

DOI: 10.11779/CJGE2024S10006

# 宽级配土离心试验地基模型落雨法分层机制与数值模拟

张旭东<sup>1,2</sup>, 王永志<sup>\*1,2</sup>, 王体强<sup>1,2</sup>, 段雪峰<sup>1,2</sup>, 袁晓铭<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 地震灾害防治应急管理重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 落雨法因其在模型制备过程与自然条件下砂土沉积过程相似, 因而成为土工离心试验地基模型常用的模型制备手段, 但是有关落雨法研究主要集中于相对密度控制, 而对于分层现象关注较少, 尤其宽级配土。针对宽级配土落雨法制备过程出现的分层现象, 利用 PFC<sup>3D</sup> 数值模拟软件, 探讨了落雨法制备过程分层现象的物理机制和出砂口落距、移动速度、宽度对分层现象的影响。结果表明: 在真空介质中, 粗细颗粒不出现分层现象; 而在非真空介质中, 粗、细颗粒出现了分层现象, 原因为非真空环境下粗、细颗粒下落过程中产生了相对速度差, 内在机制为粗、细颗粒半径不同受到平均表面流体阻力不同, 从而造成不同粒径颗粒分离现象; 随环境介质密度的增加, 粗、细颗粒在下落过程中更易于发生分离, 出砂口落距、移动速度和流量对分层现象具有一定程度影响。

**关键词:** 落雨法; 宽级配土; PFC<sup>3D</sup>; 分层现象; 分层机制

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0122-05

作者简介: 张旭东(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事数值模拟仿真研究。E-mail: zxd15128266773@163.com。

## Numerical simulation of layered phenomena and mechanism of wide-graded soil deposits using pluviation method for centrifuge tests

ZHANG Xudong<sup>1,2</sup>, WANG Yongzhi<sup>1,2</sup>, WANG Tiqiang<sup>1,2</sup>, DUAN Xuefeng<sup>1,2</sup>, YUAN Xiaoming<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China)

**Abstract:** Because it is similar to the process of sand deposition under natural conditions, the sand pluviation has become a common method of model preparation for foundation models in geotechnical centrifugal tests. However, the researches on the sand pluviation mainly focus on the control of the relative density, and pays little attention to the layered phenomenon of sand, especially for wide-graded soils. Aiming at the layered phenomenon of sand in the preparation process of wide-graded soils by the sand pluviation method, the physical mechanism of layered phenomenon of sand in the process of rain preparation and the influences of falling distance, moving speed and width of sand outlet on the layered phenomenon of sand are discussed by using the PFC<sup>3D</sup> numerical simulation software. The results show that there is no layered phenomenon of coarse and fine particles in vacuum medium. In the non-vacuum medium, the coarse and fine particles have layered phenomena of sand, because the relative velocity difference occurs during the fall of the coarse and fine particles in the non-vacuum environment. The internal mechanism is that the average surface fluid resistance of the coarse and fine particles is different due to the different radii of the coarse and fine particles, resulting in the separation of particles with different particle sizes. With the increase of the density of the environment medium, the coarse and fine particles are more easily separated during the falling process, and the falling distance, moving speed and flow rate of the sand outlet have a certain influence on the layered phenomenon of sand.

**Key words:** pluviation method; wide-graded soil; PFC<sup>3D</sup>; sand layering phenomenon; sand layering mechanism

## 0 引言

宽级配土是重要的工程建设材料, 由于其具有压实性能好、抗剪强度高、渗透特性良好等优良的工程力学特性, 因此在工程建设中得到了广泛的应用, 如建筑土石坝、港口码头及软弱地基的处理等。随着宽

级配土在工程上的广泛应用, 国内外学者也对其开展

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目 (2023B14, 2023C11); 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2023E019)

收稿日期: 2024-05-01

\*通信作者 (E-mail: yong5893741@163.com)

了原位试验与室内试验的研究, 室内物理试验多为单元试验, 且在单元试验中发展了落雨法<sup>[1]</sup>, 同时广泛用于离心机试验、振动台试验等模型制备, 但是落雨法对宽级配土的适用性尚缺乏研究。

