



护岸工程中浅水拖排受力分析与计算

马文泰¹, 李祥炜², 李志朋¹, 陈一梅²

(1 长江南京航道工程局, 江苏 南京 210016; 2 东南大学, 江苏 南京 211189)

摘要: 针对低水位下岸滩裸露高程较高, 从岸上牵引施工软体排时受力机理尚不明确的问题, 采用分段的方法, 将软体排与外部环境之间的接触状态分为贴合、悬空和缠绕 3 种。在此基础上, 推导了贴合状态下静力学模型计算式、悬空状态下悬链线模型计算式和缠绕状态下弧面摩擦模型计算式。分析计算了牵引软体排的最大牵引力, 得出计算软体排受力的计算方法。该计算方法可供类似工况下计算软体排受力时参考分析, 用于牵引软体排以进行施工方案设计和设备选择。

关键词: 软体排; 低水位; 拖排; 受力分析

中图分类号: U 617.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0216-05

Analysis and calculation of dragging the soft mattress in shallow water in bank-protection engineering

MA Wen-tai¹, LI Xiang-wei², LI Zhi-peng¹, CHEN Yi-mei²

(1. Nanjing Changjiang Waterway Engineering Bureau, Nanjing 210016, China;

2. Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The bank above water is usually high at low water level, and the force state of dragging the soft mattress with concrete interlock blocks to the riverbank of high elevation has not been studied. Aiming at this problem, the contact state between the soft mattress and the external environment is divided into three types by using the method of segmentation: clinging, hanging, and enwinding. The calculation formula of the static model in the clinging state, the calculation formula of the catenary model in the hanging state, and the calculation formula of the cambered surface friction model in the enwinding state are derived. The maximum dragging force of the soft mattress is analyzed and calculated, and the calculation method is obtained. The method can be applied in the analysis of soft mattresses in similar conditions for project design and equipment selection.

Keywords: soft mattress; low water level; dragging the mattress; force analysis

长江航道整治中, 有大量的护岸护底工程, 目前在深水条件下铺设软体排的施工工艺已较为成熟^[1-2]。高水位时期是长江鱼类生长、繁殖的时期, 施工对鱼类的生存环境造成极大的不良影响, 因此, 工程施工应尽量在枯季进行。枯季施工, 水位较低, 岸滩裸露的高程较高, 水面以上部分的岸滩、铺排船与岸滩之间的浅水区域无法直接利用铺排船施工, 需要拖排上岸。如在武汉至安庆 6 m 水深航道整治工程九江段, 由于施工中使

用的铺排船吃水深度要求, 铺排船无法靠近岸滩, 导致岸滩与铺排船锚泊位置之间存在长度约 100 m 的浅水区域, 施工中需要在岸上将排垫由铺排船牵引至设计位置, 这就需要根据受力情况选择和配置牵引设备。

目前对于软体排受力情况的研究大多数集中在深水条件下直接沉排的施工方法^[3-5], 对浅水条件下铺设混凝土联锁块软体排的研究较少, 因此, 本文对牵引拖排方案中软体排受力情况进行探究,

收稿日期: 2020-11-01

作者简介: 马文泰(1991—), 男, 助理工程师, 从事沿海、内河航道及港口的疏浚、整治、吹填等方面研究工作。

总结出适用于浅水条件下牵引软体排所需的牵引力计算方法。

1 软体排受力计算的分段分析法

1.1 基本假设

在已有的研究方法中, 对于混凝土连锁块软体排的计算与研究, 都在横向上将软体排视为质量分布均匀、受力均匀的整体来处理^[6-9]。本文对软体排的简化处理如下: 1) 排体自重力按均布荷载计算, 排体受力在横向上一致。2) 不考虑排体所受的浮力, 即排体处于水下时, 其水下自重力仍按水上自重力计算。由于铺排船的锚泊位置与水岸线之间的水位差较小(2 m), 且铺排过程中大部分排体位于水上, 因此这个假设虽然会增加排体受到的牵引力, 但是产生的误差较小, 而且是偏安全的。3) 不考虑排体以及加筋条的弹性变形。4) 不考虑水流对软体排产生的动水压力。

