

文章编号:1006-7329(2001)05-0045-05-0045-05

苏通长江大桥建桥后航线规划研究^{*}

陈明栋¹, 杨胜发², 文 岑¹, 许光祥², 陈 杰¹

(1. 重庆交通学院 西科所, 重庆 400016; 2. 重庆交通学院 河海建筑工程系, 重庆 400074)

摘要:通过建立水流和船舶运动基本方程,与实船静水操纵性能试验比较,船舶操纵性指数与实测基本一致。苏通长江公路大桥的修建将改变原河段船舶航线。本文论述了运用该数学模型重新规划航线,并比较了建桥前后船舶操纵参数的变化,以保障建桥后船舶安全航行。

关键词:苏通长江大桥;航线规划;数值模拟

中图分类号: U442.54

文献标识码: A

应用船舶航行数学模型来研究航道中船舶的航行条件开始于70年代,H. Eda首先对包括航道宽度、水深和船舶控制方式等方面问题进行了研究;之后,J. Puglis和R. H. Ashburner等分别研究了巴拿马运河船舶双向航行的安全问题、苏伊士运河岸壁作用及拖轮对船舶制动的影响等问题。90年代,中国、日本通过对实测的大量船舶航迹线以及实船静水试验研究,在船舶航行物理模型试验和数值模拟方面取得新的进展。

苏通长江大桥位于长江下游江苏省境内澄通河段,西距南京约280 km,东距长江入海口约100 km,该桥的建设对促进地方经济飞速发展,加强苏南、苏北的联系,完善国道、省道干线公路网,进一步改善过江条件,缓解过江交通压力,保证航运安全等各方面都具有十分重要的意义。本文通过建立水流和船舶航行数学模型,模拟建桥前后船舶航行情况,论证苏通长江公路大桥的修建对船舶航行的影响,建议桥位河段上下水船舶航线和航行操纵方式。

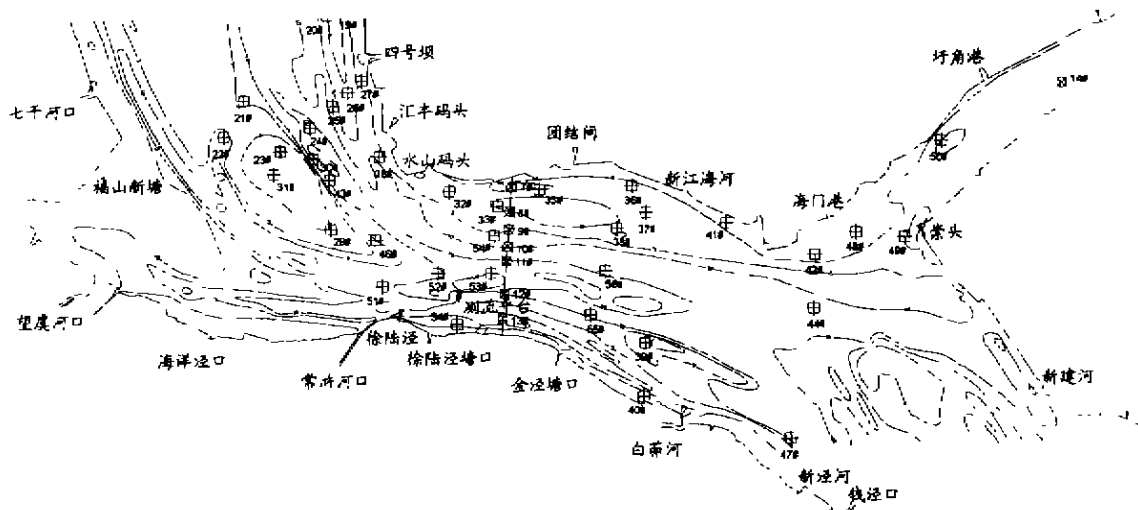


图1 桥区河段河势图

* 收稿日期:2001-08-30

基金项目:江苏省交通厅资助项目(2000-05)

