

基于 XCT 扫描技术的铁路路基 翻浆冒泥机理研究

王张弛¹, 曹志刚¹, 蔡袁强^{1,2}, 刘福深¹, 张剑锋¹

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为研究铁路路基翻浆冒泥的发生机理, 本文结合 XCT 扫描试验技术试验观测了循环荷载下饱和基床翻浆冒泥通道形成全过程, 以及发生翻浆冒泥时内部孔隙水的运移规律。研究表明, 基床内翻浆冒泥通道的形成是铁路路基翻浆冒泥启动的关键。静荷载作用下, 基床内不会出现翻浆冒泥通道, 底部孔隙水随荷载次数增加而整体上升; 当土体受到循环荷载时, 基床孔隙水压迅速累积升高, 在土体内部逐渐发育出输水通道, 导致路基底层颗粒向上迁移而形成翻浆冒泥。基床性翻浆冒泥可分为3个阶段, 孔压累积阶段、通道发展阶段与抽吸阶段。翻浆冒泥通道发展速度随着荷载幅值的增大而增加。最后采用嵌入强间断数值方法来模拟土体试验时翻浆冒泥通道的发展, 分析了不同土体黏聚力对地基输水通道形成的影响规律, 发现随着土体黏聚力的升高, 土体内输水通道发展速度降低。本研究可为软土地基道路翻浆冒泥的预防与治理提供参考。

关键词: 翻浆冒泥; XCT 扫描; 水分迁移; 细粒运移; 铁路路基; 输水通道; 嵌入强间断方法

中图分类号: U418.5

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)03-0187-08

Study on the mud pumping mechanisms of railway subgrade based on X-ray computed tomography technology

WANG Zhang-chi¹, CAO Zhi-gang¹, CAI Yuan-qiang^{1,2}, LIU Fu-shen¹, ZHANG Jian-feng¹

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, Zhejiang, China)

Abstract: To investigate the mechanisms of the mud pumping of subgrade bed, this paper observes the whole formation process of saturated subgrade mud-flushing channel under cyclic loading and the internal pore water movement law during mud-flushing based on X-ray computed tomography technology. The research shows that the formation of mud pumping channel in subgrade bed is the key to the start-up of mud pumping in railway subgrade. Under static loading, there is no mud pumping channel in the subgrade bed, and the bottom pore water increases with the increase of load times. When the soil is subjected to cyclic loading, the pore water pressure of the foundation bed increases rapidly, and the water conveyance channel is gradually developed inside the soil, which leads to the upward migration of the particles in the bottom layer of the road and the occurrence of mud pumping. The development of mud pumping in base-bed slurry can be divided into three stages: pore pressure accumulation stage, channel development stage and suction stage. The development speed of the mud pumping channel increases with the increase of the load amplitude. Finally, the embedded strong discontinuity numerical method is used to simulate the development of mud pumping channel during soil tests, and the influence of soil cohesion on the formation of foundation water conveyance channel is analyzed. It is found that the development speed of water conveyance channel in soil decreases with the increase of soil cohesion. This study can provide a reference for the prevention and treatment of mud pumping in soft soil foundation road.

Key words: mud pumping; X-ray computed tomography; water migration; fine particles migration; railway subgrade; water conveyance channel; embedded strong discontinuity approach

收稿日期: 2022-01-24

基金项目: 国家自然科学基金 (51978611)。

作者简介: 王张弛 (1997—), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要从事铁路路基翻浆冒泥研究工作。E-mail: 624578630@qq.com。

0 引言

截至2020年,我国铁路营业里程达14.6万km,在气候环境荷载、交通荷载等作用下,交通基础设施路基灾害频发。路基翻浆冒泥是铁路路基最为普遍的路基病害之一,发生路段长达5 805 km。铁路路基翻浆冒泥会导致道床层污染,引起轨道严重退化,使路基力学性能下降,降低道路服役年限,并留下安全隐患^[1],整治病害道路需花费大量资源,因此深度认识翻浆冒泥对铁路工程的发展有重要意义。

翻浆冒泥主要有两种形式^[2]:道床性翻浆冒泥与基床性翻浆冒泥。道床性翻浆冒泥为非基床材料,如粉尘、道砟破碎物等细粒在道砟层内堆积,导致轨道排水能力下降,在降雨时与水相结合形成泥浆,污染并淤堵道床,受到交通荷载时,从道砟层翻冒而出,造成道砟层力学特性劣化。基床性翻浆冒泥为反复重载下,饱和基床土在不良的排水条件下软化,列车经过时,基床土中孔压累积,最终以泥浆形式沿着道砟间空隙向上发生翻浆冒泥。

基床翻浆冒泥主要受以下3个决定因素影响^[3-5]:

