

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240326001

高速铁路堤段列车进出站加减速阶段振动特性实测*

高广运^{1,2}, 史文杰^{1,2}, 耿建龙^{1,2}, 李伟³, 李思莹⁴

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 华东建筑集团股份有限公司, 上海 200092; 4. 广西交科集团有限公司, 广西 南宁 530007)

摘要: 为研究高铁进出站加减速阶段列车运行引起的路堤段地面不同位置处振动特性, 实测了阜阳西站附近郑阜高铁和商合杭高铁之间路堤段地面振动, 对比不同线路上不同列车加减速引起的地面不同方向上振动加速度时频曲线, 研究了列车车型、列车运行状态和高铁线路型式对地面振动特性的影响。研究表明, 列车车型对靠近轨道处地面沿轨道方向振动影响明显。列车运行加速度较小时, 列车不同轮对产生的地面振动加速度峰值差异较小。列车车型主要改变地面水平方向振动频谱特性。列车运行状态对距轨道较远处地面水平方向振动加速度峰值影响较大, 对不同位置处地面竖向振动主频影响较大。商合杭高铁和郑阜高铁列车运行产生的地面振动反弹增大现象出现的位置不同。郑阜高铁线上不同列车对距轨道中心较远处地面振动影响较商合杭高铁线大。商合杭高铁列车运行引起的地面水平方向振动主频整体随与轨道中心间距增加而增大, 郑阜线上不同方向振动主频随与轨道中心间距增加未呈现明显的变化规律。商合杭高铁上不同列车运行产生的地面水平方向加速度振动主频差异较小, 在郑阜高铁上不同列车运行产生的振动主频差异较大。

关键词: 高铁; 路堤; 加减速; 列车车型; 车速

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)05-1139-12

Field Measurement of Vibration Characteristics During Acceleration and Deceleration of Train Entry and Exit along Embankment Sections of High-speed Railways

GAO Guangyun^{1,2}, SHI Wenjie^{1,2}, GENG Jianlong^{1,2}, LI Wei³, LI Siying⁴

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Arcplus Group PLC, Shanghai 200092, China;

4. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd, Nanning 530007, China)

Abstract: To investigate the vibration characteristics at different ground locations of embankment sections caused by train acceleration and deceleration during entry and exit of high-speed railway stations, field measurements were conducted on ground vibrations along the embankment section between the Zhengzhou-Fuyang high-speed railway and the Shangqiu-Hefei-Hangzhou high-speed railway near Fuyang West station. The time-frequency curves of vibration accelerations in different directions on the ground caused by acceleration and deceleration of different trains on different lines were

* 收稿日期: 2024-03-26; 修回日期: 2024-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277130)资助

作者简介: 高广运(1961—), 男, 教授, 博导。主要从事环境振动与屏障隔振研究。E-mail: gaogy@tongji.edu.cn

compared. The effects of train type, train operating status, and high-speed railway line type on the ground vibration characteristics were investigated. The results showed that the train type significantly affected the ground vibration along the track direction near the rails. When the acceleration of the train was small, the differences in the peak values of ground vibration acceleration caused by different wheelsets were relatively small. Train type primarily altered the spectral characteristics of ground vibrations in the horizontal direction. The train operating status had a considerable effect on the peak values of horizontal ground vibration accelerations at locations farther from the track, and a greater effect on the dominant frequencies of vertical ground vibrations at different locations. The locations where the ground vibration rebound amplification phenomenon occurred differed between trains on the Shangqiu-Hefei-Hangzhou high-speed railway and Zhengzhou-Fuyang high-speed railway. Trains on the Zhengzhou-Fuyang high-speed railway had a greater impact on ground vibrations at locations farther from the track center compared to those on the Shangqiu-Hefei-Hangzhou high-speed railway. The dominant frequencies of horizontal ground vibrations induced by trains on the Shangqiu-Hefei-Hangzhou high-speed railway generally increased with increasing distance from the track center. In contrast, the dominant frequencies of vibrations in different directions on the Zhengzhou-Fuyang line did not exhibit a distinct variation pattern with increasing distance from the track center. The differences in the dominant frequencies of horizontal ground vibrations caused by different trains on the Shangqiu-Hefei-Hangzhou high-speed railway were relatively small, whereas significant differences were observed for those on the Zhengzhou-Fuyang high-speed railway.

Keywords: high-speed railway; embankment; train acceleration and deceleration; train type; train speed

0 引言

路堤作为高铁车站进出站阶段采用的一种典型路基形式,通过的车次频次高,时间长,列车存在频繁的加减速过程,对周围环境的影响较大。为研究高铁路堤段的振动特性,马利衡等^[1]通过现场试验和数值分析的方法,分析了沪宁城际高速铁路路堤段地面振动特性及影响因素。G.Kouroussis等^[2]基于现场实测数据和数值计算模型分析了列车类型和土体参数对路堤段地面振动特性的影响。陈洪运等^[3]实测了在津秦客运专线滨海北站附近路堤段时频振动特性,并建立数值计算模型分析了环境振动传播衰减规律。孟祥连等^[4]在西宝高速铁路黄土地区典型路基段实测了不同机车类型、不同运行速度通过时水平、垂直的振动特性。G.Y.Gao等^[5]建立2.5维有限元模型分析了路堤高度和弹性模量等对地面振动位移的影响。

目前,对列车进出站阶段运行产生的振动响应多集中于地铁的研究^[6-9],而对高铁进出站阶段列车加减速引起的路堤段地面特性研究较少。史吏等^[10]构建 $u-p$ 格式饱和土体单元并结合黏弹性人工

边界研究了列车加减速引起轨道结构和饱和地基振动,结果表明列车加速和减速均增大了土体竖向位移。Z.G.Cao等^[11]将地基考虑为饱和多孔弹性半空间模型,分析了高铁加减速引起的地基振动响应,研究表明列车车速较低时列车加减速对纵向位移和速度响应影响较小,而当列车速度为200 km/h时,列车减速会使纵向位移和速度响应显著增加。

列车在进出站过程中处于制动减速和启动加速运行状态,振动特性较正线区间更为复杂。因此,本文实测了阜阳西站南侧商合杭高铁和郑阜高铁不同列车运行引起不同方向地面振动,分析了高铁车站附近列车车型和地形形状等对高铁列车加减速阶段地面振动特性的影响。

1 测试概况

1.1 测试场地与车辆情况

本次测试场地位于商合杭高铁和郑阜高铁线路之间,阜阳高铁西站南侧500 m处。进站列车进站前2 min、出站列车出站后2.5 min左右会经过测点。阜阳西站位于阜阳市区西南部,郑阜高铁和商合杭高铁在此处设站,单日通过的车次均在150列

