

文章编号:1005-0523(2014)01-0017-06

浅埋隧道下穿建筑物爆破振动规律及控制研究

张建波,杨新安,何知思

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:敖包沟隧道是巴准铁路的控制性工程,隧道围岩与上覆地层为填土、黄土、砂岩夹泥岩,地层性质软弱,稳定性差;该隧道浅埋下穿西梁煤矿三栋建筑物,建筑物结构强度较差,隧道在下穿建筑物施工中的爆破控制技术成为关键技术。说明了下穿段的钻爆设计,采用现场测试的方法实测施工中的爆破振动,根据测试结果,调整爆破方案与参数,控制爆破对建筑物的振动影响。分析了爆破振动速度特征,采用回归分析的方法给出了浅埋隧道下穿建筑段的爆破振动速度传播规律,并给出了3方面的爆破控制措施。研究结果保障了敖包沟隧道下穿段的爆破施工安全,对同类施工有一定借鉴作用。

关键词:浅埋隧道;下穿建筑物;爆破开挖;监测;爆破控制

中图分类号:U25

文献标志码:A

爆破技术在隧道工程的建设中发挥着极其重要的作用。在爆破作业过程中,会有一些爆破危害产生,主要包括爆破振动、爆破飞石、空气冲击波、噪声、炮烟以及尘埃等。其中爆破振动对于附近的建筑物极易造成破坏^[1]。山岭隧道的开挖大多采用钻爆法施工,钻爆法具有施工速度快、安全、适应性强、施工成本低等优点,正是由于这些优点,钻爆法已广泛应用于山岭隧道的开挖中。另一方面,由于爆炸过程中能量的急剧释放,产生了很大的冲击作用,隧道在爆破过程中,必然会对围岩、衬砌以及临近建(构)筑物产生不同程度的影响,特别是下穿建筑物的浅埋隧道,甚至会引起建(构)筑物损坏或倒塌、边坡滑动以及隧道围岩裂开、冒顶、塌方等。因此,开展浅埋隧道爆破开挖及其振动规律的研究,探索隧道建设与地质环境、周边环境之间的相互关系、相互作用,以及由此产生或诱发的隧道各类病害,从而提出合理的控制技术措施,具有重要的现实意义^[2-4]。

以巴准铁路敖包沟隧道下穿建筑物段为工程背景,对隧道下穿建筑物施工爆破振动波的传播进行了测试,获得了大量的现场爆破振动数据,结合测试数据对爆破振动速度进行了分析,得到了浅埋隧道爆破振动规律,并且提出了浅埋隧道下穿建筑物爆破施工的控制措施。

1 工程概况

敖包沟隧道为巴准铁路的控制性工程,隧道全长3 180 m,为双线铁路隧道。隧道位于内蒙古高原区,主要地貌单元为低中山区,地形起伏大,沟梁相间,间歇性沟谷发育,山陡峰峻,切割强烈,最大高差85 m。隧道洞身围岩主要级别为Ⅳ、Ⅴ级,其中Ⅳ级围岩1 020 m,Ⅴ级围岩2 136 m。隧道在D1K34+592~D1K34+658段连续穿越敖家沟西梁煤矿职工宿舍、职工食堂及变电站三座建筑物,建筑物的结构较差。洞顶覆土地层为填土、黄土、砂岩夹泥岩,地层性质软弱,稳定性差。

收稿日期:2013-12-10

作者简介:张建波(1987—),男,硕士研究生,研究方向为隧道及地下工程。

2 浅埋隧道下穿建筑物爆破振动测试

2.1 爆破炮眼布置及掏槽方案设计

敖包沟隧道下穿建筑物段最大埋深仅20 m,地表覆盖较厚的全风化砂质黄土,稳定性较差。隧道洞身穿越砂岩夹泥岩层,且泥岩以夹层性质存在于砂岩之中,浅灰色,遇水具有一定的软化膨胀性,易崩解,属弱膨胀岩。为了确保隧道下穿建筑物段的施工安全,隧道拱部采用 $\Phi 89$ 超前大管棚注浆加固、衬砌加强,施工采用人工+微震爆破技术的环形开挖预留核心土法开挖。

