

DOI: 10.11779/CJGE202208005

# 有砟轨道路基翻浆冒泥模型试验系统的研发与应用

韩博文<sup>1,2</sup>, 蔡国庆<sup>1,2</sup>, 李 舰<sup>1,2</sup>, 张国光<sup>3</sup>, 赵成刚<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044;  
3. 中国铁路济南局集团有限公司, 山东 济南 250000)

**摘要:** 为研究既有有线有砟轨道路基的翻浆冒泥机理, 自主研发了一套能够模拟循环荷载-湿化耦合作用的模型试验系统。模型试样直径 500 mm, 由厚度分别为 350 mm 的路基土和 200 mm 的道砟组成, 整个试样在高强度透明有机玻璃模型筒中制备完成。模型试验系统配备有监测荷载、位移、体积含水率和孔隙水压力的 4 种传感器, 并通过高清相机对颗粒迁移过程进行图像捕捉。基于所研发的试验系统, 针对辛泰铁路典型翻浆冒泥病害路段土样, 开展翻浆冒泥模型试验。试验结果表明: 动孔隙水压力是导致翻浆冒泥病害产生的关键因素。随着体积含水率的增加, 动孔隙水压力引起的颗粒迁移量逐渐增加; 在饱和状态下, 会引起大量颗粒迁移, 翻浆冒泥现象显著。试验结束时, 道砟污染指数达到 25%, 在实际工程中已严重影响铁路的正常运营, 有必要对污染道砟进行换填。

**关键词:** 有砟轨道路基; 模型试验; 累积变形; 颗粒迁移; 孔隙水压力; 翻浆冒泥

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)08-1406-10

**作者简介:** 韩博文(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土动力特性方面的研究工作。E-mail: 18115022@bjtu.edu.cn。

## Development and application of model test system for mud pumping in ballasted track subgrade

HAN Bo-wen<sup>1,2</sup>, CAI Guo-qing<sup>1,2</sup>, LI Jian<sup>1,2</sup>, ZHANG Guo-guang<sup>3</sup>, ZHAO Cheng-gang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. China Railway Jinan Group Co., Ltd., Jinan 250000, China)

**Abstract:** In order to study the mud pumping mechanism of ballasted track subgrade on the existing lines in China, a physical modelling system which can simulate the cyclic loading-wetting coupling process is developed. The model sample with a diameter of 500 mm is composed of 350 mm-thick subgrade soil and 200 mm-thick ballast. The whole sample is prepared in a high-strength transparent plexiglass model cylinder. The test system is equipped with four types of sensors to monitor the load, displacement, volumetric water content and pore water pressure, respectively. A high-definition camera is installed to observe the whole test process. The developed test system is used to carry out the mud pumping model tests on the soil samples of typical mud pumping disease sections of railway from Xindian to Taishan. The results show that the dynamic pore water pressure is the key factor for mud pumping. As the volumetric water content increases, the amount of migrated particle caused by dynamic pore water pressure gradually increases. In the saturated state, it will cause a large number of particles to migrate, and the phenomenon of mud pumping is significant. At the end of the tests, the ballast fouling index reaches 25%, which will seriously affect the normal operation of the railway in the actual project. It is necessary to replace the fouled ballast.

**Key words:** ballasted track subgrade; model test; cumulative deformation; particle migration; pore water pressure; mud pumping

## 0 引 言

翻浆冒泥是在列车交通荷载与降雨、地下水位上升等复杂环境影响下, 路基内部产生超静孔隙水压力引发细颗粒填料迁移, 向外翻冒而形成的一种典型路基病害, 长久以来, 对铁路安全运营造成了巨大威胁。

近年来, 中国铁路建设不断向高速化和重载化方向发

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52078031, U2034204); 北京市自然科学基金面上项目(8202038); 中央高校基本科研业务费项目(2021JBM111, 2021CZ109)

**收稿日期:** 2021-09-24

\*通信作者 (E-mail: guoqing.cai@bjtu.edu.cn)

展, 虽然铁路结构设计不断优化, 路基填料标准不断提高, 但翻浆冒泥病害仍时有发生, 在既有有线有砟轨道路基中尤为显著, 即使是高速无砟铁路也同样存在翻浆冒泥病害<sup>[1]</sup>。因此, 正确认识翻浆冒泥过程中颗粒迁移规律, 全面揭示翻浆冒泥机理, 对于保障铁路正常运营至关重要。

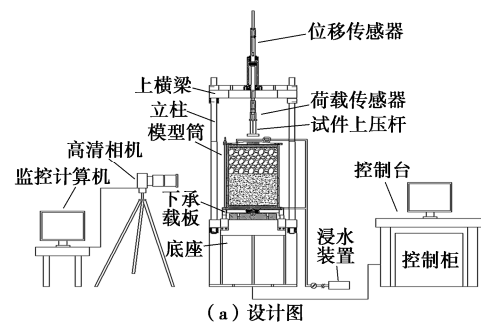
国内外诸多学者对路基翻浆冒泥及土体颗粒迁移开展了研究, Kamruzzaman 等<sup>[2]</sup>利用其研发的循环过滤试验装置<sup>[3]</sup>, 从浊度、渗透系数、沉降变形及颗粒分布等方面入手, 研究了动荷载作用下饱和细颗粒填料在底砟层(过滤材料)中的迁移特性(过滤特性), 给出了底砟的设计标准。Israr 等<sup>[4]</sup>也进行了类似研究, 对动荷载作用下饱和粗颗粒填料内部颗粒的迁移规律、渗透特性和孔压发展规律进行了研究。Duong 等<sup>[5-6]</sup>针对法国既有有线铁路翻浆冒泥问题开展了模型试验研究, 分析了循环荷载作用下非饱和与饱和试样的颗粒迁移规律及变形特性, 认为在较高饱和度下试样内部颗粒迁移现象显著, 而在较低饱和度下则无明显变化。Chawla 等<sup>[7]</sup>通过开展路基模型试验, 研究了土工合成材料对于暴雨后翻浆冒泥病害的抑制作用, 研究发现, 铺设土工合成材料可抑制路基内部的颗粒迁移, 使得路基的沉降变形减小。丁瑜等<sup>[8]</sup>开展了动三轴试验, 对不同细颗粒含量的饱和风化红砂岩残积土路基填料试样的动孔压变化规律进行研究, 分析了动孔压对路基内部颗粒迁移规律的影响, 研究发现, 在细颗粒含量小于 25% 时, 动孔压随细颗粒含量的增加而增大, 反之则规律相反, 并由此建立了考虑细颗粒含量影响的动孔压经验模型。张升等<sup>[9]</sup>对饱和砂-粉土混合材料在动荷载作用下的颗粒迁移机制进行了模型试验研究, 通过对孔隙水压力的测量发现, 孔隙压力梯度会引起细颗粒的集聚和迁移, 在浅层区颗粒迁移现象较为明显, 颗粒越细小, 迁移现象越显著。针对翻浆冒泥病害引发的路基填料的污染, 一些学者还利用探地雷达<sup>[10-14]</sup>对不同污染程度的现场路基或模型路基进行探测分析, 建立了雷达探测图像与内部填料污染程度的关系。此外, 还有学者针对静荷载作用下渗透过程中的颗粒迁移问题进行了研究, 包括颗粒迁移引起的过滤材料稳定性<sup>[15]</sup>、颗粒迁移引起的土壤侵蚀问题<sup>[16-19]</sup>、多孔介质中的颗粒迁移机制<sup>[20-22]</sup>等。

