



引文格式: 李世雄, 张登飞, 谷琪, 等. 灌溉区铁路黄土路基的动残余变形特性试验研究[J]. 西北地质, 2026, 59(2): 128–138. DOI: 10.12401/j.nwg.2025084

Citation: LI Shixiong, ZHANG Dengfei, GU Qi, et al. Experimental Study on Dynamic Residual Deformation Characteristics of Loess Railway Subgrade in Irrigation Areas[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(2): 128–138. DOI: 10.12401/j.nwg.2025084

灌溉区铁路黄土路基的动残余变形特性试验研究

李世雄¹, 张登飞^{1,*}, 谷琪², 李治嘉¹, 王博³

(1. 西北大学地质学系, 大陆动力与早期生命国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 3. 延安市非常规天然气有限公司, 陕西 延安 716099)

摘要: 黄土高原铁路网常态化穿越高密度农田灌溉廊带, 路基持续累积工后沉降超限, 严重威胁铁路毫米级平顺管控要求, 对列车运营安全提出重大挑战。本研究聚焦该区域农田灌溉常态化与铁路路基稳定性要求的突出矛盾, 基于宝中线铁路典型工点的现场调查和室内动三轴试验, 查明灌溉区铁路黄土路基沉降的成因, 揭示黄土湿化后的动残余变形特性并提出防控阈值。研究表明, 周期性灌溉导致路基土体的水分波动叠加长期列车循环动载是引发严重沉降的主要原因; 通过建立考虑排水条件的列车荷载波形模拟对比试验, 发现半正弦波荷载作用下的残余应变较常规正弦波降低了 15%~20%, 证实其更符合实际列车动载特征; 提出了考虑固结应力、动应力幅值和振动周次影响的黄土动残余应变模型, 对实际灌溉区的工点沉降初步预测与实际基本相符。研究成果为黄土区铁路路基长期沉降预测提供了理论依据, 对完善振动-渗流耦合作用下的路基病害的全生命周期安全评估具有重要工程价值。

关键词: 黄土高原铁路路基; 动残余变形特性; 半正弦波; 累积沉降; 全生命周期安全评估

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)02-0128-11

Experimental Study on Dynamic Residual Deformation Characteristics of Loess Railway Subgrade in Irrigation Areas

LI Shixiong¹, ZHANG Dengfei^{1,*}, GU Qi², LI Zhijia¹, WANG Bo³

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Geo-Hazards in Loess Area, Ministry of Natural Resources, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Yan'an Unconventional Natural Gas Co., Ltd, Yan'an 716099, Shaanxi, China)

Abstract: The railway network in the Loess Plateau routinely traverses high-density farmland irrigation corridors, where the subgrade continuously accumulates excessive post-construction settlement, severely threatening the millimeter-level smoothness control requirements of railways and posing significant challenges to train oper-

收稿日期: 2025-03-16; 修回日期: 2025-05-21; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金项目(42027806、42372324、41907233)联合资助。

作者简介: 李世雄(1999-), 男, 硕士, 主要从事黄土力学特性研究。E-mail: lishixiong@stumail.nwu.edu.cn。

* 通讯作者: 张登飞(1987-), 男, 教授, 主要从事黄土动力灾害与防控科研与教学工作。E-mail: dfzhang87@nwu.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

ation safety. This study addresses the prominent conflict between routine farmland irrigation practices and the stability requirements of railway subgrades in this region. Through field investigations at a typical site along the Baoji-Zhongwei Railway and dynamic triaxial laboratory tests, the causes of subsidence in loess subgrades under irrigation were identified, and the dynamic residual deformation characteristics of loess after wetting were revealed, along with proposed prevention-control thresholds. The research demonstrates that periodic irrigation-induced moisture fluctuations in the subgrade soil, combined with long-term cyclic train loads, are the primary drivers of severe settlement. By conducting comparative simulation tests of train load waveforms under varying drainage conditions, it was found that the residual strain under semi-sinusoidal wave loads decreased by 15%~20% compared to conventional sinusoidal waves, confirming that semi-sinusoidal waves better reflect real-world train dynamic load characteristics. A dynamic residual strain model for loess was established, incorporating consolidation stress, dynamic stress amplitude, and vibration cycles. Preliminary predictions of subsidence in actual irrigation zones using this model aligned well with field observations. The findings provide a theoretical foundation for long-term settlement prediction of railway subgrades in loess regions and hold significant engineering value for advancing lifecycle safety assessments of subgrade defects under coupled vibration-seepage interactions.

Keywords: loess plateau railway subgrade; dynamic residual deformation characteristics; half-sine wave; cumulative settlement; lifecycle safety assessment

随着铁路运输向高速化、重载化发展,既有线路面临提速增密、轴重提升等多重压力,地质环境脆弱的山区铁路频发地质灾害事件,严重威胁运营安全。近20年间全球范围内已发生多起触目惊心的灾害事故:2022年贵广高铁因隧道口泥流盖轨导致动车脱线,造成1死8伤;2021年南同蒲铁路路基垮塌致使列车悬空;2020年京广铁路边坡滑移引发车厢脱轨致1死4重伤;2020年成渝线、法德TGV高铁等多起边坡失稳事故均造成列车倾覆。统计表明,此类灾害多表现为泥流堆积盖轨、边坡溜塌挤轨、路基沉陷拉轨和河流冲刷悬轨模式,其突发性与破坏性凸显全生命周期铁路地质灾害防控研究的紧迫性,亟需从发灾机制、预警阈值与防控技术层面建立系统性解决方案。

深入剖析灾害诱因发现,除降雨等环境因素外,长期行车振动对岩土体稳定性的累积损伤不容忽视。研究表明,铁路沿线边坡与路基持续承受等效3~4级地震强度的机车振动荷载(简文彬等,2016),这种长持时、小振幅的振动通过土体动力响应诱发渐进性破坏。Pietrafitta滑坡(Guerriero et al., 2021)、上海地铁1号线路基沉降(王常晶,2006)、日本东海道新干线路基沉降(杨广庆,1998)和宝中线中卫段路基沉降(赵蒙,2021)等现场监测均已证实,周期性振动会显著加剧边坡滑移与地基变形。对于具有强烈的振敏性与水敏性的黄土地区,行车振动及其与降雨入渗的

交互作用愈加不可忽视。二者共同作用下,会加速黄土体的开裂、孔隙水气迁移、斜坡表面崩解与失稳及其地基层部沉降,产生了振动促裂、促渗、促崩、促滑和促沉的“五促效应”(王家鼎等,2021)。黄土动力特性研究成为此类铁路灾害防控的关键科学问题。

