

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.013

船行波扰动下平陆运河岸坡侵蚀特性模型试验研究

梁 越^{1,2},左江瑞¹,许 彬^{1,2},韩林峰^{1,2},潘 剑³,YAR Mohsin¹

(1. 重庆交通大学河海学院,重庆 400074; 2. 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;
3. 广西平陆运河建设有限公司,广西 南宁 530000)

摘要: 为了研究平陆运河船舶航行产生的船行波对岸坡侵蚀特性的影响,设计了大型室内水槽模型试验系统,试验分析了网状柔性护岸、方形透水混凝土护岸、六边形透水混凝土护岸、砾石护岸及无护岸结构 5 种工况下岸坡的表面波压变化及水力侵蚀特征。结果表明:岸坡表面波压时程变化具有周期性,无护岸结构岸坡负向波压最大;砾石护岸因结构不规则性表现出优越的消能性能,高水位与高船速条件下出现次波峰效应;岸坡表面波压分布在静水位以下附近向两侧迅速衰减,船速对波压及波高影响显著高于水位变化;岸坡表面侵蚀分析显示,无护岸结构岸坡表面主要表现为岸坡裂缝、土体倒塌和坡面淘刷 3 种侵蚀形态,除砾石护岸外其余护岸结构均有细颗粒析出现象;内部土压与表面波压表现出一致的动力响应特性,综合生态效益与侵蚀控制效果,砾石护岸方案最优。

关键词: 船行波;运河岸坡;护岸结构;表面波压;侵蚀特性;平陆运河

中图分类号: TV131.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)05-0107-09

Experimental study on erosion characteristics model of the Pinglu Canal bank slope under ship-generated wave disturbance

LIANG Yue^{1,2}, ZUO Jiangrui¹, XU Bin^{1,2}, HAN Linfeng^{1,2}, PAN Jian³, YAR Mohsin¹

(1. College of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

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

3. Guangxi Pinglu Canal Construction Co., Ltd., Nanning 530000, China)

Abstract: To investigate the impact of ship-generated waves on the erosion characteristics of the bank slope along the Pinglu Canal, a large-scale laboratory flume model testing system was designed to analyze the surface wave pressure variations and hydraulic erosion characteristics of the bank slope under five different conditions: mesh flexible revetment, square permeable concrete revetment, hexagonal permeable concrete revetment, gravel revetment, and unprotected slope. The results show that the temporal variation of the surface wave pressure on the bank slope is periodic, with the unprotected slope exhibiting the maximum negative wave pressure. The gravel revetment, due to its structural irregularity, demonstrates superior energy dissipation performance. Moreover, under high water levels and high ship speeds, a secondary wave peak effect occurs. The surface wave pressure distribution on the bank slope rapidly attenuates on both sides near the static water level. The ship speed has a significantly greater effect on wave pressure and wave height compared to water level changes. Analysis of surface erosion on the bank slope reveals that the unprotected slope mainly experiences three types of erosion forms, namely slope cracking, soil collapse, and slope scouring. Except for the gravel revetment, all other revetments show fine particle precipitation. The internal soil pressure and surface wave pressure exhibit consistent dynamic response characteristics. Based on the overall ecological benefits and erosion control effects, the gravel revetment is the optimal solution.

Key words: ship-generated wave; canal bank slope; revetment structure; surface wave pressure; erosion characteristic; the Pinglu Canal

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52379097);广西科技计划项目(桂科 AA23062023);重庆市研究生联合培养基地建设项目(JDLHPYJD2021004);重庆市教委科学技术研究计划项目(KJQN202300744);国家重点研发计划项目(2023YFB2604703)

作者简介: 梁越(1985—),男,教授,博士,主要从事水利工程灾害形成机理及防治研究。E-mail:liangyue2560@163.com

通信作者: 左江瑞(2000—),男,硕士研究生,主要从事水利工程灾害形成机理及防治研究。E-mail:z2531554018@163.com

引用本文: 梁越,左江瑞,许彬,等. 船行波扰动下平陆运河岸坡侵蚀特性模型试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(5): 107-115.

LIANG Yue,ZUO Jiangrui,XU Bin,et al. Experimental study on erosion characteristics model of the Pinglu Canal bank slope under ship-generated wave disturbance[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2025,53(5):107-115.

平陆运河是我国继京杭大运河之后 1 400 多年来第一条全新建设的国家级运河工程,是融入“一带一路”倡议、西部陆海新通道、交通强国以及新时代西部大开发等国家重大战略部署的关键性基础设施项目。由于人工开挖的运河属于限制性航道,其过水断面相对较小,导致在该航道上运行的船舶与水相互作用产生的船行波具有波高较大、流速较急等特点^[1-2],从而对岸坡产生显著的冲刷作用。随着经济的快速发展,水运需求日益增长,船舶正朝着大型化和高速化方向发展^[3],由此产生的船行波对岸坡的侵蚀效应显著增强^[4-5]。因此,为了保障平陆运河岸坡的长期稳定性,深入研究船行波对岸坡的侵蚀机制具有重要意义。

