



# 长江通州沙水道深水航道整治工程 顺水沉排受力计算分析

罗少林, 谢长文, 刘赛龙, 陈锦

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 结合长江通州沙水道深水航道整治工程的特点, 分析在不同水深、不同流速条件下顺水沉排时船舶、排体的受力情况及船舶的控制方式, 以确定顺水沉排的适用范围、排体的设计参数, 为类似工程设计提供参考。

**关键词:** 航道整治; 顺水沉排; 受力计算分析

中图分类号: U 617.9<sup>+</sup>1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0007-05

## Stresses calculation and analysis of downstream fascine mattress in Tongzhousha Yangtze River deep-water channel regulation project

LUO Shao-lin, XIE Chang-wen, LIU Sai-long, CHEN Jin

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Combining with the characteristics of Tongzhousha Yangtze River deep-water channel regulation project, we analyze the stresses of ship, fascine mattress and method of ship control when conducting downstream fascine mattresses at different water depths and different current, so as to determine the usable scope of downstream fascine mattress and design parameters of fascine mattress. It may serve as reference for other channel regulation projects.

**Key words:** channel regulation; downstream fascine mattress; stresses calculation and analysis

通州沙整治工程由通州沙潜堤、狼山沙潜堤、狼山沙尾部潜堤与丁坝组成。潜堤堤身根据不同的水深条件分别采用抛石斜坡堤和半圆体混合堤, 丁坝堤身采用抛石斜坡堤结构; 护底采用软体排结构, 其中堤身排为砂肋软体排, 余排采用混凝土连锁块软体排。为了使排体较好地适应工程后河床的冲刷变形, 潜堤护底采用垂直水流沉排方式, 丁坝护底采用顺水沉排方式。

在长江中下游已实施潜(丁)坝<sup>[1]</sup>护底工程中, 所采用的护底工程大部分采取垂直水流沉排施工方式, 深水顺水流沉排施工很少采用, 目前对于顺水流沉排受力分析的研究成果也甚少, 个别区域采取了深水顺水流沉排施工, 也仅限于流速小于0.5 m/s区域, 由于流速非常小, 其施工工艺与垂直水流沉排差别不大, 而本工程丁坝处水

深较大, 流速也相对较大, 考虑到施工的安全, 有必要对顺水沉排受力进行分析和计算, 为制定顺水沉排的施工工艺提供指导。

### 1 工程条件

#### 1.1 河床组成

工程区域河床主要以淤泥质粉质黏土和粉细砂为主, 砂土覆盖层较厚, 工程建成后坝体附近河床变形较大。

#### 1.2 工程部位河床地形

通州沙整治工程施工图设计按照2012年5月测图进行, 潜堤、丁坝铺排范围内水深一般在25 m以内。根据最新的工前测量, 部分区域冲刷较严重, 水深已至30 m。

收稿日期: 2013-06-07

作者简介: 罗少林(1981—), 男, 工程师, 从事港口航道工程设计工作。

### 1.3 水沙运动特性

工程位于长江下游，流速的变化受长江径流量的影响较大，参考工程附近的苏通大桥潮流观测资料及现场施工实测流速，本工程处施工期最大表面流速约为 2 m/s。

该河段悬沙主要为粉砂，粒径比较细；大潮随水动力的增强，悬沙粒径相对较粗；枯季悬沙中值粒径一般略大于洪季；床沙粒径也较细，床沙主要为细砂，其次为粉砂，易冲易沉，活性性强，床沙中值粒径洪枯季没有明显的规律。

### 1.4 风浪

根据波浪数模计算结果，本河段最大波浪来自 NW-NNW 方向，出现在 NW 向的大风浪，50 a 一遇极端高水位时最大波高  $H_{1\%}$  约为 3.0 m，平均周期为 2.06 s。

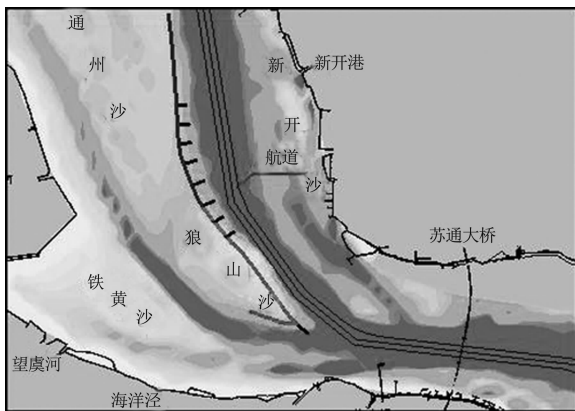


图 1 工程河段示意

## 2 受力分析

由于顺水沉排（图 2）时作业船舶、设备和施工排布上的受力大大增加，有可能造成船舶断缆、排布撕裂和卡排梁变形及裂痕等问题，从而严重威胁到施工船舶和人员的安全。本文结合顺水沉排施工工艺，对顺水沉排的受力进行简化分析与计算。

