

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.05.031

铁路有砟道床振动和变形的 离散元模拟与试验验证

张 徐, 赵春发, 翟婉明, 冯 洋

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 运用三维激光扫描仪获取碎石道砟颗粒的几何形态, 构建了不规则形状的簇颗粒模型, 在此基础上建立了有砟道床三维离散元模型, 用于道床细观力学行为的离散元模拟分析。同时, 为了验证离散元模拟结果的可靠性, 开展了高速铁路有砟轨道 1:1 实尺模型试验, 获得了静态加、卸载和循环简谐荷载作用下道床的变形以及不同深度处道砟的振动响应。对比分析表明, 离散元模拟和试验获得的道砟振动加速度幅值接近, 随深度的衰减规律一致; 等效静态加、卸载条件下道砟的垂向变形以及循环荷载作用下道砟的累积变形均能够与试验结果吻合, 说明建立的三维道床离散元模型是合理的, 能够较为准确地模拟有砟道床的振动响应和累积变形行为, 可用于高速铁路有砟道床的细、宏观劣化机制研究。

关 键 词: 铁路道砟; 簇颗粒; 离散单元法; 实尺模型试验; 激光扫描

中图分类号: U 213.7

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2017)05—1481—08

Discrete element simulation and its validation on vibration and deformation of railway ballast

ZHANG Xu, ZHAO Chun-fa, ZHAI Wan-ming, FENG Yang

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: A three-dimensional (3D) discrete element model (DEM) is established to simulate micro- and macro-scale mechanical behaviors of railway ballast. In this model, the clump models with irregular shape are built to simulate the real ballast particle geometry morphology captured by using a 3D laser scanner. A full-scale model of high-speed railway ballasted track is conducted to validate the DEM model. The deformation and vibration response of railway ballast are obtained under the static load and the cyclic load in the laboratory. The amplitudes of the ballast acceleration and its attenuation law with the depth acquired by DEM simulation and experimental tests are close. Numerical results of the vertical deformation of railway ballast under the static loads and the permanent deformation under cyclic loads are good agreement with experimental data, which demonstrates that the established DEM model is reasonable. Therefore, the obtained vibration response and deformation of railway are reliable and relatively accurate. This DEM model can be used for subsequent analysis on the micro- and macro- mechanical behaviors and deformation of high-speed railway ballast.

Keywords: railway ballast; clump model; discrete element method; full scale model test; laser scanning

1 引 言

碎石道床是铁路有砟轨道的重要组成部分, 起着分散列车荷载、减振降噪和排水等功能。在列车荷载反复作用下, 道床容易出现累积变形、道砟磨损破碎、翻浆、板结等劣化现象, 导致线路维修工

作量大、养护成本高。长期以来, 国内外学者为此开展了大量的理论与试验研究^[1-5], 主要从宏观角度揭示了道床的力学性能与累积变形规律, 为铁路有砟道床的道砟选材、粒径匹配、截面形状设计以及施工维护方法等提供了理论支撑。但由于道床是人工堆积的散粒体结构, 经典的连续介质力学理论

收稿日期: 2016-07-27

资助项目: 国家自然科学基金项目 (No. U1234209, No.51578469); 国家重点基础研究发展计划项目 (No. 2013CB036205); 牵引动力国家重点实验室自主研究项目 (No. 2015TPL-T12)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (U1234209, 51578469), the National Key Basic Research Program of China (2013CB036205) and the Project of State Key Laboratory of Traction Power (2015TPL-T12).

第一作者简介: 张徐, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事高速及重载铁路轨道结构力学方面的研究工作。E-mail: xuzhang2013@126.com

通讯作者: 赵春发, 男, 1973 年生, 博士, 研究员, 主要从事铁路车辆与轨道系统动力学方面的研究工作。E-mail: cfzhao@swjtu.edu.cn.

不能充分描述其细观特征, 试验研究也难以获得道砟之间接触、移动、碰撞等细观力学行为, 因此, 有砟道床的劣化机制并未被充分揭示。另一方面, 因为普速铁路、重载铁路的列车运营速度低, 列车动荷载引起的道砟振动并不显著, 一般认为, 静轴重及其通过次数是道床累积变形的决定性因素。高速铁路的轮轨动力作用强烈, 显著的道砟振动会加剧道砟的重排、磨损与破碎, 这对道床服役性能的劣化具有不可忽视的影响, 但以往的研究很少关注道床的振动。可见, 对于高速铁路有砟道床而言, 传统的准静态研究方法及其某些研究结论并不完全适用, 而从细观尺度和动力学的角度研究道床的力学行为与劣化机制, 对高速铁路有砟轨道结构设计与运营维护技术的发展具有重要的理论意义。

