

轨道交通与建筑物共建体振动影响因素分析

徐司慧, 周顺华, 张小会, 肖军华

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 采用车辆-轨道-隧道-土层-建筑物系统空间动力分析模型, 对建筑结构的振动影响因素进行计算分析. 结果表明: 共建建筑物近振源区域以竖向振动为主, 竖向振动加速度峰值约为水平向的 1.6 倍; 共建建筑物结构约束变化位置振动易发生突变; 开间尺寸对结构振动的影响主要体现在振动主频上; 隧道基底的加固程度对共建结构 1~5 Hz 的低频振动影响较大; 建筑结构的振级对列车速度的敏感性随外部约束的增强而减小, 降低车速可有效地减小建筑物近振源区域振级.

关键词: 城际铁路; 矩形隧道; 扣件力; 车致振动

中图分类号: U213.2

文献标志码: A

Analysis on Influencing Factors of Vibration of Rail Transit-building Integrated Structure

XU Sihui, ZHOU Shunhua, ZHANG Xiaohui, XIAO Junhua

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A vehicle-track-tunnel-soil-building spatial coupling model was proposed to analyze influencing factors of vibration of integrated structure, which is composed of intercity railway tunnel and big public building. The results show as follows: the vertical vibration is dominated in the nearby area of vibration source, and the vertical vibration acceleration amplitude is about 1.6 times of transverse vibration. The vibration intensity is more easily changed when the structure constraint condition alters. Room size has an effect on the dominant vibration frequency. The vibration of building structure changes with the stiffness of tunnel foundation, mainly in 1~5 Hz. The sensitivity of vibration level to velocity is lower when the structure constraint becomes stronger. The vibration in the nearby area of vibration source can be attenuated by decreasing velocity.

Key words: intercity railway; rectangular tunnel; fastener force; train-induced vibration

受城市规划、轨道交通线路规划等因素影响, 越来越多的轨道交通隧道结构与地上建筑进行共建综合开发, 形成了轨道交通与建筑物共建体. 相较于一般的环境振动问题, 轨道交通与建筑物共建体的振动条件更加复杂, 具体体现在: 轨道交通线路与上部建筑物基础进行刚性整体性联结, 振动衰减距离有限, 部分建筑结构振动加剧; 共建段通常为地铁区间线路或者城际线路, 车辆运行速度高; 受到建筑用地的限制, 减振措施需考虑工程可实施性, 常常只能采取轨道或隧道结构减振. 因此, 为了同时满足轨道交通与建筑共建体的各自功能, 必须针对该共建体的振动特性开展系统研究.

目前, 建筑结构车致振动的研究多基于车辆-建筑物非共建工程^[1], 试验和理论研究表明建筑物车致振动特性影响因素较多, 涉及振源、传播路径、受振体 3 个方面. Vogiatzis^[2-3]研究了列车荷载在地表的传播规律及其对古建筑的影响, 并提出了安装浮置板结构的减振方法. 袁扬等^[4]通过室内锤击激励试验和数值模拟, 对不同振源特性下隧道-地层-建筑物体系的振动传播途径进行了总结. 夏倩等^[5]结合现场振动测试和数值分析, 研究了地铁振动对衬体结构的影响规律和影响因素. 盛涛等^[6]对地铁隧道诱发的环境振动进行了现场监测, 探索了地铁振动在经过衬砌、土层及建筑结构的 3 层滤波效应后, 频谱及振幅特性的衰减规律及对邻近建筑物室内舒适度的影响程度. 虽然上述研究取得了一系列有益成果, 但不能严格适用于轨道交通与建筑物共建体. 韦凯等^[7-9]基于上海某共建工程进行现场实测与数值研究表明: 钢弹簧浮置板轨道基频的选择需要综合考虑共建结构型式、结构刚度以及钢弹簧支反力的时域与频域特性. 然而, 该研究的振源主要为地铁列车荷载, 行车速度低, 研究结果难以适用于高速列车与建筑共建工程. 文献^[10-11]通过建立三维有限元

收稿日期: 2015-11-03

第一作者: 徐司慧(1991—), 女, 博士生, 主要研究方向为车辆轨道动力学. E-mail: xsyh1234@163.com

通讯作者: 周顺华(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为城市轨道交通结构设计及地下工程.

E-mail: zhoushh@tongji.edu.cn

模型研究了高速列车荷载作用下的共建结构减振问题, 但并未涉及建筑结构自身振动特性分析, 仅限于隧道结构减振. 文献[12-13]的车致振动研究则主要针对列车-桥梁-建筑物系统, 与本文的地下振源动力响应不同.

本文针对某城际铁路隧道与大型公共建筑物共建的振动问题, 采用车辆-轨道-隧道-土层-建筑物耦合系统动力学方法, 研究车辆振动激励在建筑结构中的传播特征及开间尺寸、隧道基底刚度、列车速度等因素对结构振动特性的影响, 以期对轨道交通-建筑物共建体系的减振措施研究提供一定参考.

