



# 深槽护底带端部边缘防护结构优化\*

朱玉德

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

**摘要:** 调研已实施深槽护底工程的稳定性, 在分析破坏原因的基础上提出了深槽护底端部边缘防护优化思路。以长江中游江口水道七星台深槽护底带为例对深槽护底边缘防护结构开展水槽试验研究, 最终提出了深槽护底带边缘设置抛石+柔性材料+透水框架组合防护措施, 该措施防护效果较优。

**关键词:** 护底端部; 防护结构; 优化思路

中图分类号: U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)07-0061-05

## Optimization of edge-protecting structures at the end of the bottom protection zone in deep channel

ZHU Yu-de

(Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications,  
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** The paper investigated the stability of the implemented deep-channel bottom protection project, and put forward the idea of optimizing the edge-protecting structures at the terminal end of the bottom protection zone work in deep channel based on the analysis on destruction causes. Further, taking Qixingtai deep-channel bottom protection zone at the Jiangkou waterway in the mid reach of the Yangtze River as an example, it carried out flume experiments and studies on the edge-protecting structure at the end of bottom protection zone in deep channel and finally raised combined measures of setting rock riprap plus flexible materials and permeable frames at the edge of bottom protection zone in deep channel.

**Keywords:** bottom protection end; protecting structure; optimization idea

20世纪90年代以来随着长江上游水利工程的建设尤其是三峡水利枢纽蓄水的运用, 导致下游河床冲刷下切、水位下降, 由此带来一系列航道问题, 为应对这些问题, 以防冲壅水为目的深槽护底工程陆续实施, 并取得了明显成效。护底工程通过建筑物覆盖河床, 阻断水流与河床质泥沙的作用, 从而保护河床免受水流冲刷。由于护底所在深槽河床多为水流流态变化剧烈的区域, 无建筑物覆盖保护的护底边缘区域易遭冲刷破坏, 进而影响工程稳定, 因此, 针对深槽护底边缘防护措施开展研究是保证深槽护底稳定的迫切需要。

### 1 已建深槽护底带工程结构及破坏情况<sup>[1-4]</sup>

长江中下游大规模航道整治至今, 在胭脂坝河段、燕子窝水道、黑沙洲水道等河段航道整治工程中均采用过深槽护底工程, 取得了较好的整治效果, 护底工程在保护河床免受水流冲刷方面发挥了积极作用。已建护底多采用类似丁坝条状布置, 自河道一侧向另一侧岸线平铺(覆盖深槽), 一定高程处与岸边或高滩衔接, 护底结构主要有软体排、抛枕、抛石等形式, 目前深槽护底端部边缘通常的防护方法为散抛石防护。

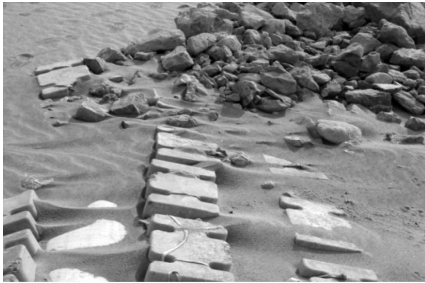
调研发现已建护底一般整体稳定性较好, 很

收稿日期: 2016-02-01

\*基金项目: 三峡后续工作总体规划研究项目(TKS05115018)

作者简介: 朱玉德(1979—), 男, 副研究员, 从事水力学研究。

少出现建筑物整体功能性丧失的破坏，但或多或少会出现局部破坏，局部破坏多位于护底边缘尤其是岸边滩槽、滩岸衔接处，护底破坏形式主要为两种：1) 压载体滑落导致护底局部破坏(图 1a))，在不利水流条件下诱发的护底整体破坏；2) 护底边缘强烈的三维水流导致的不断扩大的局部冲刷引起塌陷变形破坏(图 1b))。



a) 破坏形式1



b) 破坏形式2

图 1 护底边缘岸滩衔接部位破坏

## 2 深槽护底带边缘防护措施优化思路<sup>[1,5]</sup>

### 2.1 已建护底带边缘破坏原因

1) 不利水流条件下，护底边缘压载体块体出现滑移而诱发的破坏主要是护底区域位于水深、流急的部位，按一般护滩条件设置的防护块体质量不够，不足以抵御水流冲刷而导致破坏。

2) 护底边缘强烈三维水流淘刷引起局部冲刷坑导致护底塌陷变形而出现的破坏，主要由于床面和护底为两种不同的介质，在强烈水流作用下护底端部边缘床面发生较为剧烈的冲刷变化，处于深槽区护底边缘河床随之会发生变形，进而加剧软体排边缘水流紊动强度并加快河床冲刷速度。

