



# D形软体排顺水沉排受力特性分析

常留红, 王瀚锐, 李小超, 孙文硕, 郑景琦, 李飘

(长沙理工大学 水利与环境工程学院, 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114)

**摘要:** 软体排沉排过程中受到移船、水流等因素的影响容易发生撕排现象。为探究顺水沉排过程中相对移船位移、水深、表面流速和布置加筋条对排布受力的影响, 基于悬链线理论建立软体排数学模型, 考虑流速沿水深的指数分布, 开展系列数值计算。结果表明: 相对移船位移对排布应力的影响最大, 表面流速和水深次之; 排布最大轴向和横向应力均出现在排布顶端, 沿排宽方向表现为两端大、中间小的特点; 布置加筋条能够显著降低排布的轴向和横向应力, 防止撕排现象发生。

**关键词:** 软体排; 排布受力; 非线性有限元计算; 悬链线理论

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0078-07

## Analysis of force characteristics of downstream sinking D-shaped flexible mattress

CHANG Liu-hong, WANG Han-rui, LI Xiao-chao, SUN Wen-shuo, ZHENG Jing-qi, LI Piao

(Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province,

School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The sinking of flexible mattresses, due to ship movement, water flow, and other factors, is prone to tearing of the mattresses. To explore the influences of relative displacement of the ship, water depth, surface velocity, and arrangement of stiffeners on the forces on downstream sinking flexible mattresses, we build a mathematical model of flexible mattresses according to the catenary theory, and carry out a series of numerical calculations considering the exponential distribution of velocity along water depth. The results show that the relative displacement of the ship, followed by surface velocity and water depth, has the greatest influence on the stresses of flexible mattresses. The maximum axial and transverse stresses are both at the top of the flexible mattresses, and a characteristic of large tensile forces at two ends and small ones in the middle is observed along the mattress width direction. The arrangement of stiffeners can significantly reduce the axial and transverse stresses of the mattresses and thereby prevent the tearing phenomenon.

**Keywords:** flexible mattress; force on mattress; nonlinear finite element calculation; catenary theory

软体排由土工织物和压载体体制成, 具有较好的抗冲刷性能, 常用于航道整治工程中各种整治建筑物的护底<sup>[1-2]</sup>。顺水流沉排过程中, 受到移船、水流等因素的影响, 排布的受力呈现出明显的非线性特征, 极易发生横向和纵向撕排现象<sup>[3]</sup>。因此, 沉排过程中排布的受力是保障工程安全的关键因素, 也是工程界广泛关注的热点问题之一。

对于沉排过程中软体排的受力, 目前还没有

应用性广泛的分析方法。冯海暴<sup>[4]</sup>在分析沉排过程中排体所受水流力时, 采用与船舶水流力类似的计算方法, 此方法使用方便, 但很多情况下与实际情况不符。朱宪武<sup>[5]</sup>采用悬链线理论分析和计算软体排的受力, 但未考虑水流动水压力对排布的影响。

考虑动水压力作用下的软体排受力研究, 张为等<sup>[6]</sup>将排布内的拉力分解为静水拉力和动水拉

力两部分, 并采用经验方法对两者进行估算; 黄召彪等<sup>[7]</sup>考虑沉排过程中排布上的动水压力, 通过理论分析计算单宽软体排与船舷相切部位的受力; 张景明等<sup>[8]</sup>通过模型试验, 测量软体排在静水和动水中的受力; 孙峙华等<sup>[9]</sup>基于集中质量法建立力学模型, 考虑排体的拉伸变形和作用在排布上的水流力计算单宽软体排沉排过程中的受力; 张益智等<sup>[10]</sup>假定作用在排布上的动水压力全部转化为竖直方向的分力, 通过有限元方法开展了软体排受力数值模拟研究; Li 等<sup>[11]</sup>考虑流速沿水深的指数分布, 模拟排布在动水中的受力。以往研究多以理论研究和单宽软体排受力计算为主, 但在实际沉排过程中, 排布的受力十分复杂, 在移船、水流等多因素作用下, 软体排受力的研究成果尚不多见。

