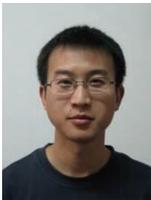


· 航道及通航建筑物 ·



非恒定流对丁坝局部冲刷影响数值模拟研究*

喻涛^{1,2}, 邓梦龙^{1,2}, 温致宇³, 李顺超⁴, 何熙⁴

(1. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

3. 广西平陆运河建设有限公司, 广西 南宁 535000; 4. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 丁坝作为整治结构广泛应用于内河航道整治工程中, 但其损毁现象十分普遍, 天然水流基本均为非恒定流, 不同的非恒定条件对丁坝局部冲刷影响不同。利用 FLOW-3D 中的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 VOF (volume of fluid) 模型, 研究水流非恒定条件对丁坝周围局部冲刷的影响。研究结果显示: 流量变幅的增大会使得坝头冲刷坑的长度、宽度以及最大冲深增大, 并且会使冲刷宽度更快达到临界宽度。洪峰次数会影响冲刷坑最大冲深的形成过程, 洪峰出现的越晚, 最大冲深发展速率越小。冲刷坑长度和面积与洪峰次数无明显关联, 但洪峰次数越多, 冲刷坑宽度会更快达到临界值。洪水持续时间越长, 冲刷坑最大冲深的增长速率越减慢, 最终达到临界值。洪水持续时间越长, 冲刷坑的长度和面积越大, 冲刷坑宽度会更晚达到临界值。研究成果可为洪水期维护丁坝稳定性提供技术支持。

关键词: 非恒定流; 丁坝; 局部冲刷; 数值模拟

中图分类号: U656.35+2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)05-0080-07

Numerical simulation of unsteady flow influence on local scouring of spur dikes

YU Tao^{1,2}, DENG Menglong^{1,2}, WEN Zhiyu³, LI Shunchao⁴, HE Xi⁴

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Guangxi Pinglu Canal Construction Co., Ltd., Guangxi 535000, China;

4. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: Spur dikes are widely used as regulating structures in inland waterway regulation projects, but their damage phenomenon is very common. Natural water flow is basically unsteady, and different unsteady conditions have different impacts on local scour around spur dikes. The RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and VOF (volume of fluid) model in FLOW-3D are used to study the effect of unsteady water flow on local scour around spur dikes. The results show that increasing flow variability increases the length and width of the scour hole and the maximum scour depth at the head of the dam, and will also causes the scour width to reach the critical width more quickly. The number of flood peaks affects the formation process of the maximum depth of the scour hole, and the later the flood peak appears, the smaller the development rate of the maximum scour depth. The length and area of the scour hole are not significantly related to the number of flood peaks, but the greater the number of flood peaks, the faster the scour hole width will reach the critical value. The longer the duration of the flood, the slower the rate of increase of the maximum depth of the scour hole, which eventually reaches the critical value. The longer the flood duration, the larger the length and area of the washout pit, and the later the width of the washout pit reaches the critical value. The research results can provide technical support for maintaining the stability of spur dikes during flooding.

Keywords: unsteady flow; spur dike; local scouring; numerical simulation

收稿日期: 2024-07-02

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604700); 广西创新驱动发展专项基金项目(桂科 AA23023009)

