

轨道交通隧道基底刚度对共建结构的振动影响分析

周顺华, 张小会, 杨新文, 朱欢乐

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为了探明建筑物与轨道交通隧道共建时隧道基底刚度对系统振动的影响, 建立列车-轨道-隧道-土层-建筑物系统耦合振动模型, 列车-轨道动力学模型和隧道-土层-建筑物有限元模型通过扣件力进行参数传递, 对隧道基底土层加固为不同刚度时隧道结构以及建筑物结构振动位移、速度、加速度响应进行了时程分析、频谱分析和振级分析等。结果表明: 隧道基底刚度越大, 其下沉位移越小, 隧道结构振动速度突变越大且振动速度的周期性越不明显, 但振动位移的振幅变化与隧道基底刚度没有严格的相关性; 隧道基底刚度对隧道振动加速度影响的主要频率为 1~5 Hz 的低频部分; 隧道基底刚度对于建筑物结构振动有较大影响, 主要集中于低频范围, 影响幅度可达 10 dB。

关键词: 轨道交通; 基底刚度; 共建结构; 振动; 数值仿真分析

中图分类号: U213.2

文献标志码: A

Effect of Railway Tunnel Foundation Stiffness on Vibration Response of Tunnel-Building Integrated Structure

ZHOU Shunhua, ZHANG Xiaohui, YANG Xinwen, ZHU Huanle

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

Abstract: In order to study the effects of railway tunnel foundation stiffness on tunnel-building integrated structure vibration response, the vehicle-track-tunnel-soil-building coupling dynamic model was established, and the reaction force of fasteners was used to transmit between vehicle-track coupling dynamic model and tunnel-soil-building finite element model. The displacement, velocity and acceleration response of tunnel and building with the change of tunnel foundation stiffness was analyzed by the way of time history analysis, spectrum analysis and vibration level analysis. The results show as follows: the subsidence displacement decreases with

the increasing of tunnel foundation stiffness furthermore, the discontinuity of velocity is exacerbated and the periodicity of velocity is weakened, but the correlation between amplitude of oscillation displacement and stiffness of tunnel foundation is not obvious. The vibration acceleration of tunnel is affected by the stiffness of tunnel foundation mainly in 1~5 Hz. The vibration of building structure changes with the stiffness of tunnel foundation, mainly in the low frequency level and the amplitude of variation can be 10 dB.

Key words: rail transit; foundation stiffness; tunnel-building integrated structure; vibration; numerical simulation analysis

随着城市建设的持续发展, 轨道交通隧道与建筑物共建的情况也逐渐增加, 共建结构一方面增大了整个系统的参振质量, 以期减小系统的振动响应; 另一方面却使得隧道结构与建筑物之间没有足够的振动衰减距离, 建筑物部分结构振动更加严重。现场实测及系列研究表明: 科隆蛋高弹扣件轨道与钢弹簧浮置板轨道结构对共建结构均有明显的减振效果^[1], 地铁低频振动传播容易在共建结构内引起共振, 因此钢弹簧浮置板固有频率应避开共建结构的低频敏感频段^[2], 并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等^[3]。该系列研究主要针对地铁与建筑物共建结构, 其主要特点是列车行车速度低, 从轨道结构出发对共建结构进行减振处理具有较高的工程可实施性, 但特殊轨道结构(如钢弹簧浮置板轨道)难以适应高速列车运行情况, 在部分工程中的使用受到制约。

隧道基底是直接承载列车、轨道结构、隧道结构的介质, 在实际工程项目中, 往往会对其进行注浆或者换填等处理, 这些处理措施侧重于对基底承载力进行改善。然而在对振动敏感且减振轨道结构使用受到制约的工程中, 由于建筑物与隧道共建结构的

收稿日期: 2013-07-17

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(211186)

第一作者: 周顺华(1964—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为岩土工程和铁道工程。E-mail: zhoushh@tongji.edu.cn

通讯作者: 张小会(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为铁道工程和耦合系统动力学。E-mail: 1988xiaohui@tongji.edu.cn

特殊性,隧道基底成为系统减振的关键部位.在进行隧道基底加固处理前,考虑基底刚度对于系统振动的影响^[4],在施工期将系统振动响应纳入隧道基底土体加固参数选择之中具有重要的意义.

