

· “长江南京以下 12.5 m 深水航道建设”专栏(18) ·



软体排与扭双工字透水框架结构
潜堤下游联合护底试验研究*

曹民雄^{1,3}, 张卫云^{1,2}, 马爱兴^{1,3}, 胡颖^{1,3}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学, 江苏 南京 210098;
3. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 为充分利用软体排与扭双工字透水框架的各自结构护底优势、减少工程投资, 通过水槽试验研究了潜堤下游两者联合护底的水动力特性、防护效果及适用部位、布置方式等关键技术问题。结果表明坝脚附近出现下沉水流、堤坝后存在横轴环流; 框架群可有效减缓水平向滩面水流, 但无法消减越堤的竖向水流, 框架不能直接抛投于堤脚或坝脚处, 应抛投于软体排的下排边; 排边框架抛投宽度以 20 m 左右 (5 m 搭接) 为宜, 框架抛投密度以 2 个/m² 时效果最佳; 成果可为工程设计提供技术参考。

关键词: 潜堤下游; 联合护底; 软体排; 扭双工字透水框架; 水槽试验
中图分类号: U 617 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-4972(2015)07-0001-07

Experimental study on joint bottom protection soft mattress and
twisted double “H” permeable frame structure submerged breakwater downstream

CAO Min-xiong^{1,3}, ZHANG Wei-yun^{1,2}, MA Ai-xing^{1,3}, HU Ying^{1,3}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: To make full use of the advantages of soft mattress and twisted double “H” permeable frame for bottom protection, and reduce the project investment, we study the hydrodynamic characteristics, the protective effect and applicable parts and arrangement of the submerged breakwater downstream’s soft mattress and twisted double “H” permeable frame joint bottom protection by the generalized flume test. The results show that sinking current appears near the dam base and transverse circulation emerges behind the dam; The framework group can effectively slow down the level surface water flow to the beach, but it is unable to reduce the vertical flow of overflow the dike. The framework can not be directly thrown into the base of the dike or the base of the dam, so the framework should be thrown into the soft mattress of bottom edge. A side frame thrown width of about 20 m (5 m overlapping) is advised, and the framework thrown density of 2 sets/ m² is the best. The results can provide technical reference for the engineering design.

Keywords: submerged breakwater downstream; joint bottom protection; soft mattress; twisted double “H” permeable frame; flume experiment

潜堤或浅坝对水流的拦截作用较大, 越堤流
往往引起堤坝下游冲刷, 危及堤坝安全^[1], 为此
需要对堤坝下游进行防护, 工程中多采用软体排
护底或周边透水框架抛护。

收稿日期: 2014-11-04
*基金项目: 交通运输部科技项目 (2013328J17500)
作者简介: 曹民雄 (1965—), 男, 博士, 教授级高工, 从事港口航道与工程泥沙研究。

护底软体排是直接隔离水流对床面泥沙的作用而护滩,但往往在软体排边缘再次出现冲刷,需要加护余排。过去的排体主要采用植物和天然纤维为原料,易腐烂、工程使用寿命短,多作为临时工程措施以应急,有时也作为生态护岸^[2];20 世纪 60—70 年代荷兰在围海造陆工程中采用了混凝土块压载体软体排护底,此后混凝土软体排应用越来越广泛,近年来长江上也广泛应用土工织布软体排。软体排的周边河床冲淤形态^[3-4]、稳定性^[5]、损毁机理^[6]等研究表明,软体排具有良好的变形适应能力,但维持坝体的稳定,需要加护余排使得排边冲刷尽可能远离坝体。

透水框架具有较大的孔隙率,框架对水流的扰动将引起床面水流速度的折减,应用最为广泛的是四面六边透水框架。四面六边透水框架群的减速促淤效果^[7-10]、水动力特性^[11-12]及工程应用^[13-14]等研究表明减速促淤效果明显,但框架易散落及锈蚀散架。针对存在的不足,长江南京以下深水航道一期工程开发了扭双工字新型透水框架^[15-16],框架群自然勾连、也能适应一定的冲淤变形。

