

DOI:10.11918/201907040

# 高速铁路无砟轨道路基翻浆模型试验

冷伍明<sup>1,2</sup>, 李亚峰<sup>1</sup>, 聂如松<sup>1,2</sup>, 栗雨<sup>1</sup>, 董俊利<sup>1</sup>, 程龙虎<sup>1</sup>

(1.中南大学 土木工程学院,长沙 410075;2. 高速铁路建造技术国家工程实验室(中南大学),长沙 410075)

**摘要:**针对高速铁路无砟轨道出现的路基翻浆病害,构建了足尺的轨道路基翻浆模型试验系统,量测了路基翻浆发生过程中路基的含水率、基质吸力和超孔隙水压力,分析了高速列车动荷载作用下路基动水压力的变化规律,并探讨了高速铁路无砟轨道路基翻浆的机理和影响因素.结果表明:无砟轨道基床表层在雨水入渗条件下基本处于饱和状态,在列车动荷载的长期作用下,易发生翻浆病害;超孔隙水压力的显著增大导致路基发生翻浆,翻浆区域内超孔隙水压力的增量沿基床表层深度方向上保持不变;饱和状态下,底座板两侧路基的超孔隙水压力较路基中心线下更高,更易发生翻浆.降低路基含水率或孔隙水压力可有效地防止和抑制路基翻浆的发生.

**关键词:**无砟轨道;路基翻浆;模型试验;动水压力特性;影响因素

中图分类号: TU411.8

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)03-0118-09

## Model test of subgrade mud-pumping of ballastless track for high-speed railway

LENG Wuming<sup>1,2</sup>, LI Yafeng<sup>1</sup>, NIE Rusong<sup>1,2</sup>, SU Yu<sup>1</sup>, DONG Junli<sup>1</sup>, CHENG Longhu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. National Engineering Laboratory for High Speed Railway Construction (Central South University), Changsha 410075, China)

**Abstract:** To investigate the subgrade mud-pumping of ballastless track for high-speed railway, a full-scale model test system was built. The moisture content, matric suction, and excess pore water pressure of the subgrade during the process of subgrade mud-pumping were measured, the hydrodynamic pressure characteristics of the subgrade were analyzed under dynamic loads induced by high-speed trains, and the mechanism and influencing factors of subgrade mud-pumping of ballastless track were evaluated. Results show that the subgrade surface layer of ballastless track was basically saturated after rainfall infiltration. The mud-pumping was likely to happen under the dynamic loads of high-speed trains. The subgrade mud-pumping occurred with an increase in excess pore water pressure, and the increment of excess pore water pressure was constant in the mud-pumping region with an increase in the depth of subgrade surface layer. In saturated situation, the excess pore water pressure of the subgrade on both sides of the concrete base was higher than that below the center line of the subgrade, making mud-pumping more likely to occur. Reducing the water content or pore water pressure of subgrade can be an effective way to control and prevent the occurrence of subgrade mud-pumping.

**Keywords:** ballastless track; subgrade mud-pumping; model test; hydrodynamic pressure characteristics; influencing factors

近年来,中国在高速铁路领域不断取得新的突破和成就,高速铁路已成为当今社会大力发展的交通运输方式<sup>[1-2]</sup>.路基作为铁路线路的下部结构,是整个铁路运输方式的基础.铁路路基受列车荷载、水和温度等因素的长期耦合作用,容易产生各种路基病害.无砟轨道路基翻浆是近年出现的一种新的高速铁路路基病害<sup>[3]</sup>,路基翻浆降低了路基对上部轨道结构的支承及约束作用,影响无砟轨道的动力稳定性,进而极大地影响高速列车运行的平顺性和

安全性<sup>[4]</sup>.文献[5-6]指出路基翻浆是一种在交通荷载作用下细颗粒从路基中向上迁移的现象,翻浆程度受列车循环荷载、路基含水率、轨道结构、填料级配等影响.文献[7-8]认为路基高含水率是导致翻浆发生的关键因素,饱和状态下路基超孔隙水压力的形成与消散驱动路基翻浆的发生.文献[9-10]通过室内试验和数值计算指出降低孔隙水压力可有效地抑制路基翻浆的发生.文献[11]认为列车荷载作用下轨枕上下起伏引起的抽吸力驱动细颗粒土迁移,进而导致路基翻浆现象发生.文献[12-13]指出黏粒含量(质量分数)大于20%且粉粒含量大于20%的路基土易发生翻浆病害.

上述关于路基翻浆的研究多集中于公路和有砟轨道<sup>[5-13]</sup>,而关于无砟轨道路基翻浆的研究则较少.

收稿日期: 2019-07-04

基金项目: 中国铁路总公司系统性重大项目(P2018X011);

国家自然科学基金(51878666,51678572);

中南大学研究生创新项目(2018zzts192)

作者简介: 冷伍明(1964—),男,教授,博士生导师

通信作者: 聂如松, nierusong97@csu.edu.cn

文献[14]通过现场调研,指出底座板侧缝和接缝为雨水浸入提供了通道,在列车的循环荷载作用下,基床表层内形成的超孔隙水压力带动细颗粒土从底座板裂缝中渗出或涌出,引发路基翻浆.文献[3]开展了室内无砟轨道翻浆缩尺模型试验,指出列车动荷载、水与路基填料中的细颗粒是导致路基翻浆的关键因素.已有的研究成果表明,翻浆过程中路基动水压力特性的变化规律对于揭示翻浆机理具有重要意义,而目前关于这方面的研究相对较少.

本文依托高速铁路建造技术国家工程实验室的轨道-路基动力试验系统,构建足尺的无砟轨道路基翻浆模型试验系统.对翻浆过程中路基的含水率、基质吸力和孔隙水压力等进行量测,探究了高速列车动荷载作用下路基动水压力特性变化规律,结合路基翻浆的发展过程,揭示了路基翻浆与动水压力特性间的联系,并探讨了无砟轨道路基翻浆的影响因素.研究成果为研究无砟轨道路基翻浆提供了试验基础,对于进一步揭示翻浆机理具有重要意义.