既有黄土动力特性研究多依托动三轴试验体系,经历了从地震荷载向交通荷载的范式拓展。早期研究聚焦地震作用(李又云等,2009;王志杰等,2011),系统揭示了含水率、围压、动应力幅值等参数对动剪切模量(王谦等,2019)、阻尼比(陈存礼等,2014)及残余应变(Yang et al., 2020)的影响机制,并建立了初始剪应力-破坏模式关联模型(Liu et al., 2023)。随着高速铁路和重载铁路的发展,研究扩展到交通荷载下黄土的长期劣化性能,发现了循环荷载引发的土体结构重组会累积塑性变形(Wang et al., 2020),且刚度软化程度与动应力水平呈非线性关系(曾垂青等,2022)。然而,现行试验方法存在显著局限:①沿用“短持时、大振幅”地震研究的等幅正弦波连续加载模式,忽略了“长持时、小振幅”的真实列车荷载的单向压应力半正弦波特征(谷天峰等,2009;万战胜等,2011);②残余应变模型多基于不排水条件(Xiao et al., 2011),难以反映长期运营中排水条件下的孔隙水消散过程。这些缺陷导致现有理论体系无法准确刻画交通荷载特有的“长持时-波形特异性”属性,对黄土动力响应的实质影响。

基于此,本研究聚焦黄土高原灌溉区铁路路基沉陷问题,通过地质调查厘清沉陷的成因与特征,继而采用湿化饱和后原状黄土开展考虑波形特征(半正弦波/等幅正弦波对比)与固结压力影响的动三轴试验,探讨波形特征以及初始固结压力对黄土体残余应变发展规律的影响程度,建立考虑排水条件与真实波形的累积变形预测模型。研究成果可为精细化评估列车振动诱发的路基长期沉降提供理论支撑,对完善黄土区铁路灾害防控技术体系具有重要工程意义。

1 既有铁路黄土路基沉陷现场调查

本研究采用多尺度工程地质调查方法、无人机航测和钻孔取样等技术,对宝中铁路(陕西宝鸡—宁夏中卫)沿线 135 km 典型灌溉病害区段开展系统性调查。重点研究六盘山北麓固原段黄土塬—梁过渡带特殊地貌单元下,农业灌溉—列车振动耦合作用诱发的新型路基病害发育规律。调查揭示 3 个关键工程地质矛盾。

(1)灌溉制度与路基水稳性的时空冲突。在宁夏固原地区,该地区降雨稀少且多为夏季集中短时间的强降雨,土地干旱,农户不得不依靠引黄河支流水源

进行农田灌溉,而火车线路不得不穿越村庄耕地(图 1),沿线两侧多为路堤,较少有全程布置防水、排水措施。根据实地调查发现,调查区年均降水量不足 400 mm,但集中式漫灌年均水量达 $1.8 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (3 次/年,分别在 3 月、6 月和 11 月;单次灌水深度 50 cm 持续 24 h),长期灌溉渗流导致路基坡脚含水率从天然状态(12%~15%)骤增至 28%~32%(图 1),地下水为从枯水期的 8~17.5 m,骤升到 4.1~16 m,水位抬升高达 2~10 m;现场钻孔取样发现路基土体形成了软弱层,近乎流态—软塑状态,硬塑和软塑层界限分明(图 2),造成路线多出路基沉降严重段,为维持铁路的正常运营部分桩位道床垫高达 2 m 之多;在 2015 年 7~10 月的现场沉降监测发现,仅 4 个月就出现了严重的不均匀沉降,且最大沉降处的沉降值达到了 31 cm,是设计允许值 20 cm 的 1.5 倍,严重限制了列车行车速度,且对列车的行车安全造成极大影响。

(2)列车荷载谱与土体动力响应的非线性耦合。宝中线铁路列车轴重为 25~40 t,行驶速度为 80~120 km/h。肖世伟(2014)计算显示,时速 120 km 轴重 25~40 t 列车作用下路基面动应力为 74.60~119.37 kPa;冷伍明等(2018)基于路基足尺模型试验测试发现,时

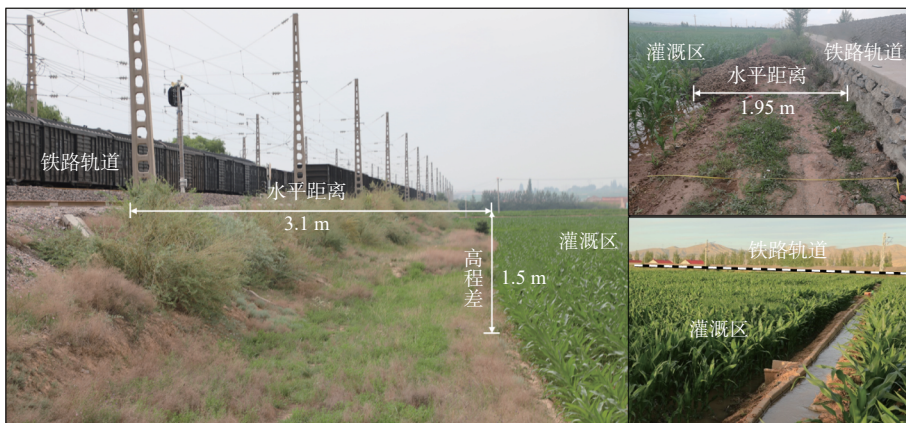


图1 农田灌溉区与铁路轨道的相对位置图

Fig. 1 Relative position map of farmland irrigation area and railway track



图2 现场钻孔取样路基土体形成了软弱层

Fig. 2 Field borehole sampling reveals the formation of weak layers in subgrade soil

速 80 km 轴重 25~30 t 重载列车作用下路基面动应力为 64~90.1 kPa; 李鹏(2018)对朔黄线现场测试表明: 轴重 25~30 t 列车运行时路基面的动应力范围 110.1~123.0 kPa。以上结果可以估测火车振动产生的动应力幅值为 90~135 kPa。铁路两侧农田灌溉会在路基下方形成相互连通的流场, 软化路基填土、降低承载力、造成道砟沉降进而影响铁路行驶。火车运行的振动扰动对浸润土体的影响是剧烈的, 振动会引

