



大水深下扭王字块组吊装沉放受力及运动特性数值模拟研究

李宗华

(长江重庆航道工程局, 重庆 400012)

摘要: 针对王家滩航道整治工程中, 扭王字块在大水深、复杂流动条件下实现精细化沉放的难题, 开展扭王字块组吊装下沉过程受力及运动特性的研究。采用三维数值模拟方法, 结合现场实际操作条件, 构建扭王字块组吊装沉放的仿真模型, 系统剖析风速、流速、沉放速度和下沉深度等因素对漂移距离、吊索张力和艏摇角等关键参数影响的变化规律。结果表明: 流速对漂移距离的影响显著, 随着流速的增大, 漂移距离呈先增大、后减小、再增大的趋势, 最大漂移距离为 3.5 m; 扭王字块组因自身结构具有非对称性, 导致下沉受力不均匀和下沉过程不断绕 Z 轴旋转, 流速和沉放速度对这一过程的影响明显; 沉放速度增大使得入水砰击荷载增大, 导致吊索张力产生剧烈波动, 严重影响吊装系统的稳定性。研究成果可提升扭王字块在大水深条件下的沉放精度, 切实保障施工安全性, 为同类航道整治工程提供技术参考与理论支撑。

关键词: 航道整治工程; 扭王字块; 沉放; 数值模拟; 水流速度; 沉放速度

中图分类号: U617.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0233-08

Numerical simulation study on force and motion characteristics of hoisting and sinking of accropode group under great water depth

Li Zonghua

(Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400012, China)

Abstract: Aiming at the problem of achieving refined sinking of accropode blocks under the condition of great water depth and complex flow in the Wangjiantan channel regulation project, a study on the force and motion characteristics during the hoisting and sinking process of the accropode group is carried out. Using a three-dimensional numerical simulation method, combining with the actual on-site operating conditions, a simulation model for the hoisting and sinking of the accropode group is constructed. The variation laws of the influence of factors such as wind speed, flow velocity, sinking speed, and sinking depth on key parameters such as drift distance, sling tension, and yaw angle are systematically analyzed. The results show that the flow velocity has a significant impact on the drift distance. As the flow velocity increases, the drift distance first increases, then decreases, and final increases again, with a maximum drift distance of 3.5 m. Due to the asymmetry of its own structure, the accropode group has uneven sinking forces and rotates continuously around the Z-axis during the sinking process. The flow velocity and sinking speed have a significant impact on this process. An increase in the sinking speed leads to an increase in the slamming load during sinking, resulting in severe fluctuations in the sling tension and seriously affecting the stability of the hoisting system. The research results can improve the sinking accuracy of accropode blocks under great water depth condition, effectively ensure construction safety, and provide technical reference and theoretical support for similar channel regulation projects.

Keywords: channel regulation project; accropode; sinking; numerical simulation; flow velocity; sinking speed

收稿日期: 2025-01-05

作者简介: 李宗华(1975—), 男, 高级工程师, 从事航道整治工程、陆上及水下爆破及非爆清礁施工及相关工艺研究。

在航道整治工程相关研究领域,诸多学者针对规则形状的块石或块石群的漂移距离、抛石工艺和方法开展了大量工作。韩海骞等^[1]推导了不同边界的动水抛石漂移距离计算公式,与室内水槽试验吻合良好;尹立生^[2]从椭圆流速分布公式出发,结合室内和野外实测资料对公式进行了验证;李寿千等^[3]对弱感潮河段的抛石漂移距进行现场试验,确定了涨落潮条件下块石漂移距的表达式;黄卫东等^[4]引入群体沉速推导出块石沉速、抛投落距和综合抛投离散参数公式,将传统抛投落距公式推广至深水区,但对扭王字块或扭王字块组的漂移距离公式还没有类似的研究。在精确抛石方面,传统挖掘机抛石面临船舶受载不均匀、石料破坏和运输船失稳等安全风险,长臂挖掘机抛石的抗风浪能力和抗激流能力明显增强,抛石工效提升^[5-7];网兜抛石、吊秤计量的浮吊抛石能够精确计算块石质量,进行块石的抛填^[8-10]。但是对于扭王字块或扭王字块组的安装,目前尚未有成熟的施工工艺。

