

基于离散元法的铁路道床力学特性

高亮, 罗奇, 徐阳, 马春生

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 道砟外形复杂, 其几何形态对道床力学行为有显著影响, 为揭示道砟模拟方法对道床力学行为的影响规律, 针对道砟外形极不规则、咬合作用强的特点, 采用自编算法建立了能模拟真实道砟外形的颗粒簇。基于离散元法, 分别建立了基本球道砟和颗粒簇道砟的三维道床-轨枕空间模型, 分析循环荷载下两种道床的接触力、配位数、道床应力和振动加速度的差异。结果表明, 相同循环荷载下, 颗粒簇道床比基本球道床最大接触力小 769 N, 平均接触力小 10 N, 说明颗粒簇接触力幅值范围更小, 分布更均匀; 基本球配位数在 1.0~3.2 范围内周期变化, 颗粒簇配位数在 5.3~6.1 范围内周期变化, 说明颗粒簇间的接触点更多, 接触状态更稳定; 颗粒簇道床顶部振动加速度和应力比基本球道床的分别小 0.26g, 16 kPa, 说明颗粒簇能反映道砟间的咬合作用, 保持道床的整体受力性。

关键词: 离散元法; 颗粒簇; 接触力; 配位数; 动力响应

中图分类号: U213.7

文献标志码: A

Railway Ballast Bed Mechanical Property Based on Discrete Element Method

GAO Liang, LUO Qi, XU Yang, MA Chunsheng

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Shape of ballast is complex. The irregular shape affects the dynamic characteristic of ballast bed significantly. In order to reveal the effects of simulation methods on railway ballast bed mechanical property, a program is compiled to generate cluster to model real ballast according to the characteristics of ballast irregular shape and interlock behavior. Based on discrete element method, the 3-dimension models of ballast bed and sleeper are established by using sphere ballast and cluster ballast. The paper presents an analysis of the differences of two kinds of ballast bed model under cyclic load on contact force, coordination number, ballast bed stress and acceleration. The results indicate that the maximum contact force of cluster ballast is 769 N smaller

than the sphere ballast and the average contact force is less than 10 N, which shows that magnitude contact force of cluster is smaller and its distribution is more uniform. The coordination number of sphere varies within 1.0~3.2 and that of cluster is between 5.3 and 6.1, which suggests that contact point of cluster is larger and its contact state is more stable. The acceleration of the cluster ballast bed top is 0.26g smaller than the sphere and the stress is less than 16 kPa, which proves that cluster can simulate the interlock behavior and maintain the ballast bed integrity.

Key words: discrete element method; cluster; contact force; coordination number; dynamic response

有砟轨道作为一种传统的轨道结构型式, 具有造价低、振动噪声小、易于维修等优点。德国、法国、日本的高速铁路中有砟轨道所占比例均超过 50%。我国高铁广泛采用的是无砟轨道, 有砟轨道仅占 5%, 但无砟轨道面临服役性能下降、维修困难等难题, 深入研究有砟轨道对我国高速铁路的发展具有巨大的潜在价值。有砟道床属于离散体, 力学机理复杂, 国内对散体道床力学行为的研究存在很多不足, 许多关键科学难题尚未解决, 如高速条件下道砟粉化、轨道几何形位难以保持, 长期运营下轨枕空吊、道床不均匀沉降等, 这些问题严重影响了有砟轨道在高速铁路中的推广应用。

铁路道砟外形极不规则, 棱角多, 颗粒间咬合作用强。道砟形状对道床宏观力学特性有重要影响^[1-3]。国内外学者针对不规则颗粒的模拟方法做了大量研究, 由简单到复杂、从二维到三维, 形成的方法主要有两大类: ①单一圆盘或圆球颗粒; ②多个圆盘或圆球组合体。Ting 等^[4]采用二维椭圆模拟道砟, 肖宏等^[5]采用三维球体模拟道砟, 但这种规则外形颗粒难以反映真实道砟的咬合力。Lim 等^[6-8]在

收稿日期: 2013-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(U1234211, 51108026); 中央高校基本科研业务费专项资金(2012JJBZ011)

第一作者: 高亮(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为铁路轨道结构与轨道动力学. E-mail: lgao@bjtu.edu.cn

PFC3D(Particle Flow Code 3-Dimensional)中将球颗粒黏结成具有破碎功能的颗粒簇,井国庆等^[9]在PFC2D(Particle Flow Code 2-Dimensional)中利用连接杆将7个圆盘组合成颗粒簇,这种颗粒簇较规则外形颗粒有所改进,但他们分析中采用的颗粒形态比较单一,不能反映道砟外形的多样性. Lu等^[10-11]以圆球为基本单元,通过空间位置的随机组合生成不规则颗粒簇.

