

道砟非均匀分布对道床力学特性的影响

许玉德^{1,2}, 缪雯颖^{1,2,3}, 李少铮^{1,2}, 刘学敏⁴

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 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;
3. 浙江省轨道交通运营管理集团有限公司, 浙江 杭州 310014; 4. 国能铁路装备有限责任公司, 北京 100011)

摘要: 铁路道床机械清筛作业中, 分次回填道砟颗粒会导致道砟分层, 出现非均匀分布现象。为了解道砟非均匀分布对道床力学特性的影响, 基于离散单元法基本原理, 生成有砟道床仿真模型, 模拟道砟均匀分布、“上大下小”分层分布、“上小下大”分层分布等 3 种道床工况, 分析 3 种道床工况在捣固作业和稳定作业中的力学特性变化。结果表明: 道砟非均匀分布对道床力学特性产生影响, 其中道床密实度特性受道砟分布状态影响较小, 而道床垂向刚度和横向阻力特性则受道砟分布状态影响较大。在捣固作业中, 道砟“上小下大”分层分布最有利于道床垂向刚度提升。在稳定作业中, 道砟“上大下小”分层分布最有利于道床横向阻力提升。道砟颗粒流动则是使得道床垂向刚度和横向阻力提升的重要因素。

关键词: 有砟道床; 颗粒分布; 横向阻力; 垂向刚度; 离散单元法

中图分类号: U216

文献标志码: A

Effect of Uneven Ballast Distribution on Mechanical Characteristics of Ballast Bed

XU Yude^{1,2}, MIAO Wenying^{1,2,3}, LI Shaozheng^{1,2}, LIU Xuemin⁴

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Zhejiang Rail Transit Operation Management Group Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 4. CHN Energy Railway Equipment Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: During the mechanical cleaning operation on ballast bed, backfilling ballast in batches would lead to a layered and uneven ballast distribution. To reveal the effect of uneven ballast distribution on the mechanical properties, the simulation model of ballast bed was

generated based on the basic principle of discrete element method. Then three kinds of ballast layering distributed conditions were simulated in the model, the uniform distribution, "large upper and small lower" distribution and "small upper and large lower" distribution, respectively. And the mechanical characteristics of ballast bed during the tamping operation and the stabilizing operation were analyzed. The results show that the uneven ballast distribution has impact on the mechanical properties of ballast bed. The compactness of ballast bed is less affected, while the vertical stiffness and the lateral resistance are obviously affected. During the tamping operation, the "small upper and large lower" ballast distribution is most conducive to improve the vertical stiffness. While during the stabilizing operation, the "large upper and small lower" ballast distribution is most conducive to improve the transverse resistance. The flow of ballast particles is an important factor to improve the vertical stiffness and the lateral resistance of ballast bed.

Keywords: ballast bed; particle arrangement; lateral resistance; vertical stiffness; discrete element method

利用大型养路机械(以下简称“大机”)进行道床清筛, 可以快速有效地提升铁路线路质量。在现场作业中, 道床原有的脏污道砟被挖出, 由清筛车经振动筛分后将符合级配的道砟分前后两端回填, 道砟不足的地段则由补砟车进行后续补充道砟^[1]。现场反馈, 清筛车筛分回填的道砟与补砟车后续补充的清洁道砟存在粒径差异, 分次回填道砟颗粒会导致道砟分层, 出现非均匀分布现象。

铁路道砟颗粒是散粒体, 故有砟道床具有明显的散体力学特性。目前, 道床力学特性的研究多集中在

收稿日期: 2023-02-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(22120180239); 中国铁路总公司科技研究开发计划(2017G003-B); 国家能源投资集团有限责任公司科技创新项目(GJNY-19-89); 国能铁路装备有限责任公司技术开发项目(TZKY-21-40)

第一作者: 许玉德, 教授, 工学博士, 主要研究方向为轨道管理及养修技术。Email: xuyude2000@163.com



论文
拓展
介绍

微观层面,其中道砟级配粒径^[2-3]、道砟形状^[4-5]、道床脏污^[6-7]等相关特性研究已取得重要成果。但是,现有研究通常假设道砟颗粒在道床中均匀随机分布,较少关注道砟非均匀分布对道床力学特性的影响。在为数不多的相关研究中,文献[8]考虑道砟形态分布的统计规律,分别构建了符合概率分布及随机分布的道砟试样模型,开展三轴试验计算分析,结果表明,不同颗粒形态的分布对道砟力学响应的影响随着围压提高而增大。文献[9]针对相同碎石颗粒的不同分布排列工况开展了室内试验和数值模拟,结果表明不同颗粒初始排列状况下,碎石骨料会产生不同的荷载—变形响应。文献[10]则针对不同分布排列方式的砂土颗粒开展了三轴剪切试验,结果表明不同排列方式下试样的强度不等。类似地,道砟颗粒作为散粒体,出现非均匀分布现象对道床力学特性也势必会产生影响,但如何影响以及影响程度如何,相关研究尚未开展。

本文基于道砟非均匀分布现象,建立大机作业的

有砟道床离散元模型,模拟道砟均匀分布、“上大下小”分层分布、“上小下大”分层分布等3种道床工况,仿真分析3种工况在捣固作业和稳定作业中道床密实度、垂向刚度、横向阻力等特性的变化,初步揭示了道砟分层分布条件下的道床力学特性变化规律,所采用的研究方法以及发现的规律性结果可为深入开展道砟非均匀分布现象研究提供一定的参考。

