

临近既有线铁路路基施工扰动影响及防护研究

李 鹏 曹 浩

陕西煤业化工建设(集团)有限公司路桥分公司 陕西 西安 710021

摘 要:为解决临近既有线铁路路基施工易引发路基沉降、边坡失稳等安全问题,本文结合土力学相关理论,划分开挖、填筑、桩基三类核心施工工况,剖析静力、动力、水理三类扰动的影响机理与病害规律。通过数值模拟分析多因素耦合扰动特征,划分施工风险等级,构建涵盖前期预控、过程防护、动态监测及应急处置的一体化防护体系,经模拟验证优化防护方案,可为同类工程安全施工提供技术参考。

关键词: 临近既有线铁路;路基施工;扰动影响;防护

引言:铁路改扩建工程中,临近既有线路基施工工况复杂,施工与运营交叉作业,受限空间、荷载叠加及不可逆土体扰动极易诱发路基病害,严重威胁列车通行安全。当前施工扰动机理把控不足、防护措施针对性较弱,难以适配复杂施工场景。基于此,本文系统探究施工扰动影响规律,搭建完善的防护技术体系并完成优化验证,旨在精准管控施工风险,保障既有铁路运营稳定,提升路基施工安全质量。

1 临近既有线铁路路基施工基础理论与施工工况

1.1 临近既有线施工界定及工程特性

(1) 临近既有线施工范围界定:依据现行铁路施工安全规范,结合列车运行速度、路基结构类型及施工工艺,划定临近既有线施工安全管控范围。同时明确施工分级管控标准,严格划分施工禁区与常规管控区,禁区内严禁高扰动、重型施工作业,管控区需全程落实安全监测、限速施工等管控措施,从范围层面规范施工安全管理边界。(2) 工程核心特性:该类工程具备五大核心特性,一是运营不间断性,施工期间既有铁路正常通车,施工与运营交叉开展;二是施工空间受限,紧邻既有线路设备及构筑物,作业面狭窄、施工机械调度受限;三是荷载叠加复杂,施工荷载与列车动荷载相互叠加,受力体系多变;四是安全风险极高,极易引发路基沉降、边坡滑移等隐患;五是扰动影响不可逆,土体结构破坏后难以自主恢复,易产生永久性路基变形^[1]。

1.2 路基土体扰动相关基础理论

(1) 土力学变形理论:路基土体受开挖、填筑、机械挤压等施工作用,原有初始应力平衡状态被打破,产生应力重分布,进而出现弹性与塑性变形。该理论明确了土体剪切、压缩变形的力学规律,是分析路基土体扰

动、沉降变形的核心理论基础。(2) 孔隙水压力变化理论:施工扰动会挤压土体孔隙,引发超孔隙水压力激增,短期内无法快速消散,导致土体有效应力降低、抗剪强度下降。待孔隙水压力逐步消散后,土体固结收缩,易造成路基不均匀沉降,直接影响路基整体稳定性。(3) 列车动荷载耦合扰动理论:施工产生的静力扰动会改变土体初始状态,叠加列车高频往复的动力荷载,形成复合扰动效应,加剧土体疲劳损伤,加速路基沉降、开裂及边坡失稳等病害的发生发展。

1.3 常见临近既有线路基施工工况分类

(1) 路基开挖施工:涵盖边坡开挖、基坑开挖、既有路基削坡等工况,施工会直接剥离土体、破坏原有支护结构,易引发边坡坍塌、路基失稳,扰动突发性强、安全风险集中。(2) 路基填筑施工:包含路基加宽、加高及新增路基填筑作业,填筑荷载持续挤压周边原生土体,引发土体侧向位移与压缩变形,易造成既有路基沉降、轨面变形。(3) 辅助桩基施工:涵盖搅拌桩、钻孔灌注桩、MJS 桩等路基加固工艺,成桩过程的振动、挤土效应会扰动周边路基土体,引发微小变形与沉降,长期累积易影响线路平顺性。

2 临近既有线铁路路基施工扰动影响机理及规律分析

2.1 施工扰动主要类型及破坏形式

(1) 静力扰动:静力扰动主要由路基开挖、土方填筑等静态施工作业引发,施工过程中土体卸荷或新增荷载会打破路基原有应力平衡状态,促使土体发生应力重分布。该类扰动无明显振动效应,但持续性、累积性较强,易造成既有路基不均匀沉降、土体侧向位移、边坡土体松弛开裂等静态变形病害,长期发展会导致路基整体平顺性下降,影响线路运营状态。(2) 动力扰动:动

