

长江口深水航道治理与河床演变关系初探

严以新¹, 高 进², 诸裕良¹, 郑金海¹

(1. 河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 湘潭工学院土木系, 湖南 湘潭 411201)

摘要 简要分析了北槽具有优良河势的各种因素, 并根据长江口深水航道治理工程一、二、三期及远景规划实施后北槽分流比的数模计算结果, 初步研究了深水航道治理与河床演变之间的关系. 物理模型试验结果显示, 在分流河口由于边界层脱离而产生一个立轴旋涡——兰金涡(Rankine Vortex), 因而引发横向流, 藉此可以解释底沙偏向南槽的输移问题.

关键词 长江口 航道治理 北槽 河床演变

中图分类号 TV147

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2001)05-0007-06

长江口深水航道治理是我国经济建设中的一件大事, 意义重大, 为世人所瞩目. 治理工程由分流口、南导堤、北导堤、丁坝群及航道疏浚五部分组成, 第一期工程航道浚深至 8.5 m (通航基面, 下同), 第二期工程航道浚深至 10 m, 第三期工程航道浚深至 12.5 m, 远景规划为航道浚深至 15 m. 第一期工程已于 1998 年 1 月 27 日开工、2000 年 4 月竣工. 三期工程实施后, 将从根本上解决制约上海航运事业发展的拦门沙航道水深严重不足的问题, 满足第三、四代集装箱船全天候通航及第五、六代集装箱船乘潮进出港, 同时可兼顾 10 万 t 级散装货船也能乘潮进出长江口, 以带动长江三角洲和整个长江流域的经济发展并把上海建成国际航运中心, 从而有力地促进国民经济的持续发展.

长江河口是一个分汊型河口, 是在径流量大、泥沙丰富、潮流亦强的特定条件下形成的. 长江口在徐六泾以下, 由崇明岛分隔为南支和北支, 南支河段在浏河口以下又被长兴岛和横沙岛分隔为南港与北港, 南港在九段以下再被九段沙分隔为南槽与北槽, 形成三级分汊四口入海的格局(图 1).

长江平均径流量约 $30\,000\text{ m}^3/\text{s}$, 洪季可达 $56\,200\text{ m}^3/\text{s}$, 最大洪峰流量超过 $90\,000\text{ m}^3/\text{s}$, 而最小枯季流量仅为 $4\,620\text{ m}^3/\text{s}$. 洪季的大、小潮涨潮潮棱体分别为 53 亿 m^3 和 16 亿 m^3 , 而对应的枯季的大、小潮涨潮潮棱体分别为 39 亿 m^3 和 13 亿 m^3 . 长江口的泥沙主要来自上游. 水体平均含沙量为 0.55 g/L , 年均输沙量达 4.86 亿 t, 其中洪季占总量的 87.2%, 推移质约占输沙总量的 1/10.

长江口航道自外海经北槽与南港进上海港. 航道天然水深为 6.0 m, 依靠疏浚维持在 7.0 m, 年维护量约为 700 万 m^3 . 目前大型集装箱船与矿石散货船仅能候潮或卸载进出上海港, 严重地制约了上海及长江沿岸经济的发展.

为此, 本文首先分析长江口深水航道整治工程所在河段——北槽的优良河势, 然后利用数学模型预测深水航道治理一、二、三期工程及远景规划实施后, 在不同疏浚深度下北槽的正常分流比, 并探讨治理工程对河床演变的影响及河床演变对长江口治理工程的反作用.

1 北槽优良河势

1.1 河势顺直

北槽自 1954 年正式形成以来, 分流比从 1964 年的 32.45% 增至 1983 年的 50.2%. 分流比迅速增大的原因是因为它的主槽(指进口段的 10 m 深槽)与南港主槽(10 m 深槽)两者的轴线衔接较为顺直的缘故.

从 1998 年海图上量得南港主槽与北槽进口段主槽轴线间的夹角仅 7° , 而南港主槽与南槽进口段河道的中轴夹角为 21° , 两者相差 3 倍. 在北槽形成之初, 那时它的过水断面显然要比南槽为小, 由于它与南港主槽

衔接较为顺直,才得以发育.为什么会顺直?因为它是在 1954 年特大洪水期形成的,河流有“大水趋直”的特性.一般来说,长江河口的各个通道,在其形成之初都比较顺直,否则就不会形成.北槽至今历史还不长,1998 年洪水期其分流比曾达到 67.3%,又体现了“趋直水大”的特性.河道顺直是形成北槽河势优良的一个极为重要的内边界条件.

