

# 河岸边坡对抛投沙袋落点规律影响的试验研究

肖洋<sup>1,2,3,4,5,6</sup>, 高杰<sup>2</sup>, 张涛涛<sup>1</sup>, 李一彤<sup>7</sup>, 袁康<sup>2</sup>, 许晨<sup>8</sup>

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室, 江苏 南京 210098; 5. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 6. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098; 7. 河北省滦河河务事务中心, 河北 唐山 063016; 8. 苏州科技大学地理科学与测绘工程学院, 江苏 苏州 215009)

**摘要:**通过概化水槽试验,分析了有河岸边坡情况下开底驳船和翻板船抛投沙袋的漂移、偏移落距和落点范围规律,并研究了不同抛投方式的影响。试验结果表明:河岸边坡的存在会导致沙袋发生滑动或滚动,增加沙袋的漂移和偏移落距,且坡度越大,沙袋在顺水流方向的落点越分散;沙袋平均漂移落距随流速的增大而增大,流速较大时,边坡坡度变化对沙袋漂移落距影响较小,流速较小时,开底驳船抛投时沙袋平均漂移落距随边坡坡度的增大而增大,翻板船抛投沙袋在顺水流方向的落点越集中;开底驳船抛投方式比翻板船抛投方式的沙袋落点更分散,但落点范围相差不大。

**关键词:**沙袋;抛投方式;落点;河岸边坡

中图分类号:TV131.61+1 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2024)03-0045-06

**Experimental study on influence of riverbank slope on law of thrown sandbag landing point//XIAO Yang<sup>1,2,3,4,5,6</sup>, GAO Jie<sup>2</sup>, ZHANG Taotao<sup>1</sup>, LI Yitong<sup>7</sup>, YUAN Kang<sup>2</sup>, XU Chen<sup>8</sup>(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Key Laboratory of Water Cycle and Hydrodynamic System, Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 6. Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 7. Luanhe River Affairs Center of Hebei Province, Tangshan 063016, China; 8. School of Geography Science and Geomatics Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)**

**Abstract:** The drift distance, offset distance, and landing range of sandbags thrown by bottom-opening barges and flipper boats in the presence of riverbank slopes are analyzed through generalized flume experiment. The influence of different throwing methods is also investigated. The experimental results show that the existence of the riverbank slope will cause the sandbags to slide or roll, increasing their drift and offset distance. Moreover, as the slope gradient increases, the landing points of the sandbags become more scattered in the downstream direction. The average drift distance of sandbags increases with the flow velocity. When the flow velocity is high, the variation in slope gradient has a relatively small impact on the drift distance of the sandbags. However, when the flow velocity is low, the average drift distance of the sandbags thrown by the bottom-opening barges increases with increasing slope gradient, while the landing points of the sandbags thrown by the flipper boats become more concentrated in the downstream direction. The throwing method of bottom-opening barges results in more dispersed landing points compared to flipper boats, although the difference in landing range between the two throwing methods is insignificant.

**Key words:** sandbag; throwing method; landing point; riverbank slope

三峡工程运用后,长江中下游输沙量减少,清水下泄,河槽冲刷下切贴岸,崩岸险情频发<sup>[1-3]</sup>,亟须加

强河道深槽治理和护底。传统的河道深槽治理和护底大多采用抛石技术,但块石资源逐渐短缺和枯竭,

**基金项目:**国家自然科学基金长江联合基金项目(U2240209);国家自然科学基金面上项目(52379075);高等学校学科引智计划项目(B17015);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室自主研究项目(521013152);水利部重大科技项目(SKS-2022124)

**作者简介:**肖洋(1974—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: Sediment\_lab@hhu.edu.cn

**通信作者:**张涛涛(1992—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: ztt714521@163.com

且开山采石方式因爆破采石会造成山体破坏、植被锐减和引发粉尘等环境问题。另外,抛石本身结构并不稳定,水流在抛石间隙中流速仍较大,极易淘走土体,导致结构失稳。沙袋抛投可以利用现有江底泥沙,就地取材,避免环境破坏,是长江中下游岸坡治理宜采用的防护技术。

