

用两种计算流体力学模型与物理验证模型研究横向坝坎块石缓坡的水力荷载

彭梦瑶

中南大学水利工程学院, 长沙 410083, 湖南, 中国

摘要: 横向坝坎块石缓坡 (crossbar block ramp) 可保持河床稳定并改善河流的生态连通性。确定其设计荷载时, 两大不确定性来源是其强烈的紊流流动与下游壅水影响。本文用 OpenFOAM 建立了整条横向坝坎块石缓坡的两个计算流体力学 (CFD) 模型, 通过记录单道坝坎上的荷载 (力与力矩) 来处理这两个问题。就湍流而言, 第一个模型采用雷诺平均 Navier-Stokes (RANS) 方法, 第二个模型采用大涡模拟 (LES)。两个模型的流动均为非定常, 并对自由表面加以追踪; 网格完全相同, 约 3030 万个单元, 分布在 480 个处理器核心上, 计算的采样时段为 180 s。CFD 模型以物理模型实测的水位与压力加以检验, 各模型比尺相同, 均为 1:20/3。每个模型均研究了代表三种典型流态的三级流量。结果表明, 各模型都再现了这三种流态的特征。RANS 模型最快可比 LES 快 5.3 倍, 但产生了过大的波浪, 很可能导致坝坎荷载被高估或低估。LES 模型与物理模型吻合良好, 可用于荷载预测; 不过若要获得统计上可靠的最大荷载估计, 还需更长的采样时段和更多级流量。两个模型都表明, 为找出临界荷载, 必须考虑尾流干扰流态中的非定常波浪。本文结果可为今后研究横向坝坎块石缓坡水力荷载的方法选择提供依据。

关键词: 横向坝坎块石缓坡; 流态; CFD; RANS; LES; 物理模型

Investigating Hydraulic Loads on a Crossbar Block Ramp Using Two Different Computational Fluid Dynamics Models and a Physical Validation Model

MengYao Peng

College of Hydraulic Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China

Abstract: Crossbar block ramps provide bed stability and facilitate ecological connectivity in rivers. Two major sources of uncertainty in determining their design loads are their massively turbulent flow and backwater influence. Here, they were addressed using two computational fluid dynamics (CFD) models (created with OpenFOAM) of a complete crossbar block ramp by recording loads (forces and moments) on single crossbars. To model turbulence, the first model used the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) approach, and the second model used Large Eddy Simulation (LES). The flow in both models was transient and the free surface was tracked. Their mesh was identical and consisted of about 30.3 million cells distributed on 480 processor cores. The computed sampling interval was 180 s. The CFD models were tested against measurements of water level and pressure from a physical model. All models were in the same scale, 1:20/3. Three discharges representing three typical flow regimes were studied in each model.

Copyright © 2026 by author(s) and Ufascience Publisher.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution international License (CC BY 4.0)
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



文章引用: 彭梦瑶. 用两种计算流体力学模型与物理验证模型研究横向坝坎块石缓坡的水力荷载[J]. 现代工程与应用, 2026, 4(4): 74-84.
DOI: <https://doi.org/10.61784/mea2043>

Characteristics of the flow regimes were reproduced in all models. The RANS model was up to 5.3 times faster, but produced excessive waves, which likely caused over- and underestimation of crossbar loads. The LES model showed good agreement to the physical model and could be used for load predictions. However, a longer sampling interval as well as a larger variety of discharges would be required to obtain stochastically reliable estimations for the maximum loads. Both models indicated that unsteady waves in the wake-interference flow regime must be considered to find critical loads. The results can support decisions on the methods for future investigations of hydraulic loads on crossbar block ramps.

Keywords: Crossbar block ramp; Flow regime; CFD; RANS; LES; Physical model

一、引言

阶梯—深潭（step-pool）构造是陡坡天然溪流中典型的河床形态[1-2]，其特征是一系列大致横贯主流方向的坎状构造，其间为潭状凹陷。仿照阶梯—深潭构造的人工建筑物被广泛用于保持河床稳定和改善生态连通性[3-6]，可用于自平原缓流河道至陡峻山溪的各类河流，名称不一，包括阶梯—深潭缓坡与横向坝坎块石缓坡[7-8]，本文采用后一名称。横向坝坎块石缓坡与台阶式溢洪道、台阶式跌水、方形横条与肋条以及排水渠中的横梁有若干相似之处，但在用途、陡度以及流态的出现方式等方面存在差异[9]。

横向坝坎块石缓坡上通常可辨识出三种流态[7-8]。本文按流量递增顺序分别称之为孤立粗糙流（流态 R1）、尾流干扰流（R2）与掠过流（R3）。由于流态过渡对条件的细微变化都很敏感，各项研究对其定义并不一致。定性而言，孤立粗糙流的特征是潭中出现不与下游坝坎发生相互作用的小驻波或水跃，输入的能量大部分在潭内耗散，使各潭与各坝坎处的水力条件相近。尾流干扰流的特征是自定常到强烈非定常的波浪，非定常波浪不断溃灭与重建，产生短暂或不完整的水跃并带入空气。掠过流的水位最高，且顺应平均河床坡度，主流在坝坎顶部之上通过；潭内形成定常涡结构，与主流之间的质量与动量交换很少。