本文依托长江干线武汉—安庆段 6 m 水深航道整治工程, 基于悬链线理论建立软体排数学模型, 考虑流速沿水深的指数分布, 分析顺水沉排过程中相对移船位移、表面流速、水深和布置加筋条对排布受力的影响, 为施工时排布的加筋条设置方案提供依据, 为类似工程的设计、施工提供理论基础。

## 1 工程概况

工程河段马当河段位于长江下游, 上起小孤山, 下至华阳河口, 长 30 km(下游航道里程 700~730 km), 为分汊河型, 南汊为主汊, 较顺直, 为主航道所在。工程沉排主要采用 D 形联锁软体排, 联锁块采用 C20 混凝土, 施工采用顺水流沉排系混凝土块排铺放方式。根据实测水文资料, 工程所处水域大多为主流顶冲水域, 实测流速一般在 1.7 m/s 左右, 最大为 1.98 m/s。工程软体排排布采用 250 g/m<sup>2</sup> 的聚丙烯编织布缝制, 排布宽 38.5 m。加筋条布置方案为: 10 m 以下水深沿排宽方向每 0.5 m 设置一个 50 mm 宽的纵向聚丙烯加筋条, 10 m 以上水深沿排宽方向每 0.5 m 设置一个 70 mm 宽的纵向聚丙烯加筋条。排布、混凝土单元块尺寸见图 1。

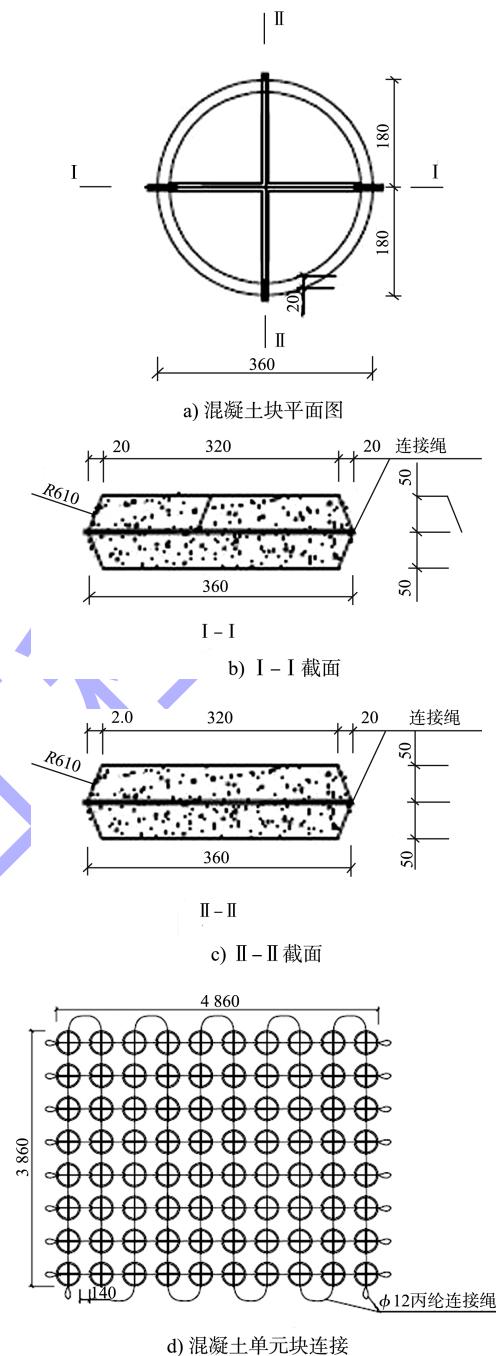


图 1 D 形联锁片形状及参数 (单位: mm)

## 2 数学模型的建立与验证

### 2.1 数学模型的建立

软体排在移船过程中呈现的形态为半个悬链线, 悬链线的数学表达式为:

$$\operatorname{ch} \frac{x}{c} = 1 + \frac{y}{c} \quad (1)$$

式中:  $x$  为移船方向坐标;  $y$  为水深方向坐标;  $c$  为悬链线参数, 其计算方法见文献[12]。

## 2.2 排布所受水流作用力

在沉排过程中，排布从河床一直延伸到水面，考虑明渠中流速沿水深的指数分布，选择明渠指数流速分布公式表征天然河流中水流流速：

$$\frac{u}{u_m} = \left( \frac{y}{h} \right)^n \quad (2)$$

式中： $u$  为流速； $u_m$  为表面流速； $h$  为水深； $y$  为待求处水深； $n$  为指数，取  $\frac{2}{7}$ 。

软体排沉入水中，水流冲击排体，使水流动量发生变化。此时排布上的水流流速为 0，根据动量定律，可得到作用在排布上的动水作用力。利用动量方程式(3)及连续性方程式(4)，令  $v_2=0$  m/s 得到式(5)。