作者简介:陈明栋(1954-),男,浙江奉化人,高级工程师,主要从事航道整治及通航研究。

1 桥区河段概况

苏通长江大桥位于江苏省东部长江下游的澄通河下段—南通河段(以下简称“桥区河段”),“工可研”拟定了两个桥位:中线桥位和东线桥位,分别位于南通市下游 16 km 和 38 km。其中东线桥位为推荐桥位。

桥区河段平面形态呈藕节状,主深槽紧靠北岸南通港~龙爪岩一侧,江面开阔,暗沙丛生。主流从上至下约有 90% 顺横港沙尾南侧进入通洲沙东水道,其余进入西水道。通洲沙东水道下段又分为狼山沙东、西两水道,东水道为主汊,近年来狼山沙东水道中又出现了新开沙,与左岸形成夹槽。狼山沙东、西水道和通洲沙西水道三汊水流汇合,顶冲徐六泾后进入河口河段。东线桥位附近,江面较窄,徐六泾河宽仅 5.7 km,该处河床滩槽高程较大,是有名的险工段,徐六泾节点对稳定长江口南支河段河势具有重要作用。桥区河段水流平顺,通航水域较为宽阔,穿越桥区的航道较为顺直。目前,桥位附近水道内通航的大吨位船舶主要有万吨级以上的进江海轮和万吨级的驳船队,因此在该河段建桥,规划新的船舶航线和提供适航的水流条件非常重要。

桥区河段上游有大通、马鞍山、南京、镇江、江阴等水文站,桥区河段内有天生港、姚港、军用码头、徐六泾、徐六泾 2 号平台、南支杨林、北支青龙港等水文站和潮位站,这些水文站、潮位站为分析建桥后水流变化对船舶航行的影响提供了丰富的水文资料。

桥区河段处于长江口潮流界以下,潮汐为非正规半日浅潮,潮位每日两涨两落,日潮不等现象比较强。天生港、徐六泾的历史最高潮位分别为 7.08 m、6.75 m(19970819);历史最低潮位分别为 0.42 m、0.36 m(19560229);最大潮差分别为 4.01 m、3.74 m;最小潮差分别为 0.00 m、0.18 m;平均潮差分别为 1.92 m、2.01 m(以上均为吴淞基面,吴淞基面-1.923 m=黄海基面);平均涨潮历时分别为 4 h 9 min、4 h 14 min;平均落潮历时分别为 8 h 16 min、8 h 10 min,即潮流在上溯过程中,受河床边界阻力和径流压力,涨潮历时沿程递减,平均落潮历时是涨潮历时的 2 倍左右。由于本河段距河口较近,进潮量十分巨大,两个全潮总进潮量达 60 亿 m^3 左右,潮流量随天文潮和上游径流大小而变化,徐六泾实测涨潮最大流量达 154 000 m^3/s ,实测落潮最大流量达 152 000 m^3/s 。一般来说小潮和寻常潮的落潮流量大于涨潮流量,而大潮则不一定,愈往上游,潮流量愈小。

2 数学模型的建立

河道水流流场、水位等是模拟船舶航行的基础,数学船模的建立包括两部分,水流数学模型和船舶航行数学模型。

2.1 水流数学模型的建立

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(h_0 + \xi)u}{\partial x} + \frac{\partial(h_0 + \xi)v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} - fv - i_{bx} + \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + fu - i_{by} + \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} = 0 \quad (3)$$

式中: u, v 为流速在 x, y 方向的分量; h_0 为水深; ξ 为自由水面在竖直方向的位移; i_{bx}, i_{by} 为床面高程变化在 x, y 方向的分量; f 为柯氏力系数, $f = 2\omega \sin \phi$, ω 为地球自转角速度, ϕ 为地球纬度; g 为重力加速度; n 为糙率。

在求解水流运动方程和泥沙运动方程时,采用动水压力校正法。该方法的基本思想是将压力分解成动水压力和静水压力之和,由控制体积法导出二维偏微分方程的离散格式,采用 Patankar 和 Spalding 提出的压力校正法求解动水压力场,然后求解水位控制方程,用最新的水位替代压力校正

