



# 新型压载块水动力学特性的 三维精细数值模拟<sup>\*</sup>

王欣霖<sup>1</sup>, 耿嘉良<sup>1</sup>, 李冬<sup>1</sup>, 黄卫<sup>2</sup>, 肖衍<sup>3</sup>

(1. 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430040;

2. 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 3. 长江宜昌航道工程局, 湖北 宜昌 443003)

**摘要:** 针对荆江航道整治工程中使用的仿沙波软体排中压载块质量大、经济性差的问题, 在普通型压载块的基础上改进形成一种新型压载块。为分析对比 2 种压载块的水动力学特性, 采用三维精细数值模拟的方法, 分别从主流方向流速、剪切流速及湍动能 3 方面分析 2 种压载块的水动力学特性, 得出新型压载块在节约混凝土用量 19.8% 的同时仍呈现出较优的水动力学特性。研究成果可为软体排的压载块设计提供支撑。

**关键词:** 软体排; 压载块; 数值模拟; 水流结构

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0082-05

## Three-dimensional precise numerical simulation of hydrodynamic characteristics of new ballast block

WANG Xinlin<sup>1</sup>, GENG Jialiang<sup>1</sup>, LI Dong<sup>1</sup>, HUANG Wei<sup>2</sup>, XIAO Kan<sup>3</sup>

(1. Changjiang Waterway Survey and Design Institute (Wuhan) Co., Ltd, Wuhan 430040, China;

2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

3. Changjiang Yichang Waterway Engineering Bureau, Yichang 443003, China)

**Abstract:** In view of the problems of large weight and poor economy of ballast blocks in the sand-wave imitating soft mattress used in Jingjiang waterway regulation project, this paper develops a new type of ballast block on the basis of the ordinary ballast block. To analyze and compare hydrodynamic characteristics of the two kinds of ballast blocks, this paper uses a three-dimensional precise numerical simulation method to analyze the hydrodynamic characteristics of the two kinds of ballast blocks from three aspects of mainstream direction velocity, shear velocity, and turbulent kinetic energy, respectively. The paper concludes that the new ballast block still presents better hydrodynamic characteristics while saving 19.8% of concrete consumption. The research results can provide support for the ballast block design of the soft mattress.

**Keywords:** soft mattress; ballast block; numerical simulation; flow structure

软体排结构主要由排垫和压载体构成<sup>[1-2]</sup>。压载体根据压载的材料又可分为块石、砂袋、混凝土 3 类<sup>[3-8]</sup>, 其中混凝土压载体因形状多样、便于制模、施工效率高而应用较多。

常用混凝土压载体按照形状的不同可分为 X 形排<sup>[9-10]</sup>压载体、D 形排<sup>[11-12]</sup>压载体、单元块<sup>[13-14]</sup>等, 这些压载体大多为混凝土块体, 平面较规则, 能依靠自身重力压紧排布, 使之紧贴河床和滩面,

收稿日期: 2023-03-03

\*基金项目: 国家自然科学基金项目 (11502032)

作者简介: 王欣霖 (1987—), 女, 硕士, 工程师, 从事港航工程结构设计。

起到保沙作用。与天然滩面相比, 混凝土压载块体顶面相对较平整。

本文研究的普通型压载块模仿天然沙波形态, 与排垫相结合形成一种仿沙波软体排结构, 该结构在长江中游荆江河段航道整治工程的昌门溪—熊家洲段进行了试验性应用<sup>[15]</sup>, 根据应用成果, 普通型压载块和排垫组成的仿沙波软体排结构铺设后类似于沙波起伏, 在流速小于 1.0 m/s 时, 能促使泥沙在波谷淤积; 在流速介于 1.0~1.5 m/s 时能保持稳定, 而当流速大于 1.5 m/s 时, 需要在结构轴线和边缘设置压载结构。

由于普通型压载块为混凝土实心构件, 质量较大且经济性稍差。本次研究在普通型压载块的基础上, 提出一种改进型压载块, 在保留普通型压载块波峰的同时于波谷上开孔, 节约混凝土用量 19.8%。为了研究 2 种形式压载块的水力特性, 本文采用三维精细数值模拟的方法, 主要从主流方向流速、剪切流速及湍动能 3 方面模拟 2 种不同压载块的水流结构, 对比不同压载块水流结构的差异。

