

船闸集中输水系统复合模型研究与应用

刘本芹, 宣国祥, 李中华

(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, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 在分析船闸输水系统重要性及相关水力学问题研究方法特点的基础上, 针对集中输水系统船闸, 提出并建立了局部物理模型与数学模型相结合的复合模型, 阐述了其具体实施方案. 采用2座依托工程船闸的物理模型试验资料验证了复合模型研究成果的准确性, 并将复合模型成功应用于工程实例船闸, 得到了相应的输水水力特性、船舶系缆力、闸室及引航道流速特性等水力指标, 均符合规范及设计要求; 确定了闸室镇静段长度, 提出了消能工优化布置措施, 为工程设计提供了技术依据. 研究表明, 提出的船闸集中输水系统复合模型既能保证研究成果的准确性, 又比物理模型试验大大节省费用并缩短研究周期, 是一种适合低水头船闸较好的新型研究方法, 具有推广应用价值.

关键词: 船闸; 集中输水系统; 复合模型; 应用

中图分类号: U641.3⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)04-0078-06

船闸是我国内河航运建设中采用最多的通航建筑物型式, 集中输水系统又是我国船闸采用最广泛的一种输水系统型式, 主要应用于10.0 m以下水头的船闸. 输水系统的设计至关重要, 不仅影响到船闸的通过能力, 还关系到船闸及其附属结构物以及过闸船舶的安全. 船闸输水系统水力学问题是船闸工程建设中的关键技术问题: 一方面, 输水系统的设计必须满足输水时间的要求, 以保证船闸的通过能力和营运效率; 另一方面, 在船闸充、泄水过程中, 随着闸室内水面的上升或下降, 停泊在闸室内的船舶受到因闸室内非恒定水流形成的水面坡降力、水流运动的流速力以及各种局部流态如回流、漩涡等冲击产生的局部力的影响, 输水系统的设计需保证这些作用在船舶上的力满足相关设计规范的要求, 否则作用力过大将导致固定船舶的缆绳断裂, 或船舶摇摆幅度过大导致船舶发生碰撞、倾覆等不安全现象.

近几年通过大量的物理模型试验和原型观测研究, 计算集中输水系统船闸输水水力特性及船舶受力的方法已较为成熟, 但尚无法直观地模拟输水系统进出口水流流态等局部水力现象; 而对于采用集中输水系统的低水头船闸而言, 也无必要全部进行输水系统整体物理模型试验研究. 因此, 为了总结已有研究经验, 进一步提高成果的准确性, 并尽可能节省时间和费用以满足工程需要, 提出了局部物理模型和数学模型相结合的船闸集中输水系统复合模型研究方法^[1].

1 复合模型概述

船闸集中输水系统复合模型研究的具体实施过程为: (1) 以依托工程为研究对象, 建立船闸闸首和集中输水系统(包含部分闸室)的局部物理模型, 通过局部物理模型试验测定恒定流状态下的船闸充、泄水阻力系数及流量系数, 作为数学模型计算的基本参数; (2) 建立船闸输水数学模型, 采用实测阻力系数及流量系数计算输水水力特性及充水时闸室内停泊船舶的系缆力, 并依据设计及相关规范要求确定合适的充、泄水阀门开启方式; (3) 针对确定的阀门运行方式, 依据数学模型计算的水力特性值, 在局部物理模型中调试研究

收稿日期: 2013-01-05

作者简介: 刘本芹(1977-), 女, 山东蒙阴人, 高级工程师, 硕士, 主要从事通航建筑物水力学研究. E-mail: bqliu@nhri.cn

工况,观测局部水流流态,测定闸室不同断面的流速分布,并优化消能工布置;(4)复核相关调整是否影响充、泄水流量系数,如产生影响则返回第(2)步;(5)根据局部物理模型试验和数学模型最终计算结果,提出相应的研究成果及结论。

