

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.06.010

张幸农,夏云峰,曹民雄.感潮河段航道整治设计理论与方法探讨[J].水利水运工程学报,2019(6):86-95. (ZHANG Xingnong, XIA Yunfeng, CAO Minxiong. Study on design theory and method of waterway regulation in tidal river[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(6): 86-95. (in Chinese))

感潮河段航道整治设计理论与方法探讨

张幸农,夏云峰,曹民雄

(南京水利科学研究院,江苏 南京 210029)

摘要:通过长江下游大量航道整治研究成果的总结提炼,探讨和论述感潮河段航道整治设计理论与方法。结果表明:根据不同的径流和潮汐影响,感潮河段中可划分为常年潮流段、季节性潮流段和常年径流段3个区段;根据河型特征和滩槽格局,浅滩类型有单级分汊型、多级分汊型、水下心滩型和水下沙洲型浅滩四种。应综合考虑航道整治影响因素及外部条件,确立航道整治总体原则,梳理得出不同区段设计通航水位及其与上下游衔接,以及整治参数(整治水位和整治线宽度)的确定方法;针对各类浅滩特点,采取相应的整治思路和整治工程措施,整治建筑物包括混凝土构件混合堤和新型生态守护结构。

关 键 词:感潮河段;航道整治;长江;设计理论与方法

中图分类号: U617 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2019)06-0086-10

感潮河段一般为大型平原冲积河流,江阔水深,航运自然条件优越,如长江和西江下游感潮河段均属于“黄金水道”中价值最高的航段,实施深水航道整治工程对于国民经济振兴与发展意义重大。然而,感潮河段水沙动力条件与河床演变复杂,沿岸人类活动频繁、外部限制条件众多,航道整治技术难度大,但目前关于感潮航道整治工程的设计理论与方法尚未成形,严重滞后于工程实践,急待在现有基础上进行探讨和归纳。

纵观近百年来国内外平原河流航道治理工程,其设计理论与方法是基于河流泥沙工程学基本原理,遵循“应势利导、束水攻沙”的方针,浅滩段采用筑坝束水攻沙,或辅以疏浚措施,改善航道水深条件。由此形成了浅滩类型划分及碍航特性分析、航道设计通航水位和整治参数(整治水位和整治线宽度)计算确定,以及整治工程措施和整治建筑物结构型式选择与设计等一系列的理论和技术方法,并且经过许多中小河流的具体工程实践得到了检验。我国通过60多年来西江、汉江、湘江、松花江和京杭大运河等中小平原河流的航道整治工程^[1],也形成了相应的航道整治设计理论与方法的技术体系。对于近河口的感潮河段航道治理,包括美国密西西比河下游和欧洲易北河口、莱茵河口的航道治理工程,我国近10多年来实施的长江口深水航道治理工程和南京以下12.5 m深水航道治理工程,以及珠江出海口门段航道治理工程等,同样也是延用了原有的设计理论与方法,但在实践中发现了许多问题。例如,对于长江下游感潮河段,与其他中小河流相比,受上游径流和河口潮汐双重影响,不同径潮组合下水沙动力特征更为复杂,且河床沙质覆盖层更厚、冲淤变化幅度更大,浅滩段碍航特性规律难循,同时,沿岸码头桥梁密布,往往需统筹兼顾选择多汊路通航,更重要的是涉水工程建设必须符合生态环境保护和水利防洪的要求。因此,基于中小河流实践的航道整治设计理论与方法难以完全适用,海岸和长江口航道治理中采用的大型整治建筑物结构型式设计和施工方法,以及欧美发达国家先进的治河理念及工程设计与方法等等,虽有许多值得借鉴参考之处,但总体上与感潮

收稿日期:2019-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51679147)

作者简介:张幸农(1960—),男,上海人,教授级高级工程师,博士,主要从事河流泥沙方面研究。

E-mail: xnzhang@nhri.cn

河段航道整治具体情况差异较大,也难以照搬引用。因此,有必要及时进行相关的梳理和总结。

本文主要依据长江南京以下 12.5 m 深水航道治理工程,通过已有研究及设计成果的归纳总结和分析提炼,针对感潮河段航道整治设计理论与方法的重点问题,包括河道区段及水沙运动特性、浅滩类型及碍航特性、设计通航水位、航道整治原则与思路、整治参数、整治措施与建筑物结构型式等,进行探讨和论述,以期完善航道整治理论和技术体系,促进河流动力学理论发展和河道治理工程技术水平的提高,从而体现出学术理论意义和工程应用价值。

1 感潮河段水沙动力特性、区段划分和浅滩类型

1.1 水沙动力特性

感潮河段日内潮位呈现涨落变化,潮波上溯过程中,受径流与河床边界条件阻滞的影响,潮波变形明显,一般呈现日内两涨两落的日潮不等现象,如长江下游河段^[2-4];总体上潮位仍为两涨两落过程,但沿程潮差和涨落潮历时各不相同,表现为自上而下潮差有所增加,涨潮历时沿程略有变大,落潮历时沿程略有减小。据统计,在长江南京以下河段,新生圩—五峰山段平均潮差在 0.67 ~ 1.38 m,平均涨潮历时约为 3 h 20 min,平均落潮历时约为 9 h;五峰山—江阴段平均潮差在 1.40 ~ 1.69 m,平均涨潮历时约为 3 h 32 min,平均落潮历时约为 8 h 51 min;江阴—天生港段平均潮差在 2.05 ~ 2.44 m,平均涨潮历时约为 3 h 45 min,平均落潮历时约为 8 h 35 min。

