

DOI:10.11784/tdxbz202504031

交通荷载和降雨耦合作用下弱膨胀软土路基边坡 溜塌演化机理研究

雷华阳^{1,2,3,4}, 谢军¹, 冯双喜^{1,3,4}, 曹啸雷¹, 颜志雄⁵, 车百林⁶

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004;

3. 中国地震局地震工程综合模拟与城乡抗震韧性重点实验室, 天津 300350;

4. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300350;

5. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100000;

6. 中国铁路武汉局集团有限公司, 武汉 430000)

摘要: 中国铁路路基已进入建养并举的关键阶段, 面临交通荷载与极端降雨等耦合的复杂服役环境, 既有线弱膨胀软土路基易出现边坡溜塌病害。本文依托某弱膨胀土铁路路基工程, 结合粒子图像测速(PIV)技术, 自主研发了可视化弱膨胀软土路基边坡溜塌模型试验装置系统, 模拟在交通荷载与降雨耦合作用下弱膨胀软土路基边坡溜塌行为。通过分析不同位置的土压力值和沉降量变化规律, 捕捉不同时刻坡面 PIV 图片变化规律, 揭示了弱膨胀软土路基边坡溜塌演化机制。研究表明: 在交通荷载与降雨耦合作用下, 坡顶、坡脚和基底处土压力值随着加载时间和交通荷载应力增量值的增大而增大, 而对于坡面处土压力值呈现出初期增大后期降低的两阶段演化规律。沉降随着加载时间延长而增大, 在暴雨条件下不同位置处的沉降值与交通荷载应力增量值呈现线性增大的规律。通过 PIV 图片观察发现: 边坡溜塌机制为坡面位移随降雨历时增加而扩大, 形成冲蚀沟; 动荷载增大将加快边坡沉降和溜塌速度。本文研究成果为类似弱膨胀软土铁路路基边坡溜塌机理研究提供了理论支持, 对保障列车安全运营具有重要意义。

关键词: 弱膨胀土; 交通荷载; 降雨; 边坡溜塌; 演化机理

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)03-0251-10

Study on Slope Collapse Evolution Mechanism of Weakly Expansive Soft Soil Subgrade Under Coupled Action of Traffic Load and Rainfall

Lei Huayang^{1,2,3,4}, Xie Jun¹, Feng Shuangxi^{1,3,4}, Cao Xiaolei¹, Yan Zhixiong⁵, Che Bailin⁶

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

3. Key Laboratory of Earthquake Engineering Simulation and Seismic Resilience, China Earthquake Administration, Tianjin 300350, China; 4. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin 300350,

China; 5. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd.,

Beijing 100000, China; 6. China Railway Wuhan Group Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: The railway subgrade in China has entered a stage where construction and maintenance are carried out simultaneously, and it will face a complex service environment involving the coupling of traffic load and extreme rainfall. As a result, the existing weakly expansive soft soil subgrade is prone to slope collapse diseases. Based on a weakly expansive soil railway subgrade project and in combination with the particle image velocimetry (PIV) technology, a visualized model test device system for weakly expansive soft soil subgrade slope collapse was independently

收稿日期: 2025-04-27; 修回日期: 2025-09-06.

作者简介: 雷华阳(1974—), 女, 博士, 教授, leihuayang74@163.com.

通信作者: 冯双喜, shuangxi@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378363); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(N2023G008).

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52378363), the Science and Technology Research and Development Program of China State Railway Group Co., Ltd.(No. N2023G008).

developed in this paper, so as to simulate the behavior of slope collapse of weakly expansive soft soil subgrade under the coupled action of traffic load and rainfall. Through the analysis of variation laws of soil pressure and settlement at different locations and those of PIV images of the slope surface at different moments, the evolution mechanism of weakly expansive soft soil subgrade slope collapse was revealed. Results show that under the coupled action of traffic load and rainfall, the soil pressure at the top of the slope, the foot of the slope and the base increases with the increasing loading time and traffic load, while it shows a two-stage evolution law of increasing initially and then decreasing on the slope surface. The settlement increases with the loading time, and under the condition of extreme rainfall, the settlement values at different locations increase linearly with the traffic load stress increment. By means of observing the PIV images, the slope collapse mechanism is determined, i.e., the slope displacement will expand with an increase in rainfall duration, and erosion gullies are formed subsequently. In addition, when the dynamic load increases, both the slope settlement and slope collapse will be accelerated. The research results in this paper provide theoretical support for studies on the mechanism of slope collapse of similar weakly expansive soft soil railway subgrade, which is of significance for ensuring the safe operation of trains.

Keywords: weakly expansive soil; traffic load; rainfall; slope collapse; evolution mechanism

在“交通强国”、“一带一路”等国家战略支撑下,煤炭、矿石等大宗货物的远距离运输需求不断增长.中国重载铁路运量规模连续十年增长,重载货物列车提速已经成为中国铁路交通运输发展的必然趋势.铁路在长期服役阶段,往往面临着交通荷载、极端降雨等复杂的服役环境.在中国湖北、四川、江苏等地广泛分布着强度低、胀缩大、裂隙强等不良工程特性的弱膨胀软土.早前修建的部分铁路建设标准不高,常以弱膨胀软土为路堤填料.在复杂的服役环境条件下,弱膨胀软土路基段线路边坡溜塌病害屡见不鲜,如不及时处置边坡溜塌,将会导致整个边坡坍塌失稳.因此,探究交通荷载和降雨耦合作用下弱膨胀软土路基边坡溜塌演化机理对保障列车安全运营具有重要意义.

近年来,众多学者在考虑交通荷载条件下对铁路路基边坡稳定性及劣化机理进行了系统的研究^[1-6].周孝鑫等^[7]对京广线路基边坡因溜塌诱发的失稳灾害进行了现场调查测绘,确定其在交通荷载影响下失稳形式为深层滑移拉裂式,提出病害演化分为浅层滑移、深层迁移和深层滑移 3 个阶段.黄启友^[8]采用石灰改性加固处理蒙华铁路三荆段的膨胀土路基的高边坡工程,揭示了边坡溜塌加固机制,并指出石灰使膨胀土中黏土矿物成分减少,微观结构更加紧密,原状土的膨胀性大幅减弱. Jiang 等^[9]开展了在列车车速影响下的全尺寸模型试验研究,提出列车速度增大将使路基与轨道接触压力呈现“W”形状的分布模式.任佳丽等^[10]针对在交通荷载作用下某 25 m 高的长大裂隙膨胀土临时渠道边坡预应力伞形锚加固监测中存在的精度不高等问题,开展了室内物理模型试验,确定了影响渠坡溜塌的关键因素和加固方案的合

理性,给出了利用交通荷载作用下锚力监测作为膨胀土边坡溜塌状态的判别标准.然而,这些研究仅考虑了交通荷载单因素对路基边坡稳定性的影响.

