

长江口南港泥沙运动的水动力条件

严以新¹, 高进², 郑金海¹, 童朝锋¹

(1. 河海大学海岸及海洋工程研究所, 江苏南京 210098; 2. 湘潭工学院土木系, 湖南湘潭 411201)

摘要:应用流体运动最小阻力原理导出了分流角发育的理论计算公式,并在弓形断面假定条件下,对不同宽度比时的分流角作了计算,得出了与实测值相一致的结果,同时还定量地证明了长江南北港、南北槽分流角发育由小到大,直至极限而消亡的规律.分汊水槽试验表明推移质大多偏向支汊,原因是在分流口支汊一侧由于边界层脱离而“搓”出一个个旋涡以吸引底沙.分析得知,从南港主槽下泄的落潮流,在扩散角增大处,也会产生旋涡并吸引底沙经南槽输移入海.

关键词:长江口;南港;最小阻力原理;分汊河道;兰金涡

中图分类号:TV143+.3 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2002)05-0001-06

泥沙问题是任何一项水利工程都必须着重研究的关键问题之一.长江河口是一个径流量大、泥沙丰富、潮流强的河口^[1],对其进行航道整治首先必须弄清泥沙运动的规律.长江河口是一个分汊型河口,口门宽阔,拦门沙广布,槽滩相间排列,在河流与海洋动力的作用下,径流、潮流、波浪、盐水异重流以及柯氏力等都在影响泥沙的运动,河口的地貌形态对泥沙的运动也会产生重要的影响.既然影响泥沙运动的因素是多方面的,那么就必须进行多学科的研究.本文力图揭示泥沙运动规律的力学机理,即弄清长江口南港泥沙运动规律的水动力条件.包括以下问题:南北港分流口的稳定性问题,进入南港的底沙是否仍从南槽输移入海,它的水动力条件是什么?本文首先推导了河道分流角的理论公式,然后分析了长江口南北港分流角的稳定性,同时根据水槽试验,探讨了长江口南北港分流口底沙运动的规律.

1 分流角发育的理论公式

冲积河流具有一定的自动调节功能,能使来自上游的水、沙通过河段下泄以保持平衡.这种调节功能不仅表现在河床的比降、河宽、水深、床沙及河型的变化上,而且表现在对分流河道的分流角的自动调整上^[2],使分流角在不断变化之中达到最小阻力状态.

河渠均匀流的沿程水头损失 h_f 可用 Darch-Weisbach 公式表示:

$$h_f = \lambda \frac{L}{4R} \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

式中: λ ——沿程水头损失系数; R ——水力半径; V ——断面平均流速; g ——重力加速度; L ——研究段的长度.假设河道的过水断面为弓形,其过水断面的水力半径为

$$R = \omega / \chi = r^2 (\varphi - \sin \varphi) / (2r\varphi) \quad (2)$$

式中: ω ——河道的过水断面面积; χ ——湿周; r ——弓形弧的半径; φ ——水面对应的圆心角($0 < \varphi < \pi$).河宽 b 和水深 h 可以表示为

$$b = 2rsin(\varphi/2) \quad (3)$$

$$h = r(1 - cos(\varphi/2)) \quad (4)$$

把式(2)(3)代入式(1)并将 V 改用流量 Q 表示,有

$$h_f = \lambda \varphi L Q^2 A [(\varphi - \sin \varphi)^3 gr^5] \quad (5)$$

在河道的分流处截取一段作为研究段,概化为图1.假设在研究段内河道为直的,分流前后分段为均匀

流过水断面为弓形,各河段水面所对应的圆心角相等,均为 φ .
 C, B, A 断面的面积、河宽、流量分别为 $\omega_1, b_1, Q_1, \omega_2, b_2, Q_2, \omega_3, b_3, Q_3$,并有 $Q_3 = Q_1 + Q_2$,即在研究段内无流入与流出.对于一条稳定的河流,即自动调整到最小阻力状态的河流,必须满足能耗率最小^[3-5].在研究段内单位时间水流的能耗 W (即能耗率)为 AO, BO, CO 河段能耗率之和:

$$W = \gamma Q_3 (H_A - H_O) + \gamma Q_2 (H_O - H_B) + \gamma Q_1 (H_O - H_C) \quad (6)$$

