



长江中游沙质河床航道整治护滩带破坏机理及对策研究

陈飞, 郑力, 蔡大富, 曾方
(长江航道规划设计研究院, 湖北武汉430011)

摘要: 航道整治工程中护滩带的水毁现象较为突出, 基于实际工程中的破坏现象, 分析了护滩带破坏的主要影响因素, 对护滩带进行受力分析, 初步探讨了护滩带水毁机理, 提出了多种解决措施, 并在其他工程中进行了试验性的运用, 通过运用后的效果对比, 提出了较为成熟的护滩带结构形式。

关键词: 护滩带; 水毁机理; 受力分析; 对策研究

中图分类号: TV 861

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)10-0081-06

Failure mechanism and countermeasure investigation of beach protection belt in channel regulation in the middle and lower Yangtze River

CHEN Fei, ZHENG Li, CAI Da-fu, ZENG Fang

(Changjiang Waterway Institute of Planning, Design and Research, Wuhan 430011, China)

Abstract: The damage of beach protection belt by the water current force is very prominent in the channel regulation. Based on the destruction phenomenon of the actual project, this paper analyzes the main influential factors for the damage of the beach protection belt, carries out a stress analysis, investigates the damage mechanism, and proposes several solutions, which are applied to other projects. A relatively mature structural type of beach protection belt is proposed.

Key words: beach protection belt; water damage; stress analysis; countermeasure investigation

长江中游河道为冲积型河道, 分布有大量的、形态各异的成型淤积体(江心滩或边滩), 它们是河道的重要组成部分。在三峡蓄水后航道整治工程中, 为了稳固河岸和洲滩、稳定枯水航槽、控制河道格局, 需对一些滩体加以保护和控制, 从而维持其相对稳定^[1]。从目前已实施的工程及研究情况来看, 护滩工程相对于其他类型的整治建筑物具有结构及施工工艺简单、造价低等优点; 同时护滩工程基本不占用过水面积、不引起流场改变、不改变河道现状、不对环境产生不利影响。护滩带在中下游航道整治工程中应用广泛, 但其受到水毁破坏的问题也较为突出^[2]。在长

江中游航道整治工程中, 软体排护滩带的破坏形式可归纳为4大类: 边缘塌陷形成陡坡造成排体变形较大或者悬挂; 边缘排体下部河床局部淘刷, 形成空洞; 排体基础整体冲刷坍塌; 排中部塌陷或鼓包^[3-4]。本文将结合实际工程中的破坏现象, 研究护滩带水毁破坏的机理及改进措施。

1 护滩建筑物水毁过程及影响因素分析

1.1 护滩建筑物损毁过程分析

根据动床试验过程中对护滩建筑物损毁过程的观测, 护滩带护滩后, 由于护滩带隔离了具有较大流速的水流直接作用于受护滩面, 使得受保

收稿日期: 2012-07-30

作者简介: 陈飞(1982—), 博士, 高级工程师, 从事河流动力学及航道整治研究。



图1 沙市三八滩护滩带破坏

护的滩面难以冲刷，而未铺设护滩带的滩面及河槽在受较大流速水流的作用下，滩槽泥沙大量起动，首先发生冲刷下切。

随着护滩带边缘未护滩面的不断刷深，护滩带及所护滩面形同淹没坝体凸起于周边滩面，周边水流出现涡旋，紊动强烈，护滩带边缘滩面泥沙不断被淘刷形成冲刷坑。此时，冲刷坑较小，同时护滩带整体具有一定延展性（适应一定河床变形的能力），护滩带逐渐下降（塌陷）将边缘冲刷坑逐渐覆盖，当床面下切到一定程度或发生不均匀冲刷，且冲刷下切强度超过护滩带的变形能力时（冲刷坑较大），因护滩带块体本身为刚性构件，使得护滩带边缘部分出现“架空、悬挂”现象，尤其在滩脚附近，流速大，护滩带及所护滩面凸起相对明显，水流淘刷护滩带附近泥沙强烈，出现撕裂破坏。

