

徐菁蔚. 生物启发外形调控下三维黏塑性溃坝冲击结构物的动力响应数值模拟分析[J]. 人民珠江, DOI: 10.3969/j.issn.1001-9235.XXXX.XX.001.

生物启发外形调控下三维黏塑性溃坝冲击结构物的动力响应数值模拟分析

徐菁蔚

(福州英华职业学院, 福建 福州 350101)

摘要:溃坝下泄的泥浆影响范围广且破坏性大,流态区别于清水流动,精细化理清其致灾机理具有现实意义。通过OpenMP构建并行基座,基于Herschel-Bulkley搭建本构模型,采用APPLIC(Approximated PLIC)方法重构自由面,利用自研三维数学模型开展黏塑性溃坝水动力分析,结果发现:当前模型预报结果与物理试验结果具有一致性;非牛顿流体冲击力响应区别于牛顿流体静水压变化,受等效重力控制,冲击力存在非静水压力效应;基于海豹胡须生物启发,通过外形调控,在相同阻水率的情况下,圆柱比方柱的峰值冲击力减少约50%,且冲量大幅减小,流线型圆柱可削弱动量变化进而减少冲量。通过多源数据验证了模型可靠性,阐述了非静水压力效应,链接了生物启发与防灾减灾,可为溃坝灾害链识别与减灾应用提供参考。

关键词:溃坝;Herschel-Bulkley模型;APPLIC方法;OpenMP技术;生物启发

中图分类号:TV122.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(XXXX)XX-0001-14

受厄尔尼诺现象影响,暴雨和洪水等极端事件频发,“雨带北移”现象凸显。极端降雨时产汇流迅速发展,易在河流上游形成暴涨水位,堤坝溃决、山体滑坡、堰塞湖漫溢等灾难风险陡增^[1],已是十分突出的现实问题;2026年7月6日,广西南宁六蓝水库发生溃坝,坝体形成缺口,溃坝下泄的泥浆冲击下游构筑物。通过梳理这一过程相关动力响应特性有助于黏塑性溃坝风险研判,保障人民群众的生命财产安全。

黏塑性溃坝致灾预报具有防灾减灾工程应用普适性,这一过程可在极短时间内集中释放高强度能量,呈现流动结构突变、多机制耦合叠加特征^[2],致使精确预报这一过程仍存在诸多挑战。首先,由于流场空间具有三维特征,二维数值模拟无法精确捕捉三维流动信息^[3];其次,非牛顿流体剪切应力和屈服应力相互作用并影响流态,其非线性流变特征区别于牛顿流体的固定流变属性,不确定性风险增

大;最后,冲击结构物的过程中,将发生复杂的流固耦合作用,既会影响结构安全,又会改变局部流体演化,需要搭建有效本构模型以还原结构物周围非牛顿流场动力响应特性^[4]。

针对溃坝的复杂非线性动力响应,基于物理试验、数值模拟的研究已取得丰富成果^[5]。在物理试验方面,2007年,Soares-Frazão等^[6]分析了清水溃坝波冲击矩形结构物的水动力特性。2012年,敬小非等^[7]梳理了不同溃决口门形态对下泄泥浆流动特性的影响。2015年,Aureli等^[8]发现了清水溃坝波冲击棱形结构物的冲击力峰值与水深呈二次函数关系。2021年,张宏刚等^[9]阐述了不同浓度溃坝混合液对冲击力和流速的影响。2022年,黄宜超等^[10]汇总了不同降雨工况下尾矿库坝体破坏数据。2024年,周昔东等^[11]分析了上下游水深和坡度对湿床溃坝的影响,探究了波动波和涌浪波变化规律。2025年,Martínez-Aranda等^[12]通过非接触室内试验,梳

基金项目:2026年院士工作站科研项目(26YSGZZ012);福州英华职业学院第二批产教融合工作室项目(FZYHJ20260520-01)

收稿日期:2026-08-14 **修回日期:**2026-09-22

作者简介:徐菁蔚(1993—),女,硕士,主要从事生物力学等工作。

理了黏塑性溃坝冲击障碍物时冲击力演化与流场特征的关联。考虑到物理试验成本和周期,数值模拟凭借无缩尺效应、信息可视化等优势快速发展。2000年,Brufau和Garcia-Navarro^[13]通过二维模型模拟了溃坝波翻越三角形障碍物的过程。2012年,向浩等^[14]基于MPS方法研究了非牛顿流体二维溃坝的自由面形态,验证了本构模型有效性。2012年,Kao等^[15]基于SPH方法复现了溃坝中的反射、水跃等复杂现象。2017年,乔成等^[16]改进了SPH方法的混合黏度公式并开展了二维动床溃坝研究。2020年,Issakhov等^[17]通过ANSYS Fluent软件模拟了清水和泥浆的三维溃坝,预报了泥浆输运的动力过程。2023年,Simsek和Islek^[18]针对上下游水深比不同的二维和三维清水溃坝,分析了不同湍流模型的精度。2024年,刘汉龙^[19]阐述了生物启发外形调控在结构设计中的应用。综合国内外研究现状,物理试验关注清水溃坝,受限于材料差异性、仪器精度等因素,黏塑性溃坝的物理试验数据有限,可复现物理试验过程的三维数值模拟结果较少报道。已有数值模拟研究主要梳理了清水溃坝冲击、二维自研模型应用于非牛顿流体溃坝分析、商业软件预报三维泥浆输运等过程。由于非牛顿流体复杂性,闭源软件无法深入修改并提高精度,Martínez-Aranda等^[12]阐明了泥浆、碎屑流等非牛顿流体具备屈服应力,需要采用黏塑性流体本构模型进行描述。此外,数值模拟集中于二维模型,其无法精确预报载荷演变、动量交换等复杂过程;三维模型精度高,但软件建模参数多且复杂,网格量或粒子数陡增,受制于自主代码研发、高性能计算等瓶颈,较少开展三维问题研究^[20]。

因此,研究目的是开展生物启发外形调控下三维黏塑性溃坝冲击结构物的动力响应数值模拟分析。通过自主研发经物理试验验证的数值模型,发挥自由面重构、本构模型、高性能计算等技术优势,聚焦复杂非线性流固耦合过程,复现三维黏塑性溃坝,综合分析冲击力、水位、冲量、三维流场等多源数据,理清非牛顿流体的非静水压力效应机理并阐述等效重力特性,将主血管与分支血管的微观生物

流体调控机制迁移至宏观灾害防护,借鉴血液流动、海豹胡须外形调控特性,应用生物启发技术对比不同结构类型抗灾韧性,以期溃坝涌浪冲击形成的灾害链风险识别和防灾减灾研究提供参考。

1 数学模型

在笛卡尔坐标系中,构建三维不可压缩黏性流模型,耦合本构模型以描述黏度随剪切速率变化的流态,模拟黏塑性溃坝复杂自由面流动的现象。

1.1 控制方程

连续性方程和动量方程如下:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + g \delta_{i,3}, \quad (2)$$

式中: u_i 为笛卡尔坐标系*i*方向瞬时速度分量,其中*i*=1,2,3; x_j 为空间坐标分量,其中*j*=1,2,3; ρ 为密度; t 为时间; P 为压强; μ_{eff} 为表观黏度; g 为重力加速度; $\delta_{i,3}$ 为克罗内克函数。

流体与外部空气域之间的气液交界面液体体积分数 α 的对流输运方程如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = 0, \quad (3)$$

