

DOI: 10.11779/CJGE2016S1033

# 深水顺水沉放条件下护底软体排结构设计方法

黄召彪, 柴华峰, 李丰华

(长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011)

**摘要:** 顺水流沉排方式能有效减少水流对软体护底排的冲刷破坏, 但由于在深水条件下顺水流沉排时受力情况复杂, 施工过程中难以保证软体排结构的安全。对深水顺水沉放条件下软体排受力进行理论分析, 并对理论计算结果进行现场试验验证。在受力分析的基础上提出了适合在深水顺水流沉放条件下软体护底排的结构设计方法, 并在长江中下游航道整治工程中得到了较好的应用。

**关键词:** 深水; 水流; 软体排; 结构设计

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2016)S1-0173-04

**作者简介:** 黄召彪(1967-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事航道整治方面的设计和科研工作。E-mail: hzb8959@yahoo.com.cn。

## Design methods for soft mattress in deep water and immersion along flow conditions

HUANG Zhao-biao, CHAI Hua-feng, LI Feng-hua

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

**Abstract:** The flow erosion intensity on soft mattress can be reduced effectively in the way of immersion along the flows. However, as the force condition is complex during the sinking process of soft mattress, it is difficult to ensure the structural safety. The force on the soft mattress in deep water and immersion along the flow conditions is analyzed. Field tests are carried out to validate the theoretical analysis results. Based on the force analysis, a new design method for soft mattress in deep water and immersion along the flow conditions is proposed. The structure has been well used in the middle and lower waterway regulation project of Yangtze River.

**Key words:** deep water; flow; soft mattress; structural design

## 0 引言

软体排由于具有良好的保土透水性, 同时适应河床变形能力强, 近年来在航道整治护底工程中得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。在护底软体排两种施工方式中, 顺水流沉排相比垂直水流沉排能有效地减小底部河床的溯源冲刷破坏<sup>[4]</sup>, 护底效果更好, 但排在沉放过程中受水流顶冲力大, 尤其是深水大流速区域排体受力更大, 因此对这种条件下的排体结构、船舶设备等要求很高。本文依托长江黑沙洲水道航道整治工程<sup>[5-6]</sup> (如图1), 探讨适应于深水顺水流条件下护底软体排结构设计方法。

## 1 软体排受力分析

### 1.1 受力理论分析

由于软体排在水中的形状不规则, 准确计算在施工过程中软体排的内力比较困难。本文受力计算采用的主要方法是, 首先分析在静水中铺排时软体排的受

力情况, 然后结合水槽试验分析移船放排工况条件下动水压力对软体排受力的影响, 最终确定铺排方向与水流方向呈任意角度时软体排所受拉力。

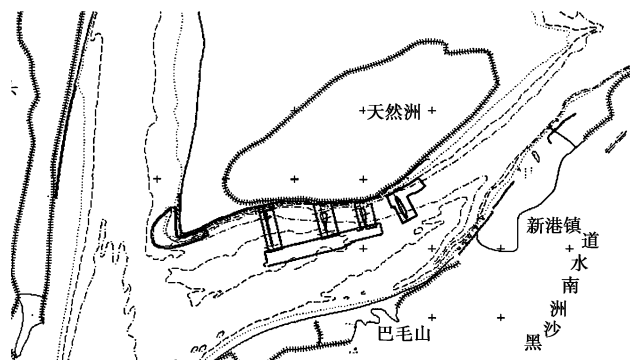


图1 黑沙洲水道航道整治工程平面示意图

Fig. 1 Plan view of channel improvement project for Heishazhou waterway

收稿日期: 2015-11-30

取单位宽度的软体排进行分析, 沉排过程中, 软体排分别受水中排体河底处的锚力、船舶水中排体的水中重力、悬挂着未入水的排体重力、动水压力、船舷对排体的拉力, 其受力示意图见下图 2, 排体所受最大拉力  $T_B$  处于软体排与船舷相切的部位。

