

文章编号:1007-2993(2008)05-0232-04

高地震区公路隧道地震动力响应分析

朱长安¹ 高波¹ 索然绪²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031; 2. 西安公路研究所, 陕西西安 710054)

【摘要】 基于土-结构相互作用理论, 对高地震区一实际重大工程的公路隧道洞口段结构进行了抗震计算, 得到了衬砌结构各控制点的位移、加速度及内力响应规律。结果表明: 在人工合成地震波条件下, 衬砌墙脚、拱腰为抗震薄弱位置; 结构的加速度波形与输入波形相似; 这些结果为抗震设计提供了一些依据。

【关键词】 高地震区; 公路隧道; 隧道洞口段; 粘性边界

【中图分类号】 P 315.9

Analysis for Seismic Dynamic Responses of Highway Tunnel in High Earthquake Intensity Area

Zhu Changan¹ Gao Bo¹ Suo Ranxu²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031;

2. Xi'an Highway Institute, Xi'an Shanxi 710054)

【Abstract】 Based on soil-structure dynamic interaction theory, aseismic calculation is used for the analysis on portal section of highway tunnel for an important practical engineering project. The response of displace, acceleration and internal forces of structure are described. Results show that the locations of the basement of sidewall and the hance are weak points of aseismic under the situation of artificial seismic wave. The waveform of acceleration of structure is similar to the one input. These results provide some references for aseismic design.

【Key Words】 high earthquake intensity area; highway tunnel; portal section of tunnel; viscous boundary

0 引言

近年来, 地下结构的抗减震问题越来越得到国内外学者的关注和研究。我国是地震多发地区, 而西部更处于强震地带, 随着我国西部大开发, 大量的公路和铁路相继修建, 更多的隧道工程仍将不可避免地修建在西部强震地带, 这使得隧道抗震设计成为隧道设计的一个重要环节。本文采用时程分析法, 对一在建重大工程的隧道结构进行了动力响应分析。

1 工程背景及概况

本工程为西南高烈度区在建的某隧道, 隧道位于北京至昆明高速公路四川境内雅安至泸沽段, 隧址区内新构造运动较强烈, 隧址区晚近期构造运动极为强烈, 本区主要表现为大面积间歇性强烈上升, 具有较均衡上升的特点。受区域性断裂构造的影响, 隧址区岩体结构较破碎, 岩体陡立岩质坚硬弱风化状, 节理裂隙较发育。

隧道洞口覆盖层为残坡积块石质土、块石夹土, 强风化一弱风化带出洞, 洞顶围岩由英安岩强风化一弱风化带构成, 岩体以碎石状镶嵌结构和巨块(碎)石状镶嵌结构为主。侧壁围岩由英安岩弱风化带岩体

构成, 岩体呈巨块(碎)石状镶嵌结构。

隧道全长约 1500 m, 两线轴线间距为 35 m, 右线比左线晚出洞 18 m。隧道洞口为偏压端墙式洞门, 地形坡度达 50°~60°, 局部岩壁陡立, 数值模拟坡度为 1.5 : 1。隧道主洞衬砌见图 1。

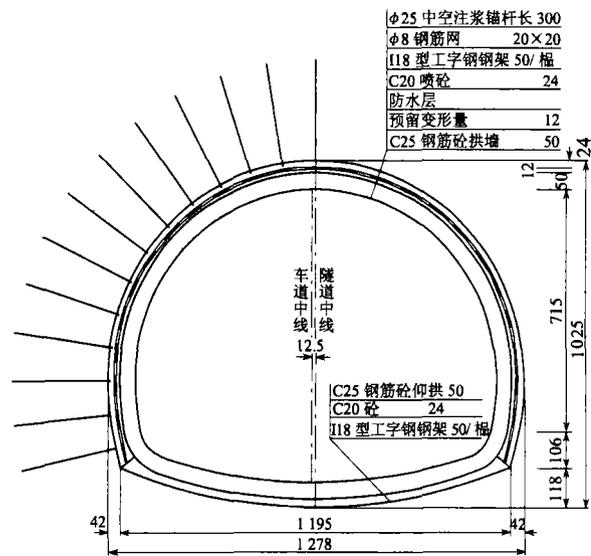


图 1 隧道主洞衬砌断面图(单位: cm)

2 结构计算模型

在FLAC3D中采用有限离散的差分网格进行模拟,整体模型共113 170个单元、120 463个节点,能保证计算具有足够的精度。模型尺寸洞口处为水平方向200 m、纵向180 m,垂直方向按照实际地形进行模拟,模型见图2。