式中:若 $C=1$,则液体占据全部网格单元;若 $C=0$,则空气占据全部网格单元;若 $0<C<1$,则液体动态交界面切割网格单元。

模型离散、流固耦合和自由面更新的三维并行架构见图1,基于投影法框架,式(2)中对流扩散方程采用QUICK方法,叠加式(1)连续性方程条件后得到的压力泊松方程利用SOR方法,迭代出新时刻的压强 P 后,通过压力-速度耦合更新速度场信息。式(3)中动态交界面利用VOF类型的APPLIC方法追踪自由面,APPLIC方法已被证实可减少空间拓扑判断,保持精度且提高计算效率^[21];通过几何分析可计算固体结构物体积分数,固体交界面利用浸入边界法处理;基于OpenMP并行技术完成三维空间

计算量加速模拟,利用多线程共享内存并行,避免复杂通信而实现高效计算。

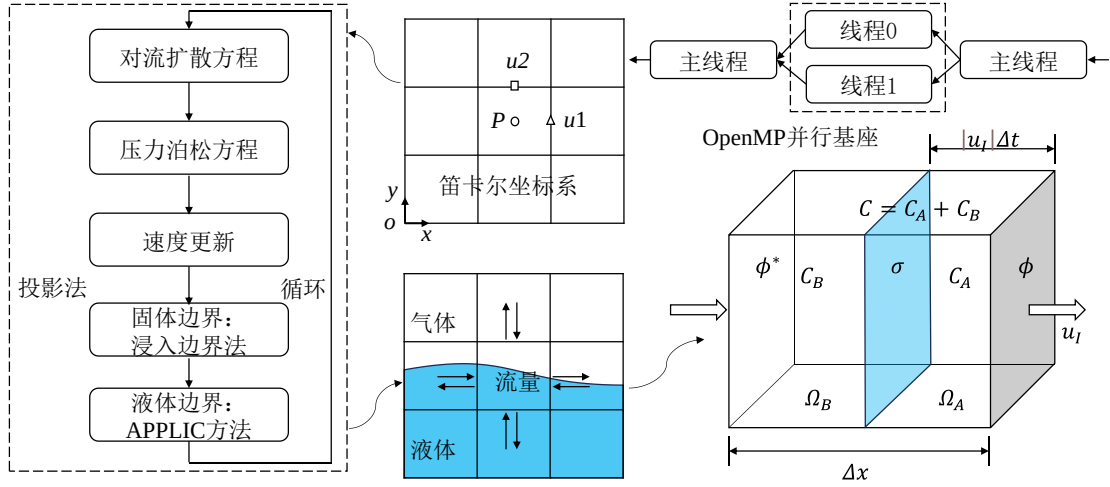


图1 模型离散、流固耦合和自由面更新的三维并行架构

Fig. 1 3D parallel architecture for model discretization, fluid-structure interaction, and free-surface update

1.2 APPLIC 自由面重构技术

流动速度为 u_l , 穿过网格面 φ 的体积分数值对流通量 F 表达式如下:

$$F = C_A \operatorname{sgn} u_l, \quad (4)$$

式中: $C_A(c_f, C, \mathbf{n}) = |c_f|V(\alpha_A'', m_A'')$ 为体积分, Courant-Friedrichs-Lewy 数 $c_f = \frac{u_l \Delta t}{\Delta x}$, 参数 α_A'' 和 m_A''

的表达式如下:

$$\alpha_A'' = \begin{cases} Q_A' \alpha' & n_l c_f \leq 0 \\ Q_A' (\alpha' - r_A) & n_l c_f > 0 \end{cases} \text{ 和 } m_{A,l}'' = \begin{cases} Q_A' m_l' |c_f| & l = I \\ Q_A' m_l' & l \neq I \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{n} = -\nabla C$, $Q_A' = \frac{1}{1 - r_A}$, $r_A = m_l' (1 - |c_f|)$, $m_l' =$

$\frac{|n_l|}{\|\mathbf{n}\|_1}$, $\alpha' = \alpha(C, \mathbf{m}')$, $l=1, 2, 3$; 同时, 为了避免PLIC方法复杂的几何拓扑计算, 代数计算替代这一过程, Kawano等^[21]提出的 α 和 V 代数函数如下:

$$\alpha(V, \mathbf{m}) =$$

$$\begin{cases} \frac{1}{2} (2V)^p & V \leq 1/2 \\ 1 - \frac{1}{2} [2(1 - V)]^p & V > 1/2 \end{cases} \text{ 和 } V(\alpha, \mathbf{m}) = \begin{cases} 0 & \alpha \leq 0 \\ \frac{1}{2} (2\alpha)^p & 0 < \alpha \leq 1/2 \\ 1 - \frac{1}{2} [2(1 - \alpha)]^p & 1/2 < \alpha < 1 \\ 1 & \alpha \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: p 为模型参数; 通过更新 F 的变化, 可得液体体积分 C 。

1.3 Herschel Bulkley 本构模型

Herschel-Bulkley 本构模型公式如下:

$$\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma}^m, \quad (7)$$

式中: τ 为剪切应力; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; τ_y 为屈服应力; μ 为稠度系数; m 为流动行为指数。

根据式(7), 可推导出式(2)中的表观黏度 μ_{eff} 如下:

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \mu \dot{\gamma}^{m-1}, \quad (8)$$

式中: 黏塑性流体参数取值见表1, m 小于1, 该流体呈现剪切稀化特征。

表1 黏塑性流体参数数值

Tab. 1 Numerical parameters of the viscoplastic fluid

参数	τ_y	μ	m
数值	23.16 Pa	3.96 Pa·s ^m	0.478

2 模型应用

2.1 黏塑性溃坝冲击下游平板结构物

2.1.1 模型构建

非牛顿流体溃坝初始条件见图2,计算域的长

度 $L=L_1+L_2+L_3$,其中 L_1 长度可变,其依据流体质量 M 推算,流体质量工况见表2,Case0的流体质量 $M=9.0$ kg, Case1的流体质量 $M=29.8$ kg,其他参数 $L_2=0.8$ m和 $L_3=1.0$ m;计算域的宽度 $B=1.0$ m和高度 $H=0.6$ m。溃坝流体的宽度 $B_0=0.24$ m,高度 $H_0=0.26$ m。下游平板结构物的长度 $B_1=0.2$ m,高度 $H_1=0.3$ m。下游水位测点位于结构物正前方,间距 $L_4=0.14$ m。物理试验为倾斜水槽,倾角 $\theta=12^\circ$,其他详细参数可以在Martínez-Aranda等^[12]研究中找到。

