

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.074



开放科学(资源服务)标识码OSID:



基于DEM-MFBD方法的有砟轨道 路基不均匀沉降影响分析

余翠英^{1a}, 雷红博^{1b}, 罗文俊^{1b}, 马斌²

(1. 华东交通大学 a. 理学院; b. 土木建筑学院, 南昌 330013; 2. 中铁二局集团有限公司, 成都 610013)

摘要:针对有砟轨道路基不均匀沉降现象,开展有砟轨道结构整体变形分析。基于离散元-多柔性体动力学耦合方法(DEM-MFBD),建立了一种简化的2.5维有砟轨道耦合模型,并将其用于有砟轨道细观力学特性研究。基于此耦合模型特性,提出荷载及刚度折减方法,对不同路基沉降波长、幅值下有砟轨道结构整体受力变形进行计算分析,在此基础上研究路基不均匀沉降对轨枕空吊的影响规律。结果表明:路基沉降幅值和波长的增加均导致轨道不平顺明显增大,并促使道床应力集中位置外扩;钢轨沉降面积与路基沉降面积的比值(S_1/S_0)可以反映轨枕空吊情况;路基沉降幅值为10~15 mm时出现轨枕空吊,建议沉降限值不超过10 mm,以便工务部门控制轨枕空吊和轨道不平顺等病害。

关键词:有砟轨道;离散元法;多柔性体动力学;路基沉降;刚度折减;轨枕空吊

中图分类号:U213.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)04-0010-09

Analysis of uneven subgrade settlement of ballasted track based on DEM-MFBD method

YU Cuiying^{1a}, LEI Hongbo^{1b}, LUO Wenjun^{1b}, MA Bin²

(1a. School of Science; 1b. School of Civil and Architectural Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 2. China Railway Second Bureau Group Co., Ltd., Chengdu 610013, P. R. China)

Abstract: In view of the uneven settlement of ballasted track subgrade, the overall deformation analysis of ballasted track structure is carried out. Based on the coupling method of discrete element method and multi-flexible body dynamic (DEM-MFBD), a simplified 2.5-dimension coupling model of ballasted track is

收稿日期:2022-04-02

基金项目:国家自然科学基金(52068028);江西省自然科学基金(20212BAB204015);江西省教育厅科技资助项目(GJJ190329);华东交通大学博士启动资金(452)

作者简介:余翠英(1976-),女,博士,副教授,主要从事列车-轨道(桥梁)系统振动、无砟轨道结构损伤机理及脱轨安全控制研究,E-mail:yucuiying1023@163.com。

罗文俊(通信作者),女,教授,博士生导师,E-mail:lwj06051979@163.com。

Received:2022-04-02

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52068028); Natural Science Foundation of Jiangxi Province (No. 20212BAB204015); Science and Technology Foundation of Department of Education of Jiangxi Province (No. GJJ190329); Startup Foundation for Doctors of East China Jiaotong University (No. 452)

Author brief: YU Cuiying (1976-), PhD, associate professor, main research interests: vibration of train-track (bridge) system, structure damage mechanism and derailment safety control of ballastless track, E-mail: yucuiying1023@163.com.

LUO Wenjun (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: lwj06051979@163.com.

introduced and applied to the study of meso-mechanical properties of ballasted track. Based on the characteristics of the coupling model, the load and stiffness reduction method is proposed. The global stress and deformation of the ballasted track structure under different subgrade settlement wavelengths and amplitudes are calculated and analyzed. At the same time, influence of uneven subgrade settlement on unsupported sleepers is studied. The results show that the increase of subgrade settlement amplitude or wavelength obviously leads to the increase of track irregularity and the outward expansion of the stress concentration position of the ballast bed. The ratio of rail settlement area to subgrade settlement area (S_1/S_0) can reflect the status of unsupported sleepers. It is found that the unsupported sleepers are produced when the subgrade settlement amplitude is 10-15 mm. Therefore, it is suggested that the subgrade settlement amplitude should be controlled within 10 mm, so that the engineering department can control the problems such as unsupported sleepers and track irregularity.