铁路路基的翻浆冒泥问题的本质, 是路基填料在动荷载-湿化耦合作用下发生的复杂颗粒迁移问题。已有的研究成果一部分是针对静荷载作用下的颗粒迁移问题, 考虑动荷载影响的研究大多针对饱和路基填料, 无法对非饱和状态以及非饱和到饱和动态过程中路基填料的颗粒迁移特性进行分析。此外, 现场原位试验与监测的成本高、可重复性低。因此, 研发新型

室内模型试验装置, 并开展相关试验研究十分必要。本文自主研发了可实现动荷载-湿化耦合作用下非饱和和路基翻浆冒泥颗粒迁移规律测试的新型模型试验装置, 并利用该装置对辛泰铁路典型翻浆冒泥路段路基填料开展了模型试验研究, 分析循环荷载-湿化耦合作用下有砟轨道路基翻浆冒泥颗粒迁移规律, 揭示翻浆冒泥病害机理, 为翻浆冒泥病害整治与铁路工程的安全施工运营提供一定的参考。

## 1 试验系统组成

翻浆冒泥模型试验系统主要由主机、模型筒、液压伺服加载系统、浸水装置、监测采集装置、辅助装置组成。图 1 为模型试验系统设计图与实物图。试验系统的基本工作流程为: 通过液压伺服加载系统对模型筒内试样施加循环荷载, 结合浸水装置对试样实时浸水以模拟列车交通荷载-降雨湿化耦合作用, 通过监测装置对试验过程中的关键试验现象及相关试验指标进行监测, 并通过数据采集装置记录存储试验数据。



(a) 设计图



(b) 实物图

图 1 模型试验系统

Fig. 1 Model test system

### 1.1 主机

主机结构为四立柱结构, 轴向加载作动器安装在

上横梁上方, 上横梁、底座与立柱组成反力架, 用于承受轴向加载油缸的反力。底座上安装有可升降的气动导轨, 升降导轨上升后, 高度与固定导轨平齐, 小车可在两根导轨上自由移动, 模型筒放置在小车上。当小车移动到机架中心后, 升降导轨下降, 小车下平面与承载接触, 小车车轮与导轨分离, 此时即可进行加载试验。试验完成后可将导轨升起, 将小车与模型筒移动到机架一侧。

## 1.2 模型筒

模型筒体(图2)采用高强度透明有机玻璃材质, 便于清晰观测筒体内部试验现象。筒高 600 mm, 内径 500 mm, 壁厚 20 mm。底部采用 O 形密封圈与底座密封, 在筒体上方安装一个压盖, 通过连接螺杆与底座连接, 并把筒体压牢。筒壁两侧对称设置传感器插孔。

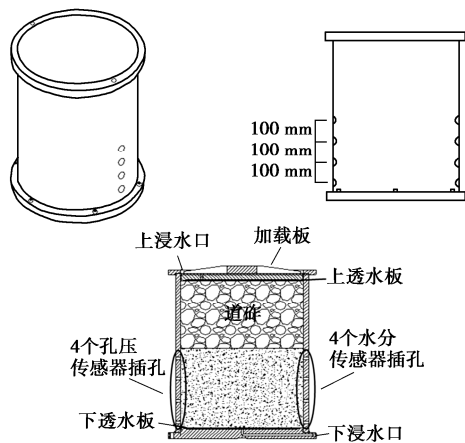


图2 模型筒示意图

Fig. 2 Schematic view of model cylinder

## 1.3 伺服液压加载系统

伺服液压加载系统为整个试验系统提供动力和液压控制功能, 主要由伺服油压作动器、液压站、伺服阀及管路等附件组成。伺服作动器负责对试样施加静、动荷载, 液压站提供动力, 伺服阀将电气控制信号转换为液压控制信号, 使得作动器按控制要求加载。本系统可施加最大轴向静荷载或动荷载幅值为 50 kN, 轴向加载的最大位移为  $\pm 10$  mm, 动荷载加载频率范围为 0~10 Hz, 可施加动荷载波形包括正弦波、三角波、梯形波、锯齿波、随机波及用户自定义波形。

## 1.4 浸水装置

浸水装置由减压阀、导管和透水板组成。减压阀一端与供水管线相连可调节供水压力, 减压阀另一端通过导管与试样相连。试样的顶部和底部均安装有特制透水板, 可实现试样顶部或底部的均匀浸水。透水板由环形槽结构与具有均匀分布小孔的网孔板, 水流通过环形槽的导流作用从外环向中心流动, 再通过小

孔均匀分布到试件的端部。透水板材质为铝合金, 直径 490 mm, 总厚度 55 mm, 质量约 13 kg, 既保证了一定刚度, 使试件受力均匀, 同时质量相较于普通金属更小, 安放、取出更为方便。

## 1.5 监测采集装置

监测采集装置包括高清相机、荷载传感器、位移传感器、水分传感器、自制高量程张力计以及传感器对应的数据采集装置。高清相机采用索尼 ILCI-A7M3 微单相机, 用于捕捉试验过程中的颗粒迁移动态画面, 相机可与笔记本电脑相连, 通过安装配套的 Remote 软件可实现电脑对相机拍摄画面的实时监控。荷载传感器用于测量施加在试样上的荷载大小, 位移传感器用于测量试验过程中试样产生的轴向位移, 水分传感器选用 EC-5 水分传感器, 测量试验过程中试样内部的体积含水率, 自制高量程张力计可同时测量试样在非饱和状态下的基质吸力和饱和状态下的动态孔隙水压力, 量程为  $-450\sim 2000$  kPa。水分传感器与高量程张力计各 4 个对称分布于试样筒两侧, 间距为 100 mm。

