



非恒定流下桩群绕流局部冲刷试验

王多银^{1,2}, 唐选海¹, 穆军帅³, 段伦良^{1,2}, 李国洋¹, 杜文力¹, 吴穗庆¹
(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
3. 安徽省建筑工程质量监督检测站有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要: 水流经过桩群时, 桩前会出现下降水流和马蹄形漩涡, 显著增加水流的挟沙能力与输移能力。本文基于非恒定流桩群绕流局部冲刷水槽试验, 研究非恒定流下桩群绕流的局部冲刷分布以及最大冲刷深度; 通过计算流体力学软件 Flow 3D 对水槽试验进行模拟计算仿真, 研究非恒定流下桩群绕流局部冲刷发展过程。研究表明: 上游单桩的冲刷范围为桩前 2D (桩径) 至桩后 1D, 桩外侧 2.5D 至桩内侧 1D; 下游单桩的冲刷范围为桩前 1D 至桩后 1D, 桩外侧 1.5D 至桩内侧 1D, 且桩群各个区域的横向冲刷断面也有差异; 最大冲刷深度和冲刷体积随时间呈对数形式增加, 直至达到冲刷平衡状态, 且 20% 的时间局部冲刷可完成冲刷平衡时的 50%, 50% 的时间可达到冲刷平衡的 80%。

关键词: 非恒定流; 桩群绕流; 局部冲刷; 数学模拟

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0075-09

Local scour experiment of flow around pile group under unsteady flow

WANG Duoyin^{1,2}, TANG Xuanhai¹, MU Junshuai³, DUAN Lunliang^{1,2}, LI Guoyang¹, DU Wenli¹, WU Suiqing¹

(1. Hehai College of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

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

3. Anhui Provincial Construction Engineering Quality Supervision and Testing Station Co., Ltd., Hefei 230031, China)

Abstract: When water flows past the pile group, there will be a descending water flow and a horseshoe shaped vortex in front of the pile, which significantly strengthens the sediment carrying capacity and transport capacity of the water flow. Based on the local scour flume experiment of unsteady flow pile group, this paper studies the local scour distribution and maximum scour depth of pile group under unsteady flow. By using computational fluid dynamics software Flow 3D to simulate and calculate the flume experiment, and investigate the development process of local scouring around the pile group under unsteady flow. The research shows that the scouring range of upstream single piles is from 2D in front of the pile (Pile diameter) to 1D behind the pile, and from 2.5D on the outside of the pile to 1D on the inside of the pile. The scouring range of downstream single piles is from 1D in front of the pile to 1D behind the pile, and from 1.5D on the outside of the pile to 1D on the inside of the pile. Additionally, there are differences in the transverse scouring sections in various areas of the pile group. The maximum scouring depth and scouring volume increase logarithmically with time until the scour equilibrium is reached. Moreover, 20% of the time for local erosion can achieve 50% of the scouring equilibrium state, and 50% of the time can reach 80% of the scouring equilibrium state.

Keywords: unsteady flow; flow around pile groups; local scour; mathematical simulation

桩是深入土层或岩层的柱形构件, 桩与连接桩顶的承台共同组成桩基础^[1]。实际工程中为了

满足建筑物稳定性要求, 桩基础往往以桩群形式出现^[2]。当桩体相互靠近时, 柱与柱之间的流体

收稿日期: 2023-10-31

作者简介: 王多银 (1965—), 男, 硕士, 教授, 博导, 研究方向为港航工程等领域结构与介质相互作用。

相互干扰,导致桩群之间的流场情况和动力响应情况更复杂,对床底的局部冲刷作用也更加复杂。

局部冲刷发展过程可分为冲刷起始阶段、主要冲刷阶段和冲刷平衡阶段^[3]。国内外学者对桩柱的局部冲刷主要从水流特性、泥沙特性、结构物几何特征、时间尺度等多方面研究桩柱周围局部冲刷,主要包括:桩柱周围水动力特性、冲刷机理、冲刷坑的形成及其发展过程、平衡冲刷坑深度影响因素以及冲刷坑深度公式预测等。

桩基布置形式等因素会对流场造成显著干扰,导致桩周泥沙冲刷强度存在较大差异。Du等^[4]研究对比垂直桩和斜桩间的局部冲刷问题,发现倾斜桩最大冲刷深度与竖向桩相比有不同程度的减小;Lin等^[5]发现在给定的相对冲刷深度下,桩径的增加增大了桩侧承载力的冲刷损失。桩间距也是影响桩周局部冲刷的重要因素。Qi等^[6]对无量纲桩距对桩基冲刷尺度的影响展开研究,发现桩间距对区域内流场以及冲刷坑形态的尺度影响显著。黄雄合等^[7]研究明渠砂质床面桩柱冲刷的水沙动力机理,发现桩柱冲刷范围随雷诺数 Re 增大呈减小趋势;梁发云等^[8]通过试验研究了黏性-砂性土层的局部冲刷机理,发现由于上部黏性土层具有一定的束缚作用,黏性-砂性土层中的冲刷深度往往比单一砂性土层的最终冲刷深度小。Link等^[9]通过相关研究发现,桩周局部冲刷首先发生在桩侧,且桩侧呈现对称分布,而最大冲刷深度最终出现在桩前,桩后冲刷深度最小。Debnath等^[10]通过理论分析和模型试验研究清水冲刷条件下圆柱桥墩冲刷发展状况,试验结果表明,冲刷平衡条件与平均剪切应力和时间密切相关,只需10%~20%的平衡冲刷时间即可发展到最大平衡冲刷深度的60%~80%。叶茂胜^[11]在水槽试验中进行了3组不同洪峰非恒定流量下的圆柱绕流局部冲刷试验,流量上涨阶段的冲刷占比均在75%以上。

