文章编号：1673-0291(2026)02-0068-10 DOI：10.11860/j.issn.1673-0291.20250055

大跨桥梁伸缩变形对梁端有砟道床细观力学行为的影响分析

刘万里[1]，柯明亮[1]，蔡小培[1]，张 政[2]，钟子杰[1]
（1.北京交通大学 土木建筑工程学院，北京 100044；2.中铁第四勘察设计院集团有限公司，武汉 430063）

摘 要：针对温度作用下大跨桥梁伸缩变形引起梁端有砟道床力学性能劣化及线路平顺性降低问题，基于离散元法与多体动力学耦合理论，建立桥梁-道床-轨枕耦合模型，揭示主梁伸缩变形与枕群位移作用下，梁端道砟颗粒的运动特性、密实度演化规律及力链传递机制等细观力学行为．结果表明：主梁伸缩工况下，梁端及道床底部道砟运动速度最大，枕间道砟速度最小且呈现显著的上拱趋势；道砟颗粒横向位移均在约 2 mm，枕底处道砟颗粒纵向位移显著大于枕端，且随埋深增加呈递增趋势，最大峰值达 7.36 mm；梁端枕底区域道床密实度随主梁伸长而减小，随收缩而增大，枕盒区域密实度呈波动变化；主梁伸长时道砟接触力增加，收缩时接触力先下降后上升，道床内部力链由底部以约 45°角向表层传递，平均接触力峰值为 18.90 N；在枕群位移作用下，枕侧道砟发生纵向流动，枕底道砟产生旋转错动，枕底和枕盒区的密实度发生波动变化，道床密实度可降低 1.89%，接触力由枕底与枕侧以约 45°角向下传递至道床底部；轨枕接触力主要集中在枕侧和枕底，单根轨枕纵向阻力约 10 kN，低于单轨枕测得的纵向阻力．研究成果阐明了桥梁伸缩变形对梁端有砟道床细观力学行为的影响机制，可为揭示梁端线路平顺性演变规律及保障铁路运营安全提供理论支撑．

关键词：有砟轨道；道砟；桥梁变形；离散元；细观力学
中图分类号：U213.7 **文献标志码**：A

Influence analysis of long-span bridge expansion deformation on meso-mechanical behavior of ballast beds at girder ends

LIU Wanli[1], *KE Mingliang*[1], *CAI Xiaopei*[1], *ZHANG Zheng*[2], *ZHONG Zijie*[1]
（1.School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2.China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China）

Abstract: To address the critical issues of mechanical degradation in the ballast bed at girder ends and the resulting deterioration of track regularity caused by the thermal expansion and contraction of long-span bridges, a bridge-ballast-sleeper coupling model is established based on the coupled discrete element method (DEM) and multi-body dynamics. This study reveals the meso-mechanical behaviors of ballast particles at girder ends, specifically their motion characteristics, compactness evolution, and

收稿日期：2025-04-15；**修回日期**：2025-07-05
基金项目：国家重点研发计划（2022YFB2602900）；中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划（N2023G083）
Foundation items: National Key R&D Plan (2022YFB2602900); China State Railway Group Co., Ltd. Science and Technology Research and Development Program (N2023G083)
第一作者：刘万里（1995—），男，湖北麻城人，博士生．研究方向为铁路轨道结构与轨道动力学．**email**：22110378@bjtu.edu.cn.
引用格式：刘万里，柯明亮，蔡小培，等．大跨桥梁伸缩变形对梁端有砟道床细观力学行为的影响分析[J]．北京交通大学学报，2026，50(2)：68－77.
LIU Wanli, KE Mingliang, CAI Xiaopei, et al. Influence analysis of long-span bridge expansion deformation on meso-mechanical behavior of ballast beds at girder ends[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2026, 50(2): 68－77.(in Chinese)

force chain transmission mechanisms, under the effects of main girder deformation and sleeper group displacement. The results indicate that during the expansion and contraction of the main girder, the ballast particles at the girder end and the bottom of the ballast bed exhibit the highest movement velocities, while those between the sleepers show the lowest velocities with a significant upward arching tendency. The lateral displacement of ballast particles remains consistently at approximately 2 mm. The longitudinal displacement of the particles beneath the sleeper is significantly greater than that at the sleeper ends, increasing with depth and reaching a peak of 7.36 mm. The compactness of the ballast bed beneath the sleepers at the girder end decreases as the main girder elongates and increases as it contracts, whereas the compactness in the sleeper box regions. The contact force between ballast particles increases during the elongation of the main girder, and initially decreases before increasing during contraction. The internal force chains within the ballast bed are transmitted from the bottom to the surface at an angle of approximately 45°, with an average peak contact force of 18.90 N. Under the displacement of the sleeper group, the ballast on the sides of the sleepers undergoes longitudinal flow, while the ballast beneath the sleepers experiences rotational dislocation. The compactness in the sleeper bottom and crib regions fluctuates, and the overall compactness of the ballast bed can decrease by 1.89%. Contact forces are transmitted downward from the sleeper bottom and sides to the base of the ballast bed at an angle of roughly 45°. The contact forces on the sleepers are primarily concentrated on the sides and bottom, resulting in a longitudinal resistance of approximately 10 kN per sleeper, which is lower than the longitudinal resistance measured in single-sleeper tests. These findings clarify the mechanisms by which bridge expansion deformation influences the meso-mechanical behavior of the ballast bed at girder ends, providing theoretical support for understanding the evolution of track regularity at girder ends and ensuring the safety of railway operations.

Keywords: ballasted track; ballast; bridge deformation; discrete element; micromechanics

随着铁路交通线网不断向江海和复杂山区延伸,千米级跨度铁路大桥不断涌现[1].有砟轨道具有弹性好、自适应性强、养护维修方便等优势,成为千米级桥首选轨道结构形式[2].与传统桥梁相比,千米级桥结构刚度更柔、荷载更大,梁端将产生更大的伸缩位移[3].现场运营表明,大跨桥梁端极易出现轨排异常窜动、轨枕偏斜、道床稳定性不良等问题[4],给轨道的服役状态造成了不良影响,因此,深入探究桥梁伸缩变形对梁端有砟道床的影响机制,已成为亟待解决的关键问题.