爆破炸药选用二级煤矿许用乳化炸药,采用 $\Phi 35$ mm($0.95\sim 1.25$ g $\cdot$ cm $^{-3}$),长度200 mm的药卷。雷管选用煤矿许用毫秒延期电雷管(延期时间不超过130 ms),起爆采用电起爆方式。采用台阶法分区进行多次开挖,爆破炮眼分区布置如图1所示。上台阶开挖时,采用两次爆破分部开挖:第一步对掏槽及辅助眼进行爆破;第二步对周边眼、内圈眼及底板眼进行爆破。上台阶掏槽眼采用三对垂直楔形掏槽,炮眼布置过程中,先布置掏槽眼,再均匀布置周边眼和辅助眼,周边眼采用间隔不连续装药方法。下台阶两步开挖,并严格控制装药量。隧道爆破掏槽方案布置如图2所示。爆破时先对掏槽眼及辅助眼进行装药爆破,然后待爆破完毕后对爆破情况进行检查,清除危石后方可进行周边眼、内圈眼和底板眼的装药、爆破工作。周边眼采用间隔装药结构,其余炮眼采用 $\Phi 35$ mm标准药卷连续装药,并用炮泥堵塞孔口。为了减少爆破振动对地表构筑物及围岩的扰动,开挖时采用半断面微台阶预裂爆破开挖,炮眼爆破顺序依次为周边眼、掏槽眼、辅助眼、内圈眼、底板眼。爆破振动测试采用四川瞭望工业自动化控制技术有限公司研制的BR-6722爆破振动测试系统,系统主要由速度传感器、爆破振动信号分析仪组成。

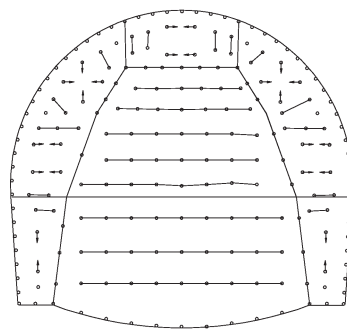


图1 隧道下穿建筑物段分区爆破炮眼布置图

Fig.1 Arrangement diagram of the blast holes in zonal blasting of the tunnel undercrossing buildings

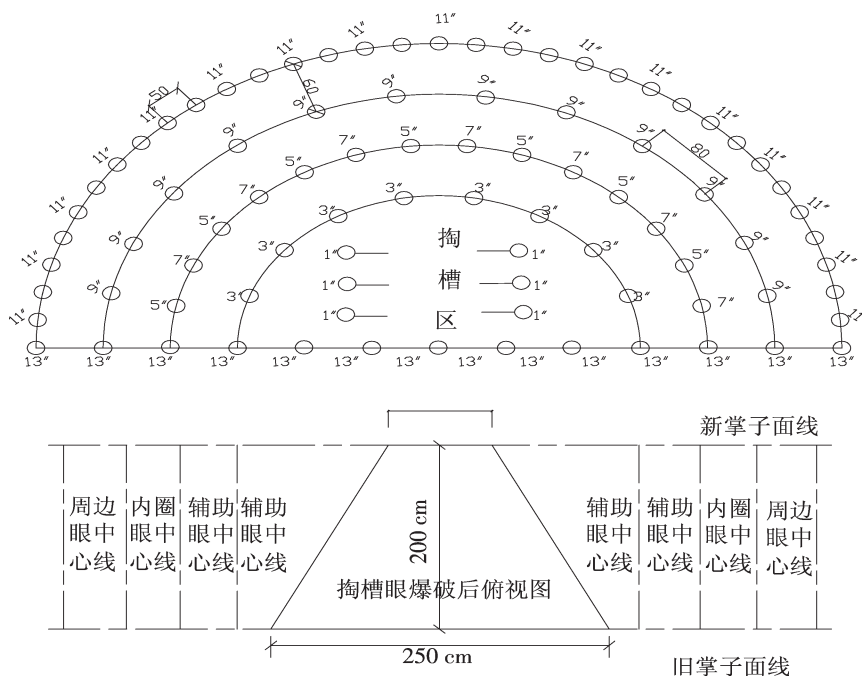


图2 隧道下穿建筑物段爆破掏槽方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of blasting cut of the tunnel undercrossing buildings