## 1 无砟轨道路基翻浆试验系统

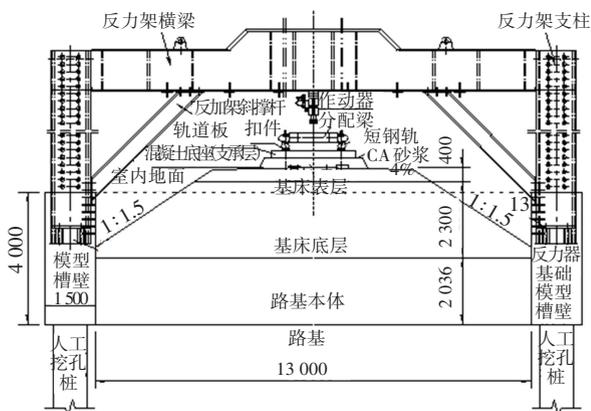
### 1.1 无砟轨道-路基足尺模型

以单线高速铁路无砟轨道为设计原型,无砟轨道-路基足尺模型建造在长为28 m、宽为13 m、深为8 m的模型槽内,基床表层和底层的厚度分别为0.4、2.3 m,基床以下路堤厚为2.0 m,路基边坡坡率为1:1.5,其中路肩表面设置混凝土封闭层.路基上布置CRTS II型板式无砟轨道,由钢轨、扣件、轨枕、轨道板、CA砂浆层和混凝土底座板组成.钢轨规格为60 kg/m,轨道板厚为200 mm,CA砂浆层厚为30 mm,底座板厚为300 mm.轨道-路基模型如图1所示.

依据《高速铁路设计规范》<sup>[15]</sup>,无砟轨道-路基模型的基床表层采用级配碎石填料,基床底层和基床以下路堤采用改良的B组填料.基床表层和表层以下的压实系数分别为0.97、0.95,路基填筑标准满足规范要求.足尺模型所用的级配碎石的颗粒级配曲线如图2所示.



(a) 实物照片



(b) 横断面(mm)

图1 无砟轨道-路基足尺模型

Fig.1 Full-scale model of ballastless track-subgrade

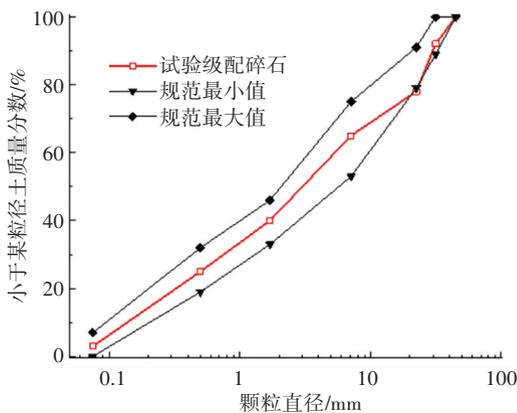


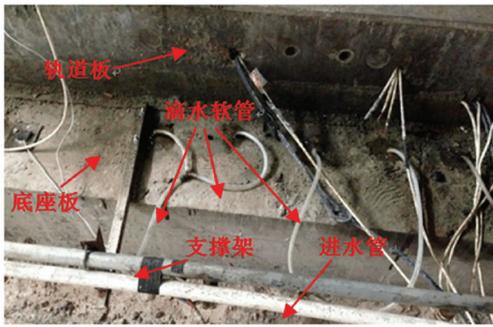
图2 级配碎石颗粒级配曲线

Fig.2 Gradation curves of tested graded crushed stone

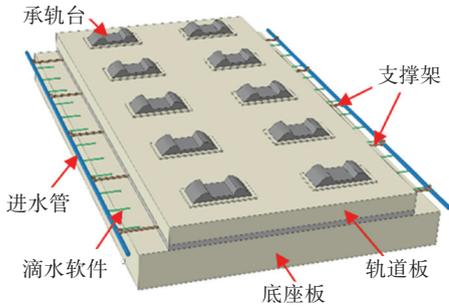
### 1.2 雨水滴浸系统

现场调研表明,雨水大多从底座板与水泥砂浆封闭层间的侧缝或底座板间的接缝处入渗到路基中<sup>[14]</sup>.考虑到室内模型试验周期短,温度变化幅度小,混凝土底座板因热胀冷缩产生的变形较小,底座板周边难以出现侧缝或接缝.因此,本试验系统采用雨水滴浸方式模拟自然环境中的降雨入渗作用.

在轨道-路基足尺模型底座板的两侧(具体位置为底座板两侧上表面超出轨道板的部分)垂直向下钻直径约为1 cm的孔,并贯通底座板.将延展性良好的滴水软管一端插入钻孔中,另一端与固定在底座板两侧的进水管连接.其中,进水管为硬质PVC管,固定在焊接在底座板两侧的支撑架上.滴水软管与进水管及钻孔间密封性良好,确保在滴浸过程中无水溢出.在埋设传感器的路基剖面附近,加密钻孔和滴水软管数量,确保雨水滴浸系统能快速有效地增大传感器附近路基土的含水率.雨水滴浸速率由流量计和阀门控制.雨水滴浸系统如图3所示.



(a) 实物照片



(b) 布置示意图

图 3 雨水滴浸系统

Fig.3 Rainwater drip system

### 1.3 加载系统

列车循环荷载主要通过电液伺服加载系统模拟(图 4), 加载系统主要由作动器、分配梁、电机、油源、冷却塔、油源控制系统和 MTS 控制系统组成. 动荷载经作动器传递至分配梁, 再向下依次传递至钢轨、轨枕、轨道板、底座板, 最后至基床. 作动器的最大静态试验荷载为  $\pm 200$  kN, 最大行程为 50 mm, 最大动位移幅值为 5 mm, 最大加载频率为 50 Hz.



图 4 加载系统

Fig.4 Loading system

加载系统采用作动器组联合加载来实现列车动荷载的模拟. 模拟过程中, 作动器组输入相同的荷载时程曲线. 根据所模拟行车方向确定轮载最先到达的轨枕, 对相应的作动器发出加载命令, 再对其他作动器依次发出加载命令. 相邻作动器加载波形的延迟时间由轨枕间距和行车速度确定. 通过调整相

邻作动器加载先后的时间间隔, 最高可模拟行车速度为 380 km/h 的高速列车所产生的列车动荷载.