国内外学者围绕梁端有砟轨道的力学响应与演化规律开展了大量研究.在梁端轨道结构宏观力学性能方面,文献[5]基于现场实测的梁端轨道位移分析了梁端病害的产生机理,结果表明梁端的伸缩变形引发了梁端上方散体道床的循环伸缩变形,造成桥上碎石道床的性能劣化.文献[6]针对梁端伸缩装置开展现场测试,分析了梁端伸缩装置对桥梁刚度和梁端应变分布的影响.文献[7-8]基于车辆-梁端轨道空间耦合模型分析了梁端区域车辆及轨道静动力学特性,结果表明梁端区域的梁轨相对位移和车体加速度均大于桥上其他部位,梁端是桥上线路的敏感区域和薄弱环节.文献[9]建立了桥上有砟轨道无缝线路模型,分析了梁轨相对位移分布规律,结论表明梁端区域梁-轨纵向相对位移显著.在桥上有砟道床细观力学行为方面,文献[10]基于离散元理论建立了碎石道床模型,揭示了桥上无缝线路散粒体道床的传力特性,结果表明简支梁活动端附近的道床颗粒最易受扰动.文献[11]结合桥梁-有砟道床耦合模型分析了高铁桥梁梁端道床劣化机理,并提出了延缓劣化措施.文献[12]基于轨检数据结合梁端道床刚度测试数据分析了温度对简支梁桥梁端轨道平顺性的影响,分析表明温度变化会导致梁端道砟迁移流变,加剧轨道高低不平顺.

综上,既有研究在梁端轨面受力变形分析方面取得了丰硕成果,但针对梁端有砟道床的研究仍存在以下不足:多基于有限元仿真,分析时采用弹簧单元模拟道床阻力,难以对梁端道床的细观力学行为进行深入探讨;多针对简支梁与连续梁桥,缺乏对千米级跨度高铁桥梁梁端道床力学特性的系统性探讨.鉴于此,本文基于离散元与多体动力学耦合方法,构建了考虑温度荷载作用的桥梁-道床-轨枕多层结构三维耦合模型,分析了梁体伸缩和枕群位移作用下道砟颗

粒运动与接触特性，揭示了桥梁变形条件下颗粒迁移与力链传递规律.研究成果明确了桥梁伸缩对梁端道床细观力学行为的影响机理，可为梁端线路平顺性演化规律深化研究、保障线路安全运维提供理论支撑.

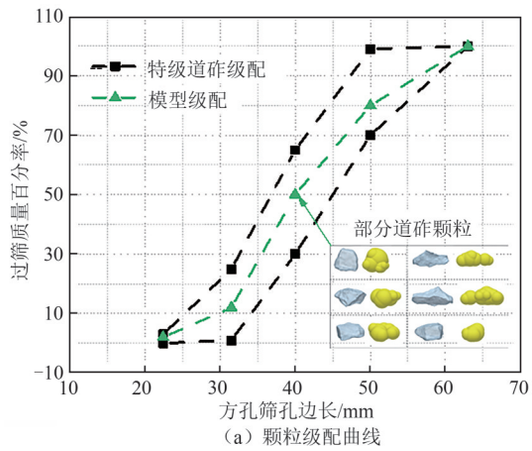
1 桥梁-道床-轨枕耦合模型

1.1 模型建立

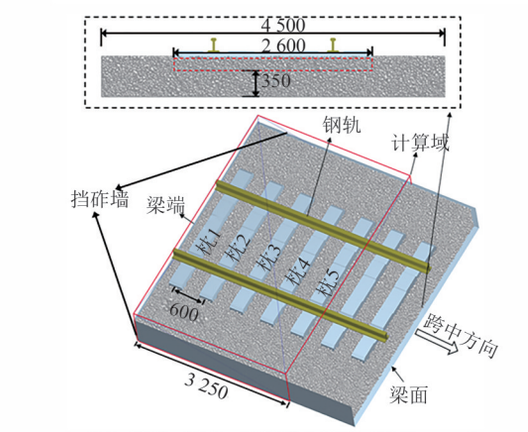
考虑大跨度桥梁端有砟道床断面特性，并兼顾计算效率，利用EDEM软件建立包含7根轨枕的梁端道床离散元模型，模型中仿真计算域为5根轨枕，计算域外的轨枕考虑为模型的边界条件.当离散元模型中道砟形态样本量超过10组时，有砟道床力学特征计算结果差异不大[13].基于文献[14]理论验证，当单颗道砟的离散元球体单元数量达到临界阈值8时，即可有效重构颗粒棱角形态特征.故本文挑选12块具有典型形状特征的道砟颗粒，利用三维激光扫描获取其外轮廓，采用Clump法进行填充，平均每个道砟由15～25个球形颗粒组合而成.按照文献[15]级配要求动态生成道砟颗粒.采用特定断面形状的墙体压实道砟，使得道床整体密实度在1 760 kg/m^{3}左右，确保密实度与道床断面廓形满足规范要求，模型中道床厚度350 mm，顶面宽度4 500 mm，纵向长度3 250 mm，轨枕间距600 mm，砟肩至挡砟墙间以道砟填平[16].钢轨和轨枕基于多刚体动力学方法在Recurdyn仿真软件中建立，大跨桥梁端铺设小阻力扣件，采用Bushing三向弹簧阻尼单元模拟，相关参数参考文献[17-18]取值.颗粒级配曲线及桥梁-道床-轨排耦合模型见图1.由图1(a)可见，模型的道砟级配满足特级道砟级配要求.

千米级桥梁结构中，与道床直接接触的是桥面板，仅考虑道床为研究对象，忽略桥梁结构的建模，采用一块刚体平面模拟桥梁.将轨枕与桥面板导出为Wall单元，以此作为耦合边界.桥梁-道床-轨排耦合模型见图1(b).在联合仿真中，离散元求解器计算道砟与轨枕及桥面板的接触力，经由耦合边界将接触力(力矩)信息实时传递至多体动力学求解器.多体系统求解运动学响应，更新轨枕与桥面结构位置参数，进而将最新运动学状态返回至离散元计算域中.在保证精度前提下，通过对二者的时间步长进行调整，实现运动数据的实时交互[19]，以准确模拟轨枕、桥面板与道砟之间的相互作用.经过多次仿真测试，本仿真模型时间步长取值为5×10^{-6} s.

模型中道砟间及道砟与几何体之间采用Hertz-Mindlin无滑动接触模型，道砟、轨枕、桥面板材料参数参考实际工程取值.道砟与轨枕的接触参数参考文献[20]并通过多次仿真尝试进行确定，模型主要计算参数见表1.



(a) 颗粒级配曲线



(b) 桥梁-道床-轨排耦合模型（单位：mm)

图1 颗粒级配曲线和桥梁-道床-轨枕耦合模型

Fig.1 Particle size distribution curve of ballast and bridge-ballast bed-sleeper coupling model

表1 模型主要计算参数

Tab.1 Main calculation parameters of the model

名称	道砟	轨枕
泊松比	0.18	0.23
密度/(kg·m^{-3})	2 600	2 300
剪切模量/GPa	25	15
碰撞恢复系数	0.72	0.40
静摩擦系数	0.56	0.85
滚动摩擦系数	0.27	0.25

1.2 桥梁伸缩变形模拟

温度作用下，超大跨度铁路桥梁的伸缩量可达数百毫米[2]，钢轨内部产生巨大伸缩附加力，为避免梁端钢轨拉断，梁端区域需设置钢轨伸缩调节器以放散钢轨附加力.以五峰山悬索桥降温为例，桥梁纵向变形引起的梁端轨道变形示意见图2.