力扰动多产生于桩基钻孔、路基夯实、重型机械碾压等施工工序,作业过程会产生周期性振动荷载并传递至周边路基土体。高频振动会破坏土体颗粒结构,使密实土体逐渐松散,降低路基整体刚度与稳定性,进而引发路基土体松动、轨面高低不平、道床脱空失稳等问题,严重时会影响列车通行安全^[2]。(3)水理扰动:原始路基依托稳定的排水体系维持水文平衡,施工开挖、堆载、机械碾压等作业易破坏原有排水通道、堵塞排水沟槽,改变场地原有水文条件。降雨积水无法及时排出会加剧雨水下渗入侵,使路基土体吸水软化、强度大幅衰减,同时引发孔隙水压力骤增且难以消散,显著提升路基沉降、边坡滑塌、路基翻浆冒泥等灾害风险。

2.2 不同施工工况的扰动影响机理

(1)开挖施工扰动机理:路基、边坡及基坑开挖属于典型卸荷作业,会直接移除原有土体支撑结构,打破路基长期形成的应力平衡体系,使周边土体产生回弹变形与应力松弛。随着开挖深度和范围增大,土体卸荷效应持续加剧,极易引发既有线路基不均匀沉降、边坡滑移及土体坍塌等病害,是临近既有线路施工最核心的风险源之一。(2)填筑施工扰动机理:临近既有线路路基加宽、加高填筑作业会持续增加外部附加荷载,对周边原生土体产生挤压作用,形成持续性侧向土压力。土体在挤压作用下发生塑性变形并向既有线路方向位移,最终导致既有路基侧向偏移、轨距偏差、线路几何形态变形,直接影响铁路线路的合规性与运营平顺性。(3)桩基施工扰动机理:搅拌桩、钻孔灌注桩、MJS桩等加固桩基施工过程中,存在土体切削、挤土、高频振动等多重作用,会直接改变周边路基土体的密实度与结构性。成桩挤土会造成土体压缩变形,施工振动会引发土体疲劳损伤,多重作用叠加易导致局部路基沉降、微小变形,累积后会严重影响线路整体稳定性^[3]。

2.3 基于数值模拟的扰动影响规律分析

(1)数值模型构建:依托专业有限元数值模拟软件,结合现场实际地质条件、路基结构尺寸和施工参数,建立高精度临近既有线路基施工三维数值模型。精准选取土体本构模型,确定土层物理力学参数、模型边界约束条件,同时匹配实际运营工况设定列车动荷载参数,保障模型贴合现场实际施工场景。(2)单工况扰动规律分析:针对路基开挖、土方填筑、桩基施工三种核心工况开展单一变量数值模拟,控制施工距离、施工进度、施工荷载等关键参数,系统分析不同工况下既有路基沉降量、侧向位移、土体应力的动态变化规律,明确各单一工况的扰动范围与影响程度。(3)多因素耦合

扰动规律分析:结合现场复杂工况,探究施工静力、动力扰动与列车往复动荷载、场地水文地质条件的多因素耦合扰动效应。分析多场耦合作用下路基土体的变形响应、应力演化及稳定性变化特征,揭示复合扰动下路基病害的发展规律。

2.4 施工扰动风险等级划分

(1)风险评价指标选取:结合临近既有线路基施工风险特征,选取核心量化评价指标,主要包括路基最大沉降量、土体侧向位移值、施工振动传播速度、边坡稳定性系数,各项指标可精准反映路基变形状态与安全稳定水平,为风险评级提供数据支撑。(2)风险等级划分标准:严格依据现行铁路施工安全技术规范,结合数值模拟结果与现场施工经验,将施工扰动风险划分为低、中、高、极高四个等级。明确各风险等级的判定阈值、危害程度及对应的施工管控、监测、应急处置要求,实现施工风险的分级精准管控。

3 临近既有线路铁路路基施工防护技术体系与优化

3.1 施工前期预控防护技术

(1)施工方案优化:施工前期结合既有线路运营条件、场地地质情况及施工扰动特性,对整体施工方案进行专项优化设计。优先选用低扰动、小影响、高可控的施工工艺,摒弃大面积、一次性集中作业模式。采用分段、分层、跳槽间隔施工方式,合理划分施工单元,严格控制单次施工范围、开挖深度和填筑厚度,有效降低单次施工的应力扰动强度,避免集中荷载与大规模卸荷造成的路基突变变形,从源头减小施工对既有线路的扰动影响。(2)前期土体加固:针对临近既有线路基土体松散、承载力不足、稳定性较差的区段,开展施工前预处理加固作业。通过喷浆挂网、浅层注浆、地表压实、表层换填等综合手段,对路基边坡及施工影响范围内土体进行提前加固处理。该方式可有效提升表层土体密实度与整体强度,改善土体结构性,减小后续施工开挖、挤压、振动带来的塑性变形,大幅提高既有路基抵御施工扰动的能力^[4]。(3)排水体系预处理:水理扰动是诱发路基沉降、滑塌、翻浆的重要诱因,因此施工前需对场区排水体系进行系统预处理。全面疏通既有路基侧沟、排水沟、泄水孔等原有排水通道,修复破损排水设施,清除淤积杂物。同时结合施工布置新增临时排水沟槽、截水设施,完善地表及地下排水系统,避免雨水积渗、地下水抬升引发土体软化、孔隙水压力激增,从水文防控角度杜绝水致路基病害。