1 工程背景

某城际铁路隧道与大型市政结构共建工程, 其

中城际铁路为四线矩形隧道, 明挖法修建, 最小净埋深 10.6 m, 单洞净宽 10 m, 净高 13 m. 车辆为动力集中式高速列车, 编组模式为一动六拖, 每节车辆由 4 个轮对组成. 轨道采用双块式无砟轨道结构, 设计行车速度为 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. 上部市政结构长 180 m, 宽 105 m, 最大高度 57 m. 建筑物分为主楼和副楼, 主楼为地上 9 层, 地下 1 层, 副楼为地上 5 层或地上 3 层, 地下 1 层. 共建段处, 隧道部分围护结构与建筑物基础刚性联结, 城际铁路线路走向垂直于建筑物长度方向.

隧道主要穿越土层为粗砂, 局部穿越粉质黏土, 隧道底板主要坐落在粉质黏土层中, 结构下卧粉质黏土厚度分布较为均匀. 表 1 为涉及土层的主要物理力学指标, 有限元数值分析中, 对土层作适当简化, 模拟区域的工程横断面如图 1 所示.

表 1 土层物理力学参数

Tab.1 Soil properties

名称	含水率/ %	液性 指数	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa	变形模量/ MPa	压缩模量/ MPa	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	承载力/ kPa
素填土	22.7	0.48	10	10		2	24	0.48	
粉质黏土	38.0	0.92	12	24		4	19	0.30	130
粗砂			31		50		19	0.23	150
中风化岩					130		23	0.23	1 200
微风化岩					400		24	0.23	2 000

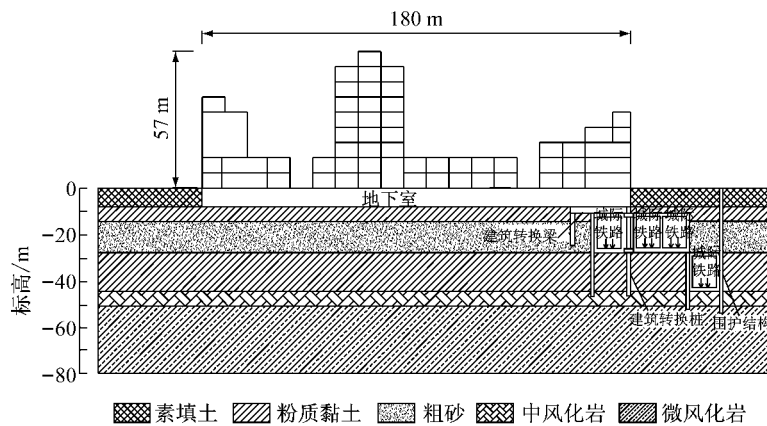


图 1 结构横断面图

Fig.1 Cross section of the structure

该共建体系的特点有: ① 城际铁路隧道结构与建筑物基础共建长度较大, 达 105 m; ② 建筑物内部开间尺寸差异较大, 分别为 5、7、10、14 m 等; ③ 城际铁路为四线线路, 线路数量多且行车速度高. 考虑到该轨道交通-建筑物共建体系的结构复杂性和减振制约性, 需在工程完工之前对建筑结构的振动特性及影响因素开展系统研究, 以期为后续减振工作提供参考.

2 计算方法及模型

2.1 车辆-轨道-隧道-土层-建筑物动力计算方法

共建结构的车辆振动分析采用车辆-轨道-隧道-土层-建筑物耦合系统动力学方法, 将该系统分为 2 个子系统, 即车辆-轨道子系统和隧道-土层-建筑物子系统, 通过扣件力实现两者的联系和交互计算.

车辆-轨道子系统采用车辆-轨道垂向耦合动力

学模型,其由车辆模型、轨道模型按照 Hertz 轮轨接触关系联系组成,如图 2 所示.计算中考虑轨道随机不平顺,采用德国高干扰轨道谱^[14].

车辆采用四轴二系悬挂模型,每节车辆都是由车体、转向架、轮对及弹簧-阻尼器悬挂装置组成的多自由度系统,其运动方程可使用矩阵形式表达为

$$M_c \ddot{X} + C_c \dot{X} + K_c X = Q \quad (1)$$

式中: M_c 、 C_c 、 K_c 分别为车辆系统的质量、阻尼和刚度矩阵; \ddot{X} 、 \dot{X} 、 X 分别为车辆模型中的广义加速度矢量、广义速度矢量和广义位移矢量; Q 为车辆模型中的广义荷载矢量.

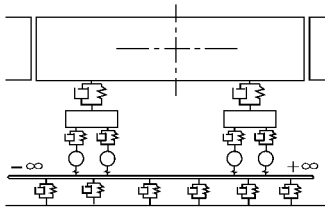


图 2 车辆-轨道垂向耦合模型

Fig.2 Vehicle-track vertical coupled model

共建工程中车辆模型计算参数见表 2.

表 2 车辆模型计算参数^[13]

Tab.2 Properties of the vehicle

车型	质量/t			点头惯量/ (t·m ²)		刚度/ (kN·m ⁻¹)		阻尼/(kN· s·m ⁻¹)	
	车体	构架	轮对	车体	构架	一系	二系	一系	二系
动车	63.8	4.3	1.9	1 349.3	4.02	339.6	885.8	21	63.8
拖车	47.4	3.5	1.4	1 288.2	3.47	550.0	400.0	12	80.0

轨道模型中,将钢轨视为无限长 Euler 梁模型,考虑边界条件后,简化为有限长简支梁,其弹性由轨下胶垫提供,受力关系如图 3 所示.

