

· 航道及通航建筑物 ·



顺水沉放条件下护底软体排排头 漂移距水槽试验研究*

杨涵苑^{1,2}, 周成洋³, 夏志康¹, 左利钦¹, 黄廷杰¹, 陆永军¹

(1. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,
长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210029;

2. 武汉大学, 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

3. 江苏省淮沭新河管理处, 江苏 淮安 223001)

摘要: 航道整治工程软体排沉排过程中, 排头着床位置的精准控制是关系施工成败和铺排质量的重要因素。实际施工时对沉排参数的选取大多依赖经验性判断, 尚缺乏理论与试验研究。通过概化水槽试验, 研究了顺水沉放条件下不同沉排参数对排头漂移距的影响规律, 量化表征了各参数的敏感性差异。基于多元非线性回归理论建立了多因素作用下排头漂移距预测模型, 利用相关系数和平均绝对误差等指标对其预测精度进行了统计分析。试验结果表明, 排头漂移距随排头梁质量和连接绳长增大而减小, 随水深和流速增大而增大; 各参数敏感性排序为流速>相对绳长>水深>排头梁质量。研究成果可为软体排沉排施工提供科学依据。

关键词: 软体排; 顺水沉放; 漂移距; 水槽试验; 非线性回归

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0098-08

Experimental study on the drift distance of the bottom protection flexible mattress head in the process of downstream sinking

YANG Han-yuan^{1,2}, ZHOU Cheng-yang³, XIA Zhi-kang¹, ZUO Li-qin¹, HUANG Ting-jie¹, LU Yong-jun¹

(1.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute,
Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210029, China;

2.State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3.The New Huaishu River Management Division of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China)

Abstract: In the process of flexible mattress sinking in waterway improvement engineering, the precise control of mattress location is an important factor that affects the success and quality of construction. Currently, the selection of sinking parameters mostly depends on empirical judgment because of the lack of theoretical and experimental research. Through the generalized flume experiment, the influence of different parameters on drift distance of mattress head in the process of downstream sinking was studied, and the sensitivity difference of each parameter was quantified. Based on the theory of multivariate nonlinear regression, a prediction model of the drift distance of mattress head under the effect of multiple factors was established, and its prediction accuracy was statistically analyzed by using correlation coefficient, mean absolute percentage error, etc. The experimental results

收稿日期: 2021-10-18

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2040219); 长江航道科技项目(Hs219003)

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

通讯作者: 陆永军(1964—), 男, 博士, 研究员, 从事港口与航道泥沙研究。E-mail: yjlu@nhri.cn

show that the drift distance decreases with the increase of beam weight and rope length, while increases with the increase of water depth and velocity. The sensitivity order of each parameter from largest to smallest is velocity, relative rope length, water depth and beam weight. The study results can provide a scientific basis for the construction of flexible mattress sinking.

Keywords: flexible mattress; downstream sinking mattress; drift distance; flume experiment; nonlinear regression

软体排是由土工织物系结压载物制成的柔性防冲结构,其整体性高、灵活性好、耐久性强,能自动调节自身形态以适应河床变形,克服了传统防护结构中的诸多问题^[1-2]。受不同地区石料运输成本、施工效率、工程造价等因素影响,近年来航道整治工程中多采用软体排作为护滩(底)建筑物^[3-5]。由于软体排排垫具有隔离和反滤功能,可大幅削减近岸水流的冲击能量、防止局部淘刷及渗透作用对河床造成变形破坏,并保护排体下方土颗粒不随水流冲刷下移^[6-7]。此外,排垫表面的粗糙、多孔性为水生生物及植被生长提供了良好的栖息场所,使其对海洋及河流水文环境的负面影响非常有限。因此软体排在长江^[8-9]、密西西比河^[10]等大江大河的航道整治工程中发挥着重要作用,取得了良好的洲滩守护效果。

