



长江中游杨林岩水道护滩软体排结构改进措施

樊书刚，朱代臣，何艳军

(长江重庆航运工程勘察设计院，重庆 401147)

摘要：对目前在长江中下游航道整治护滩工程中广泛采用的系结混凝土块软体排护滩带的运行情况进行调查分析，结合杨林岩水道航道整治工程对顺直分汊河段江心洲的守护，对护滩软体排结构进行改进，提出了分区加固的设计原则，采用 X 型排、单元排、钢丝石笼护垫的不同组合结构，有效解决了滩面抗冲性要求不一致的结构选型问题。工程实践表明，该结构适应水流冲刷特点，结合透水框架的使用，整治建筑物稳定性大幅提高。

关键词：航道整治；系结混凝土块软体排；结构改进措施；杨林岩水道

中图分类号：U 617.8 **文献标志码：**A **文章编号：**1002-4972(2015)10-0101-07

Structural improvement measures for beach protection belts of Yanglinyan waterway in the middle reach of the Yangtze River

FAN Shu-gang, ZHU Dai-chen, HE Yan-jun

(Changjiang Chongqing Harbor and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China)

Abstract: This paper presents the on-site investigation and analysis of a new kind of flexible mattress with concrete blocks ballast which is widely used in the Yangtze River. Yanglinyan waterway is a straight braided stream, which needs to be regulated after running of the Three Gorges. The structural improvement measures of beach protection belts used on the Nanyangzhou are studied. The problem of different requirements for different impact areas are solved by a combination of X type belts, unit belts, and steel gabion pad. The engineering practice shows that the new structure adapts to water erosion features. Combining with the use of permeable framework, the stability of the regulation building has a substantial increase.

Keywords: waterway regulation; flexible mattress with concrete blocks ballast; structural improvement measure; Yanglinyan waterway

近年来，随着国家对长江航运战略层面的高度重视，长江航道建设速度得到了大幅提高，相继实施了多项航道整治工程。对于以粉细砂为主要河床质的长江中下游河段，护滩结构的稳定在航道整治工程中起到至关重要的作用。目前长江中下游主要采用 4 种护滩结构：1) 排体结构，主要有系沙袋软体排、系结混凝土块软体排、铰链混凝土块软体排和混凝土联锁块软体排 4 种；

2) 钢丝网石笼结构；3) 抛石结构；4) 抛枕结构，主要有沙枕和碎石枕 2 种。各种结构在河床变形适应性、造价高低和施工难易度方面各有特点，尤以系结混凝土块软体排应用最为普遍。

通过近年来的工程实践应用情况调查，系结混凝土块软体排适应河床变形能力强、保沙性好，但自身稳定性差，不适用于大流速的复杂环境，边缘变形过大时易破坏，抗老化性能也稍弱，后

收稿日期：2015-01-22

作者简介：樊书刚（1985—），男，硕士，工程师，从事港口与航道工程研究与设计。

期维护工作量大, 因此开展相关改进措施研究十分必要。本文结合长江中游杨林岩水道航道整治工程, 分析研究了顺直分汊河段江心洲复杂水流条件下护滩的结构形式, 针对以往陆上护滩工程往往采用单一结构而不能兼顾不同冲刷流速带的问题, 提出了分区加固的设计原则, 即充分考虑滩面流速分布及软体排损毁机理, 选择抗冲性能不一致的护滩结构。将 X 型排、单元排和钢丝石笼护垫不同组合应用在不同的高程范围, 充分发挥了 X 型排、单元排的柔性保沙特征和钢丝石笼护垫的大糙率、不易沉陷坍塌特性, 取得了较好的工程效果。

