

文章编号:1006-1355(2015)06-0127-04+151

多孔地铁隧道交叠运行环境振动影响数值分析

邬玉斌, 曾钦娥, 宋瑞祥, 刘金雨, 何 蕾, 吴 丹

(北京市劳动保护科学研究所, 北京 100054)

摘要:随着城市地铁线网的逐渐加密,地铁线路布局越发复杂多样,多条地铁线路近距离并行或交叠运行情况越来越多,由此产生的地铁环境振动影响也更为恶劣和复杂。建立多孔隧道不同列车运行状态下环境振动影响三维动力有限元模型,计算结果同相关标准规范中的经验公式预测结果进行对比,两者吻合较好,在此基础上系统分析隧道孔数、隧道空间位置关系及列车不同交汇情况对地表振动传播规律的影响。仿真结果表明:上部隧道孔洞对下部隧道地铁列车运行引起的地表振动传播规律影响较大,且对隧道孔洞近场地表振动具有一定的遮挡作用;上下隧道水平间距相比垂向间距影响更为显著;不同列车运行状态组合方式对地表振动影响差异较大。研究结论可为地铁环境振动影响评价、地铁线路设计等提供参考依据。

关键字:振动与波;地铁交叠隧道;环境振动;传播规律;数值仿真

中图分类号:T112.3;TU311.3

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2015.06.028

Numerical Analysis of Environmental Vibration Induced by Stacked Subway Tunnels Operation

WU Yu-bin, ZENG Qin-e, SONG Rui-xiang, LIU Jin-yu,
HE Lei, WU Dan

(Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 10054, China)

Abstract: With the rapid development of subway construction, the distribution of subway tunnels is becoming more and more complex, such as parallel tunnels with close intervals, stacked tunnels and crossing tunnels. These subways can induce serious environment vibration. In this paper, 3D stacked tunnel models with different train operation conditions were built. The numerical calculation results were found to be in good agreement with those from the empirical formulae provided in some standards. On this basis, the influence of the number of the tunnel, the spatial positions of the tunnel and different train operation conditions on the environmental vibration was analyzed systematically. The simulation results show that the upper tunnel has a great influence on the propagation rules of the ground vibration induced by the lower tunnel in the train operation condition, and has a shelter effect to the near-field ground surface vibration of the tunnel. The horizontal spacing between the tunnels has greater influence than the vertical spacing between the tunnels. Different train operation combination has different effect on the ground vibration. These conclusions have provided some references for the assessment of subway environment vibration and subway design.

Key words: vibration and wave; stacked subway tunnels; environmental vibration; propagation rule; numerical simulation

地铁作为一种快速、方便的交通方式,能够有效缓解交通压力,近年来随着交通设施需求的增加,

地铁网络不断复杂化,在地铁纵横网络中不可避免的出现多条隧道交叉重叠现象,如北京地铁新机场线和19号线长达18.8 km的上下叠落共走廊敷设线路正在规划建设中。国内外对交叠隧道的设计、施工做了比较深入的研究^[1-7],但对交叠隧道环境振动传播规律的研究较少。多孔交叉重叠地铁隧道近距离同时存在,一方面影响了振动传播路径,另一方面地铁同时运行增加了多振源叠加综合振动影响的情况,由此引起的环境振动影响更为复杂和恶劣。

收稿日期:2015-03-11

基金项目:北京市财政项目(高振动环境区域建筑振动和噪声测试能力建设 PXM2014_178304_000005_00132840)

通讯作者:曾钦娥(1990-),女,江西宜春,硕士,主要研究方向:环境振动与噪声。

E-mail: 250295064@qq.com

运用有限元软件 ANSYS 建立不同地铁列车运行状态、不同隧道孔洞及其空间位置关系的地铁多孔隧道三维动力有限元模型,基于轨道不平顺引起的惯性力和轴重拟合了列车轮轨作用力并作为计算模型激励源,采用粘弹性边界条件消除模型边界反射振动波的影响,有限元模型计算结果与相关标准规范给定的地铁振动影响经验公式预测结果进行对比分析,验证模型计算精度,在此基础上分别研究交叠隧道孔数、隧道空间位置关系以及列车的不同交汇情况对地铁振动传播规律的影响,本文研究结论可为地铁环境振动影响评价、地铁线路设计等提供参考依据。

2 多孔交叠地铁隧道计算模型

2.1 轮轨作用力模拟

列车运行时,由于车辆速度和轨道结构类型及状态变化的随机性使得轮轨间的荷载具有随机性,我们通常将其简化为静荷载和动荷载^[8],静荷载为车轴荷载,动荷载为轨道随机不平顺引起的惯性力,则移动列车对钢轨的作用力为^[9]

$$F(t) = -\sum_{i=1}^N (F_i + m_w \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}) \delta(x - vt - a_i) \quad (1)$$