造床水流可通过形成兼具最大水流阻力与最大河床稳定性的几何形态，使天然阶梯—深潭构造趋于稳定。据此有理由预期，几何形态与流态之间的相互作用对横向坝坎块石缓坡的稳定性同样至关重要。在近期的一项研究中，Sindelar 和 Smart 在物理模型中量测了块石缓坡上单块块体周围的压力分布[7]，其结果表明：(a) 由 R1 向 R2 的流态转换与临界水力条件相关联；(b) 作用于单块块体（或坝坎）的平均拖曳力并非预测稳定性的良好判据，而应采用瞬时拖曳力。后一结论与 Zhang 等的结果一致，他们对于一个阶梯—深潭单元进行了三维模拟，指出坝坎处与潭内湍动能（TKE）分布的不均匀性。

现有的坝坎设计方法或基于块体的静力平衡，或基于剪应力。由于所依据的坝坎布置形式不同、临界流量的定义也不同，这些方法难以直接比较；视边界条件而定，各方法所得块体尺寸可能相差悬殊。

坝坎设计面临的另一挑战在于，水力条件不仅随流态而变，还沿缓坡长度而变。许多研究只关注缓坡的中段，以排除上下游水位的边界影响。Sindelar 在第一个和第二个潭中观测到特别高的底部应力。而最下游段壅水的影响则鲜有研究。

为在计入壅水的条件下更好地识别临界流动条件与坝坎最大荷载（如力矩），有必要在整条横向坝坎块石缓坡上开展涵盖广泛几何形态、坡度与水力情景的系统研究。一般而言，大规模参数研究宜采用计算流体力学（CFD）模型，因为其在建模与数据采集方面所需工作量少于物理模型。然而，由于横向坝坎块石缓坡上的流动强烈紊动，计算时间与精度之间如何权衡尚不清楚。模拟湍流的两种常用方法是雷诺平均 Navier-Stokes（RANS，速度较快）与大涡模拟（LES，精度较高）。以往针对整条横向坝坎块石缓坡自由表面流的 CFD 研究一律采用 RANS[8]；而计算量更大的 LES 研究以及基于粒子方法，则仅限于坝坎一池段或无自由水面的

区段。目前尚缺乏在整条横向坝坎块石缓坡上、并有物理验证数据支撑的两类 CFD 方法对比研究。

本文针对上述挑战建立了采用 RANS 与 LES 的两个非定常 CFD 模型，并依据一个含 12 道坝坎、涵盖三种流态的物理模型的点测数据对其加以评价。研究目标为：(i) 确定两类 CFD 方法在不同流态与不同沿程位置下的水力精度；(ii) 分析 CFD 模型中导致坝坎荷载最大的水力机制；(iii) 量化并评价 CFD 所预测坝坎荷载的差异。研究结果可为今后横向坝坎块石缓坡水力荷载研究的方法选择提供依据。

二、方法

(一) 模型几何与边界条件

本文所考虑横向坝坎块石缓坡的几何形态在物理模型与两个 CFD 模型中基本相同。缓坡由 12 道坝坎（CR1—CR12）与 11 个潭组成（图 1），水平长度 7.932 m，宽度（WCR）0.151 m，比尺为 1:20/3（弗劳德相似），以与试验水槽尺寸相匹配。CFD 模型沿用该比尺以保证完全可比。缓坡段河床坡度恒为 $I = 3\%$ ，上、下游段无坡度。坝坎为锐缘直角形，横贯整个模型宽度，高度一致。潭与坝坎按流向编号。坝坎与潭的尺寸符合德国大型河流上横向坝坎块石缓坡的最低生态要求。

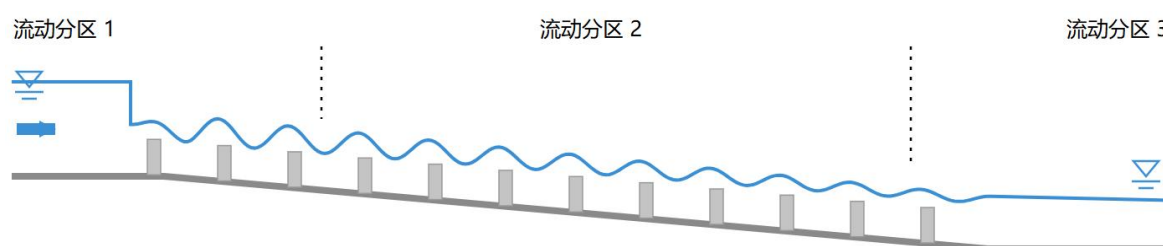


Figure 1 Schematic of the Crossbar Block Ramp Considered

图 1 所考虑横向坝坎块石缓坡的示意图。水位曲线上可区分出三个典型流动分区（上游控制、重复型、受壅水影响）。图示为流态 R2（尾流干扰流）。

预计有大量参数会影响横向坝坎块石缓坡上的实际流动，其中影响最大的是坝坎高度（HCR）、潭长（LP）与坡度（I）（图 2）。这些参数沿横向不变，因而可忽略横向、采用横向坝坎块石缓坡的准二维纵剖面建模。为降低复杂性并增强可比性，本文未考虑坝坎开口。由于预期主要出现无激波的非破碎波状水跃，侧壁效应可以忽略。又因 WCR 相对 LP 很小，横向流动效应的空间范围小、持续时间短，故对主流的发展而言可视为可忽略。

