

文章编号: 1000-7598-(2006) 增-0779-05

引水隧洞下穿铁路隧道近接施工振动影响研究

龚 伦 , 仇文革

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: 结合云南省盐津县白水江三级电站引水隧洞下穿内-昆铁路手扒岩隧道的工程实际, 采用数值模拟计算及现场测试对既有铁路隧道受下穿引水隧洞施工产生的振动影响进行研究。结果表明, 经验公式的计算结果作为预测及警示是偏于安全、可行的, 数值模拟分析结果比经验公式更接近工程实际; 引水隧洞的掌子面距铁路隧道前后 $4D$ (D 为引水隧洞开挖洞径) 范围内施工时, 需对铁路隧道交叉点处的振动速度进行监测, 重点是竖直方向的振动速度; 引水隧洞在铁路隧道正下方爆破施工时, 爆破施工所采用的最大段装药量不得大于 2.5 kg , 以满足振动速度控制标准; 施工过程中进行的爆破振动监测并根据监测结果及时调整爆破参数, 是此类地下近接工程成功修建的有力保障。

关 键 词: 引水隧洞; 下穿隧道; 振动影响; 振动监测; 近接工程

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study on vibration influence of nearby excavation of a traversing diversion tunnel on above existing railway tunnel

GONG Lun, QIU Wen-ge

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper gives an analysis of blasting vibration influence of a traversing diversion tunnel construction on the above existing railway tunnel, by using numerical methods and field test, associated with the practical situation of Shoupayan Tunnel of Nei-Kun Railway which was traversed by the diversion tunnel of Baishuijiang Cascade III Hydropower Station in Yanjin Yunnan Province. The analysis result indicates that, empirical formula's results are safe and feasible. Numerical simulation results are more contiguous with engineering practice than those of empirical formula. When the distance between diversion tunnel face and railway tunnel is less than $4D$ (D is the hydraulic tunnel diameter), the vibration speeds at the point of intersection in railway tunnel must be monitored, especially for the vertical vibration speed. When constructing the diversion tunnel under the railway tunnel, the detonator of the maximum segment should be less than 2.5 kg in order to satisfy control criterion of vibration speed. The blasting vibration monitoring in the course of excavation and the blasting parameters modification timely according to monitoring results are the guarantees for the successfully nearby excavation.

Key words: diversion tunnel; traversing tunnel; vibration influence; vibration monitoring; nearby excavation

1 引 言

随着国民经济持续发展, 国家对基础设施建设力度日渐加强, 交通及水利工程得到空前发展, 使得新建隧道靠近既有建筑物、小净距平行隧道、上下交叉隧道等形式的地下近接工程越来越多^[1]。

目前对靠近既有建筑物和小净距隧道等近接工程的爆破振动问题均有研究^[2-12], 而对于上下交叉近接隧道的动力影响研究相对较少。文本结合云南

省盐津县白水江三级电站引水隧洞下穿内-昆铁路手扒岩隧道工程, 采用数值模拟计算及现场测试对上下交叉近接隧道在爆破荷载作用下的振动影响进行研究

2 工程概况

引水隧洞与铁路线路平面夹角为 82° , 从铁路隧道下方穿过, 平面相交处铁路隧道基底标高 465.55 m , 引水隧洞洞顶外轮廓标高为 452.49 m ,

收稿日期: 2006-08-20

基金项目: *国家自然科学基金资助 (No. 50578135)

作者简介: 龚伦, 男, 1974 年生, 博士研究生。主要从事隧道及地下工程的近接工程机理的研究。E-mail: gonglun33@126.com

两隧道净距为 13.06 m。

手扒岩隧道建筑限界为隧限-2A, 碎石道床, 断面尺寸: 净高 6.55m、净宽 4.9 m, 衬砌 C20 混凝土厚度 40 cm (Ⅲ级), 铺底厚度 20 cm; 引水隧洞穿越灰岩、泥灰岩、砂岩等地层, 圆形断面尺寸: 内径 7.0 m、外径 8.1 m, 衬砌 C20 混凝土厚度为 55 cm。

引水隧洞与铁路隧道净距小于 $2D^{[1]}$ (D 为引水隧洞开挖洞径), 故此工程属近接隧道工程。引水隧洞的爆破施工对铁路主干线上处于运营中隧道的动力影响及对策是亟需解决的问题。