船行波与岸坡之间的相互作用是一个复杂且能量传递剧烈的过程,其波浪爬升与回落会对岸坡稳定性产生显著影响,相关学者通过水槽模型试验对该影响进行了研究。黄海龙等^[6]在波浪水槽中利用不规则造波机进行了模型试验,得出不同波要素条件下的船行波在多种护岸结构类型上爬升高度的经验公式。Huang 等^[7]结合量纲分析和粒子群优化算法,提出一种用于预测限制性航道中船舶产生最大波高的计算公式。李佳皓等^[8-9]通过植物护岸试验,得到了植物分布密度与消减船行波爬高与回落的经验公式。王力等^[10]结合造波装备与数值模拟软件,开展了波浪对碎石土岸坡侵蚀的水槽试验,分析了不同坡度和碎石含量条件下岸坡的侵蚀特征。在岸坡结构形式方面,除斜坡式岸坡外,也有学者对直立式岸壁进行了研究,例如,何超勇等^[11]在镇江段对船行波进行了现场观测,并通过物理模型试验对两种货船船行波在直立式岸壁附近产生的最大波高进行了对比分析。近年来,随着计算机技术和数值模拟软件的发展,国内外学者主要通过数值模拟结合理论分析、现场观测与物理模型试验等方法开展船行波对岸坡侵蚀的研究,并验证其结果的可靠性^[12-13]。针对浅水航道中船舶迎面对航时产生的波浪耦合效应, Kim 等^[14]利用计算流体力学(CFD)方法,分析了浅水航道中船舶运动与岸坡之间的相互作用,揭示了船舶运动与波浪高度变化的动态特征,及其对岸坡和防护结构的影响。在探究船行波单因素及多种因素对内河航道岸坡影响方面,程曦^[15]利用 ABAQUS 软件,进行了稳定渗流、降雨和船行波三者共同作用对内河航道岸坡稳定性影响的数值研究。Huang 等^[16]则采用计算流体力学与离散元耦合方法,模拟船舶产生的波浪与受限水道岸坡上护坡块石之间的相互作用,并分析了不同船速与吃水深度对护坡稳定性的影响。

现有研究中模型试验所采用的波浪多由造波设备生成,具有可控性强、规则性高、波形一致等优点,属于理论上的标准波。而实际船行波具有随机性、复杂性、波高与波长随船速和船型变化等特征,造波设备无法模拟船行波的 V 形波系、波浪的能量分布以及船尾产生的回流效应等复杂现象。此外,现有研究多集中于无护岸或硬质护岸条件下的岸坡冲刷问题,缺乏对柔性护岸及其他透水性护岸结构在船行波作用下的响应分析;且多基于波浪爬升与回落值的变化来验证不同船行波波态对岸坡的作用,较少关注船行波作为外力作用于护岸结构表面及其内部所引发的侵蚀特性。

基于此,本文聚焦于平陆运河大型船舶航行过程中产生的船行波扰动对岸坡侵蚀特性的影响,设计并构建了一套完整的大型室内水槽模型试验系统,以模拟不同航行速度与水深条件下船行波对网状柔性护岸、方形透水混凝土护岸、正六边形透水混凝土护岸、砾石护岸及无护岸 5 种岸坡结构波压时程变化、波压分布特征及岸坡表面与内部侵蚀特性的影响。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验模型岸坡设计为无护岸结构和有护岸结构两种,护岸结构为网状柔性护岸、方形透水混凝土护岸、正六边形透水混凝土护岸和砾石护岸,护岸结构材料参数见表 1。岸坡采用强风化泥质粉砂岩夹泥岩进行填筑,粉、细砂(中砂)粒径为 0.005~0.25 mm,模型密度为 2.08 g/cm³,模型堆筑用量共计 21 m³、50 232 kg(其中砂与粉土、水的质量比为 2.22:4.44:1)。待岸坡堆积完成后,采样测得其渗透系数为 1.59×10⁻⁵ m/s。其余非试验数据采集段采用木条骨架支撑,表面放置 5 mm 厚的 PVC 塑料板隔水。

表 1 护岸结构材料参数

Table 1 Parameters of revetment materials

类型	厚度/mm	尺寸/mm	材料
砾石护岸		40~50(粒径)	鹅卵石
方形透水混凝土护岸	15	250×250(长×宽)	C25 混凝土
正六边形透水混凝土护岸	15	250(边长)	C25 混凝土
网状柔性护岸	15	1 600×1 000(长×宽)	网状柔性

1.2 试验模型

航道模型尺寸为 20 m×6.62 m(长×宽),护岸段长 5 m,5 种岸坡各占试验段 1 m,岸坡坡比为 1 : 1.6。结合运河通航条件,试验船舶采用牵引式模型船,选取 5 000 t 级货船模型,尺寸为 3.23 m×0.53 m×0.22 m(长×宽×吃水,原型尺寸为 97 m×15.8 m×6.5 m)。根据试验设计方案,在室内场地进行试验场的砌筑,主要包括挡墙、PVC 板铺设、试验岸坡砌筑以及护岸结构的安置等工作。试验模型建造过程如图 1 所示。

