

⑧ 通榆河响水段船行波与护坡冲蚀试验研究^①

40-44

严忠民 唐洪武[✓] 周春天

U617.8

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

摘要 运用遥控自航船模、光电测速、自动生波机等先进手段对通榆河响水段航道特性、航行波波态及粘土护坡抗冲蚀能力进行试验研究。试验结果表明,该河段船行波形态具有明显的狭窄、浅水航道特性,船型编队宜优先考虑单列式拖带船队和单列顶推船队。在当地气候条件下,粘土冻融后护坡抗冲性能显著降低,将影响护坡的稳定性。

关键词 航道 遥控船模 船行波 光电测速 冻融土 护坡 冲蚀 试验

通榆河是江苏省苏北东部沿海地区的一项以水利为主,立足农业,综合开发的重点工程,也是苏北地区航运的重要动脉之一。船舶高速航行所产生的船行波对于运河两岸堤坡有剧烈的冲刷作用。护坡能否抵御船行波的冲蚀,直接影响工程的安危。本文通过响水河段物理模型试验,对其航道特性、船行波波态和粘土护坡的抗侵蚀能力进行探讨。

1 模型试验方法

1.1 船行波模型设计

1.1.1 船池

船行波模型试验水池尺寸为 $60\text{ m} \times 12.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$,由停船段、过渡段、匀速段和减速停船段组成。匀速段为船行波测试范围,并分航道监测断面 I、II、III,间距 4 m ,在断面 I 处量测波高,断面 II 处量测流速。为确保船队直线航行,在模型上两端设有可滑动导轨,可设定中航及边航航线。模型两岸边坡根据试验研究需要,由可动钢架支撑灰塑板作为边坡进行调节,见图 1。为保证模型试验可靠性及试验数据的精度,参照国内

外近年来研究及有关缩尺影响^[1],试验模型按重力相似准则设计,几何比尺 $1:25$ 。

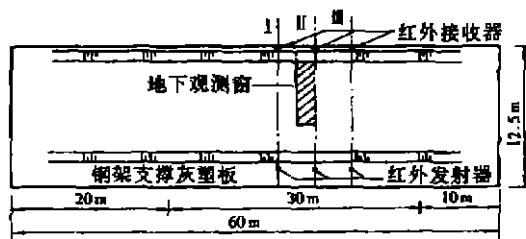


图 1 船行波试验河道模型

1.1.2 船模

船队模型按通榆河航道设计标准,以及现行京杭运河营运情况,试验选用了 270 HP 拖轮、185 HP 拖轮、100 t 舱驳和 500 t 货驳线型图加工。拖轮均模拟螺旋桨和舵,由专用控制电路遥控驱动。经计算,采用 $1:25$ 比尺可达到船模几何相似、排水量和吃水相似、航速相似,对于由缩尺效应导致螺旋桨转速增大对船队首驳船行波的影响,通过调节拖距予以消除。

1.2 粘土护坡模型设计

由于粘土模拟的相似理论尚不成熟,故本文粘土护坡试验按 $1:1$ 设计,考虑到现有

①参加本文试验工作的还有周耀庭、侯乐如、刘长辉等。

第一作者简介:严忠民,男,硕士,高级工程师,从事水利枢纽及环境水力学研究,曾发表《城市污水潜管排放研究》等论文。

港池的深度不可能达到原型河道的水深,试验中仅切取原型静水面附近 1m 高的一段岸坡,在相应于原型河道的坡脚处设置浪高仪测定波要素(与船行波试验中测定波要素位置一致)。波浪池尺寸为 $50\text{m} \times 17.4\text{m} \times 1.4\text{m}$,池前是推波板,侧面加碎石消波。

模型护坡粘土取自通榆河响水河段,夯实后干密度分别为 $1.50, 1.40, 1.33\text{t/m}^3$ 。另外,考虑到通榆河响水段冬季出现零度以下气温的时间可达 1 个月,一个冬季中,粘土护坡要经历多次冻融过程。粘土冻融后物理力学性质会产生明显的变化,抗冲能力明显下降,对岸坡的保护作用会大大降低,因此增加制作了冻融试验段。方法是将取来的原状土制成 $50\text{cm} \times 25\text{cm} \times 15\text{cm}$ 块体,夯实后干密度为 1.50t/m^3 ,然后,放置冻柜冻融 3 次再砌入岸坡模型进行冲蚀试验。