现有软体排的铺排方式可分为顺水流、逆水流及垂直水流沉排。在护滩(底)带中地形平缓的开阔水域往往采用顺水和逆水沉排;而对于受地形影响较大的边滩守护工程,一般由岸边向江心垂直水流铺设。逆水沉排时排体在水中往往发生剧烈震荡或漂浮,存在巨大安全隐患,故很少采用。新型顺水沉排相比垂直水流工艺能有效减小河床底部的溯源侵蚀,因此近些年受到了更多关注。然而,由于迎水面积大、水流顶冲导致排体受力大幅提升^[11]。前人针对软体排力学特性、结构设计及铺设工艺等开展了一些研究。朱宪武^[12]最早采用悬链线理论对软体排力学特性及水下构型开展研究,推导了排体在静水中的受力计算方法。孙峙华^[13]基于集中质量法开发了顺水沉排力学计算模型 DASMDS,克服了排体质量不均匀分布及排布拉伸变形问题。张景明^[14]根据长江口深水航道治理工程的沉排经验,阐述了软体排

的结构形式、设计方法及应用前景。胡利文等^[15]针对大榭港区围堤工程实际施工特点,提出了不同水位区域及潮间带的铺排工艺优化方案。杨再常^[16]基于排头着床受力分析提出双排头施工技术,大幅增强了顺水沉排时排头锚固作用,有效减少了撕排及断排现象发生。然而,从提高排头着床精度出发,对多因素作用下顺水沉排排头漂移距的变化规律及预测尚缺乏理论与试验研究,导致排头梁、连接绳等设计参数大多依赖经验性判断。

相较于抛石漂移距研究^[17],沉排过程中受排体内部张力作用,导致排头着床区别于抛石沉降的一般性规律。鉴于此,本文通过水槽试验,致力于揭示排头梁质量、连接绳长、水深及流速4个沉排参数对排头漂移距的影响规律,并基于多元非线性回归理论建立排头漂移距预测模型,实现沉排参数与排头漂移距的定量表征,以期对软体排沉排施工及排头精准着床提供理论指导。

1 水槽试验概况

1.1 试验设计

图 1a) 为铺排船及船载设备进行顺水沉排的实际情景,沉排前预先将混凝土联锁块吊装至甲板指定位置,利用丙纶绳系结于下方排垫。松开卡排梁及卷排筒,使得排头梁牵拉排头沿船舷及翻板下滑并着床。随后沉排船沿水流方向往下游移动一定距离,待联锁块绑扎完成后继续放排并移船,重复沉排操作。本研究根据现场沉排的主要特点,开展软体排沉排的概化水槽试验。试验在南京水利科学研究院铁心桥试验基地泥沙基本理论试验厅的变坡水槽中进行,试验水槽长 40 m、宽 0.8 m、深 0.8 m。水流由泵房从地下水库抽水

至过流堰，配合长 50 cm 的 PVC 管群进行消能，使得流态沿水槽宽度方向趋于平顺。通过调整电动执行器的开度大小控制水槽入口流量，采用超声波流量计进行测量。

原型排混凝土压载块密度为 2.35 t/m^3 ，一般选用密度较为接近的铝合金（密度为 2.7 t/m^3 ）作为模型材料^[18]，将压载块外形概化为圆柱体。根据重力相似原理将排体按 1:20 比尺进行缩尺制作，计算得到单片铝块直径为 16 mm，高为 5 mm，质量偏差为 1.5%，符合 TS/T 231-8—2018《内河航道整治建筑物模拟技术规程》要求（ $\pm 5\%$ ）。由于无法严格按照原型排体构造进行模拟加工，将压

载块与排垫的系结方式简化为：采用 502 胶将铝块按几何比尺等间距粘贴于棉布上的预设位置。试验表明，采用粘接的简化方式并不会改变实际系结方式的排体变形特点。由于软体排在顺水流沉放时所受水流冲击力大，因此实际工程中需在排头处等间距系结混凝土排头梁，用于牵拉排头着床，并锚固于河床底部。如长江下游江乌河段航道整治工程所采用的排头梁质量为 770 kg/根，由重力相似计算得到模型梁质量为 0.10 kg。本研究选用 12 cm 宽模型排体（面密度 $\rho_s = 4.34 \text{ kg/m}^2$ ），采用强度及耐磨性较好的尼龙绳系结与排体等宽的条形混凝土块开展顺水沉排水槽试验。