1 水道概况

杨林岩水道(图 1)位于长江中游湖北省洪湖市和湖南省岳阳市境内, 长 7 km, 属顺直分汊型河段。水道上邻洞庭湖湖口, 距城陵矶 15 km, 下接界牌水道, 距武汉 226 km。河段进口受白螺矶、道人矶节点控制, 河宽约 1.75 km, 出口受杨林山、龙头山节点控制, 河宽约 1.12 km, 在上下节点之间河段宽阔, 被南阳洲分为左右两汊, 汊道段最大河宽放宽到 3.2 km。左汊受入口弯曲和出口礁石影响, 仅通航小型渔船, 右汊多年来一直为主通航汊道。南阳洲滩面中水期平均流速 1.9 m/s, 高滩中洪水期横流强烈, 最大流速 3.5 m/s。

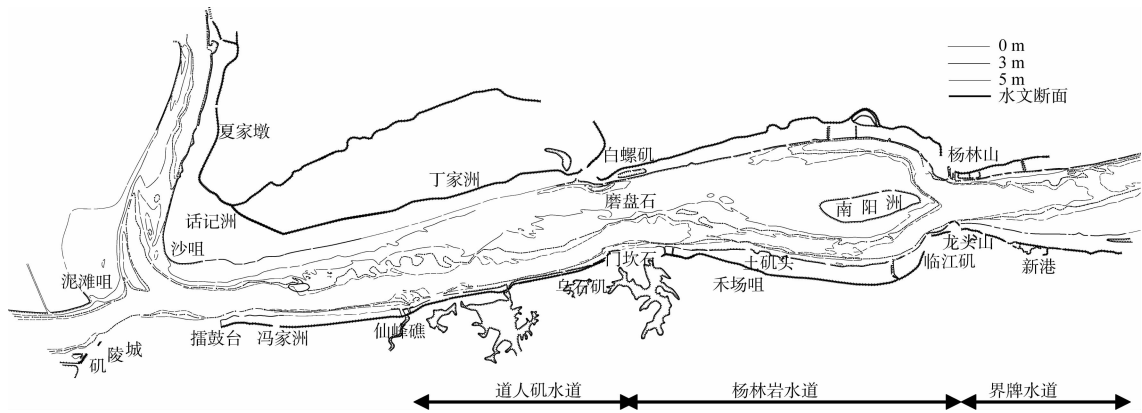


图 1 杨林岩水道河段河势

2 近期演变特点

2.1 水文、泥沙特征

根据螺山水文站实测资料分析, 杨林岩水道从 20 世纪 70 年代至今, 来流量基本稳定, 三峡蓄水运行后, 枯水平均流量加大, 汛期最大流量减小, 虽对年内的流量有一定改变, 但年际变化

总体较小。2010 年年径流量 6 480 亿 m³, 与三峡蓄水前多年均值基本相当, 2013 年年径流量 5 698 亿 m³, 较三峡蓄水后 2003—2011 年平均值偏小 3.5%, 为中水年份。杨林岩水道年径流量与年输沙量多年变化过程见图 2。