## 1 数值模型建立与验证

### 1.1 数值模型建立

根据研究场景, 采用完整三维水动力学模型 Flow 3D 进行模拟。Flow 3D 采用基于结构化矩形网格的 Favor 方法及真实的 3 步 Tru-VOF, 控制方程中考虑了体积和面积参数。模型采用完整三维水动力学控制方程, 湍流封闭模式为大涡模拟。建模时, 对沙丘区域采用局部网格加密技术, 实现对沙丘三维地形的精确捕捉。

### 1.2 数值模型验证

数学模型采用单个二维对称圆弧形沙丘、简化三角形二维沙丘(Attar and Li 2015)等试验资料进行率定和验证(图 1、2)。结果表明模型具有较高的精度, 能用于三维沙丘水流结构的研究。

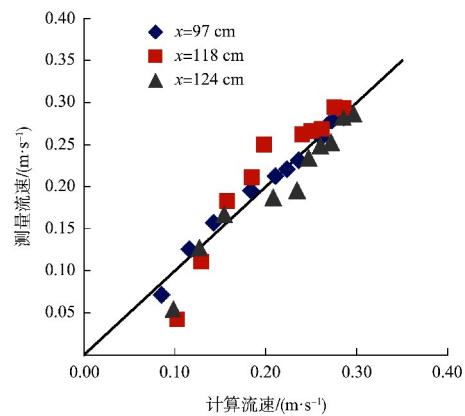


图 1 简化三角形二维沙丘计算流速和测量流速对比

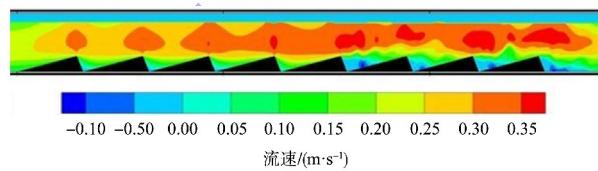


图 2 简化三角形二维沙丘流速分布

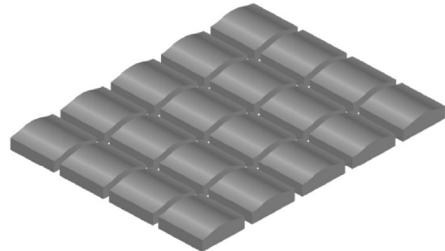
## 2 数值模型计算结果分析

### 2.1 数值模型

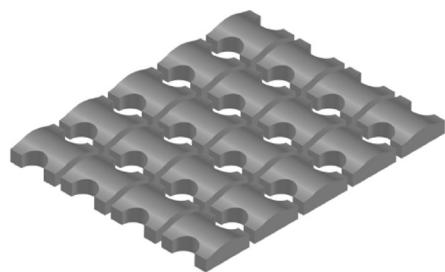
普通型单个压载块的几何尺寸为长 40 cm、宽 40 cm、高 10~14 cm; 改进型压载块在普通型基础上在两侧波谷处开孔, 开孔半径 10 cm。

通过对 2 种不同压载块的水流结构模拟, 根据水流结构初步判断压载块结构在固滩、促淤以及消能等方面的效果。模型以基于原型河道水流条件概化的典型水流单元为研究对象, 水流单元  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的概化范围分别为  $-2.0 \sim 4.0$  m、 $0 \sim 1.3$  m、 $0 \sim 12.0$  m。进口给定流速和水位, 出口给定水位, 河道两岸采用对称边界, 底部为固壁边界条件。模拟时采用  $(5 \times 4)$  个压载块排列, 为了尽可能精确表现结构物形状, 对压载块采用局部加密网格处理, 最小网格尺寸为 0.02 m, 计算网格总数为 49.92 万个。压载块结构布置见图 3。

根据设计工况概化 2 种水流条件, 分别代表洪季和枯季。洪季水深 11 m, 流速 1.5 m/s; 枯季水深 3 m, 流速 0.8 m/s。通过对  $y=0.65$  m 纵剖面模拟结果分析, 对比 2 种压载块附近的水流结构差异。