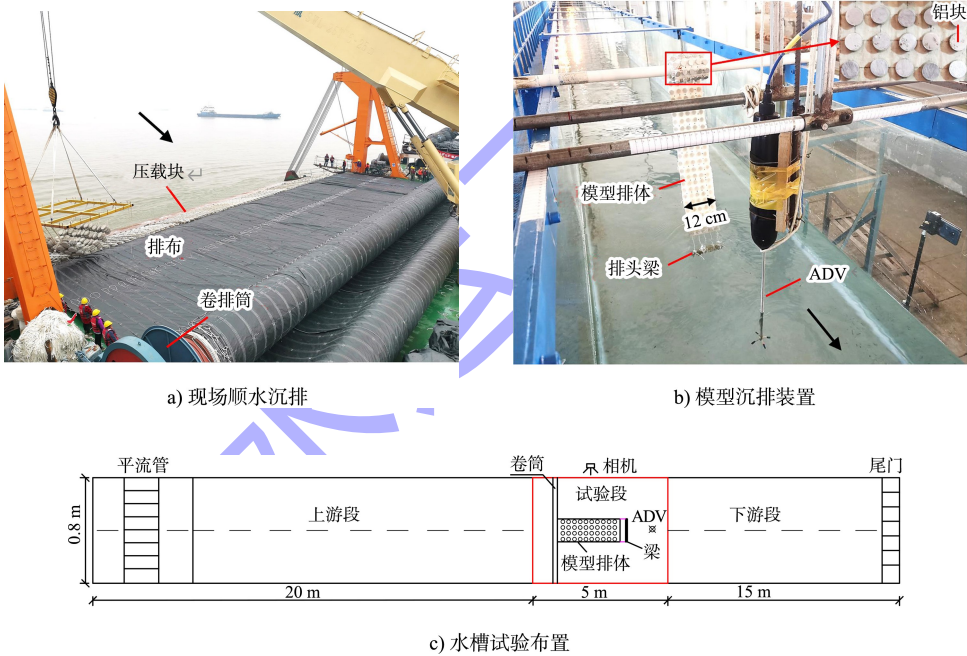


图 1 试验设计

1.2 试验工况

本研究设计了 5 种排头梁质量 (0.06、0.08、0.10、0.12、0.14 kg) 和连接绳长 l (0、0.02、0.04、0.06、0.08 m)、4 种水深 h 和流速 v 等共计 57 组试验工况，见表 1。其中 R1~R25 工况旨在探究排头梁及连接绳长对漂移距的影响规律，R26~R41 工况主要关注不同水流条件下漂移距的变化特征，R42~R57 用于验证漂移距计算模型的预测精度。

试验通过卷筒进行放排，待排头梁达到锚固于槽底、不随水流漂移的稳定状态后，采用相机拍摄记录每组工况下排头漂移状态，并将照片导入 AutoCAD 中测量排头梁着床点距离沉排点的水平距离与水位高度的相对大小，再乘以试验水深得到实际漂移距。为确保试验结果的准确性，每组工况重复沉排 3 次并对测量结果进行算术平均处理。各典型工况下排头漂移情况见图 2。

表 1 水槽试验工况

工况	h/m	$v/(m \cdot s^{-1})$	l/m	$m/(kg \cdot m^{-1})$	工况	h/m	$v/(m \cdot s^{-1})$	l/m	$m/(kg \cdot m^{-1})$
1	0.25	0.20	0.00	0.53	30	0.20	0.15	0.00	0.96
2	0.25	0.20	0.00	0.67	31	0.20	0.20	0.00	0.96
3	0.25	0.20	0.00	0.85	32	0.20	0.25	0.00	0.96
4	0.25	0.20	0.00	0.96	33	0.20	0.30	0.00	0.96
5	0.25	0.20	0.00	1.13	34	0.25	0.15	0.00	0.96
6	0.25	0.20	0.02	0.53	35	0.25	0.20	0.00	0.96
7	0.25	0.20	0.02	0.67	36	0.25	0.25	0.00	0.96
8	0.25	0.20	0.02	0.85	37	0.25	0.30	0.00	0.96
9	0.25	0.20	0.02	0.96	38	0.30	0.15	0.00	0.96
10	0.25	0.20	0.02	1.13	39	0.30	0.20	0.00	0.96
11	0.25	0.20	0.04	0.53	40	0.30	0.25	0.00	0.96
12	0.25	0.20	0.04	0.67	41	0.30	0.30	0.00	0.96
13	0.25	0.20	0.04	0.85	42	0.15	0.15	0.08	0.67
14	0.25	0.20	0.04	0.96	43	0.15	0.20	0.08	0.67
15	0.25	0.20	0.04	1.13	44	0.15	0.25	0.08	0.67
16	0.25	0.20	0.06	0.53	45	0.15	0.30	0.08	0.67
17	0.25	0.20	0.06	0.67	46	0.20	0.15	0.06	0.85
18	0.25	0.20	0.06	0.85	47	0.20	0.20	0.06	0.85
19	0.25	0.20	0.06	0.96	48	0.20	0.25	0.06	0.85
20	0.25	0.20	0.06	1.13	49	0.20	0.30	0.06	0.85
21	0.25	0.20	0.08	0.53	50	0.25	0.15	0.04	0.96
22	0.25	0.20	0.08	0.67	51	0.25	0.20	0.04	0.96
23	0.25	0.20	0.08	0.85	52	0.25	0.25	0.04	0.96
24	0.25	0.20	0.08	0.96	53	0.25	0.30	0.04	0.96
25	0.25	0.20	0.08	1.13	54	0.30	0.15	0.02	1.13
26	0.15	0.15	0.00	0.96	55	0.30	0.20	0.02	1.13
27	0.15	0.20	0.00	0.96	56	0.30	0.25	0.02	1.13
28	0.15	0.25	0.00	0.96	57	0.30	0.30	0.02	1.13
29	0.15	0.30	0.00	0.96					

