



阶梯形丁坝局部冲刷特性数值模拟^{*}

李国际¹, 钟亮^{1,2}, 姜彤¹, 姜利¹

(1. 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;

2. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 阶梯形丁坝局部冲刷特性研究对河道整治工程方案设计具有重要意义。应用平面二维水流泥沙数学模型, 研究来流条件及丁坝尺度对阶梯形丁坝局部冲刷的影响。结果表明: 在清水恒定流作用下, 冲刷达到平衡所需历时主要受来流条件影响, 而受丁坝几何尺度的影响相对较小; 随着弗劳德数 Fr 的增大, 冲刷坑面积 A 、最大冲深 h_s 总体均呈线性增加, $Fr \leq 0.565$ 时平均冲深 \bar{h} 随 Fr 增长较慢, $Fr > 0.565$ 时 \bar{h} 随 Fr 增长相对较快; 一级丁坝高度、二级丁坝长度对局部冲坑形态及冲深发展的影响具有一定的等效性; h_s 与 \bar{h} 均随一级丁坝相对高度 ψ 的增加而增大, 当 $\psi > 0.7$ 时其增幅趋于平缓。

关键词: 阶梯形丁坝; 冲刷过程; 冲坑形态; 数值模拟

中图分类号: TV 863; U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0093-08

Numerical simulation of local scour characteristics of step-shaped spur dike

LI Guo-jian¹, ZHONG Liang^{1,2}, JIANG Tong¹, JIANG Li¹

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

2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The study of local scour characteristics of step-shaped spur dike is of great significance to the design of river channel regulation projects. We study the effects of inflow condition and spur dike size on local scour of step-shaped spur dike by using a 2D flow and sediment mathematical model. The results show that under the constant flow of clear water, the time required for scour to reach equilibrium is mainly affected by the inflow condition, while the geometric scale of spur dike has relatively fewer impacts. With the increase of Froude number Fr , both the area of scouring pit A and the maximum scours depth h_s increase linearly. The mean scour depth \bar{h} increases slowly with Fr when $Fr \leq 0.565$, and \bar{h} increases relatively faster with Fr when $Fr > 0.565$. The height of the first step spur dike and the length of the second step spur dike have a certain degree of equivalence in the influence of the local scour pit shape and scour depth development. Both h_s and \bar{h} increase with the relative height of the first step spur dike ψ , and the growth tend to be flat when $\psi > 0.7$.

Keywords: step-shaped spur dike; scouring process; scour hole morphology; numerical simulation

丁坝是常用的航道整治建筑物, 具有调整河道分流比、增强航槽冲刷、改善碍航流态等作用。航道整治中, 丁坝剖面形态一般根据其功效确定, 并多采用单一断面形式(简称“单式断面丁坝”);

但对于某些河段, 为解决汛期淤积严重、落水期冲刷不及等问题, 也常采用两级整治水位相结合的阶梯形断面形式(简称“阶梯形丁坝”), 以减小对河道行洪的影响^[1]。

收稿日期: 2020-11-15

^{*}基金项目: 重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0278)

作者简介: 李国际(1995—), 男, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。

通讯作者: 钟亮(1980—), 男, 博士, 教授, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: zlcqjtu@163.com。

丁坝局部冲刷特性研究对航道整治工程设计和丁坝水毁保护等具有重要意义。迄今为止,国内外学者对丁坝局部冲刷机理和冲坑形态尺度问题开展了较多研究,并认为丁坝局部冲刷机理存在马蹄形漩涡学说、单宽流量增大学说、下潜水流学说和综合学说等^[2],而丁坝局部冲坑形态尺度问题研究,目前主要集中在冲坑形态发展过程和最大冲深等方面。对于冲坑形态发展过程,彭静等^[3]根据冲深将冲刷发展分为初始阶段、发展阶段和稳定阶段;Zhang 等^[4]研究不同挑角下丁坝冲刷坑形态的演化过程,发现挑角 90°时冲刷坑形成较慢;王振等^[5]通过动床模型试验表明,铅丝笼透水丁坝的局部冲淤量随坝长的增加而增加;Rajaratnam 等^[6]通过室内水槽试验表明,随着时间的增加,冲坑横断面尺寸不断扩大,但边坡角度基本不变,不同时间点的冲坑形态具有几何相似性;陆晶等^[7]认为,淹没丁坝挑角对坝头附近床面冲刷坑形态、位置、尺寸均有影响,床沙粒径则主要影响冲刷坑的尺寸。对于最大冲深,方达宪等^[8]通过水槽试验发现,局部最大冲深随坝长的增加而增加,随床沙粒径的增大而减小;宁健等^[9]通过数值模拟研究认为,河宽缩窄率 $L/B < 0.5$ 时(L 为丁坝长度, B 为河宽),最大冲深随 L/B 的增加总体呈线性增加, $L/B \geq 0.5$ 时,丁坝对水流的影响范围达到对岸,最大冲深增加迅速;马兴华等^[10]基于起动流速和起动切应力,提出丁坝冲刷深度计算的半理论半经验公式;Pandey 等^[11]认为,清水冲刷条件下,来流量越大,最大冲深越大。