(1) 作用于铁道的上覆荷载;(2) 铁道基床土体自身性质;(3) 水与温度对铁道基床的影响。针对这3个因素,诸多学者开展了以下相关研究。

上覆荷载是翻浆冒泥的必要条件。ZHANG等^[6]通过自制室内试验装置,根据不同荷载作用下道床层泥浆浊度,探究了加载频率与荷载大小对饱和基床土细粒上移的影响。INDRARATNA等^[7]对土体进行不同加载频率、循环应力的循环三轴试验,通过实验数据得出了在高循环应力比下,土体中细粒与水会在循环荷载下发生重分布,引发土体表层液化,导致翻浆冒泥。HUANG等^[8]通过现场调查以及足尺轨道模型实验,探究了翻浆冒泥发生前后,基床与板式轨道的动力响应规律。

基床土体自身性质是决定翻浆冒泥的内在因素。聂如松等^[9]收集并统计了60多组翻浆冒泥土的物理性质指标数据,分析了病害土样的颗粒组成,发现翻浆冒泥土中绝大多数黏粒含量大于20%,粉粒含量大于20%,渗透系数小于 1.0×10^{-4} cm/s。蔡袁强等^[10]采用自制模型试验,探究了黏粒含量、孔隙比对基床翻浆冒泥的影响,结合试验结果以及现场统计数据,提出了粉质黏土翻浆冒泥判别准则。WANG等^[11]将道砟铺设在路基土上建立了小比例尺模型试验,研究了含水量、细粒含量等因素,确

定了无砟板式轨道下翻浆冒泥的驱动因素。DUONG等^[12]通过室内试验,在不同基床土干密度条件下对基床土进行试验,提出低密实度基床在交通荷载下易引发超孔隙水压,并导致翻浆冒泥。

水是翻浆冒泥发生不可或缺的因素。HAYASHI等^[13]对水力路径和荷载点位对道路翻浆中水与细粒量的影响开展了相关研究。CHAWLA等^[14]则分别对比黏土与粉土两种不同基床土的翻浆冒泥程度,发现当渗透系数较高时,基床更易浸水软化从而引发翻浆冒泥。张升等^[15]利用自主研发的试验系统,探究了列车荷载下饱和砂粉土动水力特性及细粒迁移机制,发现在孔隙水压力反复累积消散过程中,轴向孔隙水压力梯度会对孔隙水形成“抽吸”作用,促使细颗粒迁移并聚集。目前对基床性翻浆冒泥输水通道的形成条件与发展规律尚不清楚,进而难以对基床性翻浆冒泥病害进行针对性防治。

基于此,本文以基床层翻浆冒泥为重点,从微观角度出发,探究软土地基中翻浆冒泥启动过程,包括通道形成机理以及孔隙水运移规律。从而在微观层面探究交通荷载下基床翻浆冒泥形成机理,为防治轨道翻浆冒泥病害提供技术支持。

1 试验方案及材料

1.1 试验设计与试验仪器

X光计算机断层扫描技术(简称XCT)可在不破坏土体完整性的前提下便能探究土体的内部情况^[16-18]。

本试验通过XCT扫描系统获取荷载下土体底部氯化铯溶液的运移规律,探究基床性翻浆冒泥输水通道的形成条件以及发展规律。试验系统的各组成部分如图1所示,该试验系统利用装有高分辨率探测器(2 000×2 000像素)的XTH255/320LC装置进行改装,在160 kV加速电压和120 μA束流下获得X射线,其中包括X光发射装置、接收器装置、试样等,试样及其测量装置如图2所示。X光发射装置包括X射线源管、2.5 mm铜滤光片、操控主机等,其中铜滤光片用于滤除低能X射线。试样距离X光源239.4 mm,距离接收器779.4 mm。试验采用30%质量浓度氯化铯溶液作为示踪剂,氯化铯具有高X射线衰减率,并且在水和其他液体中具有很高的溶解性^[19],在XCT扫描图像中,含有氯化铯溶液的土体与普通饱和土体有明显的灰度差。

试样装置容器内径 $D=40$ mm,高 $H=80$ mm,材料为有机玻璃。其余组件包括孔隙水压计、数据

采集仪,孔隙水压计量程为 0~50 kPa,采样频率为 20 Hz,精度为 0.5%,孔隙水压计与 Campbell 公司 CR6 数据采集仪连接进行数据采集,容器侧壁开有孔洞(孔洞中心距离杯底 $h=15\text{ mm}$,孔径 $d=10\text{ mm}$),以便于孔隙水压计的安装,孔隙水压计安装完成后,于外杯壁与孔隙水压计交接处注射热熔胶进行防漏处理。

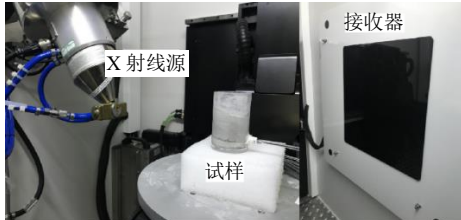


图1 XCT扫描系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of XCT scanning system