河流中沙袋抛投的精准定位是沙袋防护技术中的关键,不少学者对沙袋的沉落过程开展了研究。例如:孙东坡等<sup>[4]</sup>开展了单个沙袋的水槽概化试验,分析了沙袋的沉降力学机理、落地稳定性及偏移运动方程,但其沉落速度和横向偏移量难以满足相似性,对于实际工程设计仅有参考价值;应强等<sup>[5]</sup>假定沙袋平行下沉、无转动,根据牛顿第二定律建立了沙袋的运动微分方程;王晓娟等<sup>[6]</sup>通过水槽模型试验观测了沙袋的沉落轨迹,建立了沙袋顺水流方向位移(水平位移)和向水下沉落位移(竖向位移)公式,并指出沙袋竖向位移和水平位移均同水深、流速、尾端底部至水面的距离成正比,同体积、填充率成反比;Zhu等<sup>[7]</sup>通过室内水槽试验研究了不同沙袋在不同水深、流速下的沉降规律,并提出了一个解析公式来评估水平沉降距离;Liu等<sup>[8]</sup>通过水槽试验研究了不同水深、流速下的沙袋沉降过程,考虑了沙袋尺寸、填充率、滑移距离、倾斜角度等因素影响,根据力平衡原理建立倾斜面抛投的沉降方程;Liu等<sup>[9]</sup>对多个沙袋从斜面释放的沉降过程进行了试验研究,提出了单个、二联通和三联通沙袋结构,通过袋型选择试验确定三联通土工包具有最佳的沉降精度,并在水流条件不变的情况下,从尺寸、填充率、土工包间隔、斜面滑动距离、斜面倾角5个方面进行了参数筛选。前人对沙袋沉降规律的研究多采用水槽试验,重点关注不同水深、流速、沙袋体型等条件下的沙袋沉降过程。然而,实际的沙袋防护工程多在有一定岸坡坡度的位置施工,而岸坡的存在对附近的水流结构会产生一定影响,进而影响沙袋落距和成型。

本文通过水槽试验,开展不同边坡坡度下沙袋沉降物理模型试验,并考虑翻板船抛投和开底驳船抛投方式的影响,研究边坡对沙袋落点的影响规律,以为河流深槽整治与防护工程建设提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 试验参数选取

参考以往的工程经验、前人的研究及相关规范<sup>[10-15]</sup>,选取原型沙袋体型为长10 m、宽1.60 m、高0.58 m,理论截面直径1.20 m,长宽比6.2:1,单袋体积7.92 m<sup>3</sup>,填充度70%。抛投方式会改变沙袋的入水速度和姿态,从而影响沙袋沉降规律及落点。在国内外实际施工过程中,通常采用的沙袋抛投方式有开底驳船抛投、网兜抛投、升降平台抛投和翻板船抛投等<sup>[16]</sup>,对于本文试验选取的沙袋体型,通常采用翻板船抛投和开底驳船抛投两种抛投方式。因此,本文试验主要模拟这两种抛投方式的影响。在沙袋护岸的施工过程中,水流条件是沙袋沉降过程的主要影响因素之一,而水深和流速对沙袋的沉降影响较大<sup>[17-19]</sup>。参考长江南京八卦洲河段水深范围32~44 m,取模拟水深38.40 m。根据以往工程经验,当水流流速较大时,水流条件较为复杂,沙袋抛投施工难以精准控制。因此,流速超过2 m/s时,应暂停沙袋抛投施工。试验选取水流流速范围为0.50~2 m/s,设置6个水平。参考长江南京河段实际情况,重点岸段典型断面坡度集中分布在1:1.5~1:4之间。边坡坡度缓于1:3的坡度对沙袋沉降位移方式及落距的影响较小。因此,模型试验中边坡坡度选用范围为1:1.5~1:3,共设置5个水平和无边坡的对照组。

### 1.2 试验布置设计

试验在长20 m、宽1.20 m、高0.60 m的矩形断面循环水槽进行,水槽内水流流速通过首部的流量计控制,进水口有消能的蜂窝管和压波板,使得水流平稳,水槽内水流水位通过尾门控制,试验水槽示意图见图1。试验中沙袋的翻板船抛投通过一个架在水槽上的不锈钢翻板来实现,倾斜角度则借助一侧的量角器确定,翻板角度 $\alpha$ 为10°,无滑落距离,装置如图2(a)所示。开底驳船抛投通过电机控制底部双侧驳板实现沙袋抛投,装置如图2(b)所示。

在玻璃水槽侧面贴两张不锈钢贴尺,可以对拍摄的视频与模型试验实际物体的几何比尺转换起辅助作用。试验坐标系选用二维坐标系,坐标原点在水槽底部平面, $x$ 轴位于水槽底部并且保持水平, $z$

