



深水大流速条件下和畅洲水道 潜锁坝损毁特征分析

盛艳丽, 何国华, 周贵国

(长江镇江航道处, 江苏 镇江 212004)

摘要: 航道整治工程中常使用潜锁坝来调节汊道分流比, 一般由坝体和护底余排两部分组成, 由于潜锁坝横跨深水大流速的汊道, 对水流的调整作用明显, 易引起河床局部剧烈冲刷, 河床变化反作用于建筑物结构, 导致局部变形甚至损毁。本文选取和畅洲水道左汊的两座潜锁坝为典型案例, 采用实测资料结合水流模拟分析的方法, 研究了建筑物实施后的效果以及建筑物发生变形的部位和局部损毁情况, 探讨局部损毁的特征和原因。结果表明: 坎体基本完整, 变形主要发生在护底的余排边缘, 排体损毁部位与建筑物附近冲刷较为剧烈的位置相对应, 损毁原因主要有洪水期河道深槽主流冲刷、坎体变坡区下游水流紊乱淘刷和特殊水文年长时间洪水作用加速排体损毁 3 个方面。

关键词: 潜锁坝; 深水大流速; 损毁特征

中图分类号: TV147; U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0096-06

Damage characteristics of submerged closure dams in Hechangzhou Waterway under deep water conditions with high flow velocity

SHENG Yanli, HE Guohua, ZHOU Guiguo

(Changjiang Zhenjiang Waterway Division, Zhenjiang 212004, China)

Abstract: Submerged closure dams are often used in channel regulation projects to adjust the diversion ratio of branches, and the structure is generally composed of the dam body and the bottom protection mattress. Since the submerged closure dam crosses the branch of deep water with high flow velocity, it has an obvious regulating effect on water flow and can easily cause local violent scouring of the riverbed, and the changes in the riverbed react on the building structure, thus leading to local deformation and even damage. This paper selects two submerged closure dams in the left branch of Hechangzhou Waterway as a typical case and analyzes the effects of building implementation, as well as the deformation and local damage of the building by using measured data combined with water flow simulation analysis. Then, the paper discusses the characteristics and causes of local damage. The results show that the dam body is basically intact, and the deformation mainly occurs at the edge of the bottom protection mattress; the damaged area of the mattress corresponds to the location where the intense scouring occurs near the buildings. The main causes of damage are the mainstream scouring of the deep channel in the waterway during the flooding period, the turbulent scouring of the downstream water flow in the slope change area of the dam body, and the accelerated damage of the mattress during the long period of flooding in special hydrological years.

Keywords: submerged closure dam; deep water with high flow velocity; damage characteristics

潜坝是指最枯水位时, 淹没在水下而不碍航的整治建筑物, 按照是否横跨河槽或汊道, 又可

分为潜丁坝、潜锁坝^[1]。对于长江中下游黄金水道建设而言, 潜锁坝的主要作用是封堵窜沟或调

收稿日期: 2022-10-10

作者简介: 盛艳丽 (1991—), 女, 工程师, 从事航道维护管理工作。

整汊道分流比^[2-4], 根据资料统计: 在长江中游界牌、陆溪口、罗湖洲等水道航道整治中, 采用了潜锁坝封堵串沟; 在长江下游马当南、黑沙洲、和畅洲等水道航道整治中, 采用了潜锁坝调整汊道分流比, 抑制非通航汊道的发展。潜锁坝是航道整治中常用的建筑物之一, 对于调整汊道分流比的潜锁坝而言, 往往横跨深水大流速的汊道, 水流绕过建筑物时会发生局部流线弯曲及流速变化, 形成复杂的紊动涡体, 引起河床发生较剧烈的局部冲刷, 潜锁坝较其他类型建筑物的损毁程度也更严重。

