文章编号: 1006-6616 (2018) 02-0238-06

地裂缝与斜交地铁隧道动力响应数值分析

刘 蕾1,刘雪玲2,周金喜3

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083;

2. 长安大学地质工程与测绘学院,陕西西安 710054;

3. 青海省有色地质矿产勘查局八队,青海西宁 810001)

摘 要:采用 ABAQUS 有限元软件建立马蹄形地铁隧道与地裂缝呈 60°斜交的计算模型研究地铁运行引起的地裂缝附近地层的振动响应。计算结果表明:隧道附近的土体振动较强烈,距离隧道越远,土体的加速度幅值越小;振动响应较强烈的区域,沿隧道纵向约为 120 m,沿竖直方向为隧道下方 15 m,与隧道纵向垂直的水平方向上为隧道左右 20 m 范围;振动在与隧道纵向垂直的水平方向传播时,无地裂缝地带在隧道两侧均匀衰减,地裂缝地带在有地裂缝的一侧振动衰减较快,说明地裂缝对地铁振动在地层中的传播有较强的阻隔作用;地裂缝附近隧道下方土层的振动要比上部土层强烈,传至地表的振动加速度基本衰减为零。

关键词:地裂缝;地铁隧道;列车荷载;动力响应;数值分析

中图分类号: U451 +.5 文献标识码: A

NUMERICAL ANALYSIS ON DYNAMIC RESPONSE OF THE OBLIQUE METRO TUNNEL IN GROUND FISSURE AREA

LIU Lei¹, LIU Xueling², ZHOU Jinxi³

(1. College of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shannxi, China;

3. No. 8 Team of Geology and Mineral Resources Bureau for Non-Ferrous Metals of Qinghai Province, Xining 810012, Qinghai, China)

Abstract: A numerical analysis model, with an oblique crossing of 60° between horseshoe-shaped metro tunnel and ground fissure, was built with ABAQUS to study the dynamic response of the oblique metro tunnel in ground fissure area under vibration load of metro. The results show that the soil vibration near the tunnel is stronger, and the acceleration amplitude of the ground near the tunnel are greater than those far away from the tunnel. The area with strong vibration response is within 120 metres along the metro tunnel, 15 metres under the tunnel in vertical direction, and 20 metres in both sides of the tunnel. Ground fissure has a strong barrier effect on the propagation of subway vibration in the soil. The vibration of the soil below the ground fissure is stronger than that of the upper soil layer, and the vibration acceleration on the ground level of the soil nearly reduces to zero.

Key words: ground fissure; metro tunnel; train load; dynamic response; numerical analysis

0 引言

为缓解地面交通压力, 西安已建成多条地铁

线路,地铁运行引起的振动对邻近建筑物的影响 也为人们所关注。虽然国内外学者针对地铁列车 振动在地层中的传播规律已经开展了大量的研究 工作^[1-8],取得了较多的成果,但是西安广泛分布

基金项目:国家自然科学基金项目 (41172257);青海省自然科学基金 (2017-ZJ-909);青海省应用基础研究 (2014-ZJ-706) 作者简介:刘蕾 (1983-),女,博士,主要从事地质工程及安全工程等方面的研究。E-mail:46744214@qq.com 收稿日期:2017-08-28;修回日期:2017-12-28 范二平编辑 的地裂缝使得地铁振动的传播具有特殊性。杨 觅^[9]建立了不同衬砌形式下的隧道—地裂缝—地 层相互作用模型,分析了地裂缝邻近土体振动的 基本特征,以及正交隧道断面尺寸和形状对振动 响应的影响。刘蕾^[10]通过物理模型试验的方法研 究了地铁列车荷载作用下地裂缝与斜交地铁隧道 的动力相互作用特性。袁立群^[11]研究了地裂缝与 正交马蹄形地铁隧道的动力响应规律。

总体来讲,目前地铁列车荷载对地裂缝环境 下地铁隧道动力作用的研究成果较少。已建或规 划的西安地铁线路中,地铁多处以斜交的形式穿 越地裂缝。拟通过数值模拟方法,对地铁列车荷 载作用下地裂缝与斜交马蹄形地铁隧道呈 60°斜交 时地裂缝附近的土层振动响应进行研究。