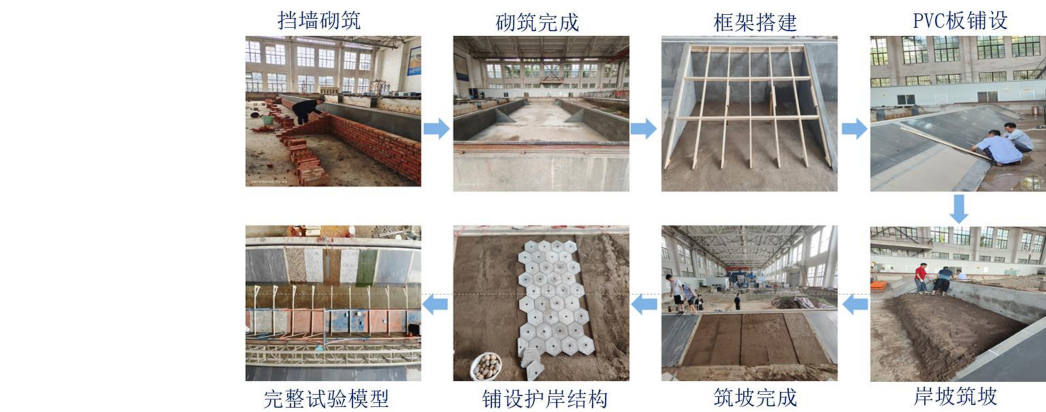


图 1 试验模型建造过程
Fig. 1 Construction process of test model

1.3 试验系统

a. 牵引设备。为了模拟船舶在运河内的航行过程,在水槽顶部沿航道方向布置了 1 条长度为 20 m 的测桥。测桥底部设有速度可控的牵引系统,用于牵引船舶航行。牵引系统可通过步进电机控制船舶速度。同时在测桥一侧悬挂波高仪,用于采集对应试验岸坡的波高情况,在测桥上布设近景摄影测量装置以监测岸坡变形特征。模型平面布置如图 2 所示。

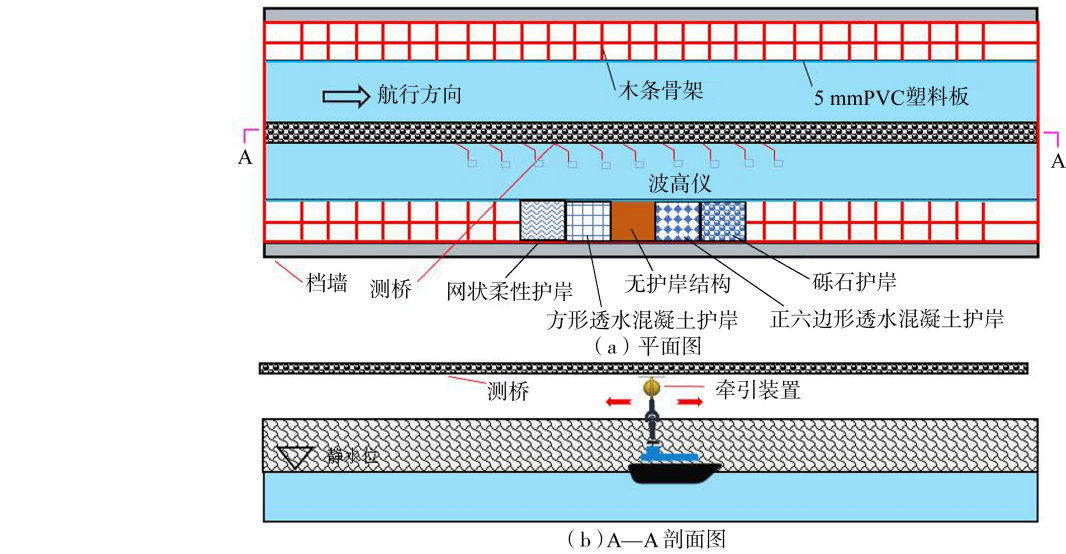


图 2 模型平面及剖面
Fig. 2 Plan and section view of model

b. 监测设备。在护岸段岸坡表面、内部以及航道内布设了各类监测传感器,其中水压传感器布设在岸坡表面,土压传感器布设在岸坡内部。监测传感器采用以下设备:①TZT3826H 动静态信号测试分析系统(V2018)-控制分析仪;②BWK-S 水压传感器,直径为 15.8 mm,分辨率 0.01 kPa,误差小于 0.3FS(full scale, 满量程);③土压传感器,直径 16 mm,误差小于等于 0.5FS。传感器动态响应频率均为 1 kHz,即 1 s 采集 1 000 次数据,因此能准确采集到受船行波影响下数据的变化过程。

无护岸段岸坡布置 4 个土压传感器,布置在垂直于岸坡方向,以测量土体受到的法向力;在岸坡表面布置 6 个水压传感器,用于测量岸坡表面的波压。有护岸段岸坡布置 2 个土压传感器,水压传感器在护岸结构

表面布置1个且随静水位移动。无护岸结构和有护岸结构岸坡土压传感器在同一高度上采用相同的编号,各传感器位置布置如图3所示。按照试验方案修筑后得到试验系统示意图如图4所示。

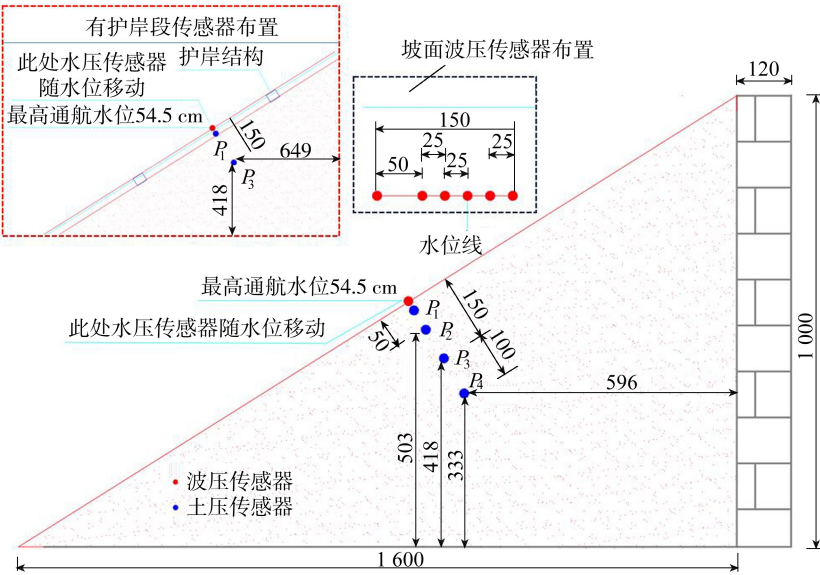


图3 岸坡传感器布置(单位:mm)