3 经验公式

3.1 萨道夫斯基公式

对于所研究的引水隧洞爆破施工, 掏槽眼的爆破振动常常是最大的, 掏槽爆破采用分段延时技术后多为单孔起爆, 故可采用萨道夫斯基公式对峰值质点振动速度进行估算。

$$V = K(Q^m / R)^\alpha \quad (1)$$

式中: V 为爆破振动速度 (cm/s); K 为地质系数; α 为爆破地震波衰减系数; Q 为最大段药量 (kg); R 为爆心距测点距离 (m); m 为药量指数。

3.2 速度控制标准

《爆破安全规程》(GB6722-2003)规定, 交通隧道振动速度标准为 10~20 cm/s。考虑到处于运营中的隧道拱部锚固有电气化设施的多种部件, 为了确保安全, 取 5 cm/s 作为铁路隧道的振动速度控制标准。

3.3 参数选取

根据工程现场地质条件及《爆破安全规程》, 参数选取见表 1。

表 1 经验公式参数表

Table 1 Parameters of empirical formula

岩性	高程差 R/m	地质系数 K	衰减指数 α	药量指数 m	速度控制标 [v]/cm·s ⁻¹
中硬岩	13.06	200	1.65	1/3	5

3.4 计算结果分析

质点振动速度 V 受最大段装药量 Q 、距爆源中心距离 R 、起爆方法以及爆源与测点间地质等条件影响。根据以上参数计算不同距离适宜的最大段药量如图 1 所示, 图中尺寸单位除高程以 m 计外, 其余均以厘米计; 圆圈内数字代表该范围容许最大段药量, 单位: kg。

在引水隧洞掌子面距铁路隧道边墙为 30.75 m 时, 铁路隧道上的振动速度为 1.7 cm/s, 达到速度控制标准的 1/3, 故引水隧洞掌子面在铁路隧道前后 30.75 m (共 67.2 m 约 $8D$) 范围内爆破施工时, 需在铁路隧道上进行爆破振动监测。

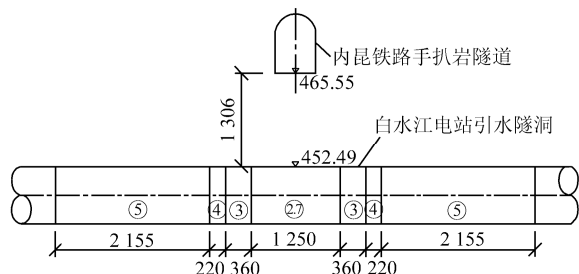


图 1 引水隧洞爆破施工最大段药量适用范围

Fig.1 Quantity of explosive in maximum part of diversion tunnel by blasting excavation

4 数值模拟计算

4.1 计算原理

(1) 方程 整体的动力平衡方程为

$$[m]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (2)$$

式中: $[m]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$ 、 $\{u\}$ 分别为加速度、速度和位移列阵; $\{F(t)\}$ 为动荷载列阵。

(2) 积分 利用 Newmark 积分方法, 参数满足

$$\delta \geq 0.5, \quad a \geq 0.25(\delta + 0.5) \times 2 \quad (3)$$

(3) 阻尼 采用通用的瑞利 (Rayleigh) 阻尼, 如下式:

$$[C] = \alpha[m] + \beta[K] \quad (4)$$

式中 $\alpha = \xi\omega_1$; $\beta = \xi/\omega_1$, 其中 ω_1 为基频, 由模态分析得到; ξ 阻尼比, 取为 0.01。

4.2 有限元模型的建立

4.2.1 计算模型

本次计算只进行平面分析。模型的左、右及下边界均取至距引水隧洞开挖轮廓线 150 m 处, 上边界取至地表 (100 m), 计算模型共划分 6 202 个节点、7 002 个单元。参考点 1~3 位于铁路隧道墙脚位置, 间距分别为 21.75, 14.70 m; 参考点 4 与引水隧洞中心线位于同一高度, 距开挖轮廓线距离为 17.7 m, 爆破加载及考察点位置见图 2 所示。