根据软体排与外部环境之间的接触状态对软体排进行分段, 软体排与外部环境之间的接触状态分为 3 类: 贴合、悬空和缠绕。

1.2 贴合状态受力分析

贴合指的是软体排与铺排船或岸坡、河床之间完全接触, 同时软体排在纵向上不发生变化或变化很微小, 该接触状态见图 1。

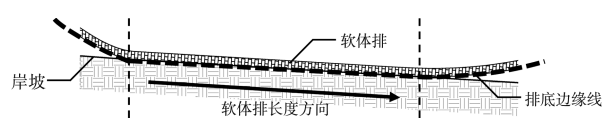


图 1 贴合状态

定义软体的排底边缘线为与排垫重合的线, 排底边缘线在任意点处的切线方向代表着软体排在该点处的排体方向。当软体排与岸坡处于贴合状态时, 排底边缘线为一段直线, 角度与岸坡角度相同。软体排在甲板上滑动、沿翻板表面下滑、在平整的河床或岸坡表面滑动时的状态都属于贴合状态。

软体排与外部处于贴合状态时, 采用静力学分析方法计算其受力情况, 主要考虑的作用力包括排体内部的纵向拉力、排体自身重力、外部对

软体排的支持力与摩擦力, 这些力之间形成静力平衡, 保持软体排在施工中静止或匀速移动, 计算时根据软体排的受力平衡进行求解。贴合状态的受力分析情况见图 2。

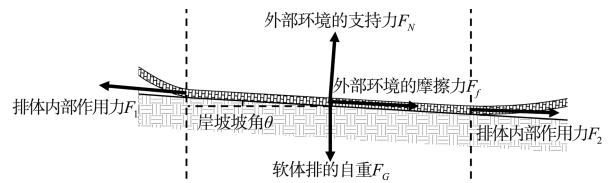


图 2 贴合状态的受力分析

贴合状态下的软体排的受力情况如下:
沿岸坡方向:

$$F_1 = F_G \sin \theta + F_f + F_2 \tag{1}$$

垂直岸坡方向:

$$F_N = F_G \cos \theta \tag{2}$$

式中: F_1 、 F_2 为贴合状态软体排左端、右端所受的排体内部作用力; F_G 为贴合状态软体排的自重力; θ 为岸坡的坡角; F_f 为贴合状态软体排所受的岸坡摩擦力; F_N 为贴合状态软体排所受的岸坡支持力。

1.3 悬空状态受力分析

外部环境存在高度差时, 软体排与外部的接触将出现悬空状态, 如船体与岸坡或河床之间的高度差, 或岸坡不同位置之间的角度、高程变化较大时, 软体排都将处于悬空状态, 悬空的软体排不与外部物体直接接触, 其状态见图 3。

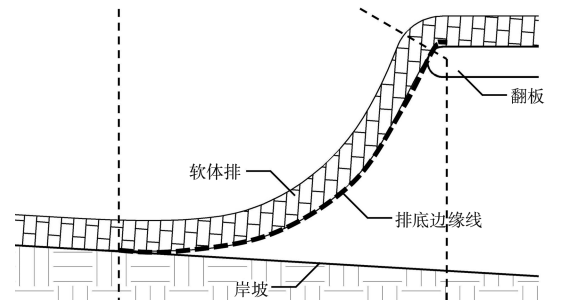


图 3 悬空状态

由图 3 可见, 在悬空状态下, 软体排与翻板、岸坡之间只在两端点处接触, 在与岸坡的接触点处, 排底边缘线的切线方向与岸坡方向相同; 在翻板的接触点处, 排底边缘线的切线方向与翻板

边缘的切线方向相同。

当软体排与外部物体之间以悬空状态接触时,软体排的形态可按照悬链线进行计算。悬链线为一条两端固定、粗细与质量分布均匀、柔软且不能伸长的链条在重力的作用下所具有的曲线形状。在船舶工程中,悬链线也常常被用来计算船舶的锚链形态^[10]。在软体排受力计算的研究中,悬链线也很早就被用于分析软体排内部的受力情况,本工程在施工的过程中,排在横向上的受力较为均匀,因此处于悬空状态的软体排可视为均质、柔软的链条,使用悬链线理论进行计算。

