



## 单向格栅软体排顺水沉排受力特性研究\*

吴杰<sup>1</sup>, 陈磊<sup>1</sup>, 李铭华<sup>1</sup>, 徐逸文<sup>1</sup>, 卢潇<sup>2</sup>, 诸裕良<sup>2</sup>, 冯兴国<sup>2</sup>

(1. 南京市长江河道管理处, 江苏 南京 210011; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院 江苏 南京 210024)

**摘要:** 单向格栅软体排是一种以单向格栅为受力构件, 自下而上由反滤土工布、单向格栅和混凝土压载块 3 部分组成的新型软体排结构。以长江中下游护底工程为应用场景, 利用有限元法模拟单向格栅软体排在顺水沉排施工条件下的受力特性, 发现随着相对移船位移、水深、水流流速和压载质量的增大, 单向格栅软体排体的最大应力逐渐增大; 随着水流方向与沉排方向夹角的增大, 单向格栅软体排所承受的最大应力逐渐减小。在各种顺水沉排条件下, 铺排船翻板下端处的单向格栅软体排受力最明显, 且软体排承受的最大应力位于翻板下端的软体排宽度方向上距离两侧边缘约 1 m 的位置, 软体排中间部位受力较小。结果表明: 单向格栅软体排所承受的最大应力远低于其抗拉强度, 该新型软体排结构在长江中下游护底工程中具有较好的适应性, 相对于传统的加筋软体排, 单向格栅软体排可减少 20% 以上的排布成本。

**关键词:** 护底工程; 单向格栅; 软体排; 受力特性

**中图分类号:** U 617

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2023)04-0129-08

### Stress characteristics of downstream sinking flexible mattress constructed with unidirectional grille

WU Jie<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>1</sup>, LI Minghua<sup>1</sup>, XU Yiwen<sup>1</sup>, LU Xiao<sup>2</sup>, ZHU Yuliang<sup>2</sup>, FENG Xingguo<sup>2</sup>

(1. Nanjing Yangtze River Management Office, Nanjing 210011, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Flexible mattress constructed with unidirectional grille is a new type of flexible mattress, which is composed of three parts from the bottom to the top: anti-filtering geotextile fabrics, unidirectional grille, and concrete ballast block. Taking the revetment project in the middle and lower reaches of the Yangtze River as the application scenario, the finite-element method is used to simulate the stress characteristics of the unidirectional grille constructed flexible mattress under the condition of downstream sinking. The maximum stress of the unidirectional grille constructed flexible mattress increases with the relative displacement of the ship, the water depth, the water velocity, and weight of ballast block, while the maximum stress decreases with the increase of the angle between the water flow direction and the flexible mattress sinking direction. Under various downstream sinking conditions, the stresses obviously concentrate at the lower end of the flap of the paving ship on the unidirectional grille constructed flexible mattress, and the maximum stress is located at the lower end of the flap and about one meter away from the edges on both sides in the width direction of the flexible mattress, while the middle part of the flexible mattress is less stressed. The results show that the maximum stress of the unidirectional grille constructed flexible mattress is much lower than its tensile strength, and it presents good adaptability in the riverbed protection project of the middle and lower reaches of Yangtze River. Compared with the traditional flexible mattress made of the reinforced belt, the cost of the unidirectional grille constructed flexible mattress can reduce by more than 20%.

**Keywords:** riverbed protection project; unidirectional grille; flexible mattress; stress characteristics

**收稿日期:** 2022-07-15

**\*基金项目:** 江苏省水利厅科技资助项目 (2021014)

**作者简介:** 吴杰 (1977—), 男, 高级工程师, 从事河道整治与水利工程管理工作。

长江中下游岸坡主要由河流相沉积的二元结构组成,土层抗冲能力较弱。长江中下游干流河岸除经受江流冲刷外,还频繁经受潮流和船行波侵蚀,岸坡易受冲蚀变陡,甚至崩塌<sup>[1]</sup>,严重影响河势稳定和防洪安全,因此每年在沿岸开展大量护岸工程。