目前,国内外研究者对桩基础局部冲刷进行了较为全面的研究,并取得一定突破性进展,但研究多集中在恒定流或单桩条件下,难以反映

实水流非恒定运动的复杂性以及桩群各桩柱之间流体的相互干扰,因此,有必要对非恒定复杂水流条件下桩群绕流局部冲刷展开研究。本文基于长江上游洪水特征和重庆主城港区高桩码头桩群尺寸特征,开展非恒定流下间距比 $L/D=3.5$ 时(L 为桩柱间距, D 为桩柱直径),方形布置的四圆柱桩群绕流水槽局部冲刷试验和数值模拟,研究非恒定流下桩群绕流的局部冲刷分布以及局部冲刷发展过程。

1 水槽试验设置

1.1 试验设备

本次试验在重庆交通大学河海学院航道整治厅内6 m玻璃水槽中进行。试验水槽高0.3 m、宽0.25 m、长6 m,主要由有机玻璃板组成,见图1。水槽右下角为流量控制系统,包括流量控制模块及流量测量模块两部分,根据流量反馈实现水槽流量的闭环控制。在计算机控制软件中输入试验所需要的目标流量,然后计算机将输入的目标流量信息传递到变频器中,随后变频器将计算机信号转化为频率信号,控制水泵的转速从储水箱中抽水,为水槽提供准确的水流流量。其中,水槽整体纵向比降 $i=3‰$ 。



图1 试验水槽

为便于分析桩群绕流局部冲刷情况,在桩群前后布置成深10 cm、长50 cm、宽25 cm的长方体沙床凹槽,使用0.3 mm均质石英砂填充,试验前对石英砂进行多次清洗去除粉质,并将其铺设于长方体沙床凹槽内,见图2。沙床距离水槽进水口3.2 m,距离出水口1.3 m,水流进出口都设置有一定坡度的衔接,保证出入口的水流平稳,其余部分模拟河床均使用有机玻璃板。

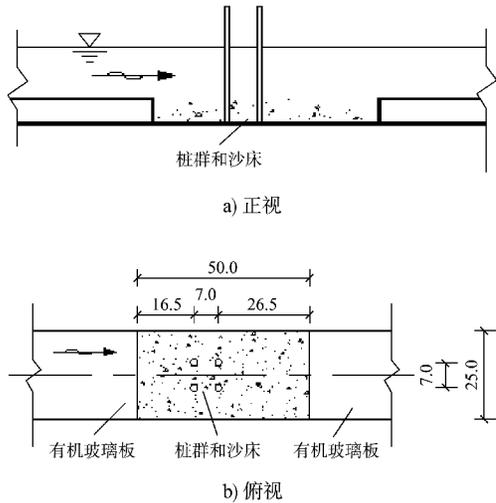


图2 试验沙床凹槽布置(单位:cm)

试验桩的原型选取长江上游架空直立式高桩码头桩基,其直径 $D_p = 2$ m,桩间距 $L_p = 7$ m,间距比 $L/D = 3.5$ m。根据重力相似原则,试验桩选用长度25 cm, $\phi 2$ cm的实心有机玻璃管,该材料具有良好的透明性、化学稳定性和耐用性,具备较强的抗冲击性能,满足试验研究的要求。为确保试验过程中模型桩不发生振动、倾覆和扭转,试验前在桩群底部采用特制打孔的有机玻璃板(尺寸为50 cm \times 25 cm \times 0.5 cm)进行嵌合,并使用亚克力胶水进行固定粘合。

1.2 流量设置

试验以长江上游洪水涨落为背景,探究不同流量历程下桩群周围局部冲刷的差异性规律。为确保洪水流量过程的可重复性和规律性,本试验非恒定流施放采用正弦型流量历时曲线。这种流量过程可以用简洁的指标来表示,从而方便试验的观测、数据采集和分析。为确保试验的准确性,试验过程中的最小流速需不小于模型砂的起动流速,因此非恒定流正弦函数曲线流量的最小流量和峰值流量需通过计算得出。本次试验采用试验砂为0.3 mm无黏性均质石英砂,选用沙莫夫经验公式(1)和岗卡洛夫经验公式(2)计算模型砂的起动流速:

$$U_{c1} = 1.144 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d^* \left(\frac{H}{d}\right)^{1/6}} \quad (1)$$

$$U_{c2} = 1.071 g \left(\frac{8.8H}{d_{95}}\right) \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} \quad (2)$$

式中: U_c 为泥沙起动流速,m/s; ρ_s 为石英砂密度, kg/m^3 ; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; H 为水深,m,取 0.1 m; d_{95} 、 d 为泥沙粒径参数,m。

经公式计算取 $Q_{\min} = 18.8$ m^3/h 为非恒定流正弦函数曲线谷底流量, $Q_{\max} = 33.5$ m^3/h 为非恒定流正弦函数曲线峰值流量。根据长江上游洪水特点,按公式(3)构建非恒定流正弦型流量历时曲线:

$$Q = 7.35 \sin\left(\frac{2\pi}{1800} \cdot T - \frac{\pi}{2}\right) + 26.15 \quad (3)$$

本试验中非恒定流的模拟释放过程采用阶梯模拟的方式,根据单峰型洪水的演变过程,可以将流量分为上涨和下跌2个阶段,并将涨幅和跌幅分为8个部分,总共累计15个阶段,1个周期的模型放水时间 T 取1800 s,流量历时曲线见图3。

