

全国中文核心期刊

ISSN 1000-3665
CN 11-2202/P

2010 **4**

第37卷 总234期 Vol. 37 Total 234

水文地质工程地质 韩济若

HYDROGEOLOGY & ENGINEERING GEOLOGY

编 辑 李铁博
副 编 刘宜强 李铁博
主 审 刘 群
总 编 李 敏 田珠江 徐万忠 李文新
总 编 辑 侯金武



科普宣传片

DVD
VIDEO

● 滑坡危害及其预防

● 泥石流沟识别和避灾



中国地质环境监测院 联合编印
地质出版社
国土资源电子音像出版社 出版发行

ISSN 1000-3665



9 771000 366106

《地质灾害防灾避险科普宣传片》在京首发

中华人民共和国国土资源部主管

中国地质环境监测院主办

《水文地质工程地质》第四届编委会

(按姓氏笔画为序)

- 指导专家:** 王志敏 王秉忱 刘广润 卢耀如
李坤芬 江集福 张宗祜 张宏仁
林学钰 袁道先 薛禹群
- 编委会主任:** 侯金武
- 副主任:** 李凤荣 沈照理 姜建军
- 委员:** 万力 于青春 于海潮 王广才
王文科 王述俊 王金生 王明玉
王思志 王楠新 王贵珍 王瑞久
叶为民 田廷山 刘丹 刘建
刘长礼 刘传正 刘再华 朱纪华
孙云伟 孙占学 孙亚军 任理
李彤 李广贺 李文鹏 李国敏
李烈荣 许永义 汤洁 汤德生
朱龙仓 杜东菊 吴吉春 吴青松
吴宝伟 吴国祿 吴紫江 宋献方
何成成 何吉洲 沈照理 张卫东
张永波 张明霞 张健智 张忠群
张新兴 陈建生 陈崇春 陈梦然
陈鸿汉 陈桂华 傅磊 周训
周文斌 周启友 周永章 周仰灶
梅健 梅敏 梅立中 武强
武选民 范志和 范宏喜 钟佐康
钟自然 姜建军 胡朝文 夏元友
郭纯青 郭永涛 赵勇胜 哈承信
段永侯 官辉力 施斌 钱会
徐炬力 隋江平 陶成法 侯金武
袁洪峰 唐常源 唐群明 麻峙达摩
殷斌 殷坤忠 殷跃平 曹剑峰
林子夜 杨文峰 杨再生 杨宝平
童长江 曹安怀 彭建兵 焦超超
塔新景 黄润秋 黄志兴 蒋良文
谢宇中 雷明堂 魏子新 穆桂金
蔡健勋 Warren W Wood(USGS)

- 主编:** 陈梦然
执行主编: 苏嘉法
副主编: 田廷山 李文鹏 刘传正 何成成 武选民

《水文地质工程地质》编辑部

- 主任:** 范宏喜
副主任: 李善峰
编辑: 张明霞 江美华 张若琳
英文审校: 周训 李昂
编务: 姜建英

水文地质工程地质

刊名题字 郭沫若

中华人民共和国国土资源部主管
中国地质环境监测院主办



目次

水工环论坛

加强科普宣传主动防范地灾

李铁铮

水文地质

论跨国水体及其和谐开发

李佩成 郝少英(1)

基于同位素的豫北平原浅层地下水形成的认识

苗晋祥(5)

扬泰地区地下水硫同位素组成特征及其意义

李云 姜月华 周迅等(12)

华北东部平原地下水垂向循环的水化学与同位素示踪

卿永霞 王贵珍 高业新(18)

潮汐作用下的滨海湿地浅层地下水动态变化

高茂生 叶思源 史贵军等(24)

北京市泉水变化状况及原因分析

王小娜 王金生 吴东杰等(28)

北京郊区浅层地下水总硬度变化趋势及其机理浅析

姜体胜 杨志山 黄振芳等(33)

工程地质

地震动力作用触发的斜坡崩塌高差效应研究

崔晋鹏 胡瑞林 殷跃平等(38)

江苏太仓浅部淤泥质土层的工程地质特征

张云 薛禹群 吴吉春等(43)

层状岩体围岩变形破坏特征及稳定性评价

夏彬伟 陈果康 房等(48)

吉林地区草炭土物理力学指标相关性试验研究

刘桂林 傅磊(53)