Zhao 等<sup>[2]</sup>利用自动落雨装置, 研究其对模型试样制备的能力, 发现设备能够在 1g 的条件下制备相对密实度在 50%至 90%之间的均匀细砂试样, 且 CPT 检测的平均值在 4%以内。Lagioia 等<sup>[3]</sup>采用落雨法, 研究在空气介质、水介质和真空条件下制备试样的密实度, 发现真空条件下制备试样的相对密实度可达到 140%, 指出真空落雨法可作为测定砂土最大干密度的一种标准方法。马险峰等<sup>[4]</sup>利用落雨法, 探讨了相对密实度随落距、出砂孔尺寸、出砂流量和移动速度的变化规律, 指出落距是影响相对密实度的主要因素。李浩等<sup>[5]</sup>采用落雨法, 分析了相对密实度空间均匀性分布特征, 发现模型箱中部附近的相对密实度分布均匀性都优于四边和四角。方薇等<sup>[6]</sup>利用 PFC<sup>3D</sup> 数值模拟的方法, 研究落雨成型过程及孔隙率的变化规律, 得出物理试验与数值模拟呈现相同的影响规律。

以上对落雨法制备模型的研究均是基于细粒土开展的相关工作, 而有关宽级配土的研究十分少见, 特别是在落雨法制备试样的过程中出现的分层现象鲜有研究。本文以 PFC<sup>3D</sup> 离散元数值模拟为工具, 结合对已有物理试验认识, 对落雨法制模过程中出现的分层现象进行分析, 为后续使用落雨法制备宽级配土模型提供借鉴与参考。

## 1 模型制备与分层现象

### 1.1 试验设备

此次试验所使用的设备为中国地震局工程力学研究所自主研发的自动落雨装置, 如图 1 所示。该装置由三个伺服电机来驱动, 可实现 XYZ 三个方向的运动, X 向最大移动距离 1.9 m; Y 向最大移动距离 1.0 m; Z 向最大移动距离 1.3 m, 机械臂移动速度范围: 0~900 mm/s, 加速度 0.1g, 砂箱容积 ≥ 180 L, 配有 1~10 mm 鸭嘴式出砂口, 可满足大多数模型试样制备的需求。

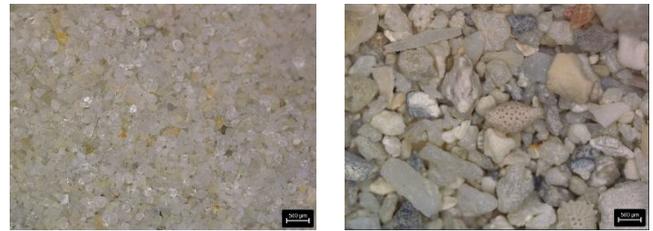


图 1 自动落雨装置

Fig. 1 Automatic mobile pluviator

### 1.2 试验材料

本次试验采用石英砂和珊瑚土两种不同性质的土样进行模型试验的制备。两种土体的微观特征如图 2 所示, 为了研究石英砂与珊瑚土在模型制备时存在的差异, 二者的级配曲线相同如图 3 所示, 表 1 为试验材料的基本物理力学参数。



(a) 石英砂

(b) 珊瑚土

图 2 土体试样微观特征

Fig. 2 Microscopic characteristics of soil samples

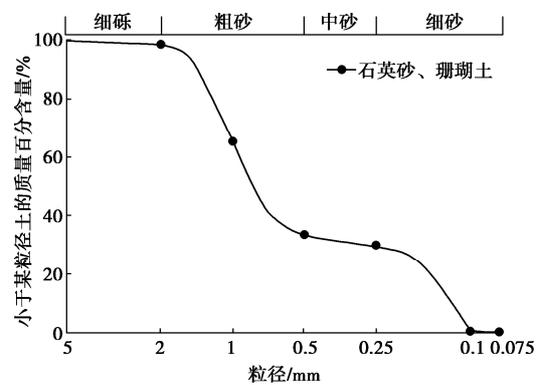


图 3 级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curve

表 1 试验材料物理指标

Table 1 Physical indexes of test materials

试验材料	$G_s$	$\rho_{\max} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho_{\min} / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$d_{10} / \text{mm}$	$d_{30} / \text{mm}$	$d_{50} / \text{mm}$	$d_{60} / \text{mm}$	$C_u$	$C_c$
石英砂	2.63	1.962	1.611	0.1490	0.2530	0.7590	0.916	6.15	0.47
珊瑚土	2.78	1.750	1.289	0.1490	0.2530	0.7590	0.916	6.15	0.47