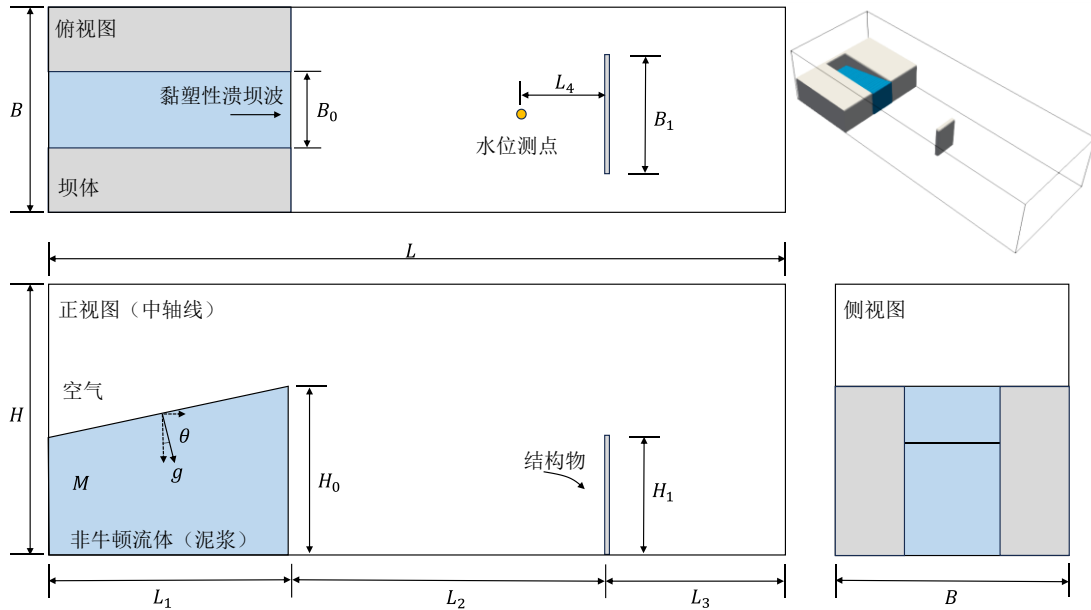


图2 非牛顿流体溃坝模型初始条件

Fig. 2 Initial conditions of the non-Newtonian fluid dam-break model

表2 流体质量工况

Tab. 2 Fluid mass conditions

工况	高度 H_0 /m	流体质量 M /kg
Case0	0.26	9.0
Case1	0.26	29.8

2.1.2 网格收敛性分析

网格收敛性分析可确保结果稳定性,粗网格、中网格和细网格尺寸见表3,网格分辨率逐倍提高。冲击力计算方法见式(9),其监测结果见图3,三套网格在Case0工况中的冲击力预报趋势均和试验结果一致。结合物理试验数据对三套网格数值模拟

的冲击力结果进行误差定量评价,粗网格、中网格与细网格对应Case0工况峰值P1的相对误差分别为5.40%、2.00%和1.99%,粗网格的峰值偏差大于中网格和细网格的结果,中网格和细网格的预报结果与实验监测结果基本一致,综合考虑计算成本,中网格的分辨率足够用于溃坝与下游结构物相互作用研究,因此选用中网格,其网格数量为280万(100×350×80)。

$$\mathbf{F}(t) = \iint_{S_w} (-P\mathbf{n} + \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n}) dS, \quad (9)$$

式中: $\mathbf{F}(t)$ 为 t 时刻流体对结构的总作用力; S_w 为流体浸湿的固体壁面区域; dS 为壁面微元面积。

表3 网格尺寸
Tab. 3 Mesh sizes

类型	X轴 $\Delta x/m$	Y轴 $\Delta y/m$	Z轴 $\Delta z/m$
粗网格	0.010 0	0.010 0	0.010 0
中网格	0.005 0	0.005 0	0.005 0
细网格	0.002 5	0.002 5	0.002 5

2.1.3 冲击力和水位演变分析

冲击力和水位监测结果见图3,整体一致性良好,Case0峰值P1和P2的相对误差分别为2.00%、8.11%,峰值出现时间的相对误差分别为1.30%、1.88%;Case1较Case0新增了突降区,其在P2和P3突降区谷值的相对误差为2.65%,谷值出现时间的相对误差为3.20%。

Case0的冲击力在0.6 s至0.8 s时达到第一个

峰值P1,结构物前方水位迅速抬升,溃坝势能转变为动能并释放能量;冲击力在0.8 s至1.0 s时逐步衰减并回升,受溃坝来流补给和平板结构物阻挡,结构物前方水位保持平稳后微抬,动能释放而势能累积;冲击力在1.0 s至1.2 s时达到第二个峰值P2,结构物前方水位逐渐抬升至最高位;此后,冲击力大幅衰减,结构物前方水位在重力的作用下塌陷。

Case1的冲击力在0.6 s至0.8 s时达到第一个峰值P1,其幅度增大;冲击力在0.8 s至1.0 s时逐步衰减并回升,由于溃坝来流被结构物分开,延缓了冲击破坏,壅水现象加剧,动能释放而势能累积;冲击力在1.0 s至1.2 s时达到第二个峰值P2,水位逐渐抬升至最高点,能量复杂切换;冲击力在1.2 s至1.3 s时突降,水位处于回落拐点;冲击力在1.3 s

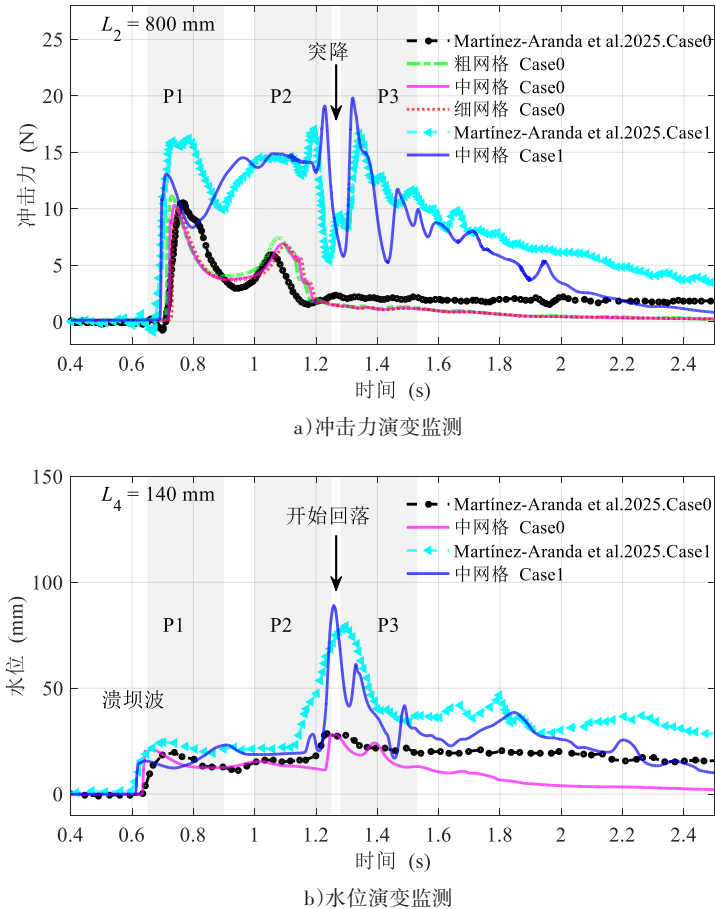


图3 冲击力和水位监测结果

Fig. 3 Monitoring results of impact force and water level

至 1.4s 时达到第三个峰值 P3, 骤然回落的水体再次冲击结构物, 此后, 冲击力逐渐衰减。

Case1 与 Case0 的表现存在差异, Case1 的上游流体质量较多, 冲击力峰值增加至 3 个。根据牛顿流体静水压理论 $P=\rho gh$, 在流体密度和重力加速度固定的情况下, P 与水位 h 呈正相关关系; Case1 冲击力峰值 P2 和 P3 之间存在突降, 而水位处于高位, 因此, 非牛顿流体冲击力与水位关系不符合牛顿流体静水压理论; Martínez-Aranda 等^[12]考虑了非牛顿流体的剪切应力、屈服应力等因素, 推导出等效重力关系如下:

$$P = \rho \left(g + \frac{D\bar{v}_z}{Dt} \right) h \text{ 和 } g' = g + \frac{D\bar{v}_z}{Dt}, \quad (10)$$

式中: $\bar{v}_z$ 为深度平均的竖向速度; 非牛顿流体的冲击力响应区别于牛顿流体的静水压变化, 其载荷分析受等效重力 g' 影响。等效重力上升可增大冲击力; 在冲击力峰值 P2 和 P3 的突降区域, 水位开始回落, 结合水位斜率, $\frac{D\bar{v}_z}{Dt} < 0$ 则等效重力大幅减小, 冲击力骤降; 反复波动将撕扯并破坏结构物。

2.1.4 三维流场动力演变分析

在冲击力和水位多源数据融合分析基础上, 进一步耦合多过程流场信息, 探明水动力响应特征, 有助于识别风险源及指导防灾工作, 不同时刻的三维流场动力演变过程见图 4。

