



多粒径块石水下群抛漂移过程数值模拟研究

杨杰¹, 张义佐², 黄铮³, 马梦杰³, 刘延波³

(1. 中交上海航道局有限公司, 上海 200002; 2. 天津天科工程管理有限公司, 天津 300450;
3. 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江省哈尔滨 150001)

摘要: 水下抛石工程中常采用不同粒径块石组成块石群进行抛投, 在多粒径块石群水下抛投过程中, 块石会因水流作用与块石间的相互碰撞产生漂移, 难以精准定位块石落点。针对上述问题, 采用有限体积法和基于 Hertz-Mindlin 接触的离散元算法对多粒径块石群抛后的漂移过程进行 CFD-DEM 耦合研究, 得出多粒径块石群在不同来流条件下的水平移距、沉降时间、扩散过程与落点分布。结果表明, 在同一流场中, 由于流场拖拽力分量占比较小, 粗粒径块石的漂移距离与沉降时间均小于细粒径块石; 不同粒径组成的块石群, 抛投后在河床底部分布不规则, 且随流速增大而漂距普遍增大。

关键词: 航道整治; 水下抛石; 有限体积法; 漂移距离

中图分类号: U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0086-06

Numerical simulation on drifting process of underwater riprap with multiple particle sizes

YANG Jie¹, ZHANG Yi-zuo², HUANG Zheng³, MA Meng-jie³, LIU Yan-bo³

(1.CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China;

2. Tianjin Tianke Engineering Management Co., Ltd., Tianjin 300450, China;

3. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In the underwater riprap project, block stones with different particle sizes are often used to form block stones for throwing. In the process of underwater throwing of block stones with multiple particle sizes, the block stones will drift due to the interaction between water flow and the block stones, so it is difficult to accurately locate the falling point of the block stones. On the above problems, this paper uses the finite volume method and the discrete element method based on Hertz-Mindlin contact to study the CFD-DEM coupling of the drift process of the multi particle size block stone group after throwing, and obtains the horizontal displacement, settlement time, diffusion process and impact point distribution of the multi particle size block stone group under different incoming flow conditions. The results show that in the same flow field, because the drag force component of the flow field is relatively small, the drift distance and settlement time of coarse-grained block stones are less than those of fine-grained block stones. The block stone groups with different particle sizes are irregularly distributed at the bottom of the riverbed after throwing, and the drift distance generally increases with the increase of velocity.

Keywords: channel regulation; underwater riprap; finite volume method; drift distance

抛石作业被广泛应用于我国沿海沿江地区的河道治理、护岸、防汛抢险、桥墩防冲等工程中。在抛石施工过程中, 要重点把握好“抛准、抛足、抛匀”这3个指标。其中“抛准”是抛石作业中最为关键的评价指标, 即应该准确地将抛石投在

规定的区域范围内, 完全覆盖塌陷区域^[1]。在实际的抛石施工中, 多采用网兜、液压反铲式挖掘机和抓斗等方式进行机械抛填, 在抛石量较大时, 还会采用底开驳船、侧抛船等特殊作业船舶进行直接抛投。在实际工程中, 抛石多为混合石料群

抛, 而非单颗粒抛石, 因此有必要对多粒径块石群抛后的沉降轨迹及落点位置进行研究。

1 研究背景

抛石漂移距是指抛投的块石从进入水中落到设计位置, 中间因为水流作用而产生横向或者纵向水平移动的距离。若抛投位置不准确, 可能会造成抛石超过预期的抛投范围, 不能达到设计要求的相关高程, 最终会大幅减弱治理的效果; 也可能会导致块石抛投不均匀, 主要维护的地段会出现大片空白, 甚至形成工程薄弱区域。这对于工程整体的作用是一种削弱, 甚至可能会影响到工程的安全性。

为探究水下抛石施工过程中的块石漂移过程, 为工程提出指导意义, 梁润^[2]、詹义正^[3]、姚仕明等^[4]推导出抛石漂移距的相关公式, 但尚未找到适用于多粒径水上块石群抛的漂距估算公式, 且经验公式得出的块石漂距往往与实测值偏差较大。韩海骞等^[5]、李小超等^[6]设计相关的水槽试验, 并在施工标段做了现场试验, 但试验需要不断调整, 成本较高。相比之下, 数值模拟成本低廉, 只需要在计算机上进行模拟和数据处理, 在不能进行试验的恶劣天气下也能采用数值模拟估算出漂距。

