

主管 中华人民共和国铁道部

主办 中国铁道工程建设协会

中铁二局集团有限公司

国际刊号 ISSN 1003-8825

国内刊号 CN 51-1414/U

西南交通大学

全国中文核心期刊

中国期刊全文数据库(CJFD)全文收录期刊

中文科技期刊数据库(维普)全文收录期刊

全国建筑行业《优秀杂志一等奖》

中国核心期刊数据库(遴选)全文收录期刊

中国台湾华艺(CEPS)中文电子版收录期刊

路基工程

SUBGRADE ENGINEERING



布鲁克(成都)工程有限公司

—ROCCO柔性被动防护系统

ISSN 1003-8825



|||
2010

(总148期)

目次

全国中文核心期刊
全国建筑行业《优秀杂志一等奖》
中国期刊全文数据库(CJFD)全文收录期刊
中国核心期刊数据库(遴选)全文收录期刊
中文科技期刊数据库(维普)全文收录期刊
中国台湾华艺(CEPS)中文电子版收录期刊

主管单位 中华人民共和国铁道部
主办单位 中国铁道工程建设协会
中铁二局集团有限公司
西南交通大学
国际刊号 ISSN1003-8825
国内刊号 CN51-1414/U

发行范围 国内外公开发行
编辑出版 铁道部《路基工程》编辑部
主 编 卿三惠
常 务 曾令录
副 主 编
副 主 编 曹新文

发 行 铁道部《路基工程》编辑部
订 阅 全国各地邮局(所)
邮发代号 62-156
广告证号 5101034000064

地 址 成都市金牛区通锦路16号
邮 编 610032
电 话 市电(028) 路电(061)
86443000 43000(主 任)
86442063 42063(编 辑)
86444726 44726(网上收稿)
87689247 42963(广告发行)
86444186 44186(排版校对)
86442963 42963(财务传真)

E-mail: ljgch01@163.com
ljgch02@163.com

网 址 www.ljgch.cn
印 刷 四川煤田地地质制图印刷厂
定 价 10元/期 60元/年

• 论 述 •

地震荷载作用下黄土区地铁隧道动力特性研究	刘妮娜, 刘 洋, 刘洪佳	1
压实黄土土水特征曲线	赵彦旭, 吕攀峰, 张虎元	4
FLAC强度折减法在开挖边坡稳定分析中的应用	卢书强, 许 模	6
塑料排水板处理软基监测数据及变形特性分析	郭永发, 廖 辉, 陈 杰	9
青藏铁路格拉段路基工程设计	王多青	12
灰土改良土动力变形特性试验研究	曾国红, 彭海燕, 冯俊琴	14
采动区土工格栅加强沥青路面力学性能研究	刘 灿, 于广云, 冯建光	17
倒装路面结构在移动荷载下的力学响应分析	张维全, 俞仁怡	19
国内外长寿命沥青路面的分析与比较	黄维蓉, 刘志前, 张文武	22
岩土工程中的无损检测技术	谭峰屹, 王新志, 林祖楷	24

• 试验研究 •

高填路堤涵洞受力及变形特性有限元分析	岑国平, 刘晓曦, 王 旭	27
界限含水率试验数据计算方法与试验优化研究	赵秀绍, 莫林利	29
水泥风积沙工程性质试验研究	张 雁, 李维生, 李 娟	32
基于弹性地基梁理论的隧道纵向变形分析	王志良, 申林方	34
干沟填石高路堤稳定性监测技术研究	唐双林	37
运营铁路隧道渗漏水整治施工组织优化研究	刘 建, 刘 丹	39
三峡库区新集镇典型高切边坡破坏机理研究	许冬丽, 於汝山	42
数学形态学路面裂缝识别算法研究	梁世庆, 孙波成, 邱延峻	44
用MATLAB工具箱优化铁路四线隧道断面设计	章慧健, 仇文革, 高 扬	47
土工格栅在拓宽路堤中的效果监测与分析	余巍伟, 刘优平	49
路面最大压实度与筛孔通过率的数量关系探析	刘海洲, 汪 凡, 付 鹏	52
留设煤柱法防止采空区对上覆公路破坏的研究	范慧鹤, 姜庆红, 刘海燕	54
石灰粉煤灰改良盐渍土填料力学特性研究	吴廷荣, 贾锦绣, 王都兴	57
桥台后回填固化粉煤灰路面的沉降研究	王照宇, 沈 正	59
负摩擦桩中性点的确定方法研究	徐初来, 苏 达	62
强度折减法分析滑坡稳定的误差和敏感性研究	何建平	64
基于MATLAB语言的拱桥拱肋线形优化设计	姜旭东, 张新胜, 赵义书	67
大别山区客运专线铁路隧道瓦斯成因分析探讨	韩立国	69
围岩塑性区范围统一解	马爱群, 张常光	72
武广客运专线端梁结构分析及尺寸优化	张娅敏, 张 毓, 赵坪锐	74
郑西客运专线试验段路基沉降变形预测	于春海, 陶福金, 杨有海	77
滴水崖I号滑坡瞬态稳定分析	安 民, 尹小涛, 冉昌国	79
透水性路面的铺面材料与工程应用研究	董 祥, 王继果	82
复合地基技术在储油罐地基处理上的应用	崔 莹, 田晓艳, 李 源	85
纤维半刚性材料用于道路基层的试验研究	路光辉	87
地震作用下路基内孔压变化规律的研究	郭允林, 阮永芬	89
斜坡基岩复合地基稳定性三维有限元分析	李文英, 王春雷	91
桩锚支护结构内力试验研究	鲍春生, 吴雄志, 白金杰	94
高速铁路CFG桩柔性荷载试验数值模拟分析	周 勇, 刘升传, 吴立坚	96