式中: H_A, H_O, H_B, H_C — A, O, B, C 点处的水位; γ —水的容重.严格说来,不同地点处的 γ 因含沙量、含盐量的变化而有所不同,为方便计,这里设 γ 为常数.一般 H_C 与 H_B 也不相等.求能耗率最小也就是求式(6)的最小值.由于假定了 γ 为常数,式(6)可表示为

$$h_W = W/\gamma = Q_3 (H_A - H_O) + Q_2 (H_O - H_B) + Q_1 (H_O - H_C) \quad (7)$$

其中 $H_A - H_O, H_O - H_B, H_O - H_C$ 为 AO, OB, OC 河段的沿程水头损失 $h_{fAO}, h_{fOB}, h_{fOC}$,在式(6)(7)中忽略了分流处局部水头损失所产生的能耗.

把式(5)代入式(7)有

$$h_W = h_{fOC} Q_1 + h_{fOB} Q_2 + h_{fAO} (Q_1 + Q_2) = \lambda \varphi Q_1^3 L_1 \lambda (\varphi - \sin \varphi)^3 g r_1^5 + \lambda \varphi Q_2^3 (L - L_2) \lambda (\varphi - \sin \varphi)^3 g r_2^5 + \lambda \varphi (Q_1 + Q_2)^3 L_2 \lambda (\varphi - \sin \varphi)^3 g r_3^5 \quad (8)$$

由图1可得出如下关系式:

$$L_1 = S/\sin \theta \quad L - L_2 = S \cdot \cot \theta \quad (9)$$

把(9)式代入(8)式,有

$$h_W = \frac{\lambda \varphi Q_1^3 S}{(\varphi - \sin \varphi)^3 g r_1^5 \sin \theta} + \frac{\lambda \varphi Q_2^3 S \cdot \cot \theta}{(\varphi - \sin \varphi)^3 g r_2^5} + \frac{\lambda \varphi (Q_1 + Q_2)^3 (L - S \cdot \cot \theta)}{(\varphi - \sin \varphi)^3 g r_3^5} \quad (10)$$

由式(10)可知 h_W 仅是分流角 θ 的函数,而其余系数均为常数,因此可以用求极值的方法求出水头损失为最小值时的分流角,将 h_W 对 θ 求导,得

$$h'_W = \lambda \varphi S [-Q_1^3 \cos \theta / r_1^5 - Q_2^3 / r_2^5 + (Q_1 + Q_2)^3 / r_3^5] \lambda (\varphi - \sin \varphi)^3 g \sin^2 \theta \quad (11)$$

令 $h'_W = 0$,可得

$$\cos \theta = (r_1/r_3)^3 [(1 + Q_2/Q_1)^3 - (r_3/r_2)^3 (Q_2/Q_1)^3] \quad (12)$$

把 r 改用河宽 b 表示,则

$$\cos \theta = (b_1/b_3)^3 [(1 + Q_2/Q_1)^3 - (b_3/b_2)^3 (Q_2/Q_1)^3] \quad (13)$$

此即为分流河道夹角的分析表达式,它建立了河床几何形态要素与水流动力要素之间的函数关系式,是泥沙冲淤在地貌形态上的反映.

可以证明,在 $0 < \theta < \pi/2$ 范围内, $h''_W > 0$,因此当 $h'_W = 0$ 时,所求的极值为最小值.此为最小阻力原理的成立提供了理论上的证明,同时还证明了分流角不会超过 90° .

