



潜堤下游软体排与透水框架 联合护底效果分析*

陈飞¹, 马爱兴², 陈源华³, 李传凯¹

(1. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;
3. 长江航道局, 湖北 武汉 430010)

摘要: 软体排和透水框架护底作用机理及应用条件各异。为充分发挥两者的优势, 提出联合护底的结构形式。通过水槽试验研究潜堤下游联合护底的防护效果, 并分析联合护底的经济性。结果表明, 采用联合护底能够有效减弱护底边缘的局部冲刷强度, 要达到相近的护底守护效果, 联合护底相对单纯软体排护底可节省工程投资5%以上。

关键词: 联合护底; 软体排; 透水框架; 经济性

中图分类号: U 17

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0100-05

Protection effect of soft mattress-permeable frame joint bottom protection downstream submerged breakwater

CHEN Fei¹, MA Ai-xing², CHEN Yuan-hua³, LI Chuan-kai¹

(1. Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Changjiang Waterway Bureau, Wuhan 430010, China)

Abstract: The application conditions and protection mechanism of soft mattress are different from the permeable frame. In order to give a full play of the advantages of both, we put forward the joint structure for the bottom protection. Studying the protective effect of the submerged breakwater by the water tank test, and analyzing the economic efficiency of the joint bottom protection, we get to the conclusion that the joint structure can weaken effectively the local scour at the edge of the bottom protection. To achieve similar effects of bottom protection, the joint bottom protection can save project investment of more than 5%.

Keywords: joint bottom protection; soft mattress; permeable frame; economicalness

软体排和透水框架是目前航道整治工程中应用较多的两类护底结构形式, 在长江中下游及长江口航道整治工程中应用的实践表明两类结构在特定的条件下均具有较好的防护功能^[1]。软体排通过阻隔水流直接对河床作用从而守护部位局部滩面免受冲刷, 促使冲刷坑远离主体建筑物并减小冲刷坑的深度, 保证主体建筑物的整体稳定; 而以透水框架为代表的消能结构则通过构件的透空性消减近底水流流速和动能达到减弱冲刷的目的^[2-4]。软体排作

为一种“被动型”防护结构, 能够起到很好的护滩护底效果, 但这种效果的前提是软体排铺设范围足够大, 如果软体排宽度较小, 软体排边缘会产生严重的冲刷, 危害工程安全; 透水框架是一种降低近底流速的“主动”防护结构, 可对流经的水流进行结构调整, 通过消能来达到减速甚至促淤的目的, 可明显减小冲刷坑的深度^[5-6]。

鉴于软体排和透水框架结构护底作用机制和适用条件的差异, 为充分发挥两者的作用特点、

收稿日期: 2015-09-29

*基金项目: 交通运输部科技项目 (2013328J17 500)

作者简介: 陈飞 (1982—), 男, 博士, 高级工程师, 从事港口航道工程设计与研究。

加强防护效果, 提出软体排与透水框架结构联合护底的结构形式。一方面可以充分发挥两者的作用特点, 利于增强排体的稳定性, 减少工程范围, 减弱工程对生态环境的影响; 另一方面, 在达到同等防护效果的前提下, 工程投资也可能会比单纯使用软体排护底时少, 经济效益较好。通过水槽试验研究了潜堤下游联合护底的防护效果及透水框架群抛投宽度对防护效果的影响, 并对联合护底的经济性进行分析。

1 概化水槽设计

为了能在模型试验中合理、客观地模拟透水框架的消能特性, 模型采用平面与垂直比尺为 $a_L = a_H = 40$ 的正态设计。试验水槽长 55.5 m、宽 2 m、槽底坡度为 1‰, 动床试验时将水槽中间 17 m 段定床面改为动床, 深度 20 cm, 试验模拟高 5 m、顶宽 4 m、边坡 1:2 的潜堤, 水流条件为滩面水深 8.1 m、堤顶垂向平均流速 3.5 m/s。水槽平面布置见图 1。