国内外学者对道砟模拟方法做了一定的研究,但既有研究结果大多基于道砟箱小尺度模型,缺乏从实际道床全尺寸的角度,深入分析单一圆球和圆球组合体两种模拟方法对道床力学性能的影响.

本文利用PFC3D建立了颗粒簇道砟模型和单一球体道砟模型,采用落雨法配合分层捣固生成道床全尺寸模型,两种模型的参数保持一致. 颗粒簇模型的主要特点是能够方便地控制球体组成数目和组合方式,以有效模拟各种外形的道砟;组成颗粒簇的球体之间没有内力,颗粒簇作为一个刚体参与计算.

1 轨枕-道床离散元模型的建立与验证

离散元法DEM(Discrete Element Method)将颗粒离散成一个个单元的集合,通过牛顿第二定律建立单元的运动方程,单元之间的接触通过弹簧和阻尼器来连接. 有限元法FEM(Finite Element Method)不能反映道砟颗粒外形、级配等重要参数对道床力学性能的影响,而离散元法通过简单明确的物理参数,直接明了地揭示道砟颗粒间的相互作用. 近年来,离散元法逐步应用于铁路道床的研究.

PFC3D是一款基于离散元理论的分析软件,它从微观角度研究颗粒的力学特性,适合模拟任意形状的三维球集合体,分析复杂组合颗粒之间的相互作用和运动关系. 本文利用PFC3D建立了轨枕-道床三维实体模型,其中道砟采用颗粒簇或者基本球模拟,边界条件采用墙单元模拟,轨枕采用聚单元模拟.

1.1 不规则颗粒簇的生成

道砟外形极不规则,如何最大程度地模拟道砟颗粒形态是研究的关键和难点. 目前,通过组合球体模拟复杂外形颗粒的方法有重叠法^[12]和非重叠法^[13-14]. 本文利用PFC3D中的Fish语言,采用自编重叠算法,利用黏结球的方式生成了能够模拟真实道砟的颗粒簇,如图1,2所示.

自编算法通过圆球数目和组合方式的不同来模



图1 真实道砟颗粒

Fig.1 Real ballast

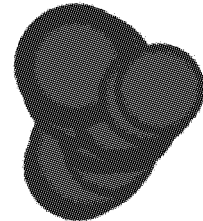


图2 黏接球生成的颗粒簇

Fig.2 Agglutinating clump

拟道砟颗粒的形状和大小,借以真实地反映道砟间的边-角、角-角接触,以及相互咬合关系. 同时需要说明的是,本文中的颗粒簇为不可破碎单元,不考虑荷载下道砟颗粒破碎的情况. 图3a是基本球道砟模型,图3b~3h是部分颗粒簇道砟模型.

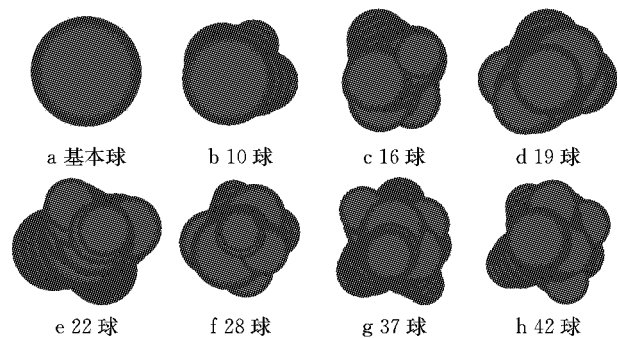


图3 道砟颗粒模型

Fig.3 Models of ballasts

组成颗粒簇的基本球越多,越能反映道砟的外形特征,模拟也就越真实,但计算量也越大. 因此需要在计算效率和道砟仿真程度上做好平衡. McDowell等认为,当组成颗粒簇的基本球数目大于8时,就能反映颗粒间的咬合作用^[15]. 由于实际道砟外形的任意性,尚不可能将所有道砟外形均模拟出来,本文选择了8种典型道砟进行分析,采用的颗粒簇平均由19个圆球组成.