作者简介: 喻涛(1982—), 男, 博士, 教授、博导, 研究方向为港口及航道工程。

在工程实践中,水流条件是导致坝体失稳和破坏的重要因素。丁坝长期与水流对抗,不可避免地会出现水毁问题,天然河流大多为非恒定流,所以研究水流的非恒定性对丁坝局部冲刷影响是必要的。高桂景等^[1]通过水槽试验研究了坝长、流量及水深对丁坝附近水流脉动动能分布的影响;叶桢^[2]采用三维紊流数学模型模拟丁坝近区流场的变化,得出丁坝坝头存在2个小角涡,坝后除大尺度漩涡(回流)外,在高流速下还存在若干次生涡;戚蓝等^[3]采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,用VOF(volume of fluid)的方法进行自由表面的追踪,并对丁坝局部冲刷坑形态及冲刷坑深度进行数值模拟;喻涛等^[4]通过水槽概化模型试验研究天然河流日均流量过程作用下,丁坝冲刷及破坏机理;Pandey et al.^[5]研究了丁坝周围冲刷现象的影响因素对冲刷过程的调控作用,包括冲刷时间、最大冲刷深度、水流模式等;Li et al.^[6]、Peng et al.^[7]等对丁坝周围流场特性和涡旋结构用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行了分析;辛玮琰等^[8]研究长江界牌河段丁坝周围水流结构特点,得出随坝头流速的增大,下潜水流、坝头涡旋系、单宽流量分别成为影响坝头损毁的主因;李晓玲等^[9]对丁坝水流特性(主要包括自由水面线、丁坝附近流场和紊动场等)的国内外研究现状进行综合论述;赵丽梅等^[10]研究得出在非恒定流作用下,淹没式矮堰冲刷深度振荡频率先随流量的增加而增大,到达洪峰流量后逐渐减小;钟亮等^[11]采用自回归马尔柯夫模型,将天然来流过程概化为波谷起冲和波峰起冲两种情况;苏伟等^[12]通过动床冲刷试验对不同形式丁坝的水流紊动特性进行对比分析,得出冲刷坑的深度随水流紊动特性的变化呈先增大后减小的趋势;喻涛等^[13]研究发现洪峰流量对冲刷深度起主导作用,洪水总量对坝头冲刷坑范围起主导作用,有效洪水周期对冲刷坑范围及冲刷深度均起主导作用;温致宇^[14]采用实测洪水资料分析和三维水动力学数值模拟方法,概化分析了表征天然河流水流非恒定特性的参数。

综上,现有的研究主要针对水流恒定条件下对丁坝的局部冲刷影响,水流非恒定条件下研究还不够充分。本文把非恒定特性概化为3个因素,以研究不同的流量变幅、变率和洪水持续时间对丁坝的局部冲刷影响,研究成果为丁坝在汛期的修建维护提供一定的技术参考。

1 水流非恒定特性概化

1.1 洪水流量变幅

洪水流量变幅是指洪峰流量与基准流量的比值,对长江上游寸滩站1978—2007年内每年的洪水流量变幅进行统计,以每年的年均流量作为该年的基准流量。30个水文年的流量变幅频率见表1。其中洪水流量变幅的范围为基准流量的1~7倍。从不利角度出发,设置洪水流量变幅为3.0、4.5和6.0。

表1 寸滩站1978—2007年流量变幅
Tab.1 Flow variation range of Cuntan Station from 1978 to 2007

洪水流量变幅(基准流量的倍数)	出现次数/次	频率/%
1~2	2 769	66.82
2~3	1 072	25.87
3~4	258	6.23
4~5	37	0.89
5~6	6	0.14
6~7	2	0.05

1.2 洪峰次数

统计寸滩站1978—2007年内每年出现的洪峰次数,通过分析寸滩站30个水文年的数据可以得到每年洪峰出现次数在1~6范围内,3次洪峰次数的占比约为50%,在试验变量设定规律的基础上,选择洪峰次数1、2、3作为本次试验的变量。

1.3 洪水持续时间

统计寸滩站30个水文年单个洪峰持续时间,得出占比最大的时长为5~10 d,其次为0~5 d和10~15 d。综合考虑,设置本次试验洪水持续时间的基准为10、15和20 d。以阻力相似准则确定时间比尺,洪水持续时间设置为3个变量分别为540、810、1 080 s。

2 模型设计及验证

2.1 数学模型水槽设计

运用 FLOW-3D 建立长 30.0 m、宽 2.0 m、高 1.0 m 的数学模型水槽。通过分析长江上游工程丁坝类型及河道各项参数，结合试验水槽实际尺寸，

本次试验采用正挑式丁坝，坝头为圆弧直头式。试验模型比尺为 1:40，模型丁坝迎水坡坡度 1:1.5，背水坡坡度 1:2，向河坡坡度 1:2.5。丁坝高度 10.0 cm、坝长 50.0 cm，横纵剖面见图 1，试验工况见表 2，三维模型见图 2。

