



运东船闸下游引航道非恒定流模型试验

步晓斌¹, 王 龙¹, 申 霞²

(1. 江苏省扬州市航道管理处, 江苏 扬州 225003;
2. 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, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对运东船闸扩容工程, 通过 1:40 正态物理模型, 研究船闸泄水过程及泄水结束后, 引航道内泄水波运动特征、水面比降、流速分布、回流强度等。结果显示: 在引航道设计方案下, 上下游水头差 7.13 m、阀门开启时间 5 min 时, 人字门处反向水头为 0.39 m, 系船停泊区水面纵向流速为 0.62 m/s, 超过规范要求, 会对引航道内船舶、人字门以及引航道护岸产生不利影响, 下一步应研究合理、可行、有效的工程或非工程措施以改善通航水流条件。

关键词: 运东船闸; 物理模型; 非恒定流; 泄水长波

中图分类号: U 641.1 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)12-0118-05

Experimental study on unsteady flow in Yuandong ship lock's lower approach channel

BU Xiao-bin¹, WANG Long¹, SHEN Xia²

(1. Waterway Management Department of Yangzhou City, Yangzhou 225003, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In Yuandong ship lock expansion project, we establish a physical model of 1:40 scale ratio to study the long wave movement, water surface slope, velocity distribution, and backflow intensity when the lock empties and afterwards. The results show that the reverse water head at the miter gate is 0.39 m, and the longitudinal surface velocity at the mooring site is 0.62 m/s under the designed condition. These values are beyond relevant standards, so measures shall be taken to improve the navigation condition.

Keywords: Yundong ship lock; physical model investigation; unsteady flow; long wave

运东船闸位于江苏省干线航道网通扬线起点, 规划将老船闸拆除, 并在原址进行船闸扩容工程建设。新建船闸上下游最大水头差达 7.13 m, 闸室泄水将导致引航道内生成复杂的水流流态, 给船舶停靠及航行造成安全隐患。船闸灌泄水过程中引航道内水流运动特性的研究方法主要包括理论分析^[1]、水流数学模型^[2-7]、概化物理模型试验^[8-9]等。本研究采用 1:40 正态物理模型对船闸输水廊道以及下游引航道内水流进行模拟, 模型的

直观性强, 能够真实反应岸壁边界及复杂流态, 工程结构近区模拟准确性高。试验内容包括水流流态、泄水波运动特征、水面比降、流速分布、水位壅高、回流强度等, 分析水流运动对引航道内船舶的影响, 以及对船闸本身(人字门)及引航道护岸等的影响。研究结果可为下一步提出合理、可行、有效的改善下游引航道通航水流条件的工程或非工程措施提供依据, 是确保船舶航行和船闸运行安全的科学支撑。

收稿日期: 2015-06-04
作者简介: 步晓斌(1977—), 男, 高级工程师, 从事船闸水力学及工程运行管理研究。

1 工程概况

运东船闸建于 20 世纪 80 年代, 位于江苏省高邮市境内高邮湖东侧, 与京杭运河相连, 为江苏省干线航道网通扬线的起点。近年来, 由于过闸船只数量激增以及部分构筑物破损, 拟将原船闸拆除并在原址进行重建。建设规模 230 m × 23 m × 4 m, 为 III 级通航建筑物, 船闸上下游正常水头差 5.5 ~ 7.0 m, 最大水头差 7.13 m。下游引航道平面布置采用不对称式 (图 1), 船舶进出闸方式为“曲线进闸, 直线出闸”。下游引航道宽度约 70 m, 直线段长度为 410 m。下游远调站布置在下游引航道折点 735 m 的西岸, 靠泊岸线长度为 100 m, 停泊锚地紧邻远调站顺岸布置, 长度为 420 m。船闸下闸首门槛顶高程 -3.3 m (85 国家高程, 下同), 下游引航道设计底高程为 -3.3 m, 远调站处引航道设计底高程为 -2.5 m。下闸首输水系统采用简单消能工的水平环绕对冲消能的平底板短廊道集中输水系统, 输水廊道进水口断面尺寸为 3.5 m × 3.5 m, 两个出水孔尺寸分别为 3.3 m × 3.5 m、3.1 m × 3.5 m。下游引航道护岸设计方案为: 左岸采用重力式护岸结构, 右岸采用钢板桩护岸结构。