综合上述成果,现有研究主要是针对单式断面丁坝,阶梯形丁坝还较少涉及。作者的前期研究^[12]显示,阶梯形丁坝具有独特的水流结构,这将影响其局部冲刷特性,但目前还缺乏相关研究。为此,本文将非淹没阶梯形丁坝为例,基于数值模拟资料,分析来流条件和丁坝几何尺度对阶梯形丁坝局部冲刷的影响,研究结果可为航道整治工程设计和丁坝水毁保护等提供参考。

1 数值模拟

1.1 模型建立

1.1.1 控制方程

水流连续方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(H\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{v})}{\partial y} = HS \tag{1}$$

水流运动方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(H\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(H\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(H\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = \\ f\bar{v}H - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gH^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \\ \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (HT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (HT_{xy}) + Hu_s S \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(H\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(H\bar{v}^2)}{\partial y} + \frac{\partial(H\bar{u}\bar{v})}{\partial x} = \\ -f\bar{u}H - gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gH^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \\ \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (HT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (HT_{yy}) + Hv_s S \end{aligned} \tag{3}$$

泥沙输运模型主要采用 Engelund-Hansen 输沙理论,总输沙率 S_{tl} 为:

$$S_{tl} = 0.05 \cdot \frac{C^2}{g} \theta^{5/2} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \tag{4}$$

泥沙连续方程:

$$-(1-e) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} - \Delta S \tag{5}$$

河床变形方程:

$$z_{new} = z_{old} + \frac{1}{1-n} \frac{\partial z}{\partial t} \Delta t_{HD} \tag{6}$$

式中: H 为静止总水深; t 为时间; \bar{u} 、 \bar{v} 为 x 、 y 方向的平均流速; S 为源(汇)项; f 为柯氏力参数, $f = 2\Omega \sin \varphi$, Ω 为地球自转角速度, φ 为地理纬度; η 为水位; g 为重力加速度; ρ_0 为参考水密度; p_a 为当地大气压强; ρ 为水密度; τ_{sx} 、 τ_{sy} 为 x 、 y 方向风剪应力; τ_{bx} 、 τ_{by} 为 x 、 y 方向河床切应力; S_{xx} 、 S_{yy} 、 S_{xy} 为辐射应力分量; T_{xx} 、 T_{yy} 、 T_{xy} 为水平黏滞应力项; u_s 、 v_s 为源(汇)项流向外界的流速分量; C 为谢才系数; s 为泥沙相对密度,其值为 ρ/ρ_s ,其中 ρ_s 为泥沙密度; θ 为希尔兹

数; d_{50} 为中值粒径; e 为底床孔隙率; z 为河床高程; S_x 、 S_y 分别为沿 x 、 y 方向推移质输沙率; ΔS 为源汇项, 对于平衡输沙, 取 $\Delta S=0$; z_{old} 、 z_{new} 分别为更新前、后的河床高程; n 为床沙孔隙率; Δt_{HD} 为时间步长。

1.1.2 边界条件

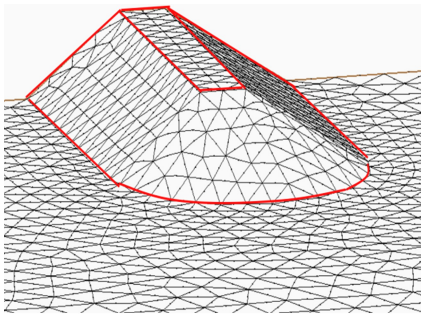
水流模块中, 设定水槽左、右两侧均为陆边界, 进口给定流量, 出口给定相应的水位, 对于不滑动岸边界, 取 x 、 y 方向的流速 u 、 v 均为 0 m/s 。泥沙模块中, 设定泥沙输移仅受单一水流条件作用, 进、出口边界均为零梯度。

1.1.3 方程离散与求解

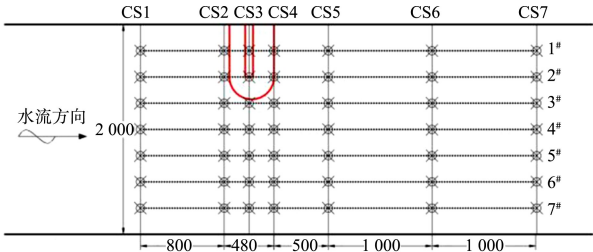
采用有限体积法对计算区域进行空间离散, 将平面二维模型细分为不重叠的单元, 计算区域采用三角形网格进行剖分, 水位定义在网格节点上, 单宽流量定义在相邻网格的中部, 求解格式采用一阶精度方法。