1.2 轨枕-道床离散元模型的建立

利用两种道砟,本文建立了三维轨枕-道床离散元模型. 根据《高速铁路设计规范(试行)》的规定,道床模型顶面宽度3.60 m,厚度0.35 m,边坡坡度1:1.75. 模型中各种尺寸的道砟在道床范围随机分布. 轨枕采用III型混凝土枕,通过球颗粒的规则排列来生成. 两种轨枕-道床分析模型如图4所示.

模型中球体和墙体均满足刚性假设,根据散体力学理论取刚度值,颗粒之间的相互作用基于Mohr-Coulomb滑动摩擦准则. 本文参数选择参考了Lim^[8]和Lu等^[10]的研究,其中摩擦系数是基于大量调研和相关试验分析选取的,具体的取值见表1.

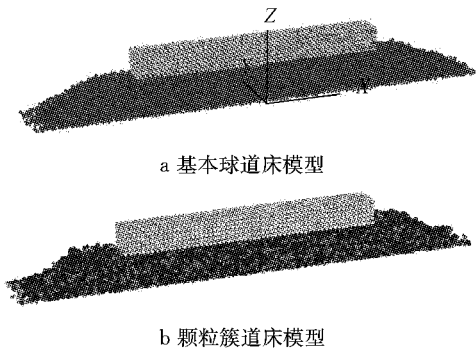


图 4 两种道床模型

Fig. 4 Two kinds of ballast bed model

表 1 道床模型参数

Tab.1 Parameter values for ballast bed model

参数	数值
道砟颗粒法向接触刚度/(N·m ⁻¹)	5×10 ⁸
道砟颗粒切向接触刚度/(N·m ⁻¹)	5×10 ⁸
轨枕颗粒法向黏结刚度/(N·m ⁻¹)	1.6×10 ¹²
轨枕颗粒切向黏结刚度/(N·m ⁻¹)	1.6×10 ¹²
墙体法向接触刚度/(N·m ⁻¹)	1×10 ⁹
墙体切向接触刚度/(N·m ⁻¹)	1×10 ⁹
道砟颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2 600
轨枕颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2 800
颗粒间摩擦系数	0.5

研究散体道床的室内试验,如道砟箱循环荷载试验^[8]和 RTF(railway test facility)列车荷载模拟试验^[16],均是在轨枕上施加正(余)弦荷载,本文在轨枕承轨槽处施加正弦荷载,公式如下:

$$F(t) = F_0(-1 - \sin(2\pi ft - \pi/2))$$

式中: F_0 是枕上压力半峰值,本文采用 70 kN; f 是加载频率,采用 10 Hz; t 为加载时间.在加载周期内,荷载的方向始终向下.

1.3 模型可靠性验证

为研究散体道床的力学特性,并验证离散元道床模型的有效性,作者在京沪高铁徐州铺轨基地有砟轨道段进行了行车荷载测试.同时,为精确模拟行车荷载下的枕上压力,本文利用 Fish 语言编制了枕上压力荷载谱,方法为:先利用 FORTRAN 动力学仿真计算程序,计算机车通过轨道时的动力响应,提取枕上动压力时程图,最后利用 Fish 语言将其编制成荷载谱,如图 5 所示.

图 6a 是机车通过有砟轨道段实测的道床振动加速度图,图 6b 是仿真获得的颗粒簇道床振动加速度图,测试值和仿真值均取于钢轨中心线正下方离轨枕底面 150 mm 处,本文中振动加速度单位为 $g=9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.图 6 表明现场实测和离散元仿真的图形相似,数量级也一致.不同行车速度下,道床振动加速度、道床顶面应力的测试值和仿真值如表 2 所

示.