a) 普通型

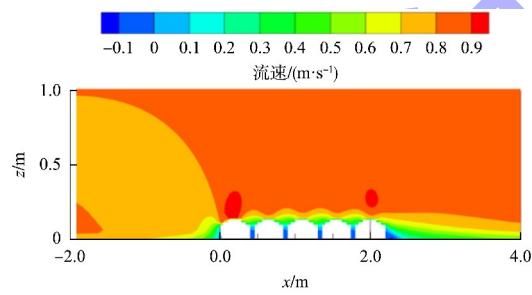


b) 改进型

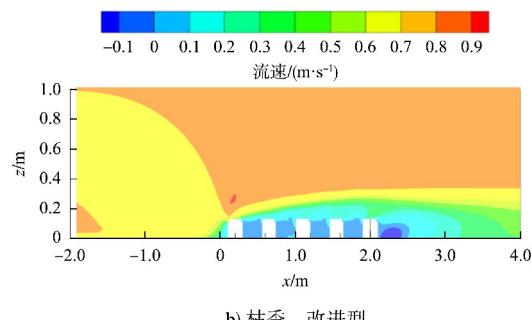
图 3 压载块模拟

## 2.2 主流方向流速分析

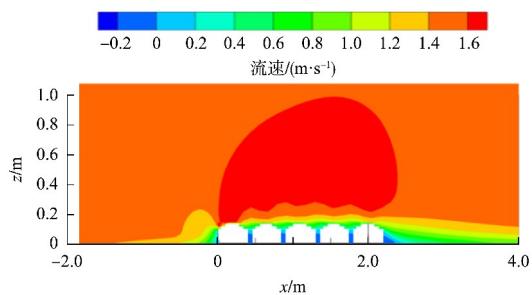
通过主流方向流速分析 2 种块体结构对局部河床主流方向上水动力条件的影响程度, 定性认识不同工况固滩的效果。图 4 为不同水流条件和压载块结构下的主流方向流速对比。



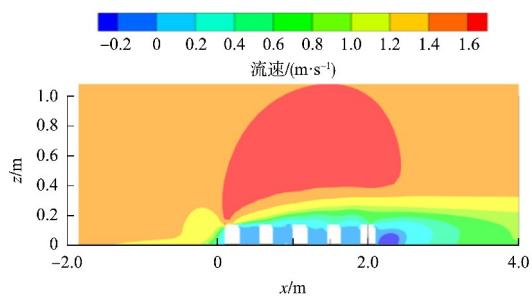
a) 枯季, 普通型



b) 枯季, 改进型



c) 洪季, 普通型

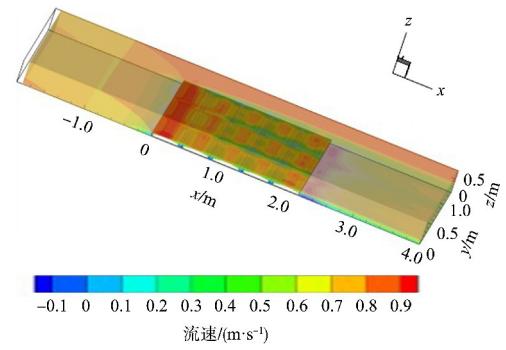


d) 洪季, 改进型

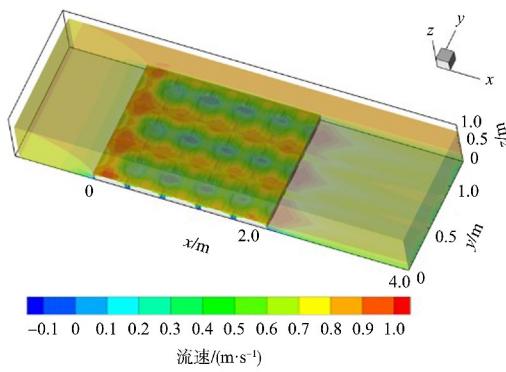
图 4 枯洪季水流条件下 2 种压载块主流方向流速对比

图 5a) 为枯季水流条件下普通型压载块主流方向流速分布三维图。由图可知, 压载块波峰之间出现了较小流速分布区域, 并且在主流方向块体间还出现了负流速, 同时在块体上、下游均出现了流速减缓区域。表明压载块的存在改变了流速分布, 在块体之间及其上下游区域由于流速减小, 能够保护床面不被冲刷, 从而达到固滩的目的。

图 5b) 为枯季水流条件下改进型压载块主流方向流速分布三维图。由图可知, 在压载块开孔区域以及排下游出现流速较小的分布区域, 在两排排体的布置缝位置出现较大的流速分布, 表明压载块的存在改变了流速分布, 使得水流呈现出较强的三维特性。同普通型压载块相比, 改进型压载块流速在空间分布发生了较大改变。普通型压载块的较大流速分布在波峰位置, 横向沙波块间的流速较小; 而改进型压载块波峰流速明显减小, 较大的流速分布在横向块体之间。此外, 改进型压载块下开孔所在的位置还出现了较小流速。