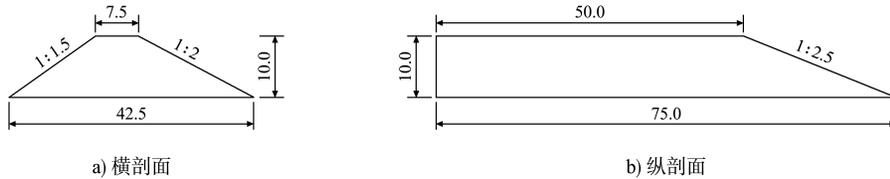


图 1 丁坝剖面 (单位: cm)

Fig. 1 Spur dike section (unit: cm)

表 2 试验工况

Tab. 2 Experimental conditions

工况	基准流量 $Q_0/(L \cdot s^{-1})$	洪峰流量 $Q_{max}/(L \cdot s^{-1})$	流量 变幅 F	洪水持续 时间 T/s	洪峰次数 $P/个$
1	20	60	3.0	540	1
2	20	90	4.5	540	1
3	20	120	6.0	540	1
4	20	60	3.0	540	2
5	20	120	6.0	540	2
6	20	60	3.0	810	2
7	20	60	3.0	1 080	2
8	20	120	6.0	540	3

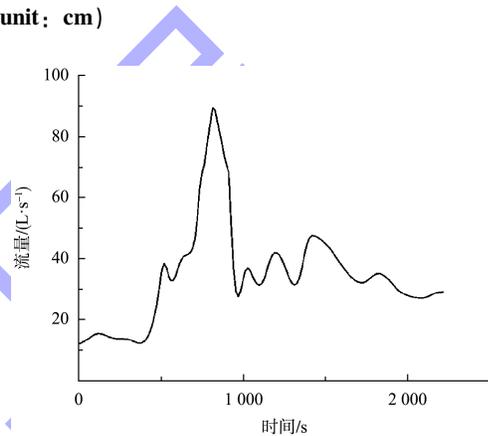


图 3 验证选用的流量过程

Fig. 3 Verification of selected flow process

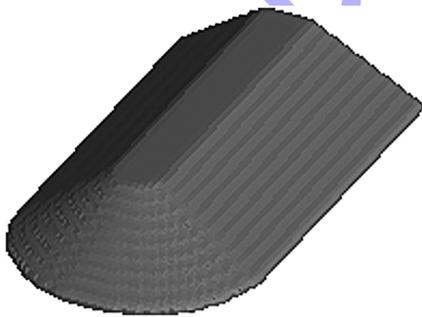


图 2 丁坝三维模型

Fig. 2 Spur dike 3D model

2.2 模型验证

通过对模型冲刷情况进行验证，确保数学模型的可靠性，验证物理模型试验数据来自文献 [15] 的试验结果。流量过程选用 10 a 一遇的天然非随机流量过程，非恒定的流量过程线见图 3。通过改变糙率大小进行模型率定，使计算误差在允许范围内，最终设定河床糙率为 0.013，丁坝糙率为 0.083。对丁坝周围的冲刷情况进行了验证。

试验对丁坝附近的河床冲淤变化进行验证，通过测量冲刷坑最大冲深和冲刷沙垄总长，并与物模试验对比，确保了泥沙输移模型的可靠性。由图 4、5 可知，非恒定流作用下丁坝河床冲淤变化与实际基本一致，动床模型率定与验证成功。

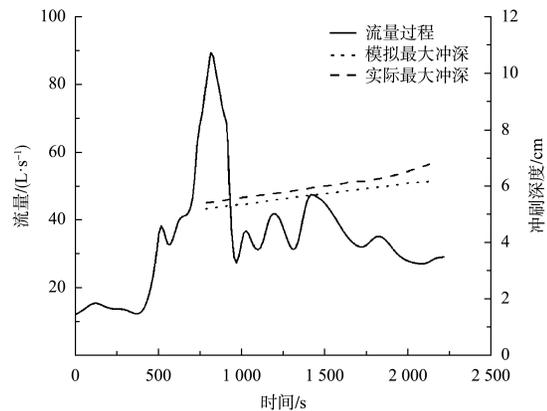


图 4 洪水过程中丁坝坝头附近最大冲刷深度变化

Fig. 4 Variation of maximum scour depth near head of spur dike during flood process

