

E-mail: aixingma@ yahoo. com. cn

护滩面,使得受保护的滩面难以冲刷,进而守护滩体.护滩带整体上护滩效果明显^[5],但工程应用中护滩带经过一定的水沙作用后,出现了不同程度及不同类型的破坏,如排体边缘塌陷、悬挂、排体中部鼓包或塌陷等(见图2).文献[2]和[6]对护滩带的破坏类型进行了归纳,总体上可分为5个破坏类型:(1)边缘塌陷型;(2)排体中部塌陷或鼓包;(3)边缘形成陡坡,边缘排体变形较大甚至悬挂;(4)边缘排体下部河床局部淘刷,形成空洞;(5)排体基础整体冲刷坍塌.

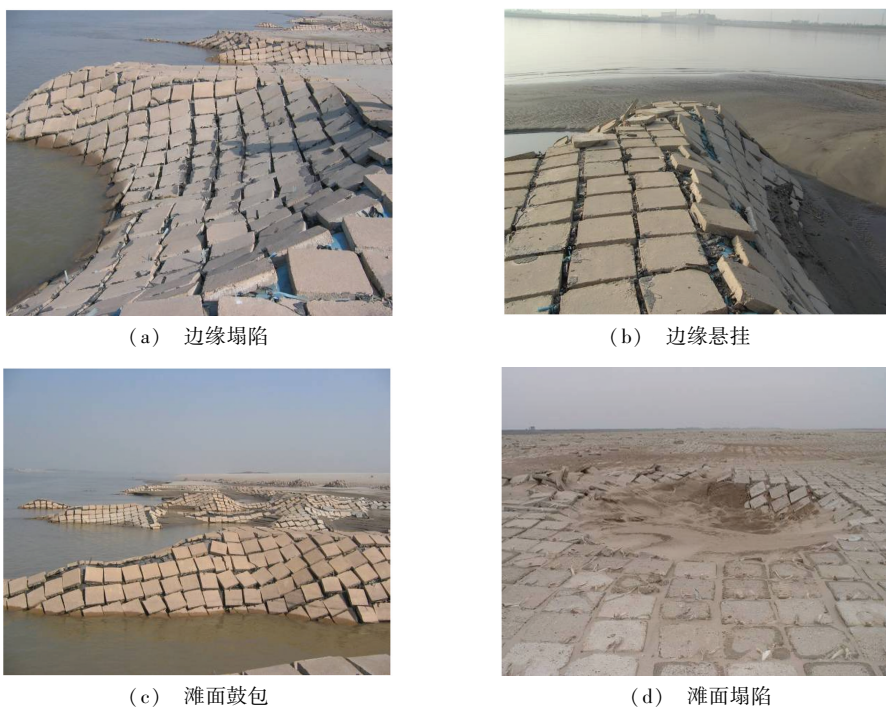


图2 工程中护滩带破坏情况

Fig.2 The failure of beach protection band in practical project

根据文献[7-8]中的试验观测,护滩带在滩脚附近出现悬挂、架空、撕裂等破坏,或者滩面护滩带出现塌陷或鼓包,造成护滩带破坏(见图3).



图3 试验中护滩带破坏情况

Fig.3 The failure of beach protection band in test

2 护滩带损毁过程及影响因素

2.1 损毁过程分析

根据清水冲刷试验过程中对护滩带损毁过程的观测^[7-8],清水冲刷开始阶段,因水流流速较大,且又为

不饱和挟沙,护滩带守护范围以外的滩面及上下游床面泥沙开始成层下移,床面开始进入冲刷下切阶段.此时护滩带边缘滩面逐渐冲刷下切形成冲刷坑,因护滩带整体具有一定延展性(适应一定河床变形的能力)而逐渐下降贴合滩面护滩,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,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,护滩带破坏,水流淘刷其底部泥沙,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,护滩带底下泥沙发生运动,使得护滩带某些部位发生鼓包、塌陷现象,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.

随着上下游床面及滩面冲刷下切,水深增加,并形成一定规模的沙波运动,引起床面阻力增加,流速及水面比降减缓,限制了滩面继续冲刷下切,河床处于冲淤平衡阶段.

2.2 损毁影响因素分析

护滩带损毁机理较为复杂,影响因素较多,破坏的关键在于护滩带附近局部冲刷坑的形成与发展,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、水流作用时间的长短、护滩带破坏部位的水深大小等.水流流速及作用时段的长短直接关系到护滩带边缘未护滩面冲刷坑的形成范围、深度及其发展.水深大小一方面关系到水流漫滩与否,护滩带是否受水流作用;另一方面也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 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,形成了护滩带边缘的局部冲刷坑.