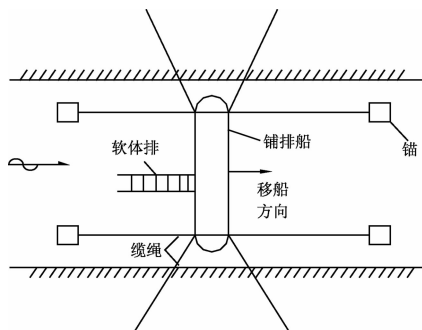


图 2 顺水沉排平面

### 2.1 铺设过程中的受力状态

软体排铺设过程见图 3。

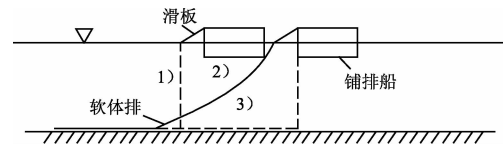


图 3 软体排铺设过程

1) 软体排迅速沿船舷垂直向下滑动直至河床，软体排排体承受垂直向下的重力作用、动水压力以及卷排筒刹车时对滑动中的软体排产生的一个附加动力荷载的作用。

2) 铺排船沿铺排方向向前移船时由于移船速度大于放排速度，则使部分软体排悬吊于水中呈半悬链线状态，此时船舷处拉力最大。当放排速度一定时，移船速度越大，其拉力值越大。

3) 当卷筒上的排布剩下一定长度时，停止移船，卷排滚筒刹车停止软体排下滑，剩下排体仍呈半悬链线状态逐渐铺设于河底，此过程中船舶对其拉力逐渐变小并消失。

考虑到运动状态 2) 的受力最为不利，船舷处拉力最大，拟重点分析运动状态 2) 时软体排的受力情况。

### 2.2 受力条件分析

1) 选取 1 m 宽的软体排<sup>[2]</sup>进行计算分析。

2) 混凝土块按均匀荷载进行计算分析，且由于混凝土块的质量远大于聚丙烯编织布、加筋条和系结条的质量，因此聚丙烯编织布、加筋条和系结条的质量忽略不计。

3) 加筋条直接缝制在基布上，软体排在沉放过程中，加筋条与排体基布是共同受力的，而排体之间的连接处，因只有纵向加筋条相连，故排体之间的连接处所有的拉力均由加筋条承受。因此必须计算对连接处的加筋条受力情况。

4) 不考虑加筋条的弹性变形，且不考虑水上架设滑板。

5) 排头不会随着船一起移动，排体在水中保持半悬链线状。

根据顺水沉排施工工艺，排布最大受力点在排体将要脱离船舷处，整个排体主要受力有：排

体船舷处受船舶的拉力  $T_B$ , 船舶水中排体的水中重力  $G_1$  和悬挂着未入水的排体重力  $G_2$ , 水中排体河底处的锚力  $T_m$ , 尤其是水中整个排体所受的水流力 (动水压力  $F_w$ )。取单位宽度 (1 m) 的排体进行分析, 其受力情况见图 4。

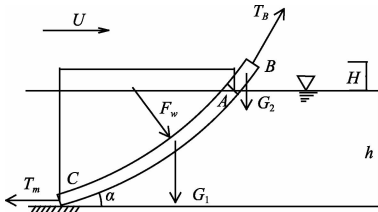


图4 单宽排体受力示意

### 2.3 受力计算

#### 2.3.1 计算思路

在实际施工中, 由于铺排方向可能与水流方向成任意角度, 当软体排在垂直水流方向上的投影面积不为零时, 在动水压力的作用下, 即使软体排的下放速度大于移船速度, 软体排在水中也不可能保持垂直状态。这时, 软体排在水中的形状不规则, 准确计算动水压力以及软体排的内力非常困难; 如果不考虑动水压力, 即在静水中进行软体排的铺设, 这时软体排的受力情况可准确计算出。因此, 首先分析在静水中铺排时软体排的受力情况, 然后在此基础上采用经验公式分析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。