起下部饱和土体产生湿-振耦合沉降, 黄土体的残余变形随着振动次数的增多逐渐变大。由于下部饱和黄土层的变形, 引起铁路路基沉降变形或不均匀沉降, 诱发铁路路基多种病害(图 3)。因此, 无论是短期的强降雨还是定期灌溉工作, 当铁路附近的土体被浸润后, 导致地下水位抬升饱和黄土层变厚, 再叠加列车行车荷载就会导致黄土体的残余变形逐渐增大, 导致铁路路基病害的潜在威胁提升。



a. 路基变形破坏; b. 路基侧移倾斜; c. 路基变形与轨道侧翻; d. 道砟加高

图3 农田灌溉区引发的铁路病害展示

Fig. 3 Railway diseases caused by farmland irrigation areas

(3)传统防护体系与新型病害的适应性失衡。既有防护措施(局部加筋土挡墙、灰土挤密桩加固、浆砌片石护坡)等存在缺陷: 调查区段未设置立体排水系统, 仅局部设置梯形边沟; 动态响应缺失: 既有结构未考虑路基土体湿化后的动载-渗流耦合作用, 导致新型病害发生, 伴随着潜蚀型陷穴、振动液化裂缝(最大宽度为 35 mm, 延伸长度为 12~18 m); 差异沉降波状轨道(波长 6~8 m, 幅值 8~12 mm)。

2 试验研究方案

2.1 试验研究思路

基于上述现场地质调查, 典型病害成因是由于周期性的农田灌溉造成水分入渗到铁路路基下部的黄土体, 造成地下水位抬升, 形成地下水饱和区, 并且在毛细作用的影响下形成饱和毛细区, 这两种饱和区的黄土易在列车行车的动荷载条件下发生湿-振耦合变形(图 4), 引发上部铁路路基逐渐沉降变形, 影响铁路行车安全, 其中轴向应力与上覆压力和动应力有关, 水平围压由上覆压力决定。由此, 通过室内试验重点

研究灌溉饱和后黄土的动残余变形发展规律。

试验土取自中卫市海原县高速公路与铁路旁, 坐标为 E 106.114°, N 36.423°, 选择深度在 4.4~5.6 m 处的软弱黄土地层进行原状土取样, 该地层是典型工点的沉陷区。其基本物理指标: 土粒比重为 2.68~2.70, 干密度为 1.48 g/cm³, 含水率为 19.6%, 液限为 32.8%, 塑限为 18.2%, 塑性指数为 14.64, 属于黏粒含量较高的粉质黏土试样。试验采用饱和和原状土, 试样直径为 39.1 mm, 高为 80 mm。饱和试样采用真空抽气法和泡水法结合在饱和缸中饱和, 饱和度在 90% 以上。

2.2 试验研究方案

为研究不同动力荷载波型以及固结围压条件对黄土残余应变发展规律的影响, 设计试验方案, 控制初始固结应力比、试验频率和排水条件不变, 进行了 3 类工况分析。

(1)对于宝中线铁路列车轴重为 25~40 t, 行驶速度为 80~120 km/h, 火车振动产生的动应力幅值为 90~135 kPa, 并考虑到地表动应力衰减影响, 设置的动力幅值约为 20~90 kPa, 试验过程以循环应力比参

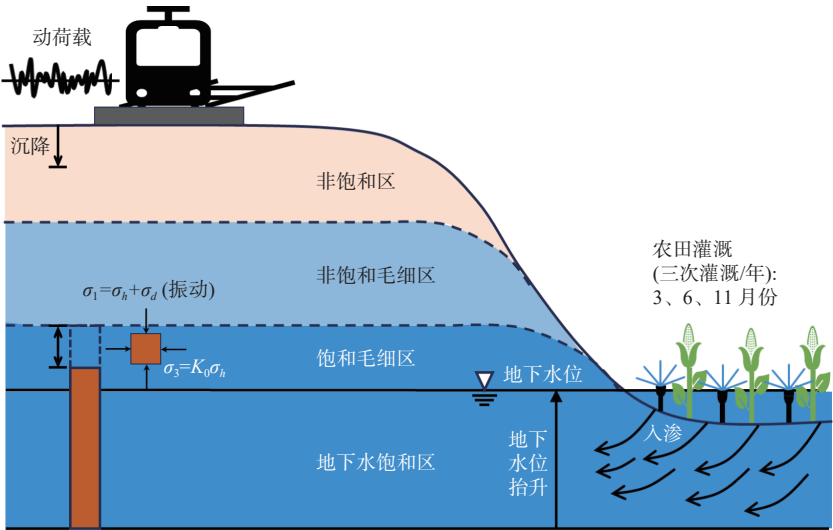


图4 列车动荷载下农田灌溉的黄土变形发展图

Fig. 4 Development diagram of loess deformation in farmland irrigation under train dynamic load

数 $CSR(=\sigma_d/2\sigma_c)$ 控制(表 1)。

(2)考虑到高路堤局部最大高度可达 12 m, 为此, 设置考虑的最大深度为 12 m, 对应的侧向约束压力为 120 kPa(其中静压力系数考虑为 0.5)。此外, 考虑其他病害路堤, 设置了 5 m 和 8 m。由此, 共设计的围压 σ_3 分别为 50、80、120 kPa, 以分别模拟路基面以下不同深度的侧压环境。

(3)考虑到真实列车荷载的单向压应力半正弦波特征, 为对比分析半正弦波和正弦波二者的波形对饱和黄土动残余应变的影响, 在围压 $\sigma_c=80$ kPa, 初始固

结应力比 $k_c=1.0$, 频率 $f=1$ Hz 以及排水条件下, 进行半正弦与正弦波两种循环试验。试验加载波形如图 5 所示。

此外, 考虑到既有铁路在长期运营中孔隙水压消散, 故试验控制为排水条件。

2.3 试验仪器与方法

本次试验采用 GDS 动三轴试验仪, 主要包括轴向激振器、位移传感器、围压控制系统、数据采集及信号调节装置、无限反压控制系统(图 6)。该仪器能够施加不同形式和不同强度的振动荷载, 测量出振动作用下试样的应力和应变。

表 1 试验控制条件汇总

Tab. 1 Summary of experimental control conditions

波形	k_c	围压(kPa)	动应力比	排水条件	频率(Hz)
正弦	1	80	0.23	排水	1
			0.32		
			0.45		
半正弦		80	0.24		
			0.31		
			0.51		
半正弦		50	0.71		
			0.21		
			0.53		
半正弦		120	0.70		
			0.11		
			0.23		
			0.35		

