

强涌潮河口河相关系及其验证

韩曾萃¹, 曹颖^{1,2}, 尤爱菊¹

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江大学, 浙江 杭州 310027)

摘要: 分析并提出了有涌潮的强潮河口的河相关系式, 其平均水位下的断面面积可用落潮时的流量(含径流量)和含沙量计算, 结果较符合实际情况, 但强涌潮河口河宽大、水深浅, 仅采用涌潮系数仍有一定的误差, 如改用涨潮流量和含沙量, 则可大幅减小计算误差。本文还给出了潮汐河口纵向河宽放宽率和面积放大率的定义和计算公式。利用钱塘江河口治理前后50年的实测资料, 对130 km长河段的相应断面特征、河宽放宽率、面积放大率以及弯道特征计算式进行了验证, 取得了满意的验证结果。

关键词: 强潮涌潮河口河相关系; 河宽放宽率; 面积放大率; 弯道曲率半径

中图分类号: U617.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2009)04-0083-08

冲积性河流及河口通过自动调整, 有可能较长时间内处于相对平衡状态, 其断面形态(半潮水位下的河宽、水深和面积)、纵向沿程河宽放宽率、断面面积放大率及平面弯曲特征等与流域及海域的来水、来沙条件之间存在某种定量关系, 这种定量关系称为河相关系^[1-3]。寻求河相关系是河流(河口)动力学及河床演变学的重要研究内容。河相关系包括流量Q、流速U、面积A、河宽B、水深H、含沙量S、河床高程Z₀等7个未知数, 而可提供的方程仅6个(水流连续、动量守恒、输沙守恒、河床变形及2个几何关系A=BH、Q=UA)。潮汐河口流量Q包括径流及涨潮潮量W_f, 而W_f与沿程断面形态和潮差有关。因此, 它不是一个封闭体系, 应补充方程, 这是研究河相关系的学术意义^[3,4]。另外, 由于河床的断面、平面形态是决定水位(高潮位、洪水位、风暴潮水位)及潮汐特征(涨落潮潮量、历时、流速)的重要依据, 它们随径流的变化而变化, 其变幅反映了河床的稳定性。治理河道、河口就是要使其更加稳定, 并适应两岸社会经济发展的需求, 这是研究河相关系的实际意义。

钱塘江河口是典型强潮河口, 它既有一般河口的普遍特征, 又有强涌潮河口的特殊性, 而且近60年的治江缩窄活动较大, 在制订130 km长的治江规划线时应用了河相关系式^[5], 本文以钱塘江河口治理前、后断面变化来验证河相关系, 对治江效果进行回顾检验。

1 强涌潮河口河相关系式的提出及验证

河流、河口及海湾河相关系的研究成果非常多^[3], 本文不再重述。窦国仁^[1]用年平均落潮流量等于河口的年平均径流和年平均涨潮流量之和及落潮输沙量等于年径流输沙量与潮流输沙量之和, 将河流、河口的河相关系统一为1个关系式, 同时提出了河床最小活动性假说的综合指标:

$$K_n = a[(\beta V / (\alpha V_{0b}))^2 + bB/H] \quad (1)$$

式中:k_n为活动性指标,a为与流量变幅有关系数,b为比例系数,V和V_{0b}分别为河道的流速和河床颗粒的止

收稿日期: 2009-08-10

作者简介: 韩曾萃(1936-), 男, 湖北武汉人, 教授级高级工程师, 主要从事钱塘江河口治理规划、潮汐动力、咸水入侵、水资源、水污染的研究。E-mail: hanzc@zjwater.gov.cn

动流速, α 为河岸与河底土壤的相对稳定系数. 涌潮系数 β , 有涌潮时 $\beta=1+0.35\Delta H/H$, 其中: ΔH 为潮差, B 为半潮河宽, H 为半潮时水深, 无涌潮时 $\beta=1.0$, 窦国仁在研究中已注意到钱塘江、曹娥江河口特别宽, 水深特别浅, 因此, 提出涌潮系数以求弥补. 他指出河床在冲淤变化过程力求活动性最小, 故存在活动性指标 K_n 对自变量 v, h, B 偏导数为零, 从而得到半潮水位下断面形态的 H, B, A 等一系列的计算式(公式从略). 许多河流、河口都符合上述关系式, 但对钱塘江河口 130 km 河长上更多断面验证, 发现即使考虑了涌潮系数后, 河宽计算值仍偏小、水深偏大. 文献[2]收集了钱塘江、曹娥江、甬江、飞云江、椒江、敖江、射阳河、长江口及国外的 Thames、Forth 等 12 个河口的出口、中间及潮汐末端各 3 个断面, 建立了如下经验的河相关系式:

