

文章编号: 1674—8247(2022)04—0036—04
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.04.006

400 km/h 高速铁路车致环境振动预测方法和控制技术 研究现状与展望

代 丰 杨吉忠 冯读贝 陈以庭

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:随着市域高速铁路的快速发展,高速列车运行产生的高幅宽频环境振动问题不容忽视。本文以400 km/h成渝中线为例,分析了高速铁路车致环境振动预测对线路规划和正常运营的必要性,在总结铁路环境振动预测方法和控制技术研究现状及存在问题的基础上,给出了适用于400 km/h高速铁路环境振动预测和控制的研究方向,结果表明:(1)瑞利阻尼方式在低频无法足量反映土体对振动衰减能力,并放大了土体对高频振动衰减效果,更高速标准铁路环境振动预测应考虑振动传递介质土的非线性特征;(2)城市轨道交通环境振动采取的轨道减振措施,具有易增加线路不平顺性、对低频减振效果不明显及工程造价高的特点,不适于高速铁路环境振动控制;(3)400 km/h高速铁路环境振动预测和控制宜围绕土体动力学参数频变特性、振动影响因素修正、适应不同建设条件和阶段的控制措施方面开展深入研究。

关键词:高速铁路;环境振动;预测;频变;控制措施

中图分类号:U238

文献标志码:A

Research Status and Outlook of Prediction Method and Control Technologies for Train-induced Environmental Vibration for 400 km/h High-speed Railways

DAI Feng YANG Jizhong FENG Dubei CHEN Yiting

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610083, China)

Abstract: With the rapid development of urban high-speed railways, the problem of high-amplitude broadband environmental vibration induced by high-speed train operation cannot be ignored. This paper analyzes the necessity of prediction of high-speed train-induced environmental vibration for route planning and normal operation with the case study of 400 km/h Chengdu-Chongqing High-speed Railway and gives the research directions applicable to the prediction and control of environmental vibration of 400 km/h high-speed railway on the basis of summarizing the research status and problems of prediction methods and control technologies for railway environmental vibration. The results show that: (1) Rayleigh damping method at low frequencies cannot adequately reflect the attenuation ability of the soil to vibration, and amplify the attenuation effect of the soil to high-frequency vibration, the prediction of higher speed standard railroad environment vibration should consider the non-linear characteristics of the vibration transmission medium soil. (2) The

收稿日期:2022-01-12

作者简介:代丰(1988-),女,高级工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技发展计划项目(KSNQ202058)

引文格式:代丰,杨吉忠,冯读贝,等. 400 km/h 高速铁路车致环境振动预测方法和控制技术研究现状与展望[J]. 高速铁路技术,2022,13(4): 36-39.

DAI Feng, YANG Jizhong, FENG Dubei, et al. Research Status and Outlook of Prediction Method and Control Technologies for Train-induced Environmental Vibration for 400 km/h High-speed Railways[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4):36-39.

track damping measures taken to cope with the environmental vibration of urban rail transit, characterized by the easy increase of the track irregularity, inapparent damping effect on low-frequency vibration, and high engineering cost, are not suitable for the control of high-speed railway environmental vibration.

Key words: high-speed railway; environmental vibration; prediction; frequency variation; control measures

伴随城市规模扩张和城际联通流动,根据《交通强国建设纲要》对城区 1 h 通勤交通圈发展目标要求^[1],越来越多的城际高速铁路在中心城区设站,高速铁路线路也不可避免地穿越城区建筑物密集区域,相应线路敷设方式逐渐成为高速铁路规划建设面临的难题。

既有京津城际铁路、胶济客运专线等运营情况表明,高速铁路穿越中心城区,将引起严重的车致环境振动问题。由轨道不平顺激发的轮轨动荷载使车辆-轨道系统产生振动,高幅振动经由轨下基础向大地传播,对沿线居民生活、建筑设施及精密设备使用产生影响。我国多条穿越中心城区高速铁路由于未能掌握其环境振动特性和传递规律,出于保守设计考量不得不采取降速方式,如京张高速铁路进城段、京广高速铁路石家庄段、济青高速铁路青岛段均降速至 200 km/h 及以下^[2],且在近振动敏感点线路区段,实际运营速度均小于设计速度,严重影响城际高速铁路通行效率。

成渝中线作为更高速度等级轨道交通示范线路,是以成都、重庆中心城市间直达城际客流为主、兼顾区际长途客流的更高标准高速交通线路。按照成渝中线“深入城区、快进快出”的规划方针^[3],线路不可避免地穿越居民生活区和建筑密集区,而随着人们环保意识的增强和现代化工业进程的发展,400 km/h 高速列车运行产生的高幅宽频环境振动问题不容忽视,高要求的铁路车致环境振动控制已成为 400 km/h 高速铁路规划和建设面临的一项重大挑战。