抛石运动过程是一个典型的流-固耦合现象, 块石颗粒为固体相, 水流为流体相, 为精准模拟这一流固耦合过程, 张强强^[7]、陈凯华等^[8]、刘卡等^[9]、李卫国^[10]均建立了数值模型对水下抛石的运动过程进行模拟, 他们的研究证明数值模拟的方法可以对抛石工程达到良好的模拟效果, 得到的预测结果较为可靠, 可以指导相关的施工作业。但现存数值研究多集中于对单颗粒块石漂距的研究, 针对多粒径混合块石群抛扩散过程的研究较少。为了更好地探究块石粒径对水下抛石的漂移距离与沉降时间的关系, 本文采用计算流体力学-离散元(CFD-DEM)方法建立针对水下抛石作业的耦合分析模型, 并以块石粒径与来流速度为变量对水下抛石的漂移距离与沉降时间进行研究。

在针对抛石施工过程的数值仿真中, 为模拟块石碰撞中的接触、压缩与回弹过程, 采用离散

元方法(DEM)对块石碰撞的实际情况进行模拟。在 DEM 计算过程中, 采用牛顿第二定律和接触力-位移方程完成块石漂移运动和块石碰撞的模拟。水流的运动变化情况则可采用经典的计算流体力学方法(CFD)进行求解。最早在 1992 年 Tsuji 等^[11]提出了 CFD-DEM 耦合的方法, 基于欧拉-拉格朗日颗粒轨道模型, 将流体相和颗粒相分别用计算流体力学和离散元法处理计算, 用于研究一维水平管的无黏性节涌流化过程。近年来, 随着 CFD 和 DEM 不断发展完善, CFD-DEM 耦合方法在研究固液两相流方面也具有更强的优势, 能够满足大部分条件下的固-液两相流模拟。因此本文将计算流体力学程序 OpenFOAM 和离散元程序 LIGGGHTS 进行耦合, 建立 CFD-DEM 耦合模型研究抛石群的沉降过程及河床分布情况。

2 数值模型建立

2.1 离散单元法理论

在 CFD-DEM 耦合方法中, 流体被看作是含颗粒的连续介质, 采用含体积分数的 Navier-Stokes 方程描述; 颗粒被看作是离散单元, 通过检测单元间接触量, 代入刚度模型由牛顿第二定律描述, 流相-离散相间耦合通过求解每一迭代步中流场对每个颗粒的动量与能量传递实现。

在 CFD-DEM 耦合方法中的离散单元部分, 颗粒之间的运动遵循牛顿第二定律, 并在动力守恒方程中考虑了流体对颗粒的作用力, 在给定的时间步长中, 通过显式迭代颗粒相关位置进行求解。在 DEM 部分颗粒平动与转动控制方程分别如下:

$$m \frac{d^2\boldsymbol{\delta}}{dt^2} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_f - c \frac{d\boldsymbol{\delta}}{dt} \quad (1)$$

$$\mathbf{I}_M \frac{d^2\boldsymbol{\theta}}{dt^2} = \mathbf{M} \quad (2)$$

式中: m 为固体质量; t 为时间; $\boldsymbol{\delta}$ 为平动位移; \mathbf{F}_e 为外力; \mathbf{F}_c 为接触力; \mathbf{F}_f 为流体施加在固体上的力; c 为阻尼系数; \mathbf{I}_M 为惯性矩张量; $\boldsymbol{\theta}$ 为角位移; \mathbf{M} 为总扭矩, 包括外力、流固相互作用力的扭矩。

在 DEM 系统中, 颗粒间的运动模拟通过考虑颗粒间相互接触量与接触处的本构关系实现。颗粒接触本构关系又被称为接触刚度, 考虑到颗粒

间的平动与转动，颗粒的接触刚度通常被分解为接触法向割线刚度与接触切向切线刚度，并由不同的接触刚度模型给出。颗粒的法向接触刚度与切向刚度定义式为：

$$\begin{cases} K_n = F_n / \delta \\ K_t = (F'_t - F_t) / \Delta u \end{cases} \quad (3)$$