护岸工程分为水上护坡和水下护脚两部分,其中水下护脚是整个护岸工程的重点<sup>[2-3]</sup>。随着生态环保要求的提高,块石开采被严格控制,以致其价格飞涨且不易采购,因此长江中下游采用传统的抛石护脚日益困难,以软体排为代表的薄层护脚结构应用越来越广泛。长江中下游采用的软体排主要有砂肋软体排、系混凝土块软体排、混凝土铰链排等,相对块石护脚可节省大量石料,并适应一定程度的河床变形,其工程应用取得了较好的效果<sup>[4]</sup>。但现有的软体排结构须依赖大型专用船舶进行施工,设备造价高昂,对施工人员要求高,且软体排质量难以保障<sup>[5]</sup>。如砂肋软体排和系混凝土软体排的排布施工时易出现撕排<sup>[6]</sup>,且砂肋软体排的充砂管袋容易被后续的抛石损伤<sup>[7]</sup>,混凝土铰链排不宜用于较陡岸坡,在地形急剧变化时铰链排自我调整受限,易出现排体破坏,且金属铰链锈蚀断裂后容易出现排体滑坠等<sup>[8]</sup>,进而影响护岸工程防护效果。因此,迫切需求一种施工方便、质量易控、同时具备良好整体性、柔性、耐久性和适应地形复杂变化的新型软体排结构。

单向格栅是一种纵肋方向抗拉强度较高的土工材料,具有良好的柔韧性和耐久性,作为加筋材料被广泛应用于路基和护岸工程以提高其稳定性<sup>[9]</sup>。本项目以高强度单向格栅形成排面,上设混凝土压载块,下设反滤土工布的新型软体排结构,用高强度单向格栅提高软体排整体性、柔性和对复杂地形的适应性,降低对专业施工船舶要求。并以长江中下游护岸工程为应用场景,采用有限元法建模计算单向格栅软体排在不同顺水沉排工况下的受力特性,成果可为单向格栅软体排的工程应用提供参考。

## 1 单向格栅软体排的结构设计及建模

### 1.1 结构设计

单向格栅软体排自上而下分别是混凝土压载块、高强度单向格栅和土工布,见图1,其中单向格栅作为排体的主要受力构件承受各种荷载作用;土工布起反滤作用,抵抗水流对河岸的冲刷;混凝土压载块起抗水流掀动保持排体稳定的作用。混凝土压载块通过具有自锁功能的高强度尼龙绑扎带固定在单向格栅横肋上,通过连体塑料卡钉将反滤土工布固定在横肋和纵肋节点处以形成软体排的整体结构。单向格栅软体排用于河道护底工程时,纵肋按照垂直岸线向河道中心延伸的方向布置,横肋按平行于岸线的方向布置。采用的单向格栅为聚丙烯材质,经塑化挤出板材、冲孔、加热、拉伸而成,其纵向抗拉强度 260 kN/m,单向格栅的横肋宽 12 mm,横肋间隔 600 mm,纵肋宽 3 mm,每米横肋上分布 54 根纵肋。

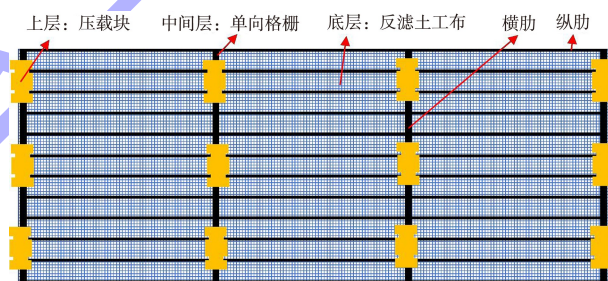


图1 单向格栅软体排的结构布置

### 1.2 模型建立

采用 Workbench 软件对单向格栅软体排进行建模分析,受力构件单向格栅和反滤土工布均为聚丙烯材质,在建立其简化模型中,为将土工布、单向格栅和混凝土压载块视为整体进行建模,软体排等效厚度设置为 50 mm,宽度为 20 m,混凝土压载块质量按照单向格栅软体排的自身重力进行加载。采用概念建模方式,首先计算出不同工况时单向格栅软体排的边界条件;其次根据概念建模的要求,将边界条件的坐标数据保存为 txt 文件;再次根据操作流程将边界条件的坐标数据导入软件形成模型框架。聚丙烯单向格栅为该新型

软体排的主要受力构件, 在有限元模型中采用聚丙烯单向格栅的材料参数进行建模, 见表 1。

表 1 聚丙烯单向格栅软体排的材料性能参数				
密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	剪切模量/ MPa
2 500	0.42	1.1	33	387

单向格栅软体排的水下质量为排体自身质量去除浮力后的质量, 动水环境中水流对软体排的作用力  $\Sigma F$  按照公式(1)的动量方程求得, 横向分量  $D$  和法向分量  $F$  分别见公式(2)(3)。

$$\Sigma F=\rho A\beta v^2$$
(1)

$$D=\rho A\beta v^2\sin\theta^2$$
(2)

$$F=\rho A\beta v^2\cos\theta^2$$
(3)