1 问题提出

在线路规划阶段,沿线居民对振动环评结果尤为关注,科研院所的室内精密仪器对环境振动限值的极高要求与线路规划的矛盾也逐渐凸显,如成都某精密设备所在单位要求车致振动响应满足 VC-C 等级,成渝中线线路初步方案距离该中心仅 50 m,线位方案可否满足环境振动限值要求赫然成为制约高速铁路选线的重要因素。初步设计方案中的距离线路中心 50 m 处振动预测结果如表 1 所示,纵向和竖向振动加速度在 0.062 5 gal 限值附近,三向振动速度均超出 12.5 um/s 的限值要求,可见 50 m 范围内振动加速度

和速度无法满足精密设备的场地要求。成渝两地作为历史文化名城,其历史文物建筑的微振动保护也对线路近距离穿越提出了极高要求。

表 1 距离线路中心 50 m 处振动预测结果表

方向	均方根加速度 /gal	VC-C 标准 /gal	均方根速度 /(um/s)	VC-C 标准 /(um/s)
竖向	0.068 1	0.062 5	45.5	12.5
横向	0.049 1		120.3	
纵向	0.053 6		169.0	

高速铁路车致环境振动反映了振动激励强度与敏感目标承受振动能力之间的关系,涉及预测、评估和控制 3 个阶段。预测是对振动传至受振体能量强度的定量推测,评估旨在合理量化敏感目标承受振动的能力与预测值比较,控制是采取措施以降低振动激励强度或提高敏感目标承受振动能力,而预测在铁路环境振动影响研究中具有举足轻重的作用^[4],对控制起到指导性作用。因此,准确预测更高速度铁路系统产生的环境振动量值和幅频特性,采取适宜的相应控制技术,对于纾解成渝中线线位方案难确定的问题,确保沿线居民振动舒适性、建筑设施安全性和精密设备使用性具有重要的理论和现实指导意义。

2 研究现状

高速铁路车致环境振动激励和传播机理复杂,受车辆、轨道、线下基础结构、周围土体、建筑物结构型式及其相互作用等诸多因素影响。国内外就轨道交通环境振动预测方法,主要分经验预测方法和理论预测方法两类。

2.1 铁路环境振动经验预测方法

在工程前期规划及可行性研究阶段,基于实测数据或理论计算结果得到的经验公式被广泛用于国内外铁路环境振动预测中。然而,各国技术规范标准中环境振动经验预测方法主要基于普速铁路和城轨交通的振动特性,尚无针对高速铁路环境振动经验的预测模型。国际上普遍采用的是基于链式衰减公式和经验数据库的经验预测公式法,代表模型有美国联邦交通局提出的第 2 阶段整体评价模型和中国 HJ 453-2018《环境影响评价技术导则城市轨道交通》中的经验模型^[5]。需注意的是,该方法中修正项取值就有限个经

验样本回归拟合,在预测复杂地层和复杂结构振动传递特性上存在较大局限。

2.2 铁路环境振动理论预测方法

铁路环境振动强度取决于振源特性、传递途径及受振结构,现有研究一般通过将车辆-轨道和地层-结构视为2个可解耦的子系统,并在不同的分析域中求解,由车辆-轨道模型计算得到列车荷载施加到地层-结构子系统,或是采用多体动力学软件与有限元耦合分析。

铁路环境振动预测的核心在于计算振动在地层中的传递及地表或结构内的振动响应。由于移动列车荷载作用下振动在地层中的传递是一个三维问题,且考虑到轨道、路基、桥梁等线下基础的几何不规则性,地层振动传递模型将土体假设为具有粘性阻尼的均匀弹性半空间或分层结构的均匀弹性半空间,利用动力时域/频域解析法或数值法,研究列车移动荷载作用下地层的振动响应。为了解决三维模型引起的大尺度多网格计算耗时问题,既有研究对地层振动三维预测模型进行优化,假设轨道和土层沿纵向均匀分布,沿线路方向进行 Fourier 变换转换到频率-波数域中,形成 2.5 维计算方法^[6],或引入周期性理论,沿线路方向采用 Floquet 变换,将三维问题映射到单位厚度的周期单元中求解。经典的解析法和半解析法如 PiP 模型^[7]和薄层法亦可用于铁路环境振动预测。