1 仿真模型

1.1 有砟道床模型

研究表明,道砟形状对道床的宏观力学特性影响较大^[11]。参考文献[12]对道砟形态随机特征的量化统计研究,挑选8种典型道砟颗粒,通过三维激光扫描仪确定道砟表面点云数据,建立道砟颗粒三维模型,采用快速填充颗粒法,生成非球形的复杂颗粒团簇,如图1所示,圆球单元数量在12~16个之间。

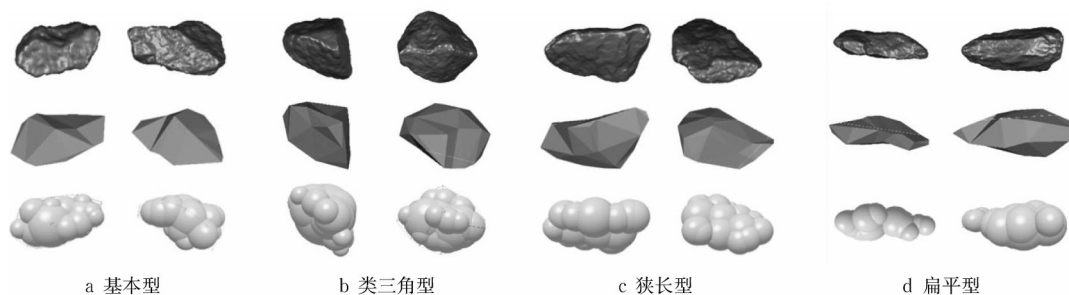


图1 道砟颗粒选取与模拟

Fig.1 Selection and simulation of ballast particles

轨枕选取Ⅲ型混凝土枕,模型中共设置3根轨枕,只针对中间轨枕进行大机作业,两侧轨枕用以减少边界效应影响。设定轨枕间距为60cm,砟肩宽度为50cm,道床底部净空区域30cm,边坡坡度为1:1.75。需要说明的是,有砟道床离散元模型中重点关注道床和轨枕,不考虑上部钢轨及联结零件的作用。

为了解道砟分层分布条件下的道床力学特性,

设置3种道床工况,分别为道砟均匀分布、道砟“上大下小”分层分布(即小颗粒较多分布在下层)、道砟“上小下大”分层分布(即小颗粒较多分布在上层)。如图2所示,为上述3种道床工况在同一纵向截面的分布示意图,其中浅灰色为小颗粒道砟(粒径小于等于35.5mm),深灰色为大颗粒道砟(粒径大于35.5mm)。

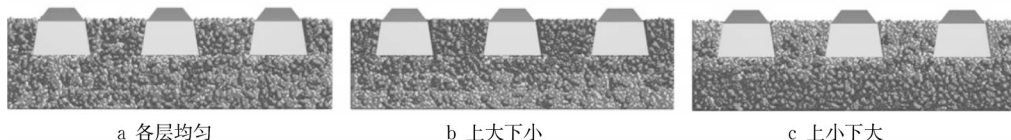


图2 不同道砟分层分布工况截面图

Fig.2 Cross section of different ballast layering distributed conditions

道砟级配分布如图3所示。3种道床工况整体级配相似,如图3a所示,均符合既有线一级碎石道砟粒径级配^[13]。各工况的道砟分层级配则不同,分别

如图3b、3c、3d所示,其中第1层为枕盒区域,第2、3、4层依次为枕下0~10cm、10~20cm、20~30cm区域。

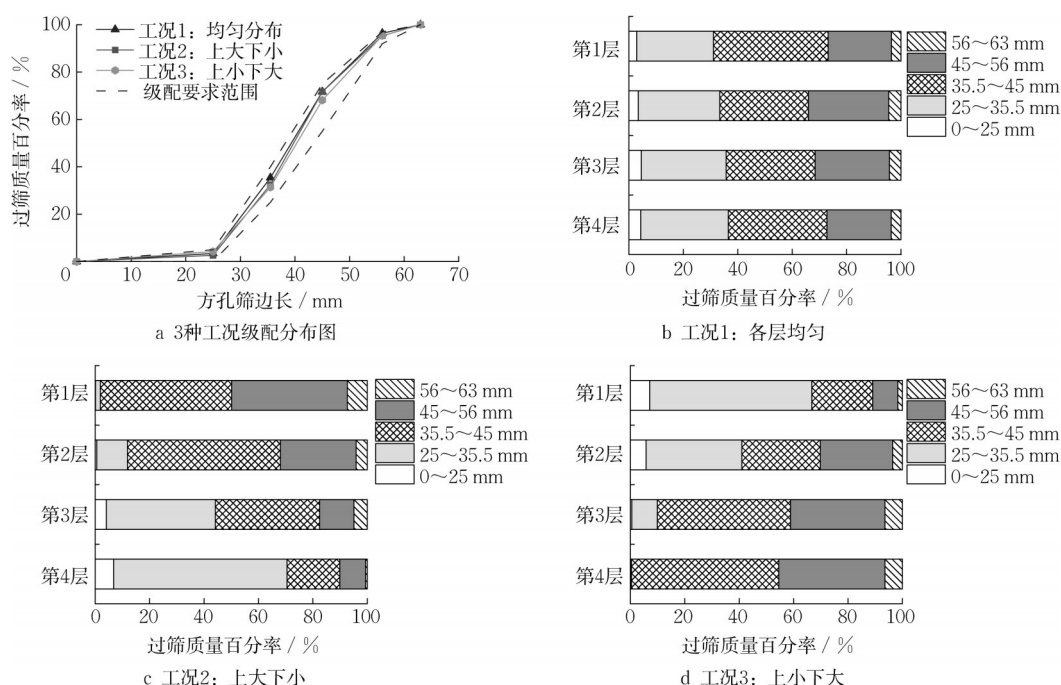


图3 工况设置及级配分布图

Fig.3 Working condition setting and grading distribution diagram

道砟颗粒间以及道砟颗粒与捣镐、轨枕间的作用均采用Hertz Mindlin无滑动接触模型。材料参数与接触参数的选取参考文献[14~16],并经试算调整后取值如表1所示。