本文选取2座具有完整物理模型试验研究资料的船闸为研究依托工程^[2-3],采用物理模型试验研究成果来验证复合模型的可靠性。2座船闸的基本特性见表1。

表1 依托工程基本特性

Tab.1 Basic characteristics of the backing projects

依托工程 编号	有效尺寸 (长×宽×吃水)	设计水头/ m	设计输水 时间/min	设计船舶(队)/ t	输水系统布置型式	阀门面积/ m ²
1#船闸	180.0 m×23.0 m×3.5 m	9.98	8~10	单列2×1 000 t	短廊道集中输水系统	21.6
2#船闸	230.0 m×23.0 m×4.0 m	9.78	8~10	双列2×1 000 t	短廊道集中输水系统	28.0

2 数学模型

船闸输水基本原理以及单级船闸输水过程非恒定流方程和计算方法可查阅相关文献^[4-6],据此计算出船闸输水基本水力特性。而船舶系缆力计算的目的是检验船舶的缆绳受力是否超过其容许受力,或根据容许受力确定合适的阀门开启速度。对于集中输水系统来说,由于闸室充、泄水的水流都是集中在闸室的一端进入或流出,因此闸室内的各种水力现象要远比分散输水系统船闸强烈。

船闸充水时,闸室内停泊船舶将受到波浪运动、纵向流速及局部水流所产生的动水作用力。这3个力的最大值并不发生在同一时间,波浪力的最大值发生在阀门开启初期,此时流速力和局部力几乎为零,而流速力和局部力最大值发生在闸室纵向流速最大的时候。此外,闸室纵向流速一般不会超过1.0 m/s,流速力不会很大,而局部力又是可以通过调整消能措施予以降低的。通过以往大量船闸工程的计算分析、模型试验及原型观测可知,充水时初始波浪力值较大,在充水初期闸室内还未见明显水流运动时,停泊船舶的缆绳就受到很大的作用力,往往成为船舶安全过闸的制约因素,而且这个力与输水系统的消能无关,因此集中输水系统船闸充水时,过闸船舶的停泊条件主要由初始波浪力控制。同时借鉴文献^[7]对停泊在引航道内的船舶系缆力计算方法及应用条件的探讨结果,本文计算时认为闸室内的船舶停泊在闸室轴线上,没有水平位移,船舶竖向位移不影响缆绳的水平受力。根据相关规范^[8],经推导得到船闸充水初期最大波浪力的计算式如下:

$$P = \frac{k_r \omega DW \sqrt{2gH}}{t_v (\omega_c - \chi)} \quad (1)$$

式中: P 为波浪力(kN); k_r 为系数,对锐缘平面阀门可取0.725; ω 为阀门处廊道断面面积(m²); D 为波浪力系数; W 为船舶(队)排水量(t); H 为设计水头(m); t_v 为输水阀门开启时间(s); ω_c 为闸室过水横断面面积(m²); χ 为船舶浸水横断面面积(m²)。

3 复合模型验证

3.1 阻力系数及流量系数

模型采用的基本参数由物理模型试验测定得到,2座依托工程的物理模型比尺均为1:30,设计的物理模型与原型保持几何相似、水流运动相似和动力相似,遵循重力相似准则,满足《通航建筑物水力学模拟技术规程》(JTJ/T 235-2003)^[9]的相关要求,因此可以保证参数的正确性。试验测得1#船闸充水过程阀门全开后的阻力系数及流量系数分别为1.66和0.78,泄水过程阀门全开后的阻力系数及流量系数分别为1.88和0.73;2#船闸充水过程阀门全开后的阻力系数及流量系数分别为2.46和0.64,泄水过程阀门全开后的阻力系数及流量系数分别为1.49和0.82^[2-3]。

3.2 模型验证

采用复合模型计算了2座船闸的输水水力特性及船舶系缆力,计算值及验证结果见表2.相同船闸运行条件下,复合模型研究得出的输水水力特征值与物理模型试验结果相比,最大误差为3.73%,最小误差几乎为0,说明复合模型对输水水力特征值的计算较为准确.典型输水水力特性过程线比较见图1,2种方法得到的输水水力特性变化曲线吻合较好,仅流量变化曲线在最大流量时刻略有偏后,原因在于数学模型中平面阀门不同开度的局部阻力系数是根据经验公式估算的,与模型不同时刻的实际阻力系数略有差异,但对输水水力特征没有太大影响.闸室内船舶最大纵向系缆力的计算误差不超过5.0%,产生差别的主要原因有两方面:一是计算值为理想状态下的初始波浪力;二是模型试验所用船舶与设计船型尺寸有差别和试验量测存在误差,但并不影响以此作为确定阀门开启方式的依据之一.验证结果表明,采用该复合模型研究集中输水系统船闸相关水力学问题是准确可靠的,误差满足《通航建筑物水力学模拟技术规程》(JTJ/T 235-2003)^[9]的规定.

