

文章编号:1673-9469(2024)04-0044-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.04.006

铁路基床翻浆冒泥路段道砟颗粒运动及力学特性研究

赵泽源^{1,2}, 王莉苹^{1,2}, 王天亮^{1,2,3*}, 苏成^{1,2}, 齐向阳^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

3. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要: 为研究有砟轨道基床翻浆冒泥路段的道床动力学响应规律, 自制了一套模型试验装置来模拟铁路基床翻浆冒泥过程, 路基模型采用粉质黏土与道砟碎石填筑, 在道床层不同位置处埋入三颗智能颗粒传感器实时监测道砟的振动加速度及运动姿态变化, 分析洁净状态与不同翻浆冒泥程度对道砟颗粒加速度与运动姿态的影响。试验结果表明: 泥浆侵入道床后, 道床内道砟颗粒的振动变得更加剧烈, 并且泥浆侵入道床程度的加深会提高道砟颗粒的振动水平; 在洁净的道床中, 道砟颗粒之间会产生较强的约束作用, 道砟颗粒不易发生转动; 无论在何种道床状态下, 道砟颗粒绕横向、纵向转动的程度均大于绕竖向转动; 当泥浆侵入道床之后, 道砟颗粒会产生绕横向、纵向的较大转动, 绕竖向旋转角度没有明显变化。

关键词: 有砟道床; 智能颗粒传感器; 模型试验; 翻浆冒泥; 振动响应

中图分类号: U216.41

文献标识码: A

Study on the Movement Patterns and Mechanical Characteristics of Ballast Particles in the Mud Pumping Section of Railway Trackbeds

ZHAO Zeyuan^{1,2}, WANG Liping^{1,2}, WANG Tianliang^{1,2,3*}, SU Cheng^{1,2}, QI Xiangyang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

3. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: In order to study the dynamic response of the ballast bed in the section of the ballast track foundation bed, a set of model test equipment was made to simulate the process of the railway foundation bed slurry. The subgrade model was filled with silty clay and ballast gravel, and three SmartRock sensors were embedded in different positions of the ballast layer to monitor the vibration acceleration and movement attitude changes of ballast in real time. The test results show that the vibration of ballast particles in the ballast becomes more intense after the mud invades the ballast bed, and the deepening of the mud invades the ballast bed will increase the vibration level of ballast particles. In the clean road bed, there will be a strong restraint between the ballast particles, and the ballast particles are not easy to rotate. Regardless of the track bed condition, the degree of ballast particles rotating around the transverse and longitudinal is greater than that around the vertical. When the mud intrudes into the ballast bed, the ballast particles will produce a large rotation around the transverse and longitudinal directions, and the rotation angle around the vertical has no obvious change.

Key words: ballast bed; intelligent particle sensor; model test; mud pumping; vibration response

收稿日期: 2023-08-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378453)

作者简介: 赵泽源(2000-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 从事特殊土路基方面的研究。

* 通信作者: 王天亮(1981-), 男, 河北保定人, 博士, 教授, 从事特殊土路基与轨道交通灾变控制方面的研究。

有砟道床是有砟轨道的重要组成结构,其结构的稳定性直接影响了有砟轨道的工作性能与行车安全。在水分、温度及列车荷载的耦合作用下,既有铁路有砟道床容易出现板结、脏污、道砟磨损、翻浆冒泥等病害,其中翻浆冒泥是有砟轨道主要的病害之一^[1]。路基的基床翻浆冒泥是基床中土颗粒在降雨或者地下水作用下浸润,在列车荷载作用下形成泥浆,沿着道砟颗粒之间的缝隙向上翻涌进入道床层,最终翻涌到道床表面的现象。翻浆冒泥病害的产生严重影响了列车的运行安全以及既有铁路线路的扩能改造^[2]。形成翻浆冒泥的原因复杂,影响因素众多,国内外诸多学者对翻浆冒泥病害做了大量的研究。Duong 等^[3-4]针对法国既有铁路线路翻浆冒泥问题展开研究,通过室内试验模拟了铁路路基翻浆冒泥的发生过程,分析了饱和基床与非饱和基床内部颗粒的运移规律,认为基床层含水率是发生基床翻浆冒泥的关键因素,在路基饱和状态下容易发生细颗粒的向上运移,而在非饱和状态运移情况并不显著。针对外部脏污颗粒侵入导致的道床污染方面,崔旭浩等^[5-7]通过离散元法建立有砟道床及脏污颗粒的离散元模型,研究有砟道床在脏污与板结条件下的动力响应及脏污板结对动力行为的影响,发现脏污与板结会提高道床振动水平,增大道砟颗粒的受力,改变道砟颗粒之间的接触状态,不利于道床的稳定。新型智能颗粒传感器的运用加速了有砟轨道动力响应在试验探究方面进程,Zeng 等^[8-9]开展室内模型试验,将智能颗粒埋入道床模型内,研究道砟脏污及水分含量对于道床内部道砟颗粒运动的影响,发现水分含量对脏污道床内道砟颗粒运动的影响大于洁净道床。Liu 等^[10]通过将智能颗粒埋入现场道床中,研究在不同干湿条件下洁净与脏污道床路段道砟层面的力学行为异同,发现在干燥条件下,洁净道床与脏污道床道砟颗粒加速度基本一致,而在湿润条件下,脏污道床有更大的道砟加速度。