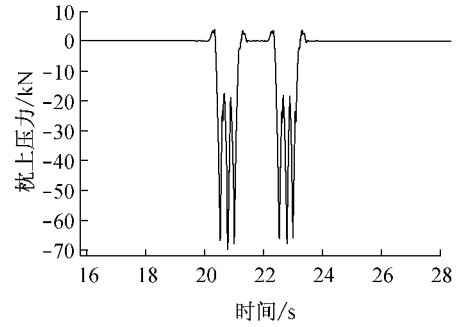
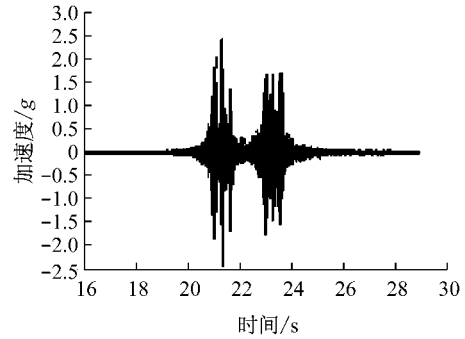
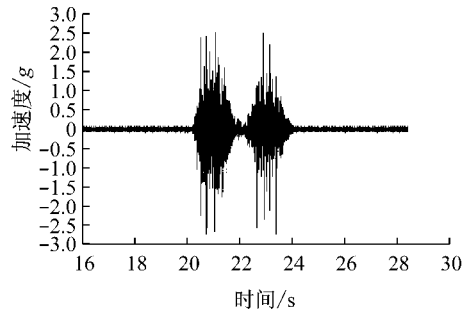


图 5 枕上压力荷载谱

Fig.5 Time history graph for sleeper pressure



a 道床加速度实测结果



b 道床加速度仿真结果

图 6 道床加速度实测与仿真结果

Fig.6 Test and simulation result graphs for ballast bed acceleration

表 2 实测值与仿真值结果

Tab.2 Statistical results of testing and simulation values

速度/ (km·h ⁻¹)	道床加速度/g			道床顶面应力/MPa		
	测试值	颗粒簇 仿真值	基本球 仿真值	测试值	颗粒簇 仿真值	基本球 仿真值
15	2.42	2.74	3.12	0.197	0.225	0.239
20	3.46	3.75	3.94	0.199	0.237	0.253
25	3.85	3.98	4.11	0.205	0.243	0.262
30	4.30	4.43	4.65	0.207	0.257	0.274

表 2 表明,不同行车速度下,两种模型的道床振动加速度和顶面应力的仿真值与测试值接近,验证

了本文所建离散元模型的有效性和可靠性.同时还可以看出,基本球道床仿真结果大于颗粒簇道床,颗粒簇道床的仿真结果更接近实测值.

2 散体道床力学性能分析

本文针对基本球道砟和颗粒簇道砟分别建立了道床-轨枕离散元模型,对比两种模型在循环荷载下的力学性能差异,主要分析了颗粒接触力、配位数、道床应力和振动加速度等指标.

2.1 接触力分布特征分析

道砟接触力直接影响其劣化和寿命,研究表明,当颗粒最大接触力小于 10 kN 时,道砟破碎的概率很小^[7].循环荷载作用下,基本球道床加载、卸载时最大接触力为 5.574 kN,4.807 kN;颗粒簇道床为 4.805 kN,4.776 kN.图 7 是基本球道床加载、卸载时接触力图,图中力的大小与黑线粗细成正比,颗粒簇道床的接触力分布与之相似.

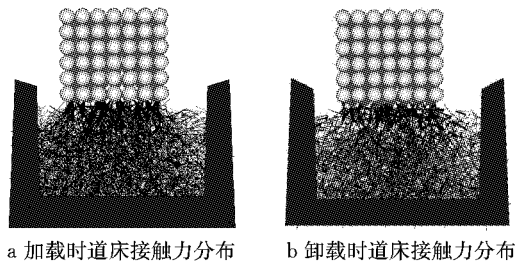


图 7 道床接触力分布

Fig.7 Distribution of ballast contact force

由图 7 可知,上部荷载由轨枕传递到道床时,道砟之间的接触力呈台锥体分布,台锥体之外的接触力接近零.两种模型的接触力均是加载时比卸载时大,但基本球道床的最大接触力比颗粒簇大 769 N.颗粒簇能反映道砟多棱角的特点,颗粒间由于边-角、角-角接触而产生咬合力,而基本球道砟之间的接触只是球体间的点-点接触,传力方式单一.