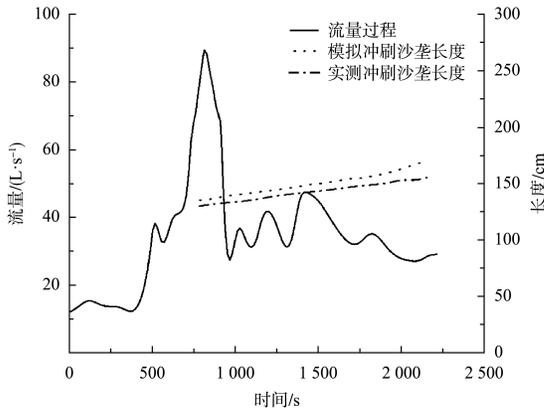


图5 洪水过程中丁坝附近冲刷沙垄总长变化
Fig. 5 Variation of total length of scour sandbars near spur dike during flood process

3 试验结果

3.1 流量变幅对丁坝局部冲刷的影响

运用 FLOW-3D 分别模拟工况 1、2、3，处理数据得出不同流量变幅条件下，丁坝坝头的冲刷坑最大冲深(图 6)、冲坑面积(图 7)和长宽(图 8)随冲刷历时变化曲线。

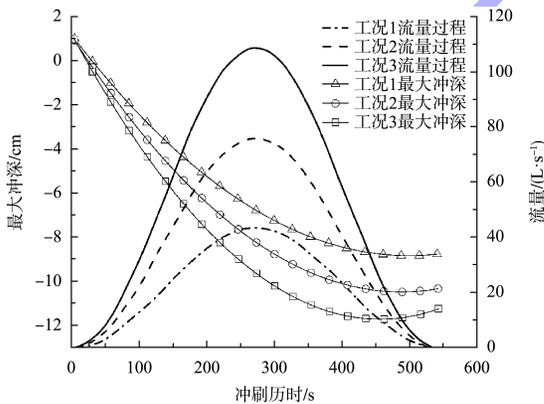


图6 不同流量变幅下最大冲深时变曲线
Fig. 6 Time-varying curve of maximum scour depth under different flow variation ranges

由图 6 可知，在只有 1 个洪峰的洪水历时中，随流量的增大，坝头处的冲刷不断加深；在落水期，随流量的逐步减少，流速逐渐降低，冲刷发展比较缓慢。

流量变幅越大，同一时刻的坝头冲刷坑最大冲深也越大。工况 1 的最大冲深为 8.62 cm，对应 3 倍流量变幅 F ；工况 2 的最大冲深为 10.24 cm，对应 4.5 倍流量变幅 F ；工况 3 的最大冲深为 11.50 cm，

对应 6 倍流量变幅 F 。可见，在流量变幅增大到 4.5 倍时，最大冲深增大约 19%；在流量变幅增大到 6 倍时，最大冲深增大约 33%。

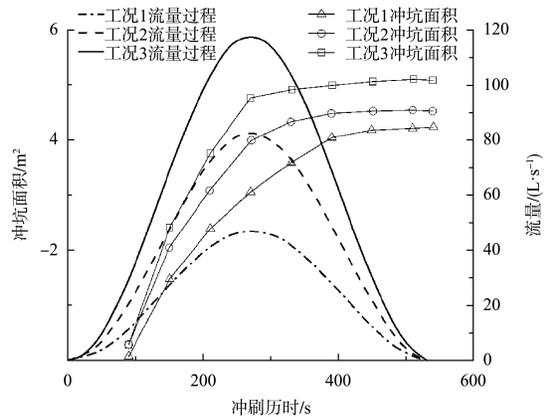


图7 不同流量变幅下冲坑面积时变曲线
Fig. 7 Time-varying curve of scour hole area under different flow variation ranges