1.3 试验量测技术

1.3.1 船模航速监测系统

船队航速采用自行研制的光电测速仪,以拖轮船头抵达各测速断面隔断红外光为一脉动信号,在河道上等间距布置 3 个发射与接收传感器,经微机系统记录信号的时间间隔,再依测速断面间隔距离算得船速(见图 1)。

1.3.2 波浪要素监测系统

试验采用微机自动量测系统进行波要素数据采集和数据处理。采用 BGY-2 型电容式测波传感器测量模型中的船行波,测波仪的输出信号接二次仪表将其放大,然后经 16 路有源低通滤波器滤去干扰信号并进一步将其电压信号放大至 $\pm 5\text{V}$,然后一路送模/数(A/D)转换,将模拟信号转换为数字信号送主机进行数据处理;另一路送 SC-18 型紫外线示波器观察和记录船行波波形。微机系统对船行波信号进行巡回连续采样,采样间隔为 5ms ,对每一路连续采样 20 个波约 $10 \sim 15\text{s}$ 。

1.3.3 回流流速测试系统

岸边回流速度由 HD-4 型电脑流速仪测量,采样时间为 1s ,采样间隔时间为 1s ,2 只

传感器布置于水面下 2cm 。

2 船行波试验成果与分析

2.1 通榆河响水段船行波波态分析

船行波系属于重力波范畴的一种水面波动。当船体在水面与水体作相对运动时,对于船舶而言,因需克服水流阻力,必须做功。对于水体而言,在吸收船体做功的能量后,其中一部分表现为水面波动,在重力作用下,按一定规律以一定形式扩散传播,即形成所谓船行波。通榆河响水段通航水深约 $3 \sim 5\text{m}$,航速 $8 \sim 12\text{km/h}$,河道底宽 50m ,通航船队一般为单拖(270 HP),1 顶 2 驳(270 HP + $2 \times 500\text{t}$)和单列 1 拖 10 驳(185 HP $10 \times 100\text{t}$)。试验结果表明,船行波波态具有明显的狭窄、浅水航道波态特性。三种船型的船首、船尾都存在有扩散波系和横波系,但随船型不同,船行波波态也有所不同。图 2 给出了三种船型在通航水深 3m 时的岸坡坡脚处的波高历时过程线,由图可见,单拖时的船散波和艉散波组成不同波向相交的波群,最大组合波高(歧点处)出现在紧靠第一个首波附近。由于船前水面局部壅高,船后出现凹槽,引起岸坡处水面剧烈降落。单列顶推时,岸坡处水位降落历时明显较单拖长,且出现两个下沉峰值。第一列下沉峰值较小,仅为第二列的一半;并列顶推时,由于船宽约占航道的 $1/4$,且水深较浅,顶推引起的船首壅高和水面降落值非常大,同时整个河道水体向前推移,故图中未能给出并列顶推的波动过程线。1 拖 10 驳

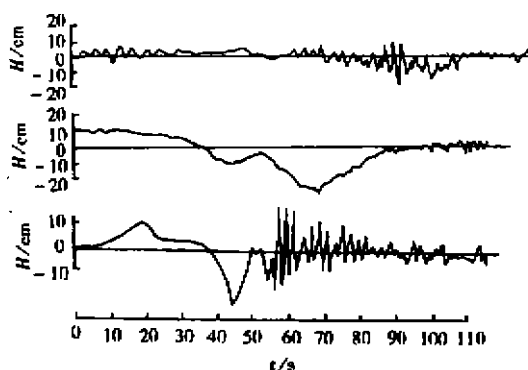


图 2 $D=3\text{m}$ 、边坡 1:3 中航时 H 过程线

时,拖轮船首波和船尾扩散波之间拉开了距离,且由于 100 t 拖轮和拖带的 10 只驳船水下船体断面较小,故不像顶推或单艘拖轮时那样船首处有明显的水面下降。但每只驳船均有一个相近的波连续作用于岸坡。

