

基于不同颗粒形态模拟方法的道砟三轴试样变形特性对比分析

Xue, Li Hua; Xiao, Jun Hua; Zhang, De; Guo, Yun Long; Chen, Bing Wen

DOI

[10.6052/j.issn.1000-4750.2022.01.0044](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.01.0044)

Publication date

2023

Document Version

Final published version

Published in

Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics

Citation (APA)

Xue, L. H., Xiao, J. H., Zhang, D., Guo, Y. L., & Chen, B. W. (2023). 基于不同颗粒形态模拟方法的道砟三轴试样变形特性对比分析. *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics*, 40(9), 142-152.
<https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.01.0044>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.



基于不同颗粒形态模拟方法的道砟三轴试样变形特性对比分析

薛立华 肖军华 张德 郭云龙 陈炳文

COMPARATIVE STUDY ON DEFORMATION CHARACTERISTICS OF BALLAST TRIAXIAL SPECIMENS WITH SIMULATION METHODS OF DIFFERENT PARTICLE SHAPES

XUE Li-hua, XIAO Jun-hua, ZHANG De, GUO Yun-long, CHEN Bing-wen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.01.0044>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于计算接触力学的粗颗粒土体材料细观性质模拟

SIMULATION ON MESO-MECHANICAL PROPERTY OF COARSE-GRAINED SOIL MATERIALS BASED ON COMPUTATIONAL CONTACT METHOD

工程力学. 2020, 37(7): 151-158 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.08.0490>

考虑颗粒破碎的堆石料湿化变形特性离散元模拟研究

Dem simulation of wetting deformation characteristics of rockfill considering particle breakage

工程力学. 2018, 35(S1): 217-222 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.05.S043>

基于DEM-FDM耦合的普通铁路碎石道床-土质基床界面接触应力分析

STUDY ON INTERFACE STRESS BETWEEN BALLAST AND SUBGRADE FOR TRADITIONAL RAILWAY BASED ON COUPLED DEM-FDM

工程力学. 2018, 35(9): 170-179 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.06.0422>

钢纤维高性能轻骨料混凝土多轴强度和变形特性研究

STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF HIGH PERFORMANCE STEEL FIBER REINFORCED LIGHTWEIGHT CONCRETE UNDER MULTIAXIAL COMPRESSION

工程力学. 2019, 36(8): 122-132 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.07.0401>

自适应有限元-离散元算法、ELFEN软件及页岩体积压裂应用

ADAPTIVE FINITE ELEMENT-DISCRETE ELEMENT ALGORITHM, SOFTWARE ELFEN AND APPLICATION IN STIMULATED RESERVOIR VOLUME OF SHALE

工程力学. 2018, 35(9): 17-25,36 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.06.0421>

行程敏感式液阻减振器动力学特性的三维流-固耦合有限元仿真分析

3D FSI FEA SIMULATION AND ANALYSES OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A DISPLACEMENT-SENSITIVE LIQUID DAMPER

工程力学. 2020, 37(9): 217-229 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.10.0584>



订阅号：面向读者



订阅号：面向作者

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1000-4750(2023)09-0142-11

基于不同颗粒形态模拟方法的道砟三轴 试样变形特性对比分析

薛立华^{1,2}, 肖军华^{1,2}, 张 德³, 郭云龙⁴, 陈炳文^{1,2}

(1. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;
3. 上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海 200433; 4. 代尔夫特理工大学土木工程与地球科学学院, 荷兰, 代尔夫特 2628CN)

摘 要: 道砟不规则形态是影响有砟道床变形特性的重要因素, 对道砟形状及棱角分布等不同尺度形态特征的刻画与数值重构仍是道砟仿真研究的热点问题。该文采用形态重构方法, 生成了符合真实道砟形态指标概率分布的多面体道砟试样, 构建了不同围压下道砟三轴加载计算模型, 并将该仿真结果与三维扫描生成、非统计随机生成的道砟试样的仿真结果及室内试验结果对比分析。结果表明: 围压提高, 颗粒形态对道砟力学响应的影响逐渐显著, 该文方法重构数值试样的应力-应变结果与试验结果的符合度高于非统计随机生成试样; 道砟试样横向变形与堆积结构调整有关, 与三维扫描生成的道砟试样相比, 非统计随机生成试样的颗粒调整程度与侧向鼓胀范围均偏大; 形态统计特征对道砟接触力演化趋势影响不大, 但是不同形态特征的道砟最大接触力水平差异近 50%。

关键词: 道砟; 三轴试验; 形态统计特征; 离散元-有限元耦合; 变形特性

中图分类号: U213.7+22 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.01.0044

COMPARATIVE STUDY ON DEFORMATION CHARACTERISTICS OF BALLAST TRIAXIAL SPECIMENS WITH SIMULATION METHODS OF DIFFERENT PARTICLE SHAPES

XUE Li-hua^{1,2}, XIAO Jun-hua^{1,2}, ZHANG De³, GUO Yun-long⁴, CHEN Bing-wen^{1,2}

(1. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
3. Shanghai Road and Bridge (Group) Co. Ltd, Shanghai 200433, China;
4. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft 2628CN, Netherlands)

Abstract: Particle shape plays an essential role in deformation characteristics of railway ballast bed. The numerical reconstruction of ballast morphological features, including overall shape and angular distribution, remains a hot issue in research on ballast mechanical behavior simulation. A novel shape reconstruction method was adopted to generate ballast particles that met the desired probability density distribution of morphological indices. On this basis, the numerical model of ballast triaxial tests were established under different confining pressures. The results were compared with those obtained from indoor tests and simulations whose particles were generated from 3D scanning or non-statistical random generation. The results show that the particle shape has a growing effect on the mechanical response of ballast, with an increase in confining pressure. The relation between deviatoric stress and axial strain in the specimen which meets the probability density distribution is more consistent with the experimental results than that of the non-statistical randomly generated specimen. The lateral

收稿日期: 2022-01-09; 修改日期: 2022-04-20

基金项目: 高铁联合基金项目(U2034204); 国家自然科学基金项目(52178435); 上海市科学技术委员会项目(20DZ2251900)

通信作者: 肖军华(1980—), 男, 湖北仙桃人, 教授, 博士, 主要从事铁路路基动力学研究(E-mail: jhxiao@tongji.edu.cn).

作者简介: 薛立华(1996—), 男, 山东济宁人, 博士生, 主要从事铁路路基动力学研究(E-mail: lihua_xue@foxmail.com);

张 德(1990—), 男, 江苏无锡人, 工程师, 博士, 主要从事铁路路基动力学研究(E-mail: dz2015@tongji.edu.cn);

郭云龙(1992—), 男, 黑龙江绥化人, 博士, 主要从事轨道工程研究(E-mail: yunlong.guo@tudelft.nl);

陈炳文(1999—), 男, 吉林延边人, 硕士生, 主要从事铁路路基动力学研究(E-mail: bwchen666@163.com).

deformation of ballast is correlated with the adjustment of the packing structure. For non-statistical randomly generated specimen, both the lateral deformation and the particle adjustment are larger than those generated by 3D scanning. The ballast contact force evolution is less influenced by its morphological features. Nevertheless, the difference in the maximum contact force of specimens with various particle shapes is nearly 50%.