文献[2]也曾导出过河道的分流与汇合角理论公式.但该文假设分汊与汇合后的主河道与主汊宽度相等,其最小阻力原理的表达形式采取各河段的沿程水头损失之和为最小,而本文则是能耗率之和为最小.本文考虑问题较文献[2]要全面,故更切合实际.

2 南北港分流口的稳定性分析

近期长江口南港变化的规律可以概括为:分流口周期性上提下挫,分流口通道交替性兴衰,分流河道阶段性淤浅^[6].长兴岛、横沙岛把南支分为南港与北港,目前南北港的分流口为中央沙(图2).多年来南北港分流口在浏河口与吴淞口之间摆动,是一个多变的分流口,分流口上游的扁担沙与浏河沙交替被冲刷下移,挡

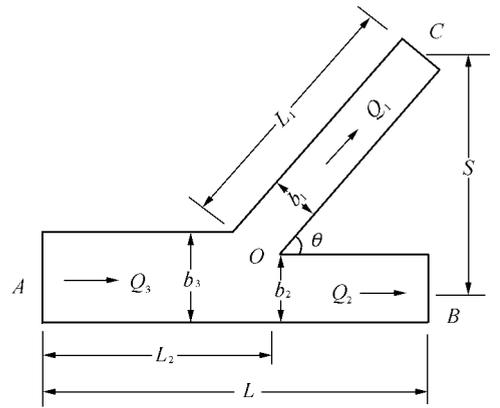


图1 河道分流概化

Fig.1 Generalization of river bifurcation

在北港与南港的上口,因此多次发生切滩.1924年、1978年北港两次切开扁担沙,其泥沙经北港输移入海;1958年、1963年南港上口的浏河沙咀发生切滩.1958~1972年大约有4亿m³底沙进入南港,这些底沙大多经南槽输移入海,而对北槽的影响不大.20世纪80年代以后,长江河口渐趋稳定,但支配长江河口河床演变的规律仍在起作用.目前南北港分流口的2个通道——流向北港的新桥通道与流向南港的南沙头通道下段之间的夹角已达84°,其发育已渐趋极限,南沙头通道下段已经萎缩,在它上游的新浏河沙已被切断,1998年特大洪水加速了这一过程,新浏河沙被切部分在洪水期加速下移,与中央沙合并已成定局,不久南北港分流口将上提,因此可以认为,南北港分流口是不稳定的.