式中:  $\rho$  为水的密度, 取  $1\,000\text{ kg/m}^3$ ;  $A$  为过水断面的面积;  $\beta$  为动量校正系数;  $v$  为水流断面平均流速。沉排时单向格栅软体排的排头和排尾不随沉排船移动, 两端采用固定约束。

2 单向格栅软体排沉排过程的受力分析

2.1 工况组合分析

以长江中下游护底工程为应用场景, 依托黑沙洲航道整治工程资料<sup>[10]</sup>, 通过有限元模拟单向格栅软体排在沉排施工时的受力特性。实测资料显示, 黑沙洲河段枯水季该水域不同部位水流流速分布在  $0.70\sim2.06\text{ m/s}$ , 流域水深分布在  $8.5\sim26.0\text{ m}$ , 为分析相对移船位移、水流流速、水深、压载块质量、水流与沉排方向夹角等因素对单向格栅软体排力学特性的影响, 按照表 2 所示条件模拟单向格栅软体排的应力分布。

表 2 有限元模拟的工况条件		
组次	设定条件	变量
1		0.2
2	$h=15\text{ m}, v=2\text{ m/s},$ $G=110\text{ kg/m}^2, \theta=0^\circ$	0.4
3		0.6
4		0.8
5	$h=15\text{ m}, G=110\text{ kg/m}^2,$ $\theta=0^\circ, \Delta x/h=0.4$	1.0
6		1.5
7		2.0

续表1

组次	设定条件	变量
8	$v=2\text{ m/s}, G=110\text{ kg/m}^2,$ $\theta=0^\circ, \Delta x/h=0.4$	10
9		15
10		20
11	$v=2\text{ m/s}, h=15\text{ m},$ $\theta=0^\circ, \Delta x/h=0.4$	80
12		110
13		140
14	$v=2\text{ m/s}, G=110\text{ kg/m}^2,$ $h=15\text{ m}, \Delta x/h=0.4$	0
15		15
16		30

注:  $h$  为水深;  $v$  为水流表面流速;  $G$  为软体排压载质量;  $\theta$  为水流方向与沉排方向夹角; 相对移船位移  $\Delta x/h$  表示单位水深的移船距离,  $\theta=0^\circ$  表示顺水沉排。

2.2 相对移船位移对排体应力分布的影响

由图 2 可知, 在各种相对移船位移条件下, 单向格栅软体排均在铺排船的翻板下端受力最明显, 水下部分的软体排受力相对较小, 此结果与文献报道相符。袁立莎等<sup>[11]</sup>采用有限元软件 Algor 模拟计算了通州沙整治工程中各种工况下连锁块软体排的应力分布, 也发现在铺排船的翻板下端受力最大。此外, 最大应力所对应网格的单向格栅软体排宽度方向的应力分布见图 3, 随着相对移船位移的增加, 单向格栅软体排所承受的最大应力明显增加, 当相对移船位移从 0.6 增加至 0.8 时, 单向格栅软体排所承受的最大应力从不到  $50\text{ kN/m}$  急剧增加至超过  $110\text{ kN/m}$ , 表明相对移船位移是影响单向格栅软体排应力分布的重要参数, 在单向格栅软体排沉排施工时, 应严格控制铺排船的移船距离以避免软体排受力过大而造成撕排。进一步观察发现最大应力均位于距离软体排宽度边缘约  $1\text{ m}$  的排体结构上, 这与刘林双<sup>[12]</sup>报道的长江中下游河道护底沉排工程中 D 型块软体的撕排现象吻合。在相对移船位移为 0.8 的顺水沉排条件下, 单向格栅软体排的最大应力仅为单向格栅抗拉强度 ( $260\text{ kN/m}$ ) 的  $2/5$ , 表明高强度的单向格栅能够满足软体排的强度要求, 单向格栅软体排在长江中下游护底工程中具有适用性。