计算模型 1

1.1 模型尺寸

隧道模型断面形状采用马蹄形, 与实际地铁 隧道一致,断面如图1所示。模型长度取为240 m, 包含2个车身长度。模型宽度应满足不小于8倍隧 道直径^[12],同时,也应考虑土体剪切波长的影响。 根据西安地铁二号线土体的剪切波速测试结果^[13], 地铁埋深范围内土体的最大剪切波速约为v =360 m/s。地铁诱发的振动频率范围为1~80 Hz, 本次模拟取振动频率为10 Hz,则土中剪切波的最 大波长约为 λ = v/f = 360/10 = 36 m。模型边界距 隧道中心线的距离至少为一个波长,即36m。综 合考虑有限元模型规模和计算精度,取模型宽度 为173 m, 深度 50 m。隧道顶部埋深取 15 m。计 算模型中设置地裂缝,倾角为80°,地铁隧道与地 裂缝夹角为60°。计算模型如图1所示。

1.2 模型材料参数与本构关系

(1) 土层及隧道衬砌结构材料参数

模拟中土层的计算参数采用西安地裂缝 f6 地 段的参数,根据勘察结果^[13],计算参数见表1。 模型中按实际情况对土体进行了分层。地铁隧道 衬砌的计算参数为:弹性模量 30×10³ MPa,密度 2500 kg/m³, 泊松比 0.17。

(2) 动弹性模量与动泊松比

模型中弹性模量和泊松比采用动弹性模量和 动泊松比,利用实测的地层剪切波速结果反算土 体的动力参数^[14],计算得出各土层的动弹模和动 泊松比。土层动弹模:杂填土117 MPa,黄土



Fig. 1 Schematic diagram of test model (unit: cm)

表 1 西安地铁二号线典型地段地层参数

Table 1 Formation parameters of typical ground

fissures in Xi' an metro line 2						
土层	重度/	弹性模量/	泊松比	粘聚力/	内摩	埋深/
	(kN/m^3)	MPa	μ	kPa	擦角	m
杂填土 (Q ^{ml})	17.3	1.2	0.35	16	11°	1.7
黄土 (Q ^{al})	18.6	3.5	0.35	24	19°	4.6
黄土 (Q ₃ ^{eol})	19.2	4.0	0.30	30	21°	13
古土壤(Q ^{el})	19.6	4.5	0.32	35	23°	16.4
黄土 (Q ₂ ^{eol})	19.6	8.0	0.33	40	26°	20
粉质粘土 (Q ₂ ^{al})	19.6	10.0	0.30	40	26°	50

(Q^{al}) 220 MPa, 黄土 (Q^{eol}) 274 MPa, 古土壤 304 MPa, 黄土 (Q₂^{eol}) 305 MPa, 粉质粘土 322 MPa。动 泊松比:杂填土 0.273,黄土 (Q^{al}) 0.271,黄土 (0^{eol}_{2}) 0.242, 古土壤 0.251, 黄 土 (Q^{eol}_{2}) 0.213, 粉质粘土 0.211。

(3) 本构关系

根据目前的相关研究成果,地铁运行造成的 隧道---土层的振动属于小能量振动,土体基本处 于弹性变形范围内。模拟中土体的本构模型采用 线弹性模型,隧道衬砌选择弹性本构关系。

1.3 单元尺寸与类型

动力分析划分网格时的单元尺寸应该考虑介 质中的波长^[15]。模拟模型沿轨道方向和水平向单 元尺寸为1.25 m,竖向约1.4 m,其他区域单元网 格的最大边长为 2.5 m。单元类型为 C3D8R 单元, 即8节点六面体线性缩减积分单元。

1.4 边界条件

根据无线延伸方向不同,设置6种模式无限单 元(见图2),分别模拟 x 向无限延伸、y 向无限延 伸、z 向无限延伸的情况。模型顶部采用自由边界。



图 2 无限单元示意图 Fig. 2 Schematic diagram of infinite element

1.5 材料阻尼

由于土体阻尼的影响,实际地层振动的总能 量是有衰减的。结构动力分析时采用瑞利 (Rayleigh)阻尼。阻尼矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} C \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} M \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中: [C] 为阻尼矩阵; [M] 为质量矩阵; [K] 为刚度 矩阵; $\alpha \pi \beta$ 分别为与质量和刚度相关的阻尼系数。