随着护滩带边缘“架空”现象的出现，水流行进护滩带边缘时将不断淘刷护滩带下滩面泥沙，由于淘刷的不均匀性，护滩带与滩面间出现空隙，水流从护滩带下部穿过，直接作用于受护滩面；此外，由于护滩带表面不同部位流速不同，根据伯努利方程，流速大的部位对应压力小，流速小的部位压力大，造成护滩带底下不同位置的压差。由于护滩带下不同部位泥沙的各向异性，这些因素使得护滩带底下泥沙发生运动，从而有些护滩带发生鼓包现象，有些部位的护滩带出现塌陷，当护滩带下泥沙冲淤变形的幅度大于护滩带变形能力时，护滩带出现撕裂破坏。

1.2 护滩建筑物损毁主要影响因素分析

护滩建筑物破坏机理较为复杂，影响因素也较为复杂，破坏的关键在于护滩建筑物附近局

部冲刷坑的形成。就护滩带而言，其损毁的主要因素包括水流条件、河床组成、护滩带自身的结构、平面布置，以及护滩带施工工艺等。

1) 水流条件。

水流条件是造成护滩带破坏的动力因素，也是根本原因。主要包括流速大小、水流作用时段的长短、护滩带破坏部位的水深大小等。水流经过护滩带边缘时，当流速大于滩面泥沙起动流速时，护滩带边缘泥沙起动，未护滩面逐渐下切，随着水流作用时间的加长，护滩带边缘未护滩面大幅下切，形成局部冲刷坑，促使护滩带的破坏。水深大小一方面关系到水流漫滩与否，直接关系到护滩带是否受水流作用；另一方面关系到护滩带上动水压力大小，是加速护滩带出现“悬空”、“架空”后破坏的动力因素。

2) 河床组成。

主要与泥沙粒径有关，泥沙粒径的大小决定了河床的可动性。河床的组成与水流条件共同作用下，使得护滩带边缘局部形成冲刷坑。

3) 护滩带自身的结构、平面布置。

护滩带自身的结构主要与护滩带上的混凝土块质量、系结方式、排体接缝的连接方式、编织布及系结条抗拉强度等有关。平面布置又与护滩带长度、宽度、间距等有关。

混凝土块质量是块体能否有效压载排体、以防止水流作用于护滩带底下泥沙的重要因素，同时也是护滩带在“悬空”、“架空”时加速护滩带破坏的重要因素；系结方式、排体接缝的连接方式、编织布及系结条抗拉强度都是限制护滩带自身抗破坏强度的重要因素。

护滩带长度、宽度、间距是护滩带能否有效防止水流淘刷滩面的重要因素。

4) 施工工艺。

主要与护滩带施工质量、排体搭接宽度、护滩带边缘压载情况、排体的加筋方式等有关。

排体搭接宽度较小时, 当冲刷坑发展至2块以上排体受护区域时, 搭接处河床易出露, 使得冲刷向护滩带内部发展; 受加工工艺限制, 编织布多采用纵向加筋, 而横向未加筋, 使得排体延展性不足以适应河床较大幅度变形, 排体“悬空”、“架空”后, 排体上的拉力大于抗拉强度时发生撕裂。

综合上述因素可知, 流速大小是护滩带破坏的动力因素, 滩面泥沙粒径与较大流速共同作用后, 局部冲刷坑的形成是护滩带破坏的诱发原因, 编织布、系结条及接缝部位的抗拉强度不够是护滩带破坏的直接原因。

2 护滩带损毁受力分析

2.1 软体排受力情况分析

从护滩带单个混凝土块体及护滩带受力角度对损毁机理进行分析, 位于边滩斜坡上的护滩带边缘混凝土块体受力情况见图8。假设边滩沿滩宽方向坡度为 α , 混凝土块尺寸 $c \times b \times h$ (长 \times 宽 \times 高), 混凝土块主要由块体内的系结条与缝合在排垫、加筋条之间的系结条联结而成。