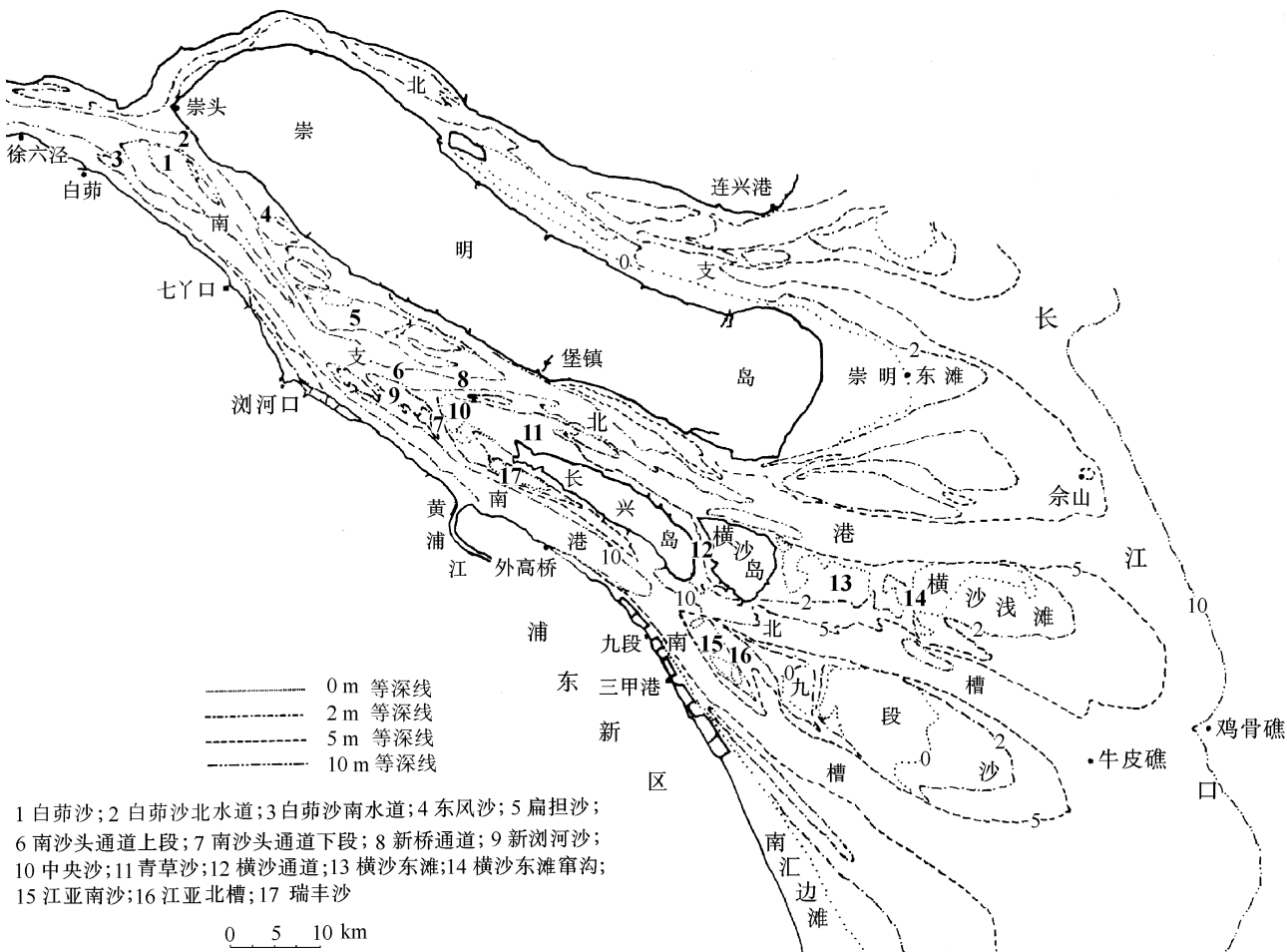


图 1 长江口河势图(1997)

