文章编号:1005-0523(2013)01-0026-06

地铁引起大地振动的有限元分析

涂勤明,雷晓燕

(华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心,江西 南昌 330013)

摘要:运用大型有限元软件ANSYS建立了地铁隧道动力分析模型,分析了带桩基础的隧道结构、隧道埋深及大地参数对地铁引起大地振动响应的影响。计算结果表明:底部带桩基础的隧道结构对地面振动有明显的减振效果,桩基础越长,减振效果越好;隧道埋深对地铁引起大地振动有较大影响,地面振动强度随埋深的增加而减小;大地土层参数对地面振动的影响与激振频率有关。

关键词:地铁;大地振动;隧道埋深;振动加速度

中图分类号:U491.9+3 **文献标志码**:A

近年来,我国城市轨道交通迅速发展,国内已经有34个城市规划了地铁建设,在建线路2 000多公里。地铁以其"方便快捷、安全舒适、客运量大、不占地面空间"等优势受到人们青睐的同时,也带来了大地和环境振动问题。过大的大地振动会影响人们的正常生活和工作,也会影响精密仪器的正常运行,国际上已经把大地振动列为七大环境公害之一。所以,对地铁引起大地振动的减振措施研究非常必要。国内外学者已经做过大量的有关地铁引起大地振动的研究和测试工作,对减振措施也做过许多相应的探索和试验,目前公认有效并已用于实际工程中的措施有:钢弹簧浮置板轨道、弹性扣件、地屏障、波阻块等[1]。本文就加桩基础的隧道结构、隧道埋深及大地土层参数对地铁引起大地振动响应的影响作简要分析。

1 带桩基础隧道结构对地面振动的影响

1.1 隧道结构形式及分析方法

隧道断面形式为矩形,如图1所示,为双线铁路隧道,洞口尺寸为10 m×10 m。隧道衬砌为C30混凝土,厚度是0.8 m,地铁埋深15 m。现考虑在隧道底部加两根桩基础,比较设置不同长度的桩基础对地表振动的影响。桩基础材料与衬砌相同,直径为1.2 m,长度 H 选用0,5,10,15,20 m共5种情况。在地表处,从隧道中心线开始向右侧每隔5 m设置一个振动响应输出点,共设21个,比较5种不同的桩长对地表离隧道中心线100 m范围内的振动影响。

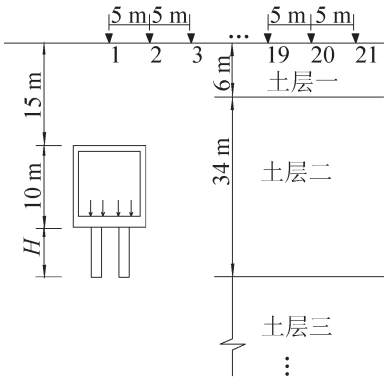


图1 隧道断面形式及地表响应点设置
Fig.1 Tunnel cross-section and surface responding points distribution

1.2 有限元计算模型

在大型有限元软件ANSYS中建立平面模型,按平面应变问题计算。设隧道衬砌、桩和土层均为均匀弹性变形体[2],均采用PLANE42号单元模拟,衬砌和桩的单元网格尺寸取0.2 m×0.2 m,土层单元网格尺寸为1 m×1 m,土层与隧道结构之间采用加密单元的方法进行过渡[3]。各材料参数如表1所示。

收稿日期:2012-12-18

基金项目:国家自然科学基金项目(U1134107);江西省优势科技创新团队计划项目[2010]210

作者简介:涂勤明(1988—),男,硕士研究生,研究方向为高速轨道动力学。

中国知网 https://www.cnki.net

表1　材料计算参数

Tab.1　Material parameters

介质	名称	厚度/m	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/MPa	泊松比
土层一	人工填土	6	1 800	160	0.38
土层二	粘性土	34	1 900	251	0.38
土层三	硬粘土	45	2 000	510	0.35
土层三	微风化岩石	50	2 100	850	0.33
衬砌	C30混凝土	0.8	2 500	30 000	0.25
桩基础	C30混凝土	—	2 500	30 000	0.25