相比于非淹没建筑物, 潜锁坝研究较少。Guan 等^[5]采用声学多普勒测速仪(Nortek)测量了潜锁坝在冲刷平衡状态下的床面切应力和冲刷坑内水流紊动结构, 提出了不同翻坝流态的潜锁坝局部冲深公式; 《航道工程手册》^[6]推荐采用闸坝泄流引起的局部冲刷计算公式, 估算潜锁坝下游冲刷深度; 文岑等^[7]基于水槽试验, 通过假定潜锁坝冲刷前后涡旋环量相等, 提出了潜锁坝冲深公式; 付中敏等^[8]采用文岑公式, 计算了长江下

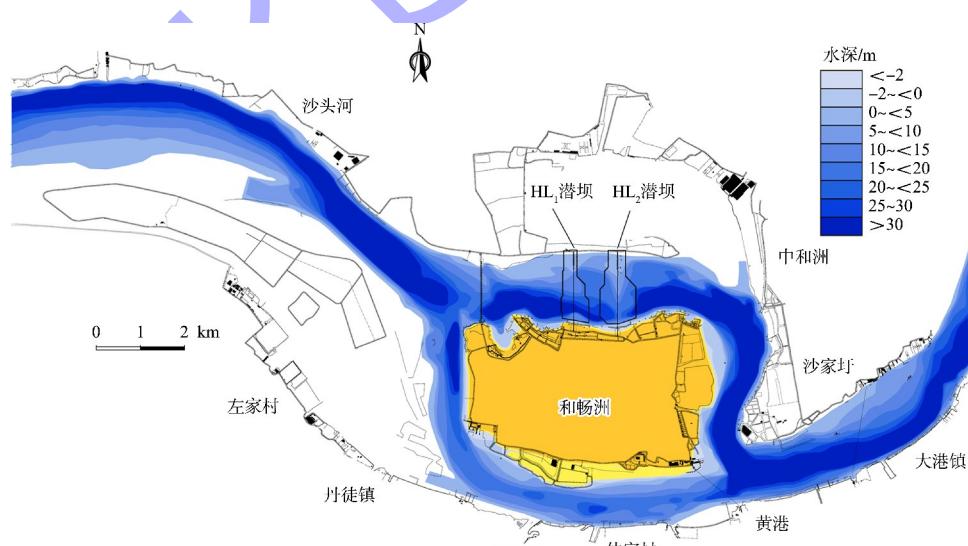
游黑沙洲水道护底余排作用下潜锁坝的冲刷深度。

对于潜锁坝, 国内外学者多限于水槽试验, 研究主要集中在水流结构和局部冲刷深度预测等方面。在实际工程中, 研究主要集中在常见的护滩和丁坝等类型建筑物的损毁及维修设计等方面^[9-10], 受年际径流的不确定性以及年内洪、枯水的流速不一致, 潜锁坝建筑物的损毁特性更为复杂。本文以南京以下 12.5 m 深水航道和畅洲水道左汊潜坝为例, 分析潜坝实施后河床演变、建筑物年内和年际损毁变化特征, 进一步探讨建筑物损毁的原因, 为类似工程提供参考。

1 研究概况

1.1 研究区域

和畅洲水道位于长冮南京以下, 上起世业洲尾, 下至五峰山, 全长 48 km, 自上而下可分为六圩弯道、和畅洲汊道、大港水道, 见图 1。和畅洲左汊为主汊, 长约 11 km, 分流比约 75%; 右汊为支汊, 长约 10 km, 分流比约 25%, 右汊是长江下游 12.5 m 深水航道所在。



注: 绘图基面为航行基准面。

图 1 2020 年 11 月和畅洲水道河势

为保障和畅洲右汊 12.5 m 航道条件, 实施了南京以下深水航道整治工程, 整治建筑物于 2015 年

6 月开工, 2017 年 5 月完工, 2019 年 5 月通过竣工验收^[11-13]。和畅洲水道航道整治工程主要在左

汉口门已建潜堤下游 2 100、3 100 m 处新建 2 道拦江潜坝，采用变坡断面形式，坝顶控制高程分段为 4.0（左岸）、-6.0、-18.0、4.0 m（右岸）。建筑物可调整左右汊分流比以及改善右汊航道条件。