Key words: ballast; triaxial test; morphological statistical feature; discrete element-finite element coupling model; deformation characteristic

有砟轨道具有弹性性能优良、建设成本低廉、易于维修等优点, 在各国铁路工程中得到广泛应用^[1]。碎石道床作为有砟轨道的重要组成部分, 起到承载轨排、分散列车荷载、减振降噪等作用。随着铁路运输高速化、重载化的发展, 列车对线路的动力作用进一步增强, 这对于碎石道床的可靠性提出了更高要求。

针对道砟变形特性, 国内外研究者^[2-4]早期普遍通过开展大尺寸直剪、三轴试验, 从道砟试样剪切强度、应力-应变及颗粒破碎等角度研究了道砟变形规律。此后, 相关学者^[5-6]将智能颗粒、粒子图像测速与断层扫描等先进测量手段引入道砟试验中, 将道砟宏观变形与颗粒运动分布、破碎演化等细观力学行为相关联, 但限于采样精度与观测点位, 仍难以研究道砟形态对其变形特性的影响。相较于试验及连续介质力学分析方法, 离散元数值仿真方法可反映道砟特性, 同时, 在颗粒运动追踪、接触统计分析等方面具有优势, 目前已成为研究道砟变形特性的主要方法。

颗粒棱角与形态的随机性是影响散粒体力学性能的重要因素^[7]。相关研究表明, 棱角嵌挤导致颗粒之间产生嵌固阻力, 宏观上表现为对散粒体整体刚度的提高^[8]; 不规则形态使得密实堆积的颗粒间形成复杂接触体系, 提高了散粒体传力结构的稳定性^[9]。道砟作为典型的颗粒材料, 其不规则形态对碎石道床的密实度^[10]、变形模量^[11]、累积变形速率^[12]等均有显著影响。

在道砟不规则形态重构方面, 相关学者^[13]通过在球颗粒中引入抗转力矩, 模拟了道砟棱角对颗粒转动的阻碍效用, 但球颗粒之间的接触数明显少于复杂形态颗粒, 导致模型接触力网络过于简化, 道砟细观力学行为与宏观变形难以对应。对此, 相关学者^[11]通过球拼接构造球簇颗粒以模拟道砟不规则形态。该方法能在一定程度上反映道砟棱角咬合对道床力学特性的影响, 但球簇堆叠会造成颗粒质量分布与真实道砟存在差异, 且在大尺寸模型计算中难以平衡其计算效率与准确性。

采用多面体单元模拟不规则道砟颗粒被认为是解决上述问题的有效方法之一。BIAN 等^[14]、XU 等^[15]基于计算机三维视觉成像获取道砟投影轮廓, 采用不同形态分析与简化方法重构多面体单元模拟道砟颗粒。但上述研究仅以少量道砟轮廓重构道砟颗粒, 导致离散元模型中颗粒形态分布局部化, 使细观力学参数的标定存在偏差。为此, QIAN 等^[16]对大量道砟颗粒进行形态扫描, 据此构建了不规则道砟样本库。该方法虽能反映真实道砟试样的形态特征, 但其建模过程工作量巨大。对于上述问题, 部分学者^[17-18]从概率统计角度研究发现, 道砟形态指标满足统计规律。但现有道砟离散元研究中, 尚无可刻画多尺度(整体形状、局部棱角)形态指标统计特性的仿真模型及其对道砟试样宏细观力学行为影响规律的报道。究其原因: 一方面, 目前缺乏能够同时刻画不同尺度形态指标统计特征的颗粒分析与重构方法; 另一方面, 目前尚无考虑离散元计算及道砟形态特点的多面体颗粒简化与建模方法。

本文作者此前在对真实道砟形态特征进行统计分析的基础上, 提出了一种基于颗粒形态指标概率分布的道砟重构方法^[19], 但对上述重构方法在道砟宏细观力学行为模拟中的准确性尚未展开深入研究。为此, 本文基于上述方法重构了符合真实道砟形态统计特征的多面体试样, 进行不同围压条件下三轴加载离散元 (DEM)-有限元 (FEM) 耦合计算, 并与非统计随机形态数值试样的计算结果及室内三轴试验结果相对比, 在评估上述重构道砟试样计算准确性的基础上, 研究了形态统计特征对道砟试样变形特性的影响及细观机理。

1 道砟形态特征统计分析 with 样本重构

1.1 道砟形态特征量化指标

道砟形态特征按照分析尺度可划分为整体形态特征与局部形态特征^[7]。整体形态特征主要描述颗粒整体形状与尺寸, 本文参考相关研究的量化方法^[17], 首先根据颗粒三维图像计算其正交三维

尺寸，即长轴 Φ_1 、中轴 Φ_2 、短轴 Φ_3 ，三条特征轴位置如图 1 所示。

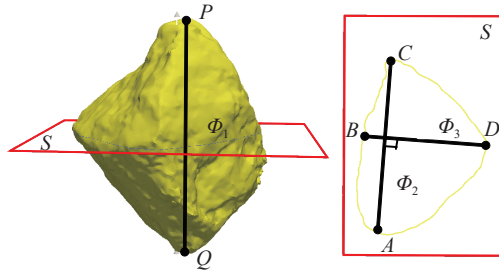


图 1 道砟长轴 Φ_1 、中轴 Φ_2 、短轴 Φ_3 示意图
Fig. 1 Schematic diagrams of Φ_1 , Φ_2 and Φ_3

在此基础上，引入球度指数 (sphericity index, SP) 以量化颗粒整体形状与正球体的近似程度。当前球度指数有多种计算方法，由于上文分析已获取道砟三维正交尺寸，同时考虑到指标参数与道砟碎片状指数存在对应关系，本文选用 KRUMBEIN^[20] 提出的计算方法，如式 (1) 所示：

$$SP = \sqrt[3]{\frac{\Phi_2 \Phi_3}{\Phi_1^2}} \quad (1)$$

局部形态特征主要描述颗粒棱角特性，本文作者前期提出基于颗粒局部曲率构造的曲率系数 (curvature index, CI) 量化。研究发现^[19]，道砟点云中至少 20% 的点位于棱角位置，其对应曲率大于位于面上点的曲率。因此，对颗粒点云按照局部曲率降序排列，取前 20% 的点曲率之和作为曲率指数，由式 (2) 表示：

$$CI = \sum_{i=1}^{20\%N} \rho_i \quad (2)$$

式中： N 为颗粒点云总数，按照降序排列； ρ_i 为颗粒局部曲率。

本文根据现行《铁路碎石道砟》(TB/T 2140—2008)^[21]，按照一级道砟材质与级配要求筛取 50 kg 道砟样本 (共计 584 个道砟颗粒)。通过三维激光扫描获得道砟表面轮廓点云数据，计算上述五类

形态指标并建立各形态指标的概率密度函数，可实现对真实道砟形态特征的量化。

1.2 满足真实形态特征统计规律的道砟样本重构

真实道砟颗粒点云数多、非线性程度高，形态指标与点云分布之间的关系难以直接建立。为此，基于本征正交分解法 (proper orthogonal decomposition, POD)，分析不同方向点云的径向距离差异，得到表征道砟颗粒形态特征的基向量 φ 与形态扩展系数 c ，实现道砟形态的降阶。根据随机场理论，对于任一道砟颗粒 j ，各方向径向距离 r 可以采用特定阶数基向量的叠加近似计算，如式 (3) 所示。作者前期研究^[19]发现，选取 34 维基向量用于颗粒形态描述时，其相对误差已小于 4%，且继续提高阶数，误差降幅已经很小，因此文中选取 34 阶作为叠加基向量截止阶数。

$$r = \bar{r} + c_{0j} + c_{1j}\varphi_1 + \dots + c_{kj}\varphi_k \quad (3)$$

式中： \bar{r} 为点云平均径向距离； φ_k 为第 k 阶基向量； c_k 为第 k 阶基向量对应的形态扩展系数。

在对颗粒形态降阶表征的基础上，为重构符合特定形态指标概率密度分布的道砟颗粒，还需建立重构颗粒形态扩展系数与真实道砟形态指标之间的关系。基于上述扫描道砟样本，采用径向基神经网络 (radial basis function, RBF) 建立颗粒形态指标间的组合关系 ($\Phi_2 \rightarrow \Phi_1, \Phi_3, SP, CI$)；在此基础上，再次通过径向基神经网络，建立形态指标组合与形态扩展系数之间的对应关系 ($\Phi_1, \Phi_3, SP, CI \rightarrow c_0, c_1, \dots, c_k$)。由此，根据真实道砟中轴 Φ_2 的概率分布曲线，计算得到重构道砟形态扩展系数，即可重构任意数量符合真实道砟样本形态指标概率分布的道砟颗粒，上述道砟重构总体流程如图 2 所示。