地震荷载作用下地铁盾构隧道动力响应分析

刘斌 门玉明 彭建兵等(58)

震后黄土动力学特性试验研究

王峻 王强 王杰民(63)

抗滑刚架桩挡墙的设计与应用

尉学勇 蔡成斌 刘卫民等(68)

桩承式路堤土拱效应的改进 Terzaghi 方法

余闻 刘松玉 杜广印(74)

云南哀牢山某滑坡滑体与滑带土工程性质试验研究

宋会琳 谢勤 齐剑峰等(77)

地震荷载作用下地铁盾构隧道动力响应分析

刘妮娜, 门玉明, 彭建兵, 储春妹, 刘洋

(长安大学地质工程与测绘工程学院; 西部地质资源与地质工程教育部重点实验室;
国土资源部岩土工程开放研究实验室, 西安 710054)

摘要: 动力荷载作用下的土与地下结构的相互作用是工程研究的一个热点。基于动力学基本方程, 运用有限单元法和振型迭加法, 对位于黄土地区的盾构地铁隧道在 El Centro 地震波动力荷载作用下的动力反应进行弹塑性数值分析。从计算结果分析得出在 El Centro 地震波作为动力激励时地铁盾构隧道的动力反应特征。分析得出盾构隧道在地震波作用下拱底所产生的加速度最大, 且这一部位的动应力最大。同时隧道结构内侧的累积变形大于其外侧所对应各点的累积变形, 且最大变形出现在隧道结构的侧墙部位。

关键词: 土与地下结构相互作用; 盾构隧道; 地震荷载; 动力响应

中图分类号: U425.1¹ 文献标识码: A 文章编号: 1000-3665(2010)04-0058-05

地下结构的抗震分析常用方法有两种, 一是利用有限元法进行数值模拟分析, 另一种是建立地下结构的模型进行振动台试验。数值模拟由于其经济且结果可靠而在近年得到了较多的应用, 其分析结果对于地下结构的设计及研究起到了一定的指导作用^[1-4]。

西安是地震活跃的地区, 其抗震设计是这一地区结构设计的一个重要问题, 2008 年的汶川地震在这一地区也产生了一定的影响。目前正在建设的地铁 2 号线是西安的一个重要市政工程, 对其抗震设防进行研究是非常必要的^[5]。

1 基本理论

1.1 动力有限元基本方程

动力荷载作用下的运动方程根据达朗贝尔直接平衡法、虚功原理建立其表达式为^[6-9]:

$$M\ddot{a}(t) + C\dot{a}(t) + Ka(t) = Q(t) \quad (1)$$

式中: $\ddot{a}(t)$ 、 $\dot{a}(t)$ 、 $a(t)$ ——系统的节点加速度向量、节点速度向量和节点位移

向量;

M 、 C 、 K 、 $Q(t)$ ——系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和节点荷载向量, 分别由各自的单元矩阵和向量组成。

1.2 质量矩阵

运动方程式(1)中的质量矩阵 M 可以分为一致质量矩阵(或协调质量矩阵)和集中质量矩阵两种形式, 分析中根据模型特点采用一致质量矩阵。

一致质量矩阵的单元质量矩阵为:

$$M^e = \int_{V^e} N^T \rho N dV \quad (2)$$

式中: N ——形函数矩阵。

将上式中的单元质量矩阵分配在对应的结点上就得到了对应的集中质量矩阵在每个节点上的单元质量矩阵。

1.3 阻尼矩阵

阻尼矩阵在一般情况下依赖于振动频率, 而在实际分析中通常将实际结构的阻尼矩阵简化为质量矩阵 M 和刚度矩阵 K 的线性组合。这种阻尼称为瑞利阻尼(Rayleigh), 表达式为:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3)$$

式中: α 、 β ——不依赖于频率的常数, 其表达式为:

$$\alpha = \frac{2(\xi_j \omega_i - \xi_i \omega_j)}{(\omega_i + \omega_j)(\omega_i - \omega_j)} \omega_i \omega_j \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_i \omega_i - \xi_j \omega_j)}{(\omega_i + \omega_j)(\omega_i - \omega_j)}$$

只要实测两种振型下的频率 ω 和阻尼比 ξ , 便可

收稿日期: 2009-09-24; 修订日期: 2010-02-09

基金项目: 长安大学发展基金(0305-1001); 陕西省自然科学基金(2005D04); 国家自然科学基金项目(40772183); 国土资源大调查项目(1212010641403); 国家自然科学基金重点项目(40534021)