王家滩河段碍航特性突出。该河段水流状况复杂,礁石星罗棋布,航道条件恶劣,是长江上游朝天门—涪陵河段航道整治工程的重点区域。为有效改善王家滩航道条件,保障航运安全,设计方案规划在王家滩深潭修筑 2 座潜坝,即 W1#、W2#潜坝。2 座潜坝均采用抛石结构,在坝体上游坡面和坝后护脚部位设置扭王字块进行压覆。王家滩潜坝施工区域水深超过 40 m,水流条件复杂,受水流、水深和作业工艺影响^[11],传统水上抛石作业易产生较大漂移距离。扭王字块作为一种新型压覆结构应用于航道整治工程尚属首次,其精确沉放对工程成败起着关键作用。鉴于此,开展大水深下扭王字块组吊装下沉过程的受力及运动特性研究显得尤为必要。

本文借助数值模拟手段,结合现场实际环境与操作条件,构建扭王字块吊装沉放仿真模型,深入探究吊机受力和扭王字块运动的变化规律,旨在为扭王字块的精细化沉放控制提供科学依据与技术参考。

1 模型建立和测试组合

1.1 扭王字块吊装及沉放

扭王字块块体单块质量为 1.9 t,长、宽、高均为 1.449 m,体积为 0.805 m³,见图 1,采用 C30 素混凝土制作。为了充分利用吊机能力,节省吊放作业时间,提升吊放作业效率,在实际施工中将扭王字块以 4 块为 1 组进行绑缚,固定成扭王字块组。

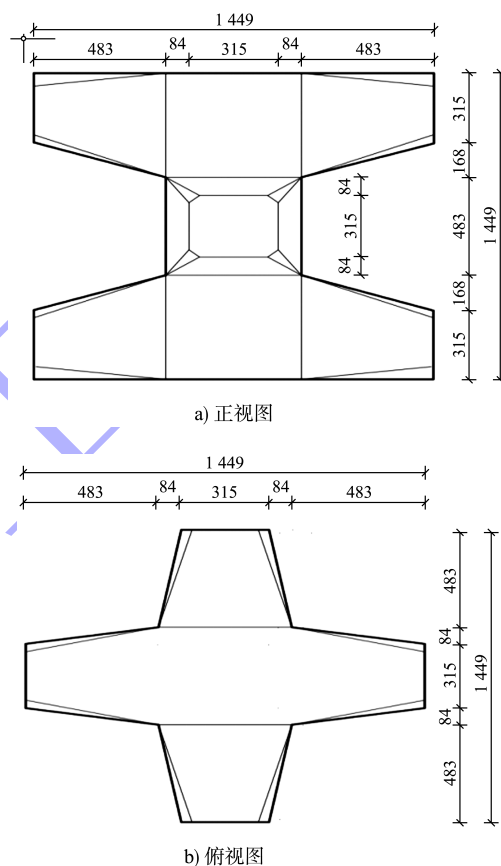


图 1 扭王字块结构尺寸 (单位: mm)

Fig. 1 Dimensions of accropode (unit: mm)

扭王字块组的主要施工方法是通过浮吊主吊钩将其从运输驳船脱离,然后吊装至指定区域进行吊放,可以继续下放吊索直至潜坝顶面进行安放,此时要考虑环境因素对吊索和扭王字块组的整体作用;也可以到达指定的高度进行脱钩,此时要考虑环境因素对扭王字块组的水动力作用,见图 2。

通常,在扭王字块吊放过程中可以忽略施工船舶在环境荷载作用下运动对扭王字块的影响,在常规风平浪静气象条件下,施工船舶运动幅度通常很小,且扭王字块通过弹性绳索与浮吊船相