表2 闸室输水水力特征值比较

Tab.2 Hydraulic characteristics comparison between the composite model and physical model

项目	充水				泄水			纵向系缆力/ kN	
	T/min	$Q_{\max}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	E_{\max}/kW	$v_{\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	T/min	$Q_{\max}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	E_{\max}/kW		
1#船闸	物理模型值	8.77	144	8 700	0.59	9.24	134	8 490	20.56
	复合模型值	8.77	145	8 650	0.57	9.10	139	8 500	19.55
	误差	0.00%	0.69%	-0.57%	-3.39%	-1.51%	3.73%	0.12%	-4.91%
2#船闸	物理模型值	11.74	139	8 100	0.73	8.68	169	10 200	30.04
	复合模型值	11.57	143	7 850	0.74	8.72	174	9 850	31.23
	误差	-1.45%	2.88%	-3.09%	1.37%	0.46%	2.96%	-3.43%	3.96%

注:T为闸室输水时间, Q_{\max} 为最大流量, E_{\max} 为最大能量, v_{\max} 为闸室断面最大平均流速.

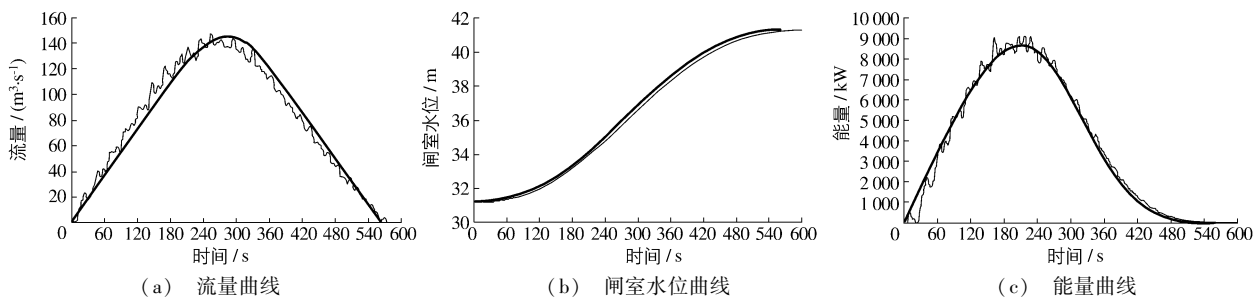


图1 典型输水水力特性过程线比较

Fig.1 Comparison of typical hydraulic characteristic curves

3.3 对比分析

复合模型研究方法采用局部物理模型试验测定的基本水力参数,计算船闸输水水力特性及闸室内船舶纵向系缆力;同时,由于集中输水系统出水段主要集中在上闸首附近,可通过局部物理模型试验观测出水口水流流态及出水均匀性,并根据需要优化调整消能工布置,使出水水流均匀,这样虽然目前无法计算闸室内船舶横向系缆力值,但可通过在局部模型中保证闸室出水段出流均匀来降低船舶所受横向水流作用力.因此,复合模型研究比纯数学模型计算的结果更为准确和全面,又比纯物理模型试验节省时间和费用.

4 应用实例研究

工程实例船闸通航标准为双列1+2×1 000 t级船队,尺度(长×宽×吃水)为160 m×10.8 m×2.2 m;船闸规模(长×宽×槛上水深)为230 m×23 m×4.0 m,设计正、反向最大水头分别为5.6和5.4 m,对应水位组合

12.10 ~ 6.50 m 和 4.60 ~ 10.00 m,反向最大水头对应闸室初始水深 4.0 m,输水时间要求 8 ~ 10 min.

