

# 隧道爆破施工法对临近建筑物的振害分析

张旻\*, 雷波, 来朝辉

(陕西省建筑科学研究院, 陕西 西安 710082)

**摘要:** 本文通过对某铁路隧道施工沿线爆破的振动现场测试及隧道沿线临近建筑物的振害调查, 结合有关规范对爆破沿线建筑进行振害分析, 通过评价隧道爆破施工法对隧道沿线临近建筑物的影响, 探讨爆破施工法实施的合理原则。

**关键词:** 爆破振动, 单段爆破药量, 振动安全允许速度, 爆破振动安全允许距离。

## The appraiser of the vibration damage to adjacent buildings caused by the blasting during railroad tunnel construction

Zhang Min\*, Lei bo, Lai zhao hui

(Shaanxi Provincial Academy of Building Research, Xi'an Shaanxi 710082, China)

**Abstract** In this paper, both the dissension appraiser of the vibration damage caused by the blasting during railroad tunnel construction and the simulation of the vibration test at construct site be studied in order to confirm the velocity and amplitude of the vibration wave. Meanwhile, different geodesic distance and peak velocity (the maximal velocity at horizontal and vertical orientation) can also be confirmed. What's more, the time-history curve and velocity spectrum curve can be described through regression analysis. Not only in terms of the appraisal of the vibration damage to the buildings near the railroad tunnel but also the comparison between the survey and calculation, the vibration range can be confirmed and the effect of blasting construct method can be well estimated. By the way, the rational principles of blasting construct technique are discussed as well.

**Key words** blast vibration, charge amount per delay interval, allowed velocity of vibration safety, allowed distance of construction blasting vibration.

## 1 隧道爆破施工及沿线建筑物概况

某段铁路隧道沿线累计总长 100 余公里, 其工程地质条件复杂, 围岩等级主要为 III 级、IV 级、V 级, 沿线隧道及桥桩成孔主要采用延时爆破施工法, 部分隧道洞口及岩质较差地段采用机械开挖。

其隧道沿线临近建筑物主要结构形式为木构架土筑墙结构 (以下简称“土木结构”)、砌块结构及砖混结构 (以下简称“砌体结构”), 墙体厚度各异, 地基基础主要采用天然地基上做毛石基础, 房屋平面依山势地形布置各异, 少数房屋分期建设且结构形式不统一。建筑物的可靠性等级差异较大, 其中极少数民房按照国家标准设计施工, 大部分为村民自建住宅。

## 2 隧道沿线民房调查结果

本次共调查民房约 450 户, 其中土木结构约 200 余户, 砌体结构约 200 余户, 距离隧道最近的民房为 10m, 距离隧道最远的民房为 754m。调查房屋地处山区, 当地村民的房屋基本上是依河而建, 靠山而居。多数民房的基础是半填半挖, 或者是部分采用人工地基, 部分采用天然地基, 绝大多数房屋基础采用片 (块) 石干垒。土木房屋一般为一层, 主要结构组成为: 400~500mm 厚夯土 (土坯) 墙体承重, 木檩石板 (青瓦) 屋面; 砌块或砖混房屋多为一~二层, 主要结构组成为: 200mm 厚墙体 (200×200×400 mm 空心砌块) 或 180mm 厚 (个别为 120mm) 墙体 (240×115×53 烧结粘土砖) 承重, 100~120mm 现浇混凝土楼 (屋) 面板。

现场调查发现: 不论房屋距离隧道的远近, 不同结构类型的房屋具有各自不同损害共性。

受检土木结构房屋普遍存在的损害特征: 前、后纵墙自屋面木梁下竖直向下开裂, 上宽下窄。左右山墙及内横墙, 自木檩和木梁 (房内隔层楼板梁) 竖直向下裂缝, 上宽下窄。横纵墙体交接处竖向裂缝。左右山墙与前后纵墙转角交接处, 自地面向上开裂, 下宽上窄。门窗洞口角部斜裂缝和窗台下的竖直裂缝。

\* 张旻, 32 岁 (1976 年~), 男, 工程师, (029) 88644576, 838629302@qq.com, 西安市环城西路北段 272 号

受检砌体结构房屋普遍存在的损害特征：顶层房间屋顶处墙体水平裂缝、屋面板裂缝、漏水（无防水层）、门窗洞口角部斜裂缝和竖向裂缝、墙体沿砌块灰缝斜裂缝、女儿墙竖向裂缝、水泥散水沿长度方向平行开裂。