2.2 船行波波脚处最大波高

临近岸坡的波浪尺度取决于船边的波浪尺度,波浪自船边向岸边传播过程中扩散衰减程度以及扩散波系与横波系的干扰叠加情况。后者又与两波系的波长、波向及波形相位有关,其影响因素十分复杂。根据前人试验资料的总结和因次分析^[2],本文试验主要考虑以下因素:

$$\frac{H}{D} = f\left(\frac{D}{h}, n, Fr, \text{船型编队, 航线}\right)$$

式中 H 为岸坡脚处最大波高; D 为通航水深; h 为船队吃水深; n 为河道断面系数即河道过水断面面积与船舶水下部分剖面面积的比值; $Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$, V 为航速。试验结果表明,对通榆河响水河段,相对波高随弗劳德数 Fr 的增加而迅速增加,但不同的船型编队、通航水深和航线,相对波高随 Fr 变化的具体过程并不完全相同,如图 3、图 4 和图 5 所示。对同一弗劳德数 Fr ,边航(航线距岸坡脚 $1/4$ 河宽)引起的波高要比中航(航线与河道中心线重合)大得多。对不同的船型编队则单列顶推产生的波高最大,1 拖 10 驳其次,单拖最小。对不同的通航水深则浅水要比深水引起的波高大。

2.3 船行波波周

通过对三种船型编队 and 不同航道参数所测得的最大波高的波周期进行统计分析,最大波高 H 与相应波周 T 有如下的线性关系:

$$T = 0.0346H + 1.038$$

式中 波高 H 的单位为 cm,波周 T 的单位为 s,适用范围 $5\text{cm} \leq H \leq 30\text{cm}$ 。

2.4 船行波波峰线

试验结果表明,船行波的波峰线与航线的夹角随弗劳德数 Fr 的增加而减小,但与

岸边水面线的夹角在 $Fr < 0.6$ 时,变化值不大。实测三种船型编队形成的船行波波峰线与岸边水面线的夹角平均值为 35° 。

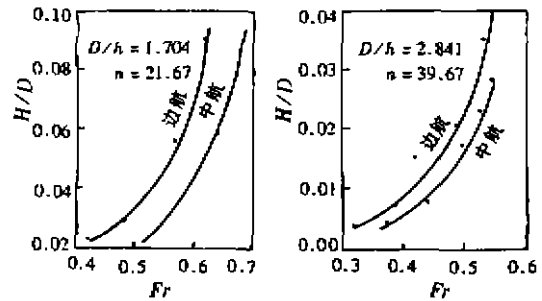


图 3 单拖 $\frac{H}{D} \sim Fr$ 关系图

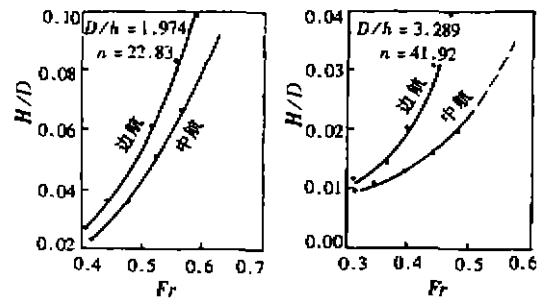


图 4 单列顶推时 $\frac{H}{D} \sim Fr$ 关系图

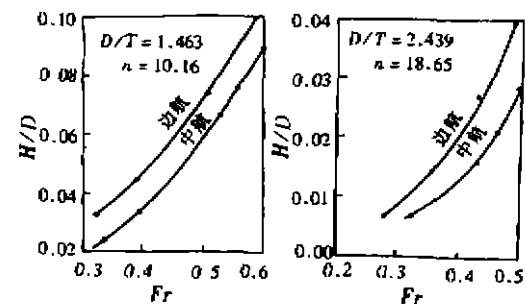


图 5 1 拖 10 驳时 $\frac{H}{D} \sim Fr$ 关系图

2.5 岸边回流流速

船队在狭窄、浅水型河道中航行,除产生船行波外,还会出现次生的水力现象,如回流。较大的回流流速将对岸坡冲蚀起到雪上加霜的作用,在护坡设计中不容忽视。试验结果表明,在通榆河响水河段,回流速度大小随断面系数 n 增大而减小,同时随 Fr 的增大而增大,且船队边航时回流流速大于中航时的回流流速。在单列顶推时,实测最大回流流速可达 1.21 m/s 。

