

文章编号: 1009 - 6582 (2007) 01 - 0061 - 04

城市小间距交通隧道爆破安全监测及结果分析

雷明锋 张运良 彭立敏
(中南大学土木建筑学院,长沙 410075)

摘要 根据长沙市小间距交通隧道的爆破安全现场监测结果,进行了安全性评价及地震波衰减规律分析。安全性评价分别采用振速峰值和振速 - 频率安全判据进行评判,结果表明各测试结构物在测试爆破条件下是安全的,且具有较大的安全空间,可适当增加装药量,以加快施工进度,节约资金。通过萨道夫斯基经验公式回归分析,给出了测试条件下的场地系数 k 和地震波衰减指数的值,并由此反演得到任意质点振速峰值预测公式和最大(段)允许装药量的控制公式,且后续施工证明装药量控制值是可靠、安全的。

关键词 城市交通隧道 爆破监测 安全评价 衰减规律 振速峰值预测 装药量控制

中图分类号: U455. 6 **文献标识码**: A

1 引言

随着我国经济的迅速发展,大量既有单线隧道需增设二线或新线隧道,一开始就需建成平行的双线隧道,且为充分利用土地,间距相对越来越小,这就存在新建隧道开挖爆破产生的地震动有可能引起邻近既有隧道损伤的危险,如国内的湘黔铁路增建的线坪口隧道、流潭隧道等^[1];国外意大利的 Lo - cooColio 公路隧道等^[1],都因间距较小,而使得既有隧道在爆破作用下出现衬砌开裂、剥落等工程安全现象,严重危及车辆及行人的安全。尤其是在城市进行该类工程爆破施工时,由于人群、构筑物密集,除了要保证工程质量和施工进度外,还必须保证施工区一定范围内的人员与建、构筑物的安全。由此可见,在施工过程中对隧道爆破地震动进行安全监测和分析(特别是小间距隧道),确保围岩、既有隧道以及附近建、构筑物的稳定与安全显得尤为重要。

2 工程概况

长沙市天际岭隧道属于重要的市政道路工程之一,它位于火星南路上,隧道横穿植物园,呈南北走向,全长约 444 m,为双线隧道。隧道横断面开挖宽度约为 17. 264 m,开挖高度约为 11. 01 m,其中心线间距为 47. 264 m,岩柱净宽为 30 m。按《公路隧道设计规范》要求,类围岩最小净间距 $(3. 0 B \sim 5. 0$

$B)$ 为 51. 792 ~ 86. 32 m^[2],因此该隧道属小间距公路并行隧道。其中右线已贯通,于 2003 年投入运营。左线由于资金不能及时到位,停工一年零八个月后才恢复施工,裸露时间过长,加之雨季来临,存在严重的安全隐患。隧道主要地质条件:岩石为强风化泥质粉砂岩,岩性较软,稳定性差,为土夹石层,岩石及土层颜色较深,遇水易泥化,岩面湿润。因此,施工中根据短进尺、弱爆破的要求,采用上下台阶爆破开挖,其中下台阶又分为左右断面分部爆破,主要的爆破参数见表 1,爆眼布置限于篇幅从略。隧道建成后将成为纵贯长沙市的主要干道之一,其对改善长沙市交通状况、投资环境具有十分重要的意义。

表 1 爆破参数

Table 1 Table of blasting parameters

爆破部位	上台阶	左下台阶	右下台阶
炮孔数 / 个	151	93	92
总药量 / kg	40 ~ 68	24 ~ 36	24 ~ 31
最大段装药量 / kg	12 ~ 24	4. 2 ~ 8. 0	4. 2 ~ 8. 4
延时时差	50 ms 等间隔		
雷管总段数	15		
进尺 / m	0. 75 ~ 1. 5	1. 3 ~ 1. 5	1. 3 ~ 1. 5
掏槽方式	中空掏槽	—	
起爆方式	非电毫秒雷管		

注:表中数据包括了初次试爆爆破参数,且在实际施工中各参数根据围岩条件的好坏作了适当的调整。

修改稿返回日期: 2006 - 07 - 10

作者简介:雷明锋,男,硕士研究生.