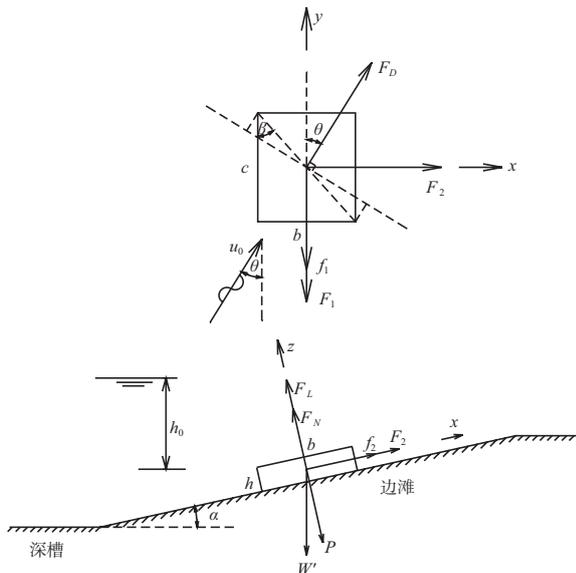


图8 护滩带边缘块体受力分析

混凝土块在滩体上主要受有效重力 W' , 拖曳

力 F_D , 上举力 F_L , 动水压力 P , 排垫阻碍块体运动的拉力 F_1 和 F_2 , 滩面对块体的摩擦力 f_1 和 f_2 , 滩体对混凝土块的支持力 F_N 。沿滩体坡度方向为平面方向, 垂直于滩体坡度方向为 z 方向, 受力分析如下:

x 方向:

$$F_D \sin \theta + F_2 + f_2 - W' \sin \alpha = 0 \quad (1)$$

y 方向:

$$F_D \cos \theta - F_1 - f_1 = 0 \quad (2)$$

z 方向:

$$F_N + F_L - P - W' \cos \alpha = 0 \quad (3)$$

1) 拖曳力 F_D 和上举力 F_L 。

拖曳力和上举力为水流对混凝土块的作用力。水流和块体表面接触时将因摩擦而产生摩擦力 P_1 , 当护滩带表面水流的雷诺数稍大时, 块体顶部流线将发生分离, 并在块体背水面产生涡滚, 从而在块体前后产生压力差, 造成形状阻力 P_2 , P_1 和 P_2 的合力为拖曳力 F_D 。

当混凝土块与排垫不完全贴合、或排垫撕裂时, 混凝土块底部与排垫或滩体间流动有渗透水, 块体顶部与底部的流速不同, 前者为水流的运动速度, 后者则为块体和排垫或块体和滩体间渗透水的流动速度, 比水流的速度要小得多。根据伯努利定律, 顶部流速高、压力小, 底部流速低、压力高, 造成的压力差产生方向垂直块体向上的上举力 F_L 。

拖曳力 F_D 和上举力 F_L 一般表达式为:

$$F_D = C_D k_1 b h \rho g \frac{u_0^2}{2} \quad (4)$$

$$F_L = C_L b c h \rho g \frac{u_0^2}{2} \quad (5)$$

式中: u_0 为水流底速; C_D 为拖曳力系数; C_L 为上举力系数; c, b, h 分别为块体长、宽、高; k_1 为块体垂直水流方向的投影面积系数, $k_1 = \frac{\sqrt{b^2 + c^2}}{b} \sin(\theta + \beta)$, θ 为底流与块体长度方向夹角, $\beta = \arctan\left(\frac{b}{c}\right)$ 。

2) 有效重力 W' 。

$$W' = (\rho_s - \rho) g b h c \quad (6)$$

式中: ρ_s 为混凝土块密度; ρ 为水的密度。

3) 动水压力P。

流动水流对块体的时均压力和脉动压力之和为动水压力。

4) 排垫阻碍块体运动的拉力F₁, F₂。

F₁, F₂分别为系结条、加筋条、排垫阻碍块体分别沿块体长度(纵向)、宽度(横向)方向运动的拉力,与系结条、加筋条、排垫本身抗拉强度有关,当超过其抗拉强度时,系结条、加筋条、排垫可能出现紧绷或撕断,使得排垫或滩面暴露于水面,护滩效果减弱。

