

文章编号: 1000-7598-(2008)02-549-04

# 列车移动荷载对下穿公路隧道稳定性影响研究

叶 飞<sup>1,2</sup>, 丁文其<sup>1</sup>, 王国波<sup>1</sup>, 王士民<sup>1</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室/ 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092;

2. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 西安 710064)

**摘 要:** 将列车荷载模拟为单一的移动荷载, 考虑围岩为黏弹性成层地基, 利用分层法研究了移动荷载作用下围岩的动力响应, 得到了围岩在动力荷载下的受影响范围, 从而可评价列车荷载对下穿公路隧道稳定性的影响程度。最后将理论分析结果与现场量测结果 (主要是上方列车荷载通过时量测下方公路隧道的振动响应) 进行对比分析, 二者吻合较好。

**关键词:** 分层法; 移动荷载; 公路隧道; 振动; 稳定性

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

## Influence of moving train load on stability of underlying highway tunnel

YE Fei<sup>1,2</sup>, DING Wen-qi<sup>1</sup>, WANG Guo-bo<sup>1</sup>, WANG Shi-min<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Department of Geotechnical Engineering, College of Civil

Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shaanxi Provincial Major Laboratory for

Highway Bridge & Tunnel, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** By considering train load as single linear moving load and rock mass as viscoelastic layered ground, the paper analyzes the dynamical response of the rock below the moving train with the Multi-Layer method. The affecting range of the moving load is obtained, thus the affecting extent of the moving train load on the stability of the underlying highway tunnel can be evaluated. The comparison of theoretical analysis with site monitoring results (mainly about the vibration response of the tunnel) shows that they accord with each other.

**Key words:** Multi-Layer method; moving load; highway tunnel; vibration; stability

## 1 前 言

隘岭隧道位于福建和江西境内, 省境的分界线分别位于洞身 Zk135+131 和 Yk135+062 处。福建境内左洞长 923 m, 右洞长 842 m, 江西境内左洞长 509 m, 右洞长 615 m。该为双线分离式隧道, 隧道右线出口位于半径  $R = 1\,200\text{ m}$  的曲线上, 左洞出口位于半径  $R = 1\,200\text{ m}$  曲线上。

隘岭隧道下穿赣龙铁路一已建铁路隧道 (古城隧道), 铁路轨顶至隘岭隧道拱顶高差 32 m 左右, 斜交角度约  $26^\circ$ , 右洞交叉点桩号 Yk134+366.15, 左洞交叉点桩号为 Zk134+453.19 m。图 1 为隘岭隧道进口端与赣龙铁路古城隧道出洞口立体交叉的图片, 图 2 为两隧道交叉的平面示意图。

隘岭隧道采用钻爆法进行施工。由于其上方古

城隧道已建成, 故爆破施工可能对古城隧道的稳定性产生影响<sup>[1]</sup>, 同时古城隧道火车运行也可能对隘岭隧道的结构安全造成影响。

本文主要分析上方 (古城隧道) 通行的列车荷载对下方施工的隘岭隧道的影响。运用分层法原理对列车移动荷载对下方隘岭隧道的影响进行了理论分析, 并结合现场测振结果, 进行了验证。