Fig.1 Yangtze River Estuary (1997)

1.2 南北槽的分流角呈锐角状

可以证明,冲积河流的分流与汇合角参与河流的自动调整^[1].自然界不存在大于 90°的分流与汇合角.南、北港与南、北槽演变的一个特点是分流口上提下挫.当分流口的沙洲被落潮流冲刷下挫时,分流角将增大,当增大到一定程度(接近于 90°)时,由于阻力过大,必然会在其上游的某个薄弱环节发生切滩,形成新的分流口并具有较小的锐角状分流角及较直的通道,重新开始新一轮演变过程,1918 年和 1978 年北港分流口切开扁担沙和 1963 年南港分流口切开浏河沙咀即是如此.对南、北槽分流口而言,由于它形成的时间还不长,这种周期性的演变还未显示出来.目前其分流角为 65°,但若不加控制而任其发展下去,则必然要发生重大变化.

当分流角趋近于 90°时,分流口上游将要发生切滩,形成新的分流口,这是南、北港分流口发生交替变更的机制.有些切滩发生时,老分流口的夹角还不到 90°,那是在上游的某个薄弱环节处被切开.这就是说,老分流口的分流角趋近于 90°时,预示着其上游的某处要发生切滩,但切滩不一定都在分流角趋近于 90°时发生,需视具体情况而定.当分流口通道中有一支趋于衰亡时,分流角必然要增大,要趋近于 90°.南支与北支的分流角已近于垂直,故北支淤废.如今南、北槽的分流角为 65°,河势正处在优良时期,这也是北槽具有生命力的又一个重要的内边界条件.

1.3 南北槽分流口流场的水动力特征有利于南槽排沙

在分流口,岸边呈喇叭形,河道放宽,河水流到此处,发生边界层分离现象,产生旋涡.旋涡产生后顺势进

入偏转汉道,随后由于粘性扩散而消失.此旋涡属立轴旋涡——兰金涡(Rankine Vortex),是一种组合涡^[2].根据理论分析,长江口南北槽分流口存在此种旋涡,并由此而形成有利于南槽排沙的水动力特征.

从河海大学进行的水槽试验可观察到,在分汉口上游的主槽中放置一层底沙,放水后在分汉口形成一个接着一个的立轴旋涡,进入支汉后因粘性扩散而消失.旋涡通过时,水面呈漏斗状.放置在主槽中的底沙,向下输移过分汉口时,几乎是垂直地进入偏转支汉,表明在分汉口底部存在横向流,使主槽中的底沙过分汉口时偏转进入支汉.试验还表明,当流速增大到一定值时,进入顺直水槽中的底沙才逐渐增多.

根据水槽试验的结果,可以分析南北槽分流口的水动力特征与泥沙运动的关系.由图 1 可以看出,从南港下泄的落潮流,在 10 m 深槽东端,由于河道放宽,发生边界层分离,形成兰金涡,此涡顺势进入南槽,并引发横向流,吸引底沙进入南槽.南北槽分流口流场特定的水动力条件,决定了南槽多排底沙的机制.1963 年南港分流口发生切滩,大量底沙进入南港,这些底沙大多经南槽输移入海,进入北槽的并不多.正因为如此,才使得在南支河段未整治之前先行实施北槽拦门沙深水航道的治理成为可能.但一般认为,南槽之所以成为底沙下泄的主要通道,是由于南槽与邻近南岸的南港落潮主槽顺直贯通、南港主槽中的底沙必然径直向下输移进入南槽.事实上,正如前文所指出的,按 10 m 深槽轴线的顺直程度(图 1),应优先进入北槽.再有,南港主槽的北侧为瑞丰沙咀,从这里冲刷下来的泥沙(底沙)向下输移时偏北,显然也应进入北槽,然而却是大部分底沙进入了南槽.这表明,在分流口有一个力把底沙引入南槽,这只能是涡流所致.尽管上述分汉水槽的输沙试验与南、北槽的情况不尽相同,但两者的输沙机制却是一致的.