时间为 0.65 s 时, 溃坝流体从决口处涌出, 迅速形成冲积扇堆积体系, 受黏塑性影响, 冲积扇轮廓规则且完整, 流体充分延展。三维流场速度分布差异大, 冲积扇前缘速度增大, 向前演进并冲击平板结构物, 坝体缺口两侧的流体逆向速度增大, 溯源冲击并淘蚀两侧坝体, 不利于坝脚局部安全与整体抗冲稳定性, 这是次生破坏的诱因之一。

时间为 1.00 s 时, 溃坝流体均沿着平板结构物爬升, 非牛顿流体剪切稀化, 流体动能释放, 贴壁爬升。随着溃坝来流补给质量由 9.0 kg 增大到 29.8 kg, Case1 工况发生越浪, 剪切稀化将放大上游流体质量的差异, 冲击强度进一步增大, 爬升前缘速度大且动能充足, 高动能维持壁面区域高剪切环境,

使流体保持低黏度流动特性, 溃坝流体越过结构顶部, 呈现出自由铺展流动状态。

时间为 1.20 s 时, Case0 工况的上游流体质量不足以支撑来流动能, 屈服应力和重力阻碍进一步流动, 爬升的流体回落。Case1 工况的上游流体质量足以顶推下游爬升的流体, 动态平衡并形成壅水效应。两组工况平板结构物下游尾流尚未闭合, 靠近平板结构物后方的尾流为逆向流速, 溯源侵蚀平板结构物后方基础, 回流区范围从坝体扩展至平板结构物, 分流通过平板结构物两侧的补给流体推动尾流持续发展, 扰动并重塑下游空间地形。

时间为 1.30 s 时, Case0 工况的上游流体补给动量不足, 交汇后的尾流未形成剧烈扰动, 冲击动能在平板结构物下游已大幅衰减, 仅在交汇中心线附近挤压形成局部隆起, 流场结构趋于平顺。Case1 工况的流体回落, 表面流速为负值, 撞击上游补进来流, 局部速度剧烈变化, 上游来流补充的动能推动平板结构物前缘堆积的流体, 平板结构物两侧分流的流体补给尾流, 尾流出现双向对冲和挤压汇聚现象, 冲淤变化进一步扩大并重塑受灾区域空间地形。

进一步阐述黏塑性流体近壁流场演变机制, 图 5 展示了平板结构物周围流场动力特征。

时间为 0.65 s 时, 二者在坝体缺口两侧表现出逆向速度, 而在平板结构物附近表现为正向速度, 短时间内空间速度分布差异大, 回流区溯源侵蚀布局完成, 这是坝体缺口持续扩张且坍塌不断发生的诱因之一。

时间为 1.00 s 时, 二者在水槽壁面掀起较高的薄层溃坝波并在平板结构物侧面形成射流, 卷吸周围流场并沿着主流方向延伸, 加剧平板结构物侧面基础的侵蚀破坏, 这是洪灾中桥墩、房屋等下游结构物基础失稳的诱因之一。

时间为 1.20 s 时, Case0 工况平板结构物前缘的流体塌陷并再次释放能量。Case1 工况平板结构物前缘的壅水增厚, 蓄积能量并形成二次砰击。自由面在短时间内经历了铺展、拉伸、收缩、折叠、融合等系列复杂变形, 流场的剧烈变化致使结构物周围