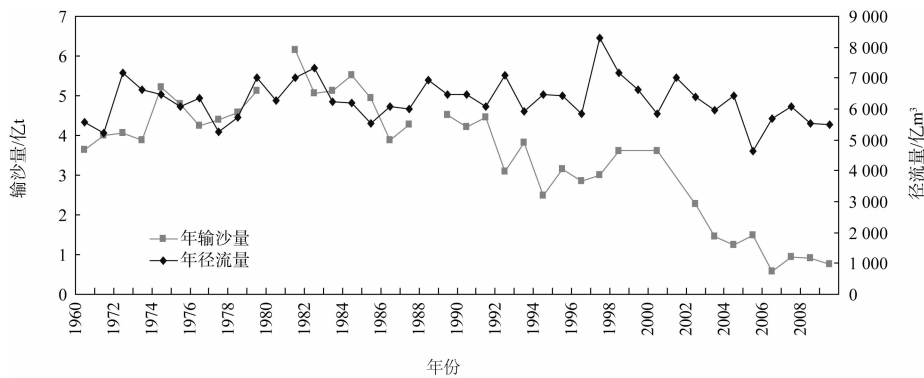


图 2 杨林岩水道年径流量与年输沙量多年变化过程

年输沙量方面, 从 20 世纪 60 年代至今发生了较大的变化。20 世纪 60 年代年输沙量与三峡蓄水前多年平均值基本相当, 20 世纪 70 年代起, 受荆江河段 3 次裁弯影响, 年输沙量逐渐增大后随着河势控制工程的实施, 输沙量逐渐减少, 到 20 世纪 90 年代初期, 已恢复至三峡蓄水前多年平均水平。之后, 随着上游整治工程、水利工程的实施及河道大量采砂, 年输沙量开始减少, 并持续低于多年平均水平。2003 年三峡蓄水运行至今来沙持续减小并低于三峡蓄水前的多年平均水平。2010 年螺山站年输沙量 8 370 万 t, 仅为三峡蓄水前多年平均值的 20%。2013 年年输沙量 8 380 万 t, 为 2009 年以来的最大沙年。

2.2 近期演变特点

杨林岩水道作为典型的顺直分汊河段, 上下游受进出口节点控制, 河床边界稳定, 河床演变主要受自身来水来沙条件的影响, 保持着淤积冲刷的演变特点, 具体表现为南阳洲洲头位置与滩形的变化, 以及由此引起的两汊及航道条件的变化。通过历年来河道等深线及断面变化分析, 结合数学模型试验成果^[1], 认为河段的河床演变主要表现为以下 2 个特点:

1) 三峡蓄水前, 来沙量的大幅增加会促使南阳洲淤积发展, 对水流控导作用加强, 水流集中, 航道条件较好; 来沙量大幅减少会促使南阳洲冲刷, 滩槽坦化, 水流分散, 航道条件变差。但在自然条件下, 河段的还滩能力并未改变, 通过自然演变, 可以保持相对稳定的航道条件。

2) 三峡蓄水后, 对坝下河段的冲淤变化产生新的影响^[2], 众多心滩及岸坡冲刷幅度及范围较蓄水前均发生改变。对工程河段而言, 年际、年内水沙条件与天然情况均有较大改变, 来沙量大幅减少, 中枯水期流量增加, 冲刷历时延长。2008 年以后河段总体表现为冲刷, 重点表现在南阳洲洲头低滩冲刷下挫、右缘崩退, 右汊展宽, 中下段逐渐淤积变浅。根据河段 2012 年 10 月测图, 汛后南阳洲中低滩滩面较同年 3 月平均冲深 3 m,

滩上 5 m 等高线后退约 600 m, 右汊中下段最浅点高程 3.3 m (航行基准面下), 主航槽已经表现出向宽浅化方向发展的不利趋势。三峡蓄水后的水沙条件, 在今后将长期保持相对稳定, 河段目前已经呈现出的不利演变趋势, 今后将一直持续, 并最终导致右汊中下段出浅。

3 整治方案

该河段(图 3)航道建设标准为 3.7 m × 150 m × 1 000 m (水深 × 航宽 × 弯曲半径), 通航保证率 98%。对于顺直分汊型河段, 维持主航槽良好航道条件的关键在于固定两岸边界及分流点, 并保持江心洲滩一定的分流高度。本工程通过对南阳洲洲头及右汊两岸边滩采取固滩措施, 稳定南阳洲洲头位置及滩体形态, 稳定右汊两岸边滩, 以达到稳定现有滩槽格局、防止右汊航道条件向不利方向发展的目的。