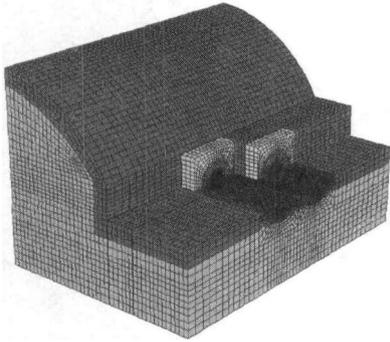


图2 计算模型

隧道模型计算参数根据相关单位提供的设计资料取值(见表1)。围岩和衬砌均采用实体单元模拟,围岩采用Mohr-Coulomb屈服准则及弹塑性增量本构关系,隧道衬砌采用弹性本构。

表1 物理力学计算参数

名称	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	E/GPa	μ	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
小块石夹土	2.0	1.2	0.4	200	20
弱风化英安岩	2.4	6.0	0.25	700	41
锚杆折算区	2.4	7.5	0.2	1000	41
初期支护	2.2	22.0	0.2		
二衬	2.5	31.0	0.2		

3 动力边界条件

本文采用不随频率变化的Local局部阻尼来近似表征岩土体在地震波传播过程的阻尼作用。以有限的区域模拟无限区域的计算,必须考虑边界上波的传播效应,应不使波在边界上产生反射而再返回到计算域中,因此考虑采用粘性动力人工边界。

Lysmer和Kuhlemeyer(1969)提出粘性动力人工边界,是指在边界上施加正向和切向与边界无关的粘壶,由粘壶提供正向和切向粘性阻力。

粘性边界通常是考虑一简谐波的传播来推导,另外,对于任意形状的瞬态波,也可象推导球面波的

透射边界那样,来推导粘性边界。因此,粘性人工边界的完整方程可写为^[1-3]

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= a\rho C_p v_n = c_p v_n \\ \tau &= b\rho C_s v_s = c_s v_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: v_n, v_s 分别为边界上的法向和切向速度; ρ 为介质的密度; a, b 是待定常数,可根据边界处波的反射和与折射理论确定; C_p, C_s 分别为P波及S波在介质中的传播速度。

$$C_p = \sqrt{(K+4G/3)/\rho} \quad C_s = \sqrt{G/\rho}$$

4 地震动参数

计算采用的地震波为地震安全评价报告^①给出的基岩人工合成的超越概率为2%的地震波,其峰值加速度约为0.437g,持时约35s,峰值出现时刻6.46s,对地震波进行时频分解,地震波能量主要集中在前10s内,因此选取该波前15s进行计算,激励方向为水平方向,时程曲线见图3。

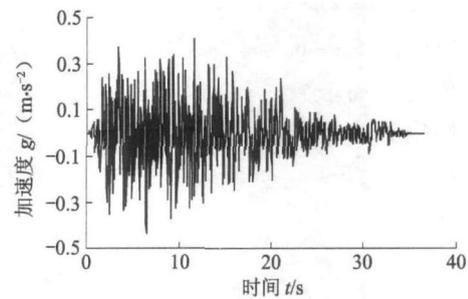


图3 输入地震波加速度时程曲线

5 动力计算结果及分析

本文计算在隧道横截面上选取8个监测位置,分别为:拱顶、左拱肩、左拱腰、左墙脚、仰拱、右拱腰、右拱肩、监测点布置见图4。

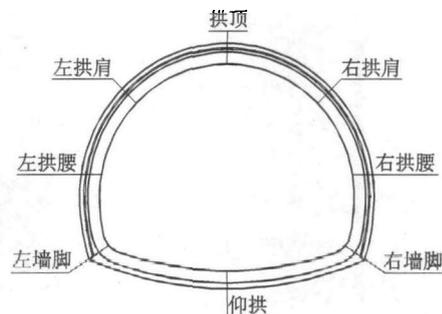


图4 监测点分布图

①四川赛思特科技有限责任公司.北京至昆明高速公路四川境雅安至泸沽项目地震安全性评价报告[R].2005.