连,可有效缓冲船舶运动影响,使得扭王字块运动速度和加速度维持在较小范围,故可通过准静

态过程对吊装过程进行模拟。但在极端水文条件下,该假设可能不成立,需要进一步评估。

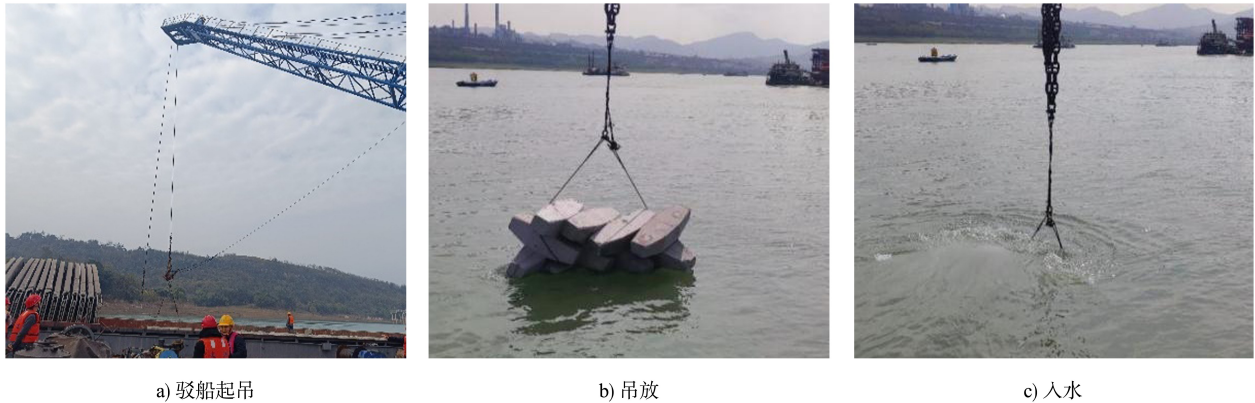


图 2 扭王字块组吊装施工

Fig. 2 Hoisting and placing construction of accropode group

1.2 测试组合

为了精准预测扭王字块组在吊装过程中的受力情况及运动特性变化规律,需紧密结合现场实际状况,充分考量风速、流速、沉放速度以及下沉深度等因素的影响。每个因素设置 3 个水平数。

1) 风的作用时段主要集中在从吊装起始至入水前这一区间。风速与风向对结构入水前的初始条件具有极为显著的影响。鉴于地理环境因素,该流域内风速整体偏小。冬、春两季风力相对较大,强风大多出现在夏季,且常伴随雷雨天气。依据重庆站的资料统计,常风向为 N 和 NW,频率处于 6%~15%;强风向为 W,最大风速在 12~16 m/s,频率为 2%~5%。基于此,选定的风速分别为 0、5 和 10 m/s。2) 流速的作用时间覆盖从

结构入水直至沉放完成的整个过程。流速大小对结构入水后的状态变化起着关键作用。经综合考虑,选取的流速分别为 0.5、1.0 和 1.5 m/s^[12]。

3) 沉放速度是决定结构入水姿态以及沉放阻力的关键参数之一。若沉放速度过快,结构入水时砰击受力与所受阻力会显著增大,导致运动和受力状况变得复杂;而沉放速度过慢,则会降低施工效率。综合权衡,选取的沉放速度为 0.1、0.5 和 1.0 m/s。

4) 下沉深度主要取决于场地的水深条件。根据现场 ADCP (acoustic Doppler current profiler, 声学多普勒流速剖面仪) 测量结果,在大于 28 m 水深时,结构的运动轨迹较难掌控。针对本文所涉及的大水深情形,选取的沉放深度分别为 30、40 和 50 m。测试组合参数见表 1。

表 1 测试组合参数

Tab. 1 Test combination parameters

组合	风速 $v_w/(m \cdot s^{-1})$	流速 $v_c/(m \cdot s^{-1})$	质量 m/t	重心位置/m	沉放速度 $v_L/(m \cdot s^{-1})$	下沉深度 d/m
1	0	0	7.6	(1.992,0,0.242)	0.1	50
2	5	0	7.6	(1.992,0,0.242)	0.1	50
3	10	0	7.6	(1.992,0,0.242)	0.1	50
4	0	0.5	7.6	(1.992,0,0.242)	0.1	50
5	0	1.0	7.6	(1.992,0,0.242)	0.1	50
6	0	1.5	7.6	(1.992,0,0.242)	0.1	50
7	10	0.5	7.6	(1.992,0,0.242)	0.1	50
8	10	0.5	7.6	(1.992,0,0.242)	0.5	50
9	10	0.5	7.6	(1.992,0,0.242)	1.0	50
10	10	0.5	7.6	(1.992,0,0.242)	0.1	30
11	10	0.5	7.6	(1.992,0,0.242)	0.1	40
12	10	0.5	7.6	(1.992,0,0.242)	0.1	50

1.3 模型建立及组装

相对于规则的形状,扭王字块和扭王字块组的外形和尺寸较为复杂,应采用 MOSES 建议的 surface 命令自上而下的方法进行扭王字块组的模型建立。进行布尔运算耦合后的模型及网格划分见图 3。

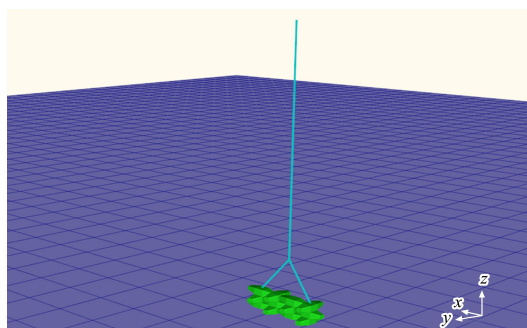


图 3 数值分析模型

Fig. 3 Numerical analysis model

由于模型比较复杂,采用 MOSES 自带的“体-面-线-点”的自上而下的建模方法进行模型建立。吊索包括吊臂、绳索和吊钩,吊索从吊臂位置下放链接吊钩。吊臂、吊点以点的形式通过 ASSEMBLY T-H_DEFINITION 进行组装。本文采用的吊索直径为 20 mm,弹性模量为 210 GPa,吊臂位于水面以上 20 m 处,吊点位于扭王字块组上部两端,组装后的模型见图 4。