Fig. 3 Sensor layout on bank slope (unit: mm)

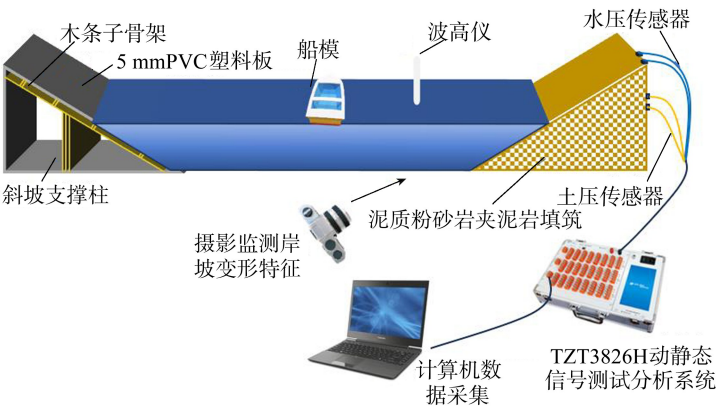


图4 试验系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of testing system

1.4 试验工况

根据船行波波态的影响因素,在试验护岸段设置不同的航行速度和水深,牵引模型船的电机频率依次从 10 Hz 加到 30 Hz,对应的航行速度范围为 0.57~0.88 m/s;水深设置 2 组工况,分别为 46.5、54.5 cm,均在船舶满载、单侧通航下进行观察试验。试验工况如表 2 所示。

1.5 试验流程

通过牵引系统控制船舶在航道中的行驶状态,船舶运动过程中通过布设的各类传感器及摄影设备监测航道水面波浪高度、岸坡表面冲刷形态、岸坡表面以及内部的动力响应。进一步对数据进行处理与分析,得到船行波传播特性及船行波作用下岸坡动力响应与变形特征。

具体操作流程如下:①按照试验布置填筑岸坡及安置传感器;②试验槽蓄水,按照试验工况从最高水位依次往下递减;③启动模型,牵引模型船的电机频率依次从 10 Hz 加至 30 Hz,在每次开始之前都需将对应频率下的船速进行标定核准,在此基础上开展正式试验;④试验开始,1 人控制电机,1 人负责数据采集,1 人负责观察船舶的运动状况;⑤每个工况重复试验 2 次或 3 次,待试验数据有效且合理时方可变动工况条件,继续下组试验。

表 2 试验工况

Table 2 Test conditions

工况	水深/cm	电机频率/Hz	航行速度/(m/s)
1	46.5	10	0.57
2	46.5	30	0.88
3	54.5	10	0.57
4	54.5	30	0.88

2 试验结果与分析

2.1 岸坡表面波压变化规律

2.1.1 岸坡表面波压时程变化

船行波是不同波长波浪组合而成的水面波^[17],故将船行波对岸坡的侵蚀作为波浪力对岸坡的影响。波浪对岸坡的作用分为破碎、冲击、上爬及回落 4 个阶段^[18]。

在不同水位和航速工况下,观察分析 5 种结构土质岸坡表面采集到的波压变化。对采集到的波压数据进行降噪平滑处理后得到不同工况下岸坡静水位以及与岸坡接触处波压随时间变化图(图 5)。坝体在受到船行波冲刷时,坝坡表面会受到负向波压,这是由于船行波回落阶段在岸坡坡面产生浮托力^[19]的结果。