5.1 位移响应分析

定义“相对位移”为隧道衬砌断面各监测点最大位移与衬砌仰拱底部最大位移的差值。

由图5可以看出,各控制点水平位移峰值沿纵向随着埋深的增加而逐渐减小,并且趋于稳定(左线),位移峰值均发生在隧道的洞口段,并且由于右线晚出洞

而产生前后错距的缘故,右线隧道位移峰值普遍大于左线;由图6知,靠近隧道洞口,由于自由表面的存在,相对位移峰值在洞口最大,向洞内延伸而减小,随着埋深和岩性变化,在50m左右虽然稍有增大的趋势,但最终会趋于稳定值,对照下文的内力变化规律不难发现,相对位移一定程度上反映结构的受力情况。

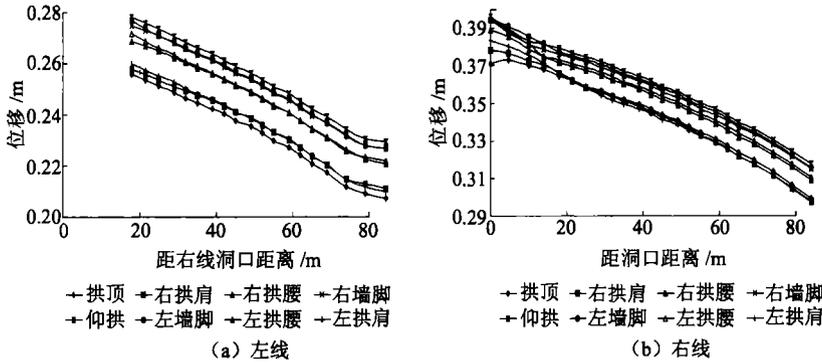


图5 隧道水平位移峰值沿纵向变化曲线

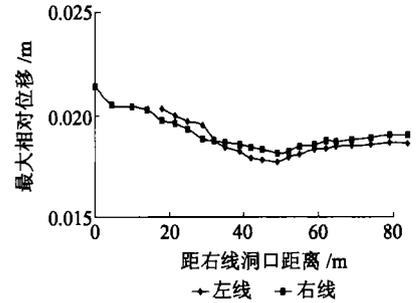


图6 水平相对位移峰值沿纵向变化曲线

5.2 内力分析

图7和图8显示了隧道左右线衬砌各监测位置峰值内力沿隧道纵向变化趋势。

弯矩峰值在隧道洞口段拱顶和右墙脚最大,随着进洞的距离增大,拱顶弯矩会有减少的趋势,但墙脚和拱腰成为控制位置,而仰拱反应较小;轴力峰值仰拱在两线一直呈较大的趋势;剪力峰值

在洞口反应较为强烈,最大值均出现在墙脚部位,随着距洞口距离的增加,拱腰剪力值有所增大而成为控制部位;综上分析,可见无论是左线还是右线,隧道墙脚部位在地震作用下最为危险,另外拱腰和拱顶的响应也较大,特别在隧道洞口段拱顶的内力峰值值得注意。