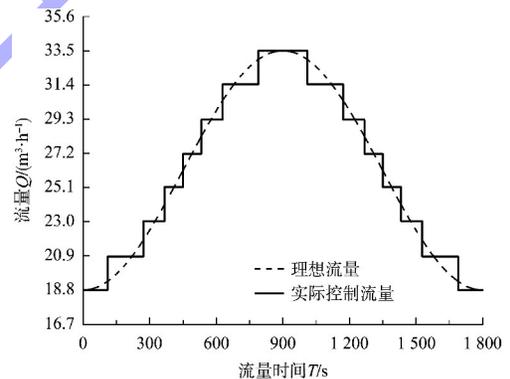


图3 非恒定流历时曲线

1.3 水槽试验步骤

1) 向水槽储水箱蓄水到固定水位,检查入水口和尾门设置情况,检查试验模型与模型沙摆放情况,安全无误后进行下一步操作。

2) 开启流量控制系统,将流量设置为初始流量 $Q_{\min} = 18.8$ m^3/h ,1 min后进行非恒定流流量控制30 min。

3) 1个非恒定流过程完成后,对桩群周围沙床面进行地形测量。

4) 试验结束,关闭流量系统,进行仪器设备的校准与归库。

2 水槽试验结果分析

随着水流流速增大，桩群周围泥沙颗粒所承受的剪切力、拖曳力增大。水流条件达到泥沙颗粒的起动条件时，泥沙颗粒随水流运动。桩群的局部冲刷开始于桩前迎水面的左右侧，进而往桩群区域延伸，然后冲刷坑进一步发展扩大。随着非恒定流量的增大，桩周下降水流产生的马蹄形漩涡不断向下掏刷沙床，泥沙颗粒以螺旋流的运动方式不断被水流运输到桩群外，随水流被运输到下游低流速区域淤积。

2.1 局部冲刷地形

如图4、5所示，桩群中的最大冲刷深度出现在每根桩周围。上下游各桩的桩前、桩左、桩右出现最大冲刷深度，这与非恒定流单桩局部冲刷、恒定流单桩冲刷的现象一致。不同于非恒定流单桩绕流局部冲刷，在上游桩的桩后出现了较大区域的冲刷坑，而在下游桩后冲刷区域深度普遍小于上游桩。在四桩中心区域，出现因冲刷较小形成的沙丘，冲淤地形高程分布关于中轴线对称。



图4 T=1 800 s 水槽试验非恒定流桩群绕流局部冲刷地形

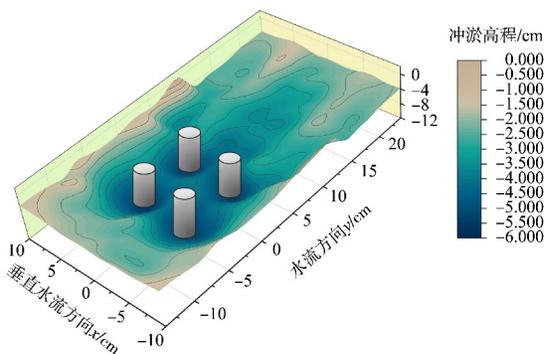


图5 T=1 800 s 水槽试验非恒定流桩群绕流局部冲刷地形等高线

从图6a)可以看出，上游桩与下游桩桩前冲刷坑深度基本一致，冲刷坑的前后坡度变化不同。在上下游桩桩心的连线断面上，即 $x=3.5\text{ cm}$ 、 $x=-3.5\text{ cm}$ 的纵向断面上，在上游桩前 $2D$ 处开始出现明显的冲刷坑，直至上游桩后 $1D$ 处，可认为上游单桩的冲刷坑范围为桩前 $2D$ ~桩后 $1D$ ；下游桩前、桩后 $1D$ 开始出现明显的冲刷坑，可认为下游单桩的冲刷坑范围为桩前 $1D$ ~桩后 $1D$ 。从图6b)可以看出，在左右岸桩心的连线断面上，即 $y=3.5\text{ cm}$ 、 $y=-3.5\text{ cm}$ 的横向断面，上游桩外两侧 $2.5D$ 开始出现明显的冲刷坑，下游桩外两侧 $1.5D$ 开始出现明显的冲刷坑，上下游桩内冲刷坑的范围一致，约为 $1D$ 。冲刷坑范围见图7。