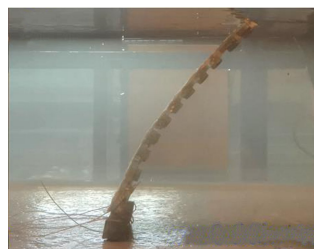
注: m 为单位宽度软体排对应的排头梁质量。



a) R1, $m=0.53 \text{ kg/m}$



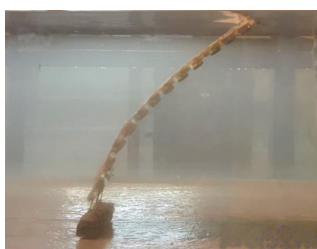
b) R3, $m=0.85 \text{ kg/m}$



c) R4, $m=0.96 \text{ kg/m}$



d) R5, $m=1.13 \text{ kg/m}$



e) R8, $l=0.02 \text{ m}$



f) R13, $l=0.04 \text{ m}$



g) R18, $l=0.06 \text{ m}$



h) R16, $l=0.08 \text{ m}$

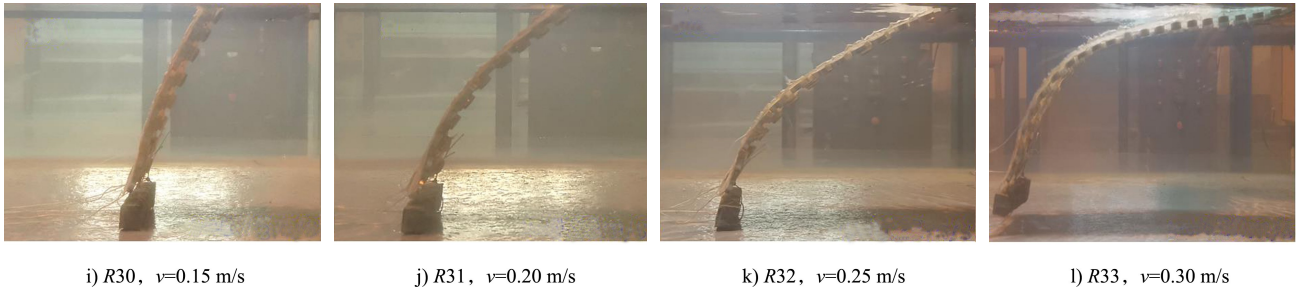


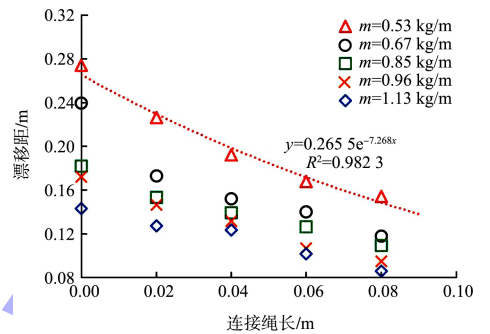
图2 典型工况沉排照片

2 结果与讨论

2.1 漂移距影响因素

图3给出了不同排头梁质量 m 、连接绳长 l 工况下排头漂移距 s 测量结果。由图3a)可知,随着排头梁质量 m 增大,漂移距 s 呈幂函数递减。当 m 由 0.53 kg/m 增加至 1.13 kg/m , $l=0 \text{ m}$ 时,即排头梁直接绑系于排头, s 由 0.27 m 减小至 0.14 m ,减幅达 47.9% ; $l=0.32 \text{ m}$ 时, s 由 0.15 m 减小至 0.09 m ,减幅达 44.3% 。原因是排体在水下主要受动水压力、排体自重及水上排体牵拉力作用,排头梁的加重减小了软体排自重与动水压力合力的垂向夹角,使得排头梁着床后的平衡状态下,漂移距随排头梁质量的增大而减小。

