

类矩形盾构隧道与圆形盾构隧道振动特性对比分析

张启乐¹ 冯立力² 王建立¹ 王建¹ 张斌¹

(1. 隔而固(青岛)结构设计事务所有限公司, 266108, 青岛;

2. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315101, 宁波//第一作者, 工程师)

摘要 以宁波地铁3号线一期工程采用的类矩形盾构隧道为研究背景, 分别建立类矩形盾构隧道和圆形隧道有限元模型, 并对两种隧道结构的振动特性作了对比分析。研究表明: 与圆形盾构管片相比, 类矩形盾构管片自振频率更高, 对控制管片结构与轮轨振动的共振更为有利; 无论是道床中心、隧道壁还是线路正上方的地面位置, 类矩形盾构隧道的振动水平均要小于圆形盾构隧道; 当振动由隧道壁向地面传递时, 圆形盾构隧道的振动衰减得更快; 考虑地铁设计选线因素, 在地面建筑敏感点位置, 类矩形盾构隧道可以减少Z振级3~6 dB。类矩形盾构隧道在自身结构和线路规划等方面对地铁振动的控制均具有优势。

关键词 圆形盾构隧道; 类矩形盾构隧道; 振动特性

中图分类号 U451+.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.03.010

Comparative Analysis of the Vibration Characteristics for Quasi-rectangular Shield Tunnel and Circular Shield Tunnel

ZHANG Qile, FENG Lili, WANG Jianli, WANG Jian, ZHANG Bin

Abstract Based on the 1st phase project of Ningbo metro Line 3, the finite element models of quasi-rectangular tunnel and circular tunnel are established respectively, the vibration characteristics of both tunnels are compared and analyzed. Compared with the circular tunnel, the quasi-rectangular shield has a higher natural frequency, which is more favorable for the resonance control of tunnel segment and metro vehicle wheel vibration; whether on the track bed, tunnel wall or on the ground just above the line, the vibration level of quasi-rectangular tunnel is smaller than that of the circular tunnel; when vibration passes from the tunnel wall to the ground, the vibration attenuation of the circular tunnel is faster. If the line planning factors are taken into consideration, at the sensitive position of ground buildings, the quasi-rectangular shield can achieve the reduction of Z-level by 3~6 dB. Therefore, the quasi-rectangular tunnel has more advantages in vibration control due to its own structure and the line planning.

Key words circular tunnel; quasi-rectangle tunnel; vibration performance

First-author's address GERB (Qingdao) Structure Design Co., Ltd., 266108, Qingdao, China

城市轨道交通在给人民群众的出行带来便利的同时, 其运营过程中所诱发的环境振动及二次结构噪声问题对人们的影响亦越来越大。国际上已把环境振动列为七大环境公害之一, 很多专家和学者对城市轨道交通振动的产生、传播及控制机理做了大量研究。

文献[1-4]均仅限于对常规断面隧道振动特性及传递规律的研究, 而针对异形盾构隧道, 目前并未有任何公开的研究成果。

宁波地铁3号线一期工程首次采用类矩形盾构。该隧道为国内首条且为世界上最大的类矩形盾构隧道。本文以宁波地铁3号线一期工程为背景, 对类矩形盾构隧道和圆形盾构隧道的振动特性进行对比分析。其结论可为宁波地铁4号线及后续城市线路规划及轨道结构设计提供参考。

1 钢轨振动荷载

目前, 列车荷载的确定方法主要有模型分析法、经验分析法和试验分析法。本文基于试验分析法来获取钢轨振动荷载, 即通过实测的钢轨振动加速度来反演得到钢轨振动荷载。

1.1 振动加速度数定

经小波分解和重构后的钢轨加速度时程可认为是一个具有零均值的各态历经的平稳高斯过程^[5], 因此可以将钢轨振动加速度波形分解为一列不同频率的谐波, 即可用傅立叶级数表示为:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos n\omega t dt \quad (n = 0, 1, 2, \dots, j-1) \quad (2)$$

