

高铁长期荷载作用下路基不均匀冻胀的演化及影响

李炎¹, 徐晓琳¹, 傅琪益², 高均城², 张学龙^{1*}

¹内蒙古大学交通学院, 内蒙古 呼和浩特

²天津职业技术师范大学汽车与交通学院, 天津

收稿日期: 2026年9月29日; 录用日期: 2026年10月21日; 发布日期: 2026年10月29日

摘要

目的: 在季节冻土区, 高铁线路路基产生非均匀冻胀几乎难以杜绝; 列车长期循环通过时, 冻胀区土体变形会持续发展, 进而波及行车平稳性与轨道长期使用性能。方法: 将车辆-轨道耦合动力学计算同土体累积塑性应变预测模型相衔接, 建立一种面向列车循环荷载的路基冻胀变形及车轨耦合系统动力性能演化分析方法, 并选取实际线路稳定冻胀阶段进行算例研究。结果: 分析表明, 该方法可立足于车-轨-路协同作用, 刻画循环荷载下非均匀冻胀的演化过程, 并同步反映线路几何形位变化时上部车辆-轨道系统动力指标的演变趋势。结论: 在列车荷载长期反复施加后, 路基非均匀冻胀所诱发的轮轨瞬时动力冲击和层间界面接触劣化会有所减轻。因此, 累积行车荷载对缓解路基冻胀引起的轨道几何不平顺具有有利影响。

关键词

高速列车, 长期荷载, 路基冻胀, 演化规律, 系统动力学

Evolution and Impact of Non-Uniform Frost Heave of Subgrade under Long-Term Load of High-Speed Railway

Yan Li¹, Xiaolin Xu¹, Qiyi Fu², Juncheng Gao², Xuelong Zhang^{1*}

¹Transportation Institute, Inner Mongolia University, Hohhot Inner Mongolia

²School of Automobile and Transportation, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin

Received: September 29, 2026; accepted: October 21, 2026; published: October 29, 2026

*通讯作者。

文章引用: 李炎, 徐晓琳, 傅琪益, 高均城, 张学龙. 高铁长期荷载作用下路基不均匀冻胀的演化及影响[J]. 土木工程, 2026, 15(10): 199-213. DOI: 10.12677/hjce.2026.1510251

Abstract

Objective: In seasonally frozen regions, non-uniform frost heave of high-speed railway subgrades is nearly unavoidable. Under long-term cyclic train loading, the deformation evolution within frost-heave zones directly influences vehicle running quality and track service performance. **Method:** By integrating a vehicle-track coupled dynamics model with a soil cumulative plastic strain prediction model, this study develops a prediction method for evaluating subgrade frost-heave deformation and the evolution of dynamic performance of the vehicle-track coupled system under cyclic train loading. A case study is further conducted based on the stable frost-heave period of an actual railway line. **Result:** The results show that the proposed method can describe the development of non-uniform frost heave under cyclic loading from the perspective of vehicle-track-subgrade interaction, while simultaneously capturing the evolution characteristics of the dynamic performance of the vehicle-track system above the subgrade as track geometry varies. **Conclusion:** The long-term application of train loads alleviates, to a certain extent, the transient wheel-rail dynamic effects and interlayer contact deterioration caused by non-uniform subgrade frost heave. Therefore, cumulative traffic loading exerts a positive influence on reducing track irregularities induced by subgrade frost heave.

Keywords

High-Speed Train, Long-Term Load, Subgrade Frost Heave, Evolution Law, System Dynamics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

【研究意义】季节性冻土区在我国分布广泛,随着高速铁路网的铺开,季冻区高铁路基病害逐渐显露,其主要形式为由路基冻胀所导致的路基不均匀变形[1][2]。路基不均匀变形对轨道结构的静力平衡构成破坏性影响,主要表现为轨道几何不平顺的产生,并可能进一步诱发路基与轨道板界面脱空,从而危及行车安全与乘坐舒适性[3][4]。在循环行车荷载的长期作用下,路基填土中会逐渐形成塑性应变的累积。该累积效应与冻胀变形产生耦合,将明显改变轨道体系动力响应的表现形式,并进一步降低高速铁路线路维持长期服役状态的能力。鉴于此,深入探究冻胀区路基在高速列车长期荷载作用下的累积变形规律,及其上方车轨耦合系统动力学性能的时变演化机制,具有重要的理论意义与工程价值[5]-[7]。**【研究进展】**针对高速铁路无砟轨道路基冻胀变形所导致的上部车辆-轨道系统动力学响应,已有部分学者开展了研究。郭亮武[8]、郭毅[9]及吴仲伦[10]基于静力平衡理论与车辆-轨道耦合动力学理论,构建了无砟轨道-路基静力模型与车-轨-路耦合动力模型,借此考察了不同冻胀工况下轨道结构的变形行为及其动力学响应特征;Cai等[11][12]、杨国涛等[13]、高建敏等[4]、蒙富佳等[14]通过建立车辆-轨道耦合系统有限元模型,研究了不同条件下车辆轨道耦合系统的动力学响应特征;张鲁顺和赵国堂[15]建立车辆-轨道-路基冻胀耦合模型,分析了不同冻胀参数和行车速度下耦合系统动力学响应情况;Gao等[16]提出一种基于显式算法的有限元模型,研究了冻胀对车辆-轨道耦合系统动力特性的影响。

【关键问题】多数既有研究侧重于探明循环荷载作用下路基自身的累积变形规律。在路基循环累积变形研究方面,刘洪铭[17]基于车-轨耦合动力学理论,结合数值分析方法,建立了软土路基累积沉降的

力学-经验预估模型;李鹏[18]则聚焦重载铁路路堤断面,重点考察了路基附加动应力场的分布特征,以及粗粒土填料的动强度与累积变形行为。但值得注意的是,既有成果较少涉及路基持续变形对上部轨道系统动力性能的影响机制[7]。【创新特色】在既有研究[19]的基础上,本研究聚焦于持续高速行车荷载条件下路基非均匀冻胀的发展特征,以及其对上部车辆-轨道体系动力学行为的作用。方法上,将可计入路基冻胀影响的车辆-无砟轨道耦合动力学模型,与路基土体累积塑性应变预测模型加以联合,进而模拟行车荷载与路基非均匀冻胀变形协同作用下系统动力学性能的演变过程[7][20]。

2. 模型构建

2.1. 研究思路

本文研究中建立的求解框架由两个模块组成。第一个模块为计入路基冻胀效应的车辆-轨道耦合动力学模型,其作用是再现系统动力响应,并据此评价行车条件下的动力表现;第二个模块为路基累积塑性变形预测模型,用于刻画反复列车荷载引起的永久变形积累[7]。两模块的协同流程如图1所示:首先,以给定的冻胀变形初态作为输入,求解系统瞬态动力反应,并从计算结果中提取路基动应力,作为后续循环荷载下累积变形预测的关键控制变量;其次,依据路基填料的力学特性,选用工程实践中应用较广的经验公式推求累积塑性变形量;再次,当累积变形发展到一定水平后,以其对应的路基表层几何形态为准,对轨道不平顺状态进行迭代修正;最后,将修正后的路基面形重新输入动力计算模块,从而定量揭示变形不断累积过程中车-轨耦合体系动力学行为的变化规律[20]。