表 2 测试分析系统

Table 2 System for testing and analyzing

传感器	水平、垂直振速传感器
数据采集系统	DTS3850 - 3 爆破振动记录仪
数据分析软件	SeismoView2.0 软件

3 量测目的及对象

因长期停工使得天际岭隧道左线围岩、初期支护裸露时间过长,加之雨季来临,整个隧道结构存在严重的安全隐患。而爆破时产生的地震波的破坏作用是爆破公害中重要问题之一^[3]。爆破时炸药的部分能量转化为地震波,通过介质由爆心向外传播,引起介质质点振动,对周围建、构筑物产生一定的影响。因此,本文通过爆破地震波的现场监测及其结果分析,来了解施工(左)洞爆破开挖对既有(右)洞结构、施工洞洞口假山及其围岩结构的影响,并为后续爆破施工提供科学合理的爆破参数,如最大(段)装药量、段与段之间的最佳起爆时间间隔等,以确保各建、构筑物的安全。

4 量测方法及测点布置

目前,在国内大都以振速峰值来衡量爆破地震震动强度,并作为危害建、构筑物的安全指标。因此,在该工程的爆破监测中,选用了如表 2 所示的振速采集分析系统。此系统不仅可记录测点的振速,而且可获得地震波的其他主要参数,如频率等。

文献 [1] 指出,新建隧道开挖爆破产生的地震震动对既有隧道衬砌迎爆面的边墙影响最大,其振动速度明显高于其他部位,是最危险的部位。因此,在既有隧道的迎爆面边墙布置三个测点,其他测点根据工程实际需要及业主要求进行布置,具体位置及相应距离见图 1 和表 3。

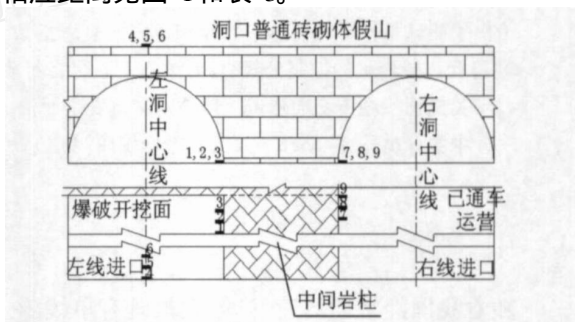


图 1 爆破测点布置示意

Fig 1 Arrangement of measuring points for blast test

表 3 量测结果计算

Table 3 Table of test results

监测点	传感器编号	R/m	Q/kg	f_w /Hz	v /(cm/s)	K	
左洞洞口假山	4(水平)	80	12	22.5	0.3224	105.29	1.568
	5(垂直)	90	12	10.5	0.5252		
	6(水平)	100	12	22.5	0.2215		
施工洞	1(水平)	10	4.2	124.6	6.8068	244.748	1.985
	2(垂直)	13	4.2	104.8	3.6567		
	3(水平)	20	4.2	124.6	1.6939		
既有洞	7(水平)	39	12	19.0	3.4635	558.749	1.988
	8(垂直)	40.4	12	35.6	0.7797		
	9(水平)	43	12	59.8	2.2422		

注:表中 R 为爆源中心至监测点的距离(m); Q 为最大装药量或分段爆破时的最大段装药量(kg); f_w 为监测点地震波主频(Hz); K、为与爆破点地形、地质条件、爆破方式等有关的系数和衰减指数。

5 测试过程

地震动监测过程分三个部分进行:第一部分为施工洞围岩爆破地震动监测;第二部分为既有洞结构爆破地震动监测;第三部分为包括洞口假山在内的周围建、构筑物的爆破地震动监测,其中洞口假山为普通砖砌体结构,起装饰作用,其结构强度相对较

低。每次测试的具体过程包括以下几个步骤:

- (1) 传感器参数设置,包括量程、预触发值、采样率、通道等。
- (2) 传感器的埋设,在预先设计的位置固定好传感器,并检查其线路通道的有效性。
- (3) 数据采集。
- (4) 数据处理及结果分析。

6 量测结果及分析

6.1 量测结果

相继进行了共十次现场测试,经配套软件处理后共获得数据 60 组,其中有效数据为 56 组。限于篇幅仅取其中 9 组代表性数据,如表 3 所示。

6.2 结果分析

根据现场测试数据,分别对既有洞结构、施工洞洞口假山及围岩结构进行安全性评价,并通过萨道夫斯基经验公式对地震波的衰减规律进行回归分析。

6.2.1 爆破安全性评价

为使安全评价更具科学性,本文除采用振速峰值作为强度评判标准外,还进一步采用振速 - 频率安全判据对洞周建、构筑物、围岩及既有隧道结构进行安全性评价。

(1) 以振速峰值作为安全判据

根据《GB60772 - 2003 爆破安全规程》中的规定,按下列值作为评判标准:

