

# 基于EDEM的混凝土垂直溜送研究

张皓, 余本辉, 张景娴

西京学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2023年3月21日; 录用日期: 2023年4月16日; 发布日期: 2023年4月23日

## 摘要

垂直溜送是大断面、大深度竖井施工中大体量混凝土的主要输送方式, 具有重力输送低能耗低成本、连续入仓高效快捷、地面场地易布置等突出优点。但由于落差大、落速高, 易发生混凝土离析, 严重影响混凝土输送效果和浇筑质量。上述问题的基本解决思路是在溜管中安装缓冲装置, 进而控制混凝土落速。本文通过离散元软件EDEM对混凝土颗粒进行参数标定, 使用JKR接触模型来对混凝土的骨料颗粒进行建模, 以颗粒表面能的大小来表征混凝土颗粒之间的黏结度, 模拟混凝土颗粒在垂直溜送中的动态变化, 分析不同角度的挡板缓冲装置对其速度变化的影响, 为混凝土垂直溜送技术提供理论依据。

## 关键词

混凝土垂直溜送, 挡板缓冲装置, EDEM, JKR黏结模型

# Research on Concrete Vertical Transport Based on EDEM

Hao Zhang, Benhui Yu, Jingxian Zhang

Shaanxi Key Laboratory of Safety and Durability of Concrete Structure, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 21<sup>st</sup>, 2023; accepted: Apr. 16<sup>th</sup>, 2023; published: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2023

## Abstract

Vertical transportation is the main transportation method of large-volume concrete in the construction of large-section and large-depth vertical shaft. It has such outstanding advantages as low energy consumption and low cost of gravity transportation, efficient and quick continuous warehousing, and easy layout of ground and site. However, due to the large drop and high falling speed, concrete segregation is easy to occur, which seriously affects the concrete conveying effect and pouring quality. The basic solution to the above problem is to install a buffer device in the pipeline to control the concrete speed. In this paper, the discrete element software EDEM is used to carry

out parameter calibration of concrete particles, and the JKR contact model is used to model the aggregate particles of concrete. The surface energy of particles is used to characterize the bonding degree between concrete particles, simulate the dynamic changes of concrete particles in vertical transportation, and analyze the influence of different angle baffle buffering devices on their velocity changes. It provides theoretical basis for concrete vertical transportation technology.

## Keywords

Concrete Vertical Transport, Baffle Buffer Structure, EDEM, JKR Bonding Model

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,我国国内水利工程快速发展,在建和拟建水电站也多处于高山峡谷且规模较大,抽水蓄能工程更是进入新的阶段,竖井形式的深长引水洞和深大调压井成为常态建筑物。如图 1 所示,混凝土垂直溜送具有重力输送低能耗低成本、连续入仓高效快捷、地面场地易布置等突出优点,因而成为大断面、大深度竖井施工中大体量混凝土的主要输送方式。但由于落差大、落速高,易发生混凝土离析,在溜管中安装缓冲装置将溜管分段,形成混凝土分段控制溜送工艺,进而控制混凝土落速,减小混凝土在高速下落过程中的离析,提高混凝土输送效果和浇筑质量。