式中 $F(t)$ 为列车对钢轨作用力; F_i 为 1/2 的第 i 个轴重; m_w 为车轮质量; $\eta(x=Vt)$ 为轨道随机不平顺值; δ 为 Dirac 函数; v 为列车运行速度; a_i 为 $t=0$ 时第 i 个轮对距原点的距离。

采用地铁 B 型车参数,假定列车运行速度为 60 km/h,计算得到轮轨作用力时程曲线,如图 1 所示,并将计算所得的轮轨作用力施加于有限元模型中的钢轨上,进行结构动力响应时程分析。

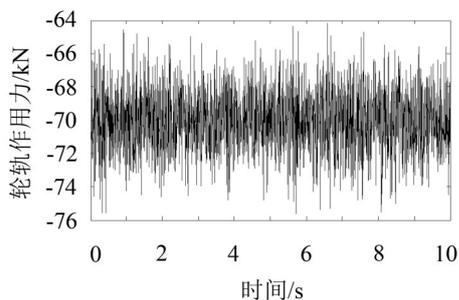
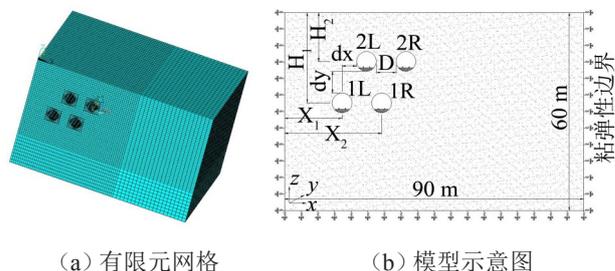


图1 轮轨力时程曲线

2.2 计算工况及模型参数

以四孔交叠地铁隧道为例建立了三维有限元模型,计算模型包括钢轨、道床、隧道和岩土,计算模型的长宽高分别为 65 m×90 m×60 m,并将土层简化为均匀介质,隧道外直径为 6 m,隧道壁厚为 0.3 m,采用钢筋混凝土结构,轨道为整体道床,采用 60 kg/m 钢轨,有限元模型如图 2(a)所示。为方便描述,将 1

L 表示下方线路左线,1 R 表示下方线路右线,2 L 表示上方线路左线,2 R 表示上方线路右线,如图 2(b)所示。各种材料物理参数见表 1,表 2 给出了各种计算工况及地铁隧道位置关系。



(a) 有限元网格 (b) 模型示意图

图2 四孔交叠隧道有限元模型及示意图

表1 材料物理参数

	弹性模量/pa	密度/(kg/m ³)	泊松比
土	5.04×10^8	2 020	0.35
隧道壁	3.25×10^{10}	2 500	0.2
道床	3.25×10^{10}	2 500	0.2
钢轨	2.1×10^{11}	7 800	0.3

2.3 人工边界条件

有限元模型采用能够同时模拟散射波辐射和地基弹性恢复性能的黏弹性,采用人工边界条件模拟半无限岩土体,即通过在人工截断的边界上设置连续分布的并联弹簧—阻尼器系统来等效模拟岩土体,其中弹簧元件的弹性系数 K_b 及粘性阻尼器的阻尼系数 C_b 的计算公式如下^[10]

$$K_b = \alpha \frac{G}{R} C_b = \rho \cdot c \quad (2)$$

式中 ρ 和 G 分别表示介质的质量密度和剪切模量; R 表示波源至人工边界的距离; c 表示介质中的波速,法向人工边界波速取纵波波速,切向人工边界波速取剪切波波速;参数 α 根据人工边界的类型及设置方向取值。

2.4 拾振点布置

为分析地表振动随距离的衰减规律,在地表距 1L 隧道中心线不同水平距离位置处选取了 15 个拾振点,对其竖向最大 Z 振级进行分析,各点至 1L 隧道中心线距离分别为 0 m、3 m、6 m、9 m、12 m、15 m、18 m、21 m、24 m、27 m、32 m、37 m、47 m、57 m、67 m,其平面位置如图 3 所示。