Keywords: ballasted track; discrete element method (DEM); multi-flexible body dynamics (MFBD); subgrade settlement; stiffness reduction; unsupported sleepers

在铁路运输高速化、重载化背景下,有砟轨道因其经济性及适应性较强,在世界范围内广泛铺设。由于地质条件复杂及其基床动应力较大^[1],容易发生路基不均匀沉降及轨枕空吊等病害^[2]。路基不均匀沉降已成为影响有砟轨道结构性能和耐久性的关键问题^[3]。

传统试验方法成本高、可重复性差,难以观测道床细观力学行为^[4],当今大多数学者采用数值模拟方法开展轨道沉降受力变形及动力响应研究^[5],尤其是离散元法,作为一种反映颗粒受力与运动状态的数值方法,可准确表达散粒体道床的力学特性,被广泛应用于有砟轨道相关研究^[6]。但是,单纯离散元方法难以准确描述轨道结构的连续体特征,部分学者采用离散元-有限元等耦合方法尝试开展有砟轨道性能研究^[7]。离散元-多柔性体动力学(DEM-MFBD)耦合方法作为一种可以有效反映离散体和连续体之

间的接触及其各自的物理力学特性的仿真方法,目前鲜有应用于有砟轨道的相关研究。

针对有砟轨道上部结构连续性与道床散粒体特征,笔者采用离散元-多柔性体动力学耦合方法,建立有砟轨道结构沉降损伤模型,研究路基不均匀沉降对有砟轨道结构整体受力变形的影响,以期为路基沉降控制和有砟轨道结构综合养护、维修提供理论依据和技术支持。

1 离散元与多柔性体动力学耦合方法

表1为不同数值模拟方法的特性及适用范围的对比。通过对比表1中多种耦合方法的特性,采用离散元-多柔性体动力学耦合方法探讨有砟轨道路基沉降大变形问题。

表1 不同数值模拟方法的对比

Table 1 Comparison of numerical simulation methods

模拟方法	数值模拟特性
离散元-有限元耦合	多为单向耦合,采用有限元方法分析连续结构体的力学响应,多用于解决连续体结构在颗粒运动作用下的力学响应问题,难以考虑连续体变形对散粒体的影响。
离散元-多体动力学耦合	通过模态振型的线性叠加近似地模拟柔性体中节点的位移,常用于小变形下的动力特性分析,不适用于大变形问题。
离散元-多柔性体动力学耦合	以墙单元作为耦合边界,向多柔性体动力学模型传递墙单元接触面的力学信息,实现接触力及柔性体结构非线性变形的准确表达,随后更新离散元模型中墙单元节点的速度和位置,可考虑颗粒与连续体结构的接触与连接,适用于离散结构与连续结构相互作用的非线性大变形问题。

离散元接触模型采用 Hertz-Mindlin 非滑动模型^[8],该模型适于有砟轨道道砟非黏性颗粒的计算。由图1可见,道砟颗粒簇由若干个球单元镶嵌而成,道砟颗粒簇之间的接触即转化为若干个球单元间的两两接触,接触单元间的接触力由单元间的相互

重叠量及相对速度决定。

离散元-多柔性体动力学耦合求解中,墙单元网格面上的接触力往往不在网格节点上,且每个三角形网格上可能有多个接触点,需采用形函数插值法,结合虚功原理,将颗粒作用在耦合面上的接触

力转换为等效节点力,其整体坐标与局部坐标转换公式^[9]为

$$\{x, y, z\}^T = T_{\text{trans } 3 \times 3} \{X, Y, Z\}^T \quad (1)$$

式中: $T_{\text{trans } 3 \times 3}$ 为转换矩阵,则耦合边界上等效接触力计算公式^[9]为

$$T_{\text{nodal } 18 \times 18} = \begin{bmatrix} T_{\text{trans } 3 \times 3} & & & \\ & T_{\text{trans } 3 \times 3} & & \\ & & \ddots & \\ & & & T_{\text{trans } 3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_{m \ 6 \times 6} = \begin{bmatrix} T_{\text{trans } 3 \times 3} & [0] \\ [0] & T_{\text{trans } 3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$F_{\text{nodal } 18 \times 1} = \sum_{m=1}^M T_{\text{nodal } 18 \times 18}^T N_m^T 18 \times 6 T_{m \ 6 \times 6} F_{m \ 6 \times 1} \quad (4)$$

式中: $T_{\text{nodal } 18 \times 18}$ 为等效节点力转换矩阵; $T_{m \ 6 \times 6}$ 为接触力转换矩阵; $F_{\text{nodal } 18 \times 1}$ 为全局坐标系下的等效节点力向量; $F_{m \ 6 \times 1}$ 为全局坐标系下接触点 m 的接触力向量; M 为单元上接触点数量; $N_m^T 18 \times 6$ 为三角形单元形函数矩阵的转置。