此外,部分学者考虑了降雨条件对铁路路基边坡稳定性及劣化机理的影响.张锐等^[11]依托南宁铁路改柳南线工程,考虑了降雨对路基工程边坡溜塌的影响,提出了膨胀土加筋和格栅的稳定性措施,揭示了土工格栅加筋对膨胀土边坡的作用机制为“以柔治胀”,加筋后的路基边坡滑移破坏风险降低. Jian 等^[12]基于现场调查对广西南宁地区道路路基膨胀土沟槽溜塌及滑坡的形成机制及危害进行了研究,结果表明:交替的季风干湿使膨胀性土壤斜坡表面出现断裂,雨水渗透加快,稳定性降低. Dai 等^[13]结合模型试验模拟了在降雨条件下膨胀土路基的破坏模式,认为降雨仅使表层土壤饱和,随着坡面高度的增加,入渗深度、速度和饱和区域减少.膨胀土浅坡破坏主要是由于膨胀效应导致的膨胀土坡应力场重新分布.苏丕辉等^[14]采用大比例尺相似模型试验模拟了在降雨条件下钢管格栅膨胀土挡墙与常规结构的加固效果,指出钢管有效改善了墙体的受力,不仅显著降低了变形,而且可明显提高承载能力.然而,上述这些研究仅考虑了降雨这一因素的影响.

目前,大多相关研究通过单独考虑交通荷载或降雨对弱膨胀软土路基边坡溜塌现象的影响对处置措施开展研究,较少考虑在降雨与交通荷载耦合作用下的弱膨胀软土路基边坡溜塌机制.本文依托某弱膨胀软土铁路路基工程,结合粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术,自主研发了可视化弱膨胀软土路基边坡溜塌模型试验装置系统,用于模拟在动荷载与降雨耦合复杂服役环境下弱膨胀软土路

基边坡溜塌行为,分析在动荷载和暴雨耦合作用下路基边坡不同位置的土压力值和沉降量变化规律,基于PIV图片揭示弱膨胀软土路基边坡溜塌的演化机制.本文研究成果为类似弱膨胀软土铁路路基边坡溜塌机理研究提供重要的理论支持.

1 试验材料与方案

1.1 试验土样

试验土样取自于某既有线弱膨胀软土路基工程填料,取样深度范围为5~10 m.根据《土工试验方法标准》^[15]的规定,对土样的基本物理性质进行了测定,结果如表1所示.从表1中可以看出,试样膨胀力为0.48 kPa,自由膨胀率为45%,依据《膨胀土地区建筑技术规范》^[16]相关规定,试样为弱膨胀土.

表1 土样物理力学指标

Tab.1 Physical and mechanical indexes of soil sample

指标	数值
天然含水率 $\omega/\%$	20
相对密度 d_s	2.68
液限 $\omega_l/\%$	30
塑限 $\omega_p/\%$	17
最大干密度 $\rho_d/(g/cm^3)$	1.84
最优含水率 $\omega_{op}/\%$	14
膨胀力/kPa	0.48
自由膨胀率 $\delta/\%$	45

基于XRD衍射试验,获得了试样的矿物成分,如表2所示.从表2中可以发现,弱膨胀土的主要矿物成分为石英,黏土矿物成分主要为蒙脱石.

表2 试样矿物成分统计

Tab.2 Statistics of mineral composition of sample

矿物	质量分数/%
石英	45.7
钾长石	2.6
斜长石	5.8
伊利石	5.7
蒙脱石	38.4
白云石	0
方解石	0
赤铁矿	0.6
绿泥石	1.1

1.2 试验装置

为了模拟交通荷载和降雨耦合作用,自主研发了可视化弱膨胀软土路基边坡溜塌模型试验装置系统,如图1所示.该试验装置系统主要包括PIV设备、试验模型箱、人工降雨系统、加载系统、监测系统. PIV设备主要包括高清工业相机、相机支架和PIVlab图像分析软件.试样模型箱采用有机玻璃制作,模型箱

尺寸为800 mm × 600 mm × 700 mm.人工降雨系统主要由供水水桶、水泵和降雨喷头组成.将降雨喷头固定在模型箱上方,降雨喷头导管与水泵相连,通过调节阀门大小来控制降雨量.模型车与砝码组成加载系统,模型车上部可以放置砝码进行荷载施加,用于调节模拟交通荷载的大小.利用伺服电机控制模型车运行的速度.监测系统包括电脑、数据采集系统、微型土压力盒和红外线沉降测量器.



图1 可视化弱膨胀软土路基边坡溜塌模型试验装置系统

Fig.1 Visualized model test device system for weakly expansive soft soil subgrade slope collapse

1.3 试验方案及步骤

结合某路基工程边坡溜塌病害的实际工况,模型试验选取几何相似比为1:10.根据现场调查资料和湖北省襄阳市的降雨数据,降雨强度根据襄阳市多雨季节7月的降雨量汇总确定,可确定试验的降雨等级为暴雨.试验降雨持续时间设定为1 h,在此期间人工降雨喷嘴喷出控制水量.根据《降水量等级》^[17],24 h内降雨量范围为50.0~99.9 mm时,降雨视为暴雨.本研究中边坡模型的润湿表面积为0.24 m²,可据此计算出相应的降雨强度.试验期间控制的喷水量为20 kg/h,对应的降雨强度为暴雨(83.3 mm/d).

重点考虑不同动荷载大小对边坡溜塌的影响.试验荷载峰值为不同应力增量下的应力最大值,谷值为0.在路基面上施加荷载,根据列车车辆长度与运行速度计算确定加载频率为2 Hz,通过实测数据研究发现轴重为19.6~22.5 t的列车对路基面产生的最大动应力范围为35~185 kPa^[18].因此,室内模型试验共进行了4次试验,每次试验均加载5.1 kg,直至加载到20.4 kg,其中4个轮子总面积为20 cm²,得出每次施加应力增量为25 kPa.具体试验方案如表3所示.