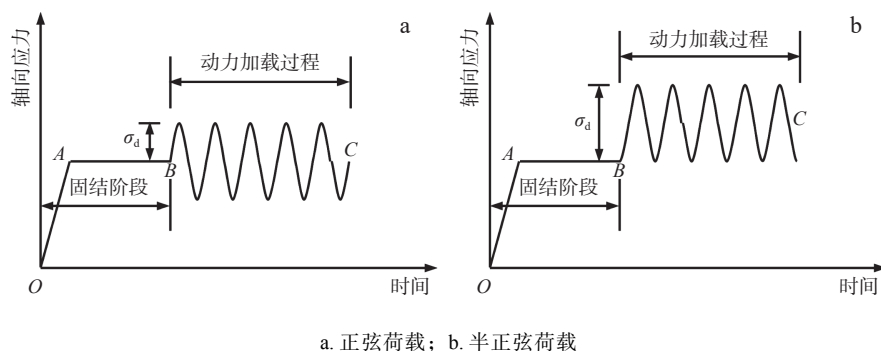
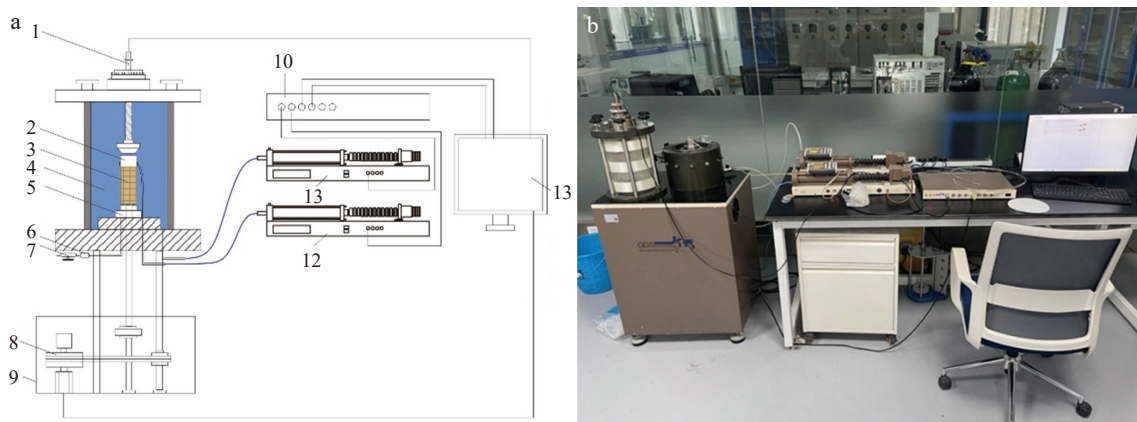


图5 不同波形动力加载过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of different waveform power loading processes



1. 加压杆; 2. 试样帽; 3. 试样; 4. 围压室; 5. 底座; 6. 孔压传感器; 7. 排水阀门; 8. 电机; 9. 振动系统; 10. 数据采集仪; 11. 围压仪; 12. 反压仪; 13. 电脑; a. GDS 动三轴原理图; b. GDS 动三轴仪器

图6 GDS 动三轴仪器及原理图

Fig. 6 Schematic diagram of GDS dynamic three-axis instrument

(1)波型试验: 设置各试验程序参数, 围压为 80 kPa, 初始固结应力比 $k_c=1.0$, 频率 $f=1$ Hz。之后, 将饱和试样与压力室内排水固结, 固结完成后, 选择正弦波或半正弦波按照预设动应力加载剪切。剪切过程中两种类型试验均为一直排水状态。

(2)控制不同围压试验: 与波型试验相同, 先设置程序参数, 后进行排水固结。固结完成后只在半正弦波型下进行试验, 试验过程均为排水状态。

本次试验采用的正弦波、半正弦, 加载次数均为 5 000 次, 每组试验进行 3 次平行试验, 确保试验数据的准确性, 减少试验误差。

3 试验结果与分析

为研究不同动力荷载波型以及固结围压条件对黄土残余应变发展规律的影响, 分析了正弦波和半正弦波的残余应变发展模式, 探讨了不同围压、不同动

应力及不同振动次数下黄土残余应变的发展规律。主要发现如下。

3.1 两种波形下饱和黄土动残余应变发展规律

正弦波与半正弦波条件下, 残余应变随振次的发展的半对数关系如图 7 所示。试验结果表明, 在本次试验的动应力比(CSR)取值范围内, 黄土的残余应变发展呈现明显的三阶段演化特征: 初始快速增长阶段、过渡发展阶段和最终稳定阶段。

(1)初始快速增长阶段($N < 100$ 次)。在此阶段, 残余应变随振次呈近似线性增长, 增长速率主要受动应力比控制。半正弦波条件下, CSR=0.71 时的初始应变增长率(0.12%/次)较 CSR=0.24(0.04%/次)提高 2 倍; 正弦波条件下, CSR=0.45 的初始增长率(0.09%/次)较 CSR=0.23(0.03%/次)提高 2 倍。这一现象与土体结构快速重组和颗粒间黏结力破坏密切相关。灌溉湿化导致颗粒间胶结力下降, 振动荷载引发定向排列度指数降低, 孔隙分形维数增加, 致使动弹性模量衰减率提升。

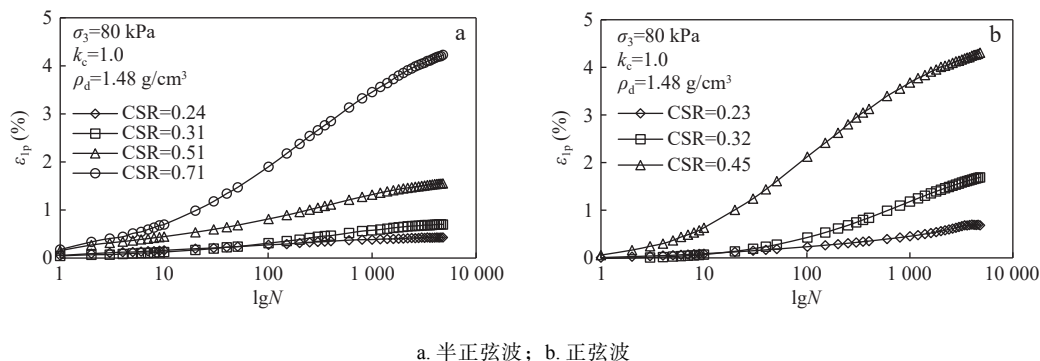


图7 不同波形残余应变与振次关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between residual strain and vibration frequency of different waveforms