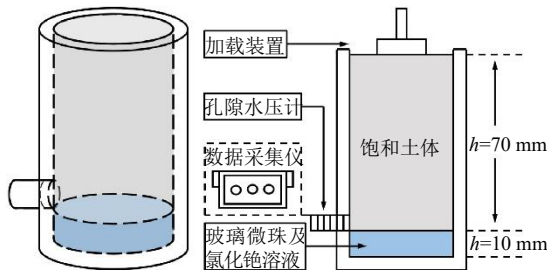


图2 试样示意图

Fig. 2 Diagram of sample

1.2 试验材料

大量现场调研表明,基床性翻浆冒泥往往发生在粉质黏土地基中^[9]。本文通过人工配制获得粉质黏土地基,来减少因土样非均质造成的试验影响。其中粉土通过筛分杭州下沙地区粉土层获得,其塑性指数为 8.72,直径大于 0.075 mm 的颗粒质量不超过总质量的 50%,满足粉土指标;黏土采用 1250 目商用高岭土,其塑性指数为 19.2,粉土和黏土在配制前均经过烘干、筛分处理。配制后的粉质黏土级配曲线如图 3 所示,土性参数见表 1,根据冷伍明等^[20] 提出易发生翻浆冒泥的细粒土物理指标,该土样均属于易发生翻浆冒泥的粉质黏土,且液限小于 50%,塑性指数小于 26,满足《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[21] 对填料的要求。

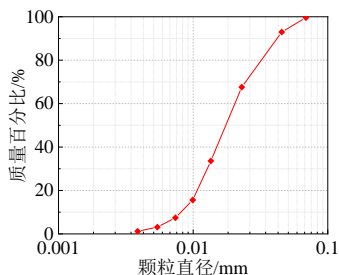


图3 试验土样粉质黏土级配曲线

Fig. 3 Grading curve of silty clay of test soil sample

表1 粉质黏土土性参数
Table 1 Properties of silty clay

土性参数	数值
比重 d_s	2.62
塑限 $\omega_p/\%$	20.75
液限 $\omega_L/\%$	30.87
塑性指数 I_p	10.12
最优含水量 $W_{op}/\%$	21.5
土体黏聚力 c/kPa	10

1.3 试样制备

土样配制完成后,将其在最优含水量下搅拌均匀,并在密封容器中静置 24 h 以上,使土样内部含水量达到均匀,再将土样分 4 层填入三轴饱和器中,通过控制单位高度土样质量,将土样干密度控制在 1.5 g/cm^3 。每层土样填筑完成后,在填入下一层土样前,将其表面拉毛,以保证饱和后土样不分层。填土完成后,将三轴饱和器置入真空饱和缸中进行抽气饱和至少 24 h 以上,饱和完毕后进行 B 值测定,若 $B \geq 0.95$,则判断该批土样已饱和,符合试验要求。

装填土样前,在试验容器内壁四周涂上凡士林,减少土体与内壁的摩擦,容器底部铺设 10 mm 厚玻璃微珠层,玻璃微珠粒径 0.5 mm,并加入质量浓度为 30% 的氯化钾溶液,其液面高度刚好没过玻璃微珠层(玻璃微珠层起到储存氯化钾溶液的作用),再装入饱和土样,土样高度为 7 cm。

1.4 试验方案

试验方案示意图如图 4 所示,对土样施加荷载,每施加 5 min 循环荷载后,便进行一次 XCT 扫描,XCT 扫描所需时间为 35 min,以此往复,当扫描后土体顶部出现氯化钾溶液时停止试验,试验过程中孔隙水压计持续记录试样底部孔压。

土样装填完毕后进行循环加载,采用落锤法施加荷载,加载频率为 1 Hz,加载时间为 5 min,加载模式如图 4 所示,本试验加载方案如表 2 所示,以探究不同循环荷载幅值下土体发生翻浆冒泥的内部变化。

XCT 扫描试验开始后,土样匀速旋转 360° ,X 射线束穿透试件,探测器记录土样不同方位和时间下 X 射线衰减信号,并将其用于 3D 重构之中,试验过程中,扫描频率为 2 Hz,土样每个角度的曝光时间为 0.5 s,土样扫描完成后共产生 2500 个投影。

对于每次加载后扫描获得的原始数据,使用

CT Pro 软件将其生成大量灰度图片,通过手动控制光束硬化、噪声、环形伪影,将生成的灰度图片载入 VG Studio MAX 3.1 进行最终处理分析。在图像中,含有氯化铯溶液土体与普通土体存在灰度差别,可通过图像灰度对比来判断荷载作用下土体内氯化铯溶液的运动规律,从而分析土体内部水分在翻浆冒泥时的运移规律。