能否采用软体排与扭双工字透水框架结构联合护底,以减少余排宽度?这是本文需要研究的问题。本文主要通过水槽试验研究潜堤下游软体排与透水框架联合护底的水力特性、效果及适用部位、布置方式等关键技术问题,可为工程设计提供技术参考。

1 水槽设计与结构物模拟

1.1 水槽设计

1.1.1 水动力特性研究水槽

潜堤下游联合护底水动力特性研究采用比尺 1:20 在变坡水槽进行,流速测量采用声学多普勒点式流速仪 Vectrino (小威龙),水位、水深由测针测量及自动水位仪监测。变坡水槽全长 44 m、宽 0.8 m、深 0.8 m,为翘板式钢架镶玻璃边壁,通过底部的钢结构支撑实现槽底坡度调节,水槽进水段采用 PVC 管群进行消能,使进口水流沿宽均匀分布,出口通过步进电机控制格栅尾门的开度进而控制尾门水位。

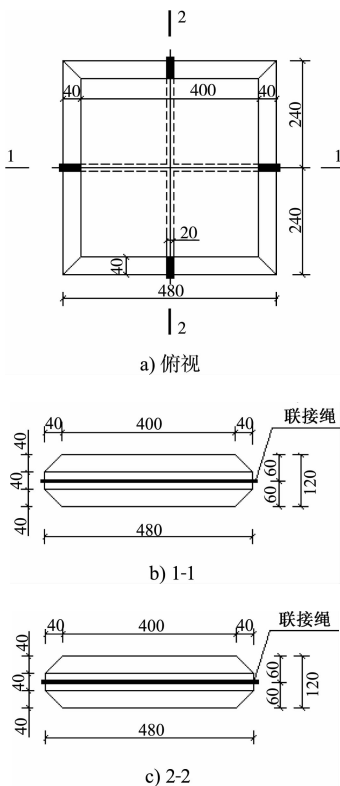
1.1.2 冲淤效果试验水槽

冲淤效果试验在 2 m 宽水槽中进行,动床试验段设置在水槽中间 17 m、铺沙深度 0.20 m。模型沙考虑模拟长江下游河段的床沙,其级配组成特征值为: $d_{15.9}=0.104\text{ mm}$ 、 $d_{25}=0.115\text{ mm}$ 、 $d_{50}=0.152\text{ mm}$ 、 $d_{75}=0.197\text{ mm}$ 、 $d_{84.1}=0.213\text{ mm}$,对应不均匀系数 $\eta\left(=\sqrt{\frac{d_{75}}{d_{25}}}\right)=1.31$,几何均方差 $\sigma_g\left(=\sqrt{\frac{d_{84.1}}{d_{15.9}}}\right)=1.43$ 。拟采用 1:40 正态设计,按泥沙起动及水下休止角相似,选定 $\rho_s=1.15\text{ t/m}^3$ 、 $\rho_0=0.63\text{ t/m}^3$ 、 $d_{50}=0.20\text{ mm}$ 的塑料沙作为模型沙。冲淤地形采用二维地形测量系统监测。

1.2 软体排与扭双工字透水框架制作与模拟

1.2.1 软体排制作与模拟

长江南京以下深水航道一期工程中采用的软体排结构为:排垫采用长丝机织布与无纺布的复合布,单位面积质量为 500 g/m^2 (350 g/m^2 机织布 + 150 g/m^2 无纺布);排垫上混凝土压载体为 C20 混凝土块体、密度 $2\,400\text{ kg/m}^3$,混凝土联锁块压载体(图 1)尺寸为 $0.480\text{ m}\times 0.480\text{ m}\times 0.120\text{ m}$,块体间的间距为 0.02 m 。





d) 模型软体排

图 1 软体排压载块体原型尺寸与模型软体排 (单位: cm)