和畅洲水道左汊潜锁坝所在区域自然水深达 45 m，最深处可达 50 m 以上，实测最大流速达 3.0 m/s，水深大、流速急。为适应深水大流速条件，保证坝体稳定性，坝体采用斜坡式，坝身结构采用袋装砂芯堤和抛石斜坡堤的组合方案，对堤高大于 5 m 的区段采用袋装砂芯堤，小于 5 m 以及两端接岸段采用抛石斜坡堤；上游坡度取 1:2.5，下游坡度取 1:3，接岸区域上下游坡度放缓到 1:3。护底余排采用混凝土联锁块软体排， HL_1 坡身上、下游侧软体排宽度分别为 150~210、150~420 m； HL_2 坡身上、下游侧软体排宽度分别为 140~320、250~490 m，坝身下游侧余排范围均设置消能防冲结构。

1.2 数据来源

和畅洲水道是长南京以下 12.5 m 深水航道整治的重点水道，也是重点观测对象，积累了大量原观资料。本文河道冲淤分析采用大范围河道地形资料(1:20 000)；建筑物局部地形变化分析采用多波束水下扫测成果(1:1 000)，分析资料均来源于长江镇江航道处。

2 潜坝实施后效果分析

2.1 分流比变化

和畅洲水道航道整治工程完工以来，工程对左汊的限流效果较好。洪水期，左汊分流比由工程前的 75.1% 减小至 61.9%，减小 13.2%；枯水期，左汊分流比由工程前的 72.4% 减小至 64.5%，减小 7.9%。从分流比变化的时间过程来看，工程完工前后(2017 年 5 月)分流比变幅最为显著，之后则相对减缓，见图 2。

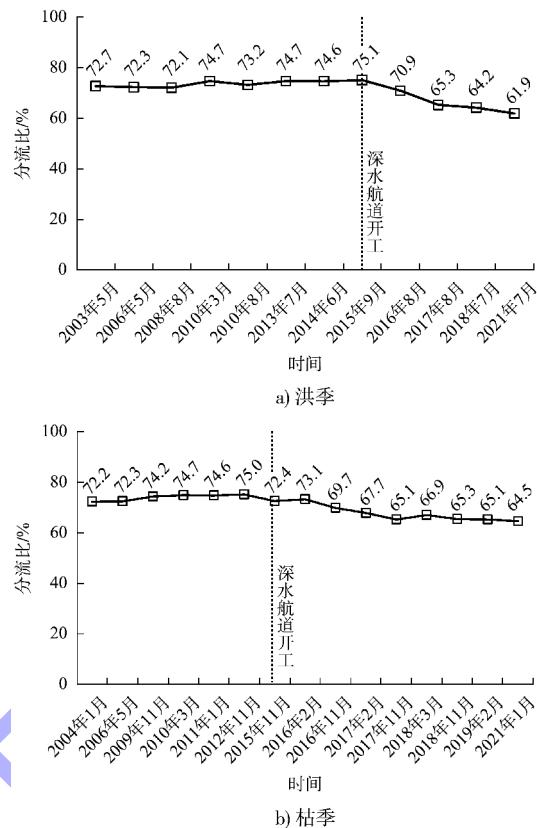


图 2 和畅洲水道左汊分流比变化

2.2 河床冲淤变化

和畅洲水道航道整治工程完工以来，左右汊河床冲淤变化见图 3。和畅洲左汊总体表现为上游下冲，其中口门潜堤— HL_1 潜坝之间总体以淤积为主； HL_1 — HL_2 潜坝之间冲淤相间； HL_2 潜坝以下以冲刷为主，冲刷部位主要在近坝段及孟家岗凸岸侧，幅度达 5~8 m。右汊整体以冲刷为主，近岸处有少许淤积，其中，进口段冲刷幅度约 5~8 m；中下段左冲右淤，冲刷幅度约 3~5 m，淤积幅度约 1~2 m。