综上,已有的翻浆冒泥研究大多集中在基床层面,道床层面的脏污及板结大多是煤灰、黄沙等外部颗粒侵入道床导致道床力学行为劣化、稳定性降低的研究,少有对于基床泥浆侵入道床产生的道床力学影响研究。基于此,本文将建立翻浆冒泥室内试验模型,将三颗智能道砟颗粒埋入道床不同位置,通过模拟翻浆冒泥过程,控制侵入道床的泥浆量,来研究翻浆冒泥对道砟振动响应的

影响,同时得到在不同道床工况下单个道砟颗粒的运动模式,期望得到翻浆冒泥道床力学响应与运动规律,相关理论可以为有砟轨道翻浆冒泥病害的识别与维护提供参考。

1 试验系统及方法

1.1 试验系统

为了更好地模拟铁路路基翻浆冒泥过程,探究泥浆翻冒过程中道砟颗粒运动模式与振动响应,本文设计了一套试验系统,如图1所示。该系统由模型箱模块、泥浆注入模块、温度和荷载耦合模块、颗粒运动追踪及数据采集模块四个模块组成,能够定量地模拟不同温度下不同翻浆冒泥工况。

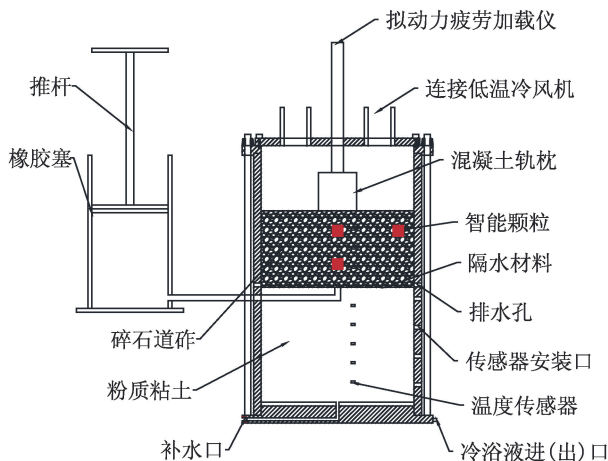


图1 模型试验系统

Fig. 1 Model test system

模型箱由亚克力圆柱形筒、金属底盘、下冷浴盘、钢杆紧固构件及亚克力上盖组成,亚克力玻璃圆筒尺寸为内径 400 mm、壁厚 20 mm、高度 700 mm,上部盖子预留冷风机进风口与出风口。箱体 300 mm 高度处预留一个直径为 25 mm 的孔洞,与泥浆注入装置连接。

泥浆注入模块由内径 180 mm、高度 350 mm、壁厚 9 mm 的亚克力玻璃圆筒与直径 220 mm、厚度 10 mm 的亚克力圆形底板及高度 400 mm 的上部活塞推杆构成,圆筒底部预留有直径 25 mm 的孔洞,与一根长 70 mm、外径 25 mm、壁厚 2 mm 的亚克力玻璃管胶接。该泥浆注入装置底部亚克力玻璃管与一根长 300 mm、外径 25 mm 的 PVC 管接入模型箱内,可以实现向模型箱内注入泥浆的目的。

温度和荷载耦合模块由 NESLAB 低温恒温冷

浴、下冷浴板、低温冷风机、拟动力疲劳加载装置组成。加载作动器与低温冷风机组合,可实现试样顶部温度和荷载的耦合控制;下冷浴板与模型箱体的合金铝底板组合,且低温恒温冷浴为下冷浴板提供恒定温度的冷冻液,实现对试样底部温度的控制,将设备放置于高低温环境实验舱内模拟环境温度,从而模拟现场道床-基床的温度控制。

颗粒运动追踪及数据采集模块由三颗 STRD-AL SmartRock 智能颗粒、采集装置以及配套的 GUI 数据处理软件组成,可以用来对道砟颗粒的运动模式进行追踪分析。

智能颗粒传感器是一种拥有不规则 3D 打印外壳的立方体颗粒,内嵌陀螺仪、加速度计、应力应变计等多个传感器,可以实时模拟追踪道砟颗粒的 X 、 Y 、 Z 三方向加速度、转动角度、三轴应力等参数,具有电池供电、无线传输等优势。本文所采用智能颗粒传感器尺寸为 $35\text{ mm} \times 35\text{ mm} \times 35\text{ mm}$,外壳尺寸长轴约 60 mm ,其接触刚度、惯性矩与等效重度均接近于真实的道砟颗粒。

1.2 试验材料与试样制备

本试验所用道砟颗粒取自朔黄铁路西柏坡段的道砟颗粒,取回后清洗晾晒后进行筛分,道砟颗粒的级配曲线见图 2。大量研究表明,粉质黏土作为基床填料易发生翻浆冒泥病害^[11-12],故本文取粉质黏土作为基床填料,依据《铁路工程土工试验规程》^[13]开展物性试验,其基本物性参数见表 1。

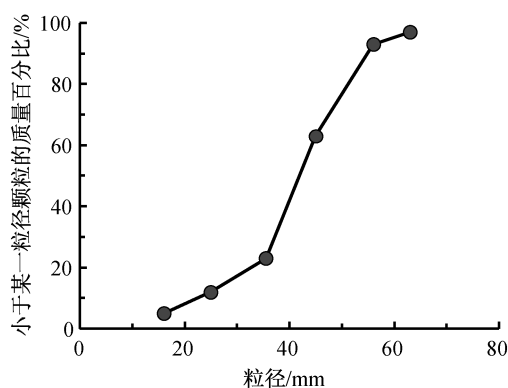


图 2 道砟颗粒级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of ballast

表 1 试验土样基本物性参数

Tab. 1 Basic physical parameters of soil

液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 I_P	最优含水率 $\omega_{op}/\%$	比重 G_s
35.9	19.7	15.8	16.55	2.61