近年来, 一些学者开始采用离散单元法模拟铁路有砟道床的细、宏观力学行为。离散单元法从颗粒尺度建模, 通过计算颗粒之间的接触力和颗粒运动来模拟颗粒体系内部的传力路径和宏观变形^[6], 理论上可以实现自下而上、由内向外地模拟道床力学性能与服役状态的演变。例如, Indraratna^[7]、Chen^[8]等采用离散单元法模拟道砟的直剪行为, 分析了脏污、土工格栅加固对道砟直剪行为的影响机制。张徐等^[9]采用黏结颗粒离散元模型模拟了道砟颗粒在静荷载作用下的变形与破碎行为, 并分析了道砟颗粒静态压碎过程中的变形规律与破碎机制。Tutumluer^[10]、孙珊珊^[11]、徐旻^[12]等建立道床离散元模型, 分析了循环荷载作用下道砟颗粒位置错动、重排等导致的累积变形行为。这些研究表明, 尽管离散元模型的参数确定及其大规模计算仍面临困难, 但它能够从颗粒层面描述道床的细、宏观力学行为, 在有砟道床劣化机制研究方面具有优势。

采用离散元方法模拟分析有砟道床的力学行为, 目前至少在以下两方面还需深入研究和改进。一方面, 道砟颗粒的不规则几何形态仍没有被充分或准确模拟。这在细观尺度上将会对道砟颗粒的细观组构, 接触力分布以及颗粒运动等力学行为的模拟产生显著影响。一些文献通过虚构簇颗粒单元模拟道砟颗粒^[7-8, 12], 这些簇颗粒单元虽然具有不规则形状, 但与道砟颗粒真实几何形状有显著差异。Tutumluer 等^[10]通过获得道砟颗粒 3 个方向的正交投影, 构建多面体单元模拟道砟。相对于虚构形状, 该方法描述了道砟颗粒的部分真实几何形态信息, 但形状模拟精度不高。另一方面, 当前采用离散元方法模拟道砟的准静态力学行为已经较为成熟, 也取得了一些较为可靠的模拟结果。但如何采用离散

元方法准确地模拟道砟在列车动荷载作用下的细、宏观动态行为, 这方面的研究目前较少。

针对上述铁路有砟道床离散元模拟研究中的不足之处, 本文构建了能够模拟道砟样本真实几何形状的簇颗粒离散单元库, 并以此为基础建立有砟道床的三维离散元模型, 模拟分析了简谐荷载和静荷载作用下有砟道床的振动和变形行为。同时, 利用高速铁路有砟轨道室内实尺模型试验台, 开展了道砟振动和道床变形的试验研究, 通过对比离散元模拟和试验结果, 验证了有砟道床三维离散元模型的有效性, 这为后续高速铁路有砟道床细、宏观力学行为和劣化机制研究奠定了基础。

2 有砟道床离散元建模

2.1 道砟颗粒细观建模

采用离散单元法建立颗粒材料的数值模型, 首先需要构建单个颗粒的离散元模型。早期研究一般忽略颗粒的实际形状, 直接采用单个球形单元模拟颗粒, 这便于在计算时搜索和识别颗粒之间的接触点, 简化接触力计算。但近年来的研究表明, 颗粒的不规则形状对颗粒材料细、宏观力学行为有十分显著的影响^[13-16]; 简单的球形单元很难模拟不规则颗粒之间的互锁效应, 容易高估颗粒的转动, 获得的颗粒材料细、宏观力学行为与实际情况有较大差异。因此, 采用球形单元模拟时一般需要引入颗粒的抗转动模型, 或者构建具有不规则形状的组合单元来模拟颗粒的实际形态特征^[17]。本文采用后一种方法进行单个道砟颗粒的离散元建模。

铁路道砟的粒径约为 20~60 mm, 一般选用由开山块石破碎筛分而成的碎石, 具有形状不规则、棱角尖锐、表面纹理粗糙的形态特征。为了模拟道砟颗粒的几何形态, 首先运用三维激光扫描仪获取道砟颗粒样本的真实几何边界, 如图 1(a)所示。扫描时将道砟颗粒样本放置于自动旋转台上, 扫描获得颗粒样本的表面点云数据。图 1(b)中颗粒表面点云含有近百万个数据点, 直接用于离散元建模时, 将给颗粒间的接触点搜索和定位带来巨大困难。因此, 需要将颗粒表面点云导入三维逆向工程软件, 创建光滑三角面片; 如果初始生成的面片存在缺陷, 还需要进行修正与光滑处理, 得到能逼近颗粒样本真实几何边界的光滑封闭面(图 1(c))。最后, 将该封闭面导入离散元软件 PFC 中, 在其内部生成有部分重叠的多个球形单元, 并能基本填满封闭面的内部空间, 使其整体轮廓逼近导入的封闭面。将这些重叠球形单元整体作为一个具有不规则形状的刚