假山:为普通砖砌体结构,取 2 ~ 3 cm/s

类围岩:按不稳定有良好支护围岩,取 10 cm/s

既有洞:按交通隧道,取 15 cm/s

从测试结果看,假山、围岩以及既有洞的最大振速均远小于安全标准值,说明已实施的爆破施工中地震动不会引起建、构筑物及围岩的破坏。尤其是对既有隧道,最大振速为 3.4635 cm/s,远小于衬砌混凝土产生裂缝的振速临界值 20 cm/s,因此,不会引起衬砌混凝土的开裂,既有洞是稳定的。同时,在后续施工中还可以适当增加装药量,以加快施工进度。

(2) 以振速 - 频率作为安全判据

以单一的振速作为评判标准,多侧重于经验,不同的标准给出的安全振速相差很大,而且建、构筑物种类结构各异,爆破类型、起爆方式也很多,爆破条件和爆破地震波通过介质情况复杂,在质点震动速度相同的情况下,通常会出现不同的质点震动频率及振动持续时间^[4]。而大量实测资料及理论分析表明,相同的建、构筑物在振速相同的条件下,不同的振动频率和振动持续时间对建、构筑物的动力响应是不一样的,如岩体强度通常随振动频率的增大而大幅度提高。因此,除持续时间之外(持续时间通常很短),结构物在爆破作用下破坏的主要因素有振动速度和振动频率。所以,仅单一考虑振速峰

值是不科学的,应采用振速 - 频率作进一步的分析。

我国《GB60772 - 2003 爆破安全规程》中给出了某些建、构筑物的振速 - 频率安全判据的具体规定,见表 4。利用测试配套软件,可得各监测对象的振速 - 频率安全评定示意图(图 2)。

表 4 建、构筑物振速 - 频率安全判据

Table 4 Safety criteria for vibration velocity - frequency of structures

保护对象	安全质点振动速度 / (cm/s)		
	< 10 Hz	10 ~ 50 Hz	50 ~ 100 Hz
一般砖房、非抗震性 大型砌块建筑物	2.0 ~ 2.5	2.3 ~ 2.8	2.7 ~ 3.0
交通隧道	10.0 ~ 20.0		

从表 3 中可见,假山处质点振动频率为 10 ~ 22 Hz,施工洞洞内围岩的质点振动频率为 104 ~ 124 Hz(测点布置在一浇注混凝土板上,左右无约束且较薄,故频率相对较大);既有洞监测点处振动频率为 19 ~ 60 Hz,对应其振速,均处在安全线以下(见图 2,仅为其中代表性的两组数据),故爆破是安全的。同样可见其具有较大的安全空间,增加装药量以加快施工,可节约成本。

6.2.2 地震波衰减规律分析

对测试结果,通过萨道夫斯基经验公式回归分析得到场地系数 K 值和地震波衰减指数 n 值(表 3)。从表 3 中可见:

(1) 在洞内,即施工洞和既有洞均以水平振速为主,垂直振速相对较小。经统计,超过 80% 的测次显示,在同一次爆破中,设计测点的水平振速大于垂直振速,且水平振速为垂直振速的 2 ~ 4 倍左右。故可以水平振速作为控制因素。

(2) 在洞外,垂直振速相对较大,约为水平振速的 1.2 ~ 1.5 倍左右,相差不大。

(3) 利用萨道夫斯基经验公式回归分析得到地震波衰减规律,回代可得质点振速峰值预测公式:

$$v_{水平} = 222.916(\sqrt[3]{Q/R})^{1.754} \quad (1)$$

$$v_{垂直} = 38.418(\sqrt[3]{Q/R})^{1.222} \quad (2)$$

式中 $v_{水平}$ ——质点水平振速峰值 (cm/s);

$v_{垂直}$ ——质点垂直振速峰值 (cm/s);

Q ——最大(段)装药量 (kg);

R ——爆心距 (m)。

同时,根据安全判据规定的各结构允许峰值,可反演得到最大(段)允许装药量的控制公式:

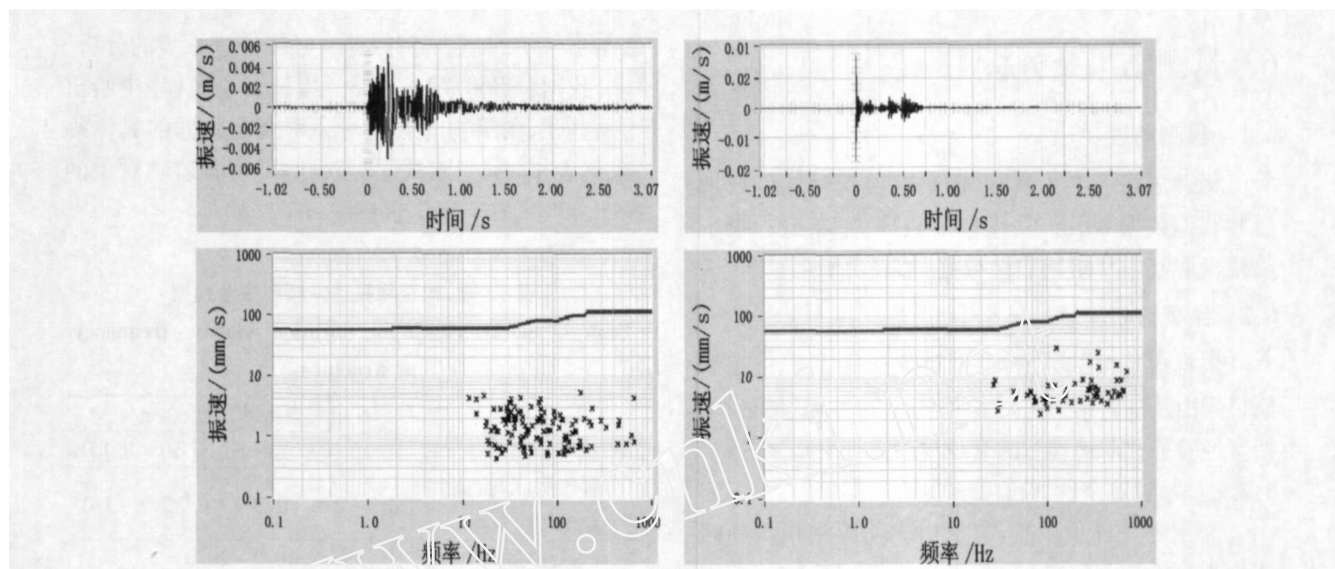


图 2 振速 - 频率安全评定示意 (对数坐标)

Fig 2 Safety evaluation graph for vibration velocity - frequency (logarithmic coordinate)

$$Q = R^3 ([v]/1.22 \cdot 200)^{3/1.572} \quad (3)$$

式中 $[v]$ ——《爆破安全规程》规定的允许峰值 (cm/s)。

于是,对各种建、构筑物计算得到不同的最大(段)允许装药量,取其最小值即为施工爆破的最大(段)允许装药量,即有:

$$Q_{\max} = \min_{i=1, \dots, n} Q_{i\max} \quad (4)$$

式中 Q_{\max} ——施工中实际可取的最大允许装药量或最大段允许装药量 (kg);

$Q_{i\max}$ ——测点 i 达到峰值振速时的最大允许装药量或最大段允许装药量 (kg)。

在本工程中,有:

$$Q_{\max} = \min \{ Q_{\text{假山}\max}, Q_{\text{围岩}\max}, Q_{\text{既有洞}\max} \} \quad (5)$$

本例中,在计算 $Q_{\text{围岩}\max}$ 时取距开挖面 15 m 处为控制点,即当此处质点振速达到峰值时,装药量为最大(段)装药量。其他建、构筑物均取离爆源距离最近点为控制点。通过计算可得到:

$$Q_{\text{测试}\max} = 12 \text{ kg} < Q_{\max} = 28 \text{ kg}$$

再一次说明已实施的爆破装药量是安全的。同时在后续的爆破施工中,最大段装药量达 24 kg,各结构仍处安全状态,说明装药量控制值是可靠、安全的。

7 主要结论

通过对长沙市天际岭隧道的爆破实地监测及结果分析,主要得到以下结论:

(1) 已实施的爆破对周围建、构筑物、围岩及既有隧道是安全的,并在此基础上具有一定的安全空间,可适当增加装药量,以加快施工速度。

(2) 隧道内振速以水平振速为主,垂直振速相对较小,故可选择水平振速作为控制因素。在洞外则是垂直振速大于水平振速,但两者相差不大。

(3) 通过萨道夫斯基经验公式回归分析了地震波的衰减规律,分别推导出振速峰值预测公式和最大(段)允许装药量控制公式。根据《爆破安全规程》规定的最大振速峰值,计算得到本工程特殊的地质及施工条件下的最大(段)允许装药量为 28 kg,后续施工验证此装药量控制值是可靠、安全的。