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin n\omega t dt (n = 0, 1, 2, \dots, j-1) \quad (3)$$

式中:

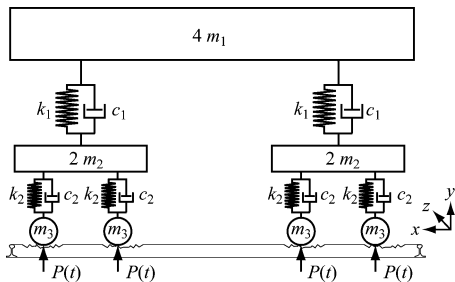
$x(t)$ ——钢轨加速度时程;
 T ——记录时长或截断时长;
 N ——加速度波形离散点的数量;
 ω ——基频, $\omega = 2\pi/T$ 。

对钢轨竖向振动加速度波形进行离散采样,即将加速度波形离散成单个点后得到:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N/2-1} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (4)$$

1.2 钢轨振动荷载求解

将列车简化为一系、二系弹簧质量系统模型的组合^[6],并假定该组合沿隧道纵向均匀分布,简化模型如图1所示。假设列车车体重心在纵向、横向都是对称的,故在计算一侧钢轨上的列车荷载时,可只分析整车模型的1/4。



注: m_1 为1/4车体质量; m_2 为1/2转向架质量; m_3 为一个轴重质量; c_1, k_1 为二系悬挂阻尼与刚度; c_2, k_2 为一系悬挂阻尼与刚度; $P(t)$ 为轮轨接触力

图1 列车简化模型

根据图1中的坐标系,选取简化列车模型的1/4为研究目标,利用直接平衡法建立车体竖向运动平衡方程为:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_2 + k_1(y_2 - y_1) + c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) = 0 \\ m_2 \ddot{y}_1 + k_2(y_1 - y_0) + c_2(\dot{y}_1 - \dot{y}_0) + \\ k_1(y_2 - y_1) + c_1(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

令 $y_1 - y_0 = \xi_1, y_2 - y_1 = \xi_2$ 。经过推导可得:

$$P(t) = (m_1 + m_2 + m_3)g + m_1(\ddot{\xi}_1 + \ddot{\xi}_2 + \ddot{y}_0) + m_2(\ddot{\xi}_1 + \ddot{y}_0) + m_3\ddot{y}_0 \quad (6)$$

式中:

g ——重力加速度。

沿纵向均匀分布的列车线荷载 $F(t)$ 可按照下式计算:

$$F(t) = KNMP(t)/L \quad (7)$$

式中:

K ——修正系数;
 N ——每节车厢的转向架数量;
 M ——列车车厢数量;
 L ——列车长度。

宁波地铁车辆为B型车,则 N 取2, M 取6, L 取117.12 m。当 K 为1时,普通整体道床的轮轨振动荷载时程及频谱如图2~3所示。

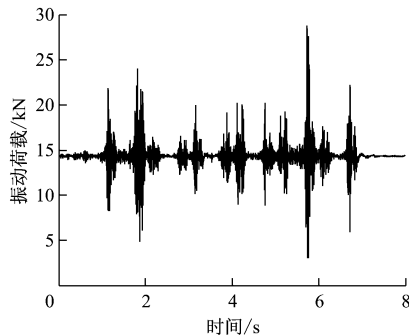


图2 普通整体道床的轮轨振动荷载时程曲线

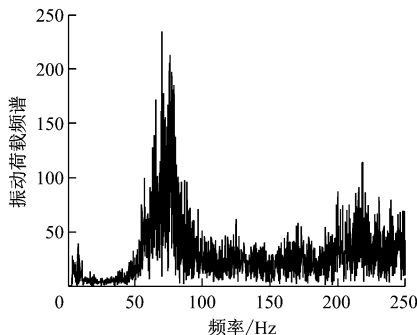


图3 普通整体道床的轮轨振动荷载频谱曲线

2 盾构隧道有限元模型建立

将隧道假定为平面问题进行有限元模型的建立。土层参数如表1所示,单元网格尺寸确定原则参见文献[7]。

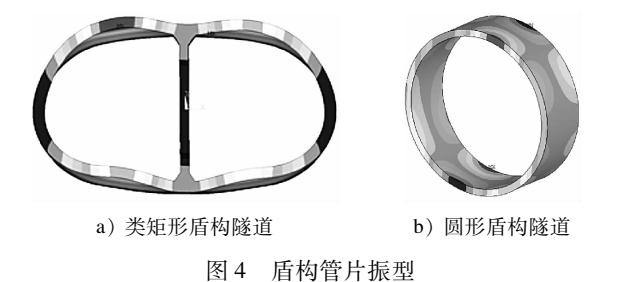
模型中,土层和隧道衬砌结构等均采用 PLANE 82 单元。扣件采用 Combine 14 单元,扣件竖向刚度假定为 33 kN/mm;钢轨仅考虑其单位长度上的质量,不考虑其弯曲和扭转变形,故钢轨采用 Mass 21 质量单元模拟。有限元模型横向长度为 150 m, 竖直方向长度为 60 m。计算域边界采用人工粘弹性边界^[8]。系统阻尼采用 Rayleigh 阻尼,其中 α 取 3.94, β 取 1.25×10^{-4} 。

表 1 土层参数表				
土层编号	土质	弹性模量/ MPa	密度/ (kg/m ³)	泊松比
1	杂填土① ₁	90.0	1 900	0.35
2	黏土① ₂	72.1	1 840	0.33
3	淤泥① ₃	51.0	1 660	0.42
4	淤泥粉质黏土④ ₁	113.8	1 800	0.41
5	黏土④ ₂	224.5	1 750	0.39

3 两种盾构隧道计算结果分析

3.1 模态分析

分别建立单位长度的类矩形盾构和圆形盾构的管片模型,并对两种模型进行模态分析,计算结果如图 4 所示。



由图 4 可知,类矩形盾构管片的竖向敏感频率为 127 Hz,圆形盾构管片的竖向敏感频率为 82 Hz,由此可知,类矩形盾构管片的敏感频率相对圆形盾构管片更高。由轮轨振动荷载频谱图(见图 3)可知,轮轨振动的能量主要集中在 50 ~ 80 Hz,与普通圆形盾构管片相比,类矩形盾构管片的自振频率与轮轨振动的卓越频率重叠区域更小,这对控制隧道管片结构的共振更为有利。

3.2 两种盾构隧道结构相同位置振动特性对比

选取类矩形盾构隧道和圆形盾构隧道的道床中心、隧道壁(距离轨面 1.25 m)及线路正上方地面点作为振动输出点,对比两种隧道结构的振动加速度及 1/3 倍频程加速度级。

3.2.1 振动加速度

两种盾构隧道振动加速度峰值对比如表 2 所示。由表 2 可知,圆形盾构隧道的振动要大于类矩形盾构隧道;在道床位置,两种隧道振动差别最大,圆形盾构隧道道床振动加速度峰值比类矩形盾构隧道大 2.32 m/s²;在线路正上方地面位置两者差别相对较小,圆形盾构隧道道床振动加速度峰值比类矩形盾构隧道大 0.072 m/s²。这是由于与圆形

盾构隧道相比,类矩形盾构隧道断面更大,因而其质量和整体刚度均较大,在相同振动荷载作用下更不容易被激振,所以类矩形盾构隧道的振动相对较小。

表 2 振动加速度峰值对比				m/s ²
项目	振动加速度峰值			
	道床中心	隧道壁	线路正上方地面	
类矩形盾构隧道	2.870	0.832	0.121	
圆形盾构隧道	5.192	2.227	0.193	
差值	2.322	1.395	0.072	