为了减少计算量，在ANSYS中建立隧道和土层的右半边模型，模型宽180 m，高135 m，共有4层土。模型左侧采用对称边界，右侧及底部边界采用刘晶波提出的等效一致粘弹性人工边界[4]。在隧道内基床上施加简谐荷载 $P_0\sin(2\pi ft)$（f 为简谐荷载的频率，P_0 为简谐荷载的振幅，取50 kN，t 为荷载作用时间），计算时间为1 s，时间步长为0.002 s，进行瞬态动力学分析。

1.3　振动响应结果分析

根据以往的实地测试和研究成果可知，地铁列车引起的大地振动以竖向振动为主[5-6]，故本文只计算21个测点的竖向振动响应。为了验证模型的正确性，先计算出在不加桩基础时21个地表测点的竖向振动加速度的变化规律，荷载频率为5 Hz，如图2所示。

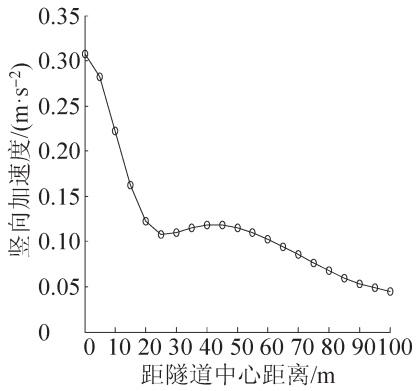


图2　H= 0 m时地表各点竖向振动加速度变化规律

Fig.2　The changing discipline of vertical vibration acceleration of ground surface responding points when the pile length H is 0 m

从图2中可以看出，随着离隧道中心距离增大，竖向振动加速度大致呈衰减趋势，且距隧道中心20 m内衰减很快，20 m之后衰减缓慢，在25~50 m范围形成一个振动放大区域。大量的实测数据和数值模拟都表明，地面的竖向振动加速度并不是随距离严格衰减的[7-8]，地面振动在25~50 m区域内形成放大区，因为弹性波在地表和基岩间的软土中传播时会发生反复反射和折射，这与地层条件、隧道埋深、激振频率、单一频率在土层中的传播特性等有关。因此，本文计算模型和方法均有可靠性。

1.4　荷载频率和桩长对地表振动的影响

由于列车荷载属于低频动荷载[9]（一般在100 Hz以内，主要集中在10 Hz以下），所以下面考虑荷载频率分别取2，5，10，20，30，40，50，60 Hz时，不同桩长对地面竖向振动加速度的影响。图3只列出其中5，20，40，60 Hz的情况。为了从数字上直观地说明桩基础的减振效果，表2列出了在不同频率下桩长 H= 20 m相对于 H= 0 m对地表竖向振动加速度的减小率。

从图3和表2中可以得出以下结论：

1）在各种频率下，桩基础均对地表振动有减振效果，且随着桩长的增加，地表的振动响应越小。

2）桩基础对地表的减振效果在距隧道中心线40 m范围内比较明显。桩长为20 m时，除2 Hz以外各频率下40 m范围内地表振动加速度都减少了30%以上，其中，对位于隧道中心线正上方的地表点的加速度减少率更是达到了59.52%。