$$A = 4.7 Q_e^{0.9} S_e^{-0.22} \quad (2)$$

$$B = 7.5 Q_e^{0.62} S_e^{0.12} \quad (3)$$

$$H = 0.62 Q_e^{0.25} S_e^{-0.34} \quad (4)$$

(2)式的计算值基本与实际相符(见表 1 的(11)), 但涌潮区河宽偏小、水深偏大(见表 1 的(14)、(19)). 将河宽计算式中的流量和含沙量改用涨潮流量和涨潮含沙量, 计算值更符合实际(见表 1 的(16)、(21)). 故(3)、(4)式分别修正为:

$$B = 7.5 Q_f^{0.62} S_f^{0.12} \quad (5)$$

$$H = 0.62 Q_f^{0.92} / Q_e^{0.62} (S_e^{-0.22} / S_f^{0.12}) \quad (6)$$

脚标 e, f 分别表示落潮平均流量、含沙量和涨潮平均流量、含沙量.

河相关系式是多年平均的平衡断面特征与动力因素(径流、涨潮潮量及含沙量)的统计关系, 故选钱塘江河口 1956~1958 年(其径流量包括丰、平、枯水年且平均值与多年平均流量接近, 故为多年平均)每年 4, 7, 11 月中 7 个有涌潮的断面平均值与相应平均潮量、含沙量, 利用上述关系式进行计算, 结果见表 1.

表 1 钱塘江河口断面特征(1956~1958 年)的验证

Tab. 1 Verification of section characteristics of the Qiantang estuary (1956~1958)

站名							
	闸口	七堡	仓前	盐官	尖山	老虎山	澉浦
平均潮差(m)	(1)	0.60	0.90	1.87	4.10	4.60	5.20
涨潮潮量(亿 m ³)	(2)	0.13	0.24	0.84	1.80	11.4	23.0
基 落潮历时 T_e (10 ⁴ s)	(3)	3.92	3.96	3.83	3.62	3.15	2.70
础 落潮量 $W_f + Q_0 T$ (10 ⁸ m ³)	(4)	0.64	0.88	1.21	2.31	13.2	23.6
资 落潮流量 Q_e (m ³ /s)	(5)	1 630	1 890	3 520	6 380	41 900	87 300
料 涨潮流量 Q_f	(6)	2 400	7 000	11 000	22 600	87 020	13 700
	(7)	0.15	0.40	1.50	5.0	10.0	8.0
	(8)	0.20	0.40	3.0	10.0	20	10
A (2)式计算(m ²)	(9)	5 540	5 040	6 680	12 400	40 890	89 120
验 A 实测(m ²)	(10)	4 880	4 290	5 890	11 530	49 900	103 200
证 A 误差(%)	(11)	13	19	13	7.7	18.8	11
(3)式计算(m)	(12)	580	800	1 160	2 080	7 266	11 100
B B 实测(m)	(13)	840	1 380	3 100	4 200	13 200	17 800
验 B 误差(%)	(14)	31	42	62	50	45	37
证 (5)式计算(m)	(15)	762	1 610	2 800	4 900	12 300	14 700
(5)式 B 误差(%)	(16)	9.5	16	11	16	6.4	17
H 实测(m)	(17)	5.80	3.10	1.65	2.70	3.70	5.10
H (4)式计算(m)	(18)	9.40	3.30	5.15	4.15	5.60	7.50
验 H 误差(%)	(19)	62	135	210	53	51	47
证 (6)式计算(m)	(20)	6.50	3.90	2.0	2.40	3.32	6.08
(6)式误差(%)	(21)	12	25	21	11	11.4	19
							13.6

由表 1 可见, 面积 A 的验证误差在 20% 以内; (3)式计算的河宽 B 误差太大, 平均达 43%, 最大 62%, 改

用(5)式计算, 平均误差为14% (最大18.8%); (4)式计算的水深误差平均达76%, 最大210%, 改用(6)式后, 平均误差为16% (最大21%). 用文献[1]中的涌潮系数方法, 其结果也达不到要求的精度.