作者简介: 刘妮娜(1975-)女, 讲师, 在职博士研究生, 主要从事地质工程及岩土工程教学及研究工作。

E-mail: dcdgx16@chd.edu.cn

以根据式(4) 计算出 α 、 β 。模型的频率根据动力模态分析求得, 阻尼比根据前期的研究选用 0.01。

1.4 运动方程的求解方法

运动方程式(1) 为常系数二阶常微分方程组, 实际应用中有有限元数值分析可以用振型叠加法和直接积分法。用振型叠加法求解线性动态问题非常有效。直接积分法是指在积分运动方程之前不进行方程形式的变化, 而直接进行逐步数值积分。地震荷载作用时的结构动力方程求解采用振型叠加法计算。

2 分析模型设计及参数选取

2.1 模型参数的选取

西安地铁 2 号线中取其典型盾构隧道形式。土层及隧道的物理力学性质如表 1 所示。

表 1 土层及隧道物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils and tunnel

土层序号及名称	重度 (kNm^{-3})	弹性模量 (MPa)	泊松比	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^{\circ}$)	埋深 (m)
①杂填土(Q_4^{ml})	17.3	1.20	0.35	16	10	1.70
②黄土(Q_4^{al})	18.1	3.5	0.35	24	18	4.60
③黄土(Q_3^{eol})	18.5	4.0	0.30	30	20	13.0
④古土壤(Q_3^{cl})	19.0	4.5	0.30	35	22	16.4
⑤黄土(Q_2^{eol})	19.2	8.0	0.30	40	25	20.0
⑥粉质粘土(Q_2^{cl})	19.2	10	0.30	40	25	30.0
隧道	25	31.5	0.198	3000	56	20

2.2 有限元计算模型

实际分析中选取 $100m \times 50m \times 60m$ 的计算区域, 计算模型如图 1 所示。

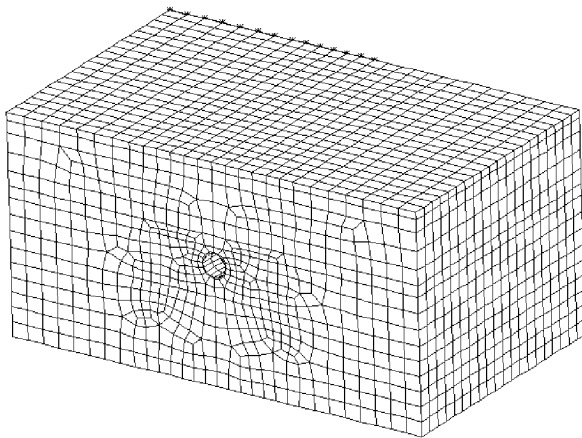


图 1 计算模型图

Fig. 1 Model of FEM

分析中考虑有限元计算精度的要求及计算的可能

性, 共划分计算单元 16 720 个。黄土与隧道结构均采用五面体三维应力单元模拟, 网格的大小采用从边界到隧道附近逐渐加密的原则, 为了模拟地震运动对隧道的作用, 采用固定基岩面, 场地两侧边界竖向约束。

2.3 材料特性

具体选用的场地及隧道材料参数均按照西安正在兴建的地铁 2 号线进行分析, 其材料特性见表 1, 图 2 为分析场地的土层剖面图。

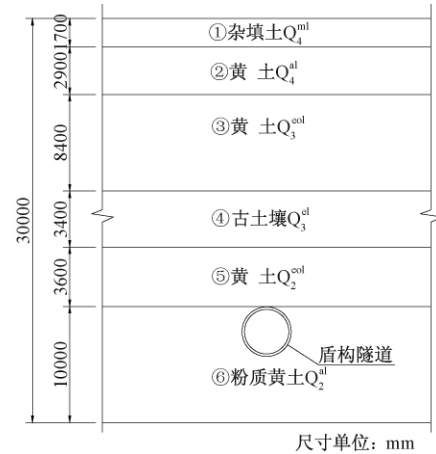


图 2 土层剖面示意图

Fig. 2 Profile of the soil

分析中假设黄土地基及隧道材料为理想弹塑性材料, 服从相关联流动准则。采用线性 Mohr - coulomb 屈服函数:

$$F = \sqrt{3}\alpha I_1 + \sqrt{3}J_2 - \sigma_y = 0 \quad (5)$$

式中: I_1 ——应力第一不变量;