张力计在使用前需经历特殊的饱和过程以达到高量程测量。首先将张力计固定在专用的饱和装置中, 使装置内部充满无气水, 然后使用 GDS 压力控制器以 10 kPa/min 的速率施加 0~1950 kPa 的压力。达到目标值后, 稳定 24 h, 并以相同速率卸载至 0 kPa。至此完成预加载饱和阶段。然后重复上述加载和卸载过程 4 次, 达到 1950 kPa 后稳定 1 h。在 4 个循环后完成张力计饱和, 并在最后一个循环中标定张力计。

## 1.6 辅助装置

辅助装置包括重型击实装置和龙门架。由于试样尺寸较大, 传统的试样击实设备无法满足要求, 因此采用重型击实装置进行击实。击实装置底盘直径约 300 mm, 质量约 7.9 kg; 砝码直径约 146 mm, 质量约 10 kg。龙门架用于试样的吊装运输。

本文研发的试验系统具有以下特点: ①可实现循环荷载与浸水湿化耦合作用, 模拟复杂水-力路径下填料的应力-应变关系。②可长期稳定施加周次循环荷载, 准确获取试验所受荷载与产生的变形。仅用一组传感器便可同时测量非饱和和基质吸力与饱和孔隙水压力。③可实时捕捉翻浆冒泥过程中的颗粒迁移特性, 通过直观的高清图像再现翻浆冒泥病害全过程。

本装置在设计研发过程中借鉴了 Duong 等<sup>[5-6]</sup>的设计思路, 在此基础上进行了优化和改进, 最为主要的改进是通过配置网孔板实现试样顶部与底部均匀浸水以模拟循环荷载-湿化耦合作用这一复杂工况。需要说明的是, 本试验重点关注试样的轴向变形演化, 无法考虑水平方向变形的影响。

## 2 翻浆冒泥模型试验

利用所研发的模型试验系统, 对辛泰铁路翻浆冒泥病害典型路段的路基填料进行初步试验研究, 分析翻浆冒泥过程中的颗粒迁移规律, 初步揭示翻浆冒泥产生机理。

### 2.1 试验材料与试样制备

通过现场调研发现, 辛泰铁路存在严重基床翻浆冒泥现象, 如图 3 所示, 严重阻碍列车正常运行。本模型试验所用土样均取自辛泰铁路典型翻浆冒泥路段, 道砟取自铁路现场全新的标准碎石道砟。依据《土工试验方法标准: GB/T 50123—1999》开展了基本物性试验, 图 4 为路基土的颗粒级配曲线, 基本物理参数详见表 1。依据《岩土工程勘察规范 (2009 版): GB50021—2001》可确定试验土样为黏土。依据行业标准《铁路碎石道砟: TB/T 2140—2008》中关于既有有线有砟铁路的道砟级配要求, 配置了本试验所用碎石道砟, 图 5 为道砟颗粒级配曲线。



图 3 辛泰铁路典型翻浆冒泥病害

Fig. 3 Typical mud pumping disease on Xintai railway

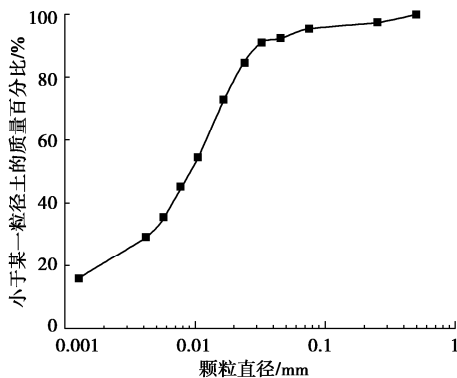


图 4 路基土级配曲线

Fig. 4 Grain-size distribution curve of subgrade soil

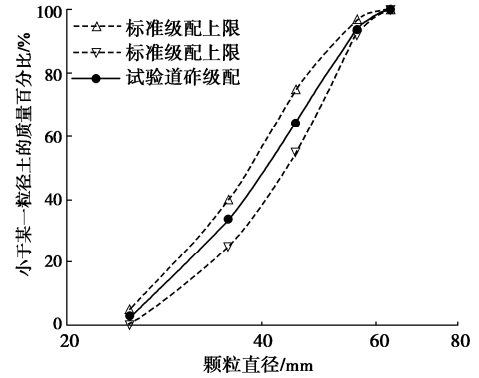


图 5 道砟颗粒级配曲线

Fig. 5 Grain-size distribution curves of ballast

表 1 试验所用土样的基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of soil

颗粒相对质量密度 $G_s$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p$	最优含水率 $w_{op}/\%$	最大干密度 $\gamma_{d,max}/(g \cdot cm^{-3})$
2.73	46.1	22.4	23.7	20.41	1.635

将碾碎土样过 1 mm 筛, 按照目标含水率进行配置并静置 24 h。采用人工击实法并依据目标干密度制备试样, 制备前, 首先在试样筒底部铺设土工布以防止细颗粒流失, 利用自制的击实装置分层击实制备试样。试样直径为 500 mm, 大于 5 倍道砟最大粒径, 可消除尺寸效应影响。试样高度为 550 mm, 分为道砟与细颗粒填料两部分, 上层为 200 mm 道砟层, 下层为 350 mm 细颗粒填料, 水分传感器与高量程张力计均安装在细颗粒填料层中, 击实制样时要配合传感器的安装分层击实。首先, 进行厚度为 15 mm 的首层击实, 安装第一组传感器, 各层传感器间距为 100 mm, 分成厚度 35, 35, 30 mm 三层击实, 直至第 4 组传感器铺设完毕后, 进行厚度为 35 mm 层的击实, 最后在填料上方均匀铺设 200 mm 厚度的道砟。至此, 试样制备完毕。图 6 为制样详细流程与实物图。结合工程现场的实际情况, 本试验土样的含水率为 15%, 干密度为 1.31 g/cm<sup>3</sup>。