1.4 北槽口门外鸡骨礁海域的旋转流有利于北槽宣泄

在长江口门外,发育有一个水下三角洲,近百年来,10 m 等深线有进有退,显示了水下三角洲沉积的不均一性.1879 ~ 1980 年水下三角洲 10 m 等深线推进速度如表 1 所示.

表 1 1879 ~ 1980 年长江水下三角洲 10 m 等深线推进速度

Table 1 Forward and backward speed of 10 m isobath of underwater delta in Yangtze River Estuary from 1879 to 1980						
地 点 (纬度)	南汇咀 (N31°00′)	南槽口 (N31°03′)	北槽口 (N31°10′)	横 沙 (N31°15′)	北港口 (N31°20′)	余 山 (N31°25′)
推进速度/(m·a ⁻¹)	134	106.5	- 38.1	- 5.9	10.3	45.1

由表 1 可知,由于北槽口门外 10 m 等深线推进速度为负值,因此为冲刷区,而南汇咀与南槽口门外 10 m 等深线向海推进最快,故为强烈沉积区.

陈吉余^[3]认为,北槽口门外鸡骨礁水域为潮流旋转最强区,M₂ 分潮的旋转率为 0.7,物质难于在此沉积.由于北槽口门外沉积缓慢,使北槽纵剖面保持较大的比降,水流宣泄得以通畅,可以说这是北槽保持优良河势的重要外边界条件.

2 治理工程后的北槽分流比预测

长江口深水航道治理工程的平面图如图 2 所示.该工程由建在北槽南、北两侧的两条导堤、丁坝群,建在江亚南沙顶端的分流口工程,以及航道疏浚五部分组成.河海大学建立了长江口三维数值模型^[4],用以分析研究工程前后长江口流场变化.一、二、三期及远期工程后北槽落潮流分流比计算结果见表 2^[5].

表 2 长江口数值模拟计算的北槽落潮流分流比

Table 2 Calculated diversion ratio of North Channel										%
工程前		一期		二期		三期		远景		
洪季	枯季	洪季	枯季	洪季	枯季	洪季	枯季	洪季	枯季	
60.15	59.81	48.67	49.97	47.28	46.74	47.95	49.10	48.36	47.49	

3 深水航道治理与河床演变的关系

深水航道治理与河床演变的关系包括两部分内容:一是航道整治对河床演变的影响;二是河床演变对航道治理产生的后果.

