

淹没桥面板周围水流与局部冲刷的 CFD 数值模拟

张远

长江大学水利与环境学院, 荆州 434025, 湖北, 中国

摘要: 本文采用基于水平集方法的多相水动力—泥沙动力数值模型 REEF3D, 模拟淹没桥面板周围的水流条件与局部冲刷。水跃、桥面漫顶、承压射流及由此引起的冲刷, 使所选算例从数值模拟角度极具挑战性。模型以试验资料加以验证, 并考察了淹没比对水流与冲刷的影响。结果表明, 水平集方法在处理复杂自由表面以及追踪可动床面方面均表现出良好的稳健性与精度; 淹没比与冲淤型态之间未见明确的相关关系。由于数值模拟能够揭示其中的水动力过程, 本文强调了数值模拟对此类复杂泥沙输移问题的重要意义。

关键词: CFD 数值模拟; 自由表面流; 承压冲刷; RANS 模型; 泥沙输移; 淹没桥梁

CFD Modeling of Flow and Local Scour Around Submerged Bridge Decks

Yuan Zhang

College of Hydraulic and Environmental Sciences, Yangtze University, Jingzhou 434025, Hubei, China

Abstract: The level set method-based, multiphase hydro- and morphodynamic numerical model REEF3D is used for the simulation of the flow conditions and local scouring around submerged bridge decks. Presence of hydraulic jumps, bridge overtopping, pressurized jets and the resulting scouring make the selected test cases especially challenging from the numerical modelling point of view. The models are validated against experimental data. The influence of the submergence ratio on the prevailing flow and scouring is investigated. The level set method showed robustness and good accuracy for the treatment of the complex free surface as well as for the tracking of the mobile bed. The submergence ratio showed no clear correlation with the prevailing erosion/deposition patterns. As the simulations offered insights into the prevailing hydrodynamics, the relevance of numerical modelling was emphasized for such complex sediment transport problems.

Keywords: CFD modeling; Free surface flow; Pressure scour; RANS model; Sediment transport; Submerged bridge

一、引言

受全球气候变化影响, 山洪等极端水文事件的发生日益频繁[1]。流量增大意味着水位升高、洪水风险加大, 随之而来的更高流速则使河床与水工建筑物承受更大的作用力。作用力增大会间接(极端情况下甚至直接)危及桥梁稳定, 成为土木工程界长期面临的设计与研究难题。桥梁失事的主要原因之一是支承结构周围形成冲刷

坑[2]。冲刷坑在一般水流条件下会随时间持续发展；而洪水事件往往对河床形态、尤其是此类结构附近的河床形态产生重大影响[3]。

出于合理的经济考虑，中小桥梁通常按抵御百年一遇洪水设计。与之相关的中小河流（集水面积较小）比大流域河流更易遭受历时短促的极端（山洪）洪水。在此类事件中，水位甚至可能到达桥面板，引起强烈的力学、水动力与泥沙动力响应。考虑到目前尚无能够定量描述桥墩附近局部冲刷的最终公式，预测全部或部分淹没桥梁周围的泥沙动力变化就更非易事。洪水中被淹没的桥梁处于承压水流条件，这不仅使水力条件的预测更加困难，还可能造成更为严重的冲刷。随着来流水深增大，桥面板可能部分或完全淹没，洪水随之分别从桥下与桥上通过[4]。此时桥面板的作用类似宽顶堰，而桥梁结构造成的竖向收缩会使水流以更高流速指向河床，从而增大侵蚀潜力。

近几十年来，无漫顶情况下桥墩与桥台周围的水流与局部冲刷一直是研究热点[5-8]。桥梁附近的承压水流条件自 20 世纪 90 年代起也有研究，但文献数量明显较少。Abed 研究了承压水流条件下的桥墩冲刷，发现同一流量下承压条件的冲刷深度可达自由表面流的 2~10 倍。Jones 等在无桥墩的室内条件下进一步研究了该课题。Umbrell 等则通过室内试验与理论分析继续推进该研究，以更深入认识相关现象的机理，并提出了一个可解释其试验数据 81% 变异的公式。研究发现，决定承压水流冲刷深度（ $s_{\max}$ ）的变量为：来流水深（ H_0 ）、沿水深与时间平均的流速（ U_0 ）、桥面板总厚度（ D ，含梁）、桥梁净空高度（ h_b ）以及构成床面的泥沙的临界冲刷流速（图 1）。对这些变量作合理组合即得到 Umbrell 公式。Shen 等在补充物理模型试验的基础上进一步改进了该公式[9]。

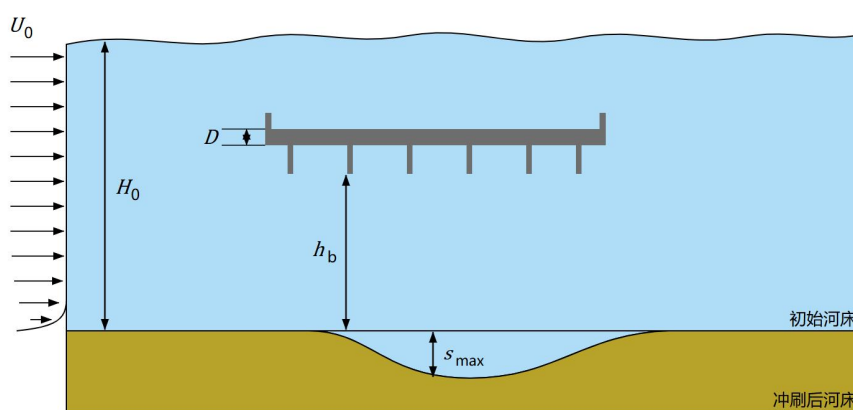


Figure 1 Schematic Sketch of the Studied Flow Problem

图 1 所研究水流问题的示意图。

Guo 等与 Guo 在室内条件下研究了漫顶淹没桥面板下清水冲刷的时间相关性，给出了预测冲刷剖面及其最大深度的机理解，发现最大冲刷发生在桥面板下游边缘附近。Hahn 和 Lyn 也研究了竖向收缩（即部分淹没桥面板）所致承压冲刷的时空演变，报告最大冲刷深度出现在收缩断面下游。Kumcu 的试验研究关注恒定与非恒定流条件下承压冲刷的差异，评估了冲刷深度与淤积高度及其位置随时间的演变。非恒定流条件这一问题至关重要，因为洪水期间过程线快速变化，实际条件下通常无法形成平衡冲刷剖面。不过，由于模型工况数量有限，研究显示最大冲刷深度（乃至平衡状态）的位置也可能出现在收缩段上游端。Malavasi 和 Guadagnini 通过室内试验研究了淹没桥面板上的水动力荷载，强调了自由表面流条件对拖曳力的重要影响。Martín-Vide 和 Prió 也开展了室内试验，研究拱桥在自由流与淹没流条件下的壅水效应与局部冲刷。