3.2.2 振动加速度级

1/3 倍频程谱是一种频域分析方法,具有谱线少、频带宽的特点。两种盾构隧道的道床、隧道壁和线路正上方地面点的振动加速度级,如图 5 所示。

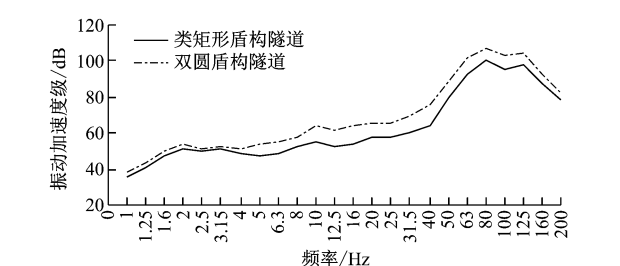


图 5 道床中心振动加速度级

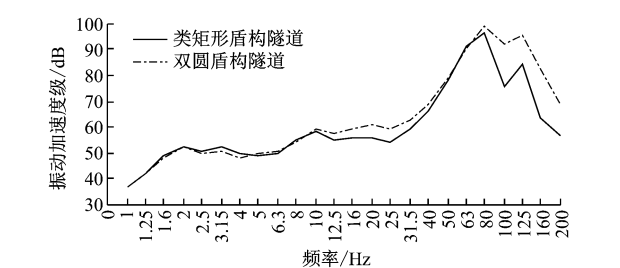


图 6 隧道壁振动加速度级

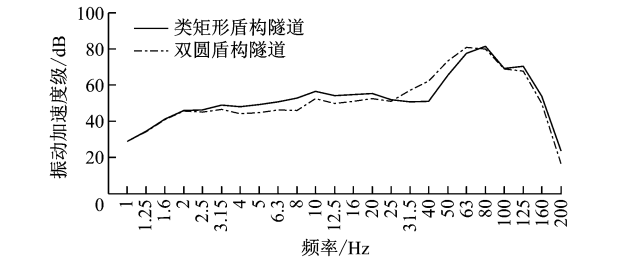


图 7 线路正上方地面振动加速度级

由图 5 ~ 7 可知,在道床中心位置,圆形盾构隧道与类矩形盾构隧道在频域内的振动特性几乎一致,频率为 50 Hz 以下时轮轨振动较小,振动较大的频段集中在 63 ~ 80 Hz,这与轮轨振动荷载的主频

一致。同时可以发现,两种隧道轮轨振动荷载均在 80 Hz 达到最大值,类矩形盾构隧道振动加速度级最大值为 104 dB,圆形盾构隧道振动加速度级最大值为 112 dB,圆形盾构隧道要比类矩形盾构隧道大 8 dB,圆形盾构隧道的振动加速度级在大部分频段均大于类矩形盾构隧道。

在隧道壁位置,两种隧道的振动加速度级同时在 63 Hz 处达到最大值,类矩形盾构隧道振动加速度级最大值为 94.2 dB,圆形盾构隧道振动加速度级最大值为 97.5 dB,圆形盾构隧道要比类矩形盾构隧道大 3.3 dB;两种隧道在 100 Hz 时的振动加速度级差值最大,圆形盾构隧道比类矩形盾构隧道大 16.23 dB;在 10 Hz 以下的低频区间,两种隧道的振动水平差别不是很明显。

在线路正上方地面位置,对于 4 ~ 20 Hz 的振动,类矩形盾构隧道略大于圆形盾构隧道;对于 25 ~ 63 Hz 的振动,圆形盾构隧道要大于类矩形盾构隧道。

由此可见,隧道内部不同位置及隧道内外的振动在频域内的特性都是不同的。隧道内部不同位置的振动特性差异主要是由隧道结构局部模态与轮轨荷载的共振导致;而隧道内外的振动特性差异是由于振动经过土层的滤波,某些频率的振动出现不同程度的衰减而导致的。

