

文章编号:1006-1355(2009)05-0038-05

不同隧道断面结构处的地表振动分析

刘 金¹, 陈长征¹, 赵 慧¹

(沈阳工业大学 机械工程学院, 沈阳 110178)

摘要: 地铁列车的振动对隧道周围土体强度和变形有较大的影响。以北京地铁 5 号线的隧道尺寸和土质特性为研究背景, 用有限元软件对圆形隧道和矩形隧道在相同列车振动荷载作用下的动力响应进行计算, 给出了隧道周围土体的变形情况和地表位移。并将这两种断面的有限元计算结果进行比较和分析, 为以后的工程设计提供参考。

关键词: 振动与波; 有限元计算模型; 矩形隧道; 圆形隧道; 土体变形**中图分类号:** U239.5 **文献标识码:** A

Analyses of Dynamic Responses of Subway Tunnels with Different Sections under Vibration Loading

LIU Jin, CHEN Chang-zheng, ZHAO Hui

(Shenyang University of Technology, Shenyang 110178, China)

Abstract: Strength and deformation of soil around the subway tunnel is greatly affected by the vibration induced by the subway trains. In this paper, taking Beijing subway line 5 as an example, the dynamic responses of subway tunnels with rectangular and circular sections under train's vibration loading are computed by means of the finite element code. The deformation of soil around the subway tunnels and the displacements of the ground surface are also given. The computation results for the two sections are analyzed and compared mutually. These results may provide some reference data for subway tunnel design.

Key words: vibration and wave; model of FEM; rectangular tunnel; circular tunnel; soil deformation

地铁运行时产生的振动也是世界各国普遍存在而需要解决的问题。地铁列车的长期振动不仅会造成隧道结构本身的不均匀沉降, 同时也会使隧道周围软土产生振陷; 所以研究受扰动地铁隧道土体在列车长期振动荷载作用下的位移规律, 对运营地铁附近有基坑开挖等卸载扰动时地铁的安全运营有重要意义。

盾构法是在地面下暗挖隧道的一种施工方法。

当代城市建筑、公用设施和各种交通日益繁杂, 市区明挖隧道施工, 对城市生活的干扰问题日趋严重, 特别在市区中心遇到隧道埋深较大, 地质复杂的情况, 若用明挖法建造隧道则很难实现。在这种条件下采用盾构法对城市地下铁道建设具有明显优点。根据隧道的使用要求、施工技术的可能、外围土层的特性、隧道受力等因素, 该方法横断面一般有圆形、矩形、半圆型、马蹄形等多种型式, 最常用的横断面型式为圆型与矩型。近年来矩形隧道和矩形盾构技术已越来越受到城市地下工程界的欢迎, 如上海隧道工程股份有限公司于 1998 年设计的 $2.5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 矩形顶管机已先后成功应用于上海的地铁 2 号线 5 号出入口人行通道、人民广场地下工程。北京地铁 5 号线工程地下线主要有马蹄形隧道、圆形隧道和总长度约 600 m 的矩形隧道 3 种

收稿日期: 2008-12-26; 修改日期: 2009-02-24

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金

(20060142002) 和辽宁省教育厅基金(05L284)

作者简介: 刘 金, (1985-), 女, 江苏淮安人, 研究生, 主要研究噪声控制及振动控制。

E-mail: liujin850419@163.com

隧道断面形式。矩形隧道优点日益体现、技术日趋成熟,隧道的有效使用面积比圆形的增大 20% 以上,工程应用前景十分广阔。

本文对矩形隧道和圆形隧道的受力进行了比较，并利用有限元分析法对其在相同载荷，相同土层环境下所产生的不同的地表位移进行了分析和研究。

1 北京地铁 5 号线有限元计算模型

1.1 模型计算参数

本文以北京地铁5号线的土质特性及隧道结构尺寸分别建立了圆形隧道和矩形隧道有限元模型，为了得到比较合理的比较结果，本文对圆形隧道及矩形隧道采用了相同的有限元模型尺寸及土层材料参数，