试验步骤如下.

步骤1 将某铁路路基工程中获取的弱膨胀软土试样和粉质黏土进行晾晒并研磨,将研磨后的土样与

水进行拌合, 确保弱膨胀软土的含水率区间为 19% ~ 21%, 粉质黏土的含水率区间为 33% ~ 35%, 还原现场原状土含水率.

步骤 2 采用分层夯实再削坡的方法在模型箱内搭建路基边坡模型, 每次击实尽量保持力度相同. 从下往上依次为粉质黏土地基和弱膨胀软土路基填料边坡. 基于模型尺寸几何相似比, 粉质黏土地基厚度为 26.5 cm, 弱膨胀软土路基填料厚度为 16.5 cm, 坡比为 1 : 1.25.

步骤 3 搭建路基边坡模型时, 在坡顶、坡腰、坡底和粉质黏土地基等位置布置微型土压力传感器, 如图 2 所示, 依次反映坡顶土体、边坡腰部、边坡坡底和路基填土情况.

步骤 4 坡顶放置透水板, 并在透水板上方布置钢条用于模拟铁路轨道.

步骤 5 在模型箱正前方架设高清工业相机, 动态观察边坡溜塌情况. 同时连接人工降雨系统, 通过调节阀门大小, 控制降雨等级.

步骤 6 开始试验. 为模拟列车实际运行状况, 根据设计的荷载频率 2 Hz, 调试电机转速为 400 r/min, 控制模型车的运行速度, 使模型车在路基面上反复移动. 与此同时, 开启降雨设备.

步骤 7 打开电脑, 调试数据采集系统, 保障微型土压力盒正常工作. 利用红外线沉降测量器观测试验过程中坡顶 3 个位置(左 1、中 2、右 3)处的沉降, 监测频率为 3 次/min.

表 3 模型试验方案

Tab.3 Schemes for model test

试验方案编号	降雨时间/min	降雨等级	交通荷载应力增量/kPa
D1	60	暴雨	25
D2	60	暴雨	50
D3	60	暴雨	75
D4	60	暴雨	100

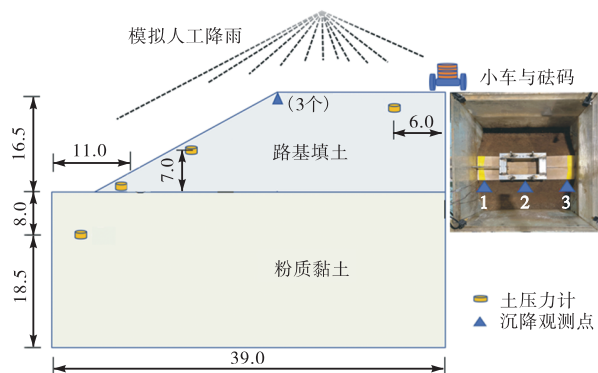


图 2 土应力计及沉降观测点布置(单位: cm)

Fig.2 Layout of soil stress meters and settlement observation points (unit: cm)

2 试验结果分析

2.1 路基土压力值演化规律

为了更好地说明路基土压力值演化的规律, 本文选取交通荷载应力增量为 25 kPa 为例进行说明, 如图 3 所示. 从图 3 中可以看出, 土压力值变化呈现出初始增长和稳定增长(或稳定衰减)两阶段变化特征. 在交通荷载和降雨耦合作用下, 在 0 ~ 8 min 初始阶段, 路基边坡不同位置处土压力值均呈现增加趋势. 超过 8 min 后, 路基在坡顶土压力值随时间延长而增大, 土压力值最大值约为 25 kPa, 这是因为在坡顶主要承受交通荷载和降雨的综合作用: 在加载初期, 水源并没有渗入土体中, 坡顶土压力增量值主要由交通荷载的循环作用引起, 雨水饱和效应仅贡献约 4.4% 的静压力增量, 动态附加应力是主导因素; 随着时间延长, 大量的雨水渗入到膨胀土路基中且荷载向路基传递, 导致坡顶土压力值增大. 数据反映在坡顶交通荷载的传递仍占有主导地位. 相反, 在坡腰位置的土压力值随着时间的延长而减小, 10 ~ 60 min 内土压力值从 17.0 kPa 衰减为 10.5 kPa, 这是因为随着雨水的渗入, 坡腰出现了滑塌, 并且滑塌现象随着降雨量的增加愈加明显, 导致土压力值减小. 坡脚位置处的土压力值随着时间的延长略微减小, 10 ~ 60 min 内土压力值从 5.0 kPa 衰减为 4.0 kPa. 坡脚位置处承受的交通荷载作用较小, 且出现“掉脚”现象. 坡底位置处土压力值初始阶段几乎为 0, 这是因为降雨和交通荷载都没对其产生影响. 然而, 随着时间的增加, 雨水在坡脚位置处聚集, 土压力值增大, 最大值为 4.0 kPa.

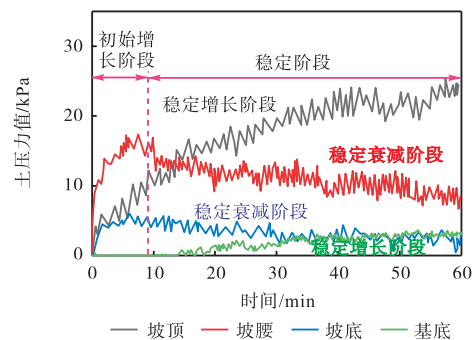


图 3 土压力值随时间变化曲线(交通荷载应力增量值为 25 kPa)

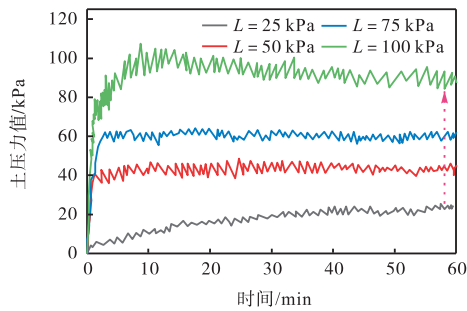
Fig.3 Curves of value of soil pressure varying with time (with traffic load stress increment of 25 kPa)