表1 道砟与轨枕参数表

Tab.1 Parameters of ballast and sleeper

项目	参数	取值
道砟	泊松比	0.25
	剪切模量Pa	10^{10}
	密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2 600
轨枕	泊松比	0.17
	剪切模量Pa	1.9×10^9
	密度 $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 500
捣镐	泊松比	0.31
	剪切模量Pa	7×10^{10}
	密度 $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 800
道砟与道砟接触参数	恢复系数	0.5
	静摩擦系数	0.7
	动摩擦系数	0.2
道砟与轨枕接触参数	恢复系数	0.5
	静摩擦系数	0.5
	动摩擦系数	0.2
道砟与捣镐接触参数	恢复系数	0.5
	静摩擦系数	0.4
	动摩擦系数	0.1

1.2 大机作业模拟

捣固作业主要通过捣镐的激振和夹持开展,本文参考08—32型抄平起拨道捣固车的内镐与外镐基本尺寸^[17],建立捣镐三维模型,并将其装配至离散元仿真软件中,如图4所示。

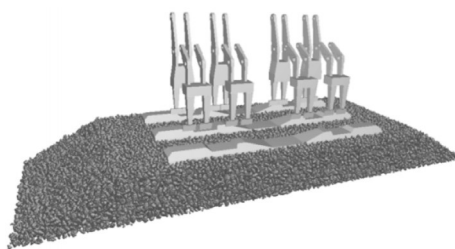


图4 捣固模型建立

Fig4 Establishment of tamping model

根据捣固作业原理,模拟插镐过程如下:① 0~0.2s,抬升轨枕进行起道,起道量20mm;② 0.2~0.6s,捣镐以 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度下插至枕下15mm(即镐掌上边缘与枕底距离15mm);③ 0.6~1.2s,捣镐激振夹持,频率35Hz、振幅6mm;④ 1.2s~1.6s,捣镐以 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度抬起。一次捣固作业包含两次插镐,第一次插镐后稳定0.6s,自2.2s开始第二次插镐过程,一次捣固共计4.2s。作业流程如图5所示。

稳定过程中,激振器使轨排产生水平振动,垂直油缸施加垂直下压力,通过钢轨传递至轨枕,再由轨枕将力传递至道床,改变道砟颗粒原有接触状态,颗粒重新排列密实。为简化模型,提高计算效率,本文通过在轨枕上施加垂直下压力与水平激振力的形式模拟稳定作业过程,如图6所示。根据现场调研得到的稳定作业参数,取垂直下压力为100kN,水平激振力为40kN,水平振动频率为30Hz,作业时间为1s。

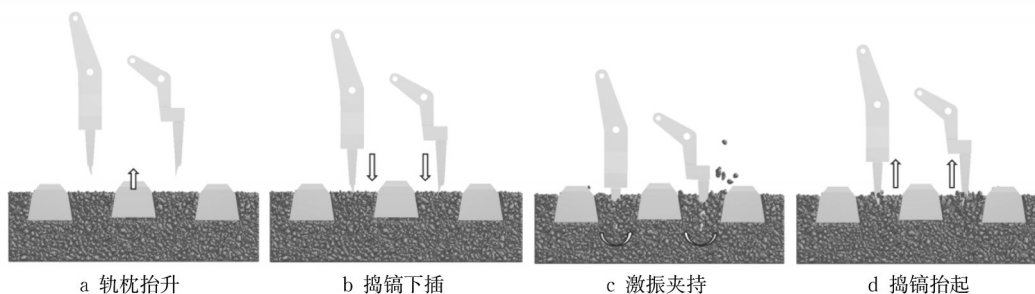


图5 捣固作业流程图

Fig.5 Process of tamping operation

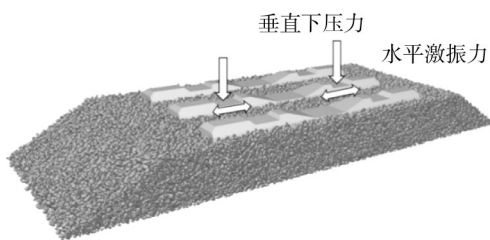


图6 稳定作业模拟

Fig.6 Stabilizing operation simulation

需要说明的是,由于轨枕作为连续介质,在单一的离散元中往往以几何体的形式模拟,作为固定边界参与计算,难以真实反映轨枕与道床的相互作用。因此,本文参考文献[18]的研究成果,采用离散单元

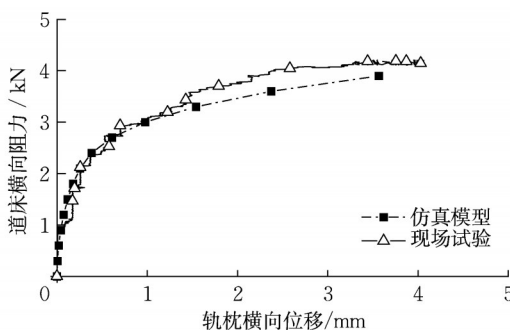
法与多体动力学耦合算法,实现轨枕与道砟间作用力与位移的双向传递。

1.3 仿真模型验证

为使得仿真模型计算的道床力学特性贴近实际,将仿真模型与现场试验的横向阻力测试结果进行对比。现场测试中,在既有重载线路上对清筛回填的道床进行四捣三稳作业,测量作业后的道床横向阻力,现场如图7a所示。仿真模型中,在均匀分布的有砟道床离散元模型上进行四捣三稳作业,而后对中间轨枕缓慢施加横向荷载,提取轨枕所受横向力与横向位移,绘制轨枕横向阻力—横向位移曲线,如图7b所示。对比结果可见,仿真模型得到的道床阻力与现场实测数据变化规律较为相近,可以认为模型是可靠的。