在数值计算中通常用体系的前两阶自振频率 和阻尼比来计算阻尼系数 α 和 β, 计算公式如下:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2\omega_i\omega_j(\omega_j\xi_i - \omega_i\xi_j)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \\ \beta = \frac{2(\omega_i\xi_i - \omega_j\xi_j)}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \end{cases}$$
(2)

式中: $\omega_i \, \omega_j \, \beta$ 别为第;阶和第 j阶振型的圆频率; $\xi_1 \, \pi \, \xi_2 \, \beta$ 别为第 i 阶和第 j 阶振型的阻尼比。

采用文献[16]中的方法确定材料阻尼,利用 ABAQUS/Standard 选择 Lanczos 方法计算得到自振频 率 $f_1 = 0.2093$ Hz, $f_2 = 0.5201$ Hz, 计算 α 、 β 。

对于土体的阻尼比,通过查阅文献[17]获知, 西北地区黄土的阻尼比范围是 0.02~0.25。由于 地铁振动属于小能量的振动,阻尼比也相对较小, 本文取 $\xi_1 = \xi_2 = 0.05$ 。根据式(2)计算得到: α = 0.0942, β = 0.0219。地铁隧道衬砌的阻尼比也 取为 0.05,则阻尼系数取值与土体相同。

1.6 加载设计

地铁振动响应有限元模拟首先应明确列车荷载,再将列车荷载施加于隧道底部。本文地铁荷载采用的是车辆一轨道一浮置板竖向耦合系统作 用在隧道仰拱面上的集中力时程,二系弹簧阻尼 系统模型见图3。

浮置板每块长 24.98 m, 伸缩缝 20 mm, 隔振



图 3 车辆荷载计算模型 Fig. 3 Computational model of metro load

器横向间距2m,纵向间距1.25m。对每块浮置板 而言,隔振器间距1.25m,隔振器距板端0.615m, 所有板的隔振器排列相同,共输出192个隔振器位 置处的仰拱所受动荷载。

在有限元计算中建立了与之相匹配的模型, 即模型沿轨道方向为240 m,沿该方向的单元尺寸 为1.25 m。在对应位置的节点上施加集中载荷, 选用指定载荷幅值。

2 试验结果与分析

利用加速度的运算结果研究分析地铁诱发振动在地层中的传播规律,在模型中布设了多条测线和测点来分析土体振动响应,具体位置如图 4 所示。



Fig. 4 Layout of each measuring point and line

2.1 列车行驶过程对土层振动的影响

列车行驶过程中土体的振动情况由测量点 1— 4 的结果进行分析,其中测点 1、测点 2 埋深为 10 m,测点 3、测点 4 位于隧道底部 8.1 m。

测量点1-4竖向加速度时程曲线如图5所示。





从图中可以看出, 在列车经过测点位置时, 各测点的振动较强烈, 时间约为 5.4 s。列车由上 盘开往下盘的过程中,由于测点 2、4 位于上盘端 部附近,开始时这两处测点加速度较大,列车驶 离测点所在位置后加速度急剧减小;测点 1、3 位 于下盘端部附近,开始时距离列车较远,这两处 测点的加速度较小,随着列车的运行,加速度逐 渐增大,尤其是列车跨越地裂缝进入下盘后,加 速度大幅增长,说明地裂缝对振动的传播有一定 的阻隔作用。从垂向上看,隧道下部土体的振动 明显强于隧道上部土体。

2.2 振动沿水平方向的传播规律

地铁振动在土体中沿垂直隧道纵向的传播规 律由图4中测线一和测线二的振动加速度幅值进行 分析。其中,测线一距离模型端部120m,垂直隧 道纵向,该测线跨越地裂缝;测线二距下盘端部 30m,垂直隧道纵向,未跨越地裂缝。

测线一和测线二的加速度幅值分布曲线如图 6 所示。



从图 6 可以看出,两条测线的竖向加速度幅值 均呈中间大、两侧小的分布规律。其中,测线一的 竖向加速度振幅最大值位于两地铁隧道中线正上方, 测线二的竖向加速度振幅最大值位于运行隧道正上 方。测线一位于地裂缝地带,与地裂缝相交的位置 位于两隧道中间,即图 6 中 *x* = 0 处,地铁振动在该 部位最强烈,而测线二远离地裂缝,最大振动量发 生在运行隧道正上方。由于地裂缝的隔振作用,测 线一的加速度幅值明显低于测线二。

