

高铁列车引发振动在铁路路基中的传播规律

祁延录¹ 宁晶² 黄勇³ 张先军⁴ 申雪松⁵ 刘洋⁶ 杨长卫⁷

1. 新疆铁道勘察设计院有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830011

2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 中国·湖北 武汉 430063

3. 新疆大学, 中国·新疆 乌鲁木齐 830011

4. 中国国家铁路集团有限公司, 中国·北京 100844

5. 中铁三局集团有限公司, 中国·山西 太原 030000

6. 中铁二院工程集团有限责任公司, 中国·四川 成都 610031

7. 西南交通大学, 中国·四川 成都 610031

摘要: 通过有限元软件建立高速铁路路基二维平面应变模型, 得到单线、双线高速铁路在列车荷载作用下的路基响应加速度曲线, 探究了列车运行引发振动在铁路路基中的传播规律并确定其影响范围。研究结果表明: 路基响应加速度在沿着路基横向快速衰减, 双线高速铁路由于双线列车荷载叠加, 其响应加速度衰减明显快于单线高速铁路, 但其响应加速度峰值要大于单线铁路; 随着列车运行速度的增加, 单线高速铁路路基响应加速度增大, 但在双线高速铁路中这一规律相反; 列车运行引发振动在单线高速铁路中影响范围约为 50m, 在双线高速铁路中影响范围约为 30m。

关键词: 高速铁路; 路基; 加速度响应; 振动传播; 数值模拟

The Propagation Law of Vibration Caused by High-speed Train in Railway Subgrade

Yanlu Qi¹ Jing Ning² Yong Huang³ Xianjun Zhang⁴ Xuesong Shen⁵ Yang Liu⁶ Changwei Yang⁷

1. Xinjiang Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830011, China

2. China Railway Fourth Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430063, China

3. Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang, 830011, China

4. China National Railway Group Co., Ltd., Beijing, 100844, China

5. China Railway Third Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

6. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610031, China

7. Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan, 610031, China

Abstract: A two-dimensional plane strain model of high-speed railway subgrade was established through finite element software, and the response acceleration curves of single track and double track high-speed railways under train load were obtained. The propagation law of vibration caused by train operation in railway subgrade was explored, and its influence range was determined. The research results indicate that the response acceleration of the roadbed rapidly decays along the transverse direction of the roadbed. Due to the superposition of double track train loads, the response acceleration of a double track high-speed railway decays significantly faster than that of a single track high-speed railway, but its peak response acceleration is greater than that of a single track railway; as the running speed of the train increases, the response acceleration of the single track high-speed railway subgrade increases, but in double track high-speed railways, this pattern is opposite; the vibration caused by train operation has an impact range of about 50m in single track high-speed railways and about 30m in double track high-speed railways.

Keywords: high-speed railway; roadbed; acceleration response; vibration propagation; numerical simulation

0 前言

随着中国高速铁路的快速发展, 高铁成为人民大众重要的出行方式之一^[1]。随着列车运行速度的提高, 高速铁路路基动力响应受到了研究者的广泛关注^[2]。高铁列车运行速度快, 对铁路的平顺性有极高的要求^[3,4], 当线路发生不均匀沉降时列车需要降速通过沉降路段或花费大量资源对病

害区域进行工程修复。同时, 列车在高速运行过程中引发的振动通过路基传递至线路两侧, 对铁路沿线的设备、房屋建筑等产生不利影响^[5,6]。

许多学者对列车荷载作用下高速铁路路基的动力响应开展了相关研究。董亮^[7]等采用数值仿真方法并引入一致黏弹性人工边界对路基在列车荷载作用下的动力特性进行分析; 刘振宇^[8]等建立高速铁路无砟轨道-路基动力有限元

模型, 分析了列车在更高速度运行条件下不同基床结构的路基动力响应; 叶阳升^[9]结合现场实测与有限元计算, 分析了无砟轨道路基动应力、动变形的幅值特征及变化规律。

论文采用 ABAQUS 有限元软件建立二维平面应变模型, 对列车引发振动在高速铁路路基中的传播规律开展研究, 分析了不同列车运行速度下铁路路基中的加速度响应特征, 得到了响应加速度在路基中的衰减规律。

1 数值仿真模型

1.1 模型建立

通过 ABAQUS 有限元软件建立二维平面应变模型。单线高速铁路有限元模型如图 1 所示, 其中路堤高度为 6.4m, 行车面宽度为 14m, 单线轨道位于行车面中央, 轨道间距为 1.435m, 路堤边坡坡率为 1 : 1.5。模型边界条件为左侧设置对称边界, 底部设置固定边界, 右侧设置无限元以吸收反射波, 以提高计算精度。