泥浆的流动性与泥浆黏度和密度息息相关^[14],通过前期对于泥浆特性的研究^[15],同时考虑泥浆的黏度、流动性与持水性,选用水土比为 0.9 的粉质黏土配置泥浆。配置泥浆时,将粉质黏土按照水土比为 0.9 的条件下充分搅拌均匀后,上覆保鲜膜静置 24 h,确保土颗粒与水充分结合,再次搅拌均匀后备用。

填筑模型前,在模型箱内壁均匀涂抹凡士林,减少填土与内壁的摩擦。在模型箱底部铺设土工布,将试验用土在最优含水率条件下进行配置并静置 24 h,分 5 层填入模型箱内,每层厚度自上而下分别为 40、75、75、75、35 mm,用击实锤按照最大干密度进行击实。层与层之间进行刮毛处理,并埋设温度传感器。填筑最后一层土样前放置注浆管,并在基床填筑完成后铺设一层隔水材料,防止注浆时水分进入基床。分三层填筑道砟,道砟层高度为 200 mm,将三颗智能颗粒分别编号为 S1、S2、S3, S1 布置在距离轨枕底面 50 mm 的中心处、S2 布置在距离轨枕底面 150 mm 的中心处位置, S3 布置在距离轨枕底面 50 mm 的侧壁处。同时,根据智能颗粒传感器布置定义空间坐标方向:垂直于轨枕方向为纵向(X 轴),沿轨枕方向为横向(Y 轴),竖直向下方向为竖向(Z 轴),如图 3 所示。道砟层顶部放置长宽高分别为 250、100、100 mm 的混凝土试块模拟轨枕。

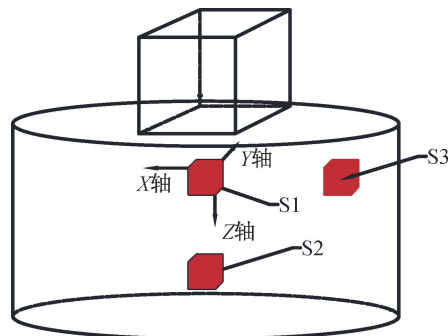


图 3 智能颗粒传感器布设位置图

Fig. 3 Intelligent particle sensor layout location diagram

1.3 试验方案

为探究翻浆冒泥前后道砟颗粒在道床中的运动状态及力学特性,设计翻浆冒泥室内模拟试验,控制温度及翻浆冒泥程度探究道砟颗粒的运动模式及振动响应特性。

已知朔黄铁路长期开行重载列车类型为 C80,故本试验动荷载加载幅值确定为 90 kPa,同时, C80 列车参数为列车长度为 12 m,运行速度为 100 km/h,依据式(1)确定加载频率^[16]。

$$f = v/l \tag{1}$$

式中, v 为列车运行速度, l 为列车单节车厢长度。依据公式取加载频率 2 Hz。

设计了荷载与温度的耦合方式, 恒温期 24 h, 调节高低温环境控制实验舱和低温恒温冷浴的温度, 使道砟和基床填土的整体温度达到 +5 ℃; 施加 10 000 次循环荷载后停止加载, 注入泥浆高度 100 mm, 再次施加 10 000 次循环荷载; 注入泥浆至 200 mm, 施加循环荷载至试验结束。试验加载示意图见图 4。

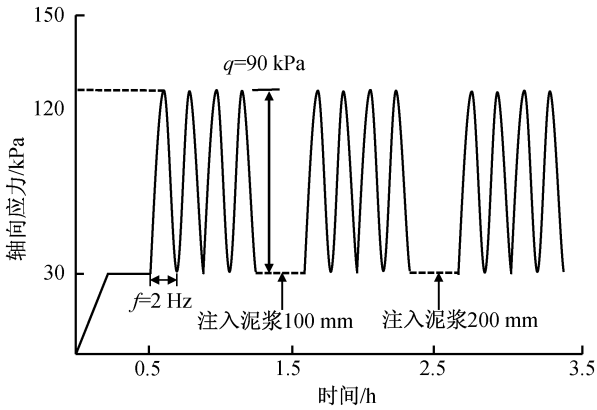


图 4 加载示意图
Fig. 4 Loading diagram

2 道砟颗粒振动加速度分析

为了分析不同道床工况对于道床不同位置处道砟颗粒产生的振动影响, 分别统计了道床内不同位置处三颗智能颗粒分别在洁净道床、注入泥浆高度 10 cm 和 20 cm 时的纵向、横向、竖向三个方向的振动加速度峰值、绝对平均值以及标准差, 列于表 2。同时得到三个智能颗粒的振动加速度