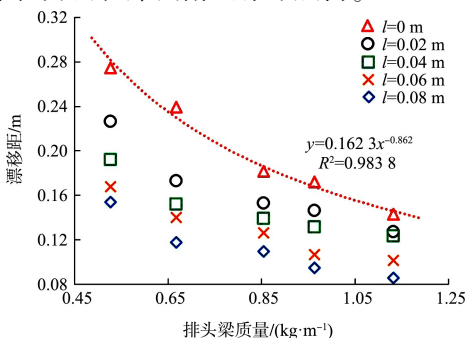
由图3b)可知,漂移距 s 随连接绳长 l 的增大呈指数型递减。当 l 由 0 m 增加至 0.08 m ,对于 $m=0.53、0.67、0.85、0.96$ 及 1.13 kg/m 的5组排头梁质量, s 减幅分别为 $43.9\%、50.8\%、39.9\%、45.0\%$ 及 39.9% 。分析认为,产生这一现象的原因是:绳长增加使得排头梁着床时排体入水深度及其在水流方向的投影面积缩小,从而减弱了动水压力对排体的冲击作用。因此,在实际工程中对于沉排较难的施工环境,可适当增大排头梁的连接绳长,但绳长过大可能导致排头缺乏足够牵拉力而在床面附近漂浮震荡。



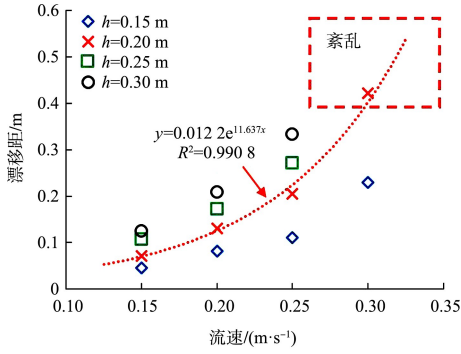
b) 排头漂移距随连接绳长变化曲线

图3 不同排头梁质量及连接绳长对排头漂移距影响

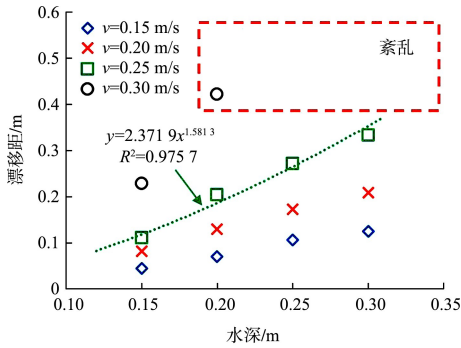
图4给出了不同水深、流速工况下排头漂移距测量结果。可以看出,随着水深、流速增加,排头所受动水压力增大,使得漂移距 s 急剧上升。当 $h=0.15 \text{ m}$, v 由 0.15 m/s 增大至 0.3 m/s 时,漂移距 s 由 0.05 m 增加至 0.23 m ,增幅达 428.7% ,此时排头尚处于稳定状态。结合图2可知,排头梁稳定着床时,水下排体近似呈规则的抛物线型。当 $h=0.2 \text{ m}$, v 逐步增大直至超过某一临界值($0.25 \sim 0.30 \text{ m/s}$ 之间),排体周围流场趋于紊乱,其构型转变为上下起伏的不规则形态。例如 R33 工况下 ($v=0.30 \text{ m/s}$),排头剧烈震荡,反复漂浮、下沉,极难沉排(见图2)。通过不断增加放排长度,最终排头梁在距离沉排点 0.42 m 位置着床,然而排头梁受水体紊动影响,缺乏足够锚固力以维持排体稳定性。保持流速不变,当 h 增大至 0.25 m 以上,强动力作用导致排体呈现与 R33 工况相似的水下构型,由于水体的剧烈紊动,在排体背水面失稳形成漩涡产生巨大的负压,导致排体所受上举力大于自重,使得排头无法沉降并着床,从而造成沉排失败。



