

循环荷载作用下大坡度地铁道岔钢轨爬行分析*

王 天¹ 马前涛^{2,3} 郑兆光^{2,3} 杨 健^{2,3} 方嘉晟^{2,3} 陈 嵘^{2,3} 徐井芒^{2,3}

(1. 中铁建华南建设有限公司, 511458, 广州;

2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 610031, 成都;

3. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都)

摘 要 [目的]当道岔铺设在坡道上时会由于列车的循环制动导致轨道的纵向力有所增加,进而产生不均匀的钢轨爬行现象,使得道岔的受力变形规律更为复杂,甚至会影响道岔的正常服役使用,因此需对循环制动荷载作用下的大坡度道岔钢轨受力变形特征进行研究。[方法]开展了循环荷载作用下的扣件纵向阻力试验,建立了9号道岔非线性有限元模型,分析了循环荷载作用下的道岔钢轨爬行规律。[结果及结论]扣件系统在循环荷载作用下会出现阻力退化现象;在第1次列车制动后,道岔钢轨的爬行量最大;在循环荷载作用下,钢轨累积爬行增长量会随着循环荷载作用次数的增加而逐渐趋于稳定;坡度的存在会显著增大循环荷载作用下的钢轨爬行量;列车荷载形式对循环制动荷载作用下道岔钢轨的爬行量影响很小。

关键词 地铁;大坡度道岔;钢轨爬行量

中图分类号 U213.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.033

Analysis of Large-slope Metro Turnout Rail Creeping under Cycling Loads Action

WANG Tian¹, MA Qiantao^{2,3}, ZHENG Zhao-guang^{2,3}, YANG Jian^{2,3}, FANG Jiasheng^{2,3}, CHEN Rong^{2,3}, XU Jingmang^{2,3}

(1. China Railway Construction South China Construction Co., Ltd., 511458, Guangzhou, China; 2. MOE Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] When turnouts are laid on slope, the longitudinal force increase on the track due to the cyclic braking of trains will cause uneven rail creeping phenomena, resulting in a more complex stress and deformation pattern for the turnout, and even affecting its normal service. Therefore, it is necessary to study the characteristics of stress and deformation of large-slope turnout rails under cyclic braking loads. [Meth-

od] Tests on fastener longitudinal resistance under CLA (cycling loads action) are conducted, and a non-linear finite element model of the No. 9 turnout is established to analyze the turnout rail creeping pattern under CLA. [Result & Conclusion] The fastener system exhibits resistance degradation under CLA. The maximum creep of the turnout rail occurs after the first train braking. Under CLA, the cumulative increase in rail creeping gradually stabilizes with the increasing number of CLA. The presence of slope will significantly increase rail creeping amount under CLA. The train loading form has minimal influence on turnout rail creeping under cycling braking loads action.

Key words metro; large-slope turnout; rail creeping amount

随着我国城市轨道交通的建设与发展,道岔作为线路的关键设备及薄弱环节,近年来发展迅速。GB 50157—2013《地铁设计规范》中指出:道岔宜设在不大于5‰的坡道上,在困难地段应采用整体道床;尖轨后端为固定接头的道岔,可设在不大于10‰的坡道上。但由于规划建设、环保、节约用地或地形条件等限制,越来越多的道岔需应用在坡度大于5‰甚至10‰的大坡度线路上。当道岔铺设在坡道上时会导致轨道的纵向力有所增加,尤其是在列车制动与起动较多的城市轨道交通道岔布置区段,以及长大坡道或变坡点附近,长轨条容易产生不均匀爬行现象,而这种爬行又会受到道岔的阻碍作用,使道岔的受力变形规律更为复杂,影响道岔的正常服役使用。目前,国内外缺乏大坡度地段地铁道岔铺设、维护及运营管理的工程实践经验,因此,有必要对道岔铺设在大坡道上时的列车运行安全性和稳定性进行研究。

针对道岔或线路铺设在坡道上的问题,已有众多学者开展了相关研究。文献[1]采用有限元法,

* 四川省自然科学基金面上项目(2023NSFSC0398);中铁建华南建设有限公司科技研究开发计划课题(20-B-05)