模型分别按 1:20 与 1:40 的块体形状、尺寸、质量相似进行缩尺模拟: 比尺 1:20 要求压载块体尺寸为 0.024 m×0.024 m×0.006 m、质量 7.29 g, 比尺 1:40 要求压载块体尺寸为 0.012 m×0.012 m×0.003 m、质量 0.91 g。混凝土压载体模拟材料是由玻璃纤维、尼龙、氟塑料等材料按一定比例融化混合形成的, 经开模注塑制作了两种比尺 (1:20、1:40) 的块体, 经抽样检验, 尺寸、质量的误差均小于 2%, 保证了压载块体模型与原型的几何相似、质量相似。根据已有研究经验, 压载体与排垫的系结可采用环氧树脂把压载体粘贴在棉布上进行模拟 (图 1)。

1.2.2 扭双工字透水框架制作与模拟

长江南京以下深水航道一期工程中研发的扭双工字透水框架杆件原型尺寸见图 2, 材料为钢筋混凝土, 平均密度 2 400 kg/m³, 原型单个透水框架质量 106.8 kg。模型同样分别按 1:20 与 1:40 的几何相似、质量相似对透水框架进行缩尺模拟, 比尺为 1:20 要求杆件尺寸为 0.005 m×0.005 m×0.04 m、框架质量 13.30 g, 比尺为 1:40 杆件尺寸为 0.002 5 m×0.002 5 m×0.02 m、框架质量 1.66 g。同样选择玻璃纤维、尼龙、氟塑料等材料按一定比例融化混合形成密度为 2.4 g/cm³ 的模拟材料, 经开模注塑制作了两种比尺 (1:20、1:40) 的透水框架模型 (图 2), 经抽样检验, 框架模型尺寸、质量的误差均小于 2%, 保证了透水框架模型与原型的几何相似、质量相似。

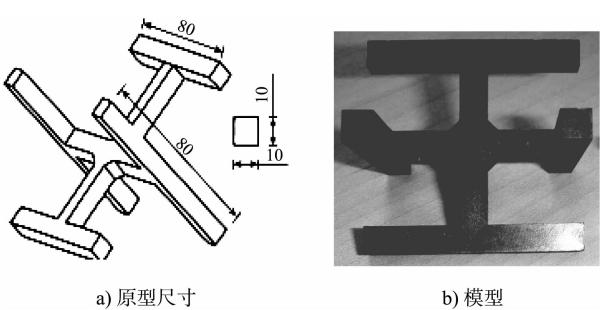


图 2 扭双工字透水框架原型尺寸与模型 (单位: cm)

2 联合护底水力特性试验

为研究软体排与扭双工字透水框架联合护底的作用机制, 首先需要研究不同联合护底方式时的水动力特性。潜堤的尺度为堤高 3 m、顶宽 4 m、边坡 1:2。按扭双工字透水框架不同的抛投部位与搭接长度分为不同方案, 各方案的护底范围按软体排与透水框架的总造价一致为原则。经测算, 软体排造价为 121.07 元/m², 扭双工字透水框架工程费用包括预制及抛投费用为 73.83 元/个, 框架抛投 2 层、密度 2 架/m² [15]。试验水流条件为潜堤顶中心处垂向平均流速 3.3 m/s、堤顶水深 2.7 m。试验方案及组次安排见表 1。以下分析以潜堤轴线为起点, 顺水流方向为 X 向、横向为 Y、垂向为 Z 向。

表 1 联合护底水力特性试验研究方案 (原型)		
组次	布置方式	排体及框架宽度
1		排体长 40 m
2		28 m 排体 + 排上压载 10 m 框架
3		28 m 排体 + 排上压载 5 m 框架 + 5 m 框架