承压条件下的复杂流动型态很难用传统水力工程方法（即室内试验）预测或分析。现代计算流体力学（CFD）模型的迅速普及，也带动了水动力与泥沙动力问题的数值研究。最早报道桥墩周围局部冲刷三维雷诺平均 Navier-Stokes（RANS）模拟的是 Olsen 和 Melaen[7]，此后该方向的研究持续不断[5,8]。若桥墩或桥台未被淹没，采用较简单的自由表面处理甚至刚盖假定即可有效适用。但当流场中存在淹没障碍物时，常规（通常基于 σ 变换的）方法便不再适用，须采用先进的自由表面处理方法。Kara 等用带水平集方法（LSM）自由表面处理的大涡模拟（LES）求解器，对一种概化的淹没桥梁几何进行了物理与数值模拟，其模型与试验数据吻合良好；此外，LES 模型还揭示了流动条件的动态特性，并能识别相干湍流结构。虽然也有针对实际工况的 LES 桥梁冲刷预测实例，但如此大尺度的 LES 通常在计算上难以承受。

Tulimilli 等报道了用商业 CFD 软件 Star-CCM+、以单相刚盖方法进行的淹没桥面板下冲刷 RANS 模拟。虽然冲刷坑的形状与最大深度模拟得较好，但实测的桥面板下游淤积在计算结果中并未出现。Xie 也报告了 Star-CCM+ 及另一款商业 CFD 模型（FLOW-3D）在模拟淹没桥面板周围局部流动与局部冲刷时的不足。

本文旨在展示基于 LSM 的 CFD 模型在模拟淹没桥面板周围水流与局部冲刷方面的能力。采用雷诺平均方法——被视为求解实际问题在计算上可负担的途径——以揭示其针对这一特定问题在水沙动力方面的能力与局限。水动力模型与泥沙动力模型均以文献中的试验数据加以验证，并强调基于 LSM 的自由表面、泥沙输移与床面演变过程的重要性。最后考察桥面板淹没程度对水动力与泥沙动力条件的影响。

二、数值模拟

本文采用开源水动力框架 REEF3D 进行数值模拟。该模型此前已在一系列水力工程应用中得到成功验证，包括明渠自由表面流以及泥沙输移。

（一）控制方程

模型以守恒型有限差分求解不可压缩雷诺平均 Navier-Stokes（RANS）方程与连续方程：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + g_i \quad (2)$$

式中， u 为对时间 t 平均的流速； x 为空间坐标； ρ 为流体密度； p 为压强； ν 为运动黏度； ν_t 为湍流涡黏度； g 为重力加速度。下标 i 与 j 表示矢量的笛卡儿分量，含 j 的项按 $i=1\cdots 3$ 隐式求和。

压强采用投影法处理，由此得到的泊松方程用高性能求解库 HYPRE 提供的几何多重网格预处理 BiCGStab 求解器求解。

（二）自由表面处理

REEF3D 在模拟的多个环节中系统地使用水平集方法。除处理复杂自由表面外，LSM 还用于表示固体边界（障碍物几何）以及模拟可动床面。这些界面的位置由光滑符号距离函数 $\phi(x, t)$ 的零水平集表示。水平集函数给出到界面（ Γ ）的最短距离，并以正负号区分不同相。对于自由表面（气相与水相之间的界面），水平集函数可写为：

$$\phi(x, t) = \begin{cases} > 0, & \text{若 } x \in \text{相 1} \\ = 0, & \text{若 } x \in \Gamma \\ < 0, & \text{若 } x \in \text{相 2} \end{cases} \quad (3)$$

LSM 与鬼单元浸入边界法的结合使用，使得可以采用计算效率高的静态（无需重划分网格）结构化正交计算网格。

(三) 湍流模型

湍流脉动的影响按 Boussinesq 假定以涡黏度表示。湍流封闭采用 Wilcox 提出的标准 $k-\omega$ 模型, 即在控制方程之外补充湍动能 (TKE, k) 及其比耗散率 (ω) 的输运方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta_k k \omega \quad (4)$$

以及

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\omega}{k} \alpha P_k - \beta \omega^2 \quad (5)$$

式中, P_k 为湍流生成率, 各系数取值为 $\alpha = 5/9$ 、 $\beta_k = 9/100$ 、 $\beta = 3/40$ 、 $\sigma_k = \sigma_\omega = 2$ 。自由表面附近因流体物性梯度过大而导致的湍流虚假过量生成, 用 Kamath 等提出的自由表面湍流阻尼加以抑制。

(四) 离散格式

RANS 方程的对流项采用 Liu 等的加权基本无振荡 (WENO) 格式离散 (最低三阶、最高可达五阶精度), 兼具高精度与良好的数值稳定性。水平集函数、湍动能与比耗散率则采用 WENO 格式的 Hamilton-Jacobi 形式处理。控制方程的时间推进采用三阶总变差不增 Runge-Kutta 格式。

计算效率通过基于 Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 判据的自适应时间步长以及区域分解并行化实现。计算域相邻部分通过鬼单元通信, 其数据交换由消息传递接口 (MPI) 处理。

(五) 泥沙输移

床面剪应力 (BSS) 基于近底湍流生成与耗散相平衡的假定计算。因此, BSS (τ_b) 与近底湍动能的关系为:

$$\tau_b = \sqrt{C_\mu} \rho k \quad (6)$$

式中 $C_\mu = 0.09$ 。

推移质输沙率 (q_b) 按 Shields 半经验方法、以临界床面剪应力 (τ_c) 计入:

$$\tau_c = \tau_c^* (\rho_s - \rho) g d \quad (7)$$

式中, τ_c^* 为无量纲 Shields 数, ρ_s 为泥沙密度, d 为泥沙特征粒径。临界剪应力的计算计入了局部泥沙床面的纵、横向坡度, 采用 Dey 的显式表达式。推移质输沙率按 van Rijn 提出的公式计算:

$$\frac{q_b}{d^{1.5} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho) g}{\rho}}} = 0.053 \frac{\left[\frac{\tau_b - \tau_c}{\tau_c} \right]^{2.1}}{d^{0.3} \left[\frac{(\rho_s - \rho) g}{\rho v^2} \right]^{0.1}} \quad (8)$$

可动床面的地形用另一个水平集函数在数值上表示, 因此床面高程变化时无需 (计算代价高昂的) 重新划分网格。床面形态由第二个水平集函数表示, 其运动由各单元的泥沙质量平衡给出, 即 Exner 方程。

本文采用了沙滑算法, 其作用是限制床面剪应力的降低。当某单元开始侵蚀时, 床面局部倾斜, 导致临界床面剪应力降低, 从而引起进一步侵蚀, 如此循环。一旦床面坡度超过床沙的休止角, 就以迭代方式把泥沙体积重新分配到相邻单元, 从而调整该床面单元的坡度——当局部坡度达到休止角时迭代停止。在二维竖向模拟中, 这意味着把相邻两个床面单元修正 $\Delta h/6$, 其中 Δh 为相邻单元之间的高差。沙滑算法不仅是数值稳定所必需, 也代表了一个真实的物理过程。