建立了城市轨道交通大坡道及小半径曲线地段的长枕埋入式轨道和浮置板轨道结构模型,分析列车紧急制动下坡通过曲线时的钢轨受力、轨道结构底部支反力及轨道板的位移。文献[2]研究了地铁正线 40‰最大坡度的可行性,从机车功率、列车制启动、轨道力学特性等方面分析了大坡度对行车的影响。文献[3]计算了列车在各运行工况下的牵引、制动能力,分析了列车在大坡道上的牵引、制动需求。文献[4]建立了长大列车动力学模型,分析了大轴重重载列车在常用全制动工况下,大坡道曲线参数设置对行车性能的影响。文献[5]基于有限元法建立了无缝道岔非线性阻力计算模型,分析不同工况条件下的钢轨纵向力及位移。文献[6]通过分析不同坡度条件下,道岔钢轨在列车下坡制动作用时的力学行为,探讨了坡度对钢轨表面接触应力指标的影响。文献[7]针对 42 号道岔结构铺设在 12‰坡道上的情况,进行了不同工况下道岔结构的安全性论证研究。文献[8]基于有限元法,对高速铁路大坡道上铺设的 18 号、42 号道岔进行了静力学计算分析。已有文献研究均针对大坡道上的道岔或区间线路,均未考虑循环制动荷载对钢轨爬行量的影响,且目前关于大坡度地段地铁道岔结构受力与变形特征的研究较少。因此,有必要研究大坡度道岔在循环荷载作用下的钢轨爬行规律。

本文以广州地铁 10 号线(以下简称“10 号线”)拆解段拟在 30‰坡道上铺设 9 号道岔为例,开展循环荷载作用下的扣件阻力试验,研究了循环荷载作用下扣件纵向阻力的退化现象。然后,基于试验数据,建立了 9 号道岔非线性有限元模型,研究了循环荷载作用下大坡度道岔钢轨爬行的变化规律。本文研究可为大坡度道岔的铺设提供理论基础。

1 循环荷载作用下扣件纵向阻力试验

1.1 试验目的

通过室内试验测试道岔扣件系统在循环荷载作用下的纵向阻力,采用统计方法得到扣件阻力的特征曲线,分析其抵抗钢轨沿道床板发生纵向位移的能力,为建立道岔有限元模型提供扣件参数支撑。

1.2 试验内容

将长为 0.5 m 的短钢轨用Ⅲ型弹条扣件系统组装在承轨面上,并用千斤顶对钢轨施加纵向力,记录荷载及钢轨位移,当钢轨发生滑移时卸载,然后再次加载。

1.3 扣件阻力试验结果

基于室内试验模型进行单向循环荷载下的扣件纵向阻力试验,共进行 9 次单向重复加载试验(试验 1—试验 9)。不同循环荷载试验下,扣件纵向阻力与钢轨位移间的关系如图 1 所示。当单向加载-卸载-再加载时,9 次试验曲线的斜率几乎不变,即弹性阶段的单元刚度保持不变。随着循环荷载次数的增加,当单元进入塑性变形阶段,阻力开始出现退化现象,即塑性阶段所能提供的约束阻力有所下降。弹性加载阶段的曲线几乎是重合的,随着加载次数的增加,当超过临界位移时,扣件阻力值会出现不同程度的下降,塑性阶段的阻力下降明显。扣件系统在单次加载-卸载作用下,存在不可恢复的残余变形。当钢轨位移较小时,胶垫的剪切变形性能保持较好,且扣件压力几乎无损失,弹性性能保持较好。当钢轨位移继续增加时,塑性变形逐渐增大,扣件阻力开始衰减,直至胶垫蹿出。

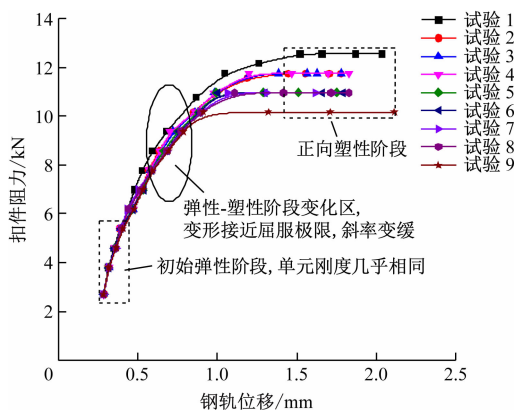


图 1 不同循环荷载试验下扣件纵向阻力与钢轨位移之间的关系

Fig. 1 Relation between fastener longitudinal resistance and rail displacement in different cycling load tests