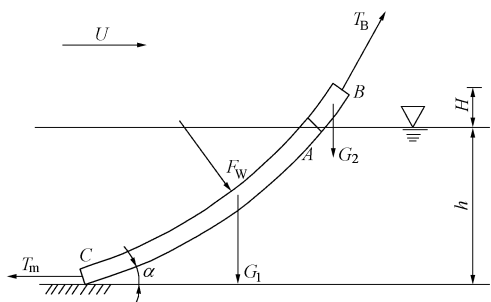


图2 软体排受力简图

Fig. 2 Forces acting on a soft mattress

根据悬念理论, 确定 A 点静水时软体排所受的拉力计算式为

$$T_1 = W_1 g(c + h) \quad (1)$$

式中,  $W_1$  为链条单位长度的水下重量,  $c$  为悬链线参数,  $h$  为水深。

设动水时软体排所受拉力为  $T_2$ , 静水时软体排所受拉力为  $T_1$ , 平均流速为  $U$ , 文献[7]通过实验拟合了顺水流时  $T_2/T_1$  与流速关系式:

$$T_2/T_1 = 1.5500U^{0.3506} \quad (2)$$

设铺排方向与水流方向的夹角为  $\varphi$  ( $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ ),  $U_m$  为水面流速, 则在动水中水下部分的软体排所受拉力计算式:

$$T_2 = [(1.4804U_m^{0.3506} - 1) \cos \varphi + 1] T_1 = \eta T_1 \quad (3)$$

根据对 B 点受力分析, 对排体分水上和水上部分进行受力计算, 其中水下部分采用动水中软体排受力, 得出动水中软体排所受最大拉力  $T_B$  计算式为

$$T_B = \sqrt{(W_1 g \eta)^2 c^2 + \left( W_1 g \eta + W_2 g \frac{H}{h} \right)^2 (h^2 + 2hc)} \quad (4)$$

式中, 软体排单位长度的水下重量为  $W_1$ , 软体排单位长度的水上重量为  $W_2$ ,  $H$  为软体排与船舷相切处至水面高度。

以上计算公式仅为线型分析的推导结果, 下一步采用现场试验对软体排的受力进行测量、检验。

## 1.2 实验验证分析

通过试验对黑沙洲航道整治的深水位置进行船舶不同位移和排体沉放不同时刻实时测量 (见图 3), 针对排体、船舶和外部条件, 监测顺水沉排过程中排体的受力情况。

实验分排左、排中、排右三部分排布受力进行比

较, 试验时水深为 26 m, 流速为 1.3 m/s, 每米软体排所受拉力平均值如图 4。

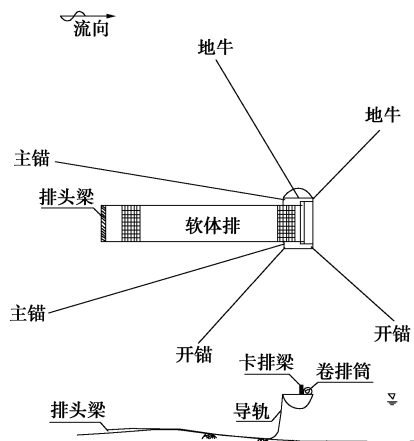


图3 试验沉排示意图

Fig. 3 Immersion of mattress

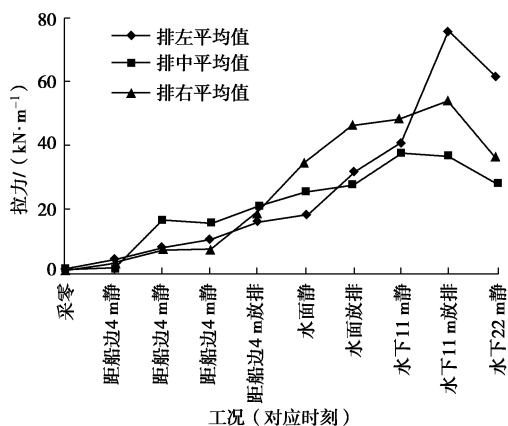


图4 各组测点每米排所受拉力

Fig. 4 Tensile forces of soft mattress per meter at various measuring points

实验证实, 顺水沉排过程中, 当软体排横断面刚过船舷处时排体所受的拉力最大, 此时单宽排体所受拉力的最大动态实测值和平均值为  $P_{d,max} = 96.41$  kN,  $P_{d,mean} = 55.17$  kN。

根据式 (4), 对实验方案进行计算。水深 26 m, 表面流速取 1.3 m, 相对移船速度取 0.6 时, 计算排体所受最大拉力为 58.76 kN, 同实验平均值接近, 按经验考虑 1.5 的制动系数后, 计算排体所受最大拉力为 88.13 kN。