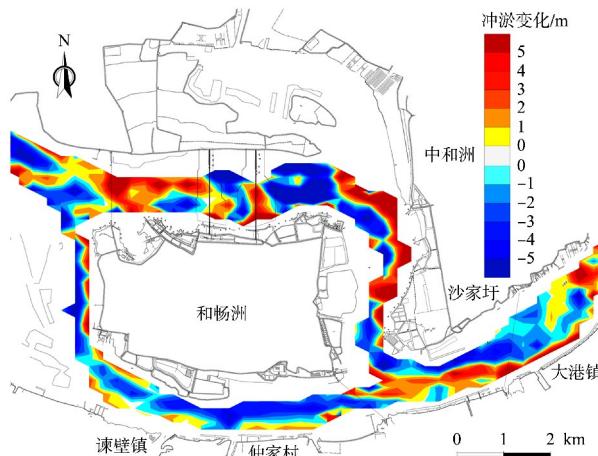


图 3 2017 年 5 月—2021 年 11 月和畅洲水道河床冲淤变化

2.3 右汊航道条件

和畅洲右汊容易出浅区域主要包括谏壁和仲家村—祝家村两处。二期工程竣工以来, 航道维护疏浚量较小, 约为1万~4万m³, 谏壁一带12.5 m等深线最小宽度为250~320 m, 仲家村—祝家村为227~340 m, 满足规划航道12.5 m×250 m的维护尺度要求, 见表1。说明左汊潜锁坝工程有效增加了右汊分流比, 保障了右汊深水航道条件的稳定。

表1 和畅洲水道航道内12.5 m线维护尺度

区域	时间	浅段 长度/m	12.5 m线 最小宽度/m	最浅 水深/m
谏壁 一带	2017年5月(完工)	1 653	205	11.9
	2019年4月(竣工)	1 247	250	11.7
	2020年11月	—	300	13.3
	2021年11月	—	320	12.8
仲家村 — 祝家村	2017年5月(完工)	890	220	11.5
	2019年4月(竣工)	230	227	11.7
	2020年11月	—	310	13.8
	2021年11月	—	340	13.6