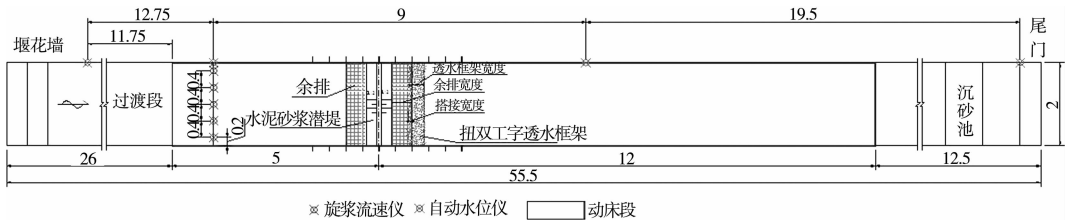
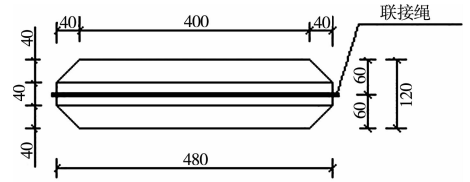


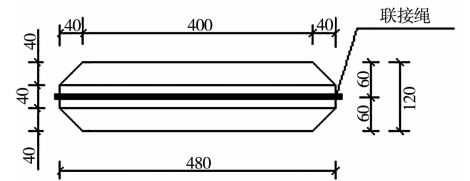
图 1 联合护底冲刷试验水槽布置 (单位: m, 下同)

模型沙选择主要考虑满足起动流速相似、模型沙与原型沙水下休止角相似。根据长江下游河段泥沙级配组成特征值, 试验采用 $\rho_s = 1.15 \text{ t/m}^3$, $\rho_0 = 0.63 \text{ t/m}^3$, $d_{50} = 0.20 \text{ mm}$ 的塑料沙作为模型沙^[5]。

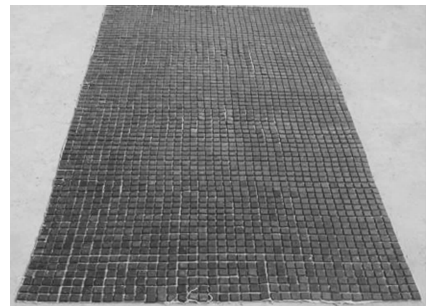
软体排严格按照块体形状、尺寸、质量相似进行缩尺模拟, 比尺 1:40 要求压载块体尺寸为 $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 质量 0.91 g。模拟材料为玻璃纤维、尼龙、氟塑料等材料按一定比例融化混合形成的模拟材料, 经开模注塑制作, 压载体与排垫的系结可采用环氧树把压载体粘贴在棉布上进行模拟 (图 2)。



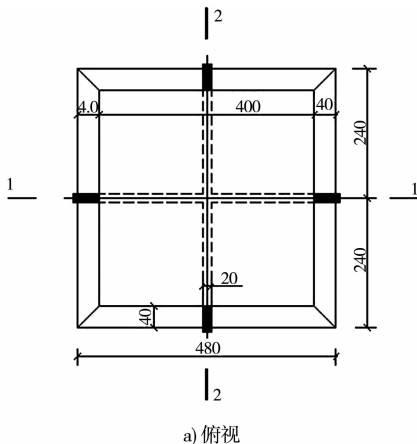
b) 1-1断面



c) 2-2断面



d) 模型



a) 俯视

图 2 软体排原型与模型

透水框架结构形式采用扭双工字型, 按几何相似、质量相当对透水框架进行缩尺模拟, 比尺为 1:40 要求杆件尺寸为 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,

框架质量 1.66 g。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（图 3）。经抽样检验，框架模型尺寸、质量误差均小于 2%，保证了透水框架模型与原型的几何相似、质量相当。

