

# 地震动力作用下土-地铁隧道模型分析

刘妮娜, 门玉明, 刘 洋

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 针对地铁建设中典型的马蹄形断面隧道建立比例尺为 1 : 20 的分析模型, 并采用数值分析方法研究马蹄形隧道处于单一土层及工程所处区域典型的成层土体中时的动力响应。分析结果表明, 在单一土层中由于土体的约束作用, 结构产生的位移以整体沉降为主, 在成层土体中除产生一定的整体变形外还伴随一定的扭转变形。在两种地层情况下马蹄形地铁隧道在地震动力作用下的动力加速度响应、竖向位移均在拱顶处产生最大值, 其中在单一土层中的加速度响应最大值为结构中部加速度的 2.29 倍。结构在顶部和侧板处所产生的动应力响应值也较大。研究表明, 地震动力荷载作用下顶板、侧板均为受力较大部位, 在设计和施工中应予以充分重视。

**关键词:** 土与地下结构相互作用; 马蹄形隧道; 地震荷载; 动力响应

**中图分类号:** P642.2; U452.1<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)03-0295-04

## Model Test of Soil and Metro-tunnels Interaction in Earthquake Activities

LIU Ni-na, MEN Yu-ming, LIU Yang

(School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** A model is set up by the similarity theory as 1/20 of the horseshoe shape metro tunnel. The dynamical response of the model that the tunnel locates in the single soil layer and typical soil layers and affects the earthquake activities is analyzed by the numerical software. The results show that when the tunnel is excavated in the single soil layer, the vertical displacement is similar as settlement. When the tunnel is located at the typical soil layers, there are torsions as well as the settlement. No matter which kind of site the tunnel is, the maximum values of the acceleration, vertical displacement both are got at the top of the tunnel. In the signal layer soil the maximum acceleration is 2.29 times of that at the middle side slab of the tunnel. The principle and shear stresses at the top and side slab of the tunnel are bigger than which those at other points. These show that the top and the side slab are the place which affect the strong force when there are earthquake activities. Some measurement should be taken in these points in the tunnel design.

**Key words:** soil-underground structures interaction; horseshoe shape tunnel; earthquake activities; dynamic response

## 0 引言

西安地铁是西安市“十一五”规划的重点工程, 总长 251.8 km。西安位于 8 度地震烈度区, 是地震活跃的地区之一, 其抗震问题非常突出。除了地面建筑以外, 地下建筑包括地铁工程的抗震问题是

不容忽视的问题。有史料记载以来, 西安地区共发生有感地震 400 余次, 破坏性地震 60 余次。从地质构造上看, 其南面是秦岭北麓大断裂, 北面是凤翔—澄城大断裂, 中间是近东西走向的渭河断陷盆地, 这一地区地壳的垂直升降运动很强烈, 有发生大地震的地质背景<sup>[1-2]</sup>。2008 年 5 月 12 日发生的

收稿日期: 2009-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40534021); 中国地质调查局项目(1212010641403); 陕西省自然科学基金项目(2005D04); 长安大学发展基金项目(0305-1001)

作者简介: 刘妮娜(1975-), 女, 陕西兴平人, 讲师, 工学博士研究生, 从事岩土工程教学与研究。E-mail: dcdgx16@chd.edu.cn

汶川大地震,西安城区震感明显,位于南郊的大雁塔塔顶倾斜 0.62 mm,塔体各层出现不均匀形变及沉降现象。这些震害再一次对西安地铁工程敲响了警钟,提醒我们必须对西安地铁进行抗震分析及抗震设计。

西安地铁隧道埋置于黄土之中,在地震过程中周围土体对地下结构的变形起到了约束作用,提供了一定的抗力,因此,与地面结构相比,地下结构具有较好的抗震能力。但是,这并不意味着在地震时地下结构是绝对安全的。如在 1995 年日本阪神地震中,神户市地铁站及区间隧道遭到了严重破坏。这一事件给认为地下结构抗震能力强的传统观念带来了巨大的冲击,引起了众多地震工作者的极大重视。阪神地震清楚的表明,在地层可能发生较大变形及位移的部位,地铁等地下结构可能会出现严重震害。因此,对地震作用下地铁隧道的抗震问题应给予高度重视。新版《地下铁道施工及验收规范》(GB 50157-2003)指出:“为了实现震后‘尽快恢复交通’的需要,对地铁隧道遭受罕遇地震时的破坏程度进行限制是必要的”<sup>[3]</sup>。

根据西安地铁二号线的实际情况,进行模型试验研究,分析地铁隧道在地震荷载作用下的变形、受力情况,对地铁结构的抗震设计具有重要的参考作用。

1 模型设计及参数选取

1.1 相似理论确定模型参数

试验针对的是动力荷载作用下地铁隧道与土的相互作用,这一试验的相似比例考虑了以下 3 个方面的情况:地下结构模型与原型的相似、场地土模型与原型的相似、地下结构模型与场地模型相似比例的匹配。