从潮流运动特征看,沿程水流流向取决于上游径流与下游潮汐之间的相互作用影响程度,可能为日内两涨两落的双向流过程,也可能表现单一向下流过程。双向流情况下,河段内落潮时上游水位高于下游水位,纵比降为正值,涨潮条件下上游水位低于下游水位,纵比降为负值,并且涨潮纵比降大于落潮纵比降。在长江江阴以上河段内中、洪水期基本无涨潮流,只有枯水大潮时才有明显的涨潮流,实测资料表明,扬中河段,枯水大潮平均涨潮流速为 0.2 ~ 0.5 m/s,平均落潮流速为 0.37 ~ 0.82 m/s,当上游流量大于 40 000 m³/s,不存在涨潮流,呈单向水流运动特征;江阴以下河段,上游流量 10 000 m³/s 遇下游中等偏大潮条件下,整体流态成往复流,徐六泾以上落潮平均流速基本大于涨潮平均流速,上游径流 60 000 m³/s 遇下游中等偏大潮条件下,涨潮流较弱或无涨潮流。

从泥沙分布和运动特征看,感潮河段悬沙多为粉细沙,含沙量分布规律表现为洪季大于枯季、大潮大于小潮、落潮流大于涨潮流;主槽一般大于边滩、汊道主汊一般大于支汊。含沙量垂线分布基本符合 Rose 分布,呈现表层小、底层大的情形,但受潮汐影响程度不同,不同时段不同区域含沙量垂线分布也呈现不同的特点。河床底质一般均为细沙,且级配较为均匀,在长江南京以下河段,悬沙中值在 0.005 ~ 0.010 mm,河床质中值粒径在 0.2 ~ 0.3 mm,90% 以上部分悬沙颗粒在床沙中不存在,应为冲泻质而不参与造床作用,仅不到 10% 的床沙质(或称临底悬沙)以跃移方式运动参与造床作用。

1.2 区段划分

感潮河段径潮动力作用相互交织,沿程不同时间呈现不同流态,水沙运动规律十分复杂,河床冲淤频繁多变,但以往常规仅按潮区界、潮流界,或是河流近口段、河口段和河口外海滨段等笼统的概念进行区分^[5],仍有较大的随意性,给航运工程水文标准确定和浅滩河床冲淤分析等造成“河-海”分界和衔接的混淆,因而有必要根据河段沿程径潮特征,确立具体的依据指标,进一步进行区段划分。

据有关研究^[6],采用月平均潮位年变幅多年平均值和多年平均潮差两特征值的比值作为分界指标。月平均潮位年变幅多年平均值按下式计算:

$$\Delta Z_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_{i1} - Z_{i2}) \quad (1)$$

式中: n 为统计年数; Z_{11} 为统计年内某年最高月平均潮位(m); Z_{12} 为统计年内某年最低月平均潮位(m)。

多年平均潮差,以 ΔZ_2 表示,则是统计年数内所有日内高潮位与低潮位差值的平均值。事实上, ΔZ_1 主要由具有周期变化的径流所决定,水位年变幅的大小说明了径流对水位的影响程度, ΔZ_2 则由潮汐所控制,其量值大小说明了潮汐对水位变化的影响程度。因此, $\Delta Z_1/\Delta Z_2$ 是一个反映径潮关系的特征值,作为航运工程水文标准的分界指标,应该是合适的。

由此,以潮流常年到达点、季节性到达点和潮区界 3 个点为界限,将感潮河段划分为 3 个区段,其中最下游的区段为常年潮流段,位于洪水潮流界以下,对应的 $\Delta Z_1/\Delta Z_2 \leq 1$,表明区段内潮汐影响十分明显;中间区段季节性潮流段,位于枯水潮流界至洪水潮流界之间,对应的 $\Delta Z_1/\Delta Z_2 = 1 \sim 5$,表明区段内潮汐作用影响不甚明显;最上游的区段为常年径流段,位于枯水潮流界以上,对应的 $\Delta Z_1/\Delta Z_2 > 5$,表明区段内潮汐影响不明显。

1.3 浅滩类型

一般地,感潮河段河床底质为细沙,浅滩是指泥沙淤积而出现的水下堆积体形成的沙埂或沙脊。根据河型特征和滩槽格局,浅滩可分为单级分汊型、多级分汊型、水下心滩型和水下沙洲型等类型。

单级分汊型浅滩又分为微弯型单级分汊浅滩和鹅头型单级分汊浅滩,通常出现在常年潮流段,与平原河流汊道浅滩基本相似,在汊道进出口门处或汊道中部,或因水流分散或因主流过渡,造成输沙能力减弱,导致泥沙淤积形成浅滩,如仪征水道的世业洲汊道右汊进口处出现的浅滩(见图 1)。

