

文章编号: 1674—8247(2021)02—0115—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.020

## 400 km/h 高速铁路穿越住宅小区车致振动响应 及二次结构噪声研究

冯读贝 曾庆华 陈以庭 刘舫泊

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**新建成渝中线以 400 km/h 下穿通过某住宅小区,目前尚无 400 km/h 高速铁路下穿居民区运营的先例,为研究列车高速运行引起的振动与二次结构噪声对住宅小区居民舒适度的影响,本文建立列车-轨道-隧道-大地-建筑物三维相互作用模型,探究不同埋深条件下建筑物振动及二次结构噪声变化规律,并给出成渝中线穿越住宅小区满足振动和噪声舒适度的建议埋深。研究结果表明:(1)成渝中线以 400 km/h 高速穿越住宅小区时,建筑物振动影响频率范围集中在 30~50 Hz 内,振动主频为 40.0 Hz;(2)随着隧道埋深的增加,车致振动响应及二次结构噪声不断减小;(3)隧道埋深大于 40 m 时,车致振动及二次结构噪声可以满足 JGJ/T 170-2009《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限制及其测量方法标准》要求;(4)建议成渝中线穿越住宅小区时隧道埋深大于 40 m。

**关键词:**成渝中线; 400 km/h 高速铁路;车致振动;二次结构噪声

**中图分类号:**U211.3;U238

**文献标志码:**A

115

## Research on Train-induced Vibration Response and Secondary Structure-borne Noise—Based on a 400 km/h High-speed Railway Passing beneath a Residential Area

FENG Dubei ZENG Qinghua CHEN Yiting LIU Fangbo

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway is designed to pass beneath a residential area at 400 km/h. There is no previous case for reference currently. For this reason, we established a 3D train-track-tunnel-ground-building interactive model to study the train-induced vibration and secondary structure-borne noise at burial depths of 10 m, 20 m, 30 m, and 40 m and gave the recommended burial depth that meets the vibration and acoustic comfort standards for the Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway to pass beneath the residential area. The study results indicate that: (1) When trains travel at 400 km/h beneath the residential area, the buildings vibrate at a frequency of 30~50 Hz, dominant frequency 40.0 Hz. (2) As the burial depth of the tunnel increases, the train-induced vibration response and secondary structure-borne noise attenuate. (3) When the burial depth of the tunnel is deeper than 40 m, the train-induced vibration and secondary structure-borne noise can meet the requirements specified in the Standard for Limit and Measuring Method of Building Vibration and Secondary Noise Caused by Urban Rail Transport (JGJ/T 170-2009). (4) The burial depth of the second Chengdu-Chongqing High-speed Railway is thus suggested to be deeper than 40 m when passing beneath the residential area.

**收稿日期:**2021-03-01

**作者简介:**冯读贝(1991-),男,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(KSNQ202062)

**引文格式:**冯读贝,曾庆华,陈以庭,等.400 km/h 高速铁路穿越住宅小区车致振动响应及二次结构噪声研究[J].高速铁路技术,2021,12(2):115-120.

FENG Dubei, ZENG Qinghua, CHEN Yiting, et al. Research on Train-induced Vibration Response and Secondary Structure-borne Noise—Based on a 400 km/h High-speed Railway Passing beneath a Residential Area[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 115-120.

**Key words:** Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway; 400 km/h high-speed railway; train-induced vibration; secondary structure-borne noise

随着我国高速铁路技术的不断提高,运行速度已经向 400 km/h + 迈进。列车运行速度的提高将引起更剧烈的轮轨相互作用,铁路穿越居民区引起的振动与二次结构噪声问题值得深入研究。肖明清<sup>[1]</sup>等通过对广深港狮子洋隧道测试发现,高速列车引起环境振动主频分布于 30 ~ 40 Hz 范围内,振动主频随与线路距离的增加而降低;王祥秋<sup>[2-3]</sup>等对武广高速铁路以 270 km/h 速度近距离穿越 3 层住宅楼进行实测,发现建筑物铅垂向 Z 振级达到 70.62 dB;李平<sup>[4]</sup>对某高速铁路隧道进行实测,测试结果表明,隧道段高速铁路振动源达 80 dB,列车运行引起的环境振动主频集中在 20 ~ 80 Hz,埋深越大,主频越低。