时程曲线, 如图 5、图 6 和图 7 所示。

图 5 给出了洁净道床中 S1 颗粒纵向、横向、竖

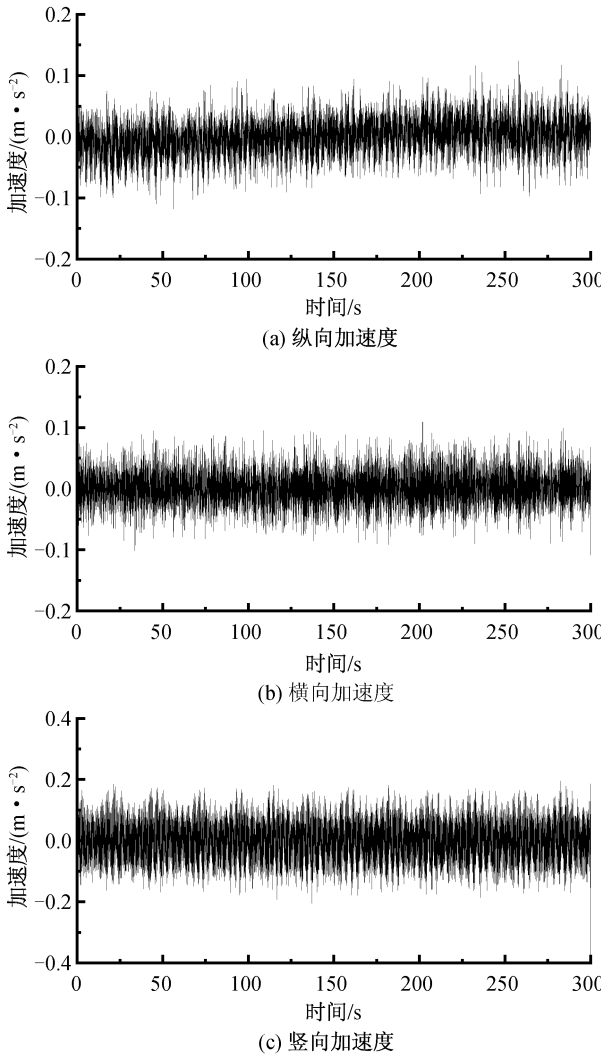


图 5 洁净道床 S1 颗粒三轴加速度时程曲线
Fig. 5 Triaxial acceleration time history curve of S1 particle in clean ballast bed

表 2 智能颗粒传感器振动加速度统计表

Tab. 2 Vibration acceleration statistics table of intelligent SmartRock sensors

位置	泥浆高度/ cm	绝对平均值			标准差			峰值		
		$a_x/$	$a_y/$	$a_z/$	$a_x/$	$a_y/$	$a_z/$	$a_x/$	$a_y/$	$a_z/$
		($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
S1	0	0.032 7	0.022 1	0.052 7	0.040 6	0.027 6	0.063 8	0.156 7	0.109 4	0.373 0
	10	0.033 1	0.031 0	0.067 0	0.042 2	0.040 4	0.084 7	0.228 9	0.223 2	0.490 2
	20	0.038 0	0.038 6	0.082 4	0.049 4	0.049 9	0.103 9	0.262 8	0.237 9	0.530 8
S2	0	0.013 7	0.013 6	0.045 4	0.017 3	0.017 1	0.060 3	0.072 8	0.064 1	0.272 6
	10	0.016 6	0.015 6	0.062 0	0.021 2	0.019 4	0.081 3	0.116 2	0.089 7	0.490 5
	20	0.024 3	0.019 9	0.071 5	0.032 6	0.025 3	0.092 0	0.174 8	0.118 2	0.470 4
S3	0	0.013 7	0.011 8	0.047 3	0.017 1	0.014 9	0.057 4	0.065 7	0.056 5	0.175 3
	10	0.016 4	0.015 7	0.058 7	0.020 8	0.019 1	0.074 2	0.150 9	0.078 5	0.397 7
	20	0.024 1	0.022 9	0.084 3	0.030 7	0.029 1	0.104 9	0.132 1	0.127 3	0.591 9

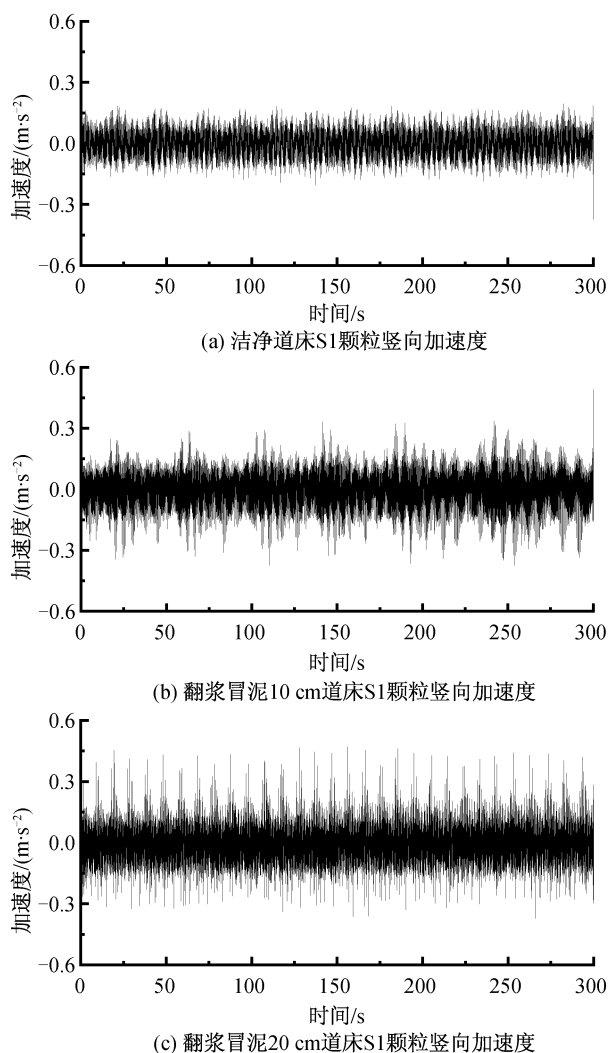


图6 不同道床工况下 S1 颗粒竖向振动加速度时程曲线
Fig. 6 Time history curve of vertical vibration acceleration of S1 particles under different conditions of ballast bed