2.2. 考虑路基冻胀的列车-轨道-路基耦合动力学模型

以经典车辆-轨道耦合动力学理论[21]为基础,建立了能够反映路基冻胀作用的高速列车-无砟轨道垂向耦合分析模型,其构成见图2。车辆部分由车体、前后转向架构架和四个轮对组成,共含7个刚体、10个自由度[7]。轨道方面,选择双块式无砟轨道作为模拟对象,并构建冻胀条件下轨道-路基弹性地基梁模型。考虑到模型按二维平面问题处理,钢轨以及由道床板与支撑层组合形成的混凝土复合结构均按简支梁等效,模型纵向长度取足以排除边界效应干扰;层间以离散线性弹簧提供支承,地基则按Winkler连续弹性基础处理。路基非均匀冻胀采用余弦曲线表征,其幅值和波长可灵活设定,并以位移边界条件的形式作用于无砟轨道底部,同时计入路基对上部结构的单向约束[7][20]。

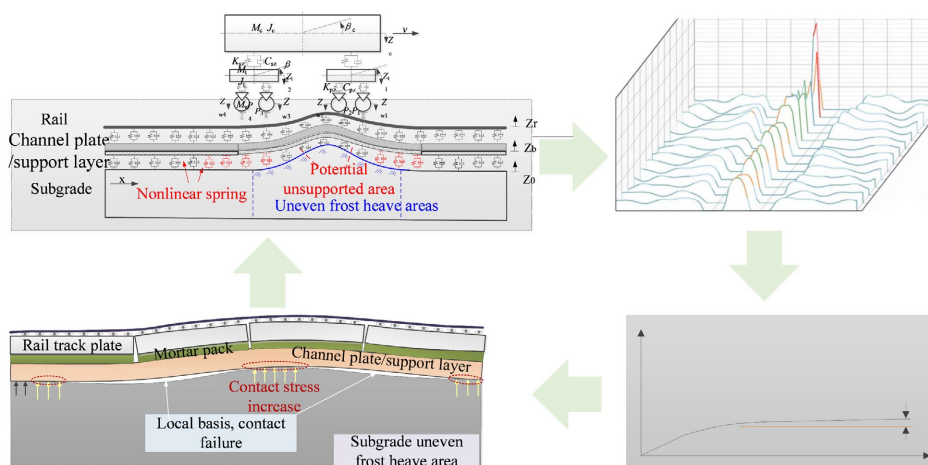


Figure 1. Prediction framework for non-uniform frost heave evolution in subgrade under cyclic train loading

图 1. 循环列车荷载下路基非均匀冻胀演变预测框架

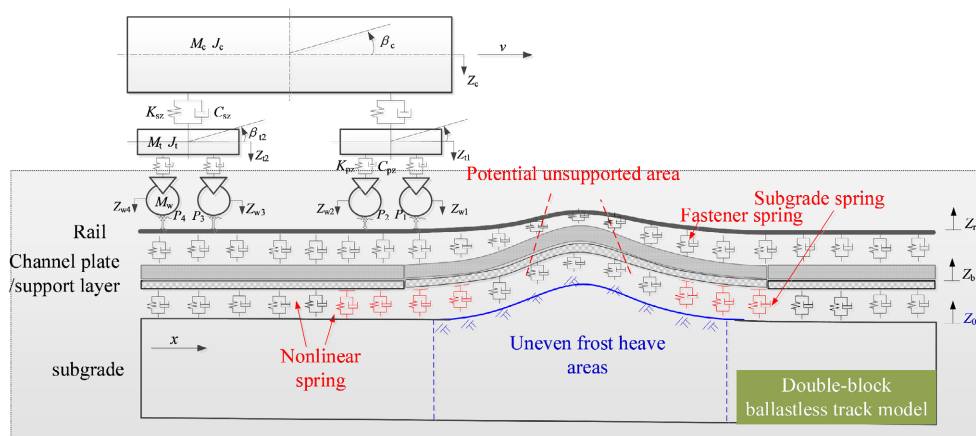


Figure 2. Dynamic model of the vehicle - ballastless track - subgrade coupled system subjected to subgrade frost heave

图2. 受路基冻胀作用的车辆-无砟轨道-路基耦合系统动力学模型

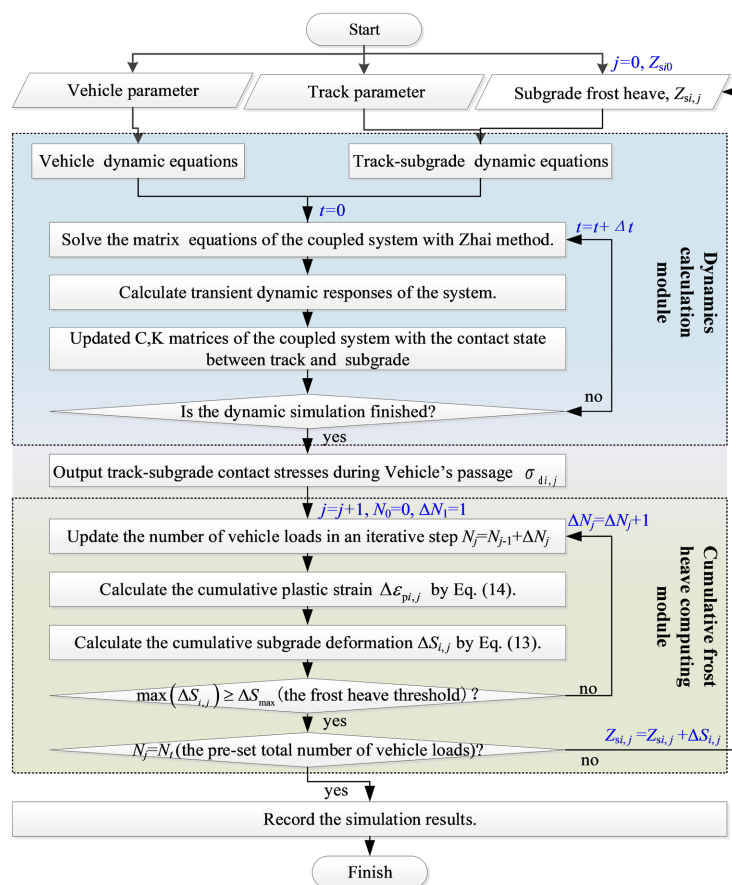


Figure 3. Computational flowchart of non-uniform frost heave evolution in subgrade induced by long-term cyclic train loading

图 3. 长期循环列车荷载诱发路基非均匀冻胀的演变计算流程

2.3. 循环荷载作用下路基冻胀累积塑性变形预测模型

本文采用的是 Li 和 Selig 提出的修正指数经验公式作为累积变形预测的数学模型, 又考虑到土体静

力强度参数、土体的静力破坏偏应力和动偏应力的影响等[20]，其表达式如下：

$$\varepsilon_p = a(\sigma_d/\sigma_s)^m N^b \quad (1)$$

式中， σ_d 为交通荷载引起的路基的动偏应力； σ_s 为土体的静力破坏偏应力； a 、 b 、 m 为参数，与土体类型和塑性指数有关，见表 1。

Table 1. Reference values of material parameters for different soil types

表 1. 不同土体类型的材料参考取值

参数取值		a		b		m	
		均值	范围	均值	范围	均值	范围
土体类型	低液限粉土(ML)	0.64	—	0.10	0.06~0.17	1.7	1.4~2.0
	高液限粉土(MH)	0.84	—	0.13	0.08~0.19	2.0	1.3~4.2
	低液限粘土(CL)	1.10	0.30~3.50	0.16	0.08~0.34	2.0	1.0~2.6
	高液限粘土(CH)	1.20	0.82~1.50	0.18	0.12~0.27	2.4	1.3~3.9

车辆荷载引起的动偏应力是求解路基累积塑性变形量的先决条件。在此基础上，联合土层的物理力学参数，确定静力破坏偏应力，进而依据既有经验公式分层计算各土体单元在循环荷载作用下的残余累积应变，最终采用分层总和法获得路基总沉降量，并以此预估冻胀变形的演化趋势。

