基于水槽试验与数值模拟的漂木堵塞与搬运规律研究

康永德[1,2,3]，李伟[1]，任小凤[2,3]，许尔文[2,3]，敬文茂[2,3]

（1.兰州理工大学 土木与水利工程学院,甘肃 兰州 730050；2.旱区水工程生态环境全国重点实验室,陕西 西安 710048；3.甘肃省祁连山水源涵养林研究院,甘肃 张掖 734000）

摘　要:【目的】本文关注被砍伐或受灾形成的漂木对河道行洪与桥墩安全的影响,通过探究其运移与堵塞规律,旨在为极端洪涝灾害防控与河道治理提供科学依据。**【方法】**采用水槽试验与数值模拟相结合的方法,以并列双排桥墩为对象,系统分析了漂木参数、释放方式、桥墩间距及水流条件对其堵塞与搬运行为的影响。**【结果】**①漂木在搬运过程中存在向水流方向调整的趋势,其方位角主要集中在-30°~30°区间,在大多数工况下占比超过40%,该趋势受河道横向流速梯度控制。②漂木长度与桥墩间距之比是影响堵塞概率的关键因素,当该比值从1增至3时,实际与潜在堵塞概率分别提高200%、40%。③桥墩附近存在显著流速差异(0.2~0.35 $m\cdot s^{-1}$),是驱动漂木旋转并可能引发堵塞的主要水动力条件。**【结论】**研究揭示了漂木堵塞受几何约束、水流动力及漂木自身特性共同作用的机制,成果可为桥梁工程安全设计与河道防洪管理提供理论参考。

关键词:漂木;水槽试验;堵塞概率;并列桥墩;搬运规律

中图分类号:TV143　　**文献标识码**:A

漂木作为河流生态系统的重要组成部分,对河道形态演变与河流工程安全的影响不容忽视[1-2]。漂木的搬运和堆积是一个复杂的水动力-木材耦合过程,显著改变了局部流场结构,可能导致河床冲刷加剧或淤积,进而影响河流地貌[3-4]。例如,在山区河流中,漂木堆积会阻塞桥梁、涵洞和狭窄河段,引发严重的洪水灾害,甚至诱发堰塞湖,抬升上游水位,对桥梁和堤防的安全构成威胁[5-6]。有研究指出,洪水是桥梁倒塌的重要原因,而漂木堵塞是加剧这一风险的关键因素之一[7-8]。由此可见,开展漂木堵塞与搬运规律的研究,可为山洪灾害预警、生态河道设计及河流近自然修复提供重要的理论支撑和定量预测工具。

水槽试验在漂木研究中扮演着至关重要的角色,为理解漂木的堵塞与搬运规律提供了受控的实验环境和直观的观测数据,是理论分析和数值模拟的重要补充和验证手段[9-10]。通过水槽试验和数值模拟,可以深入揭示漂木在复杂水流中从起动、搬运、碰撞到堆积的全过程机制[11-12]。在水槽试验中,将河道概化为长直型或规则变化的渠道,漂木则被视为光滑圆木[13-14]。Innocenti L 等[15]基于单根漂木,研究了急弯处的漂木运动轨迹,结果表明漂木长度是影响其在急弯处搬运轨迹的主要参数。Schalko I 等[16]通过水槽试验发现,弗劳德数与漂木堵塞的密集程度是影响回水上升的关键因素。Welber M 等[17]发现漂木在河道下游的堵塞情况与漂木长度、水流条件有关,河道水位上升往往降低漂木的堵塞概率,而漂木长度增加则会提高堵塞概率[18]。在汇流河道中的堵塞概率则呈先增加后逐渐降低或趋于稳定趋势[19]。上述研究表明,漂木的长度、形状以及河道水流条件等因素共同决定了其在河道中的搬运规律及堵塞概率。实际河道环境复杂多变,桥墩的存在进一步加剧了漂木搬运过程中堵塞的概率[20]。Panici D[21]基于单个桥墩的水槽试验,定量分析了漂木堵塞演化过程,指出漂木堵塞的形成、增长与失稳可用弗劳德数及漂木尺寸与桥墩尺寸之比进行表征。由此可见,漂木的堵塞与搬运规律受多种因素影响,亟待开展精细化研究。

水槽模型试验在直观观测漂木搬运现象方面具有优势,但也存在精度有限等缺陷[22-23]。通过将

收稿日期/Received:2026-04-15　　**修回日期**/Revised:2026-05-27

基金项目:甘肃省自然科学基金面上基金(26JRRA531);兰州理工大学第四批红柳优秀青年人才计划项目(062318);兰州理工大学博士科研启动基金项目(060023);国家自然科学基金联合基金(U22A20592)。

通信作者:康永德(1989—),男,副教授,硕导,博士/博士后,从事水动力学模型方面的研究。Email:kyd0115yeah.net。

物理试验观测与数值模拟结果相结合,可实现对复杂水力过程的定性与定量分析,为漂木搬运与堵塞规律研究提供新的技术途径[24]。Ruiz-Villanueva V等[25]采用二维水动力与木材运动耦合模型,研究了木材密度对河道内木材输移特性的影响,发现木材密度与输移比例呈显著负相关关系,密度增大会降低木材的输移距离及输移能力。而单一河道中木材长度的影响则更为显著。宋思源等[26]利用三维流场与漂木搬运的双向耦合模型(3D-3D 模型),模拟分析了漂木在山区河流搬运过程中可能发生堵塞的位置,结果表明易发生漂木堵塞的位置主要在河道缩窄处与较大弯道处外侧。Cicco D N P[27]通过数值模拟与试验研究了漂木的堵塞概率与水流特性、桥墩形状之间的关系,结果表明方形桥墩和较高弗劳德数条件下堵塞概率最高。上述研究虽然针对漂木参数等特性与堵塞及搬运规律得出了一系列结论,然而,漂木搬运与堵塞规律较为复杂。诸如漂木在桥墩间的相互作用规律等问题仍不清楚。

综合来看,水槽试验与数值模拟是研究漂木堵塞与搬运规律的重要手段。水槽试验能够在可控条件下直观观测漂木搬运与堵塞全过程,并为数值模拟验证提供数据支撑;数值模拟则可在水槽试验的基础上进一步解析桥墩附近水动力参数,揭示试验现象背后的水动力机制。基于此,本文以并列桥墩为研究对象,采用水槽试验与数值模拟相结合的研究方法,通过水槽试验分析漂木搬运规律与堵塞概率特征,并利用数值模型复现试验过程,分析桥墩周围局部流场结构,为河道防洪提供科学依据。

1　水槽试验与数值模拟

1.1　试验装置与试验材料

1.1.1　试验装置

水槽试验装置与材料参数如图 1 所示,试验采用高精度多功能水槽,由试验水槽、流量控制系统(DCMS)、供回水系统、翻板式尾门以及测控系统等部分组成。水槽长 13 m、宽 0.6 m、高 0.6 m,底坡为 1%。水槽接触面为有机玻璃材质,其糙率为 0.007 9~0.008 3,天然河道糙率一般为 0.035。

与实际河流相比,天然河道床面通常具有更复杂的床面起伏及岸坡形态,其糙率更大。数据测量与采集由三维声学多普勒测量仪(ADV)主机(图 1(a))和智能网关协同完成。进行流速测量时,每个测点测量时间均不低于 30 s。测量系统的精度为±0.5 cm/s,流速测量范围为 0~3 m/s,可确保测量结果的准确性和可靠性[28]。