(3) 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.混凝土块质量关系到块体能否有效压载排体,系结方式、排体接缝的连接方式、编织布及系结条抗拉强度关系到护滩带抵抗破坏的能力.

(4) 平面布置型式 目前护滩带的平面布置主要有间隔守护、集中守护与间隔守护相结合、整体守护.对护滩效果而言,整体守护效果最好,但缺乏经济性;其次为集中守护与间隔守护相结合;最后为间隔守护.

(5) 施工工艺 主要与施工质量、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,编织布多只采用纵向加筋,使得排体延展性不足以适应河床较大幅度的变形,排体“悬空”、“架空”后,排体上的拉力大于抗拉强度时发生撕裂.

综上所述,流速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,局部冲刷坑的形成与发展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.

3 护滩带损毁机理分析

3.1 护滩带块体间脉动力变化

在冲刷发展过程中,护滩带边缘区域水流结构复杂,紊动强度大,造成护滩带块体间存在一定的脉动力,当块体间所受的脉动力为脉动强度较大的拉力时,可加剧护滩带的损毁.试验表明护滩带块体间脉动力大小的变化与护滩带边缘滩体冲刷变形过程有关^[9]:冲刷初始阶段,由于水流紊动强度大,护滩带边缘冲刷发展很快,护滩带的变形严重,护块与护块之间的脉动力主要为脉动拉力,且增幅较快,冲刷至某一阶段,脉动拉力达到最大值.之后,随着冲刷时间的增长,冲刷坑逐渐达到冲刷平衡,护滩带变形逐渐趋于稳定状态,护块与护块之间脉动力变化也变缓并渐趋稳定.

3.2 护滩带损毁受力分析

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,位于滩体斜坡上的护滩带边缘混凝土块体受力情况见图4.假设滩体沿滩宽方向坡度为 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.

混凝土块在滩体上主要受有效重力 W' , 水流拖曳力 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 , 块体间的脉动力 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撑力 F_N .

拖曳力 F_D , 上举力 F_L 及混凝土块有效重力 W' 一般表达式为:

$$F_D = C_D k_1 b h \gamma \frac{u_0^2}{2} \quad (1)$$

$$F_L = C_L b c \gamma \frac{u_0^2}{2} \quad (2)$$

$$W' = (\gamma_s - \gamma) b h c \quad (3)$$

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, $k_1 = \sin(\theta + \beta) \sqrt{b^2 + c^2} / b$, θ 为底流与块体长度方向夹角, $\beta = \arctan(b/c)$; γ_s 为混凝土块重度; γ 为水的重度.

动水压力 P 为流动水流对块体的时均压力和脉动压力之和. F_1 和 F_2 分别为系结条、加筋条、排垫阻碍块体分别沿块体长度(纵向)和宽度(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. 当外力超过其抗拉强度时, 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.

根据混凝土块体受力平衡得到 F_1, F_2 和 F_N 表达式:

$$F_1 = C_D k_1 b h \gamma \cos \theta \frac{u_0^2}{2} + F'_1 - f_1 \quad (4)$$

$$F_2 = (\gamma_s - \gamma) b h c \sin \alpha + F'_2 - C_D k_1 b h \gamma \sin \theta \frac{u_0^2}{2} - f_2 \quad (5)$$

$$F_N = P + (\gamma_s - \gamma) b h c \cos \alpha - C_L b c \gamma \frac{u_0^2}{2} \quad (6)$$

由式(4)~(6)可知, 护滩带块体受力主要与块体材料(γ_s)与尺寸(b, c, h)、水流特性($P, F'_1, F'_2, u_0, \theta, \gamma$)、滩体形态(α)及滩面泥沙特性等有关; 对于单个块体, 护滩带破坏与否, 主要取决于支撑力 F_N 是否大于块体自身强度, 拉力 F_1, F_2 是否大于系结条、加筋条、排垫抗拉强度. 由于块体本身强度较大, 一般不易受水流作用而破坏, 块体附近护滩带破坏主要因系结条、加筋条、排垫受力大于其抗拉强度, 从而引起系结条断裂、块体脱离排垫或排垫撕毁, 块体脱离排垫后, 与其他坝体撞击后容易碎裂.