1) 车辆荷载引起的路基土体的动偏应力

对土体的动偏应力可采用下式计算：

$$\sigma_d = \sqrt{3J_2} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{xd} - \sigma_{yd})^2 + (\sigma_{xd} - \sigma_{zd})^2 + (\sigma_{zd} - \sigma_{yd})^2 + 6\tau_{xyd}^2]} \quad (2)$$

式中， J_2 为第二应力不变量，通过 6 个应力分量计算得到。

为简化计算，本文采用竖向动应力代替动偏应力求解路基累积变形。

2) 静力破坏偏应力

对土体的静力破坏偏应力，采用下式计算：

$$\sigma_s = 2q_f = 2\left(c_{cu} \frac{\cos \varphi_{cu}}{1 - \sin \varphi_{cu}} + \frac{1 + K_0}{2} \sigma_{cz} \frac{\sin \varphi_{cu}}{1 - \sin \varphi_{cu}}\right) \quad (3)$$

式中， q_f 为不排水的抗剪强度； c_{cu} 为粘聚力； φ_{cu} 为内摩擦角； σ_{cz} 为土体的自重应力； K_0 为土体的侧限系数。

3) 分层总和法

本文采用式(4)计算各层的累积塑性应变，叠加得到荷载长期作用下路基整体的沉降值。

$$S = \sum_{k=1}^n \varepsilon_{pk} h_k \quad (4)$$

式中， S 为路基最终沉降量； ε_{pk} 为第 k 层土体的累积塑性应变； h_k 为第 k 层土体的厚度，本文计算中设为 0.1 m； n 为总层数[20]。

2.4. 列车长期荷载作用下路基不均匀冻胀的演化方法

计算预测步骤

长期循环列车荷载诱发路基非均匀冻胀的演变计算流程见图 3。

1) 输入路基冻胀参数 $Z_{si,j}$ (初始输入为 $Z_{si,0}$, $j=0$)、车辆参数、轨道参数等，采用翟方法求解系统动

力学方程, 计算系统瞬态动力响应, 求解并输出车辆经过时轨道与路基间的动态接触应力 $\sigma_{di,j}$ (i 表示沿线路纵向路基节点), 进入下一迭代步 $j = j + 1$;

2) 在计算过程中, 将第 1 步骤中得到的路基间动态接触应力代入式(1), 根据路基土的性质选取相关参数, 利用公式(5)计算路基各层的应力增量:

$$\Delta \varepsilon_{pi,j} = a \left(\sigma_{di,j-1} / \sigma_{si} \right)^m \left[\left(4N_{j-1} + 4\Delta N_j \right)^b - \left(4N_{j-1} \right)^b \right] \quad (5)$$

式中, N_{j-1} 是达到当前迭代步 j 之前通过的总车辆节数; ΔN_j 是迭代步 j 内通过的车辆节数; “4” 表示每节车辆的 4 位轮对。路基的总沉降增量 ΔS_{ij} 可以通过式(4)计算。

值得注意的是, 在不同迭代步中通过的车辆数是不同的, 在计算过程中设置允许的路基最大沉降增量 $\Delta S_{\max}$ 来控制其取值。如若计算迭代步骤内各点变形量 ΔS_{ij} 均小于冻胀阈值 $\Delta S_{\max}$, 则将车辆数 +1 更新当前迭代步中计算累积冻胀通过的车辆数, 并代入式(5)再次计算, 重复这一过程, 直到路基某点沉降增量达到或超过允许值, 记录当前步长 ΔN_j 及目前的车辆通过总数 $N_j = N_{j-1} + \Delta N_j$, 并保存路基沉降变化量 ΔS_{ij} [20]。

3) 判断总车辆通过数是否达到预设总数 $N_j = N_t$, 是的话, 输出记录计算结果, 否则重新进行迭代, 更新路基不均匀沉降形状 $Z_{si,j} = Z_{si,j-1} + \Delta S_{ij}$, 直至 $N_j = N_t$ 时终止迭代。

3. 案例设置

3.1. 计算条件

高铁路基冻胀过程划分为初始冻胀、快速冻胀、稳定冻胀以及冻胀回落四个阶段[22] [23]。根据文献[23]、文献[24]以及图 4 的哈大高速铁路基断面冻胀发展过程可知, 哈大线的稳定冻胀周期为 4 个月, 所以本文选取稳定冻胀时期的 4 个月来分析列车长期荷载作用下路基变形的演化及其对车辆轨道系统的影响[20]。

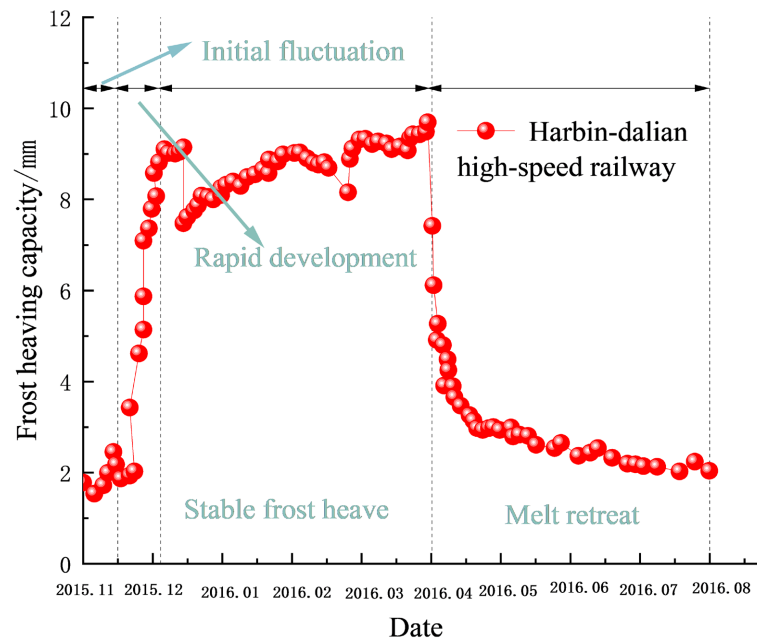


Figure 4. Development process of frost heave in base section of Harbin-Dagao railway [22] [23]

图 4. 哈大高速铁路基断面冻胀发展过程[22] [23]

本节计算中选取的主要线路参数有：

- 高速列车类型：8 节编组 CRH380B 型高寒动车组；
- 列车运行速度：300 km/h；
- 预测时长：4 个月；根据 12306 统计的哈大高铁运行数据，日均通过列车数按照 37 列计算，则通过的总车辆节数 $N_t = 8 \times 37 \times 120 = 35520$ 节；
- 路基计算参数：初始路基不均匀冻胀类型为余弦型，冻胀幅值/波长分别为 5 mm/10 m 和 5 mm/20 m，为突出路基不均匀冻胀的影响，计算中暂不考虑轨道随机不平顺。两种工况下由路基冻胀引起的初始轨面几何不平顺如图 5 所示。