式中： K_n 、 K_t 为颗粒的法向、切向的接触刚度； F_n 、 F_t 为接触点的法向、切向接触力； F'_t 为上一时步的切向接触力； δ 为颗粒接触量； Δu 为当前时步的切向接触量。

为模拟块石碰撞时的连续接触，本文使用 Hertz-Mindlin 无滑移“软球”模型，作为 DEM 部分的接触刚度模型以计算颗粒的法向与切向的接触刚度。Hertz 正应力和切应力的控制方程为：

$$\begin{cases} f_n = \sqrt{\delta} \sqrt{\frac{r_i r_j}{r_i + r_j}} (k_n \delta n_{ij} - m_{\text{eff}} \gamma_n v_{s,n}) \\ f_t = \sqrt{\delta} \sqrt{\frac{r_i r_j}{r_i + r_j}} (k_t \Delta s_t + m_{\text{eff}} \gamma_t v_{s,t}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial(\alpha_l \rho_1)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_1 \mathbf{u}_l) = 0 \\ \frac{\partial(\alpha_l \rho_1 \mathbf{u}_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_1 \mathbf{u}_l \mathbf{u}_l) = -\alpha_l \nabla p - K_{sl} (\mathbf{u}_l - \mathbf{u}_s) + \nabla \cdot (\alpha_l \boldsymbol{\tau}) + \alpha_l \rho_1 \mathbf{g} + \mathbf{f} \end{cases} \quad (5)$$

式中： α_l 为在单个计算网格内的流体含量； ρ_1 为流体密度； \mathbf{u}_l 、 \mathbf{u}_s 分别为流体、固体速度； p 为压强； K_{sl} 为固液相间的隐含动量交换系数； $\boldsymbol{\tau}$ 为流体剪切应力； \mathbf{g} 为重力加速度； \mathbf{f} 为固相交换至液相的动量。

2.3 CFD-DEM 耦合理论

在 CFD-DEM 耦合系统中，离散相与流体之间的耦合通过系统间的动量与热力学能量交换实现，但在水下抛石的漂移与着床形态研究中，热力学能量交换的影响可被忽略。因此在本文采用的耦合模型中，仅通过动量交换实现抛石颗粒与流体的耦合。在动量交换过程中，在流场中单个颗粒所受的主要外力 \mathbf{F}_i^e 可以由下式表达：

$$\mathbf{F}_i^e = \mathbf{f}_{d,i} + \mathbf{f}_{\nabla p,i} + \mathbf{f}_{\nabla \tau,i} \quad (6)$$

式中： $\mathbf{f}_{d,i}$ 为流体与颗粒相对运动产生的拖曳力； $\mathbf{f}_{\nabla p,i}$ 为由流体压力梯度产生的压力梯度力； $\mathbf{f}_{\nabla \tau,i}$ 为

式中： δ 为两颗粒接触时的重叠范围，其值为 $D-d$ ，其中 D 为直径， d 为两颗粒之间距离； r_i 、 r_j 分别为颗粒 i 、 j 的半径； m_{eff} 为颗粒 i 、 j 的等效质量，其值为 $m_i m_j / (m_i + m_j)$ ，其中 m_i 、 m_j 分别为颗粒 i 、 j 的质量； k_n 、 k_t 分别为法向、切向弹性系数； γ_n 、 γ_t 分别为法向、切向黏弹性阻力系数； Δs_t 为两颗粒之间的切向位移矢量； \mathbf{n}_{ij} 为沿着连接两个颗粒中心线的单位矢量； $\mathbf{v}_{s,n}$ 、 $\mathbf{v}_{s,t}$ 为两颗粒相对速度的法向、切向分量。

2.2 计算流体力学理论

在 CFD 部分，由于颗粒占据了相应的流体空间，因此需要引入含体积分数的 Navi-Stokes 方程质量守恒式描述含颗粒流体的运动。由于需要计算流体与颗粒间的相互交换动量，须在 Navi-Stokes 方程动量守恒式末尾加入流体交换的颗粒动量项，使用 CFDEM 程序自身的耦合求解器进行计算求解。本文使用 cfdemSolverPiso 求解器，该求解器采用含体积分数的 Navi-Stokes 守恒式为：