图 1 隘岭隧道与古城隧道交叉图片  
Fig.1 Intersection of the two tunnels

收稿日期: 2006-03-22

作者简介: 叶飞, 男, 1977 年生, 博士研究生, 主要从事隧道工程相关理论与技术研究。E-mail: xianyefei@sohu.com

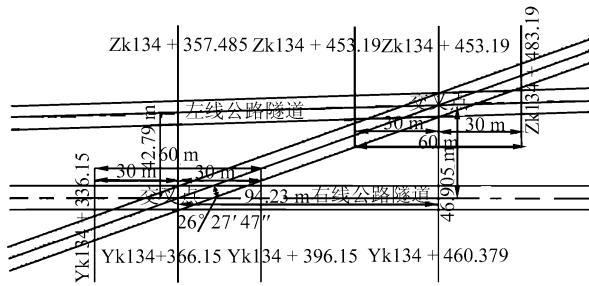


图2 隘岭隧道与古城隧道交叉平面示意图  
Fig.2 Plan of the intersection of the two tunnels

## 2 车辆振动效应的数值模拟分析

### 2.1 分层法基本原理

为了简化分析, 本文按荷载的最不利分布情况, 将列车荷载简化为恒定的移动荷载。将围岩考虑为黏弹性成层地基, 此时便是求在动力作用下三维黏弹性体的动力响应, 可用 Navier 方程求解:

$$\mu^c u_{i,jj} + (\lambda^c + \mu^c) u_{j,ji} + f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

式中: 下标  $i, j$  分别表示直角坐标的分量  $x, y, z$ ;  $u$  为位移;  $f$  为体力;  $\rho$  为质量密度;  $\lambda, \mu$  为 Lamé 常数, 考虑阻尼时  $\lambda^c = \lambda(1 + 2i\eta)\mu^c = \mu(1 + 2i\mu)$ ,  $\eta$  为地基土的内部衰减率, 也称作损失因子, 它综合考虑了地基土的阻尼特性和波在传播中的衰减。

对于控制方程 (1) 的解, 常用的解法是积分变换法。对 Navier 方程实施三重 Fourier 变换 (对空间坐标  $x, y$  和时间  $t$ ), 有

$$\left. \begin{aligned} -\omega^2 \tilde{u}_x &= V_s^2 \left( -\xi^2 \tilde{u}_x + \frac{\partial^2 \tilde{u}_x}{\partial z^2} \right) - i\xi_x (V_p^2 - V_s^2) \tilde{\Delta} + \frac{\tilde{f}_x}{\rho}; \\ -\omega^2 \tilde{u}_y &= V_s^2 \left( -\xi^2 \tilde{u}_y + \frac{\partial^2 \tilde{u}_y}{\partial z^2} \right) - i\xi_y (V_p^2 - V_s^2) \tilde{\Delta} + \frac{\tilde{f}_y}{\rho}; \\ -\omega^2 \tilde{u}_z &= V_s^2 \left( -\xi^2 \tilde{u}_z + \frac{\partial^2 \tilde{u}_z}{\partial z^2} \right) + (V_p^2 - V_s^2) \tilde{\Delta} + \frac{\tilde{f}_z}{\rho} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中

$$\tilde{\Delta} = \frac{\partial \tilde{u}_z}{\partial z} - i(\xi_x \tilde{u}_x + \xi_y \tilde{u}_y); \quad \xi = \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2}, \tilde{f}_x, \tilde{f}_y, \tilde{f}_z \quad (3)$$

分别表示变换后的体力;  $\bar{u}$  为对时间  $t$  的变换;  $\tilde{u}$  为对空间  $x$  和  $y$  的变换。将变换后的波动方程分解为面内方程和面外方程有

面内方程:

$$\left. \begin{aligned} (\omega^2 - V_p^2 \xi^2) \tilde{u}_1 + V_s^2 \frac{d^2 \tilde{u}_1}{dz^2} + (V_p^2 - V_s^2) \xi \frac{d\tilde{u}_2}{dz} + \frac{\tilde{f}_1}{\rho} &= 0; \\ (\omega^2 - V_s^2 \xi^2) \tilde{u}_2 + V_p^2 \frac{d^2 \tilde{u}_2}{dz^2} + (V_p^2 - V_s^2) \xi \frac{d\tilde{u}_1}{dz} + \frac{\tilde{f}_2}{\rho} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

面外方程:

$$(\omega^2 - V_s^2 \xi^2) \tilde{u}_3 + V_s^2 \frac{d^2 \tilde{u}_3}{dz^2} + \frac{\tilde{f}_3}{\rho} = 0 \quad (5)$$

式中:  $\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \tilde{f}_3$  为坐标变换后的体力。