坝下纵 (U)、垂 (W) 向流速及纵 (σ_x)、垂 (σ_z) 向紊动强度的沿程变化见图 3, 可见堤

后存在横轴环流，坝脚附近出现下沉水流、水流掺混强烈、紊动强度最大。从不同护底布置方式变化可见，单纯软体排护底对水流结构的影响很小；联合护底（排边下游搭接）时，框架抛投区域的水流减速明显（图 4）。

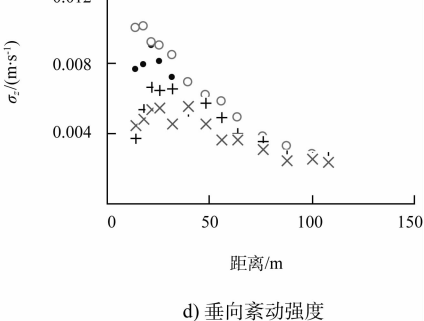
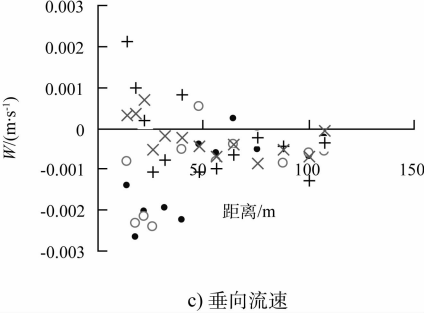
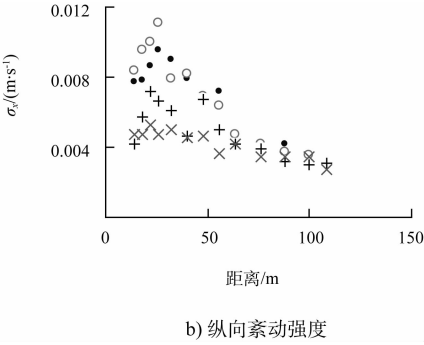
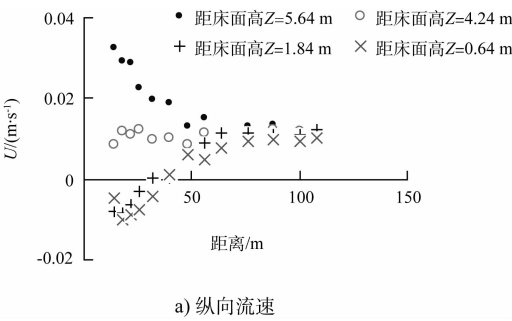


图 3 潜堤下游纵、垂向流速及紊动强度沿程变化

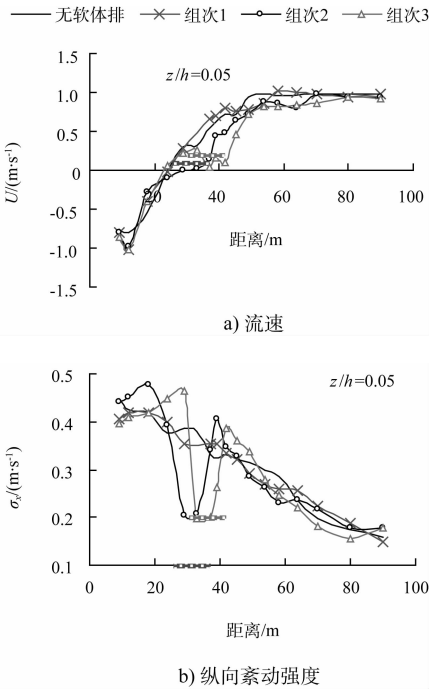


图 4 不同护底方案的流速和纵向紊动强度

框架内（距潜堤中心以下 31 m）及护底下游（距潜堤中心以下 41 m）的纵向流速沿垂向分布见图 5，可见在透水框架内，流速折减明显，护底结构下游近底流速折减效果依次为搭接形式、框架抛投于软体排上部、单纯软体排、无护底。