不同加载次数下扣件极限阻力最大值和钢轨极限位移最大值的变化情况如图 2 所示。由图 2 可知:随着加载次数的增加,扣件极限阻力最大值和极限位移最大值均有所下降;循环次数越大,衰减率越大。

2 道岔非线性有限元计算模型及参数

2.1 爬行计算原理

由于线路阻力的非线性特征(简化为理想弹塑性),在荷载叠加条件下会使得线路阻力超过其弹性区而进入塑性阶段;当荷载消失后,线路阻力不再

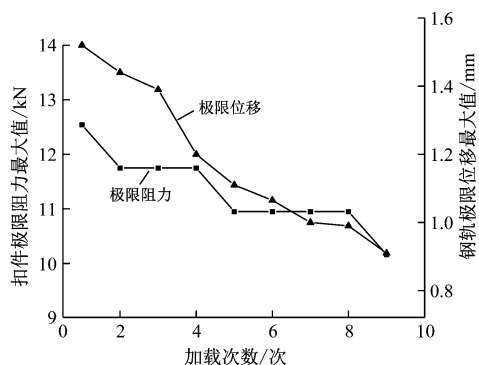


图2 不同加载次数下扣件极限阻力最大值和钢轨极限位移最大值的变化情况

Fig. 2 Variation of fastener maximum ultimate resistance and rail maximum ultimate displacement under different loading cycles

沿原始路径卸载,而是以弹性区的力-位移所对应曲线的斜率卸载,这就使得轨道结构有一定的塑性变形,即钢轨的爬行量。如果这种叠加荷载频繁发生,可能会造成钢轨爬行量过大,影响轨道结构的正常使用。本文采用有限元法建模和数据处理软件相结合的方式,考虑温度荷载、列车荷载作用下每组扣件非线性弹簧的本构关系变化情况,将上一次计算卸载的残余变形结果考虑到下一次计算过程中,通过多次的循环连续单向制动,计算大坡道上多次制动引起的道岔钢轨爬行量。

2.2 地铁9号道岔非线性有限元模型

9号道岔非线性有限元模型如图3所示。为消除边界效应,在道岔直股前端、直股后端、侧股后端各建立100 m长区间线路作为边界条件。由于只研究钢轨的纵向变形,为提高计算效率,采用杆单元建立钢轨模型,所有钢轨节点均约束横向自由度,采用非线性弹簧单元建立扣件模型,计算中考虑扣件的纵向阻力退化现象。基于循环重复荷载作用下的扣件阻力试验结果,根据上一次扣件纵向位移量更新扣件纵向刚度,将上一次阻力退化试验结果考虑到下一次计算过程中,该模型考虑了扣件、间隔铁和接头夹板的全面组合效应。

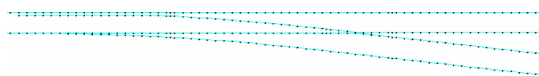


图3 9号道岔非线性有限元模型

Fig. 3 Nonlinear finite element model of No. 9 turnout

2.3 计算参数

9号单开道岔采用60 kg/m、U75V热轧钢轨,其弹性模量为210 GPa,该道岔的前长为14 015

mm,道岔后长为16 325 mm,基本轨前端长为2 600 mm,辙叉趾距为2 637 mm,辙叉跟距为3 370 mm。取列车逆向进岔为制动方向,设置制动区覆盖整组道岔,计算在直股循环制动时,道岔结构的受力与变形情况。制动工况设置示意图如图4所示。

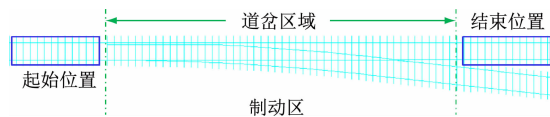


图4 制动工况设置示意图

Fig. 4 Diagram of braking working condition setting

模型计算考虑温度荷载影响,根据气温资料,广州市冬季日平均最低温度 $\geq 10^{\circ}\text{C}$,隧道内最高气温 $\leq 33^{\circ}\text{C}$,隧道内线路设计锁定轨温为 $(25 \pm 5)^{\circ}\text{C}$,可得轨温升温幅度为 33°C 。列车荷载计算采用地铁B型车荷载,列车荷载长度取为60 m。地铁B型车荷载示意图如图5所示。