地震荷载作用下黄土区地铁隧道动力特性研究

刘妮娜¹, 刘洋², 刘洪佳³

(1. 长安大学地质工程与测绘工程学院, 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054; 3. 国土资源部岩土工程开放实验室, 西安 710054)

摘要: 采用数值分析方法模拟典型的地震波作用下, 黄土地区地铁隧道的动力反应, 分析其加速度、动应力及动应变等随时间的变化特征。所得结论显示在典型的 EL Centro 地震波及不同超越概率的西安人工波的作用下, 地铁隧道的加速度时程曲线与其激发的地震波加速度时程曲线线形一致且在反应期初的加速度较大; 在大震作用下地下结构周围土体的变形会对结构的变形产生一定的影响; 应力分析的结果表示剪切应力对结构的设计起到了一定的控制作用。

关键词: 地铁隧道; 地震荷载; 动力反应

中图分类号: U451⁺.3; TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 - 8825(2010)01 - 0001 - 03

0 引言

动荷载作用下地下结构的反应是目前岩土工程研究的热点, 也是工程界十分关心的重点问题。新版《地铁设计规范》(GB50157 - 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也是必要的^[1]”。

目前对动荷载作用下结构的反应研究方法主要有两种: 一种是进行结构模型的动力反应试验, 另一种是数值模拟的方法^{[2]-[7]}。由于动力试验对于试验平台尺寸及承重的要求及模型的相似比例和边界条件的限制, 数值模拟方法在动力问题中得到了一定的发展和应用。

西安地铁二号线在部分区域采用马蹄形隧道。本文针对这一工程采用数值模拟方法研究黄土地区马蹄形地铁隧道, 在各种典型地震波作用下的动力反应。

1 分析模型设计及参数选取

1.1 模型参数选取

模型参数见表 1。

西安地铁 2 号线位于典型的黄土地区, 这一区域典型的隧道形式为马蹄形断面隧道, 隧道外径 6.6 m, 壁厚 0.6 m^[8]。

收稿日期: 2009 - 09 - 17

基金项目: 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); 陕西省自然科学基金 (2005D04); 长安大学发展基金 (0305 - 1001)

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

表 1 土层及隧道物理力学参数表

土层序号及名称	重度 / (kN · m ⁻³)	弹性模量 / E/MPa	泊松比 μ	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 / (°)	埋深 /m
杂填土 (Q ₄ ^{ml})	17.3	1.2	0.35	16	10	1.7
黄土 (Q ₄ ^{al})	18.1	3.5	0.35	24	18	4.6
黄土 (Q ₃ ^{ol})	18.5	4.0	0.30	30	20	13.0
古土壤 (Q ₃ ^{el})	19.0	4.5	0.30	35	22	16.4
黄土 (Q ₂ ^{ol})	19.2	8.0	0.30	40	25	20.0
粉质粘土 (Q ₂ ^{al})	19.2	10.0	0.30	40	25	50.0
隧道	25.0	31.5	0.20	3000	56	20.0

1.2 有限元计算模型

实际分析选取 100 m × 50 m × 60 m 的计算区域, 计算模型见图 1。利用动力模态分析计算模型的频率, 其一阶自振频率为 0.3529, 同时考虑高阶自振频率的影响, 选取第八阶自振频率 0.5205, 利用公式 (1) 计算瑞利阻尼系数和。阻尼比根据前期研究工作取 0.01。