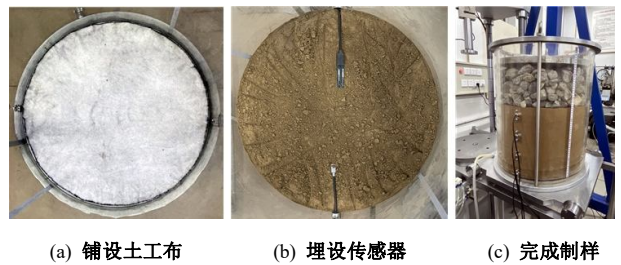


图 6 模型试样制备

Fig. 6 Preparation of model sample

### 2.2 试验方案

为模拟翻浆冒泥路基病害产生的实际工况, 本试

验共分为 3 个阶段：循环荷载-湿化耦合作用阶段（CLW）、浸水饱和阶段（WS）、饱和循环加载阶段（SCL），分别对应降雨及地下水位上升条件下列车开行、无列车开行状态下的降雨入渗、饱和状态下列车开行 3 种实际工况。依据辛泰铁路长期开行的 C70 列车轴重，换算确定本试验所施加的动荷载幅值约为 85 kPa。加载频率可依据车速与单节车厢长度确定<sup>[23]</sup>：

$$f_v = v/l, \quad (1)$$

式中， $v$  为列车行驶速度， $l$  为列车单节车厢长度。本试验中设定车速为 100 km/h (27.778 m/s)，C70 列车的单节车厢长度为 13.976 m。依据式 (1) 确定本试验所施加的动荷载频率为 2 Hz。

试验开始前，首先以 0.01 kN/s 的速率施加 30 kPa 的静荷载模拟轨道重量<sup>[5-6, 24-25]</sup>，待变形稳定后开始第一阶段试验，施加动荷载的同时打开进水阀门，分别从顶部和底部对试样浸水。振动次数达到约 20000 次时进入第二阶段，停止施加循环荷载，继续保持浸水，待试样完全饱和后关闭浸水阀门，抽取试样上方多余积水，进入第三阶段试验。在试样饱和状态下施加循环荷载，直至产生明显翻浆冒泥现象停止试验。试验完整的加载过程示意图见图 7。

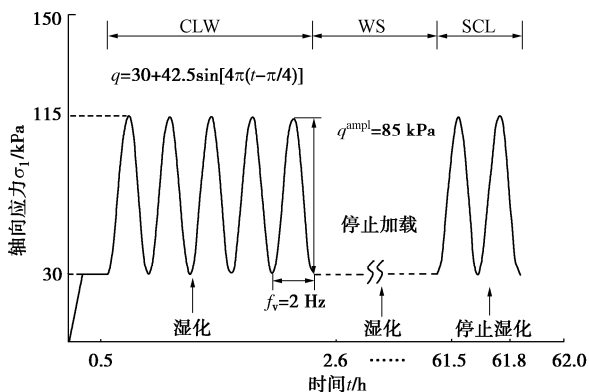


图 7 加载示意图

Fig. 7 Loading diagram

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 观测结果

通过高清相机监控的画面，可以清晰捕捉该试验全过程变化，图 8 为 CLW 阶段观测照片，顶部水位不断下降，底部水位不断上升，这与实际条件下的降雨入渗和地下水位上升相吻合。在早期阶段，没有明显的颗粒迁移现象。随着体积含水率的增加，少量细颗粒开始迁移（见图 8 (f)）。

图 9 为 WS 阶段的观测照片。本阶段停止施加循环荷载，仅模拟降雨入渗和地下水位上升过程，直至试样完全饱和。道砟层和细颗粒层几乎没有相互位移，

细颗粒也没有迁移，当浸水液面基本不发生变化认为试样达到饱和。整个饱和过程持续约 59 h。

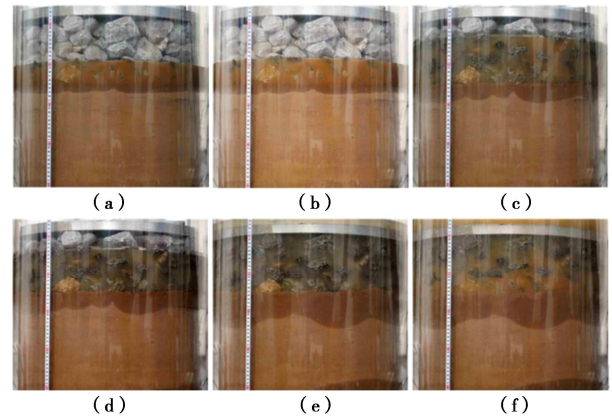


图 8 CLW 阶段观测照片

Fig. 8 Observation photos in CLW stage

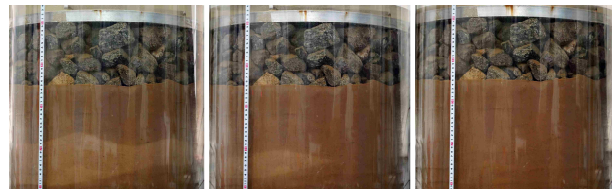


图 9 WS 阶段观测照片

Fig. 9 Observation photos in WS stage

图 10 为 SCL 阶段的观测照片。本阶段在试样处于饱和状态下继续施加循环荷载，进一步研究饱和状态下翻浆冒泥发展规律。施加动荷载后，饱和状态下的试样发生明显翻浆冒泥，道砟层和细颗粒层之间的相互作用十分剧烈。按照试验方案，产生明显翻浆冒泥后试验停止，故本阶段持续时间较短，约 20 min。

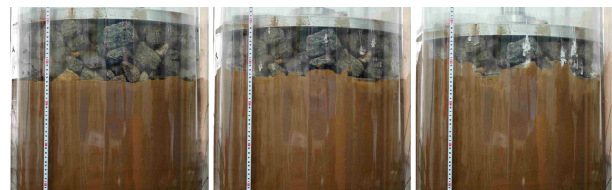


图 10 SCL 阶段观测照片

Fig. 10 Observation photos in SCL stage

#### 3.2 体积含水率与孔隙水压力演化

在整个试验过程中，使用 4 个 EC-5 水分传感器监测试样的体积含水率变化。图 11~13 给出了试验过程中的体积含水率变化。在  $h=15, 115, 215, 315$  mm 时，试样的初始体积含水率分别为 32.43%，25.64%，20.45%，20.8%。由于模型试样尺寸较大，在击实制样过程中很难保证各层土体的均匀性完全一致，因此 4 个位置的初始体积含水率存在一定差异，但差异在合理范围内。图 11 为 CLW 阶段不同高度体积含水率