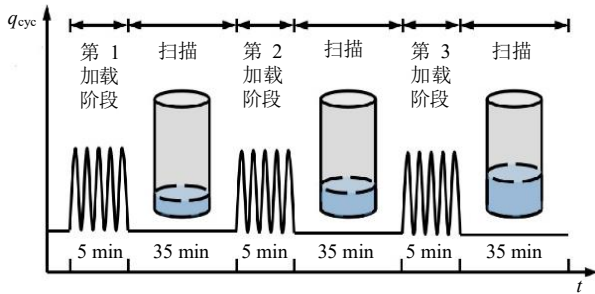


图4 XCT扫描试验方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of XCT scanning test scheme

表2 试验方案
Table 2 Scheme of test

试验序号	荷载形式	落锤下落高度 h/mm	落锤质量 m/g	加载时间 t/min	基础荷载 m/g	加载阶段 $N/次$
A	静载	无	300	10	250	3
B1	循环荷载	250	300	5	250	4
B2		250	600	5	250	3
B3		250	900	5	250	2

2 XCT扫描试验结果及分析

通过XCT扫描试验对不同荷载幅值下土体发生翻浆冒泥时内部的细观变化进行探究。

在4次加载扫描获得的图像中,选择氯化铯溶液分布范围最广平面进行截取,并将含有氯化铯溶液的土体进行标记。

2.1 静载扫描结果

静载下土体试验扫描结果如图5所示,底部圆粒为玻璃微珠,之间较白的物质为氯化铯溶液,上部黄色部分为含有氯化铯溶液的土体,灰色部分则为不含氯化铯溶液的普通土体。在静载作用下,氯化铯溶液逐渐进入土体,并随着荷载次数的增加而逐渐上升。

通过VG Studio MAX 3.1将大量的灰度图像进行叠加运算,进行三维模型重构,由此获得土体中氯化铯溶液的分布透视图,如图6所示,静载作用下,土体底部氯化铯溶液表现出整体上升的趋势。

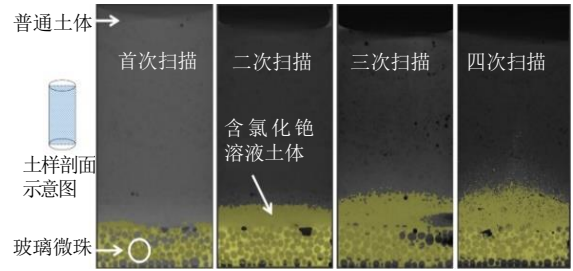


图5 A组土体内部氯化铯溶液分布变化切面图

Fig. 5 Section diagram of distribution changes of cesium chloride solution in group A

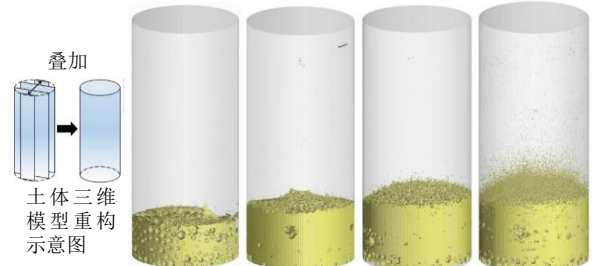


图6 A组土体氯化铯溶液分布透视图

Fig. 6 Perspective view of distribution of cesium chloride solution in soil group A

2.2 循环荷载扫描结果

图7给出了不同循环荷载加载阶段下土体氯化铯溶液的扫描结果,从玻璃微珠层顶部开始到含有氯化铯溶液土顶结束,对氯化铯溶液分布区进行标高。第1加载阶段后,土体底部氯化铯溶液局部上升,上升高度为14 mm,随着加载次数的增加,氯化铯分布区域逐渐升高变宽,高度分别为30 mm、42 mm、48 mm。第4加载阶段后,氯化铯溶液分布区域连通土体底部与表面,形成了非常明显的输水通道,这与杨新安^[22]使用地质雷达探测沪宁线和东陇海线中发现翻冒通道的结果一致。

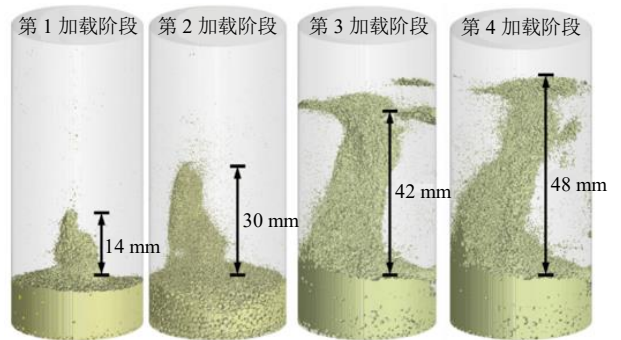


图7 B1组土体氯化铯溶液分布变化透视图

Fig. 7 Perspective view of distribution changes of cesium chloride solution in soil group B1

