



船行波作用下运河堤护面块体稳定性分析*

程远明¹, 李庆², 林振良², 刘世通²

(1. 中交天航南方交通建设有限公司, 广东深圳 518010;

2. 北部湾大学建筑工程学院, 广西钦州 535011)

摘要: 平陆运河城区段下游部分河道保留的河堤, 具有断面小、护面块体质量轻等特点, 运河通航后, 在船行波频繁作用下, 可能对坡面稳定性产生一定的影响。为分析船行波作用下现有护面块体的安全稳定性, 利用三维图形软件构建典型河道和船体模型, 通过数值模拟计算出不同船速条件下船行波产生的坡脚浪高值, 确定其对应的块体稳定质量。结果表明: 在设计高水位条件下, 5 000 DWT 散货船的船速为 3 m/s 时, 产生的船行波能使嵌固性较差的护面块体产生失稳脱落的现象, 建议该河段通航船速不宜大于 4 m/s。

关键词: 平陆运河; 数值模拟; 护面块体; 船行波; 稳定性

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0193-04

Stability of canal embankment protection blocks under ship wave action

CHENG Yuanming¹, LI Qing², LIN Zhengliang², LIU Shitong²

(1. CCCC TDC Southern Communication Co., Ltd., Shenzhen 518010, China;

2. College of Engineering and Architecture, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China)

Abstract: The river embankments preserved in the lower reaches of the urban section of the Pinglu Canal have the characteristics of small cross-section and light mass of protection blocks. After the canal is navigable, under the frequent action of ship waves, it may have a certain impact on slope stability. To analyze the safety and stability of existing protection blocks under the action of ship waves, we build a typical river channel and ship model using 3D graphics software, calculate the slope toe wave height values generated by ship waves under different ship speed conditions through numerical simulation, and determine the corresponding stable mass of blocks. The results show that under the design high water level conditions, when the speed of the 5 000 DWT bulk cargo ship is 3 m/s, the generated ship waves can cause instability and detachment of the poorly embedded armor blocks. It is recommended that the navigable ship speed in this section should not exceed 4m/s.

Keywords: Pinglu Canal; numerical simulation; protection block; ship wave ; stability

船行波是指船舶在航行过程中, 船体对水的作用而引起的波浪。已有许多关于船行波的研究, 如何超勇等^[1]以苏南运河镇江段为对象, 采用现场观测和物理模型试验的方法, 分析直立岸壁附近船行波最大波高与船舶航速之间的关系; 陈

虹等^[2]通过现场观测、数值模拟和统计分析的方法, 提出对岸坡具有现实意义的船行波要素计算公式; 李志松等^[3]基于雷诺时均(RANS)方程、重整化群(RNG)湍流模型建立数值波浪水池, 模拟船行波的形成及船舶过程, 采用现场实测数据,

收稿日期: 2023-12-05

*基金项目: 广西教育厅高校科研项目(2022KY0414); 北部湾大学高层次人才科研启动项目(2019KYQD43)

作者简介: 程远明(1993—), 男, 工程师, 从事疏浚工程施工工艺研究。

验证了数值模型的有效性。在水流、波浪作用下，护面块体主要依靠质量保持自身的稳定，也有一些关于护面块体稳定质量的研究，如潘宝雄^[4]对护面块体稳定质量进行探究，提出以密度、坡高、边坡、失稳率、坡坦及相对水深为主要考虑因素的块体稳定质量的计算公式；李贺青等^[5]提出护面块体安全度这一概念，通过理论分析导出其数值，采用物理模型验证了数值的合理性。限制性内河航道中，在波高较大、频率较高的船行波作用下，岸堤坡脚容易被淘刷、坡面块体容易出现失稳脱落，影响河道的断面形状，危及岸堤结构的安全。平陆运河城区段下游河道河堤始建于20世纪90年代，安全级别较低，结构断面小、坡度陡，分析不同航速条件下产生的船行波对护面块体稳定的影响，对保障护面结构的安全十分必要。研究成果可为后期运河运营维护提供参考依据。