黏性流体在颗粒表面产生的相应剪切应力。

近年来，针对流体与颗粒相对运动产生的拖曳力 $\mathbf{f}_{d,i}$ ，许多学者采用模型试验与数值方法等手段提出许多计算模型。其中 Hill、Koch 等利用格子玻尔兹曼方法研究流体与固体的相互作用，进一步提出包含颗粒雷诺数 Re_p 和颗粒体积分数 ϕ 的拖曳力分段计算公式。该拖曳力模型后由 Benyahia 拓展到整个体积分数、颗粒雷诺数空间上^[12-13]。其中 $\mathbf{f}_{d,i}$ 可由式(7)表达， $\mathbf{f}_{\nabla p,j}$ 与 $\mathbf{f}_{\nabla \tau,i}$ 可以由式(8)表示：

$$\begin{cases} \mathbf{f}_{d,i} = F_0(\varepsilon_s) + F_1(\varepsilon_s) & (Re_p < 20) \\ \mathbf{f}_{d,i} = F_0(\varepsilon_s) + F_3(\varepsilon_s) & (Re_p \geq 20) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \mathbf{f}_{\nabla p,i} = -V_p \frac{dp}{dx} \\ \mathbf{f}_{\nabla \tau,i} = -(\operatorname{div} \boldsymbol{\tau}') V_p \end{cases} \quad (8)$$

式中： ε_s 为颗粒体积分数； Re_p 为颗粒雷诺数；

$F_0(\varepsilon_s)$ 、 $F_1(\varepsilon_s)$ 与 $F_3(\varepsilon_s)$ 是由 ε_s 与 Re_p 确定的相应拖曳力分量; V_p 为颗粒体积; p 为颗粒所受压力; τ' 为流体黏度。

流体与颗粒的动量交换模型包括在颗粒边界上对流体作用力积分的解析模型和采用经验拖曳力模型的非解析模型。由于引入了大量颗粒模拟堆石漂移群的运动, 因此本文采用 PISO 算法以求解非解析模型下流体施加于颗粒上的经验拖曳力以提高求解效率。PISO(pressure implicit split operator, 求解压力的隐式算子分裂)算法是典型的 2 步校正法, 主要实施步骤包括预估步、第一校正步、第二校正步。PISO 算法具有相邻校正, 即在每个迭代步中, 相邻网格的速度值都会采用最新的速度预测值, 其具体计算步骤为: 1) 假定压强, 隐式求解运动方程, 得到速度预测值 u^* , 即速度预测; 2) 利用 u^* 求解连续方程, 得到压强值 p^* , 即压强求解; 3) 利用 p^* 再求解运动方程, 但改为

显示求解, 得到 u^{**} , 即速度校正; 4) 回到第 2 步, 迭代求解, 直至允许的迭代公差。

2.4 模型参数设置

在 CFD 工况设计部分中, 流场尺寸设定为 $15 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ (长×宽×高), 入口设置为沿 x 正方向速度分别为 1.00 、 1.25 、 1.50 、 2.00 m/s 的入口, 出口设置为与入口流速相同。迭代时间步为 0.5 ms , 并采用 PISO 算法对流场的速度与压力进行二次修正。网格划分采用结构化六面体网格进行, 网格尺寸根据实际块石粒径确定。根据不同网格尺寸的试算结果, 网格尺寸与块石颗粒直径的比值确定为 $2\sim 3$ 。

在 DEM 工况设计部分中, 在不同粒径颗粒群抛投仿真中, 设置颗粒材料的泊松比为 0.45 , 弹性模量为 50 GPa , 法向恢复系数为 0.3 , 颗粒转动阻尼为 0.5 。仿真中设置的抛石群颗粒粒径级配参数见表 1。

表 1 抛石群颗粒级配参数

粒径/m	颗粒质量/kg	颗粒体积/ m^3	颗粒密度/ $(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	颗粒数量/个	颗粒组分质量/t	颗粒质量分数	颗粒组分体积/ m^3	颗粒体积分数
0.075	5	0.002	2.831	39	0.195	0.008	0.069	0.008
0.110	16	0.006	2.656	100	1.626	0.067	0.612	0.067
0.160	50	0.019	2.659	100	5.000	0.207	1.881	0.206
0.260	195	0.074	2.650	23	4.485	0.185	1.692	0.185
0.300	279	0.105	2.645	15	4.178	0.173	1.580	0.173