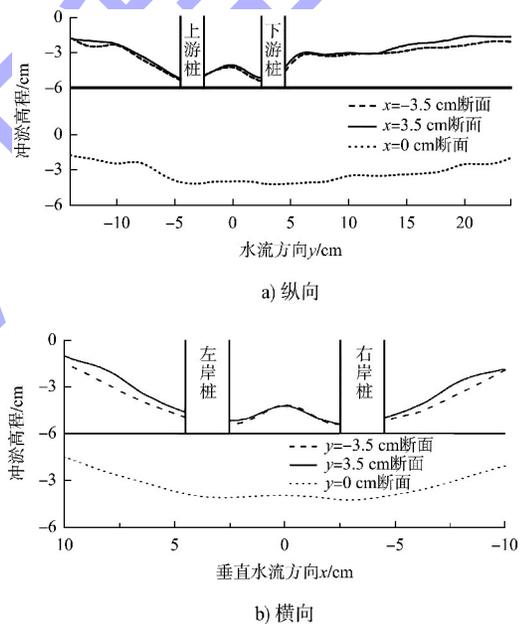


图6 断面冲淤高程分布

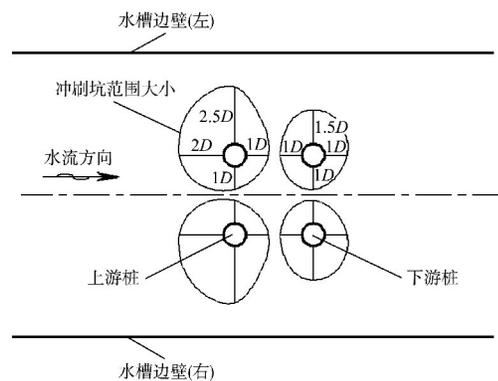


图7 桩群冲刷坑范围

2.2 局部冲刷地形断面分布

根据水流方向与桩群的空间位置,给出桩群前区域、桩群区域、桩群后区域的横向断面冲淤高程分布,见图8,分析得到以下结论:

1) 桩群前区域, y 为 -14 、 -12 、 -10 cm 断面上,沿水流方向冲刷不断加强,同一断面上冲刷深度相差不大,可看做呈 U 形分布,冲刷不受桩群绕流作用影响。 y 为 -8 、 -6 cm 断面上出现 W 形分布,这时上游桩 $2D$ 前开始出现冲刷坑。

2) 桩群区域内横向断面 y 为 -4 、 -2 、 0 、 2 、

4 cm 冲淤地形均呈 W 形分布,说明桩群绕流的存在对桩群四桩中心连线内的局部冲刷具有保护作用,在同一横向断面上,左右桩处冲刷最大、中心冲刷较小。

3) 桩群后区域横向断面冲淤地形呈 M 形分布,下游桩对桩后冲刷保护作用影响较大,在下游桩后 $1D$ 处开始出现沙脊。沿着水流方向, M 形分布谷峰、谷底差距逐渐减少,到桩后约 $8D$ 处,断面冲刷地形近似呈 U 形分布。

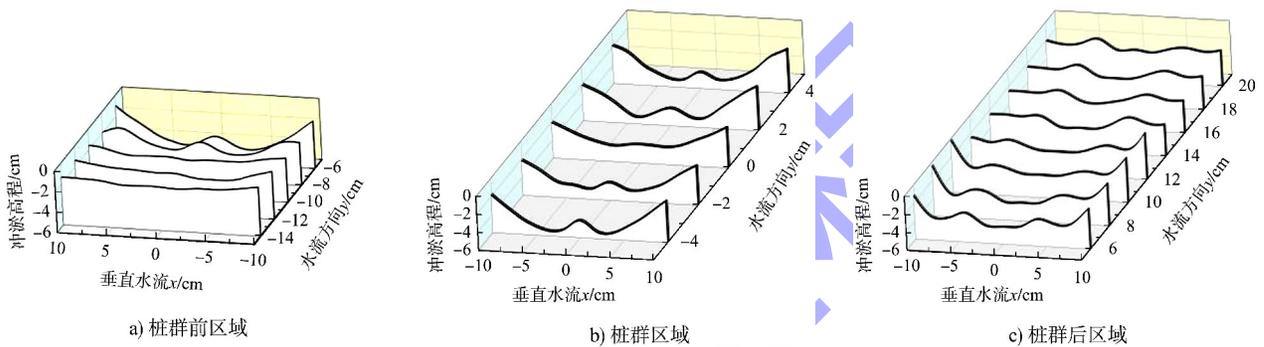


图8 桩群各区域横向断面冲淤高程分布

3 数值模拟

通过水槽试验,得到非恒定流下桩群绕流局部冲刷情况。通过计算流体力学软件 Flow 3D 对水槽试验进行模拟计算仿真,使用水槽试验得出的数据进行模型验证,进一步研究非恒定流下桩群绕流局部冲刷发展过程。

Flow 3D 软件采用有限差分法求解 Navier-Stokes 方程 ($N-S$ 方程),使用内置独特开发的 FAVOR (fractional area/volume obstacle representation) 网格处理技术,能够实现在结构化的网格内部定义复杂的几何形状,利用简单的多边形网格生成复杂的几何形状。Flow 3D 的最大优势是可以快速、精确地预测自由液面流动 (free-surface flow)。

3.1 数学模型的建立

桩群绕流的数值模拟计算范围选取十分关键。根据水槽试验物理模型,以桩群中心为三维坐标原点,水流方向为 y 轴方向。计算区域 y 方向 $-3.37 \sim 0.40$ m, x 方向 $-0.125 \sim 0.125$ m, z 方向 $0 \sim 0.25$ m。在桩前 $y=0.20$ m 和桩后 $y=0.30$ m 之间铺设深 10 cm、长 50 cm 的沙床,另外在 $y =$

-3.36 m 和 $y = 0.20$ m 的垂直面上设置 2 个 flux surfaces 监测流动数据,用于模型验证,网格划分见图 9。

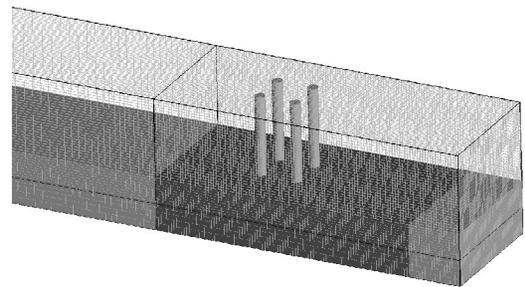


图9 模型网格划分

模拟水槽 x 、 y 、 z 在 3 个尺寸长度差距过大,按照水流方向,分别进行疏密划分。试验前,模型网格划分共采用低、中、高 3 种精度的网格划分,见图 10,低精度 20 万网格、中精度 68.4 万网格、高精度 150 万网格。根据 3 种精度网格划分进行数值模拟,见图 11,可以看出,在不同精度网格划分下,中精度模拟的水流形态基本与高精度相似,满足试验模拟需要。为节约计算资源与时间,本试验采用中精度网格划分 68.4 万个网格。