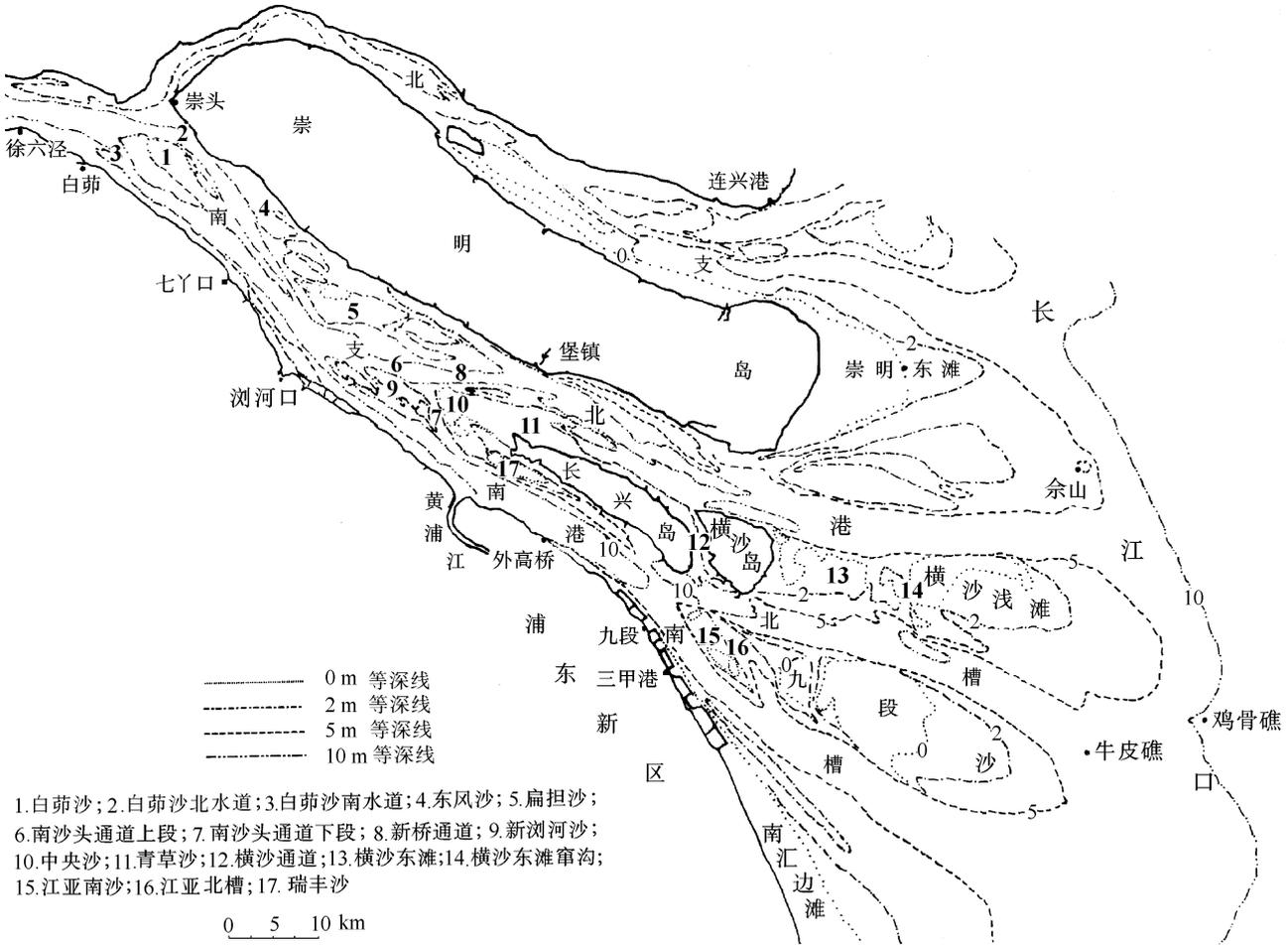


图 2 长江河口河势

Fig.2 Regime at Yangtze River Estuary

式(13)建立了河床几何形态要素与水流动力要素之间的函数关系,分流角是河宽比与分流比的函数.若假设各河段流速相等,式(13)可简化为

$$\cos\theta = \sqrt{1 + b_2^2/b_1^2} - b_2/b_1 \tag{14}$$

或

$$\cos\theta = (b_3 - b_2)/b_1 \tag{15}$$

根据式(14)得出了宽度比(主汊与支汊的) b_2/b_1 与分流角 θ 之间的关系,见表1.

表 1 分汊河道宽度比与分流角关系

Table 1 Relation between diversion angle and width ratio of bifurcated channel

b_2/b_1	1	2	3	4	5	7	10	50	100
θ	65°32'	76°21'	80°40'	82°56'	84°19'	86°55'	87°8'	89°26'	89°42'

表 1 是在过水断面为弓形,且各河段流速相等、沿程水头损失系数相等的条件下得到的,条件过于严格,

因此上述值是近似的,即理论值与实际值可能有些偏差,但所提供的信息是客观的.自然界存在最小与最大的分流角,最小分流角为 $65^{\circ}32'$,此值可能偏大,但最大的分流角不超过 90° 却是真实的,否则它是不稳定的.

分流河道形成之初,支汊与主汊的宽度差不多(例如目前的南槽与北槽),这时分流角的夹角最小,为 $65^{\circ}32'$ (南北槽的分流角正好为 65°).随着支汊的淤浅,河宽变窄,而主汊宽度增大,于是主、支汊的宽度比增大.由表1可知,分流角渐趋 90° ,支汊发育到极限,阻力增大,河道淤废,表示它的衰亡即已到来,又会形成新的分汊河道,开始新一轮的演变.

