

李勇, 李松平, 杨炬敏, 等. 基于数值模拟的溢洪道水流沿程变化与护坡高度合理性分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 399-408. LI Y, LI S P, YANG J M, et al. Analysis of the change of spillway flow edge and the rationality of slope protection height based on numerical simulation[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 399-408. (in Chinese)

基于数值模拟的溢洪道水流沿程变化与护坡高度合理性分析

李勇^{1,2}, 李松平^{2,3}, 杨炬敏⁴, 袁吉娜⁵, 刘洁⁶

(1. 河南省河川工程监理有限公司, 郑州 450047; 2. 河南省水利工程安全技术重点实验室, 郑州 450003; 3. 河南省水利科技应用中心, 郑州 450003; 4. 灵宝市窄口水务管理局, 河南 灵宝 472599; 5. 河南科源水利建设工程检测有限公司, 郑州 450003; 6. 黄河科技学院, 郑州 450063)

摘要: 为研究溢洪道水力特性, 验证工程设计方案合理性。基于 SolidWorks 软件建立溢洪道三维数值模型, 使用 Fluent 软件, 运用 VOF 方法和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型闭合 N-S 方程, 对沟水坡水库溢洪道进行数值模拟。通过数值模拟得到的溢洪道水力特性数据与物理模型试验结果进行分析对比, 并进一步分析溢洪道水流沿程变化规律, 研究表明数值模型的可信度较高, 可采用数值仿真方法对溢洪道结构进行优化。同时发现在 30 a 一遇洪水工况下溢洪道混凝土护坡高度不能满足正常泄洪的问题, 提出在斜坡段设置两级水垫塘、加高消力池段护坡高度和缩短尾水渠长度的优化方案; 利用数值模拟, 分析验证了优化方案的可行性, 为工程设计优化提供依据。研究成果为同类溢洪道工程采用数值仿真模拟提供了技术支持。

关键词: 数值模拟; 溢洪道; 水面线; 护坡高度; 优化方案

中图分类号: TV131.61 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0041

水库的安全运行关系着下游两岸居民的生命财产安全, 因此大坝安全管理与风险防控一直是重要的关注点^[1-2]。溢洪道作为水库重要的建筑物工程, 泄流能力和安全运行直接影响到水库的安全。为验证溢洪道设计合理性, 及时发现溢洪道安全风险, 在不同工况下对溢洪道进行模拟分析是较为有效的典型手段。溢洪道运行期情况的模拟主要有物理模型试验^[3-4]和数值模拟^[5-6]两种方法。物理模型试验方法是传统且应用较广的方法, 由于模型试验选取的比尺较小, 受到的干扰因素较多, 一个小的测量误差在原型上经过比尺放大后会降低试验准确性。数值模拟方法是 20 世纪六七十年代随着计算机技术的高速发展逐渐发展起来的新技术。随着气液两相流理论和数值模拟技术发展, 通过计算机软件求解描述流体运动的 N-S 方程, 可以得到完整的流场信息, 数值模拟技术也逐渐成为研究复杂流动问题的重要技术方法。许多专家学者^[7-9]对三

维数学模型在溢洪道的设计和除险加固过程中的应用进行了研究。近年来, 以 $k-\varepsilon$ 紊流模型为基础的三维数值模拟手段逐渐在溢洪道水力特性研究中得到了广泛应用^[10], Renormalization Group (RNG) $k-\varepsilon$ 湍流模型是在 $k-\varepsilon$ 模型的基础上对方程进行了改进, 提高了模型的计算精度, 使模型的适用范围更加广泛^[11-12], 通过建立溢洪道的三维模型, 并使用软件对模型流体仿真模拟^[13-15], 分析溢洪道不同方案下的泄流能力、水位流量关系和水面线等, 为溢洪道优化设计和安全运行提供了依据。

采用模型试验与数值模拟相结合的方法, 以沟水坡水库除险加固工程溢洪道作为研究对象, 开展试验研究, 分析溢洪道的沿程水面高程、水流流速流态、压力、流量及消能效果等水力特性, 为工程设计提供依据。本文主要从分析各级泄量时的水面线来验证溢洪道护坡高度的合理性方面, 提出优化方案。

收稿日期: 2023-07-10 修回日期: 2024-01-25 网络出版时间: 2024-03-14

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20240312.1814.012>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879115); 河南省科技厅软科学研究项目(232400411122)

作者简介: 李勇(1976—), 男, 河南邓州人, 高级工程师, 主要从事水工结构研究。E-mail: 2074173690@qq.com

通信作者: 李松平(1981—), 男, 甘肃静宁人, 高级工程师, 主要从事水力学和河湖长制研究。E-mail: lsp628@163.com

1 工程概况

沟水坡水库属中型水库,工程等别为Ⅲ等,溢洪道泄水建筑物级别为 3 级,原方案溢洪道平面布置见图 1。水库设计洪水标准为 50 a 一遇,校核洪水标准为 1 000 a 一遇;正常蓄水位和汛限水位均为 431.73 m。经调洪演算,30 a 一遇洪水位 435.62 m,溢洪道下泄流量 $492 \text{ m}^3/\text{s}$; 50 a 一遇洪水位 436.56 m,最大泄量 $688 \text{ m}^3/\text{s}$; 1 000 a 一遇洪水位 439.26 m,最大泄量 $1\,371 \text{ m}^3/\text{s}$;消能防冲工程防洪标准按 30 a 一遇洪水设计。溢洪道位于大坝左岸,为开敞式宽顶溢流堰,主要由引渠段、溢流堰段、陡坡段、消力池段和尾水渠段组成。桩号溢 0-123.278 ~ 溢 0+000 引渠段为梯形断面,渠底高程 431.73 m,两岸边坡坡比 1 : 1.5,坡顶高程 439.75 m,渠底宽度由 55 m 渐变至 45 m。桩号溢 0+000 ~ 溢 0+010 为溢流堰段,堰顶高程 431.73 m,过流断面为梯形,底宽 45 m,左岸边坡坡比为 1 : 1.2,右岸边坡坡比为 1 : 1.5,坡顶