本次试验加载模拟车厢长度为 25 m、运行速度为 300 km/h、轴重为 170 kN 的 CRH3 型高速列车动荷载. CRH3 型高速列车车厢长度为 25 m, 运行速度为 300 km/h, 因此通过一个车厢的周期为 0.3 s. 相邻车厢相邻转向架之间的距离为 7.8 m, 因此该两个转向架加载之间作用的时间间隔为 0.093 6 s.

根据已有研究<sup>[16-18]</sup> 成果可知, 采用 M 形波可较为真实地模拟列车动荷载作用. 基于有限元模型<sup>[16]</sup> 计算得到单个扣件的反力时程, 再乘以倍数 2, 即可得单个作动器加载时程曲线(图 5). 相邻作动器加载波形延时为轨枕间距与行车速度之比, 其中轨枕间距为 0.65 m, 故相邻作动器加载波形的延迟时间计算为 0.007 8 s. 荷载时程曲线的计算方法详见文献<sup>[16]</sup>. 通过与实测的路基基床竖向动应力响应值<sup>[19-20]</sup> 对比(图 6), 验证了足尺模型试验加载设计的合理性与可靠性.

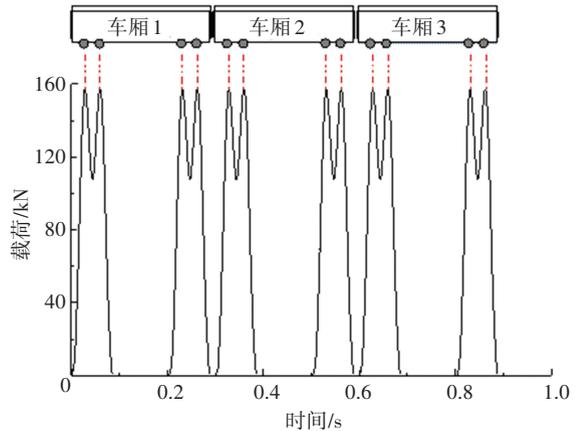


图 5 单根作动器加载时程曲线

Fig.5 Loading time history curves of each actuator

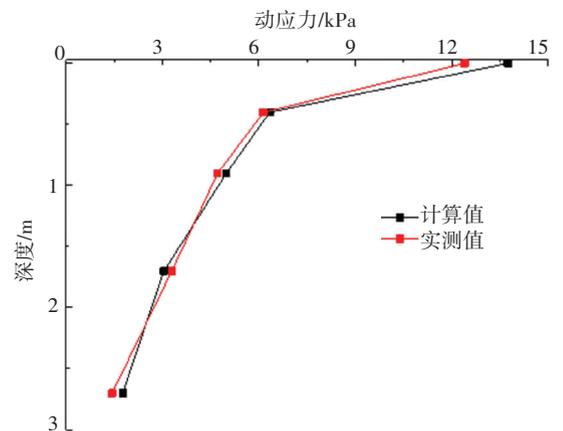


图 6 竖向动应力的实测值与计算值

Fig.6 Measured and calculated values of vertical dynamic stress

### 1.4 测量系统

试验系统采用土体水分传感器( EC-5)、土体

水势传感器(MPS-6)和小型孔隙水压力计(JMZX-5506AT)分别测量路基的体积含水率、基质吸力和孔隙水压力,探究翻浆过程中路基动水压力特性的变化规律.传感器布置在基床表层内,如图7所示.水平方向上选取底座板左侧、底座板右侧和中心线下,竖直方向上选取基床表层5、20、40 cm深度处,布置土体水分传感器和小型孔隙水压力计,土体水势传感器只布置在基床表层5、20 cm深度处.考虑到级配碎石中存在较多的碎石,在动荷载作用下,容易挤压损坏传感器,因此,在传感器周围铺设粒径小于2 mm的细粒土层(厚度为2 cm),以保证传感器的正常工作.

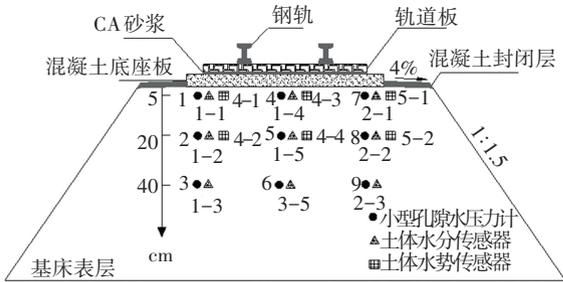


图7 传感器布置示意图

Fig.7 Layout of sensors

### 1.5 试验设置及过程

为方便观察基床表层的翻浆发展过程,剖开底座板两侧路肩上的混凝土封闭层,形成一个20 cm宽的长条形观察区域.此外,为对比分析降雨入渗对路基翻浆及动水压力特性的影响,本次试验采用单侧补水方式:底座板左侧进行雨水滴浸,而底座板右侧未进行雨水滴浸.试验设置如图8所示.

常工作状态.其中,加载系统和雨水滴浸系统在试验开始时开启1 h,在确认其工作性能后关闭.

2) 试验阶段. 开启加载系统和雨水滴浸系统,同时进行传感器数据的采集. 观察路基翻浆情况,若雨水滴浸速率无法实现路基翻浆,则调大注水阀门,加大雨水滴浸速率,确保出现路基翻浆现象,同时进行轨道-路基的图像信息记录.

## 2 试验结果分析

### 2.1 路基翻浆现象

试验进行到第41小时,底座板左侧长条形观察区域内观察到轻微的路基翻浆现象. 试验进行到第43小时,翻浆程度进一步加剧. 根据观察的路基翻浆现象,将翻浆发展过程划分为以下3个阶段:

1) 翻浆孕育阶段,在试验开始后的第20~40小时. 路肩长条形观察区域内仅有少量水排出,无细颗粒或者泥浆涌出,无翻浆现象发生.