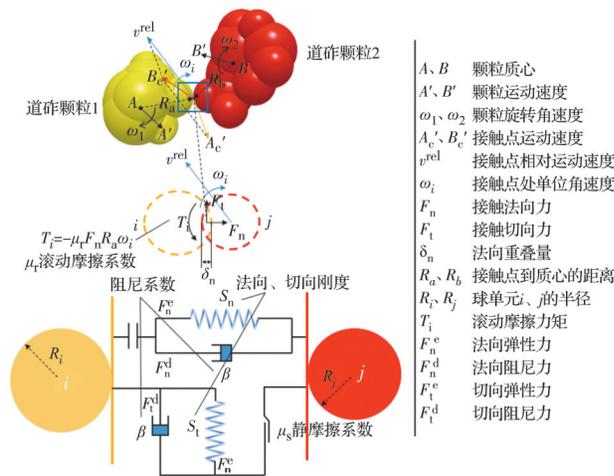


图1 Hertz-Mindlin 非滑动接触模型

Fig. 1 Hertz-Mindlin (no slip) contact model

2 模型的建立

图2为DEM-MFBD耦合过程流程图,有砟轨道结构建模过程分为离散元道床建模和多柔性体动力学上部结构建模,通过轨枕墙单元作为耦合过渡边界,进行轨道上部结构和离散元道床耦合分析。

2.1 有砟轨道道床离散元模型

为准确模拟道床内摩擦力和抗剪强度等力学行为,应考虑道砟的真实几何特征与粒径级配^[10-11]。选取华东交通大学轨道交通实验基地有砟线路的

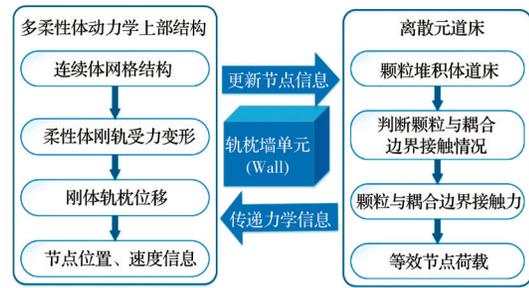


图2 离散元-多柔性体动力学模型耦合流程图

Fig. 2 Flowchart of coupling DEM-MFBD model

特级道砟为样本,利用三维扫描技术获取的不规则道砟外形轮廓作为道砟颗粒外形边界,填充外形边界,建立道砟颗粒簇。如图3所示,根据《铁路碎石道砟》(TB/T 2140—2008)^[11]规范要求,首先剔除道砟针状、片状等异常样本;其次,结合文献[10,12]的经验并多次优化计算,最终选取10种道砟颗粒样本,需要注意的是,样本需借助NX修改粒径比例,以满足颗粒级配要求,故选取样本仅考虑其外形特征影响。其中,每个道砟颗粒平均由9.23个大小不同的球单元构成,用以平衡计算精度及计算效率。



图3 道砟颗粒样本建模过程

Fig. 3 The modeling process of ballast-particle sample

基于离散元的方法目前存在计算耗时高、占用内存大等局限性,加上路基不均匀沉降问题对模型纵向长度的要求^[13],建立全尺度轨道模型难以同时满足计算效率与精度的双重要求,为此,需进行轨道横断面上的简化。参考既有研究^[6]并综合考虑计算精度及计算效率,最终确定轨枕和道床横断面均缩尺为0.2 m宽的2.5维简化模型,如图4所示。离

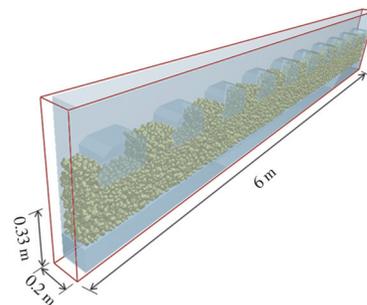


图4 离散元道床模型

Fig. 4 The discrete element model of ballast bed

散元道床模型长为 6 m、宽为 0.2 m、厚度为 0.33 m,模型中共 9 558 个道砟颗粒簇,考虑为特级道砟级配,如图 5 所示。

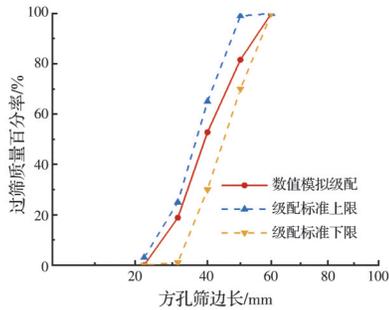


图 5 颗粒级配曲线

Fig. 5 Particle gradation curve

2.2 有砟轨道上部结构多柔性体动力学模型

有砟轨道上部结构采用多柔性体动力学建模(见图 6),将钢轨、轨枕考虑为连续体,钢轨视为柔性体,轨枕视为刚体。选用 60 kg/m 钢轨,长 12.5 m,为实体单元;Ⅲ型弹条扣件,刚度为 6×10^7 N/m,采用 bushing 单元模拟;Ⅲ型混凝土轨枕,轨枕间距为 0.6 m,将轨枕作为耦合边界导出为墙单元。为保证计算效率,仅将路基沉降区段 6 m 范围的道床进行离散元建模。考虑到有砟道床对上部结构的支承作用及不承受拉力的特点,且模型试验中离散元区域外道床受力较小,考虑为无张力弹性,忽略其塑性变形。