高程 439.75 m。桩号溢 0+010 ~ 溢 0+141.4 为陡坡段,坡度为 1 : 4.5,底板高程从 431.73 m 降至 402.53 m,底宽由 45 m 渐变至 28 m,左岸边坡坡比为 1 : 1.2,右岸边坡坡比为 1 : 1.5,护坡顶高程从 439.75 m 降至 411.53 m。桩号溢 0+141.4 ~ 溢 0+186.4 为消力池,采用综合式消力池,池深 3.2 m,坎高 2.0 m,池长 45 m,底板高程 402.53 m,两岸边坡坡比为 1 : 1.5,坡顶高程为 411.53 m,护坡高度为 9 m。桩号溢 0+186.4 ~ 溢 0+455.987 为尾水渠段,断面型式为梯形断面,底宽 28 m,桩号溢 0+186.4 底板高程 405.73 m,底板纵向底坡 0.02,两岸边坡坡比采用 1 : 1.5,左岸护坡顶高程 411.53 m,右岸护坡顶高程 409.23 m。左岸护坡高度在桩号溢 0+206.727 处由 5.8 m 渐变至 3.5 m,右岸护坡高度为 3.5 m。桩号溢 0+455.987 之后接入原有河槽。溢洪道地基土岩性主要为第 6 层黄土状粉质壤土,尾水渠末端局部为砾卵石和中粉质壤土;底板和护坡采用 C25 钢筋混凝土结构。

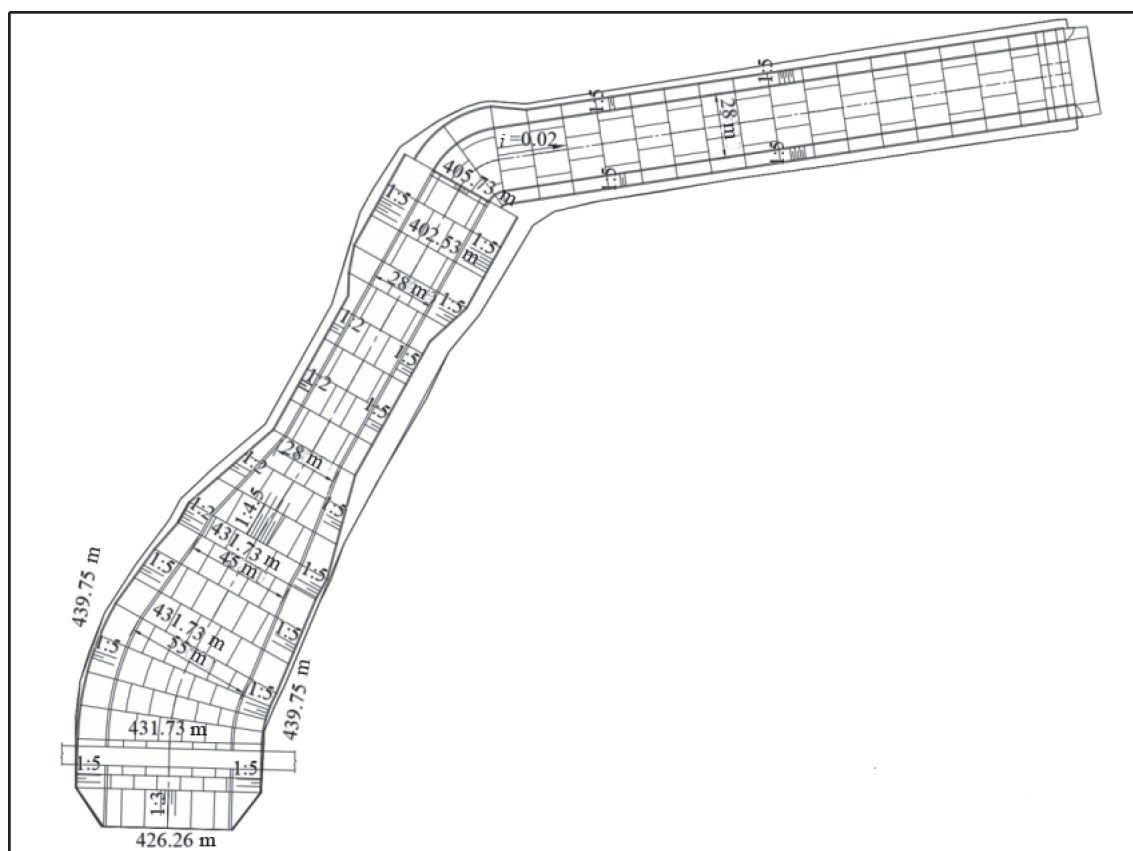


图 1 原方案溢洪道平面布置

Fig. 1 The original plan for the spillway layout

2 数值模型的建立及验证

SolidWorks 是一款专业的三维设计软件,由多

个功能模块组成,可以快速地完成三维数字模型的建立和数值模拟^[16]。Fluent 是一款通用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)软件,包括

湍流、单相流、多相流及流固耦合模型等,用于对流体流动、传热和质量交换等进行建模分析^[17-19],其系列适用于不同类型流动的求解器,包括不可压缩、可压缩和湍流。基于 SolidWorks 软件,对沟水坡水库溢洪道进行三维建模和仿真,采用 fluent 流体计算软件进行数值计算,对溢洪道结构进行优化研究^[20-23]。

2.1 控制方程

采用 RNG $k\sim\varepsilon$ 湍流模型的 k 、 ε 方程分别为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j})}{\partial x_j} + G_k + G_b - \rho \varepsilon + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j})}{\partial x_j} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon(G_k + C_{3\varepsilon} G_b)}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (2)$$

式(1)和(2)中: G_k 为由平均速度梯度产生的湍流动能, J ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; G_b 是由浮力产生的湍流动能, J ; $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$ 为有效黏性系数, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ 为湍流黏性系数, μ 为动力黏性系数, C_μ 为经验常数,取值 0.084 5; ε 为湍流耗散率; u_i 为 i 方向上的流体速度, m/s ; k 为湍流动能, J ; x_i 、 x_j 为空间坐标; α_k 、 α_ε 分别是 k 和 ε 有效普朗特数的倒数,取值均为 1.39; S_k 、 S_ε 为源项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数,取值分别为 1.42、1.68 和 0.09; R_ε 为湍流附加项。 R_ε 的计算公式为