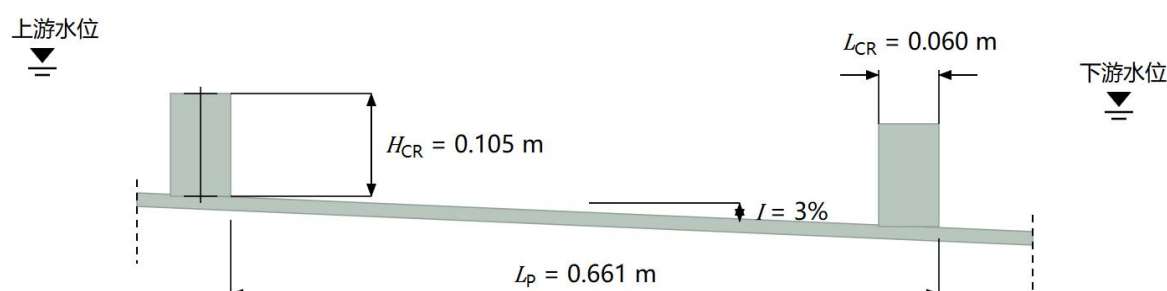


Figure 2 Longitudinal Section Showing Design Parameters and Dimensions of Two Consecutive Crossbars and Their Enclosed Pool in Model Scale

图 2 模型比尺下相邻两道坝坎及其所夹潭的设计参数与尺寸纵剖面。HCR 为坝坎高度, LCR 为坝坎长度, LP 为潭长, I 为坡度。

在物理模型中, 对 2.2~56.6 L/s 的 17 级流量 (附录 A) 进行了目视观察。其中 $Q_1 = 8.8 \text{ L/s}$ 、 $Q_2 = 17.5 \text{ L/s}$ 、 $Q_3 = 52.6 \text{ L/s}$ 三级流量经过测量并被选用, 以在 CFD 模型中激发 R1—R3 三种流态 (孤立粗糙流、尾流干扰流、掠过流) 及相应的水力荷载。换算至原型, 其单宽流量分别为 $q_1 = 1.0 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 、 $q_2 = 2.0 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 、 $q_3 = 6.0 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。 Q_1 是仍处于 R1 的最大流量, Q_2 在 R2 中产生的波浪最大, Q_3 则为物理模型的最大技术流量。

除流态之外, 坝坎在缓坡上的纵向位置对水力荷载的分类同样重要。可区分出三个流动分区 (图 1): 流动或受缓坡上游条件控制 (分区 1), 或在相继各潭中呈现重复性水力特征 (分区 2), 或受壅水影响 (分区 3)。此前已有研究隐含地作过这一区分。

上游水位取决于流量: 对 $Q_1/Q_2/Q_3$ 分别约为 0.21/0.27/0.43 m。下游水位的控制方式是使各级流量下上下游水位差均约为 0.24 m。这样, 上、下游水位随流量增大而等量升高, 比固定下游水位更接近实际情形。

(二) 物理模型

1. 试验装置

物理模型用于对 CFD 模型作点位验证。进口处以两级串联蜂窝整流器整流, 出口处以活动堰控制水位。进口至第一道坝坎的距离为 4.45 m, 最后一道坝坎至出口的距离为 2.35 m。流量以电磁感应方式量测, 最大流量脉动约为目标值的 $\pm 0.9\% \sim \pm 1.7\%$ 。制作材料采用耐磨、不膨胀、表面光滑的玻璃、有机玻璃以及 Necuron 等塑料, 几何最大公差约 1 mm。

2. 量测技术与后处理

流量由精度 0.4% 的电磁流量计控制。水位与压力时间序列以 10 Hz 采样、历时 180 s, 以涵盖 R2 中预期波浪的多个周期。水位在每道坝坎正上方中心处用 12 个精度 0.15% 的超声波探头 (UP) 量测, 上、下游各另设一个 UP。

超声波脉冲 (UP) 自探头发发出后呈锥形波束向下传播, 波束截面随传播距离增大而逐渐扩展, 抵达水面时形成一定直径的足印。该锥体直径受水位高度影响, 在 20~80 mm 范围内变化: 水位较高时波束行程较短, 锥体足印较小; 水位较低时传播路径增长, 波束扩散更为显著, 足印相应增大。波束抵达水面后, 除形成有效的反射回波外, 还在水面处发生镜面反射与散射, 部分能量经水面反射后沿原路径返回被探头接收。

水位位置的确定依赖于对回波信号的分析, 系统将传播行程最短的反射路径对应的水面点识别为有效反射点, 记作 Pref。理论上, 若水面完全水平且探头竖直向下正对水面, Pref 应位于探头轴线与水面之交点上, 即探头正下方。然而, 在实际试验条件下, 水面因水流、风浪或边界扰动等因素, 难以维持理想的水平状态, 各次试验中均呈现不同程度的倾斜与波动。受此影响, 波束足印内各点至探头的斜向传播距离存在差异, 最短行程反射点往往偏离中心位置。因此, Pref 通常位于探头中心投影点之外, 具体偏移方向与幅度取决于水面局部坡向与波动形态 (如图 3 所示)。

在本试验所观测的数据中, Pref 相对探头中心位置的水位高度差值最大可达 12 mm, 即 Pref 所在处的水面高度较中心处高出 12 mm。尽管如此, 由于 UP 算法在计算水位时默认假定 Pref 恰位于探头正下方, 即算法未对波束偏斜与反射点偏移进行几何修正, 这一假定会在水位量测中引入系统误差。相对中心水位而言, 该误差主要表现为对实际水位的低估, 最大偏差约 6 mm, 即测量值最多比实际中心水位低 6 mm。这一量级在试验精

度要求范围内,但在与 CFD 数值模拟结果进行对比时,需予以明确考虑。为此,本研究在确定 CFD 对比值时已根据各次试验的实际水面坡态和反射点偏移情况,对数值计算结果进行了相应的几何校正与偏差补偿,以确保实测数据与数值预测之间的比较建立在一致的参考基准之上。