2.2 爆破振动监测方案

为研究爆破振动在隧道拱顶岩层中的传播规律,测点尽量布置在隧道中线爆破掌子面的正上方,如图 3 所示,爆破振动监测测点按每 5 m 一个测点布设。安装传感器安装时,采用生石膏粉粘结,取适量生石膏粉加水调制成浆糊状,将传感器粘结在测点上,约 10 min 后石膏凝固后即可进行测试。敖包沟隧道下穿建筑物段施工时,地表建筑物地面都经过硬化处理,传感器直接用石膏粉粘结在地面上进行测试。垂直速度传感器应该尽量保持与水平面垂直,水平速度传感器的安装应该与水平面平行,切向水平速度传感器则与径向垂直并且和地面保持水平 3 个传感器应安装在一起,构成一个关于爆心的 3 维直角坐标系,三向传感器的安装如图 4 所示。

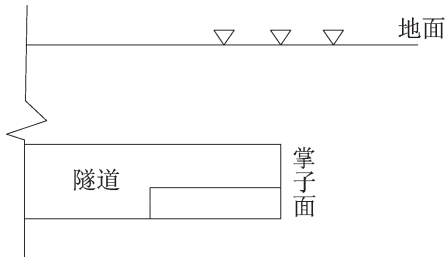


图 3 爆破振动测点布置立面图



图 4 分离式三向传感器安装

Fig.3 Elevation diagram of blasting vibration monitoring points

Fig.4 Assembly drawing of three-dimensional sensors

3 爆破振动测试结果分析

通过对下穿建筑物段隧道施工爆破引起的振动进行监测,共采集到 19 组有效数据,统计结果见表 1。表中,峰值速度表示测点爆破振动速度波形的最大值,爆心距表示测点距爆破点的距离;水平纵向、水平切向、垂直分别表示沿隧道中线、垂直隧道中线、垂直地面的爆破振动速度。

表 1 爆破振动测试数据统计表

Tab.1 Statistic table of blasting vibration testing data

测点编号	测点位置(里程)	爆心距 R/m	分段最大装药量 Q/kg	速度峰值/(cm·s ⁻¹)		
				水平纵向	水平切向	垂直
1	D1K34+640	23.00	6	0.953	0.004	1.875
2	D1K34+637	23.09	3.7	0.002	0.002	2.031
3	D1K34+636	23.00	5.3	0.903	0.297	2.375
4	D1K34+671	28.06	7.2	0.002	1.03	2.484
5	D1K34+634	23.00	14	2.568	1.831	3.964
6	D1K34+653	28.06	7.2	0.052	2.317	3.021
7	D1K34+640	26.03	8	1.098	0.442	1.345
8	D1K34+624	23.05	6.2	2.177	1.919	3.858
9	D1K34+618	23.00	7.2	0.055	0.572	1.531
10	D1K34+617	21.00	6.8	0.057	1.397	3.684
11	D1K34+615	23.09	6.5	1.023	0.886	2.362
12	D1K34+613	23.02	4.9	0.122	0.068	1.744
13	D1K34+612	23.58	5.2	0.95	1.528	2.142
14	D1K34+637	38.96	6	0.114	0.46	0.45

(续表)

15	D1K34+611	23.02	6.8	0.145	1.104	2.499
16	D1K34+610	23.50	6.2	0.994	1.366	2.534
17	D1K34+603	23.58	9.2	1.403	0.23	3.388
18	D1K34+600	25.54	6.2	2.278	0.125	3.42
19	D1K34+581	23.66	12.4	0.12	3.563	7.6

3.1 爆破振动速度特性

大量的现场试验和研究表明:爆破产生的质点峰值速度与所造成的损伤有很好的相关性,振动速度的变化能较好反映爆破振动效应在岩土中的传播规律^[5]。当炸药量、爆源距离一定时,较其他物理量而言,爆破振动速度与岩土性质有较为稳定的关系。因此,研究爆破振动速度的变化规律,能说明爆破振动对围岩的影响。

由表1数据可看出,隧道爆破施工时,爆破振动在地表有3个方向的振动速度,分别用水平纵向、水平切向、垂直方向表示,同次爆破中,垂直方向振动速度比水平切向、水平纵向大,而切向速度一般较小。爆破振动速度在不同里程数值差别较大,主要是受到隧道埋深、围岩地质条件、爆破振动装药形式与装药量、测点与爆破点之间的距离等因素的影响。