无论是压载体滑落还是边缘淘刷导致的护底局部破坏，归根结底都是护底边缘防护结构存在不足。

### 2.2 护底带端部边缘防护结构优化思路<sup>[1,3,5]</sup>

深槽护底边缘的防护通常采取抛石防护，工程实践表明：护底边缘抛石在工程完工初期对抵御边缘向下水流和马蹄形旋涡及面层水流综合剪力能起到重要作用，但随着工程运行时间增加，常出现块体滚落、整体稳定性较差、长时间累计冲刷变形适应能力差等方面的实际问题，进而引发建筑物的破坏，针对深槽护底边缘抛石防护存在的问题提出如下优化思路：1) 块体稳定问题的优化主要是对边缘压载体的质量进行校核调整，确保压载体稳定。2) 三维水流冲刷带来的问题主要由于护底与岸坡衔接部位一般处于坡面，河床冲刷的过程中护底带边缘河床冲刷速率较大且得不到泥沙补充，形成具有一定坡度的冲刷坑；冲刷坑逐步发展，护底带边缘在下向水流和马蹄形旋涡作用下，护底带头部边缘下方由于淘刷发生塌方，护底排发生悬挂，边缘压载块失稳、跌落。因此，边缘防护措施的优化着眼于护底边缘增加柔性材料和防冲备抛促淤结构。

## 3 七星台深槽护底带端部边缘防护结构<sup>[1,2]</sup>

### 3.1 研究概况及模型设计

以长江江口水道七星台护底工程为例，对上述优化思路开展深槽护底边缘防护结构研究。

三峡水库蓄水运用以来，枝江以下水位出现较大幅度下降，导致下曹家河至七星台段比降增加、航道条件恶化。为了维持枝江以上河段水位的稳定，减少枝江以下水位的降幅，避免河床持续冲刷形成集中落差，长江中游荆江河段航道整治工程在七星台深槽实施3道护底带(图 2)。

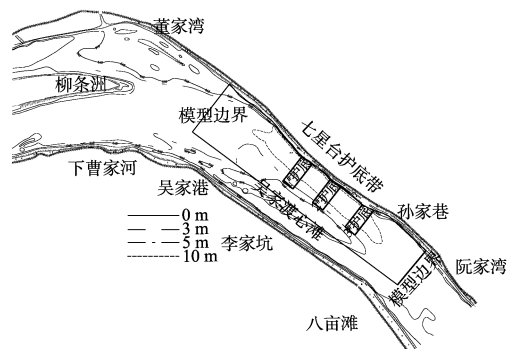


图 2 江口水道七星台护底平面布置

为研究七星台深槽护底边缘防护措施,采用江口水道2012年3月地形建立了局部大区域半江正态模型。局部模型横向范围左至七星台深槽左岸侧、右至吴家渡边滩滩脊处,共0.7 km宽区域;纵向上至七星台1#护底带上游1.6 km、下至3#护底带下游,共1.0 km长区域。模型几何比尺 $\lambda_l=100$ ,模型满足惯性力重力比相似、惯性力阻力比相似、水流连续相似,泥沙起动相似关系如下:

$$\text{重力相似} \quad \lambda_v = \lambda_l^{1/2} \quad (1)$$

$$\text{水流连续相似} \quad \lambda_Q = \lambda_l \lambda_h^{3/2} \quad (2)$$

$$\text{阻力比相似} \quad \lambda_n = \lambda_l^{1/6} \quad (3)$$

$$\text{泥沙起动相似} \quad \lambda_{v_0} = \lambda_v = \lambda_H^{1/2} \quad (4)$$

$$\text{泥沙休止角相似} \quad \varphi_1 = \varphi_2 \quad (5)$$

式中: $\lambda_l$ 为水平比尺; $\lambda_h$ 为垂直比尺; $\lambda_v$ 为流速比尺; $\lambda_{v_0}$ 为起动流速比尺; $\varphi$ 为泥沙休止角; $\lambda_Q$ 为流量比尺; $\lambda_n$ 为糙率比尺。

选择 $d_{50}=0.292$  mm的不规则塑料沙(模型沙密度为 $\rho_s=1.10$  t/m<sup>3</sup>)可满足泥沙起动相似要求;模型左侧边界按实际地形模拟,右侧边界采用水槽移动边界控制,试验前对局部模型进行率定,使局部模型符合相似性要求,建筑物按几何和重力相似模拟。

### 3.2 护底边缘防护块体稳定质量试验

#### 3.2.1 防护块体稳定性水槽试验

七星台1#护底头部与吴家渡边滩衔接处布置不同粒径石块(按重力相似)开展稳定性试验。试验水文条件河段20 a一遇洪水流量下控制流速为3.40 m/s、水深为19.0 m。

