

# 基于Flow-3D的圆柱形桥墩局部冲刷及防护研究

吴泽榕, 陈 宁

湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2024年5月3日; 录用日期: 2024年5月23日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘 要

桥梁基础的局部冲刷是导致桥梁水毁的主要因素之一, 需要采取一定措施进行防护处理。本文基于Flow-3D软件的水动力学模块和泥沙运输模块, 采用RNG k- $\epsilon$ 湍流模型对圆柱形桥墩开展了局部冲刷防护三维数值研究, 分析了安装护套对圆柱形桥墩局部冲刷防护的效果。计算结果表明: 护套装置能够大幅降低最大冲刷深度, 最大冲刷深度仅为无防护情况的13%; 安装护套装置后, 河床冲刷形态较无防护时发生了较大变化, 桥墩迎水侧未发生冲刷, 最大冲刷深度位置位于护套侧前方距离护套边缘很小距离的位置; 在护套两侧冲刷坑后方, 形成了与无防护工况类似的较大面积的沙丘拖尾, 但由于冲刷程度较小, 水流中的泥沙含量较低, 沙丘的高度和面积均远小于无防护工况。

## 关键词

Flow-3D, 单桩基础, 局部冲刷, 冲刷防护

# Study on Local Scour and Protection of Cylindrical Pier Based on Flow-3D

Zerong Wu, Ning Chen

School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: May 3<sup>rd</sup>, 2024; accepted: May 23<sup>rd</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Local scour of bridge foundation is one of the main factors leading to water damage of bridges, and certain measures need to be taken for protection treatment. In this paper, based on the hydrodynamic module and sediment transport module of Flow-3D software, the RNG k- $\epsilon$  turbulence model is used to carry out a three-dimensional numerical study on the local scour protection of cylindrical

bridge piers, and the effect of installing sheaths on the local scour protection of cylindrical bridge piers is analyzed. Calculation results show that the sheath device can greatly reduce the maximum scour depth, the maximum scour depth is only 13% of the unprotected condition; after the installation of the sheath device, the scour pattern of the riverbed changes greatly compared with the unprotected condition, and the waterward side of the abutment is not scoured, and the location of the maximum scour depth is located in the sheath side of the forward side of the sheath at a very small distance from the edge of the sheath; in the sheath on both sides of the back of the scour crater, a large area of sand dune trailing is formed, similar to the unprotected condition. In the back of the scour pits on both sides of the sheath, a large area of sand dune trailing similar to the unprotected condition is formed, but due to the smaller degree of scour and lower sediment content in the water flow, the height and area of the sand dune are much smaller than that of the unprotected condition.

## Keywords

Flow-3D, Single Pile Foundation, Local Scour, Scour Protection

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

桥梁基础冲刷作为一种常见的工程现象,对桥梁的结构安全构成严重威胁,冲刷破坏的发生十分迅速而且难以预警。据统计,美国1966年至2000年倒塌的1502座桥梁中,有50%以上的结构失效与基础冲刷直接相关。而中国在2000年至2014年间的106起桥梁结构失效事件中,高达30%与冲刷有关。冲刷作用会导致桥墩周围泥沙的流失,降低桩基的承载能力和抗倾覆能力,最终引发桥梁水毁事故。近年来,全球气候变暖加剧,强降雨、极端洪水等水文灾害频发,使桥梁失效风险进一步上升。因此,进行桥墩基础局部冲刷的预测和防护研究显得尤为迫切。

随着数值方法的发展和计算机性能的提高,CFD数值模拟在桥墩局部冲刷研究中得到了越来越多的应用。Olsen等[1]研究了直立圆柱体周围的局部冲刷,然而,他们的数值模型并未考虑到来流的湍流流动特性。熊文等[2]基于Fluent软件二次开发三维动网格CFD冲刷模型,探究了不同环境参数对冲刷坑形态的影响。喻鹏等[3]推导了平衡湍流边界层模型获取水平均匀性的来流条件,探究了串列双圆柱桥墩的冲刷历程。张曙光等[4]采用Flow-3D软件开展了圆柱桥墩局部冲刷大涡模拟,数值结果精度有所改善。王炎等[5]提出了一种新型的V形防冲挡板,可有效减弱桩基处的冲刷作用。黄永江等[6]通过数值模拟研究了环翼型挡板不同安装位置的防护影响,认为在1/3水深处防护效果最佳;陈艳梅等[7]采取试验与数值模拟结合的方法研究了3种不同形状的环翼挡板的防护效果,结果表明,板尾端宽度为45mm的防护作用最佳;成兰艳等[8]通过试验研究了挡板延伸对冲刷的影响,结果表明,当延伸长度与桩基半径相同时,防冲刷效果显著。Nazari-Sharabian等[9]基于Flow-3D开展数值模拟研究,探讨了牺牲桩对桥梁局部冲刷的防护效果,模拟结果显示,布置牺牲桩对减少局部冲刷深度具有显著效果,当牺牲桩位于桥墩上游5倍桩径处时,防护效果最佳。Aly等[10]通过数值模拟分析了不同形状桥墩护套(流线形、锥形套、三角翼和斜板)对减少冲刷潜力的效果。结果表明,这些结构能够通过改变周围流场来有效降低床面剪切应力,其中斜板和三角翼最为有效,分别减少了30%和20%的最大床面剪切应力。Kassem等[11]通过实验方法探究了圆形和六边形围裙对圆形桥墩局部冲刷几何形态的影响。研究发现,围裙能有效改变桥墩