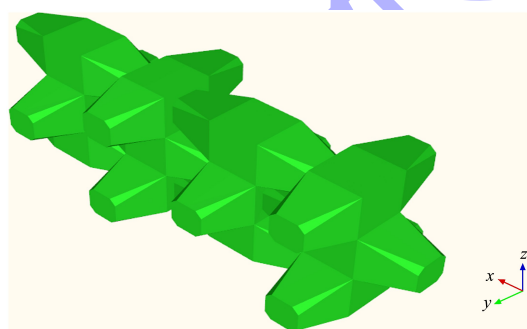


图 4 吊装模型

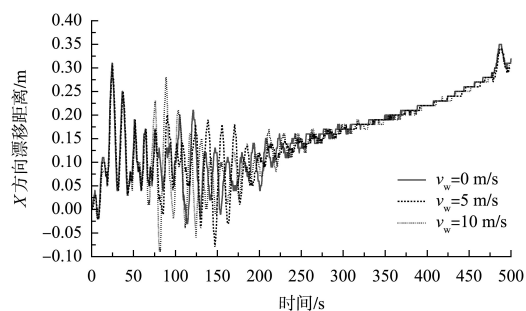
Fig. 4 Hoisting model

2 数据分析

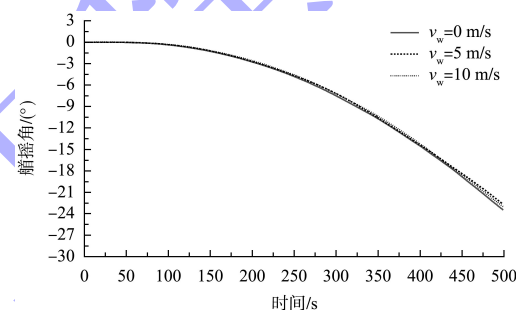
漂移距离、吊索张力、艏摇角等关键参数直接决定了扭王字块组吊装下沉安置的施工质量,本节将对表 1 中测试组合对漂移距离、吊索张力、艏摇角的影响进行分析。数值模拟时间为 500 s,采样间隔为 0.1 s。

2.1 风速对沉放受力及运动响应的影响

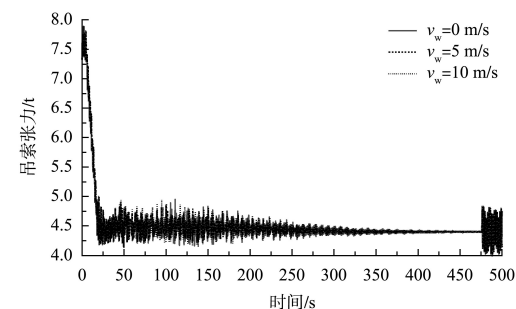
距离水面 1 m 入水,组合 1~3 考虑风速影响的 X 方向的漂移距离、艏摇角和吊索张力时程变化曲线见图 5,其中图 5d) 为结构接近河底的形态变化情况。