体颗粒,称为道砟的簇颗粒离散元模型,如图1(d)所示。采用上述方法,对一批道砟颗粒样本进行扫描并建立簇颗粒离散元模型,得到道砟颗粒离散元模型样本库。图2给出了部分道砟颗粒样本的扫描图与簇颗粒模型,可以看出,簇颗粒模型逼真地再现了道砟样本的不规则几何形态。由于簇颗粒模型由多个球形单元构成,簇颗粒之间的接触搜索就可以转换为多个球形单元之间的接触搜索,这高度简化了不规则颗粒之间的接触搜索,从而兼顾了颗粒的形状模拟精度和颗粒间的接触计算效率。

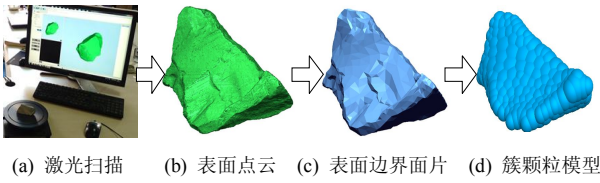


图1 道砟颗粒三维扫描及簇颗粒离散元建模流程

Fig.1 3D laser scanning and DEM modelling of ballast particles

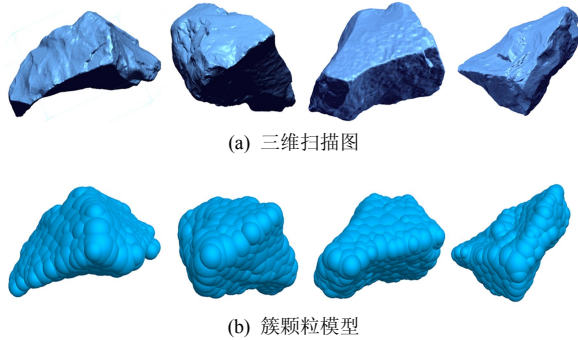


图2 道砟真实几何形状及簇颗粒模型形状对比

Fig.2 Comparisons of real geometric shapes and clump particle models of ballast

建立了道砟颗粒的簇颗粒离散元模型之后,还需要定义颗粒之间的接触本构关系。采用线性弹簧-阻尼模型模拟颗粒之间的接触行为,其中,切向接触力满足 Coulomb 摩擦定律,即切向接触力达到极限摩擦力后,颗粒之间在接触点处发生切向相对滑动。颗粒之间的法向接触力 F_n 和切向接触力 F_s 的计算公式分别为

$$\left. \begin{aligned} F_n &= k_n \Delta u_n + c_n \Delta \dot{u}_n \\ F_s &= F_s^* + c_s \Delta \dot{u}_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中:

$$F_s^* = \min(F_s^t + k_s \Delta u_s, \mu F_n) \quad (2)$$

式中: k_n 和 k_s 分别为颗粒之间的法向和切向接触刚度; c_n 和 c_s 分别为颗粒之间的法向和切向接触阻尼系数; Δu_n 和 Δu_s 分别为颗粒之间的法向和切向相对

位移; $\Delta \dot{u}_n$ 和 $\Delta \dot{u}_s$ 分别为颗粒之间的法向和切向相对速度; μ 为摩擦系数; F_s^t 为上一时间步的切向接触力; $\min(\cdot)$ 表示取最小值。

将颗粒间的接触力施加在发生接触的道砟颗粒上,给定颗粒的质量和惯性参数,根据牛顿第二定律可建立每个道砟颗粒的动力学方程。求解道砟颗粒的动力学方程,就可以计算颗粒在惯性力、接触力和外荷载共同作用下的平移和转动,从道砟颗粒层面上模拟有砟道床的振动和变形行为。

2.2 道床三维离散元模型

选择不同粒径大小的道砟簇颗粒模型,经过随机堆积,初始压实稳定,建立了有砟道床三维离散元模型,如图3所示。需要说明的是,受到离散元模型计算效率的限制,当前采用全尺寸有砟道床离散元模型模拟道砟的力学行为仍十分困难,因此,本文建立的三维离散元模型仅模拟钢轨和轨枕正下方沿线路纵向600 mm、横向300 mm区域内的道砟。该模型轨枕底面以下的道床厚度为350 mm,轨枕底面宽度为320 mm,道砟的粒径级配曲线如图4所示,这些参数均满足我国高速铁路设计规范的要求。