3）桩基础对距隧道中心线50 m之外的地表的减振效果并不明显，但桩长为20 m时，加速度也有10%

中国知网　https://www.cnki.net

以上的减小率。

4）不同激振频率下的地表振动响应不同，但桩基础对地表的减振效率不会随着频率不同而发生很大变化。

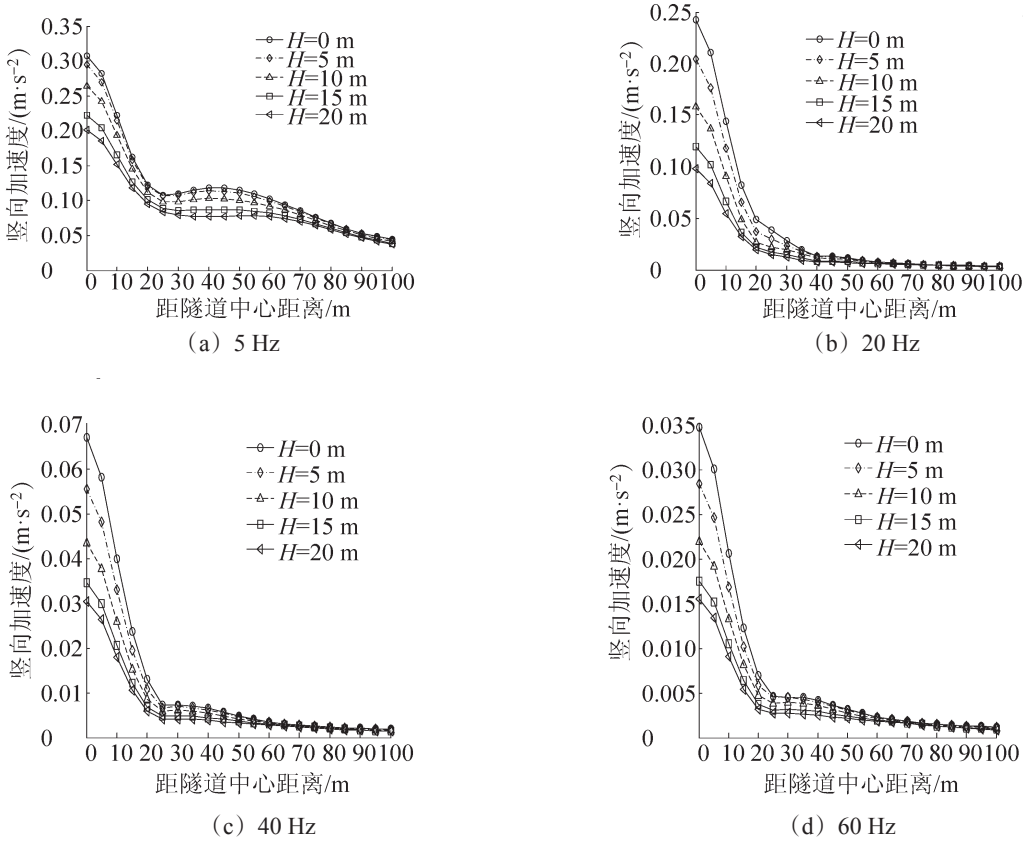


图3 不同激振频率下5种桩长的地表竖向振动加速度比较

Fig.3 The comparation of vertical vibration accelerations under different exciting frequencies and five-type pile lengths

表2 桩长 H= 20 m时地表振动的加速度减小率

Tab.2 The reduction ratio of ground surface vibration acceleration when pile length H is 20 m %

距离频率/Hz	0 m	20 m	40 m	60 m	80 m
2	38.87	26.57	19.73	22.73	23.06
5	34.47	21.64	34.83	25.02	12.89
10	50.98	69.92	47.19	9.05	22.38
20	59.52	60.01	40.81	21.75	14.57
30	55.24	53.89	40.72	20.79	14.47
40	54.66	55.28	40.84	20.29	14.62
50	55.00	55.36	40.30	19.99	14.67
60	55.21	54.37	40.05	19.83	14.70

2 不同隧道埋深对地铁引起大地振动的影响

隧道结构形式及土层参数同上例中不加桩基础的情形，考虑隧道埋深对地面振动的影响，并计算5种工况，比较隧道埋深 D 分别为10，15，20，25，30 m时地面的振动响应。用大型有限元软件ANSYS进行数值

中国知网 https://www.cnki.net

模拟，有限元模型尺寸、单元划分、分析方法等均与上例相同。

类似地，计算荷载频率分别取2，5，10，20，30，40，50，60 Hz时，不同隧道埋深对地面的竖向振动加速度影响，图4只列出其中5，20，40，60 Hz的情况。