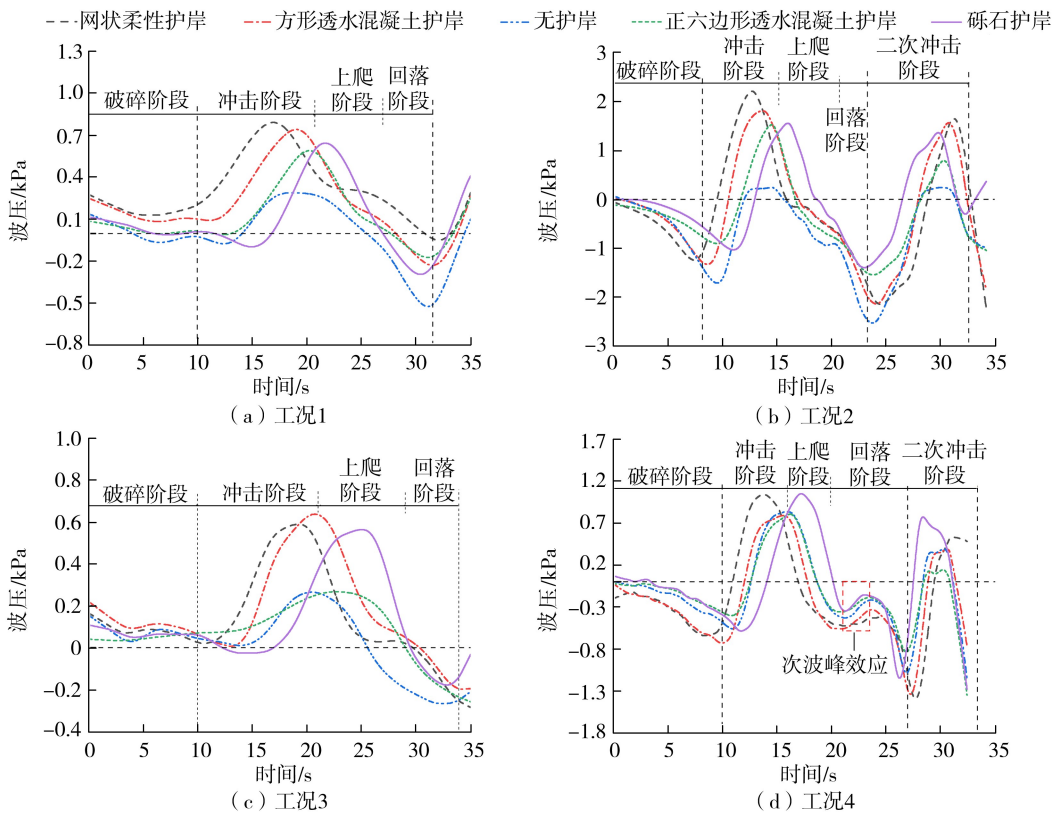


图 5 岸坡静水位处波压时程变化

Fig. 5 Temporal variation of wave pressure at static water level of bank slope

因船模起点至护岸段存在一定距离,且计时自船模起点开始,由图 5 可知,电机频率为 10 Hz 和 30 Hz 时,船行波开始作用于第一块护岸结构(网状柔性护岸)的时间分别约为 5 s 和 10 s。冲击前阶段波压数值不为 0,可能是传感器受周边环境影 响,致使水面不是绝对静止所致;初始阶段波压均向负向变化,是由于护岸结构透水性使坡面内外存在水位差,进而产生浮托力的结果。不同护岸结构的波压响应次序与船速方向上的护岸结构布置形式一致,其中网状柔性护岸波压响应最早,砾石护岸最晚。

结合船行波对岸坡的冲刷过程分析波压变化趋势。波压开始变化对应破碎阶段,此时船行波在岸坡发生破碎,波峰向岸坡翻滚;冲击阶段,破碎水体在岸坡跌落并撞击水面,产生最大正向波压;上爬阶段,船行波沿岸坡上爬,能量逐渐衰减,波压也随之减小;在动水压力作用下,部分水体渗透至岸坡内部,船行波爬至最高处后开始回落,因水体在岸坡表面的回落速度大于岸坡内部回流速度,岸坡受到浮托力,故负向波压对应回落阶段。

整体而言,有护岸结构岸坡的波压显著大于无护岸结构,这应是船行波在护岸结构上发生反射叠加,使岸坡受到多方位波压冲击所致。同时,无护岸结构岸坡承受的正向波压全阶段小于其负向波压,这可能导致岸坡内部土壤颗粒在浮托力的作用下发生移动。由图 5 分析可知,随着电机频率的升高,船行波的波动效果及波压变化更为显著;高水位(54.4 cm)工况下,船速提升时的最高正向波压小于低水位(46.5 cm)工况;

相较于低水位、高船速,高水位、低船速时岸坡表面波压周期更长。全过程中,砾石护岸的波压周期最小,且峰值波压与浮托力均较低,这可能是砾石护岸结构具有不规则性,船行波冲击砾石时部分压力被抵消所致。由图 5 (d)可知,高水位、高船速工况下,岸坡表面波压出现了次波峰效应,推测可能是高能量条件下,波浪在岸坡表面发生局部干涉,且波峰与波谷叠加使波态振幅增大所致。护岸结构铺设于岸坡表面,直接承受波浪力,因此护岸结构设计直接关系岸坡的稳定性

2.1.2 岸坡表面波压分布特征

2.1.2.1 波高采集及相对有效波压计算

船舶行进过程中引发水面波浪变化,通过悬挂波高仪采集试验船行波近岸坡的波高变化,并记录不同工况下各护岸结构的最大波高,结果如表 3 所示。由表 3 可知,船行波波高随着船速增加呈明显上升趋势,且水位升高对波高的影响在低船速工况下相对更明显。船行波波高主要由船速决定,这与文献[20]中船行波波高观测试验结果一致。

表 3 不同水位下邻近岸坡的最大波高情况

Table 3 Maximum wave heights of neighboring bank slopes at different water levels

水位/cm	船速/(m/s)	最大波高/m				
		网状柔性护岸	方形透水混凝土护岸	无护岸结构	正六边形透水混凝土护岸	砾石护岸
46.5	0.57	0.011	0.010	0.012	0.015	0.011
	0.88	0.033	0.029	0.027	0.035	0.031
54.5	0.57	0.022	0.018	0.021	0.019	0.021
	0.88	0.032	0.030	0.032	0.028	0.032

船只航行时与水体相互作用产生船行波,其中 Kelvin 波^[21]为船尾产生的横波以及船首产生的扩散波,二者叠加形成的不规则波。在研究不规则波对岸坡的作用时,需要对采集的波高变化数据进行统计,得到有效波高 H_s ;同时统计各水压传感器位置处的有效波压 P_s (有效值数据更具代表性)。引入相对有效波压 $P_s/\gamma H_s$ ^[22](γ 为水的容重)以分析波压沿岸坡变化。

2.1.2.2 无护岸结构岸坡表面波压分布

分析无护岸结构岸坡波压沿斜坡的分布情况,船行波冲击压力作用下,其相对有效波压沿岸坡分布如图 6 所示。根据无护岸结构岸坡上水压传感器的布置位置,图 6 岸坡位置以负值表示水面以下,正值表示水面上。水面以下一定距离的冲击点处出现最大相对有效波压,与冲击阶段岸坡表面出现的最大正向波压相对应。两侧相对有效波压迅速降低,冲击点以上衰减速率更快,以下衰减速率相对较慢,这是由于波浪破碎打击主要集中在静水位以下邻近区域所致。整体波压分布规律与以往室内试验成果一致。