成渝中线作为首条设计速度 400 km/h + 的高速铁路,亟需开展运行引起的振动和噪声问题的研究。本文对成渝中线穿越某住宅小区的车致振动响应及二次结构噪声进行分析,并研究不同隧道埋深对建筑物振动和二次结构噪声的影响规律,提出成渝中线穿越住宅小区满足振动和噪声舒适度的埋深建议值。

1 工程概况

某住宅小区位于重庆市,小区沿着线路长度方向约 200.0 m,建筑物形式多为 8 层框架结构,成渝中线以隧道形式穿越,成渝中线与住宅小区位置关系如图 1 所示。选取 1 栋线路正下方穿过的建筑物进行分析研究。

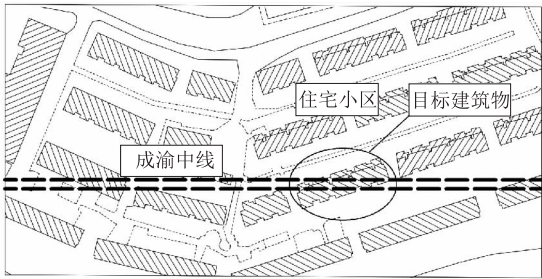


图 1 成渝中线与住宅小区位置关系图

2 分析模型

2.1 列车-轨道模型

为模拟列车在实际线路上的运行情况,基于车辆-轨道耦合动力学理论<sup>[5]</sup>,在列车-轨道相互作用分布式仿真平台<sup>[6]</sup>上实现车辆运行行为的模拟。其中,轮轨接触模型根据 Hertz 非线性弹性接触理论确定轮轨法向力,采用 Kalker 线性理论计算轮轨蠕滑力,然后采用沈式理论<sup>[7]</sup>进行非线性修正。进行空间

动态耦合计算时,考虑轨道体系振动及钢轨弹性变形对钢轨接触几何关系和轮轨作用力的影响。长波不平顺采用 TB 3352 - 2014《高速铁路无砟轨道不平顺谱》<sup>[8]</sup>,短波不平顺根据中国铁道科学研究院建议的功率谱密度函数变换而得,其波长范围为 0.01 ~ 1 m。车辆选取 CR400AF,典型轮轨动力荷载时程如图 2 所示。

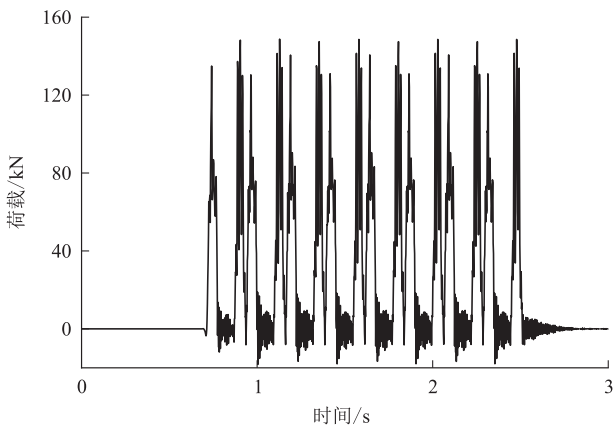


图 2 典型轮轨动力荷载时程图

2.2 隧道-大地-建筑物三维相互作用模型

模型中框架柱尺寸为 400 mm × 400 mm、600 mm × 600 mm,梁体尺寸为 600 mm × 400 mm、400 mm × 400 mm 和 400 mm × 300 mm,梁、柱均采用线单元模拟,楼板厚度 120 mm,采用壳单元模拟,建筑物共 8 层,层高均为 3.0 m,楼板跨度为 5.7 m × 4.2 m、5.4 m × 4.2 m、4.2 m × 3.0 m 和 3.0 m × 3.0 m,基础形式为独立基础。