试验结果:模型单个质量0.08~0.10 g砾石除在迎水面主轴线的无位移外,在迎水面侧角外侧均有个别或少量位移,随冲刷时间的延长位移增加;试验不断增加块体质量,当模型砾石单个质量增至0.15~0.18 g时各部位石块均处于稳定状态。故该水流条件下模型块石单颗最小稳定质量应大于0.15 g,相当于原型块石150 kg。

#### 3.2.2 校核修正

根据JTJ 312—2003《航道整治工程技术规

范》,当流速大于3 m/s时,水流作用下的块石粒径可按下式计算:

$$d = 0.04v_f^2 \quad (6)$$

式中: $d$ 为块石等容粒径(m); $v_f$ 为建筑物处的最大表面流速(m/s)。

工程区流速按设计流速3.40 m/s进行校核。计算得抛石粒径 $d=0.46$  m。块石质量公式为:

$$W = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_b \quad (7)$$

式中: $W$ 为单个块体的稳定质量(kg); $r$ 为块石的半径(m); $\rho_b$ 为块石的密度(kg/m<sup>3</sup>), $\rho_b=2\ 650$  kg/m<sup>3</sup>。计算得块石质量 $W=106$  kg。

水槽试验与规范计算的块石质量比约为1.4,因此,建议深槽护底边缘抛石防护时单件块石质量为规范计算值1.3~1.4倍以上为宜。

### 3.3 深槽护底边缘防护结构试验

#### 3.3.1 防护方案设计

根据边缘冲刷程度不同,将护底边缘防护区域分为永久防护区、一般保护区,所谓永久防护区即为护底无防护条件下边缘局部冲刷大于无工程条件下冲刷幅度的区域,是护底冲刷防护重点区域,一般根据试验或相关经验公式确定;一般保护区为永久防护区外围,其功能适应河床冲刷变形,保护永久防护区外围河床。本试验针对七星台深槽1#护底带端部边缘分别开展无防护、按试验确定粒径抛石防护、边缘永久防护区域设置抛石+沙枕+一般保护区抛透水框架3种不同方案试验(表1),模型布置见图3。

表1 护底边缘防护方案

方案	方案布置	说明
1	无护底	确定永久防护区范围40 m
2	护底边缘无防护	
3	护底边缘40 m范围抛石防护	抛石大小按上述试验确定
4	护底边缘永久保护区设置20 m抛石+20 m沙枕和一般保护区抛透水框架	块石抵抗护底边缘向下水流和马蹄形旋涡及面层水流综合剪力,沙枕为柔性过渡结构,透水框架边缘防冲促淤



a) 方案3



b) 方案4

图3 护底边缘防护结构形式模型布置

### 3.3.2 试验成果分析

开展了 25 000 m<sup>3</sup>/s 流量条件下不同防护方案的护底边缘冲刷试验，25 000 m<sup>3</sup>/s 流量为河段不利水流条件中出现几率较大的，具有代表性；同时已有研究表明 25 000 m<sup>3</sup>/s 流量下本河段河床冲刷最为明显。试验冲刷情况见表 2 和图 4。

表2 不同护底边缘防护后边缘最大冲刷深度

护底边缘防护形式	防护轴线端部流速/(m/s)	冲刷坑最深距边缘距离/m	最大冲刷深度/m
护底头部无防护	2.28	15	6.3
边缘块石抛投 40 m 防护	2.29	50	3.8
40 m 抛石+20 m 柔性材料+透水框架	2.26	3.6	

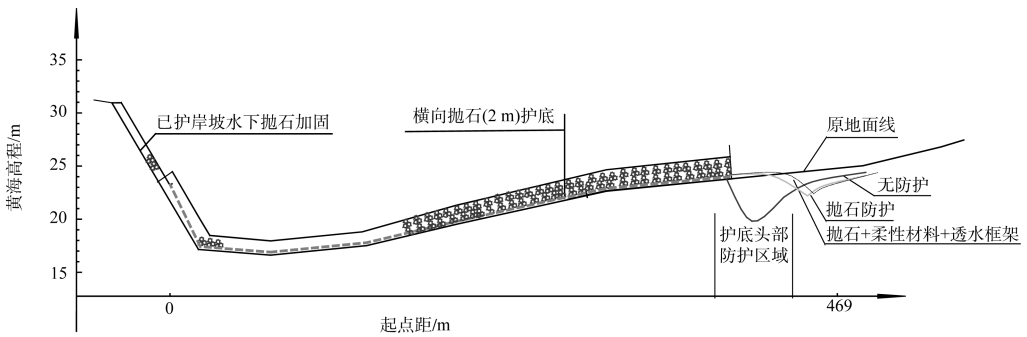


图4 不同护底边缘防护后冲刷情况

1) 深槽护底边缘设置防护措施减少了引起局部冲刷的不利因素，但冲击床面水流动力仍没完全消除，守护区域外侧的绕流对周边床面仍会产生冲刷。流速测定表明：边缘永久防护区抛投块石防护、抛石+柔性材料+抛透水框架这两个方案护底头部边缘流速分布差别不大，25 000 m<sup>3</sup>/s 流量下最大流速均在 2.3 m/s 左右。