法的水位,如此循环迭代直至收敛。

动边界技术:根据网格节点处河底高程和水位,可以判断该网格单元是否出露水面,若不露出,糙率值采用正常值;若出露,糙率值取无穷大值。

水流数学模型验证见参考文献4。

2.2 船舶航行数学模型

2.2.1 船舶运动方程

以船体重心G为原点,船首尾为x轴,垂直于船首尾向为y轴(见图2),则可得到船舶运动方程:

$$(I_x + I_{xx})\dot{\gamma} = N \tag{4}$$

$$(m + m_x)\dot{v}_x - (m + m_y)v_y\dot{\gamma} = X \tag{5}$$

$$(m + m_y)\dot{v}_y - (m + m_x)v_x\dot{\gamma} = Y \tag{6}$$

式中 γ 为转头角速度; X, Y 是船速 v 在船首尾方向及横向的分量; m_x, m_y, I_x 为 x 向、 y 向的附加质量和附加惯性矩。

2.2.2 船舶运动方程的求解

将式(4)、(5)、(6)离散,则每一时刻船舶的运动可以通过离散方程逐次积分计算求得。如将船舶对岸航速当作绝对速度,则船舶对水流的运动为相对运动,对水流速则为相对流速,在进行了对水运动的方程式离散求解后,对岸运动的参数可相应获得。

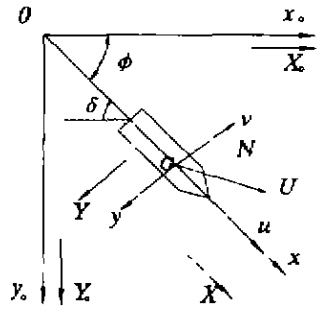


图2 船舶运动坐标系

3 船舶航行数学模型验证

船舶航行数模验证一般包括回旋直径、回旋性指数和应舵性指数等操作性验证。

3.1 验证资料

河段典型船型 $4 \times 4 + T$ 船队无实船试验资料,但有采用相同推轮的 $3 \times 5 + T$ 船队(长350.7 m宽35.1 m)在南京做的重载(载量30 000 t)试验,其从上水向下水掉头,操满舵情况下,其回转直径为1.5倍船长。由于该试验采用船队长度与所选代表船队相当,其试验得到的回转直径可作为模型验证的依据。此外本河段通行海船,其代表船型为50 000 t级的集装箱船(长275 m宽32.3 m),据现有文献^[2],有近似尺度的50 000 t级货船实船试验资料,其“Z”形试验结果列于表1。

3.2 模型验证

采用前面建立的船舶航行数学模型,首先对 $4 \times 4 + T$ 船队进行了静水情况下的回旋性计算。在满舵情况下进行定常回旋航行模拟,计算得到的回旋直径为1.66倍船长,与前述试验资料1.5倍船长较为接近且偏于安全。

其次对50 000 t级海船进行了静水情况下的“Z”形操舵计算,表2列出了操纵 20° 舵角时船舶航行数模计算的回转性指数和应舵性指数与实船试验结果的比较。从表2看出, K' 的计算值与实测值之间仅相差4.92%, T' 最大也只相差-3.9%。由此可见,船模计算的操纵性能与实船试验结果基本一致。

表1 50 000 t级货船“Z”形试验结果

舵角	20°	35°
K'	1.22	0.97
T'	2.82	2.38

表2 海船“Z”形操舵计算结果与实船试验结果比较

舵角	K'	误差(%)	T'	误差(%)	航速(m/s)
20°	实船	1.22	2.82	-3.9	8.755
	计算	1.28	2.71	4.92	

4 建桥前后船舶航行过程模拟

4.1 代表船队的选择

根据桥区河段目前的通航条件和远期规划,其主要代表船型及其尺度如表3所示。由表中可见,桥区河段通行的大型船队中,以48 000 t级的4×4+T船队(以下简称船队)的质量最大,长度最长,宽度最宽,因而其惯性最大,相对其他船型来讲,其操纵更为困难,所要求的航道条件也最高,可作为代表船队;在通行的海船中,50 000 t级的集装箱船具有较强的代表性,由于50 000 t级货轮(以下称“海船”)资料全面,并且与集装箱船的吨位和尺度基本接近,可作为代表海船。所以,本次计算选用48 000 t级的4×4+T船队和50 000 t级的海船进行主通航孔的上、下行航行模拟。