的变化规律, 由于水分未到达传感器, 各试样层的体积含水率在前 30 min 内均没有显著变化。随着顶部和底部注入水的渗透,  $h=15, 315, 215$  mm 处的体积含水率显著增加, 在 CLW 阶段结束时分别达到 70.34%, 54.20%, 39.28%。由于水暂时没有到达中部  $h=115$  mm 处, 该处的体积含水率几乎没有变化, 在 CLW 阶段结束时为 25.99%。

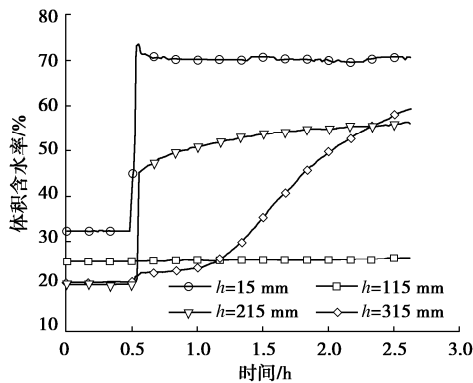


图 11 CLW 阶段体积含水率演化

Fig. 11 Evolution of volumetric water content in CLW stage

图 12 为 WS 阶段不同高度试样体积含水率变化规律,  $h=115$  mm 处的体积含水率显著增加,  $h=15, 215, 315$  mm 处的体积含水率缓慢增加。各层的体积含水率最终分别稳定在 75.73%, 74.11%, 68.79%, 70.88%, 表明试样已基本饱和。通过读取刻度尺上的读数, 可得出本阶段结束后底层道砟下降距离为 22.5 mm, 较第一阶段多下降了 1.5 mm。表层细颗粒上升高度依然为 9 mm, 并未发生变化。整体来看, 本阶段试样变形较小, 未发生翻浆冒泥现象。

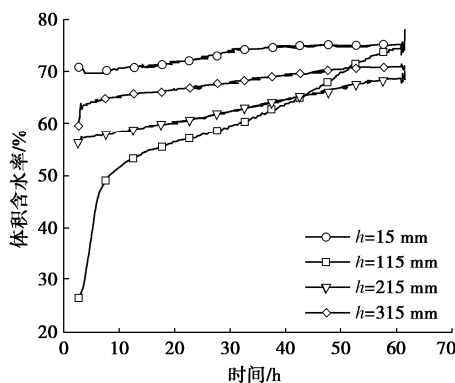


图 12 WS 阶段体积含水率演化

Fig. 12 Evolution of volumetric water content in WS stage

图 13 为 SCL 阶段的体积含水率演化规律, 体积含水率呈现增加趋势, 分析原因是循环荷载产生动孔隙水压力引发细颗粒向上迁移, 相同的体积空间内有更多水分进入, 进而体积含水率增加, 最终体积含水

率分别为 81.79%, 78.21%, 72.29%, 72.59%。

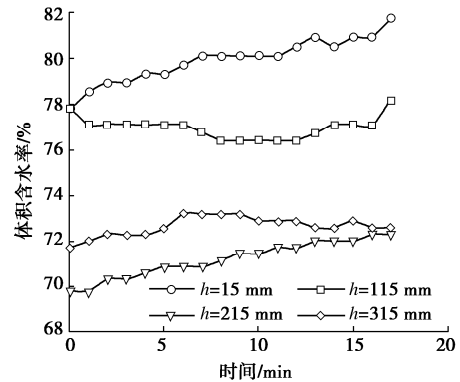


图 13 SCL 阶段体积含水率演化

Fig. 13 Evolution of volumetric water content in SCL stage

图 14 为整个试验过程中孔隙水压力的演化规律, 由于试样最初处于非饱和状态, 初始孔隙水压力为负值, 即  $h=115, 215, 315$  mm 时的基质吸力分别为 -103.43, -65.97, -52.19 kPa。由于试样体积大, 试样压实过程中各层的均匀性难以保证。离试样底部越近, 相对密度越大, 这导致 3 个位置的吸力从底部到顶部逐渐减小, 该差异在合理范围内。在 CLW 阶段, 孔隙水压力呈显著上升趋势。CLW 阶段结束时, 3 个位置的孔隙水压力值分别为 -14.67, -2.49, -26.91 kPa。结果表明,  $h=115$  mm 处的土体仍然处于非饱和状态,  $h=215, 315$  mm 处的部分土体已达到饱和状态, 并在循环荷载下产生了正的动孔隙水压力。在 WS 阶段, 由于循环荷载停止, 孔隙水压力首先产生短暂突变。随后, 随着试样顶部和底部水分的逐渐渗透, 静孔隙水压力逐渐增大。当整个试样达到饱和状态时, 孔隙水压力趋于稳定。WS 阶段,  $h=115, 215, 315$  mm 处的最终孔隙水压力分别为 23.83, 69.26, 47.55 kPa。在 SCL 阶段, 再次施加循环荷载, 动孔隙水压力显著上升, 且并未达到稳定状态。SCL 阶段  $h=115, 215, 315$  mm 时的最终孔隙水压力分别为 39.96, 75.93, 60.78 kPa。本文所用自制高量程张力计的饱和过程较为复杂, 操作难度较大。当 4 个张力计饱和完成后, 发现  $h=15$  mm 时张力计的饱和和效果不好。因此, 图 14 中未显示  $h=15$  mm 时由张力计监测的孔隙水压力。

### 3.3 累积变形

图 15 为施加初始静荷载过程中轴向位移与时间关系曲线, 轴向位移随着静荷载的增加快速增长, 分析原因为道砟层中道砟之间相互嵌入所致。待静荷载达到目标值后轴向位移增长速率显著降低, 逐渐趋于稳定, 稳定后的累积轴向位移为 3.877 mm。

