



# 基于集中质量法的软体排受力和构型分析

孙峙华<sup>1</sup>, 杨平<sup>1</sup>, 李镇宇<sup>1</sup>, 刘林双<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学交通学院, 湖北武汉430063; 2. 长江航道规划设计研究院, 湖北武汉430011)

**摘要:** 首次将一种基于集中质量法的力学模型用于分析计算软体排沉排受力和构型。该力学模型解决了不均匀质量、可拉伸软体排排体的构型和拉力分布的分析计算问题,并能考虑实际河流环境中水流的作用力。实例计算结果的讨论以及与悬链线理论解进行对比可知基于集中质量法的力学模型更适用于实际河流环境下的软体排排体的受力分析。

**关键词:** 软体排; 集中质量法; 张力; 构型

**中图分类号:** U 612.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2015)01-0149-03

## Analysis of configuration and tension force for flexible mattress by Lumped-Mass method

SUN Zhi-hua<sup>1</sup>, YANG Ping<sup>1</sup>, LI Zhen-yu<sup>1</sup>, LIU Lin-shuang<sup>2</sup>

(1. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

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

**Abstract:** A Lumped-Mass method is presented for the first time to analyze the tension force subjected by flexible mattress and its configuration. The method takes account of the elastic extension, non-uniform mass distribution of the mattress and the acting force due to flowing water. Comparing the calculation result by this method and that based on the catenary theory, we know that the Lumped-Mass method is more applicable for analyzing the flexible mattress in real fluvial environment than the commonly used catenary theory.

**Keywords:** flexible mattress; Lumped-Mass method; tension force; configuration

软体排是以土工合成材料加荷载物制成的系结式护底结构。在航道和海岸整治工程中,利用其隔离和反滤功能,进行护底、护岸和固滩<sup>[1]</sup>。软体排沉排过程中排体的受力分析直接关系到排体的设计和铺排作业的顺利安全进行。目前对沉排中排体受力的理论分析一般基于悬链线理论,仅适用于静水中不考虑拉伸的均匀质量的单位宽度排体的受力。文献[2]应用悬链线理论给出了静水中不考虑拉伸的均匀质量的单位宽度排体受力的解析表达式。文献[3]在文献[2]的基础上给出了一种考虑水面以上排体影响的近似计算方法。文献[4]在悬链线理论的基础上,以附加密度的形式计及水流力对排体受力的影响。

软体排的排体是一种土工织物,具有较好的

可拉伸性。现有的理论计算方法对静水和动水沉排过程中的软体排所受的拉力进行计算都不考虑排体的拉伸,而排体的拉伸弹性形变直接引起排体水下构型的变化,从而影响到了排体所受拉力的大小和分布。

本文采用集中质量法建立力学模型,可考虑排体的拉伸变形以及动水中水流的作用,能够对质量不均匀的排体进行受力分析。经实例计算与其它计算结果的比较可见,本文采用的理论分析方法更加适应实际情况下的分析计算。

### 1 集中质量法分析模型的建立

考虑单位宽度排体,使用集中质量模型将排体离散:沿着长度方向将排体划分为 $n$ 个微段,

收稿日期: 2014-06-04

作者简介: 孙峙华(1973—),女,博士研究生,从事结构安全性与可靠性的研究。

每个微段的质量均分到微段的两个节点上，节点间看成无质量的弹簧连接，外载荷作用于节点之上（图1）。

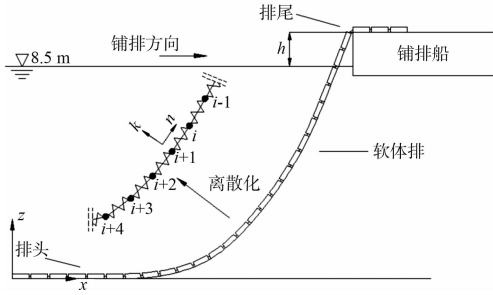


图1 集中质量法分析模型

## 2 力学分析方程的推导

### 2.1 排体受力分析和几何分析

排体微段受力分析和几何分析见图2。图2中的局部坐标系以微段的切向为X轴，垂直于切向为Y轴。根据图2可以建立微段的平衡方程：

$$(T_i + dT_i) \cos(d\theta_i) - T_i + Pd \sin\theta_i - F_i(1 + \varepsilon) ds = 0 \quad (1)$$

$$(T_i + dT_i) \sin(d\theta_i) - Pd \cos\theta_i - D_i(1 + \varepsilon) ds = 0 \quad (2)$$