考虑到上述重构的道砟点云数量巨大，直接引入离散元模型会降低运算效率，本文在保证颗粒主要形态特征的前提下，对颗粒点云进一步简

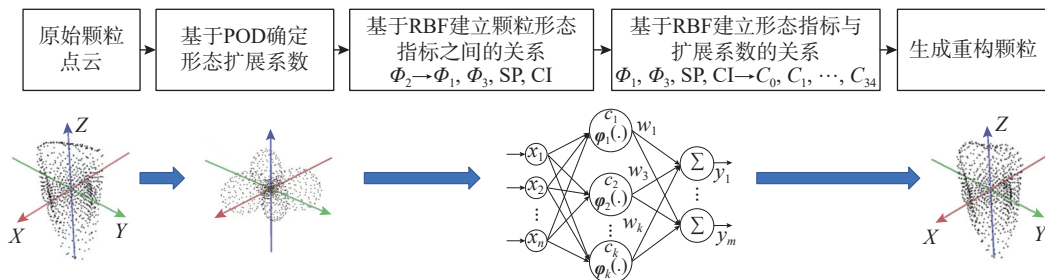


图 2 道砟形态重构流程图
Fig. 2 Flow chart of ballast samples regeneration

化。首先将三维道砟点云沿方位角及仰角在二维平面内展开，并划分为 $M \times M$ 个单元，筛选并保留颗粒特征轴(长、中、短轴)端点及各单元曲率极大值点，删去其余位置点云。根据此前研究结果^[19]，当 $M > 4$ 后，简化颗粒与原始颗粒体积与转动惯量的相对误差小于 10%。因此，本文选用 $M=5$ 进行颗粒形态简化，简化示意图如图 3 所示。形态简化后颗粒包含各单元曲率极大值点 25 个，外加特征轴端点 6 个，最终简化后的道砟颗粒共有 31 个特征点。

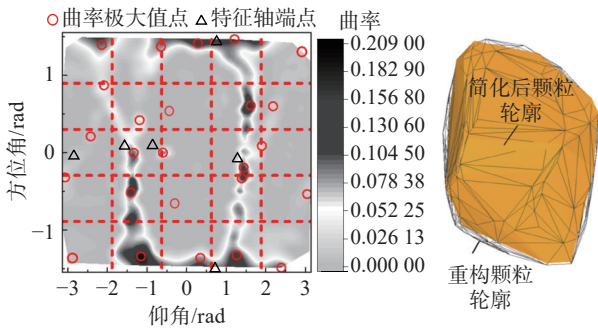


图 3 道砟颗粒形态简化示意图^[19]

Fig. 3 Schematic diagram of ballast shape simplification

按照上述方法，重构颗粒数 $N=300$ 、600、3000 的三组道砟样本，对比重构样本与真实道砟样本形态指标的概率密度函数，如图 4 所示。结

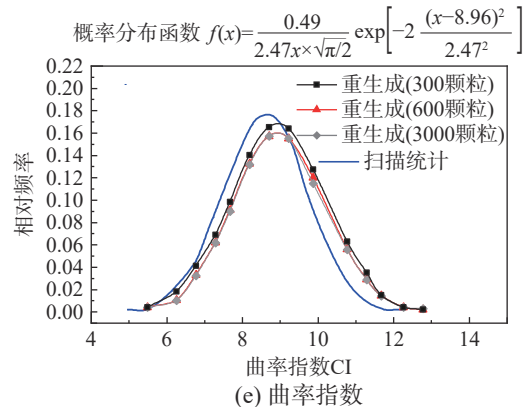
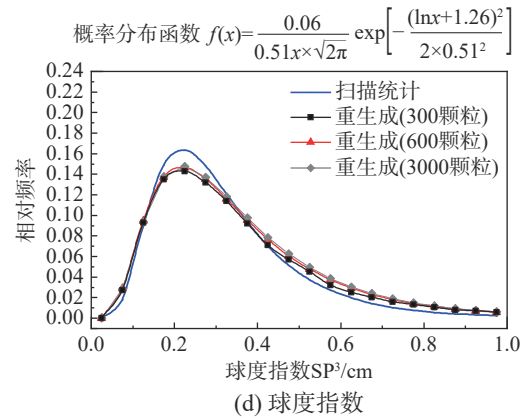
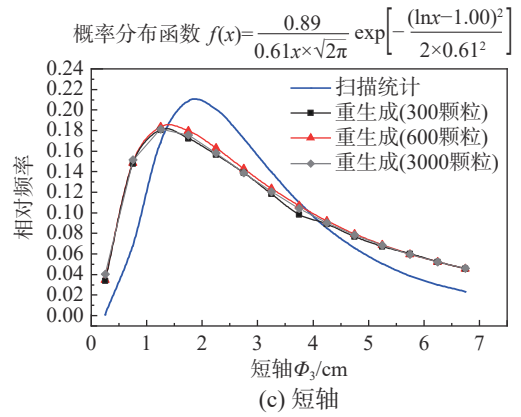
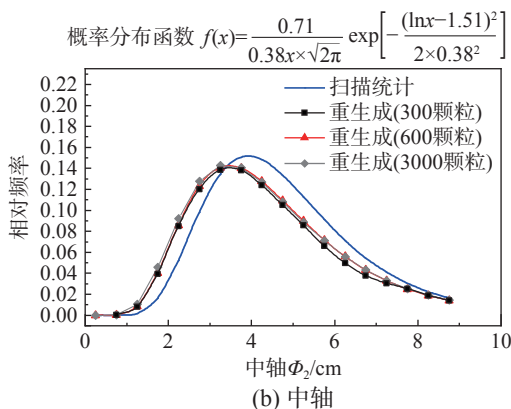
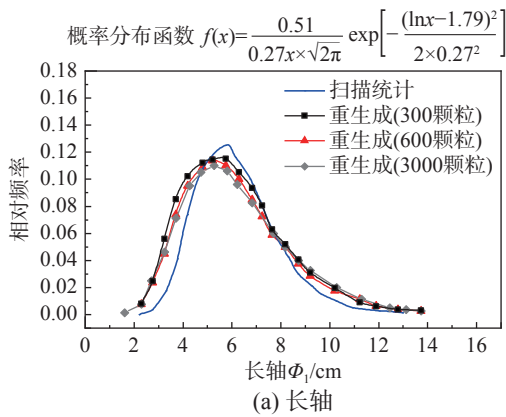