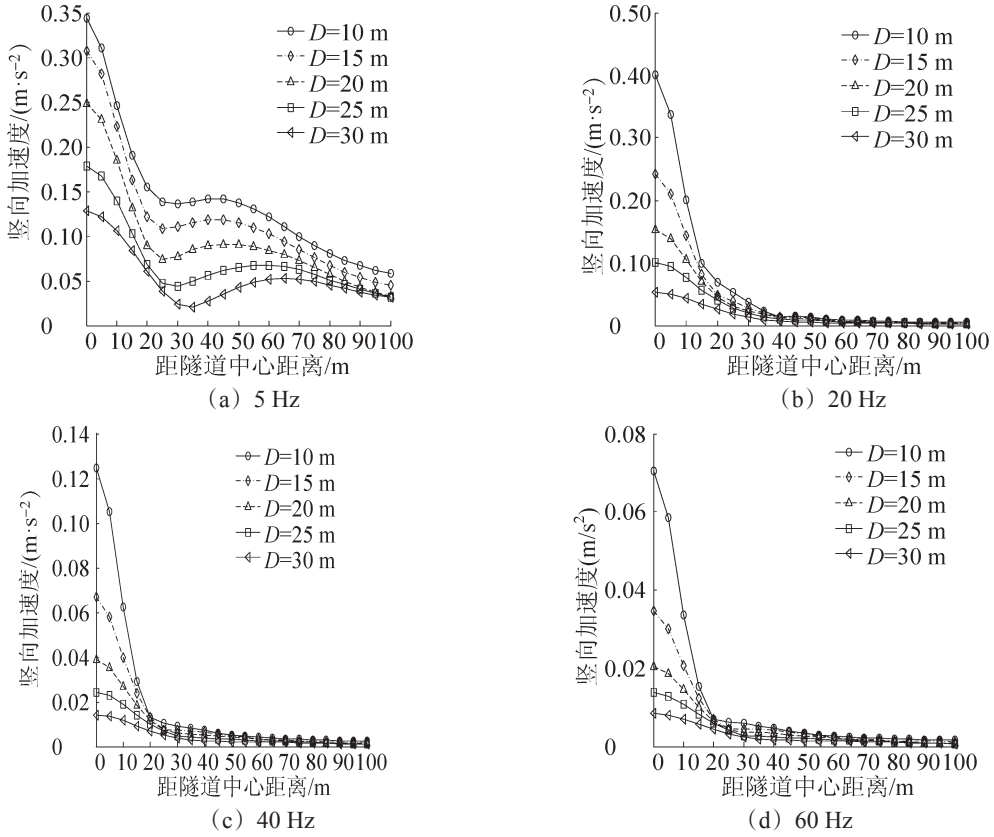


图4　不同激振频率下5种隧道埋深的地表竖向振动加速度比较

Fig.4　The comparation of vertical vibration accelerations under different exciting frequencies and five burial depths of tunnel

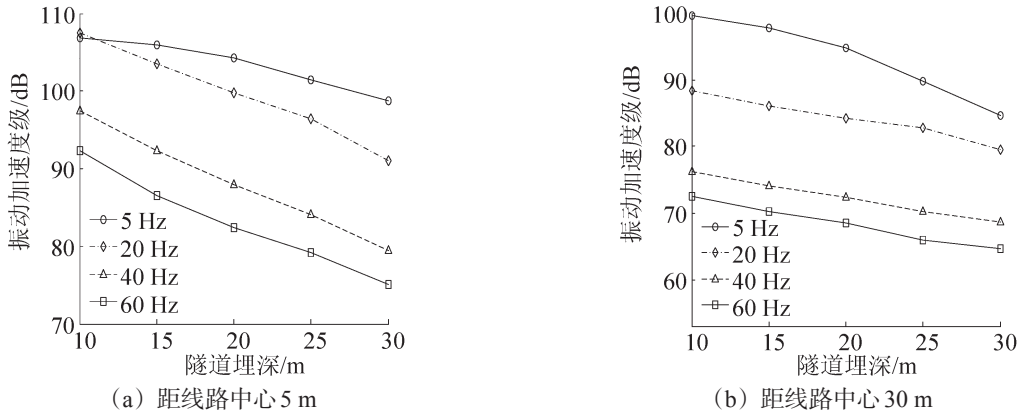


图5　振动加速度级随隧道埋深的变化规律

Fig.5　The changing discipline of vibration acceleration level with burial depth of tunnel

从有限元模型的计算结果可知，无论在何种频率下，隧道埋深对大地振动均有较大影响。隧道埋深越大，地面振动响应越小，在距离隧道中心30 m范围内，隧道埋深对地面振动的影响表现得尤为明显。为了直观起见，图5画出了距线路中心5 m和30 m处地面振动加速度级随隧道埋深的变化规律。