4.2.2 约束及荷载

(1) 约束: 计算模型上边界为自由边界, 左、

右及下边界均采用人工边界(无反射边界)，引水隧洞周边为爆炸压力荷载边界。

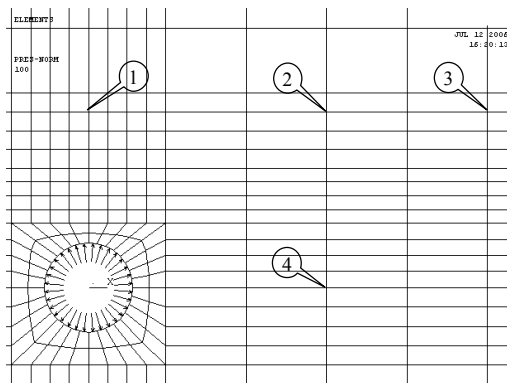


图 2 引水隧洞爆破加载及考察点位置
Fig.2 Blasting loads of diversion tunnel and investigating position

(2) 荷载：爆破荷载简化为具有上升段和下降段的三角波形荷载(图 3)。图中 $P_{\max}$ 为爆破荷载的应力峰值，与炸药品种、装药结构和围岩性质等因素有关，由式(5)求解。

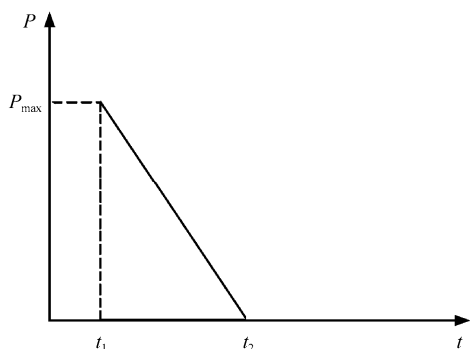


图 3 数值计算爆破荷载简化三角波形图
Fig.3 Simplified triangle wave of blasting loads for numerical computation

$$P_{\max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2154}{Z^3} - 0.803 \quad (5)$$

式中： $Z = R/Q^{1/3}$ 为比例距离， R 为炮眼至荷载作用面的距离(m)； Q 为炮眼装药量(kg)。爆破荷载曲线典型的加载到峰值应力的升压时间为 8~12 ms，卸载时间为 40~120 ms，本次计算取加载时间 t_1 为 10 ms，卸载时间($t_2 - t_1$) 为 90 ms。

4.2.3 材料参数选取

本次计算参照《铁路隧道设计规范》(TB 10003-2005) 选取材料参数，见表 2。

表 2 围岩物理力学指标

Table 2 Physico-mechanics indices of surrounding rock					
围岩级别	弹性模量 E /10 ⁴ MPa	泊松比 μ	重度 r /kN · m ⁻³	凝聚力 c /MPa	内摩擦角 ϕ /(°)
III级	0.7	0.25	23	0.7	40

4.3 结果分析

数值模型计算中，以经验公式计算的各种最大段装药量进行计算得到荷载应力峰值进行加载，只模拟引水隧洞在既有铁路隧道正下方施工时的影响。经计算，各种最大段药量情况下的爆破荷载压力峰值及各参考点峰值振动速度详见表 3。

从计算结果可知：

(1) 峰值振动速度随最大段药量的减小而降低，当最大段药量小于 3 kg 时振动速度满足速度控制标准，比经验公式计算所得的 2.7 kg 稍大。

(2) 引水隧洞爆破施工会对既有铁路隧道产生振动影响。各考察点受到的爆破振动影响程度与距爆源的距离有关，随距离的增大而减小。

(3) 最大峰值振动速度方向随考察点与振源位置关系而变，考察点与振源在同一高度时为水平方向(考察点 4)；与振源为上下关系时是竖直方向(考察点 1)。

(4) 既有铁路隧道交叉点(考察点 1)的峰值振动速度最大，故在引水隧洞爆破施工时，可仅对此点进行爆破振动监测。

表 3 爆破应力峰值及各考察点峰值振动速度

Table 3 The maximum values of blasting stresses and vibration speed at investigating position						
最大段药量/kg	爆破应力峰值/kPa	振动速度/ m·s ⁻¹				
		振速方向	1	2	3	4
5	371.02	v_x	0.00	2.59	1.36	5.05
		v_y	6.65	1.99	0.66	0.00
4	313.54	v_x	0.00	2.19	1.17	4.23
		v_y	5.58	1.70	0.55	0.00
3	253.45	v_x	0.00	1.78	0.93	3.40
		v_y	4.52	1.38	0.44	0.00
2.7	234.74	v_x	0.00	1.66	0.86	3.14
		v_y	4.25	1.30	0.41	0.00