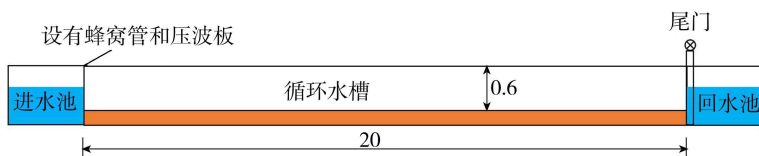


图1 试验水槽示意图(单位:m)



(a) 翻板船

(b) 开底驳船

图2 翻板船和开底驳船抛投装置

轴与翻板中心齐平且与 $x$ 轴垂直。 $x$ 轴为顺水流方向坐标, $z$ 轴为水深方向坐标。在水槽的另一侧贴白色背景纸,用以突显视频中沙袋的运动过程。在距离水槽一侧172 cm处架设高速摄像机,记录试验过程,如图3所示。

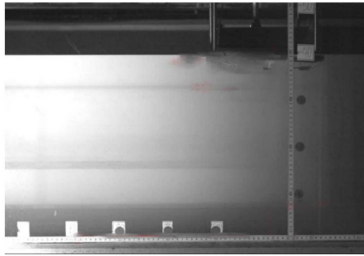


图3 沙袋沉落轨迹测量示意图

边坡采用砖块堆砌,表面用水泥抹平,边坡头部和尾部进行圆滑过渡,避免水流结构发生较大突变,边坡总长度为6 m,边坡宽度为60 cm(即水槽宽度一半),试验段在边坡长度中间位置,此处水流结构较平稳,模型概化边坡见图4。



图4 概化边坡(边坡坡度1:3)

试验采用正态物理模型,根据重力相似准则,模型与原型的阻力系数一致,因此,模型沙袋采用与原型一致的材料丙纶长丝机织布时,即可满足摩擦相似,模型比尺为几何比尺80、时间比尺8.94、流速比尺8.94、沉速比尺8.94、力比尺512000、密度比尺1。

试验将设计的原型沙袋按几何比尺80缩小制作成模型沙袋。模型沙袋长12.50 cm、宽2 cm、高0.70 cm,填充度与原型沙袋相同,为70%;模型沙袋填充料与原型相同,填充沙密度为 $1540 \text{ kg/m}^3$ 。

### 1.3 工况设置

根据前文水深(48 cm)、流速、边坡坡度和抛投方式等参数取值,模型试验工况见表1,表中各参数

均根据模型比尺计算,为模型试验采用数值。以无边坡情况作为对照组,水流条件相同,试验工况对应编号为B13~B18。

表1 边坡坡度因素模型试验工况

编号	抛投方式	边坡坡度	流速/(cm/s)	流量/(L/s)
C1	翻板船抛投	1:3	5.59	28.84
C2	翻板船抛投	1:3	11.20	57.79
C3	翻板船抛投	1:3	13.98	72.14
C4	翻板船抛投	1:3	16.80	86.69
C5	翻板船抛投	1:3	19.57	100.98
C6	翻板船抛投	1:3	22.40	115.58
C7	开底驳船抛投	1:3	5.59	28.84
C8	开底驳船抛投	1:3	11.20	57.79
C9	开底驳船抛投	1:3	13.98	72.14
C10	开底驳船抛投	1:3	16.80	86.69
C11	开底驳船抛投	1:3	19.57	100.98
C12	开底驳船抛投	1:3	22.40	115.58
C13	翻板船抛投	1:2.5	5.59	28.17
C14	翻板船抛投	1:2.5	11.20	56.45
C15	翻板船抛投	1:2.5	13.98	70.46
C16	翻板船抛投	1:2.5	16.80	84.67
C17	翻板船抛投	1:2.5	19.57	98.63
C18	翻板船抛投	1:2.5	22.40	112.90
C19	开底驳船抛投	1:2.5	5.59	28.17
C20	开底驳船抛投	1:2.5	11.20	56.45
C21	开底驳船抛投	1:2.5	13.98	70.46
C22	开底驳船抛投	1:2.5	16.80	84.67
C23	开底驳船抛投	1:2.5	19.57	98.63
C24	开底驳船抛投	1:2.5	22.40	112.90
C25	翻板船抛投	1:2	5.59	27.17
C26	翻板船抛投	1:2	11.20	54.43
C27	翻板船抛投	1:2	13.98	67.94
C28	翻板船抛投	1:2	16.80	81.65
C29	翻板船抛投	1:2	19.57	95.11
C30	翻板船抛投	1:2	22.40	108.86
C31	开底驳船抛投	1:2	5.59	27.17
C32	开底驳船抛投	1:2	11.20	54.43
C33	开底驳船抛投	1:2	13.98	67.94
C34	开底驳船抛投	1:2	16.80	81.65
C35	开底驳船抛投	1:2	19.57	95.11
C36	开底驳船抛投	1:2	22.40	108.86
C37	翻板船抛投	1:1.5	5.59	25.49
C38	翻板船抛投	1:1.5	11.20	51.07
C39	翻板船抛投	1:1.5	13.98	63.75
C40	翻板船抛投	1:1.5	16.80	76.61
C41	翻板船抛投	1:1.5	19.57	89.24
C42	翻板船抛投	1:1.5	22.40	102.14
C43	开底驳船抛投	1:1.5	5.59	25.49
C44	开底驳船抛投	1:1.5	11.20	51.07
C45	开底驳船抛投	1:1.5	13.98	63.75
C46	开底驳船抛投	1:1.5	16.80	76.61
C47	开底驳船抛投	1:1.5	19.57	89.24
C48	开底驳船抛投	1:1.5	22.40	102.14