由图2可知：调节器尖轨完全位于引桥，基本轨位于主桥并跨越梁缝布置，当温度降低时，引桥带动

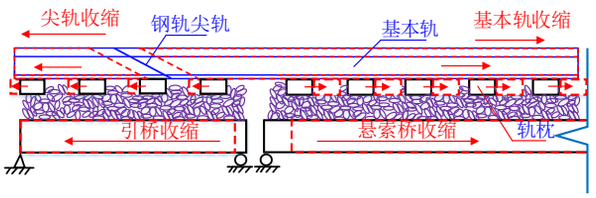


图 2　降温时桥梁纵向变形引起的梁端轨道变形示意

Fig.2　Schematic diagram of track deformation at the beam end induced by longitudinal bridge deformation during temperature dropping

尖轨和轨枕收缩,在线路纵向阻力的约束下,尖轨、轨枕与桥梁的相对位移较小;针对基本轨,桥梁主跨将带动基本轨回缩,此时位于引桥上的基本轨收缩方向与引桥收缩方向相反,故引桥上基本轨、轨枕与引桥的纵向相对位移较大[4],桥上道床受到纵向剪切作用.因此本文考虑主梁与轨枕的纵向相对位移,采用主梁伸缩与枕群位移来反映桥梁伸缩变形.根据五峰山长江大桥的实际监测,梁缝间距变化率约为 10.24 mm/℃,考虑极端温度情况并参考文献[10]的方法,为研究道床底部道砟扰动对道床其他部位产生影响,在模型中通过保证轨枕不动,以 1 mm/s的速度纵向移动桥面板实现梁体伸缩作用;为研究枕盒和枕底部位道床扰动对道床其他部位产生影响,以 1 mm/s速度纵向移动枕群实现端枕群位移作用.

对主梁伸缩和梁端枕群位移进行仿真分析时,对道砟颗粒纵向运动速度进行了统计,不同作用下道砟颗粒纵向运动速度分析见图 3.由图 3 可知:当主梁伸缩量和枕群位移量分别达到 10 mm 和 14 mm 时,道砟颗粒纵向平均运动速度趋于稳定,主梁伸缩作用下道砟速度在 0.10 mm/s 上下波动,枕群位移下为 0.23 mm/s,道砟颗粒的运动在纵向上基本处于一个动态平衡状态.因此在仿真时主梁伸缩量取为 20 mm,而实际工程对于轨枕的爬行控制十分严格,故枕群位移量在仿真分析时取 10 mm.

1.3　模型验证

对沪苏通长江大桥梁端有砟轨道开展道床阻力测试,采用单轨枕加载法测得梁端伸缩调节器区域的道床阻力曲线.模型中以 1 mm/s 横(纵)向匀速推动中间第 3 根轨枕测得道床阻力曲线,并将实测与仿真得到的单枕阻力-位移曲线进行对比,见图 4.由图 4 可知:道床阻力仿真与实测曲线基本一致.道床横向阻力实测值、仿真值分别为 19.98、19.15 kN/枕,纵向阻力实测值、仿真值分别为 17.55、16.97 kN/枕,结果分别相差 4.15%、3.30%,验证了所建模型的准确性.

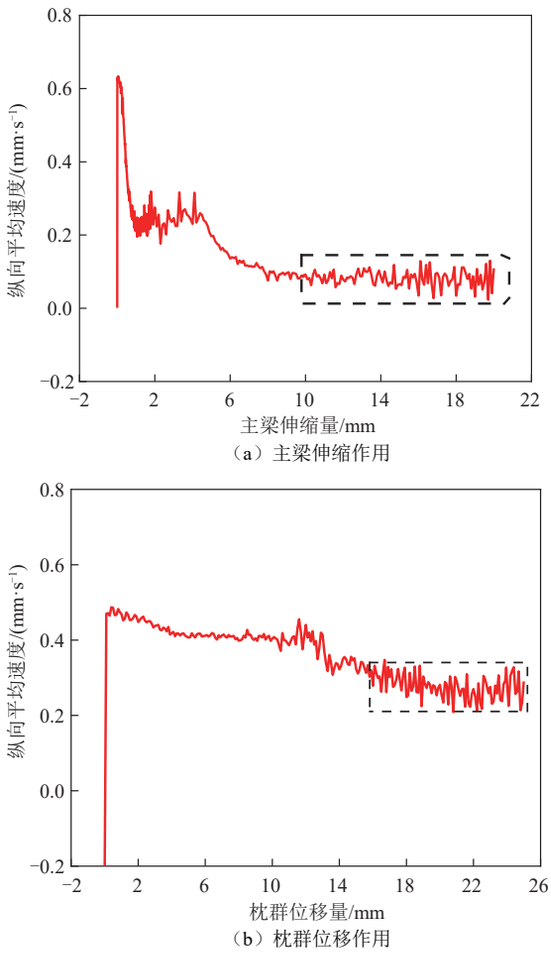


图 3　不同作用下道砟颗粒纵向运动速度统计

Fig.3　Longitudinal motion velocity statistics of ballast particles under different effects

2　主梁伸缩对道床力学行为影响

2.1　颗粒运动特性

升温荷载下,主梁梁端发生纵向位移,道床内道砟颗粒的运动情况见图 5.图 5 中,道砟颗粒以矢量表示,箭头表示道砟颗粒运动方向,颜色表示运动速度 V 大小,其中蓝色代表速度最小,红色代表速度最大,绿色介于两者之间,t 为运动时间.

由图 5 可知:温度升高时,道砟发生纵向迁移;梁端处道砟和道床底部道砟运动速度最大,枕间道砟速度最小且呈现出上拱的运动趋势.由于轨枕对枕底和枕盒区域道砟具有约束作用,道砟运动速度从道床底部至顶部逐渐递减.随着主梁进一步伸长,梁端区域道砟进一步流动,道床底部运动的道砟颗粒逐渐减少,颗粒运动速度逐渐减小并趋于稳定,运动速度较大的道砟主要集中在梁端轨枕底部.降温时,梁端区域道砟受挡砟板的挤压而向右运动,道床底部道砟也随之向右运动,且运动速度最大.道