1.2 模型验证

模型验证采用喻涛^[13]水槽试验资料。试验水槽长 30 m 、宽 2 m 、高 1 m , 水槽中部铺设了 8 m 长的动床段, 丁坝位于水槽左侧, 距进口 12.75 m , 丁坝高 0.1 m , 坝底长 0.75 m 、宽 0.425 m , 迎水坡坡比 $1:1.5$, 背水坡坡比 $1:2$, 坝头坡坡比 $1:2.5$, 圆弧形直坝头, 泥沙粒径 $d_{50}=1.0\text{ mm}$, 密度 $\rho_s=2.65\text{ t/m}^3$, 平均流量 $Q=55\text{ L/s}$ 。布置 7 个纵断面、7 个横断面, 横、纵断面交点即为流速及水位测点。丁坝附近计算网格划分及特征断面布置见图 1。



a) 计算网格划分

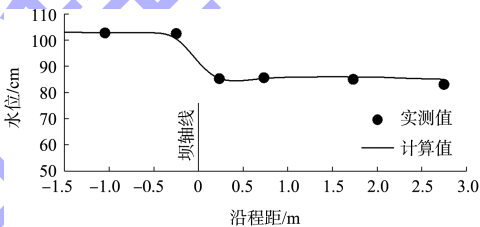


b) 测流断面分布(单位: mm)

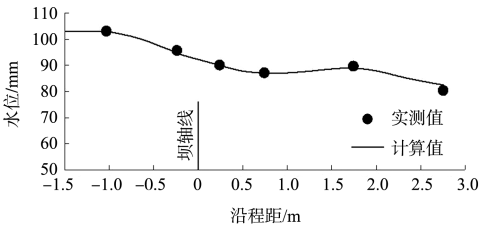
图 1 计算网格划分与测流断面分布

1.2.1 水位验证

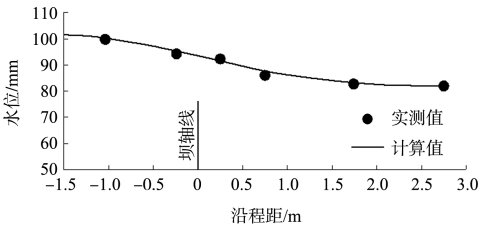
以左侧、中部和右侧 3 条纵向水面线为例, 计算水位与实测水位的对比见图 2。可以看出, 计算和实测的水面线走势吻合较好, 水位偏差基本在 1 mm 以内。