2) 缓慢翻浆阶段,在试验开始后的第41小时至43小时. 底座板左侧长条形观察区域出现路基翻浆,在20 cm<sup>2</sup>的矩形区域内,泥浆和水从冒浆通道中涌出,并间歇性地伴有气泡冒出. 泥浆和水的涌出随着循环荷载的作用呈现出周期性,此时的翻浆程度轻微缓慢,如图9(a)所示.

3) 激烈翻浆阶段,在试验进行到第43小时,经过持续的路基翻浆,原本呈珠状分布的冒浆通道进一步发展扩大,相邻通道连接融汇,呈现带状分布的特征. 路基内的水携带细粒土从冒浆通道中涌出,堆积形成薄薄的细粒土层,此时的翻浆程度较为剧烈,如图9(b)所示.

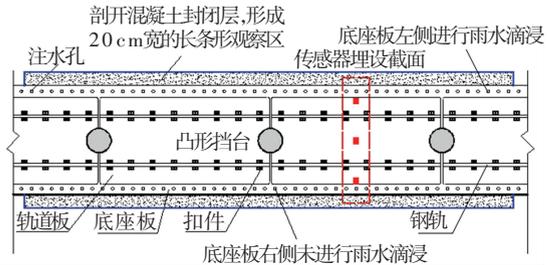
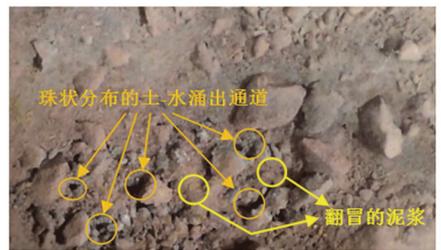


图8 试验设置示意图

Fig.8 Schematic of test setup

考虑路基翻浆试验系统包含多个子系统及传感器,在试验正式开展前,先对试验系统性能进行检测调试,确定试验系统工作性能正常后,进行路基翻浆试验.

1) 测试阶段. 进行动力荷载测试,检查作动器工作性能和动荷载参数的有效性;开启雨水滴浸系统模拟降雨入渗,检查土体水分传感器、土体水势传感器和小型孔隙水压力计的工作性能,并检验传感器记录数据的有效性;调试试验系统,确保其处于正



(a) 缓慢翻浆阶段



(b) 激烈翻浆阶段

图9 试验翻浆现象

Fig.9 Phenomenon of mud-pumping in the test

### 2.2 体积含水率变化规律

降雨条件下测试阶段和试验阶段的基床表层土体体积含水率如图 10 所示. 以注水侧(底座板左侧)的体积含水率变化为例,分析降雨条件下路基的含水率变化规律. 测试阶段第 1 次注水(持续 1 h)快速地提高了路基含水率,不同深度的路基土

迅速达到饱和状态. 在注水停止后,含水率缓慢下降,经过约 20 h 的路基自然排水后,路基的含水率仍未恢复到注水前的状态. 随后进行第 2 次路基注水,含水率再次快速上升至饱和状态,由于第 2 次路基注水持续不停歇,含水率始终维持在饱和状态的水平.