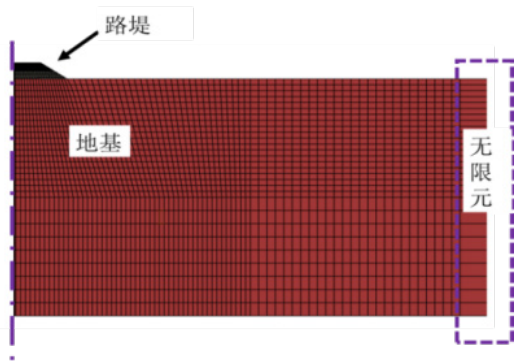


图 1 单线铁路模型图

高铁运行时, 经常会出现双线高铁交会的情况, 此时两列车的振动荷载可能会叠加, 使得路基内部振动传播规律发生改变。对模型进行简化, 建立二维模型进行数值仿真分析, 如图 2 所示。根据高铁设计规范, 双线高铁路基线间距与铁路设计速度和线间设施有关。论文分析中, 设置多条线间距, 即 5.0m, 6.0m² 种线间距工况, 分析不同线间距下列车振动在路基内部的衰减规律。

设置模型中心线到模型外侧宽度为 200m。轨道间距仍为 1.435m, 路堤边坡坡率为 1 : 1.5, 基床顶层, 基床底层, 路基土的厚度与单线路堤一致。

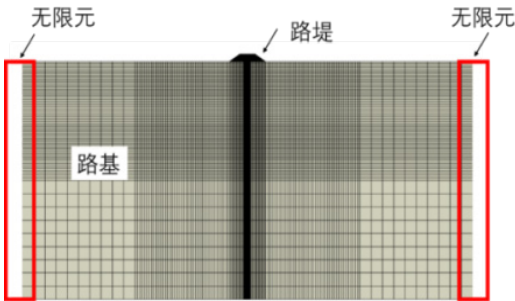


图 2 高速铁路双线路堤振动波传播特性有限元模型

单线铁路模型与双线铁路模型采用相同的材料物理力学参数设置。各材料的基本物理力学参数如表 1 所示。

表 1 材料的物理、力学特性参数

材料	E (MPa)	φ ($^{\circ}$)	c (kPa)	ρ (g/cm^3)
轨道板	30000	-	-	2.5
基床表层	360	27	70	1.95
基床底层	240	20	55	1.90
路基填土	109.5	10	30	2.1
地基土	50	20	20	1.8

1.2 计算工况

论文中设置 330km/h, 350km/h 和 360km/h 三种不同时速加载工况。速度为 330km/h 时的轮轨作用力分别如图 3 所示。高铁轮轨间距为 1.435m, 故在距离中心轴线一侧 0.7125m 处施加集中力, 分别施加上述三种速度下的列车荷载。

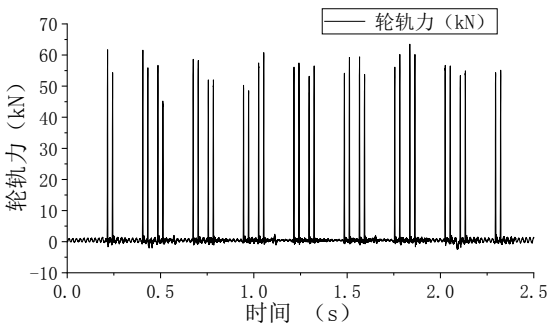


图 3 330km/h 下轮轨力

2 计算结果分析

2.1 单线高速铁路路基响应加速度分析

提取路堤与地基分界面上位于路堤中心线不同距离处的点的加速度进行分析, 范围从轨道正下方 (0.725m) 到 150m 处。

分别提取到路堤中心线不同距离处的加速度峰值, 绘制三种振动激励下的衰减曲线如图 4 所示。在 330km/h、350km/h、360km/h 时路基响应加速度峰值分别为 5.27m/s²、5.86m/s²、6.24m/s², 随着列车运行速度的增加路基响应加速度峰值增大。三条加速度衰减曲线拐点均位于距离路堤中心 50m 位置左右, 随着速度增加拐点位置基本上稳定且略有减小, 综合分析可认为高速铁路的振动影响范围在 0~50m。在距离路堤中心 50m 范围以内, 高速铁路列车运行引发的路基土体响应加速度较大, 响应加速度随着距路堤中心的距离增加而减小, 至距路堤中心 50m 处响应加速度衰减至接近 0。

2.2 双线高速铁路路基响应加速度分析

间距为 5m, 6m 的双线高铁路堤段场地振动衰减曲线如图 5、图 6 所示。双线路高铁路堤段场地振动在路堤范围内随着距离变化会出现一定的波动, 并不是连续平滑减弱, 这是由于列车荷载叠加引起的。此外, 不同车速和线间距几