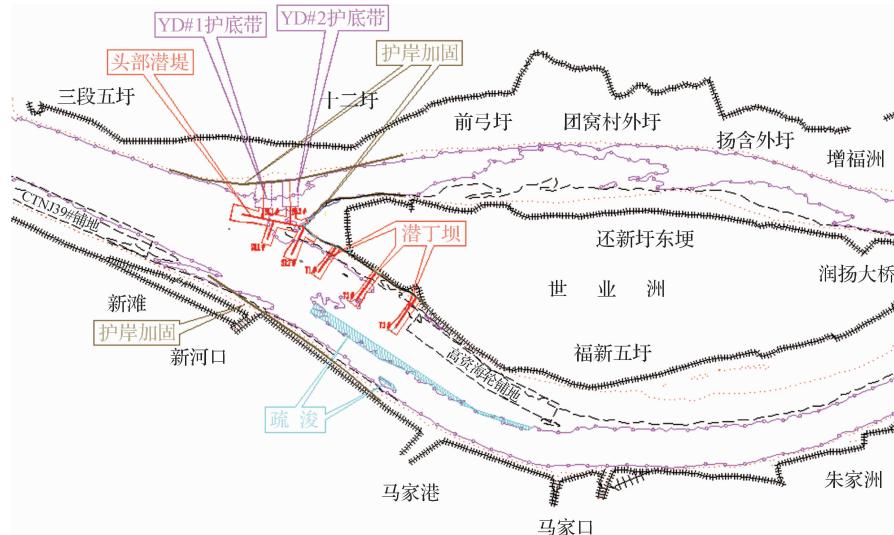


图 1 单级分汊型浅滩——世业洲浅滩

Fig. 1 Single-stage branching shoal—Shiyezhou shoal

多级分汊河型中出现浅滩,一般在潮流变动段,虽与单级分汊型浅滩有相似之处,但也有其固有特性。由于多级分汊河型河宽相对较大,洪漫滩发育并不充分,受涨落潮流交替影响,河床冲淤变化特征远比单级分汊复杂,各汊道河床处于调整之中,往往是在沙洲头部或汊道进口段易出现浅滩,如福姜沙河段南水道和北水道进口浅滩(见图 2)。

水下心滩型浅滩一般在潮流变动段,因河道呈长顺直型,河床略宽大,水流动力有一定强度,具有足够的输沙能力,虽无法维持窄深的单一河道形态,但也可能形成分汊河道。与径流长顺直河道浅滩有类似之处,但区别也较明显,径流顺直河道往往因两侧边滩周期性向下蠕动而形成浅滩,在潮流变动段,则多在中部深水区域出现不稳定的心滩,如口岸直水道的鳗鱼沙心滩(见图 3),造成航槽淤积而形成浅滩。

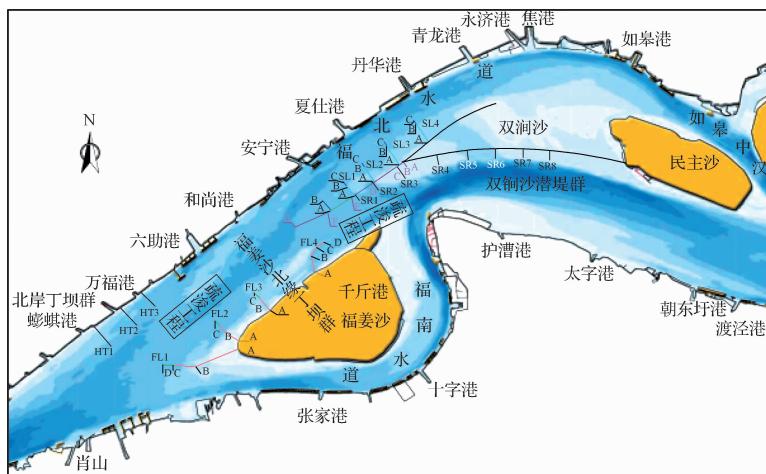


图2 多级分汊型浅滩——福姜沙浅滩

Fig. 2 Multi-stage branching shoal—Fujiangsha shoal

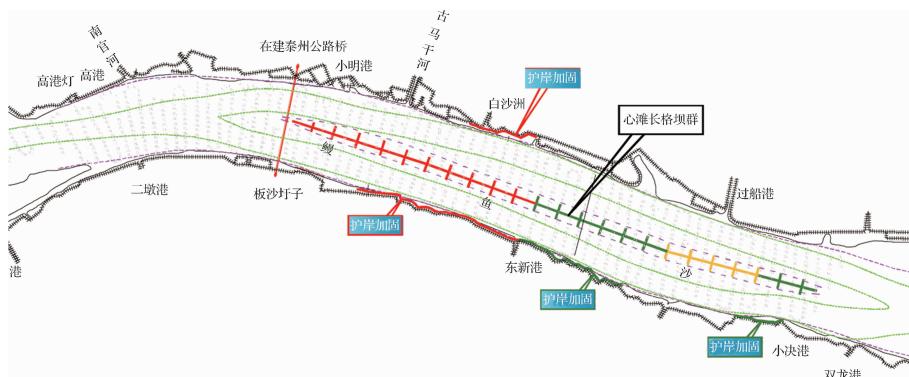


图3 水下心滩型浅滩——鳗鱼沙浅滩

Fig. 3 Underwater mid-channel shoal—Manyusha shoal

水下沙洲型浅滩基本上出现在常年潮流段。由于河道宽阔,涨落潮流水流分散,洪漫滩发育不明显,呈现出大片不稳定的浅水沙洲或水下心滩,径潮流动力强劲且不断变化。沙洲或心滩高潮时淹没于水下、低潮时又出露,滩面和各汊道泄落潮流变化多端,流路及动力很不一致。河床冲淤频繁且幅度很大,各汊道或深槽一旦泥沙淤积过多则出现碍航浅滩。典型的例子是通州沙水道、狼山沙水道和白茆沙水道中的浅滩(见图4)。