a) 左侧



b) 中部



c) 右侧

图 2 水位验证

1.2.2 流速验证

计算流速与实测流速的对比见图 3。可以看出, 计算流速与实测流速分布较为吻合, 偏差小于 0.05 m/s 。

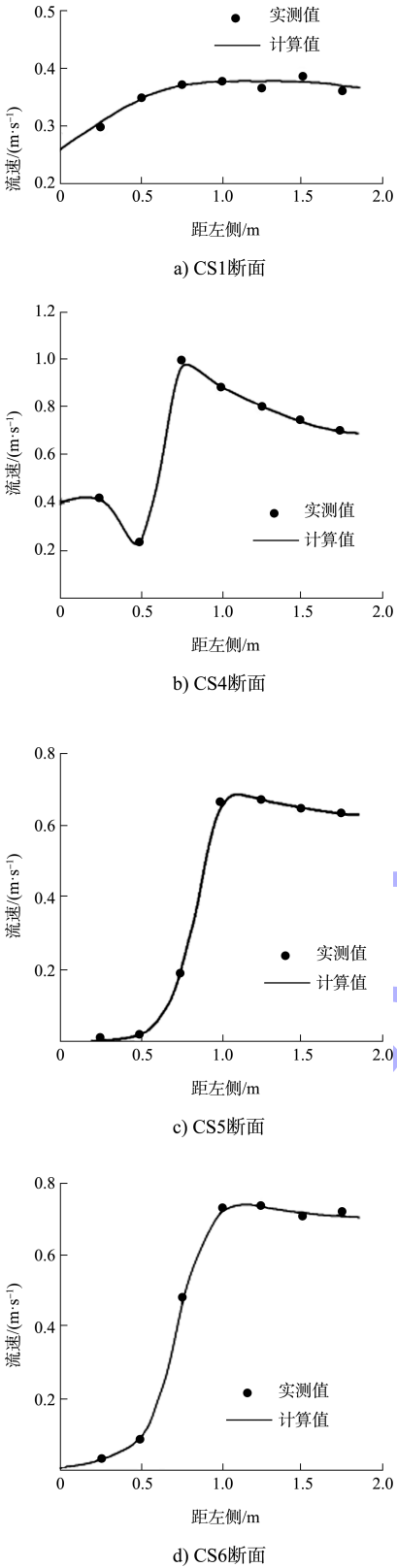


图 3 流速验证

1.2.3 冲淤变形验证

冲淤变形验证结果见图 4。可以看出，各断面计算和实测的冲淤部位、冲淤深度等较为一致，

符合程度良好，冲淤偏差基本控制在 5 mm 以内。

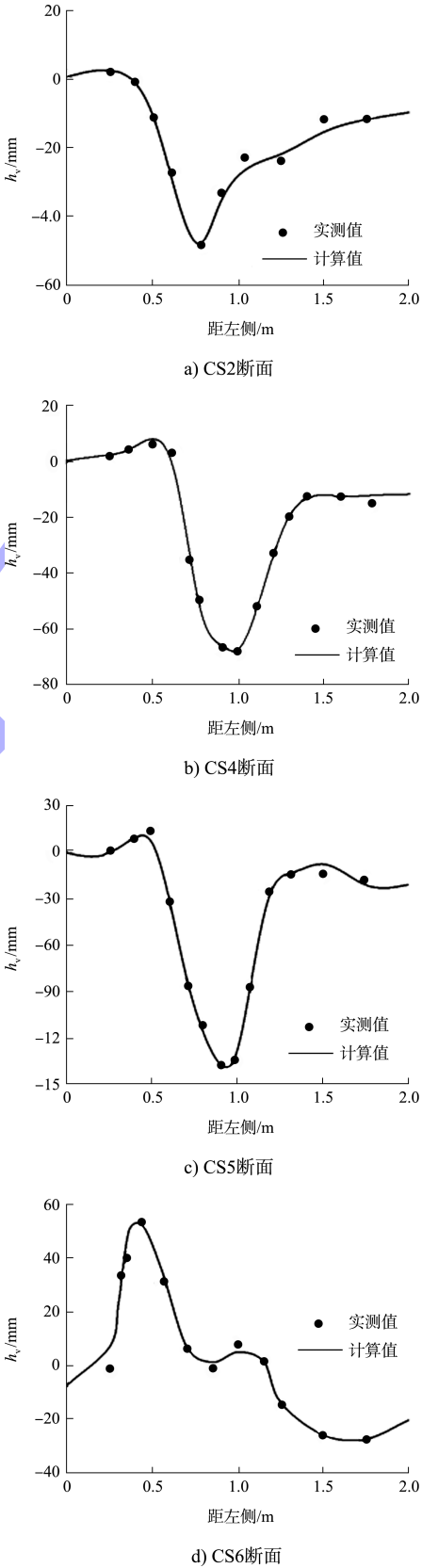


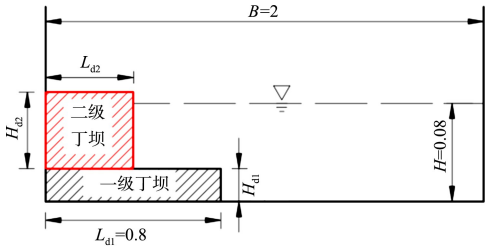
图 4 冲淤验证

注： h_v 为冲淤深度，正值表示淤积，负值表示冲刷。

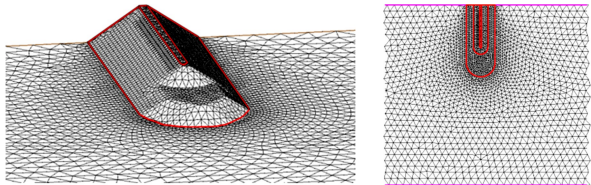
综上, 本文采用的平面二维水流泥沙数学模型能正确模拟水流泥沙运动, 可用于下一步研究。

1.3 计算工况

参考 JTS 181—2016《航道工程设计规范》, 同时考虑到计算水槽宽度、阶梯形丁坝对水流泥沙运动的影响等因素, 设置阶梯形丁坝迎水坡坡比 1:1.5, 背水坡坡比 1:1.5, 坝头坡坡比 1:1, 一级丁坝长 $L_{d1}=0.8\text{ m}$, 丁坝总高度 $H_d=0.1\text{ m}$, 水槽宽 $B=2\text{ m}$, 水深 $H=0.08\text{ m}$, 床沙中值粒径 $d_{50}=0.8\text{ mm}$; 采用正挑圆弧形直头丁坝, 并对丁坝区域进行局部加密, 丁坝处网格边长约 0.02 m , 其他区域网格边长约 0.08 m , 丁坝尺度及网格划分见图 5, 计算参数与验证时保持一致。



a) 丁坝尺度(单位: m)



b) 丁坝网格划分斜视图 c) 丁坝网格划分俯视图

图 5 丁坝尺度及网格划分

阶梯形丁坝的几何尺度参数包括一级丁坝高度 H_{d1} 和二级丁坝长度 L_{d2} , 为进行无量纲化处理, 定义一级丁坝相对高度 $\psi = H_{d1}/H$, 二级丁坝相对长度 $\varepsilon = L_{d2}/B$ 。结合数模验证资料的流量取值, 并保证床沙在各级流量下均能起动输移, 取计算流量 Q 为 $50\sim110\text{ L/s}$; 为使一级丁坝始终处于淹没状态, 结合试验水深, 取一级丁坝高度 H_{d1} 为 $0.01\sim0.07\text{ m}$; 参考文献[12]的研究成果, 取二级丁坝长度 L_{d2} 为 $0.4\sim0.7\text{ m}$; 基于上述参数取值范围, 并使计算工况具有一定代表性, 数模计算选定 Q 、 ψ 和 ε 共 3 个因素, 每个因素选定 7 个水平, 共 19 组工况, 见表 1。

