

# 重载列车荷载作用下路基夹层现象的分析\*

丁瑜<sup>1,2</sup>, 贾羽<sup>3</sup>, 王暄<sup>3,4</sup>, 宗钟凌<sup>1,2</sup>, 张家生<sup>3,4</sup>

- 江苏海洋大学土木与港海工程学院, 江苏连云港 222002
- 江苏省海洋工程基础设施智能建造工程研究中心, 江苏连云港 222002
- 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410083
- 高速铁路建造技术国家工程研究中心, 湖南长沙 410083

**摘要:** 重载列车荷载作用下路基夹层、道砟囊、翻浆冒泥等路基病害频发, 严重影响了列车的安全运行。为分析重载列车荷载作用下路基夹层现象, 采用自制试样筒对路基土(粉质黏土)和道砟进行循环加载试验, 分析重载列车荷载作用下试样变形特性及路基夹层的产生与发展过程; 进而提出路基夹层的两个主要表征指标, 即路基夹层厚度和细颗粒迁移质量。结果表明: 1) 重载列车荷载作用下, 试样的轴向变形呈非线性增大的趋势; 路基夹层在加载初期较为明显, 加载后期路基夹层的变化不明显。2) 采用路基夹层厚度及细颗粒迁移质量这两个指标对路基夹层特性进行表征, 路基夹层厚度、细颗粒迁移质量与路基土体初始干密度近似呈线性负相关关系, 与循环荷载幅值近似呈线性正相关关系, 而加载频率对路基夹层厚度和细颗粒迁移质量的影响相对较小。

**关键词:** 重载列车; 路基夹层; 轴向变形; 路基夹层厚度; 细颗粒迁移质量

**中图分类号:** TU41 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)02-0059-08

## The phenomenon of subgrade interlayer under heavy-haul train load

DING Yu<sup>1,2</sup>, JIA Yu<sup>3</sup>, WANG Xuan<sup>3,4</sup>, ZONG Zhongling<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiasheng<sup>3,4</sup>

- School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222002, China
- Jiangsu Ocean Engineering Research Center for Intelligent Infrastructure Construction, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222002, China
- School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
- National Engineering Research Center of High-Speed Railway Construction Technology, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract:** Problems of subgrade interlayer, ballast pockets, and mud pumping frequently occur under heavy-haul train loads, which seriously affect the safe operation of trains. To investigate the phenomenon of subgrade interlayer under heavy-haul train load, the cyclic loading tests of subgrade soil (silty clay) and ballast were carried out by a self-developed test apparatus, the deformation characteristics of the sample and the development of subgrade interlayer under the heavy-haul train load were analyzed. Furthermore, two characterizing indexes of subgrade interlayer, thickness of subgrade interlayer and migration quality of fine particles, were proposed. The results show that: 1) the axial deformation of the sample increases nonlinearly with the increase of loading times under heavy-haul load. The development of subgrade interlayer is obvious in the initial stage of loading, but not noticeable in the later

\* 收稿日期: 2023-03-20

录用日期: 2023-08-29

网络首发日期: 2023-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(51978674); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(L2022G002);  
江苏省高等学校大学生创新创业训练计划(202311641122Y)

作者简介: 丁瑜(1990年生), 女; 研究方向: 铁路路基病害致灾机理及其防治; E-mail: dingyu@jou.edu.cn

通信作者: 贾羽(1990年生), 男; 研究方向: 铁路路基病害; E-mail: jia\_yu@csu.edu.cn

stage of loading. 2) The thickness of the subgrade interlayer and the migration quality of fine particles can be used to characterize the features of the subgrade interlayer. The thickness of the subgrade interlayer and migration quality of fine particles are negatively correlated with the initial dry density of subgrade soil, and positively correlated with cyclic loading amplitude. The influence of loading frequency on the thickness of the subgrade interlayer and the migration quality of fine particles is relatively small.

**Key words:** heavy-haul railway; subgrade interlayer; axial deformation; thickness of subgrade interlayer; migration quality of fine particles

随着我国经济的快速发展,各地区资源需求量日益增大,大轴重、长编组重载铁路已成为我国铁路货运发展的趋势,也是参与国际竞争的重要领域之一。截至2019年底,我国重载铁路线路里程达到约10 000 km,占我国铁路线路总里程的9.6%(邓立红,2020)。重载列车轴重的提高增强了列车与轨道间的相互作用,增大了路基不同深度处的动应力,由此引发的路基夹层、道砟囊、翻浆冒泥、路基下沉等病害日益严重,严重影响了列车的安全运行(Fortunato et al., 2010; Hussaini et al., 2016; Lamas-Lopez et al., 2016)。