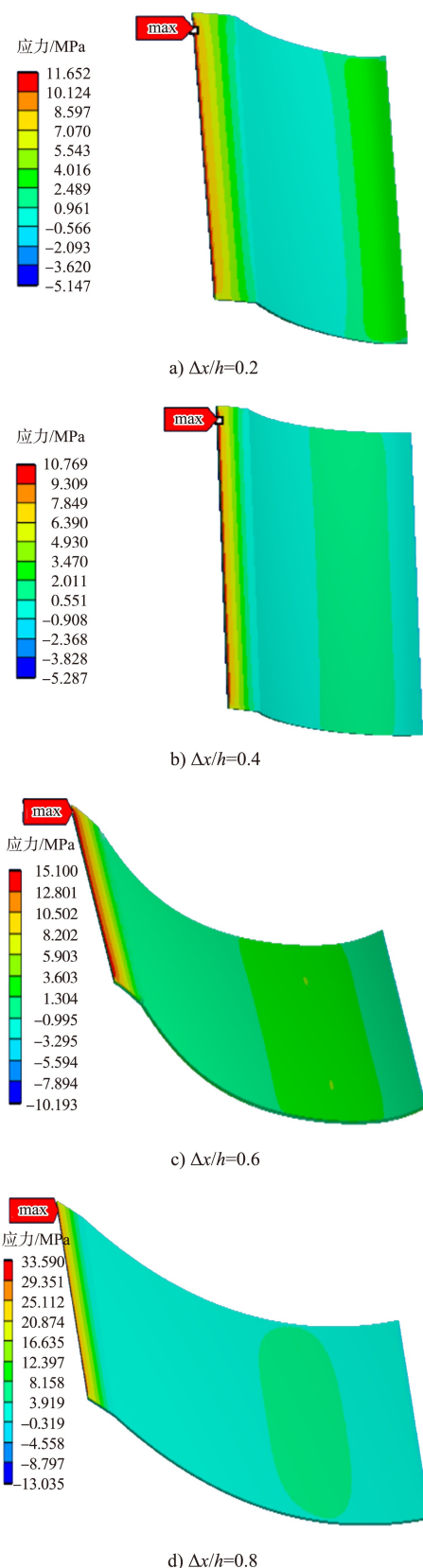


图2 不同相对移船位移时单向格栅软体排的应力云图

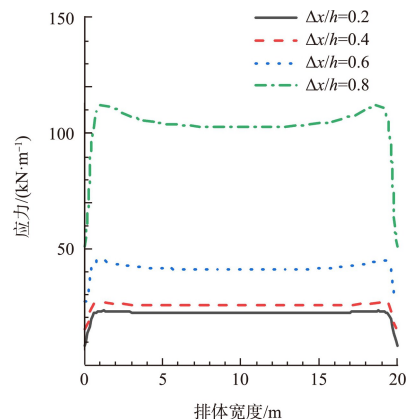
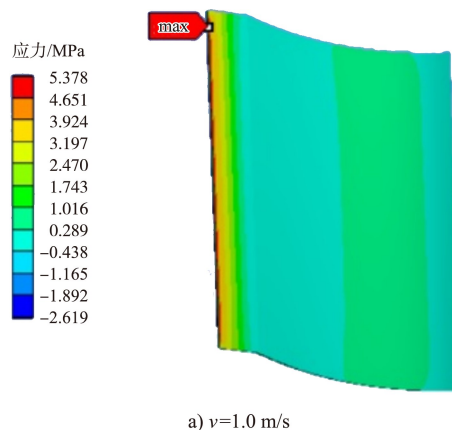


图3 不同相对移船位移时单向格栅软体排宽度方向应力分布

### 2.3 水流流速对排体应力分布的影响

不同流速下单向格栅软体排的应力分布见图4、5, 随水流速度的增加, 单向格栅软体排所承受的最大应力逐步增加, 当水流速度从 1.0 m/s 增加到 2.0 m/s 时, 单向格栅软体排所承受的最大应力从 19 kN/m 提高至 28 kN/m。与单向格栅的抗拉强度 (260 kN/m) 相比, 水流流速增加所引起的单向格栅应力增加值较小, 且各种水流流速条件下单向格栅软体排所承受的最大应力值仅为单向格栅抗拉强度的 1/10, 表明在长江中下游的水流条件下单向格栅软体排具有较好的适用性。由图 5 可知, 随流速的增加, 软体排上的最大受力趋势从排体宽度边缘向中心移动。

