

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.03.012

基于离散元与有限元耦合的 有砟道床动力学特性研究*

栗先增,王立华*,程双娇,项永志
(昆明理工大学机电工程学院,云南昆明650500)

摘要:针对有砟道床的动力学特性问题,对不同行车速度和列车轴重下的轨枕应力和道床沉降情况进行了研究,对细观角度下的道砟平均角速度变化和道床沉降特性之间的关系进行了归纳。提出了一种基于真实道砟颗粒模型,采用有限元与离散元耦合建模的方法建立了轨枕-道床的有砟轨道精细化模型;利用 EDEM 软件和 ANSYS 软件的耦合模块,对不同行车速度和列车轴重下的有砟道床的动力学特性进行了仿真测试分析,在道床沉降上与已有实验数据进行了相关对比。研究表明:该数值模型能够较好地模拟真实情况,行车速度和轴重对于道床沉降呈现正相关关系;行车速度和轴重对于道砟的平均角速度呈现负相关关系;随着列车运行速度和轴重的增加,轨枕最大应力值随之变大;轨枕和道床之间的接触强度越大,道床沉降量也越大。

关键词:有砟道床;有限元;离散元;耦合;动力学特性

中图分类号:TH113.1;U227

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)03-0289-04

Dynamic characteristics of ballast mechanics based on the coupling of discrete element and finite element

LI Xian-zeng, WANG Li-hua, CHENG Shuang-jiao, XIANG Yong-zhi
(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of
Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the dynamic characteristics of the ballast bed, the sleep stress and the bed settlement under different axle speeds and train axle weights were studied, the relationship between the average angular velocity variation of the ballast and the bed settlement characteristics under the mesoscopic angle was studied. The finite element and discrete element coupling modeling method was used to establish the orbital track refinement model of sleeper-track bed based on real ballast particle model. The coupling module of EDEM software and ANSYS software were used, the simulation test analysis of the dynamic characteristics of the ballast bed under different driving speeds and train axle weights was carried out, the correlation between ballast settlement and existing experimental data was compared. The results indicate that the numerical model can simulate the real situation better, the driving speed and axle load have a positive correlation with the settlement of the track bed, the driving speed and axle load have a negative correlation with the average angular velocity of the ballast. As the train running speed and axle load increase, the maximum stress value of the sleeper changes accordingly. The greater the contact strength between the sleeper and the track bed, the greater the settlement of the track bed.

Key words: ballastbed; finite element; discrete element; coupling; dynamic characteristics

0 引 言

随着高速铁路的飞速发展,无砟轨道以其独有的特性成为高速铁路的主要选择。有砟道床中的道砟颗

粒属于离散体,轨道和轨枕属于连续体,因此对有砟轨道进行力学特性分析时不能采用单一的方法。有限元法仅仅能从宏观分析道床整体特性,如 Ali 等^[1]利用有限元方法从整体结构研究道砟的变形与沉降等系列

收稿日期:2018-09-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51765023)

作者简介:栗先增(1992-),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要从事机械动力学及其应用方面的研究。E-mail:240141599@qq.com

通信联系人:王立华,男,博士,教授。E-mail:kmwanglihua@163.com

特性。Abdelkrum 等^[2]利用复杂的有限元模型和参数对颗粒道床整体沉降特性进行研究。而离散元法仅仅能研究颗粒之间相互作用机理,如 McDowell 等^[3-5]基于真实颗粒外形的最小半径离散单元数值模型的构造方法,用所生成的组合球单元对复杂外形的道砟颗粒进行了模拟,对比分析组合单元颗粒与球形单元颗粒在荷载作用下的力学特性。井国庆等^[6]基于二维离散单元法颗粒软件 PFC2D,建立了道砟-轨枕离散单元模型,研究了列车循环荷载作用下道砟颗粒的破碎与轨枕沉降的关系。要同时从宏观和微观方面对有砟道床进行分析,就需要引入有限元和离散元耦合的方法。