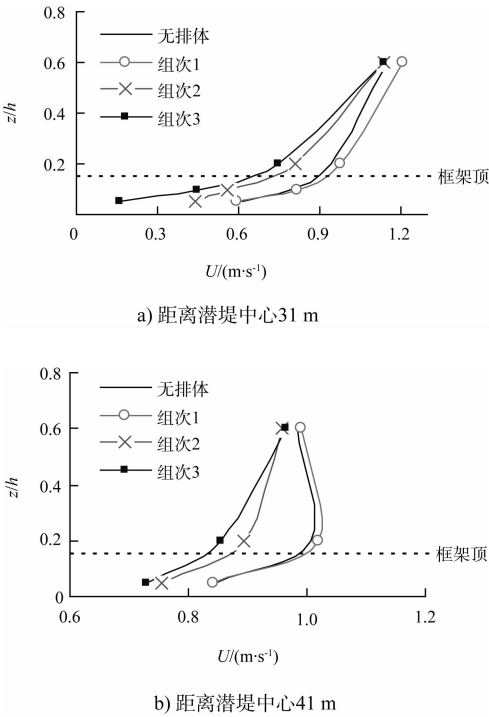


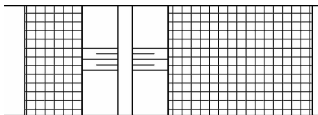
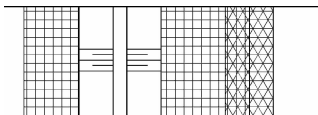
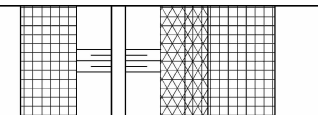
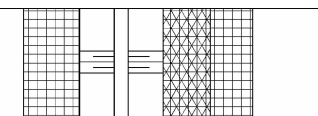
图 5 潜堤下游不同护底布置方式的纵向流速沿垂向分布

3 联合护底效果及框架抛投部位

联合护底水力特性试验表明, 框架群的近底减速效果明显, 并对下游床面有一定的掩护作用, 因而消能防护效果与框架群的抛投位置密切相关。为此, 首先研究潜堤下游局部冲刷防护中框架群的抛投位置, 各方案软体排与框架群的范围仍与联合护底的工程投资基本一致。

联合护底效果试验均在 2 m 宽水槽中进行, 试验条件均为清水冲刷。按框架群抛投位置, 共 4 个方案 (表 2), 框架仍抛投 2 层、密度 2 架/m²。潜堤高由 3 m 增加到 5 m、顶宽 4 m、边坡 1:2, 单纯采用软体排护底的下游排宽为 80 m, 上游排宽 20 m。试验水流条件为滩面水深 8.1 m、堤顶垂向平均流速 3.5 m/s。

表 2 潜堤下游联合护底方案

组次	布置方式	下游排体及框架宽度
1		排体长 80 m
2		56 m 排体 + 排上压载 5 m 框架 + 15 m 框架
3		15 m 框架 + 排上压载 5 m 框架 + 56 m 排体
4		排上压载 20 m 框架 + 56 m 排体

各方案的防护效果见图 6, 采用软体排单独护底时, 冲刷坑最大深度由无防护时的 7.6 m 减小至 3.52 m, 冲刷坑距堤脚 93.6 m; 随着防护范围缩短, 冲刷坑距堤脚越近; 框架抛投于下排边时, 因框架群的掩护使得排边冲刷深度最小 (2.96 m); 堤脚直接抛投框架时 (组次 3), 在越堤下沉水流

作用下框架区出现了近 2 m 的冲刷坑, 可能直接危及潜堤安全, 表明框架群能减缓水平向滩面水流, 但对减缓越堤的竖向水流效果不明显; 对比组次 1、2 的多次重复试验的冲刷坑深度与坡比, 联合护底比单纯软体排护底的最大冲刷深度减小约 20%, 至主体建筑物综合坡度减小约 15%。可见同样造价条件下, 联合护底较单纯软体排护底更有效, 但框架应抛投于软体排的下排边, 不能直接布置于堤脚或坝脚处。