a)  $v=1.0$  m/s



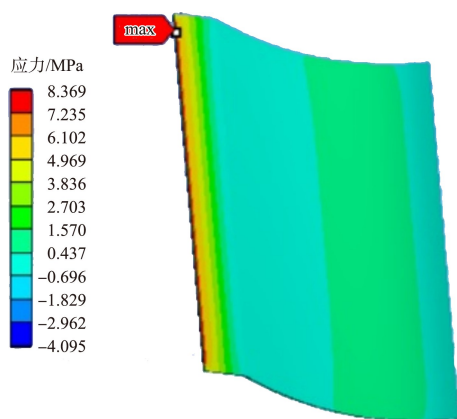
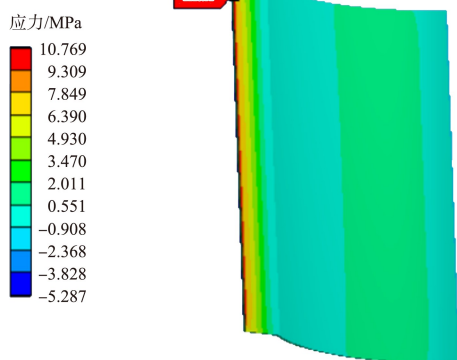
b)  $v=1.5$  m/sc)  $v=2.0$  m/s

图4 不同水流流速时单向格栅软体排应力云图

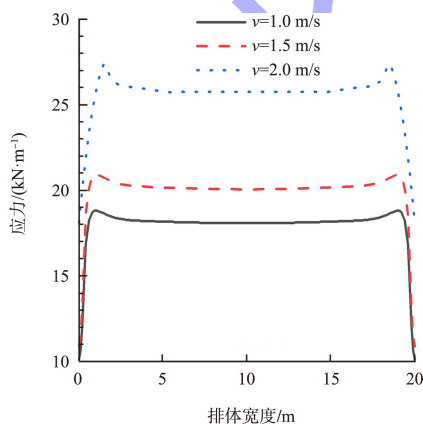


图5 不同水流流速时单向格栅软体排宽度方向应力分布

## 2.4 水深对排体应力分布的影响

不同水深条件下单向格栅软体排的应力分布见图6、7。随着水深深度的增加,单向格栅软体排所承受的最大应力也逐步增加,当水深深度为10、15和20 m时,单向格栅软体排的最大应力分

别为25、28和35 kN/m,随着水深深度的增加,软体排结构所承受的最大应力大幅增加,且水深越深,最大应力值增加越明显。即使在最大水深20 m条件下单向格栅软体排所承受的最大应力也不足单向格栅抗拉强度(260 kN/m)的1/7,表明采用高强度单向格栅为受力构件的新型软体排结构在长江中下游的水深条件下满足承载要求,具有较高的可靠性。

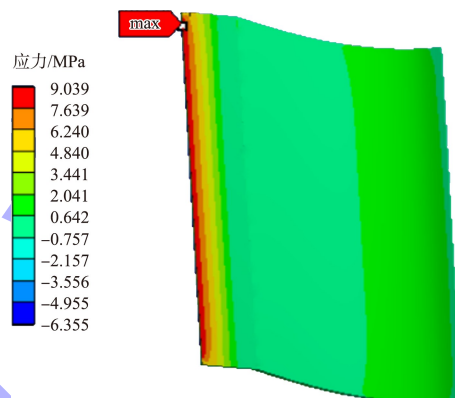
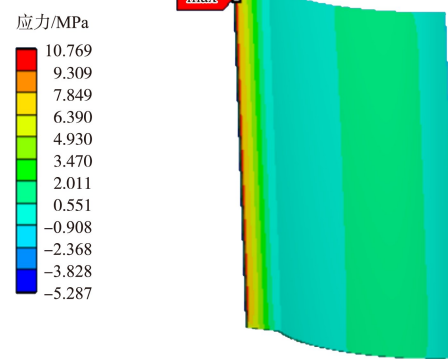
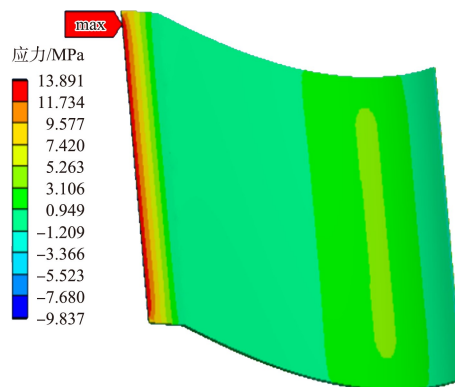
a)  $h=10$  mb)  $h=15$  mc)  $h=20$  m