式中： $T_i$ 为拉力； $\theta_i$ 为拉力 $T_i$ 的倾角； $F_i$ 为微段 $i$ 所受到动水作用力的法向分量； $D_i$ 为微段 $i$ 所受到动水作用力的切向分量； $P$ 为微段的重力； $v_i$ 为微段 $i$ 处的水流速度； $\varepsilon$ 为微段 $i$ 的拉伸应变。

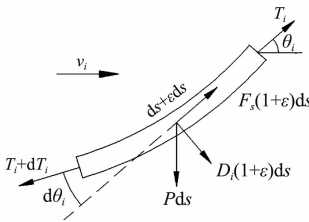


图2 排体微段受力分析

左右同除以 $ds$ ，忽略二阶无穷小量，取 $\cos\theta \approx 1$ 和 $\sin\theta \approx d\theta$ 后，可得：

$$\frac{dT_i}{ds} + P \sin\theta_i - F_i(1 + \varepsilon) = 0 \quad (3)$$

$$T_i \frac{d\theta_i}{ds} - P \cos\theta_i - D_i(1 + \varepsilon) = 0 \quad (4)$$

根据几何关系可得：

$$x_{i+1} = x_i - (1 + \varepsilon) ds \cos\theta_i \quad (5)$$

$$z_{i+1} = z_i - (1 + \varepsilon) ds \sin\theta_i \quad (6)$$

以上各式中 $\varepsilon$ 、 $F_i$ 、 $D_i$ 按下列各式计算：

$$\varepsilon = \Delta s / ds = T_i / EA_i \quad (7)$$

$$D_i = C_N \rho b v_i^2 \sin^2 \theta / 2 \quad (8)$$

$$F_i = C_T \rho b v_i^2 \cos^2 \theta / 2 \quad (9)$$

式中： $A_i$ 为排体微段截面面积； $b$ 为微段的截面宽度； $E$ 为弹性模量； $\rho$ 为水的密度； $C_N$ 为法向流载荷系数； $C_T$ 为切向流载荷系数。

由式(3)和(4)得到 $i+1$ 节点的拉力值 $T_{i+1}$ 和倾角变化量 $d\theta_i$ ：

$$T_{i+1,x} = T_{i+1} \cos(\theta_i + d\theta_i) = T_i \cos\theta_i + F_i \cos\theta_i (1 + \varepsilon) ds + D_i \sin\theta_i (1 + \varepsilon) ds \quad (10)$$

$$T_{i+1,z} = T_{i+1} \sin(\theta_i + d\theta_i) = T_i \sin\theta_i + F_i \sin\theta_i (1 + \varepsilon) ds - D_i \cos\theta_i (1 + \varepsilon) ds - P_i ds \quad (11)$$

$$d\theta_i = \frac{dT_i}{T_i} \cdot \frac{P \cos\theta_i + D_i(1 + \varepsilon)}{F_i(1 + \varepsilon) - P \sin\theta_i} \quad (12)$$

### 2.2 求解方法

计算分析时以最靠近船舷处为0号节点，从排体顶端向下依次解算。在进行积分求解时，前一微段的末端节点的积分结果作为相连的后一段始端的边界条件。边界条件设为 $n$ 号单元的倾角为零， $n$ 号单元的下端点 $x$ 、 $z$ 坐标为零。若考虑水流速度沿水深方向的分布，可将流速表示成水深的函数 $V(v_m, H)$ ，其中 $v_m$ 为表面流速， $H$ 为铺排水深。根据本文理论公式推导，应用软件Matlab编制计算程序，图3是该程序的计算流程。