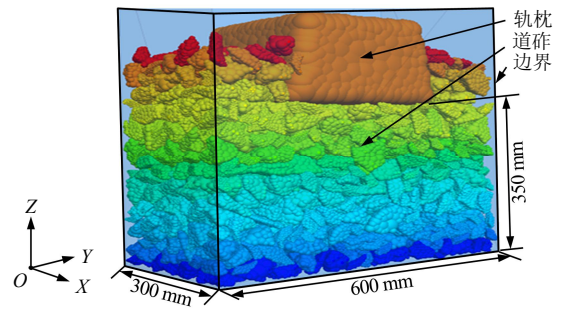


图3 道床三维离散元模型

Fig.3 3D DEM model of railway ballast

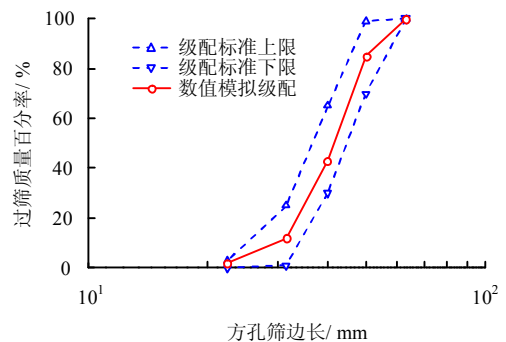


图4 离散元模型中道砟粒径级配曲线

Fig.4 Grain size distribution curve of DEM model

表1列出了道床离散元模型的主要参数值。它们主要依据后文的试验测试结果,并参考相关研究文献[7-8, 10, 18],选择了离散元模拟与后文试验结

果对比较为吻合的一组参数取值。此外,为了模拟实际线路中路基的弹性支承,道砟颗粒与底面边界

的法向接触刚度根据基床表层 K_{30} 模量与离散元模型底面边界支承面积近似换算获得。

表 1 道床离散元模型参数
Table 1 Parameters in the DEM model of ballast

道砟材 质密度 /(kg/m^3)	轨枕密度 /(kg/m^3)	道砟颗粒法 向接触刚度 /(MN/m)	道砟颗粒切 向接触刚度 /(MN/m)	道砟颗粒与侧面 边界法向接触刚度 /(MN/m)	道砟颗粒与底面 边界法向接触刚度 /(MN/m)	道砟颗粒接 触摩擦系数	道砟颗粒 接触法向 阻尼比	道砟颗粒 接触切向 阻尼比
2 810	2 400	15	10	15	0.23	0.5	0.15	0.15

3 有砟道床室内实尺模型试验概况

3.1 有砟轨道室内实尺模型

在西南交通大学轨道交通实验室开展了循环简谐荷载作用下有砟道床的振动与累积变形试验。室内有砟轨道 1:1 实尺模型按照我国高速铁路设计规范和施工标准设计建造^[19],纵向长为 8 m,横向宽为 6 m,铺设 60 kg/m 钢轨、弹条 V 型扣件和混凝土 III 型轨枕,轨枕间距为 0.6 m,采用特级道砟,枕下道床厚度为 0.35 m,道床边坡坡比为 1:1.75,基床表层厚度为 0.7 m,其横断面如图 5 所示。

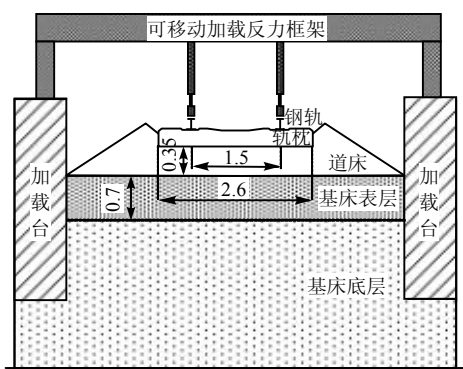


图 5 有砟轨道实尺模型横截面示意图 (单位: m)

Fig.5 Cross-sectional schematic of full-scale ballasted track (unit: m)

图 6 是有砟轨道实尺模型试验现场图。为了模拟列车动荷载作用,在钢轨上方放置加载框架,加载框底部左、右对称地设置 4 个支承底座,支承底座的纵向间距为 2.5 m (等于 CRH₂ 型动车组的转向架固定轴距)。在加载框与上方固定于地面的反力架之间垂向安装两个液压伺服作动器,作动器最大输出荷载为 500 kN。试验时将两个液压伺服作动器输出荷载设为幅值、频率和相位均相同的循环简谐荷载,通过加载框、支承底座、钢轨和轨枕传递至有砟道床,从而实现同一转向架上两个轮对荷载的模拟输入。

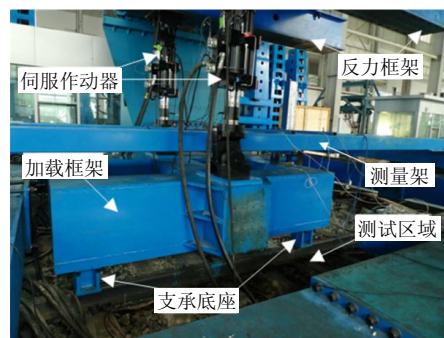


图 6 有砟道床振动与变形试验现场图
Fig.6 Photo of vibration and deformation test of ballasted track

3.2 测点布置与测试方法

在加载框支承底座正下方的轨枕和道床上设置了 4 个测点,如图 7 所示。在轨枕顶面靠近钢轨处安装一个位移计,测量轨枕的垂向位移响应,记录轨枕沉降随荷载循环次数的变化规律。在距离轨枕底面以下 50、150、300 mm 处分别放置 3 个振动加速度传感器,拾取简谐荷载作用下道砟的振动加速度响应。