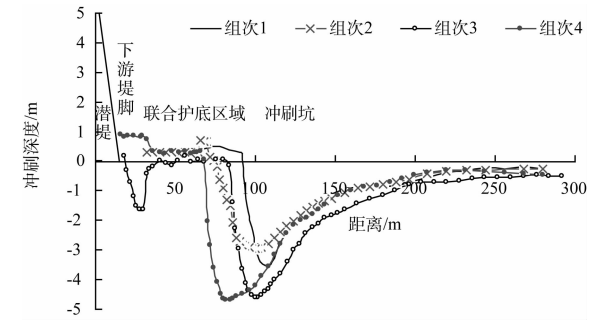


图 6 潜堤下游联合护底不同布置方式的纵向冲刷形态

4 联合护底布置范围、框架抛投密度

上述试验成果表明: 基于联合护底结构总造价基本一致的前提下对比防护效果, 软体排下游边缘搭接透水框架是联合护底的最佳布置方式。但为了取得最佳的防护效果, 软体排与框架群的搭配范围、框架群的抛投宽度与密度也是工程设计中需要解决的技术问题。

4.1 软体排和透水框架守护范围

选取潜堤下游防护进行研究, 潜堤尺度、水流条件等均与 3.2 节相同, 框架与软体排均搭接 5 m, 框架抛投密度仍为 2 个/m²。试验组次见表 3。

表 3 潜堤下游联合护底范围搭配试验组次

组次	布置方式	目的
1	40 m 排	
2	40 m 排 + 20 m 框架	框架群宽度影响 (软体排宽度固定)
3	40 m 排 + 45 m 框架	
4	40 m 排 + 70 m 框架	
5	48 m 排 + 20 m 框架	
6	52 m 排 + 20 m 框架	排体宽度影响 (框架群抛投宽度固定)
7	56 m 排 + 20 m 框架	
8	65 m 排 + 20 m 框架	

软体排宽度一定,不同框架群抛投宽度的防护效果见图7,可见,软体排下游抛投20 m框架群后护底范围达到55 m,边缘冲刷坑深度由4.53 m减小至4.25 m,最大冲坑相对堤脚坡度由0.069减缓至0.056;框架群宽度增加至45 m时护底范围达到80 m,边缘冲刷坑深度减小至3.17 m,但排外15 m处的框架群出现1.5 m深的塌陷;框架群宽度进一步增加至70 m时,边缘冲刷坑深度进一步大幅减小至1.85 m,同样排外15 m处的框架群出现1.5 m深的塌陷。组次3与组次8的防护范围一致,组次8的边缘冲深相对较小。总之,随着透水框架群宽度的增大,边缘冲刷坑深度及冲坑相对堤脚坡度减小,但排外15 m处的框架群出现约1.5 m深的塌陷,框架抛投宽度以20 m左右(5 m搭接)为宜。