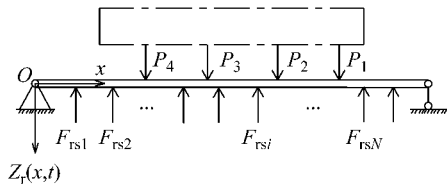


图 3 钢轨受力分析模型

Fig.3 Force analysis of rail

图 3 中, $Z_r(x, t)$ 为钢轨垂向振动位移; P_j 为轮轨作用力; N 为钢轨计算长度范围内的扣件结点数; F_{rsi} 为钢轨第 i 个支点的扣件力,由钢轨及轨下结构振动响应两部分组成,作为荷载输入条件参与计算.共建工程中轨道模型的计算参数见表 3^[15].

隧道-土层-建筑物子系统采用三维有限元方法.扣件力由两部分组成,分别为上述 2 个子系统在扣件处的振动响应,表达式为

表 3 轨道模型计算参数

Tab.3 Properties of the track

轨道部件	项目	数值
钢轨	弹性模量/(N·m ²)	2.059×10 ¹¹
	截面惯性矩/m ⁴	3.217×10 ⁻⁵
	每延米质量/(kg·m ⁻¹)	60.64
扣件	轨下胶垫刚度/(N·m ⁻¹)	6.0×10 ⁷
	轨下胶垫阻尼/(N·s·m ⁻¹)	3.625×10 ⁴

$$F_{rs} = C_p \dot{Z}_r(x_i) + K_p Z_r(x_i) - C_p \dot{\delta}_s - K_p \delta_s \quad (2)$$

式中: C_p 和 K_p 为轨下胶垫的阻尼和刚度矩阵; $\dot{Z}_r(x_i)$ 和 $Z_r(x_i)$ 为车辆-轨道子系统中钢轨在扣件处的速度和位移列阵; $\dot{\delta}_s$ 和 δ_s 为隧道-土层-建筑物子系统中轨道结构在扣件处的速度和位移列阵.

2 个子系统的求解均采用逐步法,时间积分步长需一致.计算流程为:在计算步 S_i 内,由上一计算步 S_{i-1} 中的隧道在扣件节点处的速度和位移响应以及钢轨在扣件节点处的速度和位移响应计算得到扣件力,将该扣件力施加于隧道-土层-接触面-建筑物三维有限元模型中,进而得到计算步 S_i 中建筑物的振动响应.之后,在有限元模型中,隧道在扣件处的振动响应会参与下一计算步 S_{i+1} 中扣件力的计算,更新扣件力的值,进而得到下一计算步 S_{i+1} 建筑物的振动响应.依此往复,直至计算终了.

图 4 为三维有限元网格图,模型尺寸 350 m×250 m×80 m(不含上部建筑物).土体及隧道结构采用空间实体单元模拟,隧道衬砌密度为 2.4×10³ kg·m⁻³,动弹性模量为 45 MPa,动泊松比为 0.3;建筑物梁和柱采用弹性梁单元模拟,通过设置梁单元的截面形式和尺寸模拟不同类别的梁、柱;墙体、楼板采用弹性壳单元模拟.模型的纵向网格尺寸取实际轨枕间距 0.6 m,隧道及建筑物附近网格尺寸较密、远离隧道及建筑物时网格尺寸有所增大.模型材料采用线弹性材料,材料阻尼模型采用 Rayleigh 阻尼,边界采用黏弹性边界,计算步长为 0.005 s.

2.2 模型的验证

采用上述模型试算已建共建工程的振动响应,并通过与实测值的比较检验算法的可靠性.该案例为某地铁车站与其上部办公楼共建结构,地面以上的七层混凝土框架结构为某单位的办公楼,地面以下双层结构为地铁车站的站台和站厅层,结构横断面见图 5.

模型计算结果与实测数据的对比如图 6 所示.由图 6 可知,计算值与实测值吻合较好,中心频率 20 Hz 以上区域较为一致,特别是在 40~60 Hz 频段内;4~20 Hz 区域内,两者有所差异,这是因为测试

时有少量小汽车通过,小汽车引起振动的主要频段为 8~20 Hz,而数值计算中没有考虑该部分振动.

大.随着振源距离增加,3 个方向振动速度呈减小趋势,其中,竖向速度变化幅度较大,衰减快,而水平向速度变化幅度较小.