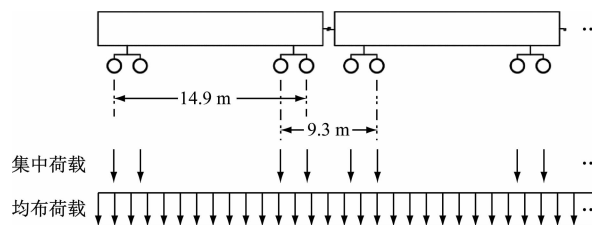


图5 地铁B型车荷载示意图

Fig. 5 Load diagram of metro Type B vehicles

制动力是通过轮轨摩擦直接作用于轨面的,然后通过扣件或道砟将部分荷载传递至路基,作用于轨面的制动力集度 $q = \mu Q$ (μ 为轮轨黏着系数; Q 为设计荷载)。根据UIC(国际铁路联盟)发布的相关标准,轮轨黏着系数取为0.25,摩擦因数按照一般标准取为0.25。

由于该道岔位于坡道上,制动荷载在沿坡道方向上存在列车荷载的分力,因此计算制动荷载时还应叠加上列车荷载的坡道分力。在计算中,坡道上的制动荷载可通过等效轮轨黏着系数 μ_0 来表征。坡道分力示意图如图6所示。其中: H 为坡道高度; α 为坡道倾角; L 为坡道长度在水平方向上的投影长度; F_1 为列车荷载; F_2 为列车荷载的坡道分力。

F_2 可以表示为:

$$F_2 = Q \sin \alpha \quad (1)$$

通常情况下, α 均为较小值,可令 $\sin \alpha \approx \tan \alpha$ 。此外,由于线路坡度 $i = H/L = \tan \alpha$,则有:

$$F_2 = Qi \quad (2)$$

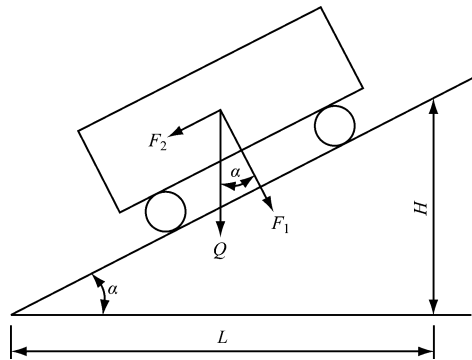


图6 坡道分力示意图

Fig. 6 Diagram of fractional force on slope

长大坡道上的等效轮轨黏着系数为 $\mu_0 = \mu + i$, 即 $\mu_0 = 0.25 + i$ 。此时, 作用于轨面的制动力集度 $q = \mu_0 Q$ 。

3 道岔非线性有限元计算结果及分析

3.1 制动力单次加载-卸载工况下钢轨受力变形分析

考虑制动荷载及33℃温度荷载共同作用下, 分析单次制动力加载-卸载的直基本轨位移。3种工况下, 钢轨纵向位移与起始位置距离间的关系如图7所示。将制动荷载加在道岔直股, 考虑温度荷载影响下, 制动加载一次转辙器区的最大纵向位移为0.161 mm, 制动卸载后的残余位移为0.041 mm。

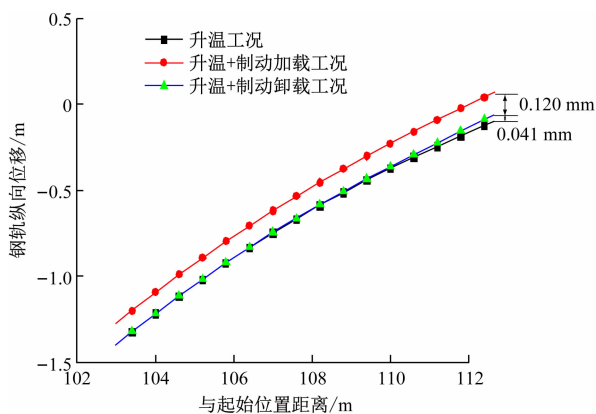


图7 3种工况下钢轨纵向位移与起始位置距离间的关系

Fig. 7 Relation between rail vertical displacement and starting position distance under three working conditions