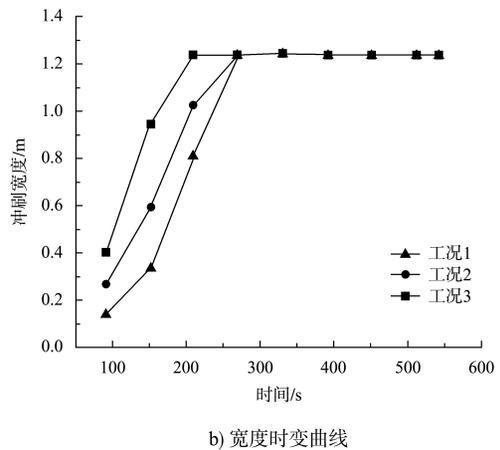
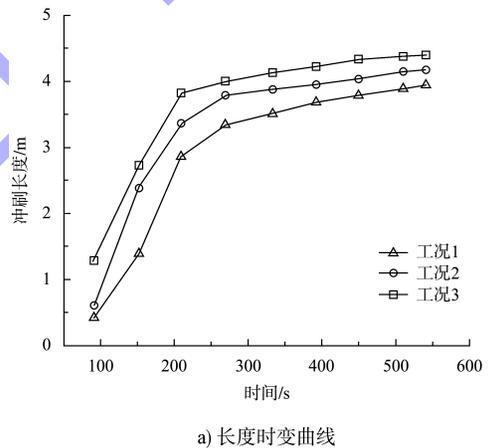


图8 不同流量变幅下冲坑长度、宽度时变曲线
Fig. 8 Time-varying curves of scour hole length and width under different flow variation ranges

由图7和8可知，冲刷坑宽度在涨水期急剧增长，由于统计数据为冲刷坑的最大宽度，冲坑在270 s已经发展到丁坝对岸侧达到最大值。随流量变幅的增大，冲刷坑长、宽和面积变化曲线均有较明显的抬升，其中流量变幅由3倍增大至4.5倍和6倍时，冲坑面积分别增长6.8%和12.5%（以变幅=3为基准，取最终时刻数据对比得出）；冲坑长度分别增长5.8%和11.4%。

3.2 洪峰次数对丁坝局部冲刷影响

分别通过 FLOW-3D 模拟 3、5、8 这三个工况，处理数据得出不同流量变幅条件下，丁坝坝头的冲刷坑最大冲深(图9)、冲坑面积(图10)和长宽(图11)随冲刷历时变化曲线。

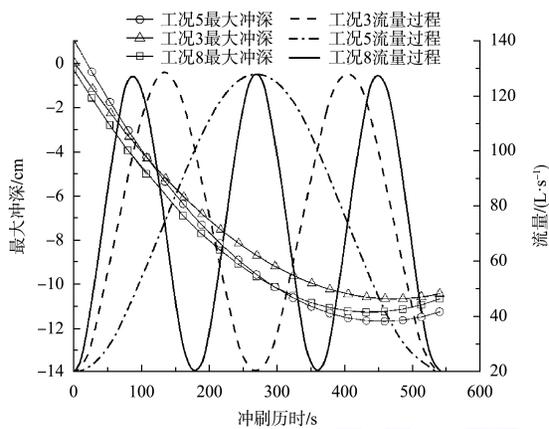


图9 不同洪峰次数下最大冲深时变曲线
Fig. 9 Time-varying curve of maximum scour depth under different peak flow frequencies

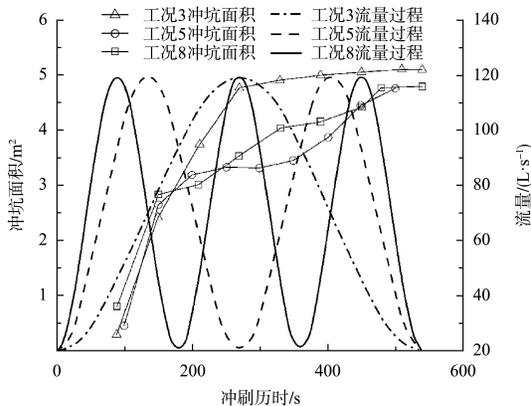
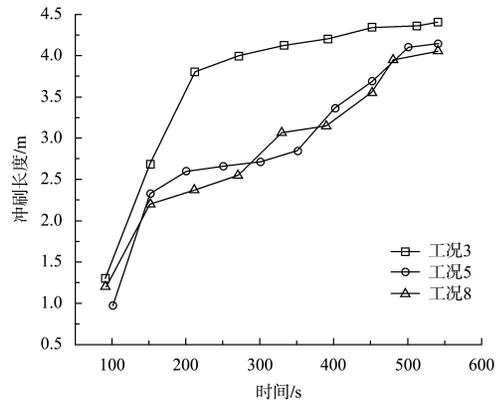
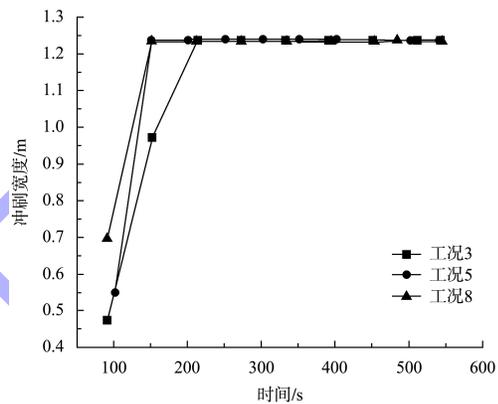