图 4 为不同交通荷载和降雨耦合作用下坡顶土压力值变化曲线. 从图 4(a)可以看出, 坡顶土压力值随时间呈现出明显的增长趋势. 在交通荷载应力增量值为 25 kPa 时, 土压力值在 0 ~ 8 min 的初始阶段

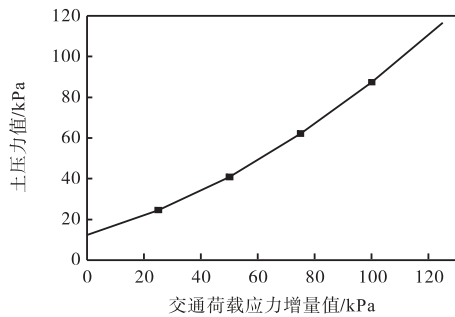
迅速增加, 增长速率较快, 随后进入稳定增长阶段, 最终土压力最大值达到约 25.0 kPa. 当交通荷载应力增量值为 100 kPa 时, 土压力值在 0~8 min 的初始阶段迅速增加, 土压力值可达 111.0 kPa, 随后土压力值稳定在 98 kPa. 与交通荷载应力增量值为 25 kPa 时相比, 土压力值约增大 2.92 倍. 这表明在交通荷载和降雨的耦合作用下, 坡顶土体受到的荷载影响逐渐累积, 随着时间的推移, 土压力值不断增加, 且增长趋势较为稳定. 这是因为坡顶土体在持续受到荷载作用下, 其受力状态不断发生变化, 稳定性逐渐降低. 为了更好地评价坡顶土压力值随交通荷载变化规律, 采用 2 次多项式对其进行拟合, 拟合情况如图 4(b) 所示, 拟合公式为

$$\begin{cases} E = 0.0035L^2 + 0.3958L + 12.395 \\ R^2 = 0.9891 \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 为土压力值, kPa; L 为交通荷载应力增量值, kPa.



(a) 坡顶土压力值随时间变化曲线



(b) 坡顶土压力值与交通荷载应力增量值拟合曲线

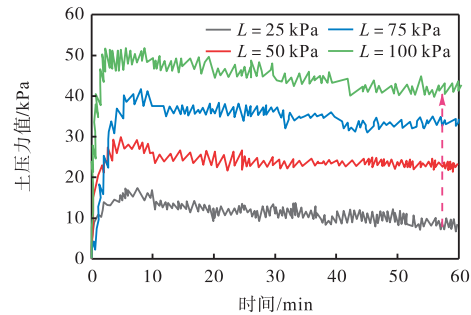
图 4 不同交通荷载应力增量和降雨耦合作用下坡顶土压力值变化曲线

Fig.4 Curves of value of soil pressure on top of a slope under coupling effects of different traffic load stress increments and rainfall

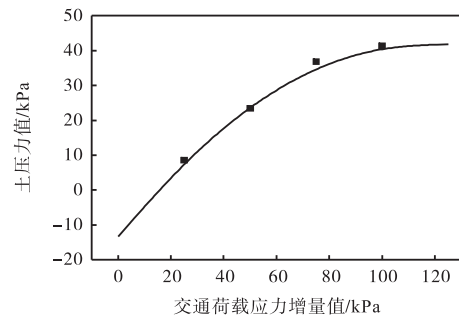
图 5 为不同交通荷载和降雨耦合作用下坡腰土压力值变化曲线. 从图 5(a)可以看出, 坡腰土压力值随时间呈现先增加后减小的变化规律. 当交通荷载应力增量值为 25 kPa 时, 在 0~8 min 的初始阶段, 土压力值从约 0 kPa 增加到 17.0 kPa, 随后在 8~

60 min 的时间段内逐渐减小, 最终降至 10.5 kPa. 当交通荷载应力增量值为 100 kPa 时, 在 0~8 min 的初始阶段, 土压力值从约 0 kPa 增加到 52.0 kPa, 随后土压力值稳定在 48.0 kPa. 通过对比图 4(a) 可以发现, 与坡顶土压力值相比, 坡腰处的土压力值明显降低, 约降低 50%, 这表明在降雨初期雨水开始渗入坡腰土体, 导致土体孔隙水压力变化, 使得土压力值有所增加. 随着降雨的持续进行, 坡腰土体出现滑塌现象, 土体结构逐渐破坏, 土压力值随之减小. 这是因为在降雨和交通荷载的耦合作用下, 坡腰土体稳定性受到较大影响, 且土体的破坏程度随着时间的推移逐渐加剧, 导致土压力值降低. 采用 2 次多项式对坡腰土压力值随交通荷载应力增量值变化规律进行拟合, 拟合情况如图 5(b) 所示, 拟合公式为

$$\begin{cases} E = 0.0042L^2 + 0.966L - 13.395 \\ R^2 = 0.9891 \end{cases} \quad (2)$$



(a) 坡腰土压力值随时间变化曲线

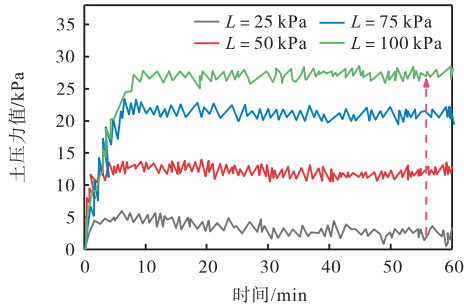


(b) 坡腰土压力值与交通荷载应力增量值拟合曲线

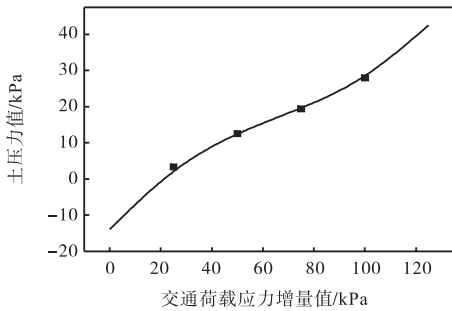
图 5 不同交通荷载应力增量和降雨耦合作用下坡腰土压力值变化曲线

Fig.5 Curves of value of soil pressure in the lower slope under coupling effects of different traffic load stress increments and rainfall