近年来,Indraratna 等^[7]通过推导有限差分法与离散元法的耦合边界,利用简化的圆盘单元和二维平面单元的耦合边界分析了颗粒与结构间的相互作用。Dowling 等^[8-9]通过建立散体颗粒与结构的离散元-有限元耦合模型,分析了结构在荷载作用下应力的传播情况,以及结构对散体颗粒离散元模拟区域的影响。严颖等^[10-11]利用离散元法模拟分析道砟颗粒,对轨枕和下部路基等结构进行了有限元分析,通过在两者相互接触面上采用新的接触算法把道砟颗粒与路基等结构间的接触力或接触位置施加到下部路基结构有限元模型的网格节点上,完成耦合过程,分析了不同循环荷载作用下道砟颗粒内部力链分布情况以及轨枕沉降量和路基应力分布情况。

高亮等^[12-13]通过实验验证所建立的轨枕、散体道床与路基三者的离散元和有限差分耦合数值模型,该方法主要是采用离散元法建立散体道砟颗粒的离散元数值模型,用有限差分法建立轨枕与路基的数值模型,在两种算法间引入过渡层,实现两者接触的耦合的过程。综上所述,目前大多数都采用耦合算法的方式对轨枕和道床之间的相互作用关系进行研究。

基于以上研究,本文采用 EDEM 和 ANSYS 耦合分析方法,对不同速度、轴重下的道床沉降特性,道砟的平均角速度和道床沉降之间的关系进行分析,进而研究轨枕和道床之间的相互作用。

1 有砟道床离散元模型

1.1 非规则形状道砟颗粒的构造

本文采用球形颗粒镶嵌组合的方式模拟真实道砟颗粒。在 EDEM 软件中,首先根据道砟颗粒的粒径和形状确定球形颗粒的半径,然后将球形颗粒进行不同的镶嵌,最后形成不同形状的道砟颗粒。这里选取 4 种不同类型的典型道砟颗粒,如图 1 所示。

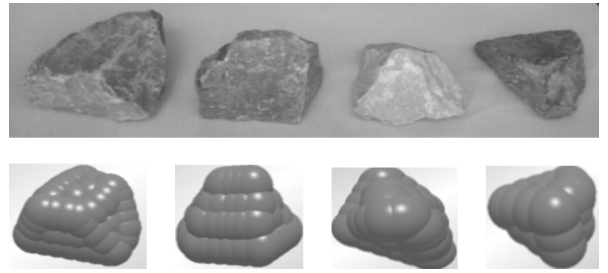


图 1 典型道砟颗粒

为了更好地研究道砟的力学性能,提高计算效率,本文采用的道砟颗粒粒径尺寸在 37 mm ~ 54 mm^[14]之间。

1.2 轨枕-散体道床耦合模型的建立

以列车行驶过程中所受影响最大的轨枕作为研究对象,基于真实颗粒,建立由一根轨枕和有砟道床组成的有砟道床离散元模型,如图 2 所示。

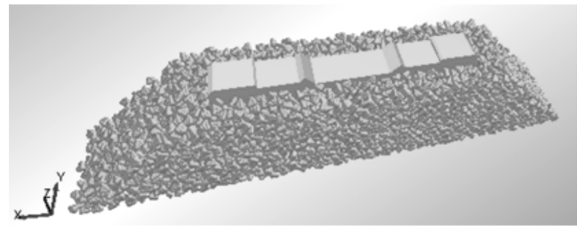


图 2 有砟道床离散元模型

图 2 中上面部分为 III 型混凝土轨枕,下面部分为道砟颗粒形成的道床。汪家蔚^[15]阐述了我国常用轨枕的 3 种类型。根据本文需求,采用 III 型混凝土轨枕,其物理参数如表 1 所示。