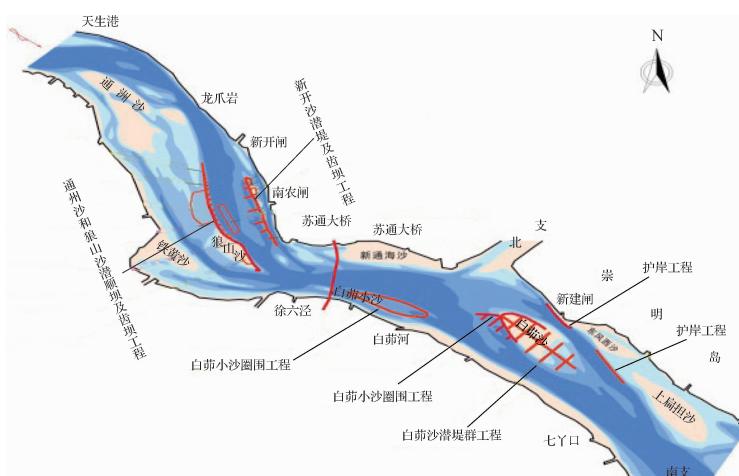


图4 水下沙洲型浅滩——通州沙、白茆沙浅滩

Fig. 4 Underwater sandbank shoals—Tongzhasha shoal and Baibaosha shoal

2 感潮河段航道整治原则

2.1 航道整治影响因素

感潮河段一般流域经济发达,水运资源丰富,航运自然条件好,但河道水沙运动和河床演变复杂,且人类活动频繁,这些因素往往对航道治理形成诸多制约。通常航道整治影响因素及外部条件有以下几方面:

(1) 主航道稳定畅通和两岸需求。感潮河段通江达海,通常是国家内河水运主通道的主要组成部分。航道治理首先须考虑确保主航道稳定畅通,达到既定航道标准并与上下游良好衔接,整治后维护量较小,运行畅通、安全可靠。同时,感潮河段流域内社会经济高度发达,两岸大型工矿企业密布,航运需求多、要求高、紧迫性强,并且存在众多跨河建筑物。在主航道达到既定航道标准的前提下,须尽量满足和适应流域内航运需求,确保社会经济发展。

(2) 河势稳定与防洪排涝。感潮河段河道水深流急,河床沙质覆盖层深厚,河床冲淤幅度较大,滩槽格局往往产生变化,甚至出现重大的河势调整,不仅可能导致浅滩段航道条件恶化,而且对沿岸港口、桥梁、取排水等涉水工程的安全也形成重大威胁。同时,感潮河段两岸城镇密集、人口密度很高,防洪排涝要求极高,尤其是堤防稳定和内涝排水受到社会各方面的高度关注。

(3) 生态环境保护。感潮河段两岸经济发达、人类活动频繁,江河生物多样性易受破坏,航道治理能否与河道生态环境相互协调,保持社会可持续发展,是必须慎重考虑的重要前提条件。

(4) 通航安全与高效。感潮河段航运发达,往往港汊林立、船舶航行密度很大,航行安全隐患多,必须选择合适的航道线路,科学合理地布设各类航道定线,确保通航安全和高效。

(5) 整治工程可靠与合理。感潮河段沙质覆盖层厚,河床冲淤幅度很大,整治建筑物型式、尺度、护底范围,以及材料可选性、施工的方便性及切实可行性方面,均需要周密考虑,做到既安全可靠又经济合理。

2.2 航道整治原则

应在充分认识水沙特征、河床演变特点与趋势、滩浅碍航特性的基础上,从水资源综合利用的角度出发,考虑社会经济和工程技术多方面因素,确定航道整治总体原则^[7]。一般包括以下几个方面:

(1) 统筹兼顾、综合治理。应按国家发展战略目标,从水资源综合利用角度出发,根据国家批复的航道发展规划,结合河道水利治理规划、环境保护规划及其他外部条件,综合考虑水利防洪、生态环境保护和城乡供水等各方面因素,确定航道整治总体方针。

(2) 统一规划、系统治理。一般应将长距离河段作为一个整体统一规划航道治理目标和规模,在认识河道水沙运动、河床演变和浅滩碍航特性的基础上,确定整治设计参数和整治工程措施,并系统考虑整治工程与上下游河段航道工程的相互衔接关系,综合确定各分段整治工程的实施时机和顺序。

(3) 以人为本、建设生态航道。树立“生态优先”的理念,航线选择和整治工程布设及施工应尽量避免影响水生动物的生存条件或干扰其生活习性,采用生态型整治建筑物,并考虑增殖放流、绿化岸滩等生态补偿措施,尽可能使得整治工程发挥出改善沿江景观、促进湿地发育和保护珍稀水生物等功能,实现航道治理与生态环境良好协调。

(4) 因势利导、河势控导与局部调整相结合。应充分利用河道有利条件和稳定河势格局,遵循水流、泥沙运动和河床演变规律,通过护岸、护滩等控导工程措施,稳定河势、固滩稳槽,引导河势向有利于航道的方向变化发展。同时以稳定滩槽格局为基础,因势利导地构筑潜堤(或坝)群、护滩带或护底带等工程措施,对局部浅段进行导流或束流,增强水流输沙能力,冲刷航槽,改善或稳定浅滩航道条件。