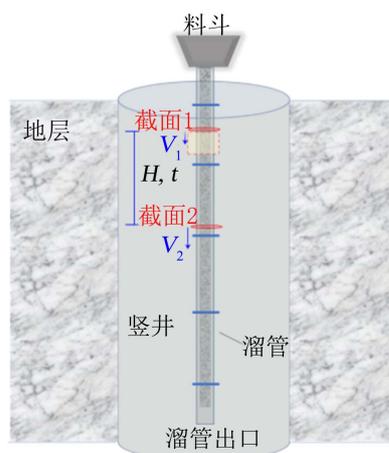


Figure 1. Schematic diagram of vertical transport of concrete in shaft

图 1. 竖井混凝土垂直溜送示意图

现如今已经有很多国内外学者对有相互作用力的颗粒采用 JKR 接触模型来进行建模。聂超超通过 JKR 接触模型对混凝土颗粒进行模拟,研究混凝土颗粒与搅拌车内的搅拌叶片之间的运动关系,并通过 EDEM 软件对搅拌车的搅拌叶片进行重新设计优化[1]。王本武基于 JKR 模型对混凝土泵送施工过程中的管路进行优化和管道监测[2]。张路敏基于 JKR 模型对混凝土在泵送过程中对弯管段泵送压力损失进行了研究[3]。但垂直溜送下的速度控制和离析问题仍然未能解决,严重制约水电竖井建设。本文拟基于室内试验,采用 EDEM 软件开展混凝土的垂直溜送研究。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 离散元模型

JKR 颗粒的接触模型是最早由 JOHNSON 等学者提出, 并以 JOHNSON、KENDALL、ROBERTS 的名字进行命名, 引入了颗粒表面能的概念, 使颗粒之间的凝聚力通过表面能来表达的接触模型, 可以用来表征颗粒之间黏结度的大小, 能够较好的模拟具有黏结力的颗粒间或含水湿颗粒间的力学行为。基于 JKR 接触模型, 可以用于混凝土颗粒的建模, 其理论公式如下[4]:

$$F_{JKR} = -4\sqrt{\pi\gamma E^*} \alpha^{3/2} + \frac{4E^*}{3R^*} \alpha^3 \quad (1)$$

式中:  $F_{JKR}$  ——法向弹性接触力;

$\gamma$  ——表面能;

$E^*$  ——弹性模量;

$\alpha$  ——切向重叠量;

$R^*$  ——等效接触半径。

而法向重叠量( $\delta$ )与切向重叠量( $\alpha$ )的关系存在如下关系式:

$$\delta = \frac{\alpha^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha}{E^*}} \quad (2)$$

### 2.2. 实验设备

基于 EDEM 软件, 为了保证混凝土仿真模拟的真实性, 本试验依据实际的混凝土坍落度筒设备, 按照 1:1 的比例建立坍落度筒仿真模型, 如图 2 所示, 在 EDEM 中将坍落度筒的材料定义为钢, 其密度为  $7800 \text{ kg/m}^3$ , 剪切模量为  $7 \times 10^{10} \text{ Pa}$ , 泊松比为 0.3。坍落度筒的顶部直径为 10 cm, 底部直径为 20 cm, 筒高为 30 cm。



Figure 2. Slump test equipment  
图 2. 坍落度试验设备

### 2.3. 实验材料

混凝土颗粒仿真模拟的材料参数如表 1 所示, 其中坍落度筒材料为钢, 表面无缝隙, 混凝土颗粒由砂浆颗粒和粗骨料颗粒组成。实际中砂浆颗粒较小, 在模拟中可以将多个砂浆颗粒看成一个整体, 故采用一个较大的颗粒来代表砂浆。因此在对混凝土颗粒进行仿真模拟建模时, 将砂浆颗粒进行放大设置, 设定其半径为 5 mm, 粗骨料半径设定为 10 mm。颗粒之间的初始参数区间如表 2 所示[5]。由此得到混凝土坍落度模型如图 3 所示。

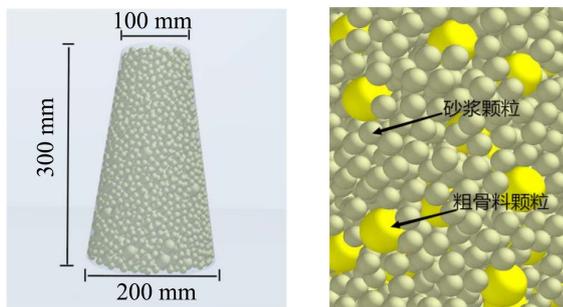


Figure 3. Concrete slump model  
图 3. 混凝土坍落度模型

Table 1. Material parameter

表 1. 材料参数

材料	泊松比	剪切模量/( $\times 10^8$ Pa)	密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
钢	0.3	700	7800
砂浆	0.25	200	2100
粗骨料	0.25	20	2600