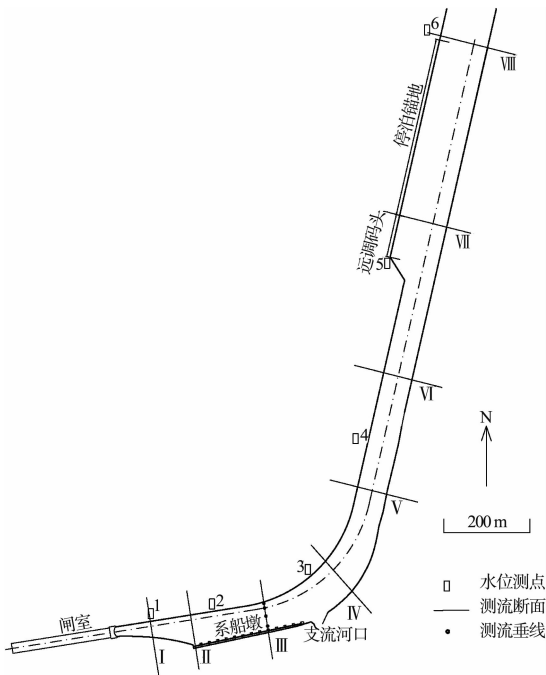


图 1 运东船闸下游引航道及测点布置

2 模拟方法

2.1 模型设计与制作

采用 1:40 正态物理模型研究船闸泄水过程中, 下游引航道内的水流运动特性。依据模型与原型的相似性要求, 求导出流速比尺为 6.325, 流量比尺为 10 119, 时间比尺为 6.325, 糙率比尺为 1.849。考虑到船闸泄水产生的水面波动传播、减少模型边界的反射对波动的影响等因素, 模型范围选定为运东船闸下闸首及其下游 2 km 的航段。根据航道设计断面采用断面控制法制作引航道模型, 闸室下闸首与输水廊道采用塑料板制成一个整体, 两侧输水廊道各接一个直径 50 mm 的管道, 模拟船闸泄水过程。下游采用翻板尾门控制水位。

2.2 试验设备与量测仪器

船闸泄水过程中, 流量、水位、流速是随时间而变的非恒定流状态, 试验中必须精确控制阀门的启闭以模拟泄水流量过程。流量过程采用南京水利科学研究院研制的电动阀门自动化系统进行控制, 闸阀上游安置电磁流量计。将给定的各工况泄流曲线输入计算机, 通过流量与阀门开度的拟合曲线, 控制电动阀门的启闭速度, 同时将所需流量与电磁流量计的读数进行实时校验并调整偏差。电动阀门下游设置三通管, 将水流分成两股进入两侧输水廊道。两个支管上各布置一个电磁流量计和阀门, 以确保两侧的流量相同, 并且总流量与上游的电磁流量计读数一致。模型中流量误差控制在 0.1 m³/h 以内。水位采用数字编码跟踪式水位仪; 流速采用激光旋浆式流速仪测量, 测点保持在 0.6 m 水深处, 水位与流速同步采集至计算机。采用自动波高仪采集泄水波的传播, 波高采样间隔为 0.05 s (模型中), 采集时间约 9 min (模型中)。

2.3 模型验证

本项目研究的主要内容是船闸泄水过程中, 下游引航道内的水流运动状况。因此, 模型验证以阻力相似为主, 即求证河槽的糙率。由于通扬

运河高邮段河道水位比降较小，流速亦很小，即使进行水文测验也难以求得糙率系数 n ，而且工程后船闸下游引航道岸坡将进行人工护砌，因此河道的天然糙率对模型试验的意义不大。运东船闸下游引航道断面规则，两侧护坡采用浆砌块石、袋装碎石、模袋混凝土、钢板桩等，糙率系数约为 0.024 ~ 0.025。根据相似条件，模型的糙率系数为 0.013。模型采用水泥砂浆适当抹光，糙率系数为 0.013，能够满足模型试验的要求。

3 引航道非恒定流特性

3.1 试验工况

模型试验的上游边界为船闸泄水过程，工况为闸室与下游引航道水头差 7.13 m、泄水阀门开启时间 5 min。此工况的泄水流量过程见图 2，最大流量为 141.53 m³/s，泄水时间为 7.65 min。模型试验的下游边界采用恒定水位 0.7 m 控制。研究该上下游边界条件下引航道的水流运动规律。