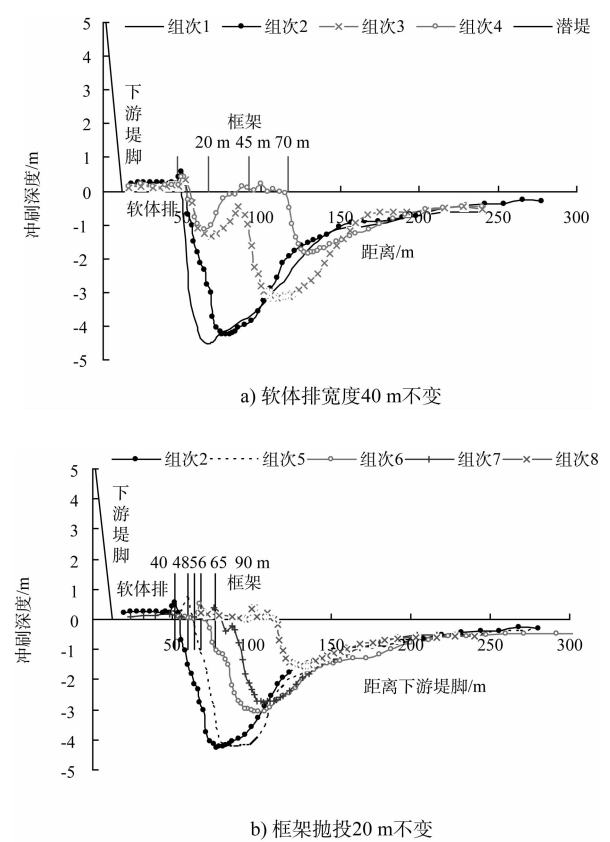


图7 不同软体排或框架宽度对潜堤下游冲刷影响

框架抛投宽度一定、不同余排宽度时潜堤下游防护效果为:随着排体宽度的增大,下游冲刷坑深度逐渐减小。

4.2 框架群合理抛投密度

在联合护底工程投资相同的前提下,研究框架抛投密度对潜堤下游冲刷的影响,试验中潜堤尺度、水流条件等均与4.1节相同,透水框架群抛投宽度取20 m,搭接5 m,试验组次见表4。

表4 潜堤下游联合护底框架密度影响因素			
试验组次	框架密度/(个·m ⁻²)	布置方式	工程投资/元
1	1.0	67.8 m排+20 m框架,	774 808.0
2	2.0	56 m排+20 m框架,搭接5 m	778 642.3
3	2.5	49.4 m排+20 m框架,搭接5 m	773 779.6
4	3.0	43.2 m排+20 m框架,搭接5 m	772 791.0

潜堤下游联合护底不同框架抛投密度的冲刷情况见图8,试验中观察到框架密度为1个/m²时框架群被冲散,部分滚落于冲刷坑中;随着框架抛投密度的增大,框架勾连性增加,减速效果增强,但守护范围缩小,综合来看,框架抛投密度为2个/m²左右时效果最佳,边缘冲深最小。

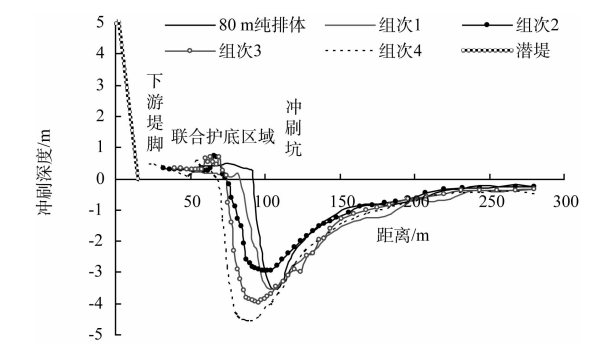


图8 潜堤下游联合护底不同抛投密度对冲刷坑影响

4.3 来水来沙条件对联合护底效果的影响

前述研究均针对潜堤(高5 m、顶宽4 m、边坡1:2)在滩面水深8.1 m、堤顶垂向平均流速3.5 m/s的特定水流条件下进行,将堤顶垂向平均流速提高至4 m/s,试验中采用80 m单纯软体排和56 m排+20 m框架搭接的两种护底方式。

不同水流条件下潜堤下游联合护底的冲刷情况见图9,可见,潜堤堤顶流速由3.5 m/s增加至4.0 m/s后,上下游水位落差由0.32 m加大至

0.55 m, 潜堤下游越堤流强度增强, 冲刷深度均有所增大, 但联合护底较单纯软体排护底的冲刷深度、相对堤脚综合坡度均有一定的减小。可见, 前述研究提出的联合护底布置方式可适应来流条件的改变。