除钱塘江河口外, 又对杭州湾的乍浦、金山、柘林、芦潮港等断面以及三门湾、象山港、乐清湾共25个断面进行了面积计算式的验证(见图1), 其结果也非常令人满意. 可见, (2)式具有较好的普遍性(河床质为粉砂、黏性粉砂).

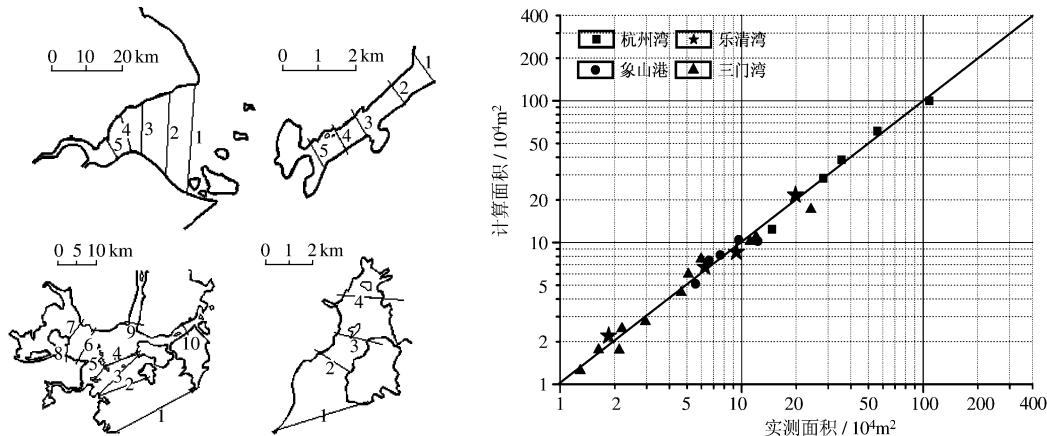


图1 杭州湾、乐清湾、象山港、三门湾各断面位置及面积验证

Fig. 1 Section positions and verifications of Hangzhou Bay, Yueqing Bay, Xiangshan Port and Sanmen Bay

20世纪80年代初进行钱塘江河口的治江规划时, 为避免河宽、水深计算误差偏大, 采用了(2)~(4)式的比值关系, 即(7)式^[5], 其中脚标1,2分别表示治理前、后.

$$\left. \begin{array}{l} A_1/A_2 = (Q_1/Q_2)^{0.9}(S_2/S_1)^{0.22} \\ B_1/B_2 = (Q_1/Q_2)^{0.62}(S_1/S_2)^{0.12} \\ H_1/H_2 = (Q_1/Q_2)^{0.28}(S_2/S_1)^{0.32} \end{array} \right\} \quad (7)$$

用1956~1958年的断面特征和潮流量作为治理前数值, 用数学模型计算缩窄后潮量(已考虑缩窄后高潮位抬升, 含沙量确定困难, 因幂次小, 忽略其变化)推求治理后的断面特征, 如以1991~1993年断面特征作验证, 结果见表2.

表2 治江缩窄后的断面特征验证

Tab. 2 Verification of section characteristics of the Qiantang estuary during and after regulation

1991~1993年(缩窄中的顺直江道验证)							
	闸口	七堡	仓前	盐官	尖山	老虎山	澉浦
基 ΔZ_2 (m)	(1)	0.76	1.10	1.85	3.67	4.30	5.20
础 W_2 (亿 m^3)	(2)	0.20	0.24	0.41	1.75	7.5	10.0
资 T_{e2} (s)	(3)	4.10	4.20	3.95	3.82	3.20	2.85
料 Q_2 (m^3/s)	(4)	1 560	1 620	2 150	5 733	24 810	71 220
A A_2 计算值(m^2)	(5)	4 692	3 763	3 800	10 480	31 190	86 000
验 A_2 实测(m^2)	(6)	4 780	3 580	5 330	8 220	33 660	82 830
证 误差(%)	(7)	1.8	5.1	28	27	9.3	3.4
B B_2 计算值(m)	(8)	820	1 278	2 365	3 960	12 480	15 800
验 B_2 实测(m)	(9)	880	1 400	2 950	3 100	12 870	16 100
证 误差(%)	(10)	6.8	8.7	19	27	0.3	1.3
H H_2 计算值(m)	(11)	5.75	2.4	2.19	3.2	3.21	4.82
验 H_2 实测(m)	(12)	5.13	2.19	2.42	2.96	3.28	4.29
证 误差(%)	(13)	12	2.2	9.5	8.1	2	11