令悬链线最低点处为坐标原点,以水平方向为 x 轴、竖直向上方向为 y 轴,则悬链线的形态可表示为:

$$y=a\left(\cosh \frac{x}{a}-1\right) \quad (3)$$

$$a=\frac{F_H}{\sigma g} \quad (4)$$

$$F_H=a \sigma g \quad (5)$$

式中: a 为悬链线系数,对于任一确定的悬链线,其值是确定的; F_H 为悬链中任一点处内力的水平分力(N); σ 为悬链的线密度(kg/m); g 为重力加速度(m/s^2); 悬链线中任一点的切线与水平方向的夹角为 β :

$$\tan \beta=\sinh \frac{x}{a} \quad (6)$$

联立式(3)~(6),即可用变量 x 和参数 a 、 σ 、 g 表示悬链的形态、任一点处悬链内力的水平分力、悬链切线与水平方向的夹角与悬链长度。

1.4 缠绕状态受力分析

由于软体排的柔性较大,当遇到表面向排体方向凸出的外部环境时,软体排将缠绕凸出部分,产生摩擦作用,其状态见图4。

由图4可见,在缠绕状态下,排底边缘线与外部环境表面重合,但方向发生了变化。目前对于缠绕状态下软体排受力分析的研究不多,实际施工中,这一分段的长度可能很小,容易在计算中被忽略,但在该分段中,软体排内部纵向拉力的方向与大小都发生了较大的变化,因此需要对

其进行研究与讨论。软体排在翻板边缘发生角度变化时,排体与翻板边缘之间就是缠绕接触的状态。

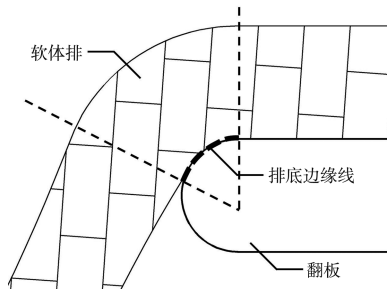


图4 缠绕状态

软体排通过缠绕船体甲板、翻板或岸坡不平整处来改变角度,这种状态下软体排的实际长度一般很小,但其受力情况与排体方向的改变往往很大。如图4所示,软体排除了受到前后分段对其作用力和自身重力外,还受到翻版的弧形边缘对其支持力和摩擦力的作用,每一点处的支持力与摩擦力的大小、方向都有区别,直接计算存在困难。对排体取微段进行分析,见图5。

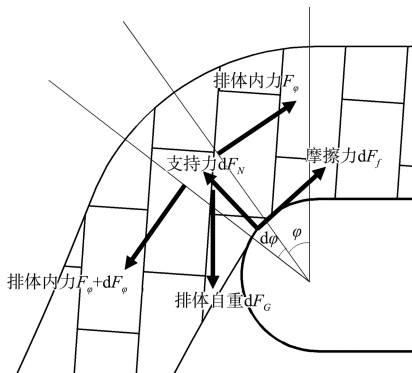


图5 受力微段

图5中,在角度为 φ 处,取微段 $d\varphi$,其受到的作用力为排体内力 F_φ 、自重 dF_G 、翻板边缘对其支持力 dF_N 、摩擦力 dF_f 、排体内力 $F_\varphi+dF_\varphi$ 。排体的重力在此处相对较小,因此在计算中忽略排体自重的影响。将上述力沿 dF_N 方向、 dF_f 方向分解,列出受力平衡式,可得:

$$dF_N=F_\varphi \sin \frac{d\varphi}{2}+\left(F_\varphi+dF_\varphi\right) \sin \frac{d\varphi}{2} \quad (7)$$

$$F_\varphi \cos \frac{d\varphi}{2}+dF_f=\left(F_\varphi+dF_\varphi\right) \cos \frac{d\varphi}{2} \quad (8)$$