考虑物理试验的可行性及采集数据的可靠性,模型箱尺寸取为 1 200 mm(垂直于激振方向)×2 000 mm(沿激振方向)×900 mm(高度方向)。试验的几何相似比确定为 1/20,根据模型土材料和结构模型材料的特性,试验将质量密度相似比例取为 1,弹性模量相似比例为 1/4,应变相似比例 1。由这些基础相似比,根据相似理论原理列出  $\pi$  项式<sup>[4]</sup>,可以计算出各物理量的相似比如下:  $C_\epsilon=1$ ,  $C_\nu=1$ ,  $C_\varphi=1$ ,  $C_t=1/10$ ,  $C_\omega=10$ ,  $C_a=5$ , 其中,  $\epsilon$ 、 $\nu$ 、 $\varphi$  为结构的应变、泊松比和摩擦角;  $t$ 、 $\omega$ 、 $a$  为时间、频率和加速度。结构的弹性模量  $E=3.98\times 10^3$  MPa,重度  $\gamma=0.127$  kN/m<sup>3</sup>。

1.2 地层模拟及边界控制

根据地铁典型地段处的实际地层情况以及地层剖面和隧道的埋置深度,选取图 1 所示的马蹄形断面隧道,考虑结构的对称性及计算的可靠性,选取半边结构进行分析,同时在结构上选取顶部、侧板、角隅及底板中部等共 6 个特征节点(如图 1 中点 1 至 6)作为典型节点进行分析。研究中对这一模型进行了单一土层及典型成层地层条件下的数值分析。

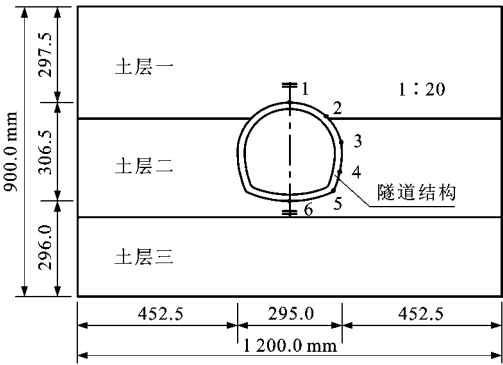


图 1 地层剖面及隧道埋置深度

Fig. 1 Profile of Soil and the Horseshoe Shape Tunnels

考虑边界效应对结构在动力载荷下的影响,在与水平振动方向垂直箱体内壁衬有厚 175 mm 的聚苯乙烯泡沫塑料板,而在沿水平振动方向上,箱体内壁粘贴光滑的聚氯乙烯薄膜,以减小与土层接触面上的摩擦阻力。在模型箱底部粘贴一层碎石,用以增大接触面上的摩擦阻力,以免激振时模型土体与底板间发生相对滑移。泡沫塑料板的动弹性模量为 4.13 MPa,重度为  $1.53\times 10^{-3}$  kN/m<sup>3</sup>,泊松比为 0.4<sup>[5-9]</sup>。

数值分析时将 4 个侧向边界取为加速度值已知的边界,因为在振动过程中模型箱的变形可以忽略不计,沿激振方向模型土 4 个侧面的加速度值与振动台台面的输入加速度一致,模型土底面为竖向固定的边界,顶面为自由变形边界。

1.3 输入激励的选择

分析中选用 Tokyo 地震波作为输入激励。以 X 向作为水平地震输入方向,水平向地震加速度幅值为 0.7 g。

2 计算结果及分析

2.1 单一土层时隧道动力反应分析

计算时采用的均质黄土的地层参数为:弹性模

量  $E_s$  为 25 MPa, 泊松比  $\mu$  为 0.35, 重度  $\gamma$  为 17.8 kN/m<sup>3</sup>, 内摩擦角  $\varphi$  为 18°。