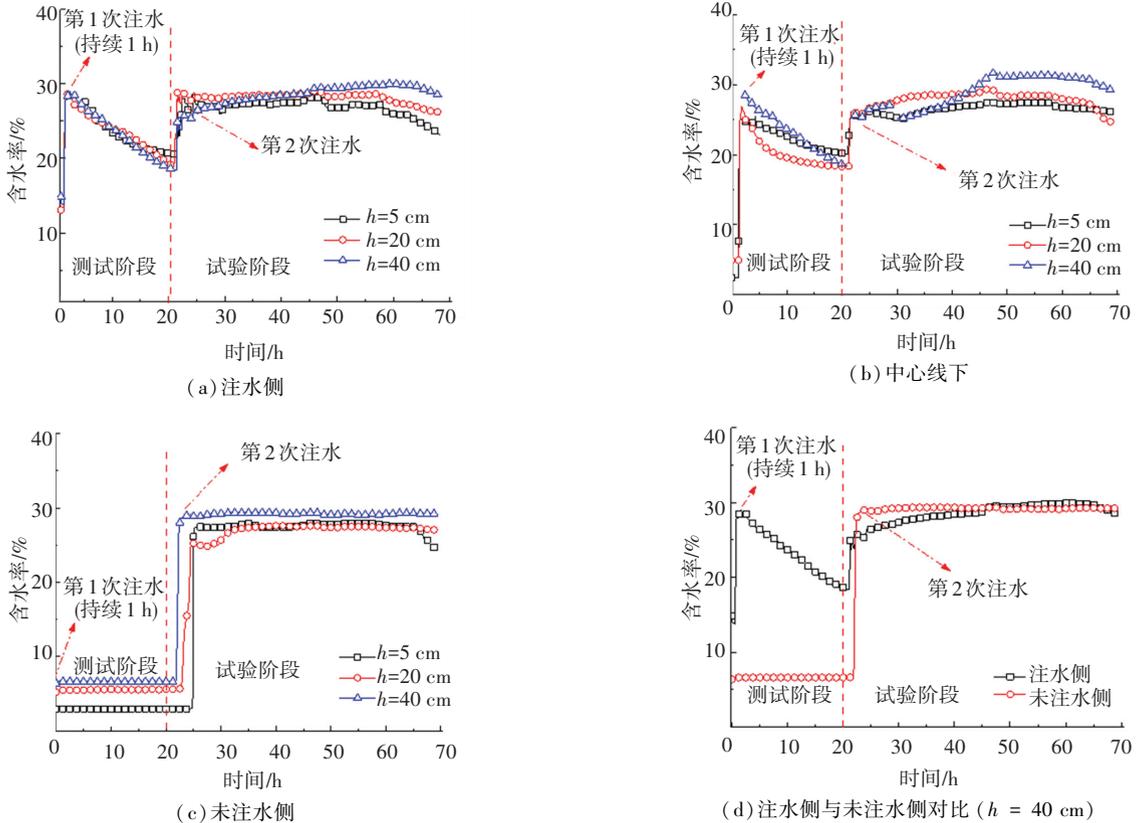


图 10 体积含水率变化曲线

Fig.10 Change curves of volumetric water content

中心线下的体积含水率变化规律与注水侧相似,但未注水侧(底座板右侧)的含水率在第 1 次注水时基本无变化,在第 2 次持续注水作用下,深处的路基土含水率最先上升,浅处的含水率变化表现出滞后性,如图 10(c)、10(d)所示. 该现象主要由以下原因导致:滴浸入路基的水在毛细作用、阻力和重力的综合作用下,渗流主要沿竖直向下的方向渗透扩散. 相比于水平方向的扩散,浸湿锋面更快地沿竖直向下进行扩散<sup>[18]</sup>. 由于第 1 次注水量较小(仅持续 1 h),水量更多地渗透到滴浸区域附近的路基深处,而非较远处的底座板右侧(距离滴浸区域的水平距离约为 2.95 m). 第 2 次注水时,由于前 1 次注水的大量滞留,新补充的水得以快速渗透扩散. 由于入渗的雨水主要沿竖直向下的方向渗透扩散,故深处的路基土含水率最先上升,浅层路基土含水率的上升则表现出一定的延迟. 此外,由于基床表层和基床底层填料渗透系数差异<sup>[18]</sup>,自由水在两者

交界处累积,仅通过自然渗透,水分将难以排出,因此基床表层深处路基的含水率较浅层处更高.

翻浆持续一段时间后,路基体积含水率出现了小幅的下降,其中靠近滴浸区域的浅层路基土含水率下降幅度更为明显. 这是由于路基翻浆导致细颗粒土被带出,级配碎石的渗透系数增大,路基的排水性能增强导致.

### 2.3 基质吸力变化规律

基床表层基质吸力随时间的变化曲线如图 11 所示. 注水侧和中心线下的基质吸力在第 1 次补水时迅速降低,未注水侧的传感器距离滴浸区域较远,基质吸力在第 2 次持续补水时才降低至稳定值. 未注水侧深处的路基土基质吸力较浅层先降低,表明滴浸的水更快地渗透到路基深处,随后再到浅层的路基土. 路基不同位置处的基质吸力变化规律也验证了上节关于路基自由水迁移规律的解释:入渗的雨水主要沿竖直向下的方向渗透扩散,对于未降雨的区域,深处的

路基土较浅层的路基土先饱和. 文献[21]在研究路基基质吸力的分布规律中也得到相似的结论.

基质吸力迅速减小至接近于0表明路基土由非饱和状态转变至饱和状态,路基土中的水分迁移达到动态平衡,基质吸力引起的土体内部应力消失,列车循环荷载作用仅由土颗粒结构和路基水共同承受. 在基床饱和后,基质吸力一直稳定并接近于0. 这一方面是由于土体含水率始终维持在较高水平,根据土水特征曲线,此时含水率变化对应的基质吸力变化很小,另一方面,基质吸力的测试是依据传感器测试端陶土板与土体湿润环境达到动态平衡时对应的孔隙水负压的大小,由于传感器周围的细粒土具有较强的持水性,其孔隙水不易排出,导致路基饱和后传感器记录的基质吸力数据变化较小.

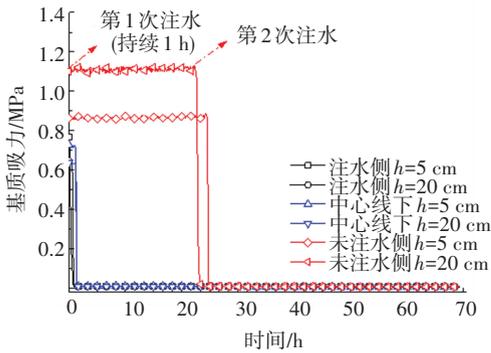


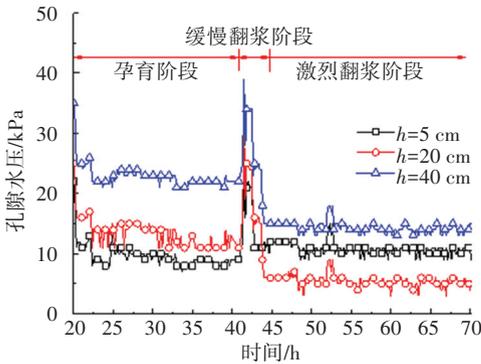
图 11 基质吸力变化曲线

Fig.11 Change curves of matric suction

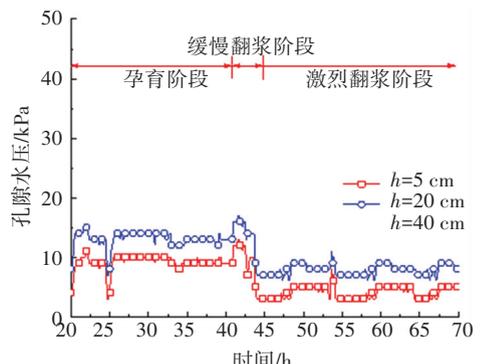
### 2.4 孔隙水压力变化规律

基床表层的孔隙水压力随时间的变化曲线如图 12 所示. 由于测试阶段小型孔隙水压力计记录的孔隙水压力数据不完整,故在图中不予表示和分析,仅分析试验阶段路基处于饱和状态下的孔隙水压力.