(2)过渡发展阶段($100 \leq N \leq 1000$ 次)。此阶段应变增长率显著降低,表现出明显的非线性特征。半正弦波条件下,CSR=0.51的应变增长率从0.08%/次($N=100$)降至0.02%/次($N=1000$);正弦波条件下,CSR=0.32的增长率从0.06%/次降至0.015%/次。这种转变反映了土体内部颗粒重新排列和应力重分布过程。

(3)最终稳定阶段($N > 1000$ 次)。当振次超过1000次后,残余应变发展趋于平缓,达到准稳定状态。半正弦波条件下,CSR=0.24、0.31、0.51的最终应变值分别为0.42%、0.69%、1.54%;正弦波条件下,CSR=0.23、0.32的最终应变值分别为0.69%、1.69%。值得注意的是,CSR=0.71(半正弦波)和CSR=0.45(正弦波)虽然应变值较大,但仍表现出稳定趋势,表明土体结构已达到新的平衡状态。

根据图7试验结果,整理不同波形、不同振次下的应力比-残余应变关系曲线(图8)。可见,波形特征对残余应变发展的显著影响:相同动应力比作用下,正弦波比半正弦波引起的土体最终残余变形要大。半正弦波的残余应变较正弦波降低了15%~20%,且达到稳定阶段所需的振次大约减少了30%。这种差异性主要源于半正弦波更符合实际列车荷载的冲击特征,其瞬时峰值应力作用时间较短,有利于土体颗粒的应力释放和结构调整。而对于正弦波作用,拉应力存在,产生拉方向残余应变,使得黄土结构强度更容易被破坏,造成相同幅值压应力作用产生更大最终变形,破坏程度更为严重。由此,可以通过控制动应力比(建议 $CSR \leq 0.35$)和优化荷载波形(优先采用半正弦波特征),可有效降低残余应变的累积速率,延长路基稳定服役周期。

3.2 残余应变发展模型

不同围压下典型的残余应变随振次的变化关系

曲线如图9所示。

(1)围压-动应力耦合效应。当围压从50 kPa增至120 kPa时,黄土的残余应变响应呈现显著差异:低围压($\sigma_3 = 50$ kPa)情况下,在动应力 $\sigma_d = 50$ kPa作用下,残余应变随振次快速累积,最终稳定值达1.9%,此时土体结构因围压不足,颗粒间接触力较弱,振动荷载易引发颗粒滑移与孔隙压缩;高围压($\sigma_3 = 120$ kPa),相同动应力下,残余应变峰值降至0.8%,表明围压提升通过增强颗粒间摩擦力和胶结作用,显著抑制塑性变形发展。

(2)当动应力比(σ_d/σ_3)超过临界阈值0.6时(如 $\sigma_d = 71$ kPa, $\sigma_3 = 120$ kPa),土体进入非线性损伤阶段,初始应变增长率提升至0.015%/次。此时,围压的约束效应部分失效,土体内部出现局部剪切带,导致应变速率突增。能量耗散模型计算结果显示,围压提升至120 kPa时,土体单位体积储能能力增强, $W_{120 \text{ kPa}} = 0.75W_{50 \text{ kPa}}$ 。这一现象揭示了高围压下土体通过颗粒重排消耗更多振动能量,抑制塑性应变累积的物理本质。

为了定量表征考虑湿化土体埋置深度、动应力幅值、振动周次影响的动残余变形模型,基于图9的试验结果,整理成不同振次下3种围压的应力-残余曲线(图10)。可见,在相同振次和围压下,动应力和动残余应变关系曲线呈现非线性特征,可用双曲线拟合,其表达式如公式(1)所示。

$$\sigma_d = \frac{\varepsilon_{lp}}{A + B\varepsilon_{lp}} * 100 \quad (1)$$

式中: A 和 B 为模型参数,分别反映了初始动残余模量和极限动强度。试验拟合结果较好,拟合系数皆高达 $R=0.99$,说明双曲线模型能够很好地描述湿化饱和后黄土的动应力和动残余应变的关系(图10)。

试验拟合对应的模型参数 B 值不随围压、动应力、振次变化,皆为0.62。而参数 A 值与振次和围压皆密

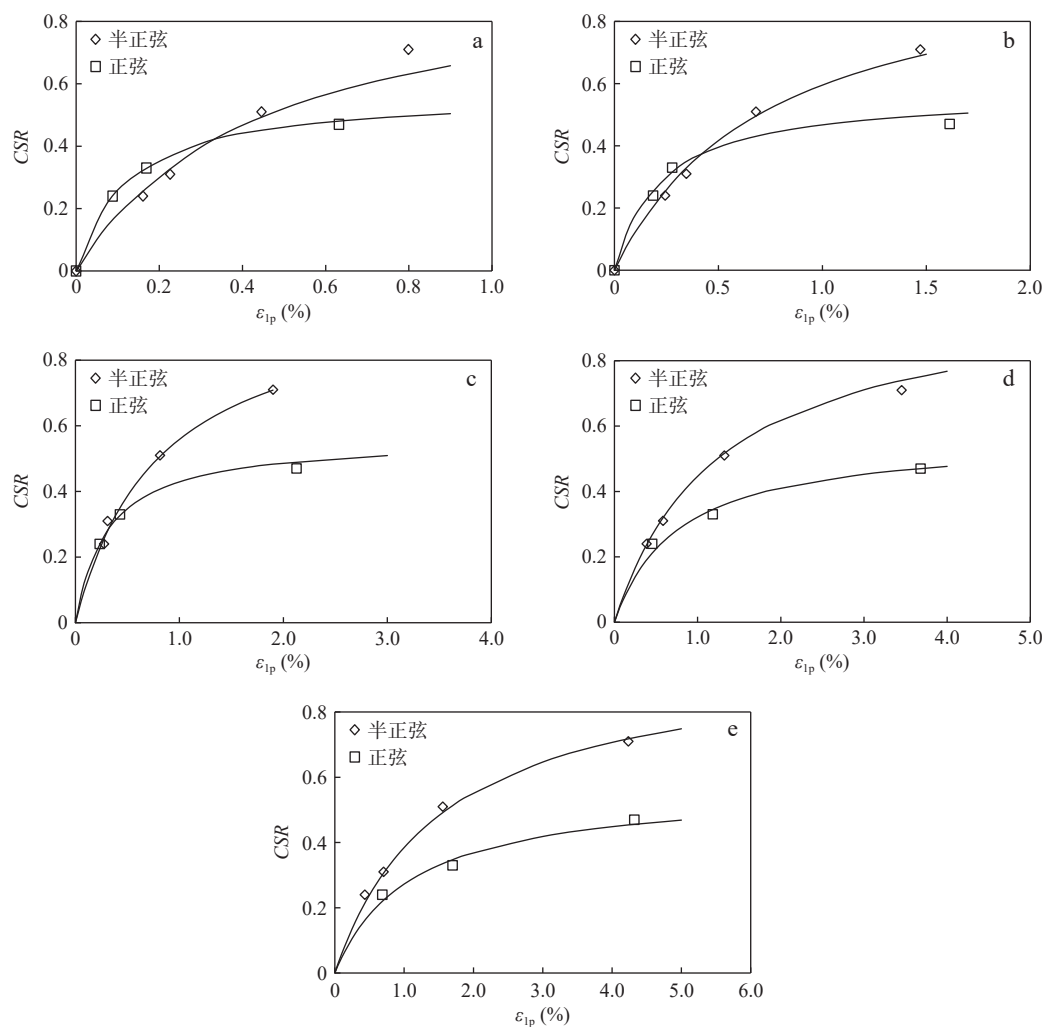
a. $N=10$ 次; b. $N=50$ 次; c. $N=100$ 次; d. $N=1\ 000$ 次; e. $N=5\ 000$ 次