3 整治建筑物损毁特征

3.1 坝体

潜坝左右两岸出露坝体完整, 与岸坡衔接完好(图4), 坝顶高程变化较小(图5), 坝体部分未见损毁。

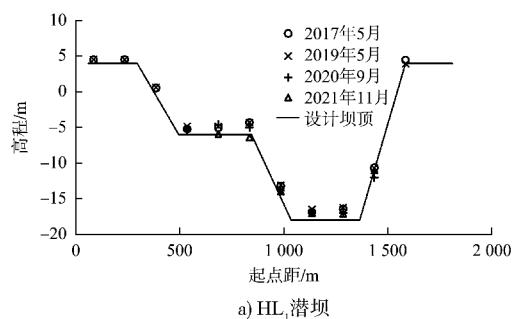


a) HL₁潜坝

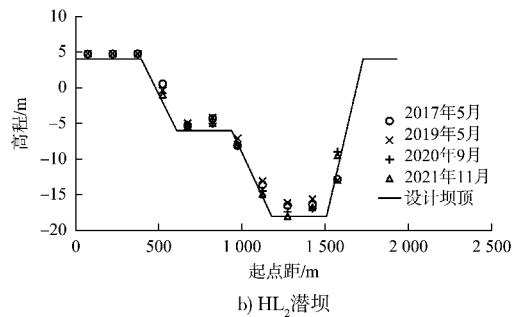


b) HL₂潜坝

图4 潜坝坝体照片



a) HL₁潜坝

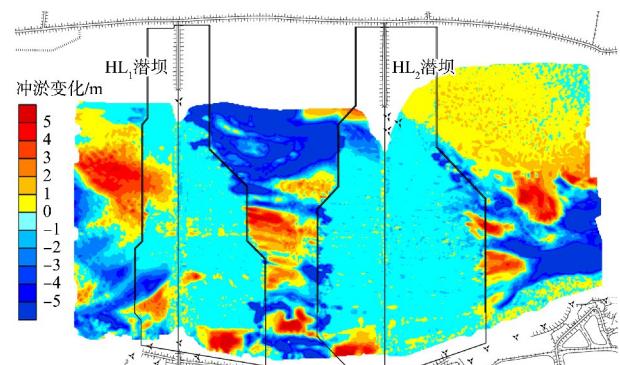


b) HL₂潜坝

3.2 护底余排

护底余排局部损毁较为严重, 排体损毁主要发生在HL₁潜坝上游南侧、HL₁和HL₂潜坝之间南北两侧以及HL₂潜坝中段下游侧。排体损毁部位与建筑物附近冲刷较为剧烈的位置基本对应(图6), 均位于河道深槽主流区或潜坝坝体变坡的下游冲刷较为集中的区域。

排体边缘附近的冲刷逐渐向排内发展, 使得排体局部发生损毁、范围逐步扩大。竣工以来, HL₁和HL₂潜坝上下游侧护底余排均有所冲刷, 排边缘局部变形严重, 损毁面积占总排体面积的比例分别为16.5%、17.3%。损毁区域局部距坝身较近, 其中, HL₁潜坝上游南侧及下游北侧损毁部位逼近坝体, 距轴线约60~110 m, 其余损毁



a) 2019年4月—2021年11月建筑物局部冲淤

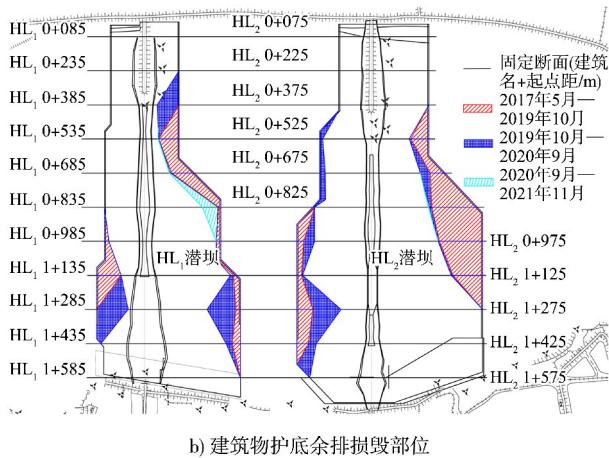


图 6 HL₁、HL₂ 潜坝建筑物局部冲淤及护底余排损毁部位

区域距坝身均在 150 m 以上; HL₂ 潜坝上游南侧及中段下游侧距离坝体较近, 距坝轴线约 130~170 m, 其余损毁区域距坝身均在 200 m 以上。

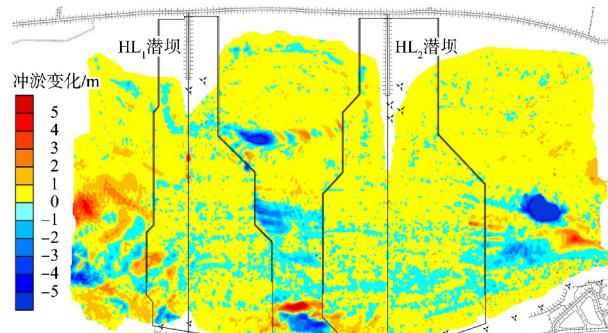
4 损毁原因

采用实测资料分析和平面二维水流数学模型相结合的方法, 探讨建筑物损毁原因。数学模型采用有限体积法离散水流运动方程, 紊流模型采用 $k-\varepsilon$ 模式, 潜锁坝采用线边界法^[14]进行模拟, 针对航道设计流量 1.02 万 m^3/s 、多年平均流量 2.85 万 m^3/s 、平滩流量 4.60 万 m^3/s , 模拟了河道及潜锁坝上下游水动力变化。