以上。除2列过站车外,其余列车均在阜阳西站停靠,列车加减速频次高且车型较多,便于开展本次研究。

测试场地与阜阳西站之间为城市主干道三清路,为双向六车道,路面车流量较大。场地西侧郑阜高铁线外为未硬化的乡间小路,偶有车辆通过,如图1所示。



图1 测试现场平面示意

Fig.1 Schematic diagram of test site plan

为测试不同位置处地面振动特性,根据现场实际情况,本文在商合杭高铁和郑阜高铁之间布置了6个测点,测点现场布置和列车通过情况如图2和图3所示,测点分布情况如图4所示。其中,郑阜高铁路堤坡度为1:1,商合杭高铁路堤坡度为1:1.5。在两条高铁线之间存在形成凸起地形的回填土,高度介于2.0~2.8 m。

在测试过程中,每个测点测试1 h。在测试时间段内,郑阜高铁共通过高铁5车次,有进站车、出站



图2 郑阜高铁测试现场

Fig.2 Test site of Zhengzhou-Fuyang high-speed railway



图3 商合杭高铁测试现场

Fig.3 Test site of Shangqiu-Hefei-Hangzhou high-speed railway

车和过站车3种运行状态;商合杭高铁共通过高铁5车次,仅有进站车和出站车2种运行状态,所有列车在经过时均不是完全匀速通过。测试时间段内通过的列车情况见表1,其中过站列车运行方向与出站列车一致。

1.2 土体参数

测试场地区域地貌分区属淮北冲积平原,整个场地土层较均匀。地势高低起伏较小,整个场地地势较平坦。测试场地土体参数见表2。其中,表层土剪切波速为210 m/s,结合2.2节中不同列车运行引起的振动加速度主频可得,路基中振动波长多集中于60 Hz附近,剪切波长为3.5 m,大于凸起地形高度2.8 m,凸起地形对剪切波的传播影响较小。

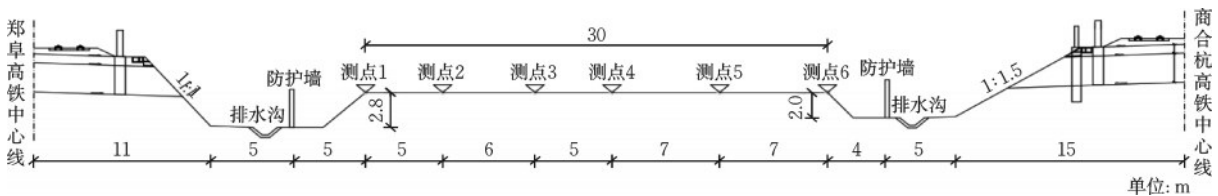


图4 测试场地高铁线路和测点布置断面

Fig.4 Cross section of high-speed railway and measurement point arrangement at test site

本次测试采用意大利测试仪 TROMINO, 振动响应频率为 0.01~300 Hz, 加速度分辨率为 0.001 gal。在测试过程中,先去除测点位置表面的石块、杂物及浮土,后将测点附近土体夯实,将仪器调平并指北后固定在坚硬的土层上,记录下测试时

间后开始进行测试。每个测点均同时采集三个相互正交方向(x 向为沿轨道方向、 y 向为垂直轨道方向、 z 向为竖向)的地面振动加速度和速度。同时,在测试过程中同步录像,确定列车车型、列车运行速度和加速度。

表1 测试时间段内列车通过情况

Table 1 Train passages during test period

序号	线路	进/出/过站	车次	车型	平均车速/(km·h ⁻¹)	运行加速度/(m·s ⁻²)	编组/节	车长/m
1	商合杭	进站	G1874	CRH380B	72.8	-0.12	8	202.95
2	商合杭	进站	G3176	CR400BF	68.0	-0.23	8	209.06
3	商合杭	出站	G7669	CRH380B重联型	76.4	0.14	16	405.87
4	商合杭	进站	G3180	CRH380B	74.3	-0.26	8	202.95
5	商合杭	出站	G3113	CRH380BL	73.5	0.06	16	399.27
6	郑阜	出站	G7731	CRH380B	87.0	0.31	8	202.95
7	郑阜	进站	G3192	CR400BF	54.1	-0.01	8	209.06
8	郑阜	过站	G3117	CRH380B重联型	142.3	-0.11	16	405.87
9	郑阜	进站	G2806	CR400BF-Z	65.0	0.07	8	211.31
10	郑阜	进站	G7722	CRH380B	74.0	0.13	8	202.95

表2 测试场地土体参数

Table 2 Soil parameters of test site

层序	土层名称	层厚/m	重度/ (kN·m ⁻³)	孔隙比	压缩模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	剪切波速/ (m·s ⁻¹)
①	素填土	3.0	18.5	0.746	3.50	0.35	15.0	5.0	210
②	黏土	5.5	19.7	0.686	9.05	0.40	49.1	10.8	210
③ ₁	粉土夹粉砂	3.4	19.4	0.714	12.75	0.43	13.1	19.8	250
③ ₂	粉砂夹粉土	7.3	19.2	0.660	14.72	0.40	6.1	25.9	240
④	粉质黏土	2.4	19.5	0.697	7.12	0.42	40.6	9.0	220
⑤	粉土夹粉质黏土	9.4	19.5	0.696	9.60	0.43	13.1	20.4	225
⑥	粉质黏土	5.1	19.6	0.709	7.55	0.41	41.5	9.2	—
⑦	粉砂夹粉土	2.0	19.4	0.684	14.50	0.40	6.5	26.9	—
⑧	粉质黏土夹粉土	8.3	19.8	0.687	10.34	0.38	50.6	10.1	—
⑨	粉质黏土夹粉土	8.2	19.8	0.672	10.07	0.37	55.0	12.0	—

2 地面时频振动特性

由于测试时间段内通过的高铁数量比较多,选取典型列车类型时程振动曲线进行分析。

2.1 不同车型列车运行引起的地面振动特性

选择商合杭高铁上处于进站阶段、列车车速和加速度接近的G3176次CR400BF列车和G1874次CRH380B列车分析不同车型列车运行引起的地面振动特性。CR400BF列车和CRH380B列车车型技术参数见表3,表中CR400BF列车与CRH380B列车编组形式、最大轴重、转向架轴距和踏面类型相同,其他设计参数不同。

图5为CR400BF列车和CRH380B列车运行引起的商合杭高铁最近的测点6振动加速度时程曲

线。由图可知,CR400BF列车和CRH380B列车在地面 x 、 y 、 z 向产生的振动加速度峰值分别为0.137、0.126、0.107 m/s²和0.260、0.136、0.106 m/s²,后者分别较前者大89.8%、7.9%、-0.1%,说明一方面沿轨道方向上两列车在产生的振动加速度均最大,垂直轨道方向次之,竖向最小,说明列车进站减速阶段产生的水平方向振动加速度峰值大于竖向,与文献[10]的研究结果一致;另一方面CRH380列车在地面沿轨道方向产生的振动加速度明显大于CR400BF列车,在垂直轨道方向上相差较小,而在竖向基本相同。