在二维分析中,任意四边形等参单元,既能大大提高精度又能适应几何形状不规则的区域和边界故本文采用四节点平面等参应变单元来模拟土体。

本文的两个有限元模型的边界条件为：周边侧向约束，不允许有水平方向位移，可以有垂直位移；底部全部约束，不允许有水平方向和铅垂方向位移；顶部为自由面。

本文中所用的地铁有限元模型长为 120 m、深为 40 m。由中央到两边的网格划分由密到疏。在地基深度方向 40 m 内土层分为 5 层,由地表向下依次为 1,2,3,4,5 层,各层材料特性不同,在中央隧道壁(即衬砌厚度)为第 6 层,其材料特性与其他 5 层有很大的差异,对波的传播影响比较大,所以另为一层。

该地铁线路沿线通过的地层均为第四纪冲积地层，除表层的填涂外，主要有粘土、粉土、砂及卵石等地层。模型中的各层材料参数如标 1 所示，该材料参数及各层土层高度是根据北京地质条件确定的。

表 1 材料参数表

Table 1 The main physical and mechanical parameters of Beijing subway line 5

parameters of Beijing subway line 1				
层号	土层厚度 /m	密度 /Kgm ⁻³	弹性模量 /Mpa	泊松比
1(杂填土)	5	1.65 * 103	9	0.3
2(粉土)	6	1.91 * 103	7	0.25
3(粘土)	7	1.99 * 103	13.3	0.3
4(中粗砂)	4	2.1 * 103	35	0.25
5(细沙)	18	2.2 * 103	45	0.25
6(混凝土)	0.3	2.5 * 103	3.0 * 104	0.167

1.2 地铁列车振动荷载的模拟

潘昌实等采用简单的类似简谐激振形式的函数来表达列车荷载,该函数能反映出分别以轨面不平顺、附加动载和轨面波磨效应为控制条件时,列车振动的高、中、低频的影响。其表达式为:

$$F(t) = P_0 + P_1 \sin \omega_1 t + P_2 \sin \omega_2 t + P_3 \sin \omega_3 t$$

式中, $F(t)$ 为列车振动荷载; P_0 为车轮静载; P_i 为不同控制条件下对应典型频率的振动荷载幅值。对于土-隧道体系, 内部振源 $F(t)$ 产生的振动将以波的形式向外传播出去, 在地表(各观察点)产生相应的振动, 为了研究其传递的特性, 荷载 $F(t)$ 应取为最基本的形式, 即单点单周期荷载。这里采用不同频率的单点单周期正弦波荷载来进行分析, 根据实测荷载幅值大小, 正弦波幅值取 15 kN。

本文所建立的圆形和矩形隧道衬砌尺寸都是北京地铁5号线中圆形隧道及矩形隧道部分的结构尺寸。下面分别对圆形隧道和矩形隧道进行有限元分析。

2 圆形隧道断有限元分析

2.1 模型建立

圆形隧道的模型如图 1 所示,根据北京地铁 5 号线地铁隧道尺寸,该隧道内径为 5.4 m,外径为 6 m。



图 1 圆形隧道模型

Fig. 1 circular tunnel model

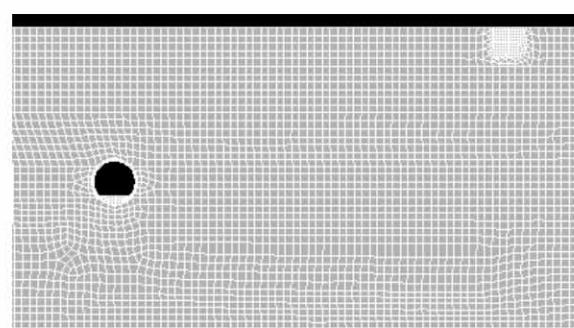


图2 圆形隧道有限元模型

Fig. 2 Finite element model

对其进行网格划分和加载, 得到有限元分析模型如图 2 所示

2.2 计算

2.2.1 谐响应计算

利用上面提到载荷对道床表面进行加载,本次有限元分析采用谐响应反应分析过程。频率变化范围为0 Hz~80 Hz,载幅值大小,正弦波幅值取为15 kN。加载如图3所示