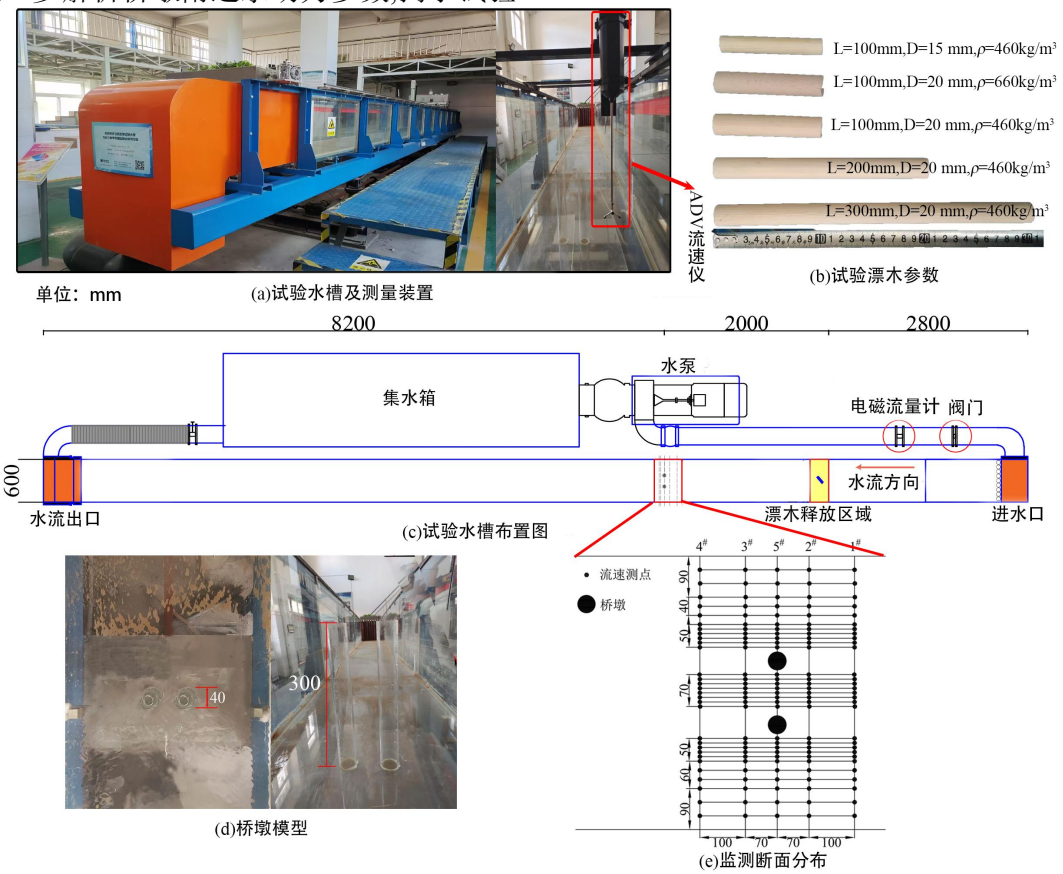


图 1　试验装置及布设示意图

Fig.1　Experimental device and layout diagram

1.1.2　试验材料

本研究水槽内不设沉积物,不考虑木材之间的

相互作用和木材几何形状的影响,以圆形原木作为漂木模型。具体的漂木特征参数如图1(b)所示,其中漂木的长度分别为(L_{wood} = 10 cm、L_{wood} = 20 cm、L_{wood} = 30 cm,分别占水槽宽度的1/6、1/3、1/2);漂木直径为D_{wood} = 1.5 cm、D = 2 cm共两种;参考Ruiz-Villanueva[25]的研究给出的漂木密度范围(660±200 kg/m^3),以松木(平均干密度为460 kg/m^3),榉木(平均干密度为660 kg/m^3)作为两种不同漂木密度。实际桥梁工程中桥墩直径约在1 m~10 m之间,水体流速大致在1 m/s~3 m/s间,柱体淹没深度可达30 m~40 m[30]。本文以实际工程中直径D=4 m的中等尺度桥墩为研究对象,采用1:100的比尺,缩尺后的模型直径G_{pier}为0.04 m(占水槽宽度的1/15)。两桥墩沿水槽中线对称放置于距上游进水口4.8 m处(如图1(c)所示),桥墩间距(两桥墩外缘之间的距离)用B_{pier}表示。共两台相机记录试验过程,以方便后期进行数据统计与测量。其中一台相机放置于距水槽的进水口2.8 m处,用于跟踪从漂木释放到桥墩位置的漂木运动,另一台相机位于桥墩上方记录漂木在桥墩处的搬运与堵塞过程。

1.1.3 试验方案

试验具体工况如表 1 所示(表中漂木释放角度中的随机释放是指漂木释放时角度不固定)。释放位置为桥墩上游 2 m 水槽中心线处。根据 Furlan P[20]的建议,为确保累计概率的统计学显著性,至少需要进行 30 次重复试验,使最大估计误差不超过 SE = 0.09;Yuan S Y 等[19]进行了 10~50 次的重复测试,得到当重复试验 30 次以上时其标准误差 SE 小于 0.1。因此,本试验的重复次数定为 50 次。

表 1　不同工况参数设置

Tab.1　Parameter settings for different experiment conditions

工况	Q/(L·s^{-1})	L_{wood}/(mm)	B_{pier}/(mm)	D_{wood}/(mm)	ρ/(kg·m^{-3})	漂木释放角度
a	10	100	50	20	460	平行于水流
b	10	100	50	20	460	垂直于水流
c	10	100	50	20	460	随机释放
d	10	100	100	20	460	随机释放
e	10	200	100	20	460	随机释放
f	10	300	100	20	460	随机释放
g	10	100	150	20	460	随机释放
h	10	200	150	20	460	随机释放
i	10	100	100	20	660	随机释放
j	10	100	100	15	460	随机释放
k	15	100	100	20	460	随机释放
l	20	100	100	20	460	随机释放

1.2 数值模型

通过 Flow-3D 软件进行数值模拟,GMO(General Moving Obstacle model)模块中流固耦合方程计算流体及固体的运动参数。湍流模型采用 RNG k-ε(Renormalization Group k-ε)湍流模型(其中 k 为紊动能,ε为耗散率),对模拟结果进行后处理可得到流场、流速及漂木的运动参数。

1.2.1 控制方程

采用笛卡尔坐标系,流体为不可压缩流体。控制方程如下。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(uA_x\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(vA_y\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(wA_z\right)=\frac{R_{SOR}}{\rho}。\quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left[uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\frac{\partial u}{\partial y}+wA_z\frac{\partial u}{\partial z}\right]\\&=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+G_x+f_x-b_x\\&-\frac{R_{SOR}}{\rho V_F}\left(u-u_w-\delta u_s\right)\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}&\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left[uA_x\frac{\partial v}{\partial x}+vA_y\frac{\partial v}{\partial y}+wA_z\frac{\partial v}{\partial z}\right]\\&=-\frac{1}{\rho}\left(R\frac{\partial p}{\partial x}\right)+G_y+f_y-b_y\\&-\frac{R_{SOR}}{\rho V_F}\left(v-v_w-\delta v_s\right)\end{aligned}\quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left[uA_x\frac{\partial w}{\partial x}+vA_y\frac{\partial w}{\partial y}+wA_z\frac{\partial w}{\partial z}\right]$$
$$=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+G_z+f_z-b_z \quad (4)$$
$$-\frac{R_{SOR}}{\rho V_F}\left(w-w_w-\delta w_s\right)$$

式中:V_F 为流体的体积分数;A_x、A_y、A_z 分别为 x、y、z 方向的流体面积分数;u、v、w 分别为 x、y、z 三个方向上的速度分量,m/s;R_{SOR} 为流体运动的质量源项;G_x、G_y、G_z 分别为重力加速度在 x、y、z 三个方向的分量,m/s^2;f_x、f_y、f_z 为 x、y、z 三个方向上的粘滞力加速度;u_w、v_w、w_w 为流体运动的速度源项;u_s、v_s、w_s 为相对质量源表面的流体速度,m/s;δ与质量源项的类型相关;p 为压强,Pa;t 为时间,s;v 为运动粘滞系数,m^2/s,g 为重力加速度,m/s^2;ρ为流体密度,kg/m^3。

1.2.2 数值模型建立

数值模型参数如图 2 所示,其边界尺寸、桥墩尺寸及位置均与水槽试验模型保持一致。模型初始水深设为 0.1 m。漂木长度分别为 0.1 m 和 0.2 m,密度为 460 kg/m^3,初始位置位于桥墩上游 2 m 处。

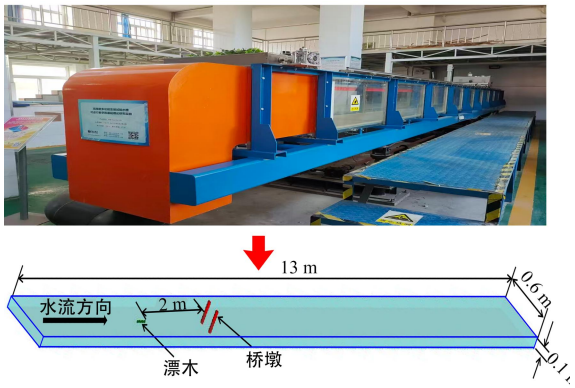


图 2 数值模型构建

Fig.2 Numerical model construction

1.2.3 边界条件

进口边界为流量边界,设置入流量 Q 为 10 L/s,出口边界为自由出流,侧壁及底部为壁面边界。时间步长为 0.001 s。采用均匀正方体结构化网格,网格尺寸为 0.01 m×0.01 m×0.01 m 与 0.005 m×0.005 m×0.005 m。其中 0.005 m 的网格为加密网格,范围为桥墩上游 2 m 到桥墩下游 1.2 m,可保证精确模拟漂木从桥墩上游搬运至下游的过程。