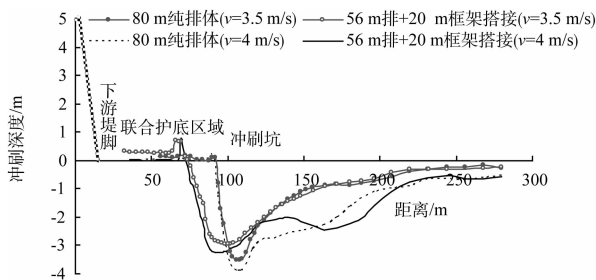


图9 不同水流条件对潜堤下游联合护底冲刷的影响

5 结论

1) 堤坝后存在横轴环流, 坝脚附近出现下沉水流、水流掺混强烈; 框架抛投区域的水流减速明显, 掩护床面范围依次为框架搭接抛投于软体排、抛投于软体排上及单纯软体排。

2) 工程造价相同的条件下, 搭接联合护底较单纯软体排护底更有效, 但框架应抛投于软体排的下排边, 不能直接布置于堤脚或坝脚处。

3) 随着软体排护底宽度的增大, 下游冲刷坑深度逐渐减小; 随着透水框架群抛投宽度的增大, 边缘冲刷坑深度及冲坑相对堤脚坡度减小, 但排外 15 m 处的框架群出现约 1.5 m 深的塌陷, 框架抛投宽度以 20 m 左右 (5 m 搭接) 为宜。

4) 框架抛投密度为 2 个/ m^2 左右时效果最佳, 边缘冲深最小。

参考文献:

[1] Annandale W. Scour technology: mechanics and engineering practice[M]. New York: McGraw-Hill Companies, 2006.

[2] Chang Te-Hsing. Shelter effect evaluation of the willow works bank protection method: a case study for Beinan River Reach 2009 Typhoon Morakot event [J]. Paddy and Water Environment, 2013, 11(1): 15-33.

[3] 贾晓, 胡志锋, 吴华林, 等. 长江口河段柔性护滩结构周边河床冲刷形态分析[J]. 水利水运工程学报, 2013 (2): 52-57.

[4] 赵凤亚, 李彪, 李长铃, 等. 不同河床泥沙条件下的整治建筑物软体排护底技术研究[J]. 中国水运, 2012 (9): 157-158.

[5] 刘怀汉, 付中敏, 闫军, 等. 长江中游航道整治建筑物护滩带稳定性研究[C]//国际航运协会 2008 年会暨国际航运技术研讨会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2008: 166-170.

[6] 马爱兴, 曹民雄, 王秀红, 等. 长江中下游航道整治护滩带损毁机理分析及应对措施[J]. 水利水运工程学报, 2011(2): 32-38.

[7] 吴龙华, 周春天, 严忠民, 等. 架空率、杆件长宽比对四面六边透水框架群减速促淤效果的影响[J]. 水利水运工程学报, 2003(3): 74-77.

[8] 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): 13-15.

[9] 刘兆锋, 李如洁, 叶素策. 混凝土四面六边透水框架群技术的研究与应用[J]. 中国水运, 2010(1): 114-115.

[10] 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.

[11] 周根娣, 顾正华, 高柱. 四面六边透水框架尾流场特性[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(3): 9-12.

[12] 李若华, 王少东, 曾甄. 穿越四面六边透水框架群的水流阻力特性试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2005(10): 64-66.

[13] 陈飞, 付中敏, 刘怀汉, 等. 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.

[14] 周生利, 刘常全, 张俊, 等. 混凝土四面六边透水框架结构在长江航道整治中的应用[J]. 水运工程, 2012(10): 102-106.

[15] 南京水利科学研究院. 新型消能护滩透水框架试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014.

[16] 马爱兴, 曹民雄, 谭伦武, 等. 扭双工字型透水框架防冲机理试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2014(1): 8-16.