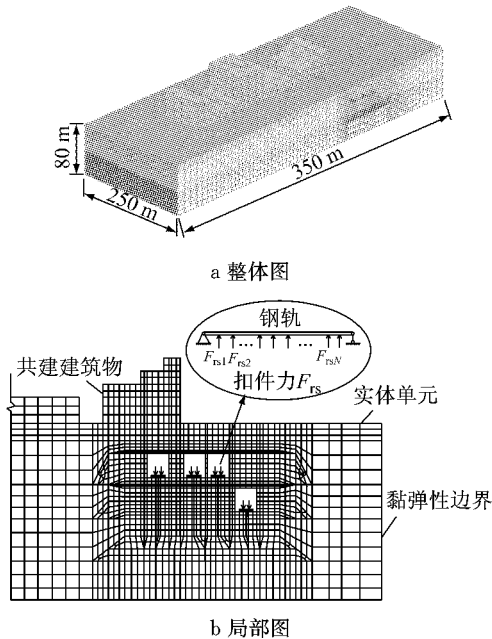


图 4 三维有限元模型图

Fig.4 Three-dimensional finite element method model

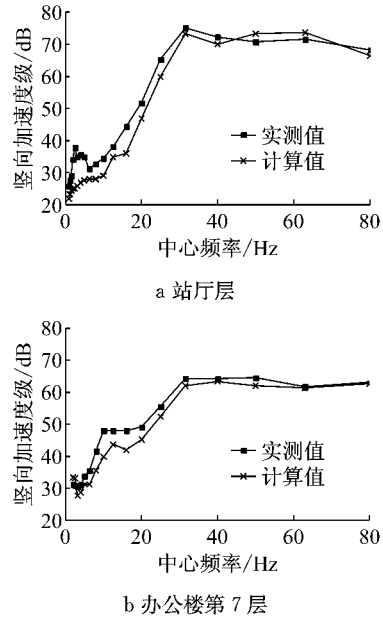


图 6 模型验证的结果

Fig.6 Validation results of model

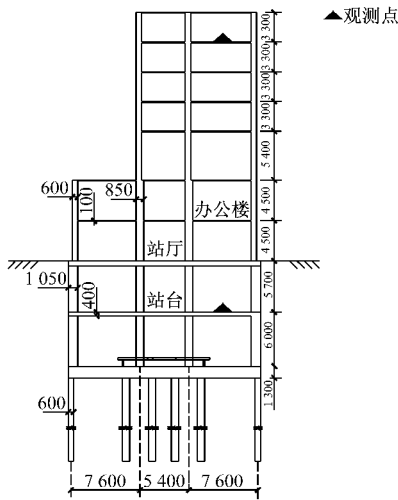


图 5 试算案例结构横断面图(单位:mm)

Fig.5 Cross section of existed project(Unit: mm)

3 共建体系振动影响因素分析

3.1 振源距离的影响

选取首层建筑物 3 个方向(横向、纵向、竖向)的振动响应分析振源距离对振动特性的影响,观测点位于各楼层中央,如图 7 所示.

图 8 为不同振源距离下首层建筑物 3 个方向(横向、纵向、竖向)的振动速度峰值响应.由图 8 可知,振动速度以竖向为主,横向与纵向速度值相差不

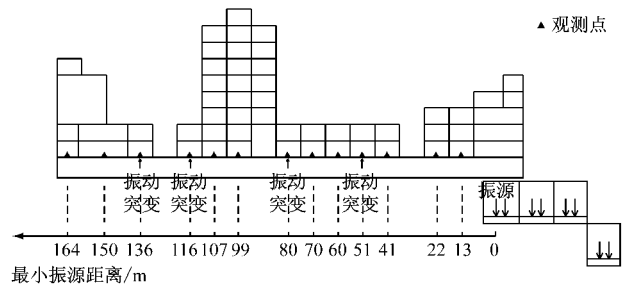


图 7 观测点分布说明

Fig.7 Layout of measuring points in building

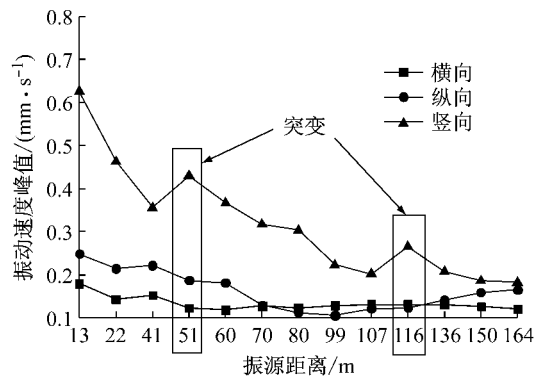


图 8 建筑物楼层振动速度峰值

Fig.8 Velocity peak of floor vibration

图 9 为 3 个方向加速度峰值随振源距离的变化规律.由图 9 可知,建筑物振动响应的总体趋势是随着远离隧道中心线,振动响应逐渐衰减,但竖向振动

的衰减梯度要大于水平向振动. 近振源处(振源距离小于 60 m), 振动加速度以竖向为主, 竖向振动响应峰值约为水平向振动响应峰值的 1.6 倍; 水平 2 个方向的振动值相当. 远离振源处(振源距离大于 60 m), 3 个方向的振动水平逐渐趋于一致.

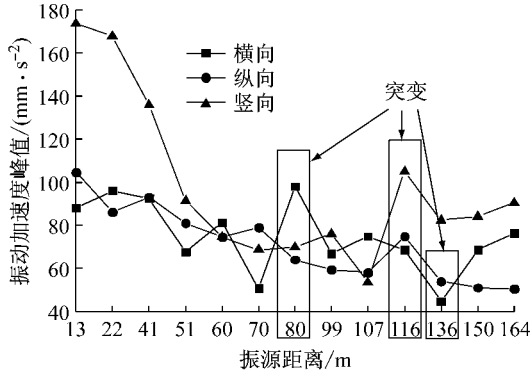


图 9 建筑物楼层振动加速度峰值
Fig.9 Acceleration peak of floor vibration

由图 8 和 9 可知, 建筑物的振动速度和振动加速度均在距振源不同位置发生突变, 其中振动加速度的突变情况更为明显, 竖向及纵向加速度在 116 m 处突然增大, 横向加速度在 80、136 m 两处突变. 进一步分析振动突变的位置可发现, 突变点多集中于建筑物结构约束变化的位置: 一方面, 当结构属于墙边自由约束(如 136 m 处)时, 其效应对振动有传递作用, 衰减楼板振动^[5]; 另一方面, 无论是墙边自由约束还是墙边部分约束(如 80、116 m 处), 约束情况的改变均会导致建筑物结构刚度的变化, 从而引起自振频率的变化, 容易导致楼板的局部共振, 对振动有局部放大作用. 表 4 列出了建筑物结构约束改变位置振动加速度的变化情况, 可以看出, 最大突变值达到 50.7 mm·s⁻². 由此可认为, 建筑物结构振动强度易在结构约束变化处发生突变, 因此需合理分配各区域的使用功能.