1 工程概况

平陆运河航道技术等级为I级，城区段下游航道底宽105 m，水深为4.9 m(航道设计底高程-6.9 m)，最小弯曲半径为360 m，计划施工工期31个月^[6]。除河道拓宽及满足弯道冲刷防护要求需要拆旧建新外，其余区域均保留原有河堤。以石江墩西侧河道为研究区域，长度为300 m，右岸为新建堤坝，左岸为原有河堤，见图1。河堤顶宽2.5~3.0 m，外侧坡比为1:1，护面为干砌石结构。



图1 研究区域位置

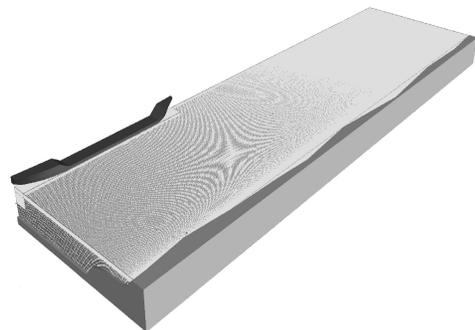
2 船行波数值模拟

船舶在水中航行时，因为速度差的存在，水

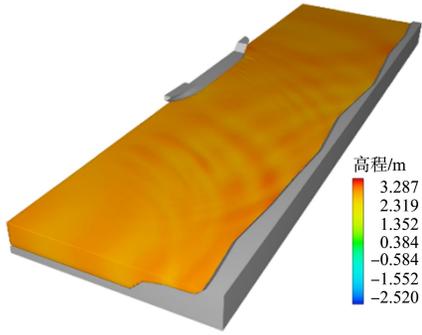
体受到船体的排挤，使得船体周边的水体产生流速及压力的变化而生成船行波。船首形成横波，船侧形成散波，船尾则形成扩张波和漩涡，影响船行波大小的因素十分复杂，主要影响因素是船舶的航速、船型、河道的尺度及水深条件等，在限制性河道内传播时，还受到堤岸反射的影响。工程实际中，一般多以经验公式、船模试验或现场实测进行估算，部分学者也采用数值模拟的方法估算船行波的波要素。

2.1 模型构建

采用三维图形软件，根据设计航道水深数据和主要船型尺度构建航道和船舶模型，基于RANS方程、RNG $k-\epsilon$ (湍动能-湍能耗散率)湍流模型，建立船行波数值模型。模型河道长300 m、宽170 m，航道底宽105 m，底高程-6.9 m。模拟的船舶为远期代表船型5 000 DWT散货船，该船长92 m、宽14 m、吃水5.2 m，取航道中线左侧区域进行研究，见图2。模拟不同航速工况条件下，船行波的生成及传播过程。计算域长度方向300 m，网格边长为0.25 m；宽度方向-83~-79 m为岸坡区域，网格边长为0.05 m，-79~0 m网格边长为0.25 m；深度方向2.0~3.8 m，网格边长为0.1 m，其余区域网格逐渐增大。船舶网格边长为0.01 m，采用嵌套的方法。航道上下游边界为零梯度、垂直边界上的流速为零；岸壁和航道底部为无滑移壁面，垂直壁面方向流速为零；自由表面为等压面；航道内初始水位为设计高水位(2.68 m)。模拟的船舶航速为3~7 m/s，共设定5种工况。



a) 计算域网格划分



b) 岸坡作用下船行波高程

图2 模型及计算区域

2.2 计算结果及分析

2.2.1 Kelvin 角

Kelvin 船行波理论认为船行波的歧线与航线的夹角为 19.47° , 数值模拟计算得到的 Kelvin 角处于 $18.41^\circ \sim 20.45^\circ$, 与理论值基本相等。船速 4 m/s 工况 52 s 时的歧点连线见图 3, 与文献[3]模拟结果类似, 但文献[3]计算结果为 19.1° , 更接近于 19.47° 的理论值, 船尾部分歧线也更为明显。存在差异的主要原因是文献[3]模型设定的岸壁较为平直、水深相等, 其波浪反射更具有规律性, 而本文模拟河段为人工河堤, 岸线较为曲折, 水深从航道边线起至河堤存在突变的现象, 模拟结果与文献[1]的内河船行波实测分布状态更相符。