国内外学者对隧道基底性质影响隧道及建筑振动特性进行了研究,并取得了一定的成果.施成华等^[5]采用动力有限元计算方法研究了沙层中隧道在列车运行时的衬砌顶部和底部的振动响应问题.薛富春^[6]和张柯^[7]等通过模拟高速铁路振动效应的激振试验及动力有限元方法,研究了富水黄土隧道在不同激振频率下的响应问题,试验结果表明振动波在黄土中迅速衰减,振动在不同介质交界面处会存在一个放大区域.张波等^[8]利用弹性波理论,研究了岩层的弹性模量对于岩层中隧道列车运行所致环境振动的影响规律,结果表明,不同深度岩层的弹性模量的影响也不相同.陈松洁^[9]对处于软弱地层中的水下盾构隧道在高速列车作用下的振动响应问题进行了研究.

现有文献侧重于处在特定类型土层条件中的盾构隧道在列车荷载作用的响应问题,未能突出隧道基底性质的特殊影响,且多采用有限元计算方法,激振力多为实测轮轨力,不能反映隧道基底及隧道结构振动对于轮轨力的影响.本文采用列车-轨道-隧道-土层-建筑耦合系统动力学方法,结合某城际铁路明挖隧道与建筑物共建实例,研究不同隧道基底刚度性质对于车致共建结构振动的影响,对于隧道基底加固参数选择提供参考.

1 计算方法及模型

列车-轨道-隧道-土层-建筑耦合系统动力学方法包含两大主要部分:列车-轨道耦合动力学模型和隧道-土层-建筑有限元模型,二者通过扣件力(针对双块式无砟轨道而言)耦合在一个大系统中.

1.1 隧道-土层-建筑有限元模型

该部分模型基于某城际铁路隧道与建筑物共建案例.城际铁路为四线矩形隧道,设计行车速度为 $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,为保证城际铁路运行安全,该线路采用双块式无砟轨道结构,明挖法修建,上部建筑物为框剪结构,主楼有地上九层及地下一层,采用桩基础.隧道顶板与建筑地下室底板最小净距仅为 1.2 m ,建筑基础与部分隧道围护结构共用,共建段长度约 150 m .

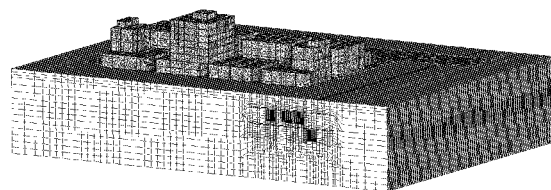
有限元模型中土体部分尺寸为 $250 \text{ m} \times 350 \text{ m}$

$\times 80 \text{ m}$,土层及隧道结构采用 3D 实体单元模拟,建筑物结构采用梁板单元模拟形成框架结构,模型材料采用线弹性材料,土层物理力学参数见表 1,表中, E_0 为弹性模量, E_s 为压缩模量.材料阻尼模型采用 Rayleigh 阻尼,取土的阻尼比为 0.02 ,混凝土的阻尼比为 0.01 ,边界采用粘弹性边界^[10].建立的有限元模型三维图及正视图如图 1 所示.

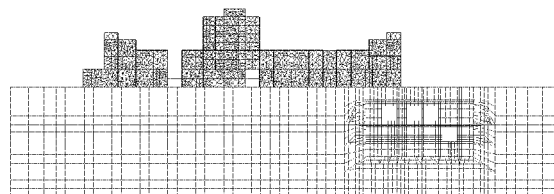
表 1 土层物理力学参数

Tab.1 Soil properties

名称	E_0/MPa	E_s/MPa	密度/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比
素填土		2	2 400	0.48
粉质粘土		5	1 938	0.30
粗砂	50		1 938	0.23
中风化岩	130		2 300	0.23
微风化岩	400		2 400	0.23



a 3D 模型图



b 模型正视图

图 1 有限元模型图

Fig.1 Finite element method(FEM) model

1.2 列车-轨道耦合动力学模型

列车-轨道耦合模型采用经典车辆-轨道垂向耦合动力模型 VICT (vertical interactions between cars and tracks)^[11].在列车模型中,每节车辆被模拟为多刚体系统,考虑轮对、转向架、车体共 7 个刚体,10 个自由度,其动力学方程可表示为统一格式:

$$M\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{P} \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分别为车辆系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{X}}$ 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 和 \mathbf{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; \mathbf{P} 为车辆模型中的广义荷载矢量.