Table 2. Initial contact parameter interval between materials

表 2. 材料间初始接触参数区间

接触参数 参数	恢复 系数	静摩擦 系数	滚动摩擦 系数	JKR 表面能 ( $\text{J}/\text{mm}^2$ )
砂浆 - 砂浆	0.01	0.03~0.50	0.04~0.40	1~12
粗骨料 - 粗骨料	0.15	0.05~0.30	0.01~0.30	0~10
砂浆 - 粗骨料	0.05	0.10~0.30	0.05~0.25	0~6
砂浆 - 钢	0.03	0.10~0.80	0.05~0.80	0~4
粗骨料 - 钢	0.20	0.01~0.60	0.03~0.20	0~3

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 控制变量法确定合适参数

通过改变表 2 中颗粒间的接触参数, 进行坍落度模拟试验, 测量模拟混凝土坍落后的堆积高度, 其中砂浆 - 砂浆恢复系数为 0.01, 滚动摩擦系数为 0.12; 砂浆 - 骨料恢复系数为 0.05, 滚动摩擦系数为 0.06; 骨料 - 骨料恢复系数为 0.15, 滚动摩擦系数为 0.05; 砂浆 - 钢恢复系数为 0.03, 滚动摩擦系数为 0.09; 骨料 - 钢恢复系数为 0.2, 滚动摩擦系数为 0.03。如图 4(a)所示, 经过多次坍落度模拟, 通过 EDEM 后处理测量工具获得堆积高度, 得到表 3。通过表 3 可以直观的看出改变颗粒间的静摩擦系数、JKR 表面能参数对于混凝土堆积高度的影响。

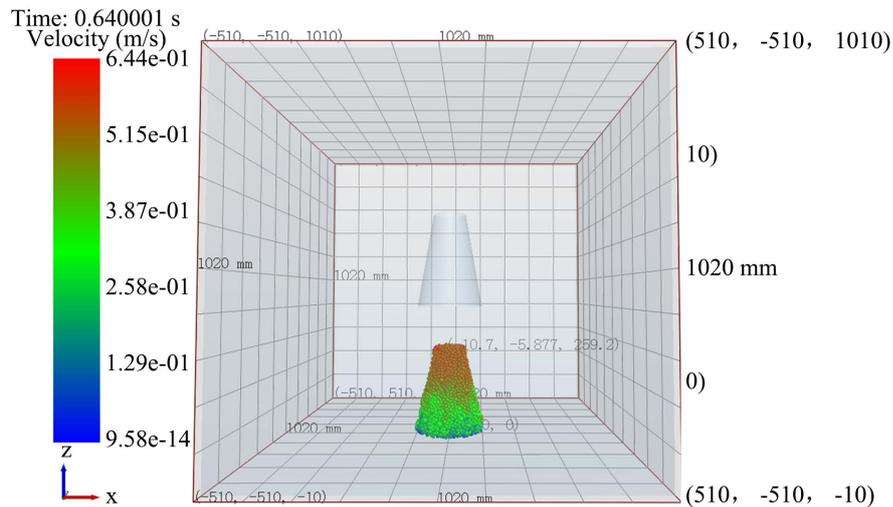
Table 3. Simulation test and result of concrete slump

表 3. 混凝土坍落度仿真试验及结果

试验号	骨料 - 骨料 JKR 表面能( $\text{J}/\text{mm}^2$ )	骨料 - 砂浆 JKR 表面能( $\text{J}/\text{mm}^2$ )	砂浆 - 砂浆 JKR 表面能( $\text{J}/\text{mm}^2$ )	砂浆 - 砂浆 静摩擦系数	混凝土堆积高度 (mm)
1	1.2	3	8	0.16	76.74

Continued

2	1.2	6	12	0.16	71.95
3	1.2	3	8	0.36	63.48
4	1.2	3	11	0.16	71.52
5	1.2	5	11	0.16	67.91
6	1.2	5	11	0.36	65.29