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right) \varepsilon^2}{(1 + \beta \eta^3) k} \quad (3)$$

式中: η 为湍流时间尺度与平均流时间尺度之比, $\eta \equiv Sk / \varepsilon$; η_0 为 η 在均匀剪切流中的典型值,取值 4.38; β 为模型的常数,取值 0.012; C_μ 为经验常数。

2.2 建立模型

根据工程资料使用 SolidWorks 软件对溢洪道进行三维建模,采用 RNG $k\sim\varepsilon$ 湍流模型闭合 N-S 方程,基于有限体积法将控制方程在计算网格上进行离散,使用 Fluent 模拟得到下游冲刷坑三维流场分布。采用 VOF 模型进行计算,选择 Simple 算法来求解质量守恒和 N-S 方程,选取动量、湍流动能和湍流耗散率离散化的二阶迎风格式。重力加速度和工作压力分别设定为 9.81 m/s^2 和 $101\,325 \text{ Pa}$ 。所有方程的时间步长设置为 0.01 s,收敛精度设置为 0.000 1。

设置计算区域的出口边界条件为自由出流,自由水面以上的空气入口采用压力入口边界,总压强为大气压强,水流入口采用压力入口边界,服从静压分布,其他为壁面边界。由于消力池和末端尾水渠部分混凝土护坡高度设计不合理,在物理模型试验过程中,30 a 一遇洪水条件下消力池和尾水渠末端均出现溢槽现象。为方便模拟,对模型中消力池和尾水渠混凝土护坡顶部进行了加高处理,消力池段加高 4 m,尾水渠段加高 3.6 m,加高后的溢洪道三维模型和网格部分见图 2。

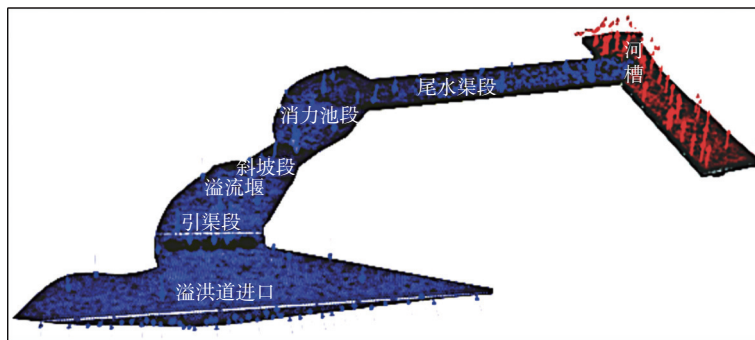


图 2 溢洪道三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of the spillway

2.3 数值模型验证

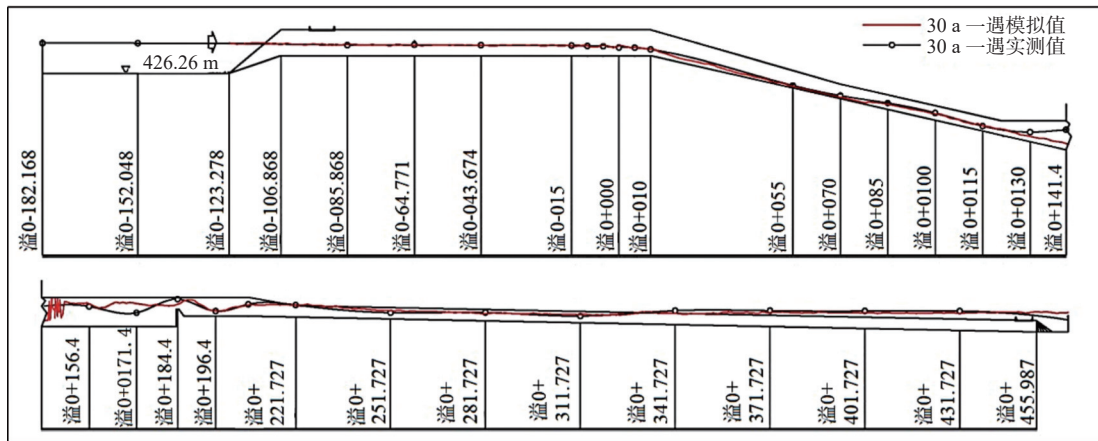
通过数值模型模拟值与物理模型实测值进行分析对比^[24]可知,在 30 a 和 50 a 一遇洪水条件下,溢洪道水面线模拟值与物理模型实测值仅在消力池段略有不同,水面线的整体相差较小,最大偏差值为 9.2%,模拟精度较高,见图 3。

模拟与实测值之间存在误差的主要原因有以

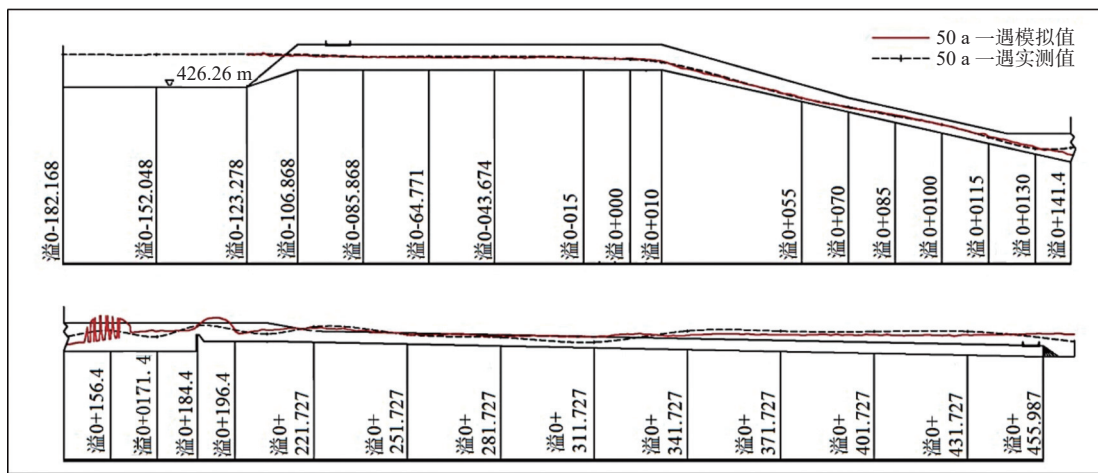
下 3 点:数值模拟是基于理论和假设建立的,与实际情况不完全相符,其中的一些参数是在特定的试验中获取的,并且还包一些经验参数;Fluent 采用迭代的方法进行计算,会产生迭代误差,导致计算结果与方程的精确解存在偏差;虽然减小网格尺寸可以提高计算精度,但同时也增加了计算量,因此必须舍弃一部分精度从而减少计算时间。为了提高数值模拟的准确性,通常采取以下方法:增加网格