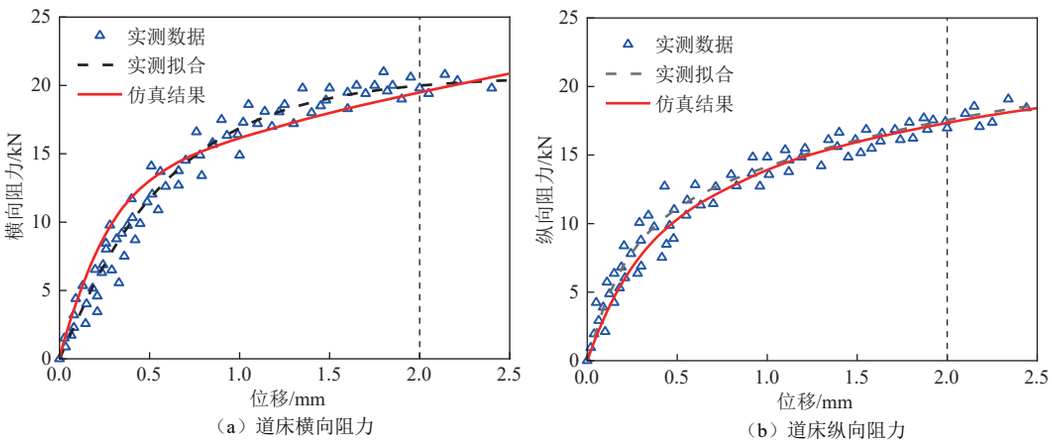


图 4　实测与仿真单枕阻力-位移曲线对比

Fig.4　Comparison of measured and simulated single-sleeper resistance-displacement curves

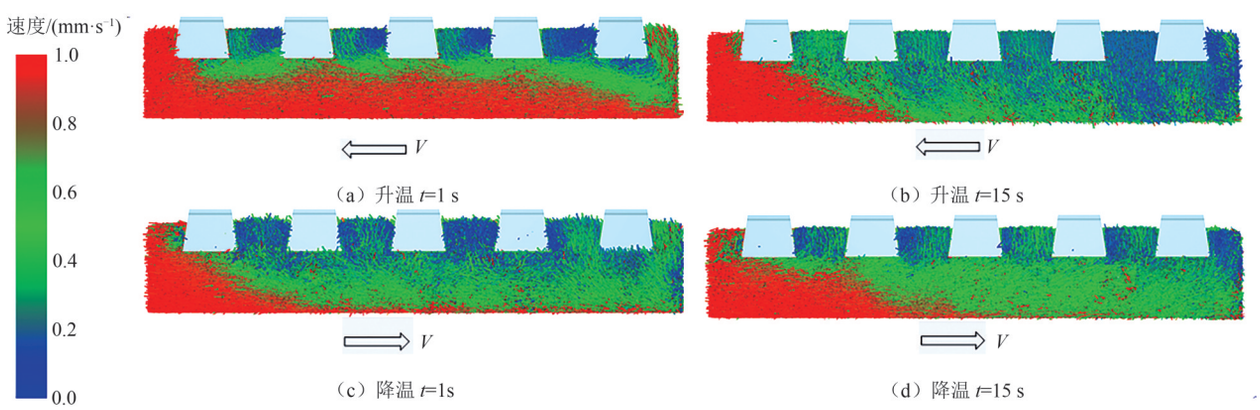


图 5　道砟运动情况

Fig.5　Ballast movement situation

床中部的道砟颗粒整体呈向右运动的趋势，在轨枕的约束作用下运动较为混乱，速度最小.

为分析主梁伸缩条件下道床不同位置处道砟颗粒的位移情况，提取 5 处道床不同位置处的道砟位移曲线.提取的道砟粒径在 50～60 mm 范围内，其中 1 号和 2 号道砟位于轨枕端部，1 号位于道床表层，2 号与轨枕底部齐平，3 号～5 号道砟位于枕底，竖向均匀排列，3 号与 5 号道砟分别位于轨枕底部和主梁桥面齐平处，提取的道砟颗粒具体位置见图 6.

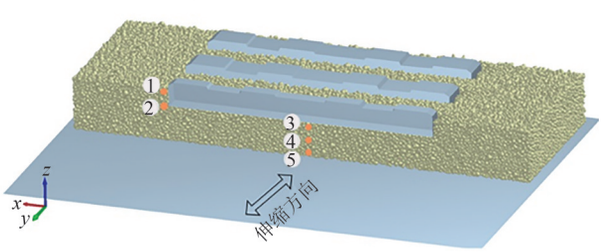


图 6　不同位置处道砟颗粒

Fig.6　Schematic diagram of ballast particles at different locations

有砟道床不同位置的道砟颗粒位移曲线见图 7.由图 7 可知：主梁伸缩对道砟颗粒横向位移影响较小，各处道砟颗粒横向位移均在 2 mm 以内；在纵向上，不同位置处的道砟颗粒均呈现出随着梁体纵向伸缩而流动，枕底处颗粒的位移大于枕端处，且枕底处颗粒位移随深度增加而增大，枕底底层颗粒位移最大达到 7.36 mm；升温阶段，枕端道砟呈现向上运动的趋势，枕底道砟由于轨枕的约束几乎没有位移，降温阶段，枕端道砟呈现先向下后向上运动趋势，枕底道砟呈现向上运动趋势，此阶段道床受到了压力作用.

2.2　道床密实度

为探究主梁伸缩位移下道床不同区域密实度的变化规律，提取 5 个枕下选区（编号为 ZD1～ZD5）和 3 个枕盒选区（编号为 ZH1～ZH3），其密实度变化见图 8.

由图 8 可知：①靠近梁端处的 ZD1 区域道床密实度变化最明显，密实度随着温度升高而逐渐减小，随着温度降低而逐渐增大.②对于枕下 ZD2～ZD5 区域密实度，在单次温度循环荷载作用下，道床枕下区域道砟受到扰动，道砟发生纵向流动，加上轨枕的约束作用，道砟颗粒不断地错动与重排，4 个枕下区域密实度均呈现出波动变化.③ZH1～ZH3 区道床密实度呈现波动变化，升温条件下表现为波动下降，