### 1.3 试验方案

根据落距、出砂口尺寸、出砂流量和移动速度的影响, 对相对密实度进行标定, 并根据目标相对密实度进行宽级配土地基模型的制备。但在标定过程中, 研究人员发现试验土样在模型箱内部出现了粗细颗粒交替分布的分层现象, 如图 4 所示。这种粗细颗粒分层现象对于液化离心试验将产生极为不利的影响, 由于砂土颗粒粒径小, 试验过程中难以直接观察到其分层现象的发生, 所以本文利用 PFC<sup>3D</sup> 软件, 对分层现象的影响及发生机制进行了模拟。

## 2 PFC<sup>3D</sup> 离散元数值模拟

### 2.1 建模方法

采用 PFC<sup>3D</sup> 离散元数值分析软件对落雨法制模过程中出现的砂土颗粒分层现象进行模拟, 由于物理模型试验所采用的砂颗粒数目十分巨大, 如果在模拟中取实际粒径将导致计算效率大大降低, 因此在此次模拟中对颗粒粒径进行了相应的放大处理<sup>[7]</sup>, 且本文只研究颗粒间的运动及状态, 故在模拟中没有考虑颗粒形状的影响, 为简化起见, 将砂土颗粒理想化成球形颗粒。模拟中模型箱尺寸为 100 cm×10 cm×200 cm, 出砂口的水平移动通过赋予砂箱的水平向速度来实现, 模型初始状态如图 5 所示, 模型参数见表 2。



(a) 石英砂分层现象 (b) 珊瑚土分层现象  
图 4 分层现象

Fig. 4 Layered phenomena

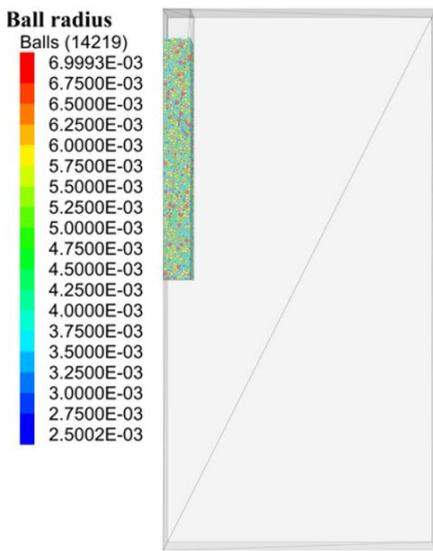


图 5 落雨制样模型

Fig. 5 Sand pluviation sample model

表 2 参数设置

Table 2 Parameter setting

微观参数	值
颗粒间接触模型	Hysteretic model
颗粒与墙体间接触模型	Linear model
颗粒剪切模量/MPa	50
颗粒与墙体切向刚度/MPa	100
颗粒与墙体法向刚度/MPa	100
粒径/mm	5~14
颗粒密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2650
泊松比	0.2
摩擦系数	0.1
阻尼	0.1
重力加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	9.81

## 2.2 环境介质密度对分层现象的影响

在模拟落雨法制模过程中设置了真空条件和非真空条件, 砂箱移动速度为 0.1 m/s, 粒径不同时, 粒径范围为 5~14 mm, 从图 6 可以观察到, 在真空条件下, 没有出现颗粒分层现象, 而在非真空介质密度中, 出现了颗粒分层现象, 不同的介质密度会影响分层现象的发生, 并由此可推断, 相同条件下, 水中落雨法比空中落雨法更易出现分层现象。详细分析见文献[8]。