3.2 循环制动作用下钢轨爬行量分析

考虑温度荷载及列车荷载作用下, 每组扣件的非线性弹簧本构关系变化, 将上一次计算卸载的残余变形结果考虑到下一次计算过程中, 分析在此基

础上的制动力循环加载-卸载过程, 分析道岔各部件的受力变形情况。循环制动加载-卸载作用下, 钢轨的累积爬行量与起始位置距离间的关系如图8所示。每次循环制动加载-卸载作用下, 钢轨的相对爬行量与起始位置距离间的关系如图9所示。

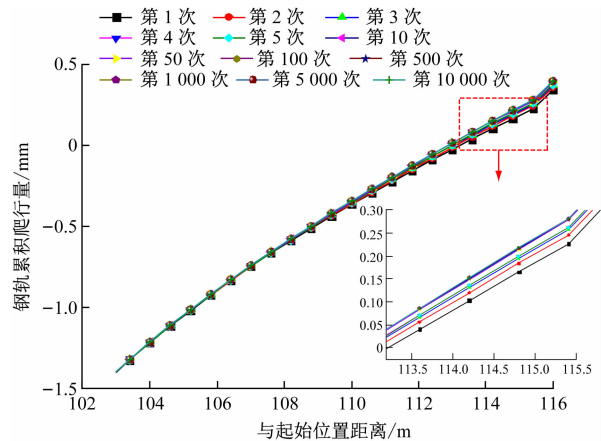


图8 不同循环次数下钢轨累积爬行量与起始位置距离间的关系

Fig. 8 Relation between rail cumulative creeping amount and the distance from starting location under different cycling times

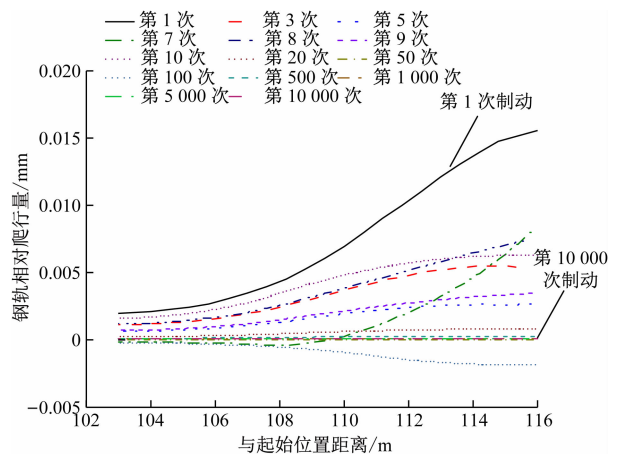


图9 不同循环次数下钢轨相对爬行量与起始位置距离间的关系

Fig. 9 Relation between rail relative creeping amount and starting position distance under different cycling times

随着循环次数的增加, 残余变形的增加量逐渐减少。当循环制动力加载-卸载循环1000次后, 钢轨累积爬行量的增加已极为缓慢, 导致扣件中的残余变形逐渐减小。当循环制动力加载-卸载循环10000次后, 钢轨累积爬行量为0.398 mm。

3.3 与平坡工况下的钢轨爬行量对比分析

为研究坡度对循环制动作用下钢轨爬行量的影响,将30‰坡度下循环制动作用时的钢轨爬行量与平坡工况下循环荷载作用时的钢轨爬行量进行对比。

3.3.1 制动力单次加载-卸载工况

不同坡度情况下,第1次制动加载和卸载的钢轨纵向位移如图10所示。第1次制动加载后,30‰坡度工况的钢轨纵向位移为0.463 mm,平坡工况的钢轨纵向位移为0.370 mm,30‰坡度工况下的钢轨纵向位移比平坡工况下的钢轨纵向位移增大了0.091 mm,增幅为21.5%;第1次制动卸载后,30‰坡度工况下的钢轨纵向位移为0.340 mm,平坡工况下的钢轨纵向位移为0.300 mm,30‰坡度工况下的钢轨纵向位移比平坡工况下的钢轨纵向位移增大了0.04 mm,增幅为13.1%。由此可知,坡度对钢轨纵向位移有较大的影响。