Trinh et al. (2012) 针对法国里昂西北部的老铁路线路病害调查发现,诸多铁路路基都存在道砟与路基土体混合的过渡层,也被称为路基夹层。路基夹层是由道砟层和路基土体相互渗透产生的,并且现有研究表明,路基夹层对路基整体性能起到重要作用(Duong et al., 2014a)。Duong et al. (2013) 采用三轴试验分析了细颗粒含量和含水率对路基夹层力学特性的影响,结果表明:在干燥条件下,路基夹层中细颗粒含量对其抗剪强度影响不显著,但在近饱和条件下,抗剪强度参数随着细颗粒含量的增加显著降低。干燥条件下,细颗粒含量的增加使试样轴向变形减小,而在近饱和条件下,细颗粒含量越高试样的轴向变形越大。Cui et al. (2013) 分析了脏污道砟的水力学特性,发现:随着吸力的增大,道砟的渗透系数逐渐减小,而脏污含量对其渗透系数的影响较小;含水率对道砟的力学特性有显著的影响,主要表现为:随着含水率的增加试样的抗剪强度下降、永久变形增加。2014年, Duong et al. (2014a; 2014b) 开发了一个物理模型,系统分析了列车荷载作用下路基夹层现象,认为,列车荷载作用下饱和路基内产生超孔隙水压力,导致有效应力的降低,道砟在外荷载作用下渗透进入路基层形成路基夹层。丁瑜等(2022)在进行路基翻浆冒泥特性的试验研究中发现,路基翻浆冒泥与路基夹层总是同时发

生的,并且路基夹层的产生与发展加剧了路基翻浆冒泥的程度。李亚峰等(2023)针对有砟轨道出现的道砟嵌入现象开展了动三轴试验,分析了不同动应力和路基含水率条件下的道砟嵌入特性,并提出定量表征道砟嵌入程度的指标。然而,现有研究多是针对路基夹层或道砟脏污形成后对其力学特性及水力学特性的影响,关于路基夹层的产生与发展过程及路基夹层的表征指标等方面的研究相对较少。

本文通过自制的试样筒对路基土(粉质黏土)和道砟进行循环加载试验,分析试验过程中试样的轴向变形特性及路基夹层的产生与发展过程;进而提出路基夹层的两个主要表征指标(路基夹层厚度和细颗粒迁移质量),并分析了路基土体初始干密度、循环荷载幅值及加载频率等因素对这两个表征指标的影响。

## 1 试验材料及试验方法

### 1.1 试验材料

**1.1.1 道砟** 道砟采用如图1(a)所示的轧制砂岩碎石,大部分颗粒棱角分明。碎石的颗粒相对密度为2.69,最大干密度为2.08 g/cm<sup>3</sup>。道砟的主要矿物成分为石英(约39.5%)、钠长石(约16.6%)、伊利石(约26.3%)、斜绿泥石(约16.7%)等。

原状道砟的颗粒级配曲线如图1(b)所示,试验过程中考虑试验设备尺寸的限制,采用类比修正法(Indraratna et al., 1993; 王瀚霖, 2017)对原状道砟进行缩尺处理,缩尺后道砟级配曲线如图1(b)所示,道砟颗粒的最大粒径为31.5 mm(小于试样直径的1/5),满足试验设备尺寸的要求。研究表明,类比材料可以在力学性能研究方面代表原状材料(Indraratna et al., 1993; 王瀚霖, 2017)。