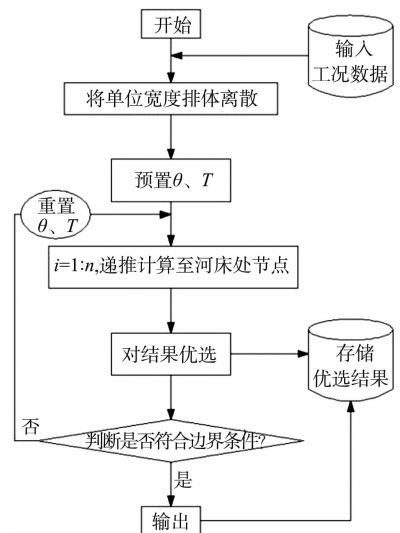


图3 集中质量法计算流程

### 3 算例与分析

#### 3.1 算例

本文计算工况选择水深  $H = 14 \text{ m}$ , 流速  $v_m = 1.05 \text{ m/s}$ 。且考虑水上一段排体悬吊影响, 设定水上部分高度  $h = 2 \text{ m}$ , 水下单位面积排体质量  $W_1 = 64.12 \text{ kg/m}^2$ , 水上单位面积排体质量  $W_2 = 109.92 \text{ kg/m}^2$ , 流速沿水深方向的分布假设为指数分布形式, 软体排排体的弹性模量  $E = 320 \text{ MPa}$  (根据文献[5]中室内试验结果估算得出)。悬吊排体长度由悬链线理论计算得到。由于悬链线理论不能考虑水上悬吊排体的影响, 运用悬链线理论计算时假定悬吊于水面上的排体与水面夹角等于悬链线顶点与水面的夹角  $\arctan(z')$ , 可近似计算得到: 水上悬吊排体长度  $S' = \sqrt{dx^2 + h^2}$ , 悬吊点拉力  $T = \sqrt{W_1^2 c^2 + (W_1 S + W_2 S')^2}$ 。

选取的计算工况为: 1) 静水工况1: 作为与悬链线理论计算结果的对照, 认为排体不可拉伸(弹性模量取一大值); 2) 静水工况2: 可拉伸排体; 3) 顺水工况1: 可拉伸排体。计算得到的排体构型见图4, 拉力分布见图5。

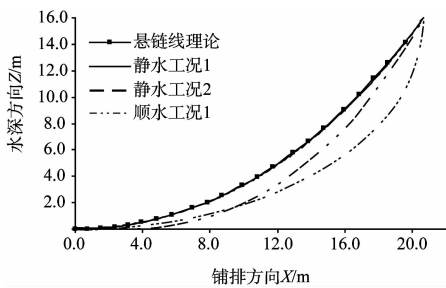


图4 排体构型

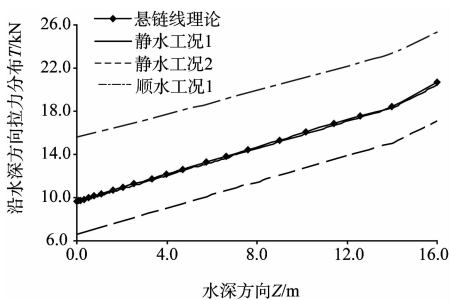


图5 沿水深方向排体拉力分布

#### 3.2 计算结果讨论

由图4可见, 当不考虑排体拉伸时, 由集中质量法计算得到的排体构型与悬链线很好地吻合。当

考虑拉伸时, 静水和顺水工况的排体构型都发生了变化, 一部分排体沉降于河底, 这与实际情况相符。顺水工况1的排体构型相对于作为其对照的静水工况2, 因水流力的作用, 近水面部分排体向铺排方向有了较大的位移, 近河床部分排体受拉而被抬起。由图5可见, 不考虑排体拉伸时, 集中质量法计算得到的排体拉力结果为  $20.42 \text{ kN}$ , 与悬链线理论值  $20.65 \text{ kN}$  非常接近, 拉力分布曲线比较吻合, 说明本算法有很好的精度。考虑排体拉伸后, 静水工况2相对于悬链线理论, 拉力值减小, 说明不考虑排体拉伸的悬链线理论过高估计了静水中排体承受的拉力。然而, 当同时考虑拉伸和水流力作用时, 排体承受的拉力值有了大幅度增加。

### 4 结论

1) 排体的弹性模量对于排体的水下构型和排体拉力值影响较大, 设计和施工计算中应加以考虑, 选取合适的弹性模量进行计算。

2) 目前分析软体排时普遍采用的悬链线理论, 因不考虑排体的拉伸而过高估计了排体在静水中承受的拉力值, 不考虑水流作用而低估了排体在流水中承受的拉力值, 且基于悬链线理论得出的排体构型与排体在水下的实际构型有较大差异。

3) 本文采用的集中质量法用于沉排过程中排体的受力分析是可行且有效的。该方法与基于悬链线理论的方法相比具有明显的优势, 能够考虑排体的拉伸变形、不均匀排体质量分布以及流体作用力, 更适用于实际河流环境下的软体排排体的受力分析。

### 参考文献:

- [1] 曹棉. 软体排在航道整治工程中的应用[J]. 水运工程, 2004(9): 70-73.
- [2] 朱宪武. 混凝土连锁块软体排受力分析与计算[J]. 水运工程, 2000(12): 21-26.
- [3] 张为, 李义天. 系混凝土块压载体软体排受力特性研究[J]. 水运工程, 2006(1): 9-15.
- [4] 张益智, 张焕岭, 许战军. 基于 ANSYS 的软体排动水沉排受力分析[J]. 西北水电, 2013(5): 21-24.
- [5] 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.