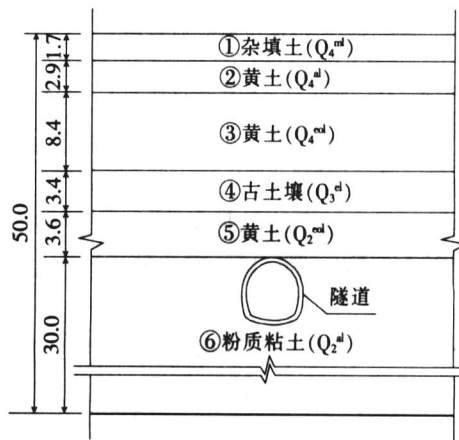


图 1 计算模型简图 (单位: m)

$$\left\{ \begin{aligned} &= \frac{2(i_i - i_j)}{(i_i + j)(i_i - j)} i_j \\ &= \frac{2(i_i - i_j)}{(i_i + j)(i_i - j)} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

1.3 地震波

加载的地震波采用西安人工地震波，其超越概率分别为 63%，10%，2%，所对应加速度峰值分别为 0.82，1.91，3.25 m/s²，同时采用 EL Centro 波南北向适合二类场地土的地震波，取其持续时间 30 秒，最大峰值加速度为 3.417 m/s²。

分析中将实际的 EL Centro 地震波记录的峰值折算成西安地区设计基本烈度。折算系数的计算公式为^{[9]-[11]}

$$a(t) = \frac{a_{\max}}{a_{\max}} a(t) \quad (2)$$

式中 $a(t)$ ， a_{\max} 为原记录的地震加速度曲线及峰值； $a(t)$ ， a_{\max} 为调整后的地震加速度曲线及峰值，调整系数为 0.574。

2 数值模拟结果与分析

2.1 加速度反应分析

西安人工地震波在 63% 超越概率、10% 超越概率和 2% 超越概率下以及加速度峰值为 0.2 g 的 EL Centro 地震波作用于马蹄形隧道上时，隧道拱顶处的动加速度反应曲线如图 2。

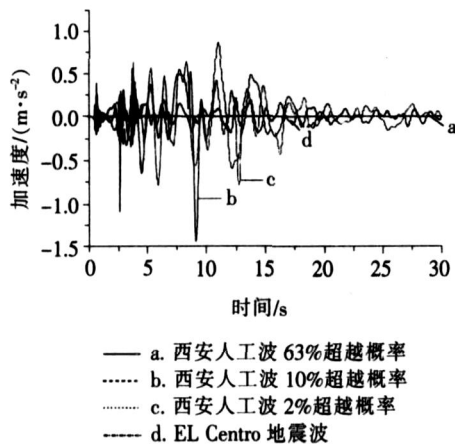


图 2 加速度时程曲线图

由隧道的动加速度时程曲线可知，在各种地震波作用下计算单元的加速度时程曲线与其激励地震波的时程曲线变化形状一致，且将其对比后可知，在地震发生初期的隧道所产生的加速度较大，而随着时间变化隧道所产生的加速度与地震波的加速度值之比相对减小。

2.2 变形随时间变化比较分析

图 3 为隧道结构上沿地震激励方向所产生的变形，分析可得，EL Centro 波和人工波在小震作用时变形曲线随着时间变化趋于收敛，而在中大震的情况下即在西安人工波 10% 和 2% 超越概率时，变形曲线

并未收敛，观察大震时分析模型的变形可以看出，震动时间在 20 秒时隧道结构变形较大，此时隧道结构处土的变形受到隧道结构的影响亦较大。为避免大震对地铁隧道的影响，地铁隧道所处的区域需要进行相应的加固处理。

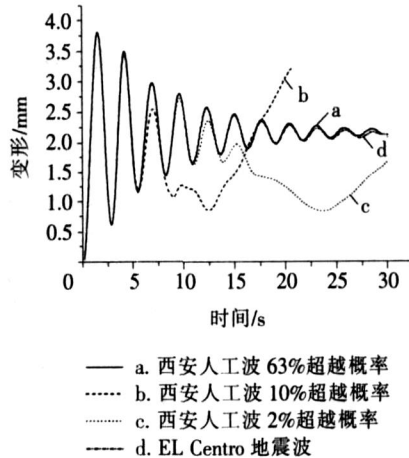


图 3 变形时程曲线图

2.3 应力

取隧道内侧为研究对象，分析其正应力和剪应力的时程变化关系。

2.3.1 正应力分析

从正应力时程曲线（图 4）分析可知，不同地震波输入时，分析结构的正应力时程与所输入的地震波时程曲线相似；在不同加速度峰值的地震波作用下，结构产生的正应力值与加速度峰值相关，如在西安 2% 超越概率的人工地震波作用下，结构所产生的正应力最大，达到了 7.0 MPa，且产生的时间点与该人工波的峰值加速度的时间点相吻合。