3.1 深水航道治理对河床演变的影响

整治工程的影响最明显的表现是丁坝的阻水作用.从以上的预测可以看出,一、二、三期工程和远景规划

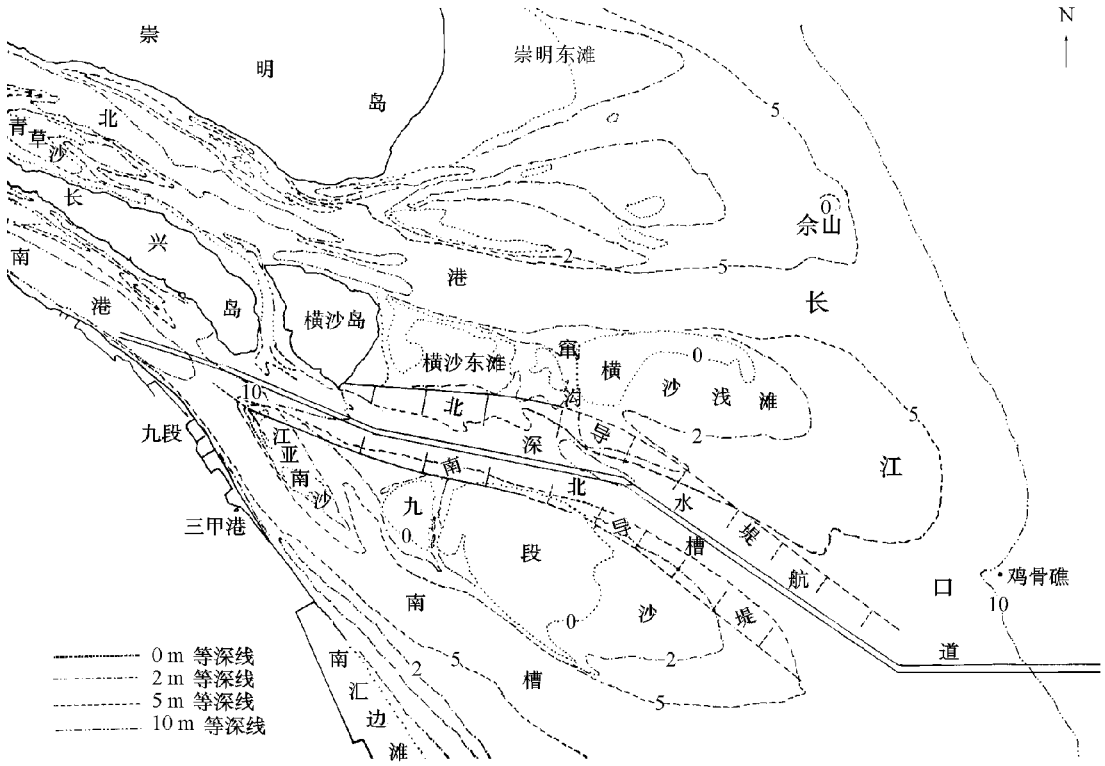


图 2 长江口与整治工程平面图

Fig.2 Plan of regulation project for Yangtze River Estuary

实施后,北槽的分流比要比工程前减少 9.84% ~ 13.07%,但所有的预测值都小于 50%.这与 80 年代初以后南北槽的实际分流比各占 50% 的状况接近.经验表明,当北槽的分流比略小于 50% 时,对河势稳定和航槽维护是有利的.分流比过大,带来的泥沙就较多;分流比小,河道又容易淤积,其结果不是分流口通道不畅就是口门淤浅.

由于南导堤建在江亚南沙与九段沙北侧的滩面上,使河水对九段沙的绕流加长,也即人为地增大了九段沙的长度,会不会增加水流的阻力?这影响不大.因为,即使没有南导堤,进入南港下段的水流仍然要在江亚南沙和九段沙产生绕流.在这里,南导堤的作用是把河水对两个沙洲的绕流变成对一个沙洲的绕流.而且,工程的作用消除了水流在江亚南沙尾部和九段沙头部漫滩流所消耗的能量.当然,导堤上的丁坝群会对进入北槽的水流产生阻力,南槽是否就增大分流比,从而发生冲刷?另外,从大的方面看,由于丁坝群在南港,是否北港的分流比增大,影响到南支下段的河床演变?我们认为是不会发生实质性变化的.这是因为,第一,南导堤挡住了江亚北槽、九段沙壅沟及滩面上原来汇入南槽下段的落潮流,使其改由北槽下泄,增强了北槽落潮流的动力,这在某种程度上抵消了由于丁坝群所增加的北槽水流的阻力.第二,丁坝群的阻水作用,虽会增加北槽乃至南港的水流阻力,但北导堤挡住了横沙东滩滩面上由于风浪掀沙进入北槽的泥沙以及横沙东滩壅沟由落潮流带进北槽下段的大量泥沙,使这部分泥沙复归北港,这部分泥沙进入北港下段河道所增加的水流阻力与丁坝群所增加的北槽乃至南港水流的阻力,在某种程度上也可以平衡.丁坝群的阻水作用限制了目前北槽分流比不断增大的趋势,使之保持在一个较为适当的比例上,这对河势稳定与航槽维护是有利的.

由于南、北导堤在平面上布置成弯道形式,有利于底沙沿东南方向输移出海,避免在东偏北的出口航槽处堆积,但却失去了北槽原先入海口门正对鸡骨礁海域的优良的外边界条件.在整治工程控制下,北槽的入海口门向南偏转,这会不会影响北槽的宣泄?至少在短期内不会.因为丁坝有束水增大流速的作用,可以抵消由于偏离鸡骨礁海域而产生的负面影响.这种影响要较长时间才能显现出来,在河口地区落潮流情况下,这种作用也成立,物模与数模均可证明,因此最不利的情况是,口门外的沉积速度加快,增大了航槽的疏浚量.