对比分析软体排受力实测值和最大受力的计算结果, 二者相差不大, 说明软体排受力计算方法基本正确, 可用于不同条件下排体结构设计的依据。

## 2 软体排结构设计方法

### 2.1 排垫土工织物

土工织物一般分为有纺织物和无纺织物两类,

有织物又分为针织布和机织布, 针织布相比于机织布, 具有较高的抗拉强度和较小的延展率<sup>[8]</sup>。顺水沉排的排体受力强度远大于垂直水流的沉排, 其结构应加强, 因此选择抗拉强度高的排布。同时, 由于排布所受纵向拉力越大, 横向收缩幅度也会越大, 横向收缩后会使排布变窄, 继而导致和邻近排体之间的搭接宽度变窄, 因此土工织物的延伸率不易过大。黑沙洲航道整治工程中, 采用较高强度和较小的延展率的加强型聚丙烯编织布, 280 g 聚丙烯编织布规格为 14 根×15 英寸<sup>2</sup>, 纵向≥抗拉强度为 3.2 kN/5 cm, 横向≥抗拉强度为 3.0 kN/5 cm)。

2.2 软体排压载结构

软体排压载主要有两个方面的作用, 一是增加软体排的稳定性, 保证排体在水流力的作用下不被破坏, 二是在水深较大时, 能增加排体重量使排体在施工时及时沉入水下, 保证排体覆盖范围的准确性。软体排的压载根据不同水深、水流特点, 以及可能产生的河床滩面形态, 一般采用分离式压载、系结式压载或砂被等不同的压载方式<sup>[9]</sup>。不同压载体软体排特点见表 1。

表 1 不同压载体软体排特点

Table 1 Characteristics of soft mattress with different ballasts		
压载方式	结构特点	适用范围
分离式压载	排布由土工织物组成, 结构简单、施工方便, 适	用于水深和流速较小、河
	沉放后再散抛块石、沙枕、石笼等压载	床变形较小的河段
系结式压载	在土工织物上缝制加筋条, 排上压载通过系结条与排体连接, 分为系袋压载、沙肋压载和混凝土块压载	系袋压载: 压载的沙袋体积小重量轻, 适用于流速
		小水深小的区域
		沙肋压载: 整体性较好, 适用于水深、流速较大的区域
沙被压载	将沙填充到土工织物缝制成的双层排布中, 形成巨大的沙被	混凝土块压载: 抗冲刷、压载重, 适用于水深流急的区域
		沙被软体排的重量轻于块石和砣块, 适用于水深和流速不大的区域

从表 1 可以看出, 沙肋压载和混凝土块系结压载的方式适合深水条件的压载, 但沙肋压载的耐久性不及混凝土块压载, 黑沙洲采用混凝土块系结压载的方式,混凝土块厚度为 12 cm, 经验算, 满足规范排体抗掀稳定性要求。

2.3 加筋方式

在排布上设置加筋条可以有效加强排体的抗拉强

度。针对深水顺水流沉排的特殊条件, 对加筋条的设计根据已有的研究进行以下分析。

在 26 m 水深, 1.3 m 流速条件下, 排体所受最大拉力理论值  $T_{\max}=88.13\text{ kN}$ , 试验实测排体所受最大拉力  $P_{d,\max}=96.41\text{ kN}$ , 由于理论公式假定水流流速稳定, 且对结构受力进行了一定的简化, 因此有必要将工程区域实验数据做为结构设计的依据之一, 同时根据经验考虑 1.2 的安全系数, 单宽排体设计抗拉强度  $T$  应满足下列条件:

$$T\geq\text{MAX}(T_{\max},P_{d,\max})\times1.2\quad (4)$$

由于加筋条直接缝制在基布上, 因此软体排在沉放过程中, 以下两种设计均考虑加筋条与排体基布是共同受力的。软体排布的抗拉强度为 3.2 kN/5cm, 单宽抗拉强度则为 64 kN/m。选用 7 cm 宽聚丙烯纵向加筋条, 抗拉强度为 20 kN/根。每米排布上平均 4 根加筋条, 每米总共可承受 80 kN。因此, 每米软体排总共可承受的拉力为 144 kN。水深 26 m 顺水沉排时, 所选结构满足抗拉强度要求。

2.4 结构设计方案

软体排由排垫和压载体构成见图 5。排体规格为 50 m×22 m (长×宽)。排垫采用 280 g/m<sup>2</sup> 的聚丙烯编织布缝制而成, 沿排体宽度方向每隔 25 cm 设有一根 7 cm 宽的纵向加筋条, 用于加固系接条和增加排垫抗拉强度。在纵向加筋条之下固定有系接条, 用于系连接压载体。

砣块压载体: 采用 C20 砣块体, 平面尺寸为 40 cm×26 cm×12 cm (长×宽×厚), 重量为 27.67 kg。为了使砣块与排体系接牢固方便, 在两端长边设有两道缺口, 缺口宽度 30 mm, 深度 60 mm。

