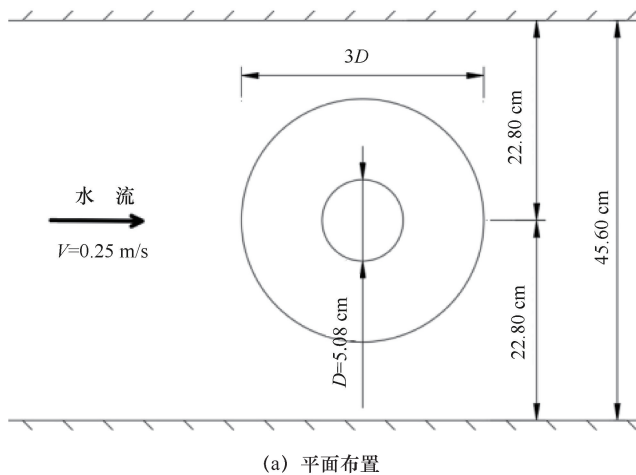
在浅水条件下,床面剪应力的计算往往基于深度平均流速与阻力系数关系,阻力系数则可结合局部粗糙度估算。为评价泥沙是否发生起动,引入了希尔兹

数,其为床层剪切应力的无量纲表示形式,综合反映了剪应力与泥沙颗粒特性之间的关系。

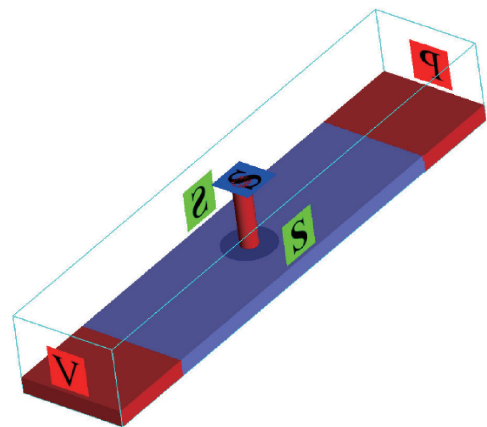
注浆加固部分的抗冲刷能力可通过提升床面临界剪应力实现。固化后的淤泥土临界切应力范围一般为2.5至4 Pa。通过换算其等效希尔兹数,并结合加权剪应力分布,可进一步评估注浆区域的防冲刷效果。

此外,床面超剪应力,即剪应力超过临界值的部分,是反映冲刷潜能的重要指标。在模拟中,通过提取桩基周围一定范围内的超剪应力均值,可对冲刷趋势做出量化判断。在本研究中,注浆区域临界剪应力取值为4 Pa,对应的等效希尔兹数约为0.64。其余模拟设置与前述模型一致,注浆区域的平面布置如图7所示。

仿真结果如图8所示,桩基周围剪应力远低于注浆区域的临界值,结合冲刷坑形态分析可见,注浆加固区域基本未发生冲刷,冲刷主要集中在桩基下游区域。与无防护条件相比,整体冲刷深度显著降低,验证了注浆防护措施的有效性。

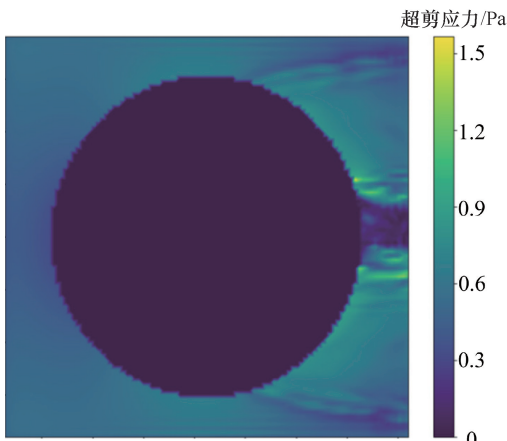


(a) 平面布置



(b) 数值计算模型

图7 注浆模拟分析平面布置图及数值计算模型



(a) 平面布置



(b) 数值计算模型

图8 注浆模拟分析结果

2.2 抛石扰流模拟分析

抛石扰流分析采用定床模拟分析, 着重考虑抛石存在对于周围流体的扰动情况。在 Melville 试验基础上添加抛石, 检验防护的效果, 建模思路主要如下: (1) 建立基于 Melville 试验的数值仿真模型; (2) 通过基于 Python 和 AutoCAD 的参数化交互建模, 结合指定抛石的投放算法, 在 AutoCAD 中生成三维实体, 输出三角网格 STL 文件; (3) 将输出的 STL 文件导入至基于 Melville 试验的数值仿真模型中, 对抛石加固