图 4 重构道砟形态特征值统计分布

Fig. 4 Morphological index distributions of reconstructed ballast

果表明，重构颗粒形态指标的概率密度函数与真实道砟样本接近，随着颗粒数提高，重构道砟形态指标概率分布并无显著差异。

2 道砟三轴试验及离散元-有限元耦合模型

2.1 道砟三轴试验方案

道砟三轴试验在 GCTS 大型三轴仪上进行。围压与轴向荷载分别由液压增压系统与液伺服闭环控制，通过试样顶部 LVDT 位移传感器及三轴

室内水体积监测试样轴向应变与体应变，试验设备如图 5(a) 所示。

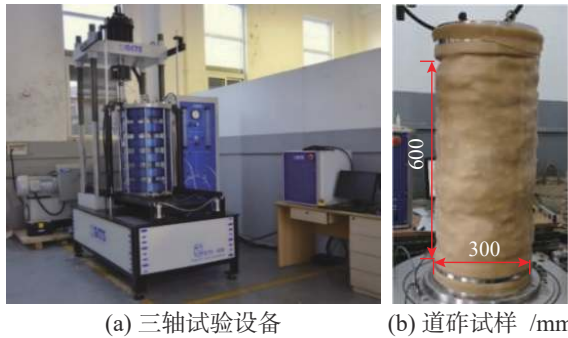


图 5 道砟大型三轴试验
Fig. 5 Large-scale triaxial test of ballast

试验中道砟材质为花岗岩，满足规范中一级道砟级配要求。三轴试样高度 0.6 m、直径 0.3 m。试验前先于铝制模板中制样，试样分 4 层压实，压实后道砟试样的堆积密度大于 1600 kg/m³；而后拆除铝制模板，形成三轴试样，如图 5(b) 所示。对于按照规范规定厚度 35cm 填筑的有砟道床，在道砟及轨枕自重条件下，实际有砟道床的侧压力约为 45 kPa^[21]，这与 LACKENBY 等^[3]、井国庆等^[22]三轴试验中围压条件相近。因此在室内三轴试验加载时，围压分别选取 30 kPa 与 60 kPa，各类围压条件下均进行 3 组平行试验，试验采用应变控制按照 3 mm/min 控制，当轴向应变达到 10% 即停止加载。

2.2 离散元-有限元耦合计算原理

道砟试样与加载板采用离散元模拟，试样周围橡胶膜采用有限元模拟。为此，本文使用离散元程序 YADE 与有限元程序 OOFEM(object oriented finite element) 进行不同对象的力学计算，并引入多物理场集成框架 MuPIF 实现变量参数交换，建立了多面体颗粒离散单元与有限单元耦合程序^[19]。

两计算域之间力学参数传递是需要解决的关键问题。本文通过引入表面耦合算法实现了两个计算域的参数传递，其耦合计算原理如图 6 所示。

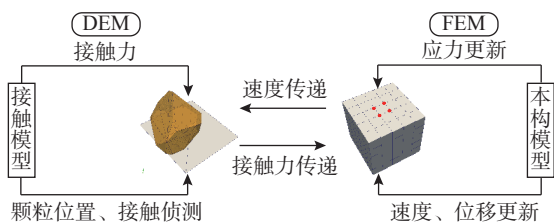


图 6 离散元-有限元耦合计算原理图
Fig. 6 DEM-FEM coupling principle

当道砟与橡胶膜接触时，有限元网格作为 facet 单元复制到离散元域内，参与颗粒接触搜索与计算，并将有限元网格位移作为 facet 单元的速度边界条件参与离散元计算；同一时步，颗粒与 facet 单元的接触力则作为力边界条件引入有限元计算。图 7 所示为颗粒与界面单元接触时，接触力传递示意图。

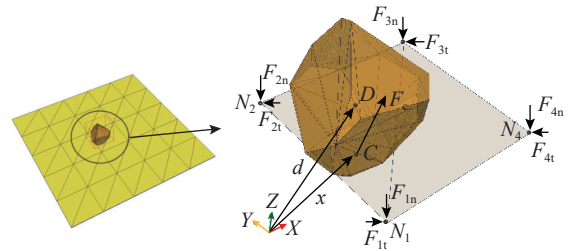


图 7 颗粒-界面单元接触力传递示意图
Fig. 7 Schematic diagrams of force transform between particle and boundary elements

在 t 时步，首先计算离散元在外载荷作用下的动力响应。将界面网格作为位移边界引入离散元域，根据离散元接触模型，颗粒与界面单元之间采用罚函数法计算耦合界面接触力，其接触罚函数的设置原则是保证惩罚项使颗粒能对界面单元间能产生一定的侵入，而侵入量相对颗粒尺寸可忽略不计。根据多面体颗粒计算采用的集中式接触力算法，其耦合位置接触力是颗粒侵入界面侵入量的函数，计算方法如下：

$$F_c = \gamma K \delta \tag{4}$$

式中： γ 为接触罚函数； δ 为离散单元与有限元网格单元间的穿透量； K 为界面材料刚度。

由受力平衡条件，与之对应的有限元网格所受外力为 $-F_c$ ，上述外力按照形函数分配至网格节点处，则有限元节点力：

$$F_p^i = -N_i(\xi_{1c}, \xi_{2c}) F_c, \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{5}$$

其中，有限元形函数为：

$$N_i(\xi_{1c}, \xi_{2c}) = \frac{1}{4} (1 + \xi_{1i} \xi_{1c}) (1 + \xi_{2i} \xi_{2c}) \tag{6}$$

式中， ξ_{1c} 、 ξ_{2c} 为耦合点处自然坐标。

离散元中颗粒运动采用显式有限差分方法进行计算，因此，有限元域内根据节点力与材料本构计算出网格位移后，每一时步均需将其作为位移边界条件进行离散元域的数据更新，时间步长应同时满足两计算域的稳定条件。重复上述计算过程，即可实现有限元与离散元之间的耦合计算。

2.3 道砟三轴试验耦合模型构建

基于 1.2 节道砟重构方法，生成了符合形态指标概率分布的多面体颗粒 S3。为研究形态统计特征对道砟试样变形特性的影响规律，还分别生成球颗粒 S1 与基于 Voronoi 空间剖分^[23]构建的非统计随机形态颗粒 S2 进行对比分析。为验证上述重构试样对道砟细观力学行为的模拟准确性，本文根据 584 颗道砟的三维形态扫描数据构建道砟样本库，生成真实道砟扫描点云简化颗粒 S4。四类道砟数值试样均满足规范中一级道砟级配要求，如图 8 所示。

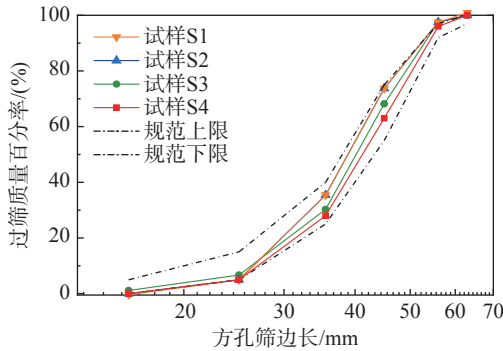


图 8 道砟试样级配曲线
Fig. 8 Grading curve of ballast samples

颗粒生成后，采用分层压实方法制备三轴试样。三轴数值试样尺寸参照室内试验情况，设置为高 0.6 m、直径 0.3 m 的圆柱体^[24]，根据有砟道床实际压实条件，数值试样分 4 层压实，压实力为 500 N。仿真计算中，颗粒接触参数的取值首先根据现有文献 [8, 16] 中道砟参数初拟；在此基础上，将接触参数引入松散道砟压实过程模拟中，根据室内试验试样堆积高度与孔隙率进行参数校准，四类道砟颗粒最终细观参数取值如表 1 所示。