在轨道模型中,钢轨被视为在连续弹性离散点支撑上的无限长 Euler 梁,对于双块式无砟轨道而言,弹性支撑主要有轨下胶垫提供,钢轨的振型坐标方程为

$$\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_r \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_r \mathbf{q} = \mathbf{P}_r \quad (2)$$

式中: \mathbf{C}_r 、 \mathbf{K}_r 分别为轨道系统中钢轨振型坐标的广义阻尼、广义刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{q}}$ 、 $\dot{\mathbf{q}}$ 和 \mathbf{q} 分别为钢轨正则振型坐标的广义加速度矢量、广义速度矢量和广义位移矢量; \mathbf{P}_r 为轨道模型中钢轨振型坐标的广义荷载矢量。钢轨的动力学方程为

$$\ddot{\mathbf{X}}_r(x) = \mathbf{Y}(x)\ddot{\mathbf{q}} \quad (3)$$

式中: $\ddot{\mathbf{X}}_r(x)$ 为钢轨的加速度矢量; $\mathbf{Y}(x)$ 为钢轨的振型矩阵。

轮轨接触关系采用 Hertz 非线性弹性接触理论, 轮轨间垂向作用力为

$$p(t) = \{ [Z_{wj}(t) - Z_r(x_{wj}, t) - Z_0(t)] / G \}^{3/2} \quad (4)$$

式中: G 为接触常数; $Z_{wj}(t)$ 为 t 时刻 j 位车轮的位移; $Z_r(x_{wj}, t)$ 为 t 时刻 j 位车轮位置钢轨位移; $Z_0(t)$ 为轨道随机不平顺输入。

车辆-轨道数值积分模型中扣件反力为

$$\mathbf{F}_{rs} = \mathbf{C}_p \dot{\mathbf{X}}_r(x_i) + \mathbf{K}_p \mathbf{X}_r(x_i) - \mathbf{C}_p \dot{\mathbf{X}}_{FEM} - \mathbf{K}_p \mathbf{X}_{FEM} \quad (5)$$

式中: \mathbf{F}_{rs} 为扣件反力矢量; \mathbf{C}_p 和 \mathbf{K}_p 为扣件下垫片的阻尼矩阵和刚度矩阵; $\dot{\mathbf{X}}_r(x_i)$ 和 $\mathbf{X}_r(x_i)$ 为扣件点处钢轨速度矢量和位移矢量; $\dot{\mathbf{X}}_{FEM}$ 和 \mathbf{X}_{FEM} 为有限元模型中对应扣件点处轨道结构速度矢量和位移矢量。

车辆-轨道-隧道-土层-建筑耦合系统动力学方法计算流程(图2)如下: 通过扣件反力来实现车辆-轨道数值积分模型与隧道-土层-建筑有限元模型两个子模型的交互计算, 在一个计算步内, 首先由前一个计算步中得到的隧道中扣件点处节点的振动位移和振动速度通过车辆-轨道数值积分模型计算出扣件反力, 然后将该扣件反力施加于隧道-土层-建筑有限元模型相应的节点上, 有限元模型在扣件反力作用下产生振动响应, 而有限元模型隧道中扣件点处节点的振动响应将在下一个计算步内作用于车辆-轨道数值积分模型, 进而影响下一个计算步的扣件反力。车辆-轨道-隧道-土层-建筑耦合系统动力学方法计算流程如图2所示。