从图5中可看出，随隧道埋深的增加，振动加速度级的衰减规律近似线性。图5(a)中，埋深每增加1 m，

中国知网　https://www.cnki.net

振动加速度级约减少0.8～1.0 dB。图5(b)中,埋深每增加1 m,振动加速度级约减少0.4～0.6 dB。可见增大隧道埋深可有效地降低地面振动,且在离线路中心较近的区域效果更好。此结论与文献[2]中的结论完全相符。

3 大地参数对地面振动的影响

下面考虑改变隧道所在土层及隧道上方土层的力学参数对地表振动的影响。为便于分析,把土层简化为两层,第一层土层厚6 m(同上例),隧道所在土层为第二层,隧道埋深15 m,结构形式同上例中桩长$H=0$ m的情况,分析方法也与上例相同。以4倍的关系分别单独改变第一层土及第二层土的弹性模量(同时根据一般规律相应地改变密度和泊松比),分5种工况计算,如表3所示。

表3 各工况的大地土层弹性模量

Tab.3 The ground soil elastic modulus under different working conditions MPa

土层	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5
第一层	160	40	640	160	160
第二层	680	680	680	170	2 720

类似地,计算荷载频率分别取2,5,10,20,30,40,50,60 Hz时,各工况的地表竖向振动加速度。图6只列出其中2,10,30,60 Hz的情况,分别比较工况1,2,3和工况1,4,5的计算结果。

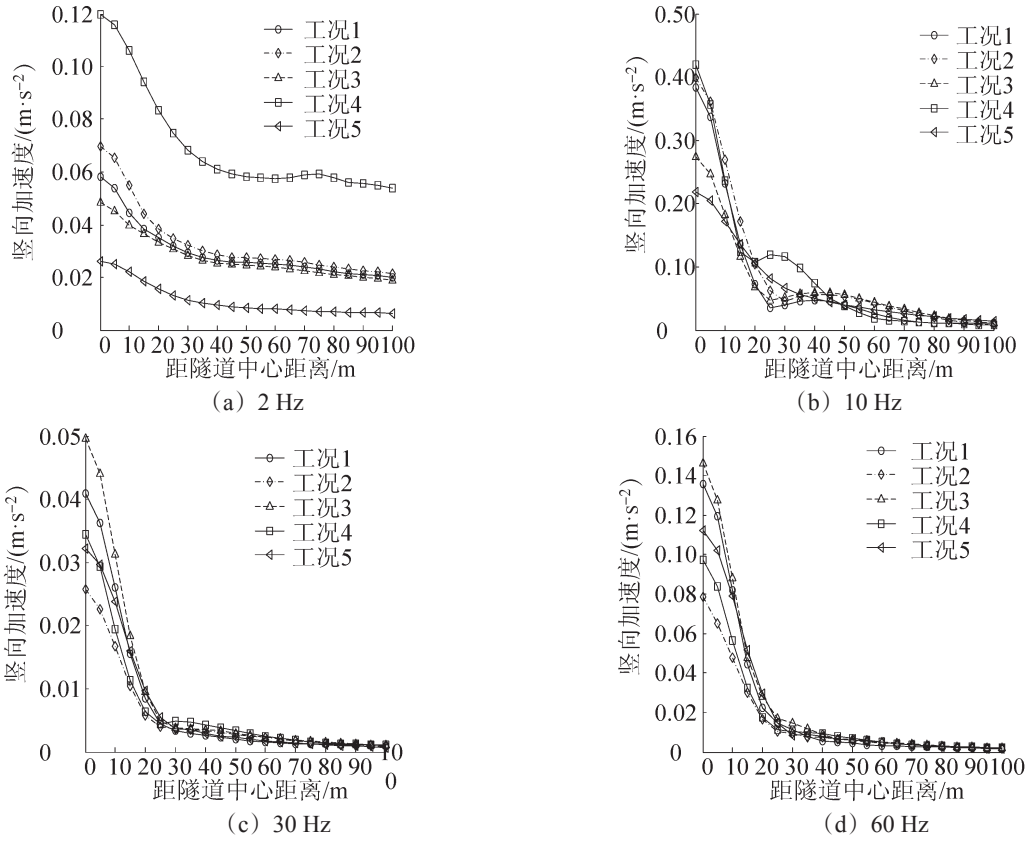


图6 不同激振频率下各工况的地表竖向振动加速度比较

Fig.6 The comparation of vertical vibration accelerations under different exciting frequencies and working conditions