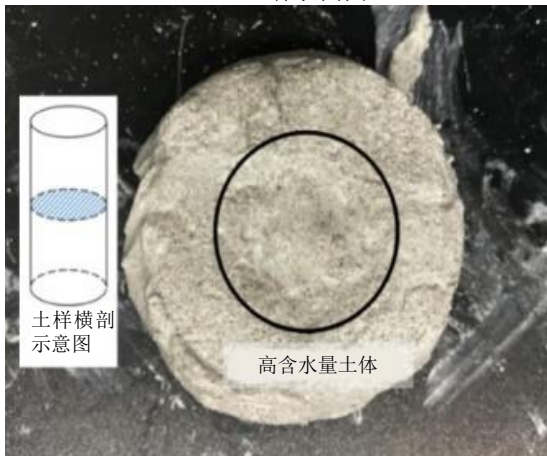
试验结束后,土样顶部出现自由水,如图8(a)所示,结合图7中第4加载阶段后土体透视图可知,自由水出现的原因是底部氯化铯溶液在多次荷载作用下,从土体底部运输至顶部。

为了解土体内形成输水通道后的变化,将土体取出,使用钢丝锯在土体中心点处沿水平方向进行切割,所得土体横向剖面图如图 8 (b) 所示,可见土体中心部分含水量较高,土体已经形成泥浆失去强度,与边缘四周土体形成明显对比,与图 7 中所得现象相符。试验证明,在循环荷载作用下,土体内部中心区域会形成输水通道,该通道具有较高的渗透性,土体底部水分在荷载作用下通过输水通道到达土体表面。

图 9 给出了 B2、B3 组土体的 XCT 扫描透视图, B2、B3 组试验结果与 B1 组表现出相同趋势,氯化铯溶液在土体内的分布随荷载次数的增加逐渐升高变宽。在 B2、B3 组中氯化铯溶液均分布在土体中心部分,说明该两组试验中也出现了输水通道。对比 B1、B2、B3 组输水通道连通至顶部的时间, B2 组在第 3 加载阶段后,形成输水通道, B3 组在第 1 加载阶段后便形成,在第 2 加载阶段后输水通道变宽。这说明当荷载幅值越大时,土体内部输水通道发展速度越快。



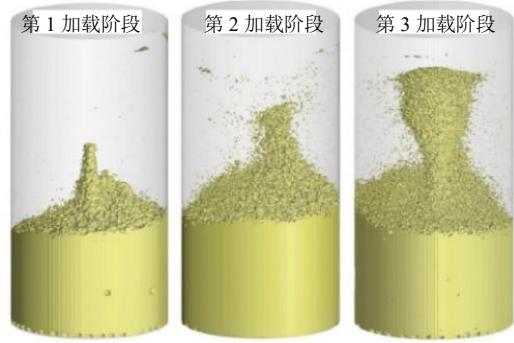
(a) 土体表面图



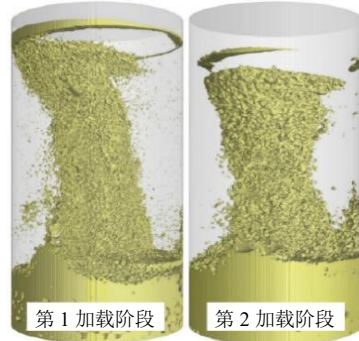
(b) 土体中心剖面图

图 8 试验结束后土体状态图

Fig. 8 Soil state after test



(a) B2 组透视图



(b) B3 组透视图

图 9 B2、B3 组土体氯化铯溶液分布变化透视图

Fig. 9 Perspective view of distribution changes of cesium chloride solution in soil group B2 and B3

2.3 孔隙水压力

为探究土样内输水通道发展时孔隙水压的变化规律,做出累积孔隙水压随时间变化图,如图 10 所示。在静载作用下,土体孔隙水压变化如图 10(a) 所示,受载时孔隙水压瞬间上升,随后迅速消散,在 1 min 后稳定在 1 kPa 左右。

由图 10 (b) 可见,循环荷载下土体孔隙水压迅速升高,随后长时间保持在峰值水平,待通道完全成形后,孔隙水压才开始消散。土体内孔隙水压峰值随着荷载幅值的增加而增大。孔隙水压峰值随着荷载次数的增加而逐渐降低。

为探究土体底部孔隙水压与通道发展规律,给出图 10 (c)。通道相对高度为含氯化铯溶液土体高度与各次荷载后土体高度之比。累积孔隙水压峰值随着通道相对高度的增加而降低,这说明,输水通道发展导致孔隙水压消散。

以上试验发现,在加载初期,底部孔隙水压迅速累积升高,土体底部在高孔隙水压作用下出现输水通道雏形。在加载中期,高孔隙水压长期作用于土体底部,输水通道因此向上发展,并最终连通土样底部与顶部,随后底部孔隙水通过输水通道运输至土体表面,并伴随着孔隙水压消散和翻浆冒泥的发生,随着循环荷载继续施加,泥浆随着水的抽吸作用迁移到表面,翻浆冒泥进一步加剧。