2 算例分析

为计算隧道基底刚度对车致共建结构振动的影响, 选取4种不同的加固方案, 其中方案1为不加固、方案2为弱加固、方案3为中加固、方案4为强

加固, 各方案基底动弹性模量分别为12、30、100和260 MPa。为满足单一变量分析的原则, 假定隧道基底其他参数相同。4种加固方案基底参数见表2。

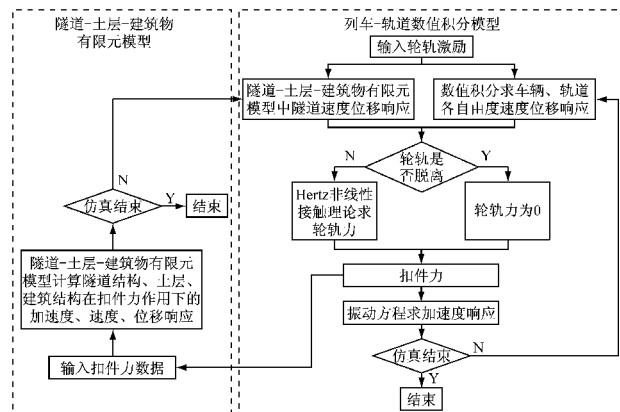


图2 车辆-轨道-隧道-土层-建筑耦合系统动力学计算流程

Fig.2 Process of vehicle-track-tunnel-soil-building coupling dynamic model

表2 各方案基底相关物理力学参数

Tab.2 Reinforced foundation properties

方案编号	弹性模量/MPa	密度/(kg · m ⁻³)	泊松比
1	12	1 900	0.3
2	30	1 900	0.3
3	100	1 900	0.3
4	260	1 900	0.3

2.1 隧道基底刚度性质对隧道结构振动的影响

采用车辆-轨道-隧道-土层-建筑耦合系统动力学方法, 计算得到系统结构振动位移、速度及加速度响应, 选取隧道底部测点, 分析基底刚度性质对隧道结构振动的影响。图3为隧道底部竖向振动位移的时程曲线。

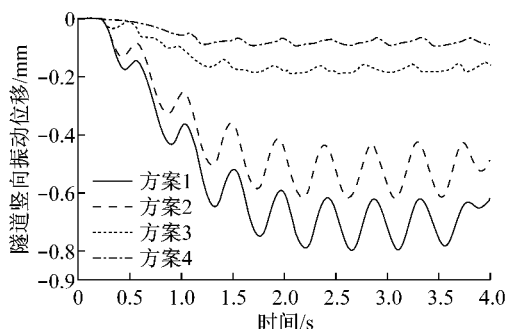


图3 隧道竖向振动位移时程曲线

Fig.3 Time history of tunnel vertical displacement

从图3可以看出, 测点处隧道振动位移由两部分组成: 在列车荷载作用下隧道的下沉位移和在周期性轮轨力作用下的波动位移。随着列车运行, 测点处隧道结构下沉位移逐渐增加, 在运行约2.0 s后达

到相对稳定状态,该部分隧道位移在列车及隧道结构相同的情况下,仅由隧道基底性质决定,表现为稳定后的下沉位移随基底弹性模量增加而减小,中加固及强加固方案(方案 3 和方案 4)的峰值远小于弱加固和不加固方案(方案 2 和方案 1). 而对于波动位移,其振动周期受到列车结构的影响在 4 种加固方案下均不发生变化. 波动位移振幅在不加固和弱加固时较大,在中加固和强加固时很小,其中振幅在弱加固时最大,表明隧道波动位移振幅与基底刚度之间并没有严格的相关性,对于特定的基底刚度,隧道波动位移振幅可能会被放大. 图 4 为不同隧道基底刚度下隧道竖向振动位移中下沉位移和波动位移情况. 方案 1~4 的峰值分别为 0.670,0.521,0.170,0.080,振幅分别为 0.196,0.197,0.036,0.020.

隧道振动位移与其振动速度有着直接的关系,为进一步理解基底刚度对隧道振动位移的影响,现

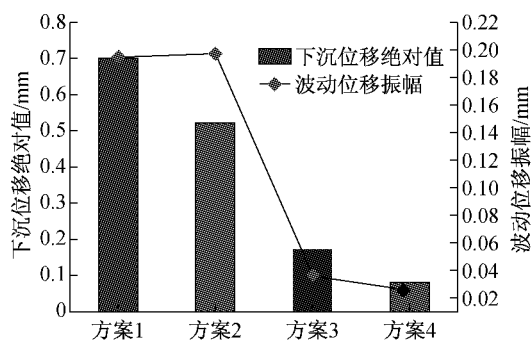


图 4 不同隧道基底刚度下隧道振动位移中下沉位移和波动位移振幅

Fig.4 Subsidence displacement and oscillation displacement of tunnel with different reinforced foundation stiffness

对该测点隧道振动速度进行分析. 图 5—8 为在不同的基底刚度下,隧道测点处竖向振动速度的时程曲线.