(5) 确保通航安全。应严格按国家相关标准和行业规范,在满足船舶航行安全的前提下,选择航道线路和布设各类航道定线,科学合理地确定整治工程方案及其选择整治建筑物结构型式,从航道基本条件上消除船舶航行安全隐患。

(6) 工程结构安全可靠且经济合理。应与工程河段的自然条件相匹配,根据水深、流速、波高、地质、施工条件等因素,合理确定整治工程结构。按既安全可靠又经济合理的原则,首先选用技术成熟已成功应用的结构型式,并尽量采用新型结构建筑物,根据各类结构特点、施工难易程度、施工工期、结构耐久性、后续调整适应性及造价等因素,进行综合比选。

(7) 实时跟踪、动态管理。感潮河段河床冲淤频繁,浅滩碍航特性往往随时演化,因而在航道整治工程规划、设计和实施的全过程中,贯彻实时跟踪、动态管理的原则,加强水沙运动和河床冲淤的监测和分析研究,科学、适时地对工程作出必要的优化和设计变更,调整施工方案和施工计划。

3 感潮河段航道整治工程设计参数

3.1 设计通航水位确定方法

如前述,感潮河段受上游径流与河口外潮汐双重影响,河段内会出现水流双向流动及(或)水位产生周期性波动。因而航道设计通航水位的确定很为复杂,依据相关研究结果^[8-9],按前述的划分区段,分别进行设计通航水位的计算与确定,以及与上下游河段分界和衔接。

(1) 设计最高通航水位可按频率分析法确定,以年最高潮位为计算样本序列(对受风暴潮影响严重的增水情况,按水文统计理论进行大值处理),标准取重现期20年一遇,资料取用年限要求至少20年。对于潮汐作用影响明显的常年潮流段($\Delta Z_1/\Delta Z_2 \leq 1$),可按耿贝尔极值I型曲线进行理论频率适线;对潮汐影响不太明显的季节性潮流段和不明显的常年径流段($\Delta Z_1/\Delta Z_2 > 1$),可按皮尔逊III型频率曲线进行理论频率适线。各区段及与上游径流河段设计高水位不存在分界,且自然形成衔接。

(2) 设计最低通航水位可按低潮累积法进行计算确定,保持与上游径流河段标准一致,即设计低水位历时累积频率大于98%,各等级航道设计最低通航水位标准按《港口与航道水文规范》(JTS145—2015)取值(表1),且分段提高标准取值,与上下游河段形成逐渐平顺过渡相接。在长江南京以下河段,常年径流段和潮流变动段采用航行基面为设计最低通航水位,常年潮流段采用理论最低潮面为设计最低通航水位,不仅偏于安全,而且可与上下游河段形成更好的平顺衔接关系。

表1 感潮河段航道设计最低通航水位低潮累积频率取值

Tab. 1 Standard values of low tide accumulative frequency of designed lowest navigable water level in tidal reach

航道等级	常年潮流段	季节性潮流段	常年径流段
I , II	≥90%	90% ~ 95%	≥98%
III , IV	90%	90% ~ 95%	95% ~ 98%
V ~ VII	90%	90%	90% ~ 95%

3.2 整治参数确定方法

感潮河段航道整治工程主体是控制洲滩边界的守护工程,仅仅是利用整治建筑物压缩浅滩段局部过水面积,提高整治水位时河道输沙能力,改善或维持航槽稳定。因而整治参数(整治水位和整治线宽度)并不是直接用于确定整治建筑物的尺度,基本仅存理论上的意义。

感潮河段同样存在造床流量,在不同区段造床流量由不同的径潮动力组合而形成。利用造床流量法或平滩水位法计算得到的整治水位,其实际意义是分析整治效果的典型水位,可理解为“实施整治工程后,对河床冲淤起到最大调整作用的水位变化幅度”。同理,感潮河段整治线宽度实际意义是分析整治效果的典型河宽,并且是通过浅滩段局部过水面积压缩比来体现的,可理解为“实施整治工程后,河床冲淤已达到航道尺度要求的浅滩段局部过水面积压缩比”。因此,感潮河段航道整治参数的确定,是基于现行相关理论及方法,通过分析整治效果与整治建筑物尺度而联立进行的。归纳起来,具体的应用途径包括以下几个步骤:

(1) 首先依据实测资料,计算确定浅滩段河道造床流量,并按水位流量关系确定对应的水位,结合平滩水位法,确定浅滩段整治水位;

(2) 按现行航道整治线宽度有关公式,计算得到整治线宽度,作为初步的参考值。若是水下守护工程类型,此步则可省略;

(3) 依据步骤(1)确定的整治水位和步骤(2)得到的整治线宽度初步参考值,布置整治建筑物,确定其高程和平面尺度;

(4) 通过分析计算,必要时通过数学模型计算或物理模型试验,针对造床流量和典型洪水流量,分析浅滩整治效果,以及整治建筑物引起的洪水位增高和局部冲刷,判断其对河道防洪、周边建筑物的影响和自身稳定性;

(5) 考虑河道防洪和局部冲刷等因素,按不同整治建筑物高程和平面尺度得到浅滩段整治前后水深比与流速比之间的关系,以及流速比与整治建筑物压缩过水面积比的关系,确定调整后的整治建筑物高程和平面尺度;

(6) 按调整后的整治建筑物高程和平面尺度,重复步骤(4),不断调整、计算分析,直至得到满足整治效果和河道防洪及局部冲刷等因素要求的压缩过水面积比,最终确定整治建筑物高程和平面尺度。