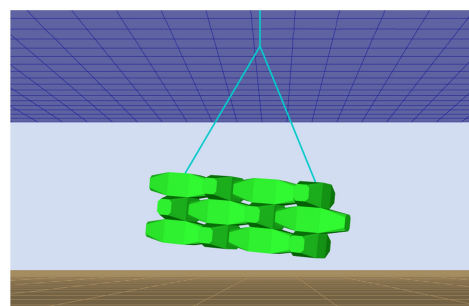
a) X 方向漂移距离时程变化



b) 艏摇角时程变化



c) 吊索张力时程变化



d) 扭王字块接近河底形态变化

图 5 风速对扭王字块沉放受力影响

Fig. 5 Influence of wind speed on force of sinking of accropode group

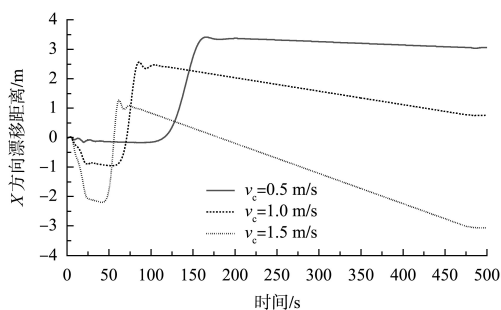
从图 5a) 可以看出, 当沉放时间小于 250 s 时, 漂移距离随着风速的增大呈增加的趋势。结构在风荷载、吊索张力、浮力以及重力的共同作用下进行平衡调整, 致使漂移距离呈现左右波动变化; 当沉放时间大于 250 s 时, 风荷载对漂移的距离影响减弱, 由于结构具有非对称性, 在吊索张力、重力、浮力作用下保持动态平衡, 此时漂移距离稳定在 0.30 m 左右。

从图 5b) 可以看出, 随着沉放时间的增加, 结构艏摇角度绕 Z 轴的反方向呈不断增大的趋势。这是因为结构下沉过程中, 其不对称性使得吊索张力、重力和浮力荷载之间相互作用, 从而引起结构绕 Z 轴旋转, 最终呈现出如图 5d) 所示的形态; 艏摇角受风速的影响较小, 这是由于风速只作用于结构露出水面的部分, 在结构下水后, 对吊索水平向受力的影响极为有限。

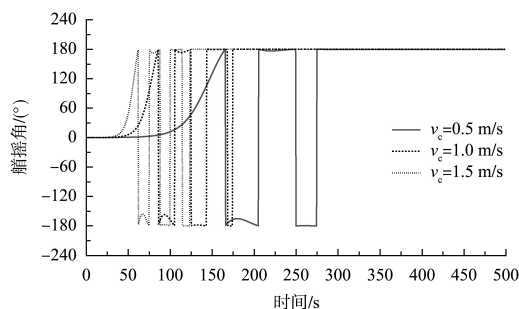
从图 5c) 可以看出, 吊索张力随着沉放时间增加呈先下降、后稳定、再轻微振荡的变化趋势。这是由于在 10 s 左右, 结构底面开始入水, 结构在风荷载、浮力、重力和吊索张力的共同作用下进行动态平衡调整, 25 s 左右, 结构完全入水, 浮力由 0 t 迅速增大到 3.22 t, 吊索张力由 7.7 t 降到 4.5 t 左右。直到 350 s 左右, 吊索张力趋于稳定, 结构在各作用力下达到平衡状态。而在 480 s 后, 吊索张力出现轻微振荡变化, 这是由结构接近河底产生的“浅水效应”导致的。

2.2 流速对沉放受力及运动响应的影响

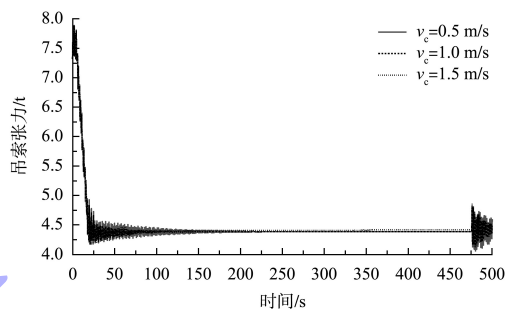
距离水面 1 m 入水, 组合 4~6 考虑流速影响的 X 方向的漂移距离、艏摇角和吊索张力时程变化曲线见图 6, 其中图 6d) 为结构接近河底的形态变化情况。



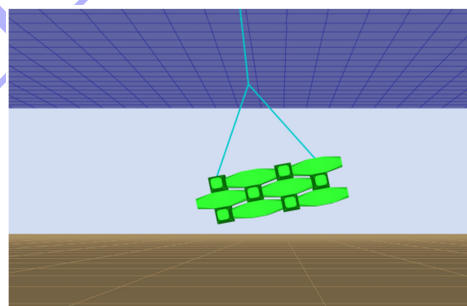
a) X 方向漂移距离时程变化



b) 艏摇角时程变化



c) 吊索张力时程变化



d) 扭王字块接近河底形态变化

图 6 流速对扭王字块沉放受力影响

Fig. 6 Influence of flow velocity on force of sinking of accropode group

从图 6a) 可以看出, 随着流速的逐渐增加, 结构的漂移距离呈先减小、后增大的趋势, 具体而言, 漂移距离由 3.5 m 减小到 0.8 m 再增大到 3.5 m。而从图 6b) 可以看出, 艏摇角在 180° 和 -180° 之间往复变化, 绕 Z 轴持续旋转, 且旋转持续时间呈逐渐缩短的趋势。这主要是因为流速的增加使得作用在结构上的水流作用力增大, 而结构的非对称性导致受力不均匀, 并且在艏摇方向缺乏平衡力矩, 结构只能通过绕 Z 轴进行不断旋转调整自身状态, 从而寻找平衡位置。从图 6c) 可以看出, 吊索张力的变化幅度相对较小, 并且在 150 s 时便