向三个方向的振动加速度时程曲线。由表 2 和图 5 可以看出,在荷载作用下,道床中的道砟颗粒在三个方向均产生振动,其中竖向振动加速度绝对平均值与峰值分别为 0.0527 、 0.3730 m/s^2 ,纵向振动加速度绝对平均值与峰值分别为 0.0327 、 0.1567 m/s^2 ,横向振动加速度绝对平均值与峰值分别为 0.0221 、 0.1094 m/s^2 ,竖向的振动加速度明显大于纵向和横向。同时根据表 2 对比 S2 与 S3 颗粒的振动加速度情况,纵向、横向方向的加速度绝对平均值与峰值差别并不明显,说明道砟颗粒在道床中的振动以竖向的振动为主,纵向、横向振动次之。

图 6 给出了 S1 颗粒在洁净道床、注入泥浆高度 10 和 20 cm 三种不同道床工况下的竖向振动加速度时程曲线。从表 2 和图 6 中可以看出,发生翻浆冒泥后,道床内道砟颗粒的振动变得更加剧烈。

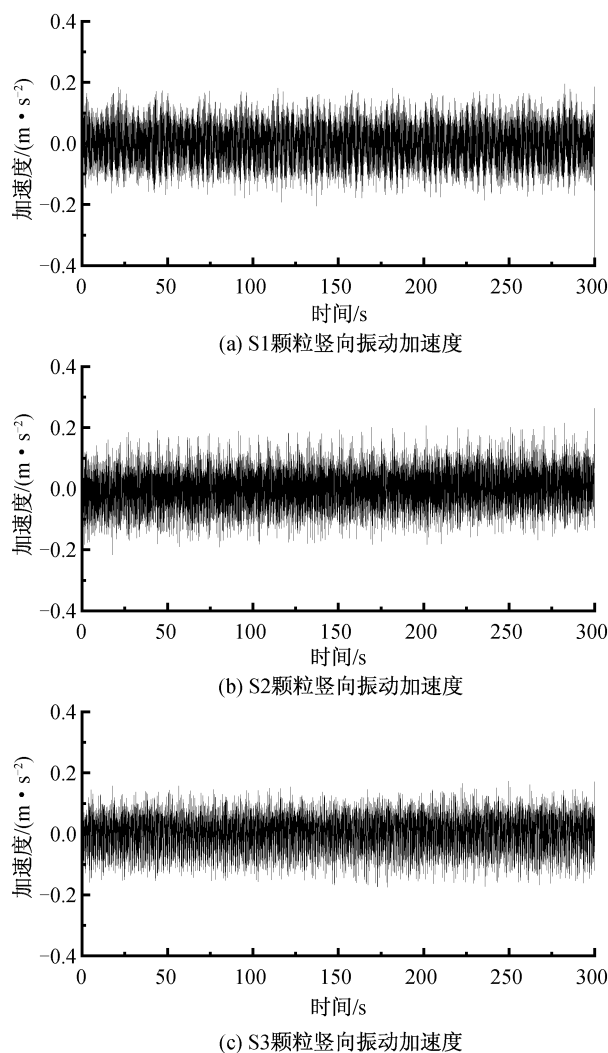


图7 道床竖向振动加速度时程曲线
Fig. 7 Time history curve of vertical vibration acceleration of ballast bed

在洁净道床中 S1 颗粒的竖向振动加速度绝对平均值为 0.0527 m/s^2 ,在泥浆高度 10 与 20 cm 的道床中的振动加速度绝对平均值分别增大到 0.0670 、 0.0824 m/s^2 ,分别增加了 27.13%与 56.36%;S2 颗粒的振动加速度绝对平均值由洁净道床的 0.0454 m/s^2 增加到了 0.0620 与 0.0715 m/s^2 ,分别增大了 36.56%与 57.49%;S3 颗粒的振动加速度绝对平均值由洁净道床的 0.0473 m/s^2 增大到了 0.0587 与 0.0843 m/s^2 ,分别增大了 24.10%与 78.22%。说明随着泥浆侵入道床程度的加深,道砟颗粒的振动越剧烈。

同时,发生翻浆冒泥后,道砟颗粒峰值加速度与标准差也大于洁净道床,并且随着泥浆高度的增加,道砟颗粒加速度峰值与标准差也越大,道砟颗粒会出现更大的瞬时加速度。分析原因可能是泥浆侵入道床,填充道砟颗粒之间的空隙,在细

颗粒与水的作用下,泥浆在道砟间起到了润滑的作用,降低了原本的道砟之间相互咬合与摩擦的程度,使得道砟颗粒之间更容易发生滑移和错动,从而增大了道砟颗粒在荷载作用下的振动响应程度^[10]。