图6 不同水深时单向格栅软体排的应力云图

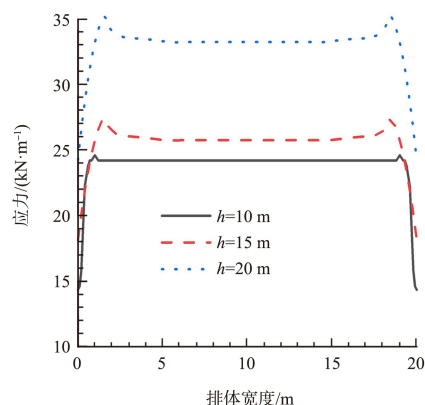


图7 不同水深时单向格栅软体排宽度方向应力分布

## 2.5 压载质量对排体应力分布的影响

单向格栅软体排上不同压载质量时的应力分布见图8、9。随着单位面积上压载质量的增加,单向格栅软体排在顺水沉排施工时所承受的最大应力有所提高,当软体排上的压载质量从  $80 \text{ kg/m}^2$  逐步提高到  $110$  和  $140 \text{ kg/m}^2$  时,单向格栅软体排所承受的最大应力相应地从约  $24 \text{ kN/m}$  逐步增加至  $27$  和  $31 \text{ kN/m}$ ,表明单向格栅软体排所承受的最大应力随着压载质量的增加几乎呈线性提高。即使是在压载质量最大的  $140 \text{ kN/m}$  条件下,单向格栅软体排所承受的最大应力也不足单向格栅抗拉强度 ( $260 \text{ kN/m}$ ) 的  $1/8$ ,表明以单向格栅为受力构件的软体排结构可满足长江中下游的护底工程的承载要求。

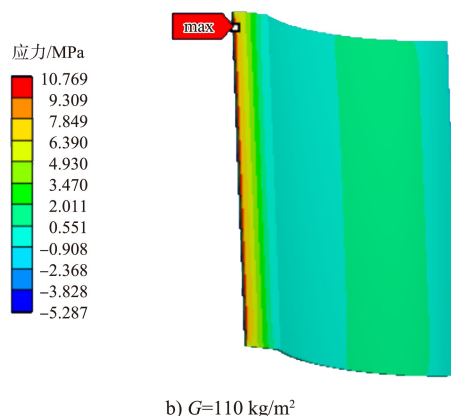
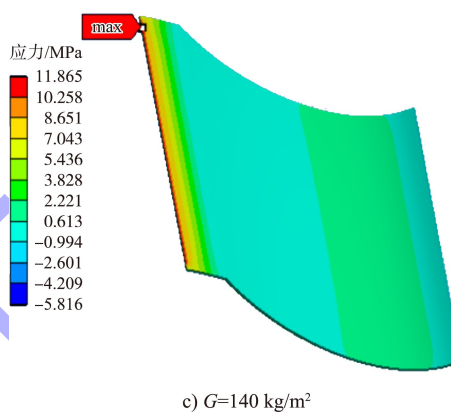
b)  $G=110 \text{ kg/m}^2$ c)  $G=140 \text{ kg/m}^2$ 

图8 不同压载质量时单向格栅软体排的应力云图

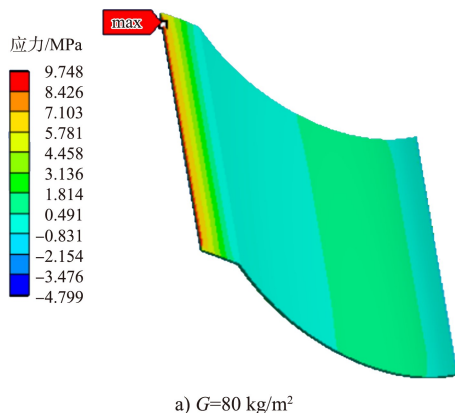
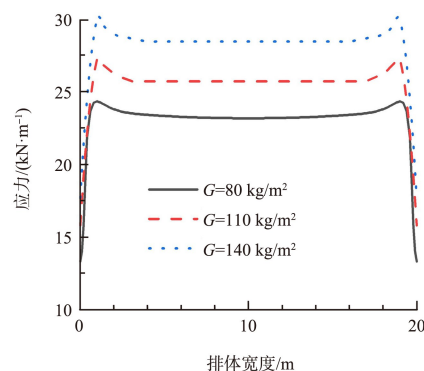
a)  $G=80 \text{ kg/m}^2$ 

图9 不同压载质量时单向格栅软体排宽度方向应力分布

## 2.6 水流方向与沉排方向夹角的影响

水流方向和沉排方向不同时,单向格栅软体排所承受的应力分布见图10、11。与顺水流沉排 ( $\theta=0^\circ$ ) 相比,当与水流方向有一定夹角的沉排施工时单向格栅软体排所承受的最大应力有所降低,