表 1 数模计算工况

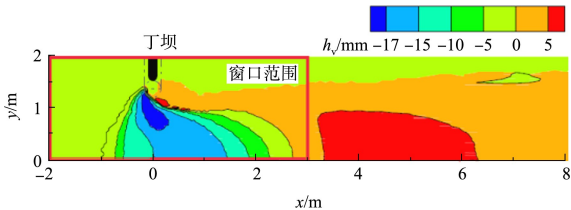
工况	$Q/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	ε	ψ	弗劳德数 Fr	工况	$Q/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	ε	ψ	弗劳德数 Fr
1	50	0.28	0.63	0.353	11	80	0.28	0.50	0.565
2	60	0.28	0.63	0.424	12	80	0.28	0.75	0.565
3	70	0.28	0.63	0.494	13	80	0.28	0.88	0.565
4	80	0.28	0.63	0.565	14	80	0.20	0.63	0.565
5	90	0.28	0.63	0.635	15	80	0.23	0.63	0.565
6	100	0.28	0.63	0.706	16	80	0.25	0.63	0.565
7	110	0.28	0.63	0.776	17	80	0.30	0.63	0.565
8	80	0.28	0.13	0.565	18	80	0.33	0.63	0.565
9	80	0.28	0.25	0.565	19	80	0.35	0.63	0.565
10	80	0.28	0.38	0.565					

注: ε 和 ψ 变化的计算工况均包括工况 4。

2 结果分析

2.1 坝头冲刷坑形成过程

以工况 4 为例, 说明阶梯形丁坝坝头周围冲刷坑形态尺度的发展过程, 不同冲刷历时的床面形态见图 6; 各时刻最大冲深 h 随时间 t 的变化规律见图 7a), 冲坑面积 A 及冲刷量 V 随 t 的变化曲线见图 7b)。



a) $t=0.5\text{ h}$

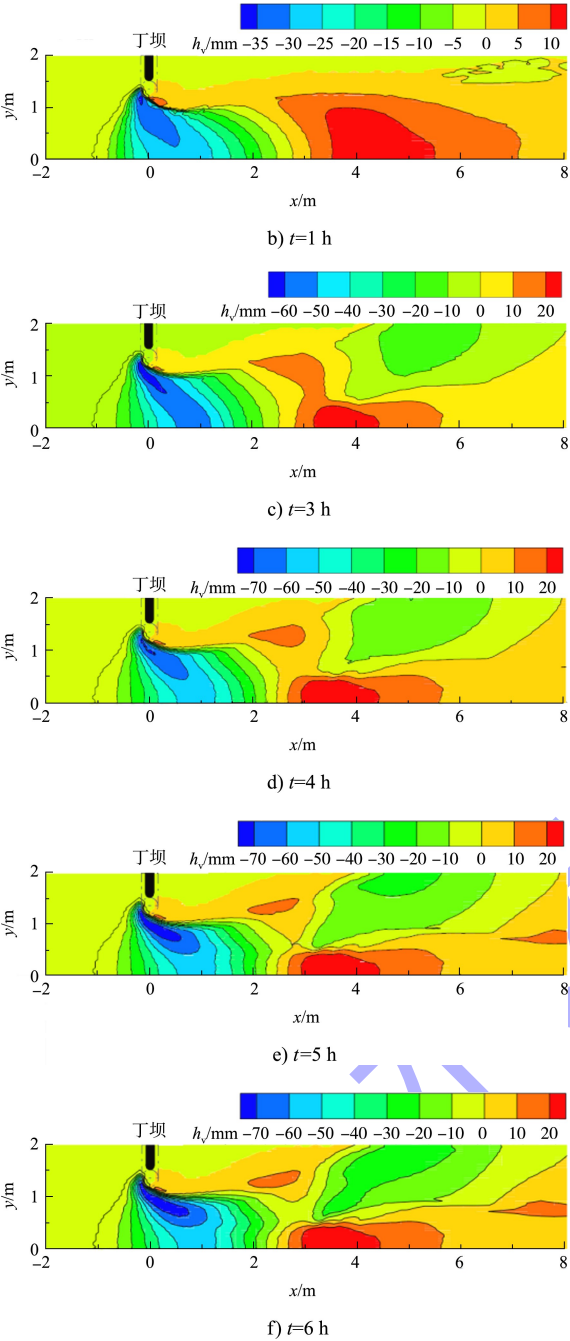
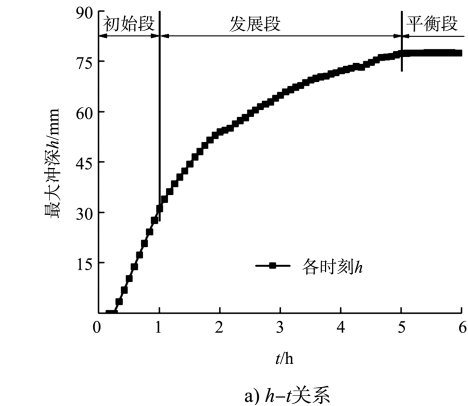