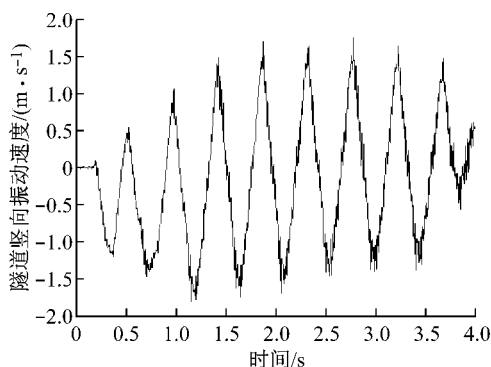


图 5 方案 1(不加固)隧道竖向振动速度时程曲线
Fig.5 Time history of tunnel vertical velocity in Project 1(non-reinforcement)

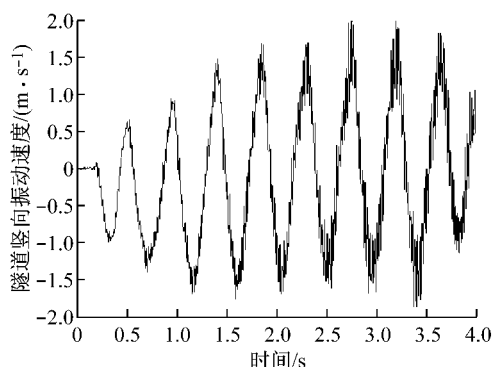


图 6 方案 2(弱加固)隧道竖向振动速度时程曲线
Fig.6 Time history of tunnel vertical velocity in Project 2(weak-reinforcement)

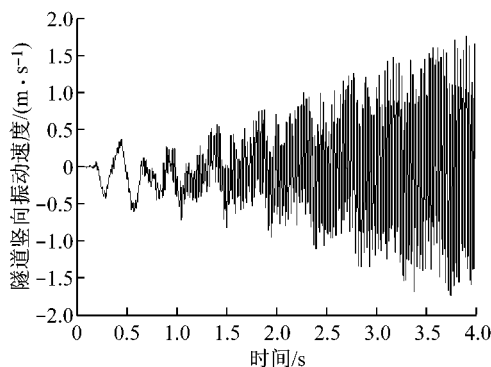


图 7 方案 3(中加固)隧道竖向振动速度时程曲线
Fig.7 Time history of tunnel vertical velocity in Project 3(medium-reinforcement)

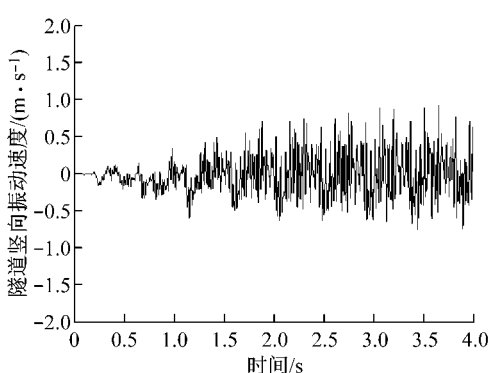


图 8 方案 4(强加固)隧道竖向振动速度时程曲线
Fig.8 Time history of tunnel vertical velocity in Project 4(strengthened-reinforcement)

由图 5—8 可知,隧道的竖向振动速度时程曲线可以分为两种类型. 第一类为不加固及弱加固情况,

该类型速度时程曲线有相对清晰的循环特征,相对稳定的振动周期,该两种方案基底刚度较小,抵抗隧

道弹性变形的能力差,速度突变较小,具体体现在时程曲线相对光滑,毛刺较少,速度在时间上得到一定积累,由图5和图6可知,在列车行进的初始阶段,向下的速度积累多于向上速度,隧道振动位移以向下为主,形成隧道下沉位移;随着列车的行进,向下及向上的振动速度得到动态平衡,但是在时程上相差半个周期,形成隧道波动位移。第二类为中加固和强加固情况,该类型隧道振动速度没有明显循环特征,两种加固方案的基底刚度大,具有较强的抵抗隧道位移的能力,由图7和图8可知,在列车行进的初始阶段(特别是在2 s以前),方向向下的振动速度略大于向上的振动速度,导致在中加固和强加固方案中隧道下沉位移较小,而在列车运行2 s后隧道振动速度只有模糊的周期特征,突变非常大,导致速度的积累较小,隧道波动位移并不明显。

基底刚度变化直接引起基底本身的固有频率改变,导致隧道振动在不同频段范围内的振动响应产生变化,为寻求基底刚度对隧道振动影响的敏感频率,现对隧道测点处竖向加速度三分之一倍频程振级进行分析,采样频率为200 Hz,隧道竖向加速度三分之一倍频程振级随中心频率变化如图9所示。