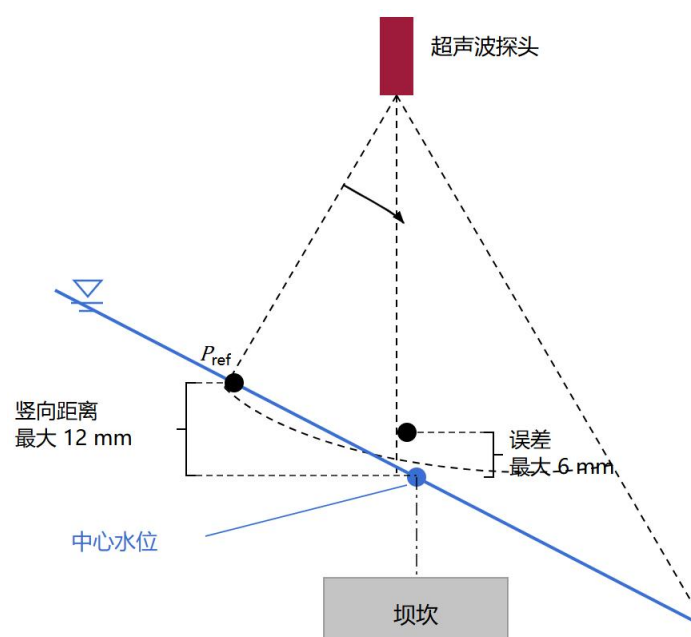


Figure 3 Example Sketch of Water Level Measurement Using an Ultrasonic Probe with a Non-Horizontal Water Surface

图 3 水面非水平时用超声波探头 (UP) 量测水位的示例示意图。图示为本研究可能出现的最大量测误差以及最不利的反射点 Pref。

此外,第 5 至第 7 道坝坎之间的水位沿中心线以 40 mm 间距用触点式水位仪人工量测。该方法只能估计平均水位,但可以可靠地确定包络线。

压力用电容式压力变送器 (CPT) 量测。CPT 安装于每道坝坎顶部预期发生流动分离处 (CPT-Top, 蓝色); 第 1、2、6、7、11、12 道坝坎在上游侧近底部静水压力最大处另设一个 CPT (CPT-Bottom, 紫色)。CPT 的量测面为直径 24 mm 的圆形,故所测压力为面平均值。此前对近底压力的试验表明,沿水槽宽度方向压力场几乎均匀,从而印证了所选准二维模型方法。需要注意的是,Q3 工况下近底压力超出 0~300 mbar 的量程。后处理阶段以滤波算法剔除负水位与明显为负的压力。

(三) 计算流体力学模型

1. 模型设置

CFD 模拟采用开源工具箱 OpenFOAM v1812。为捕捉非定常自由表面与掺气,采用多相求解器 interIsoFoam,它以有限体积法近似求解不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程,并实现了流体体积法与 IsoAdvector 格式以锐利追踪水气交界面。前期测试表明,与 OpenFOAM 处理多相问题的默认求解器 interFoam 相比,interIsoFoam 在相近计算时间下可得到更锐利的界面。

为比较 RANS 型与 LES 型湍流模拟,需要建立两个 CFD 模型。LES 中,尺度不小于网格分辨率的湍涡 (携带大部分湍流能量) 被直接求解,小于网格尺度的涡则加以模化。而在标准 RANS 方法中,控制方程一般只求解平均流动,湍流脉动的影响则被模化。本文需采用非定常 RANS (URANS) 以产生非定常波浪等现象。

理论上其应用要求湍流速度脉动的时间尺度与流动中较慢变化（如波浪）的时间尺度显著不同，而本文情形很可能并非如此（谱间隙问题）。不过这并不构成问题，因为结果可以用物理模型检验。RANS 模拟采用 $k-\omega$ SST 湍流模型，LES 采用 OpenFOAM 内置的 dynamicKEqn 湍流模型。 $k-\omega$ SST 兼具 $k-\epsilon$ 与 $k-\omega$ 模型的优点，是最常用的 RANS 湍流模型之一；dynamicKEqn 在 OpenFOAM 中与 $k-\omega$ SST 使用相同的边界条件，便于直接比较。

网格生成采用 OpenFOAM 的 blockMesh 与 snappyHexMesh 工具。三维模型域由第二部分（一）所述缓坡段、5.15 m 长的进口段与 4.8 m 长的出口段组成。进口段设计为淹没式吸出管，以避免掺气问题。六面体单元的棱边平行于 y 轴与 z 轴（分别为横向与竖向）；沿流向则与总体流向（即底面）一致，底面坡度在三个分区中各不相同。 $x/y/z$ 方向的基本分辨率分别为 $8\text{ mm} \times 10.1\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ ；在远离预期水面的空气区加粗，在预期湍流强烈且存在水面的坝坎与潭附近加密（图 4），最细分辨率约为 $2\text{ mm} \times 2.5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。该分辨率依据经验法则选取，要求在 LES 模型中至少解析 80% 的湍动能（TKE）。后处理阶段通过计算各单元已解析 TKE 与总 TKE 之比对此加以检查：

$$r_{\text{TKE}} = \frac{\text{TKE}_r}{\text{TKE}_r + \text{TKE}_{\text{SGS}}} \quad (1)$$