3.2 施工过程核心防护技术

(1) 隔离防护技术: 在施工区域与既有线路基之间设置专项隔离防护结构, 阻断扰动应力与变形传递路径。常用技术包括钻孔灌注桩隔离墙、连续止水帷幕、土工柔性隔离层等, 通过刚性支护与柔性缓冲相结合的方式, 有效阻隔施工挤压力、土体变形和振动波向既有路基传递, 大幅削弱施工扰动对轨道结构及路基基体的影响, 实现施工区与运营线路的安全隔离。(2) 路基加固防护技术: 针对高风险施工区段, 采用高强度路基加固技术提升既有路基整体刚度与抗变形能力。依托 MJS 桩高压旋喷加固、桩筏复合地基、深孔压力注浆、深层土体固化等技术, 对路基深层软弱土体进行补强加固。通过改善深部土体力学性能、提高地基承载力, 有效抑制施工扰动引发的不均匀沉降与侧向位移, 增强路基整体稳定性与结构整体性。(3) 振动控制防护技术: 为降低桩基施工、土方夯实、机械作业等动力扰动影响, 建立全过程振动防控体系。通过优化桩基钻进速度、成桩压力、夯实频率等施工参数, 减少机械作业激振强度; 在施工边界设置减振沟、隔振槽等隔振结构, 阻断振动传播路径; 优先选用低振动、低冲击施工设备, 全方位降低动力扰动对路基土体、道床及轨道平顺性的不利影响^[5]。

3.3 施工动态监测与应急防护技术

(1) 全方位动态监测体系: 围绕既有线路基安全控制要点, 布设系统化、全覆盖监测点位, 构建全天候动态监测体系。主要包含路基沉降监测、侧向位移监测、施工振动速度监测、孔隙水压力监测及边坡变形监测等内容, 全程实时采集施工全过程土体变形、应力、水压及振动数据, 精准掌握路基动态变化规律, 为风险判别提供数据支撑。(2) 监测数据预警机制: 依据铁路安全规范及线路运营控制标准, 明确各项监测指标的安全阈值、预警阈值与控制阈值, 建立分级预警机制。通过实时数据对比分析, 自动判别施工扰动风险等级, 实现正常、预警、超限三级动态判定, 及时捕捉路基异常变形趋势, 提前预判潜在安全隐患, 为防护调整和施工管控提供及时依据。(3) 应急防护处置措施: 结合施工扰动风险特点, 制定针对性应急防护处置方案。针对路基沉降超标、边坡变形开裂、施工振动超限、孔隙水压力异

常升高等风险隐患, 明确停工核查、临时支护、快速注浆加固、土方回填稳压、紧急排水等应急处置流程, 快速控制扰动发展态势, 消除安全隐患, 保障既有铁路运营安全。

3.4 防护技术效果数值验证与优化

(1) 防护方案模拟验证: 依托有限元数值模拟平台, 对各类单项防护技术及组合防护体系进行仿真模拟验算。通过构建防护施工数值模型, 对比分析防护实施前后既有路基沉降变形、侧向位移、土体应力分布及稳定性变化规律, 量化评价各类防护措施的实际防控效果, 验证防护方案的科学性与可行性。(2) 多方案对比优化: 针对不同地质条件、施工工况, 开展多种防护组合方案的对比模拟分析, 综合考量防护效果、施工难度、工期成本、现场适配性等关键因素。通过多维度指标比对, 筛选出适配不同施工场景、扰动控制效果优、经济性合理的最优防护方案, 实现临近既有线路基施工防护技术体系的精细化优化。

结束语

本文系统阐释了临近既有线路基施工的扰动理论与工程特性, 厘清不同施工工况的扰动机理与耦合规律, 完成施工风险分级。构建了全流程防护技术体系, 结合数值模拟完成防护方案的验证与优化, 有效解决了施工扰动管控难题。研究成果可有效降低路基施工安全风险, 保障线路平顺运营, 对临近既有铁路路基施工的安全管控与技术优化具备重要工程应用价值。

参考文献

- [1] 何晓, 王伟志. 临近既有铁路增建新线地基处理施工影响比较分析 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 111-122.
- [2] 吴石松. 大埋深盾构隧道下穿施工对既有铁路路基的影响分析 [J]. 岩土工程技术, 2025, 29(5): 688-692.
- [3] 陈峰. 临近既有铁路路基填筑施工扰动风险及防控对策 [J]. 铁道工程学报, 2022, 39(7): 36-41.
- [4] 刘浩, 孙伟. 邻近既有铁路软土路基施工扰动变形特性及控制技术 [J]. 路基工程, 2024, 17(3): 89-94.
- [5] 王炳龙. 复杂工况下临近既有铁路路基施工扰动监测与防护技术 [J]. 岩土力学, 2022, 43(S2): 218-224.