图8 不同振次两种波形的应力比-残余应变关系曲线

Fig. 8 Stress ratio residual strain relationship curve of two waveforms with different vibration times

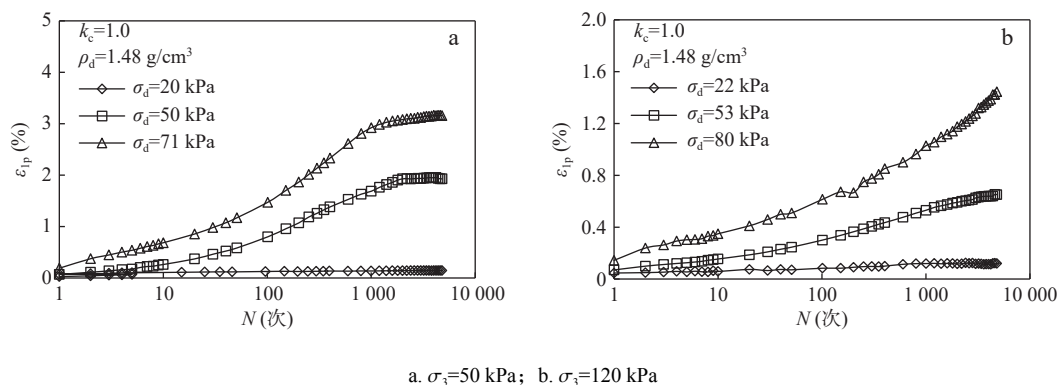
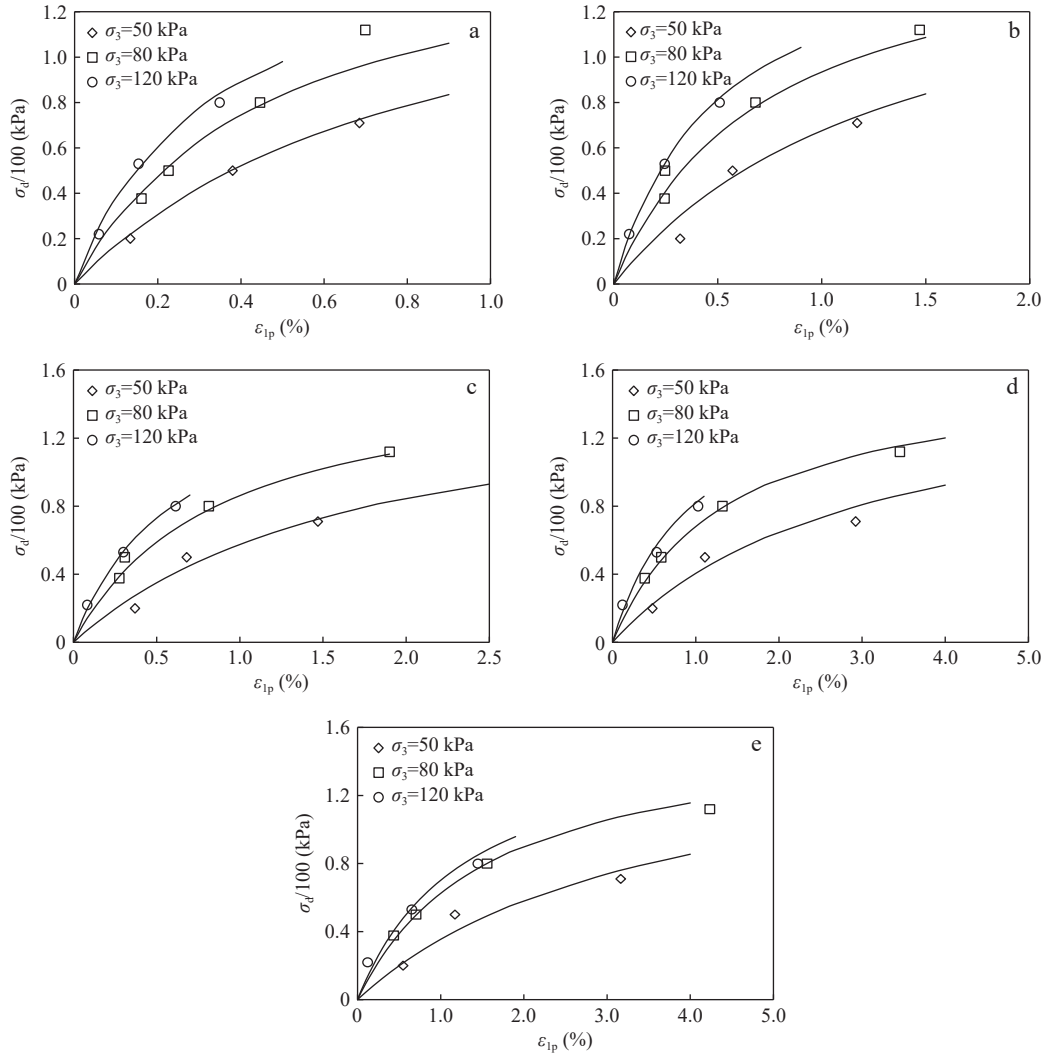