周围的三维流场, 减少冲刷坑的深度和体积。研究提出了新的预测公式和围裙形状系数, 用于更准确地预测冲刷深度。Tang 等[12]通过实验研究了床面固化技术作为减少海上风电单桩基础局部冲刷的对策的有效性。研究主要考察了保护结构的厚度、角度、延伸和放置深度等几何参数对冲刷深度的影响, 并分析了不同保护形状对冲刷坑形状的影响。但较多学者仅考虑了防护板对墩前下降水流水力特征的影响, 对于贴近河床的防护装置的防护效果及机理则研究较少。

本研究以 Melville 等[13]的经典水槽试验为基础, 基于 Flow-3D 软件, 采用 RNG k- $\varepsilon$  湍流模型, 建立了圆柱形桥墩局部冲刷防护数值模型, 分析了护套对圆柱形桥墩局部冲刷防护的效果, 为桥墩防护设计提供参考。

## 2. 数值模型计算理论

### 2.1. 湍流模型

基于 RANS 的湍流模型将湍流脉动项进行时均处理, 降低了计算消耗, 但该方法引入了新的雷诺应力项, 使得 N-S 方程无法求解。为了求解雷诺应力项, 需要引入涡粘模型将方程联立起来。本研究选用改进模型 RNG k- $\varepsilon$  湍流模型进行数值求解, 其控制方程为:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) = P_T + G_T + Diff_{k_T} - \varepsilon_T \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) = \frac{C_1 \varepsilon_T}{k_T} (P_T + C_3 G_T) + Diff_{\varepsilon} - C_2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (2)$$

式中:  $K_T$  为湍动能;  $P_T$  为速度梯度产生的湍流动能;  $G_T$  为浮力产生的湍动能;  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  分别取 1.39、1.42、0.085;  $Diff_{k_T}$  和  $Diff_{\varepsilon}$  为湍流扩散项。

### 2.2. 泥沙输送模型

以泥沙临界起动希尔兹数判断泥沙是否起动, 首先根据 Soulsby-Whitehouse 公式[14]计算临界希尔兹数  $\theta_{cr}$ , 其计算方程为:

$$\theta_{cr} = \frac{0.1}{R^{*2/3}} + 0.054 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-R^{*0.52}}{10}\right) \right] \quad (3)$$

式中:  $R^*$  为泥沙中值粒径的无量纲参数, 计算式为:

$$R^* = d_s \left[ \frac{\rho_f (\rho_s - \rho_f) \|g\|}{\mu_f^2} \right]^{1/3} \quad (4)$$

式中:  $d_s$  为泥沙粒径;  $\rho_f$  为流体密度;  $\rho_s$  为泥沙混合密度;  $\|g\|$  为重力加速度大小;  $\mu_f$  为流体动态粘度。

上述临界希尔兹数计算公式未能考虑河床倾角对泥沙沉积物的影响。实际上, 自然河床并不是平整的, 在倾斜的河床界面上堆积的泥沙沉积物稳定性更差, 更容易被水流挟带着沿斜坡向下移动。为此, 进一步推出了考虑河床倾角的修正临界希尔兹数  $\theta'_{cr}$ , 其计算式如下:

$$\theta'_{cr} = \theta_{cr} \frac{\cos \psi \sin \beta + \sqrt{\cos^2 \beta \tan^2 \varphi_s - \sin^2 \psi \sin^2 \beta}}{\tan \varphi_s} \quad (5)$$

式中:  $\varphi_s$  为泥沙休止角;  $\psi$  为流速矢量与床面之间的夹角;  $\beta$  为床面与重力矢量之间的夹角。

当河床表面临界希尔兹数大于泥沙临界起动希尔兹数时, 河床泥沙被水流挟带动转化为悬浮泥沙,

泥沙起动时存在一个泥沙被挟带上升的速度  $u_{diff}$ ，采用 Mastbergen 公式[15]进行计算，其计算方程为：

$$u_{diff} = \alpha n_s d_*^{0.3} (\theta_s - \theta'_{cr})^{1.5} \sqrt{\frac{\|g\| d_s (\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (6)$$

式中： $\alpha$  为泥沙挟带系数，推荐取值为 0.018； $n_s$  为河床表面法向向量； $\theta_s$  为河床泥沙局部希尔兹数，根据局部切应力求得，计算式如下：

$$\theta_s = \frac{\tau}{\|g\| d_s (\rho_s - \rho_f)} \quad (7)$$

式中： $\tau$  为河床局部切应力。

在河床泥沙被水流挟带转化为悬浮泥沙的同时，部分悬浮泥沙也会由于重力作用沉降转化为淤积泥沙， Soulsby [14]提出的泥沙沉降速度  $u_{setling}$  方程如下：

$$u_{setling} = \frac{v_f}{d_s} \left[ \left( 10.36^2 + 1.049 d_s^3 \right)^{0.5} - 10.36 \right] \quad (8)$$