(续表)

2001~2005年(缩窄后的微弯江道验证)							
断面面积 (m ²)	实 测	5 600	4 000	3 600	5 380	31 500	77 500
	计 算	5 460	4 500	4 300	6 480	24 500	76 100
河宽 (m)	实 测	950	1 390	1 870	2 130	7 290	15 570
	计 算	910	1 270	2 100	3 200	7 500	12 450
水深 (m)	实 测	5.90	2.87	2.00	2.52	4.32	5.00
	计 算	6.00	3.54	2.10	2.02	3.26	6.10
							8.30

面积、河宽、水深平均误差分别为 11%、9% 和 8%。再用(2)、(5)、(6)式对治江后的 2001~2005 年的地形作验证,其面积、河宽、水深的验证结果见表 2,三者的平均误差也在 10% 左右。

为了从理论上解释强涌潮河口河宽采用涨潮流计算的合理性,用有涌潮的七堡站 1958 年的一次横向同步观测资料加以解释(见图 2 和表 3)。

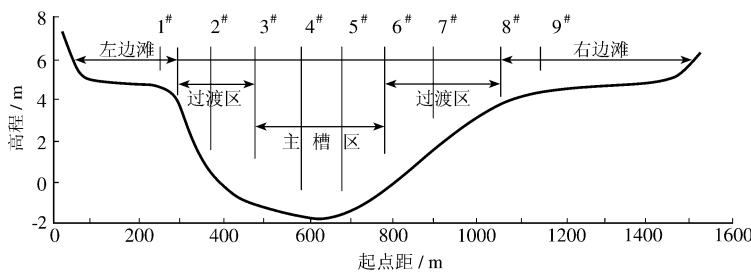


图 2 1958 年七堡站横向同步观测垂线布置示意图

Fig. 2 Vertical layout of synchronous observation in the Qibao section in 1958

表 3 七堡断面观测的涨落潮量

Tab. 3 Flood and ebb tide discharge obtained from measured discharge along the Qibao section (单位: 10⁶ m³)

潮型	潮量	左 边 滩		过 渡 区		主 槽			右过渡区		右 边 滩		全断面
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	9-右岸	9-右岸	
		左岸 290 m	290m-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-右岸	9-右岸	9-右岸	
大潮	涨 潮	3.85	18.56	15.5	16.6	15.5	17.0	10.4	3.07	14.6	115.08		
	落 潮	1.10	15.24	20.0	20.8	17.1	15.2	5.6	0.45	0.65	95.94		
	涨/落	3.5	1.22	0.78	0.80	0.91	1.12	1.86	6.82	24.5	1.20		
中潮	涨 潮	0.91	8.27	7.2	7.6	6.4	5.9	2.9	0.5	1.6	40.84		
	落 潮	0.53	9.83	14.2	14.1	11.6	10.9	3.78	0.3	0.28	65.26		
	涨/落	1.72	0.84	0.51	0.54	0.55	0.54	0.77	1.67	5.7	0.63		
小潮	涨 潮	0.27	4.34	4.6	4.5	3.5	3.0	1.07	0.13	0.15	21.45		
	落 潮	0.20	6.87	8.9	8.8	7.5	7.4	2.1	0.13	0.05	41.88		
	涨/落	1.35	0.63	0.51	0.51	0.46	0.40	0.51	1.0	3.0	0.51		