图 6 为不同交通荷载和降雨耦合作用下坡脚土压力值变化曲线. 从图 6(a)可以看出, 当交通荷载应力增量值为 25 kPa 时, 坡脚土压力值随时间的变化相对较为平缓. 在 0~8 min 的初始阶段, 土压力值从约 0 kPa 略微增加到 5.5 kPa, 随后在 10~60 min 的时间段内逐渐减小, 最终降至 4.0 kPa. 当交通荷载应



(a) 坡脚土压力值随时间变化曲线



(b) 坡脚土压力值与交通荷载应力增量值拟合曲线

图 6 不同交通荷载应力增量和降雨耦合作用下坡脚土压力值变化曲线

Fig.6 Curves of value of soil pressure at the foot of slope under coupling effects of different traffic load stress increments and rainfall

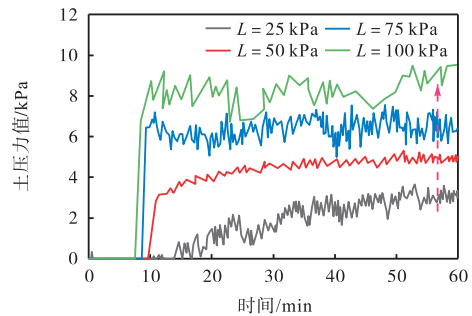
力增量值为 100 kPa 时,在 0~8 min 的初始阶段,土压力值可达 28.0 kPa,随后土压力值稳定 27.0 kPa.这是由于坡脚土体在交通荷载和降雨的耦合作用下,交通荷载动应力传递随着深度增加而减小,其土压力值变化相对较小,但整体呈现略微减小的趋势.此外,由于坡脚土体在降雨过程中受到雨水的冲刷和浸泡,土体强度降低,同时交通荷载对其影响相对较小,导致土压力值逐渐减小.这说明坡脚土体在耦合作用下虽然相对较为稳定,但仍受到一定的影响,其稳定性需要关注.采用 3 次多项式对坡脚土压力值随交通荷载应力增量值的变化规律进行拟合,拟合情况如图 6(b)所示,拟合公式为

$$\begin{cases} E = 0.000\ 05L^3 - 0.009\ 9L^2 + 0.908\ 1L - 13.94 \\ R^2 = 0.989\ 3 \end{cases} \quad (3)$$

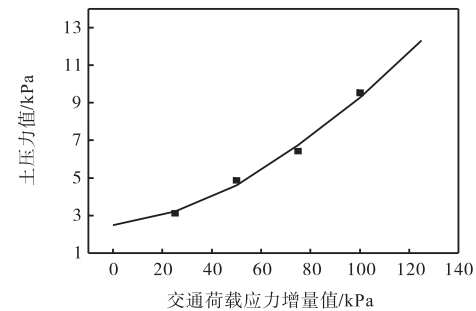
图 7 为不同交通荷载和降雨耦合作用下基底土压力值变化曲线.从图 7(a)可以看出,基底土压力值随时间的变化较为稳定.当交通荷载应力增量值为 25 kPa 时,在 0~8 min 的初始阶段,土压力值几乎为 0.随着时间的推移,土压力值逐渐增加,在 10~60 min 的时间段内,土压力值从接近 0 增加到约 2.4 kPa.当交通荷载应力增量值为 100 kPa 时,在 0~8 min 的初始阶段,土压力值同样为 0,随后土压力值稳定在 8.3 kPa.这表明基底土体在降雨和交通

荷载的耦合作用下,其土压力值变化相对滞后,且增长速率较慢.这可能是由于基底土体距离降雨影响区域较远,降雨对其影响较小,同时交通荷载的传递也相对较弱,导致土压力值变化不明显,说明基底土体在耦合作用影响下相对较为稳定,但随着降雨的持续和土体内部应力的传递,土压力值仍会逐渐增加.采用 2 次多项式对基底土压力值随交通荷载应力增量值的变化规律进行拟合,拟合情况如图 7(b)所示,拟合公式为

$$\begin{cases} E = 0.000\ 5L^2 + 0.015\ 7L + 2.477\ 5 \\ R^2 = 0.993\ 3 \end{cases} \quad (4)$$



(a) 基底土压力值随时间变化曲线



(b) 基底土压力值与交通荷载应力增量值拟合曲线

图 7 不同交通荷载应力增量和降雨耦合作用下基底土压力值变化曲线

Fig.7 Curves of value of base soil pressure under coupling effects of different traffic load stress increments and rainfall

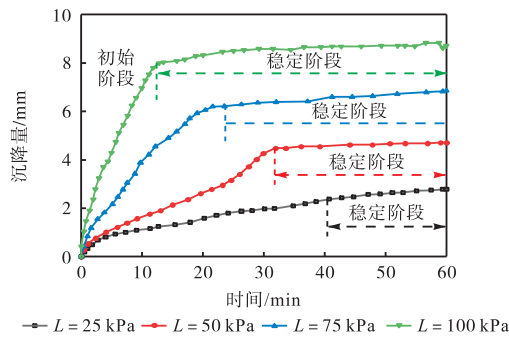
2.2 路基沉降量变化规律分析

将沉降监测点数据进行加权平均,获得不同交通荷载和降雨耦合作用下边坡沉降量曲线,如图 8 所示.从图 8(a)中可以看出,沉降量随着加载时间延长而增大,也随着交通荷载应力增量值的增大而增大,并呈现出明显的阶段性变化特征.当交通荷载应力增量值为 25 kPa 时,在初始阶段(0~40 min)沉降量快速增长,从 0 增大为 2.0 mm,增长速率较快,这主要是由于降雨初期雨水快速渗入边坡表层土体,导致土体孔隙水压力变化,同时交通荷载的施加使土体受到额外应力,土体结构开始变形.在稳定阶段(40~