注: 组分质量、组分体积为某一粒径的块石在整个抛石群内总的质量、体积的大小。

3 抛石下落规律分析

3.1 不同粒径颗粒下落位置随时间的变化

以抛石粒径为单一变量, 通过对 5 种粒径分别为 0.075 、 0.110 、 0.160 、 0.260 、 0.300 m 的颗粒在水中运动过程的模拟, 得到了颗粒的运动轨迹, 其沉降时间-水平移距关系曲线如图 1 所示。可以看出, 在其他条件不变的情况下, 改变颗粒的粒径对水平移距的影响相对较大。粒径越小者, 水平漂移距离越远, 运动停止也越慢, 而当块石粒径大于等于 0.26 m 时, 块石在下落过程中漂移现象并不显著。

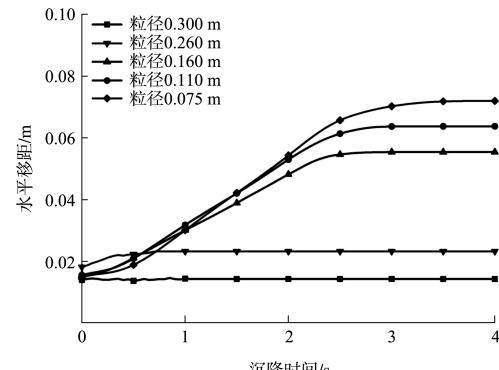


图 1 不同粒径颗粒水平移距随时间变化

3.2 不同流速下不同粒径颗粒沉降时间的变化

分别以颗粒粒径为 0.075 、 0.110 、 0.160 、

0.260、0.300 m, 水流流速为 1.00、1.25、1.50、2.00 m/s 进行模拟。5 种不同粒径颗粒在 4 种水流流速下的沉降时间变化如图 2 所示。可以看出, 若控制其他变量, 只改变水流的初始速度, 则相同粒径的颗粒随流速的增加, 其沉降时间越久; 而在相同的流速条件下, 颗粒的粒径越大, 则沉降时间越短。

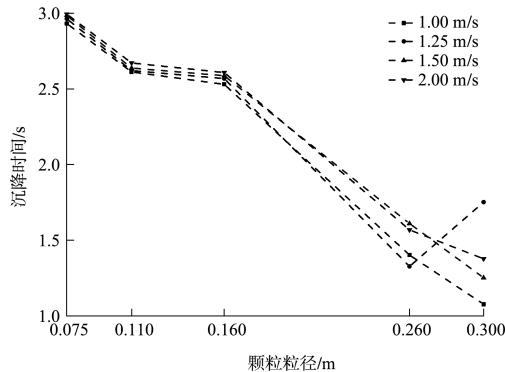
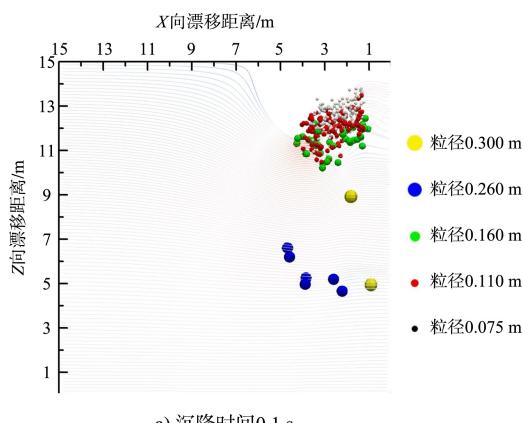


图 2 不同流速下 5 种粒径颗粒的沉降时间变化

3.3 不同粒径抛石群扩散过程及流场分布

在 CFD-DEM 耦合算法中, 一定迭代步数后会更新颗粒位置以更新流场网格中的体积分数, 流场的流线也随着颗粒的运动发生变化。由于颗粒间相互碰撞与摩擦, 初始阶段分布在生成区域前端的颗粒由于后部颗粒的碰撞会在抛投过程中不断向前扩散, 而后部颗粒由于在碰撞中将动量传递至前部颗粒, 漂距相较于前部颗粒较小。在 2.0 m/s 流速下, 不同粒径颗粒组成的抛石群抛投后在水下的扩散过程及流场形态如图 3 所示。可以明显看出粒径大的颗粒首先开始沉降且水平漂距较近, 粒径较小颗粒沉降时间较长并且水平漂距相对较远, 同时会产生一定的堆积现象。