a 现场作业后道床横向阻力测试



b 作业后有砟道床模型的横向阻力测试对比结果

图7 道床横向阻力试验结果

Fig.7 Results of ballast lateral resistance

2 捣固作业中道床力学特性变化

为了解捣固作业对不同区域道砟的扰动情况,选取枕间与枕底两部分区域开展具体分析,如图8所示。枕底区域为中间轨枕正下方,其长宽与轨枕相同,为 $2600\text{mm} \times 320\text{mm}$,高为 300mm ;枕间区域即两轨枕中间区域,其长宽 $2600\text{mm} \times 280\text{mm}$,选取与枕底区域同等高度 300mm 。

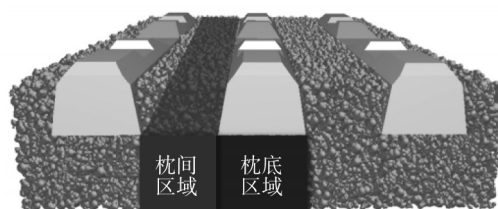


图8 分析区域选取

Fig.8 Selection of analyzing area

2.1 道床密实度变化

道床密实度在宏观层面上反映了道砟颗粒间的排列及接触状况,为了解捣固作业主要区域的颗粒

流动特性,对3种道床工况中枕底与枕间区域的道床密实度开展分析,结果如图9所示。

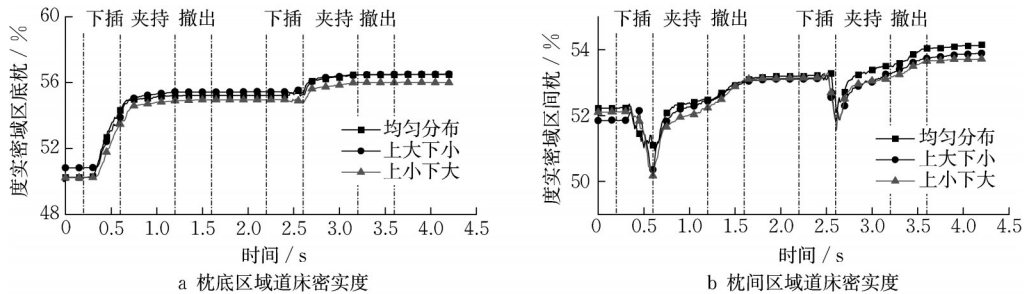


图9 捣固作业中各工况密实度变化曲线

Fig.9 Density variation under various working conditions during tamping operation

由图9可见,在捣固作业过程中,枕间区域道砟不断向枕底流入,最终枕底区域密实度提升较大。而在初始密实度相近的情况下,不同道砟分布情况下的道床密实度变化基本一致,道砟均匀分布、“上大下小”分层分布、“上小下大”分层分布等3种工况的枕底密实度分别提升了6.2%、5.7%、5.8%,枕间密实度分别提升了2.1%、2.1%、1.6%,提升幅值均较为接近,表明道砟非均匀分布对道床密实度特性

影响较小。

2.2 道床垂向刚度变化

道床垂向刚度是评价捣固效果的主要力学指标。在有砟道床模型中向中间轨枕缓慢施加垂向荷载,提取轨枕受到的垂向荷载以及轨枕重心的垂向位移数据,绘制捣固前后的轨枕荷载-位移曲线,如图10所示。

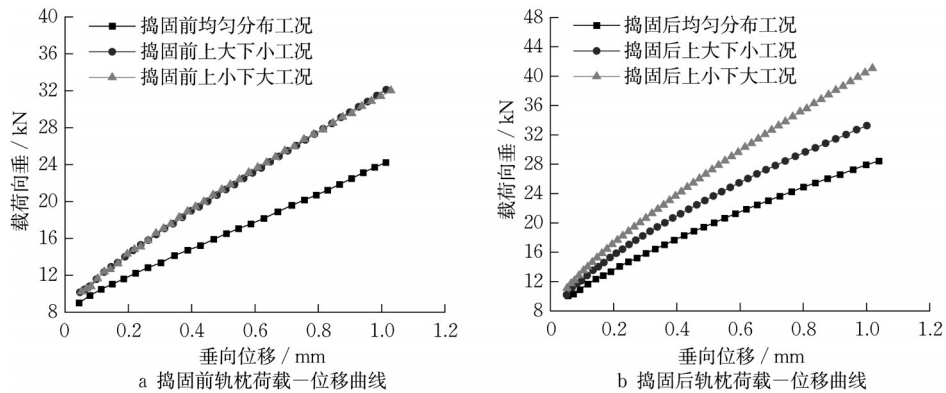


图10 捣固前后轨枕荷载-位移曲线

Fig.10 Load-displacement curve of sleeper before and after tamping

由图10a可见,在捣固作业前,均匀分布工况下道床垂向刚度较低,为 $15.7\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$,而在“上大下小”与“上小下大”分层分布两种工况下,其垂向刚度较为相近,分别为 $22.7\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 $22.3\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。由此可知,在密实度相近的情况下,道砟非均匀分布会对道床垂向刚度产生影响。