3.2 长江口河床演变对治理工程的影响

要知道长江口河床演变对治理工程有些什么影响,首先要知道河床演变的规律.在 80 年代以前的 100

多年中,长江口河势多次发生变化,原因是徐六泾以上河段江岸崩塌,长期失守,导致大量底沙进入河道并以淤积体的形式缓慢下移.其结果对北支而言是进入河道的泥沙难以输移入海,因其落潮流的分流比较小,遂使河床淤浅,至 1958 年,北支的排泄能力几乎降为零.1958 年以后,进潮量已大于落潮量,至 70 年代大量底沙被涨潮流推入南支上口堆积.对于南支,由于大量底沙充塞河道,使主泓大幅度摆动,引起冲刷,迫使沙洲动荡不定,即所谓一沙动,诸沙皆动.被冲散的泥沙在下移的过程中,堵塞于南北港分流口,致使南北港分流口多次发生交替性切滩和南北港的阶段性淤浅.由于北支的淤浅,排泄能力丧失,在大洪水年代,为满足排洪要求,河势必然要发生变化,于是在 1954 年特大洪水期间,长江口三级分汊四口入海的格局得以形成.进入南北港的大量泥沙,经河口拦门沙河段,逐渐推移入海,至 80 年代初期以后,长江口的河势已相对稳定^[6].其原因在于产生大量泥沙进入南支的外部因素已经消除.徐六泾以上河段岸边已在 40 年代末期得到整治,而徐六泾自 50 年代江心洲围垦成陆以后,江面束窄,由 13 km 减至 5.8 km,已成为节点河段.徐六泾上游河势对下游已不产生直接影响.到 80 年代初,北支由于进一步淤浅,使涨潮流的阻力增大,底沙倒灌南支的现象已经消除.长江口南、北两岸坚固的堤防及横沙岛、长兴岛先后形成,为南支及南北港提供了稳定的边界条件,长江口河势已进入相对稳定的发展阶段,各河段将按其自身的条件,在不同的来水来沙条件下进行调整,以维持平衡,并使水流达到最小阻力状态.所谓稳定,只是相对于 80 年代以来的径流量而言的,长江口泥沙堆积仍然偏多,只要大通洪峰流量超过 $70\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,长江河口就要发生变化便是证明^①.长江口大的格局稳定,是指它三级分汊四口入海的格局稳定,因为它是在百年一遇的大洪水(1954 年)期正式形成的.这不等于没有局部的变化.近期长江口河床演变的主要特点是:分流河口的周期性上提下挫,分流口通道的交替性兴衰,分流河道的阶段性淤浅,南、北支,南、北港如此,南、北槽也将如此,其根源即在于长江口泥沙堆积偏多,是以前江岸长期失守时留下的“后遗症”.这一规律还将在相当长时间内起作用.

1954 年特大洪水,白茆沙大量被冲失,底沙下移,引发了 1963 年南港分流口切滩,大部分底沙进入南港;70 年代淤积南港中央沙脊(瑞丰沙咀下延),80 年代中央沙脊为南港主泓所切,切断下的沙体即江亚南沙.90 年代江亚南沙下移与九段沙头部相连,南北槽分流口上提到江亚南沙头部,目前正处于下挫阶段.由于治理工程,分流口鱼咀控制了这一下挫之势,但仍在缓慢的下移之中.

自 1963 年南港分流口发生切滩以来,至今已有 37 年,南港分流口又要发生切滩,南北港分流角已趋近 90° ,南港分流口通道——南沙头通道下段已经萎缩,新浏河沙被切,一分为二已成定局,新的南港分流口通道即将形成.1998 年特大洪水加速了这一进程.新浏河沙被切断的沙体将下移与中央沙合并(图 1),届时南北港分流口将上提到新浏河沙头部,新一轮演变周期又将开始.本次南港分流口切滩(过程尚未完成)将没有 1963 年切滩那样严重,原因在于白茆沙北水道稳定畅通,加上 1998 年的洪水比 1954 年的为小(1998 年大通流量为 $81\,700\text{ m}^3/\text{s}$,1954 年大通流量为 $92\,600\text{ m}^3/\text{s}$),1998 年洪水期白茆沙基本未被冲失.几年后,当南港新分流口正式形成时,会有一定的泥沙进入南港,但对北槽、对整治工程不会构成威胁,原因是沙量不大,不会造成严重的淤浅.