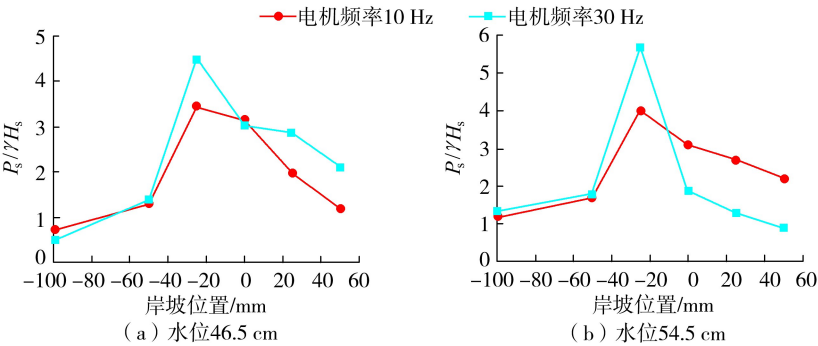


图 6 船行波冲击压力下相对有效波压沿岸坡分布

Fig. 6 Distribution of wave pressure along bank slope under impact pressure of ship-generated wave

同一水位条件下,高船速对应的最大相对有效波压显著高于低船速,原因是高船速产生的波浪能量大,破碎时对岸坡的冲击作用也更大。对比图 6(a)(b)可见,水位升高对相对有效波压的提升作用有限,而船速对相对有效波压的影响更为显著,该现象可能是因水位增加幅度不及船速变化明显所致。

30 Hz 频率下,冲击点以上区域高水位相对有效波压比低水位下降更迅速,分析认为可能是受水位和船速及试验环境共同作用的结果。高能量条件下,船行波在岸坡表面发生局部干涉与叠加,进而增大了岸坡前波浪的振幅;因此冲击点以上区域水面处相对有效波压会因波浪形态急剧变化而快速下降。

2.2 船行波扰动下岸坡侵蚀特性

2.2.1 船行波对护岸结构表面侵蚀特性

试验完成后拍摄岸坡侵蚀情况(图 7),可以看出,无论有无护岸结构,岸坡表面均出现泥沙启动与表面侵蚀现象;相比之下,带护岸结构岸坡表面泥沙运动相对较弱,无护岸结构岸坡表面侵蚀则较为明显。其中砾石护岸下的泥沙运动最不明显,而方形透水混凝土护岸、正六边形透水混凝土护岸、网状柔性护岸表面均出现了泥沙析出。可见,护岸结构可显著减少波浪对岸坡表面的直接冲击与颗粒移动。

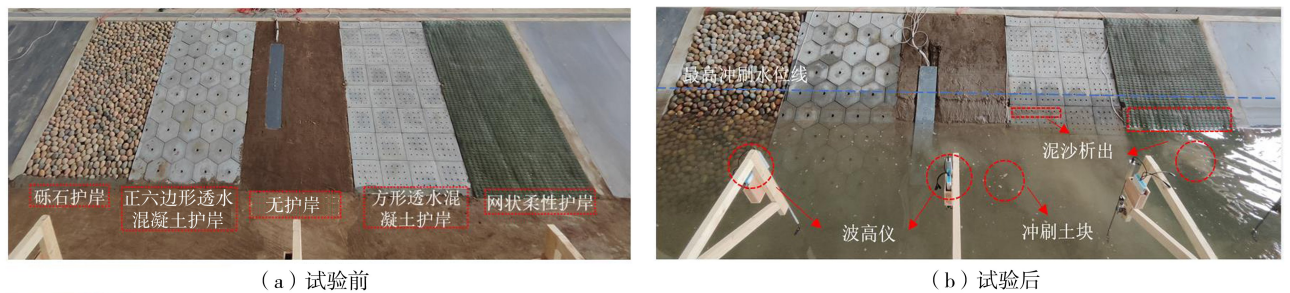


图 7 试验完成前后岸坡侵蚀对比

Fig.7 Comparison of bank slope erosion before and after test

通过测桥上的近景拍摄装置监测无护岸结构岸坡侵蚀变形特征(图 8),总体而言,随着试验的推进,两种水位工况下岸坡与水位线齐平区域均出现了明显的侵蚀,且随着时间的推移,侵蚀程度进一步加剧。整个岸坡主要呈现岸坡裂缝、土体倒塌、坡面淘刷 3 种坡面侵蚀形态,与已有研究中关于波浪作用下粉砂质岸坡的侵蚀形态变化描述一致。由于试验未拍摄放水后的坡面,因此未对水面以下岸坡侵蚀情况展开分析。边坡失稳的主要原因是岸坡土体在波浪冲刷作用下发生淘刷,进而导致边坡塌陷;因此,岸坡护岸结构可有效抵御波浪对岸坡的冲刷,提高岸坡的稳定性。