由表 3 可见:①左右边滩无论大、中、小潮,涨落潮量之比都大于 1,说明边滩由涨潮流控制,主槽则都是小于 1,为落潮流控制,而左右两边的过渡区(左为 II,右为 VI、VII)则表现为,大潮时涨落之比大于 1,中、小潮时小于 1,表现出强涌潮河口不同于一般河口的特殊性,即大潮涨潮流速受惯性力加速度的影响横向流速分布均匀,而落潮受重力作用为主,流速与水深有关;②拓宽河道主要位于过渡区和边滩区,大潮时过渡区的涨潮潮量大于落潮潮量约 12%~86%,边滩涨潮量为落潮的 1~24 倍,输沙更是如此^[5]。说明拓宽河道的主要动力是涨潮潮量,从而解释了潮波变形剧烈的强涌潮河口,计算河宽时需采用涨潮流量和涨潮含沙量。文献[6]作了数模验证;③从全断面大、中、小总潮量来看,落潮总量 2.03 亿 m³,仍大于涨潮总量(1.79 亿 m³),因为径流加上涨潮总量总是大于涨潮潮量,故断面仍应以落潮控制。

2 河口放宽率和面积放大率关系式及其验证

2.1 定义及相应计算式

河宽自上而下因潮流的增大而沿程增大, 称为河宽放宽率。有2种定义:

定义1: 根据《航道整治技术规范》(JTJ285-90), 设河口起始河宽为 B_0 , 1 km后河宽 $B_1=B_0(1+\varepsilon)$, 2 km后河宽 $B_2=B_1(1+\varepsilon)=B_0(1+\varepsilon)^2$, 则 x km处河宽 $B_x=B_0(1+\varepsilon)^x$, 其中: ε 为河宽放宽率。

定义2: 单位河长的河宽增量与河宽成正比, 即 $\frac{dB}{dx}=\alpha B$, 经计算得 $B_x=B_0 e^{\alpha x}$, 其中: α 为河宽放宽率。

很容易证明两种定义之间的关系式为: $\alpha = \ln(1 + \varepsilon)$ (8)

当 $\varepsilon=0.005 \sim 0.05$ 时, 两种方法计算差在0.4%~4%。航道放宽率多为0.005~0.01, 许多天然河口(包括放宽率较大的钱塘江河口)则为0.01~0.05, 因此, 用上述2种定义均可计算河宽放宽率。罗肇森^[7]、唐洪武^[8]、陈志昌^[9]等都是用定义1来计算航道的放宽率, 文献[7]利用窦国仁^[1]的河相关系式, 文献[8]、[9]则是利用平衡输沙概念或含沙量不变来计算放宽率, 所得结果基本一致。钱塘江河口一直选用定义2计算^[5], 不少国外河口^[10]也用指数放宽。钱塘江河口按照有涌潮时的河宽河相关系式: $B_x = 7.5 Q_{fx}^{0.62} S_{fx}^{0.12}$, $B_0 = 7.5 Q_{f0}^{0.62} S_{f0}^{0.12}$, 得

$$B_x/B_0 = (Q_{fx}/Q_{f0})^{0.62} (S_{fx}/S_{f0})^{0.12}$$

而根据放宽率的定义2, $B_x/B_0 = e^{\alpha x}$, 可以很容易地得到:

$$\alpha = \ln[(Q_{fx}/Q_{f0})^{0.62} (S_{fx}/S_{f0})^{0.12}] / x \quad (9)$$

一般河口的河宽关系式用落潮流量来进行计算, 则:

$$\alpha = \ln[(Q_{ex}/Q_{e0})^{0.62} (S_{ex}/S_{e0})^{0.12}] / x \quad (10)$$

可以将河宽放宽率的概念扩展为面积放大率, 即单位河长断面面积的增加率与断面面积大小成正比, 即 $dA/dX = \beta A$ 。同样可得:

$$A_x = A_0 e^{\beta x} \quad (11)$$

式中: β 为面积放大率。用断面面积河相关系式 $A = 4.7 Q_e^{0.9} S_e^{-0.22}$, 无论涌潮或一般河口都适用公式:

$$\beta = \ln[(Q_{ex}/Q_{e0})^{0.9} / (S_{ex}/S_{e0})^{0.22}] / x \quad (12)$$

2.2 钱塘江河口治理前后河宽放宽率、面积放大率的验证

将1956~1958年半潮水位下的河宽 B_x 及断面面积 A_x 沿钱塘江各站点绘于半对数纸上(X 轴为沿程距离, Y 轴为对数纸半潮水位下的河宽及面积), 同时也将治江缩窄过程中的1986年、1991~1993年、治理后的2001~2005年的平均河宽及平均面积均绘于同一张图上(见图3)。