而在捣固作业过程中,道砟重新排列组合,轨枕底部道砟进一步密实,垂向刚度也有所提升,如图10b所示,3种工况的垂向刚度分别提升至 $18.7\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 $24.3\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 $31.0\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$,提升幅度分别为

19.1%、7.0%、39.0%。可见,道砟“上小下大”分层分布最有利于道床垂向刚度提升。

2.3 道砟垂向位移变化

为了解枕底各区域内的道砟颗粒位移变化,并对分析小颗粒与大颗粒道砟流动的差异,分别在轨枕中心轴下方5cm、15cm及25cm区域,选取一定数量的小颗粒道砟(粒径小于等于35.5mm)及大颗粒道砟(粒径大于35.5mm),选取区域如图11所示。

提取枕下不同深度处的道砟颗粒竖向位移平均值,汇总如图12所示。

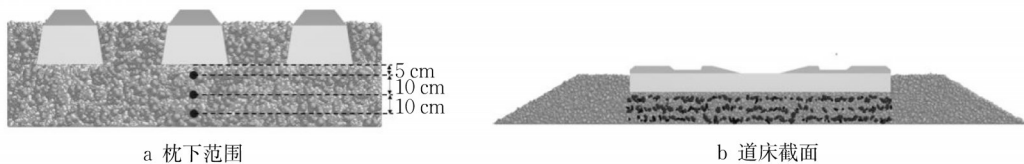


图11 道砟颗粒选取范围

Fig.11 Selection of ballast particles

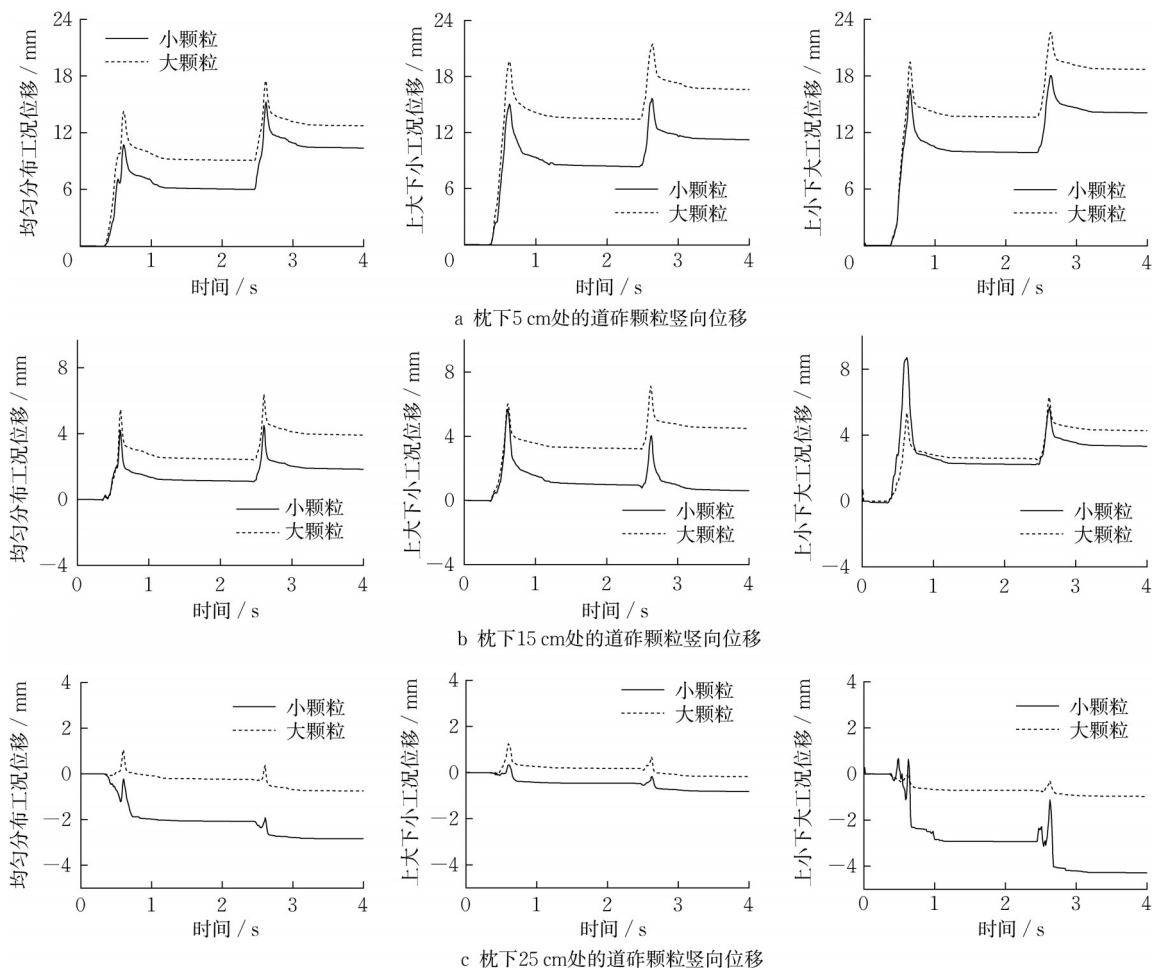


图12 捣固作业过程中道砟颗粒平均竖向位移变化图

Fig.12 Average vertical displacement variation of ballast particles during tamping operation

由图12可知,整体而言,道砟位移由上层至下层依次递减,可见捣固作业过程中颗粒流动主要集中在上层。在枕下5cm处,道砟“上小下大”分层分布工况的位移提升量整体最大,“上大下小”分层分布工况次之。结合垂向刚度值的变化分析可知,道砟流动较多的工况下,垂向刚度提升值也较大。其原因可能在于,道砟竖向位移提升越大,表明枕间区域捣入枕底区域的道砟流动越多,对枕下空隙的填充作用越明显,很大程度上改善了道砟原有的接触状态,宏观上表现为垂向刚度的提升。