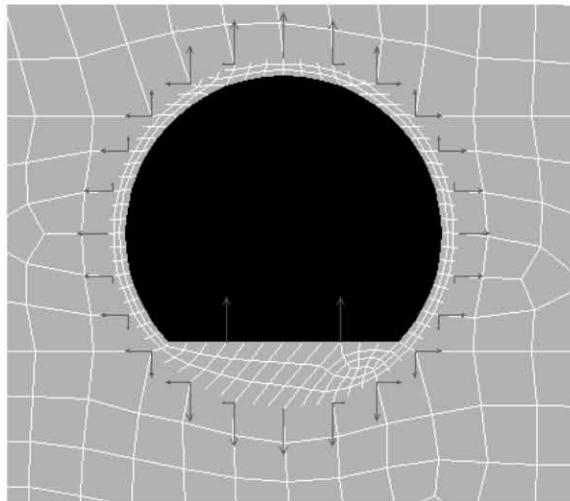


图3 圆形隧道载荷图

Fig 3 loading of circular tunnel

2.2.2 有限元分析结果

图4为距离地跌中心隧道线分别0 m,15 m,30 m处的地表位移幅值随频率变化的示意图。

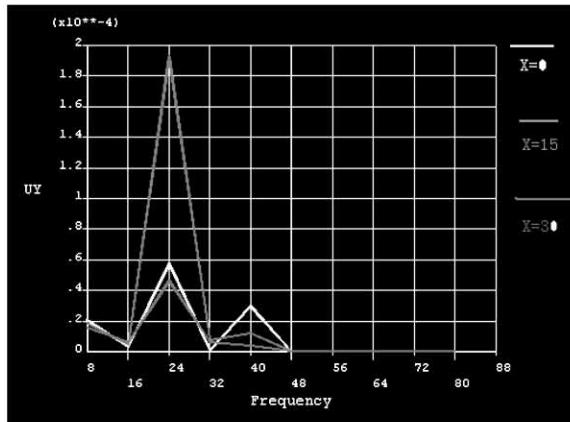


图4 $X=0$ m,15 m,30 m处的地表位移幅值随频率变化图

Fig 4 Amplitude of ground displacement

由图4可以看出,在三个距离处,位移幅值最大都发生在频率为24 Hz处。在离开地铁隧道中心一定距离处存在振动放大区,这个距离依地层条件和隧道埋深而定。本次模型的振动放大区域大概在与隧道中心处15 m左右。频率低的产生的位移幅值较大,

频率高的产生的位移幅值反而较小。

表2—4 为距离地跌中心隧道线分别0 m,15 m,30 m处的幅值列表

表2 $X=0$ m处不同频率载荷所产生的地表位移幅值

Table 2 Amplitude of ground displacement with different load frequency with $X=0$

频率/Hz	位移幅值/mm
8	$0.209239 * 10^{-1}$
16	$0.321157 * 10^{-2}$
24	$0.576466 * 10^{-1}$
32	$0.969122 * 10^{-3}$
40	$0.295841 * 10^{-1}$
48	$0.241280 * 10^{-4}$
56	$0.116242 * 10^{-6}$
64	$0.125569 * 10^{-9}$
72	$0.973845 * 10^{-10}$
80	$0.107463 * 10^{-10}$

表3 $X=15$ m处不同频率载荷所产生的地表位移幅值

Table3 Amplitude of ground displacement with differernt load frequency with $X=15$