其输水系统型式采用短廊道和三角门门缝联合输水的组合式输水系统^[10],上闸首由短廊道侧面进、出水,出水口外设消力槛,下闸首采用反向布置以充分利用门库进行消能,其短廊道也由侧面进、出水,出水口外设消力槛.水力计算得到阀门处廊道断面尺寸(高×宽)为 3.0 m×3.5 m,双侧总面积为 21.0 m².采用复合模型研究方法,对该船闸进行完整的输水系统水力学研究.

4.1 输水水力特性及船舶系缆力

按 1:25 的模型比尺,建立了该船闸闸首、部分闸室和引航道的局部物理模型.该船闸具有双向水头,设计的上、下闸首采用对称布置,输水系统布置差别不大,对输水系统基本水力参数的影响很小,可认为上、下闸首输水系统的流量系数相同,局部物理模型试验测定的充、泄水流量系数分别为 0.73 和 0.76.计算了满足波浪力要求的阀门开启速度,从便于船闸运营管理的角度考虑,确定上闸首阀门充水和泄水均采用一种开启方式,即阀门匀速全开时间 $t = 330$ s,下闸首阀门根据正向最大水头泄水和反向最大水头充水而分别采用 $t = 300$ s 和 540 s 的开启速度,相应地不同运行工况最大水力特征值见表 3,各指标满足规范要求^[11].

表 3 闸室输水时最大水力特征值

Tab.3 The maximum hydraulic characteristics of lock filling and emptying

工 况	水头/ m	阀门开启 时间/s	输水时间/ min	最大流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	联合输水流量 峰值/(m ³ ·s ⁻¹)	最大能量/ kW	最大比能/ (kW·m ⁻²)	$v_{\max 1}^{*1}/$ (m·s ⁻¹)	$v_{\max 2}^{*2}/$ (m·s ⁻¹)
充 水	5.60	330	7.70	104	86	3 594	21.42	0.55	0.19
	-5.40	540	9.30	81	76	2 568	21.15	0.54	0.18
泄 水	5.60	300	7.72	111	68	/	/	0.58	/
	-5.40	330	7.85	104	67	/	/	0.54	/

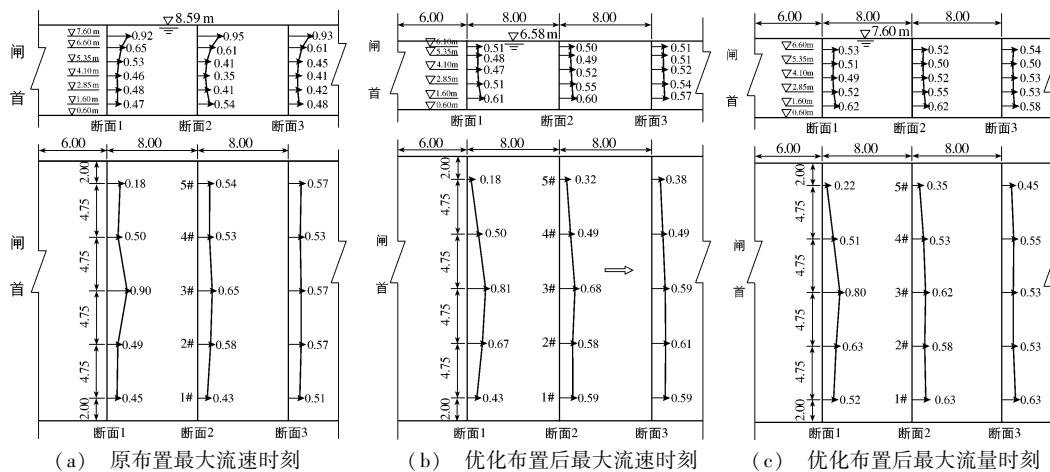
注: *¹指充水闸室最大断面流速或泄水下游引航道最大断面流速; *²为三角门门缝充水产生的闸室最大断面流速.