CR400BF列车与CRH380B列车轮对周期性加载引起的沿轨道方向上地面振动加速度幅值差异明显。CR400BF列车不同轮对运行引起的地面振动加速度峰值差异较小,CRH380B列车中间轮对运行引起的地面振动加速度峰值明显大于首尾轮

表3 列车车型技术参数

车型	CR400BF	CRH380B
编组	4M4T	
最大轴重/t	17	
转向架轴距/mm	2 500	
踏面类型	LMB10	
运营车速/(km·h ⁻¹)	350	310
全长/m	209.06	202.95
转向架中心距/mm	17 800	17 375
头车车钩中心距/mm	27 580	26 475
中间车车钩中心距/mm	25 650	25 000
新轮轮径(动/拖)	920/920	920/830

对。此外,虽然两列车均处于减速进站状态,但由于两列车车速较低且加速度较小,在时程曲线上均未出现已有论文中^[12]观察到的减速滑行,即后一轮对的运行产生的加速度峰值小于前一轮对。在其他两个方向上两种车型列车运行引起的地面振动加速度分布形态差异较小,仅是振动幅值出现的位置有所差异,且垂直轨道方向列车轮对周期性现象均比较明显,在竖向上均不明显,不同轮对产生的加速度峰值也均未出现明显的减速滑行分布情况。

为进一步分析不同车型在地面的振动传播衰减规律,汇总测试时间段内商合杭线上通过的进站列车的振动加速度峰值如图6所示。由图可知,随与商合杭高铁轨道中心间距的减小,不同类型高铁列车在地面不同方向产生的振动加速度峰值整体呈现波动增加趋势。在测点1~测点5之间,不同列车在3个方向上产生的振动接近,说明在此范围内列车车型对地面振动特性影响较小,且不同方向上

振动加速度峰值差异较小。在测点6处,不同方向上各车次列车运行引起的地面振动差异明显增大,整体呈现沿轨道方向(x 向)振动加速度峰值最大,竖向(z 向)最小,垂直轨道方向(y 向)居中的形态,说明列车车型对地面不同方向振动加速度的影响仅在靠近轨道处最近的测点明显,对距离较远的测点影响很小。

此外,在测点6处,不同车型列车在地面沿轨道方向产生的振动加速度差异较大,而在垂直轨道方向和竖向差异较小,结合图5可知在此处列车车型对沿轨道方向振动加速度影响明显,而对垂直轨道方向和竖向地面振动加速度影响较小。由表3可知,列车轮对间距、轮径等列车设计参数对列车减速进站阶段地面沿轨道方向振动影响较大。

为分析不同车速下地面振动能量和振动频率的分布情况,对G3176次CR400BF列车和G1874次CRH380B列车不同位置处地面振动加速度时程数据进行傅里叶变换,得到相应的加速度频谱曲线,分别如图7和图8所示。

由图7和图8可知,在沿轨道方向和垂直轨道方向上,CR400BF列车和CRH380B列车在地面不同位置处产生的振动主频出现的位置较为一致,变化较小;而在竖向上变化较大。

沿轨道方向上,CR400BF列车在测点4、5、6处产生的地面振动能量主要集中于27~70 Hz,而在测点1、2、3处则主要集中于50~70 Hz。CRH380B列车在测点4、5、6处产生的地面振动能量主要集中于31~36 Hz和54~63 Hz,而在测点1、2、3处则主要集中于56~72 Hz。对比可知,CRH380B列车和CR400BF列车在距轨道较近处的测点4、5、6处振

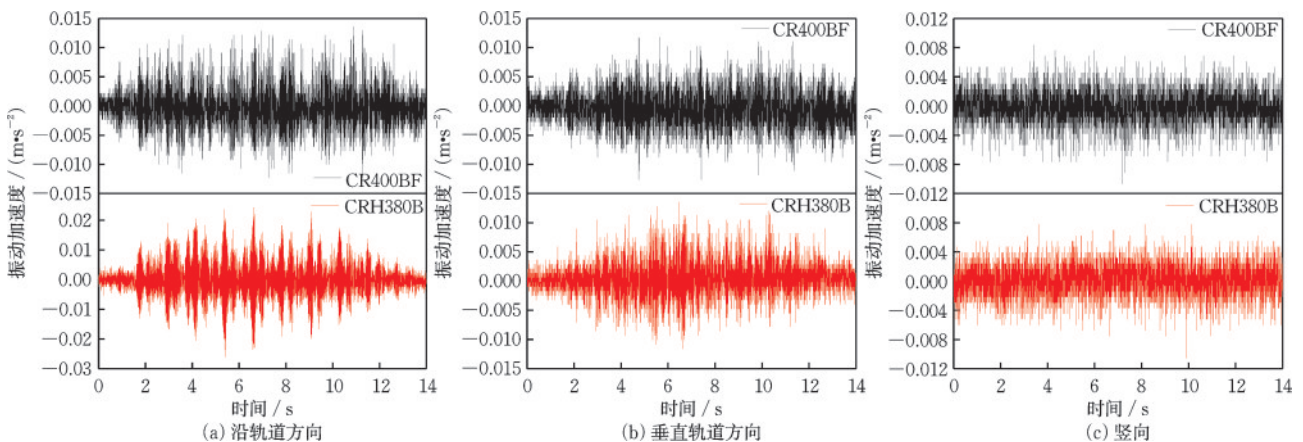


图5 测点6处CR400BF列车与CRH380B列车加速度时程曲线

Fig.5 Time-history curves of acceleration of CR400BF and CRH380B trains at measurement point 6

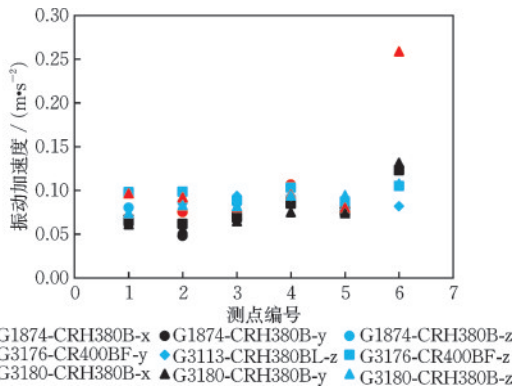


图6 商合杭高铁进站列车振动加速度峰值分布情况

Fig.6 Distribution of peak vibration accelerations of incoming trains of Shangqiu-Hefei-Hangzhou high-speed railway