的数量和质量,避免出现大的网格畸变或狭窄区域网格过度拉伸等问题,减小网格的纵横比;调整 Fluent 的求解算法参数,例如迭代次数、松弛因子等,

以获得更好的收敛性;确保边界条件和初始条件的设置准确,与实际情况相符。上述方法可以减小但不能消除 Fluent 模拟与试验之间的误差。



(1) 30 a 一遇洪水中轴水面线



(2) 50 a 一遇洪水中轴水面线

图 3 中轴线水面线模拟与实测对比

Fig. 3 Comparison of the simulated and measured values of the water surface line at the central axis

综上所述,数值模拟具有较高的可信度,可采用数值模拟的方法对原设计方案进行有针对性的修正和模拟。

3 数值模拟结果分析

3.1 水位流量关系

水位流量关系曲线可以更加直观地描述水位和当量流量的变化状况。选用多项式拟合曲线^[25]分析整合不同工况下流量-水位数据,得出 30 a、50 a 和 1 000 a 一遇 3 种工况下水位流量关系函数: $Q = -15.333H^2 + 13\ 682H - 3.05 \times 10^6$, 相关系数 $R^2 = 1$, 拟合效果较好,可供设计及运行单位参考使用。

3.2 原设计方案水流沿程变化与护坡高度合理性分析

经模拟分析,引渠段和溢流堰段水流比较稳定,

水位均处于护坡顶部以下。由于渠道断面束窄的原因,斜坡段在 30 a 和 50 a 一遇洪水工况下洪水水位虽不超过护坡顶部,但是下泄洪水过程中,斜坡段表面形成菱形水流,流态不稳定,当 1 000 a 一遇洪水下泄时,斜坡段右岸水位高度大于左岸,混凝土护坡高度不满足行洪需求。斜坡段水面线变化见图 4,在 30 a 和 50 a 一遇洪水条件下,水流进入消力池后产生淹没式水跃,由于上游跌落的水流产生的能量巨大,水流在消力池内剧烈翻滚,在 30 a 一遇洪水工况下左岸水位超过护坡顶部,水面最大高程为 412.87 m。在 50 a 和 1 000 a 一遇洪水工况下消力池水位均超过护坡顶部,消力池水面线变化见图 5。