将式(4)~(6)代入式(1)~(3)得:

$$F_2 = (\rho_s - \rho)gbhcsina - C_D k_1 bh \rho g \sin \theta \frac{u_0^2}{2} - f_2 \quad (7)$$

$$F_1 = C_D k_1 bh \rho g \cos \theta \frac{u_0^2}{2} - f_1 \quad (8)$$

$$F_N = P + (\rho_s - \rho)gbhccosa - C_L bc \rho g \frac{u_0^2}{2} \quad (9)$$

由式(7)~(9)可知,护滩带块体受力主要与块体材料与尺寸、水流特性、边滩形态及组成泥沙特性等有关;单个块体而言,护滩带破坏与否主要与F_N大小是否大于块体自身强度,F₁和F₂大小是否大于系结条、加筋条、排垫抗拉强度有关,由于块体本身强度较大,一般不易受水流作用而破坏,块体附近护滩带主要破坏为系结条、加筋条、排垫受力大于其抗拉强度而遭受破坏,使得系结条断裂、块体脱离排垫或排垫撕毁。

在护滩带边缘由于水流淘刷,逐渐形成冲刷坑,坡度逐渐变陡。此时,由于护滩带具有一定延展性,护滩带逐渐下降贴合受冲滩面,边缘块体也贴合滩面,护滩带仍保护受冲滩面,由于a值较大,使得系结条、排垫受到的拉力F₂也较大,此时,系结条可能出现紧绷或撕断,块体移动或脱落,护滩效果减弱。

随着护滩带边缘冲刷坑的发展及不均匀冲刷的发生,到一定的冲刷坑深度时,受护滩带整体延展性限制,边缘排垫出现“悬挂、架空”等变形现象。

滩脚部位的护滩带边缘出现“悬挂”变形时,单宽“悬挂”排垫最大受力T,位于排垫悬挂附近的滩体接触面处(图9),T可表示为:

$$T = C_1 \int_0^L q(x) dx \quad (10)$$

式中: C₁为与排垫延展率有关系数; L为排垫悬挂长度; q(x)为单宽“悬挂”护滩带上受力(有效重力及动水压力之和)分布。

随着冲刷坑变深而陡峭,“悬挂”排体长度变长,q加大,当q加大至一定程度或冲刷坑紊动强烈“悬挂”护滩带上脉动压力瞬时增大时,T大于排垫极限抗拉强度,该处排垫撕裂、系结条断裂、块体脱落,使得滩面暴露,并直接受水流冲刷,冲刷坑向护滩带内部发展,护滩带破坏也向护滩内部发展。

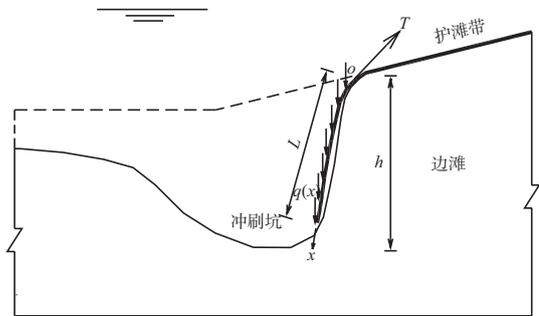


图9 滩脚处护滩带边缘“悬挂”受力

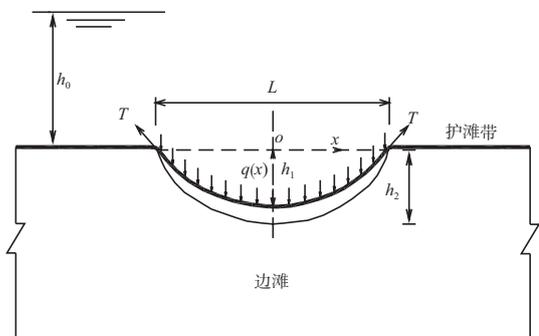


图10 护滩带边缘“架空”受力

在滩面上的护滩带边缘部分“架空”变形时(图10),单宽“架空”排垫最大受力T,位于排垫架空两侧,T可表示为:

$$T = C_1 \int_0^{L/2} q(x) dx \quad (11)$$

冲刷坑初始阶段,护滩带上流速较大,水深较浅,其上脉动压力较大,但受冲刷坑支撑,排垫两侧受力相对较小。随着冲刷坑的发展及滩面的不均匀冲刷的发生,排垫逐渐“架空”于滩面之上,“架空”的排体长度逐渐变大,排体上水深增加,单宽“架空”护滩带的有效重力及动水