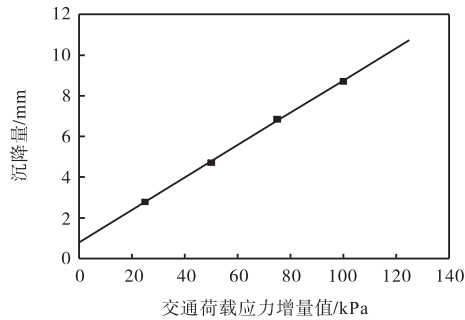
60 min), 沉降量增长速率降低甚至趋于稳定, 沉降量约为 2.8 mm. 随着交通荷载的增大, 初始阶段时间缩短. 当交通荷载应力增量值为 100 kPa 时, 在初始阶段 (0 ~ 10 min) 沉降量迅速增长, 从 0 mm 增大至 8.0 mm. 在 10 ~ 60 min 内, 降雨持续但渗入速度和范围趋于稳定, 土体内部应力调整也逐渐平衡, 沉降量稳定或出现微小波动, 沉降量约为 8.3 mm. 与交通荷载应力增量值为 25 kPa 时相比, 沉降量增大了 1.96 倍. 图 8(b) 为沉降量与交通荷载应力增量值的拟合曲线. 从图 8(b) 中可以看出, 沉降量与交通荷载应力增量值之间呈现出较为明显的线性关系, 拟合公式为

$$\begin{cases} s = 0.0797L + 0.78 \\ R^2 = 0.9933 \end{cases} \quad (5)$$

式中 s 为坡顶沉降, mm.



(a) 沉降量时程曲线



(b) 沉降量与交通荷载应力增量值拟合曲线

图 8 不同交通荷载应力增量和降雨耦合作用下边坡沉降量曲线

Fig.8 Slope settlement curves under coupling effects of different traffic load stress increments and rainfall

2.3 边坡溜塌机制分析

当交通荷载应力增量值为 100 kPa 时, 降雨结束后边坡溜塌情况如图 9 所示. 从图 9 中可以看出, 经过暴雨和不同交通荷载强度作用后, 边坡坡面出现了明显的破坏特征, 具体表现为坡面产生了多条冲沟, 冲沟中的土体持续向下流失, 导致坡面局部区域的土体发生了滑坡现象. 这是由于降雨导致土体饱和后, 雨水沿着坡面径流冲刷土体, 形成冲蚀沟. 同时, 坡

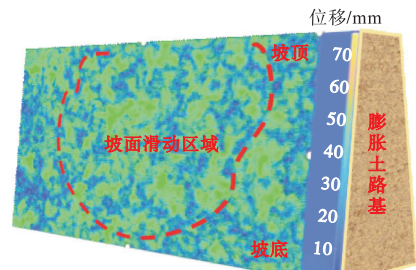
顶区域的土体也出现了明显的挤出和破坏现象, 表明在交通荷载和降雨的耦合作用下边坡的稳定性受到了严重的影响, 导致土体发生位移和土体流失.



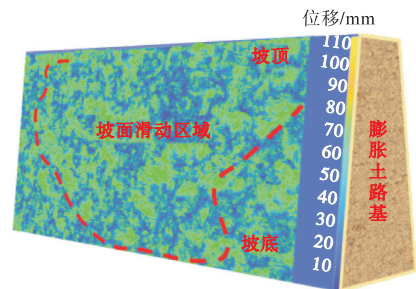
图 9 降雨结束后边坡溜塌

Fig.9 Slope collapse after rainfall ends

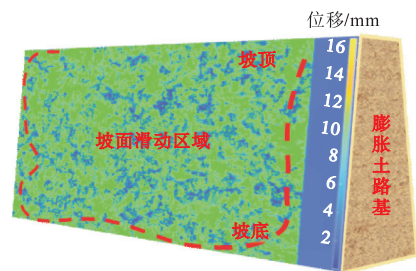
为了更好地描述不同时间下边坡溜塌演化机制, 本文借助 PIVlab 软件对坡面形态图片进行处理, 通过分析试验过程中的颗粒位移变化, 并将颗粒位移大于 2 mm 的区域勾勒显示为坡面破坏滑动区域, 获得边坡溜塌劣化发展变化情况. 图 10 为交通荷载应力增量为 25 kPa 时路基边坡溜塌 PIV 分析. 从图 10 中



(a) 15 min 后坡面位移



(b) 37 min 后坡面位移



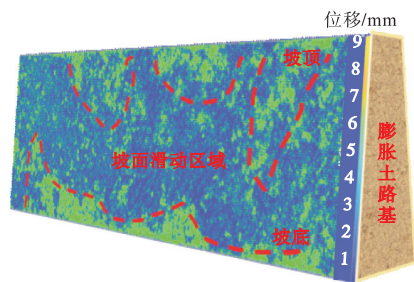
(c) 58 min 后坡面位移

图 10 当交通荷载应力增量值为 25 kPa 时路基边坡溜塌 PIV 分析

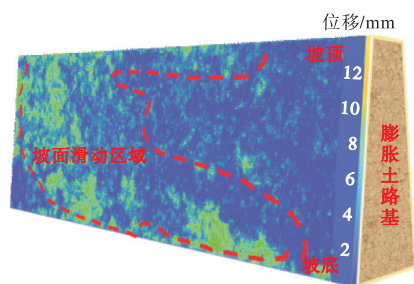
Fig.10 PIV photo analysis of subgrade slope collapse under traffic load stress increment of 25 kPa

可以看出,随着降雨和动荷载的持续作用,边坡表层土体逐渐被雨水软化并发生位移.在加载 15 min 时,坡面位移较小.随着时间推移,在 37 min 和 58 min 时坡面位移逐渐增大,最大位移达到 2.8 mm,表明在较小的交通荷载下,边坡的破坏主要集中在坡顶区域,且破坏过程较为缓慢.随着降雨的持续,坡顶土体逐渐被挤出,导致坡面出现明显的位移变化,反映出边坡在降雨和动荷载耦合作用下的稳定性逐渐降低.

图 11 为当交通荷载应力增量值为 50 kPa 时路基边坡溜塌 PIV 分析.从图 11 中可以看出,与 25 kPa 的荷载条件相比,在 50 kPa 交通荷载应力增量值下边坡的破坏更为迅速和显著.在加载 10.2 kg 的条件下,16 min 后坡面位移就达到了 2.1 mm,42 min 后位移进一步增大至 4.2 mm,表明边坡的稳定性随着交通荷载的增加显著下降,坡顶土体被快速挤出,导致坡面位移迅速增大.这种快速的位移变化反映出在较大的交通荷载下,边坡更容易受到降雨和动荷载的耦合作用影响,从而加速了边坡溜塌的破坏过程.