动能量分布频段范围均较宽,而在距轨道较远的测点1、2、3处,主要保留了高频振动成分,与既有文献[13-14]中地面实测竖向振动主频随与轨道中心间距增加而减小的衰减规律不一致,与文献[15]中地面实测振动主频随与轨道中心间距保持不变的衰减规律接近。这可能是由于不同文献中土层参数

不同而衰减规律不同。在测点1~测点6之间,CRH380B列车运行产生的振动能量集中分布频率范围均较CR400BF列车更窄;前者振动主频对应的振动加速度峰值分别比后者大51.12%、61.07%、133.80%、56.08%、105.02%、108.17%,说明在沿轨道方向上CRH380B列车较CR400BF振动能量分布更为集中,主频对应的加速度幅值更大。

垂直轨道方向上,CR400BF列车在测点5、6处地面振动能量主要集中于23~65 Hz,在测点1~测点4处地面振动能量则主要集中在55~62 Hz。CRH380B列车在测点5、6处地面振动能量主要集中于32~63 Hz,在测点1~测点4处地面振动能量则主要集中在55~65 Hz。此外,在测点1~测点6处,CR400BF列车振动主频对应的振动加速度峰值分别较CRH380B列车大81.97%、114.25%、35.05%、37.49%、86.41%、93.00%,说明在垂直轨道方向上,CRH380B列车与CR400BF振动能量分布范围较为一致,而前者主频对应的加速度幅值更大。

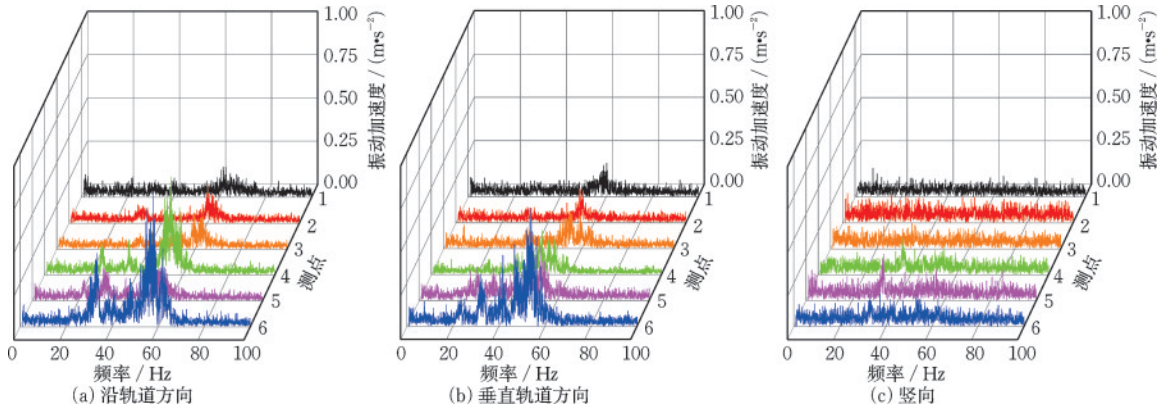


图7 CR400BF列车加速度频谱曲线

Fig.7 Spectrum curves of acceleration of CR400BF train

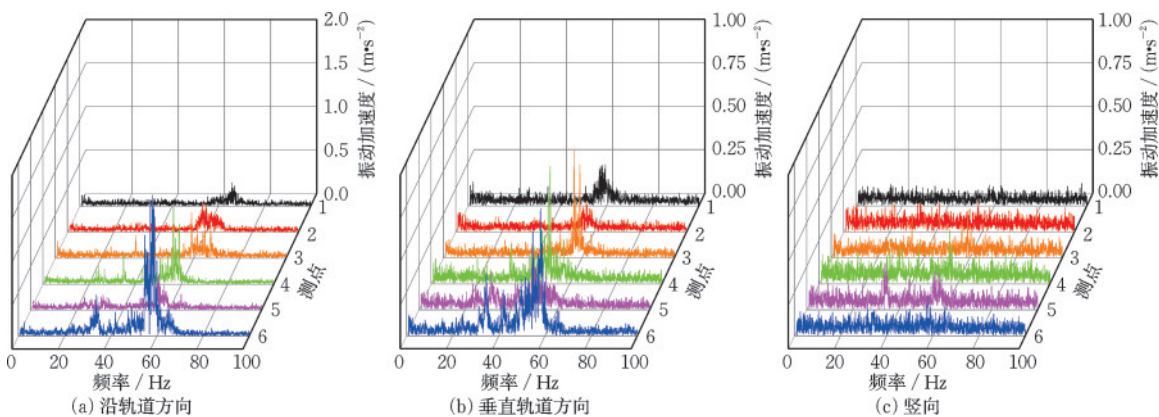


图8 CRH380B列车加速度频谱曲线

Fig.8 Spectrum curves of acceleration of CRH380B train

竖向上,在测点4、5处,CR400BF列车和CRH380B列车均可以观察到明显的振动能量集中现象,其中前者振动能量主要集中在30~40 Hz,后者振动能量主要集中在30~60 Hz。在其他位置处,CR400BF列车和CRH380B列车不同频段振动能量相差较小,且均未出现明显的振动主频。说明在竖向上,测点4和测点5处CRH380B列车运行产生的振动能量分布范围较CR400BF列车更广,地面振动主频更大,在其他位置处则差异较小。

对比3个方向的振动主频可知,不同位置处列车运行引起的沿轨道方向和垂直轨道方向上振动主频差异较小,且明显大于竖向振动主频。沿轨道方向和垂直轨道方向上,随着距轨道中心间距的增加,不同类型列车运行产生的低频振动能量耗散更快,高频振动幅值降低。对比沿轨道方向和垂直轨道方向振动频率分布情况可知,在测点5、6处,CR400BF列车振动主频对应的加速度峰值较CRH380B列车的增加幅度在沿轨道方向较垂直轨道方向更大,而在测点1~测点4处较小。对比不同类型列车在不同方向上的振动主频分布情况可知,列车车型主要改变水平方向振动频谱特性,对竖向振动频率分布影响较小。

2.2 列车不同运行状态下地面振动特性

在测试时间段内,郑阜高铁有进站车、出站车和过站车3种运行状态,商合杭高铁有进站车和出站车2种运行状态。限于篇幅限制,由于过站车的车速与出站车差异较大,运行状态差异明显,本文仅对这两种运行状态进行分析。根据表1中列车运行情况,本文选择郑阜线上时速142.3 km/h、加速度 -0.11 m/s^2 运行的G3117次CRH380B重联型

列车和时速87.0 km/h、加速度 0.31 m/s^2 的G7731次CRH380B出站列车这两种车型接近(CRH380B重联型列车为CRH380B连接而来,仅车长不同且车长对地面振动影响较小^[16])、同向运行、运行状态差异较大的车次进行对比,并分析高铁列车不同运行状态下地面振动特性。绘制高铁列车6个测点处不同方向加速度时程曲线分别如图9和图10所示。