3 计算结果分析

3.1 地铁振动衰减规律计算结果及精度验证

基于大量现场实测数据统计分析,多部标准已经给出了常规地铁隧道地铁列车运行引起的地表振

表2 各计算工况

计算工况	影响因素分析	隧道孔数	下方隧道埋深(H ₁)	上下隧道横向间距(dx)	上下隧道垂向间距(dy)	加载位置
工况一	上方隧道存在对下方隧道列车运行振动传播的影响	2孔	-10 m	--	--	1 L
		4孔	-22 m	0 m	6 m	1 L
工况二	下方隧道存在对上方隧道列车运行振动传播的影响	2孔	-22 m	--	--	2 L
		4孔	-22 m	0 m	6 m	2 L
		4孔	-22 m	0 m	6 m	1 L
工况三	上下方隧道横向间距对振动传播的影响	4孔	-22 m	6 m	6 m	1 L
		4孔	-22 m	12 m	6 m	1 L
		4孔	-22 m	18 m	6 m	1 L
工况四	上下方隧道垂向间距对振动传播的影响	4孔	-22 m	6 m	6 m	1 L
		4孔	-28 m	6 m	12 m	1 L
		4孔	-34 m	6 m	18 m	1 L
		4孔	-22 m	6 m	6 m	1 L
工况五	不同列车运行组合方式的振动影响	4孔	-22 m	6 m	6 m	1 L、1 R
		4孔	-22 m	6 m	6 m	1 L、1 R 2 L、2 R

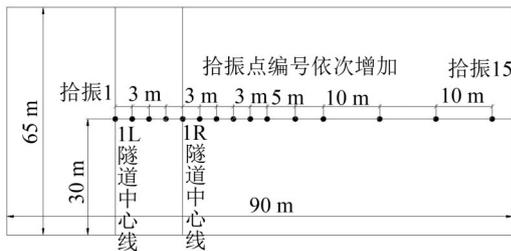


图3 拾振点位置平面布置示意图

动随水平距离的衰减规律,如《环境影响评价技术导则—城市轨道交通》(HJ453-2008)和《地铁噪声与振动控制规范》(DB11/T-838 2011)都给出了各自的经验预测公式,本文分别建立了常见双孔地铁隧道结构形式和将来可能出现的上下两层四孔隧道结构形式(模型具体参数见表2工况一),计算不同水平距离地表加速度振级衰减,计算结果与各标准经验预测结果进行了对比分析,如图4所示。

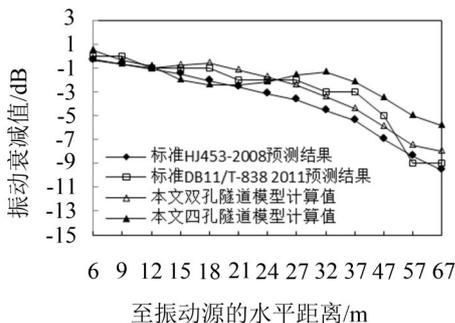


图4 本文模型计算结果与标准经验预测结果对比图

从图4可以看出,本文建立的双孔隧道数值模

型计算的地表振动衰减趋势同两部标准经验预测公式计算结果基本相同,且计算结果介于标准HJ453-2008和标准DB11/T-838 2011给定经验公式预测结果之间,证明本文数值计算方法具有一定的可信度,可用于多孔地铁隧道地表振动影响分析。对比结果同时表明四孔地铁隧道模型计算的地表振动衰减规律有别于双孔隧道模型计算结果和经验预测公式计算结果,四孔地铁隧道模型远场地表振动衰减量比较小。

3.2 隧道孔数的影响

为分析周围隧道孔洞的存在对地表振动传播规律的影响,分别计算分析了地铁正上方新增隧道孔洞和正下方新增隧道孔洞对地表振动传播规律的影响,具体参数见表2工况一和工况二,地表各拾振点竖向加速度最大Z振级如图5—图6所示。

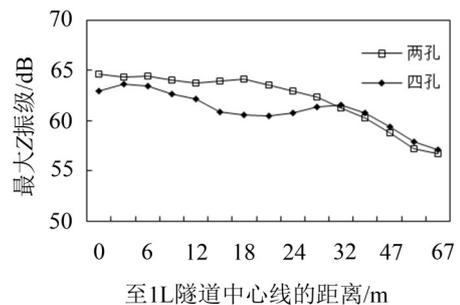


图5 地铁正上方隧道孔洞对地表振动影响的计算结果

从图5可以看出,在地铁正上方新增隧道孔洞的工况下,在近场区域(30 m以内),两孔隧道模型

计算的地表振动幅值大于四孔隧道模型计算结果；在远场区域(30 m以外)，两者的衰减趋势大致相同，但四孔隧道模型计算地表振动的幅值稍大于两孔隧道计算模型。计算结果说明地铁正上方隧道孔洞使地铁振动传播途径发生了改变，孔洞的存在对近场地表振动具有一定的遮挡作用，但随距离的增加，遮挡作用逐渐消失，甚至出现较小的放大作用。