2.2.2 船行波对岸坡内部侵蚀特性

选取工况 4 无护岸结构岸坡开展内部土压分析,土压随时间变化情况如图 9 所示。船行波作用下岸坡土压变化的本质是水质点对坡面块体的作用力变化^[23],因此需要结合船行波对岸坡的冲刷过程分析其受力情况。岸坡承受的波浪力可分为垂直于坡面的法向力与平行于坡面的切向力,其内部法向各点的土压响应主要受波浪破碎时的法向压力、水流回落时的浮托力及孔隙水压力共同作用。由图 9 分析可知,土压随时间的响应趋势与波压基本一致。土压时程变化曲线中的小峰值反映了岸坡内部复杂的波动模式,这是波浪作用于岸坡时,其表面与内部产生的反射波相互作用所致,因此小峰值可能是这些反射波在岸坡内部形成的次要应力峰值。各位置土压在船行波作用下整体变化趋势一致,且响应幅值相对较小,最大值为 512 Pa。由图 9 可知,岸坡表层土压响应最为显著,这是因为波浪作用于岸坡时,表层土体首先承受直接冲击,故表层土压变化明显;同时,表层在浮托力作用下承受的负向力最大,与表面负向波压相对应。深部土体受波浪作用相对较弱,且随着法向深度增加,波浪能量衰减,土压响应也随之减小。

由土压响应的深度变化规律可知,岸坡表面及近表层土体首先承受波浪冲击,动力响应最为显著。为了分析不同岸坡形式内部孔隙水压力响应,选取每种岸坡形式下表面测点 P_1 及与表面有一定距离的测点 P_3 ,对比二者土压,取土压随时间变化

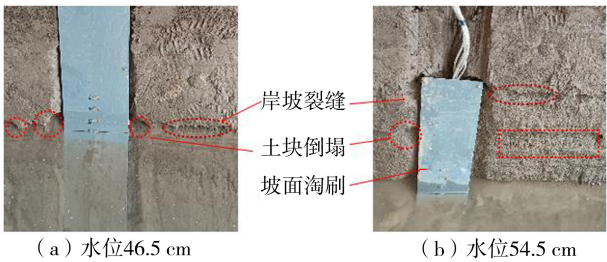


图 8 两种水位工况无护岸结构岸坡冲刷形态

Fig.8 Scour patterns of unprotected slopes at two water levels

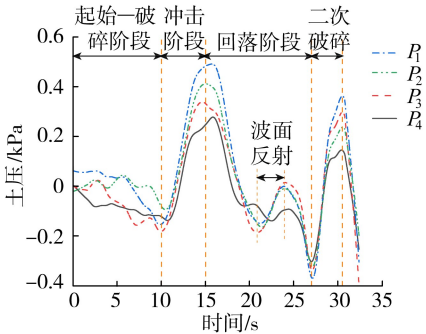


图 9 工况 4 下土压时程变化

Fig.9 Temporal variation of soil pressure at Condition 4

历程中 3 个峰值的平均值作为该测点土压值。由表 4 分析可得,4 种护岸结构对船行波的抵御效果差异较小;无护岸结构岸坡的表层及内部土压最大,方形透水混凝土护岸测点 P_1 与测点 P_3 土压最小。

内部土体土压受波浪对岸坡表面冲击力的传递以及护岸结构渗水后产生的孔隙水压力共同影响,因此,测点 P_1 与测点 P_3 的土压差值可表征船行波作用下岸坡内部孔隙水压力对该位置土压的作用,差值越小,说明孔隙水压力的影响越显著。由表 4 中的差值可见,无护岸结构岸坡因无挡水结构,水体易渗入内部,孔隙水压力最大;砾石护岸的孔隙水压力影响比其他护岸结构略大,推测是砾石间隙不够致密所致。整体来看,护岸段岸坡内部受孔隙水压力的影响程度差异较小;与无护岸段相比,护岸结构设计可显著降低孔隙水压力对内部土体的影响。

3 结 论

- a. 不同护岸结构表面波压特征基本呈现周期性变化,低水位、高船速条件下,岸坡表面波压周期较短;高水位、高船速条件下,波压出现次波峰效应,且船速提升对岸坡波压响应及船行波波高的影响大于水位变化。无护岸结构岸坡在回流阶段的浮托力大于最大正向波压,导致岸坡表面土壤颗粒在浮托力作用下发生移动;其表面相对有效波压分布于静水位上下两侧,且在静水位以下一定距离处出现最大值。
- b. 从岸坡表面侵蚀特性来看,无护岸结构岸坡侵蚀最为严重,整体呈现岸坡裂缝、土体倒塌、坡面淘刷 3 种侵蚀形态;带护岸结构的岸坡虽然也存在侵蚀,但程度相对较弱。其中,网状柔性护岸、方形透水混凝土护岸、正六边形透水混凝土护岸表面均可见明显细颗粒析出,砾石护岸虽也有细颗粒析出,但现象不明显。
- c. 波压与土压呈现一致的动力响应模式,且护岸结构表面的压力响应最为显著。岸坡内部法向各点的土压响应主要受波浪破碎时的法向波压与水流回落时的浮托力共同影响,随着深度的增加,内部土压响应逐渐减弱。各护岸结构岸坡受孔隙水压力的影响差异较小。结合生态效应与岸坡侵蚀特征,砾石护岸方案最为适宜。

参考文献:

[1] 毛礼磊. 船行波对运河断面演变影响研究[D]. 南京:东南大学,2020.

[2] JI Shengcheng,OUAHSINE A,SMAOUI H,et al. 3-D numerical simulation of convoy-generated waves in a restricted waterway[J]. Journal of Hydrodynamics,2012,24(3):420-429.