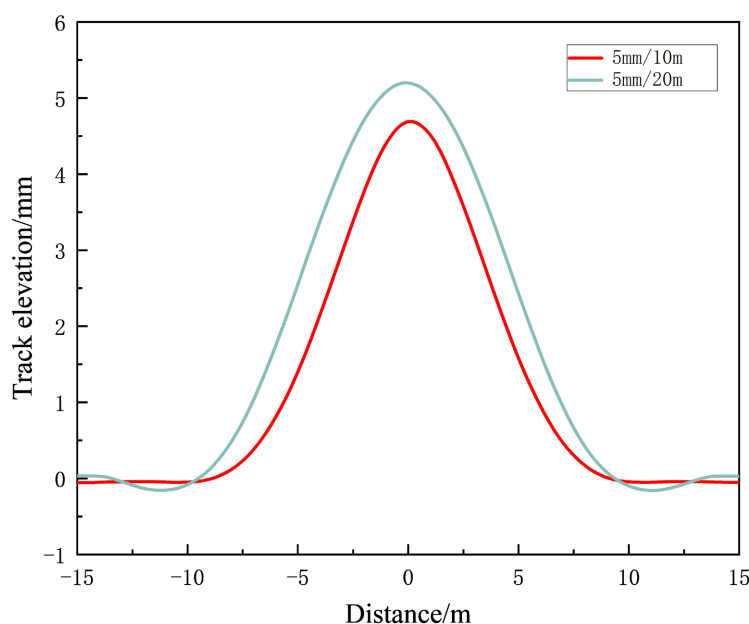


Figure 5. The initial rail surface geometric irregularity caused by high-speed line subgrade frost heave

图 5. 高铁线路路基冻胀引起的初始轨面几何不平顺

3.2. 路基型面更新阈值选取

在开展冻胀变形的长期演化预测时，路基型面在动力学计算过程中的更新以路基最大变形增量 $\Delta S_{\max}$ 作为关键控制参数。阈值设定的合理性对计算精度与效率之间的平衡具有决定性影响，因而 $\Delta S_{\max}$ 的取值需要经过审慎论证。本节的研究对象设定为初始幅值 5 mm、波长 20 m 的余弦型路基不均匀冻胀，将路基变形的更新阈值分别设置为 0.05 mm、0.1 mm 和 0.2 mm 三种方案。

由图 6(a)的对比结果来看，在三种阈值方案下，路基累积变形量随车辆通过数的变化曲线呈现高度一致性，仅在 $\Delta S_{\max}$ 取 0.2 mm 时，其曲线与另外两组之间出现了轻微偏差，这说明上述三种阈值方案均能满足较高的计算精度要求。当车辆通过数处于 5000 辆以内时，路基累积变形量呈现快速增长态势，至第 5000 辆车通过之际，累积塑性变形量达到 0.6 mm；此后，随着车辆通过数继续攀升，累积塑性变形的增长速率明显放缓，当车辆通过数累积至 5.76 万时，路基累积变形量趋于稳定，约为 0.8 mm。图 6(b)显示，更新阈值取 0.2、0.1、0.05 mm 时，完成预设车辆数的迭代次数依次为 16、13、9 次，逐步减少，即阈值越小，迭代越多，效率越低。迭代初期可通车辆少，少量加载便达阈值；随车辆累积，变形增长趋缓，单步所需车辆数增多。综合考虑精度与效率后，后续计算取 0.1 mm 为更新阈值。

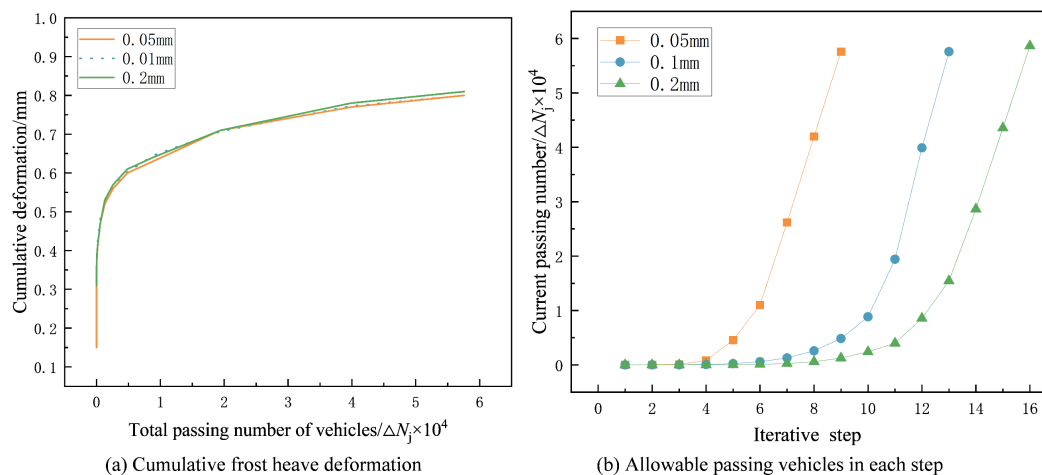


Figure 6. Analysis of the effect of subgrade frost heave profile update threshold values

图 6. 路基冻胀形态更新阈值取值影响分析

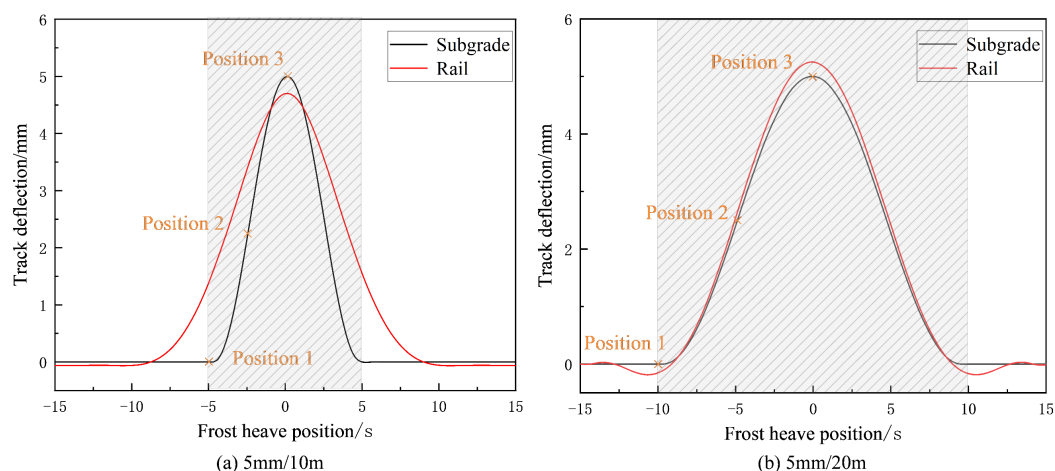


Figure 7. Initial subgrade non-uniform frost heave shape and its static rail surface geometric deformation

图 7. 初始路基不均匀冻胀形状及其引起的静态轨面几何变形

4. 结果分析

4.1. 列车长期作用下路基冻胀变形的演化规律

初始不均匀冻胀导致轨道结构与路基之间形成非协调变形, 冻胀峰值区路基隆起, 冻胀边缘区轨道与路基脱空, 此时轨道-路基接触应力的纵向分布极不均匀, 冻胀中心处接触应力高度集中, 而脱空区接触应力为零, 本质上是一种几何驱动的应力集中。当列车循环荷载反复作用于这一不均匀支撑体系时, 接触应力的空间差异直接驱动塑性变形的差异性累积, 冻胀中心区路基土承受的动偏应力最大, 塑性应变累积速率最快, 而脱空区因接触应力长期为零, 塑性变形几乎不发生。既有研究已证实, 路基冻胀变形的空间不均匀性会显著改变轨道-路基界面接触应力的分布模式, 冻胀峰值处的接触应力峰值可达非冻胀区的数倍。更为关键的是, 塑性变形的差异性累积具有“填谷削峰”的几何效应, 冻胀中心区路基因塑性变形而逐渐回落, 冻胀边缘区的脱空则因轨道结构的持续沉降而逐步消除, 这一过程实质上是以土体永久变形为代价, 将初始不均匀的几何形态向更均匀的形态重塑。