式中： $v_f$  为流体的运动粘度。

推移质运动是指泥沙颗粒在水流中沿河底滚动、滑动、跳跃或层移方式运动。Flow-3D 中，河床表面有一层仅几个泥沙粒径厚度的薄层可沿床面方向运动，用于模拟实际情况中的推移质输运。本文推移质输移速度依据 Meyer-Peter 和 Muller 的床面单宽体积输沙公式计算，计算式如下：

$$\phi = \beta_{MPM} (\theta_i - \theta_{cr})^{1.5} c_b \quad (9)$$

式中： $\beta_{MPM}$  为推移质系数，可由用户自行定义，建议值为 8~13，通常取 8.0； $c_b$  为泥沙体积分数。

### 3. 数值模型验证

为验证本研究建立数值模型的准确性，选用 Melville 等[13]的经典水槽试验进行对比。该试验水槽长 19 m，宽 0.456 m，水深 0.15 m，平均流速为 0.25 m/s，泥沙中值粒径为 0.385 mm，泥沙休止角为 32°。在水槽正中央放置直径为 5.08 cm 的圆柱作为桥墩模型。

根据水槽试验布置条件和数值模拟精度要求，计算域高取 25 cm，其中泥沙厚度 5 cm，水深 15 cm，上部空气 5 cm，宽度设置为实际水槽宽度 45.6 cm。为使上游来流和下游尾流充分发展，桥墩中心距进出口均为 15 d (d 为圆柱桥墩直径，15 d = 0.762 m)。为确保水流平顺，上下游处均布置 5 d 的定床(不调用泥沙模块)。

模型入口采用速度入口边界，流速  $v = 0.25$  m/s，初始水位 0.20 m (0.15 m 水深 + 0.05 m 河床)；出口为自由出流边界；两侧和底部均设置为壁面边界，粗糙度为  $2.5 d_{50}$ ；顶部为压力边界。选取桥墩竖向为 z 轴正方向，床面为 x-y 平面，水流方向为 x 轴正方向布置模型并建立网格。计算域网格为结构化正交网格，为保证计算精度，单元网格尺寸设置为  $0.005 \text{ m} \times 0.005 \text{ m} \times 0.005 \text{ m}$ ，网格总数约为 140 万。初始水位设置为 0.20 m，模型布置及边界条件如图 1 所示。

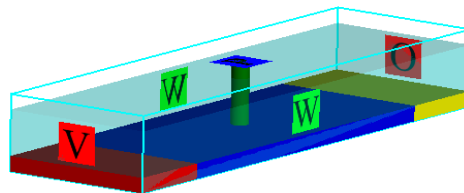


Figure 1. Schematic diagram of model layout and boundary conditions  
图 1. 模型布置及边界条件示意图

Melville 等的试验结果指出, 冲刷达到最终平衡状态需要 220 min, 最终冲刷坑深度为 6 cm。实际上, 当试验进行到 30 min 时, 冲刷深度便达到了 4 cm, 是最终冲刷平衡状态的 2/3, 考虑到计算机硬件限制, 本研究选取前 30 min 冲刷发展进行分析。

图 2 最大冲刷深度时程曲线给出了本次仿真计算中最大冲刷坑深度随时间的变化曲线, 并与熊文等 [2] 基于 Fluent 采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型和王飞等 [16] 基于 Fluent 采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型的结果进行了对比。从图中可以看出, 最大冲刷坑深度在冲刷前期迅速增大, 在后期增速逐渐趋于平缓。在前 700 s 内, 冲刷坑深度迅速发展到了 3 cm, 之后冲刷坑发展速度逐渐趋缓, 历时 1800 s 后最终冲刷坑深度为 4.25 cm。其原因在于, 在冲刷初期床面最大切应力比泥沙临界起动切应力大很多, 水流挟沙能力强, 导致冲刷发展剧烈; 随着冲刷坑的发展, 墩周河床下移, 流场运动空间增大, 水流挟沙能力减弱, 冲刷坑发展速度也随之趋缓, 这与 Melville 等的水槽试验所得出的现象相符。本研究得出的时程曲线与其他学者存在一定差异, 这是泥沙颗粒运动本身的复杂性所导致的。受限于冲刷本身的复杂性, 现有的泥沙起动和泥沙输送模型仍存在不足之处, 同时所选经验公式的不同也会导致仿真结果的差异。本仿真计算中所得冲刷坑深度与模型试验结果仅相差 7%, 说明该数值方法具有较高的计算精度, 能够较为准确地预测出桥墩局部冲刷发展历程。