[3] 王孟飞,邓斌,蒋昌波,等. 限制性航道中船行波传播特性的数值研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(5):157-163. (WANG Mengfei,DENG Bin,JIANG Changbo,et al. Numerical study on propagation characteristics of ship waves in a restricted channel[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2020,31(5):157-163. (in Chinese))

[4] 李志松,吴卫,陈虹,等. 内河航道中船行波在岸坡爬高的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2016,31(5):556-566. (LI Zhisong,WU Wei,CHEN Hong,et al. Numerical simulation of run-up of ship waves on slope bank in channel[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2016,31(5):556-566. (in Chinese))

[5] DEROO S,TROCH P. Evaluation of the effectiveness of a living shoreline in a confined, non-tidal waterway subject to heavy shipping traffic[J]. River Research and Applications,2015,31(8):1028-1039.

[6] 黄海龙,陈秀瑛,陈国平. 珠江三角洲快速客船船行波模拟及其爬高研究[J]. 海洋工程,2010,28(1):58-63. (HUANG Hailong,CHEN Xiuying,CHEN Guoping. A study on the simulation and run-up of ship waves of express liners in Zhujiang Delta [J]. The Ocean Engineering,2010,28(1):58-63. (in Chinese))

[7] HUANG Wei,LI Shuoqian,LU Yongjun,et al. A new method for predicting the maximum wave height of ship-generated onshore slopes in restricted channel[J]. Frontiers in Marine Science,2023,10:1220975

[8] 李佳皓,拾兵,郭云辉. 植物护岸对船行波消减效能的试验研究[J]. 海洋湖沼通报(中英文),2020(1):50-55. (LI Jiahao,SHI Bing,GUO Yunhui. An experimental study on effect of vegetations revetment on ship wave reduction[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,2020(1):50-55. (in Chinese))

[9] 张娜,张金凤,张庆河,等. 规则波作用下柔性植物蜂巢护岸水动力特性试验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2021,54(5):441-449. (ZHANG Na,ZHANG Jinfeng,ZHANG Qinghe,et al. Experimental study of the hydrodynamics of revetment protection using honeycomb-type flexible plants under the action of regular waves[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology),2021,54(5):441-449. (in Chinese))

[10] 王力,张晨宇,王世梅,等. 波浪侵蚀诱发碎石土岸坡变形的模拟试验研究[J]. 泥沙研究,2023,48(4):45-52. (WANG Li,ZHANG Chenyu,WANG Shimei,et al. Simulation and test study on wave-induced erosion and deformation of gravelly soil bank slope[J]. Journal of Sediment Research,2023,48(4):45-52. (in Chinese))

[11] 何超勇,嵇烈红,冯卫兵. 苏南运河船行波现场观测及物理模型试验研究[J]. 水运工程,2012(8):130-135. (HE Chaoyong,JU Liehong,FENG Weibing. Field observation and model test on ship waves of Sunan Canal[J]. Port & Waterway Engineering,2012(8):130-135. (in Chinese))

[12] 曾诚,尹雨然,周婕,等. 基于二阶规则波模拟的数值波浪水槽优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):33-40. (ZENG Cheng,YIN Yuran,ZHOU Jie,et al. Optimization of a numerical wave tank based on simulations of 2nd order regular waves[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(4):33-40. (in Chinese))

[13] 毛鸿飞,韩龙,赫岩莉,等. 潜堤坡度对波浪传播变形的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):76-84. (MAO Hongfei,HAN Long,HE Yanli,et al. Influence of slope of submerged breakwater on wave propagation and deformation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(5):76-84. (in Chinese))

[14] KIM Y K,NG E Y K. CFD study of ship-to-bank interaction[J]. Interenational Journal of Maritime Engineering,2017,159:281-290.

[15] 程曦. 基于 ABAQUS 的内河航道岸坡稳定性数值模拟研究[D]. 天津:天津大学,2012.

[16] HUANG Zhaoyuan, OUAHSINE A, FARAH E, et al. Coupled computational fluid dynamics-discrete element method for simulating the interactions between ship-induced waves and riprap on restricted waterway banks[J]. Physics of Fluids,2024,36(10):107140

[17] 陈立家,何思航,许毅,等. 一种基于流体边界耦合的船行波模拟方法[J]. 船舶工程,2023,45(12):51-58. (CHEN Lijia,HE Sihang,XU Yi,et al. A simulated method of ship traveling wave coupled with MLS-MPM and water packet[J]. Ship Engineering,2023,45(12):51-58. (in Chinese))

[18] 潘军宁,王登婷,吴美安,等. 波浪作用下混凝土砌块护坡稳定性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(4):476-481. (PAN Junning,WANG Dengting,WU Mei'an,et al. Experimental study on stability of concrete block revetment under wave action[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2005,33(4):476-481. (in Chinese))

[19] 段明印. 平原水库边坡波浪力试验及数值模拟研究[D]. 济南:山东大学,2018.

[20] SORENSEN R M. Investigation of ship-generated waves[J]. Journal of the Waterways and Harbors Division,1967,93(1):85-10.

[21] BERTRAM V. Practical ship hydrodynamics[M]. Amsterdam:Elsevier,2011.

[22] 曹婷,王平义,何鹏超,等. 滑坡涌浪下斜坡波压力经验估算方法的对比[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(1):157-163. (CAO Ting,WANG Pingyi,HE Pengchao,et al. Comparison and analysis of empirical estimation methods for slope wave pressure under landslide-generated impulse wave[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(1):157-163. (in Chinese))

[23] 李治朋,李一良,张宇亭. 波浪荷载作用下防波堤地基土动强度试验研究[J]. 岩土工程学报,2024,46(增刊 1):186-190. (LI Zhipeng,LI Yiliang,ZHANG Yuting. Experimental study on dynamic strength of breakwater foundation under wave loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(Sup1):186-190. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 11 - 19 编辑:胡新宇)