1.2.4 模型验证

以入流量 Q = 10 L/s、桥墩间距 B_{pier}=5 cm 且无漂木作用的工况为例,沿桥墩区选取 5 个典型过水断面(如图 1(e)所示),考虑到漂木浸水深度影响,对距自由水面下方 2 cm 处的流速 v_0 实测值与模拟结果展开对比分析。其中,1#、2#断面分别位于桥墩横向中心线上游 17 cm(4.25G_{pier})、7 cm(1.75G_{pier}),3#、4#断面分别位于桥墩中心线下游 7 cm(1.75G_{pier})、17 cm(4.25G_{pier}),5#断面位于桥墩横向中心线(0G_{pier})。对比验证结果如图 3 所示,模拟结果与实测结果变化趋势一致。水流流速沿水槽横向呈对称分布,且受桥墩在水槽中的阻挡作用影响,均表现为断面中心处流速最小。1#断面处,流速在 0.25 m/s~0.28 m/s,2#断面距离桥墩更近,阻水影响更强,断面中心流速降至 0.23 m/s。3#、4#、5#断面位于桥墩及其下游处,在桥墩两侧,阻挡作用导致过水断面收缩,水流流速增加,高达 0.35 m/s。

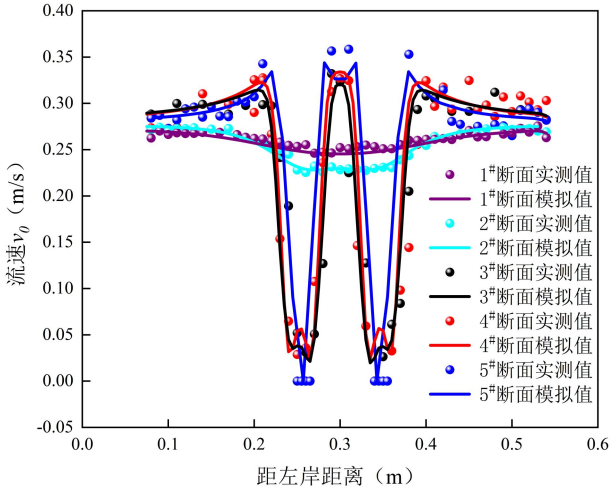


图 3 水流流速试验实测值与模拟值结果对比

Fig.3 the comparison between the measured value and the simulated value of the flow velocity

为定量评价数值模拟结果与水槽试验数据的一致性,分别计算了相关系数 R^2、均方根误差 RMSE(Root Mean Squared Error)、平均相对误差 MRE(Mean Relative Error)值。结果如表 2 所示,可知各断面试验值与模拟值之间具有较高的一致性。1#-5#断面的 R^2 均大于 0.91,RMSE 整体处于较小范围内(<0.026 65 m/s),说明预测值与实测值之间的绝对偏差较小,MRE 值均在 10%以内,表明模型相对误差较低。因此,基于模拟与实测流速数据的比较结果表明,构建的数值模型在捕捉桥墩周围的水流形态方面效果较好。

通过对比水槽试验与数值模拟结果,分析了漂木在桥墩附近的搬运过程及其运动特征,如图 4 所示。。结果表明,在 t=0.5 s 至 t=2.5 s 的时间内,数值模拟准确复现了漂木的实际运动轨迹与形态变化。桥墩上游存在明显的流速梯度,使漂木两端所受拖曳力产生差异,前端拖曳力减弱而尾端不变,从而在漂木上形成转动力矩。流速场(0.00 m/s~0.50 m/s)与物

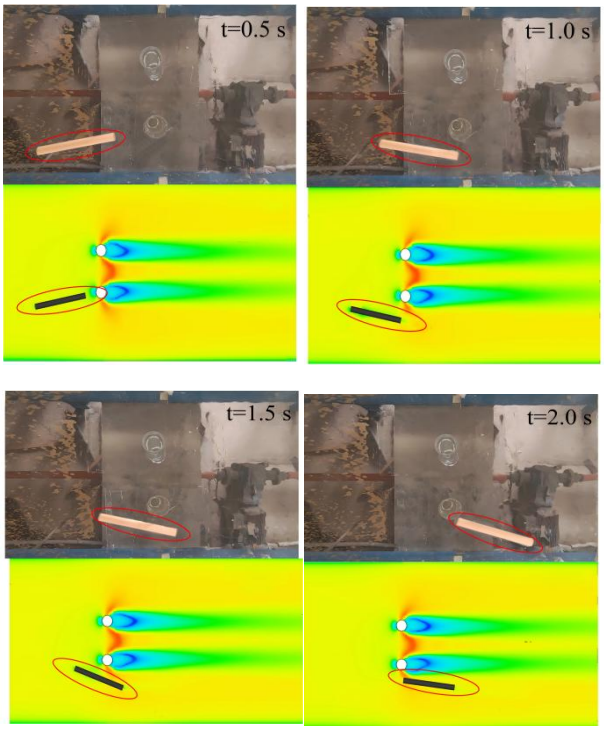
理试验结果相符,有效反映了桥墩周围水流的加速与尾流结构。该对比验证了所构建模型能够可靠模拟水流-漂木相互作用,可用于河道漂浮物运动预测及风险管理。

需要指出的是,本文验证了流场流速分布对比与试验中漂木搬运过程的定性复现。。受限于试验观测手段,当前暂未开展漂木质心轨迹、方位角时间历程等的定量验证,这会给漂木运动细节的模拟精度带来一定不确定性。。因此,本文数值模拟结果更适用于分析漂木整体搬运特征及其与桥墩相互作用的流场规律。

表 2　监测点水流流速试验实测值与模拟值的误差计算结果

Tab.2　Error calculation results of the measured value and the simulated value of the flow velocity at the monitoring point

断面编号	R^2	RMSE/(m·s^{-1})	MRE/%
1#	0.918	0.004 45	1.45
2#	0.981	0.003 61	1.13
3#	0.965	0.026 65	9.93
4#	0.985	0.017 70	9.0
5#	0.925	0.014 48	3.77



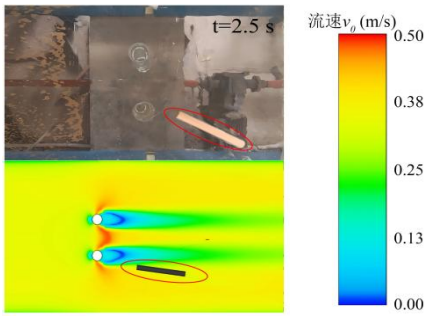


图 4　漂木搬运过程的试验与数值模拟结果对比

Fig.4　Comparison of experimental and numerical simulation results of driftwood transport process

2　结果分析

2.1　基于水槽试验的漂木搬运特征

水槽试验表明,漂木随水流运动会发生旋转,使长轴逐渐与水流方向平行,且该现象随漂木长径比(L_{wood}/D_{wood})增大更加明显。其原因在于两端流场差异导致力矩不平衡,从而驱动漂木旋转。其转动机制遵循定轴转动定律:以重心所在 z 轴为转轴时,绕该轴的转动惯量与角加速度的乘积等于外力对该轴力矩的代数和[29],即

$$M_z = J_z\alpha, \tag{5}$$

$$M_z = \sum_n F_{n\tau} r_n, \tag{6}$$

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}。 \tag{7}$$

式中:M_z为合外力矩,N·m;n为外力的个数;$F_{n\tau}$为某一外力,N;r_n为外力对轴的力臂,m;J_z为漂木对转动轴的转动惯量,kg·m^2;α为漂木的转动角加速度,rad/s^2;ω为角速度,rad/s;t为时间,s。

根据定轴转动定律对各工况漂木到达桥墩上游(距桥墩0.2 m处)时的方位角进行统计分析,结果如图5玫瑰图所示(方位角总频率归一化为1,红色标注为改变的参数)。通过控制漂木长度、直径、桥墩间距及释放方式,探究多因素耦合作用下漂木堆积方位的分布规律。结果表明,多数工况下漂木方位角分布以0°为中心,主要集中在-30°~30°,少数位于-60°~-30°与30°~60°,表明漂木在搬运中具有顺水流定向的趋势。