尾水渠与消力池衔接的弯道海漫段在 50 a 一遇洪水工况下,此区域水位超过护坡顶部。原设计方案中尾水渠下游出口垂直衔接原有河槽,由于该

河槽位于好阳河的右侧,断面不足 10 m 且右岸为较高的黄土塬和村庄,水流出现顶托,在 30 a 一遇洪水条件下尾水渠出现严重的回水现象,回水长度达

到 120 m,最大回水高程达 407 m,高出尾水渠护坡顶部近 2 m,尾水渠段出现严重的溢槽现象。尾水渠水面线变化见图 6。

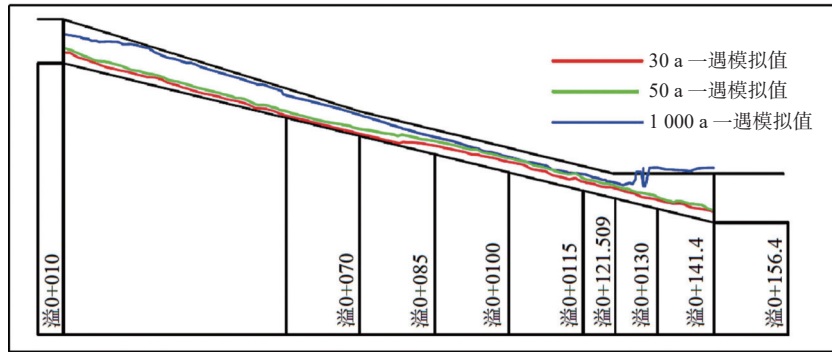


图 4 溢洪道斜坡段水面线变化

Fig. 4 Changes in the water surface line of the spillway slope section

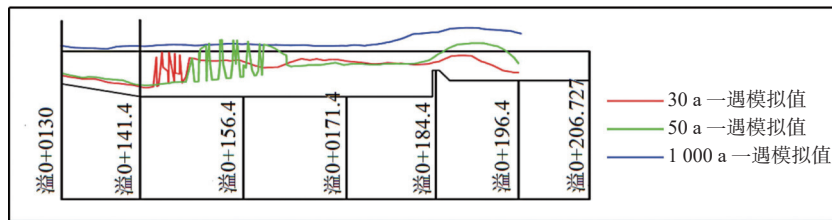


图 5 消力池水面线变化

Fig. 5 The water surface line of the pool changes

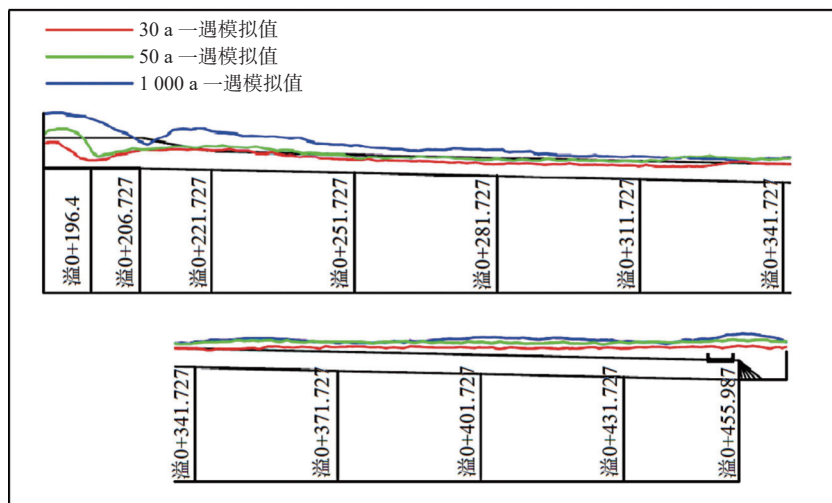


图 6 尾水渠水面线变化

Fig. 6 Changes in the water surface line of the tail drain

综上所述,斜坡段需增加消能设施,减小进入消力池的水流能量,改变洪水流态,降低水面高程;消力池、弯道海漫段和尾水渠段需增加混凝土护坡高度。

4 优化方案及分析

4.1 优化方案

为解决水流不稳导致水位过高的问题,提出溢

洪道优化方案,在溢洪道斜坡段底板设两级水垫塘消能设施。两级水垫塘结构尺寸见图 7,其中,1 级水垫塘在断面溢 0+055 与溢 0+067.55 之间,2 级水垫塘在溢 0+080.4 与溢 0+092.95 之间。为了提高水垫塘内水流的混掺和掺气,在 2 个水垫塘内各加设 2 个矩形墩,避免溢洪道斜坡段菱形波的形成,减小进入消力池的水流能量,改变洪水流态,从而降低水位。

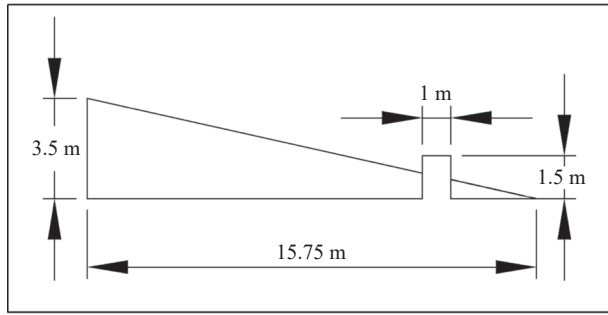
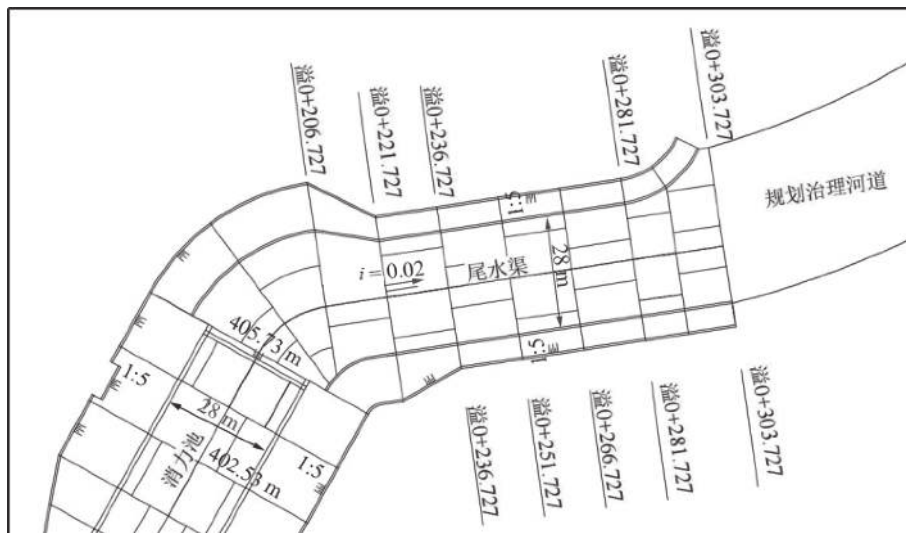


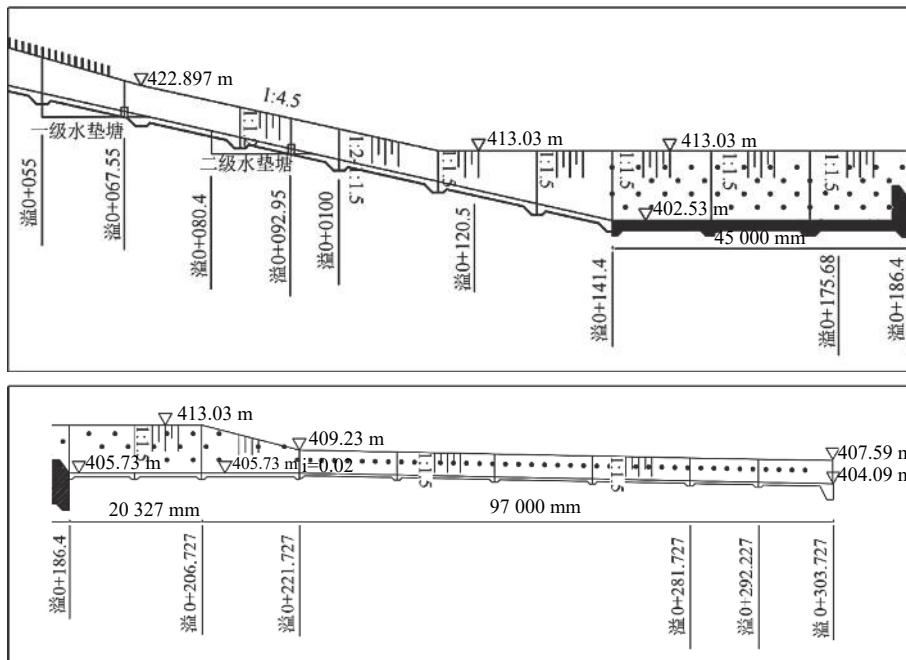
图 7 溢洪道优化方案 2 级水垫塘结构尺寸

Fig. 7 Structural dimensions of the level 2 cushion pond in the spillway optimization scheme