a) 排头漂移距随排头梁质量变化曲线



a) 漂移距随流速变化曲线



b) 漂移距随水深变化曲线

图 4 不同水深及流速对排头漂移距影响

2.2 多元非线性回归分析

回归分析是指通过非随机变量估测某一随机变量所进行的数学模型构建及统计分析。一般遵循以下步骤: 基于已有数据确定各变量之间的定量关系(回归方程); 检验回归方程的显著性及拟合度; 分析自变量贡献值, 对各影响因素敏感性进行排序; 利用回归方程对某一过程进行预测和控制^[19-20]。根据前文分析可知, 排头梁质量、连接绳长、水深、流速与排头漂移距呈非线性关系。为建立其预测模型, 考虑选用幂指数函数构建 3 种函数表达式, 基于最小二乘法对多因素作用下排头漂移距进行回归分析, 得到不同函数形式下回归参数、拟合优度 R^2 、 P 值等评价指标, 见表 2。需要说明的是, 理论上应采用 R1 ~ R41 的全部工况作为回归分析的样本数据, 但由于 R33、R37 及 R41 工况下排体剧烈震荡、浮动, 沉排施工具有极大的安全隐患, 可能造成浮排、撕排、断排及锚机损坏等事故, 甚至危及沉排船安全。因此, 上述 3 种工况的试验结果不纳入样本数据。

表 2 多元非线性函数回归分析结果

函数	表达式	k	a	b	c	d	R^2	P
1	$s = kh^a v^b m^c \exp(dl/h) / \rho_s$	132.70	1.39	2.04	-0.70	-1.80	0.977	2.08×10^{-26}
2	$s = k \exp(ah + bv + cm + dl/h) / \rho_s$	0.04	6.91	9.90	-0.93	-1.60	0.965	1.31×10^{-23}
3	$s = k \exp[hv(cm + dl/h)] / \rho_s$	0.50	-	-	7.38	-18.21	0.128	0.09

注: k 为总体回归系数; a 为水深参数; b 为流速参数; c 为排头梁质量参数; d 为连接绳长参数; ρ_s 为排体面密度。

由表 2 可知, 所构造的 3 种表达式中, 函数 1 的 R^2 最大, 达到 0.977, 而函数 2 略小(0.965)。表明上述 2 种函数的自变量(沉排参数)与因变量(漂移距)存在高度相关性; 函数 3 与函数 2 均为指数形式, 但其放大了指数项中 h 和 v 对计算结果的影响程度, 使得 R^2 仅为 0.128, 表明该函数结构无法反映自变量及因变量的相关关系。函数 1、2 的 P 值分别为 2.08×10^{-26} 、 1.31×10^{-23} ($P < 0.05$ 即表示该项显著), 说明存在真实的回归方程, 且函数 1 相比函数 2 的检验结果更显著。因此, 本研究基于多元非线性回归分析确定排头漂移距预测模型如下:

$$s = \frac{132.7}{\rho_s} h^{1.39} v^{2.04} m^{-0.7} e^{-1.8l/h} \quad (1)$$

式中: s 为排头漂移距(m); h 为水深(m); v 为流

速(m/s); m 为单宽软体排对应的排头梁质量(kg); l 为连接绳长(m); ρ_s 为排体面密度(kg/m²)。

表 3 为式(1)中回归参数检验及 95%置信度参数区间估计结果。定义 l/h 为相对绳长, 可见, m 、 l/h 、 h 及 v 的回归参数的 P 值远小于显著性水平 0.05, 表明其与排头漂移距 s 密切相关。上述因素敏感性排序从大到小依次为 $v > l/h > h > m$, 结合参数值的正负可知, v 、 h 对 s 的作用为显著正相关, 而 m 、 l/h 为显著负相关。表明在排头漂移距的预测中需首要考虑沉排水域的流速范围, 排头梁质量相比无量纲绳长及水深对漂移距的影响较小。此外, 各回归参数的置信区间分别为 $v(1.26, 1.52)$ 、 $h(1.88, 2.20)$ 、 $m(-0.80, -0.61)$ 、 $l/h(-1.99, -1.61)$, 可见其区间范围较窄, 各因