部分采用嵌套网格加密, 内外层网格大小比例为 2:1, 其他部分参数设置与 1.2 节参数设置情况相同, 如图 9 所示。

抛石扰流模拟分析结果如图 10—11 所示, 对比有无抛石防护的 x 方向流速分布可以看出, 无抛石时, 最大流速为 0.4043 m/s , 最小流速为 -0.1276 m/s , 有抛石防护时, 最大流速为 0.3956 m/s , 最小流速为 -0.1041 m/s , 流速最大值和最小值均有所降低, 同时值得注意的是, 相较于无防护情况, 抛石的存在

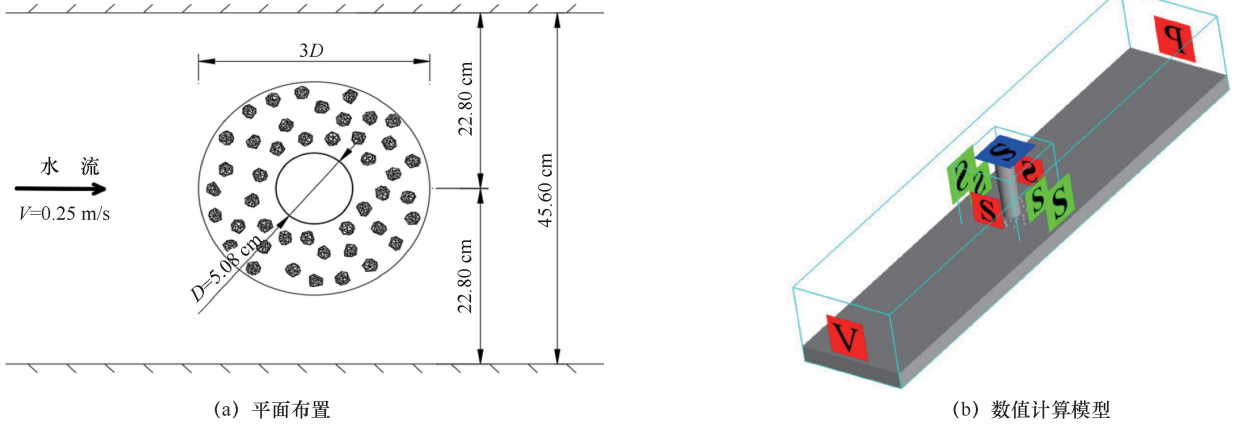
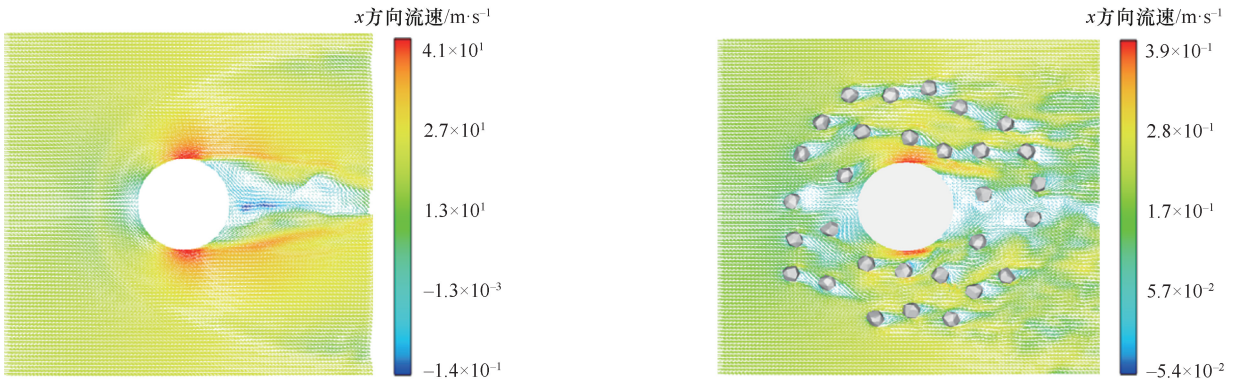