在进行车致振动动力学分析之前,对建筑物模型进行模态分析,得到隧道-大地-建筑物三维模型如图 3 所示,前 20 阶固有频率如表 1 所示。由图 3 和表 1 可以看出,前 2 阶振型均为水平方向,第 3 阶模态为沿着竖向的扭转,从第 4 阶振型开始竖直方向开始占主导作用。

表 1 建筑物前 20 阶固有频率表

振型/阶	固有频率/Hz	振型/阶	固有频率/Hz
1	1.274 8	11	11.198 5
2	1.410 8	12	12.043 4
3	1.518 3	13	14.191 3
4	3.943 7	14	15.099 4
5	4.348 6	15	16.313 2
6	4.674 5	16	18.341 6
7	6.951 7	17	19.183 5
8	7.634 8	18	20.844 6
9	8.179 7	19	22.493 6
10	10.353 1	20	23.153 6

大地尺寸沿隧道方向取 90.0 m,垂直于隧道方向取 92.0 m,竖向取 60.0 m。隧道形式为马蹄形,单洞双线,隧道埋深分别为 10 m、20m、30 m 和 40 m,土体介质共包含 3 层,模型土层的计算参数如表 2 所示。最终大地的网格尺寸控制在 0.5 ~ 1.5 m 左右,在远离隧道与建筑物的网格适当放大,既可提高计算效率又能满足计算需求。动力分析过程中,需设置阻尼参数,模拟振动波动的传递衰减,采用 Rayleigh 阻尼来计算,

阻尼比取 0.05。进行动力分析时,模型边界会发生波的反射,对结果产生影响,为消除边界反射波的影响,模型的外围四周需添加三维粘弹性人工边界,人工边界等效为连续分布的并联弹簧-阻尼器系统<sup>[9]</sup>。

将列车-轨道模型获得的 400 km/h 轮轨动力荷载时程添加到隧道-大地-建筑物三维相互作用模型中,构成完整的分析模型,以进行成渝中线穿越建筑物振动响应分析。

表 2 模型土层计算参数表

编号	土层	厚度 /m	弹性模量 /MPa	剪切波速 /(m/s)	压缩波速 /(m/s)	泊松比	密度 /(kg/m <sup>3</sup> )
1	素填土	5.0	98	97	28	0.40	1 800
2	强风化泥岩	8.0	450	195	104	0.32	1 950
3	弱风化泥岩	47.0	730	456	237	0.30	2 100

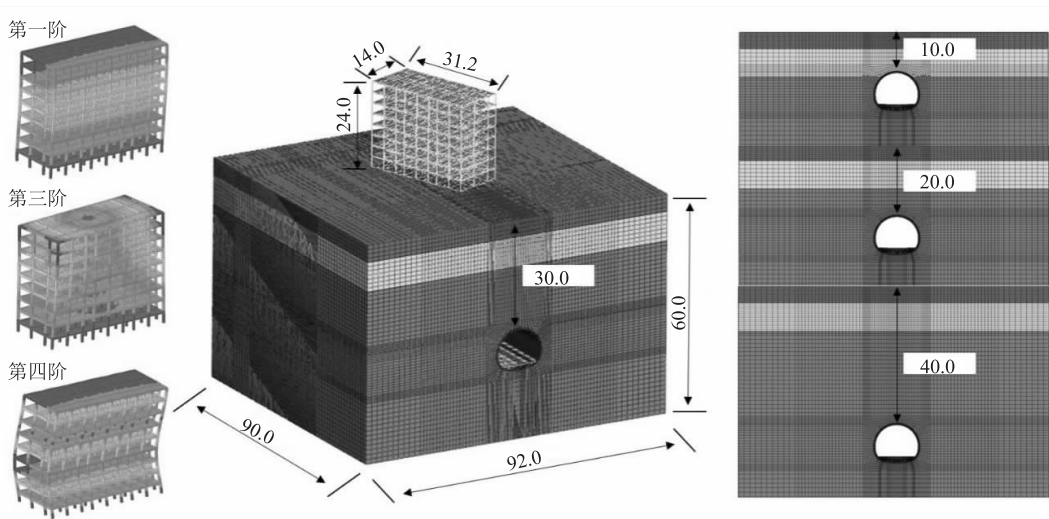


图 3 隧道-土体-建筑物三维相互作用模型图(m)