2) 深槽护底边缘不论防护形式如何，防护范围以外总会产生一定的冲刷。其中无防护边缘局部边侧绕流比较集中，冲刷靠近边缘，冲刷极限深度较大；边缘设置防护后最大冲刷区外推，最大冲深幅度明显减小。边缘防护起到了防止护底压载体边侧坍塌、外推冲刷区、减少最大冲深、减小最大范围的作用，进而保证护底安全。无防

护、边缘块石防护、抛石+柔性材料+抛透水框架 3 种类型最大冲刷深度分别为 6.3、3.8、3.6 m。

3) 护底边缘水流所产生的底部向下旋转力是永久防护区产生局部冲刷的主要动力。边缘实施局部防护后护底边缘永久防护区床面采取加固措施，减小了底部产生冲刷的不稳定因素；对护底边缘块体防护而言，护底后冲刷坑有所减小，护底效果能够正常保证，但长时间冲刷累计边缘排体出现变形，破坏就会加快。采用块石+柔性物体+四面透水框架防护措施后，护底后冲刷量明显减小，护底效果较单纯抛石护底要好。

4) 护底边缘块体主要为了隔离水流直接作用于滩面，使得滩面泥沙不能起运进而保护护底建筑物，柔性材料是块体与沙质底床的柔性过渡结

构;而四面透水框架主要作用是增大滩面阻力、减小滩面流速,使得滩面流速小于泥沙起动流速。设置规格应根据工程区具体水流和河床情况综合考虑,同时要充分考虑单个压载体质量,以保证防护效果较好。2012年实施的江口水道深槽护底工程护底边缘防护采用抛石+钢丝网卵石包的边缘防护方案(护底边缘位于主航槽,航行安全考虑未加四面透水框架),工程实施3a来护底整体保持稳定,起到较好的防护效果。

#### 4 结论

1) 已建深槽护底带的局部破坏多位于滩槽、滩岸衔接护底带端部。破坏形式主要包括两类:护底边缘压载块体滑移在不利水流条件下诱发的破坏、边缘强烈冲刷引起长时间塌陷变形后由于缺少防冲备抛材料导致的破坏。

2) 基于已建护底工程边缘破坏原因的分析,提出了深槽护底带边缘增加防护块体质量、设置柔性材料+防冲促淤的防护思路。

3) 江口水道七星台深水护底带边缘防护试验表明,深槽护底带边缘防护采用抛石+抛枕类柔性材料+透水框架的组合防护措施效果明显,实际应用亦表明该类防护方案效果较好。

#### 参考文献:

- [1] 朱玉德.长江中游荆江河段航道整治工程江口水道护底结构形式及加糙效果研究[R].天津:交通部天津水运工程科学研究所,2014.
- [2] 郑英,吴伶,赵德玉,等.四面六边透水框架护滩结构效果水槽试验研究[J].水运工程,2012(11):127-132.
- [3] 牛兰花,李云中,杜林霞.三峡工程坝下游河段控制节点演变及护底试验效果分析[J].长江科学院院报,2014,31(6):123-129.
- [4] 李冬,袁达全,耿嘉良.长江中游嘉鱼—燕子窝河段航道整治工程效果分析[J].水运工程,2013(9):89-94.
- [5] 刘红星,夏金梧,王小波,等.长江中下游岸坡变形破坏的主要形式及处理[J].人民长江,2002,33(6):8-10.

(本文编辑 武亚庆)

## · 消 息 ·

### 一公院中标深圳至中山跨江通道项目设计咨询项目

近日,一公院与上海市政工程设计研究总院、丹麦 COWI 公司以及中铁隧道勘测设计院联合中标深圳至中山跨江通道项目设计咨询项目,中标金额约为 9 565 万元。

项目起于广深沿江高速机场互通立交,在深圳机场南侧跨越珠江口,西至中山马鞍岛,终于中山横门互通立交,主体工程全长约 24.03 km。全线采用双向八车道高速公路标准建设,设计时速为 100 km,项目估算总投资约达 423.71 亿元。

此项目是《珠江三角洲地区改革发展规划纲要(2008—2020年)》以及《广东省国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》中所列的重大项目,是继港珠澳大桥之后又一超级工程。

[http://en.ccccltd.cn/pub/ccccltd/xwzx/zgsdt/201607/t20160705\\_49170.html](http://en.ccccltd.cn/pub/ccccltd/xwzx/zgsdt/201607/t20160705_49170.html) (2016-07-05)