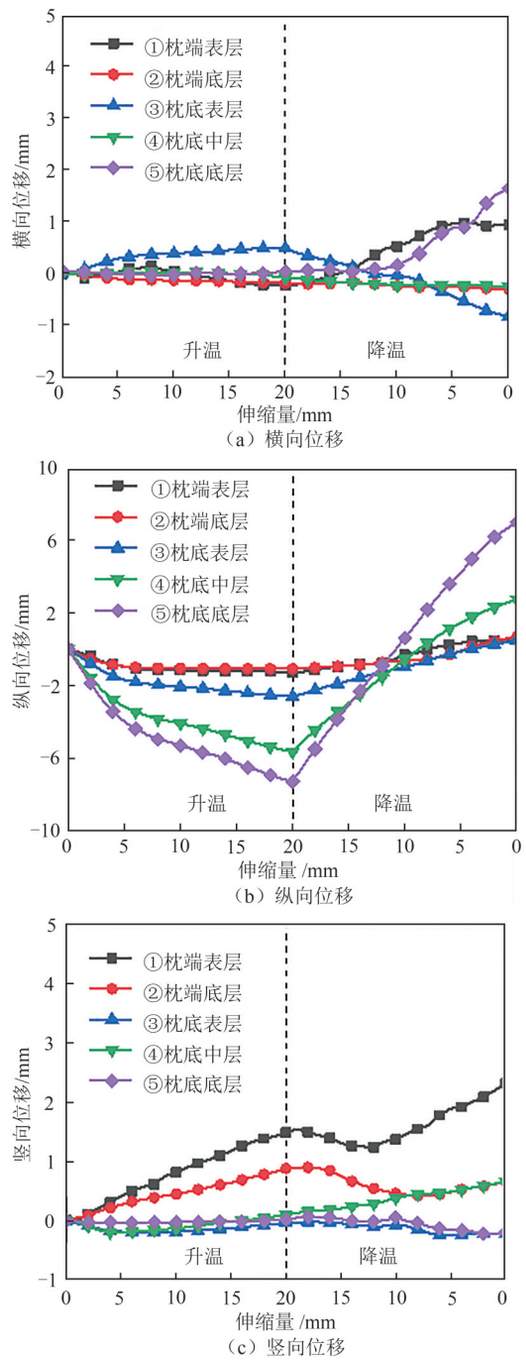


图 7　不同位置道砟位移曲线

Fig.7　Ballast displacement curves at different positions

在降温阶段波动较为平稳;ZH1 密实度波动变化最大,ZH2 密实度变化最小.可见,在梁体伸缩位移作用下,主梁伸缩打破了道床枕盒区原有的密实状态,枕间和道床底部区域受到较大的扰动.

2.3　道床力链传递规律

在仿真过程中,提取主梁发生最大伸缩量下道床内部接触力链,其分布云图见图 9,图 9 中,红色代表道砟颗粒的接触力链,颜色越深表明接触力链越强.

由图 9 可知:主梁伸缩下,道床受剪切作用,内部接触力集中在道床底部、轨枕底部和侧部;随着主梁的进一步伸缩,道砟颗粒接触力链增多,呈现出与主梁伸缩方向斜向分布(约 45°),这说明梁体伸缩使得道床垂向力链发生了重组,内部接触力主要从道床底部斜向上方传递至轨枕.

进一步定量分析道床不同区域处接触力链的变化情况,枕底和枕盒道砟平均接触力见图 10.

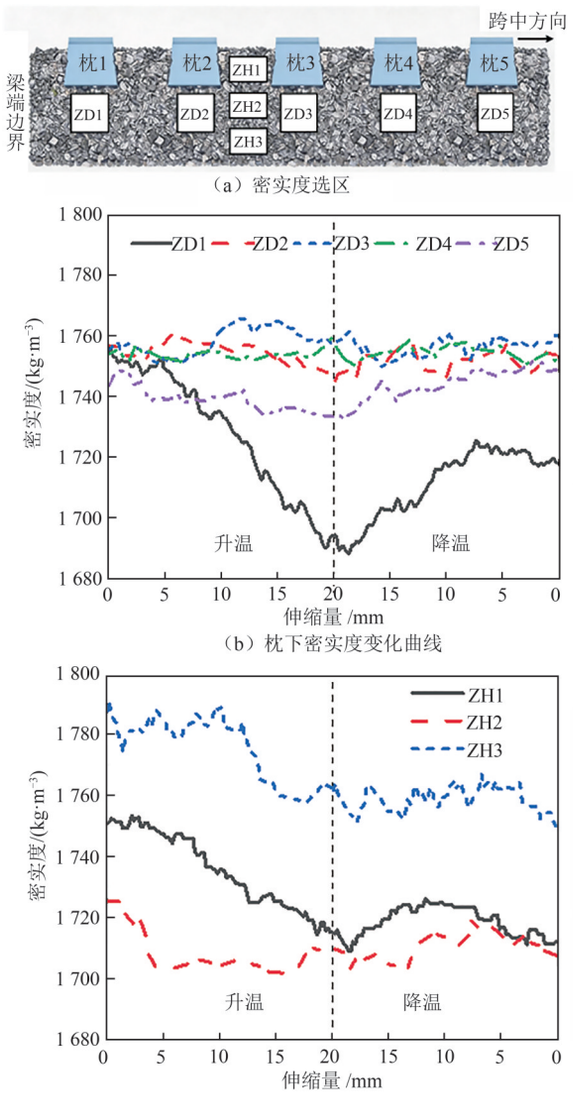


图 8　道床密实度变化

Fig.8　Variation of ballast bed compactness

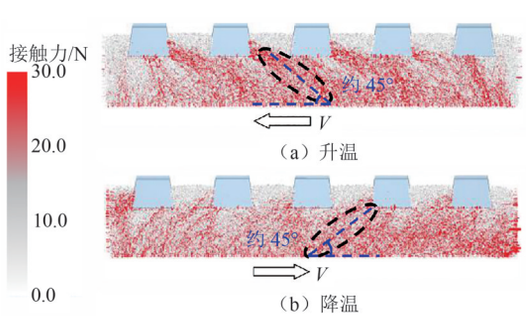


图 9　道砟接触力链云图

Fig.9　Cloud map of contact force chains among ballast

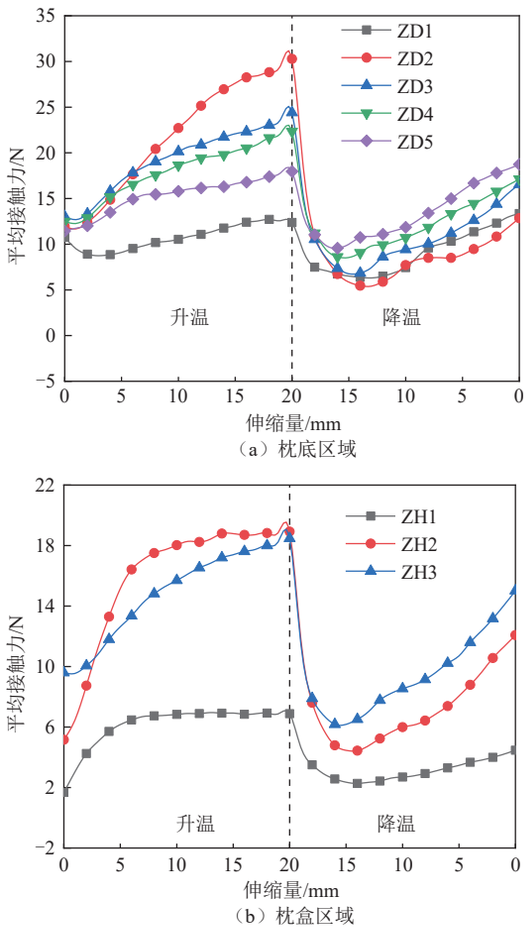


图 10　道砟平均接触力

Fig.10　Average contact force of ballast

由图 10 可知：①对于枕底接触力，在升温阶段，枕底区域道砟平均接触力逐渐增大，在降温阶段，主梁反方向伸缩，道床受到相反方向的剪切作用，故枕底道砟平均接触力先急剧减小后逐渐增大；梁端端部 ZD1 接触力最小，这与该处颗粒运动速度较大，道床密实度变化明显有关；ZD2～ZD5 接触力较大，表明此处道床受到的剪切作用较强．②枕盒区域颗粒平均接触力与最大接触力变化规律相同，升温时增大，降温时先减小后增大；枕盒中部 ZH2 区域接触力最大，平均接触力峰值为 18.90 N；道床中层和底层接触力要大于道床表层接触力，这说明主梁伸缩位移作用下，接触力链由道床底部向道床表层传递．

3　梁端枕群位移对道床力学行为影响

3.1　颗粒运动与受力特性

枕群位移作用下，枕群发生最大位移时的道床内部颗粒运动云图和道砟接触力链分布云图分别见图 11、图 12.