表 1 离散元模型细观参数
Table 1 Mesoscopic parameters of DEM

离散元域	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	法向接触 刚度 $k_n/(\text{N}/\text{m}^2)$	切向接触 刚度 $k_s/(\text{N}/\text{m}^2)$	摩擦 系数 μ	接触 阻尼 α
球颗粒	2600	5.5×10^8	4.83×10^8	1.03	0.03
非统计随机生成颗粒	2600	1.82×10^{10}	1.6×10^{10}	0.8	0.03
基于形态指标概率 分布重构颗粒	2600	1.82×10^{10}	1.6×10^{10}	0.65	0.03
三维扫描颗粒	2600	1.82×10^{10}	1.6×10^{10}	0.68	0.03

四类道砟压实后所得三轴数值试样如图 9 所示。球颗粒压实过程中颗粒间无法形成嵌挤结构且颗粒孔隙难以被细小颗粒填充，故制样后其孔隙率较室内试验试样偏大。采用上述细观接触参数经分层压实后，试样 S1~S4 的孔隙率分别为

46.6%、45.5%、44.3% 及 44.1%，与室内试验中试样初始孔隙率 43.7% 相近。

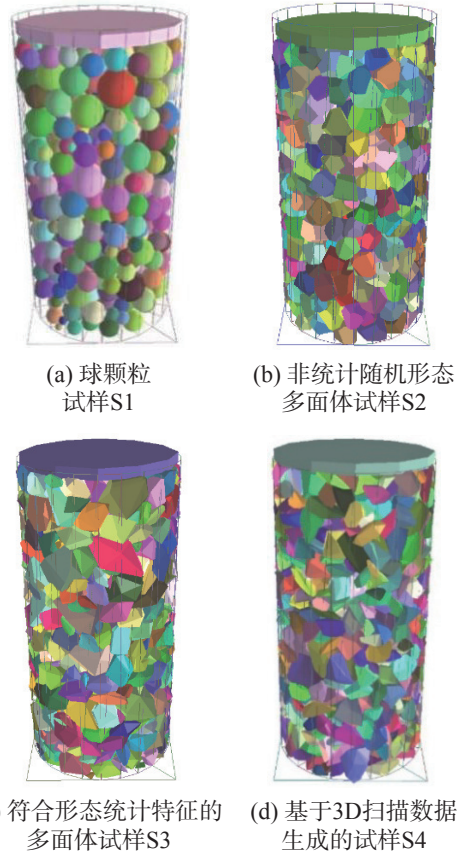


图 9 初始状态道砟三轴试样
Fig. 9 Ballast triaxial specimens in initial condition

道砟试样周围橡胶膜厚度为 0.015 m，高度及内径与道砟试样一致；考虑到道砟尖角与橡胶膜接触位置可能出现非线性变形，参考马刚等^[25]的模拟方法，橡胶材料采用超弹性材料 (hyperelastic material) 本构，材料参数取值如表 2 所示。橡胶膜选取 8 节点立方体单元，考虑耦合计算效率，当道砟试样为球颗粒时，有限元网格最小尺寸为 4 cm，其余情况网格为 2 cm。道砟三轴试验耦合数值模型如图 10 所示。

表 2 橡胶膜有限元模型参数
Table 2 Parameters of rubber membrane

有限元域	密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	体积模量/Pa	泊松比 ν	摩擦系数 μ	阻尼系数 α
橡胶	1100	1.0×10^7	0.47	0.8	0.2

3 道砟三轴耦合计算结果分析与试验对比

3.1 宏观力学行为分析

三轴加载条件下四类道砟数值试样的应力-应变计算结果及与室内实际道砟试验结果对比情况

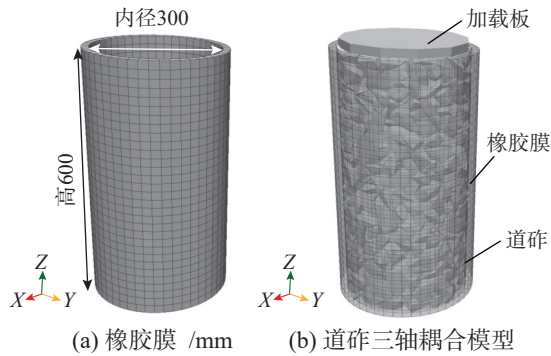


图 10 道砟三轴试验离散元-有限元耦合模型

Fig. 10 DEM-FEM coupling model of ballast triaxial test

如图 11 所示, 其中室内试验中各围压下三组平行试验轴向偏应力结果及变化趋势基本一致, 选取其中一组作为比照标准。围压 30 kPa 时, 多面体试样计算结果之间的差异较小而球颗粒试样加载前期的偏应力增速偏低; 围压由 30 kPa 提高至 60 kPa, 试样最大偏应力增加, 不同形态道砟数值试样应力-应变曲线之间的差异显著, 说明围压提高, 颗粒形态特征对剪切应力的影响逐渐显现。为量化不同形态道砟试样计算结果的准确性, 采用式 (7) 方法计算围压 60 kPa 时各数值试样模拟结果的符合度, 并以偏差最大的球颗粒试样 S1 的符合度进行标准化, 结果如图 11(b) 所示。

$$f_a = \sqrt{\frac{1}{b-a} \int_a^b (f(x) - f_1(x))^2 dx} \quad (7)$$

式中: $f(x)$ 为各试样计算结果; $f_1(x)$ 为室内试验结果; a 、 b 为区间端点轴向应变。

可见, 试样 S3 的计算结果与室内试验结果符合度最高, 较非统计形态道砟试样提高 18%。试样 S4 所扫描道砟样本并非室内试验所用道砟, 且数值试样包含的颗粒数大于道砟库中颗粒样本数, 部分多面体颗粒被多次引入, 其仿真结果与试验结果存在差异, 但应力变化趋势及最大偏应力均与室内试验结果吻合。

道砟试样体积应变-轴向应变计算结果及室内试验结果如图 12 所示, 三轴加载条件下, 道砟试样均呈前期剪缩、后期剪胀的现象。

围压 30 kPa 时, 三类多面体道砟试样的计算结果与室内试验结果相近, 而球颗粒无法模拟真实道砟之间的嵌挤效应, 剪胀量偏大。围压提高至 60 kPa, 试样剪胀受到抑制, 相同轴向应变时, 体积应变减小约 1%。

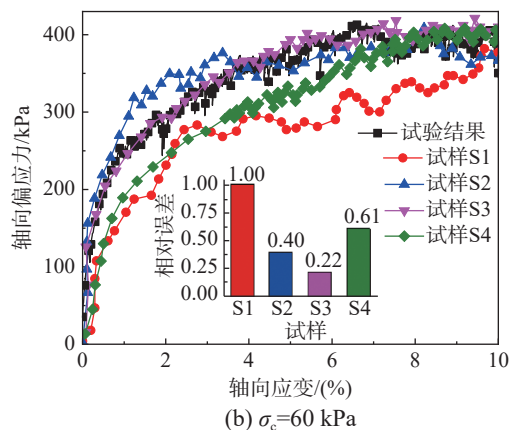
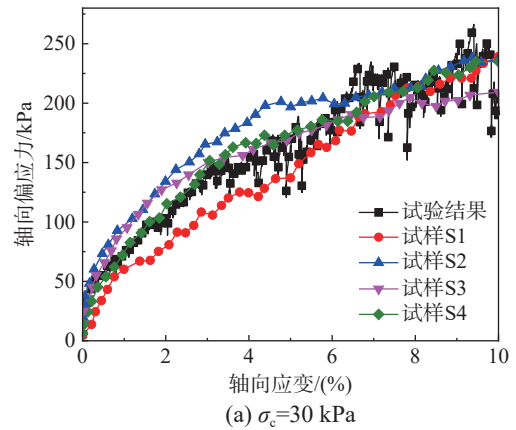