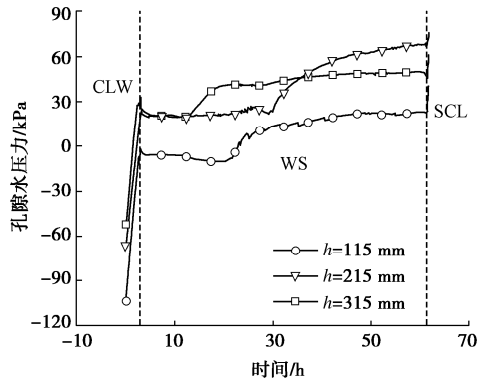


图 14 孔隙水压力演化规律

Fig. 14 Evolution of pore water pressure

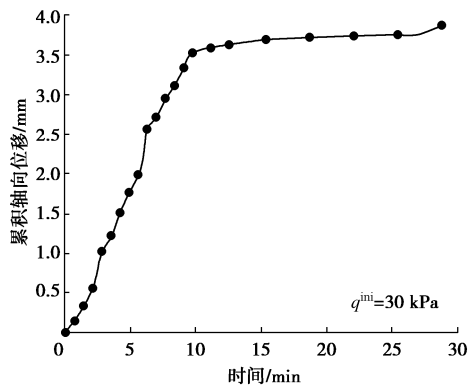


图 15 预加载阶段轴向位移演化

Fig. 15 Evolution of axial displacement in pre-loading stage

图 16 为循环荷载 - 湿化耦合阶段试样的轴向变形与振次关系曲线, 可以看出曲线在加载初期增长显著, 主要原因为湿化导致道砟与土层界面处土层软化, 道砟更容易嵌入土层中, 试样的累积变形主要由道砟嵌入产生。随后, 由于道砟嵌入效应逐渐减弱, 曲线的增长速率逐渐放缓, 累积轴向位移主要由填料的累积变形决定, 在加载后期曲线的增长速率再次增加, 原因是在 CLW 阶段后期, 试样体积含水率进一步增加, 土体发生软化, 道砟与路基填料之间的嵌入作用再次加剧。本阶段结束时的累积轴向应变达到 42.219 mm。

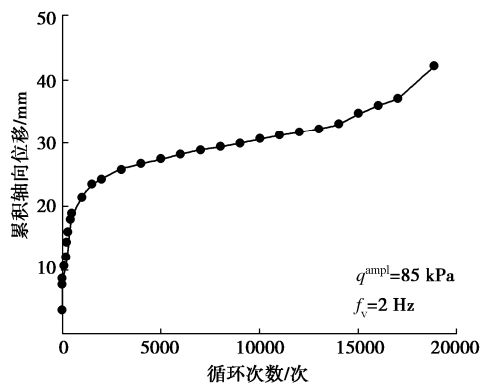


图 16 CLW 阶段累积轴向位移演化

Fig. 16 Evolution of cumulative axial displacement in CLW stage

由于 WS 阶段无循环荷载作用, 因此试样无显著累积轴向位移产生。图 17 为 SCL 阶段试样产生的累积轴向应变与振动次数关系, 由于试样在本阶段完全饱和, 因此在初始加载阶段试样累积轴向位移发展显著, 随后增长速率小幅降低, 但曲线增长趋势依旧明显, 整个过程中曲线增长速率显著高于 CLW 阶段, 本阶段结束时试样的累积轴向变形达到 77.233 mm。

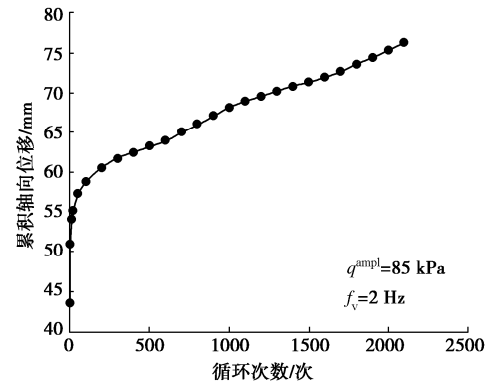


图 17 SCL 阶段累积轴向位移演化

Fig. 17 Evolution of cumulative axial displacement in SCL stage

### 3.4 翻浆冒泥水平与道砟污染指数

为了直观地反映该阶段翻浆冒泥发展程度, 绘制了试验过程中底层道砟的下降高度和上层细颗粒填料的上升高度。从图 18 中可以看出, 底层道砟的下降高度和上层细颗粒填料的上升高度均随时间的增加而增大。在初始阶段, 上层细颗粒填料有小幅下降趋势, 分析原因为循环荷载作用下试样产生的累积变形大于道砟下沉引起的土层高度增加。底层道砟下降高度明显高于上层细颗粒的上升高度, 底层道砟最大下降高度为 21 mm, 表层细颗粒填料最大上升高度为 9 mm。结合相机拍摄图像 (见图 8) 可以看出, 本阶段翻浆冒泥发展程度并不明显, 仅有部分悬浮颗粒产生。

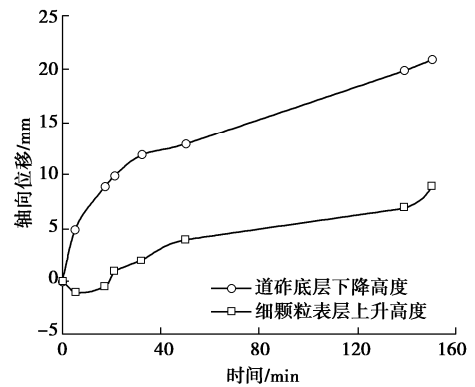


图 18 CLW 阶段翻浆冒泥水平

Fig. 18 Mud pumping level in CLW stage

与 CLW 阶段相同, 为了更加直观地反映本阶段翻浆冒泥发展程度, 绘制了道砟底层下降高度、细颗粒

粒表层迁移高度随时间的变化关系,从图 19 中可以看出,本阶段道砟层和细颗粒层移动的高度均显著发展,特别是细颗粒的迁移现象十分明显,在较短时间内其迁移高度已经超越道砟层下降高度,并继续发展。本阶段结束时道砟层下降高度为 62 mm,细颗粒层向上迁移高度为 94 mm。

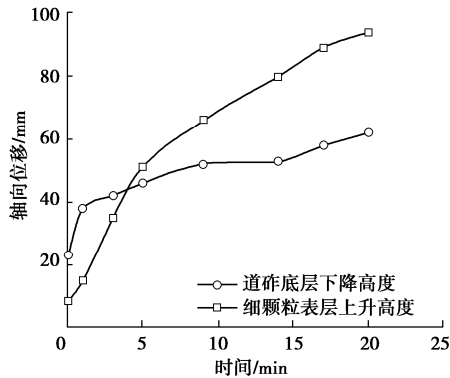


图 19 SCL 阶段翻浆冒泥水平

Fig. 19 Mud pumping level in SCL stage

试验结束后,将试样分批取出,试样表层出现明显道砟与细颗粒混合现象,部分道砟完全进入细颗粒与水形成的泥浆中,如图 20 所示。为了评估翻浆冒泥对道砟的污染程度,在拆除试样过程中将道砟及进入道砟中的细颗粒泥浆一同取出,烘干后称量其重量。本文采用 Ebrahimi 等<sup>[26]</sup>定义的考虑污染材料种类的道砟污染指数来评估道砟污染程度,其表达式为

$$F_1 = F_C (G_{s0}/G_s) \quad (2)$$

式中  $G_{s0}$  为参考相对质量密度,取值为 2.6;  $G_s$  为污染材料的真实相对质量密度,  $F_C$  为 Selig 等<sup>[27]</sup>定义的道砟污染物含量,其表达式为

$$F_C = P_4 + P_{200} \quad (3)$$

式中,  $P_4$  为污染道砟中直径小于 4.75 mm 的颗粒质量百分含量,  $P_{200}$  为污染道砟中直径小于 0.075 mm 的颗粒质量百分含量。