#### 2.3.2 计算模式

1) 在静水中船移动时软体排受力计算。

①排体水下部分的受力。

船在静水中移动时, 软体排在水下部分呈悬链线状, 因此首先采用悬链线理论来分析和计算软体排在水下部分的受力情况。

由悬链线理论可知, 当一个质量均匀的链条被悬挂着两端, 在重力作用下自由下垂的链条形状就是一条悬链线曲线 (图 5), 因此, 在移船过程中的软体排正是半个悬链线 (图 6)。



图5 悬链线曲线

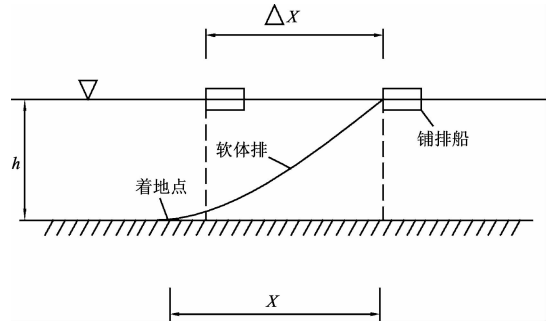


图6 船移动过程中软体排形态

假设链条单位长度的水下重力为  $W_1$ , 任意一点的拉力是  $T$ , 悬链线参数为  $C$ ,  $Z$  为水下各点距离河底的距离, 根据相关理论计算公式<sup>[3]</sup>, 对悬链线上任一微段进行受力分析, 得出链条的拉力为:

$$T = W_1 g (z + c) \quad (1)$$

在移船过程中, 软体排所受拉力与移船速度和软体排的下放速度有关, 放排速度一定时, 移船速度越大, 软体排所受拉力越大, 设移船速度为  $v_{船}$ , 放排速度为  $v_{排}$ , 则任意时间  $t$  时, 相对移船位移为  $\Delta x = v_{船}t - v_{排}t$ , 铺排船距河底的垂直距离为  $h$ , 根据相关理论计算公式<sup>[3]</sup>, 可计算出不同  $\Delta x/h$  对应的  $c/h$  的值 (表 1)。

$$\Delta x = h - \left\{ \sqrt{h^2 + 2hc} - c \ln \left[ 1 + \frac{h}{c} + \sqrt{\frac{h}{c} \left( 2 + \frac{h}{c} \right)} \right] \right\} \quad (2)$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta x}{h} = 1 - \left[ \sqrt{1 + \frac{2c}{h}} - \frac{c}{h} \ln \frac{1 + \frac{c}{h} + \sqrt{\left( 1 + \frac{2c}{h} \right) \frac{c}{h}}}{c/h} \right] \quad (3)$$

表1  $\Delta x/h$  与  $c/h$  关系数值

$\Delta x/h$	$c/h$	$\Delta x/h$	$c/h$	$\Delta x/h$	$c/h$	$\Delta x/h$	$c/h$
0.025	0.005 2	0.275	0.157 8	0.525	0.702 7	0.775	4.069 8
0.050	0.012 6	0.300	0.185 1	0.550	0.814 3	0.800	5.229 0
0.075	0.021 3	0.325	0.218 0	0.575	0.946 8	0.825	6.919 4
0.100	0.031 6	0.350	0.254 1	0.600	1.091 8	0.850	9.525 4
0.125	0.043 9	0.375	0.295 1	0.625	1.281 3	0.875	13.847 7
0.150	0.057 5	0.400	0.341 7	0.650	1.512 3	0.900	21.803 9
0.175	0.072 9	0.425	0.394 9	0.675	1.799 5	0.925	38.994 1
0.200	0.090 9	0.450	0.456 0	0.700	2.161 9	0.950	88.111 0
0.225	0.110 5	0.475	0.526 2	0.725	2.628 1	0.975	353.339 5
0.250	0.132 8	0.500	0.607 5	0.750	2.241 2		