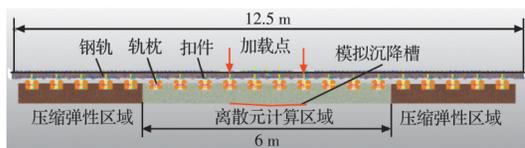


图 6 离散元-多柔性体动力学耦合模型

Fig. 6 The coupling model by DEM-MFBD

模型简化关键在于能否准确反映道床应力状态。假定列车荷载及上部结构自重由轨枕传递至轨枕底面压力为均匀分布,基于轨枕宽度不变,轨枕长度简化为 0.2 m,为保证道床顶面所受平均应力不变,将轨枕底面压力等比例缩减。相对于列车荷载,钢轨和扣件自重影响较小,故仅考虑轨枕底面压力受列车荷载单一因素影响,对输入荷载进行等效折减。

$$F = P + F_{\max}/2 \times k \times [1 - \cos(2\pi ft)] \quad (5)$$

式中: F 为输入总荷载; P 为静荷载; F_{\max} 为动荷载幅值; k 为缩减系数; f 为输入荷载频率。

钢轨外形尺寸与实际情况一致,由材料力学挠曲线近似微分方程可知,钢轨抗弯刚度与弹性模量成正比,外荷载等效折减后应对钢轨进行刚度折减,以准确反映轨道的抗弯特性。

$$E = k \times E' \quad (6)$$

式中: E 为钢轨输入弹性模量; E' 为设计弹性模量。

3 参数标定及模型验证

3.1 模型参数及标定

校准离散元模型参数的方法通常可分为两种:1)基于微观视角的直接测量法,直接在颗粒或接触层面测量参数值;2)基于宏观视角的方法,参数值在宏观角度上反映颗粒堆积体的整体力学行为。显然,直接测量法难以反映所有相关的物理效应,在计算效率及精度的限制下,很难完全恢复颗粒的不规则形状,且颗粒间的相互咬合也会被简化。在宏观方法中,不同参数组合可以得到相同的模拟结果,但参数的真实物理意义不明确^[14]。为应对参数组合的模糊性,需通过多种标准化试验进行验证。结合文献[10,12]的参数选择,在多次试算后确定模型参数,见表 2。

表 2 模型参数

Table 2 Model parameters

钢轨密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	钢轨弹性模量/GPa	钢轨泊松比	轨枕密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	道床孔隙率
7 850	200	0.3	2 400	0.48
道砟密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	道砟弹性模量/GPa	道砟泊松比	道砟摩擦系数	道砟滚动摩擦系数
2 600	10	0.22	0.7	0.3

为验证计算参数反映道砟宏观剪切特性的正确性,首先,参考文献[10]的方法进行三轴压缩试验的数值模拟。如图 7 所示,三轴压缩试验样本尺寸

为 $0.4 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$,以上述离散元道砟模型建立样本,密度为 $1 410 \text{ kg/m}^3$,孔隙率为 45.8%。对模型施加 50 kPa 的围压,将盖板以缓慢的匀速运

动下压至应变为 16.8%，记录盖板与道砟间的接触力，以计算偏应力及应力比；进一步地，参照文献[12]模拟多级剪切试验，模型包括上下两个箱体，在箱体内部装满上述离散元道砟模型，样本尺寸为 0.3 m×0.3 m×0.2 m，密度为 1 448 kg/m³，孔隙率为 46.3%，对上方箱体向下阶段性施加 16.5、31.5、56.5、81.5、106.5 kPa 的压强，并以 0.01 m/s 的速度匀速平移下方箱体，记录上方箱体侧壁压强，以计算切应力。

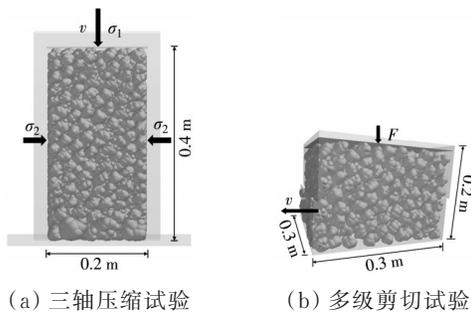


图 7 数值样本

Fig. 7 Numerical sample

水平应力 $\sigma_2 = \sigma_3$ ，参考文献[10]中的方法，通过平均有效应力 p' 及差应力 q 计算内摩擦角 ϕ 。

$$p' = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (7)$$

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (8)$$

$$\sin \phi = p'/q \quad (9)$$

式中： σ_1 和 σ_2 分别为轴向应力和水平应力。

图 8 所示为三轴压缩试验的差应力及应力比与竖向应变的关系，图 9 所示为多级剪切试验中的剪应力变化，数值模拟计算抗压试验中内摩擦角约为 41°，多级剪切试验中内摩擦角为 50.5°。可见，数值模拟结果与相关试验^[10,12]拟合较好，本文结果略大于文献[10,12]结果，考虑到样本级配的差异及本文道砟颗粒不可破碎，误差在可接受范围内，说明选取的本构模型可以还原道床的宏观特性。