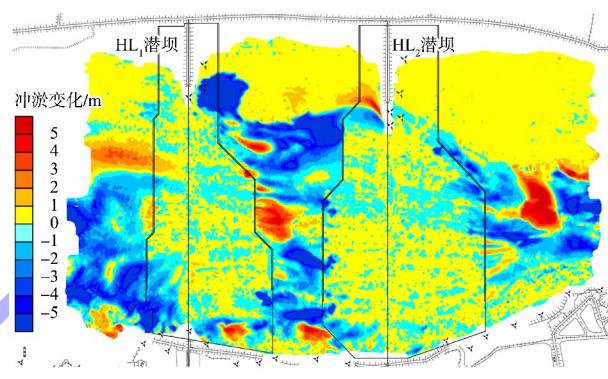
根据建筑物损毁特征分析, 和畅洲左汊潜坝护底余排损毁区域与河道剧烈冲刷区域基本一致, 可知排体损毁与河段冲刷密切相关, 引起建筑物附近地形冲刷的原因主要有河道水流动力、建筑物结构、特殊水情作用等。

4.1 洪水期河道主流区冲刷引起排体局部损毁

工程竣工后, 和畅洲左汊有较大规模的冲刷, 但从年内冲淤变化来看(图 7), 冲刷主要发生在洪水期, 枯水期总体冲淤幅度不大。由断面流速分布(图 8)可知, 左汊中上段主流偏南, 下段 HL₂ 潜坝以下主流居中, 在洪水期主流区泥沙被大量淘刷, 造成 HL₁ 南侧上下游局部排体、HL₂ 上游南侧及下游中段局部排体受损。

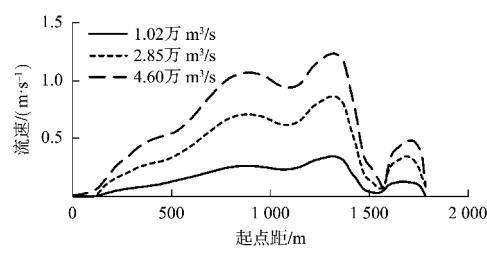


a) 2019年10月—2020年5月枯水期

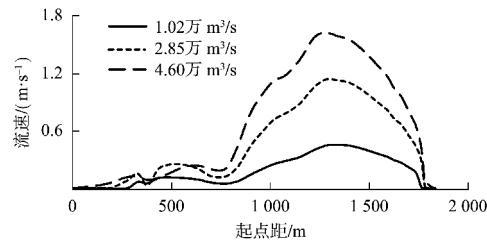


b) 2020年5月—2020年9月洪水期

图 7 建筑物局部年内冲淤分布



a) 中上段典型断面



b) 下段典型断面

图 8 数模计算左汊断面的流速分布

4.2 坝体变坡区下游水流紊乱引起局部排体损毁

水流过坝处断面面积骤减, 流速增大, 潜坝的变坡结构也使得水流在坝体附近形成绕流和翻坝水流, 在变坡段下游出现较大范围环流, 见图 9, 变

坡段下游水流流态紊乱, 引起床面冲刷, 形成冲刷坑。数模计算表明, 随着流量的增大, 环流强度及垂线平均紊动能均有所增大, 平滩流量时, 环流流速为 $0.14 \sim 0.71 \text{ m/s}$, 垂线平均紊动能为 $(10 \sim 30) \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。以和畅洲左汊 HL₁ 潜坝北侧下游较为明显, 强紊动水流冲刷河床形成冲刷坑, 见图 10, 冲刷坑向排内发展导致排体边缘塌陷变形, 局部发生损毁。