根据拉力计算公式, 即可计算出静水中不同水深、不同移船距离  $\Delta x$  对应的软体排水下部分承受的拉力  $T_A$ 。

②排体水上部分的受力。

软体排水上部分受力见图7。

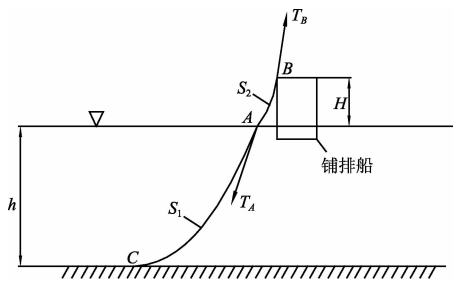


图7 软体排水上部分受力简图

由于软体排与船舷相切部分的拉力最大，因此必须考虑此处软体排的受力情况。首先，若软体排全部处于水下，即水位达到B点，则可利用链条拉力公式<sup>[3]</sup>计算出不同移船距离对应的软体排水下各处的拉力，则在A处（实际水面位置）软体排的拉力为：

$$T_A = W_1 g (c + h) \quad (4)$$

式中： $h$  为水深。

水位在A点时，假设AB段单位长度的水上重力为 $W_2$ ，根据力的平衡方程<sup>[3]</sup>，可得出水上部分的拉力为：

$$T_B = \sqrt{W_1 g^2 c^2 + \left( W_1 g + W_2 g \frac{H}{h} \right)^2 (h^2 + 2hc)} \quad (5)$$

2) 在动水中船移动时软体排受力计算。

当铺排方向与水流方向成一定角度 $\varphi$ 时 ( $\varphi \neq 90^\circ$ )，在动水压力的作用下，即使软体排的下放速度大于移船速度时，软体排在水中也不可能保持垂直状态，而会出现图8的形状，由于此时软体排在水下的形状不规则，准确计算动水压力以及软体排的内力非常困难，因此须采用经验方法进行估算。

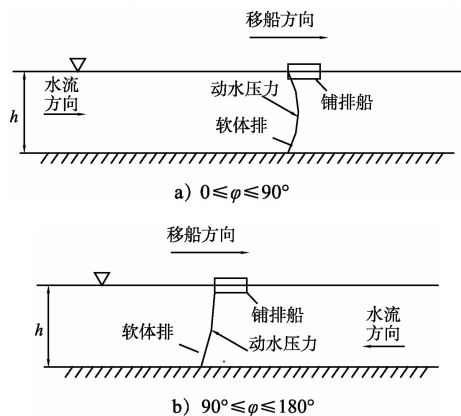
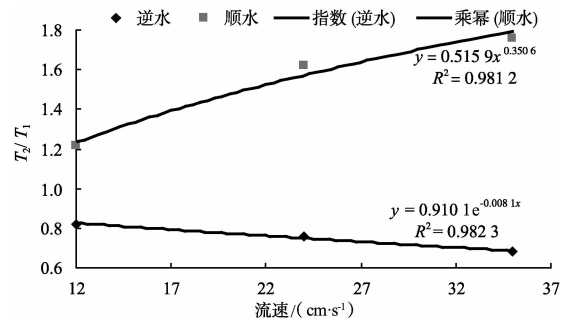


图8 软体排水下形状

张景明<sup>[4]</sup>曾对软体排在静水中沉放、铺排方向与水流方向一致、铺排方向与水流方向相反3种情况下软体排的受力情况进行了试验，根据其试验结果，分别点绘了铺排方向与水流方向一致和相反两种情况下，流速与拉力变幅之间的关系曲线（图9）。



注： $T_1$ 为静水中拉力， $T_2$ 为动水中拉力。

图9 铺排方向与水流方向相同和相反时流速与 $T_2/T_1$ 关系曲线

从图9可看出，铺排方向与水流方向相反时，流速越大，排体所受的拉力减小幅度越大；铺排方向与水流方向相同时，流速越大，排体所受的拉力增大的幅度越大。分别对顺水和逆水时流速与 $T_2/T_1$ 之间的关系进行曲线拟合，得出如下关系式：

$$\text{顺水: } y = 0.5159x^{0.3506} \quad (6)$$

$$\text{逆水: } y = 0.9101e^{-0.0081x} \quad (7)$$

式中： $x$  表示模型平均流速  $u$  (cm/s)； $y$  表示  $T_2/T_1$ 。

根据模型比尺 (1:18)，则  $u/U = 23.57$  (其中  $U$  为天然平均流速，m/s)，代入式(6)中将模型流速转化为天然流速，可得：

$$T_2/T_1 = 1.5500U^{0.3506} \quad (8)$$

根据平均流速与表面流速的关系式

$$U_m = (1 + m) U \quad (9)$$

式中： $U_m$  为表面流速 (m/s)； $U$  为平均流速 (m/s)； $m$  为系数。代入式(8)可得：

$$T_2/T_1 = 1.4804U_{m0.3506} \quad (10)$$

根据式(10)即可计算出各种表面流速对应的动水中拉力与静水中拉力的比值。

如果铺排方向与水流方向夹角为  $\varphi$  ( $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$ ), 则在动水中水下部分的软体排所受拉力计算式:

$$T_2 = (1.4804U_{m0.3506} - 1)T_1 \cos\varphi + T_1 \quad (11)$$

$$\text{即: } T_A = [(1.4804U_{m0.3506} - 1) \cos\varphi + 1] \cdot W_1 g(c+h) \quad (12)$$