由图9可知,在5~80 Hz范围内,隧道基底刚度变化对隧道竖向加速度三分之一倍频程振级影响较小,而在1~5 Hz范围内,基底刚度对于隧道竖向加速度三分之一倍频程振级有较大影响,中加固和强加固方案在低频范围内的振级明显小于弱加固和不加固方案。可知隧道基底刚度对隧道竖向振动影响的敏感频率位于低频范围,而隧道结构为轨道交通引发环境振动的振源,那么在振源处减小低频振动对于减小隧道对周边环境振动影响有着重要的作用。

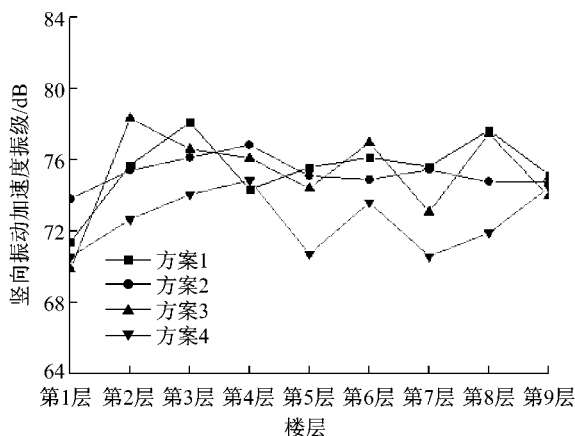
图10 建筑物楼层竖向振动 V_L 振级

Fig.10 The vertical vibration level of building

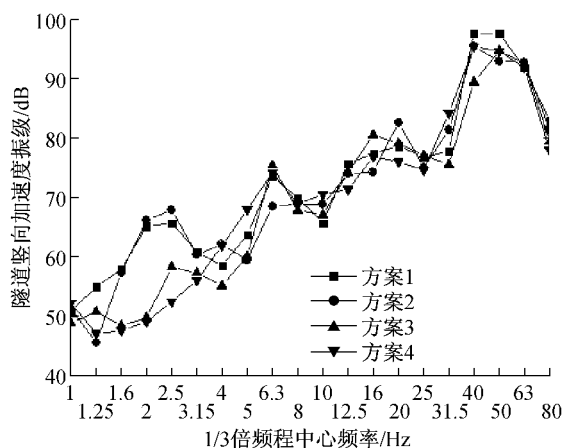


图9 隧道竖向加速度三分之一倍频程振级

Fig.9 One-third octave vibration level of tunnel vertical acceleration

2.2 隧道基底刚度性质对建筑物振动的影响

隧道结构振动经过土体的滤波和衰减作用向周边传播,引起隧道上部建筑物结构振动。建筑物根据其使用功能和结构设计不同,对于振动有不同的控制标准。所以研究隧道基底刚度性质对共建建筑物结构振动的影响对于下穿隧道选择合适基底及进行必要的基底加固具有重要的意义。

选取建筑物高层结构区相同跨度不同楼层的测点分析其水平振动和竖向振动的响应,选取的指标为加速度振级 V_L , dB。

$$V_L = 20\lg(a_{\text{rms}}/a_0)$$

式中, $a_0 = 1 \times 10^{-6}$, 为基准加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; a_{rms} 为加速度的有效值, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

图10及图11分别为建筑物楼层竖向和水平向振动 V_L 振级图。

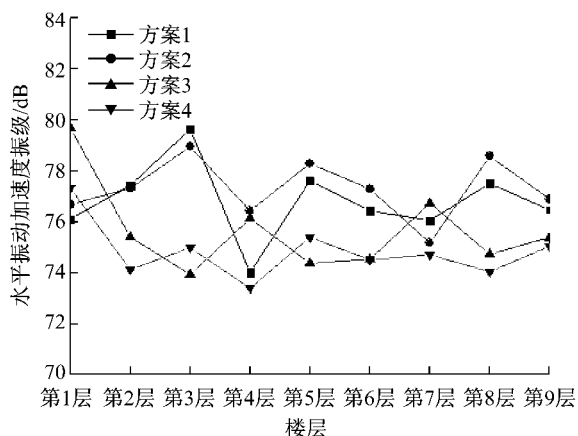
图11 建筑物楼层水平振动 V_L 振级

Fig.11 The horizontal vibration level of building

由图 10 和图 11 可知,单一测点处竖向振动随楼层的变化并不是呈现单纯的增大或减小,竖向和水平向振动也没有相同的变化趋势,这一结果与文献[12]的规律相同.对于竖向振动,强加固方案 4 加速度振级明显小于其他三种方案,基底刚度对建筑物结构振动有较大影响(约 5~10 dB),但在部分楼层竖向振动与基底刚度并没有严格的相关性.对于横向振动,中加固和强加固方案的加速度振级总体