图7给出了在洁净道床内三颗智能颗粒的竖向振动加速度时程曲线,从表2和图7中可以看出,在洁净道床内,S1颗粒的竖向振动加速度绝对平均值与峰值分别为0.052 7、0.373 0 m/s^2 ,S2颗粒的竖向振动加速度绝对平均值与峰值分别为0.045 4、0.272 6 m/s^2 ,说明随着在道床内深度的增加,道砟颗粒的振动加速度减小,原因是道砟颗粒在荷载作用下会发生振动与摩擦,荷载产生的振动能量在向下传递的过程中会逐渐消散,所以道床表层振动加速度最大。S3颗粒的竖向振动加速度绝对平均值与峰值分别为0.047 3、0.175 3 m/s^2 ,对比S1颗粒,S3的振动程度较小,说明由于更加接近振动源,在轨枕下方的道砟颗粒振动程度大于轨枕侧方。

3 道砟颗粒欧拉角变化分析

为了分析不同道床工况对道床不同位置处道砟颗粒在荷载作用下三轴欧拉角变化影响,对智能颗粒采集到的四元数数据进行欧拉角转化,从而得到了道床内不同位置处三颗智能颗粒分别在洁净道床注入泥浆高度10和20 cm时绕纵向、横向、竖向的偏转角度变化时程曲线,见图8、图9、图10。

图8给出了洁净道床中三个颗粒绕三轴偏转角度变化量,从图中我们可以看出在荷载作用下,三个颗粒的角度变化量非常小,都在 0.3° 以内,说明在洁净的道床中,道砟颗粒之间会产生较强的约束作用,道砟颗粒之间不易发生相对转动。

由图8、图9、图10中泥浆侵入前后智能颗粒偏转角度对比可以看出,无论在何种道床状态下,道砟颗粒绕纵向、横向转动的程度均大于绕竖向转动。当泥浆侵入道床之后,道砟颗粒会产生绕纵向或横向的较大转动,绕竖向旋转角度没有明显变化。分析原因可能是泥浆侵入道床,填充了道砟颗粒之间的空隙,泥浆在道砟颗粒接触面之间起到了润滑的作用,降低了原本的道砟之间较强的相互咬合与约束的程度,而相较于发生绕竖向的偏转运动,道砟颗粒之间更容易发生绕纵向、

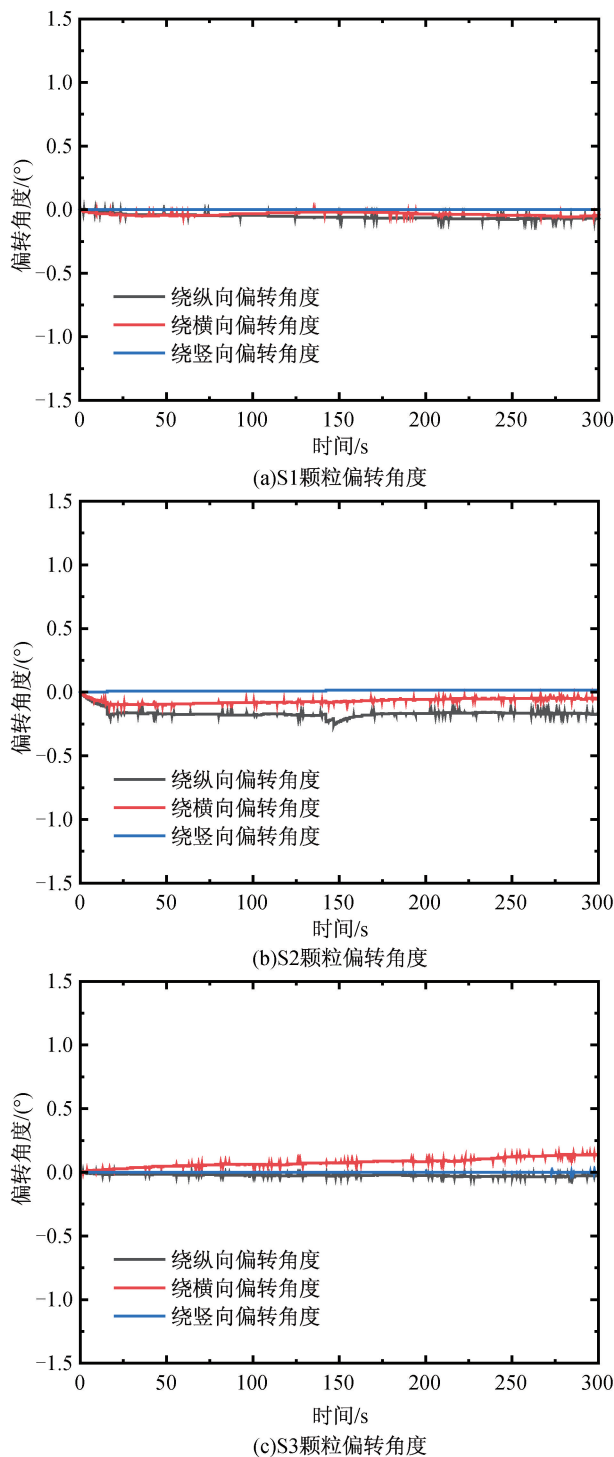
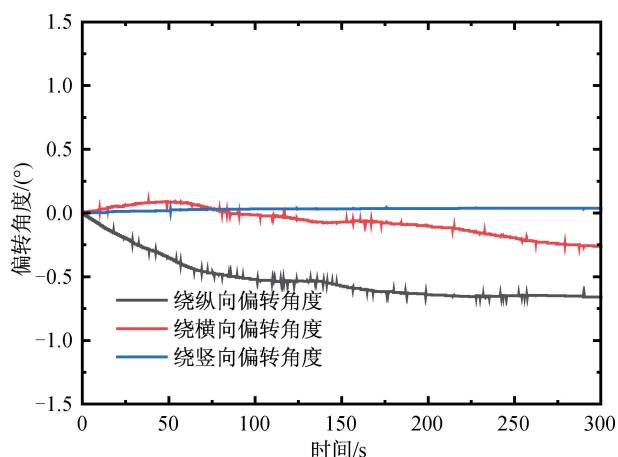