4 感潮河段航道整治思路及工程措施

4.1 航道整治思路

根据前述感潮河段航道整治原则,应尽量采取因势利导的整治工程措施,一般情况下浅滩段整治思路包括以下几个层次:

(1) 控制河势稳定^[10]。在与防洪、生态环境、沿岸港口、桥梁和取排水等外界条件协调的情况下,针对节点河岸或关键洲滩实施护岸工程措施,确保稳定良好河势条件,或促使河势向有利于航道的方向发展。

(2) 选择最优航线^[11]。在河势相对稳定的条件下,选择适应沿岸航运需求、维护量较小、安全可靠、经济合理的航道线路。

(3) 控导关键部位洲滩。针对关键部位洲滩或水下低滩,采取护滩、窜沟封堵、甚至汊道潜坝限流等控导工程措施,固滩稳槽,塑造稳定深槽或主流流路,实现和维持不同区段深水航道的“目标河型”。

(4) 局部浅区束水攻沙。针对局部浅区,采用水流调整或束水攻沙的整治工程措施,包括低滩隔流潜导堤、边滩丁顺坝群、洲头鱼嘴坝群、水下心滩固定潜坝群等等,增强浅区输沙能力,冲刷航槽、改善航道水深。

4.2 整治工程措施

以长南京以下 12.5 m 深水航道治理为例,对于感潮河段各类型浅滩,主要有以下整治措施^[12-13]。

(1) 单级分汊型浅滩,通常采用限制支汊发展、增强主汊浅段水动力的工程措施。如世业洲水道(如图 1),洲头低滩布置一条潜堤和南北侧各 2 道丁坝,守护世业洲洲头低滩,减缓水流对洲头的顶冲,归顺右汊进口水流进入航槽;洲头潜堤北侧丁坝轴线上布置 2 道护底带,控制左汊发展;世业洲右缘布置 3 条潜丁坝,增大右汊中上段退水期水流动力冲刷航槽,提高或改善航道水深条件。

(2) 多级分汊型浅滩,易采用稳定分汊河势格局、控制洲滩头部、增强局部浅段水动力的工程措施。以福姜沙水道(如图 2)为例,选择福中水道和福北水道为 12.5 m 深水航道,维持福南水道 10.5 m 深水航道;福姜沙左缘布置丁坝群,守护福姜沙左缘边滩、缩窄左汊河宽,增大江中深槽和边滩冲刷,改善江中航道水深条件;双涧沙头部布置潜堤,在已建潜堤基础上继续增高和向上游延伸,潜堤两侧双涧沙南、北侧滩面上布置丁坝,改善二级分汊口入流条件,守护双涧沙上部两侧滩面,增大福中和福北两汊进口段落潮流动力冲刷航槽,提高或改善航道水深条件;靖江边滩和福北进口段等碍航浅段辅以实施必要的疏浚措施。

(3) 水下心滩型浅滩,易采用水下滩槽分置格局的工程措施,稳固心滩,对航槽导流增深。如口岸直水

道鳗鱼沙心滩(图3),分别选择心滩两侧深槽为上下水航道;心滩滩面上布置由长顺坝和格坝组成的龟背状潜格坝群,防止心滩冲刷变形,同时促进两侧深槽冲刷,稳定航道水深条件;心滩守护工程两侧岸段为局部流速增大岸段,采取抛石护岸加固工程措施,提高岸坡稳定性,确保河道平面形态稳定。

(4) 水下沙洲型浅滩,易采用稳定洲滩或控制沙洲头部的工程措施,对航槽导流增深。如通州沙和白茆沙水道(图4),通州沙尾部与狼山沙左缘布置潜顺坝,顺坝左缘布置短齿坝,防止洲滩冲刷,固定航道右边界,并减少东水道与狼山沙、通州沙及中水道的水沙交换,增加浅区落潮流水动力;同样新开沙也采取潜顺坝加齿坝的措施,防止新开沙的冲刷以及尾部串沟的发育,固定航道左边界;白茆沙采用护滩潜堤守护上段-2 m以上高滩部分,沙头部潜堤向上延伸形成沙头部滩型,潜堤两侧布置丁坝群;右侧白茆小沙可采用潜堤圈围工程措施予以稳固;崇明岛右缘等局部处进行抛石护岸。通过上述工程措施,起到固滩、导流及航槽增深的作用。

4.3 整治建筑物结构型式

感潮河段通常江阔水深、浪大流急,地基表层以粉细砂为主,石料运距长、代价大,整治建筑物除采用抛石和沉排等传统结构外,还须应用整体性强、施工快和生态友好的新型结构。以长江南京以下12.5 m深水航道治理为例,主要有以下结构型式^[14]。

(1) 混凝土构件混合堤。对于潜堤和导流堤等建筑物,采用在抛石基床上安置混凝土预制构件的混合结构,如已在长江口应用的半圆形构件混合堤(图5)。此类混合堤结构整体性强、施工快捷,但抗滑稳定及地基承载力要求高,目前在河口及感潮河段得到广泛应用。其他构件还有齿形构件和梯形空心构件(图6),以及半圆拱型构件、圆筒构件、倒T型构件等。