上述预测模型在计算效率及解决工程实际问题时精确度较经验预测方法取得极大进展,但对土体介质振动传递规律和影响因素考虑不足,既有研究均采用瑞利阻尼或单一阻尼比代入模型计算。阻尼对土体介质振动波传递和衰减影响显著,且土体单元阻尼比和动弹性模量具有频变特性。简化阻尼设置将导致预测模型动力计算结果与实际情况有所偏差,特别是在铁路车致环境振动问题中表现明显。

目前,国内外学者对于荷载频率对不同类型土体的阻尼比影响开展了多项研究,均采用动三轴试验分析 15 Hz 以内荷载频率对典型砂土、黏土或黄土动弹性模量和阻尼比影响^[8],结果表明,土体阻尼比和动弹性模量受激振频率影响,但不同土体反映不同的变化趋势,业内对此尚未形成统一规律共识。并且,既有研究的目标频率较低,尚未见 15 Hz 以上频率对土体动力参数的影响研究,更未见考虑土体频变特性的铁路环境振动预测方法研究。

2.3 铁路环境振动控制措施

关于高速铁路地面线和地下线的环境振动水平、

响应特性和衰减规律尚未形成系统性规律指标,尚无高速铁路车致环境振动系统性控制方法,而就研究成果相对完善的城市轨道交通环境振动控制技术而言,主要从振源和传播途径采取减振措施。振源减振措施主要采取两种方法,一是在轨道系统增加粘弹性元件,隔离轮轨作用力向下部基础传递,二是通过改善车辆、轨道及线下基础结构,减少轮轨相互作用或抑制系统振动。传播途径减振措施主要通过在线路基础设置隔振沟、隔振桩和隔振墙等阻断振动波传递。城轨交通环境振动控制普遍依赖减振扣件、减振道床等轨道减振措施,但该类措施易增加线路波形磨耗,进而增大线路及受振结构振动响应,而对通过优化线下基础结构设计及传播途径上设置隔振沟等环境振动控制措施研究不足。并且,高速铁路线路平顺性指标远高于普通铁路和城市轨道交通,400 km/h 高速铁路车致环境振动控制技术应在保证高速铁路线路主要技术标准的前提下,实现沿线环境振动控制的目的。

3 存在问题

惯常通过经验法、半解析法、数值法等方法来预测铁路环境振动虽已较为成熟,但均未考虑对土体振动传递与衰减具有重要影响的土动力学参数的频变特性。由于土层及各部结构材料差异,波动主频范围各不相同,应结合地层材料特性在预测模型中考虑随频率变化的真实阻尼比和动弹性模量,以求对 400 km/h 高速铁路车致环境振动进行有效计算和准确预测。

当前,在有限元分析中考虑土体弹性模量和阻尼比的频变特性有较大难度,通常采用瑞利阻尼来反映土体阻尼比随频率的变化,但是经与实测数据对比发现,瑞利阻尼方式在低频无法足量反映土体对振动的衰减能力,同时放大了土体对高频振动的衰减效果,不精确的振动预测将直接影响建筑物减振设计方案。400 km/h 高速铁路系统具有频率高、频域宽、振幅大的特点,应精细考虑复杂的振动传递介质土的非线性特征。

城市轨道交通车致环境振动普遍采取的轨道减振措施,此类措施存在的问题包括:一是易增加线路不平顺性,二是对低频减振效果不明显,三是工程造价高,不适于对线路平顺性指标要求更高的高速铁路环境振动控制。因此,建立针对不同线下基础结构型式且满足不同环境条件和减振需求的智能化、定制化 400 km/h 高速铁路车致环境振动系统控制技术是建设高标准、高等级绿色城际高速铁路的客观需求。

4 研究方向

成渝城市群地处“一带一路”、长江经济带的交汇点,是国家推进新型城镇化的重要示范区,400 km/h 成渝中线高速铁路承载成渝双城经济圈交通基础设施建设的功能,对打造我国经济增长第四级、建设具有国际影响力的世界级城市群具有重要意义。以成渝中线高速铁路为依托,开展400 km/h 高速铁路车致环境振动精细化预测方法和控制技术研究,为400 km/h 高速铁路建设适应高质量城市发展要求提供技术支撑和决策依据,建议从以下几方面开展深入研究。

(1)400 km/h 高速铁路车致环境振动基本特征

基于列车-轨道系统动力学、岩土动力学、结构动力学方法,结合有限元方法,通过建立适应地面路基、地下隧道、高架桥梁的高铁列车-轨道-线下基础-大地-构筑物多场耦合动力学模型库,研究在路基、隧道、桥梁等不同结构基础形式条件下,综合考虑线路长波、短波不平顺激励影响的400 km/h 高速铁路环境振动在岩土体中的传递和衰减规律及其对沿线城市现状建筑物、车站等振动敏感设施设备的影响规律,掌握400 km/h 高速铁路车致环境振动的基本特征。