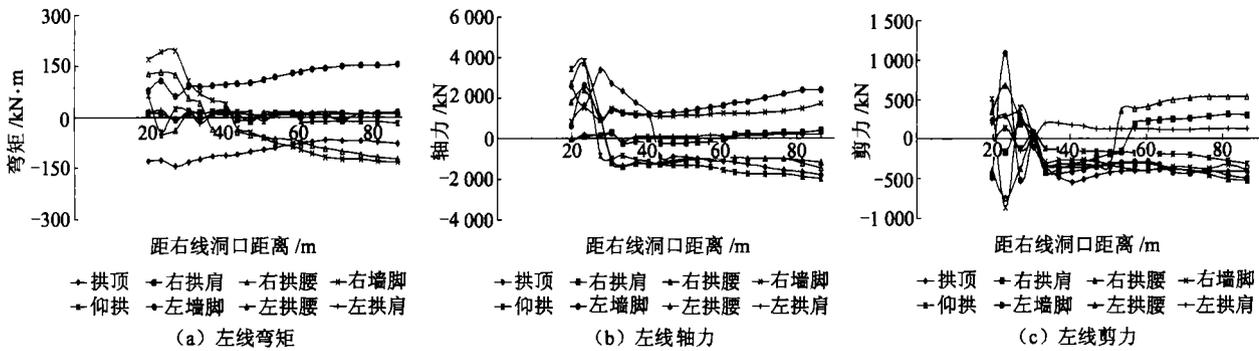


图7 隧道左线内力峰值沿纵向变化曲线

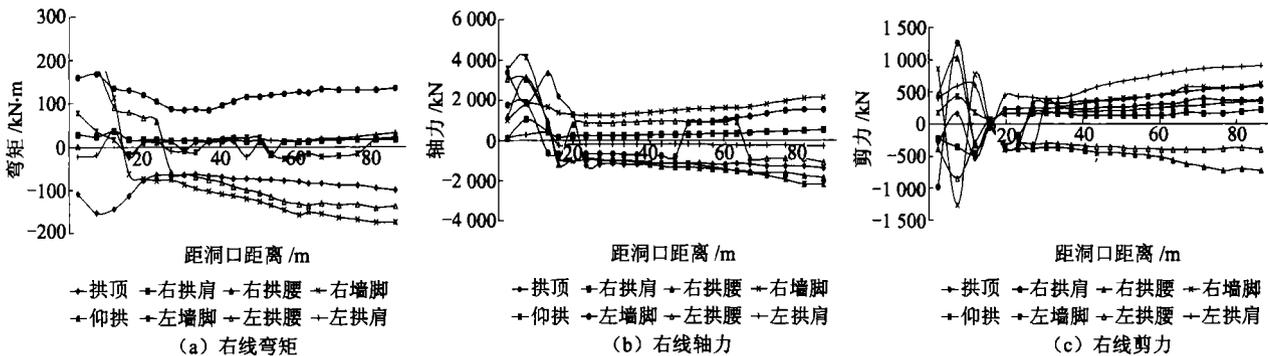


图8 隧道右线内力峰值沿纵向变化曲线

5.3 衬砌加速度反应特征

为分析隧道在地震作用下衬砌的加速度反应规律,本文主要监测了隧道洞口衬砌的加速度时程。

在地震作用下右线洞口断面隧道衬砌各监测点的水平加速度响应峰值见表2。

表2 洞口断面衬砌不同部位加速度峰值

监测点位置	拱顶	右拱肩	右拱腰	右墙脚	仰拱	左墙脚	左拱腰	左拱肩
水平向加速度 ($m \cdot s^{-2}$)	6.997/ -5.693	5.524/ -5.293	5.677/ -6.896	5.557/ -5.597	4.909/ -5.394	5.529/ -5.781	5.183/ -6.666	5.368/ -5.277

由表可得,拱顶的加速度反应比断面其他部位都强,两侧拱腰的反应也较大,拱肩和墙脚次之,而仰拱的加速度最小。这说明地下结构在水平地震作用下,结构呈水平方向的剪切振动状态,层间存在相对剪切位移,这与文献[4]的结论是一致的。

基岩输入人工合成波时程与衬砌结构拱顶监测点的加速度时程见图9。

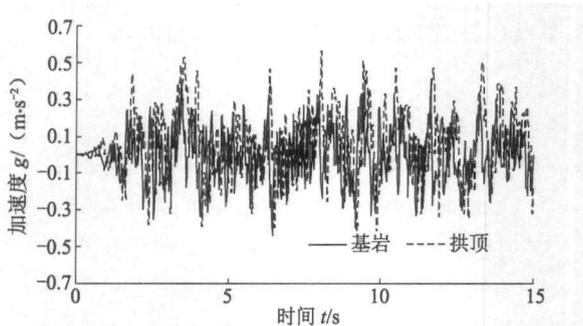


图9 加速度波形对比

从图中可以看出,拱顶的加速度时程比基岩输入波形有明显的滞后效应,两者的波形非常相似,因而两者的频谱特性也相似,说明洞结构的振动受输入的地震动频率的影响。而且,图中亦显示了其振动幅值比基岩输入幅值要大^[5],土体对地震波传播具有一定的放大效应。

6 结论

1)隧道水平位移和相对位移峰值均沿隧道纵向

随着进洞的增加而逐渐减小,相对位移在一定程度上反映衬砌的受力情况。

2)隧道洞口段结构地震反应最大,由于偏压状态和两线的错距,右线(晚出洞)的内力峰值普遍比左线大,设计中应该予以注意。

3)洞口断面的各部位的地震反应不一,墙脚和拱腰的内力较大,为控制设计点;拱顶加速度反应最大,因此隧道洞口段拱顶在设计中也值得注意。

4)结构的加速度波形与输入波形相似,并且存在滞后和放大效应,可知洞口结构的振动受输入的地震动频率的影响。

参 考 文 献

- [1] 吕淑杰. 隧道地震反应若干影响因素研究[D]. 大连:大连理工大学,2007:26-30.
- [2] 李育枢. 山岭隧道地震动力响应及减震措施研究[D]. 上海:同济大学,2006:48-51.
- [3] 高峰. 地下结构动力分析若干问题研究[D]. 成都:西南交通大学,2003:33-35.
- [4] 王明年. 高地震区地下结构减震技术原理的研究[D]. 成都:西南交通大学,1999:36-43.
- [5] 周德培. 强震区隧道洞口段的动力特性研究[J]. 地震工程与工程振动,1998,18(1):124-130.

收稿日期:2008-06-16