3.2.3 振动加速度级传递损失

图 8 为隧道壁到线路正上方地面的振动加速度级传递损失。由图 8 可知,对于低频振动,两种隧道的传递损失几乎相同,即虽然两隧道结构形式不同,但是低频振动衰减规律却一致;无论圆形盾构隧道还是类矩形盾构隧道,均呈现出振动频率越高,传递损失越大的趋势。但是对于 80 ~ 200 Hz 的高频振动,圆形盾构隧道的传递损失明显要大于类矩形盾构隧道。这是因为圆形盾构隧道质量较轻,列车经过时更能激发高频振动,而高频振动衰减较快,所以圆形盾构隧道的传递损失较大。

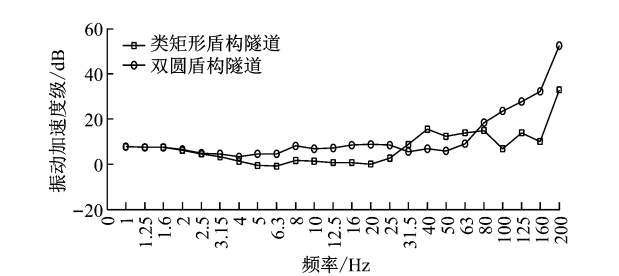


图 8 隧道壁到线路正上地面的传递损失

3.2.4 Z 振级

圆形盾构隧道与类矩形盾构隧道在道床、隧道壁与线路正上方地面位置的 Z 振级如表 3 所示。

隧道类型	Z 振级		
	道床中心	隧道壁	线路正上方地面
圆形盾构隧道	91.8	82.9	69.2
类矩形盾构隧道	84.6	81.2	68.0

由表 3 可知,圆形盾构隧道道床中心位置 Z 振级要比类矩形盾构隧道大 7.2 dB;圆形盾构隧道壁 Z 振级比类矩形盾构隧道大 1.7 dB;线路正上方地面位置,圆形盾构隧道 Z 振级比类矩形盾构隧道大 1.2 dB。

3.3 考虑选线因素的环境振动对比

与圆形盾构隧道相比,类矩形盾构隧道在进行规划选线时具有更强的灵活性。表 4 为两种隧道的选线对比。

隧道类型	选线结果	
	工况 1	工况 2
圆形盾构隧道	左线下穿道路,右线下穿居民楼	左线下穿道路,右线下穿居民楼
类矩形盾构隧道	隧道中心线穿越两圆形隧道连线中点	隧道中心线穿越圆形隧道左线中心

注:隧道埋深为 7.7 m;两圆形隧道中线间距为 15 m

选择圆形盾构隧道右线正上方地面作为振动评价点,计算评价点的 Z 振级见表 5。

隧道类型	Z 振级	
	工况 1	工况 2
圆形盾构隧道	69.2	69.2
类矩形盾构隧道	65.2	62.1

由表 5 可知,如果隧道采用类矩形盾构,且按照工况 1 进行选线,则由地铁运行引起的评价点的振动为 65.2 dB,该值要比圆形盾构隧道环境振动小 4.0 dB;如果按照工况 2 进行选线,则由地铁运行引起的评价点的振动为 62.1 dB,该值要比圆形盾构隧道环境振动小 6.9 dB。由此可知,类矩形盾构隧道的特殊断面形式使选线更灵活,从而减轻了对地铁环境振动的干扰。