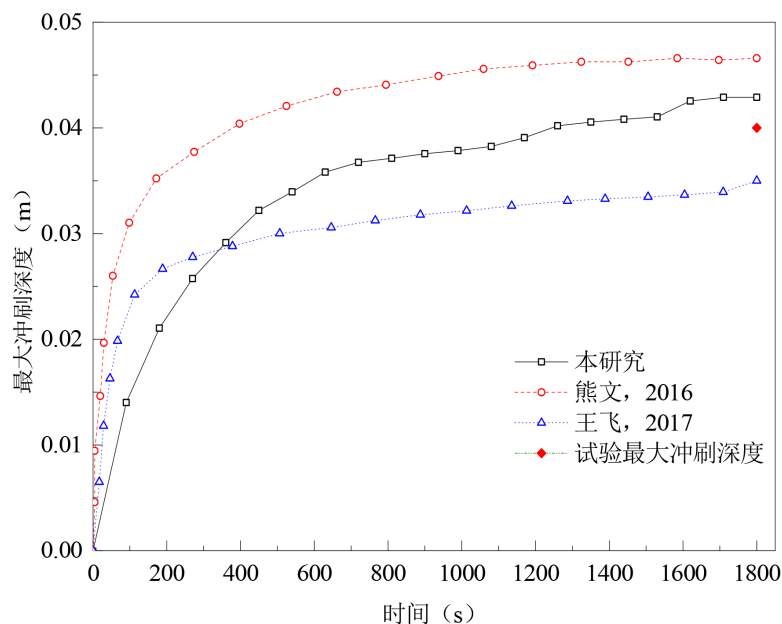
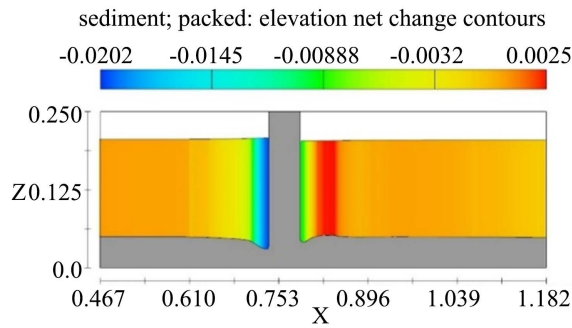
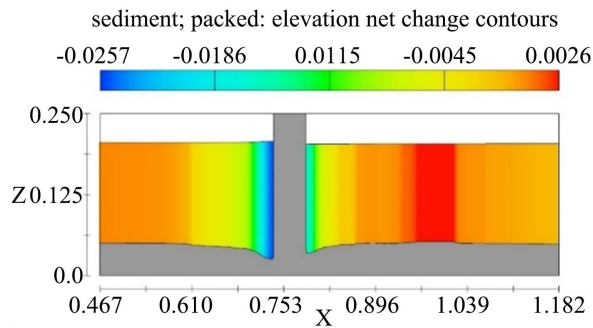


Figure 2. Time history curve of maximum scour depth  
图 2. 最大冲刷深度时程曲线

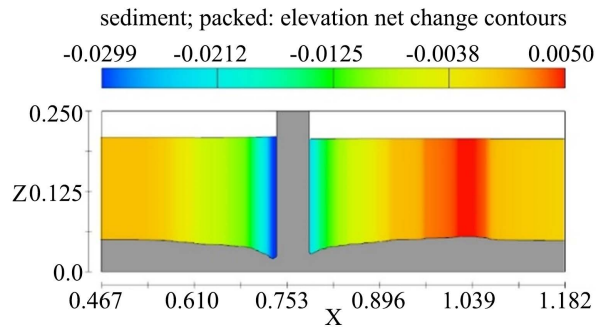
图 3~6 展示了桥墩局部冲刷坑在桥墩中轴线纵向剖面的冲刷深度随时间的变化过程。从图中可以看出, 在冲刷发展前期, 墩周泥沙被来流裹挟起动, 墩柱迎水侧泥沙起动现象尤为剧烈。随着时间推移, 冲刷坑深度和范围持续发展, 由于河床坡度变化, 冲刷坑前方的泥沙也开始达到起动条件被卷起, 冲刷坑范围不断向来流方向发展。同时, 墩柱迎水侧被挟带起来的泥沙随着水流一起向下游推移运动并少量堆积在墩柱背水侧, 由于墩柱背水侧尾部涡流和脱离涡旋的影响, 墩柱背水侧河床受到冲刷作用, 冲刷坑深度也不断扩大, 冲刷坑和尾部淤积泥沙不断向出流方向发展, 因此冲刷坑在纵向剖面上的发展范围非常大。对比纵向剖面冲刷深度和冲刷坑范围的变化情况可以发现,  $t = 1800$  s 时的冲刷深度约为  $t = 300$  s 时的 1.5 倍, 冲刷坑范围却扩大了接近 3 倍。



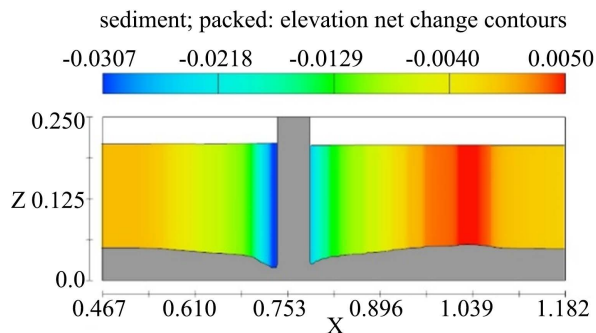
**Figure 3.** Longitudinal section of bridge abutment at  $t = 300$  s  
**图 3.**  $t = 300$  s 时桥墩纵向剖面