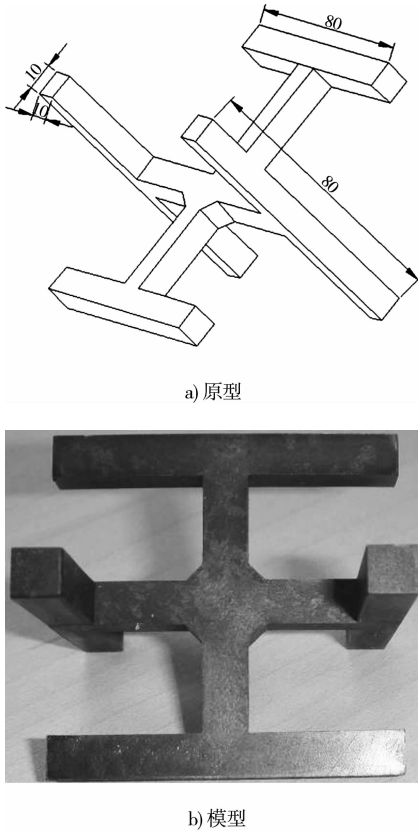


图 3 透水框架原型与模型示意

试验中联合护底采用在软体排下缘搭接抛投透水框架的布置形式(图 1)，其中搭接宽度为 5 m，框架抛投密度考虑 2 个/m²。

2 联合护底效果试验

2.1 联合护底效果

为研究联合护底相对单纯软体排护底的效果，试验中护底防护范围同为 80 m(原型)，护底分别采用 80 m 软体排、60 m 软体排 + 15 m 框架和 45 m 软体排 + 40 m 透水框架的联合护底 3 种工况，试验成果见表 1 和图 4。

表 1 潜堤下游相同联合护底防护范围不同框架群宽度试验结果

布置方式	框架宽度/m	最大冲刷距 L_s /m	最大冲刷深 h_s /m	h_s/L_s
80 m 排	0	98.0	3.87	0.039
65 m 排 + 20 m 框架	20	107.6	2.74	0.025
40 m 排 + 45 m 框架	45	107.6	3.17	0.029

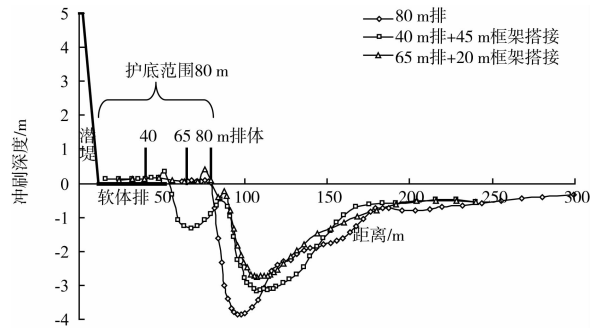


图 4 潜堤下游联合护底防护下局部冲刷坑形态

图 4 为联合护底范围相同(80 m)时不同透水框架抛投宽度对潜堤下游冲刷的影响，可以看出，单纯软体排护底形式引起的下游冲刷坑深度最大，且冲坑距离下游堤脚最近；而 40 m 软体排 + 45 m 框架形式时透水框架受潜堤下游越堤流影响较大，造成透水框架内部淘刷，出现局部冲刷坑，联合护底下游冲刷坑相对单纯排护底时明显减小；65 m 软体排 + 20 m 框架形式时，软体排覆盖区域较大，直接隔离了潜堤下游强越堤流区域，进入框架群的水流平顺，框架消能减速功能得到充分发挥，透水框架群下边缘形成缓坡，下游冲刷坑减小，冲刷坑位置相对堤脚较远。

2.2 透水框架群宽度影响

前述试验表明护底守护范围相同时，相对单纯软体排防护，联合护底可有效减弱护底边缘局部冲刷，但透水框架群抛投宽度选择多少最合适，是联合护底布置方式中面临的重要问题，为此增加了护底守护 110 m 范围的联合护底效果试验。当护底范围相同时，联合护底中透水框架宽度随护底边缘冲刷坑深度的变化关系如图 5 所示；当

护底范围为 80 m 时, 联合护底的冲刷坑相对单纯软体排护底时减小, 但随着透水框架群宽度增加, 冲刷坑深度又有增加的趋势; 当护底范围为 105 m, 且框架群宽度较大时, 相应的最大冲深也较大。表明在确定联合护底范围后, 在护底下游采用一定宽度的透水框架替代软体排, 可有效减小护底边缘的局部冲刷, 有利于潜堤和护底结构的整体稳定, 但透水框架群抛投宽度不宜过大。根据实验成果, 透水框架群抛投宽度达到 20 ~ 30 m 时, 在框架群内部及下游侧可较为充分地发挥减速消能效果, 形成较好的缓流或促淤环境, 减弱局部冲刷, 这与长江航道整治工程中应用的宽度一致。