$$\sum F' = \rho Q (\beta_2 v_2 - \beta_1 v_1) \quad (3)$$

$$Q = v_1 A \quad (4)$$

$$\sum F = \rho A \beta_1 v_1^2 \quad (5)$$

式中： $F'$  为软体排对水流的作用力； $\rho$  为水的密度； $Q$  为流量； $\beta_1$ 、 $\beta_2$  为动量校正系数，均取 1.02； $v_1$  为水流流速； $v_2$  为排布处的水流流速； $A$  为过水断面面积； $F$  为排布上的动水作用力。

为探究作用在软体排上的动水压强沿水深分布情况，绘制软体排微段计算简图如图 2 所示，可知软体排微段过水断面面积为：

$$A = ds \sin \varphi = dy \quad (6)$$

式中： $ds$  为软体排微段的长度； $\varphi$  为软体排微段与水平方向的夹角； $dy$  为软体排微段在竖直方向的投影。

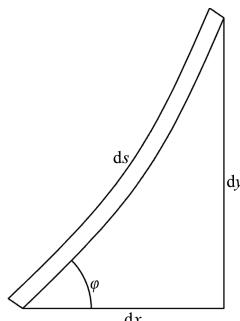


图 2 软体排微段计算

则作用在软体排上的动水压强：

$$p = \frac{F}{A'} = \frac{\rho A \beta_1 v_1^2}{A'} = \frac{\rho \beta_1 v^2 dy}{ds} \quad (7)$$

式中： $A'$  为软体排微段的面积； $p$  为作用在软体排上的动水压强。将作用在微段上的断面平均流速  $v$  用微段中心点流速近似代替，由式(2)(7)可得：

$$p = \frac{F}{A'} = \frac{\rho \beta_1 v^2 dy}{ds} = \frac{\rho \beta_1 u_m^2 y^{2n}}{h^{2n}} \cdot \frac{dy}{ds} \quad (8)$$

假定软体排在动水中仍然为悬链线状态，由图 2 得到几何关系：

$$\frac{dy}{ds} = \frac{dy}{dx} \frac{dx}{\sqrt{1 + \left( \frac{dy}{dx} \right)^2}} = \frac{y'}{(1 + y'^2)^{0.5}} \quad (9)$$

同时，由悬链线方程得到软体排长与  $y'$ 、软体排长与水深的关系式：

$$y' = \frac{s}{c} \quad (10)$$

$$s = \sqrt{h^2 + 2hc} \quad (11)$$

式中： $s$  为软体排的长度。

由式(8)~(11)可得：

$$p = \frac{\rho \beta_1 u_m^2 \sqrt{h^2 + 2hc}}{h^{2n} c} \left[ 1 + \left( \frac{\sqrt{h^2 + 2hc}}{c} \right)^2 \right]^{0.5} y'^{2n} \quad (12)$$

式(12)即为作用在软体排上的动水压强沿水深分布的计算公式。

## 2.3 模型参数选择

D 形排的排布采用非线性 SHELL181 壳单元模拟，加筋条采用 BEAM188 单元模拟。软体排沉排过程中，排布底端与排头梁连接，排头梁带动软体排沉入江底，以达到固定排头的目的，排布顶端至沉排船卷筒。因此，模型的边界条件设置为：排布底端限制平动自由度和转动自由度；排布顶端释放转动自由度，限制平动自由度。模型采用四边形网格划分，如图 3 所示。



图3 排布边界条件及网格划分

忽略排布质量, 将排布上混凝土压载物的质量均摊到排布上, 以排布自身重力的形式加载, 排布所受动水作用力根据不同工况以函数形式加载, 如图4所示。计算前, 开启大变形计算选项, 模型计算参数为: 宽度38.5 m, 单位面积排布浮重力2.6225 kN/m<sup>2</sup>, 弹性模量160 MPa, 泊松比0.4。