素对漂移距的计算均不可或缺,说明4个沉排参数的显著性较高。

表3 回归参数检验及区间估计结果

回归参数	参数值	P	置信区间下限	置信区间上限
k	132.70	7.36×10^{-20}	188.70	93.31
a	1.39	4.05×10^{-21}	1.52	1.26
b	2.04	1.94×10^{-23}	1.88	2.20
c	-0.70	2.22×10^{-16}	-0.80	-0.61
d	-1.80	2.02×10^{-19}	-1.99	-1.61

2.3 预测模型精度校核

为验证预测模型的准确性,将R42~R57预测样本的试验参数代入式(1)计算,并与试验结果进行线性拟合。引入统计学指标相关系数R、平均绝对百分比误差MAPE及均方根误差RMSE对排头漂移距的拟合结果进行量化分析。MAPE通过逐项比较相对误差,可反映预测值相较计算值的离散程度, RMSE用于衡量预测值的偏差大小,其值越小,预测精度越高。可见,模型计算值与实测值较均匀贴合于y=x线两侧,二者具有良好的相关性(图5)。经计算得到R、MAPE及RMSE分别为0.98、10.85%及0.02 m,表明预测模型具有较高准确性。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{E_i - P_i}{E_i} \right| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - P_i)^2} \quad (4)$$

式中: E_i 为漂移距试验值, P_i 为漂移距预测值, \bar{E} 为 E_i 平均值, \bar{P} 为 P_i 平均值, n 为数据个数。

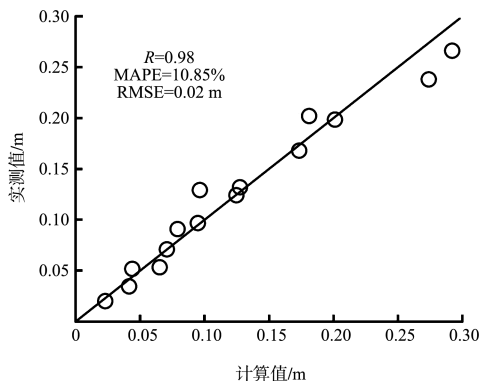


图5 排头漂移距计算值与实测值对比

进一步计算所有样本(除失败组次外)的试验值及预测值的相对误差,并进行统计分析(图6)。由图6可见,不同试验条件下排头漂移距的相对误差近似呈正态分布,最大值为25.13%,最小值为-31.27%,且有64.2%的数据集中于-5%~10%之间。可以认为,采用本研究提出的回归模型能较好地预测顺水沉排的排头漂移距,对排头着床位置的精准控制具有重要参考价值。

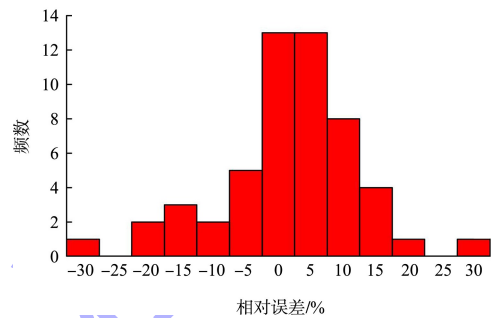


图6 预测模型相对误差统计分析

3 结语

1) 排头漂移距与排头梁质量、连接绳长呈非线性负相关;与水深、流速呈非线性正相关。当水流条件达到某一临界值后,排体构型由抛物线转变为上下起伏的不规则形态。

2) 沉排参数敏感性从大到小依次为流速>相对绳长>水深>排头梁质量。实际施工时应首要考虑沉排区域的水动力特征,防止由于水体剧烈紊动造成浮排、撕排及锚机损坏等事故发生。

3) 本研究建立的预测模型精度较高且形式简洁,相关系数R、平均绝对百分比误差MAPE及均方根误差RMSE分别为0.98、10.85%及0.02 m,表明该回归方程可以较准确计算水槽试验的排头着床位置。如应用于实际工程,还需要更多的室内试验和原型观测数据予以验证。

致谢: 本文在试验与写作过程中,与长江南京航道工程局朱文博同志进行了多次讨论,特此致谢。

参考文献:

[1] LAWSON C R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering[J]. Geosynthetics international,