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 α 值较大, 且块体间脉动力(主要为脉动拉力) F'_1 和 F'_2 较大, 使得系结条、排垫受到的拉力 F_1 和 F_2 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. 实际工程中系结条断裂、块体脱离排垫的破坏情况见图5.

随着护滩带边缘冲刷坑的发展及不均匀冲刷的发生, 在冲刷坑达到一定深度时, 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, 其受力示意图分别见图6和7.

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_1 , 位于排垫悬挂附近的滩体接触面处(图6), T_1 可表示为:

$$T_1 = C_1 \int_0^{L_1} q_1(x) dx \quad (7)$$

式中: C_1 为与排垫延展率有关的系数; L_1 为排垫悬挂长度; $q_1(x)$ 为单宽“悬挂”护滩带上受力(有效重力及动水压力之和)分布.

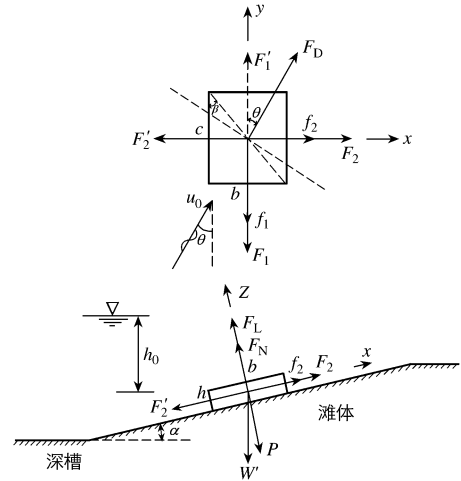


图4 护滩带边缘块体受力分析示意图

Fig. 4 Stress analysis on edge block of beach protection band



图 5 护滩带系结条断裂、块体脱离排垫的破坏情况

Fig. 5 Destruction of tied rope's rupture and block's sliding from cushion layer

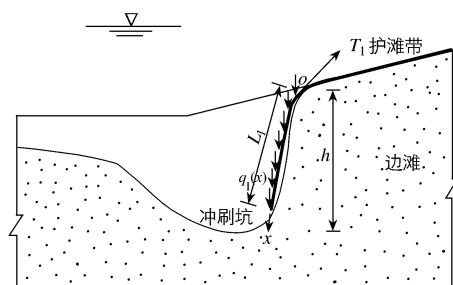


图 6 滩脚处护滩带边缘“悬挂”受力示意图

Fig. 6 Stress analysis on edge hanging of beach protection band

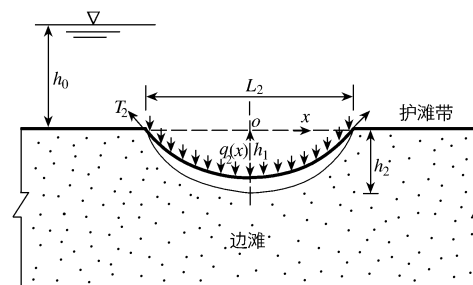


图 7 护滩带边缘“架空”受力示意图

Fig. 7 Stress analysis on edge overhanging of beach protection band

随着冲刷坑变深直至陡峭,“悬挂”排体长度变长,冲刷坑紊动强烈, q_1 加大,当 q_1 加大至一定程度或 T_1 作用位置处块体间脉动拉力瞬时增大时, T_1 大于排垫极限抗拉强度,从而该处排垫撕裂、系结条断裂、块体脱落,进而使得滩面暴露,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 2(b) 和图 3 中左图可认为是此类破坏情况。

在滩面上的护滩带边缘部分“架空”变形时(如图 7),单宽“架空”排垫最大受力 T_2 ,位于排垫架空两侧,可表示为:

$$T_2 = C_1 \int_0^{L_2/2} q_2(x) dx \quad (8)$$

式中: L_2 为护滩带边缘冲刷坑宽度; $q_2(x)$ 为单宽“架空”护滩带的受力(有效重力及动水压力之和)分布。

冲刷坑初始形成阶段,护滩带边缘受冲刷坑周边支撑,排垫两侧受力相对较小。随着冲刷坑的发展及滩面不均匀冲刷的发生,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 T_2 作用位置处块体间脉动拉力瞬时加大,两侧排垫受力 T_2 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,图 2(a) 可认为是此类破坏情况。

对于护滩带内部出现塌陷破坏也可按照护滩带边缘“架空”的受力进行分析,破坏机理类似,不同之处是边缘“架空”时排垫受滩体的三面支撑,而护滩带内部塌陷时,排垫四面均受滩体支撑,图 2(d) 和图 3 中右侧图可认为是这类破坏情况。