由图 11 可知：随着枕群的位移作用，枕盒颗粒运动速度最大，其次是道床中部颗粒，底部颗粒速度最小，颗粒运动速度随着道床深度增大而减小．枕盒道砟主要随着轨枕发生纵向位移，枕底道砟则发生旋转与错动，呈上拱趋势．

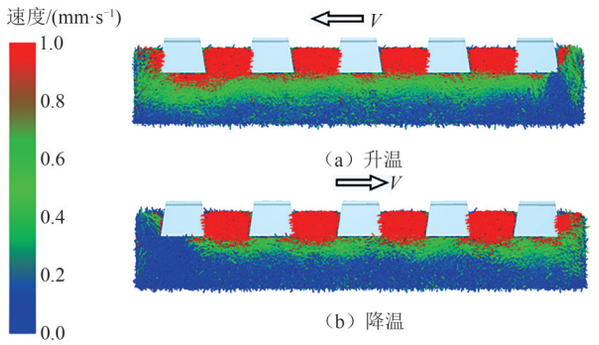


图 11　道砟颗粒运动云图

Fig.11　Cloud map of ballast particle motion

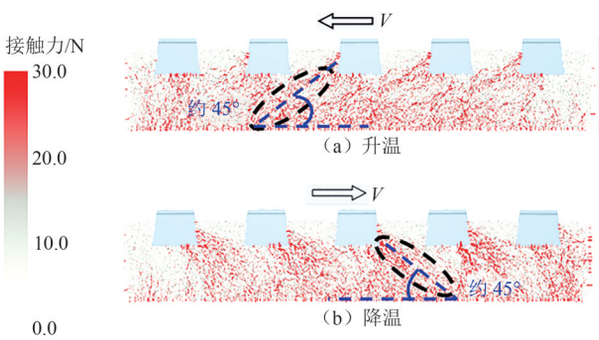


图 12　道砟接触力链云图

Fig.12　Cloud map of contact force chains among ballast

由图 12 可知：枕群纵向运动使得道床受到剪切作用，道床中阻碍轨枕运动方向上的道砟颗粒之间出现了强力链分布，主要集中在枕底与枕侧，且与枕群运动方向呈现斜 45°分布，说明道床内接触力从枕底与枕侧斜向下传递至道床底部．

梁端枕群位移作用下，道床枕底与枕盒区域道砟平均接触力变化情况见图 13.

由图 13 可知：对于枕底道砟接触力，枕群位移使得接触力迅速减小后逐渐平稳；随着枕群反向位移，接触力又有所提升，整体变化较为平稳，这说明枕群的位移改变了道床中原有的传力状态，颗粒错位、重排，并逐渐达到新的受力状态，弱化了道床垂向荷载的稳定传递，尤其是中间区域 ZD2、ZD3、ZD4 颗粒最大接触力变化幅度最大，该区域颗粒发生明显的错动重分布．由于枕盒处道砟直接受到轨枕的挤压剪切作用，枕盒表层 ZH1 与中层 ZH2 接触力在升温阶段逐渐上升，降温阶段随着轨枕反向位移，接触力先减小后增大．道床底部 ZH3 接触力变化不大，几乎不受枕群位移的影响．

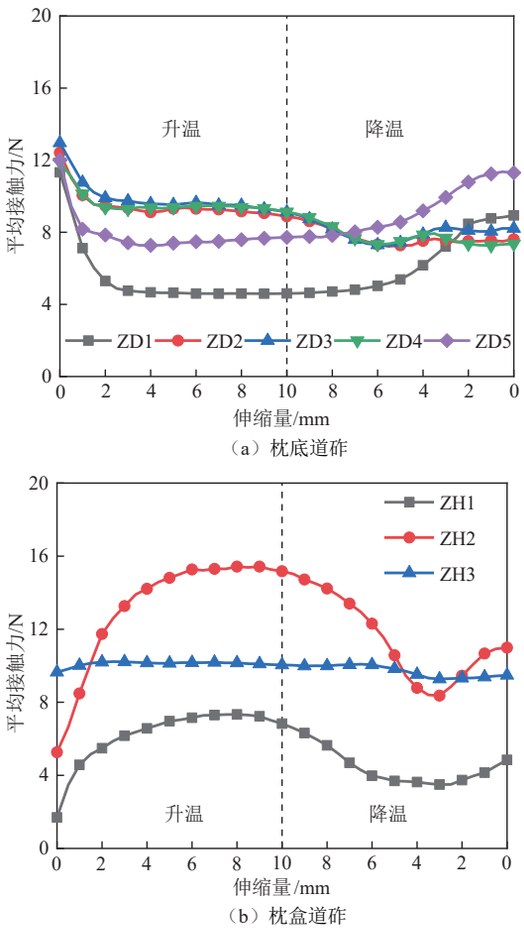


图 13　枕底与枕盒区域的道砟平均接触力

Fig.13　Average contact force of ballast in the sleeper bottom and sleeper box areas

3.2　道床密实度

梁端枕群位移作用下,道床枕底和枕盒区域密实度变化情况见图 14.

由图 14 可知:ZD1 区道床密实度呈现波动变化,ZD2、ZD3、ZD4 区道床密实度变化一致,均表现为升温阶段减小,降温阶段增大;ZD5 密实度在整个过程中变化较为平稳.在升降温作用下,枕盒表层 ZH1 密实度变化最为明显,升温阶段密实度大幅度下降,降温阶段有所增加,但最终道床密实度降低了 1.89%.枕盒中层 ZH2 密实度变化较小,底层 ZH3 密实度几乎没有变化.这表明枕群位移主要扰动表层和中层道床,底层道床几乎不受影响.

3.3　枕群受力特征

升温和降温条件下轨枕与道床产生相对位移,轨枕与道砟颗粒接触,轨枕表面与与道砟的接触力分布云图见图 15.轨枕位移过程中枕 1～枕 5 轨枕的垂向位移与纵向阻力变化情况见图 16.