进入稳定阶段。其原因在于,随着流速的增加,水流作用力随之增强,这使得吊索能够更快地达到平衡状态,进而缩短了进入平衡状态所需的时间。

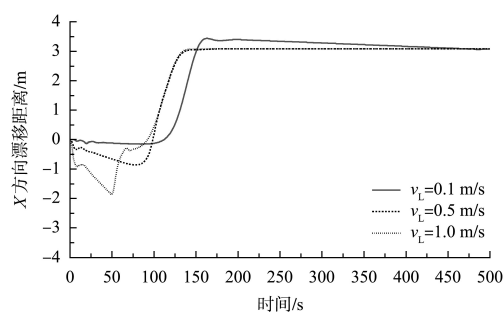
2.3 沉放速度对沉放受力及运动响应的影响

距离水面 1 m 入水,组合 7~9 考虑沉放速度影响的 X 方向的漂移距离、船摇角和吊索张力时程变化曲线见图 7,其中图 7d)为结构接近河底的形态变化情况。

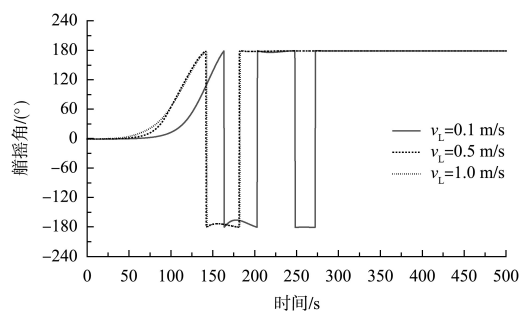
从图 7a)可以看出,随着沉放速度的增加,在沉放时间小于 200 s 的阶段,结构的漂移距离呈增大的趋势;而在沉放时间超过 200 s 时,漂移距离呈下降的趋势,并最终稳定在 3.0 m。原因为沉放速度越快,结构达到平衡状态所需时间也会相应延长。在前期,较快的沉放速度使结构在较短时间内受到更多外部因素的作用,从而导致漂移距离增大;随着时间增大,结构逐渐适应并调整,其漂移距离逐渐减小并趋于稳定。

从图 7b)可以看出,船摇角在 $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 之间循环变化,结构持续绕 Z 轴旋转,且旋转持续时间不断缩短。这表明结构在下沉过程中受到多种力的综合作用,由于其自身的结构特点,在绕 Z 轴方向上缺乏稳定的平衡机制,只能通过不断旋转来尝试寻找稳定位置,而沉放速度的变化对这一旋转特性有一定影响,速度越快,结构试图快速调整平衡的趋势越明显,导致旋转持续时间缩短。

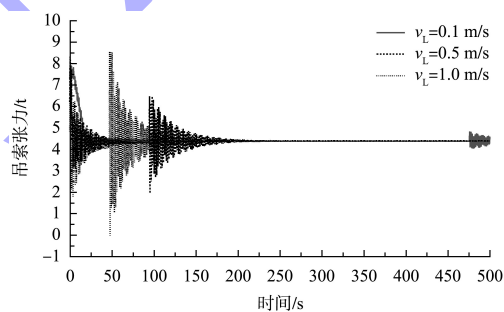
从图 7c)可以看出,随着沉放速度的增加,吊索张力呈现增大然后衰减、再增大再衰减的波动变化趋势,这对吊放系统的稳定性产生了显著影响。原因是当沉放深度加快时,结构入水过程转变为砰击入水过程,承受的砰击荷载大幅增大。入水速度越大,砰击荷载就越大,这使得吊放系统需要更长时间来平衡复杂多变的作用力。在平衡过程中,吊索张力不断调整,从而出现了这种反复波动的变化情况。