3.3 护滩带损毁机理

从上述护滩带破坏受力分析来看,护滩带破坏的主要机理为:水流冲刷未护滩面后,护滩带边缘冲刷坑形成,水流紊动加剧,护块间的脉动力迅速增加,因护滩带具有一定延展性,排体下降贴合受冲滩面继续护滩,当冲刷坑坡度较陡时,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;随着冲刷坑的继续发展,受护滩带整体延展性限制,边缘排垫出现“悬挂”、“架空”等变形,使得原受护滩面直接受水流淘刷,当

冲刷坑发展到一定阶段,变形的护滩带上受力(有效重力及动水压力之和)达到一定值,或块体间脉动拉力瞬时加大时,护滩带变形一侧或两侧的排垫受力大于其极限抗拉强度,排垫撕裂,系结条断裂、块体脱落,护滩带破坏,撕裂处滩面失去保护,直接受水流冲刷,冲刷坑向护滩带内部发展。

4 护滩带损毁应对措施

从护滩带损毁的原因及机理来看,护滩带破坏主要是排体边缘冲刷坑的形成并向排体内部发展,造成排体变形过大,超出排体自身抗拉强度,因而,抑制护滩带边缘冲刷坑的形成与发展,同时增大排体自身强度是应对护滩带损毁的重要措施:(1)在护滩带边缘抛四面六边透水框架,文献[7-8,10-11]对四面六边透水框架(以下简称“框架”)的护滩效果进行了试验研究,结果表明框架护滩效果良好,特别是水流顶冲部位,适应河床变形能力强。四面六边透水框架护滩原理与护滩带不同,框架主要通过增大滩面阻力,减小滩面流速,使得滩面流速小于泥沙起动流速而保护滩体,同时,因框架本身为散抛体,能适应滩面的较大变形。因此,在护滩带边缘特别是受水流顶冲的边缘部位抛一定的四面六边透水框架,可防止护滩带边缘冲刷坑的发展,从而起到护滩带边缘防护作用。在周天河段等航道整治工程中曾采用四面六边透水框架群对软体排边缘进行处理,工程效果较好。(2)增大排体自身抗拉强度,如将接缝处改缝接为搭接处理,可大大增加接缝处抗拉强度,目前D型排采用的接缝处理方式即为搭接处理。此外,选择合理的平面布置型式对护滩带的稳定也起到重要作用。

5 结 语

通过对护滩带损毁过程的试验观测、损毁影响因素分析、护滩带块体间脉动力及块体、排体受力分析,研究了护滩带损毁机理,主要结论如下:(1)护滩带主要发生边缘塌陷、悬挂,排体中部鼓包、塌陷等破坏类型。(2)流速是护滩带破坏的动力因素,局部冲刷坑的形成与发展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足是护滩带破坏的直接原因。(3)护滩带破坏的主要机理为:护滩带边缘冲刷坑形成,排体下降贴合受冲刷面继续护滩,当冲刷坑较陡时,护块间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;随着冲刷坑的发展,边缘排垫出现“悬挂”、“架空”等变形,原受护滩面受水流淘刷,至冲刷坑发展到一定阶段,护滩带变形侧的排体受力大于其抗拉强度,排布撕裂,系结条断裂,块体脱落,护滩带破坏,撕裂处滩面失去保护,直接受水流冲刷,冲刷坑向护滩带内部发展。(4)应对护滩带损毁的重要措施:在护滩带边缘特别是受水流顶冲的边缘部位抛一定的四面六边透水框架,增大排体自身的抗拉强度,选择合理的平面布置型式等。

致谢:本文在研究过程中,得到了长江航道规划设计研究院付中敏高级工程师和重庆交通大学王平义教授指导与帮助。在此,深表感谢!