具体而言,“上小下大”工况的大颗粒道砟位移

提升与“上大下小”工况下较为相近,而小颗粒道砟的位移明显增大,这是由于该层区域内小颗粒含量较多,在捣固作业下的流动也较多。因此,可以认为,捣固作业过程中小颗粒道砟的流动对道床垂向刚度的提升起到了重要作用。

3 稳定作业中道床力学特性变化

3.1 道床密实度变化

在稳定荷载的竖直下压和横向激振下,道砟都得以重组错动。提取稳定作业下枕底与枕间区域内

的密实度变化曲线,如图13所示。

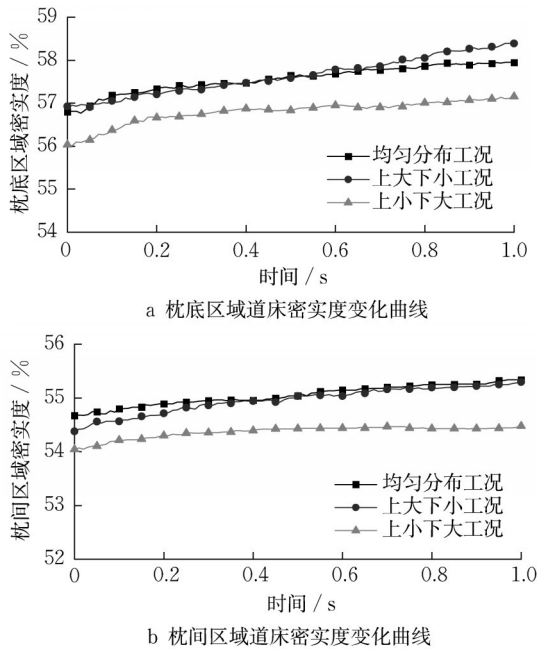


图13 稳定作业中道床密实度变化曲线

Fig.13 Density variation curve of track bed during stabilizing operation

由图13可见,在稳定作业下,3种工况的道床密实度稳步提升,变化趋势基本一致,枕底区域分别提升了1.1%、1.5%、1.2%,枕间区域分别提升了0.6%、0.9%、0.5%,提升幅值均较为接近,表明道砟非均匀分布对道床密实度特性影响较小。且总体而言,稳定作业的密实度提升量小于捣固作业。

3.2 道床横向阻力变化

道床横向阻力是衡量道床稳定性的重要参数,分别提取捣固前、捣固后、稳定后的道床横向阻力,以此探究稳定作业对道床稳定性的提升作用。对中间轨枕缓慢施加横向荷载,提取轨枕所受横向力与横向位移,绘制轨枕横向阻力—横向位移曲线,如图14所示。读取位移2mm相对应的轨枕所受阻力,即为道床横向阻力。

由图14a可见,在作业前,道砟均匀分布、“上大下小”分层分布、“上小下大”分层分布等3种工况的道床横向阻力较为相近,分别为2.55kN、2.43kN、2.61kN。由图14b可见,在捣固作业后,道床受到扰动,横向阻力有所下降,3种工况捣固后的横向阻力分别下降至2.44kN、2.19kN、2.59kN。而由图14c可见,在稳定作业后,道床横向阻力均得到提升,3种工况分别提升至3.36kN、3.98kN、3.68kN,提升幅度为31.8%、63.8%、41.0%。可以认为,道砟非均

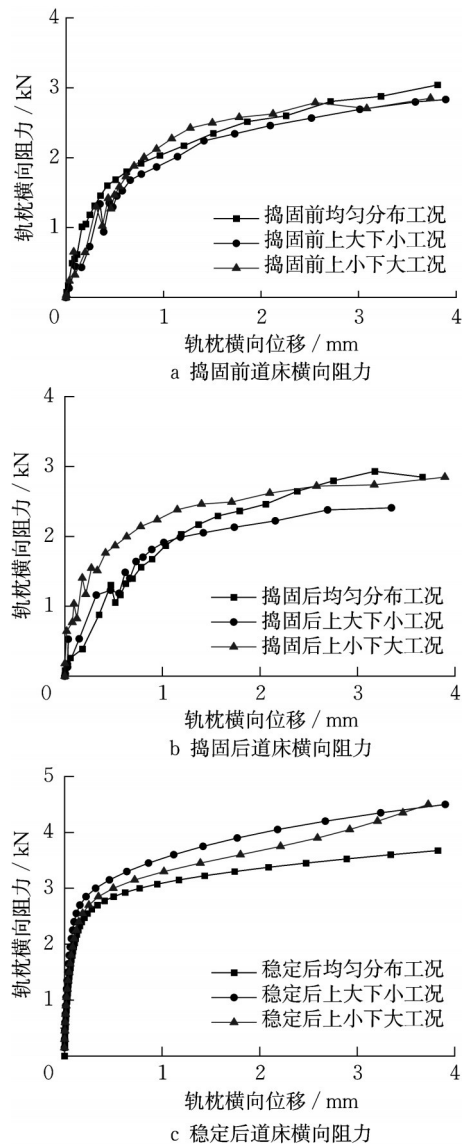


图14 作业前后道床横向阻力变化图

Fig.14 Diagram of lateral resistance change of track bed before and after operation