随着距隧道距离的增加,两条测线的振动加 速度均迅速减小。隧道外侧 20 m 的范围内,加速 度幅值衰减速度较快,隧道外侧 20 m 以外的区域 曲线较平缓,加速度幅值衰减缓慢。

从垂直隧道的方向来看,测线二的加速度幅 值分布呈左右对称的规律,而测线一的加速度幅 值分布左右不对称,模型中线右侧的加速度幅值 随距离的增加急剧减小,左侧的加速度幅值减小 速度相对较缓。其原因在于,隧道与地裂缝呈斜 交的形式,隧道左侧不存在地裂缝,隧道右侧存 在地裂缝,由于地裂缝的存在造成了右侧加速度 的急剧衰减,说明地裂缝对振动沿水平方向的传 播有较强的衰减作用。

2.3 沿竖直方向土体中振动的传播规律

地铁运行产生的振动在地层竖向的传播规律 由图 4 中测线三的结果进行分析。图 7 为列车平稳 运行后不同深度竖向加速度的幅值分布曲线。





从图中可以看出,隧道附近的振动最为强烈,隧道底部土层的加速度幅值大于隧道顶部土体的加速度幅值(约为1.5倍)。隧道上部土体中,随着埋深的减小,加速度幅值逐渐减小,尤其隧道顶部至埋深2.5 m 的范围内,加速度衰减幅度较大,地表至埋深2.5 m 处减幅变小,地表的竖向加速度幅值约为8×10⁻⁴ m/s²。隧道下部土体中,随着埋深的增大,加速度幅值逐渐减小,其中距隧道底部15 m 范围内加速度衰减幅度较大,减幅约为9.26×10⁻⁴ (m/s²)/m;15 m 以下,减幅明显变缓,约为5×10⁻⁵ (m/s²)/m,至隧道下约23 m时加速度减为零。

3 结论

采用数值模拟的方法研究西安地铁运行引起

的地层振动问题,针对地裂缝与地铁隧道斜交 60°的情况,重点分析了振动加速度的变化与分布规律,得出的主要结论如下:

(1)隧道附近的土体振动较强烈,距离隧道 越远,土体的加速度幅值越小;

(2)振动响应较强烈的区域,沿隧道纵向约为120m,沿竖直方向为隧道下方15m,与隧道纵向垂直的水平方向上为隧道左右20m范围;

(3) 地裂缝对地铁振动在地层中的传播有一 定的阻隔作用,振动在与隧道纵向垂直的水平方 向传播时,有地裂缝的一侧振动衰减较快;

(4)地裂缝附近隧道下方土层的振动要比上 部土层强烈,振动由隧道往下部地层传播过程中, 振动在隧道下方15m范围内迅速衰减,振动由隧 道往上部地层传播过程中,振动强度逐步衰减, 传至地表的振动加速度基本衰减为零。

参考文献/References

[1] 潘昌实,谢正光.地铁区间隧道列车振动测试与分析 [J].
 土木工程学报,1990,23 (2):21~28.
 PAN Changshi, XIE Zhenguang. Measurement and analysis of

vibrations caused by passing trains in subway running tunnel
[J]. China Civil Engineering Journal, 1990, 23 (2): 21 ~
28. (in Chinese with English abstract)

- [2] 张玉娥,白宝鸿.地铁列车振动对隧道结构激振荷载的模拟[J].振动与冲击,2000,19(3):68~70,76.
 ZHANG Yu'e, BAI Baohong. The method of identifying train vibration load acting on subway tunnel structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(3):68~70,76. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘卫丰,刘维宁, DEGRANDE G. 地铁列车运行引起地表 振动的预测模型及其试验验证 [J]. 振动工程学报,2010, 23 (4):373~379.

LIU Weifeng, LIU Weining, DEGRANDE G. Experimental validation of a numerical model for prediction of metro traininduced ground-surface vibration [J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23 (4): 373 ~ 379. (in Chinese with English abstract)

 [4] 莫海鸿,邓飞皇,王军辉.营运期地铁盾构隧道动力响应 分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2006,25 (S2):3507 ~3512.