图 8 是两种道床在循环荷载作用下的平均接触力变化曲线.平均接触力在加载前期变化幅度大,后期逐渐稳定.颗粒簇平均接触力为 34 N,基本球为 44 N,颗粒簇平均接触力小于基本球.由图 8 可知,颗粒簇的平均接触力和最大接触力比基本球小,说明基本球接触力幅值范围大,而颗粒簇接触力幅值范围小,分布更加均匀.

2.2 配位数变化规律分析

配位数是颗粒间平均接触点数,能够反映道砟与周围颗粒的接触情况.本文分析了循环荷载下两

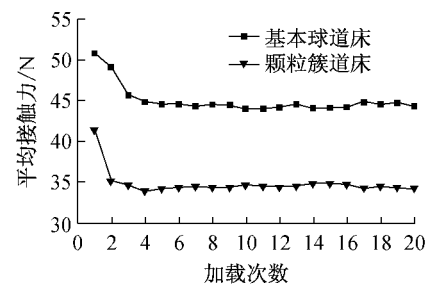


图 8 道砟平均接触力变化

Fig.8 Variation diagram of ballast average contact force

种道床模型在纵横垂向不同位置处的道砟配位数,配位数通过测量球域获得.图 4a 中给出了模型坐标系,表 3 中给出了测量球心在道床中的位置,测量球半径取值为 0.10 m.

图 9 是两种道床在循环荷载作用下配位数变化图.由图 9 可知,颗粒簇配位数比基本球大;基本球配位数在 1.0~3.2 范围内周期变化,变化范围大;颗粒簇道砟配位数在 5.3~6.1 范围内周期变化,变化范围小.

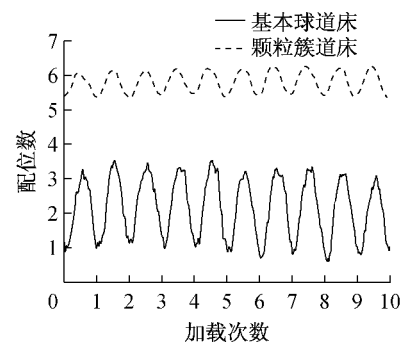


图 9 道床配位数变化

Fig.9 Variation diagram of ballast coordination number

表 3 给出了道床不同位置处的道砟配位数.由表 3 可知,道床不同位置处配位数基本相同;加载和卸载时颗粒簇的配位数约为 6.1 和 5.3,基本球约为 3.2 和 1.0.由此说明颗粒簇与周围颗粒的接触点比基本球多,在荷载作用下,其接触状态也更加稳定.

2.3 道床振动加速度分析

道床振动会加速道砟老化和破碎,导致道砟摩擦力下降,增加道床沉降变形,引起道床沉陷和边坡脚改变,在高速条件下甚至会引出道砟飞溅,这些都会导致道床养护维修工作量剧增,因此有必要研究道床振动加速度.

图 10 是两种模型在循环荷载下道床 0.15 m 深度处的振动加速度图.由图 10 可知,基本球道床的振动比颗粒簇道床剧烈.

表 4 是两种道床不同深度处振动加速度峰值.

表 3 不同道床位置处道砟配位数

Tab.3 Results of ballast coordination number on different locations

方向	球心坐标/m	基本球道床配位数		颗粒簇道床配位数	
		加载	卸载	加载	卸载
垂向	0,0.3,0.3	3.21	1.04	6.08	5.32
	0,0.3,0.2	3.17	1.06	6.03	5.28
	0,0.3,0.1	3.17	1.08	6.05	5.38
横向	0.6,0.3,0.2	3.23	0.98	6.11	5.25
	0,0.3,0.2	3.17	1.06	6.03	5.28
	-0.6,0.3,0.2	3.20	1.05	6.12	5.27
纵向	0,0.4,0.2	3.23	0.96	6.05	5.36
	0,0.3,0.2	3.17	1.06	6.03	5.28
	0,0.2,0.2	3.25	1.06	6.13	5.29

表 4 道床不同深度处振动加速度峰值

Tab.4 Ballast bed maximum acceleration at different depths

道床类型	不同深度道床振动加速度峰值/g			
	0.05 m	0.15 m	0.25 m	0.35 m
基本球道床	4.21	3.47	1.74	1.27
颗粒簇道床	3.95	2.89	1.37	1.21

变形,道砟是离散体,不能承受拉应力,有限元分析中会出现拉应力,因此需要改进为无拉应力计算模型,过程复杂,而离散元法不存在这个问题.单独的离散颗粒不存在应力,PFC3D 可以在区域内利用平均化处理方式计算出区域平均应力,应力通过测量球域获得.