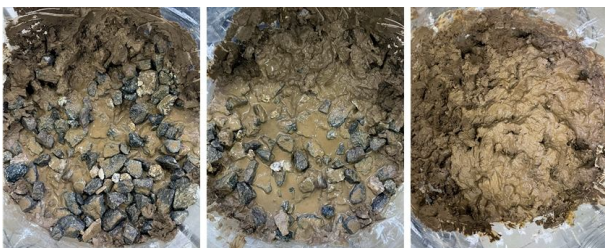


图 20 污染道砟

Fig. 20 Fouled ballasts

由于本试验中所采用的黏土材料粒径均小于 0.075 mm,且道砟颗粒均大于 4.75 mm,基于本试验的  $P_4$  和  $P_{200}$  取值相等,均为污染道砟中的细颗粒填料

质量百分含量。可通过烘干法进行计算,烘干后污染道砟的总质量  $m_{FB}$  约为 60 kg,试验所用道砟总质量  $m_B$  为 53 kg,由基本物性试验可得到细颗粒填料相对质量密度  $G_s$  为 2.73,由此可计算得到本试验最终结束后道砟的污染指数为

$$F_1 = 2 \frac{m_{FB} - m_B}{m_{FB}} \frac{G_{s0}}{G_s} = 2 \times \frac{61 - 53}{61} \times \frac{2.6}{2.73} = 25\% \quad (4)$$

Ebrahimi 等<sup>[26]</sup>针对  $F_1$  为 24% 的黏土污染道砟的大型动三轴试验表明,试样的累积变形发展速率较大,累积变形曲线一直呈现增长趋势并未稳定。鉴于此,本试验结束时污染道砟层的  $F_1$  为 25%,已到达较为严重程度,在实际工程中这一污染程度的有砟轨道路基将面临较大变形甚至诱发路基垮塌的风险。

## 4 结 论

本文介绍了一种自主研发的可模拟有砟轨道路基翻浆冒泥的动态加载模型试验系统,试验系统包括主机、模型筒、液压伺服加载系统、浸水装置、监测采集装置、辅助装置。该装置可准确施加多种波形、频率、大周次循环荷载,并对翻浆冒泥全过程进行实时监测。采用研发的模型试验系统进行了初步试验研究,取得以下 3 点结论。

(1) 由于道砟对细颗粒土层的嵌入作用,CLW 阶段和 SCL 阶段的累积轴向位移在初始循环时均迅速增加,然后增加速率减小,但尚未达到稳定水平。

(2) 动孔隙水压力是颗粒运移的关键因素。CLW 阶段初期翻浆冒泥现象不明显,随着体积含水率的增加,产生局部动孔隙压力,少量细颗粒迁移。细颗粒最大迁移高度为 9 mm。在 SCL 阶段,试样的内部空隙全部由水连接。动态孔隙水压力导致大量细颗粒运移,翻浆冒泥现象明显,细颗粒最大位移为 94 mm。饱和状态下的试样更有可能产生显著的翻浆冒泥。

(3) 试验结束时,污染道砟的  $F_1$  计算为 25%,表明道砟污染程度较高,已经严重影响列车正常运营。建议在辛泰线翻浆冒泥段更换被污染的道砟层,以确保铁路的正常运营。此外,雨季期间应尽量降低列车速度和货运量,以减少翻浆冒泥病害的发生。

## 参考文献:

- [1] 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 - 295. (NIE Ru-song, LENG Wu-ming, SU Yu, et al. Physical and mechanical properties of mud pumping soils in railway subgrade bed[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(2): 286 - 295. (in Chinese))



- [2] KAMRUZZAMAN A H M, HAQUE A, BOUAZZA A. Filtration behaviour of granular soils under cyclic load[J]. *Géotechnique*, 2008, **58**(6): 517 - 522.
- [3] HAQUE A, KABIR E, BOUAZZA A. Cyclic filtration apparatus for testing subballast under rail track[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, **133**(3): 338 - 341.
- [4] ISRAR J, INDRARATNA B. Mechanical response and pore pressure generation in granular filters subjected to uniaxial cyclic loading[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2018, **55**(12): 1756 - 1768.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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 - 380.
- [8] 丁 瑜, 陈晓斌, 张家生, 等. 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*, 2019, **40**(12): 4740 - 4750, 4758. (DING Yu, CHEN Xiao-bin, ZHANG Jia-sheng, et al. Experimental study of dynamic water pressure in transient saturated zone of red sandstone residual soil subgrade[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, **40**(12): 4740 - 4750, 4758. (in Chinese))
- [9] 张 升, 高峰, 陈琪磊, 等. 砂-粉土混合料在列车荷载作用下细颗粒迁移机制试验[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(5): 1591 - 1598. (ZHANG Sheng, GAO Feng, CHEN Qi-lei, et al. Experimental study of fine particles migration mechanism of sand-silt mixtures under train load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(5): 1591 - 1598. (in Chinese))
- [10] 杨新安, 高艳灵. 沪宁铁路翻浆冒泥病害的地质雷达检测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(1): 116 - 119. (YANG Xin-an GAO Yan-ling. GPR inspection for Shanghai—Nanjing railway trackbed[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(1): 116 - 119. (in Chinese))
- [11] ANBAZHAGAN P, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, et al. Using a seismic survey to measure the shear modulus of clean and fouled ballast[J]. *Geomechanics and Geoengineering*, 2010, **5**(2): 117 - 126.
- [12] ANBAZHAGAN P, SU L J, BUDDHIMA I, et al. Model track studies on fouled ballast using ground penetrating radar and multichannel analysis of surface wave[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, **74**(4): 175 - 184.
- [13] ANBAZHAGAN P, DIXIT P S N, BHARATHA T P. Identification of type and degree of railway ballast fouling using ground coupled GPR antennas[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, **126**: 183 - 190.
- [14] SADEGHI J, MOTIEYAN-NAJAR M E, ZAKERI J A, et al. Improvement of railway ballast maintenance approach, incorporating ballast geometry and fouling conditions[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, **151**: 263 - 273.
- [15] SRIVASTAVA A, SIVAKUMAR BABU G L. Analytical solutions for protective filters based on soil-retention and permeability criteria with respect to the phenomenon of soil boiling[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, **48**(6): 956 - 969.
- [16] INDRARATNA B, MUTTUVEL T, KHABBAZ H, et al. Predicting the erosion rate of chemically treated soil using a process simulation apparatus for internal crack erosion[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, **134**(6): 837 - 844.
- [17] MOFFAT R, FANNIN R J, GARNER S J. Spatial and temporal progression of internal erosion in cohesionless soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, **48**(3): 399 - 412.
- [18] SUITS L D, SHEAHAN T C, CHANG D S, et al. A stress-controlled erosion apparatus for studying internal erosion in soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2011, **34**(6): 103889.
- [19] XIAO M, SHWIYHAT N. Experimental investigation of the effects of suffusion on physical and geomechanic characteristics of sandy soils[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2012, **35**(6): 104594.
- [20] 刘泉声, 崔先泽, 张程远, 等. 粒径对多孔介质中悬浮颗粒迁移—沉积特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(10): 1777 - 1783. (LIU Quan-sheng, CUI Xian-ze, ZHANG Cheng-yuan, et al. Effects of particle size on characteristics of transportation and deposition of suspended particles in porous media[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(10): 1777 - 1783. (in Chinese))
- [21] 白 冰, 张鹏远, 宋晓明, 等. 渗透作用下多孔介质中悬