目前南北港分流口通道的宽度比为3.6,分流角为 84° (据1997年1/50000的长江口地形图).由表1可知,理论值为 82° ,两者基本相等.

目前处于中央沙前缘的南北港分流口发育已渐趋极限,其上游的新浏河沙已被切断,1998年特大洪水已使该串沟的10m等深线接近新宝山水道的10m等深线,被切割的新浏河沙东半部下移与中央沙合并只是个时间问题.届时,南北港的新分流口将上提到石洞口附近,位于新浏河沙串沟东部沙体的头部.原来的南北港分流口南通道——南沙头通道下段将逐渐萎缩,被逐渐发育起来的新浏河沙串沟所代替.由于该串沟西部沙体的体积较小,被洪水冲刷、变形、移位是必然的,因此未来新的南北港分流口将是不稳定的.目前,南北港新老分流口的交替过程尚未完成,1998年特大洪水切割新浏河沙时冲刷下来的底沙所产生的后果还未暴露出来.未来还将有更多的泥沙被冲刷进入南港主槽,这是一个潜在的、必然会发生的问题,这对北港的影响不大.这些泥沙是否还会像1963年南港上口切割浏河沙咀那样,底沙大多经南槽输移入海?为此,首先要弄清底沙经由南槽输移入海的机理,而这又取决于南北槽分流口的水动力条件.

3 南港底沙由南槽输移入海的水动力条件

横贯于南港上口的浏河沙咀,于1958年、1963年两度切滩,1958~1972年共有约4亿 m^3 底沙进入南港和南槽,以淤积体的形态逐步下移,致使南港与南槽成为复式河槽,并发生阶段性淤浅.南港与南槽分别于20世纪70年代和80年代水深才得以恢复,而在此期间,北槽的河势相对稳定^[7],没有发生明显的淤积,落潮流的分流比从1954年的30%增加到1985年的48%,而含沙量北槽都小于南槽.弄清发生这种现象的水动力条件是认识南港泥沙运动规律的关键.

为证明南北槽分流口水动力条件决定底沙下移过程中会向南槽偏转,河海大学海岸及海洋工程研究所进行了分汊水槽输沙试验.图3是试验装置平面图.试验时在分汊口上游铺一层底沙,约厚2cm,粒径为0.82mm,水槽的分汊角为 30° .

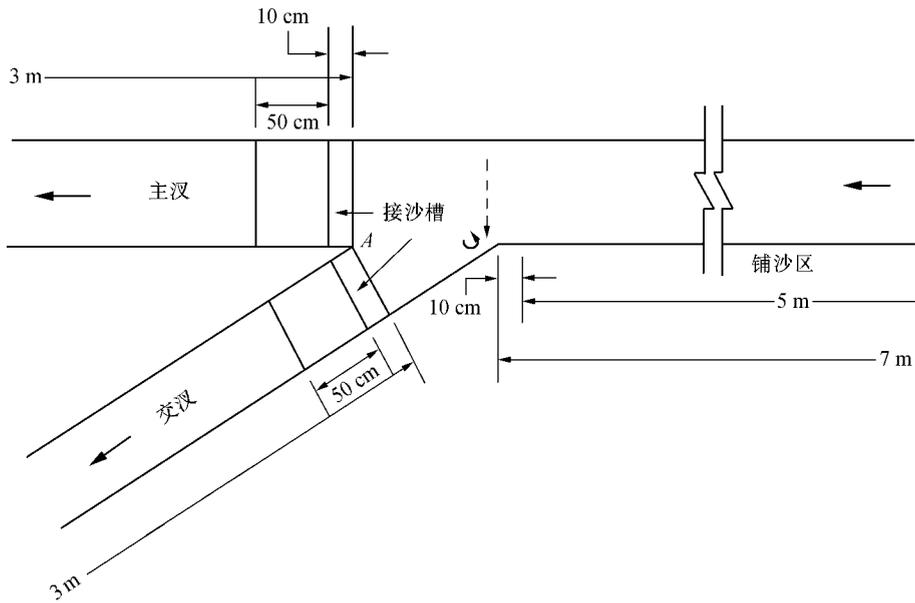
试验开始启动水泵,逐步调节流速至泥沙起动,以观察底沙向下输移情况.在分汊口由于扩散角较大,边界层发生分离现象,在一定的流速条件下,支汊一侧被“搓”出一个立轴旋涡(图4).此涡下部紧贴槽底^[8],但涡面并不明显,这是由于在分汊处存在一个回流区,旋涡与回流都是逆时针旋转,相互叠加使水面趋平.此涡在支汊口门附近产生,随来流与边界条件的变化有时也会偏下发生,一旦形成即顺流向下,不久就会由于粘滞摩擦而消失,随后又会产生一个新的旋涡.它的运动方向和路线受流速与槽底沙堆的影响,一般从沙堆边缘低凹处通过.每当旋涡产生后,紧接着就会引起其上游的底沙向涡的方向前进一段距离,旋涡不断地产生和消失,底沙也脉动式地前进,向支汊输移(图5),这一作用一直影响到水槽边界.