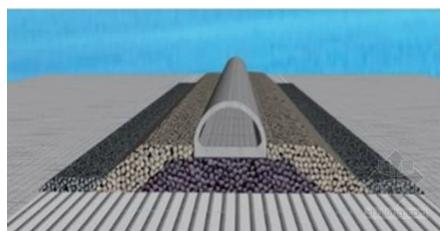


图5 半圆形构件混合堤

Fig. 5 Semi-circular composite dike

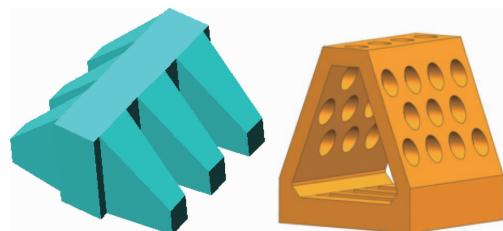


图6 齿形构件和梯形空心构件

Fig. 6 Tooth-shaped members and trapezoidal hollow members

(2) 新型生态守护结构。对于护滩、护底建筑物,主要有生态空间排体护底结构、土工格栅生态型护滩结构和护坡结构等三类。

生态空间排体护底结构是由排布和压载体构成:排布采用500 g/m²长丝机织布与无纺布的复合布;压载体尺寸为600 mm×600 mm×400 mm(长×宽×高),由混凝土预制顶板、底板和四柱组成,形成适合底栖和附着生物生存的空间块,压载体采用错位布置形式。

土工格栅生态型护滩结构包括肋高250 mm、肋空隙400 mm×600 mm、可供植物生长的格状石笼压载植生垫结构,以及外轮廓550 mm×550 mm、内轮廓370 mm×370 mm、高250 mm、侧壁对称开直径75 mm圆孔的立体网格结构。土工格栅生态型护坡结构包括大网格土工格栅加拼接咬合型十字块压护结构(土工格栅网格尺度100 mm×100 mm、十字块框格尺寸380 mm×380 mm、实体肋120 mm×120 mm),以及宽4 m、高0.3 m的隔室模袋混凝土护坡+混凝土连锁块软体排护底结构。

(3) 散抛护滩结构。在已广泛推广应用的四面六边体框架结构的基础上,提出了两种适用于感潮河段的散抛护滩结构:一是边长600 mm、横截面60 mm×60 mm×60 mm、壁厚2~3 mm的七边立体结构的主动式钩连体(图7);二是800 mm×100 mm×100 mm(长×宽×高)的扭双工字透水框架(图8)。两种结构现场钩连效果好,阻流促淤效果好,生态环境效应显著。



图 7 主动式钩连体

Fig. 7 Active hook structure

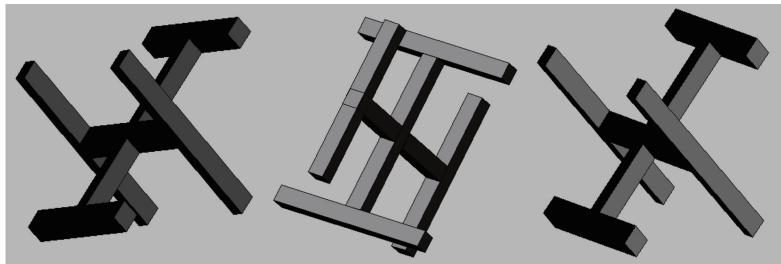


图 8 扭双工字透水框架

Fig. 8 Twisted double H permeable frame

5 结语

本文探讨和论述了感潮河段航道整治设计理论与方法,主要结论如下:

(1) 感潮河段水沙动力特性受径流与潮汐双重影响,可分为常年潮流段、季节性潮流段和常年径流段3个区段。根据河型特征和滩槽格局,浅滩类型主要有单级分汊型、多级分汊型、水下心滩型和水下沙洲型,各自表现出不同的水沙运动特征和碍航特性。

(2) 应考虑水运主通道稳定畅通和两岸航运需求、生态环境保护、河势稳定与防洪、通航安全与高效等多方面因素,确立感潮河段航道整治总体原则。

(3) 感潮河段设计通航水位应根据不同区段,考虑径潮影响,分别进行设计通航水位的计算与确定,以及与上下游河段的分界和衔接;航道整治水位和整治线宽度等整治参数可根据现有方法确定初值,但具有特殊含义,并需结合相关研究措施,考虑整治效果采用渐进方法确定。

(4) 应从感潮河段各类浅滩特性出发,遵循“固滩、导流、增深”的基本整治方针与思路,采取守护为主的整治工程措施,主体整治建筑物应采用整体性强、稳定性好、施工快捷的混凝土构件混合堤,并采用新型生态守护结构。