J_2 ——应力偏量第二不变量;

α 和 σ_y 可用线性 Drucker-Prager 屈服准则表示为抗剪强度参数 c 和 φ 的函数, 其表达式为:

$$\alpha = \frac{\sin\varphi}{\sqrt{9 + 3\sin^2\varphi}}$$

$$\sigma_y = \frac{9c\cos\varphi}{\sqrt{9 + 3\sin^2\varphi}} \quad (6)$$

由表 1 中土层及隧道材料的 c 和 φ 值代入公式(6) 即可求得 α 和 σ_y 。

2.4 地震荷载

依据抗震规范, 西安抗震设防烈度为 VIII 度, 设计基本地震加速度值为 $0.2g$, 分析中采用 EL Centro 南北向适合二类场地土的地震波, EL Centro 波持续时间 30s, 时间间隔 0.02s, 最大峰值加速度为 $3.417m \cdot s^{-2}$, 其加速度时程如图 3 所示。

计算中将实际地震记录的峰值折算成所需的基本

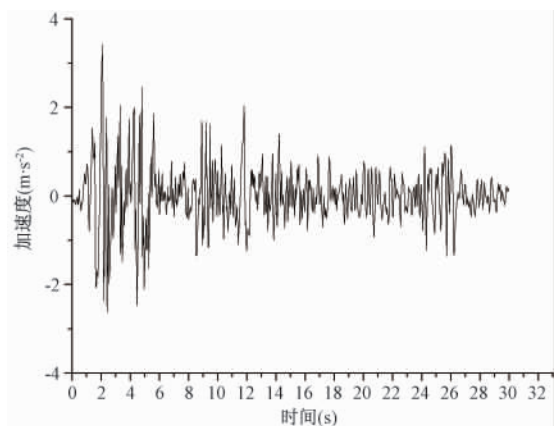


图3 EL Centro地震波加速度时程曲线
Fig.3 Acceleration time curve of EL Centro earthquake wave

烈度。折算系数的计算公式为^[10-11]:

$$a'(t) = \frac{a'_{max}}{a_{max}} a(t) \quad (7)$$

式中: $a(t)$, a_{max} ——原记录的地震加速度曲线及峰值;