5 振动监测

5.1 监测方案

根据上述分析，本工程中仅在铁路隧道上对水平及坚直振动速度进行监测，对监测结果进行微积分处理，即可得到监测信号的加速度、位移波形。

监测仪器采用 IDTS 3850 振动记录仪，该仪器可对爆破振动等信号进行记录、数据分析、结果输

出、显示打印、数据存储, 爆破振动测试系统如图 4 所示。监测断面设置在铁路隧道上受振动影响最大的断面, 即两交叉隧道相交点断面。监测测点布置在监测断面的墙脚位置。引水隧洞每次爆破均进行监测。

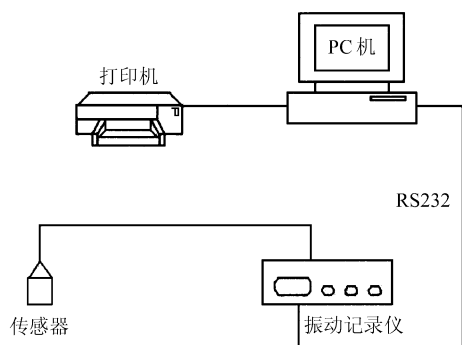


图 4 爆破振动测试系统

Fig.4 Blasting vibration test system

5.2 监测结果分析

5.2.1 监测结果

第一阶段: 此阶段部分监测结果见表 4 和图 5。

表 4 第一阶段监测结果

Table 4 Monitoring result of the first stage

序号	年.月.日	最大段药量 /kg	振动速度 /cm·s ⁻¹	主频 /Hz	距离 /m
1	2004.12.28	5.0	0.1537	15.63	45.1
2	2005.1.10	5.0	0.9316	14.04	32.6
3	2005.1.11	5.0	1.7009	9.16	30.8
4	2005.1.13	5.0	2.0729	15.26	23.3
5	2005.1.15	5.0	4.2489	76.29	17.8
6	2005.1.16	4.0	3.7775	70.80	16.5
7	2005.1.17	4.0	3.9887	183.11	15.3
8	2005.1.18	4.0	1.4492	64.70	14.3

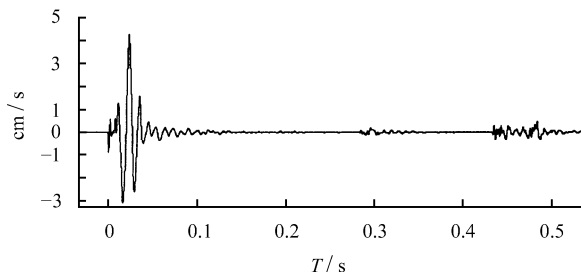


图 5 第 5 次爆破振动监测结果

Fig.5 The fifth blasting vibration monitoring results

爆破振动监测工作在引水隧洞掌子面未进入对铁路隧道产生影响的范围之前已进行, 根据监测结果及时对最大段药量等爆破参数进行调整, 比如第 5 次监测结果达到 4.25 cm/s, 若不改变爆破参数,

随着爆破距离的减小, 爆破振动速度很可能超过振动速度控制标准, 所以在第 6 次监测时将最大段药量减至 4 kg 时监测结果未超过振动速度控制标准。

第二阶段: 在诸多因素的影响下, 本工程一直停工到 2006 年 3 月。此阶段部分监测结果见表 5 和图 6。

表 5 第二阶段监测结果

Table 5 Monitoring result of the second stage

序号	年.月.日	最大段药量 /kg	振动速度 /cm·s ⁻¹	主频 /Hz	距离 /m
1	2006.4.8	4.0	3.186 7	89.844	13.2
2	2006.4.10	4.0	4.393 2	99.487	10.9
3	2006.4.22	3.0	2.476 1	61.401	3.9
4	2006.4.23	3.0	1.872 9	201.904	2.8
5	2006.4.24	3.0	2.607 4	154.541	1.5
6	2006.4.25	3.0	4.434 6	134.277	0.3
7	2006.4.26	2.5	3.552 6	196.289	-0.6
8	2006.4.27	3.0	2.983 3	117.920	-1.9
9	2006.4.30	3.0	1.059 9	154.785 2	-6.1
10	2006.5.3	3.0	0.705 5	147.705 1	-11.2
11	2006.5.8	4.0	0.534 3	127.441 4	-21.6