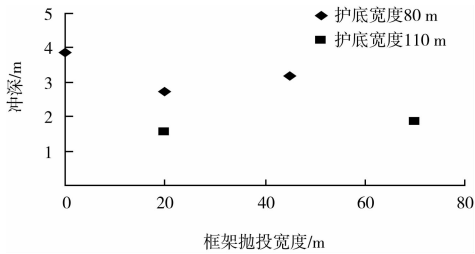


图5 护底范围相同时最大冲深随框架宽度变化关系

表2 潜堤下游联合护底不同抛投宽度试验结果

布置方式	框架群宽度/m	冲刷前堤身下游水深/m	潜堤上下游水位差 $\Delta h/m$	最大冲深距 L_s/m	最大冲深 h_s/m	最大冲坑相对堤脚坡度 h_s/L_s
80 m 单纯软体排	0	8.12	0.32	98.0	3.87	0.039
67.8 m 排 + 10 m 框架搭接	10	8.20	0.34	91.6	4.47	0.049
56 m 排 + 20 m 框架搭接	20	8.15	0.30	88.0	2.96	0.034
43.4 m 排 + 30 m 框架搭接	30	8.10	0.38	82.0	3.57	0.044
31.2 m 排 + 40 m 框架搭接	40	8.10	0.38	81.6	3.68	0.045

从图 6 和表 2 为潜堤下游联合护底不同组合方式 (工程投资相同) 作用下的冲刷情况。可见, 随着框架群抛投宽度增大, 最大冲刷坑深度呈现先减小再增大并趋于稳定的趋势, 投资相同, 框架群宽度越大, 对应的软体排宽度将越小, 在堤脚处水体紊动强, 属于易淘刷区域, 软体排宽度较小时, 强紊动的越堤流 (下沉流) 直接作用于框架区域, 对软体排外侧 (框架群防护区域、未防护的床面区域) 造成淘刷, 由于框架群具有一定的减速消能作用, 所以框架防护区域的冲刷坑减小, 但框架塌陷于坑中 (图 7), 消能作用明显减弱, 呈现框架区域塌陷出现冲刷坑, 而框架边缘又出

3 联合护底经济性试验

3.1 透水框架最优抛投宽度试验

由于软体排和透水框架的防护机理不同, 单位守护范围 2 种结构材料的工程造价也存在较大的差异, 其中透水框架的造价大于软体排 (如长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程中最终核算的 480 mm × 480 mm × 120 mm 混凝土联锁排单价 121.07 元/m², 扭双工字透水框架按抛投密度 2 个/m² 计算单价为 158.6 元/m²), 因此应该确定合理的透水框架抛投宽度, 既能使透水框架群的消能防冲效果充分发挥, 又不至于产生太大的造价差异。为研究透水框架合理的抛投宽度, 在水槽中分别开展了投资固定条件下的联合护底效果试验。

联合护底中将部分软体排由透水框架代替, 以减弱护底边缘局部冲刷, 但考虑到软体排和透水框架价格的差异, 若大面积采用框架群必将大幅增加工程投资。故通过水槽模型试验研究在相同工程投资的前提下抛投不同框架群宽度对联合护底效果的影响。试验考虑框架群抛投宽度分别为 0、10、20、30、40 m, 试验组次安排见表 2。