在水流方向与沉排方向夹角为  $30^\circ$  时,单向格栅软体排所承受的最大应力为  $22 \text{ kN/m}$ , 约占顺水流沉排时所承受最大应力 ( $28 \text{ kN/m}$ ) 的  $80\%$ 。此外,相对于单向格栅的抗拉强度,水流方向与沉排方向夹角所引起的软体排最大应力变化值较小,不影响单向格栅软体排的稳定性。

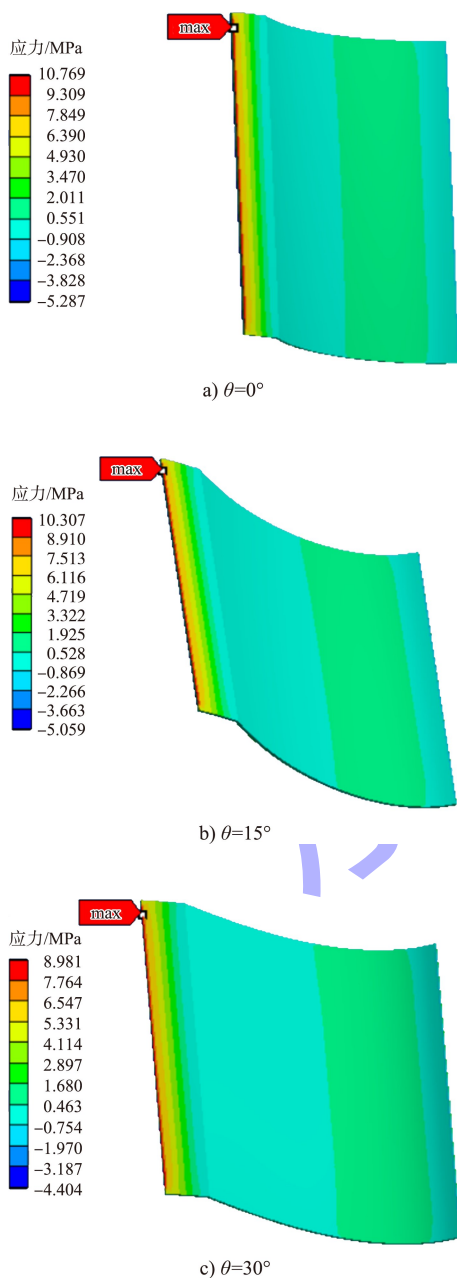


图 10 不同水流与排体夹角时单向格栅软体排的应力云图

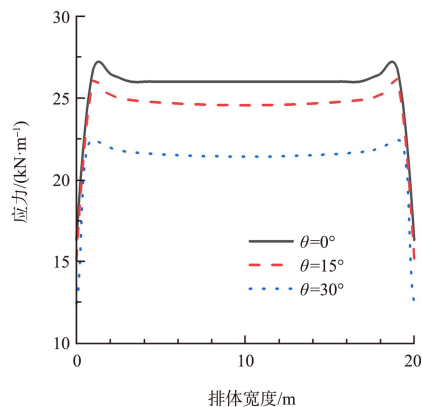


图 11 不同水流与排体夹角时单向格栅软体排宽度方向应力分布

## 2.7 经济性分析

压载质量需根据护岸工程要求而定,分析经济性时不考虑压载块的费用。单向格栅软体排以单向格栅为受力构件,土工布和压载块体通过绑扎带固定在单向格栅纵肋与横肋的节点处。通常反滤土工布价格集中在  $0.6 \sim 2.0 \text{ 元/m}^2$  之间,单向格栅价格集中在  $1.5 \sim 3.5 \text{ 元/m}^2$  之间,考虑单向格栅软体排的承载要求高,土工布和单向格栅按照较高的  $2.0 \text{ 元/m}^2$  和  $3.5 \text{ 元/m}^2$  计算,单向格栅与土工布的固定所需材料和人工费按照  $1.5 \text{ 元/m}^2$  计算,单向格栅软体排的成本在  $7.0 \text{ 元/m}^2$  左右。传统软体排是在反滤土工布上按设计密度缝制加筋带,以加筋带为主要受力构件,价格集中在  $9.0 \sim 16.0 \text{ 元/m}^2$ ,按照较低的  $9.0 \text{ 元/m}^2$  计算,单向格栅软体排仍可节约  $2.0 \text{ 元/m}^2$ ,排布成本降低超过  $20\%$ 。