表 4 结构约束突变位置振动响应
Tab.4 Vibration response at the change of constraint conditions

项目	不同振源距离处振动响应		
	80 m	116 m	136 m
约束情况	3 墙边全约束 1 墙边部分约束	3 墙边全约束 1 自由约束	3 墙边全约束 1 自由约束
最大突变值/ (mm·s ⁻²)	48.1(横向振动)	50.7(竖向振动)	-23.0(横向振动)

注: 表中正值表示该点振动加速度变大.

3.2 开间尺寸的影响

因功能需要, 建筑物内部结构设计复杂, 开间尺寸差异较大, 而开间大小对建筑结构振动的影响不容忽视. 选取 6 个典型开间(编号一至编号六)分析

开间大小对建筑物结构振动特性的影响, 其结构参数见表 5.

表 5 各编号所在结构参数
Tab.5 Structure parameters of different rooms %

开间编号	开间尺寸	振源距离	楼层
一	7.2	107.0	四
二	7.2	89.0	四
三	7.2	89.0	七
四	6.0	22.0	二
五	14.0	6.8	二
六	5.0	6.8	四

图 10 为上述 6 处结构的竖向振动加速度频谱曲线. 图中 $S_{\text{开间}}$ 表示开间尺寸, $L_{\text{振源}}$ 表示距振源距离. 分析图 10 可得:

当开间尺寸及楼层相同时, 结构振动主频相近, 如图 10a、b 所示, 此时振动均集中于 4 个频段, 分别是 20~25 Hz、30~40 Hz、55 Hz 以及 70~80 Hz; 当开间尺寸不同、楼层相同时, 结构振动频率分布特性差异较大, 振动主频随开间尺寸的增大向低频移动, 如图 10d、e 所示.

当振源距离和开间尺寸相同时, 结构振动主频相近(见图 10b、c); 当开间尺寸不同、振源距离相同时, 结构振动频率分布差异较大(见图 10e、f), 振动主频随开间尺寸的减小向高频移动.

由图 10 可知, 共建结构的车致振动频率分布特性除了与振源有关外, 也很大程度受建筑物开间尺寸的影响. 城际列车引起的建筑物结构振动频率主要集中于 20~80 Hz, 其中, 建筑物开间大小对结构振动的影响主要体现在振动主频上, 与振动幅值无明显相关关系, 开间尺寸大, 振动主频小, 反之开间尺寸小, 振动主频大.

3.3 隧道基底刚度的影响

考虑不同加固方案下隧道基底刚度对共建体系车致振动的影响, 加固对象均为隧道基底所在的粉质黏土层, 横向加固长度 38 m, 加固深度 16 m(见图 11). 加固程度的不同, 对应的刚度也不相同, 在计算中主要体现在加固模量的变化, 各方案的等效模型参数见表 6.

图 12 为建筑物楼层竖向及水平向振动加速度功率谱曲线. 由图 12 可知, 隧道基底刚度对建筑物结构 5~100 Hz 频率范围的振动影响较小, 而对 0.1~5 Hz 频段的振动影响较大.

图 13 为建筑物楼层竖向和水平向 1/3 倍频程振级图. 由图 13 可知, 1~5 Hz 的低频范围内, 隧道基底刚度对于建筑物结构振动加速度的影响较大, 其中竖向加速度可达 10~15 dB, 水平向振动加速度可达 5~10 dB, 而 5~100 Hz 范围内的结构振动则