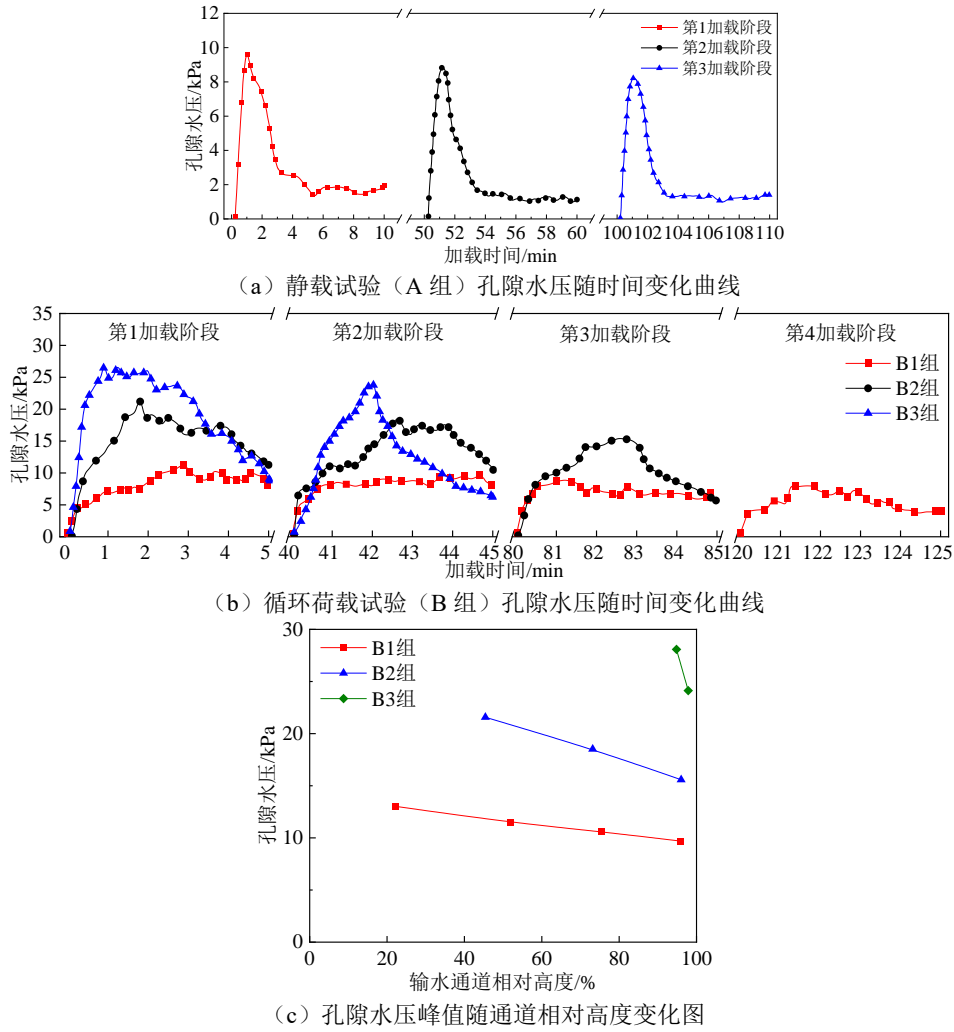


图 10 荷载作用下土体累积孔隙水压随时间变化图

Fig. 10 Accumulated pore water pressure versus time of soil under loading

3 数值模拟

3.1 模型以及参数

为模拟输水通道形成过程，采用 LIU^[23] 提出的嵌入强间断方法 (Embedded Strong Discontinuity Approach) 来模拟平面应变条件下多孔介质中单个水力裂缝的扩展，从而提出对翻浆冒泥进行描述的模型。该方法以不连续变形模式丰富应变场，并允许在单元内部模拟裂缝，I 型裂缝的产生和发展采用三线性内聚定律描述，该定律通过罚函数实现。裂缝单元内部渗透率的升高取决于裂隙开度。裂缝的扩展是由裂缝附近的高压梯度驱动，以此来模拟交通荷载下，道路路基翻浆冒泥时裂缝的发展。

模型尺寸为 70 mm×40 mm，左右两侧边界 X 方向位移为 0，为不排水边界；底部边界 XY 方向位移均为 0，为不排水边界；顶部边界为排水边界。模型网格划分示意图如图 11 所示，粉质黏土单元高度为 70 mm。粉质黏土内部预设了通道传播路径，