**1.1.2 路基土** 路基土体为粉质黏土,如图2(a)所示。依据《铁路工程土工试验规程:TB10102-2010》(2010)对该粉质黏土进行了颗粒密度试验、颗粒分析试验、界限含水率试验、击实试验等,

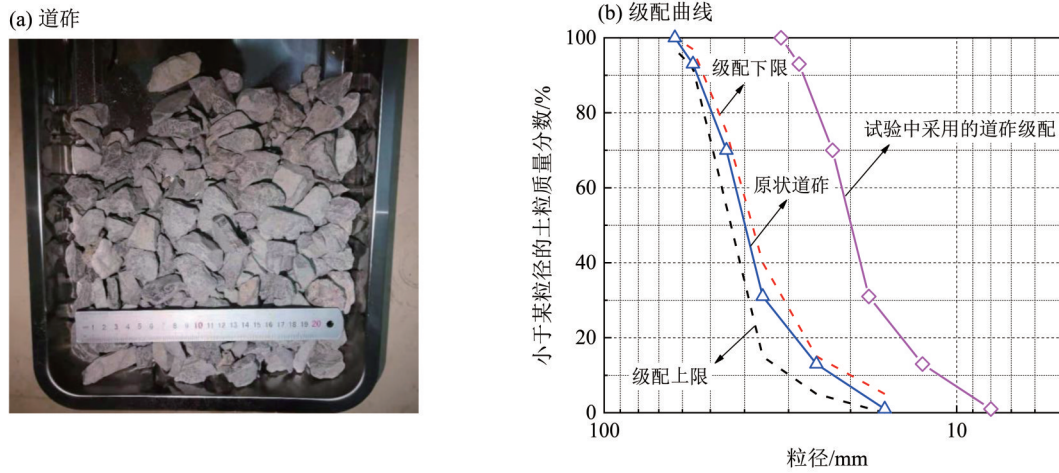


图 1 道砟及其颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves for ballast

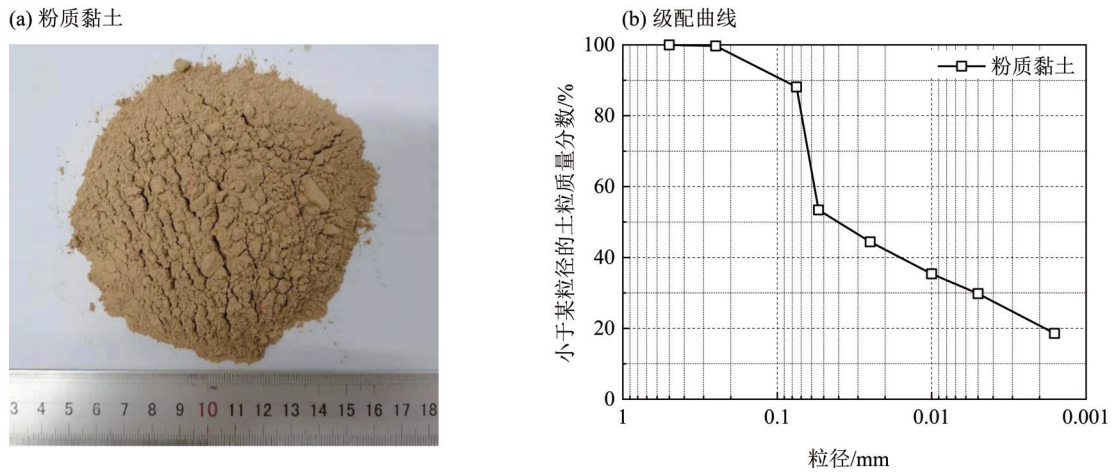


图 2 粉质黏土及其颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle size distribution curves for silty clay

粉质黏土的基本物理力学参数如表 1 所示, 可知该粉质黏土属于低液限粉质黏土, 其颗粒级配曲线如图 2(b) 所示。由图 3 该粉质黏土的击实曲线可知, 其最大干密度为  $1.81 \text{ g/cm}^3$ 、最优含水率为 14.73%。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 试验仪器** 试验采用如图 4(a) 所示的自制透明试样筒, 该试样筒配合轴向加载装置, 可以对路基土和道砟进行循环加载试验, 以研究列车荷载作用下路基夹层的产生与发展。在试验中, 需要对路基土体进行饱和处理, 因此要配置一个

试样饱和器, 如图 4(b) 所示, 利用该饱和器可以对试样进行抽真空饱和和处理。

**1.2.2 试样制备** 试样的尺寸(直径×高)为  $178 \text{ mm} \times 380 \text{ mm}$ , 试样下部装填粉质黏土, 高度为  $250 \text{ mm}$ , 采用分层湿夯法进行制样, 共分为 5 层, 每一层的厚度为  $50 \text{ mm}$ ; 试样的含水率约为 14.73%。夯实过程中尽量控制每一层落锤的高度基本一致, 夯实的次数基本相同。在进行下一层土体装填之前, 应将上一层已经夯实的土体表面刮毛, 以保证试样各层间的良好接触。

试样上部装填道砟, 道砟分为 3 层进行装填,

表 1 粉质黏土物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties for silty clay

颗粒相对密度 $G_s$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	塑性指数 $I_P/\%$	最大干密度 $\rho_{d,max}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最优含水率 $\omega_{opt}/\%$
2.64	33.42	16.64	16.78	1.81	14.73

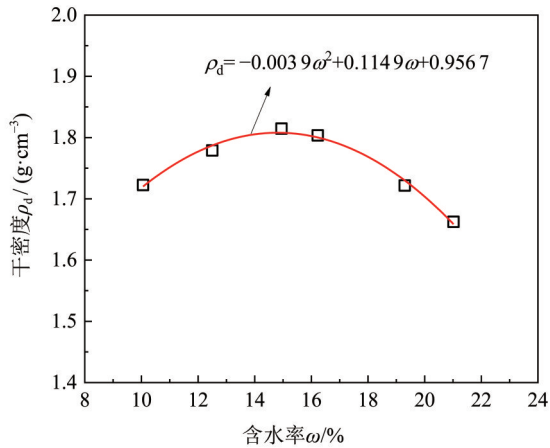


图3 粉质黏土的击实曲线

Fig. 3 Compaction curve of silty clay

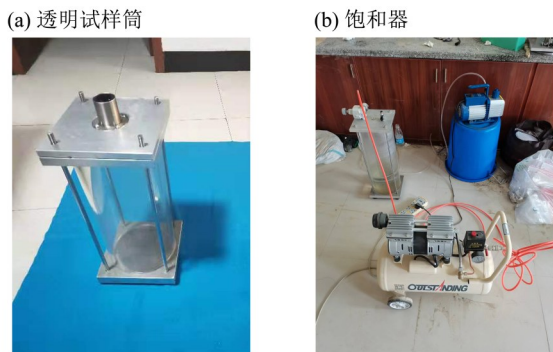


图4 试验仪器

Fig. 4 Test apparatus

下面两层的厚度为 50 mm，最上面一层的厚度为 30 mm。每层夯实过程中同样控制落锤的高度基本一致，夯实的次数基本相同。参照《重载铁路设计规范：TB 10625—2017》(2017)，重车线道床密实度不应小于  $1.70 \text{ g/cm}^3$ ，试样制备过程中控制道砟的密实度约为  $1.75 \text{ g/cm}^3$ 。道砟压实过程中仅在路基土表面形成较浅的压痕，与动荷载施加阶段产生的夹层厚度相比可以忽略。