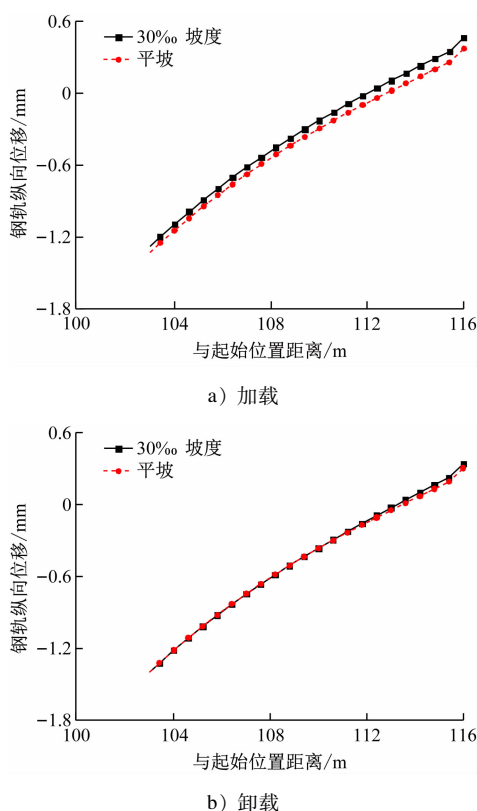


图10 不同坡度情况下第1次制动加载和卸载的钢轨纵向位移

Fig. 10 Rail longitudinal displacement during first braking loading and unloading under different slope conditions

3.3.2 循环制动工况

不同坡度情况下,列车循环制动加载-卸载10 000次的钢轨累积爬行量如图11所示。第10 000次循环制动加载-卸载后,30‰坡度工况下的钢轨累积爬行量为0.398 mm,平坡工况下的钢轨累积爬行量为0.315 mm,30‰坡度工况下的钢轨累积爬行量比平坡工况下的钢轨累积爬行量增大0.083 mm,增幅为26.23%。

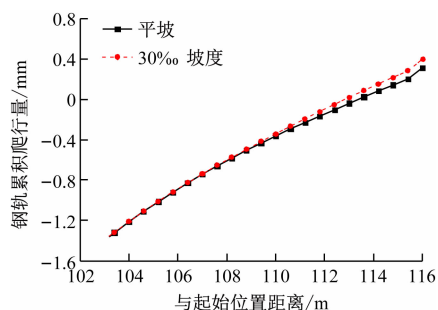


图11 不同坡度情况下列车循环制动加载-卸载10 000次的钢轨累积爬行量

Fig. 11 Rail cumulative creeping amount after 10 000 times of train cyclic braking loading-unloading under different slope conditions

3.4 不同荷载形式作用下钢轨爬行量分析

计算中,本文采用了列车荷载为荷载集度的形式,而现实中的列车荷载是通过多个轮轨接触集中力的形式施加在钢轨上的。在有限元模型中,通过对车轮所在位置的钢轨节点施加荷载来模拟列车集中力荷载形式,通过对列车所在区域的所有钢轨节点施加荷载来模拟列车的均布荷载,且均布荷载的总荷载等于集中力的总荷载。为研究不同列车荷载形式对循环制动作用下钢轨爬行量的影响,对荷载集度形式与集中力形式下,列车荷载循环作用的钢轨爬行量进行对比分析。

3.4.1 制动力单次加载-卸载工况

不同荷载形式下,第1次制动加载和卸载的钢轨纵向位移如图12所示。第1次制动加载后,集中力形式列车荷载作用下的钢轨纵向位移为0.473 mm,荷载集度形式列车荷载作用下的钢轨纵向位移为0.463 mm,集中力形式列车荷载作用下的钢轨位移比荷载集度形式列车荷载作用下的钢轨纵向位移增大了0.010 mm;第1次制动卸载后,集中力形式列车荷载作用下的钢轨纵向位移为0.352 mm,荷载集度形式列车荷载作用下的钢轨纵向位移为0.342 mm,集中力形式列车荷载作用下的钢轨位移