由图9和图10可知,在垂直轨道方向上,车速较快的CRH380B重联型列车运行引起的地面不同位置处振动时程曲线均可以明显观察到16节车厢的列车周期性加载引起的加速度峰值。在测点1和测点2位置处,列车前8节车厢和后8节车厢的连接位置处振动明显小于其他车厢处。运行较慢的CRH380B列车仅可在测点1~测点3之间观察到8节车厢列车周期性加载引起的加速度峰值。

在沿轨道方向上,随与轨道中心的间距增大,车速较快的CRH380B重联型列车运行引起的地面振动加速度周期性峰值越来越不明显;在测点1和测点2位置处前8节车厢和后8节车厢连接处振动与相邻车厢位置处振动相差较小,但仍可辨别出车厢连接位置;在测点6处已观测不到明显的周期性振动峰值,列车运行引起的振动与背景振动接近。运行较慢的CRH380B列车仅可在测点1~测点2之间观察到8节车厢列车轮对引起的加速度峰值,在其他位置处列车运行产生的振动与背景振动接近。

在竖向上,运行较快的CRH380B重联型列车运行引起的地面竖向振动加速度峰值随与轨道中心间距的增加越来越不明显,在测点1位置处无法观察到前8节车厢和后8节车厢连接处振动,在测点6处列车运行引起的地面竖向振动略大于背景振

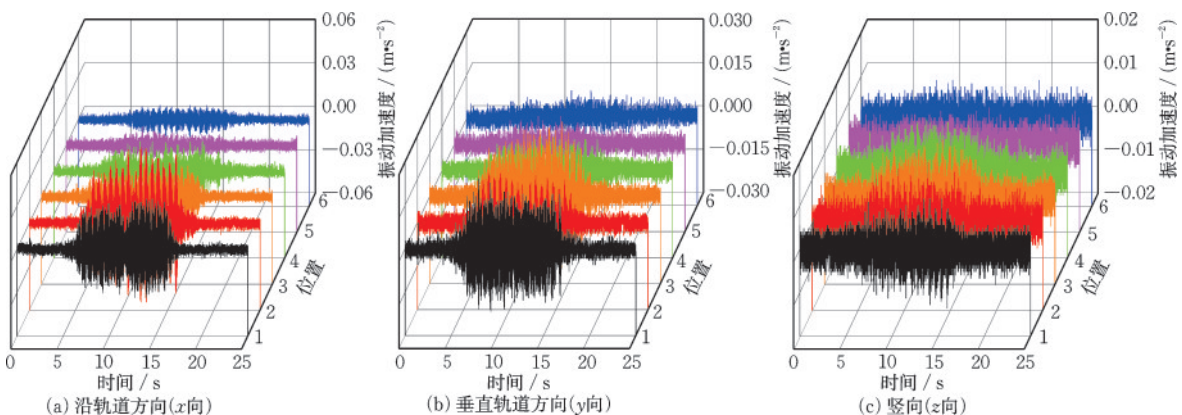


图9 CRH380B重联型列车,平均车速142.3 km/h时高铁列车加速度时程曲线

Fig.9 Time-history curves of acceleration of CRH380B multiple-unit train at average speed of 142.3 km/h

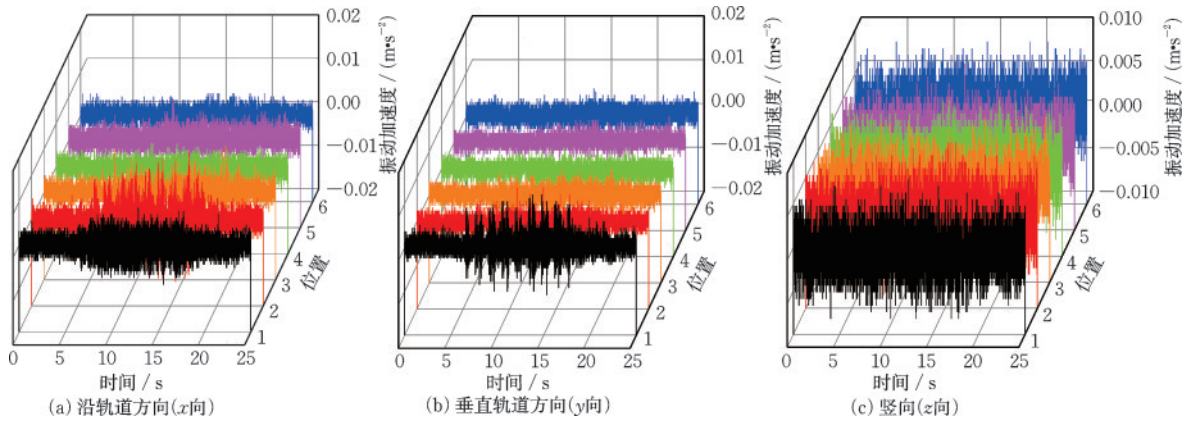


图10 CRH380B列车,平均车速87.0 km/h时高铁列车加速度时程曲线

Fig.10 Time-history curves of acceleration of CRH380B train at average speed of 87.0 km/h

动。运行较慢的CRH380B列车在不同位置处均未出现明显的周期性峰值。

在测点1处,CRH380B重联型列车前8节车厢和后8节车厢运行引起的 x 向、 y 向、 z 向振动加速度峰值分别为 0.032 m/s^2 和 0.035 m/s^2 、 0.024 m/s^2 和 0.019 m/s^2 、 0.011 m/s^2 和 0.012 m/s^2 ,后8节车厢的 x 向和 z 向振动加速度略大于前8节车厢,而 y 向较前8节车厢减小明显;CRH380B列车前4节车厢和后4节车厢运行引起的振动加速度峰值分别为 0.032 m/s^2 和 0.035 m/s^2 、 0.011 m/s^2 和 0.012 m/s^2 、 0.007 m/s^2 和 0.008 m/s^2 ,后8节车厢不同方向振动加速度均略大于前8节车厢,说明列车加速度较小时前后车厢运行产生的不同方向振动变化情况不同,而当加速度较大时不同方向变化情况一致。

为进一步分析处于不同运行状态的列车在不同位置处的振动衰减曲线,绘制振动加速度峰值衰减曲线如图11所示。由图可知,随与轨道中心间距的增加,不同运行状态列车产生的地面振动加速度