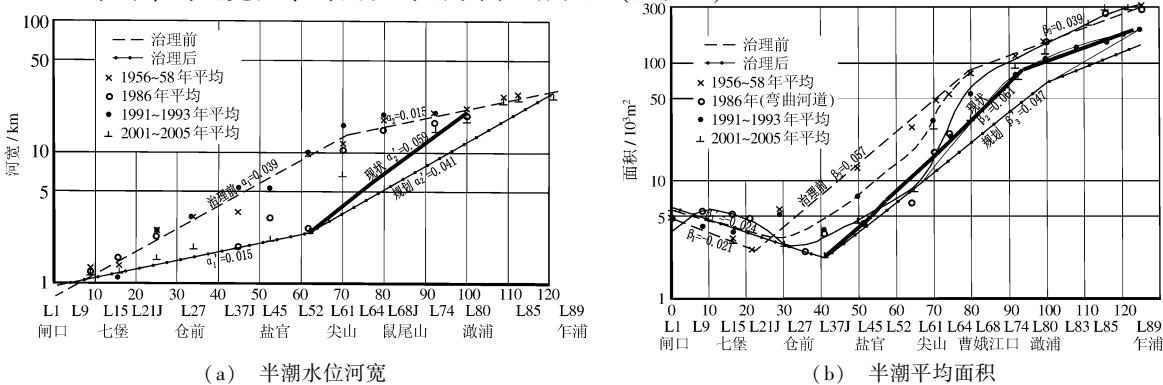


图3 半潮水位河宽及半潮平均面积的变化(乍浦以下未绘于图中)

Fig. 3 Variation of river width and average area of half tidal level

可见,河宽放宽率可分为 3 段,即从 $L_1 \sim L_{61}$ 约 70 km, $L_{61} \sim L_{89}$ 约 50 km, 乍浦至芦潮港约 70 km. 而断面面积放大率分 4 段, $L_1 \sim L_{21j}$ 的 22 km, $L_{21} \sim L_{68j}$ 的 68 km, $L_{68j} \sim L_{89}$ 的 40 km, 乍浦 ~ 芦潮港的约 60 km. 各河段的河宽放宽率及面积放大率实测值与理论计算值的比较见表 4. 其中, 实测值是利用河宽及面积实测值由定义 2 和(11)式求得, 理论计算值则利用数学模型和平均涨潮及落潮流量公式(9)和(12)式求得.

表 4 河宽放宽率及面积放大率验证

Tab. 4 Verification of the enlargement ratio of width and the enlargement ratio of cross-section area

河 段 名 称	河道放宽率 α				断面放大率 β				
	治江前		治江后		治江前		治江后		
	实测	计算	实测	计算	(治江后)	实测	计算	实测	计算
$L_1 \sim R_{61}$	0.039	0.041	0.015	0.017	$L_1 \sim R_{21j} / R_{37j}$	-0.025	-0.026	-0.021	-0.023
$R_{61} \sim R_{89}$	0.0157	0.017	0.040	0.032	$L_{21} \sim R_{68j} / R_{80}$	0.059	0.060	0.061	0.060
$R_{89} \sim$ 芦潮港	0.018	0.015	0.018	0.015	$R_{68j} / R_{80} \sim R_{89}$	0.039	0.038	0.047	0.057
					$R_{89} \sim$ 芦潮港	0.022	0.020	0.021	0.020

由表 4 可见:①河宽放宽率及面积放大率的计算值与实测值均吻合良好, 误差大多在 $\pm 20\%$ 以内, 误差原因是年平均潮量、含沙量的计算误差. 说明计算式反映了最主要的影响因素; ②虽然治江后河宽缩窄幅度较大, 但无论河宽放宽率还是面积放大率, 治江缩窄前后其绝对值变化不大, 说明治理后并未改变其基本属性; ③ $L_1 \sim R_{21j}$ 河段治理前面积放大率 $\beta = -0.025$, 治理后延长为 $L_1 \sim R_{39}$ 的面积放大率 $\beta = -0.021$, 出现负值的原因是含沙量的沿程增幅大于流量的增幅, 使面积沿程减小, 这种现象只在钱塘江这一河段出现, 形成了沙坎的倒坡段.