为了解决水流在下游尾水渠溢槽问题,对原尾水渠设计方案进行优化,优化方案布置见图 8。因桩号溢 0+303.727 下游为好阳河河道滩地,从水流形态和现状地形考虑,缩短尾水渠长度 152.26 m 至桩号溢 0+303.727 山体隘口处,在左岸设置半径为 24 m 弧度为 56°的圆弧裹头护坡,并整治下游被侵占的河道与尾水渠出口平顺连接,消除水流顶托,使洪水顺畅下泄。在大流量洪水下泄时,水流自然漫溢到好阳河河道滩地,以减小对右岸山体和村庄的冲刷。



(a) 尾水渠平面布置图



(b) 消力池和尾水渠纵剖图

图 8 优化方案布置

Fig. 8 Optimization plan layout

同时,按照 30 a 一遇洪水设计标准,消力池和弯道海漫段护坡高度增加 1.50 m,高程不低于 413.03 m。

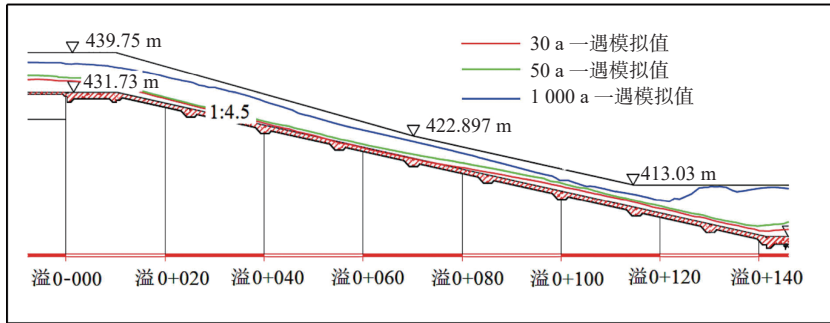
由于尾水渠缩短,尾水渠护坡高度仍采用原设计值 3.5 m,在桩号溢 0+303.727 处护坡高程为 407.59 m。