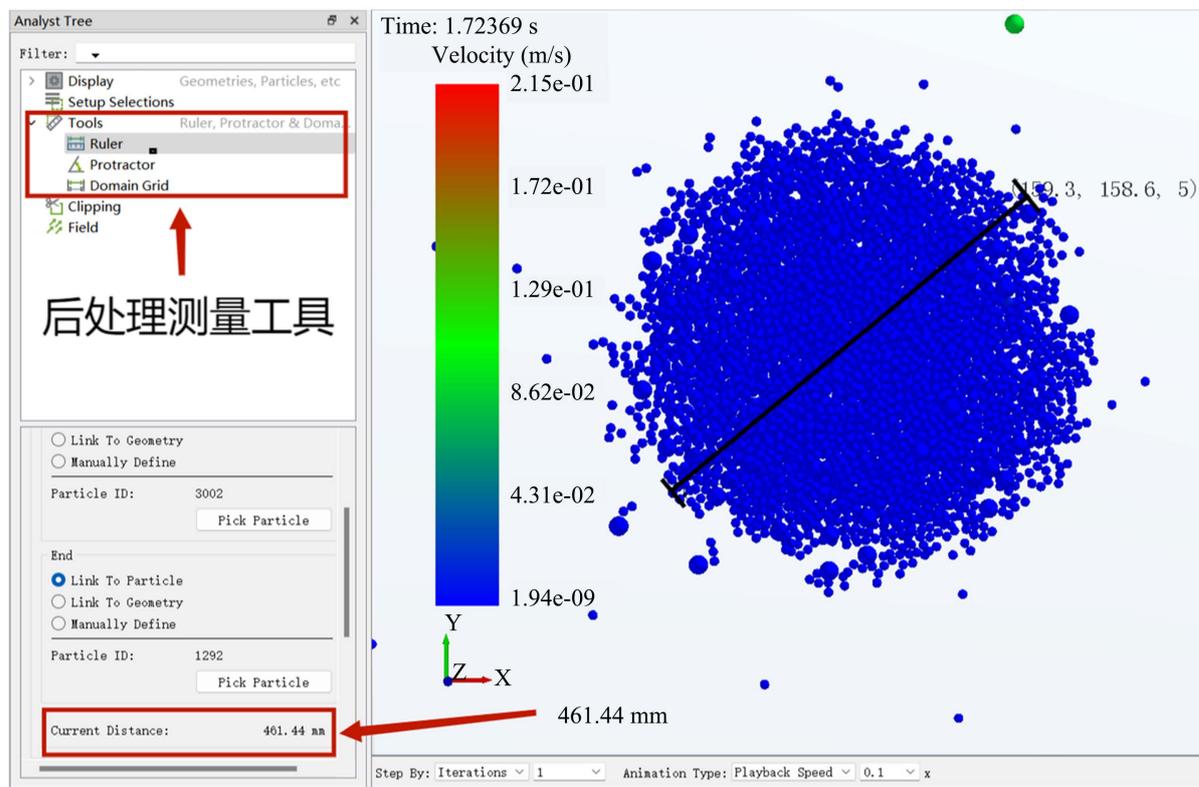
(a) 混凝土模拟坍落度



(b) 现场试验混凝土坍落度

**Figure 4.** Concrete slump simulation and actual comparison**图 4.** 混凝土坍落度仿真模拟与现场实际对比图

本次坍落度现场试验采用的是江苏铸本众鑫混凝土工程有限公司的新拌混凝土，现场试验堆积高度如图 4(b)所示为 80 mm，与表 3 试验 1 的混凝土堆积高度 76.74 mm 比较吻合。然后再通过 EDEM 后处理测量工具对表 3 试验 1 的混凝土颗粒的摊铺直径进行测量，由图 5(a)可知，混凝土颗粒流动速度为零后扩展度为 461.44 mm，现场实测的混凝土扩展度如图 5(b)所示为 460 mm，模拟结果与实测数值相对比，发现建立的混凝土离散元仿真模型在颗粒的流动性能方面与实际混凝土颗粒的运动情况较为一致，可采用该组参数来模拟混凝土在垂直溜送管道中的流动过程，并分析混凝土垂直溜送模拟状态下砂浆颗粒和骨料颗粒的速度变化。