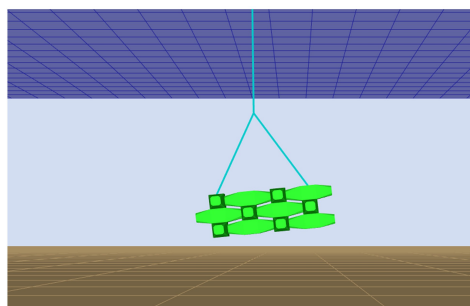
a) X方向漂移距离时程变化



b) 船摇角时程变化



c) 吊索张力时程变化



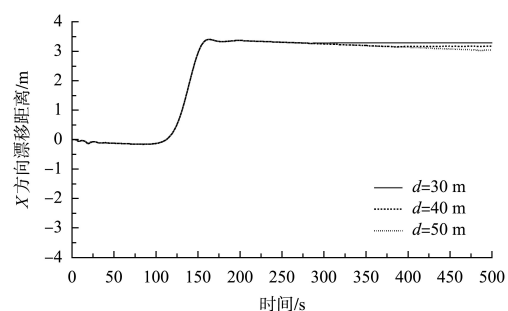
d) 扭王字块接近河底形态变化

图 7 沉放速度对扭王字块沉放受力影响

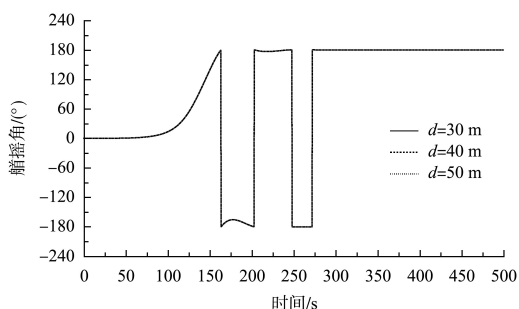
Fig. 7 Influence of sinking speed on force of sinking of accropode group

2.4 下沉深度对沉放受力及运动响应的影响

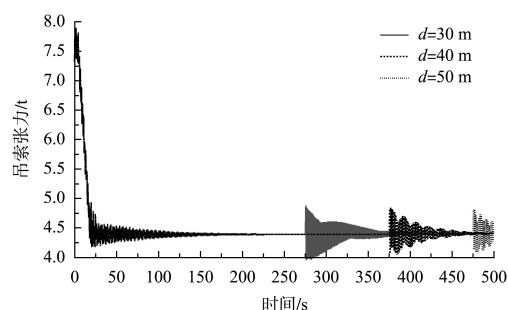
距离水面 1 m 入水,组合 10~12 考虑下沉深度影响的 X 方向的漂移距离、船摇角和吊索张力时程变化曲线见图 8。



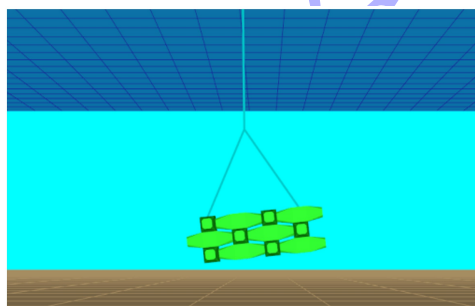
a) X方向漂移距离时程变化



b) 艏摇角时程变化



c) 吊索张力时程变化



d) 扭王字块接近河底形态变化

图 8 下沉深度对扭王字块沉放受力影响

Fig. 8 Influence of sinking depth on force of sinking of accropode group

从图 8a) 可以看出, 当沉放时间小于 300 s 时, 随着下沉深度的增加, 结构的漂移距离未呈现出明显的变化规律。然而, 当沉放时间超过 300 s 后,

漂移距离呈下降趋势。这主要是因为在前期的水体对结构的作用相对稳定, 使得漂移距离变化不大; 但在后期, 水深越小, 浅水区域的边界效应增大, 对结构的影响变大, 水深越大, 影响越小, 从而导致漂移距离降低。从图 8b) 和图 8c) 可以看出, 下沉深度对艏摇角和吊索张力的变化基本上没有影响, 吊索张力在 275、375 和 475 s 等时刻出现振荡变化, 这是由于结构吊放过程中接近水底的“浅水效应”增强所致。在这些时刻, 结构和水底的相对距离减小, 水底边界对水流及结构受力状态产生干扰, 引发了吊索张力波动。

3 结论

1) 流速对扭王字块组漂移距离影响明显, 由于流速对受力平衡的影响, 漂移距离随流速增大呈先减小、后增大的趋势。

2) 自身结构的非对称性使得扭王字块组在下沉过程中受力不均匀, 进而产生艏摇角。流速和沉放速度对艏摇角的变化影响较为明显。流速增加使得水流作用力增大, 结构受力失衡加剧; 沉放速度的改变则影响结构在下沉过程中的动态响应, 两者均促使结构通过不断旋转来寻求平衡位置, 从而影响艏摇角的变化特性。

3) 沉放速度的增大使得扭王字块组入水过程转变为砰击入水, 砰击荷载显著增大。这一变化对吊装系统的稳定性和整体性能影响显著。在实际施工中, 必须充分结合现场的水流、气象等工作环境条件, 综合权衡后合理选择沉放速度, 以保障吊装作业的安全与高效进行。