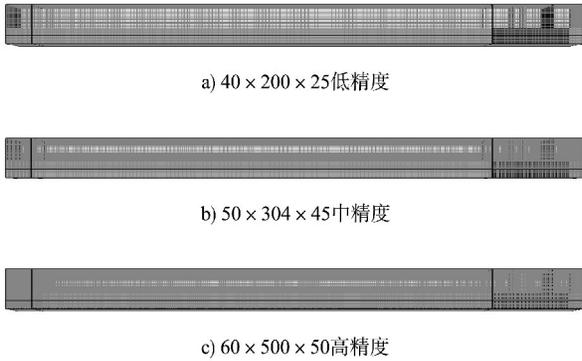


图 10 3种精度网格划分

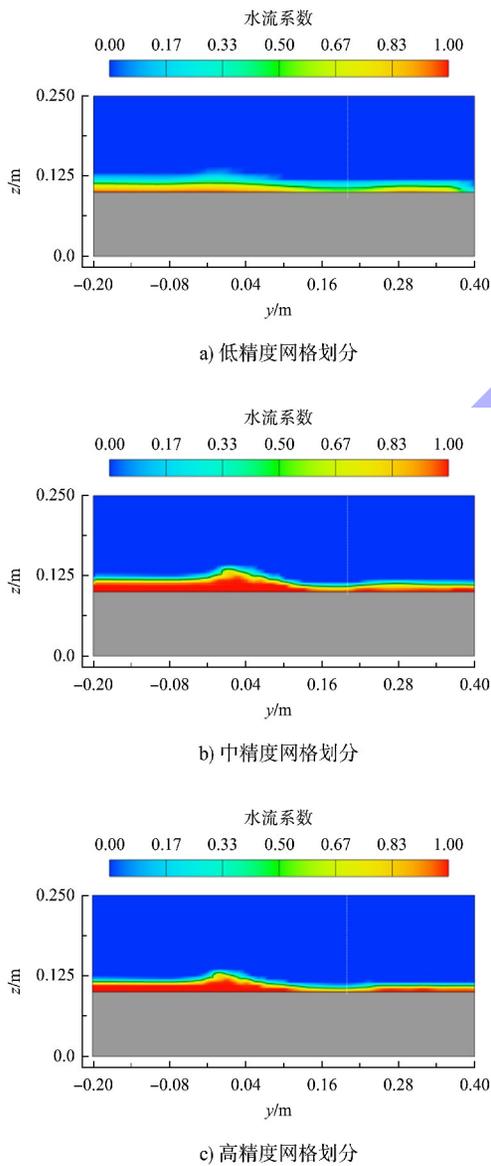


图 11 3种精度网格划分模拟结果

3.2 数学模型验证

为验证水槽数值模拟的准确性，将数值模拟得到的水位高程与本试验对比，见图 12，数值模

拟得到的 $y = -10 \text{ cm}$ 的水位高程与试验实际测量水位吻合较好。查看 2 个 flux surfaces 平面上通过的流量历时曲线，见图 13，数值模拟的流量历时曲线与试验入口流量的形态、周期、峰谷一致。通过水位高程与流量历时对比验证，说明数值模型模拟结果可靠。

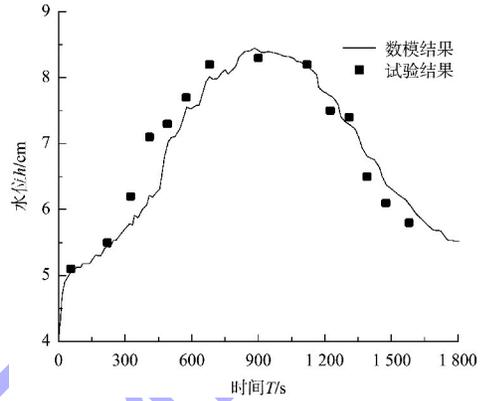


图 12 $y = -10 \text{ cm}$ 的水位高程

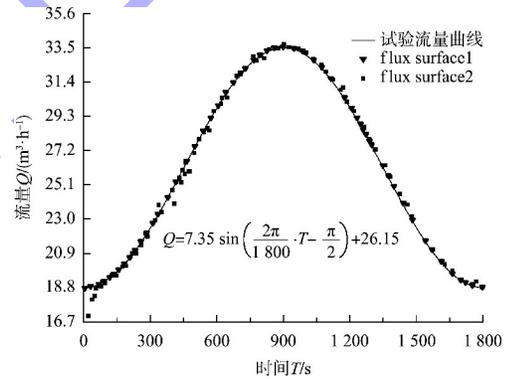


图 13 断面流量历时曲线

4 数值模拟结果分析

4.1 冲刷占比

为了更好地反映桩群绕流局部冲刷过程中的冲刷变化，定义无量纲参数冲刷占比 η 以反映局部冲刷的发展过程。冲刷占比指某一时刻的最大冲刷深度(或泥沙冲刷体积)占冲刷平衡时刻最大冲刷深度(或泥沙冲刷体积)的百分比。