为降低泥沙输移模拟的计算量, 本文采用解耦的时间步进方法: 推移质输移及由此引起的床面高程变化, 采用远大于水动力控制方程的时间步长。泥沙输移的时间步长同样依据床面高程变化速率 (时间导数) 按 CFL 判据自适应控制。每隔五个水动力时间步评估一次泥沙动力变化, 以使水流始终能适应床面高程的变化。

三、数值试验方案

(一) 漫顶水流通过桥面板

第一个算例以 Chu 等的试验为基础，主要目的是验证 RANS 模型并开展网格收敛性研究。原试验在长 1.10 m、宽 0.12 m 的循环式矩形平底水槽中进行，槽内放置一个矩形障碍物（概化桥面板），长 $L = 0.03\text{ m}$ 、厚 $D = 0.01\text{ m}$ ，槽底至桥面板底面的距离 $h_b = 0.036\text{ m}$ 。试验通过控制尾水位使上游水深 ($H_0 = 0.056\text{ m}$) 保持恒定。时均、垂线平均的入流流速为 $U_0 = 0.43\text{ m/s}$ ，即单宽流量 $q = 3.58\text{ m}^2/\text{s}$ 的水流趋近桥面板 ($Fr = 0.58$ ； $Re = 4300$)。试验以 0.1 mm 的分辨率量测了纵向自由水面剖面。

考虑到该流动问题的横向对称性，采用竖向切片 (2DV) 建模方法，从而实现快速、计算量可负担的模拟。计算域长 $0.75\text{ m} \times$ 高 $0.11\text{ m} \times$ 宽 1 个单元 (图 2)，由均匀六面体单元构成。为寻求最优计算网格，开展了网格收敛性研究，采用四种合理的网格步长 (Δx)，自 $\Delta x = 2.00\text{ mm}$ 至 $\Delta x = 0.625\text{ mm}$ (表 1)。计算并在网格敏感性分析中使用了相对网格分辨率 (定义为 $H_0/\Delta x$)，最终给出正确求解该流动问题所需的沿来流水深方向的单元数。

Table 1 Computational Mesh Parameters in the Grid Convergence Analysis Used for the Hydrodynamic Case Study

表 1 水动力算例网格收敛性分析所用的计算网格参数。

方案	$\Delta x\text{ [mm]}$	Ncells [-]	$H_0/\Delta x\text{ [-]}$
G1	2.000	20 625	28.0
G2	1.250	52 800	44.8
G3*	1.000	82 500	56.0
G4	0.625	211 200	89.6

注：带星号 (*) 者为参考方案；Ncells 为一次模拟所用计算单元总数。

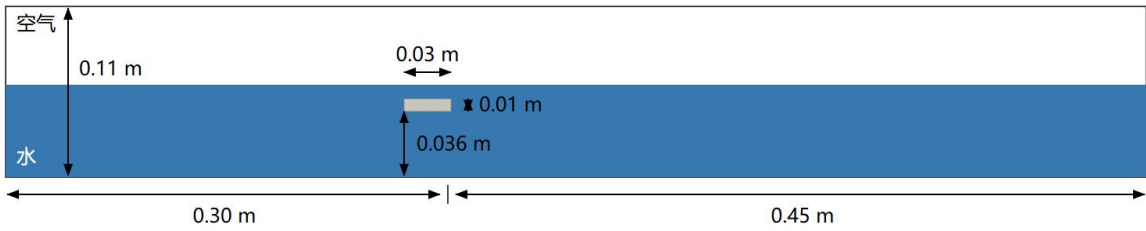


Figure 2 Dimensions of the Computational Domain and the Initial Water Level for the Hydrodynamic Case Study

图 2 水动力算例计算域的尺寸与初始水位。水流方向自左向右。

入口边界给定 Dirichlet 型边界条件，即恒定的入流流量；入口处的水面作为水动力解的一部分自由发展。给定流量按对数流速剖面假定沿水柱分布。侧壁与计算域顶面定义为对称面，底面定义为无滑移壁面边界。出口水位以零梯度 (Neumann 型) 边界条件固定。模拟运行至收敛，随后将所得自由水面剖面与试验数据比较。

(二) 淹没桥面板下的局部冲刷

第二个算例以 Guo 的试验为基础，重点验证泥沙动力模型。原试验在一个较大水槽的收缩段内进行，试验段长 $3.00\text{ m} \times$ 高 $0.55\text{ m} \times$ 宽 0.64 m ，槽内放置一块六梁桥面板 ($L = 0.26\text{ m}$ ，图 3b)。初始泥沙床面至桥面板最低点的距离 $h_b = 0.135\text{ m}$ 。试验通过控制尾水位使上游水深 ($H_0 = 0.25\text{ m}$) 保持恒定。平均入流流速 U_0

$= 0.485 \text{ m/s}$ ，即单宽流量 $q = 0.121 \text{ m}^2/\text{s}$ 的水流趋近障碍物 ($Fr = 0.31$; $Re = 66700$)。可动床面由级配良好 ($\sigma_g = 1.35$ ，其中 $\sigma_g = D_{84}/D_{16}$ ， D_{84} 与 D_{16} 分别为粒径级配的 84% 与 16% 分位) 的极细砂构成，中值粒径 $d = d_{50} = 2.18 \text{ mm}$ 。冲刷剖面用激光测距传感器量测 (精度 $\pm 0.2 \text{ mm}$)。

与前一算例类似，该流动问题横向对称，可采用 2DV 方法。Guo 等的报告也支持这一假定，他们指出试验条件——尤其是发展中的冲刷——基本上是二维的。计算域长 $2.50 \text{ m} \times$ 高 $0.6 \text{ m} \times$ 宽 1 个单元 (图 3a)，域内最下方 10 cm 为可冲刷泥沙床面。