图9 不同围压下残余应变与振次关系曲线

Fig. 9 Relationship curve between residual strain and vibration frequency under different confining pressures

切相关。换言之,振次和围压对黄土动残余变形的影响是通过初始模量来反映。将3种围压下,拟合得到的 A 值与振次之间半对数关系(图11)。可见,随着振

次的增加,参数 A 值呈现指数型增长趋势,基本以 $N=100$ 次为界。当 $N<100$ 时,半对数坐标系上基本呈现线性变化;大于该值时,呈现陡增的非线性趋势,



a. $N=10$ 次; b. $N=50$ 次; c. $N=100$ 次; d. $N=1000$ 次; e. $N=5000$ 次

图10 不同围压、不同振次半正弦波应力-残余应变关系曲线

Fig. 10 Stress-residual strain relationship curves under half-sine wave loading with different confining pressures and cyclic numbers
且围压愈大, 陡增趋势愈明显。

进一步对上述关系进行定量表征, 拟合得到不同围压下 A 值与振次 N 关系为指数关系, 其表达式如公式(2)所示。

$$A = aN^b \quad (2)$$

拟合系数 $R=0.99$, 其中 b 值与围压无关, 皆为 0.2。但 a 值与围压密切相关, 反映了围压是通过改变初始残余模量的变化率, 进而改变动残余变形来体现。

拟合 a 值与围压 σ_3 关系(图 12), 发现指数函数较好地表达随着围压的增加($R=0.975$), 动残余模量变化率非线性减小趋势, 其表达式如公式(3)所示。

$$a = c\sigma_3^d \quad (3)$$

式中: c, d 为模型参数, 分别为 41.569 和 -1.182, 负值反映了围压对动残余应变发展的约束作用。

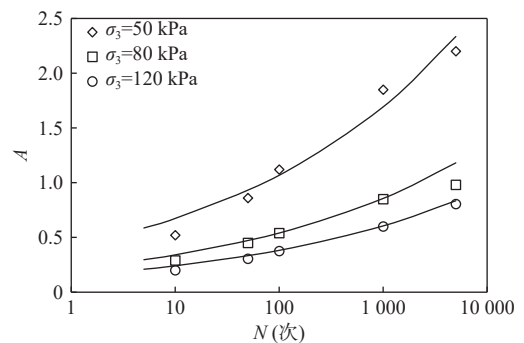


图11 不同围压 A 与振次关系曲线

Fig. 11 Relationship curve between A value and cyclic numbers N

将(1)、(2)、(3)式联合, 即可得到考虑湿化土体埋置深度、动应力幅值、振动周次影响的动残余变形模型, 如公式(4)所示。

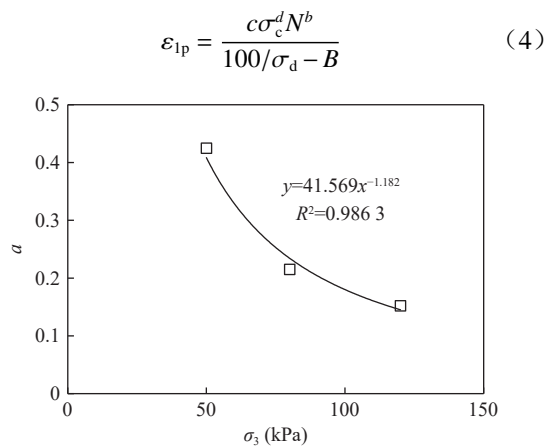
图12 a 值与围压 σ_3 关系曲线

Fig. 12 Relationship curve between a value and confining pressure

3.3 残余应变实际初步预测

野外调查过程中发现,宝中线固原地区铁路路基高于农田灌溉的水位面约为2~3 m,该地区的湿陷性黄土厚度约为9~20 m,对于路基下部饱和区的黄土埋深设为5~12 m,其上浮自重应力形成的围压约为50~120 kPa,而火车振动在深为5~12 m处的动应力比约为0.11~0.21,其参数与试验方案控制指标相对应。

1996年宝中线正式通车,距野外调查(2023年)运行了27年,平均每天货运+客运火车趟数约40次,27年内共经历了394200次列车经过,其振动波形符合半正弦波。由于农田灌溉使地下水位抬升,造成饱和黄土层变厚,通过半正弦荷载作用下黄土的残余应变发展函数模型(公式4),对固原地区铁路路基的沉降变形进行计算(图13)。距离地面较近时,由于围压减小,而动应力较大,如动应力为70 kPa,围压为50 kPa的预测曲线(图13),在进入宝中线通车的27年内铁路黄土路基应变已发生了6.6%,当灌溉引起地下水位抬升2~10 m,则相应的饱和带黄土厚度为2~10 m,对应的发生路基土体沉陷量约为0.13 m~0.66 m,对应于野外调查的一般道砟厚度约为0.45 m,加高后道砟高度为0.7~1.2 m,最高道砟为1.8 m,基本平均垫高约为0.25~0.75 m,道砟加高厚度与预测的变形量基本一致。该沉降变形量远大于《铁路路基设计规范》(TB 10001-2016)规定,普通铁路的路基沉降量0.2 m标准,路基变形严重超限。并且对2015年7~10月(4个月)的铁路路基沉降量进行预测,取饱和带黄土厚度为10 m,求得预测沉降量为21.27 cm,与现场沉降监测的最大沉降值31 cm基本接近,验证了模型的

较好的适用性。进一步通过预测曲线分析可知,大约运行25年后由于灌溉饱和路基土体产生的沉陷就达到了沉降控制标准,进一步运营就需要加固和处理。这反映了提出的考虑围压-动应力-振次影响的饱和黄土动残余应变预测模型,可为实际运营的铁路路基长期沉降评估提供了实用化量化工具。由于尚未有完整的不同工点的长期沉降监测数据,精细化预测结果有待结合数值模拟、长期监测进一步相互验证。

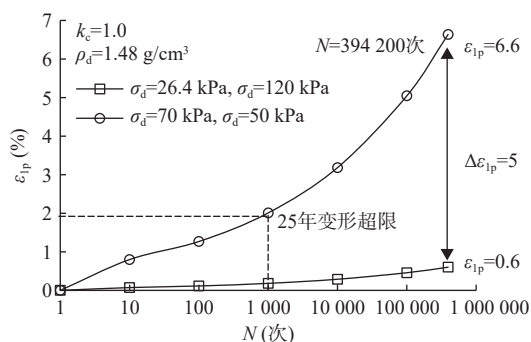


图13 宝中铁路线典型工点的黄土残余变形预测范围

Fig. 13 Prediction range of residual deformation of loess in typical construction sites of Bao-zhong Railway Line