对位于这一土层中的马蹄形隧道应力、位移和加速度响应进行计算分析, 分析结果如图 2~4。

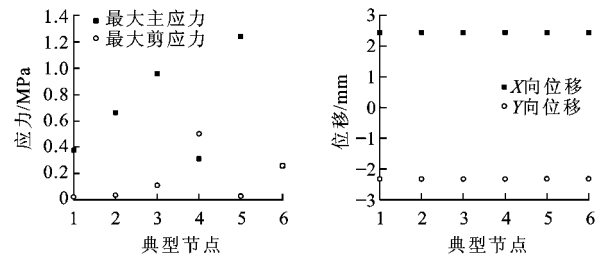


图2 均质土层中  
动应力响应

Fig. 2 Principle and Shear Stress of the Tunnel in Homogeneous Soil

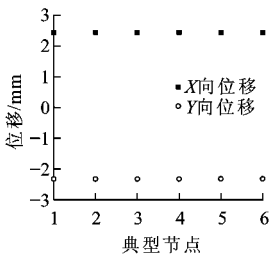


图3 水平和  
竖向位移

Fig. 3 Horizontal and Vertical Displacement

从图 2 中可以看出, 结构侧壁和底板中部处所受的剪应力较大, 最大剪应力达到 500 kPa。由此可见, 在结构设计时应对应这一部位的剪切破坏影响进行充分的考虑。从最大主应力的试验数据中可以看出, 底部角隅(点 5)处的主应力最大, 最大值达到  $1.250 \times 10^3$  kPa, 为侧壁主应力的 4 倍。

图 3 为在匀质土层中时, 结构的典型节点处的水平及垂直位移。由于土体的约束作用, 不同节点处水平位移的数值几乎相等, 反映出模型结构的整体位移较好, 同时竖向位移均为负值且大小相差不大, 表示在地震动力作用下结构产生一定整体沉降。

由图 4 的加速度响应可看出, 结构峰值加速度在结构中部较小, 其值为 0.7, 上部测点的加速度最大, 其值为 1.6, 为中部加速度的 2.29 倍。由此可见, 在地震载荷作用下, 结构的加速度峰值响应激烈的部位所承受的激振力最大, 容易遭受破坏。

2.2 成层土中隧道结构动力响应分析

考虑地铁所处区域的典型地层特点及地铁工程的实际埋置深度, 对埋置在表 1 所示的典型地层中的马蹄形隧道进行了动力响应分析。隧道的埋置深度与图 1 相同。

表 1 土层物理力学参数

Tab. 1 Physical and Mechanical Parameters of Soil							
土层 序号	土层 名称	土层 埋深/m	重度/ (kN · m <sup>-3</sup> )	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模 量/MPa	泊松比
1	填土	3	15.6	27	22	8.7	0.25
2	晚更新 世黄土	3	18.5	15	20	16.7	0.30
3	中更新 世黄土	3	19.8	19	18	18.0	0.35

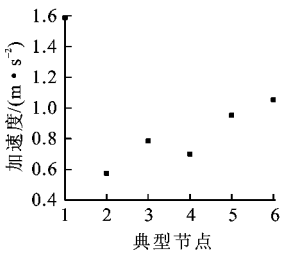


图4 单一均质土层中  
的加速度响应

Fig. 4 Acceleration Response of the Tunnel in the Homogeneous Soil

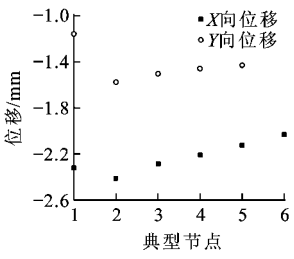


图5 成层土中隧道结构  
典型节点位移响应

Fig. 5 Horizontal and Vertical Displacement Response of the Tunnel in the Layered Soil

图 5 为在成层土中隧道结构的典型节点处水平和竖直方向的位移。由图 5 中可以看出, 在地震动力荷载作用下, 结构在竖向发生了一定量的沉降, 且竖向位移的最大值发生在顶板处。在成层土体中由于土层的约束不同, 结构除仍产生一定的整体位移外, 同时有一定的扭转现象产生。

图 6 为成层土中隧道加速度响应, 由图 6 中可以看出, 其最大响应在马蹄形隧道的顶部, 最大值为 7.8 m/s<sup>2</sup>, 马蹄形隧道底板处加速度为 6.9 m/s<sup>2</sup>, 同时侧板处的加速度也较大, 反映隧道的底板和侧板这些部位在地震时加速度响应激烈, 受到的地震力较大, 在地震时易破坏。

图 7 中对于各个典型节点处的主应力进行分析, 可以看出, 在隧道的顶板处应力最大, 其值为 1.42 kPa, 而最小的主应力在结构的侧板处, 其值为 0.62 kPa。

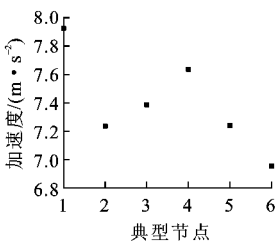


图6 成层土中隧道  
加速度响应

Fig. 6 Acceleration Response of the Tunnel in the Layered Soil

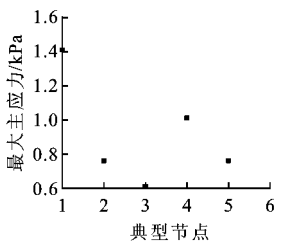


图7 成层土中典型  
节点主应力响应

Fig. 7 Principle Stress Response of the Tunnel in the Layered Soil

3 结语

通过对马蹄形断面的地铁隧道在地震动荷载作用下的反应分析可以得出以下认识:

(1)单一土层中结构的位移以整体位移为主,

在成层土体中, 由于土层对结构的约束作用的大小不同, 结构除产生一定量的整体沉降外还产生了一定的不均匀变形, 这些变形会导致结构产生一定的扭转, 在结构的内部产生剪切作用。

(2)地震荷载下结构的动力响应中, 结构顶板处的主应力最大, 加速度响应也最大, 从分析结果看, 结构的顶板、侧板及角隅处易发生破坏, 因而在设计和施工中对这些部位要引起一定的重视。

地震动荷载作用下地铁结构与土体的相互作用是目前岩土工程研究的一个热点和难点。在这一分析的基础上, 进行竖向地震荷载作用下隧道结构的反应分析及竖向和水平地震荷载耦合作用时地铁结构的反应分析、车站与隧道接口处在地震荷载作用下的反应分析是土与地下结构在动力荷载作用下需要进一步研究的课题, 这些问题的解决对于地下结构的抗震设计会起到重要的指导作用。

(上接第 294 页)

(4)危险性等级根据适宜性原则, 一般取用Ⅲ级制, 分别为危险性大(Ⅰ级)、危险性中等(Ⅱ级)和危险性小(Ⅲ级), 关键在于如何根据表 2 确定各等级的界限分值。界限分值的选取需考虑最重要地质灾害类型的“决定性”, 同时依据不同搭配组合的总评分值进行综合确定。

(5)具体评分方法可采用在网格分块评分基础上的综合评分法, 网格大小可根据具体情况有所不同。对于线性工程, 以不大于  $0.5\text{ km}\times 0.5\text{ km}$  为宜。

(6)在合理确定量化评分因子、权重、分值等因素的基础上, 采用定量方法进行地质灾害危险性分析是可行的。其既可以考虑各灾种的综合影响, 同时又可使评价者跳出纷繁复杂的多因素谜局, 用一个简单明确的“分值”来评价地质灾害的危险程度。

当然, 笔者仅以西安地铁一号线这一具体的线性地下工程的地质灾害评价为例, 对量化评分方法进行了粗浅的理论探讨, 所得出的结论也不一定具有“普适性”, 相信随着定量方法的工程实践和理论

参考文献:

[ 1 ] 门玉明, 石玉玲. 地裂缝研究中的若干重要科学问题[ J ]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(2): 172-176.

[ 2 ] 长安大学. 西安城市快速轨道交通 2 号线穿过地裂缝带的结构措施专题研究[ R ]. 西安: 长安大学, 2007.

[ 3 ] GB 50157-2003, 地下铁道施工及验收规范[ S ].

[ 4 ] 李德真, 王邦樞, 林亚超. 结构模型试验[ M ]. 北京: 科学出版社, 1996.

[ 5 ] 李凯玲, 张亚, 刘妮娜. 土-地铁隧道动力相互作用模型试验分析[ J ]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 534-538.

[ 6 ] 史良. 黄土隧道抗震设计研究[ D ]. 西安: 长安大学, 2005.

[ 7 ] 邱法维, 钱稼茹, 陈志鹏. 结构抗震实验方法[ M ]. 北京: 科学出版社, 2000.

[ 8 ] 庄海洋. 土-地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[ D ]. 南京: 南京工业大学, 2006.

[ 9 ] 王国波. 软土地铁车站结构三维地震响应计算理论与方法的研究[ D ]. 上海: 同济大学, 2007.

研究的深入, 最终将会形成此方法的规范化和统一化, 并以国家标准的形式在规范中予以明确。

参考文献:

[ 1 ] 国土资源部. 地质灾害危险性评估技术要求(试行)[ S ]. 北京: 国土资源部, 2004.

[ 2 ] 宗辉. 地质灾害危险性评估的半定量评价方法[ J ]. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(2): 51-53.

[ 3 ] 王国良. 层次分析法在地质灾害危险性评估中的应用[ J ]. 西部探矿工程, 2006(9): 286-288.

[ 4 ] 周建中, 刘忠敏, 张博. 地质灾害危险性评估及其半定量分析法在罗家寨气田内部集输工程中的应用[ J ]. 中国煤田地质, 2007, 19(1): 47-51.

[ 5 ] 吴亚子. 山区公路地质灾害危险性评估方法研究[ D ]. 成都: 成都理工大学, 2005.

[ 6 ] 张会刚. 西南山区水电站建设用地地质灾害危险性评估方法研究[ D ]. 成都: 成都理工大学, 2005.

[ 7 ] 刘江波. 建设项目地质灾害危险性评估分区定量方法研究[ D ]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.

[ 8 ] 长安大学工程设计研究院. 西安市地铁一号线(后围寨-纺织城)建设工程地质灾害危险性评估报告[ R ]. 西安: 长安大学, 2008.