试样制备完成后需要对路基土进行饱和和处理，首先利用真空泵对试样进行抽真空处理，可以去除试样孔隙内存留的空气；随后将试样筒下部的进水阀门打开使水缓慢流入试样内，待水面高于路基土表面约 10 mm 时，关闭进水阀门。将试样静置 24~120 h 后开始施加荷载。前期对试样(每个试样取 3 处样品)进行含水率测定，结果表明：初始干密度为  $1.40 \text{ g/cm}^3$  的路基土体平均含水率为 30.61%，其饱和度基本能大于 0.90；而对于初始干密度为  $1.50 \text{ g/cm}^3$  和  $1.59 \text{ g/cm}^3$  的路基土体平均含水率分别为 28.62% 和 28.12%，其饱和度能够达到约 0.85(表 2)。

表 2 粉质黏土试样含水率

Table 2 Test results of moisture content of the silty clays %

试样初始干密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	样品 1	样品 2	样品 3	平均值
1.40	30.50	29.86	31.35	30.61
1.50	28.41	28.10	29.34	28.62
1.59	27.80	28.32	28.25	28.12

1.2.3 试验方案 依据列车荷载特性，选取如图 5 所示的正弦波荷载进行模拟(丁瑜等, 2019; Ding et al., 2022)。在正弦波荷载施加前，对试样施加 40 kPa 轴向静荷载，以模拟轨道结构重力对道砟及路基土体的影响(Bian et al., 2016)。静荷载施加后，待孔隙水压力基本稳定后，对试样施加正弦波荷载。

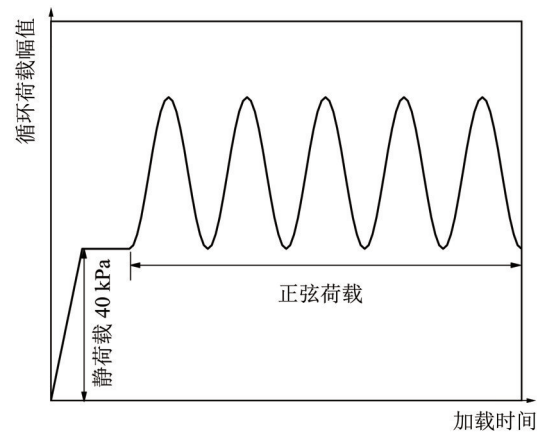


图5 加载方式

Fig. 5 Loading method

列车荷载作用在轨道上的动应力幅值与列车轴重、列车运行速度、列车长度、车辆定距等多个因素相关。依据大秦线现场测试结果，重载列车荷载作用下基床表层最大动应力幅值不超过 180 kPa(杨志浩, 2015)。因此，本试验选取的循环荷载幅值分别为 50、100 和 200 kPa。

荷载频率与列车运行速度和列车轴距等因素有关，列车运行速度在 0~100 km/h 对应的荷载频率约为 0~14 Hz (Sun et al., 2016)。本试验采用的荷载频率分别为 1、5 和 10 Hz。

路基土体的初始干密度分别为  $1.40 \text{ g/cm}^3$  (初始孔隙比  $e_0=0.89$ )， $1.50 \text{ g/cm}^3$  (初始孔隙比  $e_0=0.63\sim 0.76$ ) 和  $1.59 \text{ g/cm}^3$  (初始孔隙比  $e_0=0.53\sim 0.66$ )。

试验过程中路基土体处于饱和状态，道砟处于非饱和状态，列车荷载施加时关闭所有排水阀门，

只允许路基土内部的水沿着道砟孔隙向上排出。

试验过程中需要间隔一定时间观察路基夹层的产生与发展, 测定路基夹层的厚度。

试验结束的标准: 达到设定的循环荷载次数(50 000次)或试样总轴向应变达到5%。具体试验方案见表3。

表3 粉质黏土试样的试验方案  
Table 3 Testing programs of the silty clays

试验编号	初始干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	循环荷载 幅值/kPa	荷载频率/ Hz
S-1.40-50-5	1.40	50	5
S-1.40-100-1	1.40	100	1
S-1.40-100-5	1.40	100	5
S-1.40-100-10	1.40	100	10
S-1.40-200-5	1.40	200	5
S-1.50-100-5	1.50	100	5
S-1.59-100-5	1.59	100	5