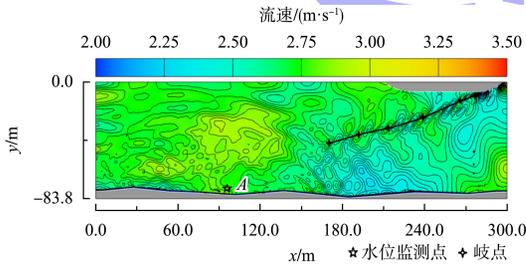


图3 船速 4 m/s 工况歧点连线

2.2.2 坡脚波高

以 1 s 为时间间隔, 记录坡脚附近点 $A (x = 91.75 \text{ m}, y = -73.54 \text{ m})$ 的历时水位值, 见图 4。将相邻波峰和波谷的最大垂直距离定义为船行波高, 可知船行波高随船速的增大而增大。Havelock 根据 Kelvin 理论, 导出的基于开阔水域深水条件下船行波高关系式为^[7]:

$$H_b = \alpha_1 \left(\frac{S}{d} \right)^{-0.33} \left(\frac{v}{\sqrt{gd}} \right)^{\alpha_2} \quad (1)$$

式中: H_b 为船行波高, m ; S 为坡脚到航线的距离, m ; d 为水深, m ; v 为船速, m/s ; α_1 为与船型和吃水有关的系数; α_2 为与航速有关的系数。将航道水深及航速等条件代入 Havelock 公式, 其中 α_1 取 0.42 、 α_2 取 2.67 , 得到各航速条件下坡脚的波高值, 与数值计算值进行比较, 见表 1。以航速为横坐标, 波高值为纵坐标绘图, 得到航速与波高的关系曲线, 见图 5。可以看出, 数值计算结果与 Havelock 公式计算结果的趋势一致, 但前者得到的结果较大, 差异的主要原因是数值计算基于限制性河道现场的实际地形与 Havelock 公式基于开阔水域条件的基本假定不同。

表1 波高值比较

船速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	水深/ m	距航线/ m	H_b/m	
			Havelock 公式结果	数值计算结果
3			0.09	0.36
4			0.19	0.51
5	10.5	73.54	0.34	0.66
6			0.56	0.84
7			0.84	1.01

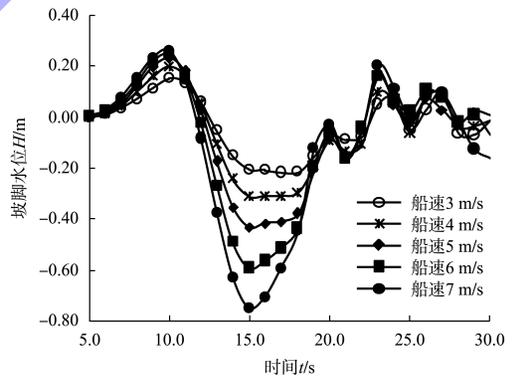


图4 坡脚历时水位

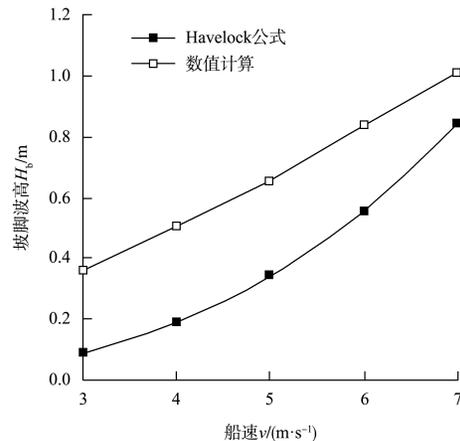


图5 波高比较

3 块体稳定性计算

3.1 稳定质量计算

研究区域河堤护面为干砌结构，护面块体为粉砂岩，坡度较为一致。护面块体稳定质量与波高、流速等水体能量有关外，还与块体的形状、大小以及护面的坡度等有关。本文以船速、船行波为护面块体稳定问题的主要考虑因素。