式中， TKE_{SGS} 为亚格子尺度上模化的 TKE； TKE_r 为已解析的 TKE，由比雷诺应力张量的迹计算：

$$\text{TKE}_r = \text{tr}(\tau_{ij}) \quad (2)$$

最终网格约含 3030 万个单元。为完全可比，LES 与 RANS 均使用该网格，尽管对 RANS 而言更粗的网格已足够。就边界层而言，Q2 工况下 RANS 模型的结果表明，潭与坝坎边界处 $y^+ \approx 20 \sim 30$ ，坝坎上游缘处 $y^+ \approx 130$ （附录 D）。使用壁面函数的理想取值应为 $y^+ = 30 \sim 200$ ，以使第一层单元中心位于对数律层内。由于流动由湍流与缓坡几何形态主导，边界层的影响很可能可以忽略，物理模型结果有助于检验这一假定。

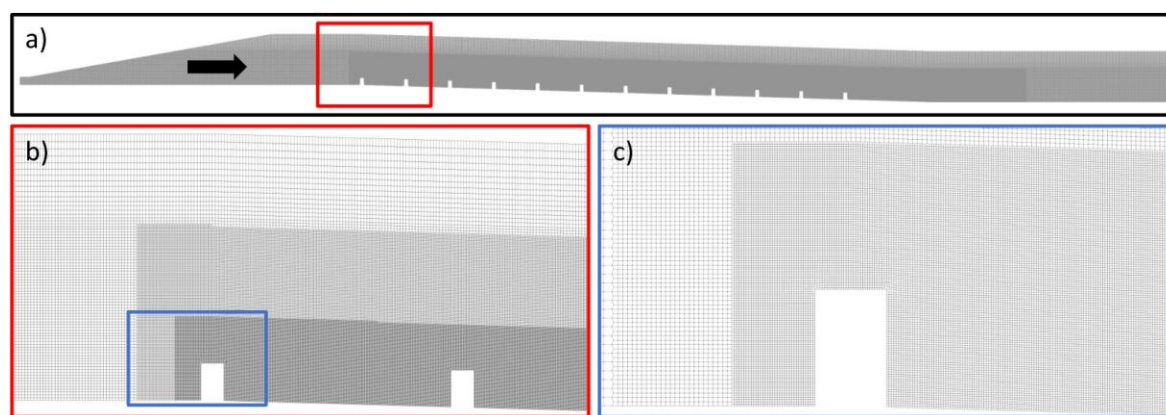


Figure 4 Longitudinal Section of the Computational Mesh

图 4 计算网格纵剖面。(a) 含进、出口段的整条横向坝坎块石缓坡；(b) 第 1、2 道坝坎处的加密区；(c) 第 1 道坝坎处加密的局部放大。

时间采用隐式一阶欧拉格式离散。LES 模型采用精度更高的 Crank-Nicolson 格式会导致不稳定。散度项按当地 Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 数在高阶格式与迎风格式之间混合离散：RANS 在 $\text{CFL} < 1$ 时采用 limitedlinearVector 格式，并混合至 $\text{CFL} = 2$ ；LES 在 $\text{CFL} < 0.5$ 时采用 LUST 格式，并混合至 $\text{CFL} = 1$ 。域内大部分区域的最高 CFL 约为 0.6。

2. 边界条件、初始化与计算

进口流量与出口水位按物理模型设定。壁面与床面采用壁面函数，等效沙粒糙度 $k_s = 0.0005 \text{ m}$ 。

每级流量先以平面水位与简单估计的流速场初始化，在二维 RANS 预备模型中运行（附录 A）。达到充分发展状态后，把结果映射到三维 RANS 模型；同样，把充分发展的三维 RANS 状态映射到 LES 模型。当进、出口流量近似相等时，即认为模拟已充分发展（不再受初始条件影响）。达到充分发展状态后，各次模拟均计算并分析连续 180 s 的采样时段，该时段与物理模型的采样时段相同，目前受计算成本限制。

每次模型运算使用高性能计算机上 24 颗 CPU（Intel Xeon Gold 6138）共 480 个处理器核心。时间步长依最大流速在 10^{-3} s 至 10^{-4} s 之间变化，而最大流速总体上取决于流量。模拟该时段需耗费 5~28 天实际时间。就每秒模拟时间而言，RANS 平均需要 41/90/36 min（Q1/Q2/Q3），LES 需要 180/220/190 min。就所选设置而言，LES 的计算量为 RANS 的 2.4~5.3 倍。需要注意，若为 RANS 另行采用更粗的网格，差距还会更大。

3. 后处理

为与物理模型中的 CPT 作点位比较，在两个 CFD 模型中于坝坎处定义了完全相同的量测面片。由于物理模型中底部压力沿模型宽度近似恒定，量测面片可定义为横跨模型宽度的矩形，每个面片尺寸为 $151 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ （图 3c 中蓝色与紫色矩形）。作用于面片的力在 OpenFOAM 中算得，再除以面片面积即得平均压力。

数值水面定义为流体体积参数 $\alpha_{\text{water}} = 0.5$ 处。为模拟物理模型中 UP 的量测面积，水位在 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的范围内采样，并只取最大值。该做法需要存储并后处理完整的水气交界面，因而把量测频率限制为 2 Hz。