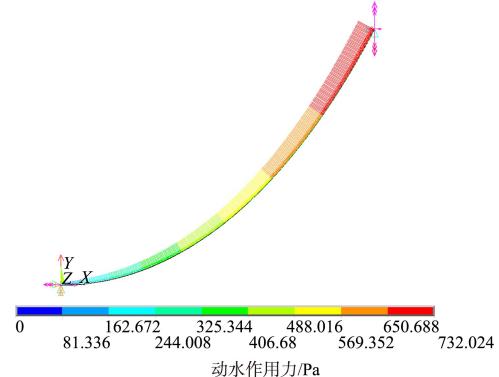


图4 作用在排布上的动水作用力

## 2.4 模型验证

许多学者已对悬链线理论建立的软体排模型计算精度进行了验证, 在此不再赘述。选择文献[12]中实测单宽排布所受最大拉力数据对作用在软体排上的动水作用力公式进行验证, 见表1。可以看出, 数值计算结果与实测数据吻合较好, 两者间最大误差均在10%以内, 表明作用在软体排上的动水作用力公式能够较好地模拟排布所受的水流力。

表1 动水作用力公式验证结果

工况	相对移船位移 $\Delta x/h$	水深 $h/m$	表面流速 $u_m/(m \cdot s^{-1})$	计算最大拉力/kN	实测最大拉力/kN	相对误差/%
1-1	0.6	8.5	0.89	26.98	29	6.9
1-2	0.6	14	1.05	36.07	38	5.1

## 2.5 计算工况

根据工程实测数据, 计算水深  $h$  为5~15 m, 计算表面流速  $u_m$  为1.5~2.0 m/s。为探究相对移船位移对排布受力的影响, 不考虑加筋条作用时, 相对移船位移  $\Delta x/h$  设置为0.4~0.8, 加筋条在相对移船位移为0.4和0.6的工况中布置。

点与铺排船之间的水平距离也逐渐增加, 排布受力面积逐渐增大。

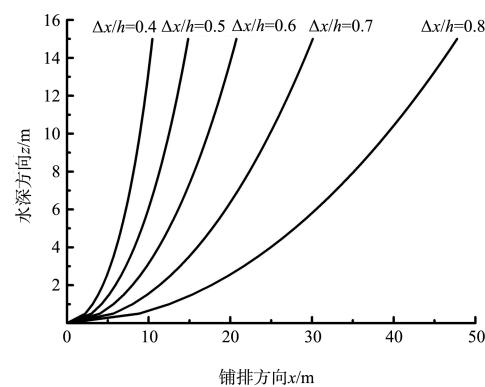


图5 不同相对移船位移软体排构型曲线

## 3 对排布受力的影响分析

以ANSYS中第一主应力  $S_1$  表示排布的轴向应力,  $S_2$  表示排布横向应力, 各方向的合位移表示排布的拉伸变形, 分析相对移船位移、表面流速和水深变化以及布置加筋条对排布的影响。

### 3.1 相对移船位移的影响

不同的相对移船位移软体排构型曲线见图5。可以看出, 随着相对移船位移的增加, 排布触底

选择水深  $h=15$  m、表面流速  $u_m=2.0$  m/s时的工况分析相对移船位移对排布受力的影响。排布最大轴向和横向应力随相对移船位移的变化曲

线见图 6。可以看出，排布的最大轴向、横向应力及其变化率均随相对移船位移的增大而增大。当相对移船位移超过 0.6 时，排布最大轴向、横向应力迅速增加，与相对移船位移从 0.4 变化到 0.6 相比，相对移船位移从 0.6 变化到 0.8 时排布最大轴向、横向应力分别增加了 112.6%、162.5%。因此，铺排过程中应控制相对移船位移在 0.6 以内。