**Figure 4.** Longitudinal section of bridge abutment at  $t = 600$  s  
**图 4.**  $t = 600$  s 时桥墩纵向剖面



**Figure 5.** Longitudinal section of bridge abutment at  $t = 1200$  s  
**图 5.**  $t = 1200$  s 时桥墩纵向剖面



**Figure 6.** Longitudinal section of bridge abutment at  $t = 1800$  s  
**图 6.**  $t = 1800$  s 时桥墩纵向剖面

图 7~10 展示了桥墩局部冲刷坑在桥墩中轴线横向剖面的冲刷深度随时间的变化过程。从图中可以明显地看到，桥墩冲刷坑在横向剖面上冲刷深度不断加深且冲刷发展速度随时间不断放缓的过程。墩柱的阻水作用会使得墩周两侧的流线收窄，进而导致两侧流速变大，对应位置的床面切应力也增大，水流挟沙能力增强，冲刷坑发展更为剧烈。可以看出，在冲刷发展的初始阶段，墩柱两侧冲刷坑发展非常剧烈，随着冲刷时间的推移，冲刷坑范围不断发展，两侧绕流在冲刷坑内的流场运动空间增大，耗能路程增加，水流挟沙能力减弱，冲刷坑发展速度也随之减缓，逐渐进入冲刷平衡阶段。 $t = 1200$  s 时和  $t = 1800$  s 时桥墩横向剖面冲刷坑深度和范围几乎没有差异。

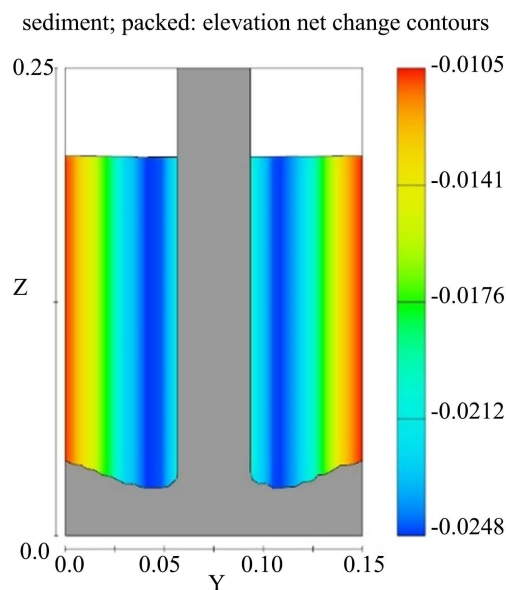


Figure 7. Transverse section of bridge abutment at  $t = 300$  s  
图 7.  $t = 300$  s 时桥墩横向剖面

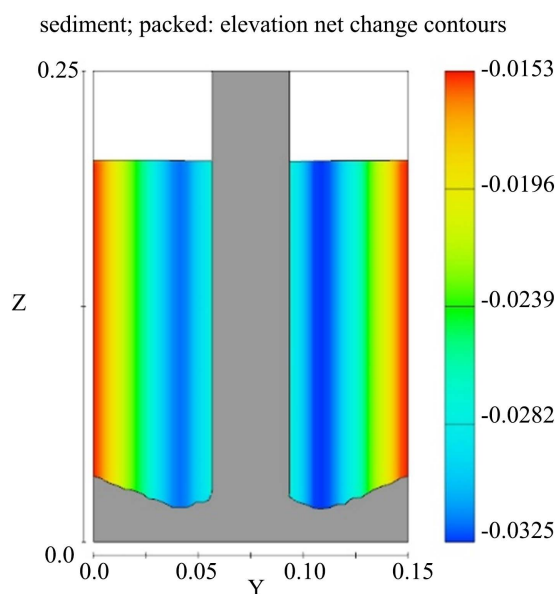
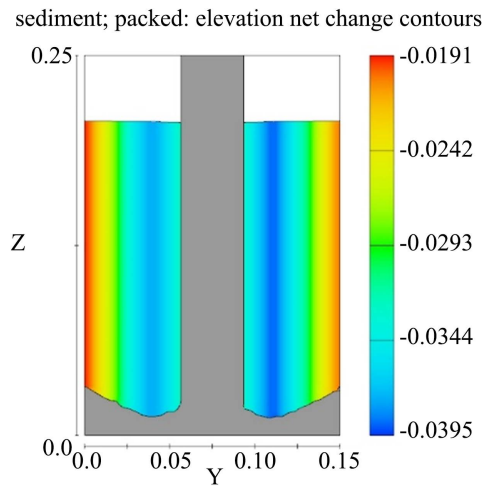
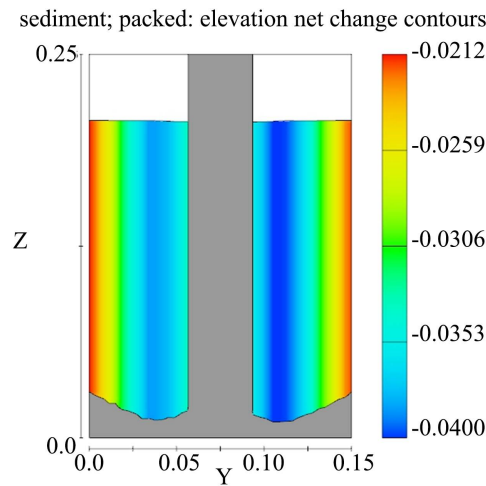