### 3 爆破振动的现场测试

#### (1) 现场爆破振动测试条件概述

根据围岩等级和隧道位置，爆破施工采用全断面、二台阶和三台阶。爆破采用毫秒延时起爆。

为了客观、实际地反映隧道爆破施工对周围建筑物的影响范围和影响程度，本次爆破振动测试爆炸源用药量选用隧道施工中爆破最大用药量 241.2kg 中延时最大一段药量。测试点为施工中的IV级围岩处。爆炸源共钻炮孔数 17+1 个，钻深 4.0m，每孔用药量 2.25/1.65 kg，合计用药量 39.9kg。采用 2 号岩石硝胺炸药，同时起爆。

#### (2) 测线及测点布设

I—I 测线：该测线量选取在与爆破位置的同一高度上，由于场地条件所限，测点与爆破点的最大高差为 18.69m，最小高差为 4.50m。该测线共布设 5 个测点，各测点与爆破点的距离关系见和表 1。

II—II 测线：该测线尽量选取在与爆破位置的同水平距离上。由于场地条件所限，测点与爆破点的最大水平距离为 45m，最小水平距离为 13.86m。该测线共布设 3 个测点，各测点与爆破点的距离关系见表 1。

表 1 测线各测点与爆破点的位置关系

测点编号	相对爆破点的距离 (m)		
	水平	垂直	斜距
I—I 1—1	52.00	-18.69	55.26
I—I 1—2	48.95	-12.26	50.46
I—I 1—3	100.19	-4.50	100.29
I—I 1—4	197.08	7.20	197.22
I—I 1—5	302.97	8.20	303.08
II—II 2—1	45.00	-18.65	48.71
II—II 2—2	13.86	31.36	34.29
II—II 2—3	35.16	41.48	54.37

#### (3) 实测数据处理

数据处理的主要目的是计算测点的最大振动速度值。根据《地震及前兆数字观测技术规范》（试行 2001-400）的要求以及本次测试仪器的标定参数进行数据处理。

根据实测数据和测试系统的标定结果，将截取的包含水平向最大振幅的事件记录数据分别经过卷积处理，得到各测点的最大速度分量（E-W、N-S、U-D），进行振动影响分析。图 1~图 8 为爆破施工时各测点计算得到的最大速度段时程曲线。

同时将水平两个方向最大速度分量进行合成，获得水平向峰值速度，振速随着测点距离的增大而减小，各测点的三分向最大速度见表 2 及表 3。

表 2 I—I' 测线各测点速度测试结果表

测点编号	测点与炮点距离 (m)	垂直向 (cm/s)	水平-东西向 (cm/s)	水平-北南向 (cm/s)	水平峰值速度 (cm/s)
1-1	55.26	0.675	0.469	0.946	1.056
1-2	50.46	0.752	0.924	0.760	1.196
1-3	100.29	0.408	0.344	0.443	0.561
1-4	197.22	0.378	0.151	0.271	0.310
1-5	303.08	0.173	0.143	0.139	0.199

表 3 II—II' 测线各测点速度测试结果表

测点 编号	测点与炮点 距离(m)	测点相对炮点 高差(m)	垂直向 (cm/s)	水平-东西向 (cm/s)	水平-北南向 (cm/s)	水平峰值速度 (cm/s)
2-1	48.71	-18.65	0.625	0.531	0.933	1.074
2-2	34.29	31.36	0.749	0.714	0.518	0.882
2-3	54.37	41.48	0.437	0.350	0.353	0.497

根据测试结果表 1, 对 I—I' 测线不同测距与峰值速度 (取水平向和垂直向的最大速度) 进行回归, 可得到相应的回归关系为:

$$\ln V = 4.007178 - 0.984044 \ln D \quad \gamma = 0.999$$

其中: V 为峰值速度 (cm/s), D 为测距 (m),  $\gamma$  为相关系数。

由于 II—II' 测线测点较少, 不适合进行回归分析, 结合 I—I' 测线的拟合结果, 用测试数据直接评价振动对房屋的影响。

通过对测试数据进行频谱分析可知, 测点处的振动频带较宽, 主振频率一般在 5~40Hz 之间, 主振频率随着测点距离的增大而减小, 部分频谱曲线见图 9~图 16。