图 6 冲刷形态随时间变化



a) $h-t$ 关系

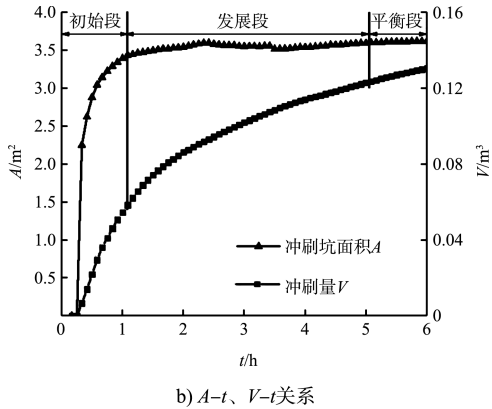


图 7 冲坑尺度与冲刷量变化

根据丁坝局部冲刷情况，选择图 6a) 所示窗口范围作为重点分析区域，统计该区域冲刷平衡时的最大冲深 h_s 、冲刷坑面积 A 及冲刷量 V 。结果显示，阶梯形丁坝各时刻最大冲深 h 随时间 t 的变化规律与单式断面丁坝较为相似，坝头局部冲刷可分为初始段、发展段和平衡段 3 个阶段：1) 在初始段，水流对坝头附近的冲刷能力强，河床冲刷变形明显，冲刷量较大，这一过程约发生在冲刷开始的 $0.8 h$ 内，在该阶段， h 与 V 均随 t 大致呈线性快速增加，约完成了 $0.3 h_s$ ，与此同时，冲刷坑面积充分发展且增长迅速。2) 在发展段，随着冲深的发展， h 与 V 随时间的增长速率逐渐降低，但坝头局部冲坑面积变化甚小。3) 在平衡段， h 达到最大， h 与 A 随时间变化甚微，由于冲坑边缘还未达到稳定，存在少量坍塌，在坝头局部冲刷达到极限冲刷深度后，冲刷量稍有增长，但总体趋于稳定。

冲坑形态发展过程为：1) 冲刷坑的上游边界始终呈弧形，在初始段冲刷坑沿水槽纵向延伸，到发展段和平衡段，上游边界几乎不变，但下游边界逐渐向下游凸出。2) 在初始段，强冲深区域呈不规则的扁圆状；到发展段，强冲深区呈窄长的条形，当冲刷逐渐平衡，强冲深区的形状由长条状逐渐恢复向扁圆状发展，由于丁坝附近横向水流始终指向右侧，所以强冲深区也始终倾向于右侧；平衡段时冲深不再发展，下游淤积区形态有微量变化。可见，与单式断面丁坝类似，冲坑发展过程中，阶梯形丁坝不同时刻的冲坑形态也

具有几何相似性。

由于坝头为圆弧形, 坝头下游侧流速较小, 床沙在坝头下游侧产生少量的淤积。在冲刷的初始段, 淤积主要出现在靠近冲刷坑下游, 当坝头局部冲刷基本达到稳定时, 局部冲坑不再发展, 坝后的淤积被分为 2 个区域: 丁坝后方的回流区和冲坑下游的右侧区域。

2.2 冲坑形态与水流条件的关系

冲刷稳定时不同水流条件的冲坑形态见图 8; 不同 Fr 时, 各时刻最大冲深 h 随时间 t 的变化规律见图 9a), 冲刷稳定时冲坑尺度随 Fr 的变化情况见图 9b)。可以看出: 1) 随着 Fr 的增大, 水流流速增大, 坝头冲刷坑边界逐渐向上游和下游延伸, 下游淤积区被分成 2 个区域, 由于下游两侧淤积带对水流的束窄作用, 坝头冲刷坑逐渐发展成长沟壑带。2) 随着 Fr 增大, 水流对床面的冲刷能力增强, 平均冲深 \bar{h} 及 A 增大, 冲刷平衡时最大冲深 h_s 越大, 与文献[11]的单式断面丁坝研究结果一致, 冲刷达到平衡所需历时从约 2 h 增加到 9 h。3) 当 $Fr=0.776$ 时, 由于水流流速远大于床沙起动流速, 丁坝上游床面已经开始冲刷, 靠近丁坝上游区域由于流速较小, 产生了大量淤积。4) A 与 h_s 随 Fr 总体呈线性增长, $Fr \leq 0.565$ 时 \bar{h} 随 Fr 增长较慢, 说明此时来流条件对平均冲深影响较小, 而 $Fr > 0.565$ 时 \bar{h} 随 Fr 增长则相对较快。