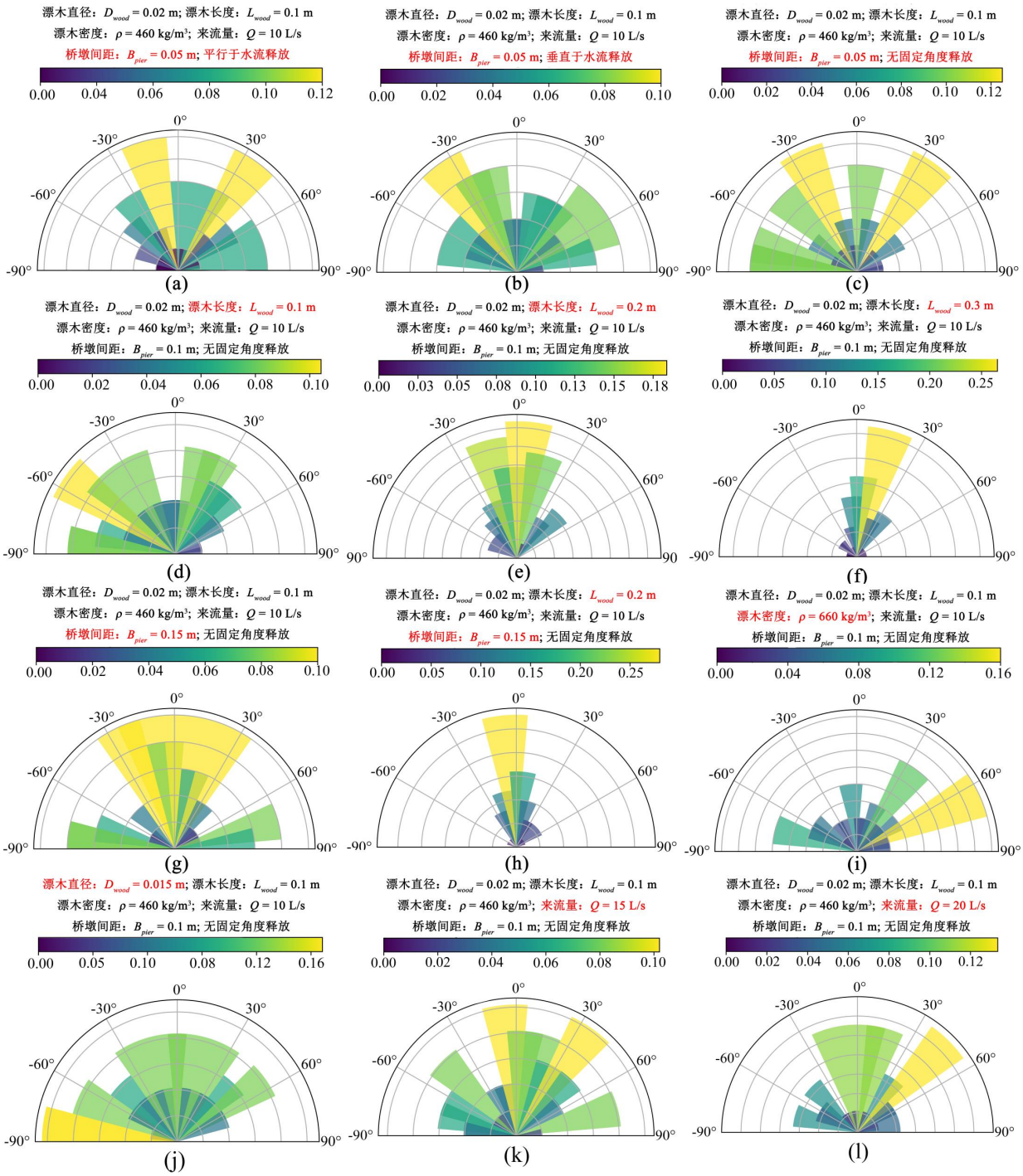


图5　漂木方位角频率图

Fig.5　Frequency distribution of driftwood orientation angles

具体而言,在三种释放条件下(图 5(a)~图 5(c)),漂木与水流方向夹角处于区间-30°~30°的频率分别为 0.38、0.30 和 0.375,整体差异较小,此时漂木在搬运过程中虽呈现与水流方向平行的趋势,但该角度区间并未形成显著优势。这主要是由于桥墩间距较小时,其对水流的阻碍作用增强,导致局部流速降低、横向流速梯度减弱,从而减小了水流对漂木的转动驱动力,使其旋转调整过程减缓甚至出现反向转动,因此方位角分布仍保持一定离散性。随着桥墩间距增大(图 5(c)、图 5(d)、图 5(g)),该区间频率相应升高,分别为 0.34、0.44、0.56。进一步分析表明,漂木的长径比对其方位角分布具有显著影响。如图 5(d)、图 5(e)、图 5(f)、图 5(j)所示,漂木长径比(L_{wood}/D_{wood})分别为 5、10、15、6.67,漂木方位角频率集中在更窄的范围内,其方位角在-30°~30°范围内所占比例分别为 0.40、0.92、0.96、0.41。表明漂木在搬运过程中长径比较大时更容易发生旋转趋于平行水流方向。如图 5(d)、图 5(i)所示,不同漂木密度对方位角具有明显影响。搬运过程中,密度较大的漂木旋转速率相对较慢,其方位角频率分布更为散乱;

反之,密度较小的漂木,方位角频率分布较为集中。密度较小(460 kg/m³)的漂木方位角处于-30°~30°时占比为 0.40,而密度较大(660 kg/m³)的漂木在此方位角范围内所占比例仅为 0.26。

水流条件对漂木的方位角具有一定影响,由图5(d)、图 5(k)、图 5(l)可知,漂木的方位角在-30°~30°之间的占比分别为 0.44、0.43、0.44,该结果差异不显著。然而,随着流量的增加,漂木方位角分布逐渐向0°集中。漂木的方位角在-15°~15°之间的占比分别为 0.17、0.25、0.27。表明在大流量条件下,漂木更易旋转至平行于水流方向。

综上所述,漂木在搬运过程中整体呈现向水流方向调整的趋势,其方位角主要集中于-30°~30°范围。该结果与王道正等[29]研究得出的漂木在水流作用下呈顺流定向运动的规律一致。本研究进一步发现长径比增大会显著增强该效应,使方位角分布更加集中。

2.2 基于水槽试验的漂木堵塞概率

据文献[25,27],实际河道中漂木并非规则圆形,而是具有分枝的木材。当其与桥墩接触时,可能因分枝勾连、形态不规则等因素导致堵塞风险显著提升。因此,将漂木堵塞概率分为实际堵塞概率(漂木完全堵塞于桥墩处的概率)与潜在堵塞概率(搬运过程中撞击桥墩的概率)。计算方法如式(8):

$$P_e = \frac{m_e}{m} \qquad P_i = \frac{m_i}{m} \tag{8}$$

式中:P_e为实际堵塞概率;P_i为潜在堵塞概率;m_e为每组试验结束后漂木发生堵塞的次数;m_i为漂木撞击桥墩的次数(包括发生堵塞的次数);m为每组试验次数,m = 50。

漂木释放方式对其堵塞概率的影响如图6所示,在相同漂木参数与水力条件下,释放方式显著影响其在桥墩处的堵塞概率。垂直水流释放时,漂木的初始方位角大,在有限搬运距离内难以充分调整至顺水流方向,因而其实际堵塞概率(P_e=0.26)与潜在堵塞概率(P_i=0.55)均最高。平行水流释放时,漂木易于顺流向调整,两类概率分别降至0.20和0.47。随机释放的实际堵塞概率进一步降低,潜在概率则与平行释放工况接近。这表明,释放方式通过控制漂木到达桥墩前的方位角调整过程,进而影响其空间通过性与接触形式,是决定堵塞概率的关键因素。