未来,若遇 1954 年那样的洪水,情况会如何?可以肯定的是,白茆沙的冲失量不会超过 1954 年,因此南、北港的淤积量也不会超过 1963 年南港分流口切滩后下移的泥沙量,但毕竟会有大量的泥沙进入南、北港.那么进入南港的泥沙会不会再一次淤积中央沙脊、被切,并使南北槽分流口上提?答案是肯定的,河床演变的规律将会继续起作用,那时,瑞丰沙将下延,园园沙航道将淤浅,南、北槽,尤其是南槽会发生淤积,到时只有采取工程措施处置了.不过,这只是设想,像 1954 年那样百年一遇的洪水发生的几率并不大.

至于大量底沙进入北港,这并不会给北槽带来什么不利影响.进入北港的泥沙向下输移,惟一可能进入北槽的通道是横沙通道(又名小港),因为经横沙东滩窄沟或越滩进入北槽的通道已被北导堤挡住.由于北港主槽是一微弯河道,青草沙位于弯道凸岸,进入北港的挟沙水流,流经北港主槽时,大量泥沙首先落淤青草沙,经横沙通道进入北槽的落潮流含沙量就不会高,因此,对北槽河势不会产生不良影响.事实上,北港的阶段性淤浅,还有助于南港和北槽分流比的增大.

一期工程已告完成,并经受了 1998 年特大洪水的考验.检测证明,长江口及北槽河势基本稳定,北槽分

①长江口航道治理工程领导小组科技组.长江口航道治理研究(第一集).1981.

流比和分沙比继续保持良好状态,已建工程进一步稳定了分流口和北槽边界,治理功能已经显现^①.

4 结 语

- a. 本文分析表明,北槽河势正处于优良阶段. 因此现阶段进行长江口深水航道的治理,是十分有利的.
- b. 利用已建的长江口数学模型,预测了一、二、三期及远期工程后北槽落潮流分流比. 计算结果表明,工程后北槽分流比要减少 9.84% ~ 13.07% .
- c. 治理工程对河势的稳定是有利的. 河床演变的趋势也不会对工程形成大的威胁.

参考文献：

[1] 高进. 冲积河流的汇合与分流[J]. 地理学报,1994,(5):429~439.
[2] 清华大学水力学教研室主编. 水力学(上册)[M]. 北京:人民教育出版社,1981. 185~193.
[3] 陈吉余. 长江口拦门沙及水下三角洲的动力沉积[J]. 华东师范大学学报,1995,(3):1~22.
[4] Zhu Yuliang, Zheng Jinhai, Mao Lihua, et al. Three-dimensional nonlinear numerical model with inclined pressure in the Yangtze river estuary[J]. Journal of Hydrodynamics,2000,12(1):57~66.
[5] 王谷谦, 周海, 季岚. 长江口河床演变及北槽 12.5 m 深水航道治理工程[J]. 水运工程,1999,(10):52~56.
[6] Yan Yixin, Gao Jin, Mao Lihua, et al. Calculation of diversion ratio of the north channel in the Yangtze estuary[J]. China Ocean Engineering, 2000,14(4):525~532.

Preliminary Study on Relationship Between Deepwater Channel Regulation and Riverbed Evolution

YAN Yi-xin¹, GAO Jin², ZHU Yu-liang¹, ZHENG Jin-hai¹

(1. College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
2. Dept. of Civil Engineering, Xiangtan Ploytechnic Univ., Xiangtan 411201, China)

Abstract :The advantageous regime of the North Channel is briefly discussed in this paper. Based on the calculation of the diversion ratio for the regulation project after stages I, II, and III and the future plan, the relationship between the deepwater channel and riverbed evolution is studied. The experimental results show that a vertical vortex—the Rankine Vortex will appear in the diversion region of the river due to the departure of boundary layer. Therefore, a transverse current will appear to push the sediment towards the South Channel.

Key words :Yangtze River Estuary ;deepwater channel regulation project ;North Channel ;Rankine Vortex ;riverbed evolution

^①上海航道勘测设计研究院. 长江口深水航道治理工程二、三期工程可行性研究报告. 1999.