a) 沉降时间 0.1 s

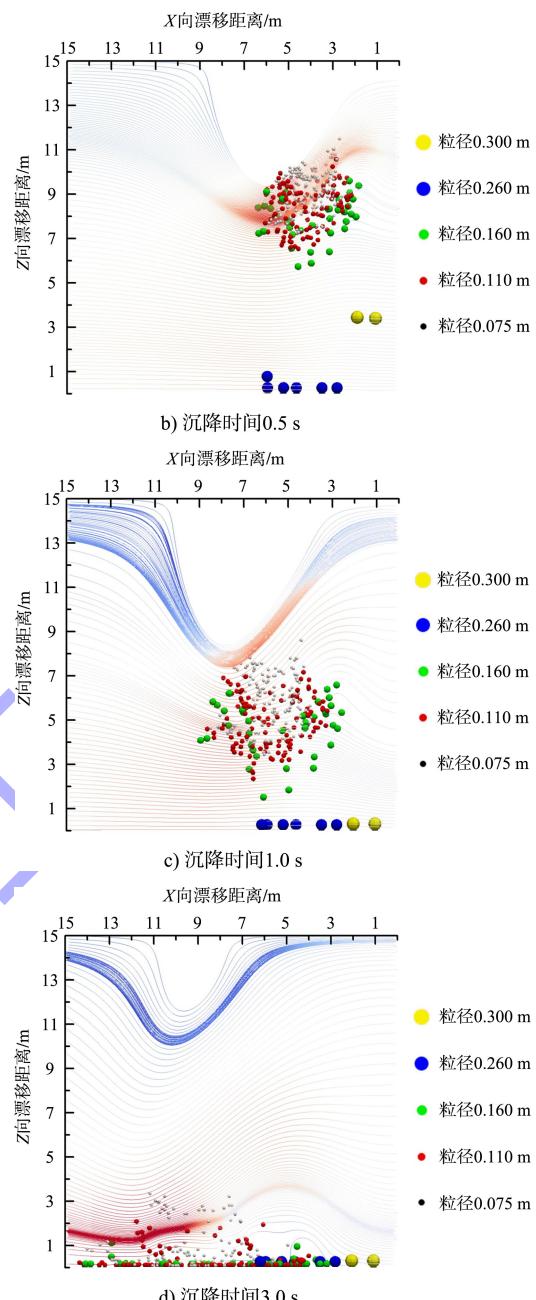


图 3 抛石群抛投后颗粒扩散过程及流场侧视图

3.4 不同流速下抛石群的落点分布

模拟不同粒径块石在水流条件分别为 1.00、1.25、1.50 及 2.00 m/s 下进行群抛, 得到的块石颗粒落至底床后的分布形态如图 4 所示。可以看出, 不同粒径的块石颗粒群抛投后落至床底后的分布形状较为不规则。在流速相同的条件下, 粒径越小者漂移的距离越远, 而粒径大者落地距离较近。通过图 4a)~d) 对比可看出, 流速大的情况下各个粒径颗粒的漂距都较远, 流速小时则漂距相对较近。