图 11 是两种道床在连续加载下的应力曲线.由图 11 可以看出,基本球道床比颗粒簇道床应力峰值大.

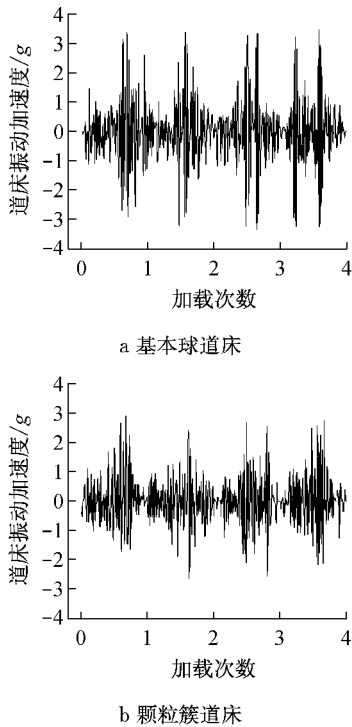


图 10 道床 0.15 m 深度处振动加速度

Fig.10 Graphs of ballast bed acceleration at the depth of 0.15 m

从表 4 可以看出,道床振动加速度随道床深度增加而衰减;颗粒簇道床顶部比基本球振动加速度小 0.26g,比道床底部小 0.06g.道砟间的咬合作用是保持道床整体受力性能的关键,由于颗粒间的互锁作用,可有效抑制道砟飞溅的发生.颗粒簇能反映颗粒间的互锁作用,可有效抑制道床振动,保持道床的整体受力性能.基本球道砟间咬合弱,颗粒容易发生相对运动,道床振动幅度大.

2.4 道床应力分析

道床内部应力分布影响列车运行平稳性和道床

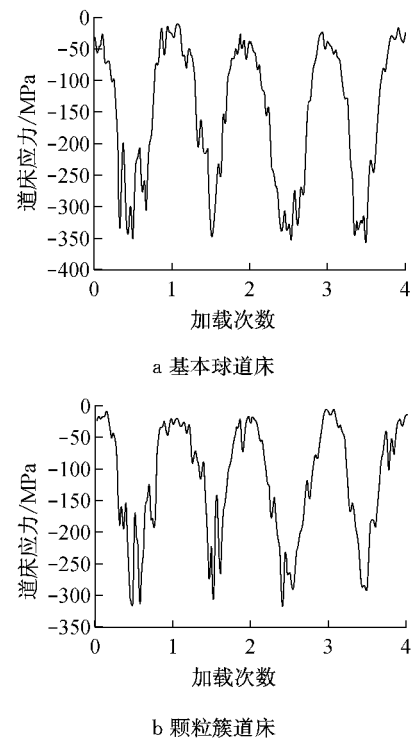


图 11 道床 0.15 m 深度处应力

Fig.11 Graphs of ballast bed stress at the depth of 0.15 m

表 5 是两种道床不同深度处应力峰值.从表 5 可以看出,外部荷载在道床传递中有较大衰减;颗粒簇道床顶部应力比基本球小 0.016 MPa,比底部小 0.035 MPa.颗粒簇外形较不规则,接触面积比基本球大,应力传播方向多,平均每个颗粒分担的应力小.

表5 道床不同深度应力峰值表

Tab.5 Maximum stress of ballast bed at different depths

道床类型	不同深度道床应力/MPa			
	0.05 m	0.15 m	0.25 m	0.35 m
基本球道床	0.394	0.353	0.283	0.129
颗粒簇道床	0.378	0.316	0.235	0.094

3 结论

本文基于离散元法分别建立了基本球和颗粒簇道床模型,分析了单一圆球和圆球组合体两种道砟模拟方法对道床力学行为的影响规律,并利用现场测试结果验证了模型的准确性.主要结论如下:

(1) 循环荷载下,颗粒簇最大接触力和平均接触力分别为 4.805 kN, 34 N, 基本球为 5.574 kN, 44 N. 颗粒簇最大接触力和平均接触力更小,说明颗粒簇接触力幅值范围小,分布也更加均匀.