图8 洁净道床智能颗粒偏转角度

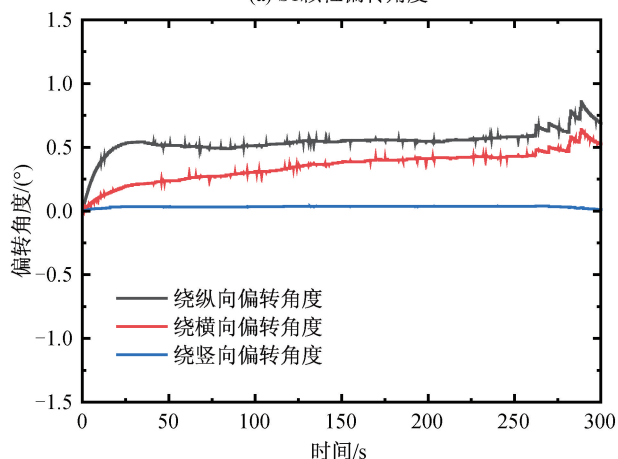
Fig. 8 Deflection angle of intelligent particle sensors in clean ballast bed

横向的滚动运动。

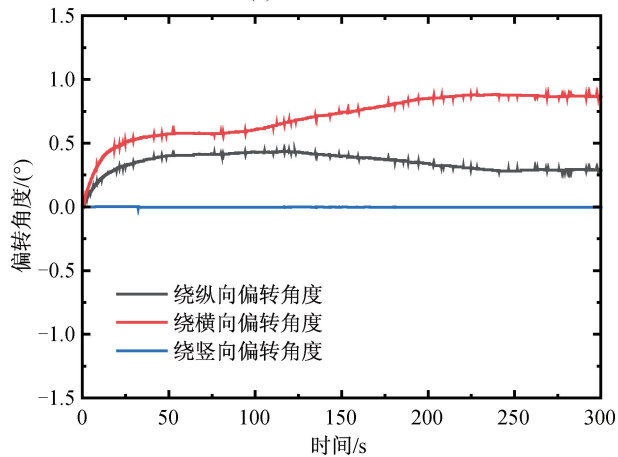
同时,由图8、图9、图10可以看出,在轨枕侧边的S3颗粒绕横向转动角度最大,在泥浆高度为20 cm的道床状态下,S3绕横向转动角度达到了 $1.316 6^\circ$,相比于在洁净道床中的 $0.136 1^\circ$,增加的幅度最大。分析原因可能是S3颗粒位于轨枕侧



(a) S1颗粒偏转角度



(b) S2颗粒偏转角度



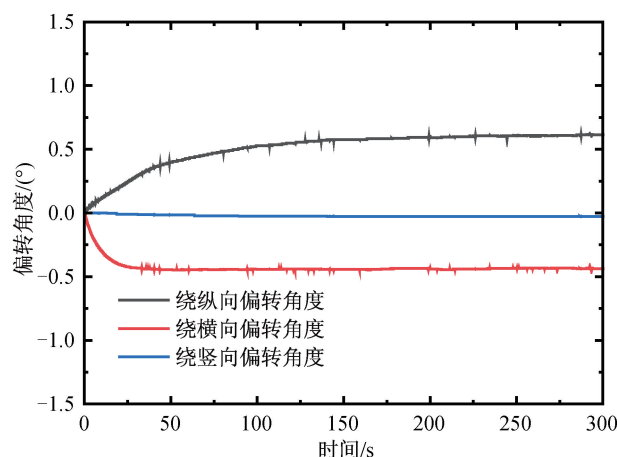
(c) S3颗粒偏转角度

图9 泥浆高度 10 cm 道床颗粒偏转角度

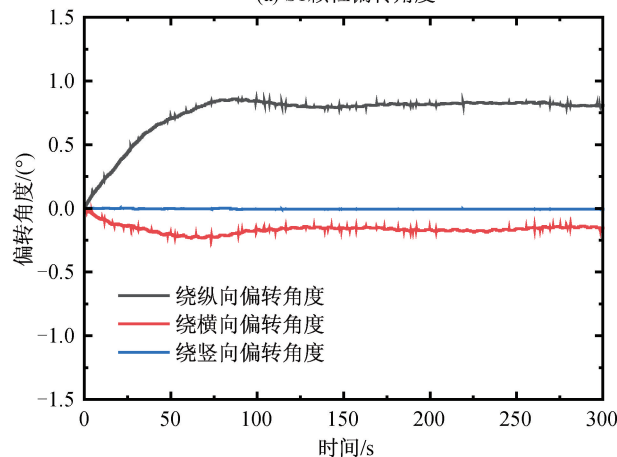
Fig. 9 Deflection Angle of intelligent particle sensors of the ballast bed with a mud height of 10 cm

边,通过轨枕传递的荷载对 S3 颗粒产生垂直于横向的切应力,又由于 S3 颗粒处缺少上部轨枕的约束,使得此处道砟颗粒之间相互咬合程度较小,故当泥浆侵入道床时,S3 颗粒处发生了绕横向的较大转动。