3 评价标准及计算方法

3.1 评价标准

目前,暂无高速铁路下穿住宅小区引起建筑物二次结构噪声影响的评价标准,为评价高速列车引起振动和二次结构噪声的影响水平,参考 JGJ/T 170-2009《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限制及其测量方法标准》<sup>[10]</sup>(以下简称《标准》)对住宅小区进行评价。根据《标准》要求的评价方法,需对建筑物内地面测点的分频最大振动加速度级(以下简称分频最大振级)进行评价,振动关注频段为 4 ~ 200 Hz,振动加速度级的计算方法为采用不同频率垂向振动计权因子修正后的振动加速度级即为计权振动加速度级,定义为:

$$VAL = 20\lg \frac{a_{rms}}{a_0}$$

(1)

式中:VAL——计权振动加速度级;  
 $a_0$ ——基准加速度,取值为  $10^{-6} \text{ m/s}^2$ ;  
 $a_{rms}$ ——频率计权振动加速度。  
计权加速度的计算公式为:

$$a_{rms} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_r^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}$$

(2)

式中:T——振动过程的平均时间;  
 $a_r(t)$ ——随时间变化的频率计权的振动加速度。

《标准》中规定建筑二次结构噪声以连续等效 A 声级作为评价指标,关注频段为 16 ~ 200 Hz。等效连续 A 声级是指在某段时间内的非稳态噪声的 A 声级,用能量平均的方法,以一个连续不变的 A 声级来衡量这一段时间内噪声的声级,相当于一个稳态的连续噪声。

《标准》给出的建筑物室内振动和二次结构噪声

限值如表 3 所示,住宅小区人员长期活动和居住地段,振动和二次结构噪声采用 1 类区域夜间标准 62 dB 和 35 dB(A) 的限值进行评价。

表 3 建筑物室内振动和二次结构噪声限值表

区域分类	适用范围	振动限值/dB		二次结构噪声限值/dB(A)	
		昼间	夜间	昼间	夜间
0 类	特殊住宅区	65	62	38	35
1 类	居民、文教区	65	62	38	35
2 类	混合区、商业中心区	70	67	41	38
3 类	工业集中区	75	72	45	42
4 类	交通干线道路两侧	75	72	45	42

注:昼间 06:00 ~ 22:00, 夜间 22:00 ~ 06:00

3.2 二次结构噪声计算方法

二次结构噪声指的是被激励产生振动的建筑构件,固体表面因振动向周围空气介质辐射的噪声。本文采用声学有限元方法计算建筑物在车致振动条件下的内场辐射噪声。将通过列车-轨道-隧道-土体-建筑物三维相互作用模型计算得到的楼板节点振动结果作为二次结构噪声的激励输入,对其进行傅里叶变换以便在频域上求解声波方程中获得建筑内声场响应。研究路线如图 4 所示。

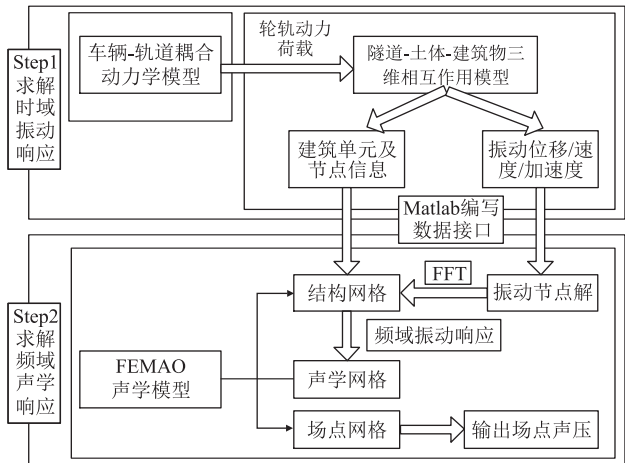


图 4 二次结构噪声计算流程图

4 测点布置

测点布置在 5.4 m × 4.2 m 跨度楼板上,1 ~ 8 层测点布置位置相同,测点布置如图 5(a) 所示。根据《标准》,二次结构噪声测点位置应处于距离地面 1.2 m 高度的平面,同时避免位于室内正中心,测点布置如图 5(b) 所示。