沙袋成型试验选取最陡边坡坡度1:1.5,水深为38.40 m(模型为48 cm),3个流速水平为1、1.50、2 m/s(模型为11.2、16.8、22.4 cm/s),抛投方式采用翻板船抛投和开底驳船抛投,模型试验工况

见表2。

表2 沙袋成型模型试验工况

编号	抛投方式	流速/(cm/s)	流量/(L/s)
D1	翻板船抛投	11.2	56.95
D2	翻板船抛投	16.8	85.43
D3	翻板船抛投	22.4	113.90
D4	开底驳船抛投	11.2	56.95
D5	开底驳船抛投	16.8	85.43
D6	开底驳船抛投	22.4	113.90

## 2 结果与分析

### 2.1 沙袋落点位置

有边坡存在时沙袋入水后先沿顺水流方向(绕沙袋长轴)摆动,然后由于沙袋沉降过程中前端下降速度快于后端速度,沙袋姿态由初始水平姿态变为与水流成一定角度下沉,落至坡脚或坡脚附近无坡区域。还有一部分沙袋前半段沉降过程仍会先绕沙袋长轴摆动,但沙袋下沉过程中前端会先落在边坡上,然后发生滑动或滚动,最终掉落至坡脚附近。观察试验过程视频发现,边坡坡度较陡时沙袋发生滑动的现象较多。由此推断,实际沙袋抛投过程中也可能存在沙袋滑动的现象,进而导致沙袋落点位置发生变化,对实际施工过程中沙袋抛投成型位置可能会产生影响。若沙袋触底时在边坡上,沙袋的长度方向与水流方向存在 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 夹角,随后发生滑动的沙袋最终姿态多与初始姿态较一致。若在坡脚无坡区域,沙袋触底后的姿态多与初始姿态保持一致,和前面无边坡存在时的姿态相似。因此,可以认为沙袋在边坡存在时发生的滑动仅对沙袋落点位置有影响,对沙袋触底后的姿态影响不大。

### 2.2 沙袋漂移落距

翻板船抛投下沙袋漂移落距统计箱线图如图5所示,可以看出,无边坡时沙袋漂移落距明显小于有边坡情况,这可能是由于水槽中沿水深分布的流速在有边坡时要大于无边坡时,使得沙袋受到水流作用力增大,沙袋漂移落距随之增大,同时表明边坡的存在对沙袋漂移落距会产生影响。由箱体长度可知,边坡坡度固定时,水流流速越小,对应的箱体长度越小,说明沙袋落点在顺水流方向越集中。同一水流条件下,边坡坡度越陡,对应的箱体长度较大,表明沙袋落点在顺水流方向越分散。由图还可看出,沙袋漂移落距平均值和中位数均随流速增大呈增大趋势。图6为翻板船抛投时沙袋平均漂移落距与流速关系。由图6可以看出,沙袋平均漂移落距随流速的增大而增大,与无边坡时规律一致,大流速时边坡坡度的变化对沙袋平均漂移落距的影响较小,而小流速时边坡坡度变化对沙袋平均漂移落距