频率/Hz	位移幅值/mm
8	$0.187563 * 10^{-1}$
16	$0.469577 * 10^{-2}$
24	0.192879
32	$0.772926 * 10^{-2}$
40	$0.122418 * 10^{-1}$
48	$0.349230 * 10^{-5}$
56	$0.901318 * 10^{-8}$
64	$0.237878 * 10^{-8}$
72	$0.895673 * 10^{-11}$
80	$0.398624 * 10^{-12}$

表4 $X=30$ m处不同频率载荷所产生的地表位移幅值

Table 4 Amplitude of ground displacement with differernt load frequency with $X=30$

频率/Hz	位移幅值/mm
8	$0.157307 * 10^{-1}$
16	$0.625347 * 10^{-2}$
24	$0.462059 * 10^{-1}$
32	$0.632610 * 10^{-2}$
40	$0.401051 * 10^{-2}$
48	$0.226592 * 10^{-3}$
56	$0.553523 * 10^{-8}$
64	$0.204786 * 10^{-8}$
72	$0.172199 * 10^{-9}$
80	$0.178550 * 10^{-1}$

图 5—8 为圆形隧道在不同频率载荷作用下的典型的几个隧道土体位移云图

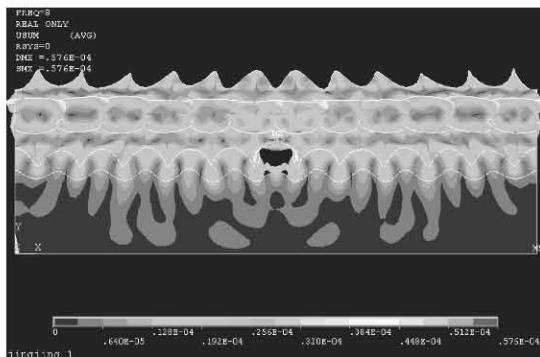


图 5 $F = 8$ Hz 隧道土体位移图

Fig 5 displacement of channel soil with $f = 8$ Hz

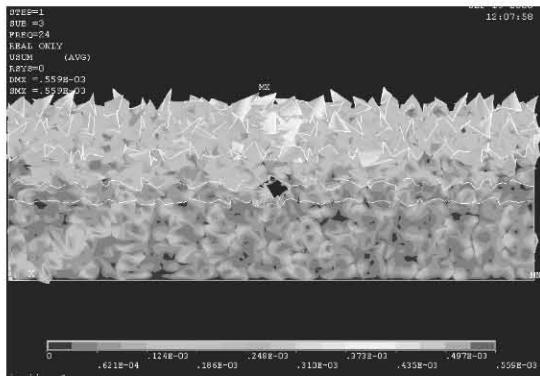


图 6 $F = 24$ Hz 隧道土体位移图

Fig 6 displacement of channel soil with $f = 24$ Hz

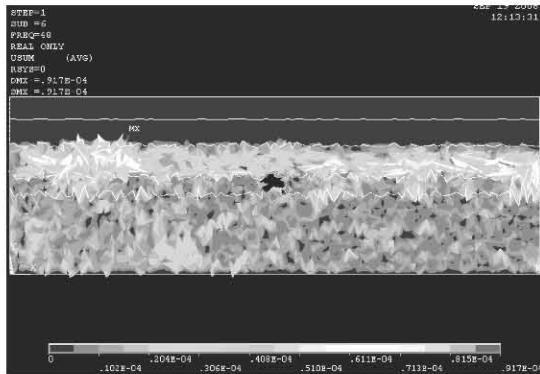


图 7 $F = 48$ Hz 隧道土体位移图

Fig 7 displacement of channel soil with $f = 48$ Hz

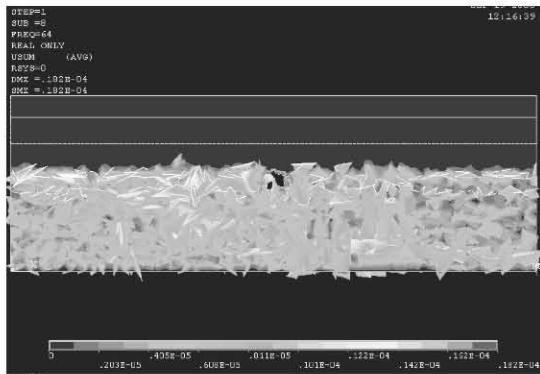