参 考 文 献:

- [1] 李志江,段斐,李伟林. X型排在长江中下游护滩工程中的应用[J]. 水运工程, 2007(4): 88-89. (LI Zhi-jiang, DUAN Fei, LI Wei-lin. Application of X-shape mattress in beach protection project on the middle & lower reaches of the Yangtze River [J]. Port & Waterway Engineering, 2007(4): 88-89. (in Chinese))
- [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. (TAN Lun-wu, CUI Chen-zhang. Study on key technology of beach protection band's stability of channel regulation in middle reach of Yangtze River[R]. Wuhan: Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute, Wuhan University, 2006. (in Chinese))
- [3] 刘怀汉,付中敏,陈婧,等. 长江中游航道整治建筑物护滩带稳定性研究[C]//中国水利学会青年科技工作委员会. 中国水利学会第三届青年科技论坛论文集. 郑州:黄河水利出版社, 2007: 290-294. (LIU Huai-han, FU Zhong-min, CHENG Jin, et al. Study on beach protection band's stability of channel regulation structure in middle reach of Yangtze River [C]//Youth Science & Technology Work Committees of Chinese Hydraulic Engineering Society. Proceedings of the Third Youth

- Forum on Science and Technology of Chinese Hydraulic Engineering Society. Zhengzhou: Yellow River Hydraulic Press, 2007: 290-294. (in Chinese))
- [4] 谷利华, 岳红艳, 张杰. 长江石首段航道整治工程行洪影响研究[J]. 人民长江, 2010, 41(8): 5-8. (GU Li-hua, YUE Hong-yan, ZHANG Jie. Study on influence of channel regulation project on flood discharge in Shishou Reach of Yangtze River [J]. Yangtze River, 2010, 41(8): 5-8. (in Chinese))
- [5] 张秀芳, 王平义, 王伟峰, 等. 软体排护滩带的护滩效果研究[J]. 水运工程, 2010(12): 98-103. (ZHANG Xiu-fang, WANG Ping-yi, WANG Wei-feng, et al. Beach protection with flexible mattress beach protection belt[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(12): 98-103. (in Chinese))
- [6] 王平义, 杨成渝, 刘晓菲. 长江航道整治护滩建筑物模拟技术的研究[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2008. (WANG Ping-yi, YANG Cheng-yu, LIU Xiao-fei. Study on simulation technique about the beach building of the Yangtze River[R]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008. (in Chinese))
- [7] 曹民雄, 蔡国正, 王秀红, 等. 边滩水沙运动特点及护滩建筑物破坏机理研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008. (CAO Min-xiong, CAI Guo-zheng, WANG Xiu-hong, et al. Study on the characteristics of bar's flow & sediment movement and beach protection band's failure mechanism[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [8] 曹民雄, 马爱兴, 王秀红, 等. 心滩水力特性及冲刷变形研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010. (CAO Min-xiong, MA Ai-xing, WANG Xiu-hong, et al. Study on the hydraulic characteristics and scouring deformation of central bar[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2010. (in Chinese))
- [9] 刘晓菲, 王平义, 杨成渝. X 型系混凝土块软体排模拟技术[J]. 水运工程, 2011(2): 102-107. (LIU Xiao-fei, WANG Ping-yi, YANG Cheng-yu. Simulation technique about X-type flexible mattress[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(2): 102-107. (in Chinese))
- [10] 刘倩颖, 王平义, 喻涛, 等. 四面六边透水框架群的护滩效果研究[J]. 水运工程, 2009(12): 44-48. (LIU Qian-ying, WANG Ping-yi, YU Tao, et al. Study on beach protection with triangular taper penetrating frame groups[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(12): 44-48. (in Chinese))
- [11] 陈飞, 付中敏, 刘怀汉. 四面六边框架结构在航道整治工程中的应用[J]. 水运工程, 2010(11): 98-102. (CHEN Fei, FU Zhong-min, LIU Huai-han. Application of tetrahedron-like penetrating frame groups in channel regulation[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(11): 98-102. (in Chinese))

Failure mechanism and relevant measures for beach protection band in lower-middle reaches of Yangtze River

MA Ai-xing, CAO Min-xiong, WANG Xiu-hong, CAI Guo-zheng

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Beach protection band is the main structure type of channel maintenance engineering in the lower-middle reaches of the Yangtze River. The effects are weakened due to structure collapse, hanging, overhanging, bulging, etc. Through the test observation of failure process, the damage factors, fluctuating force, and stress, the failure mechanism of common types, such as edge collapse, hanging, bulging and middle collapse, are analyzed. The results show that the magnitude of flow velocity is the dynamic factor of destruction, the formation and expansion of local scour holes are the inducing elements, and the insufficient tensile intensity of fabric, tied rope and joint position is a direct factor. Some countermeasures are also presented, such as setting permeable frames of tetrahedron with six sides at the edge of band, strengthening the structure's tensile intensity, and selecting reasonable types of layout, etc. The research results can be used as a reference for the design of similar beach protection structures.

Key words: channel regulation; beach protection band; stress analysis; failure mechanism; countermeasures