4.2 仿真结果分析

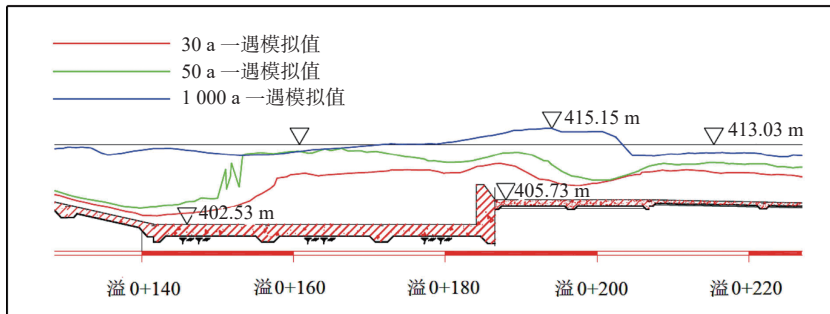
依据优化方案对溢洪道进行三维流场数值模拟,

模拟后的溢洪道水面线变化见图9。图10为优化

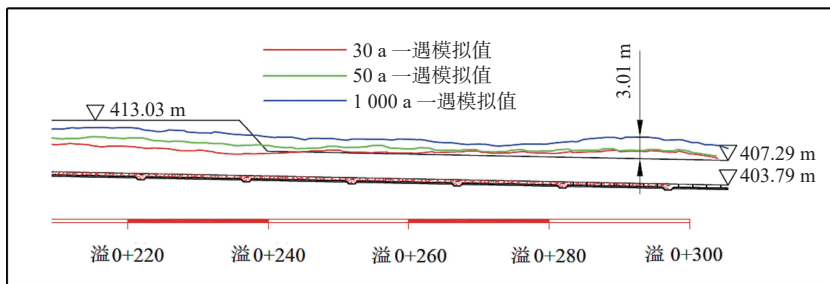
方案30 a一遇洪水流速流态图。



(a) 溢洪道斜坡段水面线变化



(b) 消力池水面线变化



(c) 尾水渠水面线变化

图9 优化方案溢洪道水面线变化

Fig. 9 Change of spillway water surface line in optimized scheme

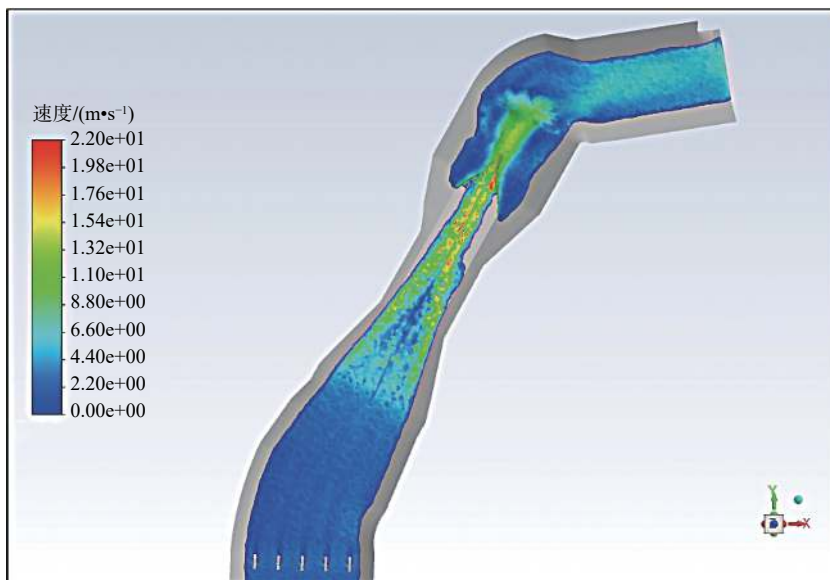


图10 优化方案30 a一遇洪水流速流态

Fig. 10 The flow velocity and flow regime of a 30-year flood in optimized scheme

由模拟结果可知:采用两级水垫塘消能的方案与原设计方案相比,斜坡段菱形水流被破坏,并削减了一部分下泄能量,洪水进入消力池后,水流翻滚程度减弱,流态比较稳定,消能效果显著;陡坡段、消力池和弯道海漫段的水面线也出现了明显变化,水位未超过护坡顶部,优化后的护坡高度满足行洪要求。在 30 a、50 a 和 1 000 a 一遇洪水工况下,尾水渠段最高水位分别高于护坡顶部 0.95 m、1.10 m 和 3.01 m,这是由于优化方案数值仿真时,洪水流出尾水渠后自然漫溢到现状的好阳河近 200 m 宽河道滩地,过水断面变大,流速突然降低,产生壅水造成。为了进一步降低溢槽风险,尾水渠段的护坡高度按照 30 a 一遇设计洪水标准需加高 1.1 m。经与当地政府沟通协商,完成了好阳河下游河道治理设计并计划实施,防洪标准为 30 a 一遇洪水,下游河道顺接优化方案后的尾水渠末端,洪水下泄顺畅,水位降低,解决了尾水渠段护坡高度不足问题。

从数值模拟仿真结果及以上边坡高度分析后认为,按照 30 a 一遇洪水设计标准考虑,优化方案合理可行。

5 结论

通过沟水坡水库除险加固工程溢洪道的数值模拟与物理模型比对分析可知:模拟值与实测值相吻合,具有较高的精度;可以采用数值仿真的方法,研究分析溢洪道的沿程水面高程变化、水流流速流态、压力、流量、消能效果、冲蚀情况等水力特性,有针对性地溢洪道结构进行优化。

拟合分析得出水位流量关系函数为 $Q = -15.333H^2 + 13\ 682H - 3.05 \times 10^6$, 为设计及运行提供参考。

针对原设计方案中消力池和尾水渠段护坡高度不能满足行洪需要的问题,提出了溢洪道优化方案并进行数值模拟,溢洪道水流流态和水面线均明显改善,护坡高度满足 30 a 一遇洪水设计标准工况下的行洪需要,优化方案合理可行。

参考文献:

- [1] 孙金华. 我国水库大坝安全管理成就及面临的挑战[J]. 中国水利, 2018(20): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2018.20.001.
- [2] 周兴波, 周建平, 杜效鹄. 美国奥罗维尔坝溢洪道事故分析与启示[J]. 水利学报, 2019, 50(5): 650-660.

DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20181009.

- [3] 滕晓敏, 陈威, 杨金孟, 等. 透水斜槛对溢洪道泄槽弯道水流改善效果试验[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 171-178. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0140.
- [4] 张文皎, 刘磊, 武彩萍, 等. 开敞式宽大单泄槽溢洪道水力特性及优化布置研究[J]. 水利水运工程学报, 2022(6): 25-34. DOI: 10.12170/20210609001.
- [5] 王海波, 沈立群, 张晋锋, 等. 台阶式溢洪道数值模拟计算精度评价方法[J]. 中国农村水利水电, 2023(2): 239-245, 254. DOI: 10.12396/znsd.220433.
- [6] 刘文, 贺昌海, 江维, 等. 某工程溢洪道掺气水流流场数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(12): 181-186, 191. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.12.030.
- [7] 刘艳华, 王一帆, 李仲权, 等. 溢洪道转弯出水渠体型及出口防冲措施优化研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(1): 200-205. DOI: 10.12396/znsd.221956.
- [8] 叶龙, 王斌, 宋炳忠, 等. L型侧槽溢洪道进口段水力特性试验及三维数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(7): 161-165, 169. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2019.07.030.
- [9] 周凯, 牧振伟, 张红红. 基于VOF模型溢洪道掺气槽位置数值模拟[J]. 水电能源科学, 2023, 41(3): 108-111, 185. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221096.
- [10] 陈伟威. 基于RNG $k-\epsilon$ 紊流模型的溢洪道水力特性数值模拟[J]. 水利科学与寒区工程, 2023, 6(1): 10-13. DOI: 10.3969/j.issn.2096-5419.2023.01.004.
- [11] 张辉, 喻双林, 杨阳, 等. 阶梯溢洪道水力特性及下游冲刷三维数值模拟[J]. 泥沙研究, 2022, 47(1): 9-15. DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2022.01.002.
- [12] 李洪彬, 蒋爽, 陈星宇, 等. 旋流泵内部不稳定流动数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 28-33, 48. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2023.03.005.
- [13] 王煌, 戚蓝, 师艳景, 等. 不同体形台阶式溢洪道消能水力特性的三维数值模拟研究[J]. 水力发电, 2022, 48(11): 66-73. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2022.11.013.
- [14] 祁媛媛, 李国栋, 李珊珊, 等. 琴键堰过流水力特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 164-169, 175. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2018.0025.
- [15] 查智力, 刘超, 严天序, 等. 井筒式泵装置水力特性数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2):