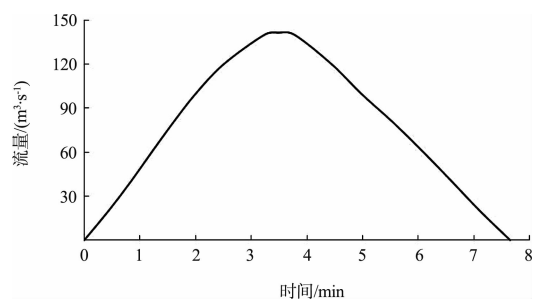


图 2 船闸泄水流量过程

3.2 水面波动

在船闸下游 2 km 的引航道内布置 9 个波高测点，分别位于 8 个测流断面以及下闸首人字门处（图 1），波高测点均位于航道中心线上，波高采集周期为 0.3 s（原型中）。采用波高仪自动监测船闸泄水全过程以及泄水结束后共约 60 min 内水面的波动。将测得的波高值与初始水位叠加，即得到各点水位随时间的变化过程。人字门、系船墩（图 1 中测流断面 III）及远调码头（图 1 中测流断面 VII）处水位过程见图 3。可见，随着船闸

开始泄水，下游引航道内产生相应的非恒定流波浪运动。紧邻出水口的人字门处水位迅速升高，在泄水全程 7.65 min 内，水位呈现出与流量变化类似的规律，即先增加至最大随后降低。当水位上升至 1.0 m 以上，水面波动频率较大，短时间内波动幅度约 0.3 m，最高平均水位为 1.09 m。泄水结束后，受波动的反向传播作用，人字门处水位出现回升，人字门的阻挡导致水位迅速爬升，0.5 min 内由 0.58 m 增至 1.01 m，随后人字门的反射作用导致波浪折向下游传播，水位随之下降，第 2 个波动周期约 11 min。对比人字门、系船墩及远调码头 3 个测点的水位波动过程可知，泄水波的传播导致下游各点波动过程有所延迟。根据各测点的距离及波动出现时间，推算出泄水波前沿前进速度约为 6.0 m/s。泄水过程中系船墩和远调码头处最大波高分别为 36 cm 和 23 cm，泄水结束后，由于波动延续性以及波浪的反向传播，水位仍出现波动，加上不规则岸线及不同结构岸壁的反射作用，各点水面波动呈现来回振荡、波幅缓慢衰减的趋势。

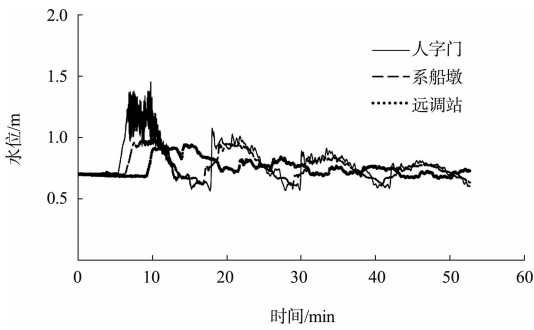


图 3 船闸泄水过程及结束后引航道内各点水位变动过程

3.3 水位变率及比降

在运东船闸下游引航道内布置 6 个水位测点，采集周期约 90 s，测量泄水过程中以及泄水结束后约 60 min 内的水位变化过程，分析水位随时间的变化速率以及各时刻引航道内水面纵向比降。1[#] ~ 6[#] 水位测点变化速率见表 1，各点水位变率出现正负交替，表明水位并不是呈现单调升高或降低，而是出现波动，水位上升最快处位于 1[#]、3[#]、4[#] 测点，约 25 cm/min。究其原因其距离泄水口

较近, 水位变化较敏感, 而 2[#]测点的水位变率较这 3 个测点小, 可能是由于其位于航道拓宽突变处, 水面变宽, 水流变缓, 加上对岸系船墩对水流波动的削减作用, 使得水位变率较周围测点小。对比 1[#]~6[#]测点数值可知, 水位变率最大值出现时刻随着与闸室的距离增加而延迟。从每个测点各个时刻值看, 水位升高的速度远大于水位回落的速度。

表 1 船闸泄水过程各时段 1 [#] ~6 [#] 测点水位变率 cm/min						
时段/s	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
0~76	24.1	12.9	-1.2	1.5	2.0	3.2
76~152	-0.9	11.5	26.3	1.8	-0.8	-0.7
152~228	-2.2	2.8	2.9	26.5	0.5	-1.2
228~304	6.9	5.8	1.0	-5.8	20.0	8.9
304~379	-8.1	-10.6	-6.4	0.7	-2.0	-1.1
379~455	-15.0	-12.0	-9.3	-7.0	2.2	16.6