图 8 $F = 64$ Hz 隧道土体位移图

Fig 8 displacement of channel soil with $f = 8$ Hz

由图 6 至 9 可以看出,隧道衬砌周围土体的位移变化比较大。地表振动主要发生在低频载荷的时候,高频时,土层位移变化比较小。

3 矩形隧道有限元分析

3.1 模型建立

矩形隧道的模型如图 9 所示,根据北京地铁 5 号线地铁隧道尺寸,该隧道内壁高度为 4.86 m,宽度为 4.3 m。同样隧道壁厚度即衬砌厚度为 0.3 m。

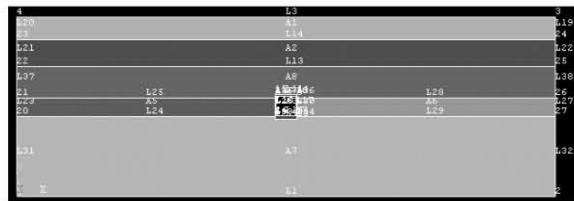


图 9 矩形隧道模型

Fig 9 rectangular tunnel model

对其进行等同于圆形隧道的网格划分和加载计算

3.2 计算

3.2.1 谐响应计算

利用上面圆形隧道中提到载荷对道床表面进行加载,本次有限元分析采用谐响应反应分析过程。频率变化范围为 0—80 Hz,载幅值大小,正弦波幅值取为 15kN。与圆行隧道载荷加载方式相同。加载如图 10 所示

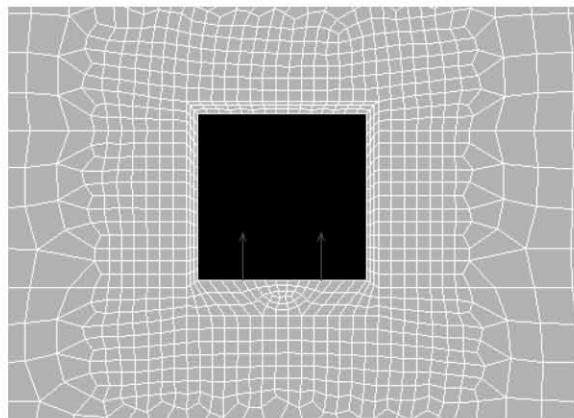


图 10 矩形隧道加载示意图

Fig 10 loading of rectangular tunnel

3.2.2 计算结果显示

图 11 分别为距离地跌中心隧道线 0 m,15 m,30 m 处的地表位移幅值随频率变化的示意图。

由图可以看出地铁交通沿线振动随着与线路中心线水平距离的增大而减小,高频振动分量的衰

减比低频快。同样在离开地铁隧道中心一定距离处存在振动放大区,但是和圆形隧道相比,矩形隧道的放大区为30 m左右。

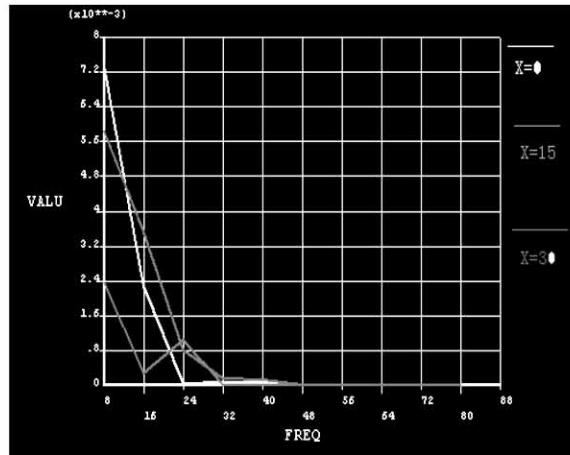


图11 $X=0\text{ m}, 15\text{ m}, 30\text{ m}$ 处的地表位移幅值随频率变化图

Fig 11 Amplitude of ground displacement

表5—7为距离地跌中心隧道线分别0 m, 15 m, 30 m处的幅值列表

表5 $X=0\text{ m}$ 处不同频率载荷所产生的地表位移幅值

Table 5 Amplitude of ground displacement with differern load frequency with $X=0$