由图 15 可知:升降温下,轨枕与道砟接触力主要分布在枕侧和枕底,升温下,枕群向左运动,梁端

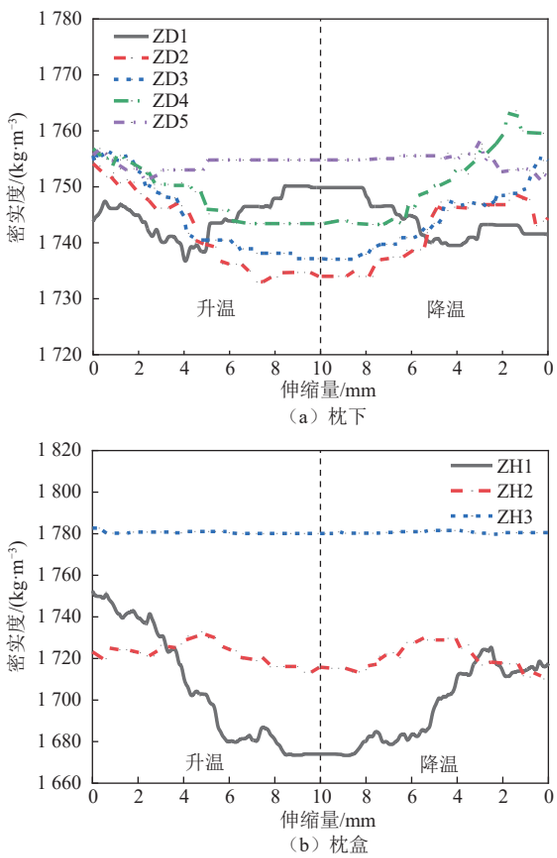


图 14　枕下和枕盒区域道床密实度变化规律

Fig.14　Evolution of ballast density in the sub-sleeper and sleeper box regions

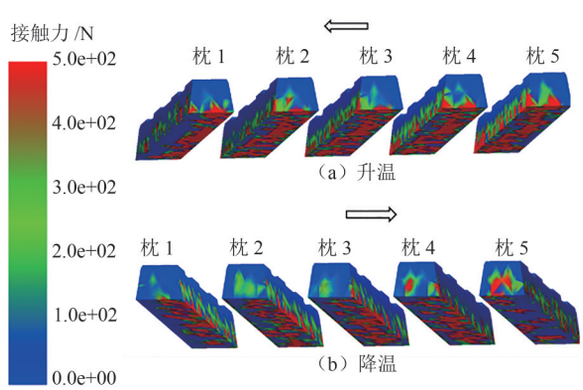


图 15　轨枕表面与道砟的接触力分布云图

Fig.15　The contact force distribution cloud between the sleeper surface and the ballast

枕 1 所受阻力较小,中间轨枕受力较大;在降温作用下,枕群向反方向运动,此时枕 1 与枕 5 所受阻力较小,中间轨枕受力较大.

由图 16 可知:枕群在纵向移动的同时不断抬升,随着枕群反方向位移,由于枕底道砟颗粒的剪胀作用,轨枕垂向位移先减小后缓慢增大,最终中间 3 根轨枕抬升最为明显,平均抬升了 2.44 mm,靠近梁端的枕 1 其枕底道床密实度最小且枕盒道砟颗粒最少,故在轨枕纵向位移时产生的垂向位移最小.

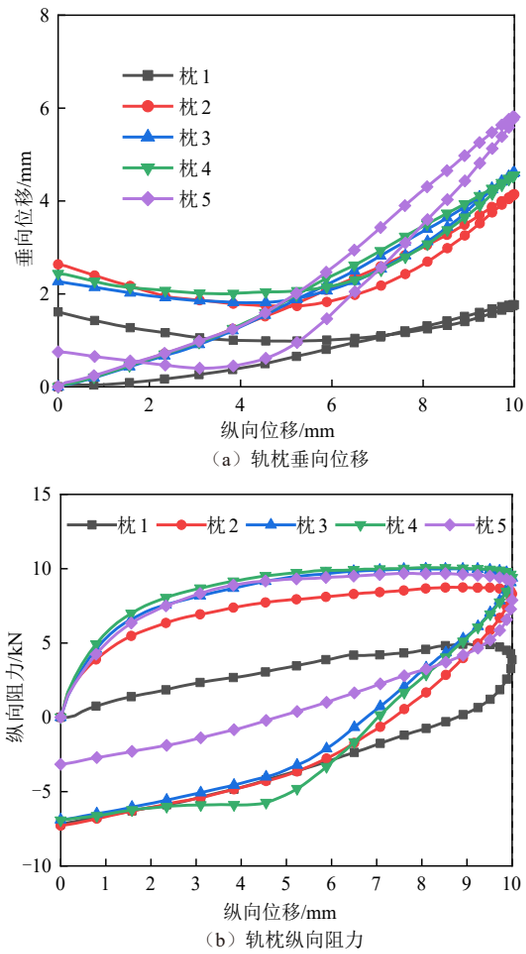


图 16 枕群位移下轨枕受力情况

Fig.16 The stress condition of sleeper during longitudinal displacement

可见，纵向位移使得轨枕产生上抬趋势，导致道床的密实度下降，破坏了道砟颗粒之间的咬合接触作用，容易引起轨枕空吊．枕群单一方向位移时，轨枕纵向阻力均呈现出增长趋势，且存在明显的屈服段，其中枕 1 由于枕侧道砟较少，且受到梁端挡砟板的影响，其极限阻力较小，仅有 4.77 kN，其他轨枕极限阻力相差不大，为 10 kN 左右．降温作用下枕群反方向位移时，轨枕所受阻力迅速减小，减小为 0 后又反方向逐渐增大，最终轨枕所受阻力约为 7.16 kN，远低于单根轨枕测得的纵向阻力．

4 结论

1）主梁伸缩下，道砟发生纵向迁移．梁端处和道床底部道砟运动速度最大，中部道砟速度较小，枕间道砟速度最小，且枕间道砟呈现出上拱的趋势．主梁伸缩下，各处道砟颗粒横向位移均在 2 mm 左右，枕底处颗粒的纵向位移大于枕端处，且随深度增加而增大，峰值可达 7.36 mm．梁端处枕底密实度随着主梁伸长而减小，主梁收缩而增大，枕盒区道床密实度呈现波动下降变化．

2）主梁伸缩下，枕底和枕盒区域道砟平均接触力变化规律基本相同，主梁纵向伸长时接触力增加，主梁收缩时接触力先下降后上升．主梁伸缩位移作用下，内部接触力集中在道床底部与轨枕底部，接触力链由道床底部呈现斜 45°左右向道床表层传递，平均接触力峰值为 18.90 N．