1) 定义实测最大冲刷深度冲刷占比 η_{h_0} ：

$$\eta_{h_0} = h'/h_0 \quad (4)$$

式中： h' 为某一时刻的最大冲刷深度，cm； h_0 为试验中实测 $T = 1800 \text{ s}$ 时的最大冲刷深度，实测 $h_0 = -5.33 \text{ cm}$ 。

2) 定义实测冲刷体积冲刷占比 η_{V_0} :

$$\eta_{V_0} = V'/V_0 \quad (5)$$

式中: V' 为某一时刻的冲刷体积, cm^3 ; V_0 为试验中实测 $T = 1\ 800\ \text{s}$ 时的冲刷体积, 实测 $V_0 = -1\ 033.96\ \text{cm}^3$ 。

3) 定义数值模拟最大冲刷深度冲刷占比 η_{h_m} :

$$\eta_{h_m} = h'/h_m \quad (6)$$

式中: h' 为某一时刻的最大冲刷深度, cm ; h_m 为数值模拟中 $T = 1\ 800\ \text{s}$ 时的最大冲刷深度, cm 。

4) 定义数值模拟冲刷体积冲刷占比 η_{V_m} :

$$\eta_{V_m} = V'/V_m \quad (7)$$

式中: V' 为某一时刻的冲刷体积, cm^3 ; V_m 为数值模拟中 $T = 1\ 800\ \text{s}$ 时的冲刷体积, cm^3 。

根据数值模拟结果计算出不同冲刷时间的冲刷占比, 见表 1。

表 1 不同阶段冲刷占比分布

时间 T/s	h'/cm	V'/cm^3	$\eta_{h_0}/\%$	$\eta_{V_0}/\%$	$\eta_{h_m}/\%$	$\eta_{V_m}/\%$
55	-1.19	-157.57	22.27	15.24	24.34	14.13
220	-2.32	-440.46	43.53	42.60	47.57	39.50
325	-2.72	-561.56	51.01	54.31	55.75	50.36
410	-3.00	-643.91	56.25	62.28	61.47	57.74
490	-3.41	-716.21	63.98	69.27	69.92	64.23
575	-3.50	-777.52	65.66	75.20	71.76	69.72
680	-3.95	-849.51	74.03	82.16	80.91	76.18
900	-4.44	-976.14	83.26	94.41	91.00	87.54
1 120	-4.50	-1 026.80	84.35	99.31	92.19	92.08
1 225	-4.49	-1 045.87	84.24	101.15	92.06	93.79
1 310	-4.66	-1 060.69	87.43	102.58	95.55	95.12
1 390	-4.66	-1 075.72	87.41	104.04	95.53	96.47
1 475	-4.67	-1 091.35	87.67	105.55	95.82	97.87
1 580	-4.63	-1 101.05	86.79	106.49	94.85	98.74
1 745	-4.77	-1 116.10	89.55	107.94	97.87	100.09
1 800	-4.88	-1 115.13	91.50	107.85	100.00	100.00

如图 14 所示, 在 $T = 360\ \text{s}$ 时, 冲刷占比超过 50%, 说明在开始发生冲刷的时间里, 冲刷发展较快, 表现为最大冲刷深度剧烈增加, 冲刷坑范围迅速扩展, 在较小的时间内(整个冲刷过程的 20%)即可达到最大冲刷深度和冲刷体积的一半。在 $T = 900\ \text{s}$ 时, 冲刷占比 η 上升缓慢, 且在后续

时间里变化不大, 可认为已经达到冲刷平衡状态。说明涨落型非恒定流的局部冲刷主要发生在水流上涨段, 水流下降段的局部冲刷可忽略不计, 这与已有研究结果基本一致^[12-13]。

从图 15 可以看出, 冲刷占比 η 随时间呈对数形式分布, 即 $\eta = a \ln t + b$, 对冲刷占比 η 进行曲线拟合, 曲线参数见表 2(其中 a 、 b 为对数函数的拟合参数; R^2 为决定系数, 其值越接近 1, 拟合效果越好)。随着时间的发展, 桩群绕流的局部冲刷最大冲刷深度和冲刷体积呈对数形式变化, 初期泥沙冲刷较为迅速, 后期的冲刷发展可忽略不计。

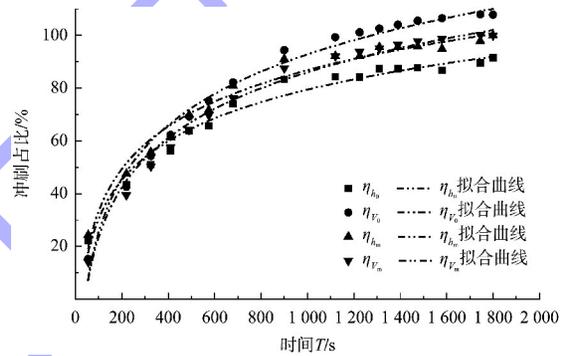


图 14 冲刷占比历时曲线

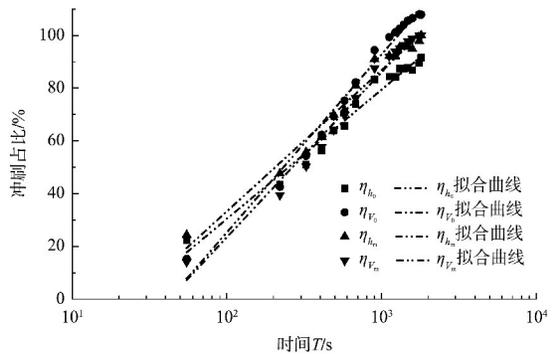


图 15 冲刷占比历时对数曲线

表 2 冲刷占比拟合曲线参数

参数取值	a	b	R^2
η_{h_0}	0.212 7	-0.674 8	0.976 8
η_{V_0}	0.293 1	-1.096 2	0.982 7
η_{h_m}	0.232 5	-0.737 5	0.976 8
η_{V_m}	0.271 7	-1.016 4	0.982 7