- 189-195. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0058](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0058).
- [16] 薛超. 基于SolidWorks的Y型岔管应力变形和流场特性分析及体型优化[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(3): 177-184. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0329](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0329).
- [17] 黄宇云, 吕海强, 余明辉, 等. 基于FLUENT的狭长型水库滑坡涌浪研究[J]. *泥沙研究*, 2020, 45(5): 48-54. DOI: [10.16239/j.cnki.0468-155x.2020.05.008](https://doi.org/10.16239/j.cnki.0468-155x.2020.05.008).
- [18] 吕蕊蕊, 郑源, 张德虎, 等. 基于FBM模型的轴流泵空化流动特性CFD分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(1): 150-165. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0017](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0017).
- [19] 武英豪, 王均星, 包芬芬, 等. 清渡河水库溢洪道模型试验研究与体型优化[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(8): 131-135. DOI: [10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20211357](https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20211357).
- [20] 鲁洪. 基于Fluent流场模拟下溢洪道水工消能设计优化分析研究[J]. *甘肃水利水电技术*, 2022(5): 54-58. DOI: [10.19645/j.issn.2095-0144.2022.05.011](https://doi.org/10.19645/j.issn.2095-0144.2022.05.011).
- [21] 施伟, 成立. 水源地取水泵站水流流态数值模拟与改善[J]. *南水北调与水利科技*, 2020, 18(2): 159-176. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0039](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0039).
- [22] 何志亚, 冷月华, 杨磊, 等. 沙河水库溢洪道挑流鼻坎体型优化及下游消能防冲研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(12): 6-11, 18. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2021.12.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2021.12.002).
- [23] 卢洋亮, 尹进步, 张曙光, 等. 跌坎型消力池底板脉动压强试验研究及体型优化[J]. *人民长江*, 2021, 52(11): 196-200. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.11.032](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.11.032).
- [24] 赵雪萍, 李璐, 赵玉良, 等. 沟水坡水库溢洪道弯道水流及消能试验研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(5): 128-131, 146. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2022.05.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2022.05.026).
- [25] 宁德雄, 李游. 多项式拟合水位流量关系曲线[J]. *云南水力发电*, 2023, 39(1): 326-329. DOI: [10.3969/j.issn.1006-3951.2023.01.075](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-3951.2023.01.075).

Analysis of the change of spillway flow edge and the rationality of slope protection height based on numerical simulation

LI Yong^{1,2}, LI Songping^{2,3}, YANG Jumin⁴, YUAN Jina⁵, LIU Jie⁶

(1. Henan Hechuan Engineering Supervision Co., Ltd, Zhengzhou 450047, China; 2. Henan Key Laboratory of Safety Technology for Water Conservancy Project, Zhengzhou 450003, China; 3. Henan Provincial Water Conservancy Technology Application Center, Zhengzhou 450003, China; 4. Lingbao City Zhaikou Water Authority, Lingbao 472599, China; 5. Henan Keyuan Water Conservancy Construction Engineering Testing Co., Ltd, Zhengzhou 450003, China; 6. Huanghe Science and Technology University, Zhengzhou 450063, China)

Abstract: The spillway is an important structure to ensure the safe discharge of the reservoir and the safe operation of the dam body. In order to ensure the safe operation of the spillway, the hydraulic characteristics of the spillway of the Goushuipo Reservoir reinforcement project were tested and studied, and the engineering design was validated and optimized.

Based on SolidWorks software, the three-dimensional numerical model of the spillway of the Goushuipo Reservoir was established by the VOF method, and the closed N-S equation of RNG $k-\varepsilon$ turbulence model were used to simulate the spillway of the Goushuipo Reservoir reinforcement project by Fluent software.

Based on the conditions of 30-year flood and 50-year flood, the data of spillway water surface line simulated by mathematical model was slightly different from that measured by physical model only in the silting pool, and the maximum deviation of water surface line was 9.2%. Using numerical simulation method to correct and simulate the original design scheme had higher simulation accuracy and reliability.

The relation function of water level and discharge was established, and the variation law of water flow along the spillway was analyzed. Under the design conditions, the flood level of the stilling pool and the tail channel of the reservoir exceeded the top of the slope protection. The reason why the concrete slope protection height of the spillway could not meet the normal flood discharge under the 30-year flood condition of the Goushuipo reservoir reinforcement project was deeply analyzed. An optimization scheme was proposed to set two-stage water mat in the

slope section of the reservoir, increase the slope protection height of the silencing pool section and shorten the length of the tail channel. The numerical simulation results showed that the rhomboid flow in the slope section of the spillway was destroyed, and the discharging energy of part of the flow was reduced. After the flood enters the silencing pool, the rolling degree of the flow was weakened, the flow state was relatively stable, and the energy dissipation effect was remarkable. The water surface line of steep slope section, stilling pool and sea section of bend did not exceed the top of slope protection. Based on the optimization scheme, the problem that the slope protection height of spillway can not discharge floodwater normally under the design condition was solved, and the scheme provided a reference for engineering optimization design.

Through comparison and analysis of the numerical simulation results of the spillway of Goushuipo reservoir with the physical model test results, the numerical simulation method have high accuracy and reliability, and the numerical simulation method can be used to study and analyze the hydraulic characteristics of the spillway along the water surface elevation, flow velocity and flow pattern, pressure, discharge, and energy dissipation and erosion evolution law and to optimize the spillway structure in a targeted manner. The relationship function of water level and discharge obtained by fitting analysis provides a reference for design and operation. The research results provide technical support for numerical simulation of similar spillway projects.

Key words: numerical simulation; spillway; water surface profile; slope protection height; optimization plan

(上接第 387 页)

The results indicate that this approach can effectively forecast the nonlinear characteristics of excavation-induced deformations. The multidimensional feature scale components obtained through the ESMD algorithm exhibit distinct physical oscillation characteristics. Simultaneously, the calculation results of the variance contribution rate for each mode indicate that the short-term fluctuation in the deformation of the sluice foundation pit is mainly dominated by the high-frequency modes IMF_1 and IMF_2 , while the long-term fluctuation is primarily governed by the trend component R_{es} . The consistency between these decomposition results and on-site observations demonstrates that the ESMD method is effective at identifying the physical characteristics of excavation-induced deformation at different time scales. The proposed ESMD-FE-AJSO-LSTM method achieves an overall deformation prediction accuracy ranging from 97.63% to 99.52%. The prediction results generally fall between those of the AJSO-LSTM, LSTM, RNN, and SVM algorithms, indicating that the ESMD-FE-AJSO-LSTM model presented has higher predictive accuracy. The predicted residuals of the ESMD-FE-AJSO-LSTM method fluctuate near the zero-value mean and exhibit an overall normal distribution. This finding suggested that the proposed method has better predictive stability and robustness than the other four models, indicating its practical value in scientific and engineering applications.

Key words: Extreme-point symmetric mode decomposition method; fuzzy entropy; artificial jellyfish search optimizer; long short-term memory; sluice; deep foundation pit; deformation prediction