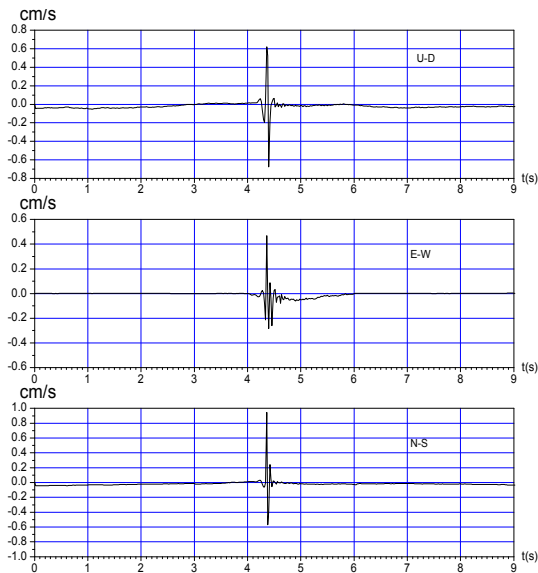


图 1 1-1 测点地面速度时程曲线

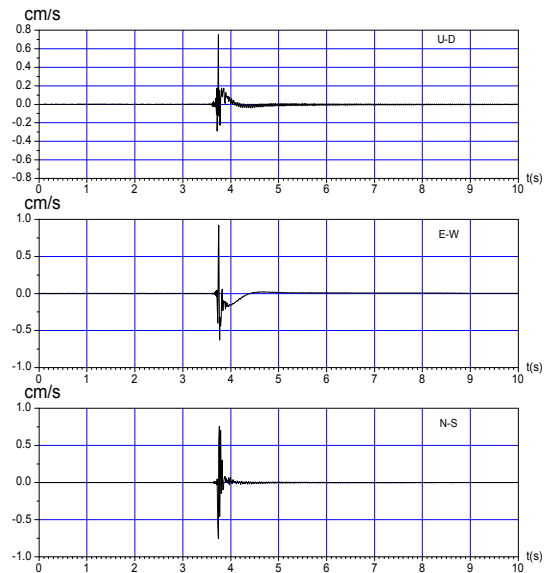


图 2 1-2 测点地面速度时程曲线

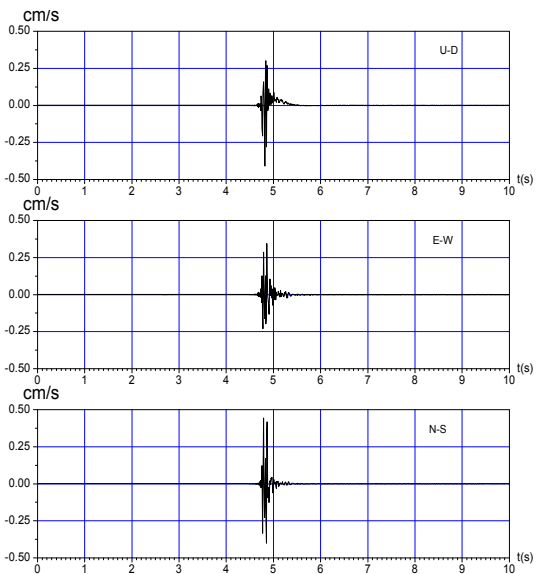


图 3 1-3 测点地面速度时程曲线

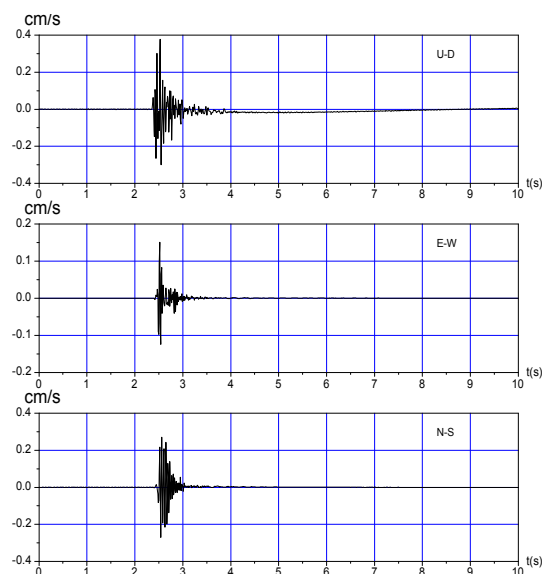


图 4 1-4 测点地面速度时程曲线

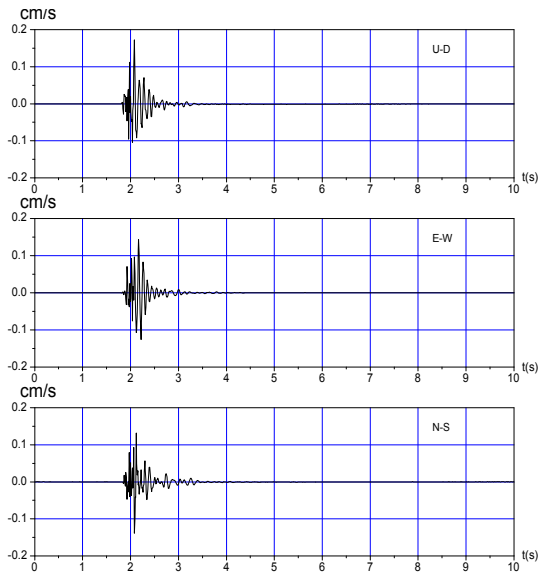


图5 1-5 测点地面速度时程曲线