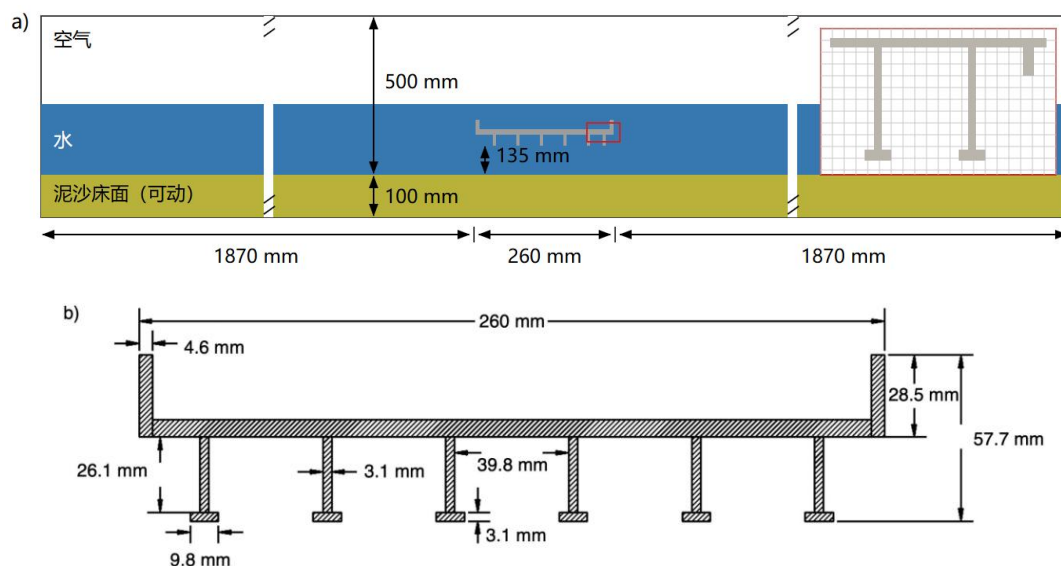


Figure 3 (a) Numerical Setup for the Morphodynamic Case Study and Detail of the Computational Mesh Near the Bridge Geometry; (b) Geometry of the Six-Girder Bridge Deck

图 3 (a) 泥沙动力算例的数值布置及桥梁几何附近计算网格的局部放大; (b) 六梁桥面板的几何尺寸。水流方向自左向右。

由于缺乏试验水力资料，本算例的水动力模型无法直接验证。为保证结果的可靠性，计算网格分辨率依据前一算例网格收敛性研究的结论选取，取 $\Delta x = 4.0 \text{ mm}$ ，对应相对网格分辨率 $H_0/\Delta x = 62.5$ 。

边界条件的定义方式与前一算例相同。先计算水动力模拟至收敛，然后才启动泥沙输移模块并运行 42 h (Guo 试验中达到准平衡条件所需的时间)。定常 (固定床) 模拟约需 0.5 h，可动床工况约需 10 h 的 CPU 时间 (10 核 Apple M1 Pro 个人笔记本电脑)。

(三) 淹没比的影响

在水动力与泥沙动力模型均得到验证之后，通过数值试验考察淹没比 (h^*) 对水流条件与冲刷的影响。淹没比定义为自水面至桥面板底面的水深与桥面板竖向厚度之比：

$$h^* = \frac{H_0 - h_b}{D} \quad (9)$$

模拟以泥沙动力算例为基础，仅改变上游水位以形成不同的漫顶情形。模拟仍分两步进行：i) 先在固定床条件下把水动力模型算至定常状态 (工况 $H_1 \sim H_3$)；ii) 再以其结果作为泥沙动力模拟 ($S1 \sim S3$) 的初始条件。最主要的参数以及若干描述流动条件的指标汇总于表 2。

Table 2 Relevant Parameters of the Numerical Experiments with Different Levels of Submergence

表 2 不同淹没程度数值试验的主要参数。

工况	U_0 [m/s]	H_0 [m]	h^* [-]	淹没状态	漫顶情况	床面
H1	0.485	0.25	2.00	完全淹没	漫顶，伴有波状水跃	固定
S1*						可动
H2	0.485	0.21	1.30	完全淹没	漫顶，伴有淹没水跃	固定
S2						可动
H3	0.485	0.17	0.61	部分淹没	无漫顶	固定
S3						可动

注：带星号（*）者为验证泥沙动力模型所用的方案。

四、结果

数值模拟结果按以下顺序给出：i) 依据 Chu 等的试验数据验证水动力模型；ii) 依据 Guo 的数据验证泥沙动力模型；iii) 考察淹没比对水力与泥沙动力行为的影响。

作为水动力验证的第一步，图 4 给出实测与模拟流动条件的定性对比。可以看出，数值模型抓住了流动的总特征。考虑到 RANS 解固有的局限，水跃位置的预测是准确的，而桥面板下游侧水位的显著跌落则被抹平，这同时也导致桥面板上方水位被高估。RANS 模型在流线曲率显著、体积力效应明显的复杂流动中出现此类偏差，Lee 等已有报道。

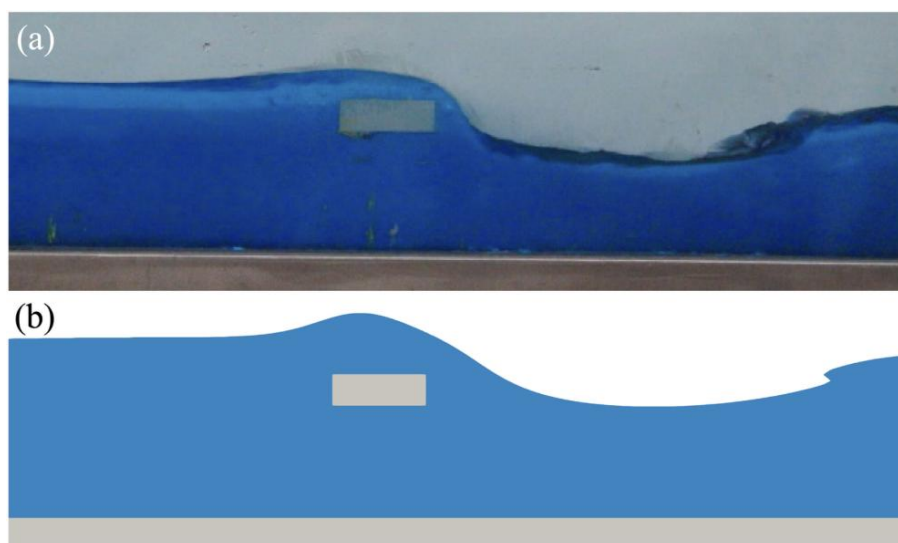


Figure 4 Qualitative Comparison of the Experimental Conditions and Time-Averaged Numerical Model (G3) Result

图 4 试验条件与时均数值模型（G3）结果的定性对比。

模型验证与网格收敛性研究基于实测与模拟纵向自由水面剖面的比较（图 5a）。为便于对照，图中还给出原文的 LES 结果。可以看出，即使分辨率最低的方案（G1）也再现了该流动问题的总特征。次粗的方案（G2）预测的水跃位置更靠近桥面板。G1 对上游水深以及水跃处水位的高估最为明显。在桥面板与水跃之间（ $x = 0.34 \sim 0.39$ m），G1 与 G2 表现最差；值得注意的是，该段水位在文献的 LES 结果中同样被高估。虽然桥面板附近的高水面梯度由 LES 抓得明显更好，但分辨率更细的 RANS 解（G3、G4）在水跃上游端（ $x = 0.35 \sim 0.40$ m）给出的结果略优。G3 与 G4 对水跃位置及相应水位的再现也都很好。