CFD 模型还可计算作用于整道坝坎的水平与竖向合力（总水流拖曳力与升力），以及绕基点 PBP 的倾覆力矩（图 5）。各道坝坎的采样频率为 100 Hz。

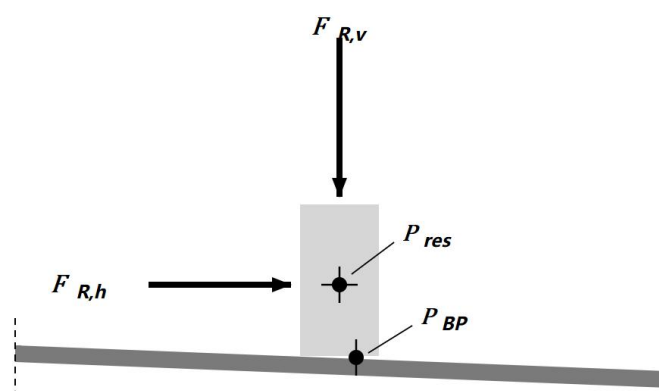


Figure 5 Resultant Drag and (Negative) Lift Forces Acting on a Crossbar

图 5 作用于坝坎的合成拖曳力与（负）升力（ $F_{R,h}$ 与 $F_{R,v}$ ）。Pres 为力的作用点，PBP 为力矩所对应的基点。

（四）精度与荷载指标

在精度分析与荷载分析中，均计算非定常随机 180 s 时间序列的中位值，作为判定与时间无关的定量吻合或偏差的稳健度量。CFD 模型与物理模型之间的中位相对偏差按下式计算：

$$\delta = \frac{\text{median}\{\text{RANS, LES}\} - \text{median}_{\text{物理模型}}}{\text{median}_{\text{物理模型}}} \times 100 \quad (3)$$

所有压力记录（单位 Pa）除以水的重度（15 ° C、1.013 bar 下为 $9801 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^2)$ ）换算为压力水头（单

位 m)，以便与水位量测结果比较。

时间序列以箱线图汇总：箱内水平线为中位值，箱的下、上边缘分别为 25% 与 75% 分位，两者之差为四分位距（IQR）。须线最大长度定义为 1.5 倍 IQR，其确切数值分别对应须线范围内的最小与最大实测值，离群值以圆点表示。

IQR 与离群值用于评价随时间变化的压力与水位脉动及其极值。就荷载而言，重点关注离群值，因为最大值对基于静力平衡的坝坎设计最为重要。此外，本文只考虑倾覆力矩而不考虑拖曳力，尽管倾覆与滑移都是块体启动的主要机制——这是因为平原河流上的横向坝坎块石缓坡中，坝坎通常嵌固于地基之中，故绕基点 PBP 的倾覆远比滑移重要。为聚焦水力荷载，模型设计中忽略了地基稳定与潭内材料尺寸设计等问题。

三、结果与讨论

（一）流态

在用三维 CFD 模型分析并量化坝坎荷载（第三部分（三））之前，先通过特征流态（本节）以及准二维物理模型的点测水位与压力数据定量地（第三部分（二））对其加以评价。分析中计入坝坎与潭的沿程位置（流动分区）。

所选三级流量（Q1—Q3）足以在三个模型中激发三种总体流态（R1—R3），但细节上存在一些值得注意的差异。在物理模型与 LES 模型中，Q1 产生的流态处于 R1 的上限，Q2 产生的流态处于 R2 的中段，Q3 产生的流态处于 R2 末端 / R3 起始。虽然 Q3 与 Q2 明显不同，但其流态仍有零星小波，不能归为典型的 R3。这一结果说明了流态难以明确划分的问题。物理模型的时均水位在 LES 中得到很好的再现，包括 Q1 与 Q2 的特征波型。

比较 RANS 中 Q1 与 Q2 的时均水位可见，潭中波峰出现的位置比物理模型与 LES 模型更靠下游。按定义，当波峰到达下游坝坎时，流态即开始由 R1 转为 R2。因此该转换在 RANS 中发生于比物理模型与 LES 模型更低的流量（R2 与 R3 之间的转换亦然）。其结果是，RANS 中 Q1 所产生的流态更接近 R2 而非 R1。对 Q2，R2 如预期出现，但瞬时水位的脉动幅度增大，即波浪更大。

要评价模型类型之间的差异以及流态对水力条件与坝坎荷载的影响，还需作更细致的考察，详见下文。

（二）水位与压力水头

1. 流动分区 1

总体而言，在流动分区 1（见图 1）中，两个 CFD 模型与物理模型在各级流量下都吻合得很好。这是因为在各级流量下，第 1 道坝坎处的水位与压力水头相对其他坝坎脉动都很小。上游水位的轻微脉动（ < 1 cm）源于第 1 潭中的驻波，其波峰略有移动。就水力而言，该系统向上下游都有联系。

水位与各道坝坎顶部压力水头之间的绝对差值，大体可由动水压力的影响来解释——静水法计算压力水头时并未计入动水压力。不过对第 1 道坝坎（CR1）而言，该差值大于其后各道坝坎，这很可能是由 CR1 上缘在各级流量下都存在的稳定大尺度分离区所致，该分离区降低了当地压力。

2. 流动分区 2 与分区 3

在分区 2 与分区 3 中，LES 模型与物理模型总体吻合良好，中位值的相对偏差为 $\delta = 1\% \sim 19\%$ （式（3））。RANS 模型在中位值上与物理模型的差异略大（ $\delta = 0\% \sim 24\%$ ）。对流量 Q2，RANS 表现出明显的定性差异：此处 Q2 代表流态 R2，其特征是反复溃灭的驻波。三个模型都产生了这类波浪，但 RANS 中的周期与振幅更大。RANS 中压力水头的变幅可达 80 mm，为其他模型的两倍。一种可能的解释是，RANS 模型中短周期的流