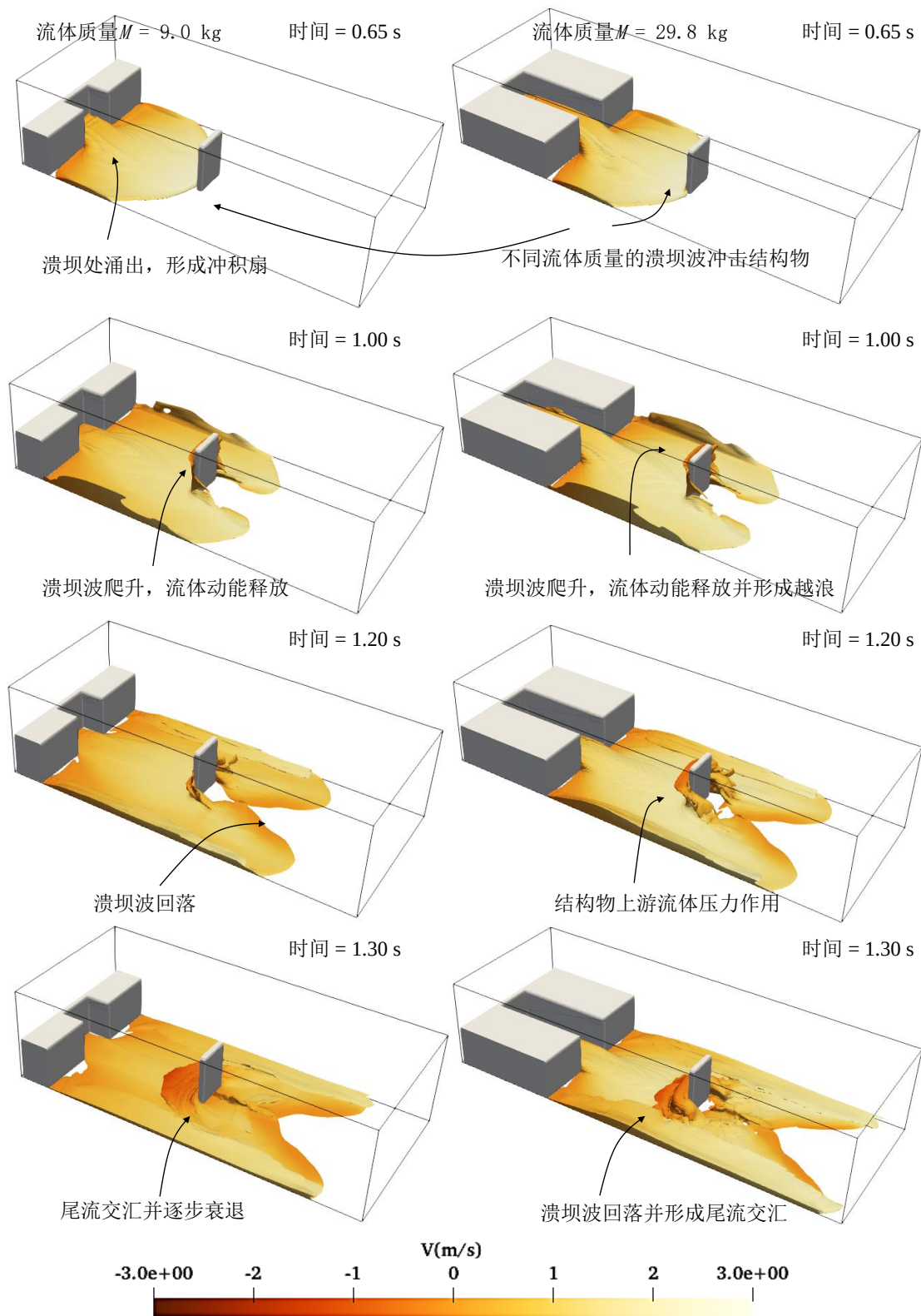


图4 不同流体质量的三维流场动力演变过程

Fig. 4 Dynamic evolution of the 3D flow field for different fluid masses

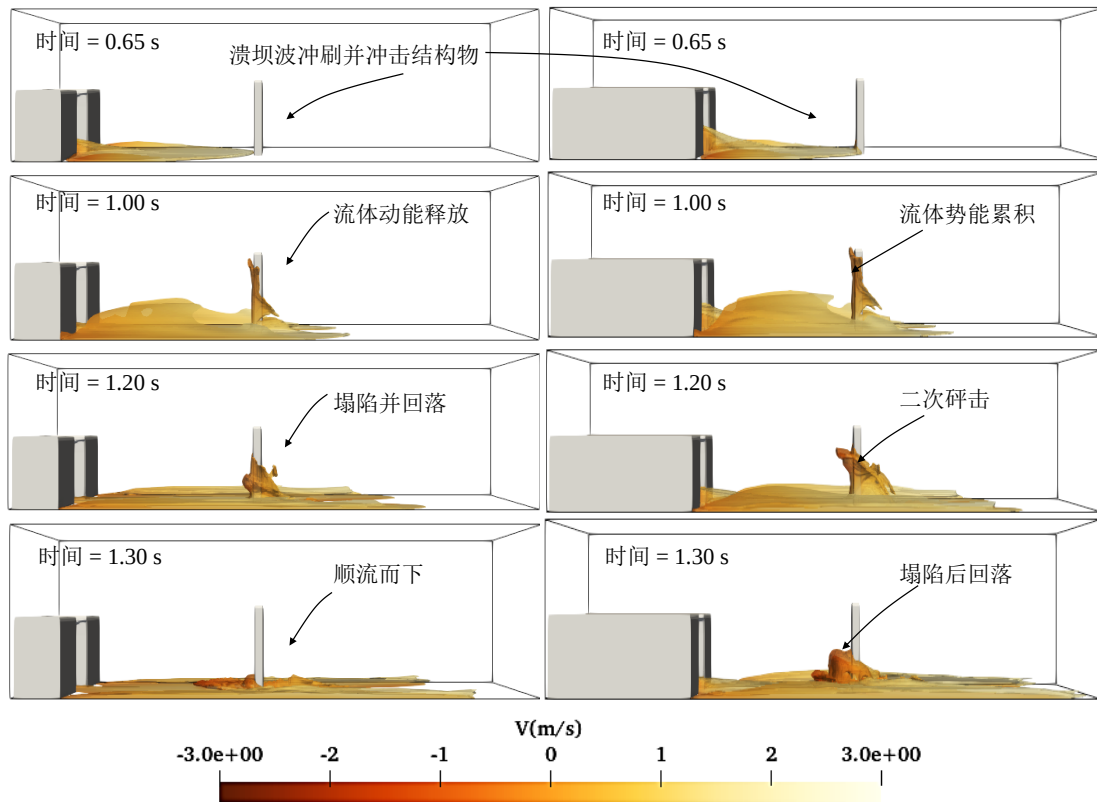


图5 平板结构物周围流场动力特征

Fig. 5 Dynamic characteristics of the flow field around flat-plate structures

受灾风险陡增,这是洪灾中落水人员试图靠近结构物而面临拍晕、溺水的诱因之一。

时间为 1.30 s 时,Case0 工况的溃坝流体平稳顺流而下;Case1 工况平板结构物前缘的溃坝流体塌陷并回落。受下泄主流、侧向约束流体供给,二者下游均覆盖大范围铺展的溃坝流体,这是洪灾之后地表淤泥增厚、空间地形重塑的诱因之一。

2.2 生物启发的结构类型优化及水动力学性能分析

2.2.1 模型构建

为突破传统工程局限,将微观生物流体调控机

制迁移至宏观灾害防护具有重要价值。殷雅俊等^[22]研究了主血管和分支血管连接方式(图6),分析了直角型、钝角型和锐角型拓扑中组织液流动过程,阐述了组织液在钝角型拓扑结构中流动具有很好的有序度;基于生物启发,在黏塑性溃坝冲击下,将下游结构物的外形优化为钝角型拓扑结构是否具备优势?

结合上述问题,自然选择提供了筛选导向,海洋生物进化出了适配复杂水动力环境的外形,根据 Zheng 等^[23]研究,斑海豹和灰海豹的胡须外形可调控流动并保护结构安全。图7为海豹胡须启发和结

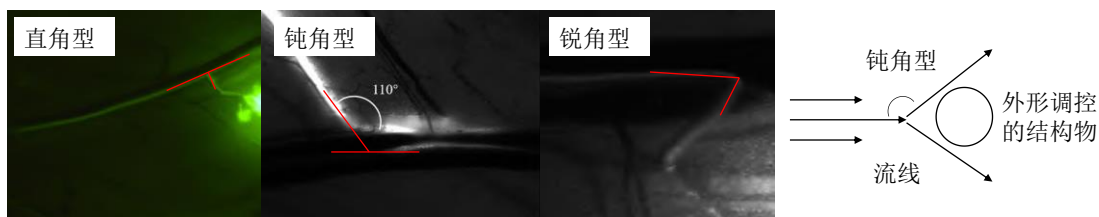


图6 主血管和分支血管分叉流动结构

Fig. 6 Flow structures at the bifurcation of main vessels and their branch vessels

构类型优化示意图,圆柱的外形类似海豹胡须圆润的外形结构,选用方柱的棱角外形作为对比。二者直径均为 B_1 ,高度均为 H_1 ,阻水率仍保持为 0.2,中

心位置与平板结构物一致;通过生物启发及关键数据以期为洪灾空间演变、下游结构物优化设计提供参考。

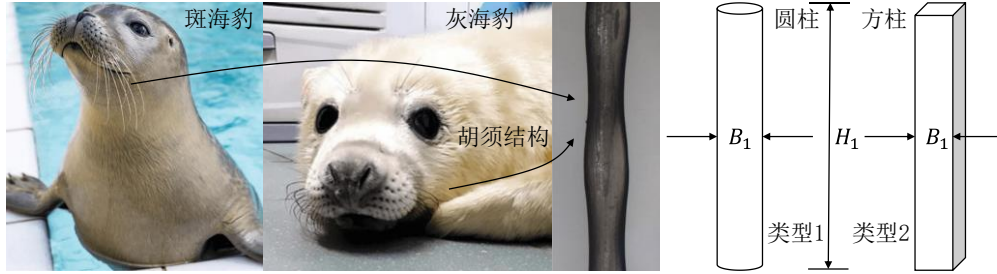


图7 海豹胡须的启发和结构类型优化

Fig. 7 Bio-inspiration from seal whiskers and optimization of structural types

2.2.2 冲击力、冲量和水位演变分析

冲击力、冲量和水位监测结果见图8,圆柱的冲击力主要表现为单个峰值,抬升后的水位同样是单个峰值;而方柱的冲击力呈现3个峰值,首次抬升后的水位会再次抬升,表现为多个峰值;方柱冲击力峰值约为圆柱冲击力峰值的2倍,通过积分可得到方柱相较于圆柱增加的冲量。根据式(10),圆柱周围水位波动不大, $\frac{D\bar{v}_z}{Dt}$ 无陡增或陡降,存在单个冲击力峰值区 P1;方柱周围水位变化类似平板, $\frac{D\bar{v}_z}{Dt}$ 表现出陡增或陡降,冲击力呈现峰值区和突降区;此外,从等式关系分析视角,削弱动量变化亦可减少冲量。

圆柱工况的冲击力在 0.6 s 至 0.8 s 时达到第一个峰值 P1,结构物前方水位迅速抬升,下泄的主流释放大量动能;冲击力在 0.8 s 至 1.0 s 时逐步衰减并回升,受溃坝来流补给和圆柱结构物阻挡,结构物前方水位保持平稳后微抬,流体的势能持续累积;冲击力在 1.0 s 至 1.2 s 时保持平稳,结构物前方水位变化不大;在此之后,冲击力和结构物前方水位逐步衰退。

方柱工况的冲击力在 0.6 s 至 0.8 s 时达到第一个峰值 P1,动能释放并作用于方柱;冲击力在 0.8 s 至 1.0 s 时逐步衰减并回升,方柱的棱角分离扰动下泄主流,动能释放而势能累积;冲击力在 1.0 s 至