3.2 模型验证

为验证模型表达道床应力状态的正确性，基于提出的荷载折减方法，并考虑轮轨力为枕上压力的 3 倍^[15]，对道砟箱试验^[16]工况进行模拟，将模型计算结果与试验结果^[6,16]进行比较。图 10 显示了列车荷载沿轨道纵向 5 根轨枕分散传递至道床（红线表示

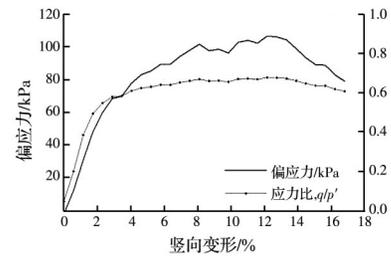


图 8 三轴压缩试验数值样本的偏应力及应力比

Fig. 8 The differential stress and stress ratio of the numerical sample by triaxial compression test

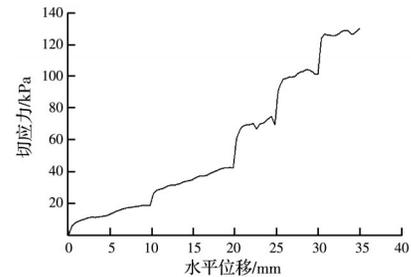


图 9 多级剪切试验数值样本的应力-应变行为

Fig. 9 The stress-displacement behavior of numerical sample by multi-stage shear test

接触力走向，红色越明显表示接触力越大），中间 3 根轨枕承担 75% 以上的列车荷载，与既有研究结论一致^[6]；模型测得最大接触力为 4 287.3 N，文献[16]中最大接触力为 4 233 N，误差约为 1.3%，表明模型能够反映真实道床应力状态。

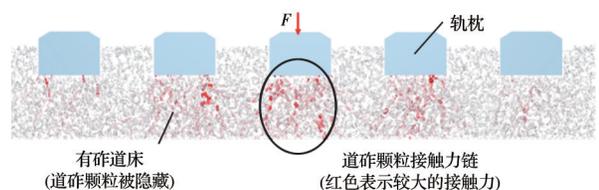


图 10 道床接触力链

Fig. 10 Contact force chain of ballast bed

为进一步验证模型反映轨道结构变形特性的正确性，参照同济大学开展的有砟轨道路基不均匀沉降实尺模型试验^[4]，对钢轨中心相距 1.8 m 的两点施加正弦荷载以模拟单一转向架的动力作用。荷载分为静载与动载两部分，其中静载为 45 kN，动载幅值为 49 kN。路基不均匀沉降为余弦型，路基沉降波长为 2.4 m，沉降幅值为 25 mm。通过试算并参考文献[17]，最终确定荷载频率为 5 Hz，加载 40 个完整周期，可得到钢轨中心点随加载过程的沉降曲线及基本稳定状态下的钢轨沉降变形曲线。

由图 11 可以看出,钢轨顶面中心点的竖直沉降量严格地随着周期性循环荷载的作用而产生周期性变化,并产生弹性变形;由于钢轨累计沉降量不断增大,加载初期钢轨沉降量较大,其增长趋势随循环加载次数的增加逐渐趋于平缓,与相关研究中对道床初期沉降与道床塑性变形的结论一致^[18]。

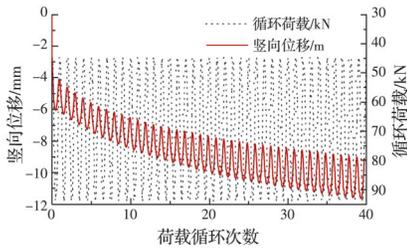


图 11 轨面中心点随循环加载过程的沉降曲线

Fig. 11 Settlement curve of central point of rail with loading process

如图 12 所示,将数值模拟得到钢轨沉降变形与文献[4]对比,仅两数据点相对误差较大,为 11% 和 11.8%,其余数据点相对误差范围为 0.2%~6.9%。数值模拟中钢轨最大沉降量为 7.47 mm,略小于文献[4]中的结果,沉降曲线趋势性拟合较好。考虑到试验的离散性和趋势性,模拟结果合理,数值模型可行,能够反映道床真实应力状态、路基不均匀沉降下轨道结构变形特性及沉降产生的历程及机理。