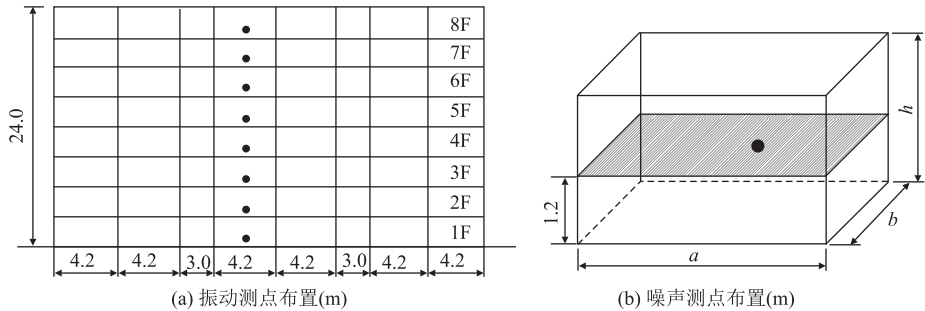


图 5 振动和噪声测点布置图

5 不同隧道埋深建筑物车致振动响应

5.1 振动加速度

当成渝中线以 400 km/h 高速下穿住宅小区时,提取建筑物测点的竖向振动加速度,不同隧道埋深建筑物首层测点的时域及频域振动加速度如图 6 所示。

由图 6 可以看出,成渝中线穿越建筑物持续时间约 2 s 左右,不同隧道埋深 10 m、20 m、30 m 和 40 m 建筑物首层测点的峰值振动加速度分别达到 0.075 9 m/s<sup>2</sup>、0.031 7 m/s<sup>2</sup>、0.023 0 m/s<sup>2</sup> 和 0.010 6 m/s<sup>2</sup>,随着隧道埋深的增加,建筑物的振动响应不断减小。建筑物车致振动影响频率范围集中在 30 ~ 50 Hz 内,振动主频为 40.0 Hz,随着隧道埋深的增加,振动主频附近的幅值不断减小,44.3 Hz 附近的幅值随着隧道埋深的增加而缓慢减小。说明随着隧道

埋深的增加,小于 40 Hz 的振动幅值衰减显著,大于 44.3 Hz 的振动幅值衰减缓慢。

5.2 1/3 倍频程振动加速度级

将振动加速度转换到 1/3 倍频程上,得到不同隧道埋深建筑物首层测点 1/3 倍频程振动加速度级,如图 7 所示。不同隧道埋深建筑物分振动随着楼层高度的变化如图 8 所示。

由图 7 可以看出,10 m、20 m、30 m 和 40 m 隧道埋深,建筑物首层测点的分频最大振级均出现在 40.0 Hz 处,分别达到 79.4 dB、72.8 dB、66.8 dB 和 60.5 dB,随着隧道埋深的增加,建筑物首层测点的振级不断减小,4 ~ 200 Hz 频率范围内,基本呈现出埋深 10 m 振级大于其他埋深的现象,40 m 埋深的振级最小,整体上大于 60 Hz 频率范围的振级快速衰减。