> MO Haihong, DENG Feihuang, WANG Junhui. Analysis of dynamic responses of shield tunnel during metro operation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (S2): 3507 ~3512. (in Chinese with English abstract)

 [5] 唐益群,王艳玲,黄雨,等.地铁行车荷载下土体动强度和动应力-应变关系 [J].同济大学学报(自然科学版), 2004,32(6):701~704. TANG Yiqun, WANG Yanling, HUANG Yu, et al. Dynamic strength and dynamic stress-strain relation of silt soil under traffic loading [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32 (6): 701 ~ 704. (in Chinese with English abstract)

- [6] Forrest J A, Hunt H E M. A three-dimensional tunnel model for calculation of train-induced ground vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294 (4/6): 678 ~ 705.
- Hussein M F M, Hunt H E M. A power flow method for evaluating vibration from underground railways [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293 (3/5): 667 ~ 679.
- [8] 熊良宵,李天斌,刘勇. 隧道地震响应数值模拟研究 [J]. 地质力学学报,2007,13 (3):255~260.
 XIONG Liangxiao, LI Tianbin, LIU Yong. Numerical simulation of seismic response at the entrance of the unsymmetrical loading tunnel [J]. Journal of Geomechanics, 2007,13 (3):255~260. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨觅,门玉明,袁立群,等.地裂缝环境下不同隧道型式的 地铁振动响应数值分析 [J].防灾减灾工程学报,2016, 36 (2):188~195.

YANG Mi, MEN Yuming, YUAN Liqun, et al. Numerical analysis of subway vibration responses for different tunnel types in ground fissure areas [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36 (2): 188 ~ 195. (in Chinese with English abstract)

[10] 刘蕾,刘雪玲,马涛. 地裂缝与斜交地铁隧道动力相互作用试验研究 [J]. 地质力学学报,2017,23 (5):654~660.

LIU Lei, LIU Xueling, MA Tao. Dynamic response analysis of the oblique metro tunnels in ground fissures area [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (5): 654 ~ 660. (in Chinese with English abstract)

 [11] 袁立群,门玉明,刘妮娜,等.与地裂缝正交马蹄形地铁隧 道动力响应模拟分析 [J].防灾减灾工程学报,2015,35
 (3):354~358.

> YUAN Liqun, MEN Yuming, LIU Ni'na, et al. The dynamic response simulation analysis of U-shaped metro tunnel orthogonal

with the ground fissure [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35 (3): 354 ~ 358. (in Chinese with English abstract)

- [12] 吕爱钟,蒋斌松,尤春安.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):26~30.
 LV Aizhong, JIANG Binsong, YOU Chun'an. Study on range of mesh about finite element for back analysis of displacement [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32 (1):26~30. (in Chinese with English abstract)
- [13] 长安大学工程设计研究院.西安市城市快速轨道交通2号 线沿线地裂缝详勘报告[R].西安,2007.
 Research Institute of Engineering Design, Chang' an University.
 The detailed survey of the ground cracks along the 2 line of Xi' an urban rapid rail transit line [R]. Xi' an, 2007.
- [14] 闫韶兵.工程地质评价空间模拟方法研究与应用 [D].青岛:中国海洋大学,2007.
 YAN Shaobing. Research on spatial simulation method of engineering geologic evaluation [D]. Qingdao: Ocean
- University of China, 2007. (in Chinese with English abstract)
 [15] 宋春雨,陈龙珠,夏字峰. 单桩复合地基上块体振动特性 分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24 (2): 134 ~140.
 SONG Chunyu, CHEN Longzhu, XIA Yufeng. Dynamics of block on composite foundation with single pile [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24 (2): 134 ~ 140. (in Chinese with English abstract)
- [16] 杨觅. 地裂缝带地铁动荷载作用下隧道-地层动力响应数值 模拟研究 [D]. 西安:长安大学,2014.
 YANG Mi. Study on the dynamic response numerical simulation of tunnel and stratum due to subway moving loads in ground fissures area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [17] 骆亚生.中国典型黄土动力特性及其参数的试验分析[D].西安:西安理工大学,2000.

LUO Yasheng. Test analysis of dynamic characteristic and parameter of some typical loess in China [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2000. (in Chinese)