在波浪力作用下，护面块体失稳主要有3种形态，分别为上脱失稳、滑动失稳和滚动失稳。目前广泛使用的块体计算公式是 Hudson 公式，其假定波浪在斜坡上发生破碎，波浪回落时，堤内水体外流对护面块体产生浮托力，当浮托力过大时，块体失稳脱出。将速度力和惯性力进行合并，当水流浮托力等于水中块体重力时，由上举脱落平衡导出块体重力关系式^[8]：

$$W=0.01 \cdot \frac{\rho_r g H^3}{K_D \left(\frac{\rho_r}{\rho_w} - 1\right)^3 \cot \alpha} \quad (2)$$

式中： W 为单个块体的稳定重力，kN； H 为设计波高，m； ρ_r 为块石密度， t/m^3 ； α 为斜坡与水平面的夹角， $(^\circ)$ ； ρ_w 为水的密度， t/m^3 ； K_D 为块体稳定系数。

现有河堤斜坡角度 α 为 45° ，块石为砂岩，护面结构为安放1层块体，无垫层。砂岩密度取 $2.3 t/m^3$ ，护面块体容许失稳率 n 取 $0\% \sim 1\%$ ， K_D 为5.5，设计高潮位时，按各船速工况条件下产生的最大波高，根据下式计算块体稳定质量：

$$m = \frac{\pi}{6} \rho_r d'^3 = \frac{W}{g} \quad (3)$$

则各工况条件下块体稳定质量 m 、折算粒径 d' 及块体表面积计算结果见表2。可以看出，护面块体稳定质量随船速的增大而增大，增加幅度为 $73.8\% \sim 184.3\%$ ，质量增量呈逐渐递减的趋势。

表2 各工况块体稳定质量、折算粒径值及块体表面积

船速/($m \cdot s^{-1}$)	m/t	d'/m	块体表面积/ m^2
3	0.009	0.187	0.017
4	0.025	0.265	0.049
5	0.055	0.343	0.105
6	0.113	0.436	0.217
7	0.196	0.524	0.377

注：护面块体厚度按0.2 m计算。

3.2 河堤护面稳定性评价

对研究区域内河堤取8个典型堤段各 $1 m^2$ 的护面块石进行测量，结果显示：结构层厚度 $14 \sim 27 cm$ ，基础为人工填筑黏土层，护面结构下无反滤层；护面块体表面积为 $0.009 \sim 0.080 m^2$ ， $0.04 m^2$ 左右的块体数量最多，大约占70%；现场除1处存在2块规格约为 $20 cm \times 15 cm \times 10 cm$ （长 \times 宽 \times 厚）处于半悬臂状态外，其余坡面较为稳定。分析认为，该块石失稳的主要原因是其上方存在1个规格为 $42 cm \times 20 cm \times 14 cm$ 块石，其全部承担自身及来自上部坡面荷载。其下部块石受顺坡方向的荷载变小，嵌固力降低，因而在疏浚施工船舶引起的船行波的作用下发生移位。表面积小于 $0.017 m^2$ 的块体在船行波作用下，仍能保持稳定的主要原因是块体间因存在着嵌固作用，同时坡脚附近的植被对于岸堤块体的稳定起到一定程度保护作用。根据计算的结果和现场调查情况，如若不考虑块体间力时，船舶航速不宜大于 $3 m/s$ ，块体嵌固较好时也不宜大于 $4 m/s$ ，正式通航前对堤岸进行统一检查分析评价，且对稳定性不强的坡面应进行适当的加固。

4 结论

- 1) 限制性航道内船行波波高数值模拟计算结果与 Havelock 公式计算趋势相一致，数值模拟计算值较大，更符合现场实际。
- 2) 护面块体稳定质量随航速的增大而增大，但质量增量呈递减趋势。
- 3) 对于嵌固性较差的块体，虽然块体尺寸较大，当航速大于 $3 m/s$ 时，仍可能发生块体失稳的现象。为保证该段河堤护面安全稳定，通航时船速整体不宜大于 $4 m/s$ 。

参考文献：

[1] 何超勇, 琚烈红, 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.
 [2] 陈虹, 吴少霖. 上海内河船行波研究[J]. 水运工程, 2017(11): 124-128.

(下转第203页)