3 强潮河口弯道特征

河流的弯道特性已有许多研究成果^[3], 但河口双向水流的弯道特征研究较少, 周志德^[10]在 20 世纪 60 年代利用钱塘江、曹娥江(为强涌潮特征)资料建立了如下经验关系

$$\left. \begin{aligned} R &= 125 Q_e^{0.45} \\ \psi &= 77.1 / R^{0.5} \\ L &= (3 \sim 4)B \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: R 为弯道曲率半径; ψ 为圆心角; L 为过渡段长度. 钱塘江河口经 50 年较大幅度的整治, 是否还满足这一关系? 为此用七格、九号坝和盐仓 3 个弯道特征再作验证, 弯道位置示意见图 4, 验证结果见表 5.

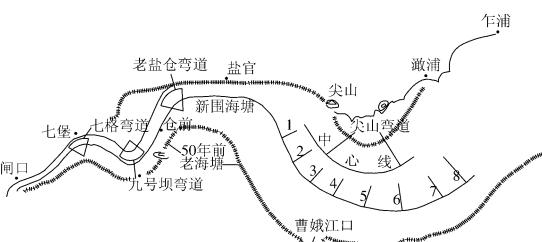


图 4 钱塘江河口地名及弯道位置示意图

Fig. 4 Sketch of Qiantang estuary and bend

表 5 弯道特征值验算

Tab. 5 Verification of river bend characteristic values

弯道名称	落潮流量 $Q_e / (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	曲率半径 R / m		中心角 $\psi / ^\circ$	
		计算值	实测值	计算值	实测值
七格弯道	1 850	3 680	3 800	63	65
九号坝弯道	2 150	3 950	4 000	70	70
老盐仓弯道	3 000	4 560	4 600	65	75

由表 5 可见, 用(13)式计算的曲率半径的精度较高, 中心角的误差在 20% 以内. 对于潮汐河口, 弯道前后断面的潮量变化很大时(如下游的尖山河段), 可用各断面落潮流量按(13)式推求其曲率半径.

对于弯道凹岸的水深与中心线(或平均)水深的关系, Englund 曾建议:

$$\xi_c / \xi_0 = (R_c / R_0)^{c_1 \tan \delta} \quad (14)$$

式中: ξ_c, ξ_0 分别为弯道凹岸和中心线的水深; R_c, R_0 分别为凹岸和中心线的曲率半径, $R_c = R_0 + 0.5B$; 系数 $c=8 \sim 11$; δ 为泥沙的摩擦角。2003~2008 年形成的尖山河弯曲率半径、凹岸水深验证见表 6。可见, 尖山河段凹岸的水深与中心线水深的关系基本满足(14)式。

表 6 尖山河段凹岸水深的验证

Tab. 6 Verification of water depth along convex bank of Jianshan reach

断面号	1	2	3	4	5	6	7	8
半潮水位(m)	2.27	1.90	1.65	1.30	1.10	0.90	0.70	0.50
半潮水宽(m)	3 800	4 900	6 500	8 000	8 800	11 200	17 200	18 000
落潮流量 Q_e ($10^4 \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	0.96	1.38	1.75	2.33	3.18	3.94	6.14	10.18
落潮 R_{eo} (km)	7.740	9.10	10.14	11.54	13.27	14.61	17.78	22.40
落潮 R_e (km)	9.64	11.45	13.39	15.59	17.67	20.21	26.38	31.40
中心线水深 ξ_c (m)	2.67	2.74	3.40	3.47	3.84	3.78	4.29	6.66
$(R_c / R_{e0})^{1.35}$	1.34	1.35	1.45	1.495	1.475	1.55	1.70	1.57
$\xi_e = (R_e / R_{e0})^{1.35} \xi_c$	3.60	3.73	4.95	5.18	5.64	5.65	7.30	10.5
实测 ξ (m)	3.66	4.60	5.84	5.80	4.95	5.40	6.70	9.85
ξ_e 误差(%)	1.6	18	15.2	10.1	1.4	5.7	8.9	6.6

4 结语

(1)一般河口及强涌潮河口断面面积用落潮时的流量和含沙量计算, 强涌潮河口的河宽用涨潮时的流量和含沙量计算, 水深则既可利用涨潮也可利用落潮时的资料来计算;

(2)河口的河宽放宽率可用 2 种定义计算, 但有涌潮河口的河宽放宽率用涨潮时的流量和含沙量, 计算值与实际更吻合;