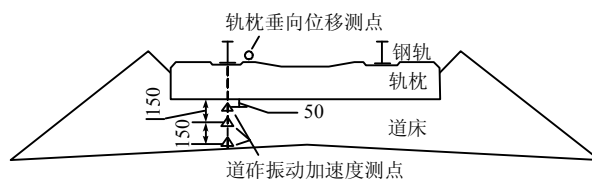


图 7 道砟振动加速度测点布置图 (单位: mm)
Fig.7 Layout of measuring points for ballast acceleration (unit: mm)

图 8 是轨枕位移计现场布置图。选用了天沐 NS-WY02 型电阻式直线位移计,量程为 ± 10 mm,分辨率为 0.01 mm;试验前将位移计安装在相对于地面固定的测量架上,其顶针接触轨枕顶面。图 9 是道砟振动加速度传感器现场安装图。ICP 加速度传感器的量程为 10 g,频响范围为 0~10 kHz。为了准确拾取道砟垂向振动加速度,将加速度计固定

于特制的保护盒中, 保护盒几何尺寸和安装加速度计后的质量与真实道砟颗粒接近; 保护盒底部制作为面积略大于盒体的平板, 以便于稳定地将保护盒垂直埋设于各测点处; 加速度计的信号线采用橡胶软管保护, 避免信号线因道砟颗粒挤压导致破损。试验中位移计和加速度传感器采样频率分别设置为 100 Hz 和 2 kHz。



图 8 轨枕位移计

Fig.8 A displacement transducer installed on the sleeper



图 9 道砟振动加速度传感器安装

Fig.9 An accelerometer embedded in ballast

3.3 试验荷载工况

按图 6 所示方式施加循环简谐荷载, 每个液压作动器施加的垂向荷载-时间历程可表示为

$$F_1 = \frac{A}{2} [1 - \cos(2\pi ft)] \quad (3)$$

式中: A 为荷载幅值; f 为荷载频率; t 为加载时间。

为保持加载过程中加载框支承底座与钢轨始终接触, 将每个作动器输出的荷载最小值设置为 5 kN。试验中考虑了 3 种荷载幅值: 每个液压作动器输出荷载幅值(峰谷值)分别为 100、140、200 kN, 相当于模拟 100、140、200 kN 的轴荷载。在荷载作用频率方面, 受液压伺服作动器输出性能和反力架动力性能的限制, 仅考虑了 1、2、4、6 Hz 这 4 种情况。综合上述荷载幅值和荷载频率, 本次试验的简谐荷载工况共计 12 种, 试验中每个工况重复实施 3 次。

本次试验还开展了有砟轨道的静荷载变形试验, 测试了静态加、卸载过程中轨枕的垂向位移。试验中, 先调整每个作动器输出荷载由零分级增加

至 200 kN, 再分级卸载, 每级增加或卸载 20 kN, 整个加卸载过程重复实施 3 次; 其中每一级加卸载时, 应待轨枕位移响应稳定后, 再进行下一级加、卸载。

4 离散元模型输入荷载

图 3 模型仅包含了有限几何区域的有砟道床, 而本文试验研究采用了全尺寸的室内模型。因此, 为了使离散元模拟计算和试验结果具有可比性, 需要确定离散元模型的等效输入荷载。首先, 离散元模型输入荷载的频率与试验中作动器的输出荷载频率一致; 其次, 需将试验中的荷载幅值通过合理换算, 得到离散元模型的等效输入荷载幅值。

假设试验中两个作动器的输出荷载由 4 个支承底座平均承担, 且支承底座正下方的钢轨扣件支点与支承底座压力(相当于轮轨力)的比值为 β (本文取为 0.34), 则支承底座下方的钢轨支点压力可近似表示为

$$F_2 = \frac{\beta F_1}{2} = \frac{\beta A}{4} [1 - \cos(2\pi ft)] \quad (4)$$

式(4)中的钢轨支点压力通过轨枕传递给枕下道砟, 在轨枕底面和道床顶面之间形成接触压力。假定轨枕底面压力近似为均匀分布, 则对于长度为 l 的轨枕, 其底面平均压力可表示为

$$F = \frac{lF_2}{L} = \frac{\beta lA}{4L} [1 - \cos(2\pi ft)] \quad (5)$$

式中: $L = 1.3$ m, 为实际轨枕长度之半。

图 3 中轨枕长度为 0.3 m, 将其代入式(5), 即可得到离散元模型的模拟输入荷载-时间历程, 模拟计算时将其施加在轨枕质心处, 可确保离散元模型中轨枕-道砟平均接触应力与试验中对应道床区域承受的枕下平均压力接近。表 2 列出了离散元模型输入荷载幅值与室内实尺模型试验中每个液压作动器输出荷载幅值(峰谷值)的对应情况。