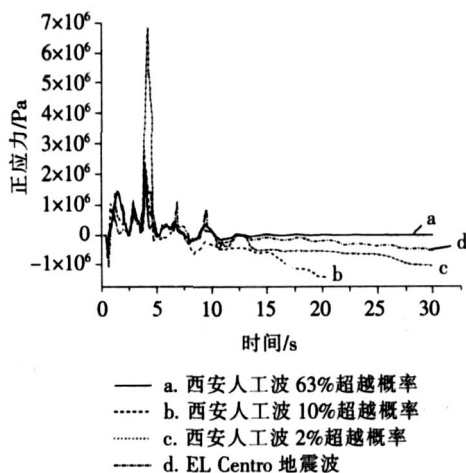


图 4 隧道正应力时程曲线图

正应力幅值的大小除了峰值点的应力，多集中于 1.5 MPa 的区域之中，同时在各种地震作用下正应力随时间都趋于收敛。

2.3.2 剪应力分析

剪应力时程曲线如图 5，在不同地震波作用下，

加速度峰值最大的西安 2%超越概率的人工地震波产生的剪应力最大, 其值达到 0.9 MPa; 同时在中震和大震的作用下马蹄形隧道的剪应力曲线不完全收敛, 说明在大震情况下隧道的破坏多受剪应力的控制。这与抗震设计中结构需满足一定的抗剪切验算相一致。

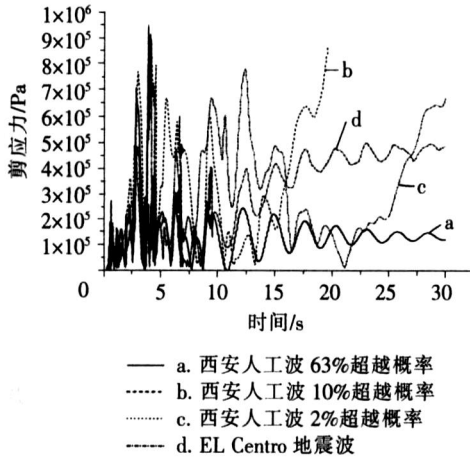


图 5 隧道内部剪应力时程曲线图

3 结论

(1) 本文数值分析所建立的模型较好地模拟了位于黄土地区的西安地铁二号线在地震荷载作用下的动力特性。

(2) 地震波作用下地铁隧道的加速度时程曲线与激励的地震波时程曲线线形一致, 且在作用初期所激发的结构加速度较大。

(3) 中震和大震作用下, 由于结构周围土体的变形较大而对于隧道的变形不收敛, 在工程中应对隧道穿越地区的薄弱土层进行一定的处理。

(4) 隧道的受力在动荷载作用下受到剪应力的影响较大, 在工程抗震设计中应进行相应的抗剪切破坏验算。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量技术监督检验局, 中华人民共和国建设部. GB50157-2003, 地下铁道施工及验收规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [2] 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).
- [3] 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.
- [4] 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]. 南京工业大学, 2006.
- [5] 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]. 同济大学, 2007.
- [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] 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).
- [9] 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).
- [10] 陶云辉, 刘昌清, 姚旭东. 基于 ABAQUS 的桩-土动力仿真分析 [J]. 路基工程, 2009 (2): 133-135.
- [11] 索然绪, 朱长安, 孙铁成. 双连拱隧道地震动应力响应影响因素分析 [J]. 路基工程, 2008 (6): 150-151.

Study on Dynamic Response of Subway Tunnel under Effect of Earthquake Load in Loess Regions

L U Ni-na¹, L I U Yang², L I U Hong-jia³

- (1. College of Geological Engineering and Surveying Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China; 3. Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering, Ministry of Land Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract: This paper simulates dynamic response of subway tunnel in loess regions under the effect of typical earthquake wave with numerical analysis method and analyzes the variation characteristic of acceleration, dynamic stress and dynamic strain with the time. The conclusion indicates that under the effect of typical EL Centro earthquake wave and different artificial waves over probability, the acceleration time curve of subway tunnel is the same as that of the excited earthquake wave and the acceleration is greater in initial response period. Under the effect of major earthquake, the deformation of surrounding soil body would exert a certain influence on that of underground structure. The result of stress analysis indicates that shearing stress plays a certain role in control of structure design.

Key words: subway tunnel; earthquake load; dynamic response