(a) 16 min 后坡面位移



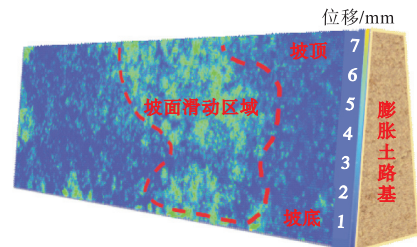
(b) 42 min 后坡面位移

图 11 当交通荷载应力增量值为 50 kPa 时路基边坡溜塌 PIV 分析

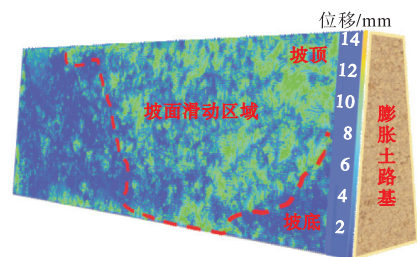
Fig.11 PIV photo analysis of subgrade slope collapse under traffic load stress increment of 50 kPa

图 12 为当交通荷载应力增量值为 75 kPa 时路基边坡溜塌 PIV 分析.从图 12 中可以看出,18 min 后坡面出现了 4.3 mm 的位移,显示出更大的交通荷载应力增量值对边坡的破坏作用更为剧烈.然而,由于坡顶土体部分挤出后模型车轻微脱轨,导致 42 min 后位移达到 7.8 mm.尽管如此,坡底的位移开始逐渐增大,表明边坡的破坏不仅局限于坡顶,也逐渐向坡

底扩展.这进一步说明了在较高的交通荷载应力增量值下,边坡的稳定性受到严重威胁,且破坏过程更为复杂,不仅涉及坡顶的土体挤出,还可引发坡底土体的不稳定.



(a) 18 min 后坡面位移

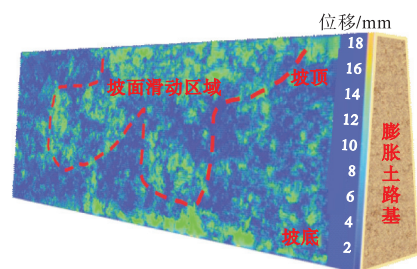


(b) 42 min 后坡面位移

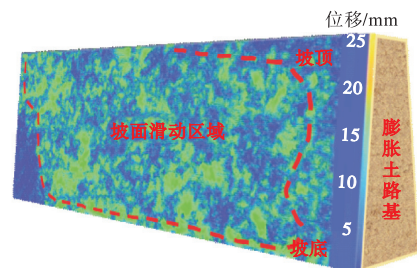
图 12 当交通荷载应力增量值为 75 kPa 时路基边坡溜塌 PIV 分析

Fig.12 PIV photo analysis of subgrade slope collapse under traffic load stress increment of 75 kPa

图 13 为当交通荷载应力增量值为 100 kPa 时路基边坡溜塌 PIV 分析.从图 13 中可以看出,34 min 后,位移约为 8.1 mm,冲沟的数量相对较少.50 min



(a) 34 min 后坡面位移



(b) 50 min 后坡面位移

图 13 当交通荷载应力增量值为 100 kPa 时路基边坡溜塌 PIV 分析

Fig.13 PIV photo analysis of subgrade slope collapse under traffic load stress increment of 100 kPa

后,位移稳定在 8.3 mm,边坡上出现了多条明显的冲沟,并逐渐向坡底延伸.这主要是由于坡脚处雨水长期集聚且未及时排空,加上边坡形态特点和较大的交通荷载作用,导致坡脚处极易形成应力集中.在坡面与坡底的双重水作用下,膨胀变形发展迅速,坡脚处形成破坏带,导致上部土体失去支撑而下滑.这种现象表明,在极端交通荷载和降雨条件下,边坡溜塌的破坏不仅迅速而且范围广泛,坡脚的破坏进一步加剧了边坡的整体失稳,反映出边坡在这种耦合作用下的极端脆弱性.

此外,通过对比分析图 11~图 13,可以发现膨胀土坡面位移呈初期缓慢后期加速的特征,与蒙脱石吸水膨胀速率(0.12 mm/min)和裂隙扩展速率(0.05 mm/min)耦合作用一致.坡脚处膨胀土因雨水集聚形成膨胀软化带,导致坡脚位移滞后但增幅更大,如在 100 kPa 荷载应力增量值下 42 min 后位移约为 7.8 mm,较坡顶处对应值高 6.4%.弱膨胀土的膨胀性通过吸水膨胀应力(贡献约 1.9%土压力增量)和裂隙闭合-软化效应,显著加剧了坡顶土压力增长与坡面位移发展.干湿循环进一步放大膨胀-收缩变形,是边坡溜塌后期加速的关键诱因.

3 结论

本文依托某弱膨胀土铁路路基工程,结合 PIV 技术,自主研发了可视化弱膨胀软土路基边坡溜塌模型试验装置系统,揭示了在交通荷载和降雨耦合作用下弱膨胀软土路基边坡溜塌演化机理,具体结论如下.

(1) 在交通荷载与降雨的耦合作用下,坡顶、坡脚和基底处的土压力值随加载时间的延长和交通荷载应力增量值的增大而显著增加.当交通荷载应力增量值为 100 kPa 时,坡顶土压力值在加载初期增长缓慢,随后随着雨水渗入逐渐增大,最大值可达 111 kPa;坡脚土压力值随时间略有减小,从 28.0 kPa 衰减至 27.0 kPa;基底土压力值在降雨初期几乎为 0,随后逐渐增加至 8.3 kPa.坡面处呈现出初期增大后期降低的两阶段演化规律:当交通荷载应力增量值为 25 kPa 时,在 0~8 min 的初始阶段,土压力值从约 0 kPa 略微增加到 5.5 kPa,随后在 10~60 min 的时间段内逐渐减小,最终降至 4 kPa;当交通荷载应力增量值为 100 kPa 时,在 0~8 min 的初始阶段,土压力值可达 28.0 kPa,随后土压力值稳定在 27.0 kPa.沉降量随着时间延长而增大,当交通荷载应力增量值为 100 kPa 时,沉降量可达 8.3 mm.在暴雨条件下不同位置处的沉降值与交通荷载值呈现线性增大趋势.