(a) 仿真坍塌试验摊铺直径



(b) 现场坍塌试验摊铺直径

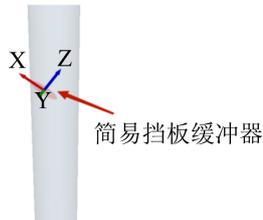
**Figure 5.** Concrete collapse spread diameter simulation and actual comparison**图 5.** 混凝土坍塌摊铺直径仿真与实际对比图

### 3.2. 缓冲装置对混凝土颗粒速度影响分析

现场溜管如图 6(a)所示[6], 为直径 220 mm、壁厚 10 mm 的光滑无缝钢管, 每一节的长度均为 6 m, 每一节溜管之间的连接方式为法兰连接。溜管的缓冲器选择方便安装、简易的半圆形挡板缓冲器, 挡板缓冲器与溜管轴线为  $45^{\circ}\sim 60^{\circ}$  夹角, 安装在每节钢管底部。参考现场溜管, 仿真模拟溜管如图 6(b)所示, 为直径 220 mm 的无缝钢管, 设置长度为 13 m, 溜管底部开口距离仓底 0.5 m, 溜管内部每间隔 4 m 设置一个圆形挡板作为简易缓冲器, 共设置 3 个缓冲器。在溜管顶部设置颗粒生成工厂如图 7(a), 骨料颗粒生成速率为 1000 个/秒, 砂浆颗粒生成速率为 14,000 个/秒。然后分别在溜管的 0.5 m、3.5 m、6.5 m、9.5 m、12.2 m 处设置一个 10 cm 高度的测速区域如图 7(b), 通过 EDEM 软件后处理系统得到通过测速区域的颗粒平均速度, 以此来分析溜管高落差垂直向下输送混凝土时骨料离析的现象。

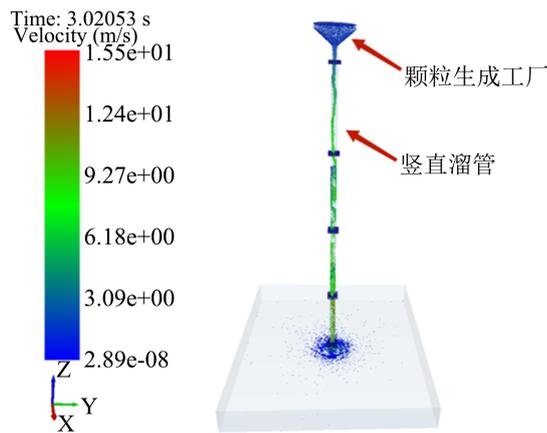


(a) 挡板缓冲器布置示意图

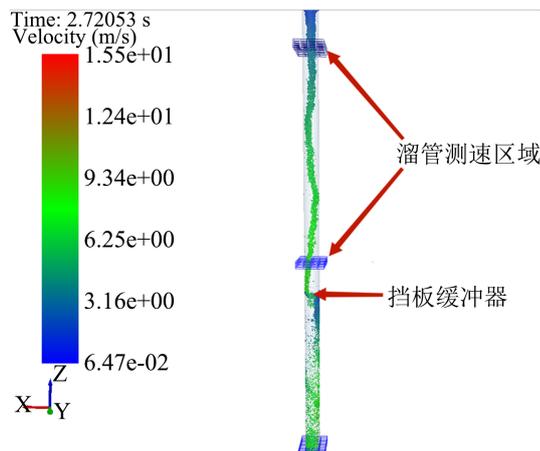


(b) 仿真模拟挡板缓冲器

Figure 6. Schematic diagram of concrete chute baffle buffer  
图 6. 混凝土溜管挡板缓冲器示意图



(a) 颗粒工厂及溜管示意图



(b) 测速区域及缓冲器示意图

Figure 7. Concrete vertical transportation simulation  
图 7. 混凝土垂直溜送仿真模拟

溜管内未设置挡板缓冲器时测速区域混凝土颗粒速度如图 8(a)所示, 溜管 12.2 m 处骨料颗粒平均速度为 15.465 m/秒, 砂浆颗粒平均速度为 15.134 m/秒, 骨料颗粒与砂浆颗粒速度差为 0.331 m/秒。