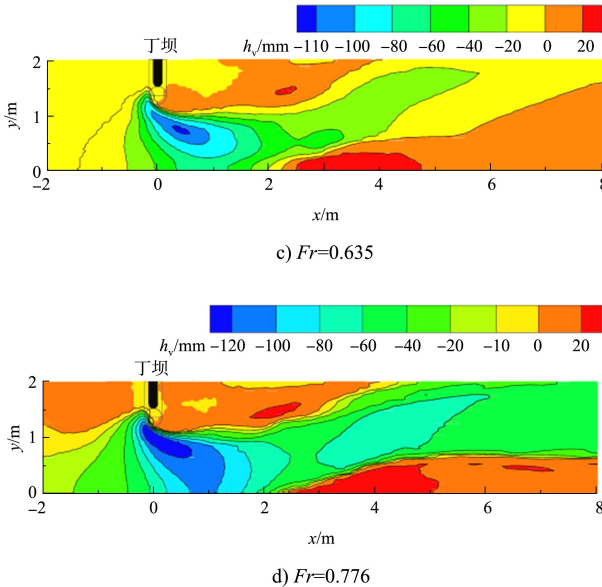
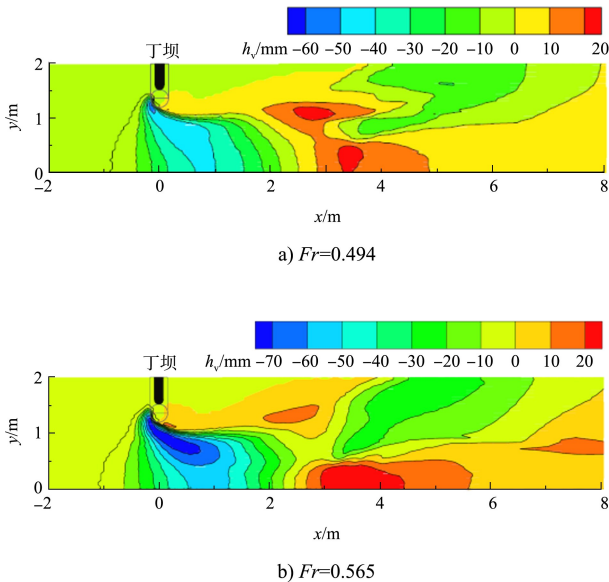
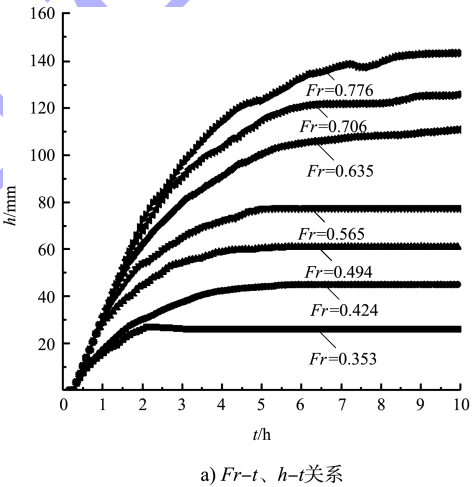
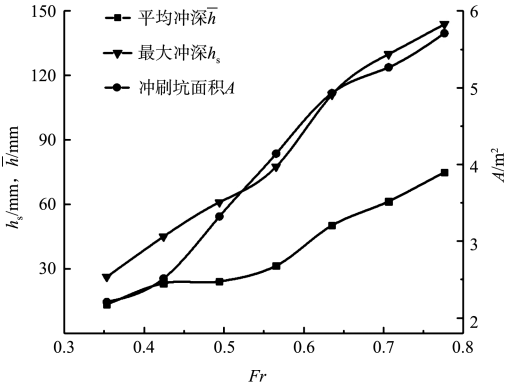


图 8 不同水流条件的冲坑形态



a) $Fr-t$ 、 $h-t$ 关系



b) $\bar{h}-Fr$ 、 h_s-Fr 、 $A-Fr$ 关系

图 9 冲坑尺度随时间及 Fr 的变化

2.3 冲坑形态与丁坝尺度的关系

冲刷稳定时不同丁坝尺度的冲坑形态见图 10; 不同一级丁坝相对高度 ψ 时, 各时刻最大冲深 h

随时间 t 的变化趋势见图 11a)，不同二级丁坝相对长度 ε 时 h 随时间 t 的变化情况见图 11b)。可以看出：1)在不同丁坝尺度下，丁坝局部冲坑形态相似，冲坑呈三角形分布，强冲深区呈斜向下游的扁圆形，下游淤积区分布及位置同工况 4。2)丁坝尺度不同时，冲刷达到平衡所需历时在 5~6 h 之间，与水流条件相比变幅相对较小，说明丁坝尺度对冲刷达到平衡所需历时影响相对较小。3)在冲刷开始约 0.4 h 内，冲深随时间的发展规律一致。4)根据文献[1]的阶梯形丁坝区水流分布显示，一级丁坝坝头附近水流流速最大，因此冲刷稳定后最大冲深点位于一级丁坝坝头略靠下游处，这与单式断面丁坝最大冲深点位置基本一致^[14]。5)一级丁坝高度、二级丁坝长度对局部冲坑形态及冲深发展的影响具有一定的等效性。