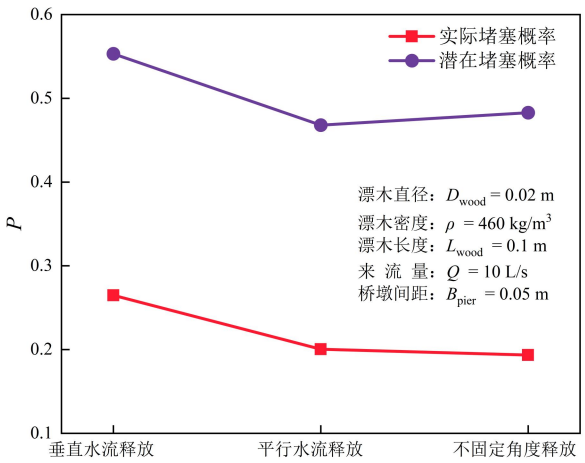


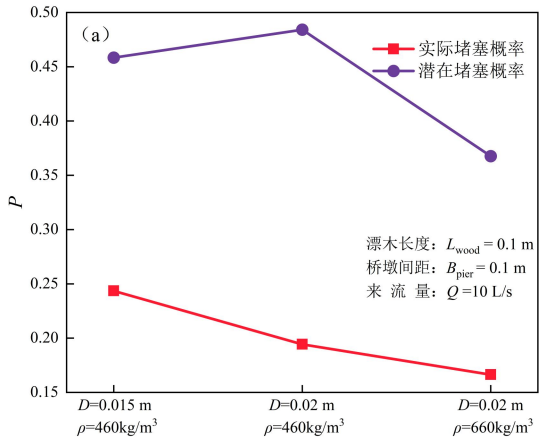
图 6　不同释放方式对漂木堵塞概率的影响

Fig.6　Effect of different release patterns on driftwood blockage probability

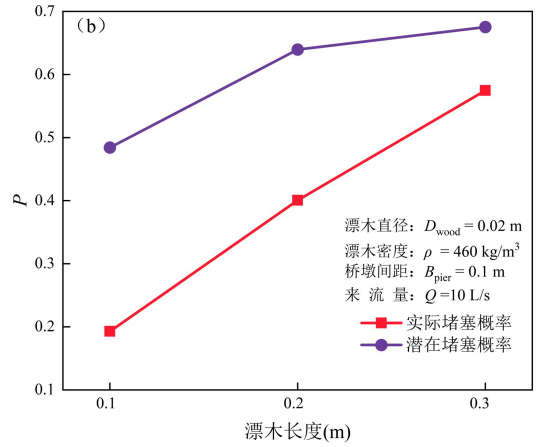
漂木参数对其堵塞概率的影响如图7所示,在相同水力与桥墩布设条件下,漂木的几何特性对其在桥墩处的堵塞概率具有显著影响。

漂木直径与密度对其堵塞概率的影响如图7(a)所示,当L_{wood} = 0.1 m时,长径比(L_{wood}/D_{wood})由6.67减小至5,实际堵塞概率(P_e)由0.24降至0.20,降幅达16.7%,而潜在堵塞概率(P_i)则小幅上升。漂木密度由460 kg/m³增至660 kg/m³,P_e进一步降至0.17,P_i则明显下降,由0.48降至0.37,降幅约为23%。结果表明,长径比减小与密度增大均能降低漂木在桥墩处发生堵塞的可能性。如图7(b)所示,在直径、密度及桥墩间距不变的条件下,漂木长度由0.1 m增加至0.3 m时,其实际堵塞概率(P_e)与潜在堵塞概率(P_i)分别从0.19和0.48显著上升至0.57和0.67,增幅分别为200%、40%。该结果说明,漂木长度相对于桥墩间距的比例是影响堵塞行为的主控因素,这与王道正等[29]关于漂木尺度效应控制堵塞概率的研究结论一致。

需要指出的是,本文采用的漂木尺寸为基于水槽试验比尺关系的简化模型,其绝对长度虽小于天然河道中常见漂木尺度,但通过控制漂木长度与桥墩间距之比(L_{wood}/B_{pier})来反映实际工程中的相对几何关系。已有研究表明,天然河道中漂木长度可达数米甚至十余米,在桥墩间距为数十米量级时,二者仍可能形成相近的相对尺度关系。因此,本研究所揭示的“L_{wood}/B_{pier}控制堵塞概率”的规律具有一定的工程代表性,其结果可用于解释实际河道中漂木在桥墩处发生滞留与堵塞的潜在风险。



(a) 漂木直径与密度对其堵塞概率的影响



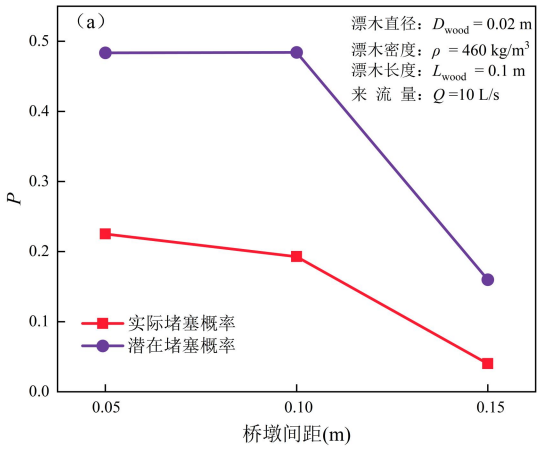
(b) 漂木长度对其堵塞概率的影响

图 7　漂木参数对其堵塞概率的影响

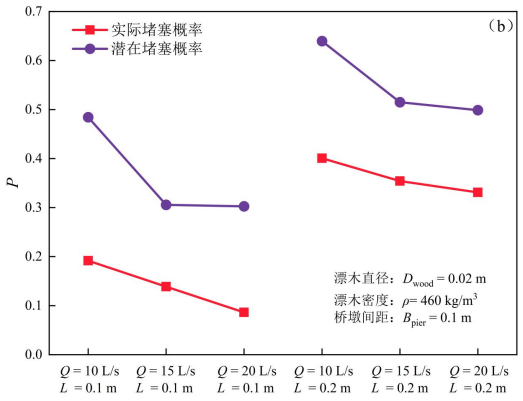
Fig.7　Effect of driftwood parameters on blockage probability

桥墩间距对漂木堵塞概率的影响关系如图8(a)所示。当桥墩间距由0.05 m增大至0.15 m时(L_{wood}/B_{pier}由2减小至0.67),P_e由0.23降低至0.04,降幅为82.6%,P_i由0.48降低至0.16,降幅为66.7%,二者均呈现出随桥墩间距增大而减小的变化趋势。流量变化对堵塞概率的影响在两种漂木长度条件下具有一致性(如图8(b)所示)。当L_{wood} = 0.1 m和L_{wood} = 0.2 m时,P_e均随流量增大而显著降低。这是由于桥墩对水槽的束窄作用使得水流在束窄区段流速增大。随着流量的增加,桥墩两侧的高流速区变得更加集中,漂木两端流速差更大,导致漂木所受水流的拖曳力增大,使漂木在到达桥墩后更易被水流搬运通过[30]。这与Cicco[27]的研究中关于流速或弗劳德数增大降低堵塞概率的结论一致。

综上所述,漂木在桥墩处的堵塞受漂木参数与水流特性影响,较大的来流量有利于漂木搬运。相比之下,漂木的释放方式和几何特性通过改变其初始方位角与搬运特征,对堵塞概率具有显著影响。总之,漂木堵塞是几何约束、流场结构与漂木动力响应耦合作用的结果,其中漂木长度与桥墩间距之比L_{wood}/B_{pier}与来流量分别构成几何与水力层面的关键控制因素。