压力增加,“架空”两侧排垫受力越来越大,当单宽“架空”护滩带的有效重力及动水压力增加到一定程度或者由于冲刷坑紊动剧烈,脉动压力瞬时增大,两侧排垫受力 T 大于排垫极限抗拉强度,“架空”两侧排垫出现撕裂、系结条断裂、块体脱落,撕裂处滩面失去保护,直接受水流冲刷,冲刷坑继续向两侧发展,直至护滩带边缘部分完全破坏。

2.2 软体排“架空”状态下的实例分析

假定排布在破坏前变形为弹性变形,当排体发生“架空”现象时,排体上最大拉力为:

$$T_{\max}=C_1Lq \quad (12)$$

式中: C_1 为与排体最大拉应变有关的系数; L 为冲刷坑宽度; q 为排体单宽质量。

设计混凝土块密度为 $2\,400\text{ kg/m}^3$,从排体使用情况来看,排边缘破坏过程均处于淹没状态,按国家有关标准,土工布的抗拉强度以 5 cm 宽作为计量标准,忽略排布自身质量,计算得排体单宽重力为 $q=49.39\text{ N/m}$ (混凝土块与混凝土块间长度方向上缝隙为 5 cm)。

当排体最大延伸率 $\varepsilon=10\%$ 时, $C_1=1.2$,排体上最大拉力、排体下坠最大深度与冲刷坑宽度的关系见表1。

表1 最大拉力、排体下坠最大深度与冲刷坑宽度的关系

冲刷坑宽度 L/m	最大拉力 T/N	最大深度 H/m
5	296	0.6
10	593	1.2
15	889	1.8
20	1 185	2.4
25	1 185	3.0
30	1 778	3.6
35	2 074	4.2
40	2 371	4.8
45	2 667	5.4
50	2 963	6.0
80	4 741	9.6
100	5 927	12.1
150	8 890	18.1
200	11 854	24.1

排体中聚丙烯编织布设计横向抗拉强度为 $1\,300\text{ N/(5 cm)}$,纵向抗拉强度为 $1\,600\text{ N/(5 cm)}$,聚丙烯加筋条设计抗拉强度为 $5\,000\text{ N/根}$,排体横向缝接强度为排体设计强度的 80% ,纵向对接处强度为排体强度的 85% 。根据X型排排布结构,假设加筋条与编织布变形、受力均相同,排体横向综合抗拉强度为 $1\,300\text{ N/(5 cm)}$,接缝处抗拉强度为 $1\,040\text{ N/(5 cm)}$;纵向综合抗拉强度为 $2\,100\text{ N/(5 cm)}$,对接处抗拉强度为 $1\,785\text{ N/(5 cm)}$ 。

1) 当冲刷坑发生在排体横向边缘时。

从上述最大拉力与冲刷坑长度的关系中可以得出,当冲刷坑宽度为 17.5 m 时,排体“架空”时,排体横向接缝处就达到设计抗拉强度。从三八滩及其他工程排体的应用情况来看,排体边缘已遭破坏区域,每条横向接缝均发生开裂,这说明,当冲刷坑宽度小于单块排宽 15 m 时,横向接缝处拉力已达到设计抗拉强度,即实际施工过程中,排体横向接缝强度未达到设计值。

2) 当冲刷坑发生在排体纵向边缘时。

当冲刷坑宽度为 30 m ,排体“架空”时,纵向对接处拉力达到设计抗拉强度;当冲刷坑宽度为 35 m ,排体“架空”时,排体纵向综合强度达到设计值。

上述计算表明,当冲刷坑发展到一定宽度和深度时,排体会出现“架空”现象,引起排体接缝处裂开。一旦排体出现裂缝后,排体坍塌,排体边缘河床地形成“垛”状,“垛”状地形反过来影响局部流态,加剧河床冲刷,使得边缘处裂缝进一步向护滩中间区域发展。