方程式 (4) 和式 (5) 为二阶齐次常微分方程, 解方程可得变换后频率域的位移, 然后, 根据围岩的应力-应变关系, 可得频率域面内波和面外波的位移与应力之间的关系式, 再考虑轨道的影响, 将轨道模拟为置于黏弹性地基上的单层 Euler 梁 (图 3), 其控制方程为

$$EI \frac{\partial^4 u_z^b}{\partial x^4} + \rho \frac{\partial^2 u_z^b}{\partial t^2} + c \frac{\partial u_z^b}{\partial t} + R_z^b(x, t) = P_0 \delta(x - vt) \exp(i\omega_0 t) \quad (6)$$

式中:  $EI$  为轨道的抗弯刚度;  $\rho$  为轨道单位长度的质量;  $p_0$  为荷载的强度;  $\omega_0$  为荷载的自振频率;  $c$  为阻尼系数;  $v$  为荷载的移动速度,  $x$  为梁 (轨道) 方向的坐标值,  $\delta$  为狄拉克函数,  $R_z^b(x, t)$  为轨道与围岩间的竖向相互作用力。

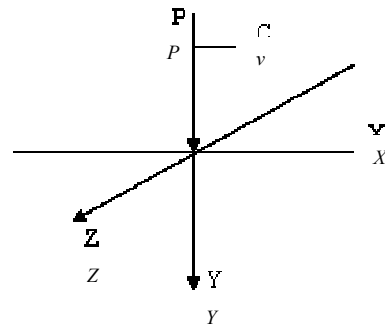


图3 移动荷载作用于单层 Euler 梁上示意图  
Fig.3 Moving load acting on Euler beam

考虑轨道与黏弹性地基 (围岩) 的相互作用, 即轨道与围岩间的位移连续和应力协调, 从而可联立方程, 求解出围岩频率域内任意深度 ( $y$ ) 处的动力响应, 再对其进行 Fourier 逆变换, 可得到时间域的响应。计算方法上, 对空间的逆变换采用离散波数法, 而对时间的逆变换用快速 Fourier 算法 (FFT), 详细的推导过程参见文献 [2~5]。

### 2.2 计算模型及参数

#### 2.2.1 计算模型及计算参数

根据上述的推导过程, 编制了相应的 Fortran

程序，计算了列车荷载作用下围岩在时间域内的动力响应，得到列车荷载引起的振动沿深度方向变化规律以及一定深度某观测点处的位移-时间曲线和速度-时间曲线，便于与实测结果相比较。

(1) 计算范围

沿古城隧道(上方铁路隧道)长度方向取 210 m (比该隧道长 60 m 左右，图 4 中的  $z$  方向)，深度方向自隧道底往下取 60 m (图 4 中的  $y$  方向)，为消除边界条件的影响，与隧道垂直方向取 100 m 范围 (图 4 中的  $x$  方向，列车作用于该范围的中间即 50 m 处)。沿深度  $y$  方向划分为 2 层，第 1 层厚取 15 m，为弱分化岩层；第 2 层厚取 45 m，为微分化岩层。

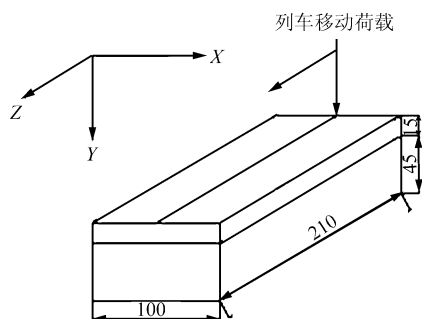


图 4 计算模型示意图 (单位: m)  
Fig.4 The analysis model (unit: m)

(2) 动力荷载

根据常规的列车参数，一列火车共 40 节车厢，每节车厢长 18 m，自重 23.2 t，载重为 60 kN，容积为 85 m<sup>3</sup>，普通列车平均车速为 108 km/h (30 m/s)，根据计算可取移动荷载的幅值为 832 kN，荷载自振频率的影响主要体现在低频，取 4 Hz。