从土力学安定理论的角度可以更深刻地理解这一机制。Brown 等关于循环荷载下土体安定行为的实

验与理论研究,以及 Jung 等关于高速铁路板式轨道路基材料安定塑性应变建模的研究,为“塑性变形趋于稳定”提供了理论基础。在冻胀稳定期,路基土在经历初期快速塑性变形后,累积应变速率逐渐衰减并趋于稳定,与此同时,脱空区在轨道结构持续沉降过程中被逐步填实,接触应力从“零应力区 + 峰值集中”的双极分布,逐步向相对均匀分布演化。当脱空完全消除、接触应力纵向趋于均匀时,轨道-路基系统即进入了一种“几何平整 + 应力均匀”的安定状态,后续列车荷载不再引发显著的附加塑性变形,轨道几何形态得以维持稳定。Jung 等针对高速铁路混凝土板式轨道系统的研究进一步证实,板式轨道路基材料在循环荷载下的安定行为表现为永久变形速率随荷载次数的增加而显著减小,最终达到“塑性应变速率为零、循环响应为弹性”的状态。

在前述模拟工况下,以初始幅值为 5 mm、波长分别取 10 m 与 20 m 的余弦型路基非均匀冻胀为对象,对持续列车荷载作用下冻胀变形的演变特征进行预测。

图 7 中,阴影部分为路基初始冻胀区域。由图 7(a)可以看出,在路基冻胀幅值/波长为 5 mm/10 m 条件下,冻胀区间内出现无砟轨道与路基间的大范围非协调变形,轨面变形波及范围略大于路基冻胀区段,轨面最大冻胀幅值为 4.46 mm,冻胀区边缘轨道结构出现轻微沉降。当冻胀幅值为 5 mm、波长为 20 m 时,轨面几何变形与路基变形之间保持良好跟随性。后续分析中,沿线路纵向布设三个特征测点,并依次定义为冻胀起始端(位置 1)、冻胀半波中点(位置 2)以及冻胀峰值所在位置(位置 3)。

图 8 呈现了初始冻胀幅值与波长分别为 5 mm 和 10 m (此时路基同轨道结构间变形不协调性显著)时,在 4 个月列车运营期内,路基冻胀及其所致轨面不平顺的演变特征。整个求解过程累计迭代 14 次,依次对应累计通过高速车辆数为 1、3、8、22、62、176、445、1030、2248、4656、9235、17614、32619 和 57600 节。由图 8(a)可知,在车辆荷载反复作用下,路基整体呈渐进下沉趋势;受初始不均匀冻胀控制,累积塑性变形的发育亦表现出显著的纵向非均匀性。在冻胀中心邻近区段,路基变形量在荷载作用下的变化幅度较大,在轮载反复作用下,冻胀引起的路基隆起呈逐步回落趋势,而冻胀影响范围以外的变形幅度则相对有限。从图 8(b)可进一步看出,初始冻胀边缘位置处的一段区域内路基累积变形为零,表明此处轨道与路基产生了局部脱空且未受到列车荷载重复作用的影响。

图 8(c)与图 8(d)分别展示了车辆荷载作用下无砟轨道轨面几何变形的演化过程。由图可知,轨面累积变形的发展规律与路基变形存在一定差异,且其演化过程较路基累积变形更为平缓。与路基冻胀边缘处荷载作用可忽略的情形形成对照,轨道结构在车辆荷载反复作用下整体呈持续沉降趋势,变形幅值由 1.37 mm 减小至 0.37 mm,表明轨道与路基之间的脱空程度逐步减轻。

图 9 给出了列车荷载作用下 5 mm/20 m 路基不均匀冻胀的演化规律。由于该工况下路基冻胀波长较长,初始不均匀冻胀未诱发轨道结构的非协调变形。与 5 mm/10 mm 冻胀工况相比,在相同荷载总条数条件下,5 mm/20 m 工况共经历 13 次迭代,表明当非均匀变形趋于平缓时,荷载所诱发的累积变形也会逐渐进入相对稳定的状态。由图可知,在列车荷载反复施加过程中,初始路基非均匀冻胀变形不断加剧,其影响范围同步向外扩展;而在整个演变阶段,无砟轨道轨面变形与路基变形之间始终表现出较高的一致性。

图 8 与图 9 分别针对图 6 所示三个标记位置,考察了不同初始非均匀冻胀工况下路基与轨面累积变形的纵向分布特征,各测点间差异较为突出。从总体演化趋势来看,塑性变形在第 1 次迭代即首节车辆通过后便出现显著响应,随后随车辆持续通过而逐渐累积增长。就路基变形而言,当初始非均匀冻胀取 5 mm/10 m 时,各位置间的累积变形表现出明显分化:位置 1 处的累积变形始终维持为零,表明该处未受到车辆荷载的有效作用;位置 2 处则需等到第 62 节车通过后才开始出现塑性变形,反映出该处轨道与路基间的局部脱空已在此之前被消除;位置 3 处的累积变形大体呈近似线性增长,当通过车辆达到 57600 节时,其累积变形量达到 1.99 mm。

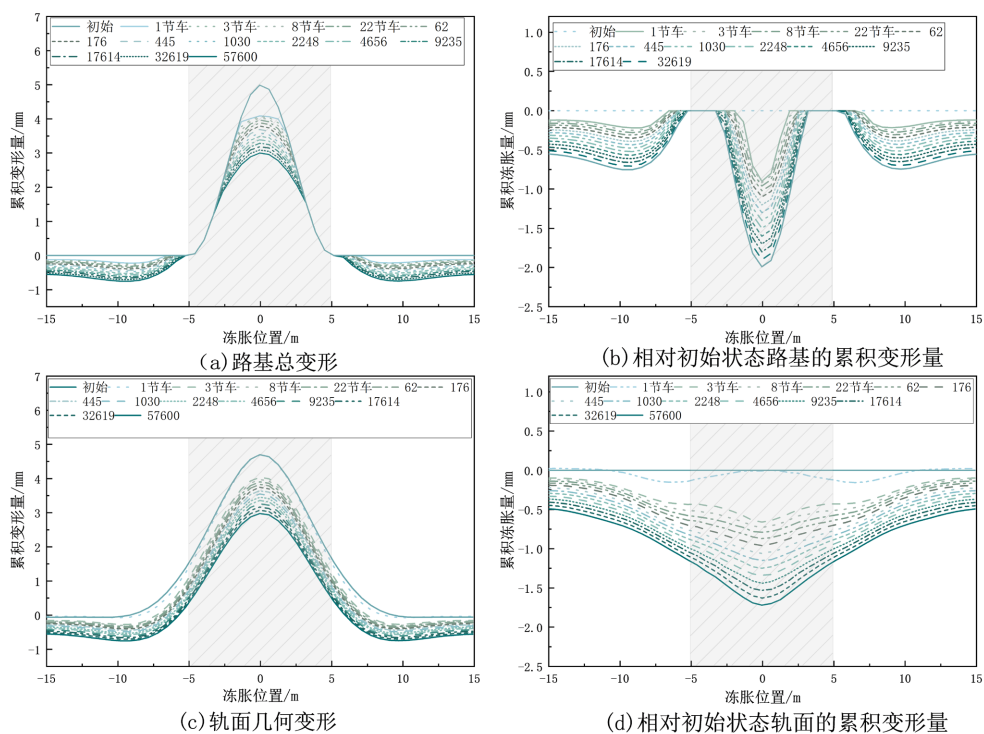


Figure 8. Evolution of non-uniform subgrade frost heave with an amplitude/wavelength of 5 mm/10 m under train loading