(4) 从所测得的地震波形图可以看出,在已实施的爆破施工中,均有地震波叠加的现象,故建议在后续的爆破施工中适当延长分段爆破段与段之间的时间间隔,避免地震波叠加,而产生高频波和振速增大,建议时间间隔增加到 200 ms。

参考文献

- [1] 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
- [2] JTG D70 - 2004 公路隧道施工技术规范 [S]. 北京:人民交通出版社, 2004
- [3] 彭远黔,刘素英. 承德钢铁公司黑山铁矿矿山爆破地震动效应 [J]. 山西地震, 1997, (3): 18 ~ 23
- [4] 唐春海,于亚伦,王建甫. 爆破地震动安全判据的初步探讨 [J]. 有色金属, 2001, 53 (1): 1 ~ 4
- [5] 国家标准局. GB60772 - 2003 爆破安全规程 [S]. 北京:中国标准出版社, 2003

(下转第 69 页)

内力及水平位移的现场监控量测结果进行对比分析,并对双连拱隧道中墙应力进行数值计算,得出在级围岩中,如果围岩条件较好的情况下,双连拱隧

道中墙一侧不进行回填;如果围岩条件较差,双连拱隧道中墙一侧可以采用横向钢支撑作临时支护,就能满足双连拱隧道整体结构的稳定性要求。

参考文献

- [1] 夏永旭,鲁彪.双连拱隧道中隔墙结构优化研究[J].公路,2005,(8):167~169
- [2] 陈建平,吴立.地下建筑工程设计与施工[M].武汉:中国地质大学出版社,2000,36~37
- [3] 申玉生,赵玉光.高速公路双连拱隧道的中墙力学特性分析[J].地下空间与工程学报,2005,1(2):200~204
- [4] 申玉生,赵玉光.高速公路双连拱隧道的明洞衬砌对中墙偏压问题分析[J].铁道建筑,2005,(7):50~52
- [5] 申玉生,赵玉光.偏压连拱隧道围岩变形的现场监测与分析研究[J].公路,2005,(4):194~198
- [6] 夏才初,刘金磊.相思岭连拱隧道中墙应力研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(增),1115~1119
- [7] 王军,夏才初,朱合华等.不对称连拱隧道现场监测与分析研究[J].岩石力学工程学报,2004,23(2):267~271
- [8] 陈贵红,李玉文,赵玉光.连拱隧道中墙受力研究[J].中国铁道科学,2005,26(1):20~24

Influence of backfill to one middle-wall side on its behavior in a double-arch tunnel

Dong Wendé¹ Gao Bo² Shen Yusheng²

(1 The Tenth Engineering Bureau Group Co., Ltd, C. R. E. C., Jinan 250000;

2 School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract In accordance with Xiaojinkou double-arch tunnel (with backfill on one side of middle wall) on Guanghui highway and Xiedipo double-arch tunnel (without backfill) on Yishui highway, in situ measurements and numerical analyses were carried out for the internal forces and horizontal displacements of their middle-walls on the purpose of comparison. Results of the analyses indicated, that under the condition of surrounding rock grade without backfill to one middle wall side or under the condition of the surrounding rock inferior to grade but with steel temporary support on one side of the middle wall, the structural stability requirements of the double-arch tunnel could all be satisfied. The monitored data and the experience can be referred to in the design, construction and research of similar projects.

Key words Double-arch tunnel; Backfill to the middle-wall; Influence on internal forces

(上接第 64 页)

Blast monitoring and analyses for urban traffic tunnels with small spacing

Lei Mingfeng Zhang Yunliang Peng Linlin

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075)

Abstract Based on the data obtained in the blast monitoring of urban traffic tunnels with small spacing in Changsha city, safety evaluation and analyses of the law of blasting vibration attenuation were carried out. Particle peak vibration velocity (PPVV) and vibration velocity-frequency criteria were used for safety evaluation. Results indicated that structures were safe under the test blast conditions and it was feasible to increase explosive quantity to fasten construction and save investment. According to Sadaovsky empiric formula, regression analyses were performed with the values of K and obtained, then the prediction formulas of PPVV for predicting the PPVV at any point were established. In addition, the control formula of explosive quantity for estimating the maximum explosive quantity in construction was put forward and justified to be safe and reliable in the following tunnel projects.

Key words Urban traffic tunnels; Blast monitoring; Safety criterion; Attenuation law; Prediction of PPVV; Explosive quantity control