## 2 结果与分析

### 2.1 试样轴向变形

图6~8所示分别为路基土初始干密度、循环荷载幅值及加载频率对试样轴向变形(循环荷载阶段)的影响, 由图可知: 循环荷载作用下试样的轴向变形可以划分为2个阶段: 当加载次数<1 000次时, 轴向变形随加载次数的增加呈线性迅速增大, 此时试样产生的轴向变形占试样总轴向变形的65%~95%; 当加载次数>1 000次时, 轴向变形随加载次数的增加非线性增大, 且增大的速率逐渐减小, 直至试验结束, 试样的轴向变形仍没有达到稳定值。结合图9和图10分析, 试样轴向变形主要源于两方面: ① 循环荷载作用下道砟下陷进入软弱路基层内形成了路基夹层, 并且路基夹层引起的试样轴向变形占试样总变形的54%~90%; ② 道砟及路基土自身的压缩变形。

由图6可知, 路基土体初始干密度对试样轴向变形具有显著影响: 随着路基土体初始干密度的增加, 试样产生的轴向变形逐渐减小。究其原因: 路基土体的初始干密度越大, 其内部结构越紧密, 外荷载作用下路基夹层的厚度越小, 路基自身的压缩变形也越小。

图7显示, 循环荷载幅值对试样的轴向变形也具有显著影响, 随着循环荷载幅值的增加, 试样产生的轴向变形逐渐增大。这是因为, 较大的循

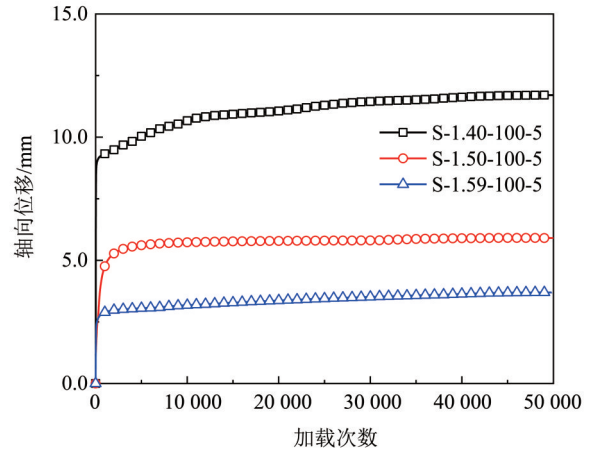


图6 初始干密度对轴向位移的影响

Fig. 6 Influence of initial dry density on axial displacement

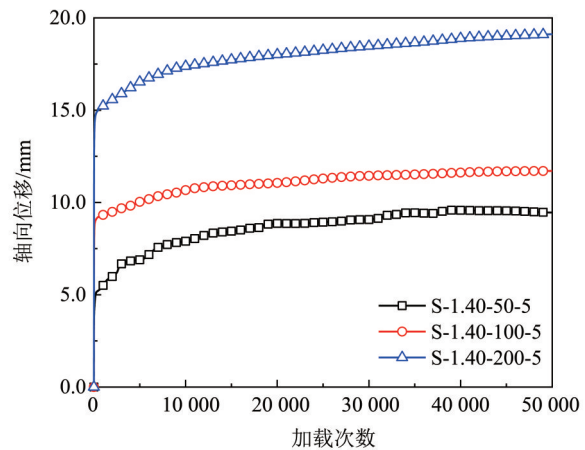


图7 循环荷载幅值对轴向位移的影响

Fig. 7 Influence of loading amplitude on axial displacement

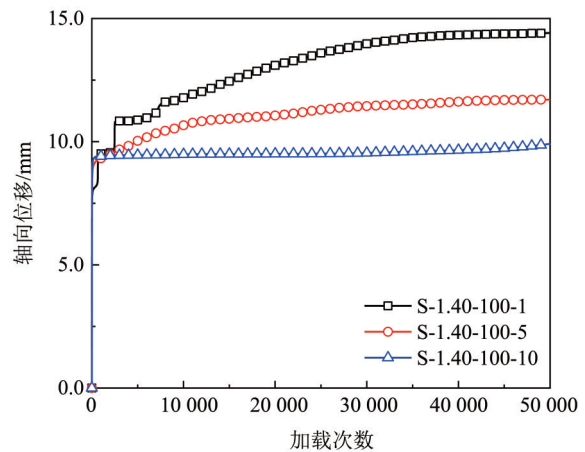


图8 加载频率对轴向位移的影响

Fig. 8 Influence of loading frequency on axial displacement

环荷载使得路基产生的夹层厚度也较大, 并且道砟和路基土体自身的压缩变形也相应增大。

由图8可知, 随着加载频率的增加, 试样的轴向变形逐渐减小。这是因为频率越大, 荷载加载、