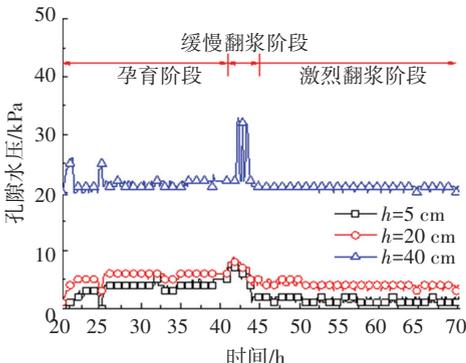
不同位置处的孔隙水压力表现出相似的分布规律:总体上,孔隙水压力随着深度的增加而不断增大;在水平方向上,孔隙水压力随着与滴浸区域距离的增加而不断减小. 现以注水侧(翻浆侧)为例,分析翻浆过程中孔隙水压力的变化规律. 动荷载加载瞬间,基床变形迅速增大,施加的动荷载由土体骨架和水共同承担,因此孔隙水压力迅速增大. 随着列车荷载的持续作用,路基的变形逐渐趋于稳定,基床内的水在基床填料中不断迁移或排出,孔隙水压力也逐渐进入小幅度的波动状态. 试验进行到第 41 小时,孔隙水压力迅速增大至峰值,较高的超孔隙水压力驱动水在粗骨料的间隙中流动,并携带细颗粒从底座板两侧的长条形观察区域内涌出,此时路基表面出现程度轻微的翻浆现象. 试验进行到第 43 小时,随着泥浆和水的持续涌出,路基翻浆由稳定状态发展至激烈状态,孔隙水压力也逐渐降低至稳定,其中浅层路基土的孔隙水压力变化最为显著. 这是由于随着细颗粒土的不断排出,级配碎石骨架的渗透系数不断增大,基床内自由水快速排出导致孔隙水压力降低.



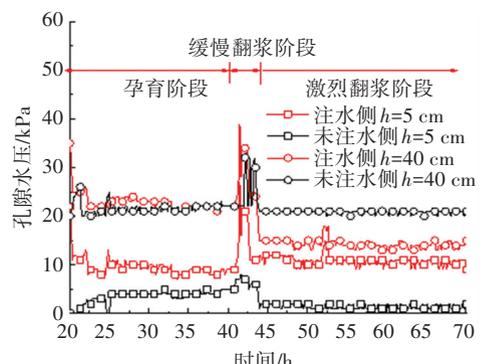
(a) 注水侧



(b) 中心线下



(c) 未注水侧



(d) 注水侧与未注水侧对比

图 12 孔隙水压力变化曲线

Fig.12 Change curves of pore water pressure

中心线下和未注水侧路基土的孔隙水压力在整体上表现出与注水侧相似的规律:翻浆时孔隙水压力快速上升、翻浆持续一段时间后孔隙水压力降低至稳定,但孔隙水压力的变化在数值上明显小于注水侧.结合试验过程中,翻浆现象仅发生在注水侧,未注水的底座板右侧未出现翻浆现象,得出以下结论:超孔隙水压力的变化达到一定程度时,才会导致路基发生翻浆现象.

为进一步分析列车动荷载对孔隙水压力的影响规律以及孔隙水压力与翻浆间的关系,绘制了列车动荷载加载以及翻浆前后注水侧与未注水侧的路基土孔隙水压力变化曲线,如图 13 所示.由图可知,列车动荷载加载前,注水侧的孔隙水压力整体较未注水侧高.随着动荷载的稳定,基床各深度处路基的孔隙水压力皆有小幅度上升,且深度越大,孔隙水压力的增长幅度越大.此时,虽然动荷载导致孔隙水压力的增大,但由于孔隙水压力未达到一定幅度,故无翻浆现象发生.

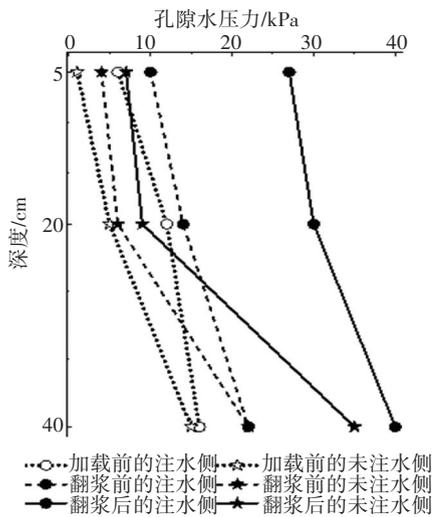


图 13 加载/翻浆前后孔隙水压力分布曲线

Fig. 13 Distribution of pore water pressure before and after loading and mud-pumping

翻浆发生前后,翻浆侧(注水侧)孔隙水压力显著增大(约 17 kPa),且孔隙水压力的增量在竖直方向上基本不变,表明孔隙水压力沿深度方向均匀传递,未发生减弱和消散.而未发生翻浆的一侧(未注水侧),较大的超孔隙水压力仅存在于基床表层的底部,随着深度的减小,孔隙水压力也不断减小至 3 kPa,发生了明显的消散和减弱.基床浅层较小的超孔隙水压力的形成与消散未能驱动土体骨架中的细颗粒进行迁移,因此,未能发生路基翻浆现象.

动荷载施加前期虽引起路基孔隙水压力的小幅升高,但不致迅速翻浆.在列车动荷载的持续作用

下,级配碎石有颗粒移动和挤密的趋势,列车动荷载在基床内产生的动应力由最初的级配碎石骨架承担而渐变为由孔隙水来承担.而由于此时基床表层处于饱和状态,孔隙水难以排出,因此孔隙水压力急剧上升,进而导致翻浆发生.可见,短期的列车动荷载作用未能引起孔隙水压力的显著增大,故无翻浆发生.而长期的列车动荷载作用会导致孔隙水压力发生突增,以致翻浆发生.

底座板两侧动应力条件和记录的体积含水率相似,而两侧的孔隙水压力发展以及翻浆情况却差异较大.这是由于底座板左侧处于雨水滴浸区域,经过测试阶段和试验阶段的长期雨水滴浸,该区域下的路基含水率整体较高,路基基本处于饱和状态.在列车动荷载作用下,充分饱和的基床表层内的自由水无法快速排出,进而产生显著的超孔隙水压力,导致路基翻浆的发生.而底座板右侧距离雨水滴浸较远,渗透路径长,路基处于不完全饱和状态,含水率和基质吸力传感器由于周围细颗粒土的良好吸水性和持水性而显示其为饱和状态,更外层的级配碎石可能未完全饱和.在列车动荷载作用下,路基内自由水由饱和处向未饱和处迁移,由于基床表层深处的饱和程度较浅层高,超孔隙水压力仅发生在充分饱和的基床表层底部,随着深度衰减,超孔隙水压力发生消散和减弱,导致轨道板右侧基床表层无翻浆现象发生.底座板两侧(注水侧和未注水侧)翻浆情况的差异表明了路基含水率对翻浆发生的重要性.