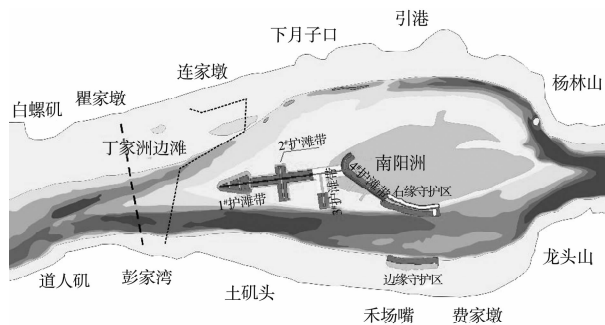


图 3 杨林岩水道整治方案平面布置

初步整治方案主要分为南阳洲洲头低滩守护工程和右汊中下段两侧护岸工程两部分。南阳洲洲头低滩守护工程防止南阳洲洲头持续冲刷下退, 维持目前两汊分流、右汊为主的滩槽格局, 采用“一纵三横”4 条鱼骨型护滩带对南阳洲洲头低滩进行守护。南阳洲右缘护岸工程和右岸费家墩护岸工程防止右汊主航槽持续展宽。

4 护滩结构改进措施

4.1 常用 X 型护滩软体排调查

长江中下游航道整治陆上护滩常用结构为 X 型

排,由排垫(含排布、加紧条、系结条)和压载混凝土块组成。压载混凝土块平面形状为长方形,尺寸为45 cm×40 cm×8 cm(长×宽×厚),质量为33.10 kg。采用2根长丝系结条绑扎于护底排布上。系结条抗拉强度不小于1 300 N/根。对20世纪90年代以来,包括三八滩、瓦口子、周天等30余个航道整治工程护滩带稳定情况进行调查,根据统计结果,经过1~2个水文年,护滩带冲刷剧烈部位坍陷深度为4.5~7.5 m,一般冲刷部位坍陷深度为2.5~3.0 m,平均冲刷深度为3~5 m。部分滩面出现较大冲坑,最大冲深达到10 m以上。

护滩软体排损毁形式见图4。从排体破坏的形式来看,护滩软体排多从建筑物周边开始,之后范围逐渐扩大,或通过渗流导致滩面塌陷。李文全等^[3]的研究成果表明,软体排周边河床冲刷变形后,水流紊动程度加剧,泥沙淘刷速度加快,局部微小变形迅速发展为大面积沉陷,排垫不能承受其上所系混凝土块产生的拉力,便会出现断裂、悬挂等破坏现象。



a) 边缘塌陷



b) 边缘悬挂



c) 滩面鼓包



d) 滩面塌陷

图4 护滩软体排损毁形式

进一步的排体稳定性计算表明,X型排排体自身抗掀性较差,流速大于2.02 m/s即有出现损毁的可能。排体稳定条件为:

$$v \leq v_{cr} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad v_{cr} = \theta \sqrt{\rho'_R g t_m} \quad (2)$$

$$\rho'_R = (\rho_m - \rho_w) / \rho_w \quad (3)$$

式中: v 为软体排边缘流速 (m/s); v_{cr} 为软体排边缘临界流速 (m/s); θ 为系数,系结软体排取2; ρ'_R 为软体排相对浮密度; g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2 ; t_m 为软体排等效厚度,取 0.08 m ; ρ_m 为软体排密度,取 2.3 t/m^3 ; ρ_w 为水的密度,取 1.0 t/m^3 。

计算得到X型排临界流速 $v_{cr} = 2.02 \text{ m/s}$,由于排体贴近河床,洪水期排体附近最大表面流速为 3.5 m/s 时,底部排体边缘流速 $v \leq v_{\max} / \sqrt{2}$ ($=2.47 \text{ m/s}$),X型排不满足抗掀稳定性要求,目前一般采用预埋和加抛透水框架等强化措施进行处理。

从护滩软体排的损毁原理可以看出, 主要受外界流速大小及自身稳定因素影响。在河道边界和水力半径、水力坡降基本稳定的前提下, 可以通过增加局部糙率减小流速; 而护滩软体排自身稳定性主要与压载混凝土块、系结条强度有关, 参考类似的 D 型排和长江上游应用的铰链排结构, 可以从增加压载混凝土块密度、增加块体间连接强度来提高整体稳定性。

4.2 改进措施研究

4.2.1 结构强化

将流速较大区域常规护滩结构 X 型排优化为单元排, 增加压载混凝土块密度, 并提高连接强度 (表 1)。单元排以 5.095 m × 2.905 m (长 × 宽) 为一个整体连片制作, 无纺布护底 (图 5)。每单元