表 2 离散元模型的等效荷载幅值

Table 2 Equivalent load amplitudes of DEM model

类型	试验荷载幅值 / kN	离散元模拟荷载幅值 / kN
荷载 1	100	4.0
荷载 2	140	5.6
荷载 3	200	8.0

5 有砟道床振动响应对比分析

道床振动响应对比分析的目的是为了检验离散元模型的动力学特性是否符合工程实际。与图 7

中室内道床模型的加速度测点相对应,在离散元模型中轨枕以下 50、150、300 mm 深度附近各选择 4 个大小和形状相近的道砟颗粒(见图 10),记录它们在不同荷载条件下的振动加速度响应。对比分析时取同一深度处 4 个道砟颗粒振动加速度幅值的平均值作为模拟计算值。同样,在有砟道床实尺模型的振动试验中,对每一种荷载工况重复试验 3 次,将 3 次测试得到的道砟振动加速度值进行平均处理。

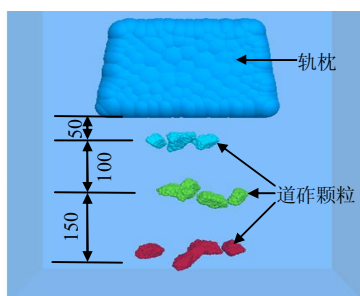


图 10 离散元模型中道砟振动观测点(单位: mm)

Fig.10 Ballast particles in the DEM model selected to observe ballast vibration (unit: mm)

表 3 列出了作动器输出荷载幅值为 200 kN、频率为 4 Hz 时 3 次重复试验得到的道砟振动加速度幅值实测结果及其平均值。由表 3 可知,相同荷载工况的 3 次重复试验中,同一深度处道砟的振动加速度幅值变化很小,这说明本次室内试验结果的重复性较好;这一结论对其他荷载工况的重复试验同样适用,但限于篇幅本文不再给出。同时,这也说明了已压实成形的道床实尺模型中的道砟颗粒排列结构和力链网络较为稳定,在连续的 3 次重复试验中同一位置处道砟颗粒的振动加速度幅值是基本确定的,并不会呈现较大的随机性或离散性。

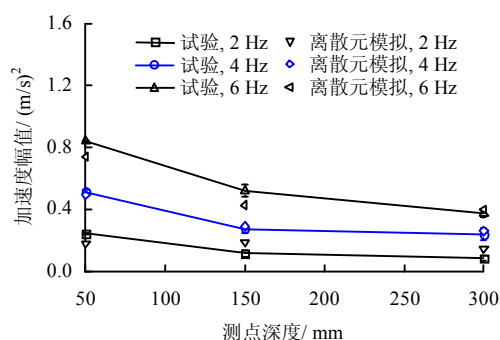
表 3 同一荷载工况 3 次试验的道砟加速度测试结果

Table 3 Testing results of ballast vibration acceleration in three experiments under the same load condition

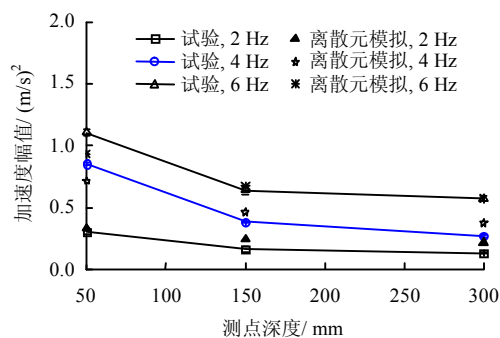
项目	道砟加速度(m/s^2)		
	枕下 50 mm	枕下 150 mm	枕下 300 mm
试验 1	1.334	0.508	0.356
试验 2	1.060	0.512	0.359
试验 3	0.974	0.518	0.362
平均值	1.123	0.513	0.359

图 11 给出了多种荷载工况下不同深度处道砟振动加速度幅值的模拟计算值与实测平均值及标准差。由图可见,在近似的荷载工况下,不同深度处道砟振动加速度幅值的离散元模拟结果与道床实尺模型试验测试结果接近;而且离散元模拟和试验给

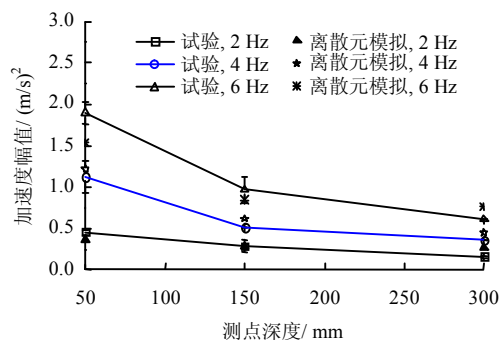
出的道砟振动加速度随深度的衰减趋势也吻合良好。这说明离散元模型中的道砟颗粒接触刚度和阻尼参数设置具有一定的合理性。此外,图 11 中模拟和实测结果均表明,在输入荷载的幅值相同、但荷载频率由 2 Hz 提高到 6 Hz 时,相同深度处的道砟振动加速度幅值均随着荷载频率的提高而增大,尤其是枕下 50 mm 处道砟振动加速度增长更为显著;这意味着列车速度提高后(相当于提高荷载作用频率),道砟的振动强度有明显增加,这无疑会加快道砟的挤压重排和磨损破碎,增大道床的累积变形速率。总体而言,在简谐荷载作用下,离散元模拟的道砟颗粒振动加速度幅值及其沿深度方向的衰减趋势均能够与试验结果较为吻合。可见,采用离散元模型模拟道砟的动态行为较为可靠。