(3) 围岩参数

围岩力学参数见表 1。

表 1 围岩参数取值表  
Table 1 Parameter of rocks

岩层	$E/MPa$	$\mu$	$\rho/g \cdot cm^{-3}$
弱风化	6 000	0.30	2.00
微风化	21 000	0.29	2.75

2.2.2 计算结果及分析

首先，取沿一条直线 ( $z = -105$  m,  $x = 50$  m, 即列车作用的正下方) 的计算结果进行分析，该直线上点的位移与深度之间的关系曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出，因列车通过时振动荷载引起下方围岩的位移最大值不到 0.7 mm，30 m 深度处 (即下方隘岭隧道拱顶位置) 位移约为 0.075 mm。

其次，取上述直线上的一点 ( $z = -105$  m,  $x = 50$  m,  $y = -30$ , 即下方隘岭隧道拱顶位置处) 的计算结果进行分析，该点位移与时间的关系曲线如图 6 所示，速度与时间的关系曲线如图 7 所示。由图 6 和图 7 可以看出，列车荷载在该位置引起振动对拱顶处围岩的影响不大，最大振动速度仅为 0.08 mm/s。

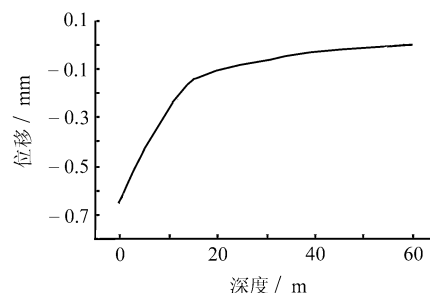


图 5 位移与深度关系  
Fig.5 Displacement-depth curve

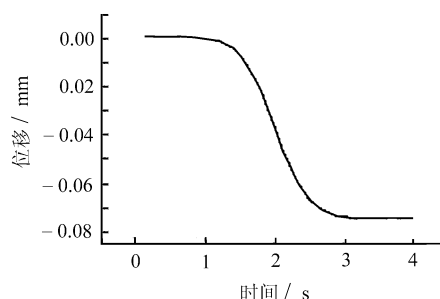


图 6 位移与时间关系曲线  
Fig.6 Displacement-time curve

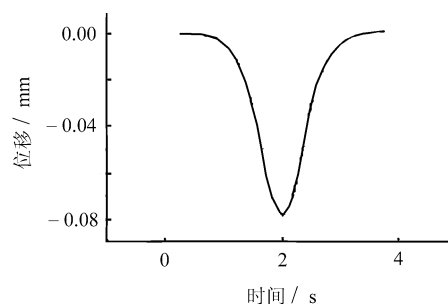


图 7 速度与时间关系曲线  
Fig.7 Velocity-time curve

3 现场爆破测振分析

3.1 所用仪器简介

本次测试采用 BlastMate III 型 (国内简称爆破 III 型) 测振仪，是加拿大 InstanTel 公司生产，用微电脑控制进行测振和测速操作的测振仪，是目前国内外较为通用的最先进的且易操作的监测仪。该机的主体由固化程序的电子计算机、热敏打印机、可充电蓄电池组成。辅体由三维测振传感器 (拾震器) 和噪声测试麦克风组成。测试时，将拾震器

和噪声测试麦克风插入主机的相应插孔,即可形成整个测试系统。如图 8 所示。

测试结束后,主机内的固化程序电子计算机可对测试结果进行简单处理,并可由热敏打印机立即打出地震波形图,最大振速及频率,频率分布状况;声波波形图,最大声波波强及频率,进行深入分析时还可利用主机上的接口及所配置的普通分析软件和高级软件与计算机联接,进行各种分析研究。