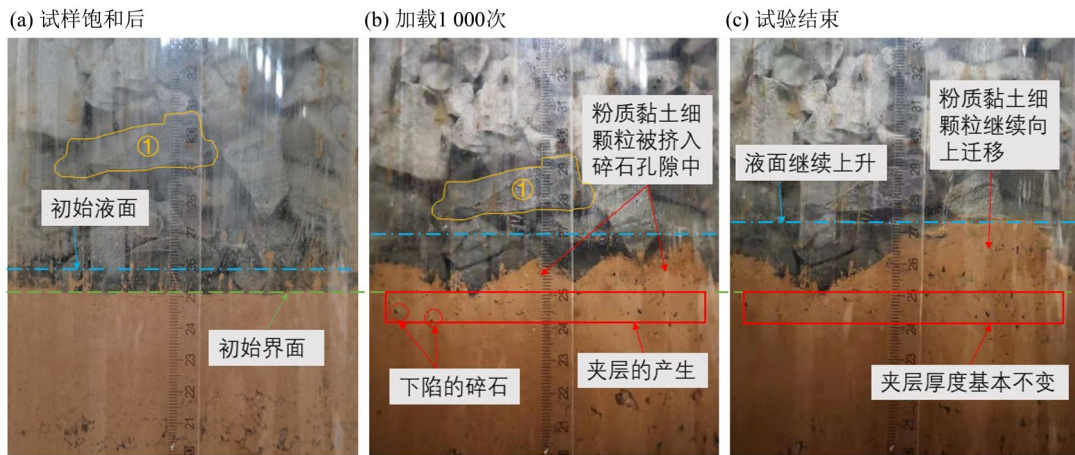


图9 试样S-1.40-100-5夹层的产生与发展

Fig. 9 Generation and development of an interlayer in sample S-1.40-100-5

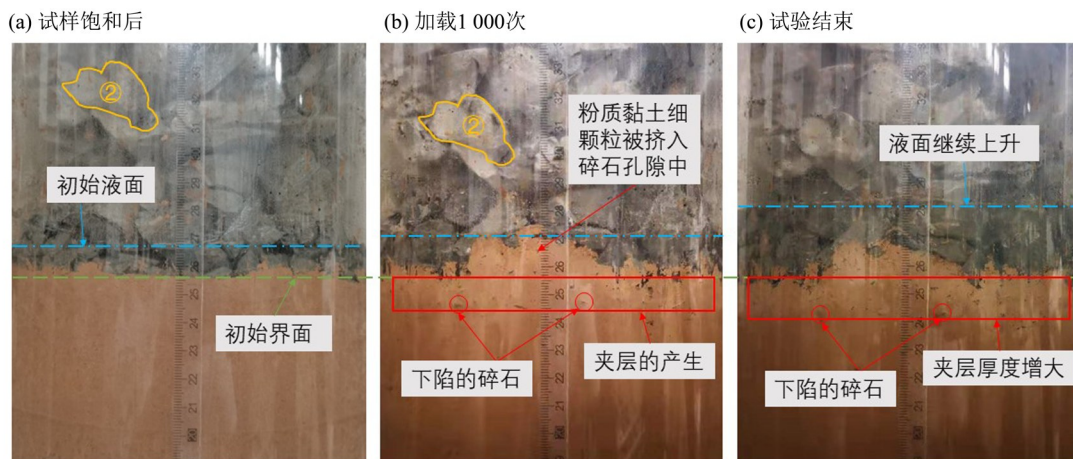


图10 试样S-1.40-200-5夹层的产生与发展

Fig. 10 Generation and development of an interlayer in sample S-1.40-200-5

卸载的速度越快, 相同加载次数试样受荷的时间就越短, 因此, 试样变形的发展不充分, 相应的轴向变形越小。

## 2.2 路基夹层的产生与发展

图9和图10所示分别为试样S-1.40-100-5和S-1.40-200-5在试验过程中路基夹层的产生与发展过程。由图9和图10可知, 试样在饱和完成后, 路基土与道砟之间存在明显的分界线, 不存在道砟下陷进入路基土体内部(即路基夹层)的现象。当对试样施加循环荷载后, 在外荷载的冲击下部分道砟下陷进入路基土体内部, 产生路基夹层。并且, 在循环荷载初期, 夹层厚度的变化较为明显, 如加载至1000次, 试样S-1.40-100-5夹层厚度约为10 mm, 试样S-1.40-200-5夹层厚度约为11 mm。随着循环荷载的继续施加, 部分道砟继续下陷, 夹层的厚度缓慢增加(试验结束后S-1.40-200-5路基夹层的厚度约为14 mm)或保

持不变(S-1.40-100-5路基夹层的厚度基本保持不变), 直至试验结束。

## 2.3 路基夹层的表征指标

路基夹层特性可以采用路基夹层厚度( $h$ )及细颗粒迁移质量( $m$ )两个指标来进行表征。路基夹层厚度的测量方法为: 以试样饱和后的路基土和道砟的分界面为基准, 在试验结束后, 测量道砟下陷进入路基土的最大深度, 即为 $h$ 。细颗粒迁移质量的测量方法为: 试验结束后, 将夹层内的道砟连同道砟颗粒上黏附的路基土体一起取出后, 烘干后称取质量, 然后将黏附在道砟颗粒上路基土体清洗干净, 再次烘干称取质量, 两次质量之差即为 $m$ 。