泄水过程中各时刻引航道纵向水面线见图 4, 引航道内最大正比降出现在 76、152、228 s 这 3 个时刻, 约为 1.0‰, 此时全航段水面坡降差异较大, 比降较大处河长仅 500 m, 其余河段水面较平缓。随着下泄水量增加以及水质点逐渐下移, 全航段水位逐渐抬高, 坡度放缓。在泄水过程后期, 水体继续向下游移动, 而闸室泄流量逐渐减少并趋于零, 上游的水体补给少于流向下游的水量, 航段水面呈现倒坡, 水面倒比降最大为 0.9‰, 发生在船闸泄水结束时。最大正负比降均处于船闸下游 100 m 范围内。

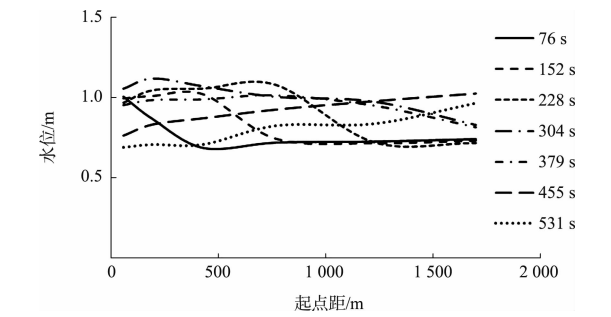


图 4 泄水过程各时刻下游引航道内纵向水面线

3.4 断面流速

在运东船闸下游引航道内布置 8 个测流断面,

每个断面布置 3~4 个测流垂线, 最左侧垂线标记为 1 (图 1)。重点研究在船闸泄水过程及泄水后最大流速区(I-2)、系船停泊区(III-4)、远调码头(VII-1)、停泊锚地(VIII-1)这 4 个特征点的流速过程。由于各垂线流速测点位于相对水深 0.6 m 处, 根据明渠流速垂向分布公式^[10], 将其换算成水体表层流速。引航道内流速最大值位于闸室下游 100 m 范围内 (系船停泊区上游), 水面最大流速达 1.73 m/s。系船停泊区(III-4)纵向流速最大值为 0.62 m/s, 横向流速最大值为 0.17 m/s。下游远调站及停泊锚地流速最大为 0.41、0.43 m/s, 横向流速很小。系船停泊区所在测流断面 III 各垂线流速过程见图 5, 可见, 流速过程呈现出与水位过程类似的趋势, 在一个泄水过程中, 各点流速先增大随后降低至零。泄流结束后, 随着部分水体的回溯, 流速值随之增加并呈现来回反复。在前两个流速波动过程中, 四根垂线的流速值极值出现时刻基本一致, 而在随后的两个流速波动中, 各垂线点流速并没有出现同时增加或降低的趋势, 泄水结束 5 min 后, 该断面处流速基本小于 0.15 m/s, 水面较为平缓。

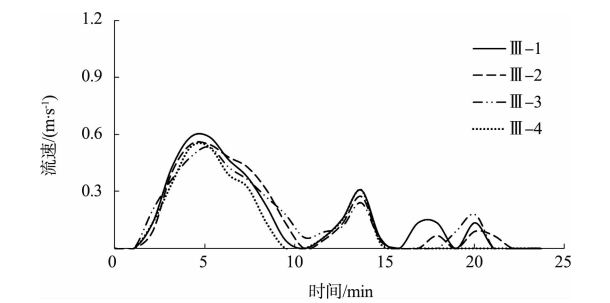


图 5 系船停泊区断面 III 各垂线表层流速过程

3.5 回流特征

运东船闸泄水过程中及泄水结束后, 下游引航道内系船墩处产生回流。泄水过程末端, 系船墩上游弯道处由于河道断面变宽, 水流能量耗散而出现顺时针回流, 面积为 70 m×20 m, 流速约 0.35 m/s, 随着泄水结束, 该回流随之消失 (图 6)。泄流结束后传递至下游的能量逐渐减少, 泄水波产生反向传播, 两者在系船墩处相遇, 由

于能量的不均等以及左右侧不对称,系船墩处生成一个顺时针回流,面积为 $80\text{ m} \times 75\text{ m}$,水流的黏滞力和惯性导致其上游生成逆时针回流,直径约 50 m ,两个回流强度约为 0.20 m/s (图 7)。