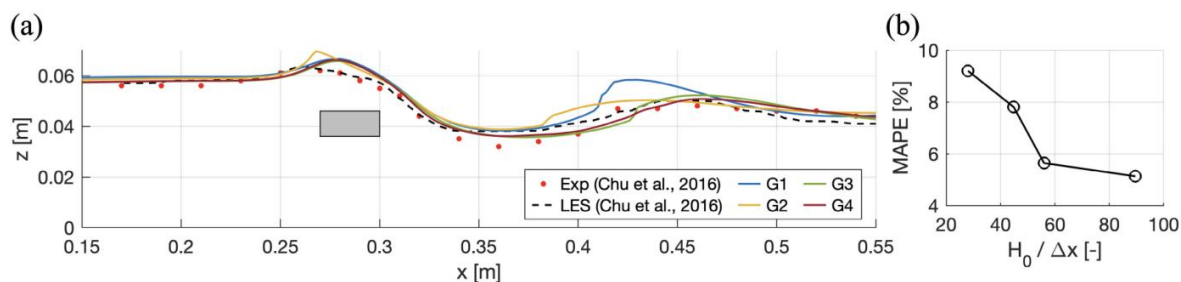


Figure 5 Verification of the Hydrodynamic Model and the Results of the Grid Convergence Study

图 5 水动力模型的验证与网格收敛性研究结果。

四种方案的精度以平均绝对百分比误差衡量：

$$\text{MAPE} = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{m_i - s_i}{m_i} \right|$$

式中， m_i 与 s_i 分别为 n 个测点处的实测与模拟水位值。结果按相对（无量纲）网格分辨率 $H_0/\Delta x$ 加以解释（图 5b）。在 $H_0/\Delta x = 28 \sim 56$ （G1~G3）之间精度迅速提高，随后在两种较高分辨率方案（G3、G4）之间收敛趋缓。综合自由水面剖面的比较与网格收敛性可以认为，相对单元尺寸 $H_0/\Delta x = 60$ （即沿上游水深布置 60 个计算单元）足以求解淹没桥面板周围的流动问题。

在模型得到验证之后，依据模拟结果评估参考方案（G3）的流动条件（图 6）。淹没射流及由此引起的近底湍动能增大，意味着存在局部侵蚀与承压冲刷发展的可能。最高流速与近底湍动能出现在水跃上游水位跌落段的下方。桥面板附近的分离使局部流速最高达 0.80 m/s，最大湍动能也出现在该区域。

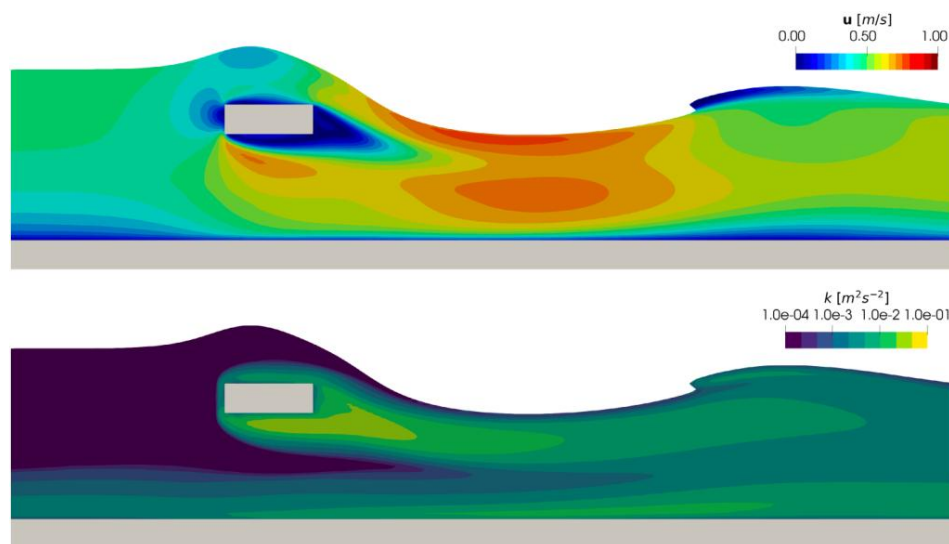


Figure 6 Modeled Distribution of Time-Averaged Velocity Magnitude (Top) and the Turbulent Kinetic Energy (Bottom) with a Logarithmic Colormap

图 6 模拟所得时均流速大小（上）与湍动能（下，对数色标）的分布。仅示出计算域的相关区段。

水动力模型验证之后，研究重点转向局部冲刷。本文用 Guo 的试验数据验证泥沙动力模型。由于该组试验缺乏水动力对照资料，网格分辨率是否充分依据前一算例的结论作出假定（两个算例的几何形式总体相似）。泥沙动力模拟采用相对网格分辨率 $H_0/\Delta x = 62.5$ （ $\Delta x = 4.0$ mm）。

泥沙输移开始之前以及达到平衡冲刷之后的流动条件见图 7。与前一算例相比，桥面板下方的淹没射流更为强烈。较高的尾水位也改变了流动的总性质：两种情形下均观测到驻波。冲刷过程中水流缓慢重新调整，使桥面板上、下方的流速均有所衰减。虽然流速明显减小，但流动的总特征得以保持——平衡冲刷条件下仍可观测到淹没射流与驻波。

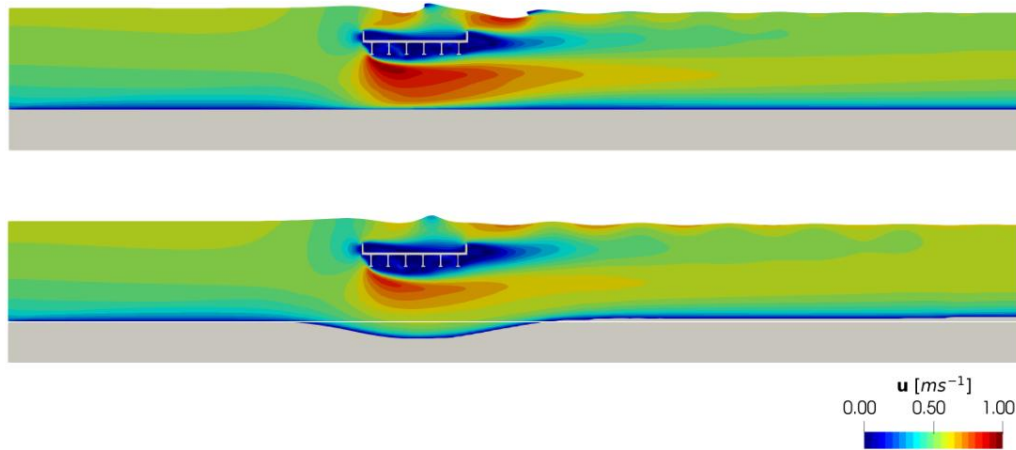


Figure 7 Velocity Magnitude Distribution Before (Top) and After 42 Hours of Sediment Transport Time (Bottom)