图 8. 列车荷载下幅值/波长 5 mm/10 m 的路基非均匀冻胀演化

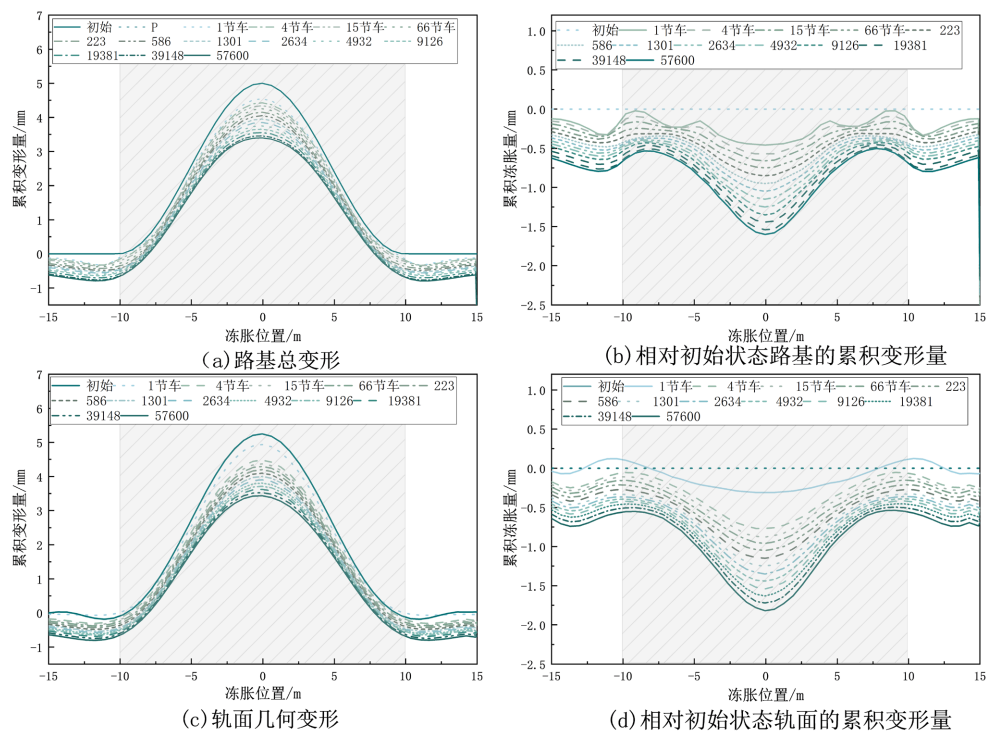


Figure 9. Evolution of non-uniform subgrade frost heave with an amplitude/wavelength of 5 mm/20 m under train loading

图 9. 列车荷载下幅值/波长 5 mm/20 m 的路基非均匀冻胀演化

在 5 mm/20 m 的初始冻胀条件下,路基各测点处的累积塑性变形均表现出近似线性的增长特征,且变形量由大到小依次为位置 3、位置 2、位置 1(见图 10)。就轨面几何变形而言,上述两种工况下各测点的累积变化量均随荷载作用同步发展;其中,5 mm/10 m 工况所对应的变形量相对更大,而 5 mm/20 m 工况下的累积下沉则表现出更为平缓的增长趋势(见图 11)。

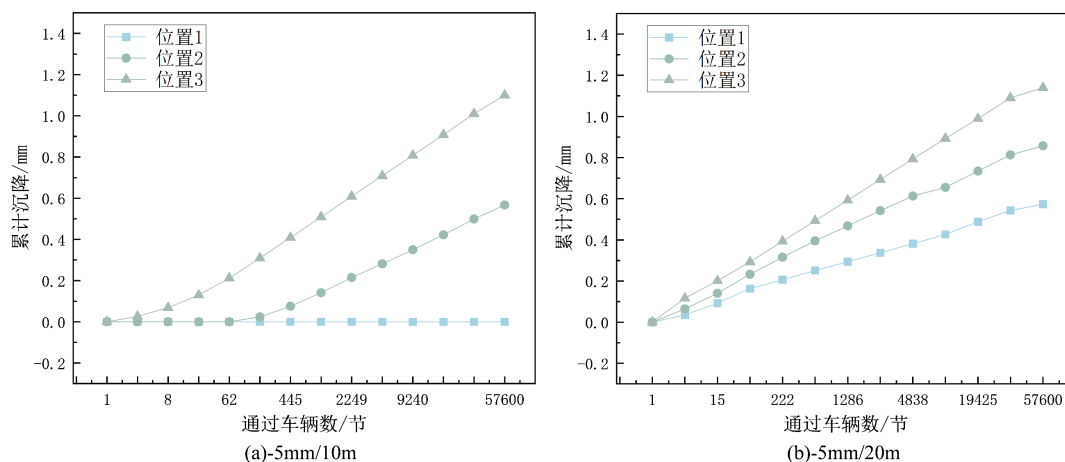


Figure 10. Cumulative deformation at subgrade locations under different initial frost heave conditions
图 10. 不同初始冻胀条件下路基各位置累积变形

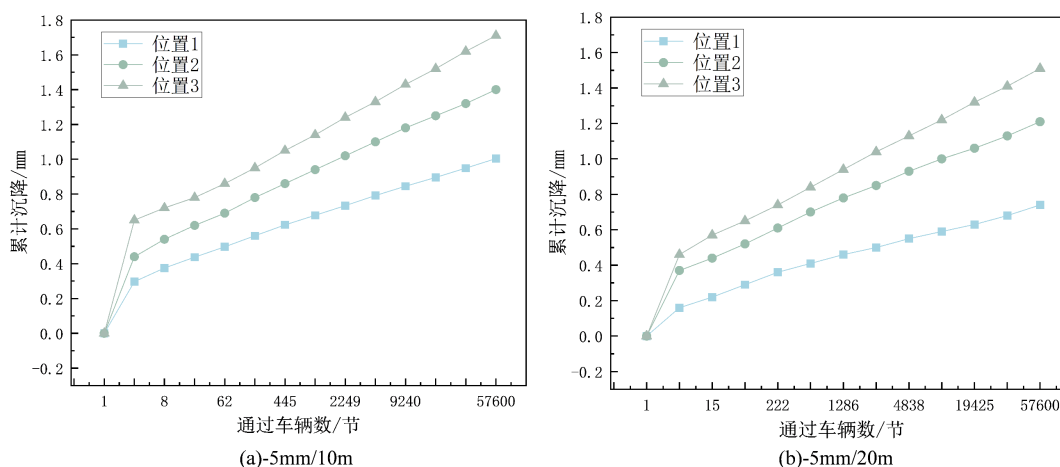


Figure 11. Cumulative deformation at rail surface locations under different initial frost heave conditions
图 11. 不同初始冻胀条件下轨面各位置累积变形

4.2. 路基冻胀演化对车辆 - 轨道耦合系统动力特性的影响

在列车荷载驱动冻胀变形持续演化的过程中,上部车辆 - 轨道耦合系统的动力学行为亦随之发生改变。本节着重探讨两种初始冻胀工况在演化进程中上部系统动力特性的响应规律。

1) 轮轨垂向力

图 12 给出了幅值 5 mm、波长 10 m 与 20 m 的初始路基不均匀冻胀演化过程,高速车辆行经冻胀区时第 1 位轮对下轮轨垂向力的变化曲线。可以看出,两种工况下轮轨垂向力的波动幅度均随路基不均匀冻胀的发育而减弱。在 5 mm/10 m 冻胀工况下,轮轨力幅值由 66.34 kN 逐步衰减至 65.00 kN,其中第 1 次迭代的下降幅度最为显著,此后各次迭代中变化趋于缓慢。究其原因,初始路基非均匀冻胀所致的轨

道与路基间不协调变形在车辆反复碾压下逐渐弱化,局部脱空程度随之减轻,从而使后续迭代中轮轨力幅值的衰减速率不断放缓并最终趋于稳定。与之相比,初始冻胀较缓的 5 mm/20 m 工况对应的轮轨力幅值降低幅度较小。