3.2 爆破振动速度回归分析

国内外大量测试结果表明,在一定的爆破方式和传播介质条件下,药量和测点到爆源的距离是影响爆破振动的主要因素,局部地质和岩(土)质条件的影响也很明显^[6]。为了研究各影响因素与爆破振动强度之间的关系,需通过量化拟合分析才能确定爆破参数与振动强度之间的关系。目前国内外比较公认的爆破振动强度与爆破参数之间关系的是萨道夫斯基经验公式^[7],我国长期以来在爆破振动安全距离与质点振动强度计算方面也采用该公式,具体形式是

$$v = k(Q^\beta/R)^\alpha \quad (1)$$

式中: v 表示爆破振动产生的质点垂直振动速度, $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$; Q 表示炸药量,齐发爆破时取总装药量,延时爆破时取最大段装药量, kg ; R 表示从爆破地点药量分布的几何中心至观测点的距离, m ; α 表示爆破震动随距离衰减系数; β 表示为药包形状系数,一般取 $1/3$; k 表示与地形、地质、爆破方式有关的系数。

采用公式(1)对测出的数据进行回归分析可以得出式中的参数,用来指导爆破参数的设计和优化,控制爆破振动速度。对式(1)两边取对数得

$$\lg v = \lg k + \alpha \lg(Q^{1/3}/R) \quad (2)$$

令 $y = \lg v$, $x = \lg(Q^{1/3}/R)$, 则可以得到

$$y = \alpha x + \lg k \quad (3)$$

式(1)由非线性关系转化为线性关系,利用最小二乘法^[8]便可求得 α 和 k 的值。

比例药量 $p = Q^{1/3}/R$, 通过对表1的现场实测数据进行拟合分析,可得到一元线性回归方程为: $y = 1.54x + 2.2118$, 求得: $\alpha = 1.54$, $k = 162.88$, 回归方程的相关系数为: $R^2 = 0.7825$, 回归相关系数较高, 结果良好,在一定程度上反映了爆破质点垂直振动速度与爆心距和装药量的关系。根据一元线性回归方程,得到了适用于敖包沟隧道近区围岩爆破振动速度衰减规律的公式为

$$v = 162.88 \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^{1.54} \quad (4)$$

敖包沟隧道下穿西梁煤矿区的三栋建筑物均为一般建筑物,《爆破安全规程》^[9]中规定的一般建筑物爆破振动速度应控制在 $3.0 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。根据现场实测数据,在19次测试中有7次爆破振动速度超过规范允许值,其中有一次(测试里程为D1K34+581)振动速度较大,达到了 $7.6 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$,其余6次超过幅度不大,对建

筑物结构并未造成较大影响。可以利用公式(4)对爆破参数进行调整和优化,同时对产生较大爆破振动速度的爆破开挖区及地表建筑物加强监测并采取控制措施,以减小爆破振动对建筑物的影响。

4 浅埋隧道下穿建筑物爆破振动控制措施

敖包沟隧道下穿建筑物段埋深较浅,在隧道爆破施工时,隧道结构和地表建筑物受到爆破振动的影响频繁,为了隧道施工和地表建筑物的安全,必须对隧道开挖引起的爆破振动进行控制,减缓对周围环境的影响。根据实测数据的分析和现场施工经验,提出了以下爆破振动控制措施:

1) 分区爆破并采用合理的起爆顺序。将开挖掌子面按照开挖台阶分割成不同的区域,分区爆破布置如图2所示。爆破时按分区分别装药,减少单区域装药量。分区爆破时采用微差爆破,同时优化炮孔的线形布置和起爆顺序,不但能尽量减少微差爆破单段最大药量,而且还使得布置炮孔简单、炮孔参数准确、临空面好,可提高炸药能量利用率,从而达到减振效果。

2) 优化掏槽形式和装药结构。选择合理的掏槽形式及掏槽孔的位置,是控制隧道下穿建筑物爆破振动的关键措施。楔形掏槽具有掏槽效果好、能为辅助眼爆破创造较好的临空面、可以降低辅助眼爆破时的爆破震动强度等优点。隧道下穿建筑物段施工时宜采用楔形掏槽,并尽量减小楔形槽的大小。为了减缓掏槽孔爆破对隧道顶板围岩的扰动,可将掏槽孔布置在距拱顶较远的区域(如图3所示)。在装药时,采用分散装药以减小爆破振动。

