

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.05.010

公路隧道声环境有限元数值分析

马非,周小平,李祖伟

(重庆大学土木工程学院,重庆400045)

摘要:公路隧道声环境复杂,影响行车的舒适性和安全性,在紧急情况下严重影响疏散信息的传递。采用有限单元法对公路隧道的声学模态及衰变特性进行数值分析。结果表明,公路隧道的声学模态在横向具有对称性,对称的区域声压幅值相等,相位相同或者相反,模态频率越高,声压幅值最大值越大,隧道长度对模态频率影响较小。与扩散声场的线性衰变特性不同,公路隧道内各点的声压级随时间的衰变是非线性的,在声源停止激励1.5 s内,衰变速率较快,从停止激励到声压级衰变30 dB的时间需要5.5~7.0 s的时间。

关键词:公路隧道;声场;模态;衰变;数值分析

中图分类号:U453.8;TU112.2 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2014)05-0061-05

Numerical Analysis of Acoustic Environment with Finite Element Method

Ma Fei, Zhou Xiaoping, Li Zuwei

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The acoustic environment of highway tunnel is complex and has influences on the driving safety and comfort. In case of emergency, evacuation information is difficult to transfer. Finite element method is used for calculating highway tunnel acoustic modal and attenuation characteristics. The results show that acoustic mode of highway tunnel has symmetry in the horizontal pressure amplitude of symmetry regional is equal and phase is the same or opposite. The higher modal frequency, the greater sound pressure amplitude is, and the effect of tunnel length on modal frequency is smaller. Decay curves of pressure level at each point in the highway tunnel over time are nonlinear. After the source excitation, in 1.5 s, attenuation rate is faster than that of few seconds later and the attenuation time of sound pressure level 30 dB is 5.5 to 7 s.

Key words: highway tunnel; acoustic; modal; attenuation; numerical analysis

公路隧道内噪声源主要有交通噪声和设备噪声,其中交通噪声是主要来源^[1-4],参照《声环境质量标准》(GB 3096—2008)的环境评价体系,隧道内噪声水平严重超标。与洞外相比,行驶在隧道高分贝的噪音环境中会导致人产生烦躁、恐惧的心理,进而导致注意力不集中,严重影响行车的安全性和舒适性。隧道内一旦发生火灾、爆炸、拥堵等应急事件,

公共广播系统发出的疏导信息或者现场指挥信息难以传达给被困人员,易使场面失控,造成严重的人身和财产损失^[5]。研究公路隧道声场特性对提高行车安全性和舒适性有着长远意义。

公路隧道的断面尺寸一般在10 m左右,纵向尺寸一般在100 m以上,有的隧道纵向长度长达18 km,纵向尺寸一般大于横向尺寸30倍。根据长

收稿日期:2014-05-08

基金项目:国家自然科学基金(51325903)

作者简介:马非(1981-),男,博士生,主要从事公路隧道营运环境研究,(E-mail)mashandong@163.com。

周小平(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)zhouxiaoping@sina.com。

空间的定义,纵向尺寸大于横向尺寸 6 倍以上的建筑物为长空间,因此,公路隧道属于典型的长空间建筑物。对于一般长空间的声学特性,采用的研究方法有统计声学理论、几何声线法、有限元法、边界元法以及经验公式等^[6-15]。已有学者基于几何声线法对矩形断面的长空间进行了深入研究,研究的对象多为走廊或者是地下地铁站等截面形式简单,纵向尺寸与断面尺寸的比例较小的长空间,基于有限单元法的研究则较少。有限单元法可以分析任意几何断面的长空间的声场特性,还可以研究不同吸声材料对声场的影响。公路隧道虽与建筑物走廊、地下车站的定义上同属于长空间,但其长度尺寸与横断面尺寸的比值较一般长空间大,且两端开口。公路隧道的断面一般为三心圆,具有较强的声聚焦效应。在目前涉及公路隧道声环境的研究可以归纳为以下 3 个方面:一是对公路隧道噪声水平的调查研究;二是路面与车辆轮胎之间产生噪声的机理研究;三是通过在隧道内部敷设降噪材料改善隧道声学环境的研究^[16-20],目前尚缺少对公路隧道声学基本特性精细化深入研究。

笔者采用有限单元法对公路隧道的声学特性进行分析,研究公路隧道的基本声学模态以及声压级随时间的衰变规律。

1 基本假定和声波方程

声波是物质波,是媒质中传播的声压 p 、质点速度 v 、密度的一种或多种变化,声音也是这些物理量的变化引起人的听觉。声传播过程必须满足 3 个基本的物理定律即平衡方程、质量守恒定律以及描述压强、温度与体积等状态参数关系的物态方程。为了使问题简化,有如下假设:

1) 空气为理想流体,不存在粘滞性,声波在传递过程中没有能量损耗。

2) 没有声扰动时,空气在宏观上是静止的,同时空气是均匀的,静态压强和静态密度都是常数。

3) 声波传播时,空气中稠密和稀疏的过程是绝热的,没有能量交换。

声波的三维波动方程为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中: p 为声压, c_0 为声速, t 为时间, x 、 y 、 z 为空间坐标。

声波的有限元离散方程为

$$\mathbf{M}_e^p \{\ddot{P}_e\} + \mathbf{C}_e^p \{\dot{P}_e\} + \mathbf{K}_e^p \{P_e\} + \rho_0 \mathbf{R}_e^T \{\ddot{u}_e\} = \{0\} \quad (2)$$

式中: \mathbf{M}_e^p 为流体“质量”矩阵, \mathbf{K}_e^p 为流体刚度矩阵, $\rho_0 \mathbf{R}_e^p$ 为流体和结构接触的耦合“质量”矩阵, \mathbf{C}_e^p 为流体衰减矩阵^[21]。

2 数值分析

2.1 分析模型

公路隧道分析模型采用的横断面尺寸如图 1(a) 所示。首先在有限元程序 ANSYS 建立网格,然后将网格导入声学程序 LMS Virtual.Lab 完成声学的分析。为了尽量降低洞口对洞内声场的影响,在模态分析中纵向长度取 400 m,在时程分析中纵向长度取 600 m。采用六面体三维单元,单元最大边长为 0.4 m,在分析中最大分析频率不大于 100 Hz,因此能够保证一个波长范围内有 6 个单元,有限元模型如图 1(b) 所示。

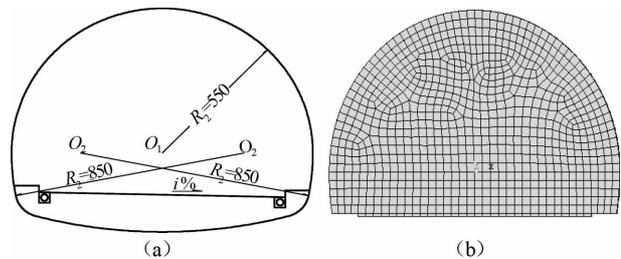


图 1 公路隧道横断面及有限元模型

公路隧道内混凝土衬砌和沥青路面都有一定的粗糙度,具有一定的吸声性能,因此在相应位置施加吸声边界条件,吸声系数取 0.04^[22]。隧道两端洞口的吸声系数为 1,即声波传播到此处时全部被外界吸收,没有声波反射至洞内。

2.2 声学模态分析

声学模态是声波在空间内传播时,在不同位置产生不同的声压分布,其以空间中各点的声压分布为特征。隧道是由衬砌和路面围成的封闭空间,与其他建筑物一样具有模态形状和模态频率。图 2 为通过有限元模态分析得到的几个代表性的隧道声学模态。

当频率小于或等于 17.4 Hz 时,声学模态均为垂直于纵轴的平面声波,横断面内的声压处处相等,这里定义为横向模态,沿纵向等间隔出现零声压节面,模态频率越高,纵向出现节面的数目越多。节面两侧相位相反,声压幅值逐渐增大。模态频率 17.5 Hz 对应的声学模态以断面竖直中心线为对称轴在横断面内声压左右对称分布,相位相反,检修道上方的区域声压幅值较大,而隧道竖向中心线附近区域声压值较小,这里定义为纵向模态。频率为 25.9 Hz 和 34.2 Hz 所对应的声学模态也均为纵向

声学模态,可以看出检修道、隧道路面中心上方区域和拱顶在纵向模态中的声压较大。

随着模态频率的升高,声压同时沿纵向和横向变化,显示出横向声学模态和纵向声学模态的叠加特征,节面不规则,在纵向交替出现相位相反的声压区域。模态频率越高,声压幅值最大值越大,同时声学模态越密集,局部模态增多,纵横模态叠加的特征越明显,如图2(e)、(f)所示。