峰值整体呈减小趋势,并出现了反弹增大现象。其中,CRH380B重联型列车 x 向、 y 向和 z 向产生的地面振动加速度最大值分别出现在测点2、测点3和测点3处;CRH380B列车,最大值分别出现在测点6、测点1和测点6处。不同运行状态列车运行引起的地面振动反弹均在 x 向最明显,但振动反弹出现的位置不同。这可能是由于振动反弹增大现象是由振动波在基岩与地表土层间和路堤坡面重复反射形成的,反弹的位置与波速(与列车车速有关)和边坡形状等有关^[17]。

距轨道中心较近的测点1~测点4之间,不同运行状态列车在不同方向上产生的地面振动加速度峰值均差异较大。在距轨道中心较远的测点5和测点6处,两列车 y 向和 z 向振动加速度差异较小,而 x 向振动加速度差异仍较大,说明在此位置处列车运行状态对地面垂直轨道方向和竖向振动加速度的影响较小,对水平方向振动加速度峰值仍有较大影响。

对两列车不同位置处地面振动加速度时程数据进行傅里叶变换,得到相应的加速度频谱曲线,分别如图12和图13所示。

由图12可知,车速较快的CRH380B重联型列车在地面不同位置处3个方向的振动主频基本不变,均在65 Hz左右。 x 向、 y 向、 z 向地面振动能量分布比较集中,主要集中于52~70 Hz、45~72 Hz、54~71 Hz。结合既有文献[15]中高铁地面振动测试数据可知,车速较快时,地面振动主要由列车运行引起,周围环境振动影响较小。

由图13可知,在列车运行引起的振动和周围环境的共同作用下,车速较慢的CRH380B列车在不同方向、不同位置处的振动主频变化均比较大。其中, x 向、 y 向地面振动能量比较分散,主要集中于

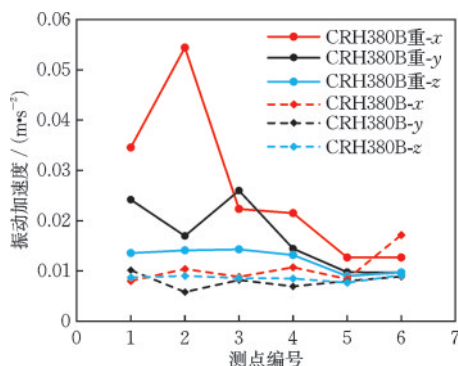


图11 列车不同运行状态下地面振动加速度峰值变化规律

Fig.11 Variation patterns of peak ground vibration accelerations under different train operating statuses

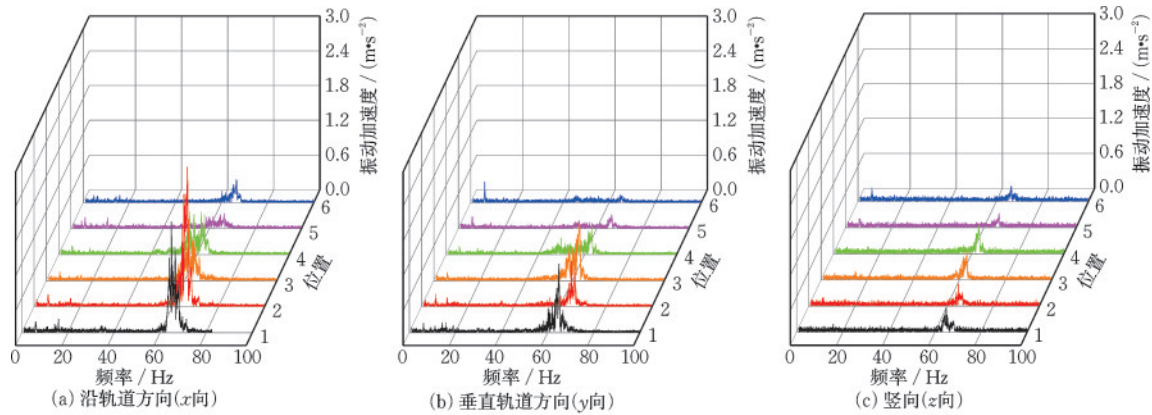


图12 CRH380B重联型列车,平均车速142.3 km/h时高铁列车加速度频谱曲线

Fig.12 Spectrum curves of acceleration of CRH380B multiple-unit train at average speed of 142.3 km/h

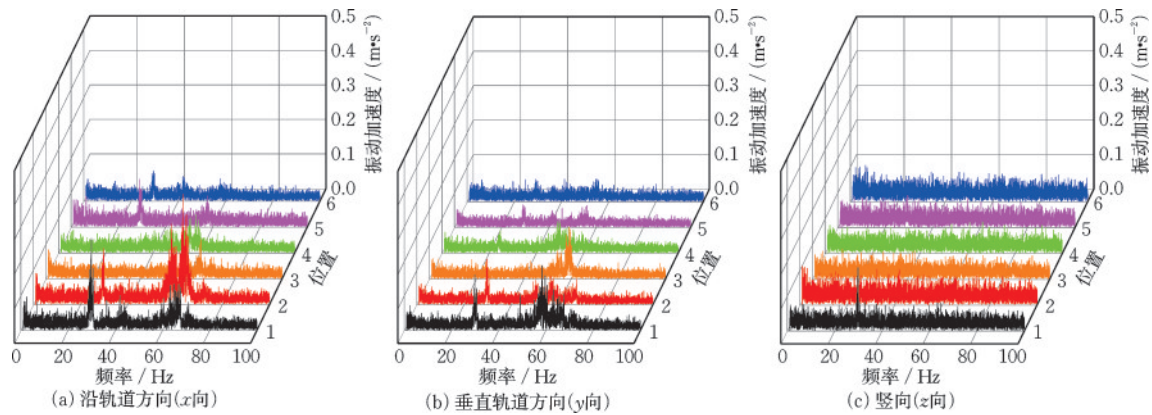


图13 CRH380B列车,平均车速87.0 km/h时列车加速度频谱曲线

Fig.13 Spectrum curves of acceleration of CRH380B multiple-unit train at average speed of 87.0 km/h

28~30 Hz 和 55~74 Hz、29~31 Hz 和 48~74 Hz。 z 向不同位置处均未出现明显的振动能量集中区,其中在测点1处出现的低频振动可能为周边道路列车运行引起的振动。因此,车速较快时地面振动能量主要集中于主频附近,车速较慢时地面振动能量比较分散。

2.3 不同线路列车运行引起的地面振动特性

由于郑阜高铁和商合杭高速铁路堤坡度不同,列车运行状态不完全相同,因此本文进一步对比了不同线路列车运行引起的地面振动特性。汇总商合杭高铁和郑阜高铁经过的所有进站车振动加速度峰值分别如图6和图14所示。

由图14可知,随与郑阜高铁轨道中心间距的增加,不同类型高铁列车运行产生的地面不同方向振动加速度峰值整体均呈减小趋势。在地面不同位置处,不同列车在3个方向上产生的振动均相差较大,未出现明显的聚集现象,说明郑阜高铁线上列