4 结论

(1)揭示了灌溉区铁路黄土路基沉陷的双重驱动机制:周期性农田灌溉引发的路基土体持续饱和与与长期列车动载的耦合作用产生残余变形,是路基沉陷超限的核心诱因。饱和区黄土动残余应变累积较大,铁路运行27年最大累积沉降量达0.13~0.66 m,局部工点远超规范限值(0.2 m)。

(2)阐明了振动波形对黄土动力响应的影响规律:相较于传统正弦波,半正弦波荷载更符合列车动载的冲击特性,其单向压应力特征使残余应变降低了15%~20%,且稳定阶段所需振次减少30%。建议黄土区路基动力分析优先采用半正弦波荷载模式。

(3)构建了排水条件下考虑围压-动应力-振次影响的饱和黄土动残余应变预测模型,并结合宝中线固原段实际工况沉陷预测值与实测沉降量基本一致,为实际运营的铁路路基长期沉降评估提供了实用化量化工具。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 陈存礼, 马少雄, 李雷雷, 等. 饱和黄河岸滩粉土循环荷载后的变形强度特性[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 801-808.
- CHEN Cunli, MA Shaoxiong, LI Leilei, et al. Deformation strength characteristics of saturated Yellow River beach silt under cyclic loading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 801-808.
- 谷天峰, 王家鼎, 王峻. 郑西客运专线黄土路基震陷研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4): 557-562.
- GU Tianfeng, WANG Jiading, WANG Jun. Research on Seismic Settlement of Loess Roadbed on Zhengxi Passenger Dedicated Line[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4): 557-562.
- 简文彬, 洪儒宝, 樊秀峰, 等. 循环荷载下节理岩体边坡动力响应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35: 2409-2416.
- JIAN Wenbin, HONG Rubao, FAN Xiufeng, et al. Experimental study on dynamic response of jointed rock slope under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35: 2409-2416.
- 李又云, 谢永利, 刘保健. 路基压实黄土动力特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1037-1046.
- LI Youyun, XIE Yongli, LIU Baojian. Experimental study on dynamic characteristics of compacted loess subgrade[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 1037-1046.
- 李鹏. 重载铁路路基动力响应与长期累积变形特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- LI Peng. Dynamic response and long-term cumulative deformation characteristics of heavy-duty railway subgrade[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- 冷伍明, 梅慧浩, 聂如松, 等. 重载铁路路基足尺模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4): 1-6+18.
- LENG Wuming, MEI Huihao, NIE Rusong, et al. Research on full-scale model test of heavy-duty railway subgrade[J]. Vibration and Impact, 2018, 37(4): 1-6+18.
- 王常晶. 列车移动荷载作用下地基的动应力及饱和软粘土特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- WANG Changjing. Study on the dynamic stress and saturated soft clay characteristics of the foundation under the action of train moving load[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- 王家鼎, 许元珺, 张登飞, 等. 黄土振动促渗效应研究[J]. 中国科学(地球科学), 2021, 51: 763-782.
- WANG Jiading, XU Yuanjun, ZHANG Dengfei, et al. Research on the Vibration Induced Infiltration Effect of Loess[J]. Chinese Science (Earth Science), 2021, 51: 763-782.
- 王志杰, 骆亚生, 谭东岳, 等. 干密度对预剪应力下重塑黄土动力特性影响的试验研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(4): 349-353.
- WANG Zhijie, LUO Yasheng, TAN Dongyue, et al. Experimental study on the influence of dry density on the dynamic characteristics of remolded loess under pre shear stress[J]. Northwest Seismological Journal, 2011, 33(4): 349-353.
- 王谦, 马金莲, 马海萍, 等. 饱和黄土动剪切模量和阻尼比的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(9): 1919-1927.
- WANG Qian, MA Jinlian, MA Haiping, et al. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of saturated loess[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1919-1927.
- 万战胜, 杨喆, 王家鼎. 列车振动荷载作用下原状黄土动力特性试验[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(2): 47-51.
- WAN Zhansheng, YANAG Zhe, WANG Jiading. Dynamic characteristics test of undisturbed loess under train vibration load[J]. Coalfield Geology and Exploration, 2011, 39(2): 47-51.
- 肖世伟, 雷长顺. 重载铁路路基荷载特征和路基动力响应分析[J]. 铁道工程学报, 2014, (4): 51-56.
- XIAO Shiwei, LEI Changshun. Load characteristics and dynamic response analysis of heavy-duty railway subgrade[J]. Journal of Railway Engineering, 2014, (4): 51-56.
- 杨广庆, 张兴明, 蔡英. 关于高速铁路路基几个问题的分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 1998, (1): 56-60.
- YANG Guangqing, ZHANG Xingming, CAI Ying. Analysis of Several Issues Concerning High Speed Railway Roadbeds[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University, 1998, (1): 56-60.
- 曾垂青, 张吾渝, 马强, 等. 循环荷载作用下海北地区重塑黄土刚度弱化试验研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(2): 292-298.
- ZENG Chuiqing, ZHANG Wuyu, MA Qiang, et al. Experimental study on stiffness weakening of remolded loess in Haibei area under cyclic loading[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2022, 44(2): 292-298.
- 赵蒙. 既有铁路路基黄土振陷病害成因机制与治理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- ZHAO Meng. Research on the Cause Mechanism and Treatment of Loess Shaking Disease in Existing Railway Roadbeds[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- Liu Xin, Huang Guangjing, Qin Zehua, et al. Shear behaviour of loess under varied drainage conditions subjected to monotonic and cyclic loads[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 177: 108397.
- Guerriero L, Ruzza G, Maresca R, et al. Clay landslide movement triggered by artificial vibrations: new insights from monitoring data[J]. Landslides, 2021, 18: 2949-2957.
- Wang Haojie, Sun Ping, Liu Enlong, et al. Dynamic properties of Tianshui saturated remolded loess: A laboratory study[J]. Engineering Geology, 2020, 272: 105570.
- Xiao Z H, Liao H J, Wen Y, et al. Accumulative deformation behaviour of loess under cyclic loading[J]. Materials Research Innovations, 2011, 15(S1): 539-542.
- Yang W, Pan B, Jin L, et al. Experimental study on dynamic characteristics of Qingyang loess under different water contents[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13: 986.