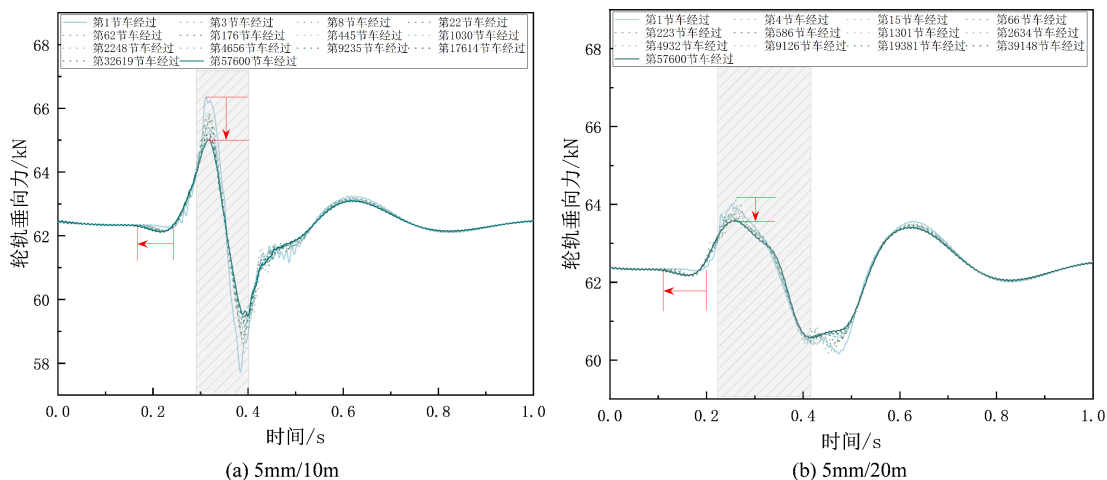


Figure 12. Effects of different initial frost heave conditions on wheel-rail vertical force under long-term train loading
图 12. 长期列车荷载下不同初始冻胀工况对轮轨垂向力的影响

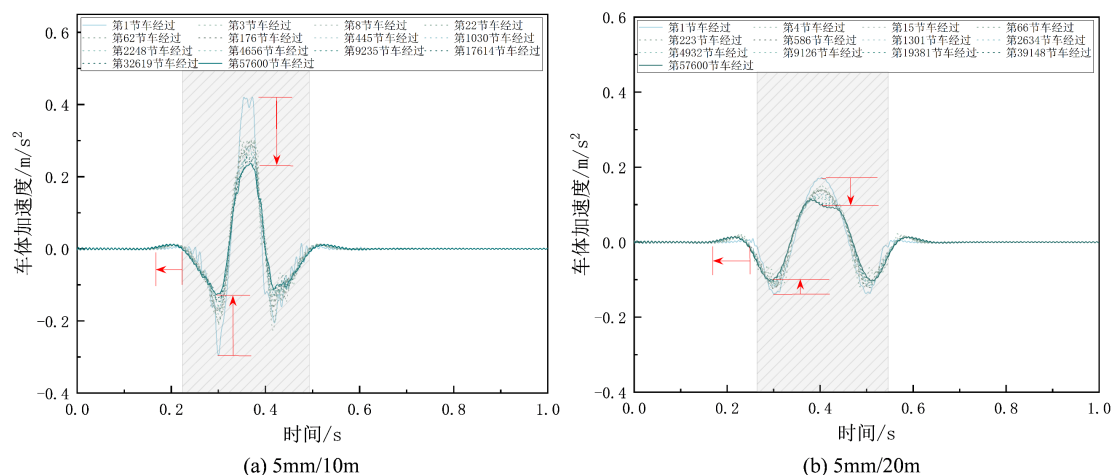


Figure 13. Effects of different initial frost heave conditions on carbody vertical acceleration under long-term train loading
图 13. 长期列车荷载下不同初始冻胀工况对车体垂向加速度的影响

2) 车体加速度

图 13 对比了两种初始路基不均匀冻胀演化过程中车体垂向加速度的变化。

与轮轨力的演化趋势相类似,车体加速度幅值亦随列车荷载作用次数的累积而逐步衰减,表明列车运营过程中由不均匀冻胀所引发的乘坐舒适性劣化得到一定程度的缓解;然而,冻胀变形所波及的范围总体上呈现小幅延伸的趋势,使得车体振动在更长的线路段落内均有体现。当初始非均匀冻胀取 5 mm/10 m 时,车体加速度幅值由 0.43 m/s² 递减至 0.23 m/s²,且首节车辆驶过时的降幅最为突出;相比之下,5 mm/20 m 工况下车体加速度幅值的衰减幅度较小,仅由 0.17 m/s² 降至 0.10 m/s²。

3) 轨道-路基接触应力

图 14 对比了初始冻胀幅值/波长为 5 mm/10 m 与 5 mm/20 m 冻胀条件下,车辆荷载反复作用引起的

沿线路纵向轨道与路基之间接触应力的变化规律。

由图 14(a)可知,当 5 mm/10 m 路基非均匀冻胀工况下板底初始即存在脱空时,轨道-路基接触应力在冻胀段落内表现出大幅度的振荡特征;在冻胀边缘的一定区间内,接触应力持续保持为零,该区段对应轨道与路基之间的局部脱离区域。随荷载循环次数增多,上述零应力段的长度逐渐减小,反映出车辆荷载的反复施加对脱空程度具有缓解作用。冻胀中心位置处,轨道-路基接触应力达到极大值,且伴随迭代次数增加,该峰值由 61.77 kPa 逐步衰减至 23.31 kPa,这表明列车荷载的持续作用可在一定程度上减轻初始路基非均匀冻胀所导致的轨道局部动力响应恶化,与此同时,轨道-路基接触应力的波动幅度呈逐渐增大的趋势。与之相对,5 mm/20 m 路基非均匀沉降条件下轨道-路基接触应力整体偏小,且未形成零应力区域,纵向非均匀性较弱,其随荷载反复作用的变化幅度亦相对平缓。

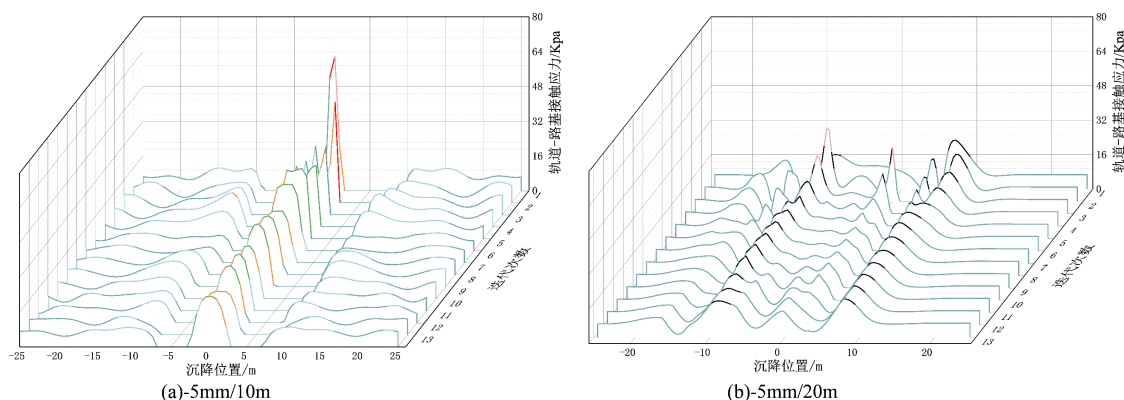


Figure 14. Effects of different initial frost heave conditions on track-subgrade contact stress under long-term train loading
图 14. 长期列车荷载下不同初始冻胀工况对轨道-路基接触应力的影响