表4为每组试样在试验结束后路基夹层厚度( $h$ )及细颗粒迁移质量( $m$ )。图11~13分别为路基土初始干密度、循环荷载幅值和加载频率几个因素对 $h$ 和 $m$ 的影响。从图11~13可以看出: ①  $h$ ,  $m$

表4 试验结束后路基夹层厚度及细颗粒迁移质量  
Table 4 Thickness of subgrade interlayer and migration quality of fine particles after the test

试验编号	$h/\text{mm}$	$m/\text{g}$
S-1. 40-50-5	7.0	231.0
S-1. 40-100-1	12.0	428.0
S-1. 40-100-5	10.0	420.7
S-1. 40-100-10	9.0	415.1
S-1. 40-200-5	14.0	498.5
S-1. 50-100-5	5.0	163.4
S-1. 59-100-5	2.0	110.0

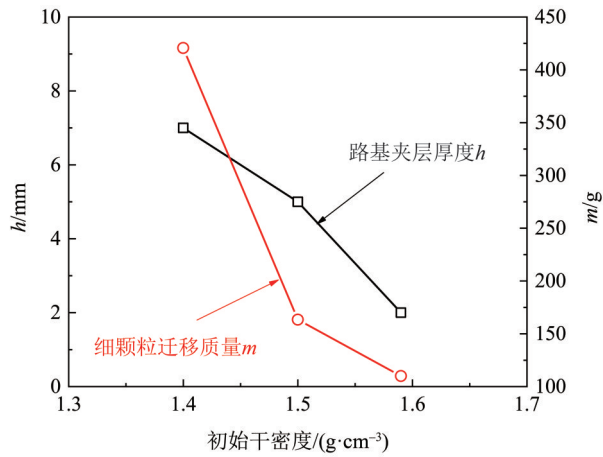


图11 初始干密度对路基夹层厚度及细颗粒迁移质量的影响  
Fig. 11 Influence of initial dry density on thickness of subgrade interlayer and migration quality of fine particles

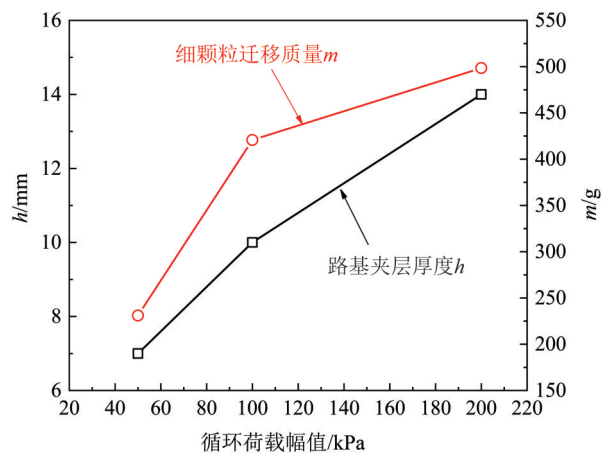


图12 循环荷载幅值对路基夹层厚度( $h$ )及细颗粒迁移质量( $m$ )的影响

Fig. 12 Influence of loading amplitude on thickness of subgrade interlayer and migration quality of fine particles

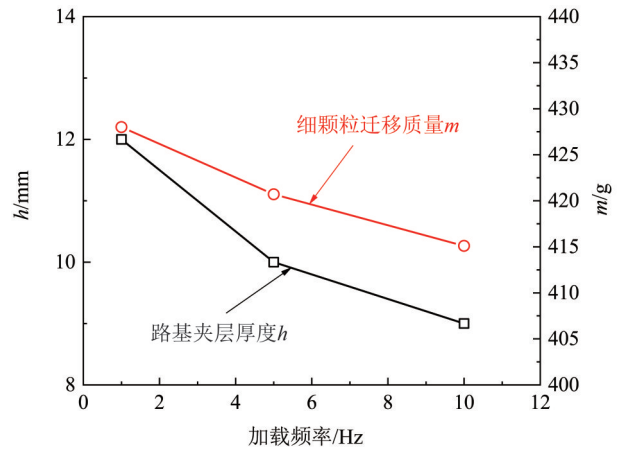


图13 加载频率对路基夹层厚度及细颗粒迁移质量的影响  
Fig. 13 Influence of loading frequency on thickness of subgrade interlayer and migration quality of fine particles

均与路基土体初始干密度近似呈线性负相关关系, 即随着路基土体初始干密度的增加, 路基夹层厚度及细颗粒迁移质量均减小。原因为: 随着路基土体初始干密度的增加, 路基土体结构更加紧密, 在循环荷载的作用下不易产生路基夹层, 路基土体细颗粒迁移的程度也逐渐降低。② 路基夹层厚度、细颗粒迁移质量与循环荷载幅值近似呈线性正相关关系, 即随着循环荷载幅值的增加, 路基夹层厚度及细颗粒迁移质量也逐渐增大。③ 加载频率对路基夹层厚度和细颗粒迁移质量的影响相对较小, 随着加载频率的增加, 路基夹层厚度和细颗粒迁移质量有轻微减少。