从计算结果中可以看出:

1) 地铁列车引起的大地振动分布特性与土层地质条件和振动频率有关。

2) 在频率小于10 Hz范围内,随着第一层土弹性模量的增大地表振动有所减小,见图6(a)(b)。然而

中国知网 https://www.cnki.net

在频率大于10 Hz的范围内，随着第一层土弹性模量的减小地表振动也呈减小趋势，见图6(c)(d)，说明对于在硬质土层中开挖的隧道，较软的隧道覆盖土层能起到一定的减振作用。

3）在频率小于10 Hz范围内，随着第二层土弹性模量的增大地表振动有所减小，见图6(a)(b)。然而在频率大于10 Hz的范围内，随着第二层土弹性模量的增大地表振动变化相差不大，见图6(c)(d)，这说明对于在硬质土层中开挖的隧道，硬质土层有良好的传递振动波的特性。

4　结论

1）在隧道底部加桩基础对地表振动有较好减振效果，在实际工程中的一些特殊地段，可以作为减振措施的一种参考。

2）增大隧道埋深可有效地降低地铁引起的大地振动，且在距线路中心较近区域效果更好。

3）减小隧道上层土的弹性模量对频率大于10 Hz的地表振动有较好的减振效果，增大隧道所在土层的弹性模量对频率小于10 Hz的地表振动有明显的减振效果。

参考文献：

[1] YANG Y B，HSU L C. A review of researches on ground-brone vibrations due to moving train via underground tunnels[J]. Advances in Structural Engineering，2006，9(3)：377-392.

[2] 和振兴，翟婉明，罗震. 地铁列车引起的地面振动[J]. 西南交通大学学报，2008，43(2)：218-221.

[3] KOJIRO FUJII，YASUSHI TAKEI，KIWAINU TSUNO. Propagation properties of train-induced vibration from tunnels[J]. QR of RTRI，2005，46(3)：194-199.

[4] 刘晶波，谷音，杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报，2006，28(9)：1070-1075.

[5] 雷晓燕，圣小珍. 铁路交通噪声与振动[M]. 北京：科学出版社，2004：228-285.

[6] SHEN H J，HUNG T J，TSUNG K C，et al. Studying characteristics of train-induced ground vibrations adjacent to an elevated railway by field experiments[J]. Jouranal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2007，10：1032-1037.

[7] 申跃奎. 地铁激励下振动的传播规律及建筑物隔振减振研究[D]. 上海：同济大学，2007.

[8] 马蒙. 基于敏感度的地铁列车振动环境影响预测及动态评价体系研究[D]. 北京：北京交通大学，2012.

[9] 耿传志，廖志军. 地铁振动衰减特性研究[J]. 上海：同济大学学报：自然科学版，2009，37(3)：344-348.

The Finite Element Analysis of Ground Vibration Induced by Subway

Tu Qinming，Lei Xiaoyan

(Engineering Research Center of Railway Environment Vibration and Noise，Ministry of Education，East China Jiaotong University，Nanchang 330013，China)

Abstract：Via finite element method software ANSYS，the dynamical analysis model of train-tunnel interaction is established. And effects of the tunnel structure type with pile foundations，burial depth of tunnels，and ground parameters on the ground vibration induced by subway are then analyzed. The calculation results show that the tunnel structure type with pile foundations is effective for reducing the ground vibration. The longer piles are，the better the reduction effect is. Burial depth of tunnel has great influence on ground vibration caused by subway. And the ground vibration intensity decreases as the burial depth of tunnel increases. The impact of ground parameters on ground vibration is related to the exciting frequency.

Key words：subway；ground vibration；burial depth of tunnel；vibration acceleration

中国知网　https://www.cnki.net