Figure 8. Transverse section of bridge abutment at  $t = 600$  s  
图 8.  $t = 600$  s 时桥墩横向剖面



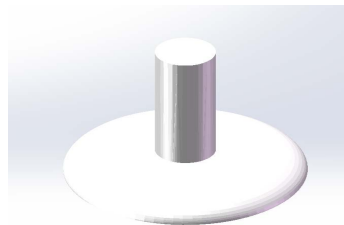
**Figure 9.** Transverse section of bridge abutment at  $t = 1200$  s  
**图 9.**  $t = 1200$  s 时桥墩横向剖面



**Figure 10.** Transverse section of bridge abutment at  $t = 1800$  s  
**图 10.**  $t = 1800$  s 时桥墩横向剖面

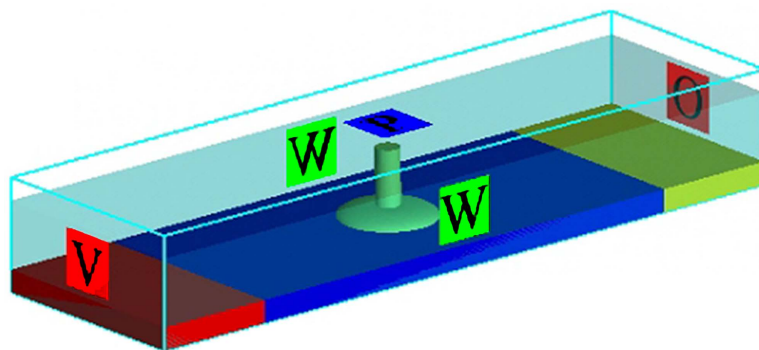
#### 4. 冲刷防护基础局部冲刷数值模型

为探究护套对圆柱形桥墩局部冲刷防护效果,在上述数值验证模型的基础上添加如图 11 所示的护套装置开展数值模拟计算,护套边缘距桥墩中心  $3d$ ,护套高度为  $0.5d$ 。护套装置防护工况具体模型网格划分及边界条件均与数值验证模型保持一致,模型布置及边界条件如图 12 所示。



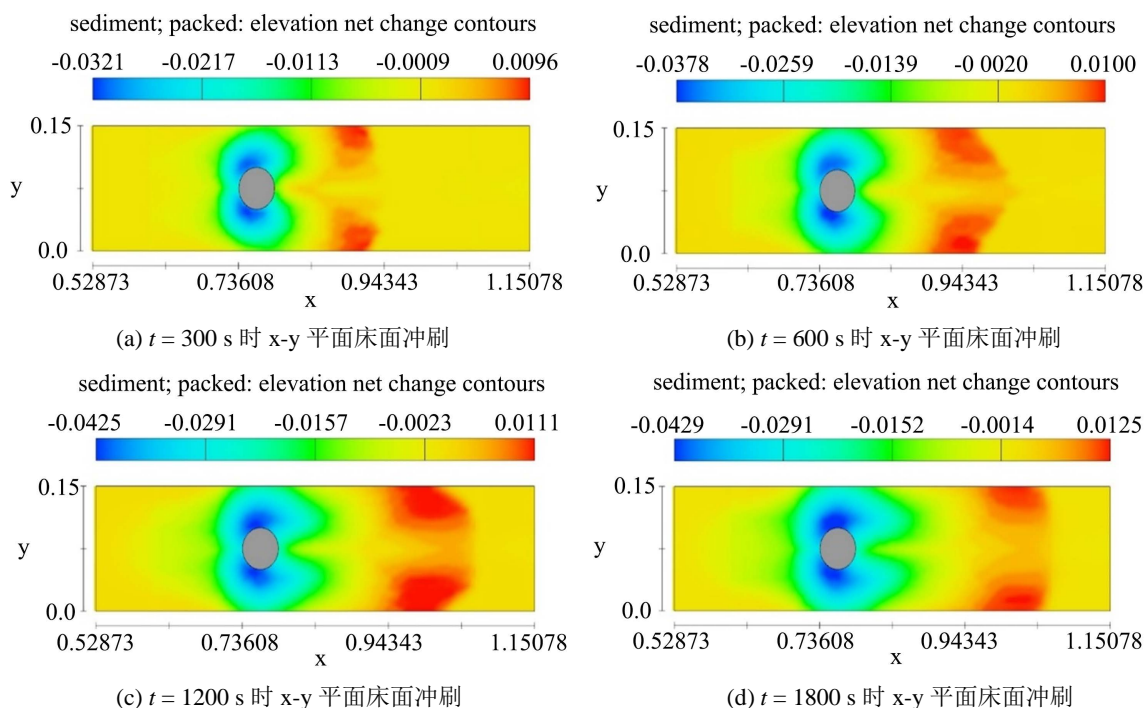
**Figure 11.** Schematic diagram of the structure of the sheath device  
**图 11.** 护套装置结构示意图