溜管内设置挡板缓冲器与溜管轴线呈 45°夹角时测速区域混凝土颗粒速度如图 8(b)所示, 溜管 12.2 m 处骨料颗粒平均速度为 9.87 m/秒, 砂浆颗粒平均速度为 9.652 m/秒, 骨料颗粒与砂浆颗粒速度差为 0.218 m/秒。

溜管内设置挡板缓冲器与溜管轴线呈 60°夹角时测速区域混凝土颗粒速度如图 8(c)所示, 溜管 12.2 m 处骨料颗粒平均速度为 7.824 m/秒, 砂浆颗粒平均速度为 7.677 m/秒, 骨料颗粒与砂浆颗粒速度差为 0.147 m/秒。

溜管内设置挡板缓冲器与溜管轴线呈 55°夹角时测速区域混凝土颗粒速度如图 8(d)所示, 溜管 12.2 m 处骨料颗粒平均速度为 7.969 m/秒, 砂浆颗粒平均速度为 7.863 m/秒, 骨料颗粒与砂浆颗粒速度差为 0.106 m/秒。

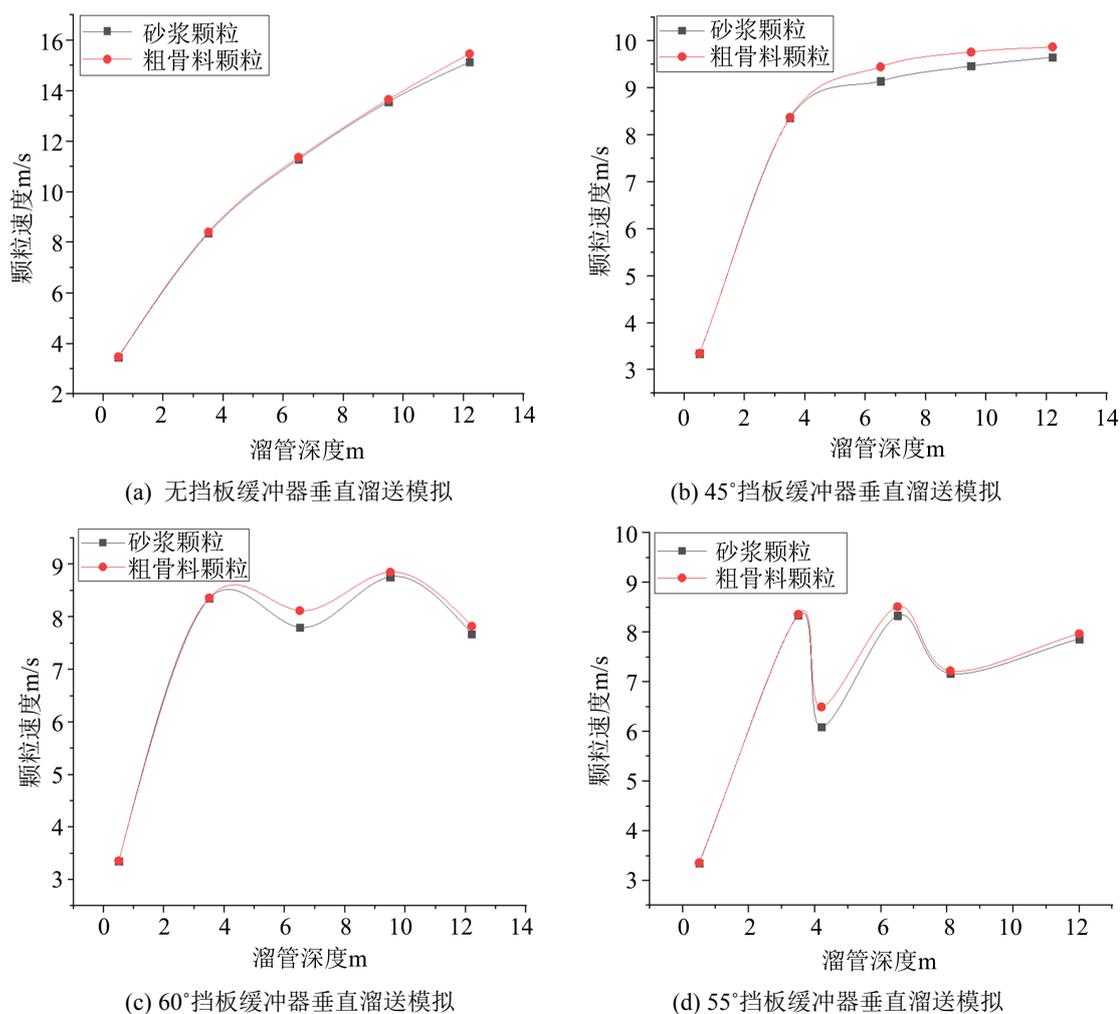


Figure 8. Effect of buffering device on velocity variation of concrete particles

图 8. 缓冲装置对混凝土颗粒速度变化影响

通过图 8 可以明显看出设置挡板缓冲器后溜管出口的混凝土颗粒速度有了显著下降, 且骨料颗粒和砂浆颗粒的速度差也有了显著下降, 说明设置挡板缓冲器可以起到很好的缓冲作用。

## 4. 结论

1) 基于离散元软件 EDEM, 建立基于 JKR 的混凝土颗粒接触模型, 通过控制变量法改变砂浆 - 砂浆、骨料 - 骨料、砂浆 - 骨料、砂浆 - 钢、骨料 - 钢的接触参数, 进行多组混凝土坍落度试验, 得到颗粒堆积高度和摊铺直径, 再与现场实际坍落度试验数据对比, 确定混凝土仿真模拟的合适参数为砂浆 - 砂浆 JKR 表面能  $8 \text{ J/mm}^2$ 、骨料 - 骨料 JKR 表面能  $1.2 \text{ J/mm}^2$ 、砂浆 - 骨料 JKR 表面能  $3 \text{ J/mm}^2$ 。