1.2 s 时达到第二个峰值 P2,水位处于急剧抬升阶段,动量变化显著,冲量迅速增大,迎流面和棱角易造成应力集中而出现结构表面开裂损伤;冲击力在 1.2 s 至 1.3 s 时突降,水位处于回落拐点,撞击、环绕方柱结构物的流体质量减少,动量变化减少,冲量迅速减小;冲击力在 1.3 s 至 1.4 s 时达到第3个峰值 P3,回落的流体再次冲击结构物,撞击、环绕方柱结构物的流体质量增大,动量变化增大,砸落的流体补充入下泄主流促使结构表面的压力增大,冲量局部增大;在此之后,冲击力、冲量和水位逐渐衰减。

2.2.3 三维流场动力演变分析

进一步分析大流量黏塑性溃坝流体冲击圆柱和方柱的动力响应特征,梳理流场速度变化、流态转化等灾害链作用机理,圆柱和方柱结构的三维流场动力演变过程见图9。

时间为 0.65 s 时,该阶段属于灾害链启动环节,下泄主流迅速铺展成冲积扇,整体形成“近端厚积”的流态。区别于平板结构物的轻薄,圆柱和方柱更厚,冲积扇前缘已出现局部爬升和分流,轮廓形状规整且无破碎。

时间为 1.00 s 时,该阶段属于灾害链成型环节,速度集中于冲积扇前缘,流体环绕于结构物,越浪致使作用于方柱的环绕质量增大,方柱动量变化大于圆柱,冲量提升更多;纵向推进的流体,连接上游

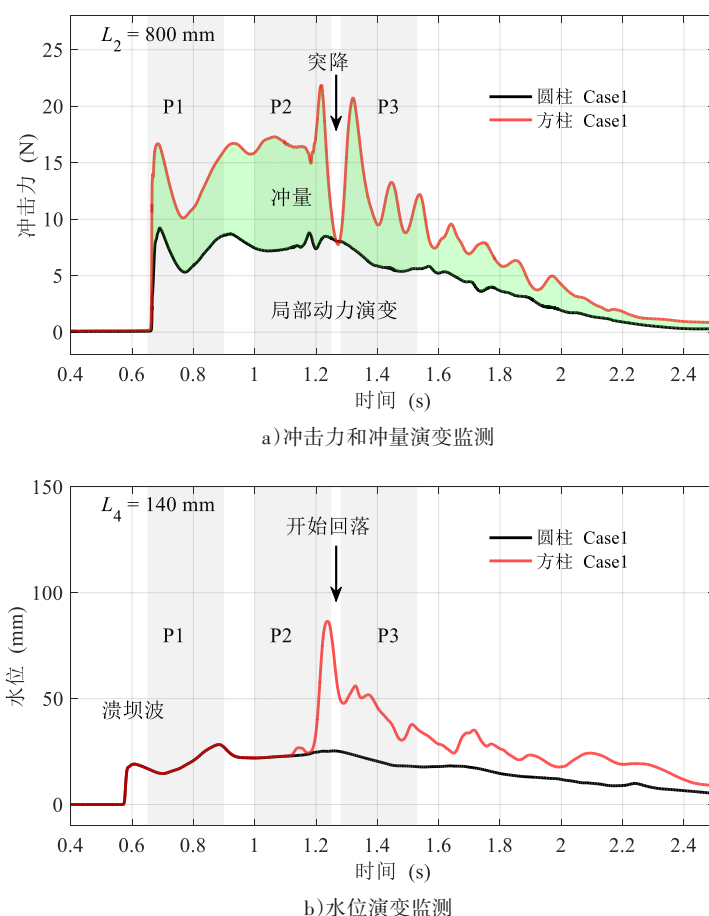


图8 冲击力、冲量和水位监测结果

Fig. 8 Monitoring results of impact force, impulse and water level

和中游,形成“中端连片”的流态。

时间为1.20 s时,该阶段属于灾害链加强环节,圆柱工况的溃坝波持续作用并形成尾流交汇,方柱工况的溃坝波塌陷并形成二次砰击。环绕圆柱的溃坝流体形态变化不大,而下泄主流补给的动能随着坝体内流体的流失而逐渐下降,该过程动量变化不大;环绕方柱的溃坝流体砸落后继续冲击结构物,冲击力增大且包裹结构物作用时长增加,冲量陡增;流场影响范围扩大,形成“远端广覆”的流态。

时间为1.30 s时,该阶段属于灾害链延伸环节,圆柱工况的溃坝波流动演化平稳,方柱工况的溃坝波回流并形成尾流交汇。上游溯源侵蚀,中游冲淤扩散,下游尾流对冲,地形出现“全域重塑”的受灾流态^[24]。

进一步论述生物启发外形的减灾优势,圆柱和

方柱结构物周围流场动力特征见图10。

时间为0.65 s时,在圆柱和方柱前缘均形成溃坝波局部爬升,正向速度集中且动能强劲,两侧射流形成下切基床的流态。

时间为1.00 s时,溃坝波爬升,圆柱和方柱承载冲击力作用的力矩和范围增大,方柱的棱角结构较之圆柱的平顺结构,流动更易分离并形成高速射流;这是圆形在抑制流动分离上的应用。