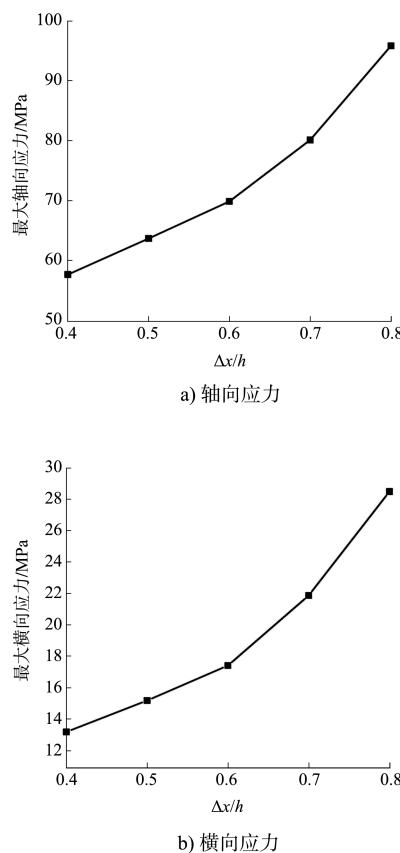


图 6 不同的相对移船位移下排布最大轴向和横向应力

### 3.2 流速和水深的影响

分别选择水深  $h=15\text{ m}$ 、相对移船位移  $\Delta x/h=0.6$  以及表面流速  $u_m=2.0\text{ m/s}$ 、相对移船位移  $\Delta x/h=0.6$  时的工况分析表面流速和水深变化对排布受力的影响，见图 7。由图 7a) 可知，随着表面流速的增加，排布所受最大轴向应力和最大横向应力均呈现出线性增大的趋势，且最大轴向应力的变化率大于最大横向应力。表明其他条件相同时，在大流速下沉排施工更容易发生纵向撕

排。由图 7b) 可知，随着水深的增加，排布最大轴向应力和最大横向应力基本呈现出线性增大的趋势，且最大轴向应力的变化率大于最大横向应力。表明大水深沉排施工时，应优先考虑排布轴向强度安全。

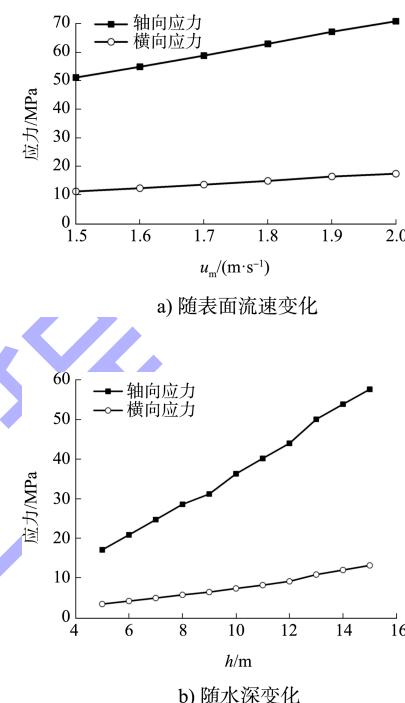
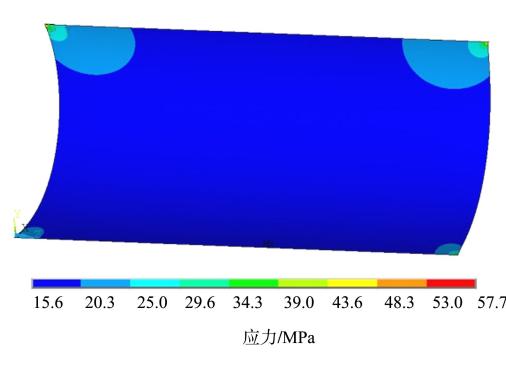


图 7 排布最大轴向与横向应力随表面流速和水深变化

### 3.3 加筋条的影响

选择水深  $h=15\text{ m}$ 、相对移船位移  $\Delta x/h=0.6$ 、表面流速为  $u_m=2.0\text{ m/s}$ 、相对移船位移  $\Delta x/h=0.6$  时的工况分析布置加筋条对排布拉伸变形和受力的影响，如图 8 所示。可以看出，排布最大轴向和横向应力均出现在排布顶端，且布置加筋条后排布的轴向应力和横向应力均明显降低。