参 考 文 献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 中国水运建设 60 年(建设技术卷)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. China port and waterway construction in the past 60 years—construction technology volume[M]. Beijing: China Communications Press, 2016. (in Chinese))
- [2] 朱晓波, 夏云峰, 徐华, 等. 长江下游三沙河段河床演变规律及其关联性分析[J]. 水道港口, 2013, 34(5): 413-419. (ZHU Xiaobo, XIA Yunfeng, XU Hua, et al. Riverbed evolution law and relevance analysis for the Three Sand Shoals reach on Yangtze River[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2013, 34(5): 413-419. (in Chinese))
- [3] 杜德军, 夏云峰, 徐华, 等. 长江河口段节点控导作用及河势格局研究[J]. 人民长江, 2018, 49(14): 1-5, 54. (DU Dejun, XIA Yunfeng, XU Hua, et al. Study on river nodes' control-guide effects and river regime in Yangtze River estuary[J]. Yangtze River, 2018, 49(14): 1-5, 54. (in Chinese))
- [4] 李春初, 雷亚平, 何为, 等. 珠江河口演变规律及治理利用问题[J]. 泥沙研究, 2002(3): 44-51. (LI Chunchu, LEI Yaping, HE Wei, et al. Evolitional processes of the Pearl River estuary and its protective regulation and exploitation [J]. Journal of Sediment Research, 2002(3): 44-51. (in Chinese))
- [5] 张静怡, 李莉君, 李文祥. 长江河口划分问题探讨[J]. 水文, 2010, 30(4): 28-31, 87. (ZHANG Jingyi, LI Lijun, LI Wenxiang. How to demarcate Yangtze River estuary[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(4): 28-31, 87. (in Chinese))
- [6] 张幸农, 陈长英, 刘慧. 论感潮河段航运工程水文标准分界与衔接[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 707-713. (ZHANG Xingnong, CHEN Changying, LIU Hui. Studying on dividing and connecting of the hydrology standard between river and sea navigation engineering[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(5): 707-713. (in Chinese))

- [7] 张幸农. 长江南京以下河段深水航道整治基本原则与思路[J]. 水利水运工程学报, 2009(4): 128-133. (ZHANG Xingnong. Basic principles and thoughts on deep waterway regulation in the lower reaches of the Yangtze River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2009(4): 128-133. (in Chinese))
- [8] 张幸农, 陈长英, 吴建树. 感潮河段设计通航水位确定方法及标准初探[J]. 水道港口, 2006, 27(4): 243-248. (ZHANG Xingnong, CHEN Changying, WU Jianshu. Essential study on definition method and standard of designed navigable stage in tidal reaches[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2006, 27(4): 243-248. (in Chinese))
- [9] 夏云峰, 闻云呈, 张世钊, 等. 长江南京至浏河口深水航道航行基面及理论基面初步分析[J]. 水利水运工程学报, 2012(1): 13-18. (XIA Yunfeng, WEN Yuncheng, ZHANG Shizhao, et al. Preliminary study on the navigation datum plane and theoretical datum plane for deep-water channel from Nanjing to Liuhe River estuary of Yangtze River[J]. Hydro- Science and Engineering, 2012(1): 13-18. (in Chinese))
- [10] 徐元, 龚鸿锋, 张华. 长江下游福姜沙河段 12.5 m 水深主航道选汊研究[J]. 水运工程, 2014(5): 1-7. (XU Yuan, GONG Hongfeng, ZHANG Hua. Study on branch selection for 12.5 m-deep main channel in Fujiangsha reach downstream the Changjiang River[J]. Port and Waterway Engineering, 2014(5): 1-7. (in Chinese))
- [11] 陈前海, 徐照明, 侯卫国. 长江澄通河段综合整治规划要点及实施效果分析[J]. 人民长江, 2013, 44(21): 12-15, 18. (CHEN Qianhai, XU Zhaoming, HOU Weiguo. Comprehensive harnessing guideline for Chengtong Reach of Yangtze River and its implementation effect[J]. Yangtze River, 2013, 44(21): 12-15, 18. (in Chinese))
- [12] 闻云呈, 夏云峰, 吴道文, 等. 长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程总平面方案优化[J]. 水运工程, 2015(2): 202-212. (WEN Yuncheng, XIA Yunfeng, WU Daowen, et al. Optimization on general layout scheme of 12.5m deepwater channel phase I project from Nanjing down the Yangtze River[J]. Port and Waterway Engineering, 2015(2): 202-212. (in Chinese))
- [13] 曹民雄, 应翰海, 申霞. 长江南京以下深水航道二期工程碍航水道演变特性及航道治理思路[J]. 水运工程, 2018(2): 1-12. (CAO Minxiong, YING Hanhai, SHEN Xia. Evolution features and regulation thinking about four reaches of deep-water channel phase II project in the Yangtze River below Nanjing[J]. Port and Waterway Engineering, 2018(2): 1-12. (in Chinese))
- [14] 曹民雄, 申霞, 黄召彪, 等. 长江南京以下深水航道生态建设与保护技术及措施[J]. 水运工程, 2018(7): 1-9. (CAO Minxiong, SHEN Xia, HUANG Zhaobiao, et al. Techniques of ecological construction and protection based on deepwater navigation channel project in the Yangtze River below Nanjing[J]. Port and Waterway Engineering, 2018(7): 1-9. (in Chinese))

Study on design theory and method of waterway regulation in tidal river

ZHANG Xingnong, XIA Yunfeng, CAO Minxiong

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Based on summary of the research results of waterway regulation in the lower reaches of the Yangtze River, the design theory and method of waterway regulation in tidal rivers are discussed and expounded. The results show that in a tidal reach, three sections: perennial tidal current, seasonal tidal current and perennial runoff can be divided according to the different runoff and tidal impacts, and there are four types of shoal: single-stage branching type, multi-stage branching type, underwater diara type and submerged bar type according to the characteristics of river type and the beach & channel pattern. The overall principle of the tidal waterway regulation should be established by consideration on many influencing factors and external conditions, and the designed navigable water level of different sections and its connection with the upstream and downstream waterway, as well as the determination method of the regulation parameters (regulation water level and regulation line width) should be sorted out, and the regulation ideas and engineering measures for the characteristics of various shoals are presented, and the concrete component mixed dikes and new type of protection structures are adopted.

Key words: tidal river; waterway regulation; the Yangtze River; design theory and method