由图 8 可以看出,振动随着楼层的增加,呈现出先



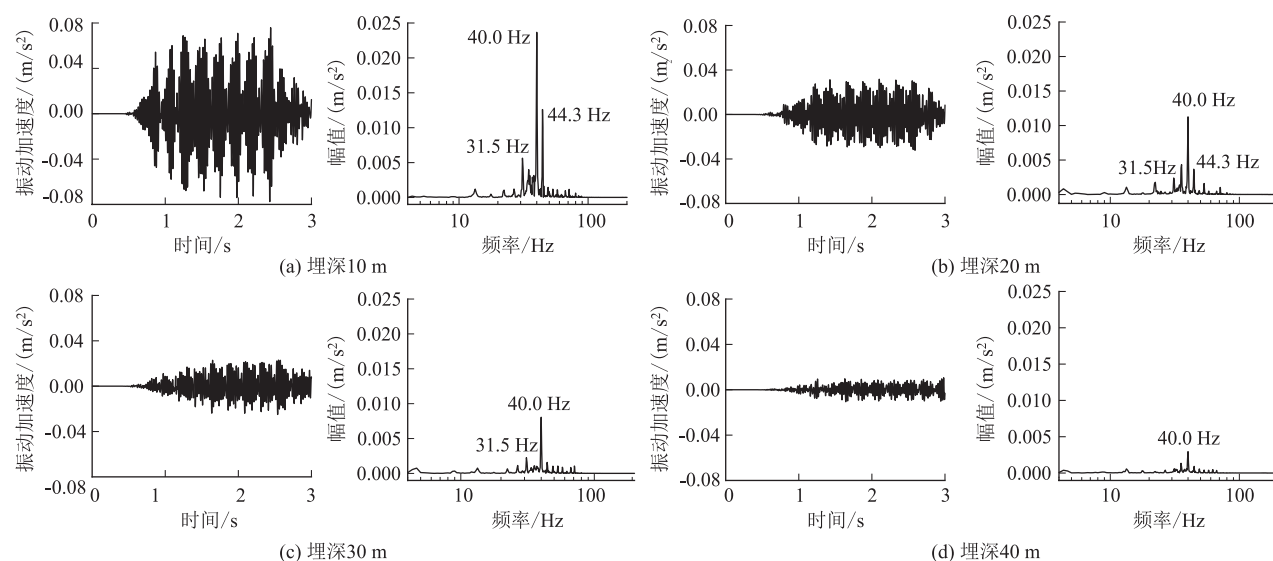


图6 不同隧道埋深建筑物首层测点振动加速度时程及频谱图

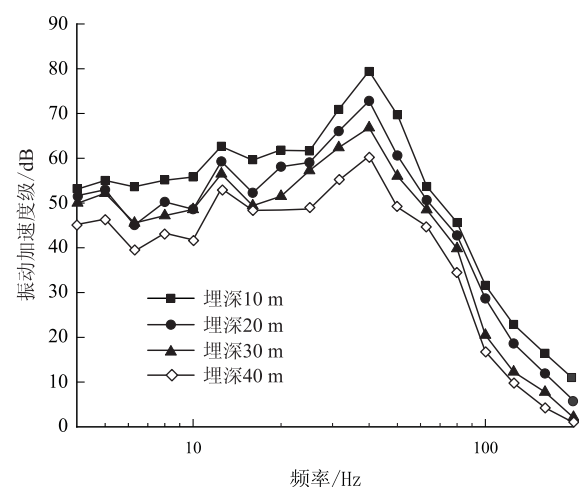


图7 不同隧道埋深建筑物首层测点1/3倍频程振动加速度级图

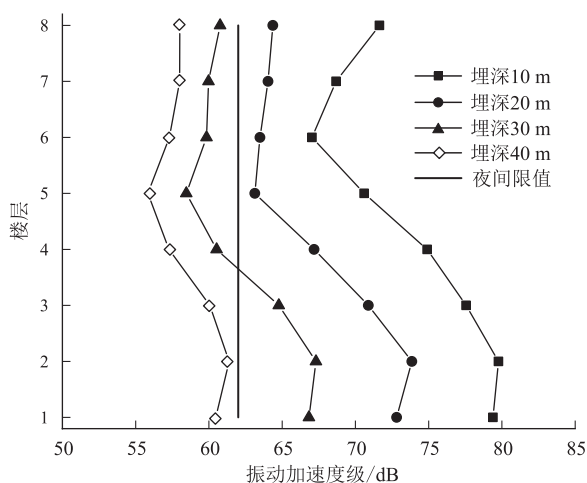


图8 不同隧道埋深建筑物振动随着楼层高度的变化图

增大(2层),后减小(3~5层),然后再增大(6~8层)的现象。说明随着楼层的增加,车致振动具有一定的

放大作用;当隧道埋深为10 m和20 m时,建筑物所有楼层振级均超出《标准》62 dB的夜间限值;当隧道埋深为30 m时,1~3层的振级超标,其余楼层不超标;当隧道埋深为40 m时,建筑物振级最大出现在2层,达到61.4 dB,小于62 dB的夜间限值。说明当隧道埋深大于40 m时,可有效提高建筑物内部居住人员的舒适度。

## 6 不同隧道埋深建筑物车致二次结构噪声

隧顶埋深10 m、20 m、30 m、40 m工况下建筑物首层二次结构噪声窄带频谱如图9所示。

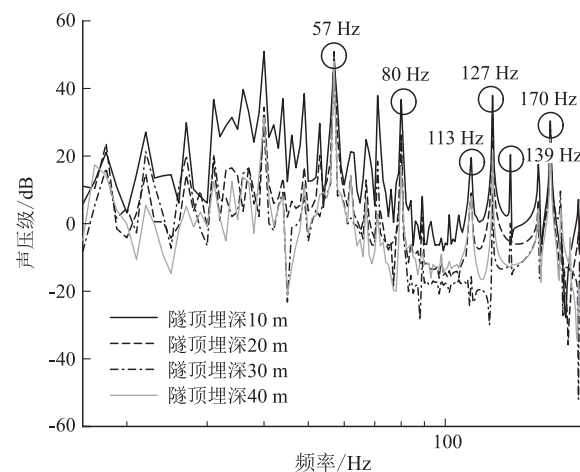


图9 建筑物首层测点声压级窄带频谱图