(2) 基本球配位数随荷载在 1.0~3.2 范围内周期变化,颗粒簇配位数在 5.3~6.1 范围内周期变化.颗粒簇比基本球的接触点多,也更稳定,能够反映道砟间的边-角、角-角接触.

(3) 道床振动加速度从道床顶部传递到底部衰减明显,颗粒簇道床顶部和底部振动加速度分别为 3.95g, 1.21g, 基本球道床为 4.21g, 1.27g. 颗粒簇的咬合作用能维持道床整体稳定性,道床振动小,基本球之间的咬合弱,道床振动大.

(4) 由于应力扩散作用,道床底部应力比顶部小很多.颗粒簇道床顶部和底部应力分别为 0.378, 0.094 MPa, 基本球道床为 0.394, 0.129 MPa. 颗粒簇棱角突出,应力传递方向多,道床应力值比基本球道床小.

以上结论表明,与基本球相比,颗粒簇能更好地模拟道砟,反映不规则道砟颗粒多点接触和咬合作用强的特点.

参考文献:

[1] Tutumluer E, Huang H, Hashash Y, *et al.* Aggregate shape effects on ballast tamping and railroad track lateral stability [C]//Proceedings of the AREMA Annual Conference. Louisville: University of Illinois at Urbana Champaign, 2006: 17-20.

[2] Cheng Y P, Minh N H. DEM investigation of particle size distribution effect on direct shear behaviour of granular agglomerates [C]//6th International Conference on the Micromechanics of Granular Media. Golden: [s. n.], 2009:

401-404.

[3] 严颖,季顺迎.颗粒形态对离散介质剪切强度的影响[J].岩土力学,2009(1):225.

YAN Ying, JI Shunying. Effects of particle shape on shear strength of discrete media[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009 (1): 225.

[4] Ting J M, Khwaja M, Meachum L R, *et al.* An ellipse-based discrete element model for granular materials[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1993, 17(9):603.

[5] 肖宏,高亮,侯博文.铁路道床振动特性的三维离散元分析[J].铁道工程学报,2009(9):14.

XIAO Hong, GAO Liang, HOU Bowen. Analysis of ballast dynamic behavior with three-dimensional discrete element method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(9): 14.

[6] Guerrero S L, Vallejo L E. Discrete element method analysis of railtrack ballast degradation during cyclic loading [J]. Granular Matter, 2006, 8(3):195.

[7] Robertson D, Bolton M D. DEM simulations of crushable grains and soils[C]//4th International Conference on the Micromechanics of Granular Media. Sendai: [s. n.], 2001:623-626.

[8] Lim W L. Mechanics of railway ballast behaviour [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2004.

[9] 井国庆,封坤,高亮,等.循环荷载作用下道砟破碎老化的离散元仿真[J].西南交通大学学报,2012,42(2):187.

JING Guoqing, FENG Kun, GAO Liang, *et al.* DEM simulation of ballast degradation and breakage under cyclic loading[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 42(2): 187.

[10] Lu M, McDowell G R. The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method [J]. Granular Matter, 2007, 9(1):69.

[11] 井国庆,高亮,邵磊.吹砟车维修机理离散元仿真与应用[J].铁道工程学报,2011(11):58.

JING Guoqing, GAO Liang, SHAO Lei. Simulation and application of maintenance mechanism of ballast blowing car with DEM[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011 (11): 58.

[12] Rousan T A, Masad E, Tutumluer E, *et al.* Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(5):978.

[13] 杜欣,曾亚武,高睿,等.基于CT扫描的不规则外形颗粒三维离散元建模[J].上海交通大学学报,2011,45(5):711.

DU Xin, ZENG Yawu, GAO Rui, *et al.* 3-D modelling of irregular shape particles for discrete element method based on X-ray tomography [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(5):711.

[14] 龙浩.空间二叉树在外形不规则颗粒三维建模中的应用[J].武汉大学学报:工学版,2012,45(2):208.

LONG Hao. Application of binary tree to the 3D modeling of irregular particle [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(2): 208.

[15] Lim W L, McDowell G R. Discrete element modeling of railway ballast[J]. Granular Matter, 2005, 7(1): 19.

[16] Aursudkij B, McDowell G R, Collop A C. Cyclic loading of railway ballast under triaxial conditions and in a railway test facility[J]. Granular Matter, 2009 (11):391.