图10 不同洪峰次数下冲坑面积时变曲线
Fig. 10 Time-varying curve of scour hole area under different peak flow frequencies



a) 长度时变曲线



b) 宽度时变曲线

图11 不同洪峰次数下冲坑长度、宽度时变曲线
Fig. 11 Time-varying curves of scour hole length and width under different peak flow frequencies

由图9可知，工况5的洪峰次数 $P=2$ ，最大冲深经过第1个洪峰的发展后，在第1个洪峰落水期后半段和第2个洪峰涨水期的前半段之间不再变化，而第2个洪峰的涨水期后半段，流速逐渐增大使得冲刷继而发展，最大冲深也有所增大，但增长速率较低，最大冲深变化曲线整体呈阶梯式。工况8的洪峰次数 $P=3$ ，冲深整体发展规律与工况5一致，区别在于工况8的洪峰次数更多，阶梯式冲深曲线的阶梯数更多。

由图10可知，洪峰次数 $P=1$ 的工况3，洪峰时刻的冲坑面积已占总冲坑面积的89%；洪峰次数 $P=2$ 的工况5，第1个洪峰和第2个洪峰时刻冲坑面积分别占总冲坑面积的55%和81%；洪峰次数 $P=3$ 的工况8，3个洪峰时刻的冲坑面积分别占总冲坑面积的17%、74%和92%。

由图 11 可知,工况 5 和 8 的冲坑长度均随洪峰出现以阶梯状持续增长。洪峰次数 $P=1$ 时最终冲坑长度为 4.4 m, $P=2$ 时最终冲坑长度为 4.13 m, $P=3$ 时为 4.08 m, 与冲坑长度不同,在洪峰次数更多的条件下,相同时刻的冲坑宽度更宽,且发展速率更快。

3.3 洪水持续时间对丁坝局部冲刷影响

采用 FLOW-3D 模拟工况 4、6、7, 收集数据进行对比, 处理数据得出不同流量变幅条件下, 丁坝坝头的冲刷坑最大冲深(图 12)、冲坑面积(图 13)和长宽(图 14)随冲刷历时变化曲线。

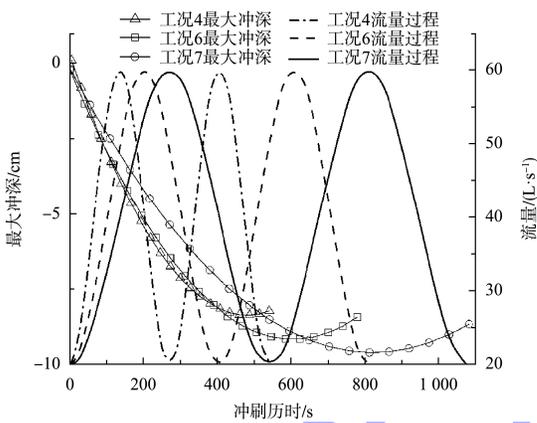


图 12 不同洪水持续时间下最大冲深时变曲线
Fig. 12 Time-varying curves of maximum scour depth under different flood durations