表 1 III 型混凝土轨枕物理参数

物理参数	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	剪切模量/Pa
III 型混凝土轨枕	3 000	0.25	3×10^7

道砟材料间的接触参数如表 2 所示。

表 2 道砟材料间的接触参数

接触参数	颗粒间	颗粒与轨枕间
恢复系数 e	0.5	0.5
静摩擦系数 μ_0	0.7	0.4
动摩擦系数 μ	0.2	0.1

2 散体道床力学性能分析

本研究通过离散元仿真,分析不同速度和轴重下的散体道床力学性能,同时细观角度分析道砟平均角速度和道床沉降的关系。

2.1 道床的沉降特性分析

随着列车荷载的反复作用,道砟会逐渐产生运动和变形,进而整个有砟道床会产生一定的沉降,导致轨面不平整,直接威胁列车的运行安全,所以从列车的运行速度和轴重两方面对道床沉降进行研究是必要的。同时与已有实验数据作对比,验证仿真模型的正确性。

仿真模拟中,列车的运行速度范围为 80 km/h、100 km/h、120 km/h、140 km/h 和 160 km/h,列车轴重范围为 16 t、20 t、25 t、27.5 t 和 30 t。

本研究选择载荷作用次数为 10、20、30、40、50、60、70、80、90、100。选取列车轴重为 16 t,行车速度为 80 km/h、100 km/h、120 km/h、140 km/h、160 km/h 时的轨枕垂向沉降规律,如图 3 所示。

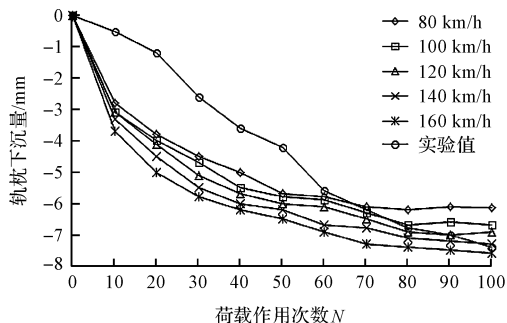


图3 轨枕垂向沉降规律

由图 3 可以看出:仿真得到的数据曲线和文献 [16] 中的实验曲线在下降趋势上基本相同,由此可认为建立的仿真模型能较好的模拟真实情况。随着列车运行速度的增加,散体道床的沉降量在不断增加,到达一定循环次数内沉降量增量趋于平缓;由此可知,散体道床的沉降分为两个阶段,初期沉降阶段和后期稳定沉降阶段,在初期荷载循环作用下道床的沉降量最大,初期沉降量比后期稳定阶段沉降量大;随着荷载作用次数的不断增加,散体道床颗粒之间不断挤压、旋转和相互错动,导致散体道床越来越密实,在达到一定阶段时,散体道床沉降量变小达到后期稳定阶段。