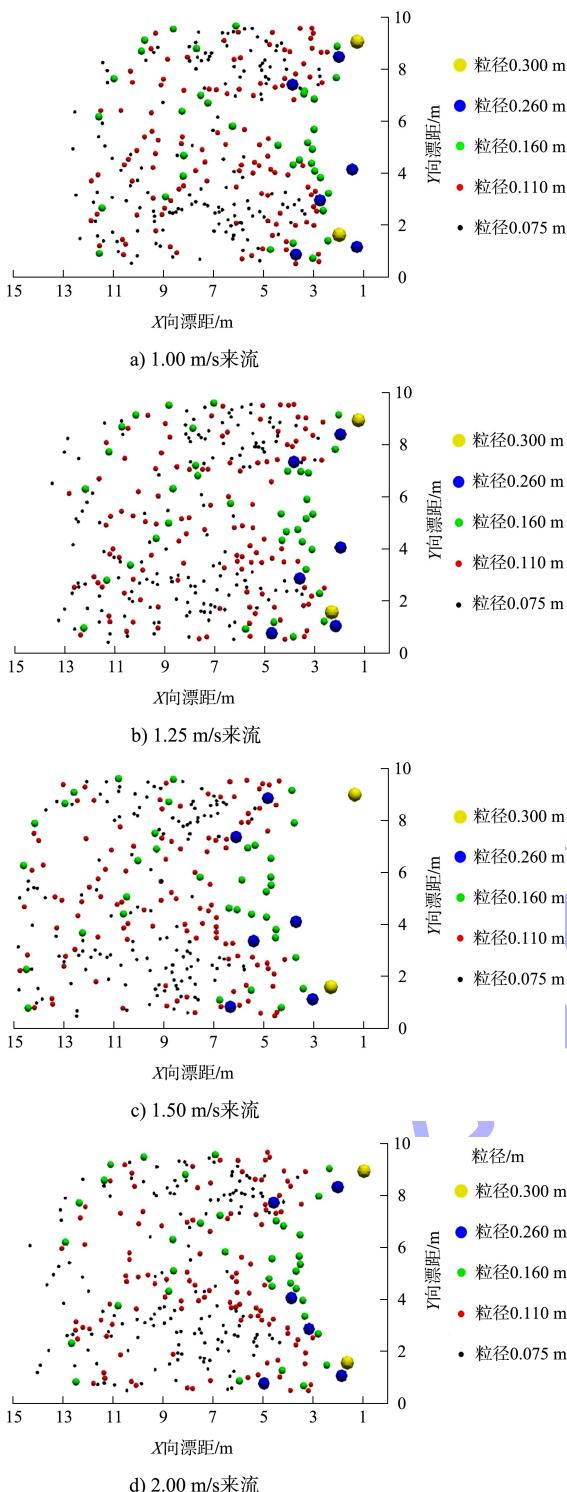


图4 不同流速下不同粒径颗粒落点分布

4 结论

1) 在同一场中, 多粒径块石颗粒群抛过程中, 块石落点分布不规则。仿真结果表明, 由于前部颗粒与后部颗粒之间的相互碰撞以及块石粒径差异造成的重力分量不同, 块石的漂距表现为由最小漂距与最大漂距间的随机分布。

2) 在相同来流条件下, 多粒径块石群中的粗粒径块石漂距显著小于细粒径块石, 粒径大于等于0.26 m的块石在下落过程中漂移现象不显著。

3) 相同的流速条件下, 由于块石运动过程中块石所受外力中重力分量随块石粒径增加而增加, 块石沉降时间随块石粒径增加而显著增加。因此, 在实际工程中应结合相关规范, 尽量选取粗粒径块石, 以提高块石群抛的施工精度。

参考文献:

- [1] 刘一恒, 钟世位. 长江航道整治工程水下抛石施工工艺及质量控制研究[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(10): 131-133.
- [2] 梁润. 河道截流的抛石抗冲稳定流速及稳定移距[J]. 武汉水利电力学院学报, 1978(1): 41-50.
- [3] 詹义正. 球体在动水中的移距公式及其应用[J]. 泥沙研究, 1992(4): 85-91.
- [4] 姚仕明, 卢金友. 抛石护岸工程试验研究[J]. 长江科学院院报, 2006(1): 16-19.
- [5] 韩海骞, 杨永楚, 王卫标, 等. 钱塘江河口闻家堰段护底抛石研究[J]. 泥沙研究, 2002(2): 29-35.
- [6] 李小超, 常留红, 李凌, 等. 水槽混合石料群抛试验[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 76-80, 94.
- [7] 张强强. 基于DEM-CFD耦合的颗粒在水中沉降过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [8] 陈凯华, 石崇, 梁邦炎, 等. 水下抛石基床动态形成过程数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(31): 314-319.
- [9] 刘卡, 高辰龙, 周玉. 基于CFD-DEM方法的水下抛石运动模拟研究[J]. 中国水运(航道科技), 2016(6): 1-9.
- [10] 李卫国. 基于CFD-DEM耦合的抛石水下漂移数值模拟[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- [11] TSUJI Y, TANAKA T, ISHIDA T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe[J]. Powder technology, 1992, 71(3): 239-250.
- [12] ZHU H P, ZHOU Z Y, YANG R Y, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: theoretical developments[J]. Chemical engineering science, 2007, 62(13): 3378-3396.
- [13] HILL R J, KOCH D L, LADD A J C. The first effects of fluid inertia on flows in ordered and random arrays of spheres[J]. Journal of fluid mechanics, 2001, 448(1): 213-241.

(本文编辑 王璁)