绘制两种选线工况振动评价点的 1/3 倍频程振

动加速度级,见图9~10。

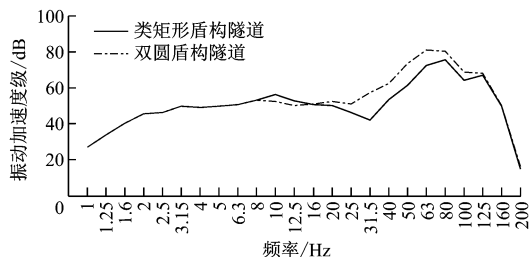


图9 选线对比工况1时1/3倍频程振动加速度级

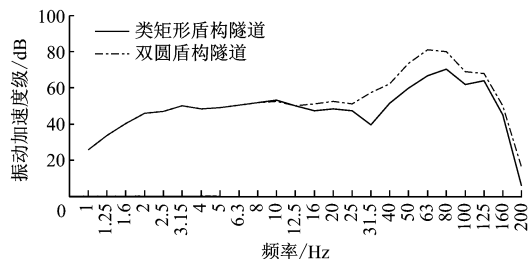


图10 选线对比工况2时1/3倍频程振动加速度级

由图9~10可以发现,无论按照工况1还是工况2进行选线,与圆形盾构隧道比较,类矩形盾构隧道振动频率降低了20~120 Hz,且在50~80 Hz降低较为明显。研究发现,地铁振动二次结构噪声频率范围一般为20~200 Hz,且峰值一般出现在50~80 Hz,1/3倍频程加速度级为35~45 dB^[10-11]。由此可见,如果采用类矩形盾构隧道,且按照工况1或者工况2选线,将会降低建筑二次结构噪声。而二次结构噪声和建筑结构的局部模态相关,因此二次结构噪声量的降低值,应根据具体的建筑结构形式进行计算。

4 结论

(1) 类矩形盾构隧道的振动敏感频率为127 Hz,避开了轮轨振动卓越频率,对控制隧道管片结构的共振较为有利。

(2) 盾构隧道内部的不同位置,以及隧道内部与外部的振动在频域内的特性是不同的。隧道内部不同位置的振动特性差异主要是由隧道结构的局部模态与轮轨荷载的共振导致的;而隧道内外的振动差异是由于振动经过土层的滤波,不同频率的

振动出现不同程度的衰减而导致的。

(3) 在盾构隧道道床、隧道壁或线路正上方地面位置处,圆形盾构隧道的振动水平要大于类矩形盾构隧道。因为类矩形盾构隧道整体质量和刚度较大,更不容易被激振,对地铁环境振动控制更有利。

(4) 类矩形盾构隧道选线更具有灵活性,可在线路规划时避开振动敏感建筑。若基于该选线因素,类矩形盾构隧道与圆形盾构隧道相比,Z振级至少可以减少4.0 dB。

(5) 基于类矩形盾构隧道选线优势,类矩形盾构隧道与圆形盾构隧道相比可以降低20~120 Hz的振动,该频段恰好包含了二次结构噪声的峰值频率50~80 Hz,这样可以减轻建筑物室内二次结构噪声的影响。

参考文献

- [1] 马龙祥,刘维宁,蒋雅君,等. 基于薄片有限元-无限元耦合模型的地铁列车振动环境影响分析[J]. 振动与冲击,2017,36(15):111.
- [2] 夏禾,曹艳梅. 轨道交通引起的环境振动问题[J]. 铁道科学与工程学报,2004(1):44.
- [3] 张啟乐,刘林芽,李纪阳. 地铁邻近建筑环境振动预测及传递规律分析[J]. 铁道科学与工程学报,2015,12(3):502.
- [4] 宗刚,张永红,任晓崧. 地铁致地表振动局部放大现象实测与机理分析[J]. 振动与冲击,2017,36(9):247.
- [5] 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.
- [6] 李德武. 列车振动荷载的数定分析[J]. 甘肃科学学报,1998,10(2):25.
- [7] 吕爱钟,蒋斌松. 位移反分析有限元网格划分范围的研究[J]. 土木工程学报,1999,32(1):26.
- [8] 刘晶波,王振宇,杜修力,等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. 工程力学,2005,22(6):46.
- [9] 国家环境保护局. 城市区域环境振动标准:GB 10070—88[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1988.
- [10] WELKER J G, CHAN M F K. Human response to structurally radiated noise due to underground railway operations [J]. JSV, 1996, 193(1): 49.
- [11] 辜小安,田春芝. 地铁振动对建筑物内二次结构噪声影响预测[J]. 铁道劳动卫生安全与环保,2000,27(1):62.

(收稿日期:2018-07-10)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com