3 粘土护坡冲蚀试验成果与分析

根据船行波试验结果,对不同的船型编队所产生的波高综合为小、中、大三种代表性波高,小波 12 cm,中波 20 cm,大波 30 cm。实测护坡试验中生波机形成的小波、中波、大波波高分别为 12.4 cm, 20.1 cm, 29.4 cm, 相应波周期为 1.44 s, 1.63 s 和 1.92 s。波峰线与岸坡水面线夹角 35° 。

在波浪冲刷初期,粘土护坡表面产生微小的剥蚀,形成麻面状。在波浪的进一步作用下,在静水面线的附近产生局部破坏,形成一个个小坑,随着波浪作用次数的增加,这些冲刷坑渐渐发展,连成一片,形成一个沿水面线的槽状破坏带,并不断加深增宽。被冲刷下来的粘土大部分沿坡面向下沉积,形成一“S”状断面。少部分粘土由于卷浪作用沿卷浪传播方向向前输移,而细小的土粒则随水扩散。在大波作用下可见到土块塌落现象。这种局部的冲刷淤积发生在静水位上下约 1 倍波高的范围内,岸坡冲刷的最深点基本上在水面与岸坡的交界处。

试验中发现,岸坡的破坏主要发生大波

且在前 200 次波作用的过程中。大约在 1000 个波作用后,岸坡破坏速度变慢并逐渐趋于稳定。图 6 是不同干密度粘土及冻隔土在大波作用下稳定后的断面破坏形态。由图可见,护坡粘土干密度大,冲坑浅小,干密度降低,则冲坑加深扩大。对同一干密度的粘土护坡,冻隔后与冻融前的破坏程度也明显不同,前者破坏程度严重,最大冲刷深度达 25.3 cm,超过粘土护坡层厚一半。

图 6 所示的破坏形态仅仅是在同一水位下的断面破坏形态,而通榆河响水河段通航水深常年在 3~5 m 内变化,由于水位的变化,伴随着船行波破坏引起的岸坡“S”状断面位置也会发生变化,图 7 列举了三种水位(水位涨落 15 cm)下,岸坡“S”状断面综合在一起的形态。由图中可见,原来在高水位时局部淤积的位置,由于水位下降而发生冲刷,水位升高时,原来冲刷的部位会有粘土淤填,但一般再次淤积下来的粘土远较原岸坡土质疏松,易遭受波浪侵蚀和被水流冲走,形成新的坡面侵蚀形态,如图 7 所示。因此,水位的上下不断变化,会使岸坡的冲刷范围不断扩大,很难形成稳定的岸坡断面。

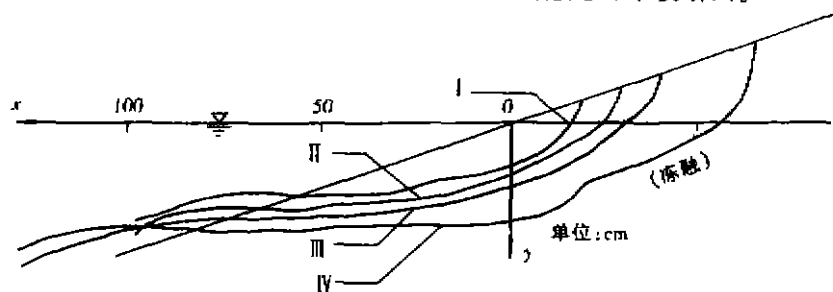


图 6 不同干密度的坡面受各种波作用后断面形态

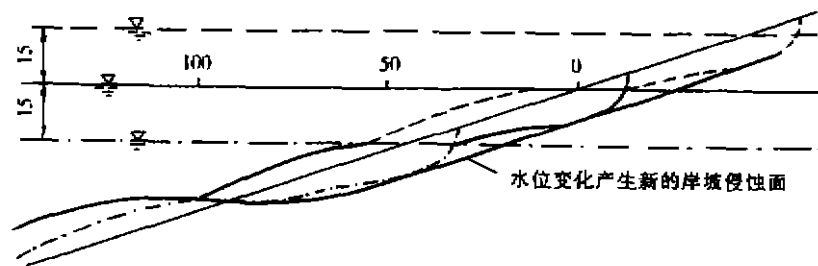


图 7 水位的上下不断变动形成新的坡面侵蚀形态(单位: cm)