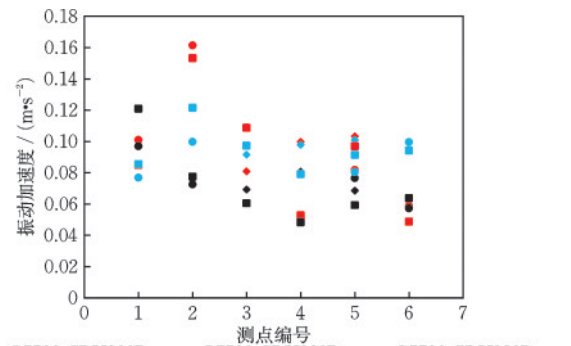


图14 郑阜高铁进站列车振动加速度峰值分布情况

Fig.14 Distribution of peak vibration accelerations of incoming trains of Zhengzhou-Fuyang high-speed railway

车车型和列车运行状态对地面振动特性影响较大,且不同方向上振动加速度峰值差异较大。

对比图6和图14可知,商合杭高铁地面振动由测点6传向测点1的过程中,地面振动反弹增大主要出现在测点4处;郑阜高铁地面振动由测点1传向测

点6的过程中,地面振动反弹增大主要出现在测点2处,说明振动反弹增大现象在地面出现的位置不同,路堤边坡坡度等对地面振动传播特性有影响。

此外,郑阜高铁线上不同列车在地面不同位置处引起的地面振动离散程度明显大于商合杭高铁测点1~测点5之间内振动,而在距轨道中心最近位置处商合杭高铁线上列车类型对地面振动的影响反而更大,说明郑阜高铁线上不同列车对距轨道中心较远处地面振动影响较商合杭高铁线更大。结合表1中列车运行加速度可知,这可能是由于实测中郑阜高铁线上不同列车进站过程中加速度有正有负,列车运行状态差异较大;而商合杭高铁线上列车均是减速进入车站。

汇总郑阜高铁和商合杭高铁经过的所有进站车在地面不同位置处振动主频分别如图15和图16所示。

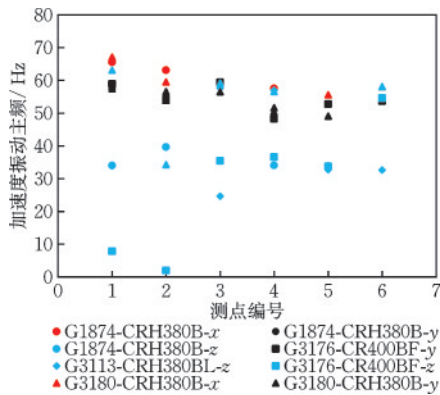


图15 商合杭高铁进站列车振动加速度主频分布

Fig.15 Distribution of main frequencies of accelerations of incoming trains of Shangqiu-Hefei-Hangzhou high-speed railway

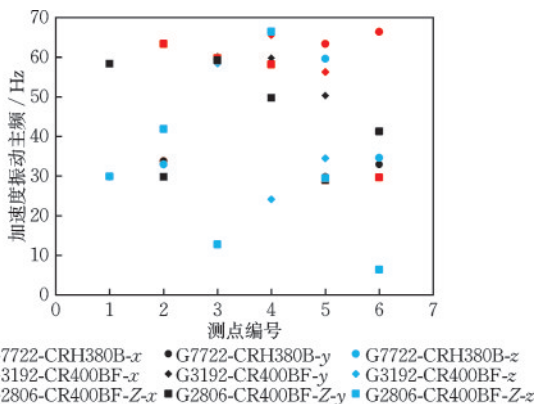


图16 郑阜高铁进站列车振动加速度主频分布

Fig.16 Distribution of main frequencies of accelerations of incoming trains of Zhengzhou-Fuyang high-speed railway

对比图15和图16可知,商合杭高铁运行引起的地面不同位置处振动大致呈现 x 向主频最大, y 向居中, z 向最小的形态,而郑阜高铁线上这种现象不明显。商合杭高铁地面振动由测点6传向测点1的过程中,不同列车运行引起的地面 x 向和 y 向振动主频整体随与商合杭高铁间距的增加而增大,在 z 向上这种变化规律不明显;郑阜高铁地面振动由测点1传向测点6的过程中,不同列车运行引起的地面不同位置处三个方向振动主频均未呈现明显的变化规律,这可能是由于商合杭线上列车均是减速进入车站,而商合杭高铁线上列车加速度变化较大,列车加减速对地面水平方向振动特性影响较大。此外,商合杭高铁不同列车运行引起的地面 x 向和 y 向振动主频加速度差异较小, z 向振动主频差异较大;郑阜高铁不同高铁列车运行产生的不同方向振动加速度主频差异均较大。

3 结论

实测了阜阳西站南侧、郑阜高铁和商合杭高铁之间不同位置处的地面振动,通过对比地面不同位置处加速度时频振动特性,分析了列车车型、列车运行状态和列车行使线路对高铁进出站阶段路堤段地面振动特性的影响,主要结论如下:

(1) 列车车型仅对靠近轨道处沿轨道方向地面振动的影响明显,对靠近轨道处垂直轨道方向和竖向地面振动加速度和距轨道较远的测点影响较小。列车运行加速度较小时,列车不同轮对产生的地面振动加速度峰值差异较小。

(2) 沿轨道方向上,CRH380B列车较CR400BF列车振动能量分布更为集中,主频对应的加速度幅值更大。垂直轨道方向上,CRH380B列车与CR400BF振动能量分布范围较为一致,而前者主频对应的加速度幅值更大。在竖向上,不同类型列车在地面大部分位置处振动能量分布情况差异较小。

(3) 列车运行状态对距轨道较远处地面水平方向振动加速度峰值有较大影响,而对竖向振动影响较小。列车加速度较小时前后车厢运行产生的不同方向振动变化情况不同,而当加速度较大时不同方向变化情况一致。列车运行状态对地面不同位置处50 Hz以上的高频水平振动分布影响较小,而对地面竖向振动主频影响较大。

(4) 商合杭高铁线和郑阜高铁线上不同列车运

行产生的地面振动在传播过程中均出现了反弹增大现象,但该现象出现的位置不同。郑阜高铁线上不同列车对距轨道中心较远处地面振动影响较商合杭高铁线大。

(5) 商合杭高铁列车运行引起的地面水平方向振动主频整体随与商合杭高铁间距的增加而增大,在竖向上这种变化规律不明显,郑阜线上不同方向振动主频随与轨道中心间距增加均未呈现明显的变化规律。商合杭高铁上不同列车运行产生的地面水平方向加速度振动主频差异较小,而郑阜高铁上差异较大。