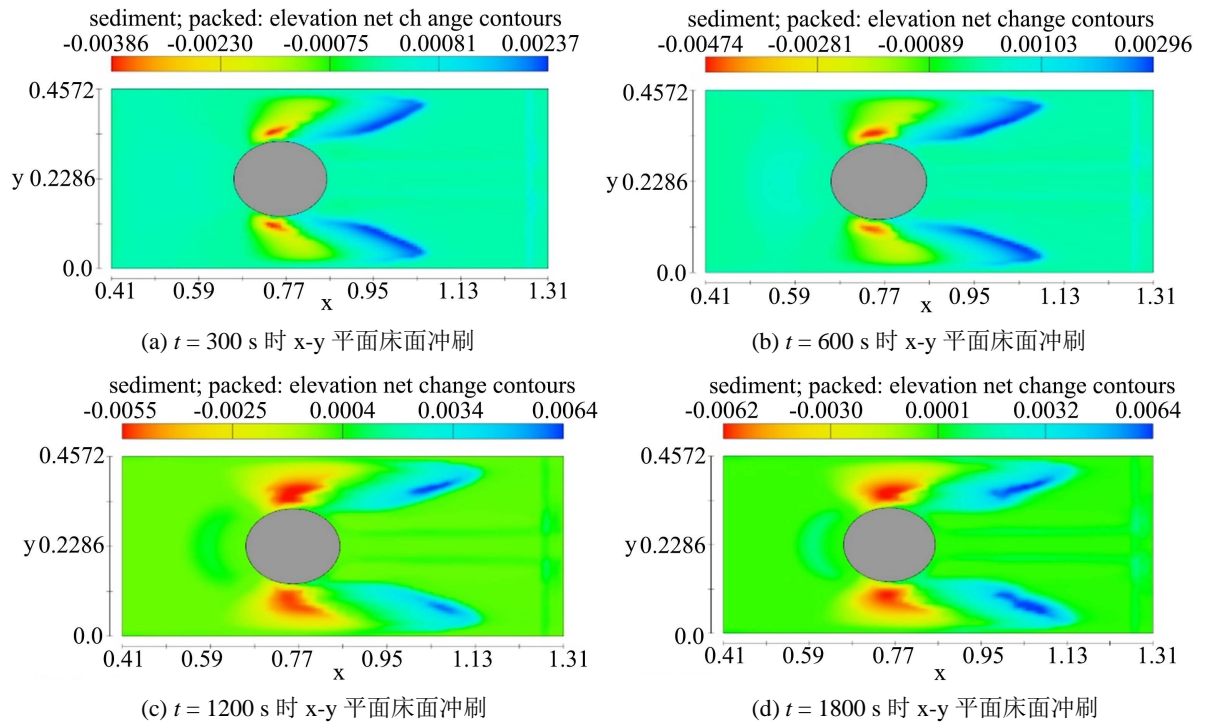


**Figure 12.** Schematic diagram of model layout and boundary conditions under protection condition  
**图 12.** 防护工况下模型布置及边界条件示意图

图 13 和图 14 详细展示了安装护套装置前后不同时刻下的河床泥沙冲淤状态变化。从图中可以看出，相较于验证水槽的结果，添加护套装置后墩柱冲刷坑形态和最大冲刷深度都发生了巨大的变化。流线形护套改变了桥墩迎水面形态，阻挡向下射流，改变其大小和方向迫使其向桥墩两侧分流，大幅减小了向下射流对桥墩基础的冲刷能量。添加护套装置后，桥墩前方几乎没有泥沙起动。在无防护条件下，水流撞击桥墩后形成强劲的下射流对墩底进行淘刷，墩前泥沙被卷起后河床坡度发生变化，墩前泥沙更容易起动，因此冲刷坑范围会向来流方向延伸一定距离；而添加该装置后，向下射流被阻挡削弱并牵引向桥墩四周，向墩前转移的水流被来流完全抵消，桥墩迎水侧未发生冲刷；被挤压至两侧的水流对河床进行了一定程度的淘刷，但由于水流能量已被大幅削弱，只在两侧形成了冲刷深度很小的片状冲刷坑；在护套两侧冲刷坑后方，形成了与无防护工况类似的较大面积的沙丘拖尾，但由于冲刷程度较小，水流中的泥沙含量较低，沙丘的高度和面积均远小于无防护工况。



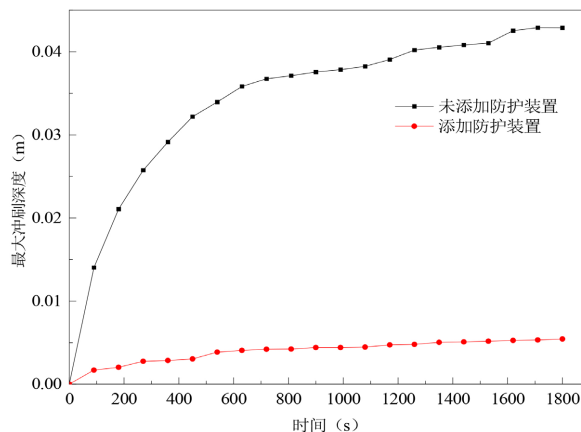
**Figure 13.** Scouring of x-y plane bed at different moments of unprotected condition  
**图 13.** 无防护工况不同时刻下 x-y 平面床面冲刷