(a) 荷载幅值为 100 kN



(b) 荷载幅值为 140 kN



(c) 荷载幅值为 200 kN

图 11 道砟振动加速度幅值的模拟与试验结果对比

Fig.11 Numerical results vs. experimental results of ballast vibration acceleration

6 有砟道床垂向变形对比分析

6.1 有砟道床静态压缩变形

图 12 是静态加、卸载过程中室内实尺模型试验和离散元模拟得到的轨枕位移-荷载曲线,该曲线的斜率反映了有砟道床抵抗变形的能力,间接体现了道床的支承刚度。其中,试验结果为 3 次重复加卸载过程的平均结果,模拟结果为一次计算结果。从图可以看出,加、卸载过程中离散元模拟与试验结果的滞回曲线形状相似,完全卸载后轨枕位移没有完全恢复,存在着微小的残余变形。但在曲线中间部分,道床变形实测值略大于离散元模拟值,试验获得的轨枕位移-荷载曲线呈现出更加明显的非线性特征。造成这种差异的原因可能是离散元模型中颗粒接触采用了简单的线性接触模型模拟,以及模型中设置的边界条件与实际情况有一定差别。可见,尽管三维离散元模型尺寸较小,但在等效荷载作用下,模拟得到的道床静态加、卸载变形行为与室内实尺模型试验结果基本吻合。

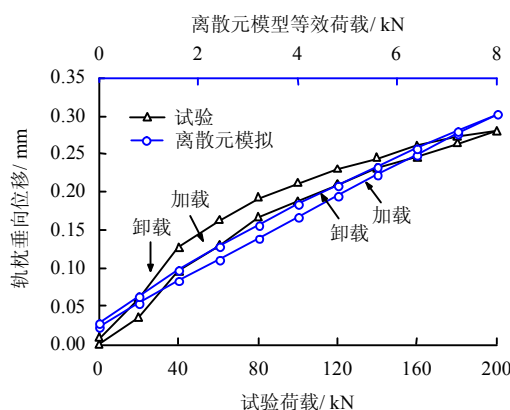


图 12 静态加、卸载过程中道砟变形的模拟与试验结果对比
Fig.12 Numerical results vs. experimental results of ballast deformation during static loading and unloading process

6.2 循环荷载作用下的累积变形

室内模型试验中测试了多种循环荷载作用下轨枕的沉降量随荷载循环次数的变化关系。图 13 给出了 3 种荷载工况下的轨枕沉降曲线及其等效荷载工况下(见表 2)的离散元模拟曲线,其中,工况 1 对应的室内试验荷载频率为 1 Hz,单个作动器荷载幅值 100 kN;工况 2 的试验荷载频率也为 1 Hz,但作动器荷载幅值为 200 kN;工况 3 的试验荷载频率为 4 Hz,作动器荷载幅值 100 kN。需要指出的是,室内试验中发现,3 种工况下路基顶面几乎没有发生残余变形,因此,可以认为图 13 中实测的轨枕沉降量基本是由道砟累积变形所导致的。

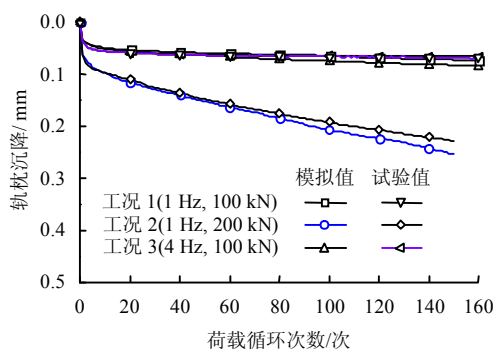


图 13 循环荷载作用下道砟累积变形的模拟与试验结果对比
Fig.13 Simulated results vs. test results of permanent deformation of ballast under cyclic loads

由图 13 可知,3 种荷载工况下离散元模拟的道砟累积变形量及其变化趋势均与室内试验结果较为吻合。模拟和试验结果均表明,当荷载幅值保持为 100 kN 不变,但荷载频率由 1 Hz 提高到 4 Hz,在 150 次循环内道床的累积变形量变化不大;同样,当荷载频率保持为 1 Hz 不变,荷载幅值从 100 kN 增加到 200 kN 以后,同样的荷载循环次数下道床的累积变形量显著增大,说明在低频荷载作用下,荷载幅值(列车轴重)是决定道床沉降的决定性因素,这与大量的前期研究结果是一致的。上述分析表明,本文建立的离散元模型能较为准确地模拟有砟道床在循环荷载作用下的累积变形规律。