图 8 Blast Mate III 型测振系统图  
Fig.8 Blast Mate III seismograph

### 3.2 现场测试

#### 3.2.1 选用主要性能参数

触发方式为自动触发;触发水平为  $0.5 \sim 1$  mm/s,监测方式为连续监测方式,采样率为 1 024 标准采样率,通频带:  $2 \sim 300$  Hz,速度误差:小于  $0.1$  mm/s,加速度误差:小于  $0.001$  g,位移误差:小于  $0.001$  mm。

#### 3.2.2 测试过程

在古城铁路隧道正下方的隘岭隧道右线的拱顶及左右两侧边墙各安装一爆破测振仪探头(合计 3 只探头),当列车通过隘岭隧道时,开启仪器采集数据。测试示意图如图 9 所示。

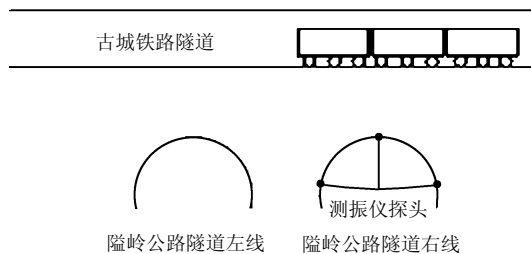


图 9 列车通过时对隘岭隧道右线测振示意图  
Fig.9 Blast Mate III seismograph

#### 3.2.3 测试结果

经过反复 3 次量测(每次都等到上方正好有列车通行时开始数据采集),3 台爆破测振仪均未能测到振动速度值,说明上方古城隧道通行的列车在下方隘岭隧道周边围岩上产生的振动小于测振仪的最

小触发水平为  $0.5$  m/s,上述数值计算结果也证实了这一点。

## 4 结 论

本文基于分层法原理,编制了 Fortran 程序,分析了列车荷载通过时下方围岩的动力响应,得到了列车通过时两隧道交叉位置沿围岩深度方向的位移-时间曲线和振速-时间度曲线,据此得到两隧道交叉断面上隘岭隧道洞壁位置的振动速度,将其和现场实测结果进行了比较,可得到如下结论:

(1) 列车通过古城隧道时,通过爆破测振手段量测不到下方隘岭隧道洞壁上的振动速度,说明列车荷载在该位置引起的振动效应小于测振仪的最小触发水平  $0.5$  mm/s,结合数值分析情况,可判断列车荷载引起的振动效应对隘岭隧道几乎没有影响,设计时和施工时可不作特殊考虑。

(2) 将上面的移动荷载变换为围岩内部的爆炸冲击荷载,仍可利用分层法分析下方隘岭隧道施工时因爆破的振动效应对上方古城隧道的影响,监测组也通过衬砌位移量测、收敛量测、已有裂缝发展量测、以及爆破测振等手段进行了量测,有关结果另文介绍;

(3) 下穿段施工已顺利结束,下穿施工中未对列车通行做任何限制,施工中未见异常情况。

### 参 考 文 献

- [1] 王明年,潘晓马,张成满,等.邻近隧道爆破振动响应研究[J].岩土力学,2004,25(3):412-414.  
WANG Ming-nian, PAN Xiao-ma, ZHANG Cheng-man, et al. Study of blasting vibration influence on close-spaced tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(3): 412 - 414.
- [2] Hirokazu TAKEMIYA, Shuhei SATONAKA, Wei-ping XIE. Train track-ground dynamics due to high speed moving source and ground vibration transmission[J]. **Structural Engineering/Earthquake Engineering**, JSCE, 2001,18(2): 299 - 309.
- [3] HUANG H H, YANG Y B. Elastic wave in visco - elastic half - space generated by Various Vehicle Loads[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2001, 21: 1 - 17.
- [4] Terumi TOUHEI. Impulsive response of an elastic layered medium in the in-Plane wave field based on a thin-layered element and discrete wave number method[J]. **Structural Engineering/Earthquake Engineering**, JSCE, 1993, 465(23), 137 - 144.
- [5] 王国波.移动荷载作用下地基土动力响应计算方法的研究[学位论文 D].武汉:武汉理工大学,2003.