3）在枕群位移作用下，枕侧和枕底颗粒运动速度较大，道床中部和底部颗粒运动速度较小，枕盒道砟主要随着轨枕发生纵向位移，枕底道砟则发生旋转与错动位移．枕群的运动使得枕底密实度降低，枕盒密实度产生波动，对道床造成了一定的扰动，温度循环荷载下密实度降低了 1.89%．

4）随着枕群纵向位移，道床受到剪切作用，道床接触力从枕侧与枕底斜向下传递至道床底部．轨枕受力主要集中在枕侧和枕底，枕群在纵向位移的同时会有抬升，平均阻力约为 10 kN，低于单轨枕测得的纵向阻力．

高速铁路服役环境复杂，梁端轨道不仅要承受桥梁的伸缩变形作用，还需承受高频列车动荷载的冲击作用．未来研究可进一步考虑列车动荷载、温度循环荷载与桥梁变形荷载的耦合效应，深入分析道砟颗粒的累积塑性变形、破碎特性、级配演化规律以及道床阻力与刚度的衰减机制．

参考文献(References)：

[1] 钟子杰，蔡小培，刘万里，等．复杂温度场对大跨悬索桥线-桥受力变形特性影响分析[J]．中国铁路，2024(9)：32－39．
ZHONG Zijie，CAI Xiaopei，LIU Wanli，et al．Impact of Complex Temperature fields on the track-bridge stress deformation characteristics of long-span suspension bridges[J]．China Railway，2024(9)：32－39．(in Chinese)

[2] 陈良江，阎武通．我国铁路超千米跨度桥梁的实践与发展[J]．中国铁路，2021(9)：26－31．
CHEN Liangjiang，YAN Wutong．Practice and development of over 1000 m-span railway bridges in China[J]．China Railway，2021(9)：26－31．(in Chinese)

[3] 蔡小培，高梓航，苗倩，等．千米级主跨斜拉桥无缝线路受力与变形特性研究[J]．北京交通大学学报，2019，43(6)：1－8．
CAI Xiaopei，GAO Zihang，MIAO Qian，et al．Study on stress and deformation characteristics of continuous welded rail on cable-stayed bridges with thousand-meter-scale main span[J]．Journal of Beijing Jiaotong Univer-

sity,2019,43(6):1－8.(in Chinese)

[4] 高亮,张雅楠,吕宝磊,等. 千米级以上超大跨径桥上无缝线路梁轨相互作用分析及应用[J]. 北京交通大学学报,2021,45(4):9－18.
GAO Liang,ZHANG Yanan,LYU Baolei,et al. Analysis and application of continuous welded rail's beam-track interaction on ultra-large span bridges above one kilometer[J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2021,45(4):9－18.(in Chinese)

[5] MILNE D L,PEN L,WATSON G,et al. Bridge and ballast interaction at a viaduct structural expansion joint on a high speed railway[C]//Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development, Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Edinburgh,2015:319－324.

[6] LIN W W, YODA T, TANIGUCHI N. Effects of bridge accessories in steel-concrete composite railway bridges in service condition[J]. Journal of Bridge Engineering,2016,21(2):04015050.

[7] 蔡小培,刘万里,赵会东,等. 超大跨桥梁梁端轨道变形特征及轨面静态变形限值[J]. 东南大学学报(自然科学版),2025,55(4):1079－1087.
CAI Xiaopei,LIU Wanli,ZHAO Huidong,et al. Deformation characteristics and static deformation limit of track on beam end of super-long-span bridge[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2025,55(4):1079－1087.(in Chinese)

[8] 蔡小培,钟子杰,刘万里,等. 连续刚构系杆拱桥-无缝线路体系适应性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2024,21(11):4478－4486.
CAI Xiaopei,ZHONG Zijie,LIU Wanli,et al. Adaptability of continuous rigid structural tied arch bridge-continuous welded rail system[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2024,21(11):4478－4486.(in Chinese)

[9] 曲村,高亮,蔡小培,等. 长大简支梁桥上有砟轨道无缝线路纵横垂向变形研究[J]. 铁道科学与工程学报,2012,9(5):7－12.
QU Cun,GAO Liang,CAI Xiaopei,et al. Research about longitudinal-transverse-vertical deformation of ballast CWR on long-span simply supported bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2012,9(5):7－12.(in Chinese)

[10] 韦安祺. 有砟轨道桥上无缝线路散粒体道床传力特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
WEI Anqi. Study on force transfer characteristics of granular ballast of CWR on ballasted track bridge[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2019.(in Chinese)

[11] 徐萌. 高速铁路桥上梁端处有砟道床劣化机理及防治措施研究[D]. 北京:北京交通大学,2023.
XU Meng. Research on the deterioration mechanism and prevention measures of ballast bed at the beam end of high-speed railway bridge[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2023.(in Chinese)

[12] 徐旸,李毅,赵一馨,等. 高铁桥上有砟轨道梁端周期不平顺演变规律及道床支承状态检测方法[J]. 中国铁道科学,2023,44(5):39－46.
XU Yang,LI Yi,ZHAO Yixin,et al. Evolution law of periodical irregularity at beam end and roadbed supporting state detection method of ballasted track on high-speed railway bridge[J]. China Railway Science,2023,44(5):39－46.(in Chinese)

[13] HUANG H. Discrete element modeling of railroad ballast using imaging based aggregate morphology characterization [D]. Champaign: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.

[14] LU M F,MCDOWELL G R. Discrete element modelling of railway ballast under triaxial conditions[J]. Geomechanics and Geoengineering,2008,3(4):257－270.

[15] 中华人民共和国铁道部. 铁路碎石道砟:TB/T 2140—2008[S]. 北京:中国铁道出版社,2008.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Railway ballast:TB/T 2140—2008[S]. Beijing:China Railway Publishing House,2008.(in Chinese)

[16] 国家铁路局. 高速铁路设计规范:TB 10621—2014[S]. 北京:中国铁道出版社,2015.
National Railway Administration of People's Republic. Code for design of high speed railway: TB 10621—2014[S]. Beijing:China Railway Publishing House,2015.(in Chinese)

[17] 中华人民共和国铁道部. 铁路无缝线路设计规范:TB 10015—2012[S]. 北京:中国铁道出版社,2013.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for design of railway continuous welded rail: TB 10015—2012[S]. Beijing: China Railway Publishing House,2013.(in Chinese)

[18] 国家铁路局. 铁路轨道设计规范:TB 10082—2017[S]. 北京:中国铁道出版社,2017.
National Railway Administration of People's Republic. Code for design of railway track:TB 10082—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House,2017.(in Chinese)

[19] LIU G Z,LI P,WANG P,et al. Study on structural health monitoring of vertical vibration of ballasted track in high-speed railway[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring,2021,11(2):451－463.

[20] XIAO J L,LIU G Z,LIU J X,et al. Parameters of a discrete element ballasted bed model based on a response surface method[J]. Journal of Zhejiang University:Science A,2019,20(9):685－700.