**Figure 14.** Scouring of x-y plane bed at different moments of protection condition  
**图 14.** 防护工况不同时刻下 x-y 平面床面冲刷

无防护状态下最大冲刷深度位置在桥墩侧前方距离桥墩很小距离的位置，添加防护装置后最大冲刷深度位置相应的移到了护套侧前方距离护套边缘很小距离的位置，其可能的原因是水流在墩柱两侧绕流时在壁面形成了边界层区域。水的粘性很小，在大雷诺数条件下与桥墩接触并发生相对运动，靠近桥墩的细薄流层受粘性剪应力影响粘附在桥墩表面形成边界层，外侧的水流则被挤压流速增快，从桥墩表面向外水流速度迅速增大至外侧的绕流速度，相应的最大冲刷深度也发生在该区域。

图 15 给出最大冲刷深度时程曲线对比图。可以看出，护套装置能够大幅降低最大冲刷深度，添加护套后最大冲刷深度仅为无防护情况下的 13%，能起到很好的防护效果；添加护套后，在  $t = 550$  s 左右最大冲刷深度位置就已经达到冲刷平衡状态，冲刷状态较无防护工况有很大改善。



**Figure 15.** Time history curve of maximum scour depth before and after protection  
**图 15.** 防护前后最大冲刷深度时程曲线

## 5. 结论

本文以 Melville 等的经典水槽试验为基础, 基于 Flow-3D 软件, 采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型, 建立了圆柱形桥墩局部冲刷防护数值模型, 分析了护套对圆柱形桥墩局部冲刷防护的效果, 得到了以下结论:

- 1) 最大冲刷坑深度在冲刷前期迅速增大, 在后期增速逐渐趋于平缓, 最终稳定状态下冲刷深度达到 4.25 cm。
- 2) 护套装置能够大幅降低最大冲刷深度, 最大冲刷深度仅为无防护情况的 13%。
- 3) 安装护套装置后, 河床冲刷形态较无防护时发生了较大变化, 桥墩迎水侧未发生冲刷, 最大冲刷深度位置位于护套侧前方距离护套边缘很小距离的位置。
- 4) 在护套两侧冲刷坑后方, 形成了与无防护工况类似的较大面积的沙丘拖尾, 但由于冲刷程度较小, 水流中的泥沙含量较低, 沙丘的高度和面积均远小于无防护工况。

## 参考文献

- [1] Olsen, N.R.B. and Skoglund, M. (1994) Three-Dimensional Numerical Modeling of Water and Sediment Flow in a Sand Trap. *Journal of Hydraulic Research*, 6, 833-844. <https://doi.org/10.1080/00221689409498693>
- [2] 熊文, 姚浩, 等. 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] 喻鹏, 祝志文. 串列双圆柱桥墩局部冲刷精细化模拟[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(1): 107-116.
- [4] 张曙光, 尹进步, 张根广. 基于 Flow-3D 的圆柱形桥墩局部冲刷大涡模拟[J]. *泥沙研究*, 2020, 45(1): 67-73.
- [5] 王炎, 杨蝶俪, 叶楠, 等. 装配式桥墩防冲刷装置三维数值模拟[J]. *低温建筑技术*, 2019, 41(11): 72-75, 84.
- [6] 黄永江, 牟献友, 白佳乐. 环翼式桥墩挡板最佳安装位置数值模拟[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(3): 101-106.
- [7] 陈艳梅, 牟献友, 成兰艳, 等. 环翼式桥墩最优挡板形状试验[J]. *水利水电科技进展*, 2014(3): 24-29.
- [8] 成兰艳, 郝拉柱, 牟献友, 等. 环翼式桥墩环翼式挡板最佳延伸长度试验[J]. *水利水电科技进展*, 2013(2): 32-36.
- [9] Nazari-Sharabian, M., Nazari-Sharabian, A., Karakouzian, M., et al. (2020) Sacrificial Piles as Scour Countermeasures in River Bridges: A Numerical Study Using FLOW-3D. *Civil Engineering Journal*, 6, 1091-1103. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091531>
- [10] Aly, A.M. and Dougherty, E. (2021) Bridge Pier Geometry Effects on Local Scour Potential: A Comparative Study. *Ocean Engineering*, 234, Article ID: 109326. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109326>
- [11] Kassem, H., El-Masry, A.A. and Diab, R. (2023) Influence of Collar's Shape on Scour Hole Geometry at Circular Pier. *Ocean Engineering*, 287, Article ID: 115791. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115791>
- [12] Tang, Z., Melville, B., Shamseldin, A.Y., et al. (2024) Experimental Study of Bed Solidification as a Local Scour Countermeasure for Offshore Wind Turbine Monopile Foundations. *Ocean Engineering*, 299, Article ID: 117369. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117369>
- [13] Melville, B.W. and Raudkivi, A.J. (1977) Flow Characteristics in Local Scour at Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15, 373-380. <https://doi.org/10.1080/00221687709499641>
- [14] Soulsby, R. (1997) *Dynamics of Marine Sand*. Thomas Telford Publications, London.
- [15] Mastbergen, D.R. and Van Den Berg, J.H. (2003) Breaching in Fine Sands and the Generation of Sustained Turbidity Currents in Submarine Canyons. *Sedimentology*, 50, 625-637. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00554.x>
- [16] 王飞, 张彬, 齐剑峰. 桥墩局部冲刷发展过程的三维动网格模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(2): 132-137.