由于隧道断面在横向左右对称,因此各阶声学模态在横向表现为左右对称,相位相同或者相反,说明

断面形状对声学模态在横向的声压分布有重要影响。

将两车道隧道有限元模型纵向长度设置为300和200 m,然后计算其声学模态,并与长度为400 m的隧道模型计算结果比较,三者首次出现纵向模态的频率均为17.5 Hz,隧道模型长度不同,首次出现相同纵向声学模态的频率相同,说明隧道模型长度对模态的影响较小。将公路隧道简化为圆管,通过管道声学计算其模态频率,首次出现纵向模态的频率为18.3 Hz,与有限元方法计算的数值较接近,说明有限元方法计算隧道声学模态的可靠性。

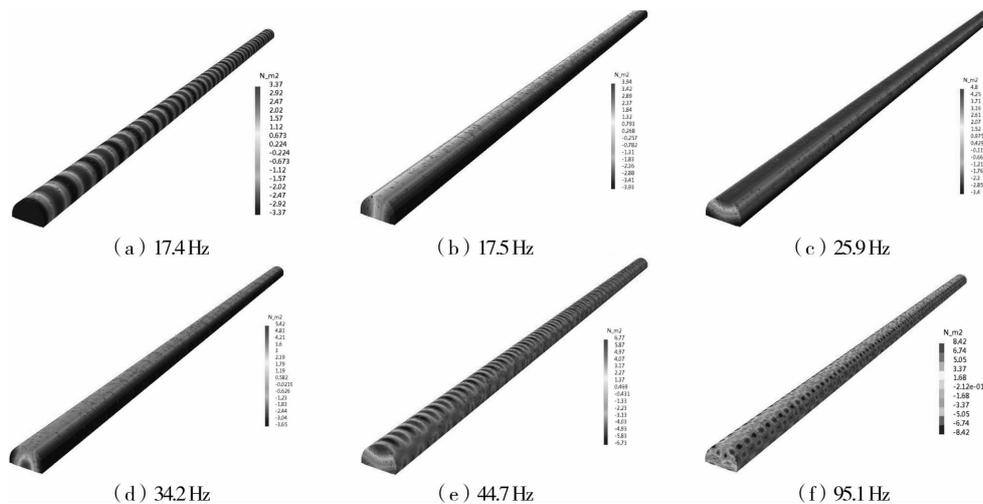


图2 隧道声学模态

2.3 衰变特性分析

采用有限元时程分析法对隧道内的声压级随时间的变化进行研究,即声压级为时间的函数。声源设置在距入口100 m处的横断面内,节点坐标为(0, 0, 100),激励频率为100 Hz,振幅为5 N/m²。以声源为起点所在断面开始,每隔40 m设置一个观察断面。在每个断面内布置6个观察点,坐标分别为(0, 0), (1, 0), (2, 0), (3, 0), (0, 1), (0, 2)。在隧道内声场达到稳态后(约20 s)停止声源激励,继续计算过程直至计算结束。然后通过后处理模块观察声压级随时间的变化。

公路隧道内声压级随时间的衰变曲线是非线性的,如图3所示,在声源停止激励约1.5 s内所有观测点声压级衰变的速度较快,停止激励1.5 s后各个观测点的声压级衰变速率逐渐变缓,并且衰变速率趋向一致。

除声源所在的横断面的各个观测点的衰变时间差异较大外,其它各个横断面内的观测点的衰变时间基本一致。与声源在同一横断面的点的衰变30 dB的时间约为5.5 s,在距声源200 m横断面内所需的时间约6 s,处于两者之间的横断面内的所需时间在

5.5~7.0 s之间,与扩散声场衰变速率处处相等有所差别,在公路隧道内即表现为距声源越近,声压级衰变的速率越快,距声源越远,声压级衰变的较慢的特点。

从几何声线法的原理可以看出,声源与接收点之间的距离为 d ,因壁面入射角度 θ 的不同而存在着数条传播路径,如果图4所示,每一条声线传播路径长度为 $d/\sin\theta$ 。假设存在着入射角 θ_1 和 θ_2 的两条声线,传播路径长度分别为 $d/\sin\theta_1$ 和 $d/\sin\theta_2$ 。在声速相同的情况下,从声源同时出发,声线通过路径1和路径2到达接收点的时间是不同的,到达时间相差 $d(1/\sin\theta_1 - 1/\sin\theta_2)/c_0$ 。入射角度不变,声源与接收点的距离 d 越大,时间差越长,因此导致衰变时间沿纵向逐渐增大。