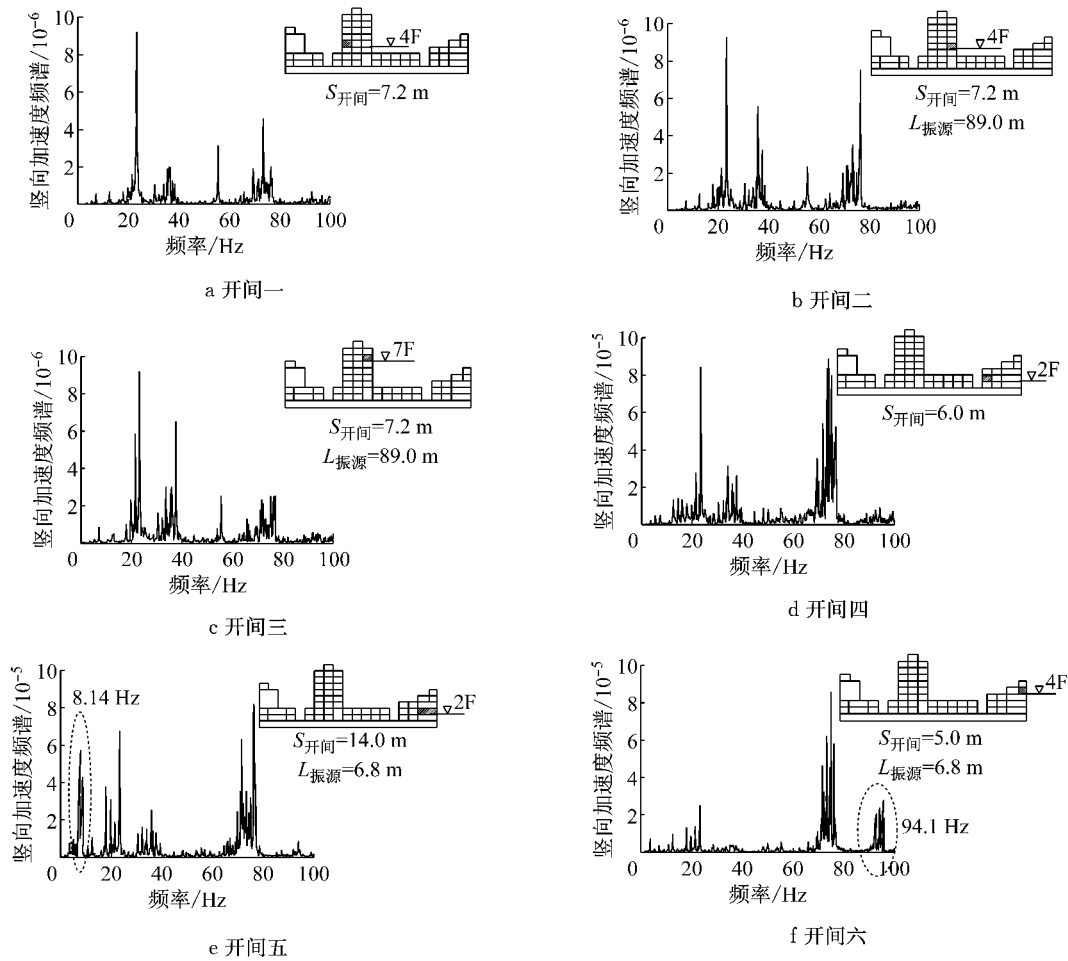


图 10 建筑物楼层竖向加速度频谱图

Fig.10 Spectrum of floor vertical acceleration

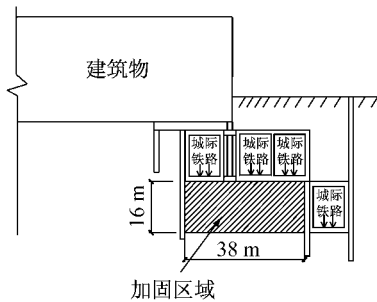


图 11 隧道基底加固区域示意图

Fig.11 Reinforced area of tunnel foundation

表 6 各方案的等效物理力学参数

Tab.6 Equivalent foundation properties

方案编号	弹性模量/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比
一	12	1 900	0.3
二	30	1 900	0.3
三	100	1 900	0.3
四	260	1 900	0.3

基本不受基底刚度的影响. 建筑物结构的自振频率较低,在低频范围的受迫振动易发生“合拍”现象,故基底刚度对于低频范围振动有较大影响这一规律对

于结构振动避开共振频率有着重要的意义.

3.4 列车速度的影响

图 14 为建筑物不同位置振动响应随速度的变化情况,其中列车速度分别为 120、160 和 200 km·h⁻¹,图中各分析点依据振源距离和结构约束程度划分成 3 类(I、II、III 区).

由图 14 可知,随着车速降低,建筑物近振源区域振动明显减弱,I 区(最靠近隧道区域)的振级在低速时小于其他 2 种速度下的振级,平均振级减小值达到 4.3 dB,单个位置减小值达到 8 dB.然而,当振源距离增加时,建筑物部分区域的振级在低速时增大,如 II 区范围内结构在低速时的振级反而高于其他 2 种速度,平均振级增大值达到 3.3 dB,单个位置增大值可达到 5 dB.

进一步分析单个位置的振级变化幅度可知,建筑物不同区域对速度变化的敏感程度有所差异. II 区所在建筑物对列车速度的变化较为敏感,同一位置由于速度不同导致的振级变化值为 4~7 dB,而 III 区内建筑物振级受速度变化影响最小,同一位置由