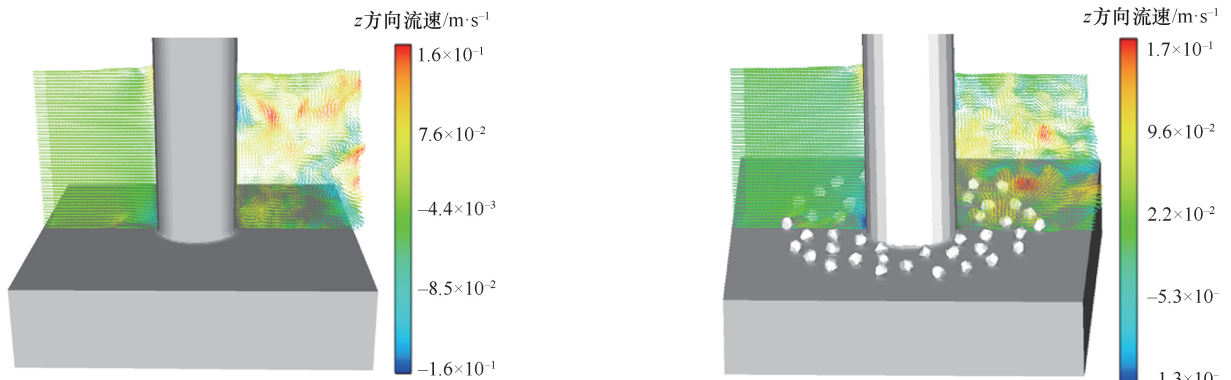
图 9 抛石扰流模拟分析平面布置图及数值计算模型



(a) 无防护

图 10 无防护与抛石防护 x 方向流速矢量

(b) 抛石防护



(a) 无防护

图 11 无防护与抛石防护 z 方向流速矢量

(b) 抛石防护

降低了桩基附近最大流速的分布范围,使得桩基附近流速整体分布更均匀;除此之外,从旋涡大小来看,无防护条件下,桩基后面的旋涡比较为明显。从引起桩基冲刷的原理来看,尾涡是引起桩基冲刷的重要因素,而施加抛石防护后,桩基后面的旋涡有所缓解。整体来看,抛石的存在,对于行进流速有一定的降低作用,起到了削弱水流强度的作用。对比有无抛石防护的 z 方向流速分布可以看出,无抛石时最大向下流速为 -0.1655 m/s ,有抛石防护时,最大向下流速为 -0.1280 m/s ,水流接触抛石后,水流被反射向上,降低了桩基周围的向下流速,减少了水流对桩基的掏蚀,可见,整体上抛石的存在,阻挡了行进桩基周围的下降水流,起到了类似于护圈的防护效果。

3 联合防护模拟分析

3.1 模型建立及参数设置

在注浆模拟和抛石绕流模拟的基础上,将两

种处理方式组合进行联合模拟,开展联合防护的清水冲刷试验模拟。模型布置如图12所示,相关参数设置与2.1和2.2节相同。由于Melville试验中,前600s冲刷坑发展较为迅速,随后冲刷坑随时间发展缓慢,因此,本案例取前600s进行数值模拟对比分析。联合防护仿真结果如图13所示,由冲刷坑形态图可以看出,施加联合防护后,由于抛石进行一定的注浆处理,抛石防护范围内基本不发生冲刷,冲刷主要发生在抛石防护范围之外的后方。同时结合上文的冲刷深度等深线,注浆防护部分前方有少许泥沙堆积,这部分泥沙随着水流不断运动,对桩后的冲刷坑有一定填充,这也符合冲刷深度曲线波动变化的现象。600s两侧的冲刷坑深度为 0.3436 cm ,相较于无防护措施情况下的冲刷深度(2.939 cm)有明显下降,最大冲刷深度降低率达88.3%,由此可见联合防护对于桩基的冲刷防护效果显著。

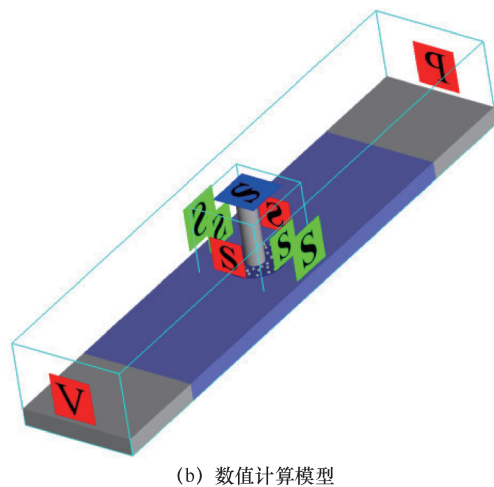
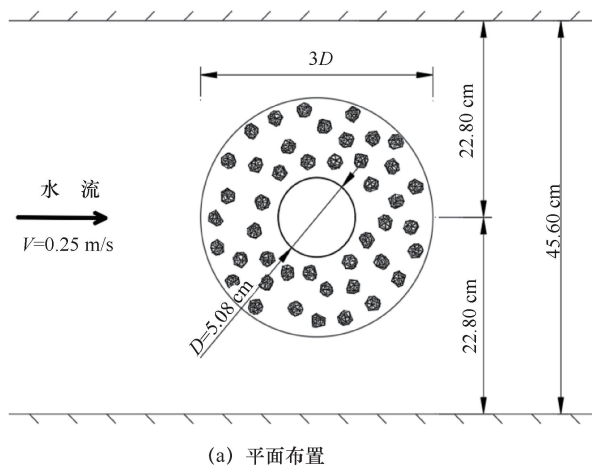