3) 加强爆破施工过程中的监测和爆破参数优化。浅埋隧道开挖时,应对爆破施工全过程进行振动监测,结合隧道常规项目的监测(如拱顶下沉、洞周收敛、地表沉降等),全面监控隧道爆破开挖及其振动效应,根据爆破振动速度衰减公式对爆破开挖区的参数进行调整和优化,以保证隧道施工安全。

5 结论

1) 在爆炸荷载的作用下,浅埋隧道爆破振动产生的垂向速度比水平速度和切向速度大,爆破振动规律与隧道的断面尺寸、开挖方法、埋深、围岩地质条件等因素有关。

2) 浅埋隧道爆破开挖时,合理的开挖方法、掏槽形式和装药结构可以减小爆破振动的影响,采用台阶法分步爆破,将大楔形槽改为小楔形槽并采用分散装药能有效的减小爆破振动。

3) 爆破开挖时将爆破掌子面进行分区,减小单区域装药量,对爆破顺序进行合理优化,可以提高炸药的使用效率,而且微爆破开挖临空面好,还能达到减震效果。

4) 敖包沟隧道下穿建筑物段的爆破振动规律符合萨道夫斯基经验公式: $v = 162.88 \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^{1.54}$, 利用该公式可以预测爆破的振动速度,还能对爆破参数进行优化。

5) 浅埋隧道下穿建筑物在爆破开挖时,爆破振动监测应该与隧道的常规监测(如拱顶下沉、洞周收敛、地表沉降等)相结合,根据实测数据和萨道夫斯基经验公式优化爆破参数,这样既能减小爆破振动对隧道和地表建筑物的影响,又能提高施工效率。

参考文献:

- [1] 张华其,张松新,周华杰,胡汉东. 爆破振动对周边建筑物的影响[J]. 爆破,2007,24(2):98-101.
- [2] 刘先林,周传波,张国生. 隧洞开挖爆破振动监测与振速预测分析[J]. 爆破,2008,25(3):96-99+106.
- [3] 张继春,曹孝君,郑爽英,郭学彬. 浅埋隧道掘进爆破的地表震动效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(22):

4158-4163.

- [4] 李利平,李术才,张庆松,王刚,马富奎. 浅埋大跨隧道施工爆破监测与减震技术[J]. 岩土力学,2008,29(8):2292-2296.
- [5] 闫鸿浩,李晓杰,曲艳东,欧阳欣. 爆破振动速度测试精细分析[J]. 岩土力学,2007,28(10):2091-2094.
- [6] 阳生权,周健,吕中玉. 地下洞室及其围岩爆破地震安全监测与动力分析[J]. 中国安全科学学报,2006,16(6):141-144+148.
- [7] 毕卫国,石崇. 爆破振动速度衰减公式的优化选择[J]. 岩土力学,2004,25(S1):99-102.
- [8] 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京: 科学出版社,2009:27-30.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB6722—2003 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社,2004.

Blasting Vibration Rule and Control of Shallow Tunnel Undercrossing Buildings

Zhang Jianbo, Yang Xin'an, He Zhisi

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aobaogou tunnel is a controlling engineering project for Bazhun Railway, and the formation property and stability are weak for the tunnel surrounding rocks and overlying strata are full of filled earth, loess, sandstone alternated with mudstone. The structural strength of three tunnel undercrossing buildings of Xiliang Coal Mine is very poor, so blasting control is the key technology in tunnel construction. This paper illustrates the design of drilling and blasting in undercrossing section, using the field measurement to monitor the blasting vibration in construction. According to the test results, it adjusts the blasting scheme and parameters, and tries to control the blasting vibration effect of blasting on buildings. Then, it analyzes the characteristics of blasting vibration velocity by using the method of regression analysis, summarizes the rule of blasting vibration velocity propagation in shallow tunnel, and presents three control measures of blasting. The results have guaranteed safety of Aobaogou tunnel in the period of blasting construction, which can be used as reference for similar construction.

Key words: shallow tunnel; undercrossing buildings; blasting excavation; monitoring; blasting control