图 7 泥沙输移历时 42 h 之前（上）与之后（下）的流速大小分布。

实测与模拟平衡冲刷剖面的比较显示出合理的一致性。冲刷剖面的总体形状以及侵蚀段与淤积段沿 x 方向的起点均被数值模型准确再现。最大冲刷深度的位置（以及冲刷坑本身的大部分）略向上游偏移。虽然最大淤积高度被低估，但泥沙动力问题的总性质得到了恰当刻画。

计算所得冲刷剖面的总体形状表明，模型能够分辨其中的水流与泥沙输移过程。然而，最大冲刷深度（ $s_{\max}$ ）随时间的发展存在明显偏差：虽然预测的平衡冲刷深度准确，但数值模拟的冲刷过程本身更为剧烈。与试验观测到的约 36~42 h 达到形态平衡不同，模拟中最大深度约 5 h 即已达到。

图 8 考察了淹没比对泥沙动力模拟前（H1~H3）与模拟后（S1~S3）流速分布的影响。各工况的总体流态相当相似，淹没程度的不同主要影响漫顶水流。图 9 中，H1 与 S1（ $h^* = 2.00$ ）为泥沙动力验证工况，其流动条件前文已作讨论。 $h^* = 1.30$ 时，结构上方水位明显降低——出现局部驻波。桥面板末端的作用类似堰，水流自此跌入主流形成淹没水跃。结构下方射流的型态与 H1 方案十分相似。桥面板下游，水跃之后的表层水流明显更慢，而射流则以更高流速延伸更远。达到平衡冲刷剖面后，桥面板上方及其紧邻区域基本成为死水区，水跃强度减弱，因而有更多水量在承压区内流动。虽然桥面板下方的流速分布与 S1 十分相似，但流量分配的这一变化使冲刷坑被拉长。在上游水位最低的情形（H3、S3）下不发生漫顶，但桥下水流仍为承压。此时收缩段中发展的射流最弱，预示冲刷较为温和，实际结果也确实如此。

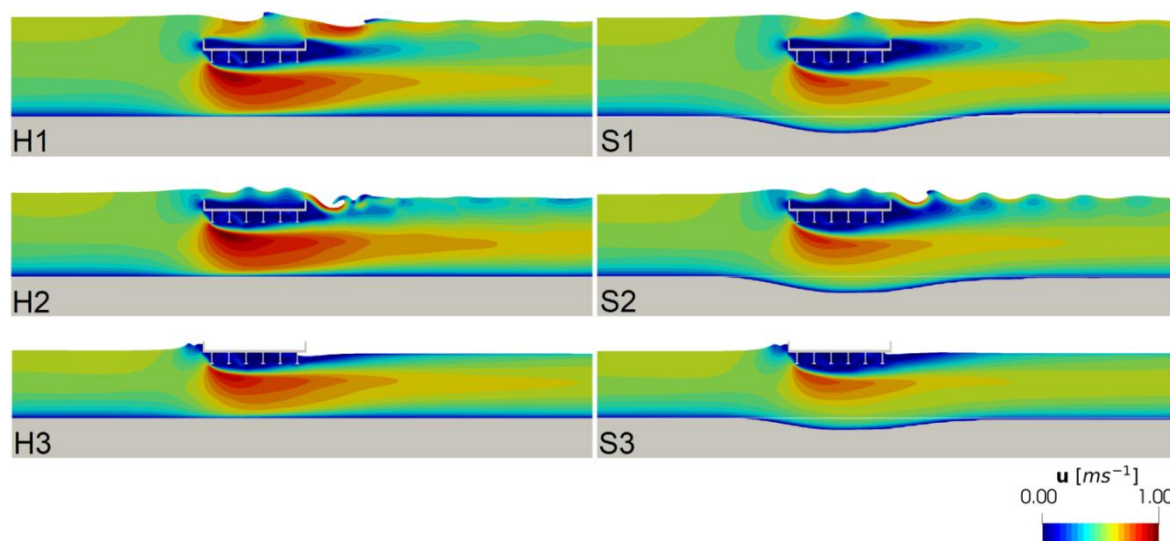


Figure 8 Velocity Magnitude Distributions Before (H1-H3, Left Column) and After 42 Hours of Sediment Transport Time (S1-S3, Right Column) in Case of Different Levels of Submergence

图 8 不同淹没程度下泥沙输移历时 42 h 之前 (H1~H3, 左列) 与之后 (S1~S3, 右列) 的流速大小分布。仅示出计算域的一段。

尽管平衡冲刷深度 ($0.03 \sim 0.04$ m) 相对于上游水深 ($H_0 = 0.17 \sim 0.25$ m)、尤其相对于桥下净空 ($h_b = 0.135$ m) 而言并不算小, 但冲刷过程并未改变流动的总性质与漫顶型式。还值得一提的是, 无论初始淹没比如何, 达到平衡冲刷后桥面板下方的流速分布都表现出十分相似的性质。

考虑到流速场中存在很高的空间梯度 (图 8), 可以预期湍流条件相当强烈。六个模拟方案的湍动能空间分布见图 9。湍动能既是解读 RANS 结果、把握湍流脉动特性的关键, 又通过线性关系 (式 (6)) 决定水流的泥沙侵蚀潜力 (即床面剪应力)。固定床模拟在上半部水层的湍动能场之间差异明显。不出所料, 最高值出现在桥面板紧邻区域, 源于该处的强剪切。不同的漫顶型式 (或不发生漫顶) 在桥面板附近呈现出不同特征。对 H1/S1, 结构上、下方均出现高值, 并最终在桥下游汇合, 形成范围很大的高端动能区 ($k > 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$)。H2/S2 中虽有水跃发展, 但下游的湍动能射流主要源自桥面板下方的剪切。H3/S3 的数值最低, 说明最低的淹没比对应较为温和的剪切。

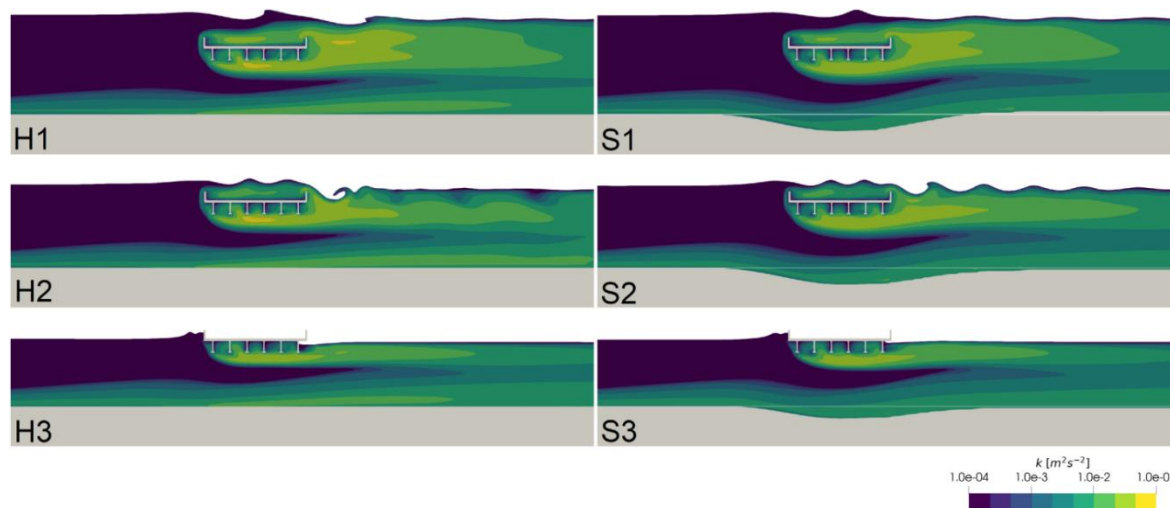


Figure 9 Turbulent Kinetic Energy Distributions Before (H1-H3, Left Column) and After 42 Hours of Sediment