经计算,正向最大水头充水时,闸室内停泊单、双列 2×1 000 t 船队时的波浪力系数分别为 1.28 和 1.53,反向最大水头充水时,闸室内停泊单、双列 2×1 000 t 船队时的波浪力系数分别为 1.40 和 1.73.由此进一步计算得到不同运行工况下的闸室内船舶最大纵向系缆力为:正向最大水头 5.6 m 充水运行时,单列船队的最大系缆力为 14.93 kN,双列船队的为 22.58 kN;反向最大水头 5.4 m 充水运行时,单列船队的最大系缆力为 16.08 kN,双列船队的为 30.44 kN.根据规范要求,1 000 t 船舶允许最大纵向力为 32.0 kN,可见系缆力值满足规范要求^[11].

4.2 流速特性及改善措施

原布置闸室充水时由于水流沿门库顺直通过短廊道,进入闸室的水量偏多,出口消能空间狭小,且受闸首高度达 1.90 m 的横槛阻挡,水流需越槛翻入闸室,因此水流壅高和紊动较大,加上在短廊道外进入闸室的水流沿墙顺流而下,在闸首中轴线处对冲消能后集中进入闸室,消能条件较差.观测水流条件表明,闸室流速分布很不均匀,两侧小中间大、底部小上部大,这种流速特性说明水流剩余能量较大,且集中在船舶停泊区域,这将使停泊船舶受到较大的局部水流冲击力及两侧水流压差形成的横向力,因此需对闸首布置进行调整.结合相关研究成果^[12-14],试验中提出了 2 点改善措施:①在门库两侧边墙设置竖槛,以便增大消能效果;②取消闸首与闸室联接处的横槛,以增大进入闸室的底部流速,从而减小上部流速,并可改善水流流态,同时为了增大短廊道出口消力槛的消能效果,将第 1 道消力槛的高度提高至 1.9 m,并将消力槛向廊道出口增宽 1.0 m,以改善水流的平面分布.

原布置及优化后的闸室断面流速分布见图 2,调整消能工布置后的闸室充水水流分布较均匀,仅靠近闸首断面 1 中的 3#测点(闸室中心线附近)流速略大,沿水深平均的最大流速为 0.81 m/s,其余断面各测点实测流速值基本均匀,且底部流速略大于上部流速,减小了水流对船舶的作用,获得了较理想的水流特性,同时根据闸室流速分布特性确定镇静段长度为 6.0 m.根据试验测定的下游引航道流速特性,提出了增设长 20.0 m、深 2.0 m 消力池的改善措施.上述局部模型试验是针对下闸首进行的,上闸首可采用相同的修改措施.

图2 闸室断面流速分布(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)Fig.2 Velocity distribution in lock chamber (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

5 结 语

(1) 针对集中输水系统船闸水力学相关问题,提出并建立了局部物理模型和数学模型相结合的复合模型,阐述了其具体实施方案,采用2座依托工程船闸的物理模型试验资料验证了复合模型研究成果的准确性,结果表明采用该复合模型研究船闸集中输水系统水力学问题是可靠的。

(2) 将复合模型成功应用于工程实例船闸,研究确定了输水阀门运行方式,得到了相应的输水水力特性、船舶系缆力、闸室及引航道流速特性等水力指标,并提出了消能工优化布置措施,确定了闸室镇静段长度,为工程设计提供了技术依据。

(3) 研究表明,提出的船闸集中输水系统复合模型可使局部物理模型与数学模型相互耦合,既能提高计算成果的准确性,又比物理模型试验大大节省时间和费用,是船闸水力学领域适合低水头集中输水系统船闸较好的一种新型研究方法,具有推广应用价值。

参 考 文 献:

- [1] 刘本芹, 宣国祥. 船闸集中输水系统复合模型研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012. (LIU Ben-qin, XUAN Guo-xiang. A study of composite model of shiplock's end filling and emptying system[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [2] 宣国祥, 刘本芹. 引江济汉通航工程进口龙洲皖船闸输水系统水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008. (XUAN Guo-xiang, LIU Ben-qin. Hydraulic model experiment study on Longzhouyuan shiplock's filling and emptying system of the water diversion project from Yangtze River to Hanjiang River[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [3] 刘本芹, 宣国祥, 宗慕伟. 芜申运河下坝二线船闸输水系统水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008. (LIU Ben-qin, XUAN Guo-xiang, ZONG Mu-wei. Hydraulic model experiment study of the Xiaba second line shiplock's filling and emptying system on Wushen Canal[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [4] 德乌斯 N. M. 通航船闸[M]. 陈士荫, 金煜, 译. 大连: 大连理工大学出版社, 1988. (DEWUSI N M. Navigation lock [M]. CHEN Shi-yin, JIN Yu, translate. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1988. (in Chinese))
- [5] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (WANG Zuo-gao. Design of shiplocks[M]. Beijing: China Water Power Press, 1992. (in Chinese))
- [6] 刘本芹, 宣国祥, 李中华. 船闸短廊道和三角门门缝联合输水的水力计算[J]. 水道港口, 2008(4): 278-282. (LIU Ben-qin, XUAN Guo-xiang, LI Zhong-hua. Hydraulic calculations of the lock short culvert associated with sector gate gap filling and

- emptying[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2008(4): 278-282. (in Chinese))
- [7] 周华兴, 刘清江, 郑宝友, 等. 船闸引航道船旁系缆力计算公式应用条件的探讨[J]. *水道港口*, 2006(5): 311-316. (ZHOU Hua-xing, LIU Qing-jiang, ZHENG Bao-you, et al. Discussion on application condition of the formula of ship mooring force of lock approach[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2006(5): 311-316. (in Chinese))
- [8] 宗慕伟, 杨孟藩. 船闸输水系统设计[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1989. (ZONG Mu-wei, YANG Meng-fan. Design of shiplock's filling and emptying system[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1989. (in Chinese))
- [9] JTJ/T 235-2003, 通航建筑物水力学模拟技术规程[S]. (JTJ/T 235-2003, Technical regulation of modelling for hydraulics of navigation structures[S]. (in Chinese))
- [10] WU Peng, XUAN Guo-Xiang, LIU Ben-qin, et al. A combined system of loop culvert and through gate filling and emptying for navigation locks under heads from either direction[C]//PIANC MMX Congress Liverpool UK2010, 2010.
- [11] JTJ 306-2001, 船闸输水系统设计规范[S]. (JTJ 306-2001, Design code for filling and emptying system of shiplocks[S]. (in Chinese))
- [12] 刘本芹, 宣国祥. 芜申运河杨家湾船闸输水系统水力计算及模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008. (LIU Ben-qin, XUAN Guo-xiang. Hydraulic calculations and physical model experiment study of Yangjiawan shiplock's filling and emptying system on Wushen Canal[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [13] 刘本芹, 宣国祥, 宗慕伟. 施桥三线船闸输水系统水力计算及模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008. (LIU Ben-qin, XUAN Guo-xiang, ZONG Mu-wei. Hydraulic calculations and physical model experiment study of the Shiqiao third line shiplock's filling and emptying system[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [14] 刘本芹, 宣国祥. 泰州引江河高港二线船闸输水系统布置及水力计算分析[J]. *水利水运工程学报*, 2012(4): 65-70. (LIU Ben-qin, XUAN Guo-xiang. Layout and hydraulic analyses of the filling and emptying system of Gaogang second-line shiplock on the Yinjiang River[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2012(4): 65-70. (in Chinese))

Research and application of composite model for ship lock with concentrated filling and emptying system

LIU Ben-qin, XUAN Guo-xiang, LI Zhong-hua

(*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Key Laboratory of Navigation Structures, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Based on analysis of importance of the ship lock's filling and emptying system and the characteristics of different research methods for relevant hydraulic problems, a composite model which combines a local physical model with a mathematical model is developed for ship lock with a concentrated filling and emptying system. And the reliability of the composite model is tested and verified by physical model experiment data of two backing projects. At the same time, the composite model is successfully applied to a practical project and the comprehensive results which accord with the relevant requirements of criterion and design are obtained from experimental studies. Research results show that the composite model for ship lock with a concentrated filling and emptying system can ensure accurate research results, furthermore, it will save a great deal of costs and time compared with the physical model experiments. Therefore, it is a new research method especially suitable for the ship lock with low head.

Key words: ship lock; concentrated filling and emptying system; composite model; application