上低于弱加固和不加固方案,但是部分楼层(第 4 层和第 7 层)规律并不一致.关于楼层竖向和水平向振动加速度振级随基底刚度变化的研究表明,基底刚度对于建筑结构振动有较大影响,但是对于特定的建筑结构,基底刚度参数选取必须进行严格的论证.

为进一步详细研究基底刚度对于楼层振动加速度的影响,选取第三层中测点数据进行其振动加速度的频谱分析,如图 12 及图 13 所示.

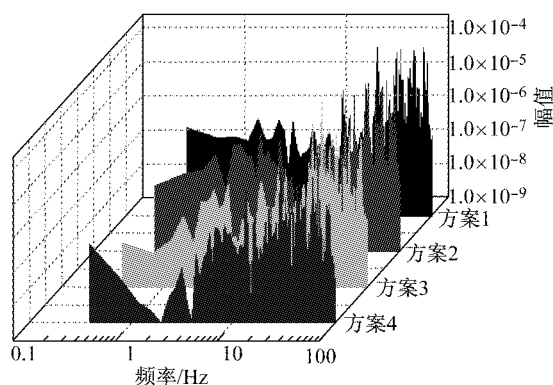


图 12 建筑物楼层竖向振动加速度功率谱

Fig. 12 The power spectrum of floor vertical acceleration

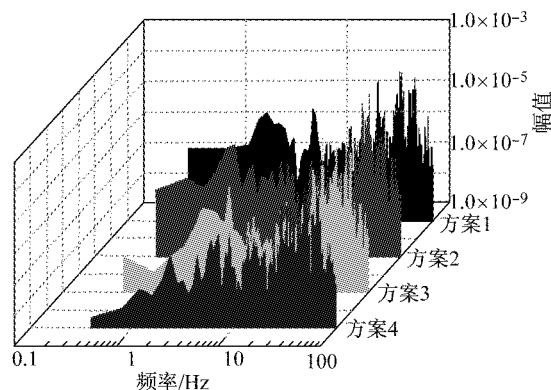


图 13 建筑物楼层水平向振动加速度功率谱

Fig. 13 The power spectrum of floor horizontal acceleration

由图 12 和图 13 可知,隧道振动引起建筑物结构的水平向和竖向振动频率分布较为复杂.基底刚度对于结构 5~100 Hz 频率范围的振动影响较小,而对于 0.1~5 Hz 频率范围的振动影响较大.建筑结构的自振频率较低,其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

较大影响这一规律使用于结构振动避开自振频率有着重要的意义.

为详细研究基底刚度对于结构低频振动的影响程度,选取第三层中测点数据进行其振动加速度的三分之一倍频程振级分析,图 14 和图 15 为建筑物楼层竖向和水平向三分之一倍频程振级图.