(a) 桥墩间距对漂木堵塞概率的影响



(b) 来流量对漂木堵塞概率的影响

图 8　桥墩间距与来流量对漂木堵塞概率的影响

Fig.8　Effects of pier spacing and inflow rate on driftwood blockage probability

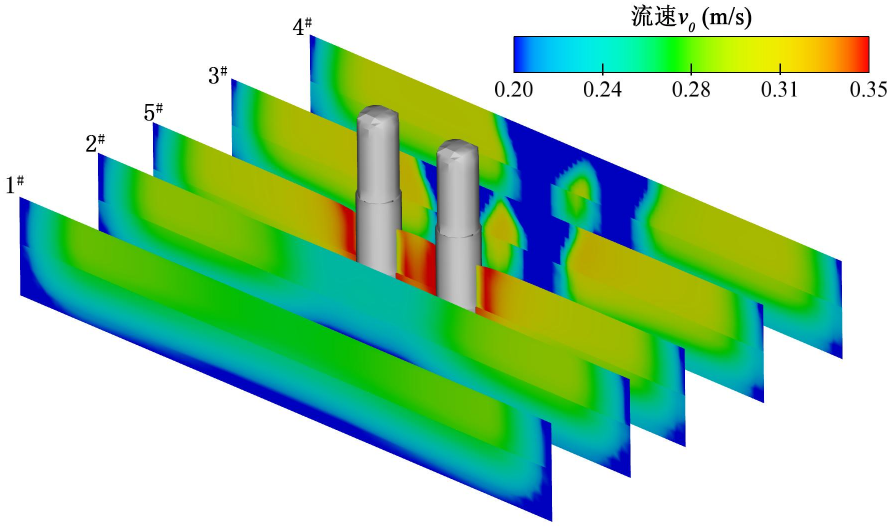
2.3　漂木运动规律数值模拟研究

2.3.1　河道断面流速分布与漂木搬运分析

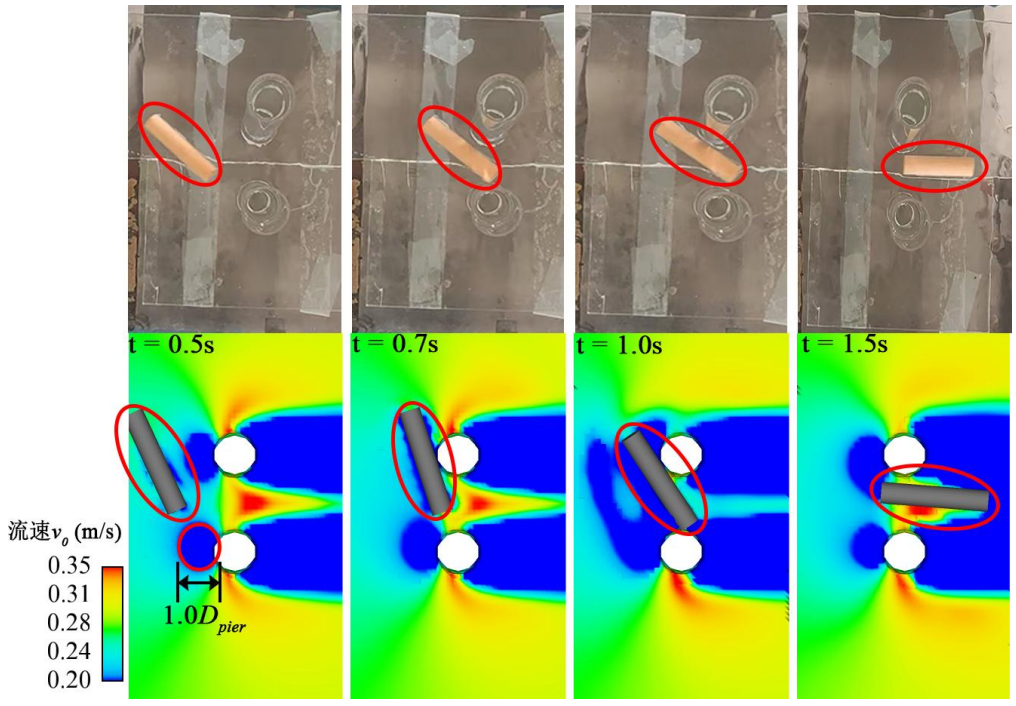
桥墩附近河道断面流速分布及漂木搬运过程如图9(a)所示。分析表明,桥墩上游及两墩间区域(2#与5#断面)存在显著的横向流速梯度,是漂木旋转的关键水动力控制区。其中,2#断面桥墩前流速降至0.22 m/s,两侧则高于0.28 m/s,形成21.4%的流速差,为漂木旋转提供了基础条件;5#断面流速梯度最大,最大流速达0.35 m/s,进一步加剧漂木转动力矩,推动其绕墩向下游搬运。该区域的横向流速差是决定漂木能否顺利通过桥墩的主要水动力因素。上述分析从流场结构角度解释了水动力条件对漂木搬运与堵塞行为的控制作用,同时与谢湘平等[9]关于桥墩附近局部流场主导漂木运动特征的结论一致。如图9(b)所示,描述了漂木在桥墩附近的运动过程中

流场分布特征:t=0.5 s时,桥墩前形成低速区(流速<0.2 m/s),与墩间及外侧的最大流速(0.35 m/s)形成差异,使漂木两端处于不同流速区而产生转动趋势;t=0.7 s时,漂木接触桥墩,前端进入加速区、尾端仍处低速区,流速差形成的力矩驱动其绕桥墩旋转;至t=1.5 s,漂木完成旋转进入两墩之间,其自身阻挡进一步加剧了局部低速区(流速<0.2 m/s)。

综上,低速区与高速绕流区的共同作用产生明显转动力矩,使得漂木持续调整角度。随着进一步靠近并进入两墩间区域,横向流速梯度差使漂木旋转并逐步趋于平行于水流方向。



(a) 1#-5#桥墩河道断面流速分布



(b) 漂木搬运数值模拟与水槽试验结果

图 9　桥墩附近河道断面流速分布及漂木搬运过程

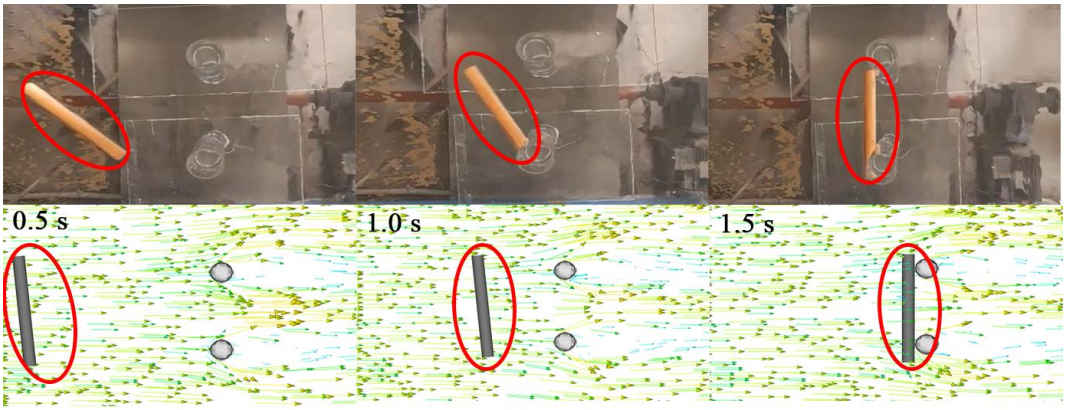
Fig.9　Velocity distribution across channel sections near the bridge piers and driftwood transport process

2.3.2 漂木堵塞过程数值分析

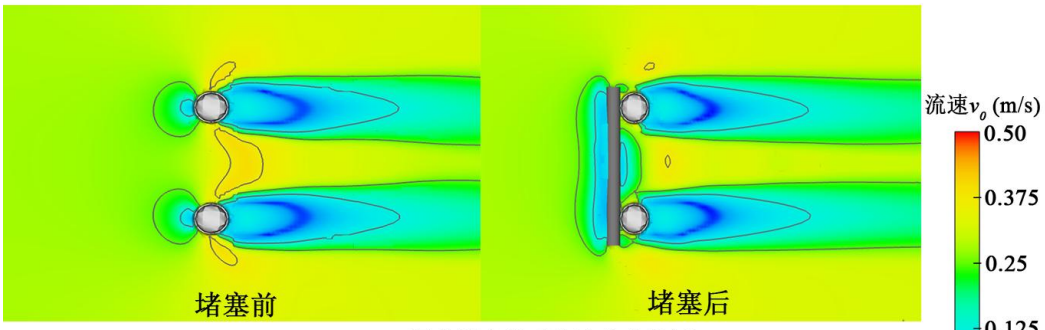
图 10 展示了漂木在桥墩处搬运与堵塞的演化过程及堵塞前后流场变化。图 10(a)为漂木在并列双桥墩条件下,由接近桥墩、旋转至最终堵塞的全过程。由图 10(b)、10(c)可知,漂木以较大夹角接近桥墩时,其前端先进入桥墩上游低速区并发生接触,此时尾端仍受水流拖曳,两端受力失衡形成转动力矩,促使漂木横向转动并跨越两桥墩,形成堵塞。流场对比表明,堵塞前水流尚可通过桥墩间隙,主流速度约 0.25~0.35 m/s,低速区限于墩前及