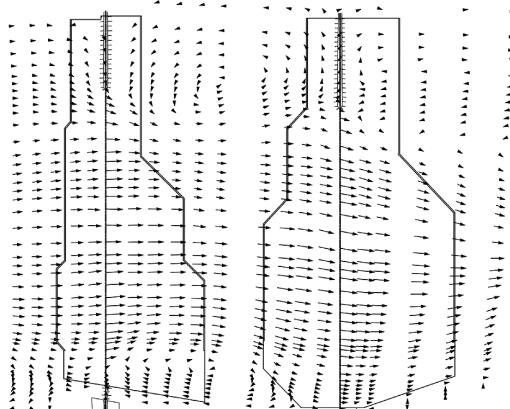


图 9 $Q=4.60$ 万 m^3/s 建筑物附近流场

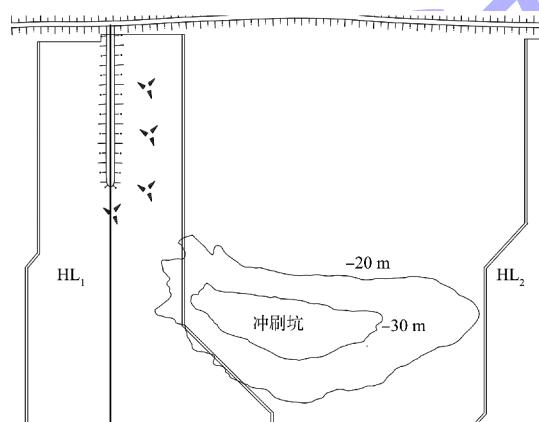


图 10 HL₁ 下游北侧实测冲刷坑

4.3 特殊水文年加速排体损毁发展

一般年份河床冲淤幅度较小, 排体损毁发展速度缓慢, 损毁比例增幅约为 0%~2%。排体变形损毁主要发生在流量较大的时段, 若遇特殊大水年, 大流量持续时间较长, 则排体会出现加速损毁的现象。如 2020 年长江流域遭受持续强降雨作用, 出现了仅次于 1954、1998 年的流域性大洪水, 在长时间大水作用下, 河道以冲刷为主, 主

流区及潜坝坝体变坡段下游排体损毁范围加速扩大, 2020 年度内排体损毁比例增幅达 3%~9%。

5 结论

1) 和畅洲水道 12.5 m 深水航道整治工程实施后, 对左汊的限流效果较好, 洪季左汊分流比减幅达 13.2%, 右汊分流比增加, 河道以冲刷为主。

2) 和畅洲水道左汊 HL₁、HL₂ 潜锁坝坝体完好, 受地形冲刷变化影响, 护底余排排边有所变形, 局部排体出现损毁, 损毁面积占比分别为 16.5% 和 17.3%, 且损毁有进一步发展的趋势。

3) 护底余排的损毁, 主要受洪季主流冲刷以及坝体高程变化衔接段坝下水流淘刷的影响, 一般年份损毁区域发展缓慢, 而在特殊大水年, 大流量持续时间较长时, 会加速排体的损毁, 如 2020 年洪季作用后, 两道潜锁坝损毁面积比例分别增加了 9% 和 3%。

4) 针对和畅洲水道航道整治建筑物的损毁特点, 建议后期加强观测, 在护底余排损毁区域及排体边缘等部位, 采用抛填厚砂袋或块石等方法进行维修。

参考文献:

- [1] 陈希. 潜坝在内河航道整治中的应用研究 [J]. 中国水运. 航道科技, 2016(4): 44-47.
- [2] 梁伟华, 杨兴旺, 胡坤龙. 潜坝坝体局部水流结构与水毁机理分析 [J]. 中国水运 (下半月), 2010, 10(10): 178-179, 181.
- [3] 韩林峰, 王平义, 卞萍. 三峡蓄水后新水沙条件下荆江河段整治建筑物损毁原因分析 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(25): 201-208, 213.
- [4] 范兵, 林木松, 钱圣. 和畅洲左汊口门潜坝加固现场试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2015, 32(9): 47-51, 75.
- [5] GUAN D W, MELVILLE B W, FRIEDRICH H. Live-Bed Scour at Submerged Weirs [J]. Journal of hydraulic engineering, 2015, 141(2): 04014071.

(下转第 183 页)