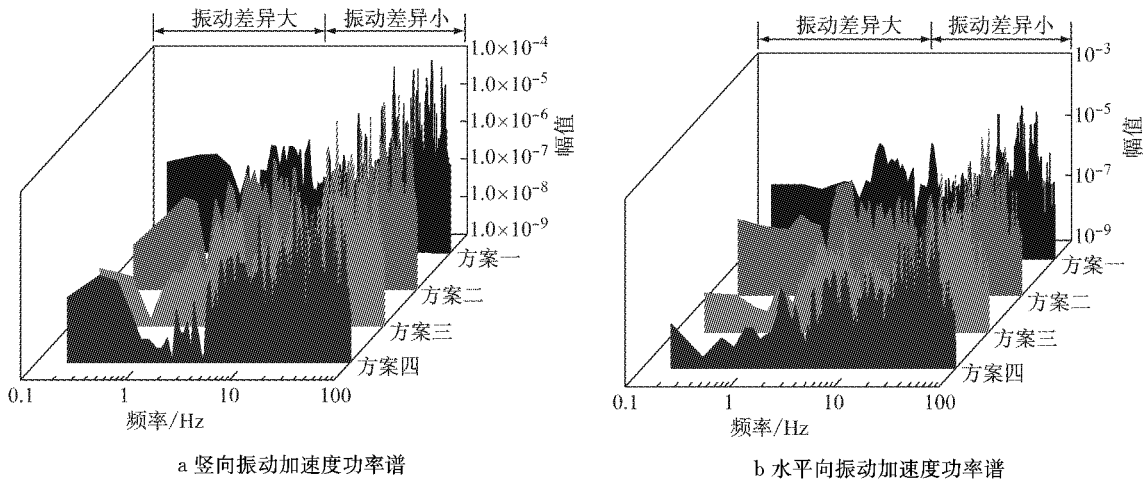


图 12 建筑物楼层振动加速度功率谱
Fig.12 Power spectrum of floor acceleration

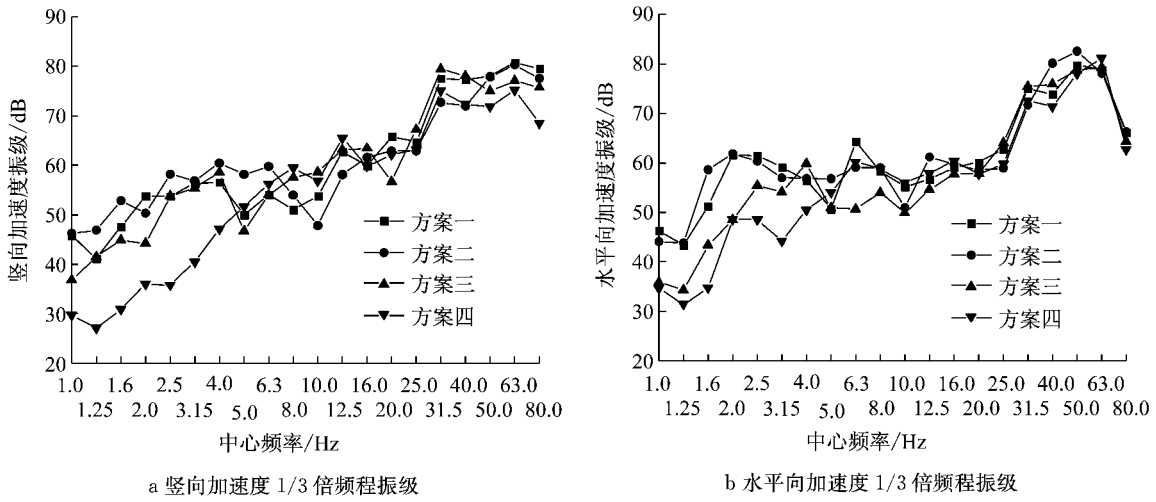


图 13 建筑物楼层加速度 1/3 倍频程振级
Fig.13 One-third octave vibration level of building acceleration

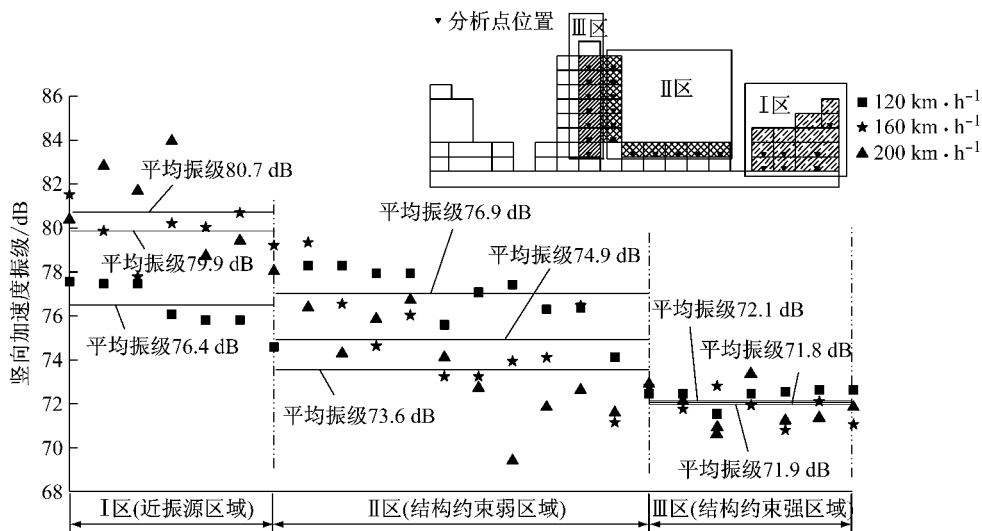


图 14 速度对建筑物振动的影响
Fig.14 Effect of velocity on floor vibrations

于速度不同导致的振级变化值仅0~1.2 dB.上述现象与建筑结构自身刚度差异有关:Ⅲ区位于建筑物主楼高层结构区的中间部位,结构4边墙边全约束,外部制约大,而Ⅱ区所在建筑物为1边或2边自由约束,显然,增加外部约束实则是增强结构的刚度,而刚度变化会引起建筑结构自振频率的改变,最终影响建筑物振级对速度的敏感性.

4 结论

(1) 城际列车运行引起的共建建筑物近振源区域以竖向振动为主,竖向振动加速度响应峰值约为水平向的1.6倍;结构约束变化位置振动易发生突变,最大突变值达到 $50.7 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$.