## 3 结论

1) 单向格栅软体排是一种以高强度单向格栅为受力构件,自下而上由反滤土工布、单向格栅、压载块体 3 部分构成,通过具有自锁功能的高强度尼龙绑扎带将压载块固定在单向格栅横肋上,通过连体塑料卡钉将反滤土工布固定在横肋和纵肋节点处。

2) 随着相对移船位移、水流流速、水深、压载质量的增加,单向格栅软体排所承受的最大应力明显增加;随着水流流速与沉排方向夹角的增大,单向格栅软体排所承受的最大应力逐渐降低,其中相对移船位移对单向格栅软体排的应力分布影响最为明显,沉排施工时应严格控制相对移船位移。

3) 顺水沉排时单向格栅软体排在铺排船的翻板下端受力最为明显,最大应力位于翻板下端软体排宽度方向边缘约 1 m 处,单向格栅软体排宽度方向上中间部分的应力较小。

4) 以抗拉强度为 260 kN/m 的单向格栅为受力构件的新型软体排,在各种沉排工况下均具备足够的富余强度,单向格栅软体排结构在长江中下游护底工程中具有良好的适应性。

5) 与传统缝制加筋带的软体排相比,单向格栅软体排的排布成本每平方米可降低 2.0 元以上,排布成本下降超过 20%。

#### 参考文献:

- [1] 黄翔.同马大堤江调圩砼铰链排护岸工程实施及效果分析[J].江淮水利科技,2020,86(2):31-32.
- [2] 吕文婷,赵进.浅析航道整治护岸工程施工工艺及质量

(上接第 77 页)

#### 参考文献:

- [1] 吕楠.董家口港矿石码头竞争战略研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2018.
- [2] 周树高,李坤鹏.超大型集装箱船进出受限港池口门通航条件分析[J].水运工程,2021(10):119-124.
- [3] 唐存宝,刘敬贤,唐强荣,等.40 万 t 级船舶进董家口港关键技术指标控制[J].船海工程,2018,47(1):172-175.
- [4] 唐存宝,张亮,刘敬贤,等.40 万 t 船舶乘潮进董家口港水深适应性[J].中国航海,2017,40(2):60-64.
- [5] 吴炜煌.港口水域 LNG 船舶航行安全领域及交通组织研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.
- [6] 刘晗.基于有限元的油船碰撞后果及防控建议研究[D].大连:大连海事大学,2019.
- [7] 刘帅臣.沿海航道乘潮通航饱和度研究[D].大连:大

连海事大学,2019.

- [3] 长江科学院.长江中下游平顺护岸工程设计技术要求[S].长江水利委员会,1997.
- [4] 长江水利委员会.长江中下游护岸工程 65 年[J].水利水电快报,2017,38(11):1-5.
- [5] 臧英平,李涛章,陈槐,等.混凝土铰链排护岸技术应用研究[M].河海大学出版社,2019.
- [6] 齐爱民,李佩超,张文德.黄河防洪工程土工织物沉排坝运行探讨[J].水利建设与管理,2015,35(7):52-53,47.
- [7] 叶海桃.D 型系混凝土块软体排施工中撕排原因分析及处理措施[J].中国水运(上半月),2015(4):71-73.
- [8] 刘同宦,李振青,胡胜刚.混凝土铰链排护岸应力变化特性及适应条件分析[J].水利水电快报,2017,38(11):75-78.
- [9] 万亮,杨和平,倪啸,等.单向土工格栅加筋膨胀土的拉拔力计算公式研究[J].公路交通科技,2020,37(1):32-41.
- [10] 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.
- [11] 袁立莎,马燕.联锁块软体排深水沉排受力的线性有限元分析[J].水运工程,2013(3):11-14,55.
- [12] 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.

(本文编辑 赵娟)

连海事大学,2019.

- [8] 王静举.港区通航规则选取对通航效率的影响研究[D].大连:大连海事大学,2020.
- [9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.海港总体设计规范:JTS 165—2013[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [10] 赵有明,戴冉.基于实船资料的大型船舶拖轮配置研究[J].水运工程,2015(7):47-50.
- [11] 黄仕唯,王志明,吴善刚.嘉兴乍浦港潮水急涨时段靠泊时间窗口分析[J].中国航海,2020,43(4):59-64,77.
- [12] 范庆波.多因素约束下受限航道船舶智能交通组织研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.
- [13] 闫化然,薛松辉,熊华,等.大型船舶进出洋山港四期码头交通组织[J].中国航海,2018,41(4):53-56.

(本文编辑 王璁)