虽有影响但无明显规律。

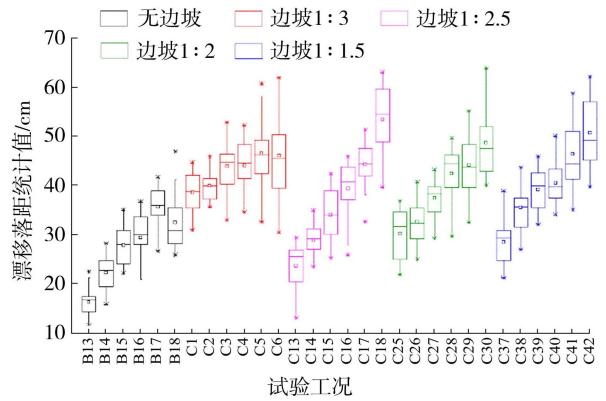


图5 翻板船抛投时沙袋漂移落距统计

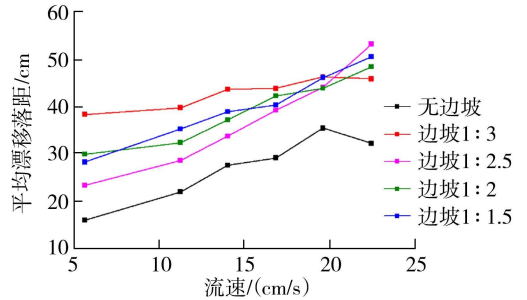


图6 翻板船抛投时沙袋平均漂移落距与流速关系

图7为开底驳船抛投下沙袋漂移落距统计箱线图,可以看出,沙袋的漂移落距平均值和中位数与流速变化成正比,与翻板船抛投时的结论相同。在同一水流条件下,大流速时边坡坡度的变化对沙袋漂移落距的影响不大,而小流速时沙袋漂移落距平均值和中位数随边坡坡度的增大而呈增大趋势。边坡坡度一定时,随流速变化,箱体长度变化不大,说明水流条件的变化对开底驳船抛投时沙袋落点在顺水流方向的集中程度影响并不明显。图8为开底驳船抛投时沙袋平均漂移落距与流速关系。由图8可以看出,在边坡坡度一定时,沙袋平均漂移落距随流速的增大而增大,与翻板船抛投时规律一致,同样,在大流速情况下,边坡坡度的变化对沙袋平均漂移落

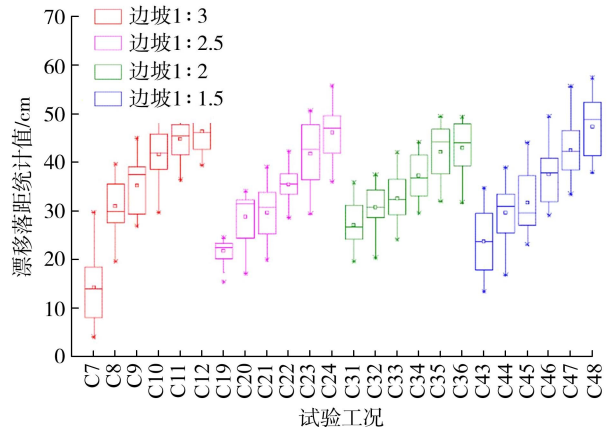


图7 开底驳船抛投时沙袋漂移落距统计

距的影响较小,而小流速时,沙袋平均漂移落距随边坡坡度的增大而增大。

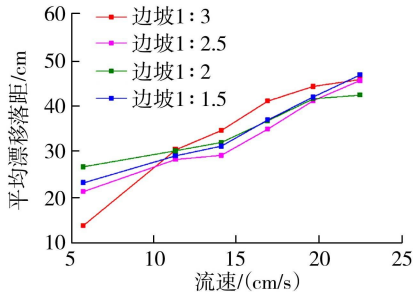


图8 开底驳船抛投时沙袋平均漂移落距与流速关系

从沙袋漂移落距统计中发现,边坡存在时,同一工况重复试验下沙袋落点的位置是在一定区间内的。表3为翻板船抛投时对应的沙袋平均漂移落距95%置信区间上下限统计情况。可以看出,当边坡坡度一定时,沙袋平均漂移落距置信区间的上下限均与流速成正比。各工况下沙袋平均漂移落距的置信区间范围基本在2~7cm之间,换算到原型为1.60~5.60m之间。有边坡存在时,沙袋平均漂移落距置信区间范围较大,这可能是因为边坡的存在增大了沙袋落点的随机性,使得沙袋平均漂移落距置信区间范围增大。

图9为翻板船抛投时沙袋平均漂移落距95%置信区间上下限与流速的关系曲线。由图9可知,置信区间上下限随流速的变化规律基本一致,均随流速增大呈增大趋势。通过SPSS分析95%置信区间上下限与流速的相关性,皮尔逊相关系数均为0.67,表明流速与平均漂移落距置信区间上下限呈强显著正相关关系(一般认为相关系数在0.60~0.80之间为强相关),同时可得出沙袋平均漂移落