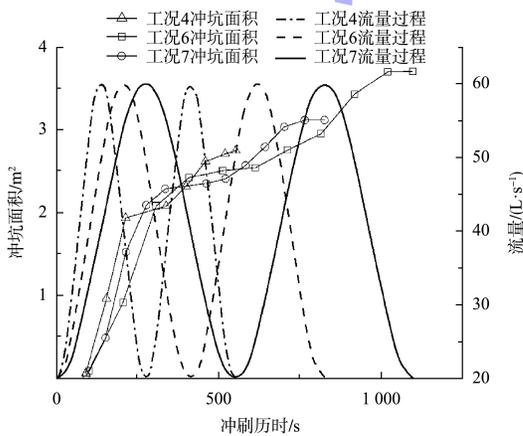
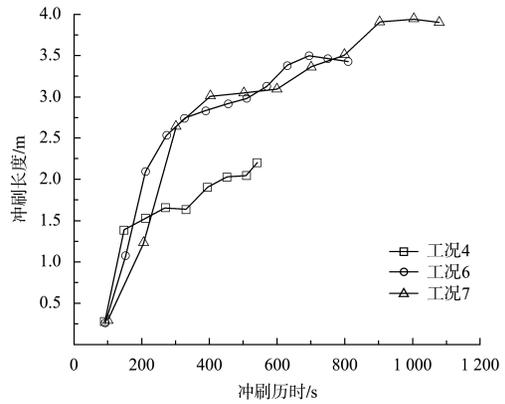
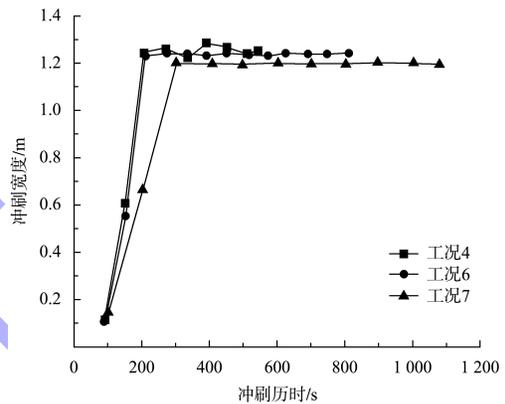


图 13 不同洪峰次数下冲坑面积时变曲线
Fig. 13 Time-varying curves of scour hole area under different peak flow frequencies



a) 长度时变曲线



b) 宽度时变曲线

图 14 不同洪水持续时间下冲坑长度、宽度时变曲线
Fig. 14 Time-varying curves of scour hole length and width under different flood durations

由图 12 可知, 当洪水持续时间 $T=540$ s 时, 坝头最大冲深 8.61 cm, 第 1 个洪峰结束时的最大冲深 6.66 cm, 占总冲深的 77.4%; 当洪水持续时间 $T=810$ s 时, 坝头冲坑最大冲深 9.24 cm, 第 1 个洪峰结束时的最大冲深 8.00 cm, 占总冲深的 86.6%; 当洪水持续时间 $T=1080$ s 时, 坝头冲坑最大冲深 9.38 cm, 第 1 个洪峰结束时的最大冲深 8.31 cm, 占总冲深的 88.6%。以 $T=540$ s 为基准 T_0 (下同), 当洪水持续时间增长为 $1.5T_0$ 和 $2T_0$ 时, 坝头冲坑最大冲深分别增大了 7.3% 和 8.9%。

由图 13 可知, 当洪水持续时间 $T=540$ s 时, 最终冲坑面积 2.74 m^2 , 第 1 个洪峰结束时的冲坑面积 2.08 m^2 , 占总冲坑面积的 75.9%; 当洪水持续时间 $T=810$ s 时, 最终冲坑面积 3.11 m^2 , 第 1 个洪峰结束时的冲坑面积 2.34 m^2 , 占总冲坑面积的 75.2%;

当洪水持续时间 $T = 1\ 080\ \text{s}$ 时, 最终冲坑面积 $3.7\ \text{m}^2$, 第1个洪峰结束时的冲坑面积 $2.54\ \text{m}^2$, 占总冲深的 68.6%。当洪水持续时间增长为 $1.5T_0$ 和 $2T_0$ 时, 坝头冲坑面积分别增大了 49.5% 和 77.9%。