列车行车速度为 80 km/h,列车轴重分别为 16 t、20 t、25 t、27.5 t、30 t 时的轨枕垂向沉降规律如图 4 所示。

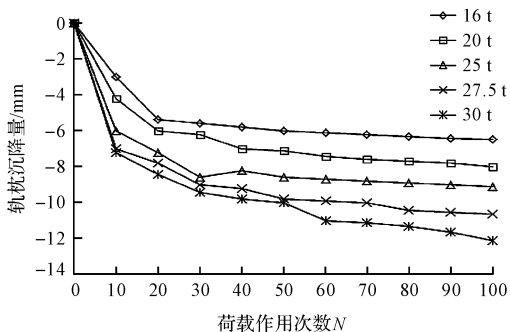


图4 轨枕垂向沉降规律

由图 4 可知:轨枕沉降量随着列车轴重的增加不断增加,沉降规律和行车速度方面基本一致。

2.2 微观角度下的道砟特性分析

道砟之间的相互运动是道床沉降的直接影响因素,所以本文通过提取道砟的平均角速度对道床沉降进行进一步说明。不同行车速度下的道砟颗粒的平均

角速度如图 5 所示。

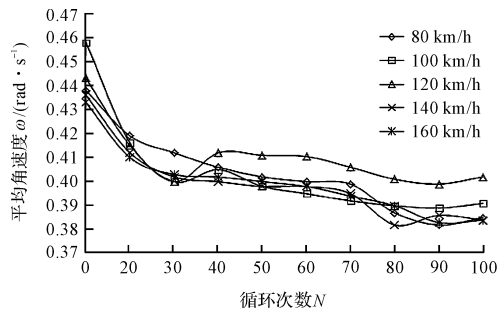


图5 道砟颗粒的平均角速度

由图 5 可知:不同的行车速度下的道砟平均角速度运动趋势大体一致,当循环次数小于 20 时道砟颗粒的角速度值大说明此时道砟颗粒的旋转运动剧烈,道床不密实导致道砟颗粒有足够空间进行转动,随着循环次数的增加,道床在列车运行速度的作用下不断密实使得道砟颗粒旋转空间变少,道砟颗粒角速度变小。结合轨枕沉降可得,随着行车速度的增加,道砟平均角速度减小,道床沉降幅度变小。

同时,提取对于不同轴重下的道砟颗粒平均角速度,如图 6 所示。

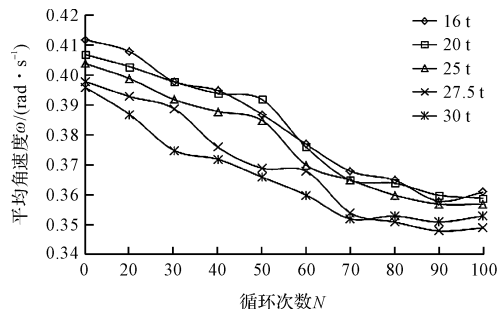


图6 道砟颗粒平均角速度

由图 6 可知:不同轴重下道砟平均角速度和不同行车速度下运动趋势基本一致。随着列车轴重的增加,同一时刻的平均角速度反而小。

3 轨枕受力及道床沉降特性分析

3.1 轨枕受力分析

通过设置不同的行车速度和轴重,对轨枕与道床间的相互作用机理进行求解计算,提取不同行车速度下的轨枕底部与道砟颗粒的接触力,随之导入到 ANSYS 软件进行耦合分析。