根据计算结果可知,公路隧道内的混响时间 t_{60} 在12 s以上,一般住房的混响时间为0.5 s、大型厅堂的混响时间为1.2 s^[22]。在播放预警信息时,声波长时间在隧道内回荡,很难识别疏导信息的内容,应引起足够的重视。要改善公路隧道内的混响,一是要控制噪声源的辐射能量,二是在衬砌上敷设降噪材料来加强噪声能量的吸收。

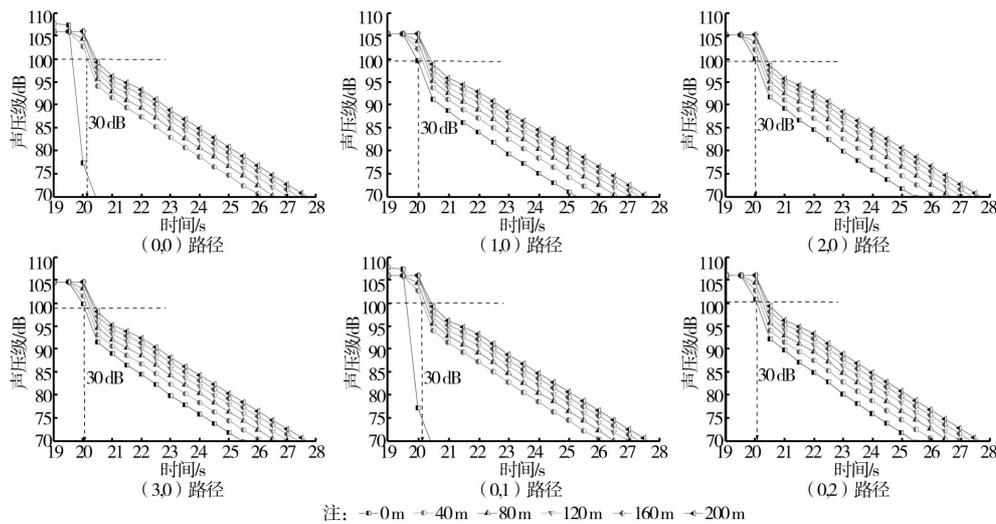


图 3 声压级随时间的衰变曲线

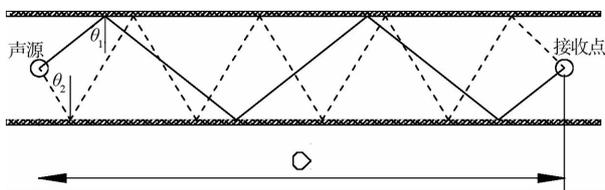


图 4 声线传播路径

3 结论

1) 公路隧道声学模态在横向具有对称性, 高次的声学模态表现为横向声学模态和纵向声学模态的叠加。模态频率越高, 声压幅值的最大值越大。

2) 公路隧道内声压级随时间的衰变曲线是非线性的, 大致可以分为两个阶段。扩散声场各点的混响时间处处相等, 而隧道内衰变时间与距声源的距离有一定的关系, 距声源越近, 混响时间越短, 混响时间越长, 声源停止激励后, 声压级衰变 30 dB 的时间在 5.5~7 s 之间。

3) 在公路隧道内的声能衰变时间过长, 对听觉环境造成恶劣干扰, 须通过其他措施进行改善。

参考文献:

[1] 王明年, 翁汉民, 关宝树. 我国 3 条高速公路隧道污染状况调查[J]. 环境科学, 1997, 18(3): 50-53.
Wang M N, Weng H M, Guan B X. Three highway tunnel pollution survey [J]. Environmental Science, 1997, 18(3): 50-53.

[2] 张锐, 黄晓明, 赵永利, 等. 隧道噪声的调查与分析[J]. 公路交通科技, 2006, 23(10): 29-32.
Zhang R, Huang X M, Zhao Y L, et al. Investigation and analysis of tunnel noise [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006,

23(10): 29-32.

[3] 杨超, 王志伟. 公路隧道通风技术现状及发展趋势[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(4): 819-824.
Yang C, Wang Z W. The technology status and development trend of highway tunnel ventilation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(4): 819-824.

[4] Ma F, Zhang Y X. Experiments and analysis of the acoustics properties of concrete tunnel [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 18: 2031-2040.

[5] 赵炜华, 刘浩学, 丁光明. 高速公路特长隧道对驾驶员的影响[J]. 公路, 2011, 5(1): 108-111.
Zhao W H, Liu H X, Ding G M. Impact of expressway long tunnel on drivers [J]. Highway, 2011, 5(1): 108-111.