共有 112 块压载混凝土块, 每个混凝土块之间用直径 14 mm 的丙纶绳纵横十字交叉连接, 丙纶绳浇筑到混凝土块内, 每个混凝土单元块质量为 3.15 t。从单体质量和系结条强度方面较 X 型排均有较大提高。

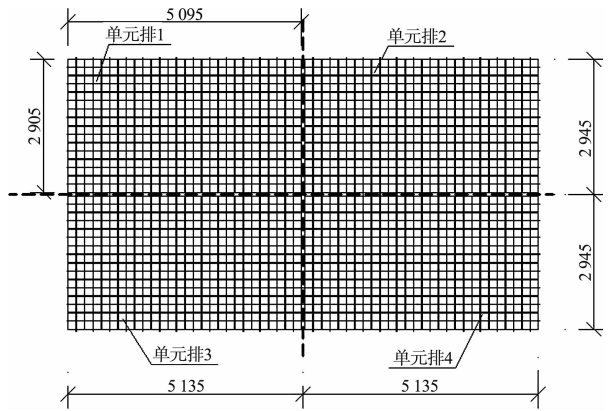


图 5 单元排设计 (单位: mm)

表 1 X 型排与单元排结构对比

项目	压载混凝土块尺寸/(cm × cm × cm)	压载混凝土块质量/kg	系结条抗拉强度/(kN · 根 ⁻¹)	受力方式
X 型排	45 × 40 × 8	33.10	≥1.300	单块 2 向受力
单元排	35 × 35 × 10	28.17	≥24	单块 4 向受力, 单元总体受力

计算得到单元排临界流速 $v_{cr} = 2.26$ m/s, 较 X 型排提高了 11.9%。从受力结构上看, X 型排依靠压载块体自重和系结条保持自身稳定, 属于单块 2 向受力, 单元排依靠抗拉强度较强的丙纶绳相互连接为整体, 除单块 4 向受力外, 还受单元约束, 在压载混凝土块质量基本相当的情况下, 单元排可承受拉力为 X 型排的 37 倍以上。

根据南阳洲滩面中水位期流速分布情况和护滩软体排损毁机理, 在纵向 1# 护滩带、横向 3# 护滩带边缘 20 m、4# 护滩带迎水侧上半区采用单元排, 以提高边缘抗冲性。

4.2.2 加糙处理

1) 根据以往的工程经验, 透水框架具有很好的防冲促淤效果, 双层透水框架带流速可减小 40% ~ 70%。李若华等^[4]的研究成果表明,

透水框架群间隔区内近底流速减小率随着间隔距离的增大而减小, 在抛投宽度为 10 m、间距接近 20 m 时, 其减速率可达 50% 以上。以往透水框架一般用于护滩软体排边缘, 本次考虑将其直接摆放于高滩滩面, 以增大其作用范围。透水框架应用范围为排体边缘、纵横护滩带交叉区及 4# 护滩带与 3# 护滩带之间的滩。分为 15 m 宽压边和单独的 3 道透水框架减速带, 透水框架带宽 30 m。

2) 将滩面流速普遍较大的 4# 护滩带优化为钢丝石笼护垫和单元排的组合结构。明渠水流流速计算采用谢才公式:

$$v = C \sqrt{RJ}$$
(4)

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$
(5)