对建立的轨枕与道床的耦合模型进行仿真,提取不同线路条件下的轨枕最大应力值,如图 7 所示。

由图 7 可知,随着行车速度和列车轴重的增加,轨枕最大应力值不断变大。

3.2 轨枕道床相互作用分析

通过离散元软件 ANSYS 仿真,得到不同行车速度

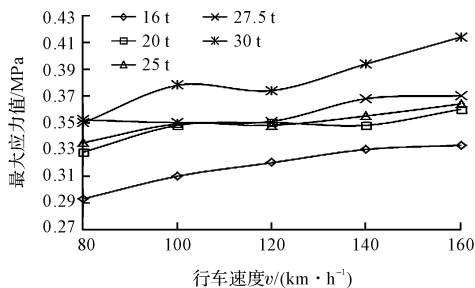


图 7 不同线路条件下的轨枕最大应力值

和轴重下的轨枕底部与道砟间的接触力。轨枕底部与道砟间的接触强度值如图 8 所示。

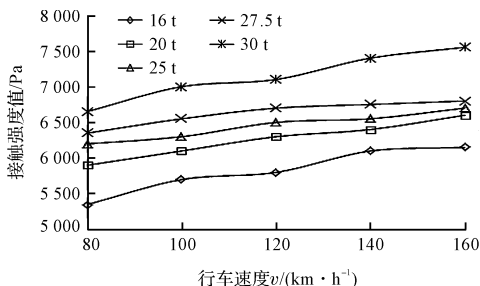


图 8 轨枕底部与道砟间的接触强度值

结合图 3 和图 4 可知:随着运行速度和列车轴重的增加,接触强度值增大。

4 结束语

通过建立轨枕与道床的三维离散元-有限元耦合模型,本文分析了轨枕与道床间的相互作用机理,以及在列车荷载作用下的轨枕沉降量、道砟颗粒角速度的变化,轨枕所受最大应力值和道床-轨枕接触强度与沉降量等关系。分析结果表明:随着列车运行速度和轴重的增加,道床的累积沉降量呈现先增大后减小的趋势,道砟的平均角速度逐渐减小,轨枕底面和道床的接触强度缓慢增大。

研究过程中发现耦合系统还有不足之处,即 AN-SYS 软件不能进行动力学分析。

参考文献 (References) :

[1] SHAER A A, DUHAMEL D, SAB K, et al. Experimental settlement and dynamic behavior of a portion of ballasted railway track under high speed trains [J]. **Journal of Sound & Vibration**, 2008,316(1):211-233.

[2] BUHAN P D, ABDELKRIM M. Numerical integration of a constitutive law for analysing the long-term behaviour of a ballast railway platform[M]// Numerical Models in Geomechanics. 2004.

[3] MCDOWELL G R, M. L U. Discrete element modelling of railway ballast under monotonic and cyclic triaxialloading [J]. **Géotechnique**, 2010,60(6):459-467.

[4] LARYEA S, BAGHSORKHI M S, FERELLEC J F, et al. Comparison of performance of concrete and steel sleepers using experimental and discrete element methods[J]. **Transportation Geotechnics**, 2014,1(4):225-240.

[5] FERELLEC J F, MCDOWELL G R. A simple method to create complex particle shapes for DEM [J]. **Geomechanics&Geoengineering**, 2008,3(3):211-216.

[6] 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,2012,47(2):187-191.

[7] INDRARATNA B, NGO N T, RUJIKIATKAMJORN C, et al. Coupled discrete element-finite difference method for analysing the load-deformation behaviour of a single stone column in soft soil[J]. **Computers &Geotechnics**, 2015,63:267-278.

[8] DOWDING C H, GILBERT C. Dynamic Stability of Rock Slopes and High Frequency Traveling Waves[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 2016,114(10):1069-1088.

[9] DOWDING C H, BELYTSCHKO T B, YEN H J. A coupled finite element-rigid block method for transient analysis of rock caverns[J]. **International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics**,2010,7(1):117-127.

[10] 邵 帅,严 颖,季顺迎.铁路有碴道床动力特性的离散元-有限元耦合模型[C].2014 工程结构可靠性设计理论、方法与应用学术研讨会.大连:大连理工大学,2014.

[11] 严 颖,季顺迎.碎石料直剪实验的组合颗粒单元数值模拟[J].应用力学学报,2009,26(1):1-7.

[12] 高 亮,徐 畅.离散元-有限差分耦合法在铁路有碴道床研究中的应用[J].北京交通大学学报:自然科学版,2016,40(4):37-44.

[13] 王国强,郝万军,王继新.离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M].西安:西北工业大学出版社,2010.

[14] 敖国栋.道砟变形特性的 DDA 方法研究[D].北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2011.

[15] 汪加蔚.我国铁路预应力混凝土轨枕的研究发展动态[J].混凝土与水泥制品,1997(5):23-27.

[16] AL-SAOUDI N K S, HASSAN K H. Behaviour of track ballast under repeated loading[J]. **Geotechnical & Geological Engineering**, 2014,32(1):167-178.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

栗先增,王立华,程双娇,等.基于离散元与有限元耦合的有碴道床动力学特性研究[J].机电工程,2019,36(3):289-292.

LI Xian-zeng, WANG Li-hua, CHENG Shuang-jiao, et al. Dynamic characteristics of ballast mechanics based on the coupling of discrete element and finite element[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(3):289-292. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>