(3)河口河弯进出口流量变化不大时, 其弯道特征可用(13)式计算, 进出口潮流量相差大于 20%~30% 时, 则应分段各自计算其曲率半径, 其凹岸处的水深关系用 Englund 关系式((14)式)基本可行。

参考文献:

- [1] 窦国仁. 平原冲积性河流及潮汐河口的河床形态[J]. 水利学报, 1964(2): 1~13. (DOU Guo-ren. The morpholohy of fluvial plain river and estuaries[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1964(2): 1~13. (in Chinese))
- [2] 韩曾萃, 符宁平, 徐有成. 河口河相关系及其受人类活动的影响[J]. 水利水运工程学报, 2001(1): 30~37. (HAN Zeng-cui, FU Ning-ping, XU You-cheng. Estuarine hydraulic geometry and impacts of human activities[J]. Hydro-Science and Engineering, 2001(1): 30~37. (in Chinese))
- [3] 钱 宁, 张 仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 339~385. (QIAN Ning, ZHANG Ren, ZHOU Zhi-de. Fluvial processes[M]. Beijing: Science Press, 1987: 339~385.)
- [4] SAVENIJE H G H. Salinity and tides in alluvial estuaries[M]. Armsterdam: Elsevier Science, 2005: 27~28.
- [5] 韩曾萃. 钱塘江河口治理与开发[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 76, 278, 296. (HAN Zeng-cui. Regulation and exploitation of the Qiantang estuary[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003: 76, 278, 296.)
- [6] 韩曾萃, 程杭平. 钱塘江河口考虑滩地输沙的含沙量计算方法[J]. 海洋工程, 1984(3): 34~45. (HAN Zeng-cui, CHEN Hang-ping. Computation of silt concentration in Qiantang estuary with consideration of silt transport in tidal flats[J]. The Ocean Engineering, 1984(3): 34~45. (in Chinese))
- [7] 罗肇森. 河口治导线放宽率的计算[J]. 水利水运工程学报, 2004(2): 55~58. (LUO Zhao-sen. Calculation formula of

- widening rate of estuarine regulation line [J]. Hydro-Science and Engineering, 2004(2): 55–58. (in Chinese)
- [8] 唐洪武, 丁 兵, 杨明远. 河口治导线放宽率的确定 [J]. 水利学报, 2008, 39(1): 59–65. (TANG Hong-wu, DING Bing, YANG Ming-yuan. Determination of widening rate estuarine regulation line [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 59–65. (in Chinese))
- [9] 陈志昌, 乐嘉钻. 长江口深水航道整治原理 [J]. 水利水运工程学报, 2005(1): 1–7. (CHEN Zhi-chang, LE Jia-zuan. Regulation principle of the Yangtze River Estuary deep channel [J]. Hydro-Science and Engineering, 2005(1): 1–7. (in Chinese))
- [10] IPPEN A T. Estuary & coastline hydrodynamics [M]. New York: Mc Graw-Hill Inc., 1966: 493–545.

Verification of fluviomorphology for macro-tide estuary with tidal bore

HAN Zeng-cui¹, CAO Ying^{1,2}, YOU Ai-ju¹

(1. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China; 2. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper gives some verification results of the fluvial formula for macro-tide estuary with tidal bore. In general, the average cross-section area of an estuary can be calculated by the average ebb tide discharge (including runoff discharge) and the average ebb sediment concentration. The formula is widely used for estuaries and bays. However, as the width and depth of macro-tide estuary with tidal bore is wider and shallower than general estuaries, using coefficient of tidal bore is not enough to offset the inaccuracy. Instead, when using the flood tide discharge and flood sediment concentration, the results are in good agreement with field data. By using the flood and ebb tide discharge distribution around the cross-section, it easily explains the reasons for reduced errors. This paper also gives the definition and calculation formula of the enlargement ratio of width and the enlargement ratio of cross-section area based on the 50-year and 130km long distance field data observed before and after the regulation of the Qiantang estuary. The paper verifies the relationship among the characteristics of cross-section, the enlargement ratio of width, the enlargement ratio of cross-section area and the characteristics of river curves.

Key words: fluviomorphology for macro-tide with tidal bore; enlargement ratio of width; enlargement ratio of area; curvity characteristics