速与压力脉动（即湍流）被削平，因而有更多能量用于形成振幅更大、周期更长的波浪。Premstaller 也曾报告 RANS 模型对非定常自由表面水跃再现不足的类似现象。

RANS 对 Q3 的第二个系统性差异是分区 2 中水位与压力水头持续偏低。该差异可由流态解释：此时对应于正在发展的流态 R3，主流被导向坝坎顶部之上；主流之下的潭内形成涡结构，这是众所周知的现象。在 RANS 中，主流的流线与流速比 LES 更均匀，主流与潭内流动之间的质量交换减少，导致主流流速增大；结合连续性即可解释水位与压力水头的降低。在分区 3 的 CR12 处，各模型之间的差异较小，因为三类模型的下游水位由相同的边界条件控制。

3. 脉动与极值

压力水头并不服从正态分布：坝坎顶部的离群值呈负偏，坝坎底部的离群值呈正偏。这一趋势在物理模型与 CFD 模型中均存在，说明 CFD 模型对坝坎周围复杂流动特征的再现在定性上是正确的。

定量而言，Q1 与 Q3 的水位与压力水头脉动（以 IQR 衡量）在 RANS 中大多小于物理模型。而对 Q2，RANS 的 IQR 偏离方向相反，为物理模型 IQR 的数倍。这同样可由反复溃灭的驻波来解释——这类驻波是流态 R2 的特征，但在 RANS 模型中过高（见第三部分（二）2.）。由于波浪的形成与溃灭会反映在坝坎处的压力场中，Q2 工况下 RANS 对坝坎的动水最大压力存在系统性高估。针对更多级流量开展的二维 RANS 预备模拟表明，在 R2 中出现自激非定常波浪的其他流量下，RANS 同样可能出现系统性高估。对 Q3，RANS 明显低估水位与压力。

就 LES 而言，水位略有高估，但压力水头结果与物理模型吻合良好乃至很好。在各级流量与各分区的大多数坝坎处，LES 的 IQR 与物理模型相近且合理。这也印证了如下假定：对本文流动而言，不必严格遵循把 y^+ 保持在 30~200 的数值建议（第二部分（三）1.）。

综上，时间分辨结果与汇总结果都揭示出 RANS 方法在分析横向坝坎块石缓坡动力荷载时的若干重要局限。虽然 RANS 在各级流量下都能在 CR1 处给出可靠结果，且 RANS 模型足以满足缓坡研究的许多其他目标[8]，但要在 R2 及 R3 起始阶段给出合理的脉动极值，仍需采用非定常 LES 模拟。这一结果或可由如下判断来解释：RANS 方法对大规模流动分离总体上有局限，而坝坎处正会发生这种分离。

然而，所需精度可因研究目标而异，有时 RANS 相对 LES 的速度优势（本文最高 5.3 倍）可能更为重要。从设计角度看，若 RANS 能可靠地高估最大荷载，这是可以接受的。仅凭两个物理测点无法回答该问题，因为这两个测点与整道坝坎荷载之间的相关性在方法上尚不清楚。因此，下文借助 CFD 计算所得力矩来考察这一问题。

（三）倾覆力矩

1. 最大力矩

首先考察力矩的极值，因为它们对基于静力平衡的坝坎设计最为重要。由于 RANS 结果并不完全可靠（见前文讨论），此处只作定性分析。

RANS 的最大力矩通常（但并非总是）大于 LES。这一不确定性排除了在参数研究中用 RANS 改进设计的可能，因为无法预料的荷载低估在设计过程中是不可接受的。

就流量而言，最高的离群值大多出现在 Q3，Q2 的离群值与之相差不远，两类模型中有时甚至更高。考虑到 Q3 的流动介于 R2 与 R3 之间，这两个结果都与报告临界荷载出现在 R2 的研究吻合良好。Q1 似乎过于深入 R1，难以再现文献所报告的明显临界水力条件。这两点都表明，为识别最大荷载，有必要考察遍及整个 R2（包括其与 R1、R3 的过渡）的多级流量。

力矩随时间的巨大变异性（表现为 Q2、尤其是 Q3 的长须线与离群值范围）使人推断，最大（与最小）荷载与单个大波相关（见第三部分（二）2.）。这与近期认为块体稳定性宜采用瞬时拖曳力而非平均拖曳力的结论一致[7]。由于 180 s 的模拟时长限制了单个大波形成与溃灭的次数，未能计算最大荷载的统计描述量（如置信区间）。

理论抗倾力矩的灰线被多次超越。不过该线仅供参考，因为其计算假定块体为松散放置；实际中块体嵌固于地基，因而可抵抗更大的力矩。还须注意，与本文所用矩形块体相比，天然块体外形更为流线，故此处的动水压力（进而水平力与力矩）很可能被高估。尽管如此，由 LES 结果可以清楚看出，自 CR1 至 CR11 沿整条缓坡都可能出现高力矩；壅水对最大力矩的影响仅出现在深度淹没的 CR12 处。

2. 中位力矩

为找出流动特征与坝坎荷载之间的一般关系，转而考察更为稳健的中位力矩。在两个模型中，Q3 的中位力矩在绝对值上都明显小于 Q2，且在分区 2 的大部分位置甚至为负。该结果可归因于两个互补效应：(i) Q3 中作用于坝坎顶部的水柱增大，使稳定作用的竖向力 FR_v 增大；(ii) 主流被分离至坝坎顶部之上、潭内形成涡旋，使倾覆的水平力 FR_h 减小（第三部分（二）2.）。两种效应都减小了绕 PBP 的转动力矩。Q3 的中位力矩强烈为负，说明竖向力远大于（最多可达十倍）水平力，即在 R3 中平均而言坝坎随流量增大而更为稳定。