- 2008, 15(6): 384-427.
- [2] 张群. 软体排顺水流施工受力分析与实船测试研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2014, 38(3): 619-622.
- [3] YAMINI O A, MOUSAVI S H, KAVIANPOUR M R. Experimental investigation of using geo-textile filter layer in articulated concrete block mattress revetment on coastal embankment[J]. Journal of ocean engineering and marine energy, 2019, 5(2): 110-133.
- [4] YAMINI O A, KAVIANPOUR M R, MOUSAVI S H. Experimental investigation of parameters affecting the stability of articulated concrete block mattress under wave attack [J]. Applied ocean research, 2017, 64: 184-202.
- [5] 曹棉. 软体排在长江航道整治工程中的应用[J]. 水运工程, 2004(9): 70-73.
- [6] CHARLIER R H, MEYER D, DECROO D. Beach protection and restoration part I: hard structures and beach erosion [J]. International journal of environmental studies, 1989, 33(1-2): 29-44.
- [7] LI Z Y, YANG P, SUN Z H, et al. Numerical analysis of tension force subjected by flexible mattress[J]. Applied mechanics & materials, 2015, 740: 116-119.
- [8] 刘颖, 杨平. 软体排沉排受力分析与非线性有限元计算[J]. 船海工程, 2011, 40(3): 52-55, 158.
- [9] 陆永军, 左利钦, 赖锡军, 等. 三峡水库下游江湖水沙交换与滩群整治[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
- [10] SJOSTROM K J, BUTLER D K, CORWIN R F. Assessment of Mississippi River revetments using the self-potential method[C]//Proceedings of the 6th Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Englewood: [S.l.], 1993: 435-448.
- [11] 黄召彪, 柴华峰, 李丰华. 深水顺水沉放条件下护底软体排结构设计方法[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1): 173-176.
- [12] 朱宪武. 混凝土连锁块软体排的受力分析与计算[J]. 水运工程, 2000(12): 21-26.
- [13] 孙峙华. 航道整治工程中软体排沉排力学特性的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [14] 张景明. 长江口深水航道治理工程护底软体排结构设计[J]. 水运工程, 2006(S2): 20-23.
- [15] 胡利文, 李英杰, 林涌潮. 大榭港区围海造陆工程软体排施工技术[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 60-63.
- [16] 杨再常. 使用双排头技术提高水深流急工况条件下顺水沉排质量[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(3): 285-287.
- [17] 许光祥, 刘添字, 楼金仙, 等. 流速垂线分布对抛石漂距的影响研究[J]. 泥沙研究, 2021, 46(5): 20-27.
- [18] 曹民雄, 马爱兴, 胡颖, 等. 航道整治建筑物及防护结构模拟技术研究[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 115-123.
- [19] 孙淑华, 王建, 何露, 等. 砂砾石地基上水闸底板弯矩预测的多元非线性回归模型[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 74-79.
- [20] 王伟, 王萌, 蔡军, 等. 基于 DMNR 模型建立 EB 炉熔炼 TC4 钛合金的双重多元非线性回归本构方程[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(10): 3609-3620.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 83 页)

4) 自动化码头将进一步推进码头数字化和信息化建设, 提升装卸设备的自动化和管理决策的自动化水平。

参考文献:

- [1] 刘二利, 冯飞翔, 徐文彪, 等. 大型集装箱码头陆域布局优化[J]. 水运工程, 2021(4): 63-69.
- [2] 朱连义, 安国利, 董席亮. 世界自动化集装箱码头发展现状及启示[J]. 集装箱化, 2015, 26(1): 7-10.
- [3] 吴邵强, 袁金虎, 彭骏骏. 基于三维仿真的自动化集装箱码头堆场布置形态[J]. 水运工程, 2019(4): 67-73.
- [4] 王敏, 唐洲, 余政. 阿布扎比哈里发港集装箱码头二期项目自动化堆场布置[J]. 水运工程, 2019(5): 98-101.
- [5] 付鹏成, 宋海涛, 李强, 等. 自动化集装箱码头堆场策略[J]. 水运工程, 2016(10): 23-26, 45.
- [6] 王施恩, 何继红, 林浩, 等. 自动化集装箱码头堆场布置新模式[J]. 水运工程, 2019(9): 23-26, 45.
- [7] ZHANG X Y, GAO H B, GUO M, et al. A study on key technologies of unmanned driving[J]. CAAI transactions on intelligence technology, 2016(3): 4-13.

(本文编辑 郭雪珍)