3 改进对策及效果

3.1 系混凝土块软体排存在的问题

从护滩建筑物结构作用机理及受力分析可以看出,系混凝土块软体排要实现护滩的保沙目的,应该具备两个要素:一是有良好的适应河床变形能力;二是有足够的强度承受外力,防止排体自身的破坏。

结合护滩建筑物受损情况,分析认为,排体受损的原因主要有以下两个方面:

1) 排体适应河床变形能力不足。

其一：铺设方式限制了排体适应河床变形的能力，由于单块排体与排体间横向缝接、纵向系接连为一个整体，当边缘河床发生不均匀冲刷变形时，由于排体的延伸率有限，连为整体的排体不能较好地适应河床变形，从而导致排体容易出现“架空”现象。其二：预留变形区要有足够的宽度，根据护滩带作用原理，守护区域应该分为预期稳定区和预留变形区。当预留变形区域过窄的时候，预期稳定区域内的床沙易从排体下面通过预留变形区流失到预留变形区域以外，造成排体坍塌。长江中游床沙颗粒水下稳定边坡一般为1:3，从目前已建航道整治工程的情况看，护滩（底）建设后，最大冲刷坑度为20 m左右，也就是说护滩区域单侧预留变形区宽度至少为60 m。

2) 排体自身强度不满足较大幅度河床变形的要求。

根据上述受力计算分析，应急守护工程中所采用的排体设计综合强度仅能满足冲刷幅度不超过3 m的河床变形要求，当冲刷幅度超过3 m时，排体容易发生撕裂。而排垫综合强度主要取决排垫自身强度和接缝处强度，由于接缝处强度只能达到排垫强度的70%，因此，接缝处往往是最先破坏的地方。

3.2 改进措施

由于护滩带的破坏往往是从边缘开始的，通过对护滩带边缘结构的改进往往能达到事半功倍的效果。

1) 排体边缘预埋处理。

研究表明，在流速较小的部位（流速小于1 m）或护滩带的上游面采用预埋处理，可以减小排体边缘不均匀冲刷及被“架空”的可能性。同时，在X型排边缘排布下铺设无纺布，无纺布与排布错缝搭接，可以保护排体撕裂处滩体免受进一

步冲刷，提高排体的保沙性能。

2) 排体边缘防冲促淤处理。

在护滩带边缘采用四面六边透水框架，此结构由6根相同长度的杆件焊接而成的正四面体结构，重心较低，具有良好的稳定平衡性，当水流通过时，利用本身构件来逐渐消减水流的动能，减缓流速，能起到减小排体边缘的冲刷，促进淤积，起到较好的护滩效果。

3.3 改进效果

改进后的构件和结构形式在长江中游沙市河段航道整治一期工程中进行了运用，从运用后的情况看，护滩带总体上保持稳定，排体边缘没有出现冲刷变形的情况，局部部位出现了一定的淤积，四面六边框架部分被泥沙掩埋，保持了较好的稳定性，改进后的护滩结构收到了较好的工程效果。

目前，此改进措施已在长江中下游航道整治工程中进行了广泛应用，从实施后的运用效果看，改进措施是十分成功的。改进后的护滩带结构能够起到改善护滩带性能的作用，护滩带边缘适应水流变形的能力增强、护滩带整体的稳定性增加，不易毁坏，后期维护相对少。

参考文献：

- [1] 陈飞, 付中敏, 刘怀汉. 三峡水库蓄水对下荆江监利河段航道条件影响分析[J]. 水利发电学报, 2011(2): 93-97.
- [2] 谭伦武, 崔承章. 长江中游航道整治护滩带稳定性关键技术研究[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 武汉大学, 2006.
- [3] 曹明雄, 蔡国正. 边滩水沙运动特点及护滩建筑物破坏机理研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2006.
- [4] 谭伦武, 赵德玉. 边滩护滩(底)建筑物布置与结构研究[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 武汉大学, 2006.

(本文编辑 武亚庆)