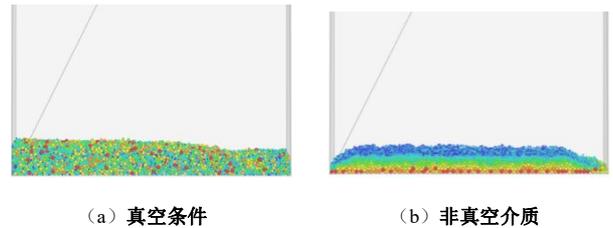


图 6 介质环境模拟

Fig. 6 Simulation of medium environment

## 2.3 落距对分层现象的影响

模拟条件为环境介质, 为了方便区分分层现象, 颗粒粒径采用 5 mm (蓝色颗粒) 和 8 mm (红色颗粒) 两种, 暂将 5 mm 颗粒定义为细粒, 8 mm 颗粒定义为粗粒, 砂箱移动速度为 0.1 m/s。从图 7 可以观察到, 当落距为 20 cm 时, 粗细颗粒均匀混合, 没有出现颗粒分层现象; 在 40 cm 落距以上时, 出现了粗粒在下, 细粒在上的颗粒分层现象, 且当落距在 60 cm 以上时, 粗细颗粒层的高度不再发生变化, 分层趋于稳定。

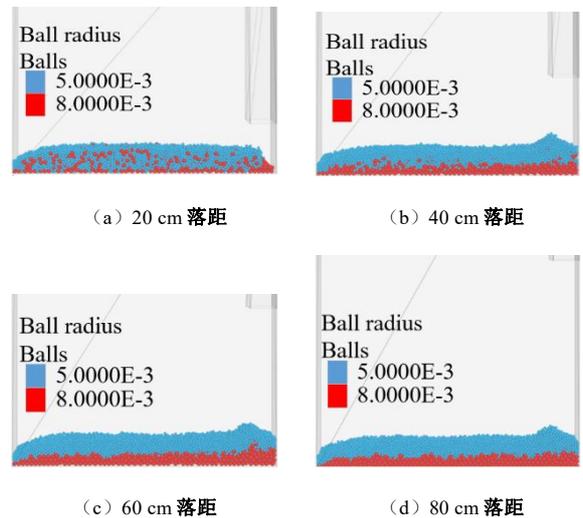


图 7 落距对分层现象的影响

Fig. 7 Effects of drop distance on layered phenomena of sand

## 2.4 移动速度对分层现象的影响

在模拟过程中, 保持落距为 100 cm, 其余条件不变, 从图 8 可以观察到, 在砂箱移动速度为 0.03 m/s 以下时, 分层现象相对不明显, 而是出现了由于速度缓慢而造成的堆积现象, 堆积起来的颗粒会出现向右侧滚动和滑动的现象, 导致了左侧颗粒高度大于右侧