长度 70 mm，通道网格进行局部细化，以捕捉通道断裂变形并确保计算时数值收敛，裂缝网格尺寸为 0.02 mm。

模拟中所用土性详细参数均通过实验获得，如表 3 所示。

以 XCT 试验中 B1 组土体孔隙水压变化为依据，于土体底部边界施加孔隙水压作为荷载，模型底部实时孔隙水压随时间变化曲线如图 10 (b) 所示。

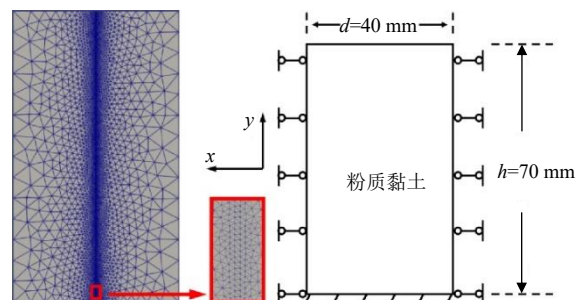


图 11 模型边界以及网格划分示意图

Fig. 11 Schematic diagram of model boundary and meshing

表 3 模拟中土体土性参数
Table 3 Parameters of soil model

材料参数	粉质黏土
杨氏模量 E/MPa	10
泊松比 ν	0.1
液体密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 000
土体渗透率 k/m^2	3.0×10^{-14}
液体黏度 $\mu/(\text{MPa} \cdot \text{s})$	1.0×10^{-9}
液体压缩性 c/MPa^{-1}	5.0×10^{-4}
土体黏聚力 c/kPa	10
Biot 系数	1
裂缝参数 g_0/m	5.0×10^{-10}
裂缝参数 g_1/m	3.0×10^{-6}
罚函数 $\varepsilon/(\text{MPa}/\text{m})$	1.0×10^7

3.2 计算结果

各次加载下,土体单元横向位移发展如图 12 所示,红色代表向左位移,蓝色代表向右位移。由图可知,在荷载作用下,土体中心单元向两边位移,且位移大小随着荷载阶段的增加而增大。

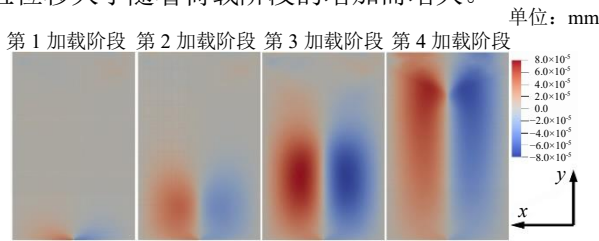


图 12 各阶段加载下土体单元横向位移发展图

Fig. 12 Development diagram of lateral displacement of soil elements under each stage of loading

土体在各个加载阶段下,输水通道宽度随高度的变化如图 13 所示。相同高度处,通道宽度随着加载阶段的增加而逐渐变宽,通道高度也随着加载阶段的增加而逐渐增高,呈现出与试验结果相同的现象,在循环荷载作用下,土体内部出现输水通道,且在高空隙水压作用下向上发展。

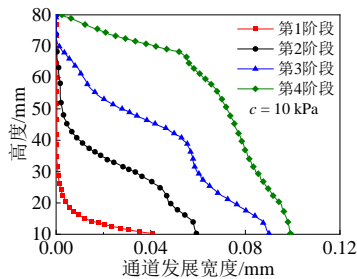


图 13 模拟计算中通道宽度随高度变化图

Fig. 13 Variation of channel width with soil height in the simulated calculation

为验证本模型,图 14 将模拟结果与 B1 组实验中土体内输水通道发展高度进行对比,通过该图可

得,在各个加载阶段,计算所得输水通道发展高度与试验值吻合较好,说明该方法能较好地模拟试验土体中通道的发展。

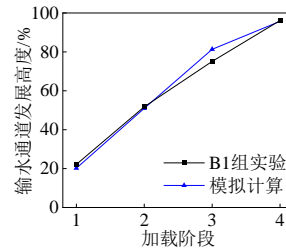
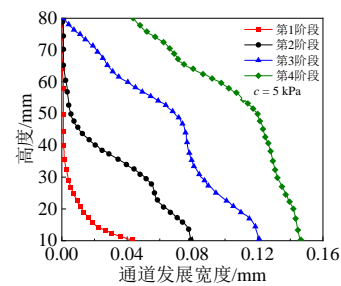


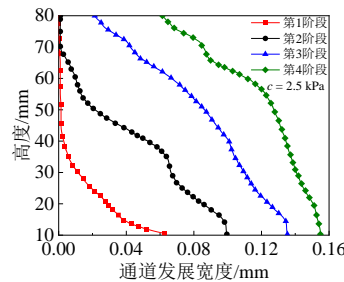
图 14 模拟计算与实际实验中通道发展高度对比图

Fig. 14 Comparison of channel relative heights between simulated calculations and actual experiment

为探究不同土体强度下输水通道的发展规律,图 15 分别给出土体黏聚力 $c=5 \text{ kPa}$ 、 2.5 kPa 的通道发展情况,本文中为更好研究土体黏聚力对翻浆冒泥通道形成的影响,模型所施加荷载与 $c=10 \text{ kPa}$ 模型土体相一致,均以 XCT 扫描试验中 B1 组试验的孔隙水压为依据。在不同土体黏聚力下,土体内通道均随着荷载次数的增加而向上发展,但随着土体黏聚力 c 的增强,通道发展速度减慢。土体 $c=2.5 \text{ kPa}$ 时,在第 3 加载阶段后,输水通道已经贯通土体,通道顶部宽度达到 0.02 mm ,在第 4 加载阶段后,顶部通道宽度发展至 0.06 mm ;当黏聚力 c 增加至 5 kPa 时,在第 3 加载阶段后,输水通道发展至土体顶部,但相比于土体 $c=2.5 \text{ kPa}$,相同高度处通道宽度减小,第 4 加载阶段后,通道顶部增宽至 0.04 mm ;而当黏聚力 c 达到 10 kPa 时,输水通道在第 4 加载阶段才贯通至顶部。