2) 在上述混凝土垂直溜送试验中可以看出, 安装挡板缓冲器后, 溜管出口混凝土颗粒速度下降显著, 挡板缓冲器与溜管轴线呈  $45^\circ \sim 60^\circ$  夹角时均未出现混凝土堵管现象, 且溜管内设置挡板缓冲器与溜管轴线呈  $55^\circ$  夹角时溜管出口骨料颗粒和砂浆颗粒的速度差最小。说明在溜管内安装缓冲器能够有效地控制高落差条件下的混凝土下落速度, 可以有效地解决混凝土拌和物中骨料与砂浆的离析问题。

## 参考文献

- [1] 聂超超. 混凝土搅拌车搅拌叶片优化设计及其离散元分析[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [2] 王本武. 混凝土泵送管道振动和应力监测及数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [3] 张路敏. 混凝土泵送垂直弯管压力损失研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [4] Johnson, K.L., Kendall, K. and Roberts, A.D. (1971) Surface Energy and Contact of Elastic Solids. *Proceedings of the Royal Society A*, **324**, 301-313. <https://doi.org/10.1098/rspa.1971.0141>
- [5] 张珂, 于天行, 于文达, 邹德芳, 张世英. 基于 JKR 黏结模型的混凝土离散元参数标定[J]. 混凝土, 2020(8): 46-50+55.
- [6] 魏立鸿. 高埋深垂直溜管运输混凝土施工工艺分析[J]. 山西水利, 2021, 37(5): 30-32.