7 结 论

(1) 结合三维激光扫描和球形单元填充方法所构建的碎石道砟簇颗粒离散元模型,能够在几何形态上逼近真实道砟颗粒,同时简化了不规则颗粒之间的接触搜索,兼顾了颗粒的不规则形状和离散元计算效率,比较适用于铁路碎石道砟力学行为的离散元模拟。

(2) 在等效简谐荷载作用下,室内模型试验和离散元模拟得到的不同深度处道砟的振动加速度幅值相当,道砟振动加速度幅值随深度的衰减规律一致;同样,室内试验和离散元模拟获得的道砟静态压缩变形曲线和多种循环荷载作用下的累积变形曲线吻合良好。这说明本文建立的道床三维离散元模型能较为准确地反映实际道床结构的细宏观力学性能,可用于高速铁路有砟道床动态性能演变规律分析及其细、宏观劣化机制研究。

参 考 文 献

- [1] SELIG E T, WATERS J M. Track geotechnology and substructure management[M]. London: Thomas Telford

- Services Ltd., 1994.
- [2] 曾树谷. 铁路散粒体道床[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
- ZENG Shu-gu. Railway granular ballast bed[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1997.
- [3] SATO Y. Japanese studies on deterioration of ballasted track[J]. **Vehicle System Dynamics**, 2007, 24(Supp.1): 197–208.
- [4] INDRARATNA B, SALIM W, RUJIKIATKAMJORN C. Advanced rail geotechnology-ballasted track[M]. Leiden: CRC Press, 2011.
- [5] LI D, HYSLIP J, SUSSMANN T, et al. Railway geotechnics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [6] CUNDALL P, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. **Geotechnique**, 29(1): 47–65.
- [7] INDRARATNA B, NGO N T, RUJIKIATKAMJORN C, et al. Behavior of fresh and fouled railway ballast subjected to direct shear testing: Discrete element simulation[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2014, 14(1): 34–44.
- [8] CHEN C, MCDOWELL G R, THOM N H. Investigating geogrid-reinforced ballast: Experimental pull-out tests and discrete element modelling[J]. **Soils and Foundations**, 2014, 54(1): 1–11.
- [9] 张徐, 赵春发, 翟婉明. 铁路碎石道砟静态压碎行为数值模拟[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 137–143.
- ZHANG Xu, ZHAO Chun-fa, ZHAI Wan-ming. Numerical analysis of static crushed behavior of railway ballast[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2015, 50(1): 137–143.
- [10] TUTUMLUER E, QIAN Y, HASHASH Y M A, et al. Discrete element modelling of ballasted track deformation behavior[J]. **International Journal of Rail Transportation**, 2013, 1(1-2): 57–73.
- [11] 孙珊珊, 严颖, 赵春发, 等. 往复荷载下铁路道砟沉降特性的扩展多面体离散元分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(11): 89–95.
- SUN Shan-shan, YAN Yin, ZHAO Chun-fa, et al. Dilated polyhedral discrete element analysis of settlement characteristics of railway ballast under cyclic loading[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2015, 37(11): 89–95.
- [12] 徐旸, 高亮, 杨国涛, 等. 道砟颗粒的精细化建模及对道床力学性能影响[J]. 铁道学报, 2014, 36(9): 73–78.
- XU Yang, GAO Liang, YANG Guo-tao, et al. Fine modelling of ballast grains and influence on mechanical properties of track bed[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2014, 36(9): 73–78.
- [13] LU M, MCDOWELL G R. The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method[J]. **Granular Matter**, 2007, 9(1-2): 69–80.
- [14] SHIN H, SANTAMARINA J C. Role of particle angularity on the mechanical behavior of granular mixtures[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2013, 139(2): 353–355.
- [15] CHO G, DODDS J, SANTAMARINA J C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2006, 132(5): 591–602.
- [16] 赵仕威, 周小文, 刘文辉, 等. 考虑颗粒棱角影响的直剪试验的离散元模拟[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 602–608.
- ZHAO Shi-wei, ZHOU Xiao-wen, LIU Wen-hui, et al. DEM simulation of direct shear tests considering particle angularity effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Supp.1): 602–608.
- [17] 蒋明镜, 贺洁. 基于颗粒抗转动模型的刚性挡墙被动土压力临界状态离散元分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2996–3006.
- JIANG Ming-jing, HE Jie. A distinct element analysis of critical state passive earth pressure against a rigid wall using a rolling resistance contact model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(10): 2996–3006.
- [18] HUANG H. Discrete element modeling of railroad ballast using imaging based aggregate morphology characterization[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
- [19] 国家铁路局. TB 10621–2014 高速铁路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
- National Railway Administration of P. R. China. TB 10621–2014 Code for design of high speed railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014.