参考文献:

- [1] 韩海筹, 杨永楚. 动水抛石漂移距离的计算[J]. 浙江水利科技, 2001, 29(3): 6-7.
HAN H Q, YANG Y C. Calculation of drift distance for hydrodynamic riprap[J]. Zhejianghydraulics, 2001, 29(3): 6-7.
- [2] 尹立生. 抛石位移计算的一种新方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(2): 13-16.
YIN L S. A new method for calculating displacement of

- riprap in river harness[J]. Engineering journal of Wuhan University, 2004, 37(2): 13-16.
- [3] 李寿千, 牛文超, 刘菁, 等. 弱感潮河段抛石漂移距现场试验研究[J]. 水运工程, 2019(12): 1-6.
- LI S Q, NIU W C, LIU J, et al. Field experiment study on throwing distance of riprap in weak tidal reach[J]. Port & waterway engineering, 2019(12): 1-6.
- [4] 黄卫东, 余明辉, 姚仕明, 等. 深水潜坝抛石加固现场试验及定位分析研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 110-117.
- HUANG W D, YU M H, YAO S M, et al. Field test and positioning analysis of reinforcement of deep water submerged dam by thrown stones[J]. Advanced engineering sciences, 2021, 53(4): 110-117.
- [5] 贾胜银. 航道整治中长臂挖掘机抛石施工工艺的应用探析[J]. 珠江水运, 2024(23): 40-42.
- JIA S Y. Application of riprap construction technology of long arm excavator in waterway regulation[J]. Pearl River water transport, 2024(23): 40-42.
- [6] 李小超, 张盖, 李卫国, 等. 不同粒径组合块石群水下漂移数值模拟[J]. 大连理工大学学报, 2022, 62(4): 394-402.
- LI X C, ZHANG G, LI W G, et al. Numerical simulations of drifting of rock groups with different particle diameter combinations[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2022, 62(4): 394-402.
- [7] 嵇文远, 杨杰, 田栋, 等. 起重船上精确抛石施工技术探索[J]. 中国水运, 2021(3): 143-145.
- Ji W Y, YANG J, TIAN D, et al. Exploration on construction technology of precise riprap on water by crane ship[J]. China water transport, 2021(3): 143-145.
- [8] 黎建洲, 王超, 袁泽雄, 等. 多波束测深技术在水下抛石验收评价中的应用[J]. 北京测绘, 2021, 35(12): 1603-1606.
- LI J Z, WANG C, YUAN Z X, et al. Application of multi-beam sounding technology in acceptance evaluation of underwater riprap[J]. Beijing surveying and mapping, 2021, 35(12): 1603-1606.
- [9] 杨杰, 张义佐, 黄铮, 等. 多粒径块石水下群抛漂移过程数值模拟研究[J]. 水运工程, 2022(9): 86-91.
- YANG J, ZHANG Y Z, HUANG Z, et al. Numerical simulation on drifting process of underwater riprap with multiple particle sizes[J]. Port & waterway engineering, 2022(9): 86-91.
- [10] 刘青. 复杂水流条件下抛石群运动扩散规律研究[J]. 黑龙江水利科技, 2024, 52(5): 25-27, 74.
- LIU Q. Study on law of movement and diffusion of riprap under complex flow conditions[J]. Heilongjiang hydraulic science and technology, 2024, 52(5): 25-27, 74.
- [11] 马梦杰. 群抛块石水下运动轨迹数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- MA M J. Numerical simulation of motion trajectory of riprap stones in water[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [12] 许光祥, 刘添宇, 楼金仙, 等. 流速垂线分布对抛石漂距的影响研究[J]. 泥沙研究, 2021, 46(5): 20-27.
- XU G X, LIU T Y, LOU J X, et al. Influence of vertical velocity distribution on the drift distance of riprap[J]. Journal of sediment research, 2021, 46(5): 20-27.

(本文编辑 王传瑜)

· 消 息 ·

湖北荆州港木沉渊港区同盛码头正式交付

近日, 中交二航局承建的湖北荆州港木沉渊港区同盛码头正式交付。

该项目主要建设内容为新建 1 个 3 000 吨级泊位, 可停靠 5 000 吨级散货及件杂货船舶。

该项目建成后, 将进一步提升荆州开发区工业物资的水路运输效率, 降低企业物流成本, 对强化区域综合交通枢纽地位具有重要意义。

https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202510/t20251009_223220.html (2025-09-25)