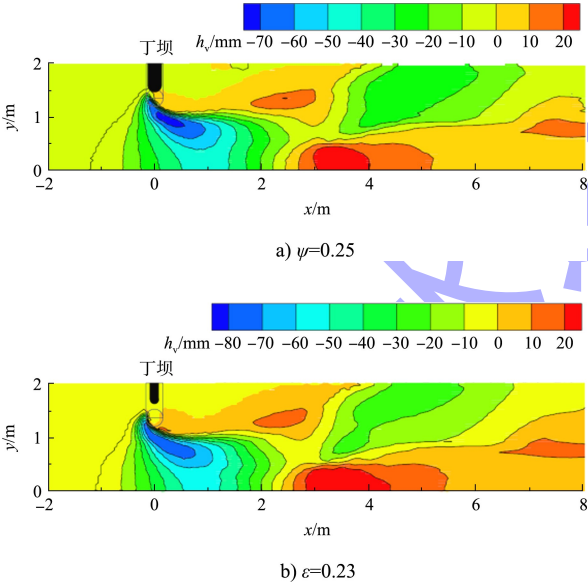
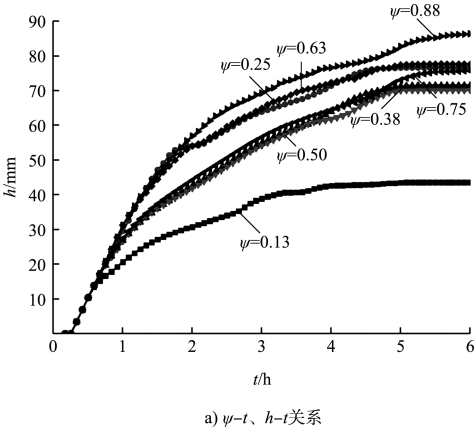


图 10 不同丁坝尺度的冲坑形态



a) ψ - t 、 h - t 关系

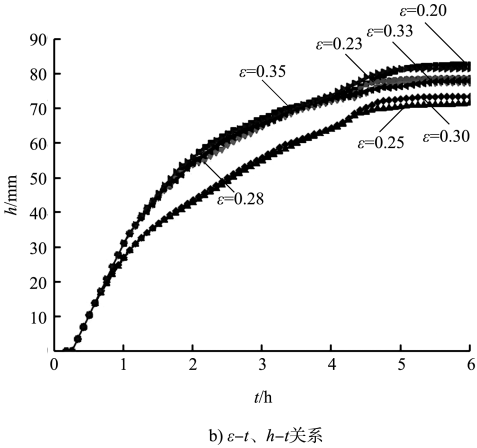


图 11 冲深随时间及丁坝尺度的变化

冲刷稳定时局部最大冲深 h_s 、平均冲深 \bar{h} 随一级丁坝相对高度 ψ 的变化见图 12。可以看出：当 $\psi \leq 0.7$ 时， h_s 、 \bar{h} 均随 ψ 的增大而增大；当 $\psi > 0.7$ 时，变化趋于平缓， ψ 对 h_s 和 \bar{h} 的影响不甚明显。该规律可能与丁坝下游回流宽度有关，文献[12]的研究发现，回流宽度最大值出现在 $\psi = 0.7$ 附近，当 $\psi > 0.7$ 时回流宽度稍有回落，进而减弱了对水流的束窄作用，此时 ψ 的增大对冲深的影响效果相对较小。

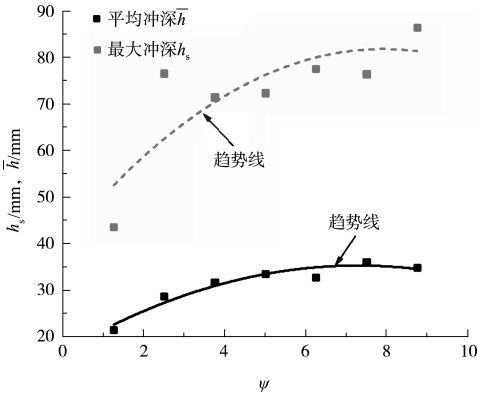


图 12 冲深随 ψ 的变化

3 结 论

1) 冲坑达到平衡所需历时主要受水流条件影响，丁坝尺度对其影响相对较小，冲坑达到平衡所需历时随着流量的增大而增加，而一级丁坝高度 H_{d1} 、二级丁坝长度 L_{d2} 对冲坑达到平衡所需时间影响较小。