尾流;堵塞后漂木成为新的阻水体,上游及墩间低速区(0~0.125 m/s)范围明显扩大。

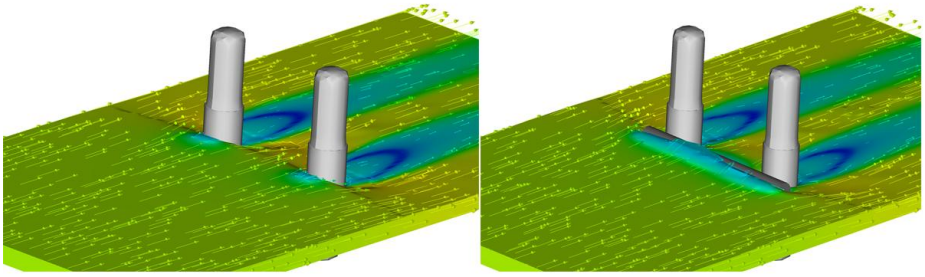
可见,漂木堵塞对桥墩周围流场结构影响显著,漂木堵塞后与桥墩形成新的阻水体,使得桥墩间低速区范围扩大,导致横向流速梯度减小。进而新的流场结构会对群体漂木的搬运过程产生累积效应,增大后续漂木的堵塞概率,造成更严重的堵塞威胁。



(a) 漂木搬运-旋转-堵塞过程试验与模拟结果



(b) 漂木堵塞前后流速分布特征



(c) 漂木堵塞前后流场分布特征

图 10　漂木在桥墩处搬运-堵塞演化过程及堵塞前后流场变化

Fig.10　Driftwood blockage process at bridge piers and associated flow field variations

2.4　基于无量纲特征的堵塞概率分析

综合水槽试验与数值模拟结果可知,漂木堵塞受多种因素影响,从无量纲特征的角度对影响漂木堵塞概率的主要参数进行综合分析。

如前所述,漂木堵塞概率受漂木几何特性、桥墩布设形式以及水力条件共同影响。其中,漂木长度L_{wood}与桥墩间距B_{pier}构成了漂木在桥墩区域内的几何约束条件,漂木直径D_{wood}和密度ρ_{wood}影响其转动惯量和动力响应特性,来流量通过改变水流速度和动能,进而影响桥墩区流场结构,可用弗劳德数Fr表征。综上,建立实际堵塞概率P_e与潜在堵塞概率P_i的无量纲参数的函数关系:

$$P_e, P_i = \delta\left(\frac{L_{wood}}{B_{pier}}\right)^a\left(\frac{L_{wood}}{D_{wood}}\right)^b(Fr)^c\left(\frac{\rho_s}{\rho_{wood}}\right)^d \quad (9)$$

式中:L_{wood}/B_{pier}为几何约束因子;L_{wood}/D_{wood}为形状因子,即漂木的长径比,影响其在水中的旋转特性;Fr为弗劳德数,代表水力条件;ρ_s/ρ_{wood}为水与漂木的密度比,反映漂木的相对密度;δ为拟合系数,a、b、c、d为各无量纲参数的影响指数。

基于试验数据,通过对数变换进行多元线性回归分析,得到以下漂木的实际堵塞概率P_e与潜在堵塞概率P_i的经验公式:

$$P_e = 0.096\left(\frac{L_{wood}}{B_{pier}}\right)^{1.11}\left(\frac{L_{wood}}{D_{wood}}\right)^{0.49} Fr^{-0.40}\left(\frac{\rho_s}{\rho_{wood}}\right)^{-0.77} \tag{10}$$

$$P_i = 0.351\left(\frac{L_{wood}}{B_{pier}}\right)^{0.73}\left(\frac{L_{wood}}{D_{wood}}\right)^{0.05} Fr^{-0.28}\left(\frac{\rho_s}{\rho_{wood}}\right)^{-0.22} \tag{11}$$

其中,实际堵塞概率 P_e 的决定系数 R^2=0.818,潜在堵塞概率 P_i 的决定系数 R^2=0.731。拟合结果显示,漂木长度与桥墩间距之比 L_{wood}/B_{pier} 的指数最大,表明其是影响堵塞概率的主控因素。漂木长径比 L_{wood}/D_{wood} 与密度比ρ_s/ρ_{wood} 对堵塞概率具有次要影响;弗劳德数 Fr 与堵塞概率呈负相关,其增大通常降低堵塞概率;综上,漂木堵塞并非由单一因素决定,而是几何约束、水力条件和材料特性共同作用的结果,其中几何约束(L_{wood}/B_{pier})起主导作用。

2.5 模型假定与适用性分析

本文对实际问题进行了适当简化。试验及模拟中将漂木理想化为规则圆木,未考虑天然漂木的不规则形态及漂木间相互作用;来流条件采用恒定流量,水槽底床为光滑刚性边界,未考虑天然河道中非恒定水流及床面粗糙度变化的影响;桥墩采用规则几何形式。基于上述假定,本文结论主要适用于规则桥墩条件下单根漂木在均匀来流中的输移与堵塞过程分析,对于天然河道中多漂木相互作用、复杂地形及非恒定水流条件,其堵塞行为仍需进一步研究验证。因此,本文结果可用于揭示漂木堵塞的基本规律与控制机理,并为工程应用提供参考。

3 结论

本文以并列桥墩为研究对象,采用水槽试验与数值模拟相结合的研究方法,通过水槽试验分析漂木参数、释放方式、桥墩间距及水流条件对搬运规律与堵塞概率特征的影响,并利用数值模拟进一步探究漂木堵塞时的水动力特性,得到结论如下:

1)漂木被搬运到桥墩上游时的方位角分布主要受河道横向流速分布控制,在横向速度梯度的作用下,漂木方位角更易集中并趋于与水流方向一致。漂木长径比是影响其方位角变化的主要参数。L_{wood}/D_{wood} 由 5 增大至 15 时,漂木方位角集中于-30°~30°的频率由 0.40 增至 0.96,提高了 140%。

2)漂木堵塞受漂木参数、桥墩布设形式与局部流场结构共同作用。漂木长度与桥墩间距之比是影响堵塞发生的关键参数。随着 L_{wood}/B_{pier} 由 1 增大至 3,实际堵塞概率 P_e 由 0.19 提高至 0.57,潜在堵塞概率 P_i 由 0.48 增至 0.67,增幅分别为 200%、40%。

3)并列双桥墩附近的流速分布梯度为漂木搬运与堵塞提供了重要水动力。流速最小区域为桥墩上游区域,形状为近似椭圆形,流速最大区域为两桥墩之间及桥墩两侧绕流区域,该流速差为漂木产生转动力矩提供了条件。

4)漂木堵塞概率无量纲化表明,漂木堵塞概率可简化为漂木长度与桥墩间距之比 L_{wood}/B_{pier}、漂木长径比L_{wood}/D_{wood}、弗劳德数Fr、流体密度与漂木密度之比ρ_s/ρ_{wood}共同构成的函数关系。其中,L_{wood}/B_{pier} 为堵塞概率函数的主控因素。

参 考 文 献

[1]Bénet L,De Cesare G,Pfister M.Partial Driftwood Rack at Gated Ogee Crest:trapping Rate and Discharge Efficiency[J].Journal of Hydraulic Engineering,2022,148(8):06022008.

[2]费高高.山洪泥石流中漂木堵塞特性实验研究[D].成都:中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所),2022.[Fei Gaogao.Experimental study on the clogging characteristies of flashfloods and debris flows with large wood[D].University of Chinese Academy of Sciences(Institute of Mountain Hazards and Environment,Chinese Academy of Sciences),2022.]

[3]陈剑刚,费高高,王喜安,等.漂木对山洪泥石流运动致灾影响研究进展[J].水利水电科技进展,2022,42(3):104-111.[Chen Jiangang,Fei Gaogao,Wang Xi'an,et al.Advances on disaster effects of drift wood in flash flood debris flows[J].Advances in Science and technology of Water Resources,2022,42(3):104-111.]

[4]康永德,侯精明,石宝山,等.泥石流的数值模拟及危险性评价[J].水利水运工程学报,2021(4):75-84.[Kang Yongde,Hou Jingming,Shi Baoshan,et al.Simulation of debris flow and hazard assessment[J].Hydro-Science and Engineering,2021(4):75-84.]

[5]张晓雷,吴浩然,乔会超,等.含植被浑水的水动力特性和紊动特性试验研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(2):37-44.[Zhang Xiaolei,Wu Haoran,Qiao Huichao,et al.Experimental Study on Hydrodynamic and turbulent Characteristics of Muddy Water with Vegetation[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2022,43(2):37-44.]