现较大的冲坑的现象。因此, 合理的框架抛投宽度将有利于潜堤下游床面的防护, 在此水流条件下, 透水框架群较好的抛投宽度在 20 m 左右。

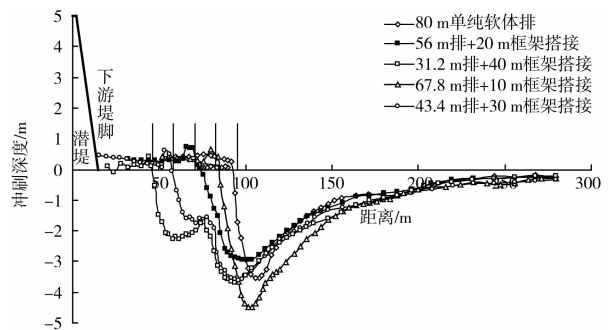


图6 潜堤下游联合护底透水框架抛投宽度影响

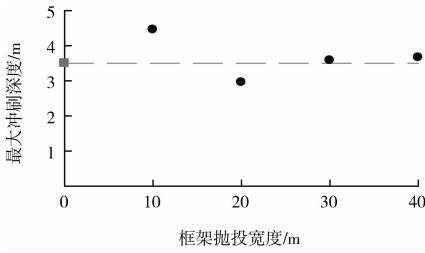


图7 最大冲深与框架群抛投宽度关系

3.2 联合护底经济性分析

在部分工况条件下采用联合护底形式可以减弱护底边缘冲刷强度，而潜堤下游水槽试验成果则表明，采用联合护底可在保证护底边缘冲刷强度基本一致的前提下，缩小守护范围、节省工程投资。根据前述试验中软体排下游搭接透水框架的联合护底形式、透水框架群抛投宽度为 20 m、抛投密度为 2 个/ m² 的试验工况下的数据对联合护底相对于单纯软体排护底的经济性进行初步分析。

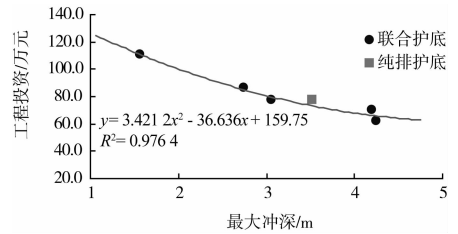
软体排和扭双工字透水框架结构工程投资单价采用长江南京以下 12.5 m 深水航道一期工程最终核算的数据(表 3)。按实际工程软体排设计情况看，内侧软体排采用 480 mm × 480 mm × 120 mm 的混凝土块压载，边缘 5 m 范围内多采用 480 mm × 480 mm × 160 mm、480 mm × 480 mm × 200 mm 的混凝土块压载。

表3 护底边缘冲刷坑深度相同时联合护底经济指标

护底结构	冲刷深度/m	工程投资/万元	节省投资比例/%
联合护底	3.52	73.2	
80 m 纯排护底(边缘 480 mm × 480 mm × 120 mm)	3.52	77.5	5.6
80 m 纯排护底(边缘 480 mm × 480 mm × 160 mm)	3.52	78.0	6.2
80 m 纯排护底(边缘 480 mm × 480 mm × 200 mm)	3.52	78.7	7.0

根据试验成果，点绘潜堤下游不同联合护底宽度条件下(软体排采用 480 mm × 480 mm × 120 mm 的混凝土块压载，排边压载 20 m 宽扭双工字透水框架)护底工程投资与冲刷坑深度的变化关系曲线(图 8)。当取护底边缘冲刷坑深度作为局部冲刷强度指标时，联合护底与单纯软体排护底的守护的工程

投资变化情况见表 3，可见相对于单纯软体排护底，联合护底达到同等效果的工程投资节省 5% ~ 7%。



注：框架群宽度相同，为 20 m。

图8 护底工程投资与冲刷坑深度的变化关系

4 结语

1) 软体排和透水框架联合护底应用于潜堤下游护底防护效果比单纯软体排效果好，当守护范围相同时，联合护底能够有效减小护底边缘局部冲刷坑深度，减缓冲刷坑相对堤脚的综合坡度。

2) 联合护底中透水框架群抛投宽度不宜过大，当透水框架群抛投宽度达到 20 ~ 30 m 时，在框架群内部及下游侧可较为充分地发挥减速消能功能，形成较好的缓流或促淤环境，减弱局部冲刷。

3) 当控制护底守护效果一致时(即边缘局部冲刷坑深度或综合坡度接近时)，采用联合护底相对单纯软体排护底可节省工程投资 5% 以上。

参考文献:

- [1] 曹民雄, 张卫云, 马爱兴, 等. 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[J]. 水运工程, 2015(7): 1-7.
- [2] 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.
- [3] 李若华, 王少东, 曾甯. 穿越四面流变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.
- [4] 马爱兴, 曹民雄, 谭伦武. 扭双工字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.
- [5] 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.
- [6] 长江航道规划设计研究院. 软体排与扭双工字透水框架结构联合护底关键技术研究[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2015.