Transport Time (S1-S3, Right Column) in Case of Different Submergence Ratios

图 9 不同淹没比下泥沙输移历时 42 h 之前 (H1~H3, 左列) 与之后 (S1~S3, 右列) 的湍动能分布。注意色标为对数刻度。仅示出计算域的一段。

另一方面, 就近底湍动能而言, 各固定床方案 (H1~H3) 呈现出十分相似的型态, 最大值均出现在结构下方。不过该高湍动能区 ($k > 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$) 的延展范围因方案而异: 湍动能射流最长者为 H2, 数值最温和者为无漫顶的 H3。还值得一提的是, 这一高强度近底湍动能射流的核心在桥面板下游脱离底部。来自桥面板上游侧 (源于壁面剪切) 的高近底湍流强度, 与上层水体中与障碍物相关的高湍动能区汇合, 使各工况在结构下游不远处均形成较为均匀的湍动能分布。

桥下冲刷的结果是湍动能分布发生局部重组 (S1~S3), 但上层水体的总体型态基本保持不变。近底区域则明显减弱, 由于湍动能与推移质输沙率之间的联系 (式 (6) 与式 (7)), 最终形成准平衡冲刷剖面; 前述脱离底部的湍动能射流最终消失。为详细考察冲刷发展所致侵蚀潜力的变化, 图 10 给出床面剪应力的纵向变化。结果显示, 在泥沙输移开始之前 (H1~H3), 近底湍动能射流对床面剪应力的影响延伸很长。初始剖面形状相似, 漫顶工况最高值可达 5 N/m^2 , H3 为 4 N/m^2 , 峰值出现在桥梁下游半侧。值得注意的是, 桥面板上、下游的床面剪应力均高于床沙的临界阈值。泥沙动力模拟之后, 水流重新调整, 床面剪应力降至临界阈值以下 (S1~S3)。尽管淹没比不同、初始 τ_b 值也有差异, 平衡后的床面剪应力剖面形状却差异很大。

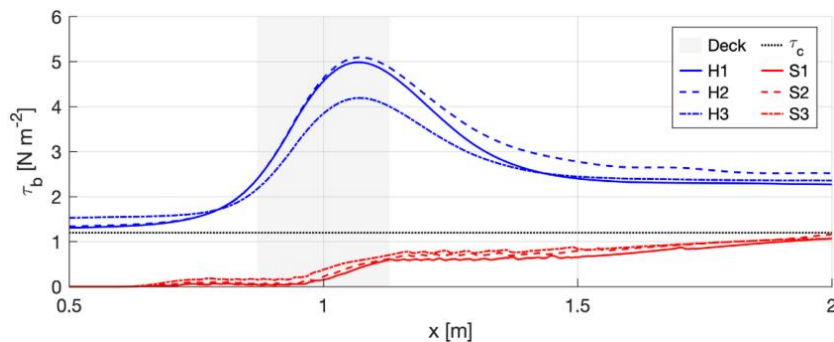


Figure 10 Longitudinal Variations of Final Bed Shear Stress Before (H1-H3, with Blue) and After the Morphodynamic Simulations (S1-S3, with Red)

图 10 泥沙动力模拟之前 (H1~H3, 蓝色) 与之后 (S1~S3, 红色) 床面剪应力的纵向变化。黑色点线为临界剪应力。

三个模型方案 (S1~S3) 最大冲刷深度随时间的演变以及冲刷坑最终剖面。一方面, 各剖面在总体形状上性质相似; 另一方面, 最大冲刷深度与淤积型态存在明显差异。S1 (用于模型验证的方案) 为前述 (图 8) 4.1 cm 的最大冲刷深度, 并在侵蚀区下游有相当规模的泥沙淤积 (0.9 cm)。就最大冲刷深度而言, 无漫顶工况 (S3) 明显较低 (3.0 cm), 而最深的冲刷坑出现在中等淹没比工况 (S2)。与 S1 不同, S2 与 S3 未出现泥沙淤积, 而是底部侵蚀延续得更长。

就时间演变而言, 各工况型态十分相似。所有工况在 $t = 1 \sim 2 \text{ h}$ 前后的时间序列中都出现一个短暂平台, 此时侵蚀速率暂时降低。该时段以 S2 最短 (约 1.5 h)、S1 最长 (约 2.5 h)。此后冲刷坑相对较快地 (5 h) 达到最大值, 随后仅有轻微变化。

依据模型结果, 淹没比与最大冲刷深度之间未见规律性联系。仅 S1 出现局部泥沙淤积, 而最深冲刷发生

在 S2。就时间特性而言,各工况表现十分相似,最大冲刷深度均在 5 h 后形成。

五、讨论

近几十年来,CFD 数值模拟在理解和解决复杂的(与水流和泥沙输移相关的)水力工程问题方面的潜力迅速提升。此类工具的新近发展鼓励研究者通过数值模拟考察愈益复杂的流动问题与现象。先进的 CFD 模型能够揭示以往至多只能通过昂贵、耗时的试验(室内)分析获取的水动力与泥沙动力特征。当然,物理模型也存在若干不足,例如尺度效应或试验设备本身的局限。

本文采用基于 LSM 的数值模型(REEF3D)研究淹没桥面板下的水动力条件与局部冲刷。水动力模型与泥沙动力模型分别以文献中的试验数据独立验证。所采用的雷诺平均湍流模拟被证明适用于处理其中的水流与冲刷问题。经验证的模型随后用于分析不同淹没程度下的水动力与泥沙动力响应。淹没比与相应冲刷之间未见系统性规律。作者指出,其他变量(如泥沙组成、床面坡度、流量)的影响今后也值得详细研究。本文的数值结果凸显了来流水深不同时淹没桥面板在水动力与泥沙动力行为上的差异,也总体上凸显了 CFD 数值模拟在此类分析中的意义。