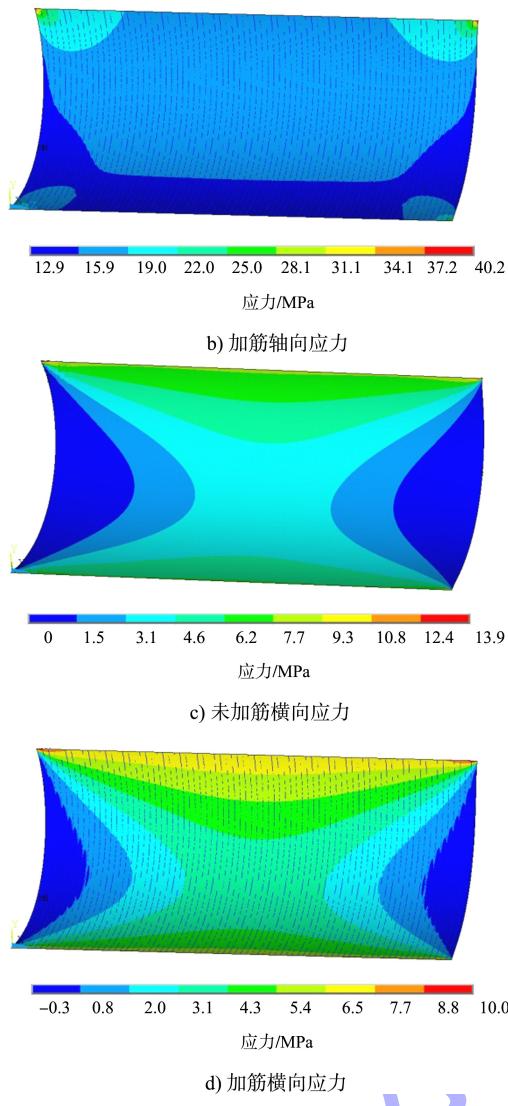


图 8 软体排应力云图

由于排布最大轴向和横向应力均出现在排布顶端, 因此选择排布顶端探讨排布轴向和横向拉力沿排宽的分布规律, 见图 9。由 9a) 可知, 排布顶端轴向拉力呈现出两端大、中间小且趋于稳定值的 U 形分布。布置加筋条后, 排布所受轴向拉力降低。与加筋前相比, 最大轴向拉力降低了 20.77%。由 9b) 可知, 排布顶端横向拉力沿排宽的分布呈现出与轴向拉力类似的 U 形, 但横向拉力在排布两端的分布呈现出一定的不均匀性, 其最大值出现在靠近排布两端的位置。布置加筋条后, 排布所受横向拉力降低。与加筋前相比, 最大横向拉力降低了 19.43%。