参考文献:

- [1] 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.
Ma L H, Liang Q H, Gu A J, et al. Experimental study and numerical analysis on vibrations of subgrades of Shanghai-Nanjing Intercity High-speed Railway[J].Journal of the China Railway Society,2014,36(1):88-93. (in Chinese)
- [2] Kouroussis G, Connolly D P, Olivier B, et al. Railway cuttings and embankments: experimental and numerical studies of ground vibration[J]. Science of the Total Environment, 2016, 557: 110-122.
- [3] 陈洪运,全德武.高铁滨海北站路基段环境振动试验研究与数值分析[J].铁道标准设计,2017,61(12):131-136.
Chen H Y, Quan D W. Experimental study and numerical analysis of vibrations of subgrade section of BinhaiBei high-speed railway station[J].Railway Standard Design, 2017,61(12):131-136. (in Chinese)
- [4] 孟祥连,周福军.西宝高铁黄土地区路基振动效应空间分析研究[J].铁道工程学报,2017,34(8):28-33.
Meng X L, Zhou F J. Spatial analysis and study of road-bed vibration effect on loess area for Xi'an-Baoji High-speed Railway[J].Journal of Railway Engineering Society,2017,34(8):28-33. (in Chinese)
- [5] Gao G Y, Bi J W, Chen J. Vibration mitigation performance of embankments and cuttings in transversely isotropic ground under high-speed train loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 141: 106478.
- [6] 郭玉斌,宋瑞祥,江楠,等.地铁列车进出站振源特征测试及数值模拟分析[J].振动、测试与诊断,2023,43(2):282-289,408-409.
Wu Y B, Song R X, Jiang N, et al. Insitu test and numerical simulation of characteristics of vibration source of metro trains arriving at or leaving Station[J].Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis,2023,43(2):282-289,408-409.(in Chinese)
- [7] 冯青松,廖春明,张凌,等.地铁列车进出站对换乘站振动影响实测分析[J].噪声与振动控制,2021,41(4):19-26.
Feng Q S, Liao C M, Zhang L, et al. Measurement and analysis of the impact of metro transfer train arriving at or departing from the station on platform vibration[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(4): 19-26. (in Chinese)
- [8] 陈文化,张谦.地铁列车进出站时土层空间振动特性分析[J].岩土力学,2019,40(9):3656-3661,3669.
Chen W H, Zhang Q. Space vibration of subsoil during metro train arriving at or leaving station [J].Rock and Soil Mechanics,2019,40(9):3656-3661,3669. (in Chinese)
- [9] 施毅,张巍,孙可,等.地铁列车进出站相邻地下空间振动烦恼率评价[J].防灾减灾工程学报,2016,36(5):724-729.
Shi Y, Zhang W, Sun K, et al. Annoyan ceratee valuation of ambient vibration of underground spaced uring arrival-and-departure of subway train [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(5): 724-729. (in Chinese)
- [10] 史吏,蔡袁强,潘晓东.列车加减速引起轨道结构和饱和地基振动[J].浙江大学学报(工学版),2013,47(11):1932-1938,1944.
Shi L, Cai Y Q, Pan X D. Study on vibrations of rail structure and saturated soil induced by train acceleration and deceleration [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(11): 1932-1938, 1944. (in Chinese)
- [11] Cao Z G, Boström A. Dynamic response of a poroelastic half-space to accelerating or decelerating trains [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(11): 2777-2794.
- [12] 巴振宁,焦鹏,梁建文,等.高速列车引起站台振动的实测与分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2020,53(12):1211-1217.
Ba Z N, Jiao P, Liang J W, et al. Actual measurement and analysis of station vibration induced by high-speed train [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2020, 53(12): 1211-1217. (in Chinese)
- [13] 雷晓燕,汪翠,王鹏生,等.时速310 km高速列车过桥诱发大地振动特性分析[J].铁道工程学报,2023,40(5):32-38.
Lei X Y, Wang C, Wang P S, et al. Characteristic

analysis of ground vibration induced by high-speed trains passing through bridges at 310 km/h[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(5): 32-38. (in Chinese)

[14] 陈功奇. 基于现场测试的列车引起地基振动分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 601-611.

Chen G Q. Ground vibration analysis induced by high-speed train based on in-situ data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 601-611. (in Chinese)

[15] Zhai W M, Wei K, Song X L, et al. Experimental investigation into ground vibrations induced by very high speed trains on a non-ballasted track[J]. Soil Dynamic

and Earthquake Engineering, 2015, 72: 24-36.

[16] Yang Y B, Hung H H, Chang D W. Train-induced wave propagation in layered soils using finite/infinite element simulation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(4): 263-278.

[17] 宋玉兰, 杨立中. 郑西高铁地面振动实测分析及隔振沟效果研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 132-143.

Song Y L, Yang L Z. Ground vibration test of the Zhengzhou-Xi'an high-speed railway and analyses of the vibration isolation trench effect[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 132-143. (in Chinese)

(本文编辑: 苏泽云)



(上接第 1109 页)

[16] 班慧勇, 施刚, 石永久. 高强钢焊接构件工字形横截面残余应力试验及统一分布模型研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 83-91.

Ban H Y, Shi G, Shi Y J. Experimental and unified model investigations on residual stress within high strength steel welded i-sections [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 83-91. (in Chinese)

[17] 建筑钢结构防火技术规范: GB 51249—2017[S]. 北京: 中国计划出版社,

[18] 吕慧宝. 国产超 500 MPa 高强度结构钢高温后力学性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2017.

Lyu H B. Research on post-fire mechanical properties of domestic high strength structural steel over 500 MPa [D]. Shanghai: Tongji University, 2017. (in Chinese)

[19] Song L X, Li G Q. Processing and cooling effects on post-fire mechanical properties of high strength structural steels [J]. Fire Safety Journal, 2021, 122: 103346.

[20] Huang L, Li G Q, Wang X X, et al. High temperature mechanical properties of high strength structural steels

Q550, Q690 and Q890 [J]. Fire Technology, 2018, 54(6): 1609-1628.

[21] 宋林昕, 李国强. 控轧控冷型高强钢高温下的力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(2): 84-92.

Song L X, Li G Q. Experimental study on mechanical properties of TMCP high strength steel at elevated temperatures [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(2): 84-92. (in Chinese)

[22] Li G Q, Song L X. Mechanical properties of TMCP Q690 high strength structural steel at elevated temperatures [J]. Fire Safety Journal, 2020, 116: 103190.

[23] Li G Q, Lyu H B, Zhang C. Post-fire mechanical properties of high strength Q690 structural steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 132: 108-116.

[24] 火灾后工程结构鉴定标准: T/CECS 252—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[25] 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

[26] 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

[27] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.