### 3 无砟轨道翻浆影响因素分析

高速铁路无砟轨道的设计、建造和维护标准高,但中国多条无砟轨道仍出现了路基翻浆病害,如沪宁线、沪杭线和武广线等<sup>[3,14]</sup>.现结合模型试验结果,对无砟轨道翻浆影响因素进行分析和探讨.

#### 3.1 轨道-路基结构

无砟轨道与有砟轨道的路基结构横断面如图 14 所示.对于有砟轨道,路基面形状设计为三角形,路基中心线向两侧设 4% 的人字排水坡.入渗的雨水经透水性良好的道砟排至基床表面,后经基床表层 4% 的人字排水坡排至侧沟,雨水不易滞留在基床表层内.而对于无砟轨道,混凝土底座板和封闭层在热胀冷缩作用下易产生收缩裂缝<sup>[3,14]</sup>,为雨水入渗提供路径.且由于基床表面混凝土封闭层的存在,入渗的雨水难以从基床表面排走,进而滞留在基床表层内.此外,由于底座板和基床表面接触面未设置横向排水坡,入渗的雨水更易聚集在动力响应最为剧烈的底座板和基床表面接触区域.

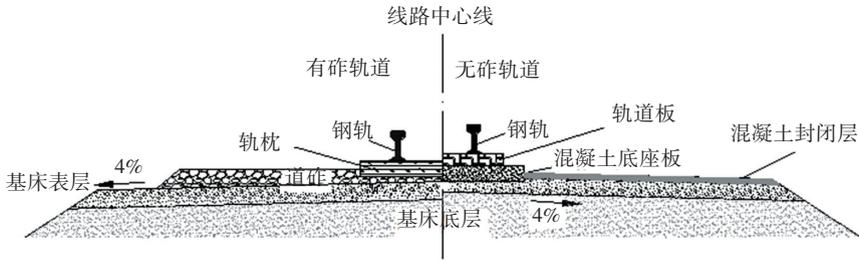


图 14 无砟轨道与有砟轨道结构横断面

Fig.14 Cross-section of ballastless track and ballast track

### 3.2 填料性质

文献[12-13]研究了发生翻浆的路基土的颗粒组成,并给出了砂粒、黏粒和粉粒三因分类图,如图15所示.发生翻浆的样本主要集中在实线三角形区域(黏粒、粉粒质量分数均大于20%)内,而在虚线三角形区域(黏粒质量分数大于30%且粉粒质量分数大于40%)内更易发生翻浆.本次模型试验基床表层采用性质良好的级配碎石填料,其颗粒组成远离易发生翻浆的区域(主要为公路和有砟轨道翻浆),但路基仍有发生翻浆的可能.

的细粒易从土体骨架中迁移脱离,进而随自由水从底座板缝隙处排出,发生翻浆现象.本试验中收集的泥浆及细颗粒也验证了这一观点,级配碎石中较多的细颗粒(尤其是粉粒和黏粒)为路基翻浆提供了泥浆来源.

此外,细颗粒含量的增加也会导致级配碎石的渗透系数迅速减小,在压实系数为0.95的条件下,级配碎石的渗透系数为 $1.5 \times 10^{-3} \sim 2.85 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ,考虑到实际工程中,基床表层的压实系数往往大于规范要求的0.95,其渗透系数会更低<sup>[23]</sup>.较低的渗透系数导致雨水浸入基床表层后短时间内难以排出,结合模型试验中体积含水率的变化规律(图10)可知,饱和后的路基土含水率下降速率较慢,20 h下降约10%,表明自然状态下路基的排水效率较低.而在持续降雨状态下,路基含水率基本保持不变,基本维持在饱和状态.故在实际降雨条件下,若底座四周存在雨水入渗裂缝,则路基会长期处于饱和状态,进而为翻浆提供充足的自由水.

综上,无砟轨道的路基结构和填料性质是影响路基翻浆的重要因素.无砟轨道路基结构形式导致从底座板周边裂缝入渗的雨水难以从基床表面排走,进而入渗至基床表层内.而基床表层级配碎石中较多的细粒(尤其是粒径小于0.075 mm的粉粒和黏粒)一方面降低了基床的排水效率,使得基床表层成为饱和和不透土层;另一方面,细粒受级配碎石骨架的粘聚和嵌固作用有限,在列车动荷载作用下,易受孔隙水压力的驱动而发生迁移,最终导致路基翻浆的发生.

## 4 结论

1) 在持续的雨水滴浸作用下,无砟轨道路基结构以及级配碎石较低的渗透系数导致雨水浸入基床表层后短时间内难以排出,基床表层基本处于饱和状态.路基接近或处于饱和状态是翻浆发生的必备条件.

2) 超孔隙水压力显著增大标志着路基翻浆的发生.翻浆区域的孔隙水压力增长最为剧烈:由10 kPa增长至27 kPa,且超孔隙水压力的增长沿深度方向上保持不变.而未发生翻浆的区域,超孔隙水压力仅发生在基床表层底部,未能传递至基床表

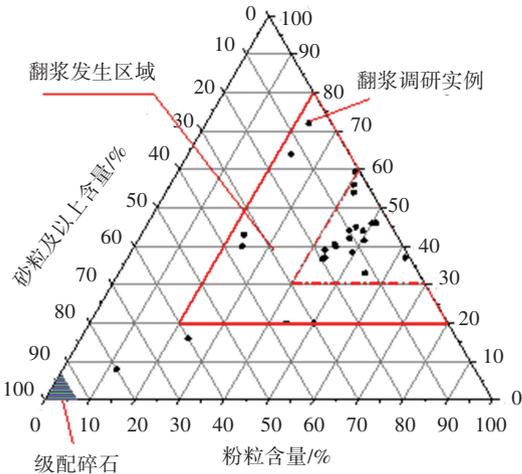


图 15 基床土颗粒三因分类图

Fig.15 Particle size distribution of fills in mud-pumping

为保证路基的压实系数达到规范要求(不小于0.95),级配碎石一般掺有少量细料(粒径小于5 mm),但为保证路基的渗透性,细料的含量应予以控制.其中,级配碎石中细料的质量分数一般为30%~50%,粒径小于0.075 mm的细粒(粉粒和黏粒)含量一般不大于7%<sup>[15]</sup>.作为基床表层填料,级配碎石中粒径小于0.075 mm的细粒含量偏少,不利于填料的碾压密实以及土体骨架对细粒的粘聚和嵌固.文献[22]对级配碎石进行冲洗,冲洗前后颗粒质量损失约7.7%,其中86%的颗粒损失为粒径为小于0.075 mm的细粒.这表明现行规范中的级配碎石骨架对细粒的粘聚和嵌固作用有限,受孔隙水压力的驱动,填充在级配碎石骨架中的粒径小于0.075 mm