工况 4、6 和 7 的冲刷坑长宽随冲刷历时的时变曲线见图 14, 各工况下冲刷坑长宽发展规律基本一致。当洪水持续时间为 T_0 、 $1.5T_0$ 、 $2T_0$ 时, 冲刷坑长度分别是 2.20、3.43 和 3.90 m, 工况 13 和 16 相对工况 10 的冲坑长度分别增长了 55.9% 和 77.3%。

4 结论

1) 流量变幅越大, 同一时刻的坝头冲刷坑最大冲深也越大。随流量变幅的增大, 冲刷坑长、宽和面积均随之增大, 冲刷面积的增长率稍大于冲坑长度。冲坑宽度因受边界条件影响, 在一定时间内都达到最大宽度无法对比, 但从冲坑宽度增长曲线可知, 流量变幅的增大会使同时刻的冲刷坑宽度更宽, 且更快达到临界宽度。

2) 洪峰次数会影响坝头冲坑最大冲深的形成过程, 坝头冲坑最大冲深在不同的洪峰内发展速率不同, 表现为洪峰出现的越晚, 坝头冲坑最大冲深发展速率越小, 直至趋于平稳。最大冲坑长度和面积与洪峰次数无明显关联。在洪峰次数更多的条件下, 相同时刻的冲坑宽度会更宽且发展速率更快。

3) 洪水持续时间越长, 对应坝头冲坑最大冲深的增长越缓慢, 直到冲深增长到某个极大值后, 洪水持续时间不再对坝头冲坑最大冲深产生影响。当洪水期内有多个洪峰时, 洪水持续时间越长, 第1个洪峰过后冲深越大, 后续洪峰的冲深增长越小。洪水持续时间越久, 坝头冲坑面积和冲坑长度也越大。冲刷坑宽度方面, 洪水持续时间小的工况更快达到了最大值。

参考文献:

[1] 高桂景, 王平义, 杨成渝, 等. 丁坝附近水流动能分布研究[J]. 水运工程, 2007(11): 75-79, 119.
GAO G J, WANG P Y, YANG C Y, et al. Distribution of pulsation kinetic energy of flow around spur dike[J]. Port

& waterway engineering, 2007(11): 75-79, 119.

- [2] 叶桢. 丁坝附近紊流的三维数值模拟及局部冲刷[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
YE Z. 3D numerical simulation of turbulent flow and local scour around spur dikes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [3] 戚蓝, 曾庆达, 吉顺文. 天然河道丁坝群局部冲刷三维数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 59-65.
QI L, ZENG Q D, JI S W. Three-dimensional numerical simulation of local scour based on spur dikes in a natural river[J]. Hydro-science and engineering, 2020(1): 59-65.
- [4] 喻涛, 王平义, 陈里, 等. 非恒定流作用下丁坝坝体块石运动特点分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(3): 40-44.
YU T, WANG P Y, CHEN L, et al. Movement characteristics of spur dike stones under unsteady flow[J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2014, 12(3): 40-44.
- [5] PANDEY M, AHMAD Z, SHARMA P K. Scour around impermeable spur dikes: a review [J]. ISH journal of hydraulic engineering, 2018, 24(1): 25-44.
- [6] LI Y T, WAI W H O, ZHAN J M, et al. Evolution of three-dimensional flow field and vortex structures around a single spur dike during the scouring process[J]. Journal of hydraulic engineering, 2024, 150(1): 04023057.
- [7] XIE P, LI C G, LYU S J, et al. Numerical simulation of 3D flow structure and turbulence characteristics near permeable spur dike in channels with varying sinuities[J]. Sustainability, 2023, 15(22): 15862.
- [8] 辛玮琰, 刘晓菲, 刘鹏飞, 等. 长江中游界牌河段丁坝周围水流特性试验研究 [J]. 水运工程, 2022 (8): 107-113.
XIN W Y, LIU X F, LIU P F, et al. Experiment on characteristics of flow around spur dike in Jiepai reach of middle reaches of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2022(8): 107-113.
- [9] 李晓玲, 张晴晴. 丁坝水流特性研究进展[J]. 中国水运 (下半月), 2017, 17 (8): 261-263, 265.
LI X L, ZHANG Q Q. Progress in the study of flow characteristics of spur dike[J]. China water transport (the second half of month), 2017, 17(8): 261-263, 265.

(下转第 95 页)