在分区 3 中，随着壅水抬高、水柱增高，效应 (i) 与 (ii) 被放大，故中位力矩比分区 2 更低。这些结果表明，随流量增大，坝坎稳定性受流动的影响越来越小，更高的流量对确定设计荷载的意义也越来越小[7]。

最后，就中位值而言，两个模型中 CR1 在所有坝坎、所有流量下所受荷载都最高，且 Q1—Q3 之间差别很小，这似乎表明 CR1 是设计中最不利的坝坎。然而，CR1 处的荷载变幅（IQR 与离群值）在所有坝坎中最小，且由 LES 模型可以清楚看出，与中位值不同，荷载变幅随流量增大而增大，并在 Q3 时最大。因此，其他坝坎很可能承受相近乃至更大的最大荷载。

3. 局限性

把本文所得最大力矩与文献中的临界力矩值相比较并不可行，因为这需要作出过多假定，结果将失之任意。尽管如此，本文结果仍能指出横向坝坎块石缓坡上最大荷载出现的条件（流态与位置）。在这些条件与比尺无关、且时间相关性可以忽略的假定下，可预期尺寸相近（HCR/LP 与 I）的缓坡在相同条件下会出现临界荷载。

掺气在 R2 中可能是相关过程，但气泡在模型中无法按比尺缩放。可能的比尺效应相对于对流与湍流被视为可以忽略；由于物理模型与 CFD 模型比尺相同，这些效应不影响两者之间的比较。

四、结论

本文以横向坝坎块石缓坡准二维纵剖面的物理模型对两个 CFD 模型进行了检验，在缓坡的三个流动分区中分析了对应三种流态（R1—R3）的三级流量（Q1—Q3）。CFD 模型的高空间与时间分辨率（最细达 2 mm、0.0001 s，模型比尺 1:20/3）提供了足够的细节，以识别物理模型与 CFD 模型之间的吻合与偏差。关于 CFD 精度的结论如下：

（1）两类 CFD 模型都能再现横向坝坎块石缓坡上三种典型流态的特征，即两者都适用于定性研究。

（2）只有 LES 模型适用于研究瞬时荷载，而寻找临界荷载必须考虑瞬时荷载。

（3）RANS 模型对非定常波浪存在很大的定性偏差，即振幅与周期偏大。这类波浪是 R2 的典型特征，在各种流态下也出现于仅略受壅水影响的潭中（由流动分区 2 向分区 3 过渡）。在这些条件下应谨慎使用 RANS 型湍流模型。

(4) 就本研究而言, LES 的计算量估计最高为 RANS 的 5.3 倍; 若为 RANS 采用优化网格, 差距还会更大。因此 LES 目前不适用于涵盖广泛参数的系统研究。

对 CFD 模型中荷载的分析表明:

(5) 倾覆力矩很可能在以非定常波浪为特征的流态(即 R2, 以及向 R3 的过渡阶段)中最大。据此, 为找出最大荷载, 有必要考察遍及整个 R2 直至 R3 的一系列流量。

(6) 最大力矩很可能源自单个大波。

(7) 壅水只降低中位力矩, 且取决于当地水位; 对最大力矩的削减作用仅出现在深度淹没、流态因壅水而转为 R3 的坝坎处。

今后的工作应研究 RANS 中波浪形成过大的问题, 其认识有助于厘清 RANS 是仅可用于定常流动条件, 还是也可用于非定常条件。若属前者, 则应寻求更先进而仍然高效的方法。目前已有若干试图兼顾 RANS 速度与 LES 精度的方法, 例如分离涡模拟(DES)。最后, 量化壅水与更缓坡度、不同块体形状、块体间隙、脉动流量以及流动分区 1 中不同潭长共同作用的影响, 可进一步提高横向坝坎块石缓坡设计的效率。

参考文献

- [1] Montgomery D R, Buffington J M. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 1997, 109(5): 596-611.
- [2] Maager F, Hohermuth B, Weitbrecht V, et al. Effect of discharge variations and sediment supply on the stability of artificial step-pool sequences//*Proceedings of the 39th IAHR World Congress*. Granada, 2022: 1135-1144.
- [3] Zhang C, Hassan M A, Saletti M, et al. A unit-scale framework for designing step-pool sequences. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 149(1): 04022033.
- [4] 李志威, 王兆印, 张晨笛, 等. 人工阶梯-深潭破坏案例与稳定性分析. *水科学进展*, 2015, 26(6): 820-828.
- [5] 张晨笛, 王兆印, 李志威, 等. 单个阶梯-深潭破坏的力学模型. *水利学报*, 2014, 45(12): 1397-1406.
- [6] 张猛. 消能系统在风景区泥石流防治中的应用探讨. *贵州地质*, 2025, 42(4): 533-540.
- [7] Sindelar C, Smart G. Transition flow in step-pool systems: pressure distributions and drag forces. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 142(10): 04016035.
- [8] 李文哲, 王兆印, 李志威, 等. 阶梯-深潭系统的水力特性. *水科学进展*, 2014, 25(3): 374-382.
- [9] 刘娇, 漆力健, 余国安, 等. 山区河流阶梯—深潭结构水力特征数值模拟. *水电能源科学*, 2014(6): 90-93.