[6]康永德,李伟,许尔文,等.基于GPU加速的溃坝洪水演进模拟研究[J].水电能源科学,2024,42(3):20-24.[Kang Yongde,Li Wei,Xu Erwen,et al.Simulation of Dam-break Flood Routing Based on GPU Acceleration[J].Water Resources and Power,2024,42(3):20-24.]

[7]王奇.水沙变化与漂木堆积下弯曲河道河床演变特性研究[D].成都:四川大学,2022.[Wang Qi.Study on Bed Evolution of Meandering Channel under the Change of Flow Discharges and Sediment Supplies and Driftwood Accumulation[D].Chengdu:Sichuan University,2022.]

[8]Okamoto T,Takebayashi H,Sanjou M,et al.Log jam formation at bridges and the effect on floodplain flow:A flume experiment[J].Journal of Flood Risk Management,2020,13(1):e12562.

[9]谢湘平,王小军,闫春岭.漂木灾害研究现状及研究展望[J].山地学报,2020,38(4):552-560.[Xie Xiangping,Wang Xiaojun,Yan Chunling,et al.A review of the research on woody debris related disaster and its prospect[J].Mounta-in Research,2020,38(4):552-560.]

[10]毛记康,刘明潇,杨超,等.沙颍河周口-界首河段通航条件分析及洪水模拟研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),1-10.[Mao Jikang,Liu Mingxiao,Yang Chao,et al.Analysis of navigation conditions and flood simulation study for the Zhoukou-Jieshou section of the Shaying River[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),1-10.]

[11]Wohl E,Cenderelli D A,Dwire K A,et al.Large in-stream wood studies:A call for common metrics[J].Earth Surface Processes and Landforms:the Journal of the British Geomorphological Research Group,2010,35(5),618-625.

[12]Diehl T H.Potential drift accumulation at bridges:Report No.FHWA-RD-97-028[R].Washington,DC:U.S.Department of Transportation,Federal Highway Administration,1997.

[13]Bocchiola D,Rulli M C,Rosso R.A flume experiment on the formation of wood jams in rivers[J].Water Resources Research,2008,44(2):112-128..

[14]Chen J,Wang D,Zhao W,et al.Laboratory study on the characteristics of large wood and debris flow processes at slit-check dams[J].Landslides,2020,17(7),1703-1711.

[15]Innocenti L,Branß T,Zaid B,et al.Characterization of trajectories and drag coefficients of large wood in sharp river bends from flume experiments[J].Earth Surface Processes and Landforms,2023,48(4),770-781.

[16]Schalko I,Schmocker L,Weitbrecht V,et al.Backwater rise due to large wood accumulations[J].Journal of Hydraulic Engineering,2018,144(9),04018056.

[17]Welber M,Bertoldi W,Tubino M.Wood dispersal in braided streams:Results from physical modeling[J].Water Resources Research,2013,49(11),7388-7400.

[18]Furlan P,Pfister M,Matos J,et al.Blockage probability modeling of large wood at reservoir spillways with piers[J].Water Resources Research,2021,57(8),e2021WR029722.

[19]YuanS ,ZhengY ,TangH , et al.Large Wood Transport and Accumulation Near the Separation Zone of a Channel Confluence[J].Water Resources Research,2024,60(3):e2023WR034790.

[20]谢湘平,王小军,屈新,等.缝隙坝对携带漂木的泥石流减灾效果实验研究[J].工程地质学报,2020,28(6):1300-1310.[Xie Xiangping,Wang Xiaojun,Qu Xin,et al.Experimental study on mitigation effect of slit dam to debris flow with driftwood[J] Journal of Engineering Geology,28(6):1300-1310.]

[21]Panici D,Almeida M A G.Formation,growth,and failure of debris jams at bridge piers[J].Water Resources Research,2018,54(9):6226-6241.

[22]Schalko I,Schmocker L,Weitbrecht V,et al.Laboratory study on wood accumulation probability at bridge piers[J].Journal of Hydraulic Research,2020,58(4),566-581.

[23]申红彬,徐宗学,郑珊,等.河流系统变化过程滞后响应与累积效应研究述评[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(5):68-77.[Shen Hongbin,Xu Zongxue,Zheng Shan,et al.A review of delayed response and accumulation effect in variation process of river system[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2025,46(5):68-77.]

[24]康永德,李伟,许尔文,等.海绵措施下降雨径流模拟及污染物削减率评价[J].水利水电技术(中英文),2024,55(2):78-89.[Kang Yongde,Li Wei,Xu Erwen,et al.Rainfall runoff simulation and pollutant reduction rate evaluation under sponge measures[J].Water Resources and Hydropower Engineering,2024,55(2):78-89.]

[25]Ruiz-Villanueva V,Piégay H,Gaertner V,et al.Wood density and moisture sorption and its influence on large wood mobility in rivers[J].Catena,2016,140,182-194.

[26]宋思源,费高高,王协康.山洪输移漂木演进特征数值试验研究[J].工程科学与技术,1-13.[Song Siyuan,Fei Gaogao,Wang Xiekang.Numerical Investigation ofLarge Wood Evolution Characteristicstransported by Flash Floods[J].Advanced Engineering Sciences,1-13.]

[27]Cicco D N P,Paris E,Solari L,et al.Bridge pier shape

influence on wood accumulation:Outcomes from flume experiments and numerical modelling[J].Journal of Flood Risk Management,2020,13(2).

[28]樊新建,李拙,庞翠超,等.勾头角度与长度对透水丁坝周围水流结构影响的研究[J].工程科学与技术,1-16.[Fan Xinjian,Li Zhuo,Pang Cuichao,et al.Research on the Effects of Hook-angle and Length on the Structure of Water Flow AroundPermeable Spur Dike[J].Advanced Engineering Sciences,1-16.]

[29]王道正,陈晓清,赵万玉,等.泥石流中漂木的运动和拦截特征[J].中国水土保持科学,2017,15(6):9-18.[Wang Daozheng,Chen Xiaoqing,Zhao Wanyu.Movement and intercept characteristies of driftwood in debris flow[J].Science of Soil and Water Conservation,2017,15(6):9-18.]

[30]杨钧午.圆端形桥墩绕流特性 PIV 试验研究[D].邯郸:河北工程大学,2024.[Yang Junwu.PIV experimental study of characteristics of flow around the round-ended bridge piers[D].Hebei University of Engineering,Handan,2024.]

Study on the Driftwood Blockage and Transportation Based on Flume Experiment and Numerical Simulation

Kang Yongde[1,2,3], Li Wei[1], Ren Xiaofeng[2,3], Xu Erwen[2,3], Jing Wenmao[2,3]

(1.School of civil and hydraulic engineering, Lanzhou University of technology, Lanzhou 730050, China ; 2.State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region,Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China ; 3.Qilian Mountain Water Conservation Forest Research Institute,Zhangye 734000, China)

Abstract: 【**Objective**】 This study focuses on the impacts of driftwood generated by logging activities or extreme disaster events on river flood conveyance capacity and bridge pier safety. By investigating the transport and blockage behavior of driftwood under flow conditions, this work aims to provide scientific support for extreme flood disaster mitigation and river management.【**Methods**】A combined approach of flume experiments and numerical simulations was employed, with parallel double-row bridge piers selected as the research object. the effects of driftwood parameters, release modes, pier spacing, and flow conditions on driftwood transport and blockage behavior were systematically examined. 【**Results**】 (1) During transport, driftwood exhibits a tendency to align with the flow direction, with orientation angles predominantly distributed within the range of -30° to 30°, accounting for more than 40% in most experimental cases. this behavior is primarily governed by the lateral velocity gradient in the channel. (2) the ratio of driftwood length to pier spacing is the key factor controlling blockage probability. As this ratio increases from 1 to 3, the effective and potential blockage probability increases by 200 % and 40 % respectively. (3) Pronounced velocity differences exist in the vicinity of bridge piers, ranging from 0.2~0.35 $m \cdot s^{-1}$, which constitute the main hydraulic condition driving driftwood rotation and potentially triggering blockage. 【**Conclusions**】 This study reveals that driftwood blockage results from the combined effects of geometric constraints, hydrodynamic conditions, and driftwood properties. the findings provide theoretical support for bridge safety design and river flood management.

Keywords: Driftwood; Flume experiment; Probability of blockage; Parallel double piers; transport laws