图 11 各类试样应力-应变结果

Fig. 11 Stress-strain curves with different particle shapes

与符合形态统计特征的试样 S3、S4 相比, 试样 S2 主要是颗粒整体形状指标存在差异, 其球度系数偏大, 加载过程中道砟以绕颗粒形心转动为主, 而激发该类运动所需能量较低^[26], 故试样在经历较小轴向应变后即出现剪胀变形。对于试样 S3 及 S4, 道砟棱角特性更为真实, 颗粒嵌挤结构稳定且具有较多细长颗粒进行孔隙填充, 故试样剪缩阶段所经历应变增加。

3.2 细观力学行为分析

对于道砟等散体材料, 粒间接触力是影响其力学行为的重要因素。已有研究发现, 法向接触力对颗粒材料的影响更为显著^[9]。为此, 本文提取数值试样法向接触力, 分析不同形态道砟粒间接触力分布特征。加载结束时, 试样法向力链的空间分布如图 13 所示, 其连线宽度正比于接触力大小。

由图 13 可见, 球颗粒试样 S1 的力链分布稀疏, 颗粒堆积结构与传力路径的复杂性不及多面体试样。球颗粒试样主力链上下贯通, 在径向边缘处接触力未明显衰减; 多面体试样的主力链集中于试样 1/2 高度以上, 在试样下层, 仅有少数主

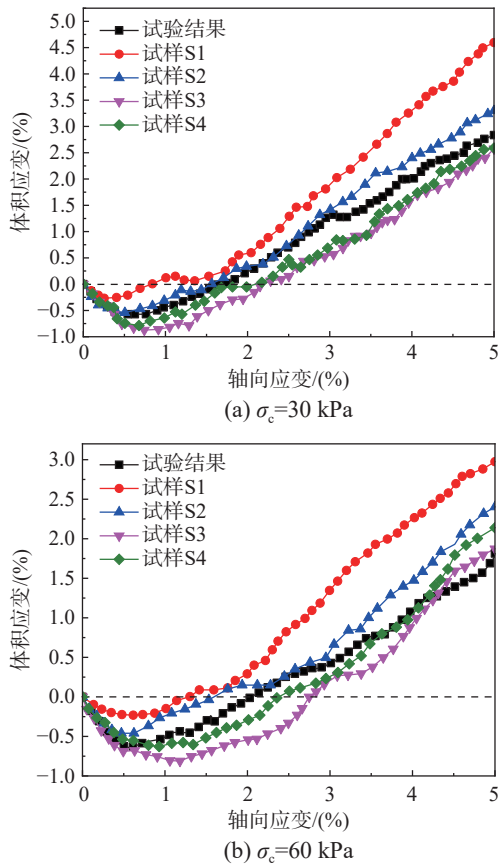


图 12 各类试样体积应变-轴向应变结果

Fig. 12 Volumetric strain-shear strain curves with different particle shapes

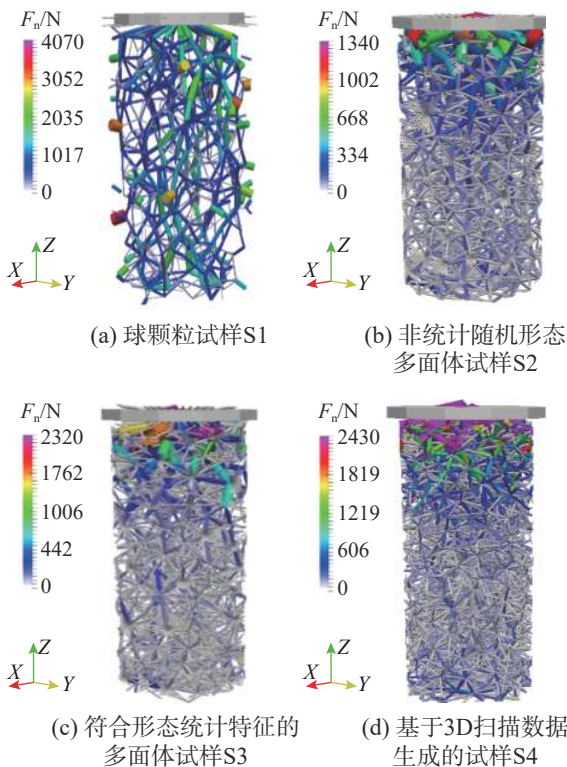


图 13 加载结束时道砟数值试样力链分布图 ($\sigma_3=60$ kPa)

Fig. 13 Force chain distribution of ballast specimens after loading ($\sigma_3=60$ kPa)

力链分布于试样轴心位置，其外侧被众多弱力链包裹。由此可见，道砟形态不仅影响颗粒堆积结构，还在一定程度上决定了粒间接触力分布，而上述两者均为影响道砟试样宏观力学行为的主要因素。

球颗粒试样无法刻画复杂颗粒形态，其力链网络的分布形式与真实道砟试样存在较大偏差；而对于三类多面体试样，其力链分布模式相似，差异主要体现于试样上部主力链的分布范围与发展程度上。因此分析道砟试样细观力学特性时，研究对象除整体试样外，还应着重于试样 1/2 高度以上部分，以探究形态统计特征对道砟细观力学行为的影响。

3.2.1 道砟试样堆积结构演化特征

道砟之间非均匀的排布形式构成了其内部复杂的堆积结构，对试样变形特性有重要影响^[9]。平均配位数 Z_m 是量化颗粒材料内部结构的常用参数，定义为各颗粒与其周边颗粒的平均接触数，计算方法如式 (8) 所示：

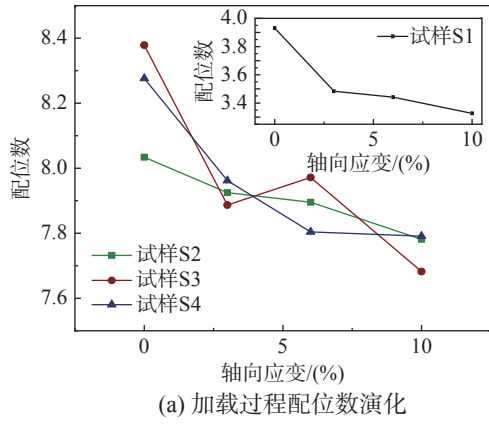
$$Z_m = \frac{2C}{N - N_0} \quad (8)$$

式中： C 为颗粒总接触数； N 为总颗粒数； N_0 为无接触颗粒数。

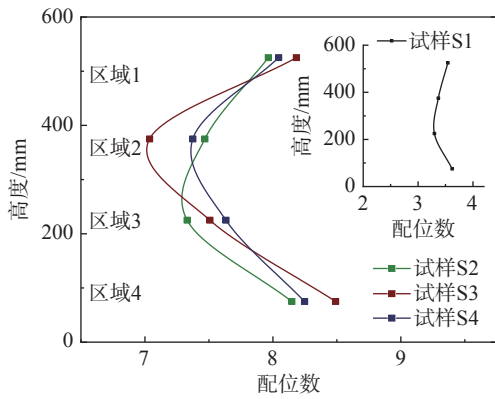
采用上述方法，计算加载过程中四类道砟数值试样平均配位数的演化情况；并沿高度方向将试样分为 4 个区域，计算加载后不同区域配位数分布情况，结果如图 14 所示。