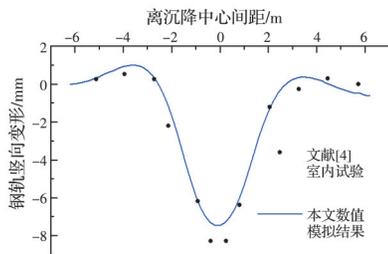


图 12 钢轨沉降变形曲线与文献[4]的对比

Fig. 12 Comparison between the rail settlement deformation curve and literature [4]

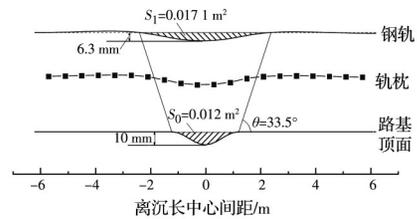
4 计算结果分析

4.1 沉降波长对轨道受力变形的影响

为研究路基不均匀沉降波长下轨道的受力变形规律,鉴于文献[4]足尺试验工况中沉降波长均小于 3 m,工况设定考虑波长范围为 5 根轨枕间距,故设定路基沉降幅值为 10 mm,沉降波长分别为 0.6、1.2、1.8、2.4 m 等 4 种工况,加载 50 个周期,荷载频率为 5 Hz,分析各路基沉降波长下轨道的结构受力

变形特征。

如图 13 所示,轨枕沉降与钢轨沉降变形大致相同。路基沉降波长经道床、轨枕传递到钢轨表面会有一定程度的扩大。测得路基-钢轨沉降波长扩散角 θ 为 $30.3^\circ \sim 34.4^\circ$,略大于文献[4]试验结果,结果表明,路基-轨面沉降波长扩散角受路基沉降波长、幅值变化影响较小,由于道床的塑性形变,路基沉降幅值及沉降面积传递至钢轨表面均有减小。



注: S_0 为路基沉降面积; S_1 为钢轨沉降面积; θ 为路基-钢轨波长扩散角。

图 13 沉降幅值为 10 mm,波长为 2.4 m 时轨道的整体变形

Fig. 13 The overall deformation of track structure with settlement amplitude 10 mm and wavelength 2.4 m

如图 14 所示,路基沉降幅值为 10 mm,波长由 0.6 m 增大至 2.4 m,钢轨不平顺幅值由 1.82 mm 增大至 6.34 mm,增大了约 2.5 倍。同时,钢轨两端的上拱减少,钢轨整体变形呈下沉趋势。当路基沉降波长为 0.6 m 时,钢轨最大沉降量为 -1.79 mm,而钢轨上拱最高达到 1.81 mm,由上拱导致的不平顺较为严重。当路基产生小波长沉降时,钢轨上拱导致的不平顺将影响列车运营的舒适性。

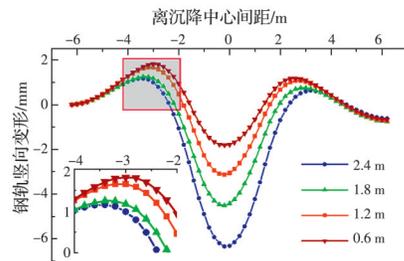
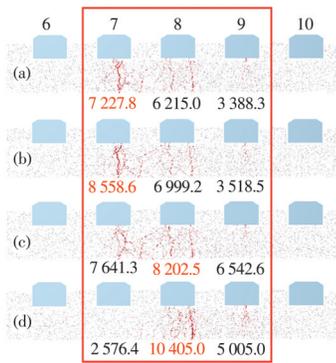


图 14 不同路基沉降波长下钢轨变形

Fig. 14 Rail deformation under different subgrade settlement wavelength

由图 15 可知,在路基沉降区相邻轨枕处,道床应力集中现象明显,随着路基沉降波长的增加,应力集中位置由 7 号轨枕逐渐外扩至 8 号轨枕处,最大接触力整体呈上升趋势。正常情况下,最大接触力为 5 841.5 N,位于 7 号轨枕下方;沉降波长为 0.6、2.4 m 时,最大接触力分别为 7 227.8、10 405.0 N,分别上升了 23.7% 及 78.1%。图 15 中数字为该位置轨枕与道床间接触力,红色突出显示为其中最大

的接触力。



注:(a)0.6 m;(b) 1.2 m;(c) 1.8 m;(d) 2.4 m。

图 15 不同路基沉降波长下道床接触力链

Fig. 15 Contact force chain of ballast bed under different subgrade settlement wavelengths

4.2 沉降幅值对轨道受力变形的影响

为研究路基不均匀沉降幅值对轨道受力变形的影响规律,基于工务维修规则和易操作性,同时借鉴文献[4]的统计和现场调研,设定路基沉降波长为 1.8 m,沉降幅值为 10、15、20 mm 三种工况,加载情况同上,分析不同路基沉降幅值下轨道结构受力变形特征。