表3 翻板船抛投时沙袋平均漂移落距置信区间

流速/(cm/s)	置信区间/cm			
	边坡1:1.5	边坡1:2	边坡1:2.5	边坡1:3
5.59	26.46 ~ 30.58	28.10 ~ 32.30	21.92 ~ 25.78	36.87 ~ 40.39
11.20	33.63 ~ 37.47	30.94 ~ 34.38	27.61 ~ 30.16	38.67 ~ 41.41
13.98	37.47 ~ 40.93	35.81 ~ 39.11	40.07 ~ 44.73	41.88 ~ 46.04
16.80	38.70 ~ 42.52	40.21 ~ 44.83	36.99 ~ 41.95	41.89 ~ 46.37
19.57	43.66 ~ 49.18	41.44 ~ 46.90	42.30 ~ 46.36	43.48 ~ 49.62
22.40	47.97 ~ 53.69	45.84 ~ 51.64	50.60 ~ 56.42	42.62 ~ 49.70

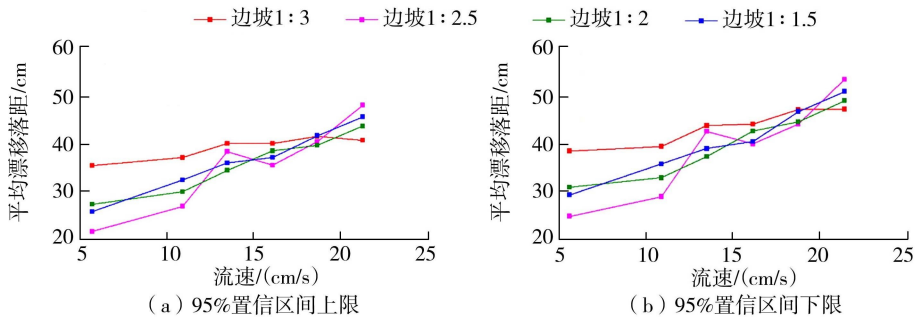


图9 翻板船抛投时沙袋平均漂移落距置信区间上下限与流速关系

距置信区间在水流条件不变时,边坡坡度对其影响无明显规律。

### 2.3 沙袋落点范围

由于边坡存在时水流结构较无边坡复杂,沙袋沉降过程中顺水流方向和垂直水流方向会受到扰动,产生漂移落距和偏移落距,沙袋落点较无边坡时更具随机性,给出沙袋落点范围可以为实际施工过程中抛投区域的确定提供依据。由表4可知,边坡存在时较无边坡时沙袋落点在顺水流方向的范围更大,且沙袋落点在垂直水流方向出现偏移。翻板船抛投时沙袋顺水流方向落点变幅范围为10.20~31.50cm,沙袋垂直水流方向落点变幅范围为8~26cm。开底驳船抛投时沙袋顺水流方向落点变幅范围为7~25.70cm,沙袋垂直水流方向落点变幅范围为6~27cm。由此可见,两种抛投方式下沙袋落点的范围相差不大。

为了估计总体特性,进行漂移落距标准化,使各组工况的漂移落距平均值为0,然后绘制正态分布曲线。翻板船抛投方式下的漂移落距和偏移落距标准差分别为5.26、5.30cm,开底驳船抛投方式下的漂移落距和偏移落距标准差分别为5.41、5.61cm。根据总体样本均值和标准差,可以确定不同置信度下两种抛投方式的漂移落距和横向落距的预测范围,具体见表5。99%的置信度表示在给定落距范围内的沙袋落点概率为99%;其他置信度同理。增加沙袋落距范围可提高落点概率,但过大的范围会增加施工难度。从表中可以看出,开底驳船抛投方式得到的落距范围稍大于翻板船抛投方式,表明开底驳船抛投方式下沙袋落点更分散一些。在置信度为95%时,翻板船抛投方式沙袋漂移和偏移落距分

别为 20.63、20.77 cm, 对应原型约 16.8 m, 开底驳船抛投方式下沙袋漂移和偏移落距分别为 21.21、21.99 cm, 对应原型约 17.6 m。

表 4 沙袋落点变幅范围统计

抛投方式	边坡坡度	落点变幅范围/cm	
		顺水流方向	垂直水流方向
翻板船抛投	无边坡	10.91 ~ 26.42	
	1 : 3	10.20 ~ 31.50	16 ~ 23
	1 : 2.5	11.40 ~ 23.40	18 ~ 24
	1 : 2	13.90 ~ 22.70	8 ~ 26
	1 : 1.5	13.80 ~ 23.70	11 ~ 23
开底驳船抛投	1 : 3	15.70 ~ 25.70	18 ~ 27
	1 : 2.5	7.00 ~ 21.20	10 ~ 26
	1 : 2	14.50 ~ 17.90	6 ~ 28
	1 : 1.5	19.50 ~ 22.10	6 ~ 16