由图 14(a) 可见，与现有计算结果^[13] 相似，多面体试样的平均配位数始终大于球颗粒试样。加载前期，试样堆积结构快速调整，棱角嵌固使试样内部形成骨架结构，部分填充颗粒出现局部架空，配位数迅速减小^[27]；随轴向应变增加，试样力链逐渐稳定，颗粒堆积结构调整趋缓，配位数降幅减小。

综合图 14(b) 中试样配位数竖向分布与图 15 中数值试样整体变形情况分析可见，球颗粒试样不同高度堆积结构调整程度基本一致，配位数最大差异为 0.25，宏观上试样呈现整体鼓胀的变形模式。对于三类多面体试样，区域 2、区域 3 范围内道砟自由度高，棱角嵌固使试样内局部拱效应更为显著，导致该区域密实度降低，试样中部出现侧向鼓胀。在多面体试样计算结果中，试样 S3 与 S4 配位数变化情况更为相似，均在区域 2 出



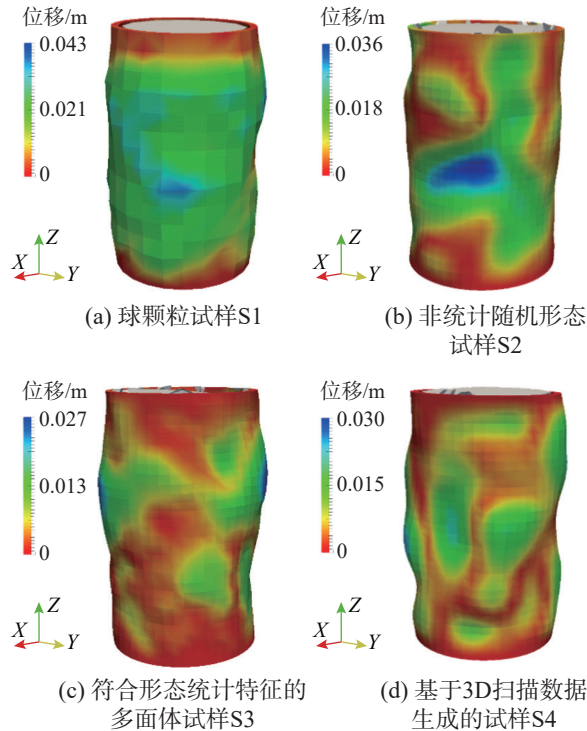
(a) 加载过程配位数演化



(b) 加载后配位数竖向分布

图 14 四类道砟数值试样配位数变化 ($\sigma_3=60$ kPa)

Fig. 14 Coordination number evolution of ballast samples ($\sigma_3=60$ kPa)



(c) 符合形态统计特征的多面体试样S3 (d) 基于3D扫描数据生成的试样S4

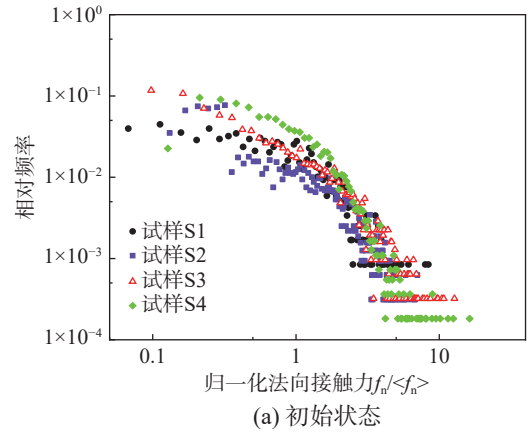
图 15 加载结束时道砟数值试样整体变形分布图 ($\sigma_3=60$ kPa)

Fig. 15 Deformation distribution of ballast specimens after loading ($\sigma_3=60$ kPa)

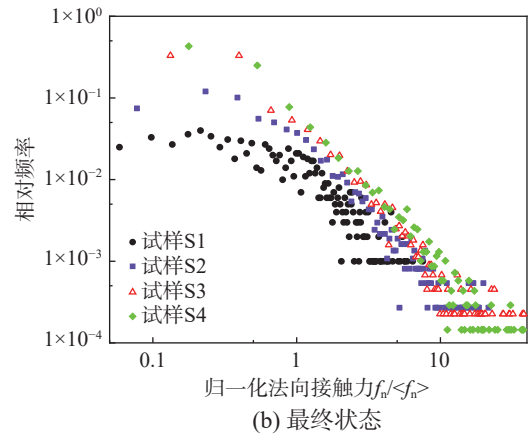
现配位数最小值，宏观上试样 S3 及 S4 呈现上部侧向鼓胀、下部侧向变形较小的变形模式；非统计随机形态试样 S2 中区域 2、区域 3 范围内配位数持续减小，侧向变形的范围偏大。

3.2.2 粒间接触力分布特征

接触力概率密度函数是定量分析粒间接触力分布特征的重要指标^[9]。双对数坐标下，四类道砟数值试样法向接触力 f_n 经平均接触力 $\langle f_n \rangle$ 归一化后的概率密度分布如图 16 所示。



(a) 初始状态



(b) 最终状态

图 16 法向接触力概率密度函数

Fig. 16 Probability density functions of normal contact forces

初始状态下，道砟形态对接触力概率分布的影响较小，道砟强接触 (f_n 大于 $\langle f_n \rangle$) 范围内接触力均呈指数分布，粒间最大接触力均为平均接触力的 10 倍左右。加载结束后，球颗粒试样接触力概率分布未发生显著变化；多面体道砟试样间接触力分布更为离散，接触力体系中强接触占比降低约 15%。结合加载后道砟力链分布情况可见，颗粒间位置调整使道砟传力路径趋于集中的同时增大了主力链上颗粒的接触力水平，其中加载后试样 S3 与 S4 的最大接触力约为平均接触力的 40 倍；试样 S2 中颗粒形态均匀，位置调整程度偏

低,最大接触力仅为平均接触力的 20 倍,因颗粒形态特性产生的道砟接触力差异接近 50%。

粒间接触力过大是导致颗粒破碎的主要原因^[28],而道砟破碎后将进一步引起粒间位置调整,最终导致试样宏观变形差异增大。由本文计算结果可见,因颗粒形态特征造成的粒间接触力差异已不可忽略。

4 结论

采用作者此前^[19]提出的道砟颗粒重构方法,生成了符合实际道砟形态统计特征的试样,构建了不同围压下的三轴计算模型,通过与试验结果对比,验证了模型准确性。研究了形态特征对道砟试样变形特性的影响规律及细观机理,得到以下结论:

(1) 围压由 30 kPa 提高至 60 kPa,颗粒形态对道砟力学响应的影响逐渐显著。满足道砟颗粒实际形态统计特征的数值试样中,颗粒调整产生的嵌固阻力较非统计随机生成的颗粒更强,试样前期剪缩量更大,偏应力变化与试验结果的符合度最高。

(2) 试样侧向鼓胀与道砟堆积结构调整引起的局部密实度降低有关,颗粒整体形状对堆积结构调整的影响显著。与实际情况相比,球颗粒与非统计多面体颗粒的结构调整程度及整体变形范围均偏大。

(3) 因颗粒局部棱角特征不同,道砟接触力演化趋势相近,但最大接触力差异明显;球颗粒试样接触力分布较为均匀,与实际道砟相比,非统计多面体试样接触力最大值偏小接近 50%。

本文仿真模型中道砟采用不可破碎的多面体颗粒,今后研究中,还需引入针对多面体颗粒的破碎准则,以进一步揭示形态统计特性对道砟破碎的影响。

参考文献:

[1] 邵帅,严颖,季顺迎. 土工格栅加强下有砟铁路道床动力特性的离散元-有限元耦合分析[J]. 固体力学学报, 2016, 37(5): 444 - 455.
SHAO Shuai, YAN Ying, JI Shunying. Discrete -finite element analysis of dynamic behaviors of ballasted railway with geogrid reinforcement [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2016, 37(5): 444 - 455. (in Chinese)

[2] HUANG H, TUTUMLUER E, DOMBROW W.