颗粒高度; 移动速度 0.04 m/s 时, 出现了明显的颗粒分层现象, 且随着移动速度的增大, 颗粒层的高度略有降低, 与物理试验的结果一致。

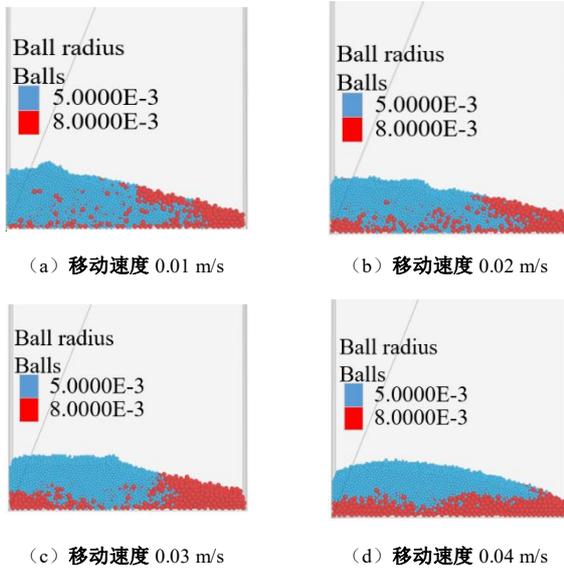


图 8 移动速度对分层现象的影响

Fig. 8 Effects of moving speed on layered phenomena of sand

## 2.5 流量大小对分层现象的影响

模拟过程中, 其砂箱尺寸为 8 cm×8 cm 和 10 cm×10 cm, 砂箱尺寸的大小决定了出砂量的大小, 故以孔径大小代表流量大小, 移动速度为 0.1 m/s, 落距为 100 cm, 可从图 9 观察到, 随着流量的增大, 颗粒层高度逐渐增加, 但分层现象并没有发生明显变化, 粗颗粒的层高与细颗粒层的层高比基本一致。

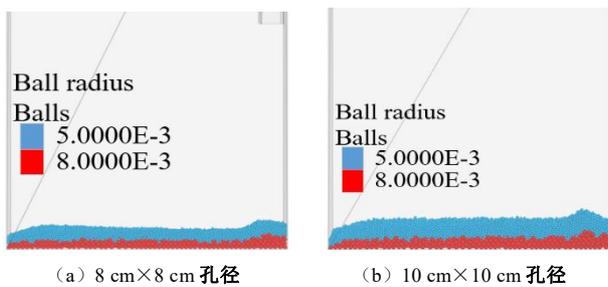


图 9 流量大小对分层现象的影响

Fig. 9 Effects of traffic volume on layered phenomena of sand

## 2.6 粒径比对分层现象的影响

在模拟中, 落距保持 100 cm, 移动速度为 0.1 m/s, 对颗粒的最大最小粒径比对分层现象的出现进行模拟, 模拟如图 10 所示。可以从图中观察到, 当粒径之比为 1 : 1.1 时, 没有出现明显的颗粒分层现象, 粗细颗粒混合在一起; 当粒径之比大于 1 : 1.2 时, 已经出现了较为明显的分层现象。这也说明了当级配较宽时, 不可避免的会出现颗粒分层现象。

综合以上结果分析, 只有在非真空环境下, 才会出现分层现象, 且在同一环境介质密度下, 颗粒的密度大小、落距、出砂口的移动速度、流量大小和粒径

之比的大小也会对分层现象的出现产生一定影响。

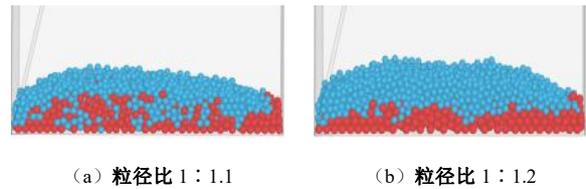


图 10 粒径之比对分层现象的影响

Fig. 10 Effects of particle size ratio on layered phenomena of sand

## 3 分层机制

根据已有的研究表明, 环境介质对落雨法成型过程有着一定影响, 这与模拟的结果一致, 如图 11 所示。根据单个球体在流体中下落状态力的平衡方程<sup>[9-10]</sup>式

(1), 可以得出颗粒从出砂口掉落瞬间, 就会在重力和阻力的共同作用下开始加速, 在下落过程中, 由于粗细颗粒的半径不同导致拖曳力不同, 从而导致了速度差, 因此在下落过程中, 粗细颗粒会发生分离, 导致沉积在模型箱内部的颗粒出现分层现象。

$$m_p \cdot g = m_p \cdot a + \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_a \cdot A \cdot v_v^2 \quad (1)$$

式中:  $m_p$  为颗粒质量;  $g$  为重力加速度;  $a$  为颗粒竖向加速度;  $C_d$  为竖向拖曳力系数;  $\rho_a$  为环境介质密度;  $A$  为颗粒迎流面的面积;  $v_v$  为颗粒竖向速度的分量。