表 5 不同置信度下沙袋落点预测范围

抛投方式	漂移落距/cm				
	置信度 99%	置信度 95%	置信度 90%	置信度 80%	置信度 70%
翻板船抛投	27.16	20.63	17.27	13.48	11.37
开底驳船抛投	27.92	21.21	17.74	13.85	11.69

抛投方式	偏移落距/cm				
	置信度 99%	置信度 95%	置信度 90%	置信度 80%	置信度 70%
翻板船抛投	27.34	20.77	17.38	13.56	11.44
开底驳船抛投	28.94	21.99	18.40	14.36	12.12

### 3 结论

a. 有边坡时沙袋的沉降方式与无边坡时略有不同, 部分沙袋会在边坡上滑动或滚动, 最终掉落至坡脚附近, 使得沙袋落点位置发生一定变化。

b. 边坡的存在会增加沙袋的漂移落距, 坡度越大, 沙袋在顺水流方向的落点越分散。沙袋平均漂移落距随流速的增大而增大, 在大流速情况下, 边坡坡度的变化对沙袋平均漂移落距的影响较小。小流速时, 开底驳船抛投下沙袋平均漂移落距随边坡坡度的增大而增大, 翻板船抛投下无明显规律。流速越小, 翻板船抛投下沙袋在顺水流方向的落点越集中。水流条件的变化对开底驳船抛投下沙袋落点在顺水流方向的集中程度影响并不明显。

c. 有边坡时沙袋落点在顺水流方向的变化范围会增大, 且有边坡时沙袋落点在垂直水流方向出现偏移。开底驳船抛投比翻板船抛投方式下的沙袋落点更加分散, 两种抛投方式下沙袋落点范围相差不大。

#### 参考文献:

[1] 陈祖煜, 孙玉生. 长江堤防崩岸机理和工程措施探讨[J]. 中国水利, 2000(2): 28-29. (CHEN Zuyu, SUN Yusheng. Probing the cause of process of Yangtze dyke collapse and corresponding structural measures[J]. China

Water Resources, 2000(2): 28-29. (in Chinese))

[2] 沈婷, 李国英, 张幸农. 水流冲刷过程中河岸崩塌问题研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊1): 260-263. (SHEN Ting, LI Guoying, ZHANG Xingnong. Numerical analysis of bank failure under lateral erosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Sup1): 260-263. (in Chinese))

[3] 王廷贵. 河流岸滩挫落崩塌机理及其分析模式[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(5): 21-25. (WANG Yangui. Mechanism and analysis mode of sinking failures of river banks[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(5): 21-25. (in Chinese))

[4] 孙东坡, 张耀先, 王二平, 等. 堵口土工包沉落试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(4): 33-37. (SUN Dongpo, ZHANG Yaoxian, WANG Erping, et al. Experimental study on settling properties of large earth bag for blocking[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35(4): 33-37. (in Chinese))

[5] 应强, 张幸农, 李伟. 沙袋在水流中的沉速、落距[J]. 泥沙研究, 2009(1): 15-19. (YING Qiang, ZHANG Xingnong, LI Wei. Settling velocity and distance of sandbags in flows[J]. Journal of Sediment Research, 2009(1): 15-19. (in Chinese))

[6] 王晓娟, 束一鸣, 刘海笑. 防治崩岸的土工包沉落轨迹试验[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(增刊1): 217-219. (WANG Xiaojuan, SHU Yiming, LIU Haixiao. Experiment on settlement trajectory of soil ladle for preventing bank collapse[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(Sup1): 217-219. (in Chinese))

[7] ZHU Lijun, WANG Jianzhong, CHENG Niansheng, et al. Settling distance and incipient motion of sandbags in open channel flows[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2004, 130(2): 98-103.

[8] LIU Xinxin, SHU Yiming, GU Ke, et al. Determination of drag coefficients for settling geocontainers dumped from a bevel[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2017, 143(3): 04016024.

[9] LIU Xinxin, SHU Yiming, GU Ke, et al. Settling mechanism for ternary-type geocontainers dumped from a bevel[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2017, 143(5): 04017023.

[10] 赖敬飞. 长江九江段河流崩岸模型试验与综合防治技术[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.

[11] ZHOU Meirong, XIA Junqiang, DENG Shanshan, et al. Channel adjustments in a gravel-sand bed reach owing to upstream damming[J]. Global and Planetary Change, 2018, 170: 213-220.