Laboratory characterization of fouled railroad ballast behavior [J]. *Transportation research record*, 2009, 2117(1): 93 - 101.

[3] LACKENBY J, INDRARATNA B, MCDOWELL G, et al. Effect of confining pressure on ballast degradation and deformation under cyclic triaxial loading [J]. *Géotechnique*, 2007, 57(6): 527 - 536.

[4] 于玉贞,张向韬,王远,等. 堆石料真三轴条件下力学特性试验研究进展[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 1 - 21.
YU Yuzhen, ZHANG Xiangtao, WANG Yuan, et al. State-of-the-art: experimental study on mechanical properties of rockfill materials under true triaxial conditions [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(4): 1 - 21. (in Chinese)

[5] LIU S, QIU T, QIAN Y, et al. Simulations of large-scale triaxial shear tests on ballast aggregates using sensing mechanism and real-time (SMART) computing [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 110: 184 - 198.

[6] KARATZA Z, ANDÒ E, PAPANICOLOPULOS S A, et al. Effect of particle morphology and contacts on particle breakage in a granular assembly studied using X-ray tomography [J]. *Granular Matter*, 2019, 21(3): 1 - 13.

[7] 王蕴嘉,宋二祥,张千里. 颗粒形状对堆石料力学特性影响的离散元分析[J]. 工程力学, 2022, 39(3): 137 - 146.
WANG Yunjia, SONG Erxiang, ZHANG Qianli. Dem analysis of the aggregate shape effect on mechanical properties of rockfill [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(3): 137 - 146. (in Chinese)

[8] 边学成,李伟,李公羽,等. 基于颗粒真实几何形状的铁铁路道砟剪切过程三维离散元分析[J]. 工程力学, 2015, 47(9): 135 - 144.
BIAN Xuecheng, LI Gongyu, LI Wei, et al. Morphology analysis of coarse aggregate based on 3d imaging method by using two planar mirrors [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 47(9): 135 - 144. (in Chinese)

[9] AZEMA E, RADJAI F, SAUSSINE G. Quasistatic rheology, force transmission and fabric properties of a packing of irregular polyhedral particles [J]. *Mechanics of Materials*, 2009, 41(6): 729 - 741.

[10] RANTATALO M. Modelling of Railway Sleeper Settlement under Cyclic Loading Using a Hysteretic Ballast Contact Model [J]. *Sustainability*, 2021, 13(21): 12247.

[11] DANESH A, MIRGHASEMI A A, PALASSI M. Evaluation of particle shape on direct shear mechanical behavior of ballast assembly using discrete element method (DEM) [J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, 23: 100357.

[12] 张徐,赵春发,翟婉明,等. 铁路有砟道床振动和变形的离散元模拟与试验验证[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1481 - 1488.
ZHANG Xu, ZHAO Chunfa, ZHAI Wanming, et al.

- Discrete element simulation and its validation on vibration and deformation of railway ballast [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(5): 1481 — 1488. (in Chinese)
- [13] GUO Y, ZHAO C, MARKINE V, et al. Discrete element modelling of railway ballast performance considering particle shape and rolling resistance [J]. *Railway Engineering Science*, 2020, 28(4): 382 — 407.
- [14] BIAN X, LI W, QIAN Y, et al. Micromechanical particle interactions in railway ballast through DEM simulations of direct shear tests [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19(5): 04019031.
- [15] XU Y, YU W, QIE L, et al. Analysis of influence of ballast shape on abrasion resistance using discrete element method [J]. *Construction and Building Materials*, 2020: 121708.
- [16] QIAN Y, LEE S J, TUTUMLUER E, et al. Role of initial particle arrangement in ballast mechanical behavior [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(3): 04017158.
- [17] NOURA O, CHARLES V, GUILLAUME P, et al. 3D Particle Shape modelling and optimization through proper orthogonal decomposition application to railway ballast [J]. *Granular Matter*, 2017, 19(4): 86-1 — 86-14.
- [18] SUHR B, SKIPPER W A, LEWIS R, et al. DEM modelling of railway ballast using the Conical Damage Model: a comprehensive parametrisation strategy [J]. *Granular Matter*, 2022, 24(1): 1 — 25.
- [19] XIAO J, ZHANG X, ZHANG D, et al. Morphological reconstruction method of irregular shaped ballast particles and application in numerical simulation of ballasted track [J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, 24: 100374.
- [20] KRUMBEIN W C. Measurement and Geological Significance of Shape and Roundness of Sedimentary Particles [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1941, 11(2): 64 — 72.
- [21] TB/T2140—2008, 铁路碎石道砟[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- TB/T 2140—2008, Railway Ballast [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008. (in Chinese)
- [22] 井国庆, 王子杰, 施晓毅. 多围压下三轴压缩试验与不可破裂颗粒离散元法分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(10): 82 — 88.
- JING Guoqing, WANG Zijie, SHI Xiaoyi. Ballast triaxial test and non-breakable particle discrete element method analysis under different confining pressures [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(10): 82 — 88. (in Chinese)
- [23] ELIÁŠ J. Simulation of railway ballast using crushable polyhedral particles [J]. *Powder Technology*, 2014, 264(264): 458 — 465.
- [24] 肖军华, 张德, 王延海, 等. 基于DEM-FDM耦合的普通铁路碎石道床-土质基床界面接触应力分析[J]. *工程力学*, 2018, 35(9): 170 — 179.
- XIAO Junhua, ZHANG De, WANG Yanhai, et al. Study on interface stress between ballast and subgrade for traditional railway based on coupled DEM-FDM [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(9): 170 — 179. (in Chinese)
- [25] 马刚, 周伟, 常晓林, 等. 堆石体三轴剪切试验的三维细观数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(5): 80 — 87.
- MA Gang, ZHOU Wei, CHANG Xiaolin, et al. 3D mesoscopic numerical simulation of triaxial shear tests for rockfill [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(5): 80 — 87. (in Chinese)
- [26] 李鹏鹏, 周伟, 熊美林, 等. 复杂形状颗粒DEM模拟及其对宏观力学响应影响研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2018, 51(6): 478 — 486.
- LI Pengpeng, ZHOU Wei, XIONG Meilin, et al. Study of DEM modeling of irregular shaped particle and its influence on macromechanical response [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2018, 51(6): 478 — 486. (in Chinese)
- [27] ZHAO S, ZHOU X. Effects of particle asphericity on the macro-and micro-mechanical behaviors of granular assemblies [J]. *Granular Matter*, 2017, 19(2): 38.
- [28] 潘洪武, 王伟, 张丙印. 基于计算接触力学的粗颗粒土体材料细观性质模拟[J]. *工程力学*, 2020, 37(7): 151 — 158.
- AN Hongwu, WANG Wei, ZHANG Bingyin. Simulation on meso-mechanical property of coarse-grained soil materials based on computational contact method [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(7): 151 — 158. (in Chinese)