- 浮颗粒的迁移过程研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10): 1786 - 1793. (BAI Bing, ZHANG Peng-yuan, SONG Xiao-ming, et al. Transport processes of suspended particles in saturated porous media by column seepage tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(10): 1786 - 1793. (in Chinese))
- [22] 薛传成, 王 艳, 刘干斌, 等. 温度和 pH 对多孔介质中悬浮颗粒渗透迁移的影响[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(11): 2112 - 2119. (XUE Chuan-cheng, WANG Yan, LIU Gan-bin, et al. Effects of temperature and pH on permeation and migration of suspended particles in porous media[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(11): 2112 - 2119. (in Chinese))
- [23] 韩博文, 冯怀平, 应志超, 等. 振动荷载作用下浸水过程对重载铁路路基床变形特性影响研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(1): 221 - 228. (HAN Bo-wen, FENG Huai-ping, YING Zhi-chao, et al. Influences of soaking process on deformation characteristics of heavy haul railway subgrade under vibration load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(1): 221 - 228. (in Chinese))
- [24] 冷伍明, 周文权, 聂如松, 等. 重载铁路粗粒土填料动力特性及累积变形分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 728 - 736. (LENG Wu-ming, ZHOU Wen-quan, NIE Ru-song, et al. Analysis of dynamic characteristics and accumulative deformation of coarse-grained soil filling of heavy-haul railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 728 - 736. (in Chinese))
- [25] 杨志浩, 岳祖润, 冯怀平, 等. 级配碎石填料大三轴试验及累积塑性应变预测模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2993 - 3002. (YANG Zhi-hao, YUE Zu-run, FENG Huai-ping, et al. Large scale triaxial tests on graded macadam filling and its accumulated plastic strain prediction model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(9): 2993 - 3002. (in Chinese))
- [26] EBRAHIMI A, TINJUM J M, EDIL T B. Deformational behavior of fouled railway ballast[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(3): 344 - 355.
- [27] SELIG E T, WATERS J M. Track Geotechnology and Substructure Management[M]. New York: Thomas Telford Publishing, 1994.

## 第九届全国岩土工程物理模拟学术研讨会（第三号通知）

**主办单位:** 中国水利学会岩土力学专业委员会

**承办单位:** 喀什大学; 南京水利科学研究院; 长江科学院; 新疆大学

为促进我国岩土工程物理模拟学术交流, 第九届岩土工程物理模拟学术研讨会将于 2022 年 8 月 10 日至 13 日在“新丝绸之路经济带”核心区、“中巴经济走廊”的起点中国新疆喀什市举行。本届会议是继武汉(2011 年)、杭州(2013)、北京(2017)会议后全国岩土工程物理模拟领域的又一次学术盛会。届时将邀请国内外岩土力学与物理模拟领域的著名专家和学者进行交流, 展现最新模拟技术和研究成果, 探讨物理模拟在“一带一路”、“中巴经济走廊”基础设施建设与防灾减灾研究中的应用, 以促进物理模拟研究对我国重大战略和重大工程的技术支撑作用。本次会议热诚欢迎本领域及相关领域的专家、学者及工程技术人员参加, 特别欢迎相关的博士和硕士研究生参加。

**会议议题:** 会议主题为“一带一路”建设与岩土工程物理模拟岩土工程物理模拟理论、技术和装备的发展前沿及“一带

一路”基础设施建设工程难点问题, 具体会议议题包括(但不限于): 物理模拟新设备与新技术(Ng 超重力模拟与 1g 常重力模拟); 岩土工程物理模拟理论与相似律; 岩土工程物理模拟与数值分析; 土动力学与岩土地震工程; 边坡与堤坝工程防灾减灾; 交通基础设施与地下工程; 水利水电与能源岩土工程; 碳捕集封存与环境岩土工程; 冻土与特殊土力学及工程; 岩土工程物理模拟研究生论坛。

**会议议程:** 2022 年 8 月 9 日大会报到, 2022 年 8 月 10 日大会开幕式及报告, 2022 年 8 月 11 日大会报告及闭幕式, 2022 年 8 月 12 日自由参观, 2022 年 8 月 13 日代表返程。

**会议地址:** 喀什天缘国际酒店。

**大会会务通讯:** 喀什大学何斌 13916666051; 喀什大学韩国旗 15699448899; 南京水利科学研究院任国峰 15805152243; 长江科学院李波 13971176497。地址: 新疆维吾尔自治区喀什市喀什大学土木工程学院, 邮编: 844006, E-mail: 562116440@qq.com。

(大会组委会 供稿)