设翻板边缘排体与翻板之间的摩擦系数为 μ , 则可得

$$dF_f = \mu dF_N \tag{9}$$

将式(9)代入式(7)、(8), 同时由于 $d\varphi$ 为极为微小的值, 将上式中的三角函数做替换, 得

$$dF_N = 2F_\varphi \cdot \frac{d\varphi}{2} + \frac{d\varphi}{2} dF_\varphi \tag{10}$$

$$dF_f = dF_\varphi = \mu dF_N \tag{11}$$

略去高阶小量后化简可得

$$dF_\varphi / F_\varphi = \mu d\varphi \tag{12}$$

对式(12)积分, 同时注意到当角度为 $\varphi = 0^\circ$ 时, 取软体排右端所受的横向拉力为 $F_\varphi = F_{\text{横}}$, 可得

$$F_\varphi = F_{\text{横}} e^{\mu\varphi} \tag{13}$$

式(13)不仅可用于软体排内力的计算, 也可进行任何在不计自重力情况下排体或缆绳等与船体、岸坡处于缠绕状态时内力的计算。

上述 3 种接触状态涵盖了软体排与外部环境接触的所有情况, 在拖排施工过程中任一状态下的软体排都可以按照这 3 种接触状态进行分段、计算。

2 拖拽软体排所需最大牵引力计算

2.1 施工中软体排最大受力状态

拖排施工中软体排所需牵引力在牵引过程中存在峰值, 该峰值出现在绑扎了混凝土连锁块的排体刚好到达水岸线位置时的瞬间。此时, 需要牵引的软体排长度达到最长, 绑扎的混凝土连锁块数量也最多。混凝土连锁块到达水岸线后, 软体排停止运动, 不再受到岸坡、甲板、翻板等阻碍其运动的摩擦力作用, 牵引设备需要提供的牵引力减小。排头固定后, 牵引设备不再提供牵引力。

从软体排的受力情况来看, 在混凝土连锁块被牵引到水岸线位置时的瞬间, 软体排的受力情况最复杂、所需的牵引力最大。根据第 1 节中软体排与外部环境之间的接触状态的分类, 对此时的软体排进行分段, 见图 6。

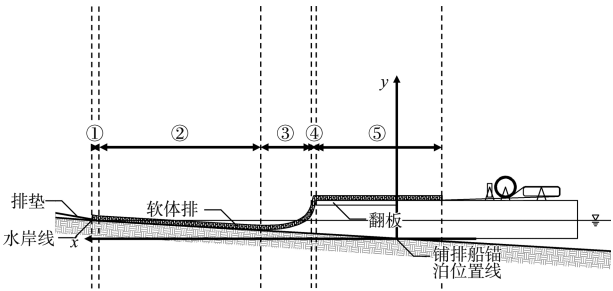


图 6 排体最终状态分段

图 6 中①号段为空排垫牵引排体的连接点至排体与岸坡的分离点, 处于悬空状态, 由于牵引的角度一般大于坡角, 排头部分排体受到上抬作用而形成悬链; ②号段排体与岸坡完全接触, 处于贴合状态; ③号段排体悬挂于翻板边缘, 处于悬空状态; ④号段排体与翻板的半圆形边缘接触, 处于缠绕状态; ⑤号段排体位于铺排船甲板上, 与翻板、甲板完全接触, 处于贴合状态。根据第 1 节中的分析方法, 联立软体排①~⑤号段的受力分析式。

2.2 软体排最大受力计算

建立坐标系, 坐标原点为铺排船与岸坡的接触点, x 轴为水平方向, 正向指向岸坡方向; y 轴为竖直方向, 正向竖直向上, 见图 6。在坐标系中, 岸坡的形态、软体排各段的起始点都可以用坐标表示。

⑤号段的长度可取定值(算例 5 m+翻板长度), 其左端坐标与翻板边缘点坐标相同。④号段的右端坐标与⑤号段的左端坐标相同, 假设④号段左端的排体切线方向与水平面的夹角为 θ_l , 由此算得③号段的坐标, 若③号段的坐标与岸坡的表面重合, 则表明假设的 θ_l 为准确值。确定③号段左端的坐标后, ②号段与①号段的长度之和是确定的, 即等于③号段左端点至水岸线处的岸坡长度。采用试算法, 假设②号段的长度 S_2 的数值, 可算得①号段左端的角度, 根据①号段左端点的坐标与岸坡边缘线处坐标的值, 可求出牵引缆绳与排垫的角度 θ_s , 将排垫的角度与①号段悬链左端的角度比较, 当这两个角度相同时, 长度 S_2 的值为准确值。