### 3 结论

本文利用自制的试样筒对路基土(粉质黏土)和道砟进行循环加载试验, 分析了重载列车荷载作用下路基夹层的产生与发展过程, 得出如下主要结论:

1) 循环荷载作用下, 试样的轴向变形先迅速增大后缓慢增大, 试样轴向变形主要来源于两方面, 即路基夹层的产生、道砟及路基土体自身的压缩变形。随着路基土体初始干密度的增加, 试样产生的轴向变形逐渐减小; 随着循环荷载幅值的增加, 试样产生的轴向变形逐渐增大; 随着加载频率的增加, 试样的轴向变形逐渐减小。

2) 在外荷载冲击下道砟下陷进入路基土体内部, 并将部分路基土体挤入道砟层孔隙中, 产生路基夹层; 循环荷载施加初期, 路基夹层的厚度

显著增大,随着循环荷载的施加,路基夹层的厚度缓慢增加或保持不变。

3) 采用路基夹层厚度  $h$  及细颗粒迁移质量  $m$  这两个指标对路基夹层特性进行表征,  $h$ 、 $m$  与路

基土体初始干密度近似呈线性负相关关系,与循环荷载幅值近似呈线性正相关关系,而加载频率对  $h$  和  $m$  的影响相对较小。

#### 参考文献:

- 邓立红,2020.我国重载铁路运输通道发展研究[J].中国铁路,(8):70-75.
- 丁瑜,陈晓斌,张家生,等,2019.风化红砂岩残积土路基瞬态饱和区动态水压力特征试验研究[J].岩土力学,40(12):4740-4750.
- 丁瑜,贾羽,王晖,等,2022.颗粒级配及初始干密度对路基翻浆冒泥特性的影响[J].岩土力学,43(9):2539-2549.
- 李亚峰,聂如松,冷伍明,等,2023.列车动荷载作用下有砟轨道道砟嵌入现象研究[J].中南大学学报(自然科学版),54(1):197-208.
- 中华人民共和国铁道部,2010.铁路工程土工试验规程:TB10102-2010[S].北京:中国铁道出版社.
- 中华人民共和国交通运输部,2017.重载铁路设计规范:TB10625-2017[S].北京:中国铁道出版社.
- 王瀚霖,2017.高速铁路路基力学性能及水分运移规律研究[D].杭州:浙江大学.
- 杨志浩,2015.重载铁路翻浆冒泥病害机理研究[D].石家庄:石家庄铁道大学.
- BIAN X C, JIANG J Q, JIN W F, et al, 2016. Cyclic and postcyclic triaxial testing of ballast and subballast[J]. J Mater Civ Eng, 28(7): 04016032.
- CUI Y J, DUONG T V, TANG A M, et al, 2013. Investigation of the hydro-mechanical behaviour of fouled ballast[J]. J Zhejiang Univ-Sci A (Appl Phys Eng), 14(4): 244-255.
- DING Y, JIA Y, WANG X, et al, 2022. The influence of geotextile on the characteristics of railway subgrade mud pumping under cyclic loading[J]. Transp Geotech, 37: 100831.
- DUONG T V, CUI Y J, TANG A M, et al, 2014a. Investigating the mud pumping and interlayer creation phenomena in railway sub-structure[J]. Eng Geol, 171: 45-58.
- DUONG T V, CUI Y J, TANG A M, et al, 2014b. Physical model for studying the migration of fine particles in the railway substructure [J]. Geotech Test J, 37 (5) : 20130145.
- DUONG T V, TANG A M, CUI Y J, et al, 2013. Effects of fines and water contents on the mechanical behavior of interlayer soil in ancient railway sub-structure [J]. Soils Found, 53(6): 868-878.
- FORTUNATO E, PINELO A, FERNANDES M M, 2010. Characterization of the fouled ballast layer in the substructure of a 19th century railway track under renewal [J]. Soils Found, 50(1): 55-62.
- HUSSAINI S K K, INDRARATNA B, VINOD J S, 2016. A laboratory investigation to assess the functioning of railway ballast with and without geogrids [J]. Transp Geotech, 6: 45-54.
- INDRARATNA B, WIJEWARDENA L S S, BALASUBRAMANIAM A S, 1993. Large-scale triaxial testing of grey-wacke rockfill[J]. Géotechnique, 43(1): 37-51.
- LAMAS-LOPEZ F, CUI Y J, D'AGUIAR S C, et al, 2016. Geotechnical auscultation of a French conventional railway track-bed for maintenance purposes [J]. Soils Found, 56(2): 240-250.
- SUN Q D, INDRARATNA B, NIMBALKAR S, 2016. Deformation and degradation mechanisms of railway ballast under high frequency cyclic loading[J] J Geotech Geoenviron Eng, 142(1):04015056.
- TRINH V N, TANG A M, DUPLA J C, et al, 2012. Mechanical characterisation of the fouled ballast in ancient railway track substructure by large-scale triaxial tests [J]. Soils Found, 52(3):511-523.

(责任编辑 秦社彩)