试验中所观察到的立轴旋涡类似于兰金涡(Rankine Vortex)有明显的涡核,它显然是组合涡^[9].组合涡中心部分为涡核,为有旋流,外缘为有势流.组合涡的速度分布为

$$v = \begin{cases} \frac{\omega}{2} r & r \leq a \\ \frac{\omega}{2} \frac{a^2}{r} & r > a \end{cases}$$

式中: a ——涡核半径; r ——距涡核中心距离; ω ——角速度.在半径为 a 的圆内,流体以 $\omega/2$ 的角速度旋转.

旋涡吸引底沙的力学机理是:当旋涡形成时,涡中水流旋转所产生的惯性离心力为漏斗状涡面的水头差,即压强梯度力平衡.这个平衡是相对于旋涡的平均转速而言的,旋涡的转速上下不等,在底部由于存在摩擦牵引,转速小,涡面水头差产生的压强梯度力大于惯性离心力,故产生指向旋涡中心的底流.由于漏斗状涡面可以扩散至边界,因此旋涡吸引底沙的作用也可以影响至边界.



在分汉口产生一个立轴旋涡——兰金涡，放置在主槽中的底沙跟随旋涡进入支汉，带箭头的虚线表示底沙运动方向，旋涡进入支汉后因粘性扩散而消失

图 3 分汉水槽的输沙实验平面

Fig.3 Plan of sediment transport experiments in bifurcated channel



图 4 立轴旋涡(箭头所指处)(侧视)

Fig.4 Vertical whirl indicated by arrow (side view)



图 5 底沙向支汉输移状况(俯视)

Fig.5 Bed load moves towards tributary (birds view)

据此，分析一下南北槽分流口的地貌特征就会发现，它和分汉水槽之间有某些相似之处：这就是扩散角较大，尽管两者的边界条件相差很大。从图 2 可以看出，由于南港是复式水槽，从南港下泄的落潮流来自两个通道，一个是长兴岛涨潮沟，另一个是南港主槽，这两个通道的下部由于受柯氏力的作用都向南偏转，呈喇叭口状。因扩散角较大，落潮流下泄时，边界层发生分离而产生旋涡。对长兴岛涨潮槽而言，落潮时在其口门所形成的旋涡顺势流经南北槽分流口上的淤积带——位于瑞丰沙咀下延部分的沙脊，旋涡所吸引的底沙就堆积于此；另外从南港主槽下泄的落潮流，在九段和五号沟附近，也会产生旋涡，这不仅吸引南港主槽的底沙南偏，而且也吸引淤积带上的底沙进入南槽。这些底沙一部分堆积在江亚南沙，一部分堆积在南汇边滩，而大部分被落潮流输移入海。由于旋涡与任何自然现象一样，它的形成是有条件的，即必须有适合的流速梯度，而这个条件在南北槽分流口是完全具备的。因为落潮之初，流速从零开始，至落急流速达到最大值，其间总会有不同的流速段适合于不同的边界条件而形成旋涡。这表明，从南港下移的底沙在不同的来流条件下有不同的运动规律，其输移方向和输沙率也不同。以上所述就是南港底沙大多经南槽输移入海的水动力条件或力学机理。由此可以认为，当新的南北港分流口上提到新浏河沙时，即使有大量的底沙冲刷下移，只要南北槽分流口的水动力条件未发生变化，那么进入南港的底沙大多仍然会从南槽输移入海。