$a'(t)$, a'_{max} ——调整后的地震加速度曲线及峰值。

3 数值模拟结果与分析

3.1 分析剖面与典型点的选取

地震波作用时盾构隧道中考虑结构对称性所取的5个典型点进行分析,图4为所选取5个典型分析点示意图^[10-13]。

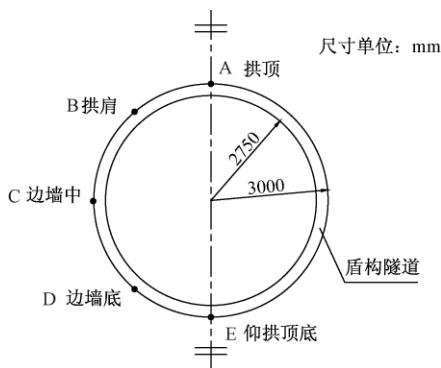


图4 隧道结构典型分析点示意图
Fig.4 Points of tunnel

为了在数据分析中排除边界条件的影响,在分析中取隧道的3个剖面,如图5所示。

3.2 加速度分析

3个剖面的加速度在拱顶处(A点)的时程反应曲

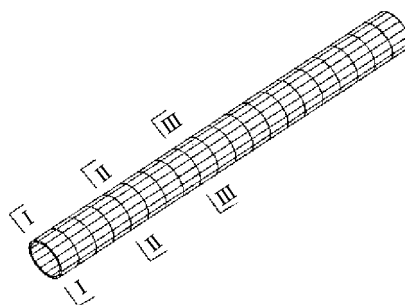


图5 隧道分析剖面选择图
Fig.5 Profiles of tunnel

线如图6所示,其中表现出3个剖面处的加速度时程与输入的地震动能够很好地吻合,说明计算模型理想地模拟了地下盾构隧道与土体在动力荷载下的相互作用。

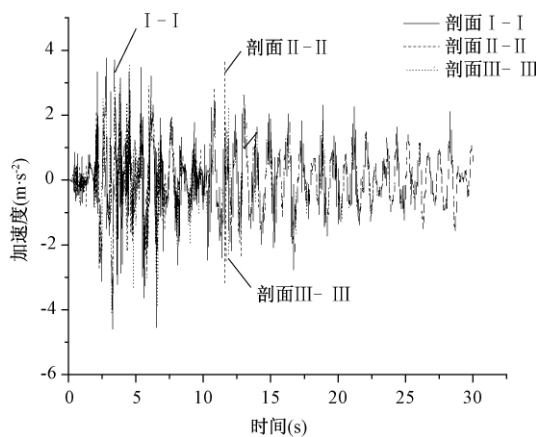


图6 3个剖面拱顶处加速度时程曲线
Fig.6 Acceleration time curve on the top of the three profiles

表2为3个剖面在不同点处 x , y 和 z 向的加速度峰值。由表2可以得到,各点的 x , y , z 最大加速度峰值均发生在剖面III处。考虑边界条件对于剖面I、II有一定的影响,剖面III处的加速度反应代表了地下盾构隧道在动力地震荷载作用下的动加速度反应。

3.3 变形分析

图7为剖面III上各点处的变形时程曲线,隧道的变形与所受动力荷载的加速度时程曲线可以较好地对应,且变形时程曲线反应出阻尼对隧道动力反应的影响。

图8为不同点处的累积最大位移。隧道内侧各点上的变形大于隧道外侧各点的变形,且最大变形发生在边墙段,其值达到22mm。

表 2 3 剖面各点加速度分量统计表(单位:m/s)

Table 2 Acceleration of the points on the three profiles (unit:m/s)

点号	剖面			
	I	II	III	
A	X	-4.13E+00	-3.65E+00	-4.59E+00
	Y	-4.76E+01	1.52E+01	1.78E+01
	Z	-1.83E+00	-1.75E+00	2.65E+00
B	X	-7.03E+00	-4.64E+00	-7.66E+00
	Y	-1.29E+01	-1.27E+01	1.49E+01
	Z	-1.82E+00	-9.12E-01	2.70E+00
C	X	7.91E+00	-7.57E+00	1.25E+01
	Y	-1.20E+01	-1.25E+01	1.46E+01
	Z	1.87E+00	-1.32E+00	2.76E+00
D	X	7.40E+00	7.14E+00	8.53E+00
	Y	-1.19E+01	-1.25E+01	-1.62E+01
	Z	-1.76E+00	-7.34E-01	2.75E+00
E	X	8.08E+00	7.27E+00	7.04E+00
	Y	-1.26E+01	-1.50E+01	-1.78E+01
	Z	-2.03E+00	-1.27E+00	2.89E+00

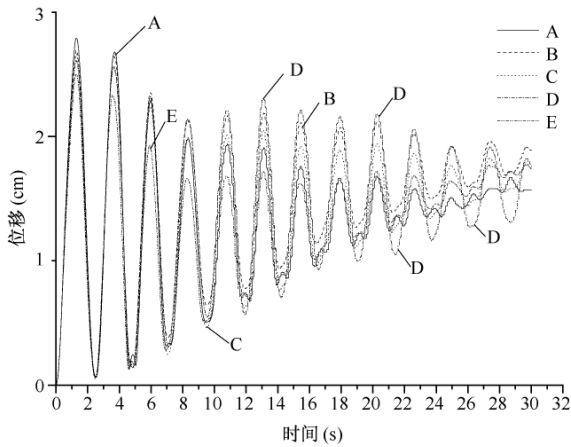


图 7 变形时程曲线

Fig.7 Displacement time curve

3.4 动应力分析

表 3 为 3 个断面上 5 个典型点处的最大主应力峰

表 3 最大主应力峰值(单位:Pa)

Table 3 Maximum principal stress of the points (unit:Pa)

剖面	点号				
	A	B	C	D	E
I	-1.52E+07	-8.48E+06	1.60E+07	-8.59E+06	-2.18E+07
II	-1.62E+07	7.78E+06	1.15E+07	7.50E+06	-1.87E+07
III	-1.42E+07	-7.10E+06	1.32E+07	-1.49E+07	2.24E+07