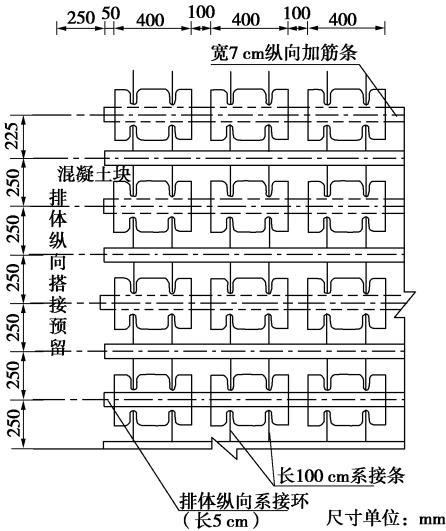


图 5 软体排结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of soft mattress  
黑沙洲航道整治工程中采用该排体结构, 在施工

过程中没有出现撕排等结构破坏现象,工程所有排体铺设完成后,通过水下探摸检测,排体全部搭接,搭接宽度在3~4 m,少数排布边有卷曲、褶皱现象,搭接宽度和平整度控制较好。总体上看,顺水铺排排布搭接及搭接区域砣块系结压载效果较好。

### 3 结 论

通过结合对软体护底排进行的理论和实验成果的分析,对软体护底排结构设计有以下结论。

(1) 深水顺水流沉排条件下,排体、船舶受力十分复杂,采用悬链线理论和动、静水排体受力与流速的变量关系分析,得出了顺水沉排的排体受力计算方法,试验证实,该计算方法能较好的反映排体实际受力情况,可作为不同条件下排体结构设计的依据。

(2) 与常规条件下对比,在对排体受力分析的基础上,本工程采用使用抗拉强度较高的排布,加密筋条的布置,并采用混凝土系结压载的方式,能满足深水条件的顺水流沉排的施工工艺要求,并取得了良好的工程效果。

#### 参考文献:

- [1] 曹 棉. 软体排在长江航道整治工程中的应用[J]. 水运工程, 2004(9): 70 - 73. (CAO Mian. Application of flexible mattress in waterway regulation engineering of the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(9): 70 - 73. (in Chinese))
- [2] 顾 勇. 土工织物在长江口深水航道治理工程中的应用研究和设计[D]. 南京: 河海大学, 2004. (GU Yong. Geotextile applied research and design in the Yangtze estuary deepwater channel regulation project[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [3] 陆梅兴. 航道治理工程软体排铺设船与关键技术的研究[D]. 上海: 上海海运学院, 2003. (LU Xing-mei. Research on channel control engineering soft mattress laying boats and key technologies[D]. Shanghai: Shanghai Maritime University, 2003. (in Chinese))
- [4] 任 杰, 曾学智, 贾良文. 东江下游河段溯源侵蚀特征与机理[J]. 水科学进展, 2010, 21(1): 84 - 88. (REN Jie, ZENG Xue-zhi, JIA Liang-wen. Mechanism study of retrogressive erosive erosion in the lower reach of Dongjiang River[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(1): 84 - 88. (in Chinese))
- [5] 薛小华, 黄召彪. 长江下游黑沙洲水道航道整治工程方案研究[J]. 水运工程, 2007(5): 70 - 75. (XUE Xiao-hua, HUANG Zhao-biao. Regulation scheme of Heishazhou waterway downstream the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2007(5): 70 - 75. (in Chinese))
- [6] 黄召彪, 刘林, 等. 长江下游黑沙洲水道航道整治工程顺水沉排施工工艺研究[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2006. (HUANG Zhao-biao, LIU Lin, et al. Research on construction technology sailing mattress in the Yangtze River Heishazhou waterway channel improvement project[R]. Wuhan: Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute, 2006. (in Chinese))
- [7] 张景明, 严之菲. 软体排深水沉放结构受力试验分析[J]. 水运工程, 2002(10): 34 - 35. (ZHANG Jing-ming, YAN Zhi-fei. Structure stress test analysis of flexible mattress during deepwater sinking[J]. Port & Waterway Engineering, 2002(10): 34 - 35. (in Chinese))
- [8] 刘 颖. 航道工程软体排沉排的受力分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010. (LIU Ying. Force analysis for soft mattress of waterway engineering[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [9] 长江航道局. 航道工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (Changjiang Waterway Bureau. Waterway engineering manual[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)