面而无翻浆现象发生。

3) 在路基充分饱和的前提下,底座板两侧的孔隙水压力更高,更易形成翻浆现象。降低基床表层含水率或孔隙水压力可有效地防止和抑制路基翻浆的发生。

4) 级配碎石骨架对细粒(粉粒和黏粒)的粘聚和嵌固作用有限,受超孔隙水压力的驱动作用,细粒易从土体骨架中脱离迁移。因此,虽然高速铁路无砟轨道基床表层采用性质良好的级配碎石填料,但在路基高含水率和列车动荷载的耦合作用下,仍存在发生路基翻浆病害的可能性。

## 参考文献

- [1] 胡一峰,李怒放. 高速铁路无砟轨道路基设计原理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010  
HU Yifeng, LI Nufang. Theory of ballastless track-subgrade for high-speed railway[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2010
- [2] 赵国堂. 高速铁路无砟轨道结构[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006  
ZHAO Guotang. High-speed railway ballastless track structure[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006
- [3] PHAM D P. 高速铁路无砟轨道基床表层级配碎石翻浆机理与加固效果研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015  
PHAM D P. Study on the mud pumping mechanism and reinforcement effect for gravel in high-speed railway ballastless track surface layer of subgrade bed[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015
- [4] 张文超, 苏谦, 刘亭, 等. 基床翻浆条件下无砟轨道路基振动特性研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3556  
ZHANG Wenchao, SU Qian, LIU Ting, et al. Research on vibration characteristics of ballastless track subgrade under frost boiling at subgrade bed[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(12): 3556
- [5] ALOBAIDI I, HOARE D J. Factors affecting the pumping of fines at the subgrade subbase interface of highway pavements: a laboratory study[J]. Geosynthetics International, 1994, 1(2): 221
- [6] ALOBAIDI I, HOARE D J. The development pore water pressure at the subgrade-subbase interface of a highway pavement and its effect on pumping of fines[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1996, 14(2): 111
- [7] 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
- [8] DUONG T V, CUI Y J, TANG A M, et al. Effect of fine particles on the hydraulic behavior of interlayer soil in railway substructure[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(7): 735
- [9] CHAWLA S, SHAHU J T. Reinforcement and mud-pumping benefits of geosynthetics in railway tracks: model tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(3): 366
- [10] CHAWLA S, SHAHU J T. Reinforcement and mud-pumping benefits of geosynthetics in railway tracks: numerical analysis[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, 44(3): 344
- [11] TAKATOSHI I. Measure for the stabilization of railway earth structure[R]. Tokyo: Japan Railway Technical Service, 1997
- [12] 聂如松, 冷伍明, 粟雨, 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  
NIE Rusong, LENG Wuming, SU Yu, et al. Physical and mechani-

- cal properties of mud pumping soils in railway subgrade bed[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(2): 286
- [13] 冷伍明, 粟雨, 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  
LENG Wuming, SU Yu, TENG Jidong, et al. Analysis and evaluation on physical characteristics of fine-grained soils prone to mud pumping[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(1): 116
- [14] 潘振华. 沪宁城际铁路路基翻浆原因分析及整治措施研究[J]. 铁道建筑, 2014(3): 74  
PAN Zhenhua. Study of regulation measures and causes for subgrade frost boiling on Shanghai-Nanjing railway[J]. Railway Engineering, 2014(3): 74
- [15] 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, 2014  
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of high speed railway: TB 10621—2014[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2014
- [16] 聂如松, 冷伍明, 张家生, 等. 轨道-路基动力试验系统的研制与应用[J]. 铁道学报, 2016, 38(8): 96  
NIE Rusong, LENG Wuming, ZHANG Jiasheng, et al. Invention and application of train-induced dynamic loading system[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(8): 96
- [17] CHEN R P, WANG H L, HONG P Y, et al. Effects of degree of compaction and fines content of the subgrade bottom layer on moisture migration in the substructure of high-speed railways[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, 232(4): 1197
- [18] 王瀚霖. 高速铁路路基力学性能及水分迁移规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017  
WANG Hanlin. Mechanical characterization and moisture migration of the high-speed railway track-bed[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017
- [19] 徐进. 高速铁路路基模型试验系统研究与动力分析[D]. 长沙: 中南大学, 2012  
XU Jin. Research on model test system of high speed railway subgrade and dynamics analysis[D]. Changsha: Central South University, 2008
- [20] 刘文劫, 梅慧浩, 冷伍明, 等. 路基基床动应力响应特征的数值模拟研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(12): 108  
LIU Wenjie, MEI Huihao, LENG Wuming, et al. Numerical analysis of dynamic stress response characteristics of subgrade bed[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(12): 108
- [21] 王建新, 王恩志, 王思敬. 降雨自由入渗阶段试验研究及其过程的水势描述[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(12): 1920  
WANG Jianxin, WANG Enzhi, WANG Sijing. Potential description of rainfall free infiltration phase[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(12): 1920
- [22] 王广领. 基床表层级配碎石细颗粒冲洗技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2017  
WANG Guangling. Research on fine particle flushing technology of grade crushed stone in subgrade surface layer[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2017
- [23] 张云根. 高速铁路基床填料物理力学特性试验分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2008  
ZHANG Yungen. Physical and mechanical characteristics experimental analysis on subgrade fillers of high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008