(2) 通过 PIV 图像分析,本文进一步揭示了边坡溜塌的演化机制.边坡坡面位移随降雨历时延长而扩大,冲蚀沟逐渐形成.当交通荷载应力增量值为 25 kPa 时,坡面位移从 15 min 后的 0.8 mm 增加到 58 min 后的 2.8 mm;当交通荷载应力增量值为 100 kPa 时,坡面位移在 18 min 后已达 8.1 mm,并在 42 min 后稳定在 8.3 mm.随着交通荷载应力增量值的增加,边坡溜塌的破坏速度显著加快,坡面位移迅速增大.此外,边坡破坏不仅局限于坡顶,也逐渐向坡底扩展,坡脚处的破坏进一步加剧了边坡的整体失稳.

本文着重探究了在交通荷载和降雨影响下路基边坡的溜塌机制,未充分讨论比尺效应和模型箱边界条件对边坡溜塌的干扰影响,类似问题将在后续研究中进一步探讨.

参考文献:

- [1] 雷华阳,万勇峰,冯双喜.不同潮汐水位下深厚滩涂软土路基长期沉降规律及预测研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2022,55(6):584-595.
Lei Huayang, Wan Yongfeng, Feng Shuangxi. Study on long-term settlement law and prediction of deep beach soft soil subgrade under different tidal levels[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2022, 55(6): 584-595 (in Chinese).
- [2] 刘观仕,陈永贵,曾宪云,等.环境湿度与温度对压实膨胀土裂隙发育影响试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(2):260-268.
Liu Guanshi, Chen Yonggui, Zeng Xianyun, et al. Effects of ambient air humidity and temperature on crack development of compacted expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 260-268 (in Chinese).
- [3] 高志傲,孔令伟,王双娇,等.循环荷载下不同裂隙方向饱和原状膨胀土动力特性试验研究[J].岩土工程学报,2025,47(4):736-748.
Gao Zhi'ao, Kong Lingwei, Wang Shuangjiao, et al. Experimental study on dynamic characteristics of saturated undisturbed expansive soil with different fissure orientations under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(4): 736-748 (in Chinese).
- [4] 庄心善,赵汉文,陶高梁,等.循环荷载下弱膨胀土累积变形与动强度特性试验研究[J].岩土力学,2020,41(10):3192-3200.
Zhuang Xinshan, Zhao Hanwen, Tao Gaoliang, et al.

- Accumulated deformation and dynamic strength properties of weak expansive soil under cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(10): 3192-3200(in Chinese).
- [5] 商拥辉, 徐林荣, 蔡雨. 浸水环境下重载铁路改良土路基动力特性研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(8): 2739-2745, 2755.
Shang Yonghui, Xu Linrong, Cai Yu. Study on dynamic characteristics of cement-stabilized expansive soil subgrade of heavy-haul railway under immersed environment[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2739-2745, 2755(in Chinese).
- [6] 庄心善, 赵汉文, 王俊翔, 等. 循环荷载下重塑弱膨胀土滞回曲线形态特征定量研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(6): 1845-1854.
Zhuang Xinshan, Zhao Hanwen, Wang Junxiang, et al. Quantitative research on morphological characteristics of hysteretic curves of remolded weak expansive soil under cyclic loading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(6): 1845-1854(in Chinese).
- [7] 周孝鑫, 谭钦文, 林志果, 等. 京广铁路 K1219 路基土质边坡深层滑移失稳机制与整治对策[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(6): 85-94.
Zhou Xiaoxin, Tan Qinwen, Lin Zhiguo, et al. Deep sliding instability mechanism and remediation measures: The subgrade soil slope along the Jingguang Railway at K1219[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(6): 85-94(in Chinese).
- [8] 黄启友. 重载铁路膨胀土路基石灰掺和改性加固及其稳定性研究[J]. *水利水电快报*, 2024, 45(4): 78-84.
Huang Qiyu. Study on reinforcement and stability of lime blending of expansive soil subgrade for heavy-haul railway[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2024, 45(4): 78-84(in Chinese).
- [9] Jiang H G, Bian X C, Jiang J Q, et al. Dynamic performance of high-speed railway formation with the rise of water table[J]. *Engineering Geology*, 2016, 206: 18-32.
- [10] 任佳丽, 熊勇, 程永辉, 等. 基于原位监测和模型试验的膨胀土高边坡稳定性分析[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(增 2): 183-187, 219.
Ren Jiali, Xiong Yong, Cheng Yonghui, et al. Stability analysis of high expansive soil slopes based on in-situ monitoring and model tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(Suppl 2): 183-187, 219(in Chinese).
- [11] 张锐, 周豫, 兰天, 等. 高速铁路土工格栅加筋膨胀土边坡作用机制[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(1): 1-12.
Zhang Rui, Zhou Yu, Lan Tian, et al. Action mechanism of geogrid reinforced expansive soil slope in high-speed railway[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(1): 1-12(in Chinese).
- [12] Jian X, Zha X D, Zhang H R, et al. Research on the damaging mechanisms of expansive soil in subgrade[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2024, 31(11): 2362-2369.
- [13] Dai Z J, Chen S X, Li J. Physical model test of seepage and deformation characteristics of shallow expansive soil slope[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79: 4063-4078.
- [14] 苏丕辉, 陈仕阔, 赵晓彦, 等. 南昆铁路钢管格栅膨胀土挡墙边坡加固机理模型试验研究[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(3): 658-666.
Su Pihui, Chen Shikuo, Zhao Xiaoyan, et al. Model test on reinforcement mechanism of geogrid-steel tube expansive soil retaining wall for slope stability of Nankun railway[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(3): 658-666(in Chinese).
- [15] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
GB/T 50123—2019 Standard for Geotechnical Testing Method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019(in Chinese).
- [16] GB 50112—2013 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
GB 50112—2013 Technical Code for Buildings in Expansive Soil Regions[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013(in Chinese).
- [17] GB/T 28592—2012 降水量等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
GB/T 28592—2012 Grade of Precipitation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012(in Chinese).
- [18] 李子春. 轨道结构垂向荷载传递与路基附加动应力特性的研究[D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2000.
Li Zichun. Study on the Vertical Load Transmission Through the Track Structure and the Characteristics of Subgrade Dynamic Stresses[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2000(in Chinese).

(责任编辑:武立有)