牵引缆绳的长度根据铺排开始前牵引装置上牵引缆绳的系点与铺排船甲板边缘的直线距离确定。牵引完成时，牵引缆绳的状态见图 7。

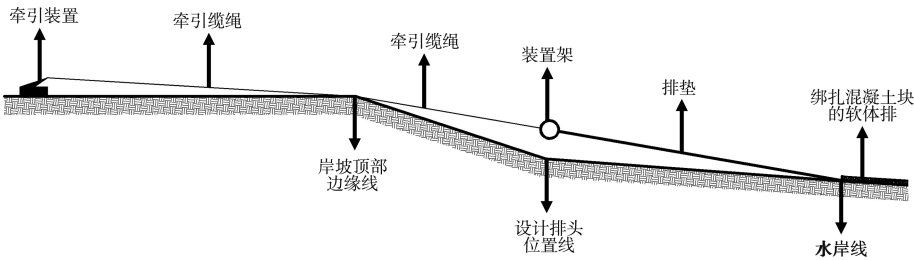


图 7 牵引结束时牵引缆绳的状态

预留排垫的长度应当与设计排头位置线和水岸线之间岸坡的长度相等，①号段左端点至岸坡顶部边缘线的直线距离可以确定，则图 7 中岸坡顶部边缘线以下的牵引缆绳长度可以算出，岸坡顶部边缘线以上的牵引缆绳长度、角

度也可算出。岸坡顶部边缘线上下两段牵引缆绳之间力的关系按式(13)计算，进而可求出牵引装置需要提供的水平牵引力。本例选取长江某护岸施工中的 4 个断面，断面尺寸及计算得出的最大牵引力见表 1。

表 1 断面尺寸及最大牵引力计算结果

断面编号	3~5m 等高线距离/m	5m 等高线至设计排头线距离/m	设计排头线至岸坡顶部距离/m	设计排头线高程/m	坡顶高程/m	所需最大牵引力/kN
1	33.86 *	32.07	20.64	7.4	14.2	400.3
2	17.00	37.16 *	20.65	7.6	14.0	132.0
3	15.30	31.93	23.99 *	10.0	14.0	110.1
4	29.69	33.05	20.63	8.3	14.6	284.3

注：“*”表示该数值为实测地形图中的最大值。

3 结语

1)根据软体排与外部环境的接触状态，高滩铺排过程中软体排的受力状态可分为贴合、悬空和缠绕 3 种。贴合状态下采用静力学模形式(1)、(2)；悬空状态下采用悬链线模形式(3)~(6)；缠绕状态下采用弧面摩擦模形式(13)。

2)拖排施工中软体排所需牵引力，在牵引过程中存在峰值，当绑扎混凝土联锁块的软体排到达水岸线时，软体排所需的牵引力达到最大。采用三段分析法，通过试算求解，即可得出铺设过程中牵引软体排所需的最大牵引力。

参考文献：

[1] 余帆,周克当,冯刚.系接压载软体排在护岸工程中的应用[J].人民长江,2002(8):32-34.

[2] 中港第三航务工程局,上海航道局.水下软体排铺设工程船及水下软体排铺设工艺:CN02110954.0[P].2003-

09-17.

[3] 程玉来,赵龙根,楼启为.土工织物软体排在长江口深水航道治理工程一期北导堤工程中的应用[J].水运工程,2000(12):53-58,62.

[4] 陈泽迹,褚辉,江道立.深水区软体排的铺设[J].中国水运,2012(1):25-27.

[5] 沈立龙,姚平.长江航道整治深水区超长软体排铺设施工质量控制技术[J].水运工程,2017(10):5-9,15.

[6] 刘林双.长江中下游河道护底沉排工程中 D 型排破坏机理研究[J].中国水运·航道科技,2018(1):13-21.

[7] 朱宪武.混凝土联锁块软体排的受力分析与计算[J].水运工程,2000(12):21-26.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 张迎春.悬链线与单跨悬索张力的研究[J].林业科学,1979(3):205-214.

(本文编辑 武亚庆)