时间为1.20 s时,方柱壅水严重而圆柱曲面分流弱化壅水,方柱两侧射流可从壅水中汲取流量,射流增厚并持续破坏桩基;这是圆形在弱化壅水上的应用。

时间为1.30 s时,圆柱前缘溃坝波流态稳定;方柱前缘溃坝波塌陷并回落,受黏塑性流体影响,并未出现清水溃坝的水花飞溅及能量空中释放现象,

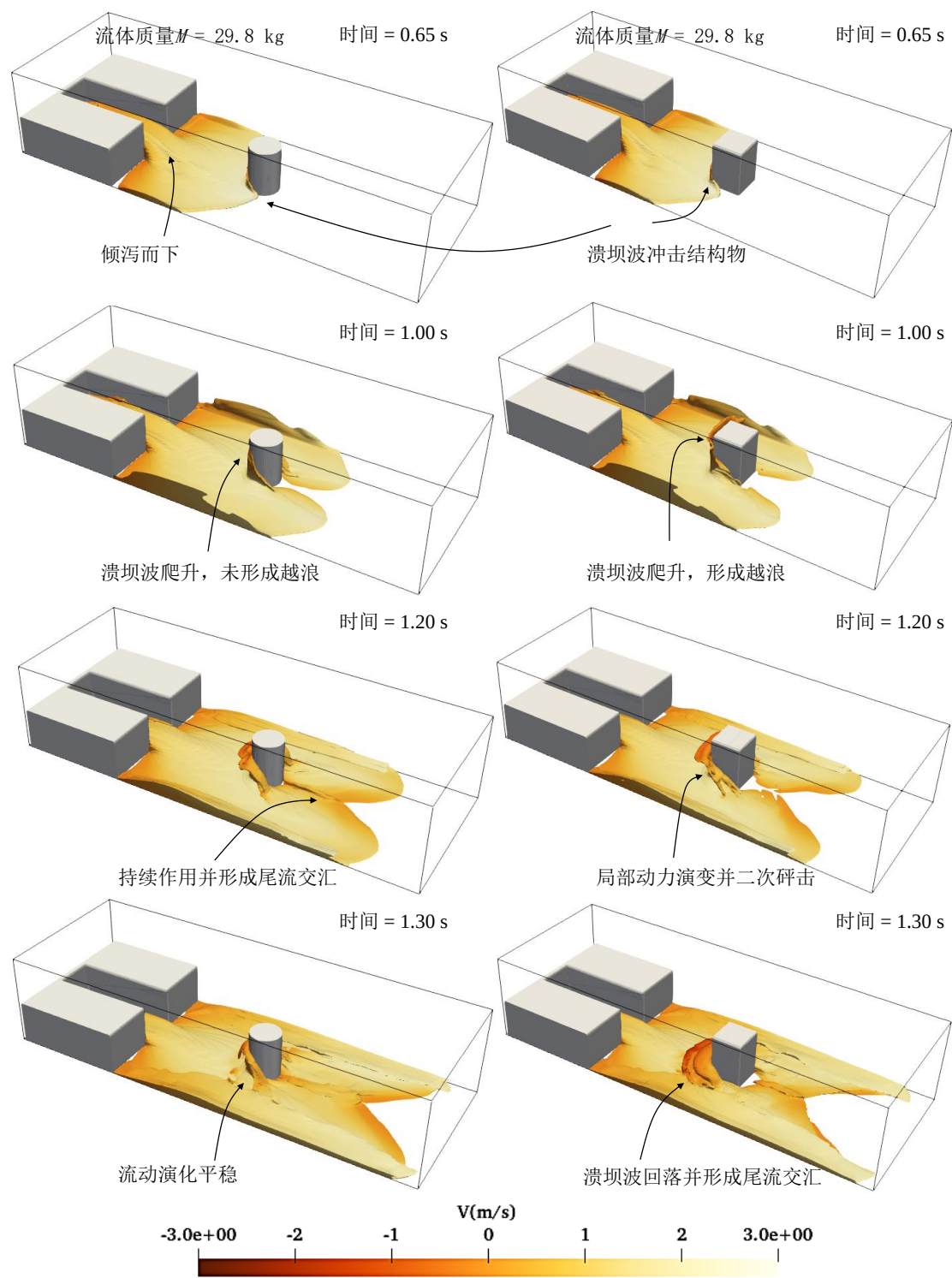


图9 不同结构类型的三维流场动力演变过程

Fig. 9 Dynamic evolution of 3D flow field for different structural types

即能量倾泻于方柱及局部地基；这是圆形在流态保持上的应用。

3 结论

通过构建三维数学模型,开展了生物启发外形调控下三维黏塑性溃坝冲击结构物的动力响应数

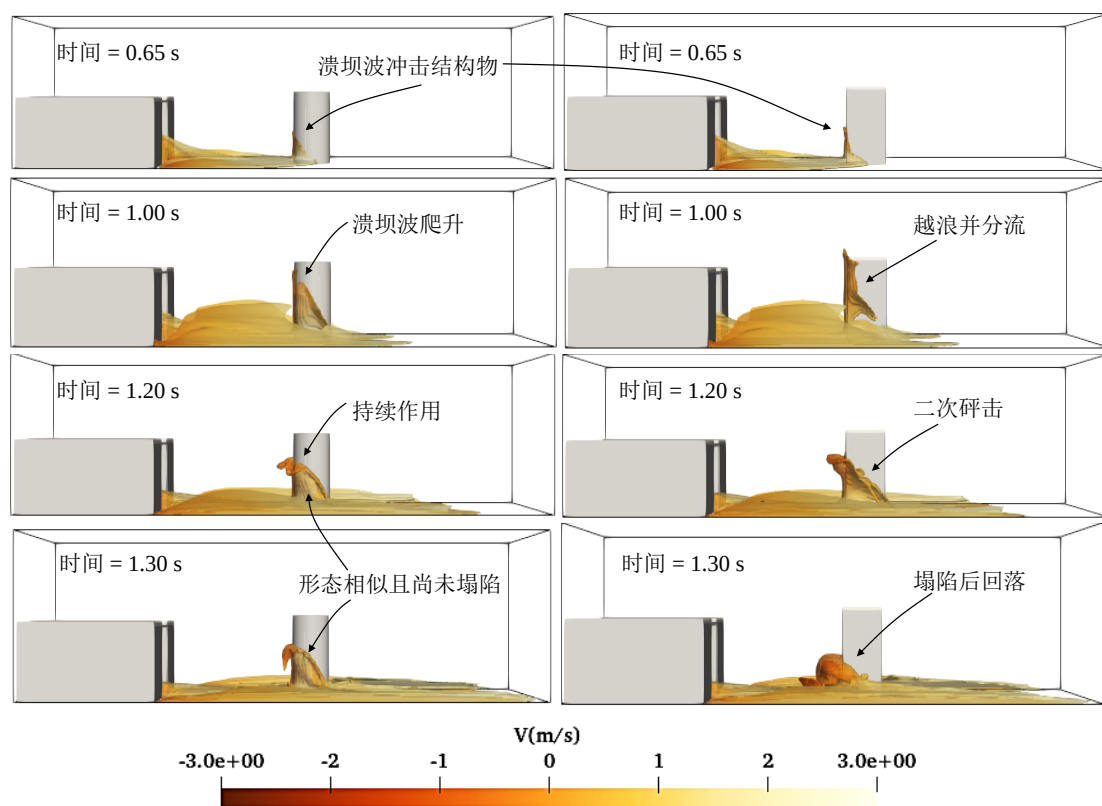


图10 圆柱和方柱结构物周围流场动力特征

Fig. 10 Dynamic characteristics of the flow field around cylindrical and square columns

值模拟分析,验证了模型可靠性,阐述了非静水压力效应,构建了生物启发技术与防灾减灾研究的联系。

a)当前三维模型的预报结果与物理试验结果具有很好的一致性,预报极值的最高精度可达98.00%,极值出现时间的相对误差可控制在3.20%以内;可复现黏塑性溃坝的复杂动力响应过程,精细化捕捉流态演变特性,精准研判回流区溯源侵蚀、越浪、局部射流等动态致灾风险。

b)增大上游来流质量,带棱角的平板或方柱结构,冲击力呈现为多个峰值区并伴有突降区,其大幅波动不利于下游构筑物安全防护工作;此外,非牛顿流体的冲击力响应区别于牛顿流体的静水压力变化,受等效重力 $g' = g + \frac{D\bar{v}_z}{Dt}$ 影响,冲击力存在非静水压力效应。

c)依托生物启发技术,量化基于海豹胡须生物启发的圆柱与棱角分明的方柱二者的动力响应特

性,在其他条件一致条件下,相同阻水率的圆柱峰值冲击力比方柱减少约50%且冲量大幅减小,流线型可削弱动量变化进而减少冲量。

参考文献:

- [1] 李言昂,韩培锋,黄世杰,等. 堰塞坝溃决机理研究热点与趋势分析[J]. 人民珠江, 2025, 46(8): 35-49.
Li Yan'ang, Han Peifeng, Huang Shijie, et al. Research Hotspots and Trend Analysis of Barrier Dam Break Mechanism [J]. Pearl River, 2025, 46(8): 35-49. (in Chinese)
- [2] Chuang Weiliang, Chen Shengyuan. Laboratory observation of impact pressure, fluid velocity, and air fraction during dam-break impacts on a square prism[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(7): 077129.
- [3] 刘占奎,郭秋歌,杨洋,等. 堤坝溃决计算方法现状及展望(II):二维和三维数学计算模型[J]. 地质科技通报, 2026, 45(2): 327-337.
Liu Zhankui, Guo Qiuge, Yang Yang, et al. Current status and prospects of calculation methods for dam and dike failures (II): Two-dimensional and three-dimensional mathematical models