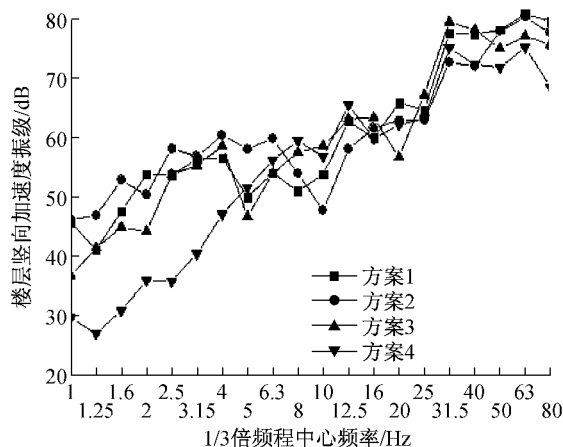


图 14 建筑物楼层竖向加速度三分之一倍频程振级

Fig. 14 One-third octave vibration level of building vertical acceleration

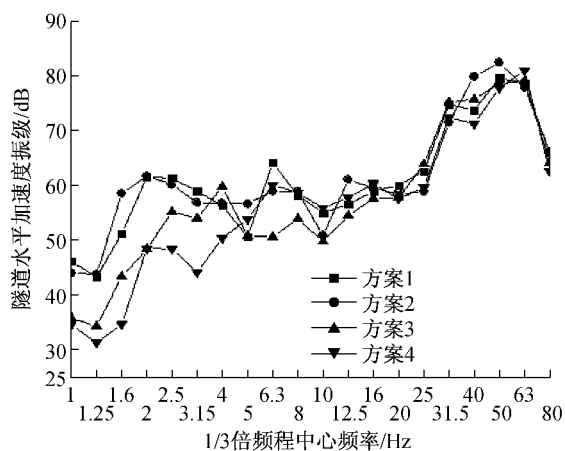


图 15 建筑物楼层水平加速度三分之一倍频程振级

Fig. 15 One-third octave vibration level of building horizontal acceleration

由图 14 及图 15 可知,在 1~5 Hz 的低频范围内,基底刚度对于建筑结构竖向振动加速度级的影

响可达 10~15 dB,而对于水平向振动的影响达 5~10 dB,对于 5~100 Hz 的频率范围,基底刚度的影

响则较小. 强加固方案的低频范围内竖向和水平向振级均小于其他方案, 但以此并不能得出基底刚度增大则楼层低频振动减弱的结论. 由于建筑结构的复杂性以及低频振动的危害性^[12], 对于特定的建筑结构, 必须进行详细的隧道基底加固刚度参数选择研究.

3 结论

通过对轨道交通隧道基底刚度对共建结构的振动影响研究, 得到如下结论:

(1) 将列车运行引起的隧道振动位移分为下沉位移和波动位移两部分, 基底刚度越大下沉位移越小, 但波动位移振幅与基底刚度没有严格的相关性.

(2) 基底刚度越大, 隧道振动速度突变越大, 周期性越不明显. 基底刚度对于隧道加速度振级影响的敏感频率范围位于 1~5 Hz 的低频段.

(3) 基底刚度对于建筑物建筑结构竖向和水平向振动有较大的影响, 主要影响 1~5 Hz 的低频段, 对于竖向振动影响可达 10~15 dB, 水平向振动影响可达 5~10 dB, 但随着基底刚度增加, 建筑振动并不是全部减弱, 对于特定的建筑结构, 必须进行细致的隧道基底刚度参数选取的研究.

参考文献:

- [1] 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: 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: 33.
- [2] 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: 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: 8.
- [3] 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, 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, 11: 134.
- [4] Robert Hildebrand. Effect of soil stabilization on audible band railway ground vibration [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(5): 411.
- [5] 施成华, 雷明峰, 彭立敏, 等. 砂层隧道列车振动响应与地基累积变形研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(7): 118.
SHI Chenghua, LEI Mingfeng, PENG Limin, et al. Study on train vibration response and cumulative deformation of sand layers of the tunnel [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(7): 118.
- [6] 薛富春, 马建林, 颜利平, 等. 客运专线富水黄土隧道隧底振动特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2010, 2: 202.
XUE Fuchun, MA Jianlin, YAN Liping, et al. Vibration characteristics test for a water-rich loess tunnel of a passenger dedicated line [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 2: 202.
- [7] 张柯. 地铁行车荷载作用下黄土地层的振动响应和沉降[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
ZHANG Ke. Vibration and settlement of Loess due to subway moving loads [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2011.
- [8] 张波, 李术才, 张敦福, 等. 岩石介质中地铁列车运行引起的环境振动响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, S1: 3341.
ZHANG Bo, LI Shucai, ZHANG Dunfu, et al. Research on rock environments vibration response induced by metro trains in rock media [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, S1: 3341.
- [9] 陈松洁. 软弱地层中水下高速铁路盾构隧道列车振动响应分析[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
CHEN Songjie. Dynamic response of the high-speed railway tunnel underwater by the train load [D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [10] 孙晓静. 地铁列车振动对环境影响的预测研究及减振措施分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
SUN Xiaojing. Prediction of environment vibrations induced by metro trains and mitigation measures analysis [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [11] 翟婉明. 车辆轨道耦合动力学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2007.
ZHAI Wanming. Vehicle-track coupling dynamics[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007.
- [12] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
XIA He. Traffic induced environmental vibration and controls [M]. Beijing: Science Press, 2010.