匀分布会对稳定作业下的横向阻力提升造成影响,其中,道砟“上大下小”分层分布最有利于道床横向阻力提升。

3.3 道砟垂向位移变化

为了解枕底各个区域内的不同粒径大小的道砟运动位移变化,在轨枕中心轴下方5cm、15cm及25cm区域,选取一定数量的小颗粒道砟及大颗粒道砟,输出枕下不同深度处的道砟颗粒竖向位移平均值,汇总如图15所示。

在稳定作业下,道砟颗粒整体向下流动,上层区域沉降大于下层区域。其中,道砟“上大下小”分层分布工况的位移沉降整体最大,“上小下大”分层分布工况在枕下5cm与15mm处的位移沉降与均匀分

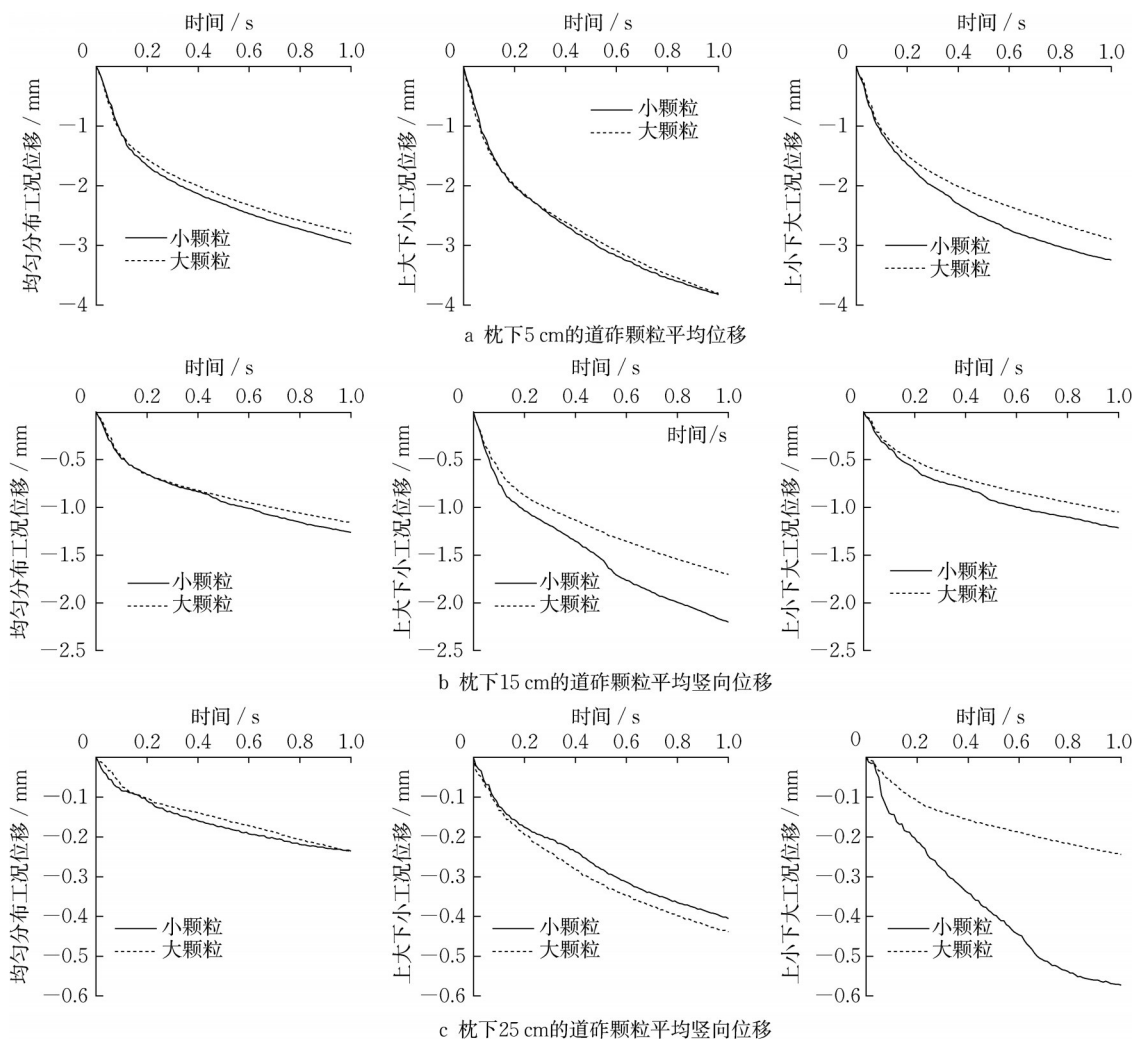


图15 稳定作业中的道砟颗粒平均竖向位移变化图

Fig.15 Average vertical displacement variation of ballast particles during stabilizing operation

布工况相近,枕下25mm区域沉降较大,这是由于该工况底层道砟空隙大,小颗粒流动较多。

结合道床横向阻力值的变化可知,道砟沉降较大的工况下,横向阻力的提升也较大。其原因可能在于,颗粒流动越多,稳定作业的压实效果越好,颗粒间的咬合作用得到加强,进而提升了道床整体稳定性。因此,可以认为,稳定作业下道砟颗粒的整体流动对横向阻力的提升起到了重要作用。

4 结论

基于铁路道床机械清筛作业中出现的道砟非均匀分布现象,建立有砟道床离散元模型,模拟道砟均匀分布、“上大下小”分层分布、“上小下大”分层分布等3种道床工况,仿真分析各工况在捣固作业和稳定作业中道床密实度、垂向刚度、横向阻力等特性的变化。得到主要结论如下:

(1)道床密实度特性受道砟非均匀分布状态影响较小。捣固作业和稳定作业中,3种道床工况的枕间区域与枕底区域道床密实度变化基本一致。

(2)捣固作业中,道砟“上小下大”分层分布最有利于道床垂向刚度提升。捣固作业前,3种道床工况对应的垂向刚度分别为 $15.7\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 $22.7\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 $22.3\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$,捣固作业后提升至 $18.7\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 $24.3\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$ 、 $31.0\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$,提升幅度分别达19.1%、7.0%、39.0%。

(3)稳定作业中,道砟“上大下小”分层分布最有利于道床横向阻力提升。稳定作业前,3种道床工况对应的横向阻力分别为 2.55kN 、 2.43kN 、 2.61kN ,稳定作业后提升至 3.36kN 、 3.98kN 、 3.68kN ,提升幅度分别达31.8%、63.8%、41.0%。

(4)作业中的道砟颗粒流动是道床垂向刚度和横向阻力提升的重要因素。在捣固作业中,道砟“上小下

大”分层分布条件下,小颗粒道砟流动最多,充分填充了枕下空隙,对垂向刚度的提升起到重要作用。而在稳定作业中,道砟“上大下小”分层分布条件下,道砟颗粒的整体流动最多,道床得到压实,对横向阻力的提升起到重要作用。

需要说明的是,由于本文模型仿真中假设的道砟分层分布均为理想工况,无法完全反映现场作业中道砟分布的真实状态,因此在今后的研究工作中,可考虑结合先进的测量技术等来解决这一问题,进一步开展道砟分层分布条件下的试验研究,并重点对如何控制道砟非均匀分布现象开展研究。

作者贡献声明:

许玉德:方案制定;过程监督;论文校修;
 缪雯颖:模型仿真;数据处理;论文写作;
 李少铮:模型仿真;论文校修;
 刘学敏:现场支持;论文校修。

参考文献:

- [1] 赵广苗. QS-650型清筛机抛砟原因分析及技术改造[J]. 铁道建筑, 2014(3): 111.
 ZHAO G. Cause analysis and technical transformation of QS-650 screening machine for ballast throwing [J]. Railway Engineering, 2014(3): 111.
- [2] BAGHERZADEH K A, MIRGHASEMI A A. Numerical and experimental direct shear tests for coarse-grained soils [J]. Particology, 2009, 7(1): 83.
- [3] 邵文杰, 练松良, 杨新文. 碎石道床沉降的离散元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 195.
 SHAO W J, LIAN S L, YANG X W. Analysis of railway ballast settlement with discrete element method [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2017, 45(2): 195.
- [4] 井国庆, 张伟乐, 常锦秀, 等. 针片状指数对道砟直剪力学特性的影响[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(4): 688.
 JING G, QIANG W, CHANG J, *et al.* Effect of flakiness-elongation index on shear behavior of railway ballast [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(4): 688.
- [5] 徐旸, 高亮, 杨国涛, 等. 基于可破碎离散单元的铁路碎石道砟磨损机制研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(2): 124.
 XU Y, GAO L, YANG G, *et al.* Research of wear mechanism of railway ballast based on crushable discrete element [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(2): 124.
- [6] DANESH A, PALASSI M, MIRGHASEMI A A. Effect of sand and clay fouling on the shear strength of railway ballast for different ballast gradations [J]. Granular Matter, 2018, 20(3): 51.
- [7] 陈宪麦, 陈楠, 王日吉, 等. 粗、细粒径煤质对道砟颗粒剪切性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(7): 2789.
- [8] CHEN X, CHEN N, WANG R, *et al.* Influence of coarse and fine coal quality on shear performance of ballast particles [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(7): 2789.
- [8] 薛立华, 肖军华, 张德, 等. 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[J]. 工程力学, 2023, 40(9): 142.
 XUE L, XIAO J, ZHANG D, *et al.* Comparative study on deformation characteristics of ballast triaxial specimens with simulation methods of different particle shapes [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(9): 142.
- [9] 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.
- [10] 刘奉银, 钟丽佳, 仲玥, 等. 不同颗粒排列对砂土力学特性的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S1): 155.
 LIU F, ZHONG L, ZHONG Y, *et al.* Effects of different particle arrangements on mechanical properties of sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S1): 155.
- [11] LU M, MCDOWELL G R. Discrete element modelling of railway ballast under triaxial conditions [J]. Geomechanics & Geoengineering, 2008, 3(4): 257.
- [12] 郭佳奇. 铁路道砟形态随机特征的量化统计研究[D]. 上海: 同济大学, 2019.
 GUO J Q. Quantitative statistical study on the morphological characteristics of railway ballast [D]. Shanghai: Tongji University, 2019.
- [13] 国家铁路局. 铁路碎石道砟: TB/T2140-2008[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
 National Railway . Railway ballast: TB/T2140-2008 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.
- [14] CHRISTIAN R T, GÜNTHER K, *et al.* Development of a standard calibration procedure for the DEM parameters of cohesionless bulk materials—Part II: Efficient optimization-based calibration [J]. Powder Technology, 2020, 360: 967
- [15] 周海燕. 道砟级配对捣固效果的影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
 ZHOU H. Study on the influence of ballast gradation on tamping effect [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.
- [16] 李朋. 铁路碎石道床车致垂向振动特性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
 LI P. Analysis of vertical vibration characteristics of railway ballasted track bed [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [17] 傅文智, 毛必显. 抄平起拨道捣固车[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
 FU W, MAO B. The leveling-lifting-lining-tamping machine [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010.
- [18] SHI S, GAO L, CAI X, *et al.* Effect of tamping operation on mechanical qualities of ballast bed based on DEM-MBD coupling method [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 124: 103574.