a) 普通型

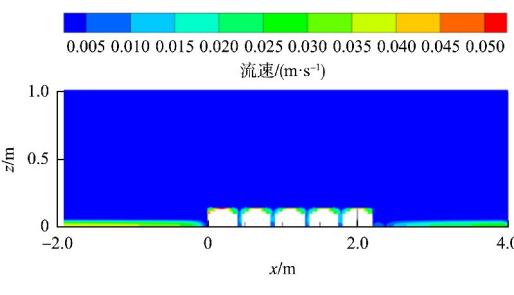


b) 改进型

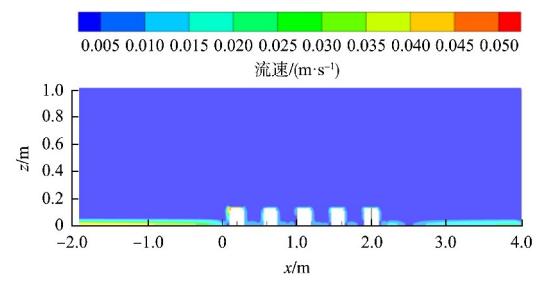
图 5 枯季水流条件下 2 种压载块主流方向三维流速分布

### 2.3 剪切流速分析

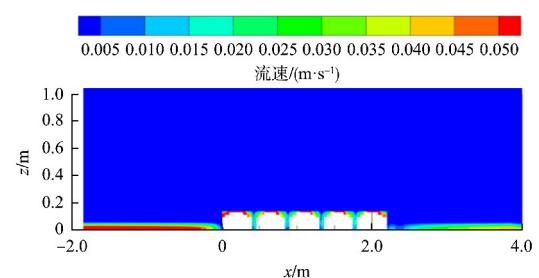
通过剪切流速分析 2 种块体结构对局部河床在水流剪切拖拽方面的改变作用, 剪切流速对床面泥沙的起动与输移有着关键影响, 当剪切流速增加时容易导致河床冲刷, 反之当剪切流速降低时则有利于河床淤积。图 6 为枯洪季水流条件下 2 种压载块剪切流速对比, 从剪切流速分布来看, 2 种压载块及其上下游区域的剪切流速差别均较小。普通型压载块间的剪切流速非常小; 改进型压载块除波峰剪切流速减小外, 其余区域及下游剪切流速增加。两者各有特点, 差别不大。



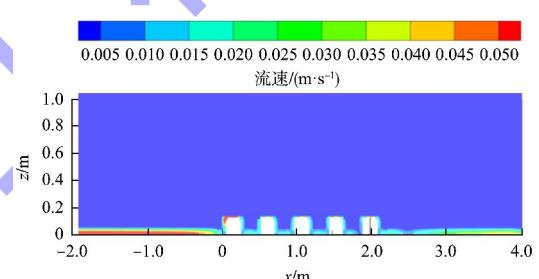
a) 枯季, 普通型



b) 枯季, 改进型



c) 洪季, 普通型



d) 洪季, 改进型

图 6 枯洪季水流条件下 2 种压载块剪切流速对比

### 2.4 湍动能分析

通过湍动能参数分析不同块体结构对局部河床水能消耗方面的作用大小, 湍动能数值较大时表明块体消能效果好, 有利于河床稳定。图 7 为枯洪季水流条件下 2 种压载块湍动能对比。从湍动能分布来看, 2 种压载块的湍动能主要位于压载块波峰及下游区域。普通型压载块工况下湍动能最大值( $<0.02 \text{ J/kg}$ )出现在第 1 个压载块的波峰附近, 改进型压载块工况下湍动能最大值( $>0.05 \text{ J/kg}$ )出现在压载块下游且沿程呈增加趋势。总的来说, 改进型压载块的消能效果优于普通型压载块, 尤其对块体下游床面的水流能量有较强消耗作用。