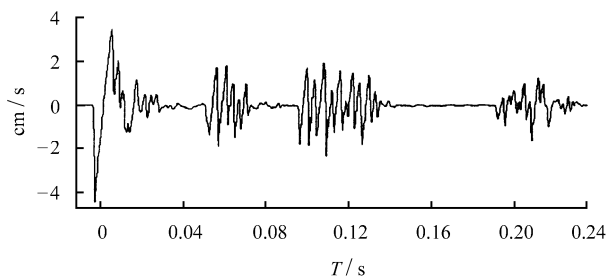


图 6 第 6 次爆破振动监测结果

Fig.6 The sixth blasting vibration monitoring results

复工后即面临引水隧洞下穿铁路隧道的近接影响段施工, 为本工程修建的关键时期, 关系到工程的成败。在此, 严格按监测结果指导施工的方针, 在第 6 次监测结果达到 4.43 cm/s 的情况下, 及时调整最大段药量为 2.5 kg, 从而实现了引水隧洞从铁路下方的安全通过。

5.2.2 结果分析

将第二阶段第 7 次监测时采用的最大段药量代入式 (1) 进行计算, 得到振动速度为 4.77 cm/s, 比监测结果大 1.22 cm/s, 说明经验公式计算时选取的 K 和 α 与实际工程地质不完全相符。由于经验公式计算结果比实际监测结果大, 说明用此经验公式进行预测及警示是偏于安全、可行的。同时, 数值模拟分析中所得允许最大段药量 (3 kg) 比经验

公式计算结果 (2.7 kg) 要大, 说明数值模拟分析的结果更接近工程实际。

6 结 论

(1) 经验公式的计算结果虽与现场监测有一定出入, 但用其作为预测及警示是偏于安全、可行的, 数值模拟分析结果比经验公式更接近工程实际。

(2) 引水隧洞掌子面在距铁路隧道前后 $4D$ 范围内施工时, 需对铁路隧道交叉点处的振动速度进行监测, 重点考察竖直方向的峰值振动速度。

(3) 引水隧洞在铁路隧道正下方爆破施工时, 爆破施工所采用的最大段装药量为 2.5 kg, 以满足振动速度控制标准。

(4) 在工程爆破施工过程中, 通过振动监测并根据监测结果及时调整爆破参数, 是此类地下近接工程成功修建的有力保障。

参 考 文 献

- [1] 仇文革. 地下工程近接施工力学原理与对策研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
- [2] 龚伦, 仇文革, 曹义. 下穿楼房隧道近接施工爆破控制技术[J]. 铁道标准设计, 2006, 1: 86—88
GONG Lun, QIU Wen-ge, CAO Yi. Research on the blasting control technology in construction of tunnels below high buildings[J]. **Railway Standard Design**, 2006 (1): 86—88
- [3] 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.
- [4] 姚勇, 何川, 晏启祥, 等. 董家山隧道小净距段爆破控制的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(增): 501—506.
YAO Yong, HE Chuan, YAN Qi-xiang, et al. Numerical simulation of blasting control for small clear distance zone of Dongjiashan tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.2): 501—506.
- [5] 郭建群, 张继春, 曹孝君, 等. 穿越高楼下的浅埋隧道掘进控制爆破技术[J]. 爆破, 2003, 20(1): 28—30.
- [6] 魏晓林, 郑炳旭. 爆破震动对邻近建筑物的危害[J]. 工程爆破, 2000, 6(3): 81—88
- [7] 阳生权. 小线间距施工隧道爆破地震影响下既有隧道围岩线性动力分析[J]. 工程爆破, 1998, 4 (1): 1—6.
- [8] 易长平, 卢文波. 开挖爆破对邻近隧洞的震动影响研究[J]. 工程爆破, 2004, 10(1): 1—5.
- [9] 毕继红, 钟建辉. 邻近隧道爆破震动对既有隧道影响的研究[J]. 工程爆破, 2004, 10(4): 69—73.
- [10] 刘慧. 近距侧爆情况下马蹄形隧道动态响应特点的研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20 (2): 175—181.
- [11] Wu C S, Li J X, Chen X. Blasting in twin tunnels with small spacing and its vibration control [J]. **Tunneling and Underground Space Technology**, 2004, 19: 518—518.
- [12] P.K. Singh. Blast vibration damage to underground coal mines from adjacent open-pit blasting[J]. **Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39: 959—973.