表3 桥区河段代表船型尺度

船型	船舶吨级(DWT)	总长(m)	型宽(m)	静水航速(m/s)
集装箱船	51 300	275	32.3	
货轮(海船)	50 000	216	30	8.75
1级航道代表船队	48 000	350	64.8	3.667
大型散货船队	40 000(上水)	350.85	42.72	
	40 000(下水)	289.89	53.4	
	40 000(上水)	350	42.68	

4.2 规划航线

本次船舶航行模拟规划的航迹线,是在实测的上、下航迹线的基础上,考虑建桥前的习惯航线和桥墩位的布设进行的。图3是2000年7月6~13日实测的推荐桥位河段的船舶航迹线,图中同时绘制了推荐桥位的桥轴线和推荐方案的桥墩位置。由于洪季上行航线不在设计主桥孔内,为保证船舶航行安全,宜调整桥墩位以满足习惯航线。

苏通长江大桥因特殊的地理环境,(1)潮汐变化频繁;(2)河道易演变;(3)水上交通量大,经综合考虑,设计选择了278 m+1 088 m+278 m跨的双塔斜拉方案。该跨度已达到目前斜拉桥型的最大尺度,因此调整桥墩位存在较大困难。经研究,本次航线规划中将主通航孔及桥墩位按上、下行实测航线右移了300 m左右,与实测枯水航迹线基本一致。主通航孔内,上、下行规划航线间距分别为420 m左右,距两侧桥墩的最小距离约210 m,均超过船队宽度的3倍以上,满足规范要求。桥区河段规划行迹线见图3。

4.3 建桥对船舶航行的影响

应用建立的船舶航行数模,对建桥前后的代表船队和海船航行过程进行了共84个组次的计算,计算成果中航行舵角、漂角和对岸航速(以下简称航速)等航行参数见表4;由表4对比分析可以认为:

在规划航线上,船队和海船均可顺利通过桥区河段,仅在洪季落急时,船队上行对岸航速偏低,

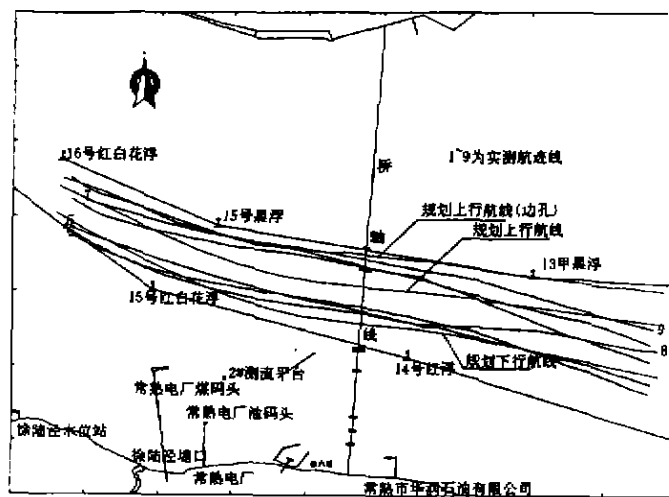


图3 推荐桥位河段规划航线

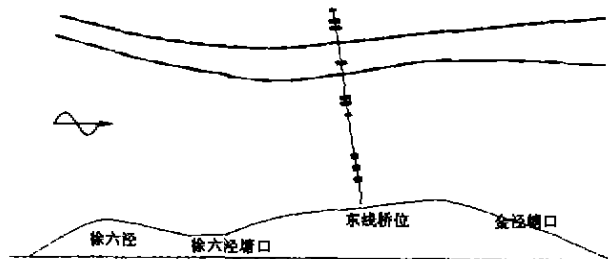


图4 建桥前海船航迹线(洪季落急)