4 结论

(1) 隧道各部位在地震动荷载作用下所产生的加速度、变形与动主应力的时程曲线均与地震波的时程

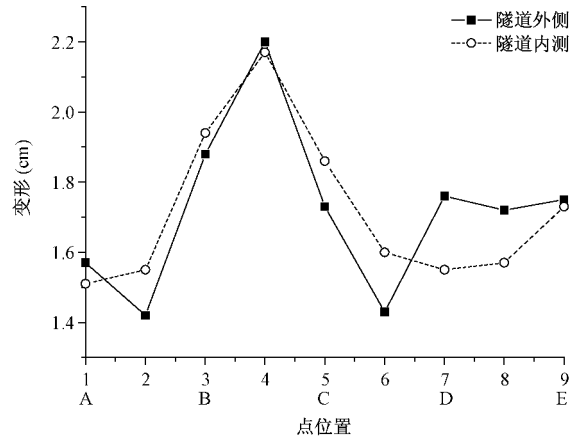


图 8 隧道的累积变形

Fig.8 Accumulated displacement of the tunnel inside and outside

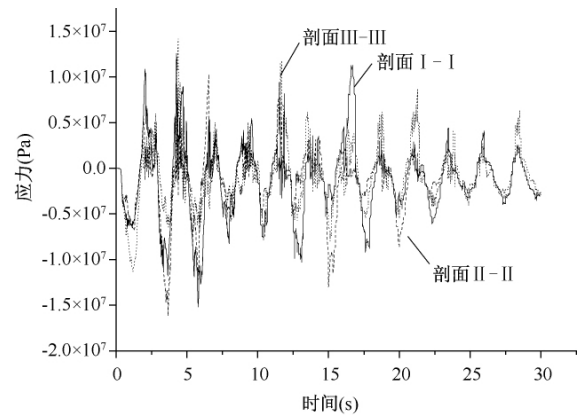


图 9 3 个剖面 A 点主应力时程变化曲线

Fig.9 Principal stress time curve of the A point on the three profiles

值,从主应力时程曲线(图 9)和表 3 中可以看出,在 El Centro 地震波作用下,主应力的最大值出现在 III 剖面的拱底位置(E 点)。

曲线的相对应,说明动荷载作用下隧道各部位的反应均与其激励动荷载相关。

(2) 动荷载作用下盾构隧道的加速度和主应力最大值均产生于结构的底部。

(3)分析盾构隧道最终所产生的累积变形,隧道结构内侧的变形大于外侧所对应各点的变形,且最大变形发生在结构的侧墙部位。

参考文献:

- [1] 左熹,陈国兴. 地下隧道地震反应数值模拟分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2007, 27(s): 311-314.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 王国波. 软土地铁结构三维地震响应理论及其计算方法的研究[D]. 上海:同济大学, 2007.
- [5] 石玉玲,门玉明,彭建兵,等. 西安城区地裂缝破裂扩展的数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(6): 56-60.
- [6] 陈火红,杨剑,薛小香,等. 新编MARC有限元实例教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [7] 梁清香. 有限元与MARC实现[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [8] 邓亚虹,夏唐代,陈敬虞. 车辆荷载作用下隔震沟隔震效率影响因素分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 883-894.
- [9] 陈水生,万春益,野田尚昭. 隔震桥梁地震响应非线性分析[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2006, 26(1): 54-58.
- [10] 张昉保,张向东,赵立峰. 隧道地震反应分析[J]. 河北交通科技, 2008, 5(1): 54-58.
- [11] 董建华,朱彦鹏. 地震作用下土钉支护边坡动力分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(6): 90-95.
- [12] 刘妮娜,门玉明,刘洋,等. 地震动力作用下土-地铁隧道模型分析[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 79-82.
- [13] 李凯玲,张亚,刘妮娜. 土-地铁隧道动力相互作用模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2008, 15(4): 534-538.

Dynamic response of shield metro tunnel in earthquake load

LIU Ni-na, MEN Yu-ming, PENG Jian-bin, CHU Chun-mei, LIU Yang

(School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University; Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education; Open Research Laboratory of Geological Engineering, the Ministry of Land Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract: Interaction of soil and underground structure under dynamic load is a hot topic for the geological engineering. Based on the dynamic equation, using FEM and vibration mode superposition method, the response of the shield tunnel which locates in the loess area and in the dynamic activity as El Centro earthquake wave was got in the paper. The maximum acceleration and the maximum dynamic stress are at the bottom of the shield tunnel. The displacement inside of the tunnel is bigger than the outside. The maximum displacement is in the side wall of the tunnel.

Key words: interaction of soil and underground structures; shield tunnel; earthquake load; dynamic response

责任编辑:张明霞