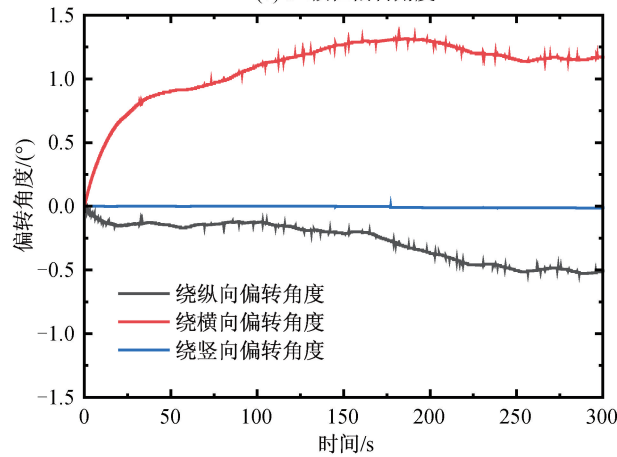
随着道床状态的改变,道砟颗粒在道床中的



(a) S1颗粒偏转角度



(b) S2颗粒偏转角度



(c) S3颗粒偏转角度

图10 泥浆高度 20 cm 道床颗粒偏转角度

Fig. 10 Deflection Angle of intelligent particle sensors of the ballast bed with a mud height of 20 cm

转动方向也可能会发生改变,如图9(a)、图10(a)所示,S1颗粒在泥浆高度 10 cm 的道床内发生绕纵向逆时针的旋转,转动角度为 0.6601° ,而当泥浆高度变为 20 cm 时,S1颗粒发生绕纵向顺时针的转动,转动角度为 0.6137° ,发生了转动方向的变化。

4 结论

通过对翻浆冒泥进行室内试验模拟,采用新型智能颗粒传感器来监测道床内部道砟颗粒的振动响应特性,得到了在室内模型试验条件下,翻浆冒泥路段道砟颗粒振动加速度响应规律和道砟颗粒运动规律,具体结论如下:

1)在荷载作用下,道床中的道砟颗粒在三个方向均产生振动,道砟颗粒在道床中的振动以竖向的振动为主,纵向和横向次之。道砟颗粒的振动加速度随着在道床内深度的增加而减小,轨枕下方的道砟颗粒振动程度大于轨枕侧方。

2)泥浆侵入道床后,道床内道砟颗粒的振动变得更加剧烈,并且泥浆侵入道床程度的加深会提高道砟颗粒的振动水平。

3)在洁净的道床中,道砟颗粒之间会产生较强的约束作用,道砟颗粒不易发生转动。无论在何种道床状态下,道砟颗粒绕纵向和横向转动的程度均大于绕竖向转动。

4)当泥浆侵入道床之后,道砟颗粒会产生绕纵向和横向的较大转动,绕竖向旋转角度没有明显变化。

参考文献:

- [1] 肖尊群,耿星月,王鑫,等. 铁路基床翻浆冒泥病害成因的细观机理分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19): 8152-8158.
- [2] 宋绪国,叶朝良,苏达. 朔黄重载铁路路基病害的分类及其成灾机理研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2013, 26(1): 61-66.
- [3] DUONG T V, CUI Y J, TANG A M, et al. Investigating the mud pumping and interlayer creation phenomena in railway sub-structure[J]. Engineering Geology, 2014, 171: 45-58.
- [4] DUONG T V, CUI Y J, TANG A M, et al. Physical model for studying the migration of fine particles in the railway substructure[J]. Geotechnical Testing Journal, 2014, 37(5): 20130145.
- [5] 崔旭浩,肖宏. 基于离散单元法的铁路板结道床动力特性分析[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(6): 1197-1204.
- [6] 崔旭浩,肖宏,令行. 脏污对散体道床动态行为影响的宏细观分析[J]. 铁道学报, 2022, 44(9): 120-127.
- [7] 崔旭浩,肖宏,肖慧娟. 脏污对有砟道床动力特性影响的离散元分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(2): 551-559.
- [8] ZENG K, QIU T, BIAN X, et al. Identification of ballast condition using SmartRock and pattern recognition[J]. Construction and Building Materials, 2019, 221: 50-59.
- [9] ZENG K, ZENG S, WANG T, et al. Real-time evaluation of railroad ballast condition through change of contact stress using SmartRock[J]. Transportation Geotechnics, 2022, 37: 100857.
- [10] LIU S, HUANG H, QIU T, et al. Characterization of ballast particle movement at mud spot[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(1): 04018339.
- [11] 冷伍明,栗雨,滕继东,等. 易发生翻浆冒泥的细粒土物理状态指标分析与评判[J]. 铁道学报, 2018, 40(1): 116-122.
- [12] 聂如松,冷伍明,栗雨,等. 基床翻浆冒泥土的物理力学性质[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(2): 286-295.
- [13] 国家铁路局. 铁路工程土工试验规程:TB 10102—2023[S]. 北京:中国铁道出版社, 2023.
- [14] 游智,钟小春,张洋,等. 压滤泥饼调制泥浆及其在砂层渣土改良中的应用研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 40-46.
- [15] 张胜杰. 水热力作用下铁路基床泥浆特性与侵入道砟机理研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2023.
- [16] 韩博文,蔡国庆,李舰,等. 有砟轨道路基翻浆冒泥模型试验系统的研发与应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(8): 1406-1415.

(责任编辑 周雪梅)