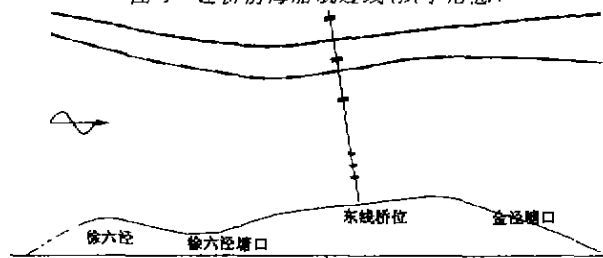


图5 推荐方案海船航迹线(洪季落急)

但实际航行中,船队主要在涨潮时上行通过该河段,以降低航运成本。

对于主通航孔上行船队,对比建桥前后航行参数可见,各级流量船舶航行操作参数基本不变,舵角不大于 10° ,漂角不大于 15.7° 。对于主通航孔下行船队,各级流量船舶航行操作参数略有变缓,舵角不大于 12° ,漂角不大于 10.9° 。建桥后,引起的船队下行操纵参数变化较小,对船舶的上行和下行基本无影响。

表4 推荐桥位主通航孔海船、船队航行参数统计(推荐方案:双塔)

水文组次	试验船型	方案	上行			下行		
			舵角范围($^\circ$)	对岸航速范围(m/s)	漂角范围($^\circ$)	舵角范围($^\circ$)	对岸航速范围(m/s)	漂角范围($^\circ$)
洪季落急	海船	无桥	-10.0~5.0	6.00~6.99	-4.4~3.4	-5.0~7.5	10.21~11.76	-2.2~1.9
		推荐方案	-12.0~10.0	5.71~7.14	-5.0~3.3	-5.0~10.0	10.10~11.42	-4.0~2.7
	船队	无桥	-7.5~7.5	0.80~1.96	-10.4~13.0	-5.0~10.0	5.07~6.63	-6.8~2.5
		推荐方案	-15.0~15.0	0.52~2.12	-13.1~14.6	-5.0~5.0	5.07~6.48	-8.2~3.9
洪季涨急	海船	无桥	-15.0~15.0	9.03~10.71	-2.2~3.4	-5.0~10.0	6.78~8.00	-3.0~2.2
		推荐方案	-7.5~5.0	9.09~10.60	-4.0~5.0	-7.5~10.0	6.71~8.03	-3.2~2.9
	船队	无桥	-10.0~7.5	4.34~5.57	-7.2~9.6	-7.5~7.5	1.72~2.98	-10.3~5.7
		推荐方案	-10.0~7.5	4.28~5.64	-6.1~10.8	-7.5~5.0	1.62~2.99	-11.3~10.4

5 结论

通过水流、船舶航行数学模型对苏通长江公路大桥推荐桥位和桥型方案船舶航行过程的模拟,可获得如下结论:

1) 本文建立的船舶航行数模,经对静水定常回旋性和“Z”形操舵计算,回旋直径、回转性指数和应舵性指数均与实船试验结果基本一致。

2) 东线方案洪季上行航线不在主通航孔内,仅针对航行方面,宜调整桥墩位以满足习惯航线;本次规划的东线方案航线是在调整桥墩位存在更大困难的基础上进行的,即将主通航孔的规划航线在实测的相应航线基础上右移300 m左右,基本与实测枯水航迹线一致。中线方案主通航孔规划航线基本与实测洪季航迹线一致。

3) 在各计算组次内,海船和船队通行主通航孔时,建桥后最大舵角为 15° ,与建桥前相比的变化值为 $-7.5\sim 7.5^\circ$;海船、船队通行主通航孔时,建桥后最大漂角分别为 6.6° 、 14.6° 。船舶航行过程模拟结果表明,推荐桥型方案对船舶航行的影响均较小。

参考文献:

- [1] 宣国祥. 船舶航行条件的实时模拟[J]. 水利学报, 1999, (8): 62-67.
- [2] 文岑. 船舶航行的数值模拟[J]. 重庆交通学院学报, 2000, (4): 102-106.
- [3] 中国人民解放军南字812部队. 船舶操纵性译文[J]. 1974.
- [4] Norrbin. Theory and Observations on the Use of a Mathematical Model for Ship Maneuvering in Deep and Confined Waters[M]. 1970.
- [5] 西南水运工程研究所. 苏通长江公路大桥船舶航行数值模拟研究报告[R]. 2001.