从图9中可以看出,在50 Hz以上频段内,声压级曲线出现较为密集的峰值,这是由于二次结构噪声的计算对象为封闭房间,在噪声求解时可看作为封闭腔体,因此会存在声学模态,封闭声腔的声学模态频率如

表4所示。由表4可以看出,声腔的声学模态频率基本能够对应二次结构噪声频谱的峰值频率,说明高频的声压级峰主要受声腔本身声学模态控制。

表4 建筑物声腔声学模态频率表

模态阶数	频率/Hz	模态阶数	频率/Hz
1 阶	$1.9 \times 10^{-5}$	7 阶	139.2
2 阶	56.7	8 阶	160.8
3 阶	80.2	9 阶	170.5
4 阶	98.3	10 阶	179.6
5 阶	113.4	11 阶	188.4
6 阶	126.7	12 阶	197.1

隧顶埋深 10 m、20 m、30 m、40 m 工况下建筑物首层二次结构噪声 1/3 频谱如图 10 所示。从图 10 可以看出,二次结构噪声基本随着隧道埋深的增加逐渐减小,且不同埋深方案下二次结构噪声最大值为 31.2 dB(A),未超过《标准》35 dB(A)的夜间限值要求。同时 16~50 Hz 频段内二次结构噪声随频率变化趋势与楼板振动频谱基本一致,在 100 Hz 以上频段内,二次结构噪声曲线呈现出先增大后减小趋势。另外,二次结构噪声窄带频谱中 50 Hz 以下频段内声压级随频率分布与振动结果基本一致,在 40 Hz 处出现噪声峰值;同时,随着隧顶埋深的增加,二次结构噪声曲线幅值逐渐减小。