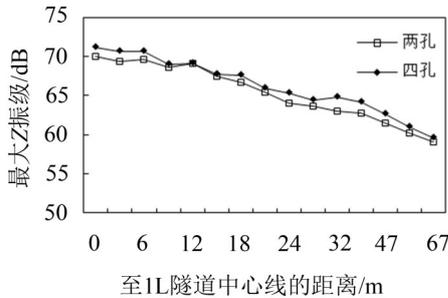


图6 地铁正下方隧道孔洞对地表振动影响的计算结果

从图6可以看出，在已建隧道下方增加隧道的工况下，两者的衰减趋势一致，四孔的最大Z振级幅值略大，说明下方隧道的建立对振动的传播具有一定的反射作用但影响不大。

3.3 隧道相对位置的影响

隧道空间相对位置在一定程度上影响地铁振动的传播途径，研究隧道相对位置变化(水平间距和垂向间距)对地表振动传播规律的影响。计算工况如下：

(1) 四孔隧道埋深一定，上方隧道相对下方隧道分别水平向右偏移0 m、6 m、12 m、18 m(具体参数见表2工况三)；

(2) 下方隧道埋深一定，上方隧道横向偏离下方已建隧道6 m，上方隧道的埋深相对下方隧道的埋深分别向上偏移6 m、12 m、18 m(具体参数见表2工况四)。各工况下拾振点竖向加速度最大Z振级计算结果如图7—图8。

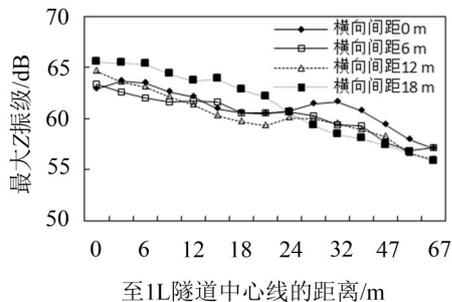


图7 上、下隧道水平间距对地表振动影响的计算结果

从图7可以看出，在振源近场地表区域(与振源水平距离24 m以内)，上方隧道与下方隧道水平距离越大，地表最大Z振级越大，在振源远场地表区域

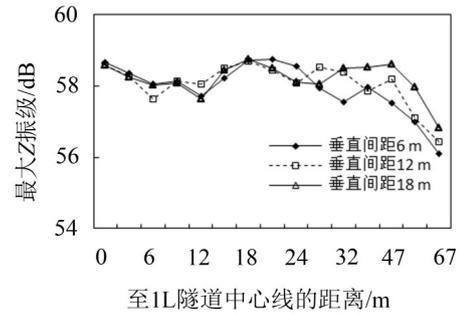


图8 上下隧道垂向间距对地表振动影响的计算结果

(距振源24 m外)，上方隧道与下方隧道水平距离越大，地表最大Z振级反而越小。

从图8可以看出，改变上方隧道的埋深，即改变隧道垂向间距时，在振源近场区域(至振源水平距离24 m内)，三种情况计算结果相差不大；而在振源远场区域(至振源水平距离24 m外)，上下隧道垂向间距越大，地表最大Z振级计算值越大。

3.4 不同列车交汇情况的影响

多孔交叠地铁隧道近距离同时存在时，列车交汇情况较多，且有多种不同交汇组合方式，为简化分析，按以下三种情况进行分析：

- (1) 下方隧道左孔(1 L)有列车运行；
- (2) 下方两孔(1 L、2 L)隧道有列车运行；
- (3) 四孔(1 L、1 R、2 L、2 R)隧道同时有列车运行(各参数具体见表2工况五)。计算结果如图9所示。

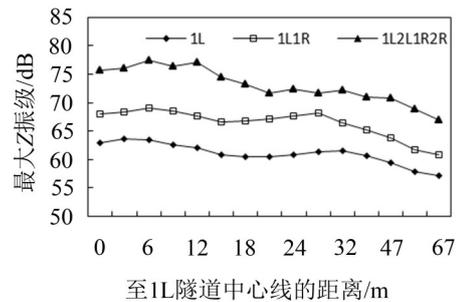


图9 不同列车运行组合方式计算结果

从图9可以看出，不同列车运行组合方式对地表振动影响差异较大，同时运行列车数量越多，地表最大Z振级计算值越大，因此在进行环境振动影响评价时应考虑多振源叠加的影响。

4 结语

通过多种计算工况对比分析，可以得到以下结论：

- (1) 计算结果表明两孔隧道数值模型在地表不同水平距离处的振动计算值与各标准给定的经验

(下转第151页)