(下转第 72 页)

5-7. (in Chinese))

- [14] 南军虎,高欢,汪超群,等.一种新型旋流排沙渠道的试验研究和数值模拟[J].工程科学与技术,2022,54(6):116-123. (NAN Junhu, GAO Huan, WANG Chaoqun, et al. Experimental study and numerical simulation of a newly developed desilting channel with swirling flow[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(6):116-123. (in Chinese))
- [15] 南军虎,高欢,汪超群,等.旋流排沙渠道水力特性预测模型适宜性研究[J].水电能源科学,2022,40(9):142-145. (NAN Junhu, GAO Huan, WANG Chaoqun, et al. Study on the suitability of hydraulic characteristics prediction model of desilting channel with swirling flow[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(9):142-145. (in Chinese))
- [16] 南军虎,罗涵,马康宁,等.旋流排沙渠道体型优化的正交数值试验方法和应用[J].水力发电学报,2022,41(10):160-169. (NAN Junhu, LUO Han, MA Kangning, et al. Orthogonal numerical experiment method and

application for shape optimization of desilting channel with swirling flow[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(10):160-169. (in Chinese))

- [17] 南军虎,汪超群,李伟,等.旋流排沙渠道排沙特性试验[J].农业工程学报,2022,38(14):127-135. (NAN Junhu, WANG Chaoqun, LI Wei, et al. Experiments on sediment characteristics in a desilting channel with a swirling flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(14):127-135. (in Chinese))
- [18] 周芳龄,唐勇,周晓泉.基于DPM模型的旋流式沉沙池悬沙数值模拟[J].水电能源科学,2020,38(10):91-94. (ZHOU Fangling, TANG Yong, ZHOU Xiaquan. Numerical simulation of suspended sediment in vortex-type sedimentation basin based on DPM model[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(10):91-94. (in Chinese))

(收稿日期:2023-05-08 编辑:俞云利)

(上接第50页)

- [12] 胡维忠.长江中下游干流河道崩岸状况及其防治[J].长江技术经济,2020,4(1):17-20. (HU Weizhong. Bank collapse and its prevention in the main stream of the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Technology and Economy of Changjiang, 2020, 4(1):17-20. (in Chinese))
- [13] 陈敏,沈华中,冯源,等.长江中下游河道近年崩岸应急整治[J].水利水电快报,2017,38(11):15-18. (CHEN Min, SHEN Huazhong, FENG Yuan, et al. Emergency regulation of bank collapse in the middle and lower reaches of the Yangtze River in recent years[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2017, 38(11):15-18. (in Chinese))
- [14] 刘祥玉,刘晓辉,高清洋,等.长江中下游顺直河道水流冲刷引发崩岸的模拟试验[J].水运工程,2019(4):90-97. (LIU Xiangyu, LIU Xiaohui, GAO Qingyang, et al. Simulation experiment of bank collapse caused by scouring in straight river section in middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(4):90-97. (in Chinese))
- [15] 王延贵,陈吟,陈康.冲积河流岸滩崩退模式与崩退速率[J].水利水电科技进展,2018,38(4):14-20. (WANG Yangui, CHEN Yin, CHEN Kang. Study on collapse-retreat patterns and bank erosion rates of alluvial

riverbanks[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(4):14-20. (in Chinese))

- [16] 贺俊锋.浅谈袋装砂施工工艺在深水筑堤中的应用[J].珠江水运,2007,11(2):21-23. (HE Junfeng. Discussion on the application of sand bag construction technology in deep water embankment construction[J]. Pearl River Water Transport, 2007, 11(2):21-23. (in Chinese))
- [17] 刘欣欣.深水滑抛土工包沉落机理与棱体成型研究[D].南京:河海大学,2017.
- [18] 焦子峰,于学付,蒲敏艳,等.Padma河道整治工程土工沙袋抛填施工方法对比[J].水运工程,2019(2):200-203. (JIAO Zifeng, YU Xuefu, PU Minyan, et al. Comparison of construction methods for geotextile sandbag dumping applied to Padma river regulation engineering[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(2):200-203. (in Chinese))
- [19] 刘欣欣,束一鸣,顾克,等.翻板抛投土工包沉落轨迹与落域[J].水利水电科技进展,2018,38(1):50-54. (LIU Xinxin, SHU Yiming, GU Ke, et al. Settling trajectories and placement for geocontainers dumped from a bevel[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1):50-54. (in Chinese))

(收稿日期:2023-10-04 编辑:俞云利)