比荷载集度形式列车荷载作用下的钢轨纵向位移增大了 0.010 mm。由此可知,列车荷载形式对循环制动作用下钢轨纵向位移的影响很小。

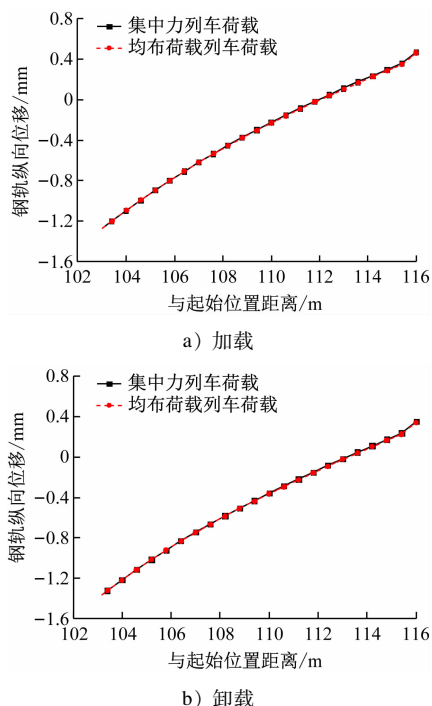


图 12 不同荷载形式下第 1 次制动加载和卸载的钢轨纵向位移

Fig. 12 Rail longitudinal displacement during first braking loading-unloading and unloading under different load forms

3.4.2 循环制动工况

不同列车荷载形式下,列车循环制动加载-卸载 10 000 次的钢轨累积爬行量如图 13 所示。第 10 000 次循环制动加载-卸载后,集中力形式列车荷载作用下的钢轨累积爬行量为 0.414 mm,荷载集度形式列车荷载作用下的钢轨累积爬行量为 0.398 mm。

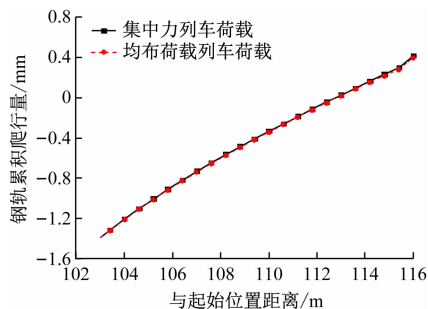


图 13 不同列车荷载形式下列车循环制动加载-卸载 10 000 次的钢轨累积爬行量

Fig. 13 Rail cumulative creeping amount after 10 000 times of train cyclic braking loading-unloading under different train load forms

mm,集中力形式列车荷载作用下的钢轨累积爬行量比荷载集度形式列车荷载作用下的钢轨累积爬行量增大了 0.016 mm,增幅为 3.8%。

4 结语

为研究大坡度道岔在循环荷载作用下的钢轨爬行规律,本文开展了循环荷载作用下的扣件阻力试验。以试验数据为基础,建立了 9 号道岔非线性有限元模型,研究了循环荷载作用下大坡度道岔的钢轨爬行变化规律。主要获得以下结论:

- 1) 对扣件系统施加单向循环荷载时,扣件纵向阻力与钢轨位移曲线的斜率几乎不变,即弹性阶段的单元刚度保持不变;随着循环荷载次数的增加,当单元进入塑性变形阶段时,阻力会出现退化现象,即塑性阶段所能提供的约束阻力有所下降。
- 2) 在列车第 1 次制动后,道岔钢轨的爬行量最大。循环荷载作用下的钢轨累积爬行增长量会随着循环荷载作用次数的增加而逐渐趋于稳定。
- 3) 道岔铺设在大坡道上时,由于纵向荷载的增大,循环荷载作用下的钢轨爬行量会显著增大。
- 4) 列车荷载形式对循环制动荷载作用下道岔钢轨爬行量的影响很小。

参考文献

- [1] 刘富. 城市轨道交通大坡道及小半径曲线地段轨道结构受力和变形特性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(6): 80. LIU Fu. Mechanical and deformation characteristics of rail transit track with long steep gradient and small radius curve[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(6): 80.
- [2] 王仲林, 曾勇, 易思蓉. 地铁正线 40.0‰ 最大坡度对行车特性的影响[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(5): 937. WANG Zhonglin, ZENG Yong, YI Sirong. Influence of 40.0‰ maximum gradient of metro main line on running characteristics of trains[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(5): 937.
- [3] 刘志彬, 任娟娟, 赵坪锐, 等. 长大坡道上梯形轨道稳定性研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(3): 41. LIU Zhibin, REN Juanjuan, ZHAO Pingrui, et al. Stability study of ladder track on long steep grade[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(3): 41.
- [4] 蒋立干, 时瑾, 龙许友. 大轴重重载列车长大下坡道曲线地段行车性能分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(15): 77. JIANG Ligan, SHI Jin, LONG Xuyou. Operational performance analysis for a heavy haul train passing through curve section of a long steep ramp[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(15): 77.