式中: C 为谢才系数; R 为水力半径; J 为水力坡度; n 为反应滩面粗糙程度的系数。

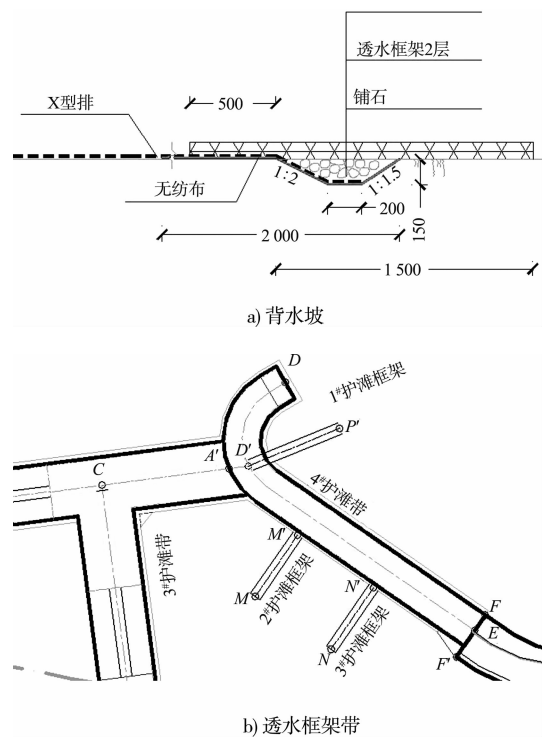


图 6 4#护滩带背水坡与高滩间透水框架带（单位：mm）

根据表面平整度及明渠水流边界糙率系数，X型排和单元排现浇混凝土表层粗糙系数取为0.013、钢丝石笼护垫为0.025。同等水流条件下，钢丝石笼护垫边缘流速可减小52%。

考虑了单元排与钢丝石笼护垫双边相邻布置（方案1）和单边布置（方案2）两种形式（图7），方案1交叉布置，对于水流的作用强于方案2，但施工困难。综合考虑工程效果和施工方便，以方案2作为实施方案。具体应用范围为4#护滩带与高滩相邻的下半区。钢丝石笼护垫尺寸为200 cm × 100 cm × 23 cm（长 × 宽 × 高），内部填入卵石，平均粒径在8~10 cm。

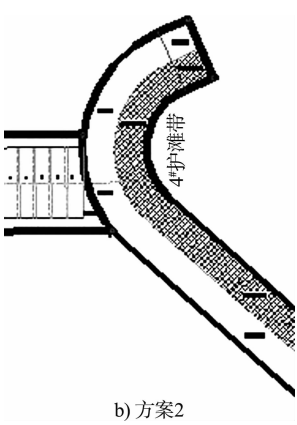
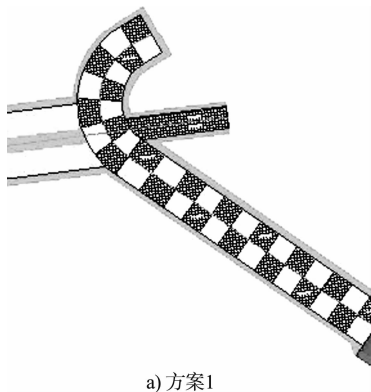


图 7 4#护滩带不同组合方案

5 应用效果

杨林岩水道整治工程于2013年1月开始施工，同年6月陆上护滩完成。从2013年汛后地形分析结果可以看出，工程河段仍处于冲刷状态，但由于南阳洲低滩护滩带的实施，导致进入右汉的主流顶冲点从右缘上端下移至南阳洲右缘护岸工程区边缘，受自身河势影响，汛期泥沙淤积，汛后主流沿右缘直冲南阳洲右缘护岸区，滩面得以保持完整（图8），加之2013年输沙量为2009年



a) 单元排与钢丝石笼护垫



b) 汛后

图 8 工程后 4#护滩带汛前与汛后对比

后的最大值, 综合原因造成滩面护滩带边缘处于淤积状态, 2013 年 11 月现场踏勘表明, 整治工程总体稳定良好, 最大冲刷坑深度 1.3 m, 位于 4[#]护滩带背水坡, 小于同类整治建筑物经历一个汛后平均冲刷坑深度, 整治建筑物稳定性得到提高。