- [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2026, 45 (2): 327–337. (in Chinese)
- [4] 李明. 复杂地形泥石流全过程动力学数值模拟及综合风险评估方法[D]. 长沙:中南大学,2023:79.
- Li Ming. Numerical simulation of the whole process dynamics of debris flow over complex terrain and comprehensive risk evaluation method [D]. Chang Sha: Central South University, 2023:79. (in Chinese)
- [5] 杜镇瀚,钟启明,周家文,等. 近坝库岸滑坡涌浪溃坝灾害链模型试验方法[J]. *地球科学*, 2026,51(4):1476–1488.
- Du Zhenhan, Zhong Qiming, Zhou Jiawen, et al. Experimental Methodology for Modeling Disaster Chain of Near-Dam Landslide Generated Waves and Resultant Dam Breach [J]. *Earth Science*, 2026,51(4):1476–1488. (in Chinese)
- [6] Soares-Frazão S, Zech Y. Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2007, 45(S1): 27–36.
- [7] 敬小非,尹光志,魏作安,等. 基于不同溃口形态的尾矿坝溃决泥浆流动特性试验研究 [J]. *岩土力学*, 2012, 33 (3): 745–752.
- Jing Xiaofei, Yin Guangzhi, Wei Zuo'an, et al. Study of tailings dam-break surges with floating slurry in model experiment in different collapse gates [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 (3): 745–752. (in Chinese)
- [8] Aureli F, Dazzi S, Maranzoni A, et al. Experimental and numerical evaluation of the force due to the impact of a dam-break wave on a structure [J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 76: 29–42.
- [9] 张宏刚,张园园,方有令. 不同浑浊度溃坝流体流动特性研究 [J]. *人民长江*, 2021, 52 (10): 220–224.
- Zhang Honggang, Zhang Yuanyuan, Fang Youling. Study on flow characteristics of dam-breach fluid with different turbidity [J]. *Yangtze River*, 2021, 52 (10): 220–224. (in Chinese)
- [10] 黄宜超,聂闻,芦松,等. 不同降雨工况下尾矿库溃坝模型试验及潜在经济损失评估研究 [J]. *矿业研究与开发*, 2022, 42 (9): 204–212.
- Huang Yichao, Nie Wen, Lu Song, et al. Study on Model Test and Potential Economic Loss Assessment of Tailings Dam Break Under Different Rainfall Conditions [J]. *Mining Research and Development*, 2022, 42 (9): 204–212. (in Chinese)
- [11] 周昔东,袁浩,苏立君,等. 湿床溃坝波演进特性试验研究 [J]. *工程科学与技术*, 2025, 57 (6): 18–26.
- Zhou Xidong, Yuan Hao, Su Lijun, et al. Experimental Study of Wet-bed Dam Break Wave Evolution Properties [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57 (6): 18–26. (in Chinese)
- [12] Martínez-Aranda S, Segovia-Burillo J, García-Palacín I, et al. Experimental study of the viscoplastic dambreak wave dynamics and the impact force exerted on rigid structures [J]. *Physics of Fluids*, 2025, 37(10):106617.
- [13] Brufau P, Garcia-Navarro P. Two-dimensional dam break flow simulation [J]. *International Journal for numerical methods in fluids*, 2000, 33(1): 35–57.
- [14] 向浩,陈斌. 非牛顿流体二维溃坝问题的数值模拟 [J]. *工程热物理学报*, 2012, 33 (8): 1338–1340.
- Xiang Hao, Chen Bin. A Numerical Simulation of Non-Newtonian 2D Dam-Break Flows [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33 (8): 1338–1340. (in Chinese)
- [15] Kao H M, Chang T J. Numerical modeling of dambreak-induced flood and inundation using smoothed particle hydrodynamics [J]. *Journal of hydrology*, 2012, 448: 232–244.
- [16] 乔成,潘华利,欧国强. 两相光滑粒子流体动力学方法在动床溃坝问题中的应用 [J]. *中国科学院大学学报*, 2017, 34 (5): 625–632.
- Qiao Cheng, Pan Huali, Ou Guoqiang. Application of two-phase smoothed particle hydrodynamics method to dam break over movable bed [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 34 (5): 625–632. (in Chinese)
- [17] Issakhov A, Zhandaulet Y. Numerical study of dam break waves on movable beds for various forms of the obstacle by VOF method [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 209: 107459.
- [18] Simsek O, Islek H. 2D and 3D numerical simulations of dam-break flow problem with RANS, DES, and LES [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 276: 114298.
- [19] 刘汉龙. 生物建造体系与展望[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024,46(4):1–22.
- Liu Hanlong. Biogenic construction: System and perspectives [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46 (4):1–22. (in Chinese)
- [20] 钟启明,蒋正淳,陈灵淳,等. 土石坝漫顶溃坝过程模拟技术研究进展 [J]. *水科学进展*, 2025, 36 (6): 1084–1096.
- Zhong Qiming, Jiang Zhengchun, Chen Lingchun, et al. A state-of-the-art review on the simulation technologies of overtopping-induced breaching process of earth-rock dams [J]. *Advances in Water Science*, 2025, 36 (6): 1084–1096. (in Chinese)
- [21] Kawano A. A simple volume-of-fluid reconstruction method for three-dimensional two-phase flows [J]. *Computers & Fluids*, 2016, 134: 130–145.
- [22] 殷雅俊,孔钺雅,余晓彬. 组织液循环运动学(Ⅱ):次流

- 道——分支血管周围间隙 [J]. 力学季刊, 2025, 46 (2): 291–302.
- Yin Yajun, Kong Yiya, Yu Xiaobin. The Kinematics for Interstitial Fluid Circulation (II): Secondary Passageway-Perivascular Space Around Branched Vessels [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2025, 46 (2): 291–302. (in Chinese)
- [23] Zheng X, Kamat A M, Cao M, et al. Wavy whiskers in wakes: explaining the trail-tracking capabilities of whisker arrays on seal muzzles[J]. Advanced Science, 2023, 10(2): 2203062.
- [24] 孙振宇, 周运浩, 张勤旭, 等. 基于二维浅水方程的胖头泡蓄滞洪区洪水演进数值模拟 [J]. 人民珠江, 2024, 45 (6): 82–91.
- Sun Zhenyu, Zhou Yunhao, Zhang Qinxu, et al. Numerical Simulation of Flood Evolution in Pangtoupao Flood Storage Area Based on Two-Dimensional Shallow Water Equation [J]. Pearl River, 2024, 45 (6): 82–91. (in Chinese)

Numerical simulation analysis on dynamic responses of structures impacted by three-dimensional viscoplastic dam-break flows under bio-inspired shape regulation

XU Jingwei

(Anglo-Chinese College, Fuzhou 350101, China)

Abstract: The mudflow from dam breaches has a wide impact range and significant destructive power, with flow characteristics distinct from clear water. Precisely elucidating its disaster-causing mechanisms holds practical significance. By constructing a parallel framework using OpenMP and establishing a constitutive model based on the Herschel-Bulkley rheology, the APPLIC (Approximated PLIC) method was employed to reconstruct the free surface. A self-developed three-dimensional mathematical model was utilized for viscoplastic dam breach hydrodynamic analysis, revealing the following findings: the current model's predictions align with physical experimental results; the impact force response of non-Newtonian fluids differs from Newtonian hydrostatic pressure variations, governed by equivalent gravity, and exhibits non-hydrostatic pressure effects. Inspired by seal whisker biologics, adjusting the shape to achieve the same drag coefficient reduced the peak impact force of circular cylinders compared to square cylinders by approximately 50%, while significantly diminishing impulse. The streamlined cylinder mitigated momentum changes, thereby reducing impulse. Multi-source data validated the model's reliability, elucidated non-hydrostatic pressure effects, linked biological inspiration with disaster prevention, and provided references for identifying dam breach disaster chains and mitigation applications.

Keywords: dam break; Herschel-Bulkley model; approximated-PLIC scheme; OpenMP technique; bio-inspiration

(责任编辑:李燕珊)