(下转第 203 页)

- [3] NILSSON C M, JONES C J C, THOMPSON D J, et al. A waveguide finite element and boundary element approach to calculating the sound radiated by railway and tram rails[J]. Journal of Sound Vibration, 2009, 321(3/4/5): 813.
- [4] 赵悦, 何远鹏, 韩健, 等. 有轨电车曲线啸叫噪声试验分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(10): 133.
- ZHAO Yue, HE Yuanpeng, HAN Jian, et al. Measurements and analyses of curve squeal caused by tram[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(10): 133.
- [5] 刘卫丰, 张厚贵, 孟磊, 等. 北京地铁采用调频式钢轨减振器抑制钢轨振动的试验研究[J]. 振动工程学报, 2016, 29(1): 105.
- LIU Weifeng, ZHANG Hougui, MENG Lei, et al. A test of suppressing rail vibration by tuned rail damper for Beijing Metro[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, 29(1): 105.
- [6] 孙方遒, 谷爱军, 刘维宁. 钢轨长实体模型在不同频段的振动及传递特性分析[J]. 铁道学报, 2013, 35(2): 81.
- SUN Fangqiu, GU Aijun, LIU Weining. Study on vibration and transmission characteristics of long solid rail models under different frequencies[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(2): 81.
- 收稿日期:2022-02-10 修回日期:2022-03-15 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-10 Revised:2022-03-15 Published:2024-07-10
· 第一作者:杨刚,博士研究生,940780623@qq.com
通信作者:何远鹏,博士研究生,he.yuanpeng@outlook.sg
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 190 页)

- [2] 虞凯. 中低速磁浮交通电磁辐射原理研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(2): 74.
- YU Kai. Research on the principle of electromagnetic radiation in low and medium speed maglev traffic[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(2): 74.
- [3] 钱根, 王沛沛, 湛博. 地铁杂散电流对隧道钢筋极化电位分布影响研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(11): 200.
- QIAN Gen, WANG Peipei, ZHAN Bo. Study on the influence of metro stray current on polarization potential distribution of tunnel reinforcement [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(11): 200.
- [4] 吴树强. 中低速磁悬浮供电系统的技术特点研究[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(8): 87.
- WU Shuqiang. Research on the technical characteristics of power supply system for medium and low speed maglev vehicles [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(8): 87.
- [5] 王向灿, 邱冰, 戴旺, 等. 中低速磁浮交通系统工程造价优化[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(6): 161.
- WANG Xiangcan, QIU Bing, DAI Wang, et al. Project cost optimization of medium-low speed maglev transit system [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(6): 161.
- 收稿日期:2022-02-09 修回日期:2022-03-22 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-09 Revised:2022-03-22 Published:2024-07-10
· 通信作者:戴能云,高级工程师,155087082@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 196 页)

- [5] 张梦楠, 颜乐, 王平, 等. 长大坡道铺设无缝道岔可行性分析[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(2): 13.
- ZHANG Mengnan, YAN Le, WANG Ping, et al. Feasibility analysis of seamless turnout on long steep grade[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(2): 13.
- [6] 曾志平, 徐榕, 阮莹, 等. 地铁大坡度道岔制动工况下钢轨表面接触应力变化规律研究[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 243.
- ZENG Zhiping, XU Rong, RUAN Ying, et al. Research on the change law of rail surface contact stress under the braking condition of metro turnout [J]. Surface Technology, 2021, 50(6): 243.
- [7] 刘伟, 刘春明. 12‰坡道上铺设 42 号道岔的理论研究与工程应用[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(10): 37.
- LIU Wei, LIU Chunming. Theoretical study and engineering application of laying No. 42 turnout on a 12‰ ramp [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(10): 37.
- [8] 张荣鹤. 高速铁路大坡道上 18 号和 42 号有砟道岔受力分析[J]. 山西建筑, 2020, 46(23): 119.
- ZHANG Ronghe. Stress analysis of laying No. 18 and No. 42 ballasted turnout on large ramp of high-speed railway [J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(23): 119.
- 收稿日期:2022-02-26 修回日期:2022-03-29 出版日期:2024-07-10
Received:2022-02-26 Revised:2022-03-29 Published:2024-07-10
· 第一作者:王天,高级工程师,693335166@qq.com
通信作者:徐井芒,教授,mang080887@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license