式中:  $T_2$  为动水时软体排所受的拉力(即水下部分排体 A 点拉力);  $T_1$  为静水时软体排所受的拉力。

水上部分受力与前面静水情况同样计算, 令

$$\eta = (1.4804U_{m0.3506} - 1) \cos\varphi + 1 \quad (13)$$

可得软体排与船舷相切位置的拉力计算式:

$$T_B = \sqrt{(W_1 g \eta)^2 c^2 + \left(W_1 g \eta + W_2 g \frac{H}{h}\right)^2 (h^2 + 2hc)} \quad (14)$$

根据相对移船位  $\Delta x$ , 根据表 1, 可查出对应的  $c/h$ , 即可求出  $c$  值, 由式(14)即可求出任意时刻软体排所受拉力  $T_B$ 。

## 2.4 计算结果分析

通州沙整治工程丁坝处顺水铺排的施工过程中水深在 5~30 m, 表面流速 1~2 m/s, 船舶与着底排体的相对位移  $\Delta x/h$  取 0.2~0.8, 铺排方向与水流方向完全一致 ( $\varphi=0$ ), 单位面积水下排体质量按混凝土联锁块 480 mm×480 mm×200 mm 考虑, 水上排体考虑  $H=2$  m, 制动时附加动力系数  $k$  经试验确定为 1.5。

各种水深及流速组合条件下考虑附加动力系数船舷处单宽排体的拉力值可根据上述公式计算出, 通过计算的拉力值, 得出如下几点结论:

1) 随着水深  $h$  的增加及相对移船位移  $\Delta x/h$  的加大, 软体排所受拉力  $T$  均逐渐加大。

2) 水深  $h$  对软体排所受拉力  $T$  影响较大, 在表面流速  $U_m$  和相对移船位移一定时, 水深  $h$  每增加 1 倍, 排体所受拉力也将增加 1 倍以上。

3) 在水深  $h$  一定条件下, 相对移船位移  $\Delta x/h$  对拉力的影响较大。当  $\Delta x/h$  从 0.2 增至 0.6 时,

即使在较大水深和表流情况下 ( $h=30$  m,  $U_m=2$  m/s), 拉力  $T$  增幅在 40 kN 左右; 但当  $\Delta x/h$  超过 0.6 时, 拉力  $T$  将大幅增加,  $\Delta x/h$  达到 0.8 时拉力  $T$  增至 3 倍左右。因此, 施工过程中铺排速度要快, 保持相对移船位移  $\Delta x/h < 0.6$ , 以减小船舶对排体的拉力。

## 3 结语

1) 顺水流沉排与垂直水流沉排受力存在差异, 顺水流沉排软体排所受拉力主要受水深、相对移船位移的影响较大。

2) 通过理论计算分析, 为满足排体的抗拉强度要求, 根据现场施工条件, 首先考虑通过控制移船相对位移  $\Delta x/h$  来满足, 在此基础上, 排体抗拉强度仍不能满足要求, 需通过调整排布、加筋带的型号及加筋带的布置来满足。

3) 由于软体排沉放过程中受水流、水深、风浪、铺排方式以及移船速度等多种因素的影响, 排体基布及加筋条上所受的力比较复杂, 理论分析较难反映实际的受力情况。因此进行现场受力实测, 可综合考虑各种因素的共同影响, 并可进一步了解和分析软体排在沉放过程中的受力机理, 以用于修正理论分析结果。这对软体排的设计及施工工艺的确定、保证施工安全性来说是十分重要的。

## 参考文献:

- [1] JTJ 312—2003 航道整治工程技术规范[S].
- [2] JTJ 239—2005 水运工程土工织物应用技术规程[S].
- [3] 余帆, 黄召彪, 谭伦武. 西部交通建设科技项目. 长江中游护滩、沉排及抗冲整治建筑物结构形式与施工工艺研究[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2004.
- [4] 张景明. 软体排深水沉放结构受力试验[J]. 水运工程, 2002(10): 34-35.

(本文编辑 武亚庆)