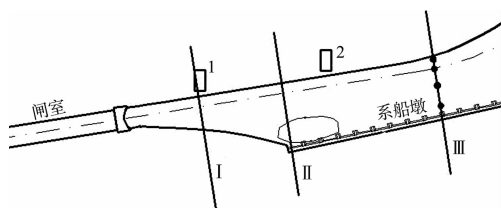


图 6 泄水过程中回流位置及范围

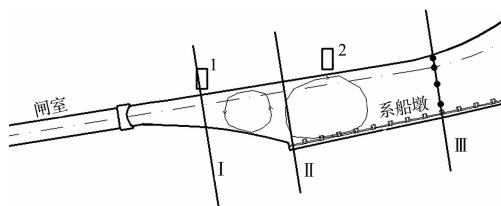


图 7 泄水结束后回流位置及范围

4 结语

1) 船闸灌泄水过程中人字门除了承受水位迅速变化所产生的静水压力外,还要承受闸室内外水流产生的随机脉动压力。《船闸输水系统设计规范》^[11]规定了船闸闸室灌泄水时,闸室水面的最大惯性超高、超降值不宜大于 0.25 m ,当水位惯性超高、超降较大时,将影响人字闸门启闭机构的安全。本次试验中,人字门处水面超高为 0.39 m ,超过标准限值。

2) 引航道内保证船舶航行的水面比降限值无相关标准要求,国内外学者根据不同等级船闸工程提出了不同的比降限值。周华兴等^[1]根据船闸等级、相应的代表船型、船队总排水量和船舶允许系缆力标准,得出内河 III 级航道允许比降为 1‰ 。据此,运东船闸泄水过程下游引航道水面正负水面比降值能够满足要求。

3) 根据《船闸总体设计规范》^[12],在通航期内 III 级航道口门区的最大纵向流速限值为 2.0 m/s ,横向流速限值为 0.3 m/s ,回流流速应小于 0.4 m/s ;引航道导航和调顺段内宜为静水区,制动段和停泊段的水面最大流速纵向不应大于 0.5 m/s ,横

向不应大于 0.15 m/s 。将模型测量值与规范进行对比可知,系船停泊区纵向流速为 0.62 m/s ,横向流速最大值为 0.17 m/s 。略超过规范要求的数值 0.5 m/s 。

4) 在该航道设计方案下,闸室内外水位差为 7.13 m 、泄水阀门开启时间 5 min 时,船闸泄水过程及泄水结束后下游引航道内的非恒定流运动特征值表明,人字门处的反向水头会对人字门的安全造成一定程度的影响,同时系船停泊区的水流略大,可能会对船舶停泊及航行造成隐患。建议采用工程措施或管理措施,改善航道内的水流条件,确保船舶及人字门的安全。

参考文献:

- [1] 周华兴,郑宝友,王化仁. 船闸灌泄水引航道内波幅与比降研究[J]. 水道港口, 2005, 26(2): 103-108.
- [2] 尤薇,曲红玲. 高良洞双线并列船闸下游引航道水流特性研究[J]. 水运工程, 2013 (8): 156-159.
- [3] 东培华,马洪亮,尤薇,等. 多线船闸下游引航道通航水流条件及改善方案研究[J]. 水道港口, 2013, 34(5): 420-424.
- [4] 李炎,汤小霞. 长洲水利枢纽四线船闸引航道通航水流条件数值模拟[J]. 水道港口, 2014, 35(1): 66-72.
- [5] 黄伦超,李珊,游涛,等. 双线船闸共用下游引航道水流特性及其影响[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(4): 37-44.
- [6] 彭伟,李君涛. 株洲枢纽双线船闸灌泄水引航道非恒定流水力特性研究[J]. 水道港口, 2014, 35(3): 239-246.
- [7] 李伟,张宝航. 船闸下引航道口门区回流特性及改善措施[J]. 水运工程, 2013 (8): 160-164.
- [8] 戈龙仔,曹玉芬,孟祥玮,等. 船闸中间渠道非恒定流特性与调节池改善措施探讨[J]. 水道港口, 2006, 27(6): 378-383.
- [9] 郑宝友,周华兴,李炎. 船闸引航道长波波动对人字闸门的影响[J]. 水运工程, 2008 (2): 82-85.
- [10] 李家星,赵振兴. 水力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2001.
- [11] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].
- [12] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范[S].