4.2 冲刷发展

基于数值模拟的非恒定流桩绕流局部冲刷结果, 分析非恒定流过程中的冲刷发展过程。如

图 16 所示，在非恒定流桩群绕流过程中，桩的阻挡使得桩前出现下降水流，在桩前形成马蹄形漩涡，桩后形成尾涡，这是影响局部冲刷的主控因素。上下游桩前均出现下降的水流，且上游桩的下降水流流速大于下游桩。随着冲刷的发展，桩后冲刷深度小于桩前，桩前出现了最大冲刷深度。

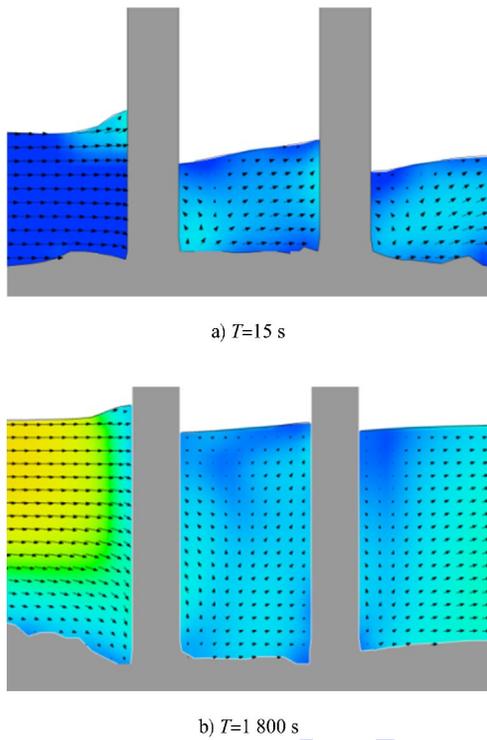
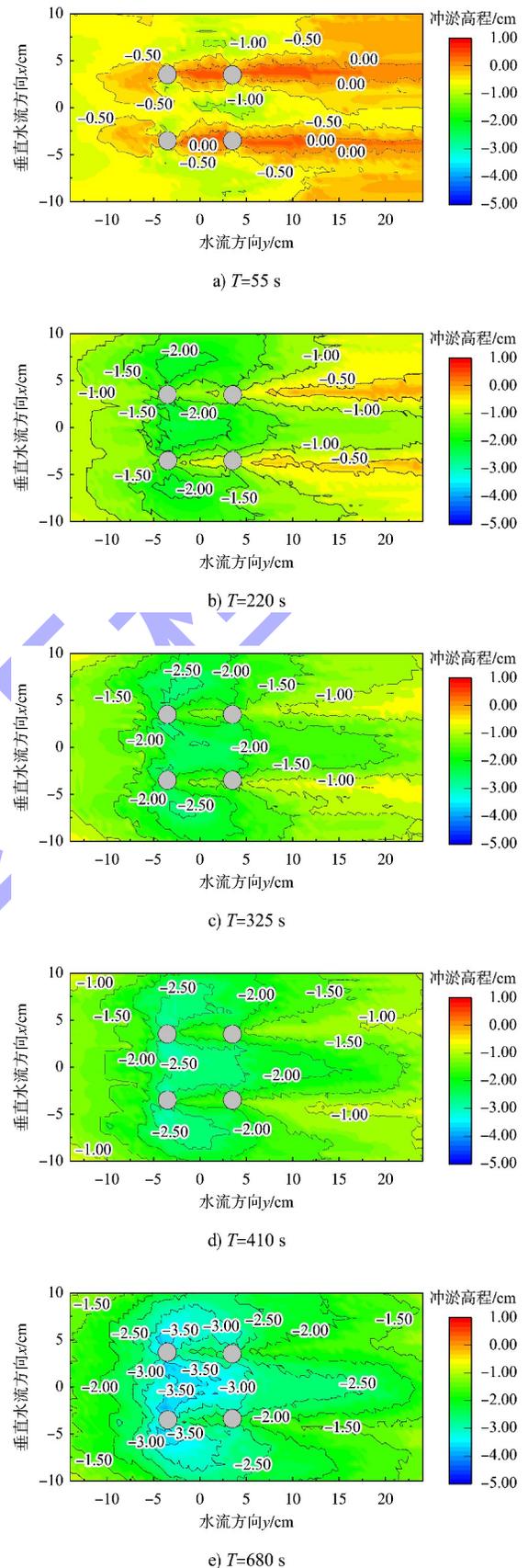


图 16 $x=3.5\text{ cm}$ 断面流速

如图 17 所示，冲刷发展于桩的左右两侧和四圆柱桩中心区域，桩对桩后区域冲刷有保护作用，出现了明显的泥沙堆积。随着水流流量增大，流速增大，冲刷过程开始在整个平面上发展，桩对桩后区域冲刷依旧具有保护作用，表现为上游桩对上游桩之前的保护作用，此区域冲刷深度明显小于桩左右区域；下游桩对下游桩的冲刷保护作用在桩后断面 1 倍桩径开始，一直持续到 8 倍桩径处，在下游桩后形成 2 条沙脊。随着流量的继续增大，在 $T=900\text{ s}$ 时，冲刷发展基本达到稳定，冲刷区域地形基本不变。最大冲刷深度出现在上游桩左右两侧以及四桩心矩形连线内。