就桥梁而言,水力工程界研究最多的结构构件是桥墩。近几十年来,其水动力条件(水流、湍流、相干结构等)在试验与数值两方面均得到深入研究。由于不存在漫顶,桥墩问题在自由表面处理方面要简单得多——基于 sigma 网格或其他更简单的单相方法通常即可合理适用[5]。在低弗劳德数($Fr < 0.2$)情形下,甚至可以有效采用刚盖方法。值得注意的是,在极端水流和/或几何条件下,桥墩周围也可能出现超临界流与水跃,这就要求采用能在同一垂线上捕捉多个自由表面位置的先进自由表面处理方法(如水平集方法或流体体积法)。而淹没桥面板、漫顶及其复杂条件更是需要先进的自由表面追踪方法——这正是本文采用基于水平集方法的模型的原因。研究表明,LSM 方法在追踪自由表面位置与可动床面两方面都稳健而准确。

淹没桥面板冲刷的研究历史较长,可追溯至 20 世纪 90 年代,但该课题尚未被认为完全解决。即使较新的研究通常也仍借助室内试验来认识和描述其中的泥沙动力过程。试验水力学至今仍常被用来推导各类水力现象的预测公式(本例中为冲刷深度乃至其随时间的发展)。另一方面,物理模型受前述局限所限,通常难以对其中的水动力过程给出深入而全面的认识。虽然现代 CFD 数值模拟可对水沙动力条件作详细分析,此类工具在淹没桥梁方面却鲜有应用。Tulimilli 等曾以间接耦合的泥沙动力模型与刚盖方法,给出淹没桥面板下水流与局部冲刷的 CFD 模拟;尽管作了明显简化,其结果仍显示出 CFD 数值模拟的价值。

本文的结果旨在推进淹没桥梁的 CFD 分析,提供高分辨率水动力、先进的自由表面追踪以及直接耦合的泥沙动力过程。虽然在泥沙动力模块的验证中平衡冲刷剖面得到了合理再现,模型却难以再现冲刷随时间的发展。这并非个例——文献中不乏这样的例子:平衡冲刷剖面模拟准确,但就整个冲刷过程而言发展偏快或偏慢。总体而言,就桥墩情形已经发现,雷诺平均数值模型能较好再现冲刷的初始阶段,因为这一剧烈时段的主要驱动是局部增大的床面剪应力;而在后期阶段,负责泥沙输移的是 RANS 模型无法分辨的相干湍流结构。Kim 等表明,LES 确实能够更准确地分辨冲刷随时间的演变。虽然本文所研究的流动问题明显不同,但既然冲刷发展的初始阶段被较好再现,随后在时间演变上的偏差或许同样可以用未被分辨的相干结构来解释。考虑到最大承压冲刷深度的位置也随时间变化(近似呈对数关系),本文 RANS 模型在时间上的不准确,可能正是所预测冲刷剖面出现空间相位偏移的潜在原因。

本文采用标准 $k-\omega$ 湍流封闭并施加自由表面湍流阻尼。尽管湍流模型的发展方兴未艾, $k-\omega$ 仍被视为合理且计算经济的选择,在工程实践中应用广泛。水动力算例已指出此类 RANS 方法的固有局限。Lee 等也报告,

两方程 RANS 模型在再现流线曲率显著、体积力效应明显的复杂流动时可能力有不逮。将本文结果与试验数据以及 Chu 等的模拟结果相比较,可以看出更先进的 LES 并非全面占优:LES 在障碍物正上方表现更好,而本文所用的 RANS 方法对下游侧水面跌落的预测更佳。当然,由于大涡与相干结构未被直接分辨,其对冲刷坑随时间发展的贡献在本方法中同样被忽略。

尽管正确求解水动力条件在泥沙动力模拟中至关重要,可用推移质输沙公式本身的不确定性同样不容忽视。目前广泛使用的半经验公式有多种(Meyer-Peter 与 Müller、Einstein、Engelund 与 Fredsøe、Parker、van Rijn 等),这意味着对某一具体问题而言,连公式的选择本身都可视为一种率定。此外,泥沙输移模型及相关子程序(如临界剪应力折减、沙滑算法)的数值实现方式,也为额外的率定与调参留下了空间。临界 Shields 参数(为推移质起动提供明确阈值)同样举足轻重,其取值在文献中的范围也很宽(0.03~0.06)。据此可以推想,一次拟合完美的泥沙动力模拟,同时也是相关子程序、公式与参数恰当组合的结果。

此类承压条件下的水流与局部冲刷现象,对水力与海岸工程界而言并不新鲜。从实践角度看,热门课题管线冲刷与之颇为相似,但这类问题通常不涉及复杂的自由表面。本文所研究的各工况均假定障碍物宽度无限,故采用 2DV 建模方法。不过,Liang 等最近通过一个三维数值管线冲刷算例指出,障碍物宽度(即第三维尺寸)对冲刷有显著影响。此外,当需要在模拟中分辨相干湍流结构时,完全三维的方法也是不可回避的。

六、结论

本文采用基于水平集方法的 CFD 模型(REEF3D)模拟淹没桥面板周围复杂的水动力与泥沙动力过程,并通过文献中的两个算例把模拟结果与试验数据相比较——所用 CFD 模型的水动力模块与泥沙输移模块分别得到独立验证。

模拟揭示了不同来流水深情形下的水动力过程,显示出现代 CFD 数值模拟在此类复杂条件(复杂自由表面形态、水跃、承压水流)下的价值。结果表明,淹没比与相应侵蚀过程之间不存在明确关系,说明冲刷高度依具体情形而定,取决于当地流动条件的局部特征。

本文还结合结果与文献中的新近实例,讨论了相关不足与可能的改进途径。所采用的 2DV 方法与 RANS 湍流模拟,为求解实际工程问题提供了计算高效且精度合理的模拟手段。完全三维的 LES 方法可进一步提高精度(并深化对相关现象的总体认识),但代价是计算时间高出若干数量级。

参考文献

- [1] Kundzewicz Z W, Kanae S, Seneviratne S I, et al. Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, 59(1): 1-28.
- [2] Johnson P A, Ayyub B M. Assessing time-variant bridge reliability due to pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 118(6): 887-903.
- [3] 柳鑫. 气候变化下长江流域极端水文气象事件模拟及暴雨洪水风险预估研究. 武汉大学, 2025.
- [4] 刘青, 吴国凤, 姚前, 等. 气候变化下沿海城市极端复合洪涝灾害危险性预估. *热带地理*, 2025, 45(4): 527-539.
- [5] Deng L, Cai C S. Bridge scour: prediction, modeling, monitoring, and countermeasures: review. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2010, 15(2): 125-134.
- [6] 石一. 桥墩局部冲刷防护措施综述. *中国水运(下半月)*, 2023(5): 95-97.

- [7] Umbrell E R, Young G K, Stein S M, et al. Clear-water contraction scour under bridges in pressure flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 124(2): 236-240.
- [8] 熊文. 桥梁抗水: 桥梁冲刷水毁分析. 北京: 科学出版社, 2025.
- [9] 王路, 刘宏伟, 魏凯, 等. 跨河桥梁基础冲刷研究综述. *长江科学院院报*, 2025, 42(7): 94-103.