频率/Hz	位移幅值/mm
8	7.361 25
16	2.278 37
24	0.315 651 * 10 - 1
32	0.660 543 * 10 - 1
40	0.476 415 * 10 - 1
48	0.594 239 * 10 - 3
56	0.198 564 * 10 - 5
64	0.144 341 * 10 - 5
72	0.135 948 * 10 - 6
80	0.614 967 * 10 - 9

表6 $X=15\text{ m}$ 处不同频率载荷所产生的地表位移幅值

Table 6 Amplitude of ground displacement with differern load frequency with $X=15$

频率/Hz	位移幅值/mm
8	2.351 37
16	0.279 624
24	1.040 47
32	0.964 55 * 10 - 2
40	0.377 925 * 10 - 2
48	0.653 895 * 10 - 3
56	0.742 866 * 10 - 6
64	0.154 325 * 10 - 7
72	0.502 854 * 10 - 9
80	0.375 947 * 10 - 11

表7 $X=30\text{ m}$ 处不同频率载荷所产生的地表位移幅值

Table 7 Amplitude of ground displacement with differern load frequency with $X=30$

频率/Hz	位移幅值/mm
8	5.841 33
16	3.524 65
24	0.799 811
32	0.154 666
40	0.114 924
48	0.262 621 * 10 - 3
56	0.354 608 * 10 - 6
64	0.625 557 * 10 - 7
72	0.145 517 * 10 - 9
80	0.414 495 * 10 - 11

4 结语

(1) 由位移云图可以得出,频率低频荷载能够使土层产生较大的位移变化,而荷载频率越高,土层位移反应幅值越小。

(2) 位移变化较大的区域集中在隧道周围的土体。如果要对土体进行改善的话,应主要针对该部分土体。

(3) 在相同载荷及土质特性条件下,使矩形隧道产生振动的激振力频率低于圆形隧道,

(4) 相同载荷及土层条件下,矩形隧道引起的地表位移振动幅值高于圆形隧道。

(5) 相对于圆形隧道而言,矩形隧道所产生的振动位移幅值衰减较快。

参考文献:

- [1] Alabi B. A Parametric Study on Some Aspects of Ground-borne Vibrations Due to Rail Traffic [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1992, 153(1): 77 - 87.
- [2] Lipin A B, Chigarev A V. The Displacements in an Elastic Half-space When a Load Moves Along a Beam Lying on its Surface [J]. *Journal of Applied Maths Mechanics*, 1998, 62(5): 791 - 796.
- [3] Sheng X, Jones C J C, Petyt M. Ground Vibration Generated by a Harmonic Load Acting on a Railway Track [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 225 (1): 3 - 28.
- [4] Jones C J C, Sheng X, Petyt M. Simulations of Ground Vibration from a Moving Harmonic Load on a Railway Track [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000, 231(3): 739 - 751.
- [5] 潘昌实,李德武,谢正光.北京地铁列车振动对环境影响的探讨[J].振动与冲击,1995, 14 (4): 29 - 34.
- [6] 谢伟平,胡建武,徐 劲.高速移动荷载作用下的轨道-地基系统的动力响应[J].岩石力学与工程学报,2002, 21(7): 1075 - 1078.
- [7] 王 峰.从限界角度分析北京地铁5号线采用国家地铁标准B型车的可行性[J].机电设备与监控.地铁与轻轨,5:45 - 50.
- [8] 杨秀仁,北京地铁盾构隧道设计施工要点[J].都市快轨交通,2004, 6(17).