(a) $c=5 \text{ kPa}$



(b) $c=2.5 \text{ kPa}$

图 15 不同土体黏度下通道宽度随高度变化图

Fig. 15 Variation of channel width with soil height under different soil viscosity

图 16 中对比了土体不同黏聚力下, 输水通道发展高度随荷载次数的变化图。相同荷载下, 土体黏聚力升高, 而输水通道达到相同高度所需的加载次数更多, 这说明提高土体黏聚力能有效减缓输水通道的发展。

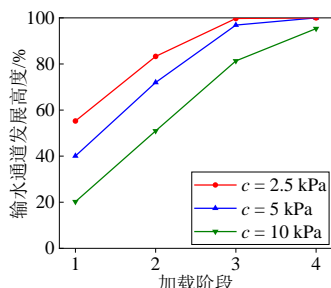


图 16 不同土体黏度下输水通道发展高度随荷载次数变化图
Fig. 16 Variation of channel relative height with load times under different soil viscosity

4 结 论

本文结合 XCT 扫描技术, 探究了饱和基床土体翻浆冒泥时通道的形成机理以及孔隙水运移规律, 并使用嵌入强间断方法来模拟实验中输水通道的发展, 得到了如下结论:

(1) 循环荷载下, 土体发生翻浆冒泥时, 土体内部逐步向上形成输水通道。

(2) 输水通道的形成共分为以下几个阶段, 循环荷载下, 土体底部孔隙水压累积, 在高孔隙水压持续作用下, 基床内逐渐形成贯通土体的输水通道, 基床底部孔隙水通过通道携带细粒向表面运移, 导致基床发生翻浆冒泥。

(3) 基床土体黏聚力是地基层翻浆冒泥的重要影响因素。基床土体抗翻浆冒泥能力随着土体黏聚力的升高而增强。

参考文献

- [1] 陈文海. 铁路路基翻浆冒泥病害机理及整治[J]. 企业技术开发, 2010, 29(7): 42-46.
CHEN Wen-hai. The mechanism of mud pumping in railway subgrade and its treatment measures[J]. Technological Development of Enterprise, 2010, 29(7): 42-46.
- [2] 王亚东. 站场翻浆冒泥原因分析及整治经验[J]. 路基工程, 2000(5): 65-66.
WANG Ya-dong. Cause analysis and treatment experience of mud pumping in station yard[J]. Subgrade Engineering, 2000(5): 65-66.
- [3] WANG Y, KONG L W, WANG Y L. Mechanism and control of subgrade mud pumping under the cyclic load of train[C]//Proceedings of the 2014 International Conference on Mechanics and Civil Engineering. 2014: 369-374.
- [4] ALOBAIDI I, HOARE D. Factors affecting the pumping of fines at the subgrade subbase interface of highway pavements: a laboratory study[J]. Geosynthetics International, 1994, 1(2): 221-259.
- [5] 贡照华. 全面整治翻浆冒泥病害的探讨与实践[J]. 铁道建筑, 2001(6): 16-18.
GONG Zhao-hua. Discussion and practice on comprehensive remediation of mud pumping disease[J]. Railway Engineering, 2001(6): 16-18.
- [6] ZHANG S, GAO F, HE X Z, et al. Experimental study of particle migration under cyclic loading: effects of load frequency and load magnitude[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16: 367-380.
- [7] INDRARATNA B, SINGH M, NGUYEN T T. The mechanism and effects of subgrade fluidisation under ballasted railway tracks[J]. Railway Engineering Science, 2020, 28(2): 113-128.
- [8] HUANG J J, SU Q, WANG W, et al. Field investigation and full-scale model testing of mud pumping and its effect on the dynamic properties of the slab track-subgrade interface[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2019, 233(8): 802-816.
- [9] 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.
- [10] 蔡袁强, 严舒豪, 曹志刚, 等. 交通荷载下粉质黏土路基翻浆冒泥机理试验[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2021, 51(5): 1742-1748.
CAI Yuan-qiang, YAN Shu-hao, CAO Zhi-gang, et al. Experiments to investigate mechanism of mud pumping of road base on silty clay soil under cyclic loading[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2021, 51(5): 1742-1748.
- [11] WANG T F, LUO Q, LIU M S, et al. Physical modeling of train-induced mud pumping in substructure beneath ballastless slab track[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 23(C): 100332-100332.