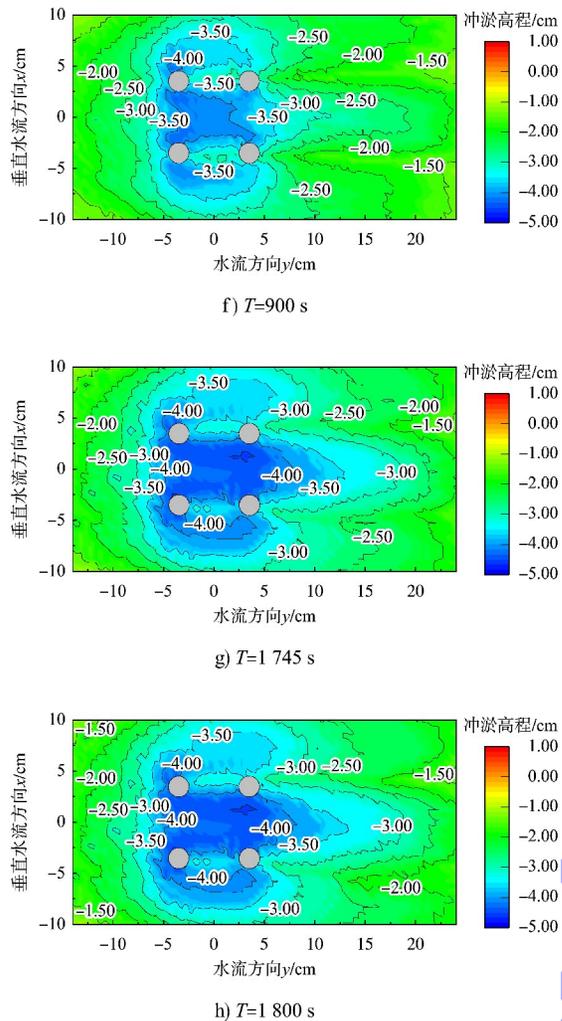


图17 数值模拟非恒定流桩群绕流局部冲刷地形高程发展

5 结论

1) 通过水槽试验发现, 冲淤地形高程分布关于中轴线对称, 且上游单桩的冲刷坑范围大于下游单桩形成的冲刷坑, 上游单桩的冲刷坑范围为桩前 $2D$ 至桩后 $1D$, 桩外侧 $2.5D$ 至桩内侧 $1D$; 下游桩单桩的冲刷坑范围为桩前 $1D$ 至桩后 $1D$, 桩外侧 $1.5D$ 至桩内侧 $1D$ 。桩群前区域冲刷深度相差不大, 横向断面地形呈 U 形分布; 桩群区域横向断面地形呈 W 形分布; 桩群后区域的桩后出现沙脊, 横向断面地形呈 M 形分布。

2) 通过数值模拟研究发现, 非恒定流桩群绕流局部冲刷下, 最大冲刷深度和冲刷体积随时间呈对数形式增加, 直至达到冲刷平衡状态, 局部冲刷的 20% 时间可完成冲刷平衡时的 50%, 50% 的时间可达到冲刷平衡的 80%。

参考文献:

- [1] 刘明维. 桩基工程 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [2] 邓绍云, 宁东卫, 邱清华. 桩群绕流阻力特性 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2014.
- [3] 喻涛, 王平义, 陈里, 等. 非恒定流作用下丁坝局部冲刷研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2014, 46(3): 31-36.
- [4] DU S T, LIANG B C, LEE D Y. Numerical investigation of local scour with inclined piles [J]. Journal of coastal research, 2019, 91(S1): 161-165.
- [5] LIN Y J, LIN C. Effects of scour-hole dimensions on lateral behavior of piles in sands [J]. Computers and geotechnics, 2019, 111(7): 30-41.
- [6] QI W G, LI Y X, XU K, et al. Physical modelling of local scour at twin piles under combined waves and current [J]. Coastal engineering, 2019, 143(1): 63-75.
- [7] 黄雄合, 许栋, 及春宁, 等. 明渠砂质床面桩柱冲刷与导流防护试验研究 [J]. 水利水电技术, 2017, 48(11): 128-133, 149.
- [8] 梁发云, 王琛, 王玉, 等. 黏性-砂性土层中群桩基础冲刷特性波流水槽试验研究 [J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 79-83.
- [9] LINK O, PFLEGER F, AZNKE U. Characteristics of developing scour-holes at a sand-embedded cylinder [J]. International journal of sediment research, 2008, 23(3): 258-266.
- [10] DEBNATH K, CHAUDHURI S. Laboratory experiments on local scour around cylinder for clay and clay-sand mixed beds [J]. Engineering geology, 2009, 111(1/4): 51-61.
- [11] 叶茂胜. 非恒定流环境下单桩绕流及桩基冲刷试验研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [12] TABARESTANI M K, ZARRATI A R. Local scour calculation around bridge pier during flood event [J]. Ksce journal of civil engineering, 2017, 21(4): 1462-1472.
- [13] CHANG W Y, LAI J S, YEN C L. Evolution of scour depth at circular bridge piers [J]. Journal of hydraulic engineering, 2004, 130(9): 905-913.

(本文编辑 赵娟)