(2)土体动阻尼比和动模量频变特性及其对铁路环境振动预测精度影响机制

采用高精度动三轴仪,研究标准砂土、粉质粘土、淤泥质粘土在200 Hz 范围内循环荷载作用下土样动力特性,探明土体动阻尼比、动弹性模量随加载幅值、加载频率、作用次数变化规律;采用一维等效线性化土体振动分析模型,研究不同频率动阻尼比和动模量下土体表面振动加速度响应,探究土体频变动力参数影响铁路环境振动预测的频率范围和量值大小。

(3)400 km/h 高速铁路车致环境振动精细化预测方法

研究400 km/h 高速铁路车致环境振动精细化预测模型,得到在铁路车致环境振动多场耦合动力学模型中考虑土动力学计算参数动态更新的实现方法,提出针对不同线下基础结构型式的高速铁路车致环境振动评估标准;基于精细化预测模型,研究分别考虑列车速度、车辆型式、轨道结构、基础结构影响因子的振源振级修正量,分别考虑垂直高度、水平距离、土层性质影响因子的大地振级修正量,考虑构筑物结构高度影响因子的受振体振级修正量,形成面向线路初步设计的高速铁路车致环境振动快速预测方法。

(4)400 km/h 高速铁路车致环境振动控制技术

通过研究轨道结构,线下基础结构平顺度、结构形式、基础刚度及隔振沟、波阻块、建筑隔振支座等措施对地面、隧道或高架高速铁路环境振动的控制效果,以及面向铁路沿线场地、既有建筑结构、尚未建建筑结构振动控制的针对线路设计、运营不同阶段的高速铁路环境振动控制技术体系,提出确保铁路沿线环境振动舒适性、安全性、可靠性和经济性,分别针对高架、地面、地下高速铁路在不同运营阶段的车致环境振动控制技术。

5 结论

本文针对400 km/h 高速铁路车致环境振动问题,总结了当前环境振动预测方法和控制措施研究现状及存在不足,给出了为满足更高速度标准的铁路环境振动预测方法和控制技术研究方向,得出主要结论如下:

(1)阻尼对土体介质振动波传递和衰减影响显著,瑞利阻尼方式在低频无法足量反映土体对振动的衰减能力,同时放大了土体对高频振动的衰减效果,400 km/h 高速铁路环境振动预测应考虑振动传递介质土的非线性特征。

(2)城市轨道交通环境振动采取的轨道减振措施,具有易增加线路不平顺性、对低频减振效果不明显及工程造价高的特点,不适于对线路平顺性指标要求更高的高速铁路环境振动控制。

(3)400 km/h 高速铁路环境振动预测和控制宜围绕土体动阻尼比和动模量频变特性及其对铁路环境振动预测精度影响机制,铁路环境振动多场耦合动力学模型土动力学计算参数动态更新实现方法,考虑振源、传播途径及受振体影响因素修正因子的铁路环境振动精细化预测模型,面向不同线下基础结构型式和运营条件在不同建设阶段的铁路环境振动控制技术方面开展深入研究。

参考文献:

- [1] 汪光焘,王婷. 贯彻《交通强国建设纲要》,推进城市交通高质量发展[J]. 城市规划, 2020, 44(3): 31-42.
WANG Guangtao, WANG Ting. Implementing the Outline for Building a Leading Transportation Nation to Promote High-Quality Development of Urban Transportation[J]. City Planning Review, 2020, 44(3): 31-42.
- [2] 孙成龙. 高速铁路地下线环境振动预测与控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
SUN Chenglong. Prediction and Control Study on Environmental Vibration of Underground Lines in High-speed Railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

(下转第46页)

Structure Optimization of Welded Turnout on 64 m-Span Bridge in High Speed Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(9): 12-17.

[3] 罗华朋,陈嵘,宋姣姣,等.地震作用对有砟轨道桥上无缝道岔纵向受力与变形影响分析[J].铁道标准设计,2018,62(5): 30-36.

LUO Huapeng, CHEN Rong, SONG Jiaojiao, et al. Seismic Impacts on Longitudinal Stress and Distortion of Welded Turnout on Bridge [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(5): 30-36.

[4] 王玉泽.京沪高速铁路徐沪段桥上板式无砟无缝道岔设计研究[J].铁道建筑,2014,54(5): 120-123.

WANG Yuze. Design Study on Slab-Type Ballastless Continuous Welded Turnouts on Bridge at Xuzhou-Shanghai Section of Beijing-Shanghai High Speed Railway [J]. Railway Engineering, 2014, 54(5): 120-123.