如图 16 所示,随着路基沉降幅值由 10 mm 增大至 15、20 mm,钢轨不平顺幅值分别增大了 16% 和 29%。钢轨沉降波长略有扩大,波长扩散角 θ 随之减小,而端部上拱差别不大。

如图 17 所示,随着路基沉降幅值的增大,7 号轨枕与道床的接触力从 7 679.3 N 逐渐降低至 3 693.3 N,同时,8 号轨枕与道床接触力从 8 202.5 N 升高至 10 827.5 N,相较于正常线路,上升了 85.4%,应力集中位置逐渐外扩(由 7 号轨枕向 8 号轨枕迁移)。

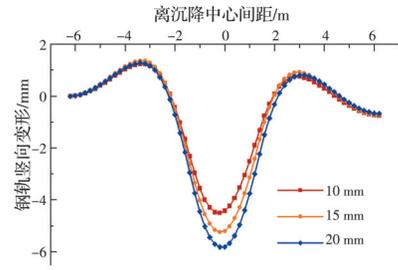
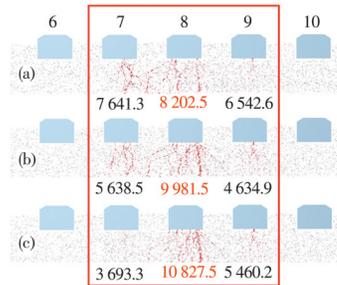


图 16 不同路基沉降幅值下的钢轨变形

Fig. 16 Rail deformation under different subgrade settlement amplitudes



注:(a) 10 mm;(b) 15 mm;(c) 20 mm

图 17 不同路基沉降幅值下的道床接触力链

Fig. 17 Contact force chain of ballast bed under different subgrade settlement amplitude

4.3 路基沉降对轨枕空吊的影响规律

不同沉降波长及幅值的组合数值模拟结果如表 3 所示。由表 3 可知,轨枕空吊情况可由钢轨沉降面积与路基沉降面积之比(S_1/S_0)划分,当 $S_1/S_0 > 1.03$ 时,均没有发现轨枕空吊;而当 $S_1/S_0 \leq 1.03$ 时,均产生不同程度的轨枕空吊。说明通过轨面沉降面积与路基沉降面积的比值反映轨枕空吊情况具有合理性和可行性,但对于该指标反映发生轨枕空吊的临界值及影响机理仍需进一步研究。

表 3 不同工况计算结果

Table 3 The calculation results of different working condition

路基沉降			钢轨沉降					轨枕空吊	
波长/m	幅值/mm	面积 $S_0/(10^3 \text{ mm}^2)$	波长/m	$\theta/(^\circ)$	面积 $S_1/(10^3 \text{ mm}^2)$	比值 S_1/S_0	轨枕与道砟间隙/mm		
0.6	10	3.0	2.91	33.3	3.5	1.17			
0.6	15	4.5	3.09	31.4	4.7	1.04			
1.2	10	6.0	3.42	34.4	6.6	1.10			
1.2	15	9.0	3.76	30.7	9.1	1.01	3.5		
1.8	10	9.0	4.13	33.1	11.0	1.22			
1.8	15	13.5	4.16	32.8	13.0	0.96	3.1		
1.8	20	18.0	4.40	30.3	15.0	0.83	7.3*		
2.4	10	12.0	4.72	33.2	17.1	1.43			
2.4	15	18.0	4.84	31.9	18.5	1.03	4.3		

注:“*”表示轨枕完全空吊。

路基沉降波长为 1.8 m 时,随着沉降幅值由 10 mm 增大至 15、20 mm, S_1/S_0 由 1.22 下降至 0.95 和 0.83,并产生了不同程度的轨枕空吊。沉降幅值为 15 mm 时,轨枕在列车荷载作用下与道床接触,而随着列车荷载的减小,逐渐与道床分离,即为非完全空吊;沉降幅值继续增大至 20 mm 时,在列车荷载作用下,轨枕始终不与道床接触,即为完全空吊。当路基沉降幅值为 15 mm 时,沉降波长由 0.6 mm 增大至 2.4 mm,轨枕与道床间隙由 0 mm 增大至 4.3 mm,轨枕空吊加剧。

在路基沉降波长为 0.6~2.4 m 的条件下,沉降幅值为 10 mm 时,均未发生轨枕空吊;沉降幅值为 15 mm 时,则发生了轨枕空吊。可见,路基沉降波长介于 0.6~2.4 m 之间时,轨枕空吊临界值的路基沉降幅值应介于 10~15 mm 之间,建议将路基沉降幅值控制在 10 mm 以内。