图12 联合防护平面布置图及数值计算模型

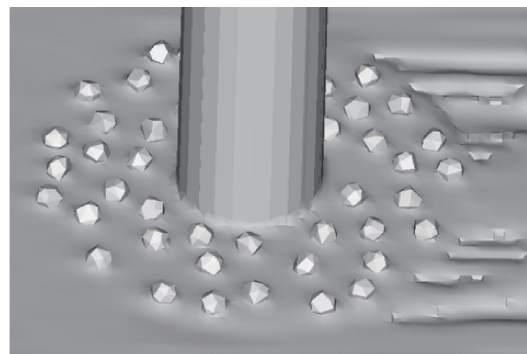
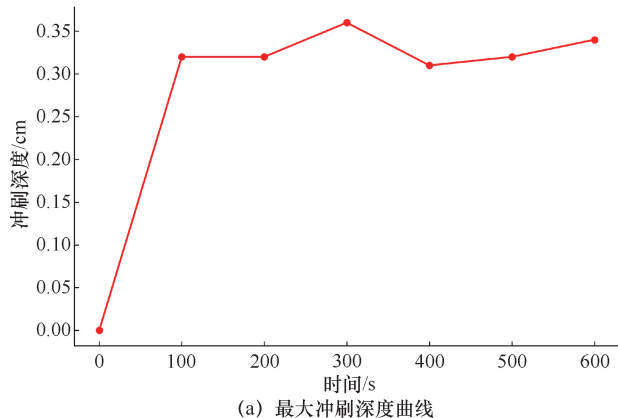


图13 联合防护下桩基周围最大深度变化曲线及600s冲刷坑形态

4 结 论

本文开展了基于注浆抛石联合防护的桥梁冲刷建模分析, 主要结论如下。

(1) 注浆与抛石联合防护方法是一种有效的桥墩桩基抗冲刷措施, 尤其适用于保留原桩基础的加固重建工程。主要步骤包括: 抽取冲刷坑内积水并清理松散泥石, 布设注浆管围绕桩基, 将抛石按粒径分层填筑, 最后通过注浆管注入水泥砂浆以稳固土层与抛石层。该防护结构形成后, 抛石层与注浆层结合, 显著增强了桥墩桩基的抗冲刷能力。

(2) 通过 Melville 试验进行仿真验证, 结合流速分析, 引起桩基周围冲刷的主要因素为横轴旋涡, 桩前下潜流和尾部涡流; 结合冲刷坑深度分析, 冲刷深度在前 600 s 时间内发展较快, 之后在 600~1800 s 时间内冲刷深度发展放缓; 同时, 在本次模拟分析中冲刷 30 min 后最大冲刷深度为 4.003 cm, 与经典试验结果(4 cm) 较为接近, 可以认为该模拟方法能够较好模拟桩基周围冲刷发展情况。

(3) 建立联合防护的冲刷仿真模型, 从冲刷深度, 冲刷坑形态等方面对比分析了联合防护和无防护的优势。从改善注浆部分临界启动切应力着手, 基于清水冲刷, 实现了对桩基周围注浆部分的模拟分析; 从桩基周围流速情况着手, 基于定床冲刷, 实现了对抛石扰流效果的模拟分析; 从桩基周围冲刷情况着

手, 基于清水冲刷, 实现对联合防护的模拟分析。从流速矢量图可以看出, 施加联合防护后, 由于受到抛石的阻挡, 行进流速被扰乱, 最大流速为有所降低, 桩基两侧的横轴涡旋被打散; 从冲刷深度冲刷坑形态分析, 施加联合防护后, 由于抛石进行一定的注浆处理, 抛石防护范围内基本不发生冲刷, 冲刷主要发生在抛石防护范围之外的两侧和后方, 600 s 两侧的最大冲刷深度相比于无防护降低 88.3%, 由此可见联合防护对于桩基的冲刷防护效果显著。

参考文献:

- [1] PANDEY M, AZAMATHULLA H M, CHAUDHURI S, et al. Reduction of time-dependent scour around piers using collars[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 213: 107692.
- [2] MONCADA-M A T, AGUIRRE-PE J, BOLÍVAR J C, et al. Scour protection of circular bridge piers with collars and slots[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, 47(1): 119-126.
- [3] WANG S, WEI K, SHEN Z, et al. Experimental investigation of local scour protection for cylindrical bridge piers using anti-scour collars[J]. *Water*, 2019, 11(7): 1515.
- [4] CHIEW Y. Scour protection at bridge piers[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 118(9): 1260-1269.
- [5] TAFAROJNORUZ A, GAUDIO R, DEY S. Flow-altering countermeasures against scour at bridge piers: a review[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2010, 48(4): 441-452.

(责任编辑 王 璐)