(2) 城际列车引起的建筑物结构振动频率主要集中于20~80 Hz,其中,建筑物开间大小对结构振动的影响主要体现在振动主频上,与振动幅值无明显相关关系,开间尺寸大,振动主频小,反之开间尺寸小,振动主频大.

(3) 隧道基底的加固程度对共建结构的低频振动影响较大,主要影响频段为1~5 Hz.

(4) 建筑物结构的振级对列车速度的敏感性随外部约束的增强而减小,降低车速可有效减小建筑物近振源区域振级.

参考文献:

[1] 姚锦宝,夏禾,陈建国,等. 列车运行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.
YAO Jinbao, XIA He, CHEN Jianguo, *et al.* Numerical analysis on the high rise building vibrations induced by moving trains[J]. China Railway Science, 2009, 30(5):129.

[2] Vogiatzis K. Noise and vibration theoretical evaluation and monitoring program for the protection of the ancient Kapnikarea church from Athens metro operation [J]. International Review of Civil Engineering, 2010,1(5):328.

[3] Vogiatzis K. Protection of the cultural heritage from underground metro vibration and ground-borne noise in Athens centre: the case of the Kerameikos archaeological museum and Gazi cultural centre[J]. International Institute of Acoustics and Vibration,2012,17(2):59.

[4] 袁扬,刘维宁,王文斌. 地铁交通引起环境振动传递特性试验研究[J]. 铁道学报,2014,36(4):99.
YUAN Yang, LIU Weining, WANG Wenbin. Experiments on environmental vibration propagation characteristics induced by metro traffic[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(4):99.

[5] 夏倩,屈文俊. 地铁振动对既有砌体结构影响规律及因素数值分析[J]. 振动与冲击,2014, 33(6):189.
XIA Qian, QU Wenjun. Numerical analysis on metro train-induced vibrations and their influences and affecting factors on existing masonry building[J]. Journal of Vibration and Shock,

2014, 33(6):189.

[6] 盛涛,张善莉,单伽铿,等. 地铁振动的传递及对建筑物的影响实测与分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2015,43(1):54.
SHENG Tao, ZHANG Shanli, SHAN Jiakeng, *et al.* In-situ measurement and analysis of subway vibration's transmission and the influence to nearby buildings[J]. Journal of Tongji University :Natural Science, 2015,43(1):54.

[7] 周萌,韦凯,周顺华,等. 轨道型式对地铁与建筑物共建结构振动响应的影响[J]. 中国铁道科学, 2011,32(2):33.
ZHOU Meng, WEI Kai, ZHOU Shunhua, *et al.* Influence of different track types on the vibration response of the jointly-built structure of subway and the buildings [J]. China Railway Science, 2011, 32(2):33.

[8] 韦凯,周顺华,翟婉明,等. 地铁与建筑物合建中不同固有频率钢弹簧浮置板轨道的适用性分析[J]. 土木工程学报, 2011, 44(11):134.
WEI Kai, ZHOU Shunhua, ZHAI Wanming, *et al.* Applicability of steel-spring floating-slab tracks of different natural frequencies for integrated metro-and-building structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44 (11): 134.

[9] 韦凯,周顺华,翟婉明,等. 地铁-建筑物合建结构中钢弹簧浮置板轨道基频优选影响因素[J]. 中国铁道科学, 2011, 32 (4): 8.
WEI Kai, ZHOU Shunhua, ZHAI Wanming, *et al.* The influencing factors of natural frequency optimization for steel-spring floating slab track in the metro-building integrated structure [J]. China Railway Science, 2011, 32(4): 8.

[10] 周顺华,张小会,杨新文,等. 轨道交通隧道基底刚度对共建结构的振动影响分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2014,42 (6):887.
ZHOU Shunhua, ZHANG Xiaohui, YANG Xinwen, *et al.* Effects of railway tunnel foundation stiffness on vibration response of tunnel-building integrated structure[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014,42(6):887.

[11] HOU Bowen, GAO Liang, XIN Tao, *et al.* Prediction of structural vibrations using a coupled vehicle-track-building model[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230 (2): 510.

[12] 杨娜,刘振林,郭婷,等. “房桥合一”轨道层结构车致振动响应测试研究[J]. 中国铁道科学,2013,34(2):29.
YANG Na, LIU Zhenlin, GUO Ting, *et al.* Field measurement and analysis of train-induced vibration of “building-bridge integration” structure [J]. China Railway Science, 2013, 34 (2):29.

[13] 朱志辉,余志武,朱玉龙,等. 车-桥振动诱发周围环境及建筑物振动的分析[J]. 铁道学报,2013, 35(4):102.
ZHU Zhihui, YU Zhiwu, ZHU Yulong, *et al.* Analysis on environment and building vibration induced by passing trains on bridge structures[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(4):102.

[14] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 4版. 北京:科学出版社, 2015.
ZHAI Wanming. Vehicle-track coupling dynamics[M]. 4th ed. Beijing: Science Press, 2015.

[15] 杨新文,宫全美,周顺华,等. 高速列车作用下双块式无砟轨道与路基垂向耦合振动分析[J]. 铁道学报,2014,36(8):75.
YANG Xinwen, GONG Quanmei, ZHOU Shunhua, *et al.* Analysis on vertical vibration of coupled double-block ballastless track and subgrade system under high-speed train running[J]. Journal of the China Railway Society, 2014,36(8):75.