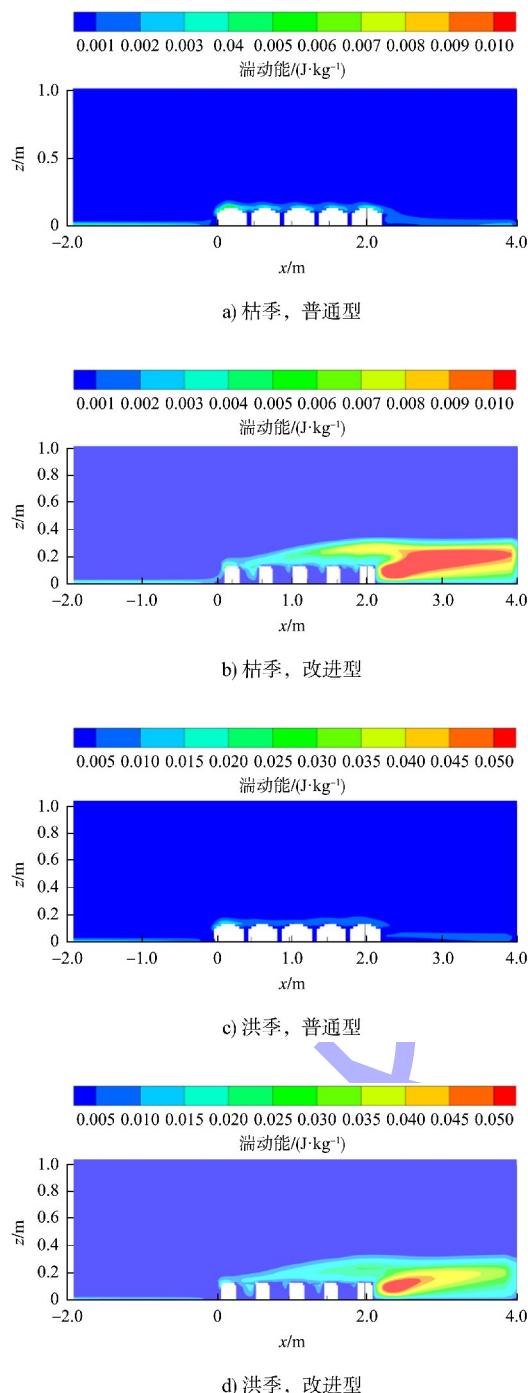


图 7 枯洪季水流条件下 2 种压载块湍动能对比

### 3 结论

1) 铺设 2 种压载块后, 均能改变其附近的流速分布, 改进型压载块流速分布较普通型压载块发生了较大改变, 水流呈现出较强的三维特性。

2) 改进型压载块对局部河床主流方向上水动力条件的影响程度明显优于普通型压载块, 改进型压载块和普通型压载块对局部河床在水流剪切拖拽方面的改变作用差别不大, 改进型压载块对

局部河床消能效果优于普通型压载块。

3) 总体而言, 改进型压载块较普通型压载块更优, 下一阶段将具体研究改进后压载块和排垫结合的仿沙波软体排结构的适用条件。

### 参考文献:

- [1] 曹棉. 软体排在长江航道整治工程中的应用[J]. 水运工程, 2004(9): 70-73.
- [2] 朱宪武. 混凝土联锁块软体排的受力分析与计算[J]. 水运工程, 2000(12): 21-26.
- [3] 黄建宇, 张璠, 曾涛, 等. 长江中游航道软体排压载体布置型式优化试验研究[J]. 水道港口, 2020, 41 (3): 309-317.
- [4] 司国良. 充砂管袋软体排在长江崩岸治理中的应用[J]. 中国水利, 2009(12): 39-41.
- [5] 陈学良, 张景明. 土工织物在长江口深水航道治理工程中的应用[J]. 水运工程, 2000(12): 48-52.
- [6] 张景明. 长江口深水航道治理工程护底软体排结构设计[J]. 水运工程, 2006(S2): 20-23.
- [7] 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, 33(8): 32-34.
- [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] 韩林峰, 王平义, 苏伟. X 型系混凝土块软体排水毁量化分析及整治效果评估[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(4): 487-493, 499.
- [10] 陈鹏. X 型排在黄河银川段航道整治护岸工程中的应用[J]. 中国水运·航道科技, 2016(4): 25-28.
- [11] 肖庆华, 潘美元, 雷国平, 等. D 型软体排沉排施工中缩撕断机理[J]. 水运工程, 2015(1): 200-203.
- [12] 李彪, 徐晗, 黄成涛, 等. 冲刷条件下 D 型软体排护底破坏机理研究[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 158-162.
- [13] 刘林双, 柴华锋, 赵凤亚. 新型混凝土单元块 D 型软体排结构计算及稳定性分析[J]. 水运工程, 2018(9): 1-8.
- [14] 腾江涛. 混凝土单元块 D 型软体排工艺在长江航道整治工程中的应用[J]. 中国水运, 2018(10): 69-70.
- [15] 长江航道规划设计研究院. 长江中游荆江河段昌门溪至熊家洲段航道整治工程施工图设计[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2013.

(本文编辑 王传瑜)