必须指出,底沙从南槽输移入海是有条件的,这个条件就是南北槽分流口的水动力条件未发生变化.由于深水航道的开挖,在一定程度上会影响南北槽分流口的水动力条件,因此,也就会影响到底沙向南槽的输移.

4 结 论

a. 南北港分流口目前正处在新老交替期,因此是一个多变时期,它是不稳定的.目前南北港分流角已达 84° ,渐趋极限.

b. 南港底沙从南槽输移入海的水动力机理是,在瑞丰沙咀与南港主槽下端岸线南偏,扩散角增大,水流下泄时边界层将发生分离而产生出一个个旋涡,由此吸引底沙南偏进入南槽.分叉水槽的输沙试验对此提供了佐证.

参考文献:

- [1] Yan Yixin, Gao Jin, Mao Lihua, et al. Calculation of diversion ratio of the North Channel in the Yangtze River Estuary[J]. China Ocean Engineering, 2000, 14(4): 525 ~ 532.
- [2] 高进. 冲积河流的汇合与分流[J]. 地理学报, 1994(5): 429 ~ 439.
- [3] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 313 ~ 317.
- [4] 张海燕著. 河流演变工程学[M]. 方铎, 曹叔尤译. 北京: 科学出版社, 1990. 绪论 iii ~ iv.
- [5] 高进. 长江河口的演变规律与水动力特征[J]. 地理学报, 1998(5): 264 ~ 269.
- [6] 严以新, 高进, 诸裕良, 等. 长江口深水航道治理与河床演变关系的初探[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(5): 7 ~ 12.
- [7] 严以新, 高进, 诸裕良, 等. 长江口北槽优良河势的机制[J]. 水利水运工程学报, 2000(3): 8 ~ 12.
- [8] 华东水利学院. 水力学(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 1979. 203 ~ 204.
- [9] 庄礼贤, 尹协远, 马晖扬. 流体力学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1997. 313 ~ 330.

Hydrodynamic conditions for sediment movement in South Waterway of Yangtze River Estuary

YAN Yi-xin¹, GAO Jin², ZHENG Jin-hai¹, TONG Chao-feng¹

(1. Research Institute of Coastal & Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Department of Civil Engineering, Xiangtan Polytechnic Univ., Xiangtan 411201, China)

Abstract: A theoretical formula for calculation of the diversion angle is developed by means of the least resistance principle. The diversion angles for different river widths are calculated on the assumption of arch-shaped cross-section, and the calculated results are consistent with the measured data. It is verified that the diversion angle included between the North Waterway and the South Waterway develops from small to large, and then dies out. Experiments performed in a bifurcated tank demonstrate that most of the bed load moves towards the tributary, where a series of vortexes are generated due to flow deviation from boundary layers, and that, for the same reason, the ebb flow from the South Waterway of the Yangtze River Estuary will push the bed load into the South Channel due to the similar vortexes around the diversion angle included between the North Channel and the South Channel.

Key words: Yangtze River Estuary; South Waterway; least resistance principle; bifurcated channel; Rankine Vortex