4) 扣件附加力

图 15 反映了两种初始工况下列车通过时扣件附加力沿线路纵向的分布特征。与轨道-路基接触应力相比,路基非均匀冻胀所激发的扣件附加力在纵向上呈现出起伏程度较为有限的分布形态,其极大值位于冻胀中心位置,向冻胀边缘方向则表现为逐步衰减的趋势。此外,扣件附加力对车辆荷载持续作用的敏感程度亦不突出:在幅值 5 mm、波长 10 m 工况下,冻胀中心处的扣件附加力由 11.81 kN 衰减至 7.41 kN;而在 5 mm/20 m 工况下,该值则从 4.89 kN 下降至 3.51 kN。

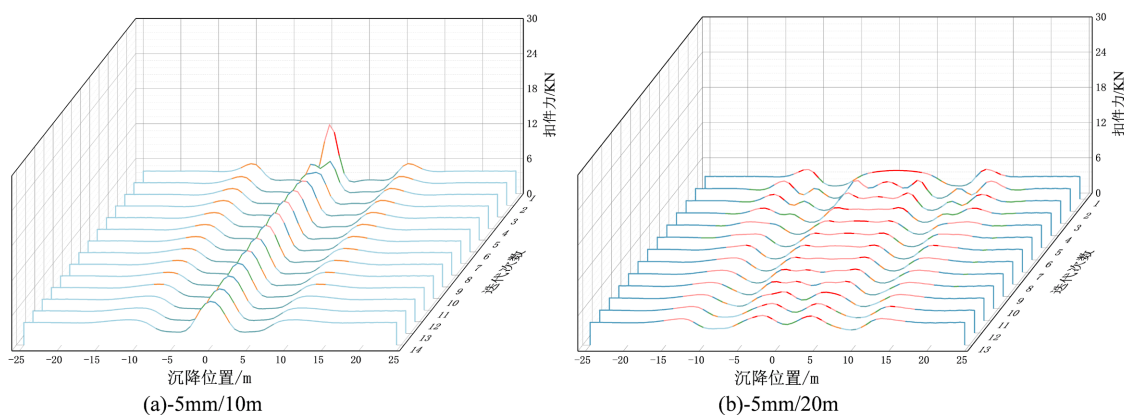


Figure 15. Effects of different initial frost heave conditions on additional fastener force under long-term train loading
图 15. 长期列车荷载下不同初始冻胀工况对扣件附加力的影响

5. 结论

本文结合已建立的考虑路基冻胀的车辆-无砟轨道耦合动力学模型, 和长期交通荷载作用下路基的累积塑性应变预测模型, 提出了列车荷载作用下高速铁路路基不均匀冻胀演化及其对上部系统动力特性影响的分析预测方法, 并选用 4 个月的稳定冻胀期为时间窗口对比了两种典型冻胀工况的差异。主要结论如下:

- 1) 当路基存在初始非均匀冻胀时, 列车荷载反复作用下所产生的后续累积变形在空间分布上呈现出高度不均衡的特征; 与此同时, 无砟轨道体系与路基之间因变形不协调而形成的局部脱离现象, 对上述累积变形的演化进程具有不可忽视的控制作用。
- 2) 在冻胀稳定期间的 4 个月内, 无砟轨道结构发生缓慢沉降, 首辆车荷载的影响最为显著, 后续车辆几乎呈现线性相关。
- 3) 累积交通荷载对于减少由路基冻胀引起的轨道不平顺具有积极作用。混凝土轨道与土质路基之间无支撑区域消减, 而初始冻胀区域规模增大。
- 4) 在长期的轨道劣化过程中, 车辆-轨道耦合系统在轮轨相互作用和结构层间力方面的初始冻胀引起的动力响应表现出缓和的趋势, 并最终达到稳定。

基金项目

国家自然科学基金(52502533)、天津市自然科学基金(25JCQNJC00050)、内蒙古自治区自然科学基金(2024MS05035)。

参考文献

- [1] 朱有志, 王磊, 刘振奇, 等. 季节性冻土区铁路路基冻害研究现状[J]. 中国铁路, 2022(3): 124-130.
- [2] 赵国堂. 季冻区高速铁路无砟轨道平顺性控制理论与技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2021.
- [3] 覃星源. 基于神经网络融合模型的季冻区路基变形预测及路面附加效应分析[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [4] 高建敏, 郭毅, 郭宇. 高速铁路路基不均匀冻胀变形对轮轨系统的动力影响研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(9): 94-102.
- [5] 梁斌. 高铁路基冻胀变形分析模型研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [6] 李鑫, 魏冠军, 张德龙. 联合 PS-InSAR 技术与多变量 LSTM 神经网络的高铁路基冻胀形变预测研究[J]. 测绘通报, 2024(1): 58-64.
- [7] 徐晓琳. 高速列车长期荷载作用下路基不均匀冻胀的演化及影响[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2025.
- [8] 郭亮武. 严寒地区路基冻胀下车辆-无砟轨道系统的动力学行为研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [9] 郭毅. 高速铁路路基冻胀变形引起的轨道结构变形特性及其对行车的动力影响研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [10] 吴仲伦. 高速铁路路基冻胀对轨道不平顺的影响分析及动力响应[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [11] Cai, X., Liang, Y., Xin, T., Ma, C. and Wang, H. (2019) Assessing the Effects of Subgrade Frost Heave on Vehicle Dynamic Behaviors on High-Speed Railway. *Cold Regions Science and Technology*, **158**, 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.11.009>
- [12] Cai, X., Zhang, Q., Zhang, Y., Wang, Q., Luo, B., Yang, G., et al. (2021) Deformation Law and Control Limit of CRTSIII Slab Track under Subgrade Frost Heave. *Applied Sciences*, **11**, Article No. 3520. <https://doi.org/10.3390/app11083520>
- [13] 杨国涛, 高亮, 刘秀波, 等. 基于动力分析的 CRTS III板式无砟轨道路基冻胀控制标准研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(10): 110-117.

-
- [14] 蒙富佳, 唐先习, 刘博, 等. 路基冻胀对高速列车-轨道耦合系统动力特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(8): 3310-3317.
- [15] 张鲁顺, 赵国堂. 基于高速铁路路基冻胀的轮轨动力响应研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(1): 8-14, 23.
- [16] Gao, L., Zhao, W., Hou, B. and Zhong, Y. (2020) Analysis of Influencing Mechanism of Subgrade Frost Heave on Vehicle-Track Dynamic System. *Applied Sciences*, **10**, Article No. 8097. <https://doi.org/10.3390/app10228097>
- [17] 刘洪铭. 轨道交通路基累积沉降规律及基于性能的 M-E 设计方法[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [18] 李鹏. 重载铁路路基动力响应与长期累积变形特性[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [19] Guo, Y. and Zhai, W. (2018) Long-Term Prediction of Track Geometry Degradation in High-Speed Vehicle-Ballastless Track System Due to Differential Subgrade Settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **113**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.05.024>
- [20] 郭宇. 高速铁路路基不均匀沉降及其演化对车辆-轨道耦合系统力学性能的影响[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [21] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 第 4 版. 北京: 科学出版社, 2015.
- [22] 任娟娟, 张书义, 许雪山, 等. 寒区无砟轨道服役性能演化与提升技术研究进展[J]. 中国铁路, 2022(8): 76-87.
- [23] 牛富俊, 刘华, 牛永红, 等. 季节冻土区高速铁路路堑段路基稳定性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 4032-4040.
- [24] 陈则连, 冷景岩. 哈齐客运专线路基冻胀变形研究[J]. 路基工程, 2014(6): 131-134.