5 结论

1) 基于 DEM-MFBD 耦合方法,提出一种 2.5 维简化模型,该模型可以正确反映有砟道床的宏观力学行为,可应用于有砟轨道沉降变形机理分析。

2) 钢轨沉降面积与路基沉降面积的比值可以反映轨枕空吊情况;当路基沉降波长范围小于 4 根轨枕间距时,轨枕空吊的沉降幅值临界值介于 10~15 mm 之间;建议沉降幅值控制在 10 mm 以内,避免轨枕空吊。

3) 路基沉降波长和幅值的增加均导致轨道不平顺明显增大,并加剧轨枕空吊现象,建议加强路基沉降监测。

4) 路基不均匀沉降促使道床产生应力集中现象,道床应力增大;随着沉降波长和幅值的增加,进一步导致道床应力集中范围外延,长期运营将导致道砟破碎,道床板结;期望为工务维修“科学修,精确修”提供理论依据。

参考文献

[1] 许玉德,赵梓含,乔雨,等.大机捣固养修作业计划多目标决策模型[J].华东交通大学学报,2019,36(3):55-63.
XU Y D, ZHAO Z H, QIAO Y, et al. Multi-objective decision model for tamping maintenance plan of ballast track [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(3): 55-63. (in Chinese)

[2] 崔旭浩,肖宏,肖慧娟,等.轨枕空吊对有砟道床动力

特性影响的离散元分析[J].振动与冲击,2020,39(16):171-179.

CUI X H, XIAO H, XIAO H J, et al. DEM analysis of effect of unsupported sleepers on dynamic characteristics of ballast beds [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(16): 171-179. (in Chinese)

- [3] 翟婉明,赵春发.现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J].西南交通大学学报,2016,51(2):209-226.
ZHAI W M, ZHAO C F. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 209-226. (in Chinese)
- [4] 邹春华,周顺华,王炳龙,等.路基不均匀沉降对有砟轨道沉降影响的模型试验[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(6):862-869.
ZOU C H, ZHOU S H, WANG B L, et al. Model test study of influence of differential subgrade settlement on ballasted track settlement [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(6): 862-869. (in Chinese)
- [5] NGAMKHANDONG C, FENG B, TUTUMLUER E, et al. Evaluation of lateral stability of railway tracks due to ballast degradation [J]. Construction and Building Materials, 2021(2), 278: 122342.
- [6] BIAN X C, LI W, QIAN Y, et al. Analysing the effect of principal stress rotation on railway track settlement by discrete element method [J]. Géotechnique, 2020, 70(9): 803-821.
- [7] NGO T, INDRARATNA B. Mitigating ballast degradation with under-sleeper rubber pads: Experimental and numerical perspectives [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 122: 103540.
- [8] MINDLIN R D, DERESIEWICZ H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces [J]. Journal of Applied Mechanics, 1953, 20(3): 327-344.
- [9] 蔡航.基于离散元与多体有限元法耦合的桥上有砟轨道力学特性研究[D].北京:北京交通大学,2020:23-26.
CAI H. Research on mechanical characteristics of ballasted track on bridge based on coupling of discrete element and multi-body finite element method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020: 23-26. (in Chinese)
- [10] ZHANG Z T, GAO W H, WANG X, et al. Degradation-induced evolution of particle roundness and its effect on the shear behaviour of railway ballast [J]. Transportation Geotechnics, 2020, 24: 100388.
- [11] 铁路碎石道砟: TB/T 2140—2008 [S].北京:中国铁道出版社,2008.
Railway ballast: TB/T 2140-2008 [S]. Beijing: China

- Railway Publishing House, 2008. (in Chinese)
- [12] STAHL M, KONIETZKY H. Discrete element simulation of ballast and gravel under special consideration of grain-shape, grain-size and relative density [J]. *Granular Matter*, 2011, 13(4): 417-428.
- [13] 铁路轨道设计规范: TB 10082—2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
Code for design of railway track: TB 10082-2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017. (in Chinese)
- [14] SUHR B, BUTCHER T A, LEWIS R, et al. Friction and wear in railway ballast stone interfaces [J]. *Tribology International*, 2020, 151: 106498.
- [15] 许良善. 35吨~40吨轴重重载有砟轨道结构试验研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2020: 41-42.
XU L S. Test research on ballast track structure of 35-40 t axle load [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2020: 41-42. (in Chinese)
- [16] LU M, MCDOWELL G R. The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method [J]. *Granular Matter*, 2006, 9(1/2): 69-80.
- [17] ZHANG X, ZHAO C F, ZHAI W M, et al. Investigation of track settlement and ballast degradation in the high-speed railway using a full-scale laboratory test [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2019, 233(8): 869-881.
- [18] INDRARATNA B, THAKUR P K, VINOD J S. Experimental and numerical study of railway ballast behavior under cyclic loading [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2010, 10(4): 136-144.

(编辑 王秀玲)