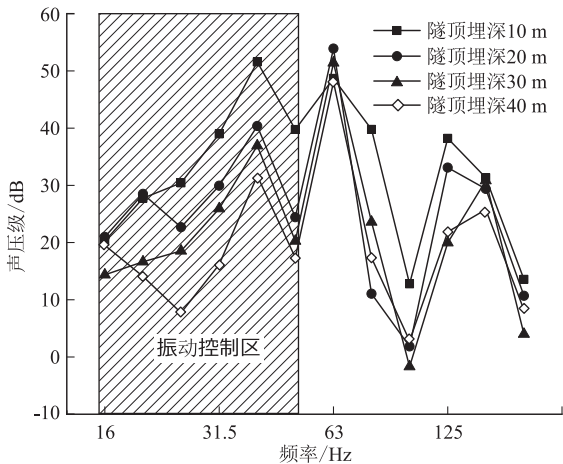


图10 建筑物首层测点 1/3 倍频程声压级频谱图

7 结论及建议

成渝中线以 400 km/h 速度穿越住宅小区,文章研究 10 m、20 m、30 m 和 40 m 不同隧道埋深条件下建筑物车致振动响应及二次结构噪声,得到以下结论:

- (1)建筑物车致振动影响频率范围集中在 30~50 Hz内,振动主频为 40.0 Hz。
- (2)随着隧道埋深的增加,车致振动响应及二次结构噪声不断减小。

(3)隧道埋深大于 40 m 时,车致振动及二次结构噪声可以满足 JGJ/T 170-2009《城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限制及其测量方法标准》要求。

(4)为提高住宅小区人员的舒适度,建议成渝中线穿越住宅小区时隧道埋深大于 40 m。

参考文献:

[1] 肖明清,姚捷,黄盾,等. 广深港高铁狮子洋隧道列车所致环境振动实测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S2): 3527-3534.

XIAO Mingqing, YAO Jie, HUANG Dun, et al. Study and Field Measurement of Environmental Vibration Induced by Underground High-speed Railway in Shiziyang Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3527-3534.

[2] 王祥秋,胡子莹,张火军. 武广高速铁路周边建筑物环境振动特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(3): 132-136.

WANG Xiangqiu, HU Zixuan, ZHANG Huojun. Analysis of Vibration Characteristics of Adjacent Buildings near the High Speed Railway of Wuhan to Guangzhou[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(3): 132-136.

[3] 王祥秋,张火军,谢文玺. 高速铁路周边建筑物环境振动现场测试与分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(3): 16-22.

WANG Xiangqiu, ZHANG Huojun, XIE Wenxi. Field Test and Analysis of the Environmental Vibration Characteristics of Building nearby the High Speed Railway[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(3): 16-22.

[4] 李平,罗信伟. 高速列车诱发桥隧段线路振动特性试验研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(4): 148-151.

LI Ping, LUO Xinwei. Experimental Study on Vibration Characteristics of Bridge and Tunnel Section Induced by High Speed Train Travelling[J]. Railway Engineering, 2019, 59(4): 148-151.

[5] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学(第四版)下册[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

ZHAI Wanming. Vehicle-Track Coupled Dynamic. Fourth Edition [M]. Science Press, 2015.

[6] 冯读贝,杨吉忠,胡连军. 列车-轨道-桥梁相互作用分布式仿真平台的研发[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(1): 76-80.

FENG Dubei, YANG Jizhong, HU Lianjun. Research and Development of Train-Track-Bridge Interaction Distributed Simulation Platform[J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(1): 76-80.

[7] SHEN Z Y, HEDRICK J K, ELKINS J A. A Comparison of Alternative Creep Force Models for Rail Vehicle Dynamic Analysis[J]. Vehicle System Dynamics, 1983, 12(1/2/3): 79-83.

[8] TB/T 3352-2014 高速铁路无砟轨道不平顺谱[S].

TB/T 3352-2014 PSD of Ballastless Track Irregularities of High-speed Railway[S].

[9] 谷音,刘晶波,杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 31-37.

GU Yin, LIU Jingbo, DU Yixin. 3D Consistent Viscous-spring Artificial Boundary and Viscous-spring Boundary Element [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 31-37.

[10] JGJ/T 170-2009 城市轨道交通引起建筑物振动与二次辐射噪声限制及其测量方法[S].

JGJ/T 170-2009 Standard for Limit and Measuring Method of Building Vibration and Secondary Noise Caused by Urban Rail Transit [S].