[6] 曾向阳. 室内声场计算机模拟发展 40 年(1968—2008) [J]. 电声技术, 2008, 12(6): 13-23.
Zeng X Y. Forty years of development of room acoustic computer simulation (1968-2008) [J]. Audio Engineering, 2008, 12(6): 13-23.

[7] Kang J. The unsuitability of the classic room acoustical theory in long enclosures [J]. Architectural Science Review, 1996, 39: 89-94.

[8] Allen J B, Berkley D A. Image method for efficiently simulating small-room acoustics [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1979, 65(4): 943-950.

[9] Borish J. Extension of the image model to arbitrary polyhedral [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1984, 75: 1827-1836.

[10] Kang J. Sound attenuation in long enclosures [J]. Building and Environment, 1996, 31(3): 245-253.

[11] Kang J. Reverberation in rectangular long enclosures with geometrically reflecting boundaries [J]. Acta Acustica United with Acustica, 1996, 82(3): 509-516.

- [12] Vinokur R Y. Propagation of sound generation by a point source in certain built-up urban environments [J]. Soviet Physical Acoustics, 1979, 25: 377-379.
- [13] Redmore T L. A method to predict the transmission of sound through corridors [J]. Applied Acoustics, 1982, 15(2): 133-146.
- [14] Pu H J, Min H Q, Qiu X J, et al. On the sound field of a vault with two open ends [J]. Applied Acoustics, 2010, 71(6): 556-563.
- [15] 罗威力,蔡铭,刘济科. 矩形截面隧道交通噪声计算机仿真[J]. 振动与冲击, 2012, 31(8): 33-37.
Luo W L, Cai M, Liu J K. Computer simulation of traffic noise in rectangular cross-section tunnel [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(8): 33-37.
- [16] 黄学辉,尚福亮,薛红亮,等. 公路隧道降噪用吸声材料的研制[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(4): 27-30.
Huang X H, Shang F L, Xue H L, et al. Development of the sound absorption material used for noise reduction in highway tunnel [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2003, 25(4): 27-30.
- [17] 师利明,罗德春,邓顺熙. 公路隧道内噪声预测和降噪措施的理论研究[J]. 中国公路学报, 1999, 12(5): 101-105.
Shi L M, Luo D C, Deng S X. Theoretical research on noise predication and measures of reducing noise in highway tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(5): 101-105.
- [18] 张金喜,孔静静,黄颂昌,等. 不同类型沥青路面吸声性能及机理的实验研究[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(8): 1084-1089.
Zhang J X, Kong J J, Huang S C, et al. Experimental study on sound absorption of asphalt pavement with different types [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(8): 1084-1089.
- [19] 丛卓红,王莎,郑南翔. 抗滑降噪型隧道沥青混合料设计[J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 37-42.
Cong Z H, Wang S, Zheng N X. Asphalt mixture design with anti-skidding and low noise performance in tunnel pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(4): 37-42.
- [20] 詹成根,郝增恒. 隧道路面明色降噪微表处技术研究[J]. 公路工程. 2013, 38(5): 67-71.
Zhan C G, Hao Z H. The tunnel pavement light color noise reduction micro-surfacing technology research [J]. Highway Engineering, 2013, 38(5): 67-71.
- [21] 商跃进. 有限元原理与 ANSYS 应用指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [22] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

(编辑 胡英奎)

(上接 49 页)

- [15] Woods J, Pellegrino J, Burch J. Generalized guidance for considering pore-size distribution in membrane distillation [J]. Journal of Membrane Science, 2011, 368(1): 124-133.
- [16] Bear J, Bachmat Y. Introduction to modeling of transport phenomena in porous media [M]. Springer, 1990.
- [17] Wang M, Pan N. Numerical analyses of effective dielectric constant of multiphase microporous media [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(11): 114102.
- [18] Wang M, Pan N. Predictions of effective physical properties of complex multiphase materials [J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2008, 63(1): 1-30.
- [19] Ge M, Lin Q. Realizing the box-counting method for calculating fractal dimension of urban form based on remote sensing image [J]. Geo-spatial Information Science, 2009, 12(4): 265-270.
- [20] Li J, Du Q, Sun C. An improved box-counting method for image fractal dimension estimation [J]. Pattern Recognition, 2009, 42(11): 2460-2469.
- [21] 陈昭宜,刘蕊梅. 一个新的气体扩散系数计算公式[J]. 科学通报, 1989, 11: 29.
Chen Z Y, Liu R M. A new formula about gas diffusion coefficient [J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 11: 29.

(编辑 王秀玲)