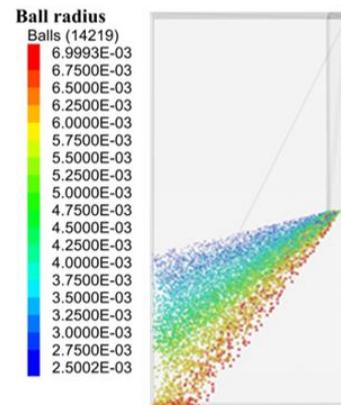


图 11 下落过程粗细颗粒分离

Fig. 11 Separation of coarse and fine particles during falling process

## 4 结 论

基于 PFC<sup>3D</sup> 离散元数值模拟的方法, 探讨落雨法制备宽级配土离心试验地基模型时出现的颗粒分层现象, 结论如下:

(1) PFC<sup>3D</sup> 可以模拟出落雨法制备模型过程中出现的颗粒分层现象, 模拟的结果与现有物理试验所得

规律性一致,证明了数值模拟方法具有可行性。

(2) 分层现象的本质为在非真空环境中,由于重力和阻力等力的耦合作用,使粗、细颗粒在下落过程中产生速度差,导致粗颗粒受力大先于细颗粒下落,细颗粒浮于粗颗粒上方,最终导致沉积在模型箱内部的颗粒出现分层现象。

(3) 随着环境介质密度的增大,粗、细颗粒在下落过程中更容易出现颗粒分离;在相同介质密度中,颗粒的密度、落距、出砂口移动速度和流量大小都会对分层现象产生一定影响。

#### 参考文献:

- [1] 吴建平, 顾尧章, 余祖国. 砂雨法成型中影响试样密度的因素[J]. 大坝观测与土工测试, 1990(3): 33-39. (WU Jianping, GU Yaozhang, YU Zugu. Factors affecting specimen density in pluviation[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 1990(3): 33-39. (in Chinese))
- [2] ZHAO Y, GAFAR K, ELSHAFIE M, et al. Calibration and use of a new automatic sand pourer[C]// International Conference on Physical Modeling in Geotechnics, ICPMG 2006. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2006.
- [3] LAGIOIA R, SANZENI A, COLLESELLI F. Air, water and vacuum pluviation of sand specimens for the triaxial apparatus[J]. Soils and Foundations, 2006, 46(1): 61-67.
- [4] 马险峰, 孔令刚, 方 薇, 等. 砂雨法试样制备平行试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1791-1800. (MA Xianfeng, KONG Linggang, FANG Wei, et al. Parallel tests on preparation of samples with sand pourer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1791-1800. (in Chinese))
- [5] 李 浩, 罗 强, 张 正, 等. 砂雨法制备砂土地基模型控制要素试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1872-1878. (LI Hao, LUO Qiang, ZHANG Zheng, et al. Experimental study on control element of sand pourer preparation of sand foundation model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(10): 1872-1878. (in Chinese))
- [6] 方 薇, 周志刚. 落砂成型过程及模型孔隙率影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(11): 2086-2093, 2164. (FANG Wei, ZHOU Zhigang. Sand-fall molding process and influencing factors of model porosity[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(11): 2086-2093, 2164. (in Chinese))
- [7] 蒋明镜. 现代土力学研究的新视野: 宏微观土力学[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(2): 195-254. (JIANG Mingjing. New paradigm for modern soil mechanics: geomechanics from micro to macro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(2): 195-254. (in Chinese))
- [8] 张旭东. 落雨法重塑宽级配土地基模型分层机制与控制方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2024. (ZAHNG Xudong. Research on Layered Mechanism and Control Method of Wide-Graded Soil Base Model Remodeling by Sand Pluviation[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2024. (in Chinese))
- [9] 王 海, 王永志, 袁晓铭, 等. 砂雨法饱和模型制样相对密度控制要素与评价方法[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 343-350, 372. (WANG Hai, WANG Yongzhi, YUAN Xiaoming, et al. Control factors and assessment technique of relative density using pluviation method for saturated model[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(2): 343-350, 372. (in Chinese))
- [10] 王浩然, 王永志, 王海, 等. 砂雨模型制备 PFC3D 的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2021(4): 68-74. (WANG Haoran, WANG Yongzhi, WANG Hai, et al. Numerical simulation of PFC3D-based model for sample reconstitution using sand pluviation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(4): 68-74. (in Chinese))

(编校: 明经平)