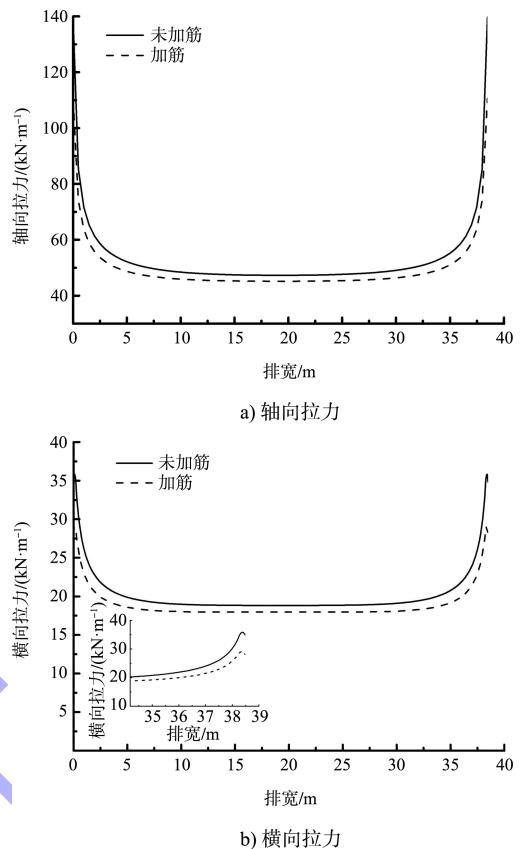


图 9 排布轴向和横向拉力沿排宽分布

#### 4 软体排强度校核

排布的纵向抗拉强度为 42 kN/m, 横向抗拉强度为 52 kN/m; 50 mm 宽加筋条的纵向抗拉强度为 11 kN/m, 70 mm 宽加筋条的纵向抗拉强度为 20 kN/m。按照工程布置, 每米排布上有 3 根加筋条发挥作用, 10 m 以下水深排布的纵向抗拉强度为 75 kN/m, 10 m 以上为 102 kN/m。所有工况均满足排布横向强度要求, 但部分工况在排布两端不能满足纵向强度要求, 需要重新制定排布加筋方案, 以保证排体的强度要求。对于不满足强度要求的工况, 考虑排布轴向应力沿排宽的分布重新制定加筋方案为: 排布两端 1 m 每隔 0.2 m 布置一根 70 mm 的纵向加筋条, 其余位置每隔 0.5 m 布置一根 70 mm 的纵向加筋条。即在排布两端每米排布有 6 根 70 mm 的加筋条发挥作用, 可承受 162 kN 的纵向拉力。重新设计加筋方案的软体排拉力计算结果见表 2。

表 2 加筋后排布所受拉力

工况	水深 $h/m$	相对移船位移 $\Delta x/h$	表面流速 $u_m/(m \cdot s^{-1})$	最大轴向拉力/ ( $kN \cdot m^{-1}$ )	纵向抗拉强度/ ( $kN \cdot m^{-1}$ )	最大横向拉力/ ( $kN \cdot m^{-1}$ )	横向抗拉强度/ ( $kN \cdot m^{-1}$ )
2-1	15	0.6	2.0	105.02	162	26.66	52
2-2	15	0.6	1.9	98.70	162	24.85	52

由表 2 可知, 表面流速 2.0、1.9 m/s 对应的工况 2-1、2-2 排布所受的最大轴向拉力小于排布与加筋条共同作用的设计抗拉强度 162 kN/m, 表明重新设计加筋方案的排布能够适应大流速条件下的软体排加固。

## 5 结论

1) 相对移船位移对排布应力有显著影响。排布最大轴向应力和最大横向应力随相对移船位移的增大而增大。当相对移船位移超过 0.6 时, 排布的应力大幅增加, 不利于铺排施工的安全。建议铺排过程中将相对移船位移控制在 0.6 以内。

2) 水深和表面流速对排布受力有较大影响。排布最大轴向和横向应力均随表面流速和水深的增加而线性增大, 最大轴向应力的变化率大于最大横向应力的变化率, 在大流速和大水深情况下铺排施工时, 应优先考虑排布纵向强度要求。

3) 排布轴向拉力和横向拉力沿排布宽度方向表现为两端大、中间小的特点, 设置加筋条时可考虑在排布沿宽度方向两端加密。加筋条的设置不仅能降低排布的轴向拉力, 同时也能有效地降低排布横向拉力, 进而防止撕排现象的发生。

## 参考文献:

[1] JIA X, LIU H, XU B. An experimental study on dynamic

response of geotextile structures in regular waves[J]. Procedia engineering, 2015, 116(1): 842-848.

- [2] HUANG W, CREED M, CHEN F, et al. Scour around submerged spur dikes with flexible mattress protection[J]. Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering, 2018, 144(5): 1-14.
- [3] 雷雪婷, 耿嘉良, 程铁军, 等. 混凝土联锁块软体排施工中撕排现象的解决方法[J]. 水运工程, 2012(11): 191-193, 202.
- [4] 冯海暴. 长江航道整治工程恶劣工况深水铺排悬链线理论研究及应用[J]. 中国港湾建设, 2014(1): 22-25, 31.
- [5] 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.
- [6] 张为, 李义天, 等. 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.
- [7] 黄召彪, 柴华峰, 李丰华. 深水顺水沉放条件下护底软体排结构设计方法[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(S1): 173-176.
- [8] 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.
- [9] 孙峙华, 杨平, 李镇宇, 等. 基于集中质量法的软体排受力和构型分析[J]. 水运工程, 2015(1): 149-151.
- [10] 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.
- [11] LI Z Y, YANG P, SUN Z H, et al. Numerical analysis of tension force subjected by flexible mattress[J]. Applied mechanics & materials, 2015, 740: 116-119.
- [12] 孙峙华. 航道整治工程中软体排沉排力学特性的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015. (本文编辑 王璁)

## 著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。