如图 9 所示, 以 1[#]护滩带尾部的横向剖面为分析断面, 2012 年汛后, 主流顶冲南阳洲洲头中低滩, 分析断面位置高程由 23 m 降低为 20 m (黄海高程)。整治工程于 2013 年枯水期完工, 根据 2014 年 3 月地形分析, 护滩带左缘守护区域已处于淤积状态, 基本恢复至 2012 年 3 月地形高度, 右缘受 2[#]、3[#]护滩带及 2[#]、3[#]透水框架带掩护, 冲刷趋势已减弱, 地形基本与工程前保持一致, 但受顶冲点下移影响, 下游的南阳洲右缘护岸工程下段护底区域前沿 3 m 等深线冲刷后退约 140 m。2014 年汛后 11 月观测, 受整治建筑物作用影响, 中高滩滩脊右缘较 2013 年施工地形淤高约 2.88 m, 也基本恢复至 2012 年 3 月汛前地形, 南阳洲重新变得高大, 右缘坡脚淤积展出, 对于维持右汉主航槽冲刷起到了固定边界作用。通过对同期的航道条件进行分析, 结果表明中下段最浅点高程 3.8 m (航行基面下), 达到了预期的整治目标。但从长期来看, 需对南阳洲右缘护岸护底区域进行加固, 以保持右汉中下段河道边界的稳定。

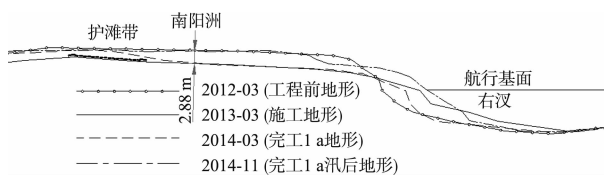


图 9 南阳洲 4[#]护滩带前沿 200 m 横断面地形线对比
(横剖 1[#]护滩带)

6 结论

1) 杨林岩水道作为典型的顺直分汊河段, 江心洲的高大完整是能够保持优良航道条件的前提

条件, 其护滩结构的稳定至关重要。目前长江中下游航道整治工程中应用最为广泛的系结混凝土软体排结构具有一定的适应河床变形能力, 但边缘处理不当往往会引起排体塌陷、悬挂, 以及滩面塌陷等损毁, 后期维护工作量大。

2) 单元排整体性和抗掀性均优于 X 型排, 应用于排体边缘易冲刷塌陷区域, 钢丝石笼护垫糙率大、稳定性强, 可抵抗较大流速。研究表明, X 型排、单元排、钢丝石笼护垫 3 类结构组合应用于滩面, 可以解决滩面流速不均、抗冲性要求不一致的结构选型问题, 可有效提高滩面整体稳定性。透水框架压边或单独使用均可取得较好的防冲促淤效果。

3) 对杨林岩水道南阳洲护滩采取分区处理, 根据滩面流速分布情况分别采用中低滩 X 型排 + 边缘单元排、高滩单元排 + 钢丝石笼护垫的组合结构, 能够适应滩段不同流量下的冲刷强度, 配合透水框架使用, 起到了较好的护滩作用。经历一个汛期, 边缘最大冲刷坑深度 1.3 m, 小于同类整治工程平均冲深, 整治建筑物稳定性得到提高, 可为类似的航道整治工程提供经验借鉴。

参考文献:

- [1] 张明, 李明, 黄成涛, 等. 长江中游道人矶至杨林岩河段航道整治工程平面二维水沙数值模拟研究[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2012.
- [2] 卢金友, 黄悦, 宫平. 三峡工程运用后长江中下游冲淤变化[J]. 人民长江, 2006, 37(9): 55-57.
- [3] 李文全, 雷家利, 王伟峰, 等. 长江中下游航道整治软体排护滩带结构优化设计[J]. 水运工程, 2012(1): 88-92.
- [4] 李若华, 周春天, 严忠民. 四面六边透水框架群减速效果的优化研究[J]. 水利水电快报, 2003(11): 15-17.
- [5] 杨祥飞, 樊书刚, 朱代臣, 等. 长江中游杨林岩水道航道整治工程初步设计[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 2012.

(本文编辑 武亚庆)