何条件下的拐点较为接近,线间距 5m、6m、7m 时分别为距线路中心 28.3m、28.4m、28.8m,均在 30m 以前,显著小于单线路堤的情况。线路间距增加后,拐点距离略有增加,但路堤坡脚以外的加速度振动峰值会明显降低。将车速从

330km/h 提高到 360km/h 后,拐点位置几乎不会改变。考虑到线间距为 5m,6m,7m 时,路基中心到路堤坡脚的距离为 16.4m,16.9 和 17.4m,故高速铁路列车运行引起的路基响应加速度在距离路堤坡脚 14 米左右衰减至 0。

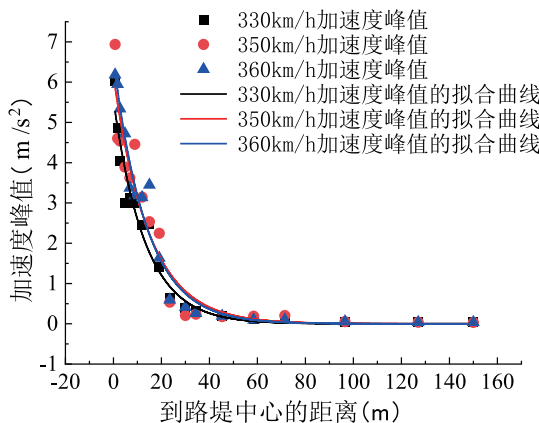


图 4 三种时速高铁激励荷载下路基加速度衰减曲线

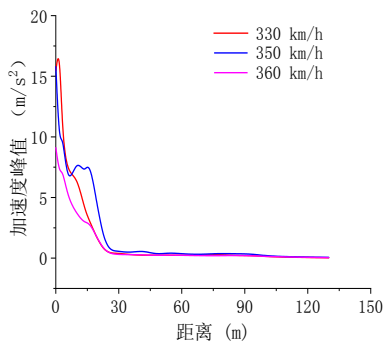


图 5 5m 线间距高铁路堤场地振动衰减曲线

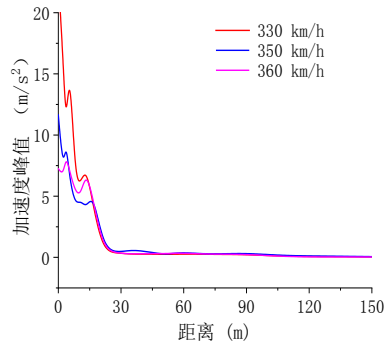


图 6 6m 线间距高铁路堤场地振动衰减曲线

3 结论

通过单双线高速铁路二维平面应变模型有限元计算,可以得到以下结论:

- ①单线高速铁路路基响应加速度峰值随着列车运行速度的增大而增大;响应加速度衰减曲线拐点在 330km/h、350km/h、360km/h 工况下均位于距离路堤中心 50m 位置左右。
- ②双线高速铁路路基中响应加速度的衰减曲线拐点位于距线路中心线大约 30m 位置。在相同列车时速下双线高速铁路路基中响应加速度峰值要明显大于单线高速铁路。
- ③双线高速铁路路基响应加速度峰值在线间距相同的情况下,随着列车运行速度的增加而减小,且由于双线列车荷载叠加,在路堤区域内加速度峰值曲线出现明显的大幅波动。

参考文献:

[1] 陈鼎.高速铁路路基动力响应及影响因素研究[D].长沙:中南大学,2010.

[2] 薛富春,张建民.移动荷载下高铁路基段振动加速度频谱衰减特

性[J].岩土力学,2015,36(S1):445-451.

[3] 马利衡,梁青槐,谷爱军,等.沪宁城际高速铁路路基段振动试验研究及数值分析[J].铁道学报,2014,36(1):88-93.

[4] 庞志强,高芒芒,李国龙,等.基于列车响应的运营期高速铁路桥梁沉降阈值[J].铁道建筑,2024,64(5):69-75.

[5] 姚锦宝,夏禾,陈建国,等.运行列车对附近建筑物振动影响的试验研究和数值分析[J].中国铁道科学,2009,30(5):129-134.

[6] 陈建国,夏禾,肖军华,等.列车运行对周围地面振动影响的试验研究[J].岩土力学,2008(11):3113-3118.

[7] 董亮,赵成刚,蔡德钧,等.高速铁路无砟轨道路基动力特性数值模拟和试验研究[J].土木工程学报,2008,41(10):81-86.

[8] 刘振宇,赵有明,李泰澧,等.更高速度条件下高速铁路路基动力响应及长期动力稳定性研究[J].铁道学报,2023,45(4):127-138.

[9] 叶阳升.高速铁路路基动力响应特性[J].铁道建筑,2015(10):7-12.

作者简介: 祁延录 (1976-), 男, 蒙古族, 中国青海乐都人, 本科, 正高级工程师, 从事铁路、公路路基设计及科研工作。