4 结 语

本文运用遥控自航船模对单拖、1拖10和顶推等船型编队进行的船行波系列试验研究表明,通榆河响水河段船行波形态具有明显的狭窄、浅水航道特性,其波形图和平面形态以及波高与各种因素的关系,与该地区已通航河流的调查结果基本吻合,说明本文试验方法是可行的,所得船行波资料可供通榆河其它河段护坡设计参考。

船行波试验结果表明,在通榆河响水河段,船型编队宜优先考虑单列式拖带船队,单列顶推船队由于只有船尾独波和顶推船船行波,作用时间相对较短也可采用,但双列顶推在通榆河响水河段不宜采用。

护坡冲蚀试验结果表明,在船行波的长

期作用下,岸坡在静水位上下约1倍波高范围内将发生冲刷和淤积,岸坡冲刷的最深点基本上在水位与岸坡交界处,冲刷深度随波高大小、土质的干密度不同而变,尤其冻融土的破坏深度最大,说明在当地气候条件下,冻融后护坡抗冲性能降低会影响护坡的稳定性。

本文试验研究得到了盐城市重点工程指挥部和盐城市水利勘测设计院的大力支持和资助,在此表示衷心的感谢!

参考文献

- 1 纽曼 J N. 船舶流体力学, 北京: 人民交通出版社, 1986
- 2 王水田. 关于船行波问题的研究. 水道港口, 1980 (4): 21~37

(收稿日期: 1996-06-28 编辑: 许宇鹏)

欢迎订阅 1998 年《人民黄河》

《人民黄河》是水利部黄河水利委员会主办的综合性水利水电技术刊物, 1992 年和 1996 年连续被定为全国中文核心期刊, 1996 年被评为全国水利系统优秀科技期刊。本刊栏目多, 内容丰富, 信息量大, 一刊在手, 可览黄河流域水利全貌。《人民黄河》适合从事水利水电、水土保持和有关农、林、地理等工作的管理、科技、教学人员, 以及关心黄河治理和建设的人士阅读。

《人民黄河》为月刊, 国内外公开发行, 1998 年将改为国际标准大 16 开本, 每月 20 日出版, 彩色封面, 每期 48 页, 每册定价 4.50 元, 全年定价 54.00 元。国内统一刊号 CN41-1128/TV, 国外代号 M738, 国外总发行: 中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱)。本刊 1998 年继续自办发行, 需要订阅的单位及个人可将订购款直接寄至本刊编辑部。开户行: 河南省郑州市交行紫办; 开户: 黄河水利委员会宣传出版中心; 账号: 6020149028852; 地址: 河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 12 层《人民黄河》编辑部; 邮编: 450003; 电话: (0371) 6302409, 6302902。

欢迎订阅 1998 年《中国水土保持》

《中国水土保持》是水利部主办的全国性水土保持业务与技术综合性刊物。她创刊于 1980 年, 开设有 20 多个栏目, 以融政策性、技术性、新闻性和实用性为一体的独特风格, 雅俗共赏的内容和精美的印刷质量, 深受国内及世界 25 个国家和地区广大读者的欢迎。本刊拟于 1998 年起改为国际标准大 16 开本, 纸张也由原 52 克改为 60 克胶版纸。

《中国水土保持》的读者对象为从事水利水保管理与科研的干部、基层水利水保工作者及有关农、林、水、牧、地理、生态学科的工作、科研、教学人员。杂志每月 10 日在郑州出版, 国内统一刊号: CN41-1144/TV, 每册定价 4.00 元, 全年定价 48.00 元。国外代号: M748, 国外总发行: 中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱)。本刊自 1993 年改为自办发行, 订阅款可信汇也可邮汇, 汇款时请注明用途。信汇开户行: 河南省郑州交行紫支, 开户: 黄河水利委员会宣传出版中心, 账号: 6020149028852。邮汇地址: 郑州市顺河路黄委会综合大楼 12 层《中国水土保持》编辑部。邮编: 450003。