[5] 唐进锋,刘传鹏,黄江阳,等.路基无缝道岔对桥上无缝线路的影响分析[J].铁道建筑,2017,57(11): 134-136.

TANG Jinfeng, LIU Chuanpeng, HUANG Jiangyang, et al. Analysis about Influence of Subgrade Continuously Welded Turnout on Bridge CWR[J]. Railway Engineering, 2017, 57(11): 134-136.

[6] 张世杰.桥上无缝道岔交叉渡线无砟轨道影响因素分析[J].铁道工程学报,2013,30(10): 48-54.

ZHANG Shijie. Analysis of Influence Factors for the Seamless Turnout Scissors Crossing Ballastless Track on Bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(10): 48-54.

[7] 高增增.高速铁路桥上道岔群无缝线路力学特性研究[J].中国铁路,2021(5): 22-27.

GAO Zengzeng. Study on Mechanical Characteristics of Continuously Welded Rail with Turnout Group on HSR Bridge[J]. China Railway, 2021(5): 22-27.

[8] 陈新.客运专线高架站咽喉区道岔梁结构设计与研究[J].铁道工程学报,2016,33(3): 51-54.

CHEN Xin. Design and Research on the Switch Beam Structure of Passenger Dedicated Line Elevated Station Throat Area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(3): 51-54.

[9] 高亮,陶凯,曲村,等.客运专线桥上无缝道岔空间力学特性的研究[J].中国铁道科学,2009,30(1): 29-35.

GAO Liang, TAO Kai, QU Cun, et al. Study on the Spatial Mechanical Characteristics of Welded Turnout on the Bridges for Passenger Dedicated Lines [J]. China Railway Science, 2009, 30(1): 29-35.

[10] 孙加林.高速铁路温度场作用下桥上无缝道岔与桥梁相互作用研究[J].中国铁道科学,2017,38(1): 43-48.

SUN Jialin. Interaction between Seamless Turnout and Bridge of High Speed Railway under Temperature Field[J]. China Railway Science, 2017, 38(1): 43-48.

[11] TB 10015-2012 铁路无缝线路设计规范[S].

TB 10015-2012 Code for Design of Railway Continuous Welded Rail [S].

[12] 邴晔.高速铁路到发线无砟轨道接轨技术应用研究[J].高速铁路技术,2022,13(2): 31-36.

LI Ye. Study on Application of Ballastless Track Connection Technology to Arrival and Departure Tracks of High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2): 31-36.

[13] 王平.桥上无缝道岔设计理论[M].成都:西南交通大学出版社,2011.

WANG Ping. Design Theory of Seamless Turnout on Bridge [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2011.

[14] 徐桂弘,徐浩,王平,等.无砟轨道连续梁桥与道岔纵向相互作用规律的研究[J].铁道建筑,2011,51(5): 119-123.

XU Guihong, XU Hao, WANG Ping, et al. Study on the Longitudinal Interaction Law between Ballastless Track Continuous Beam Bridge and Turnout [J]. Railway Engineering, 2011, 51(5): 119-123.

(上接第39页)

[3] 丁乐宁.成渝中线高速铁路引入重庆铁路枢纽方案研究[J].铁道运输与经济,2021,43(1): 108-114.

DING Lening. Plan of Connecting Chengdu-Chongqing Middle High-speed Line with Chongqing Railway Hub[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(1): 108-114.

[4] 马蒙,刘维宁,刘卫丰.列车引起环境振动预测方法与不确定性研究进展[J].交通运输工程学报,2020,20(3): 1-16.

MA Meng, LIU Weining, LIU Weifeng. Research Progresses of Prediction Method and Uncertainty of Train-Induced Environmental Vibration [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 1-16.

[5] Hanson C E, Towers D A, Meister L D. Transit Noise and Vibration Impact Assessment[R]. Washington DC: U. S. Department of Transportation, 2006.

[6] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J. Modelling Ground Vibration from Railways Using Wavenumber Finite- and Boundary-Element Methods[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2005, 461(2059): 2043-2070.

[7] HUSSEIN M, HUNT H, KUO K, et al. The Use of Sub-Modelling Technique to Calculate Vibration in Buildings from Underground Railways[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 229(3): 303-314.

[8] 李瑞山,陈龙伟,袁晓铭,等.荷载频率对动模量阻尼比影响的试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(1): 71-80.

LI Ruishan, CHEN Longwei, YUAN Xiaoming, et al. Experimental Study on Influences of Different Loading Frequencies on Dynamic Modulus and Damping Ratio [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 71-80.