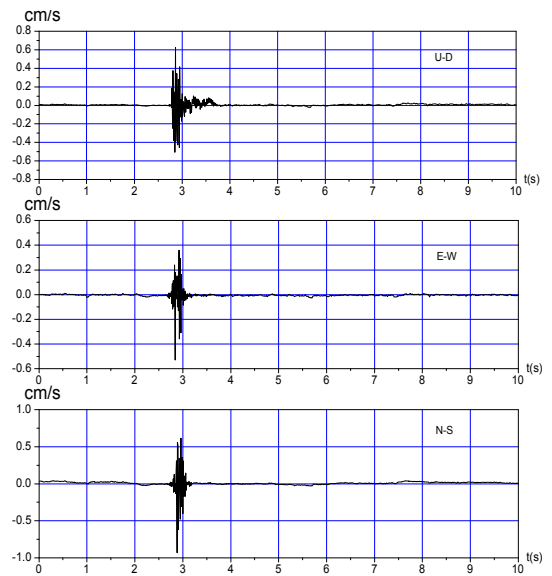


图6 2-1 测点地面速度时程曲线

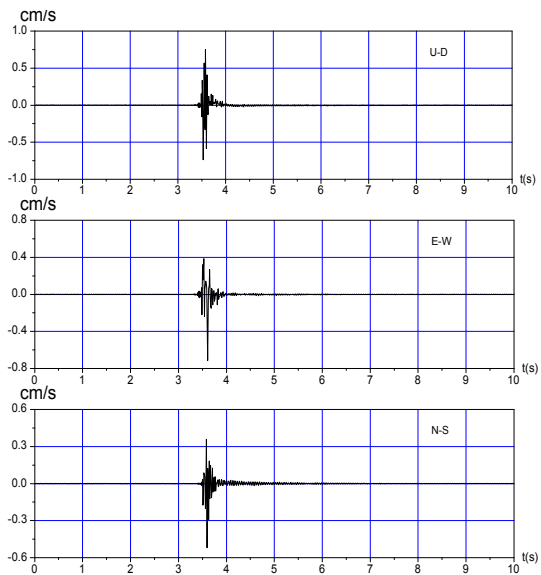


图7 2-2 测点地面速度时程曲线

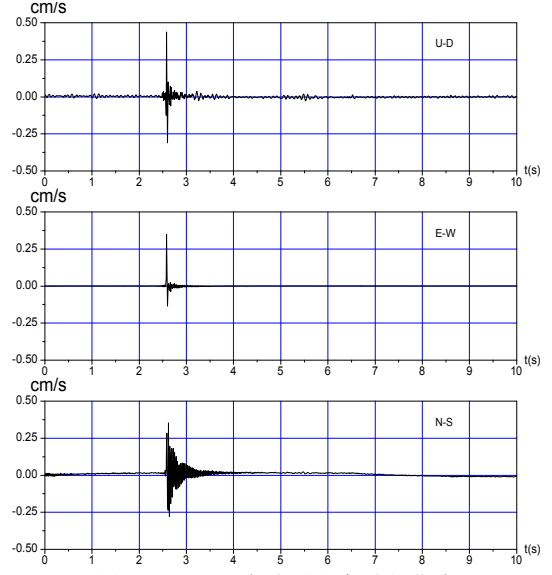


图8 2-3 测点地面速度时程曲线

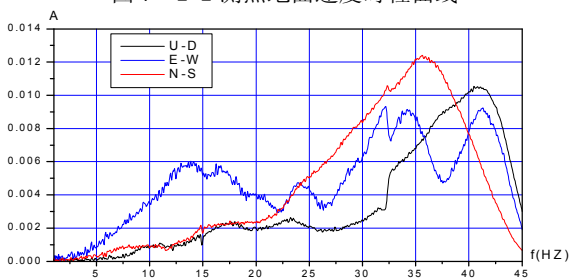


图9 1-1 测点处地面速度的频谱曲线

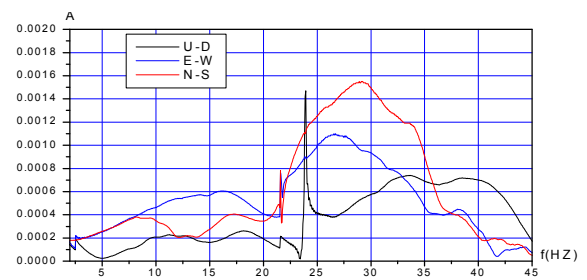


图10 1-2 测点处地面速度的频谱曲线

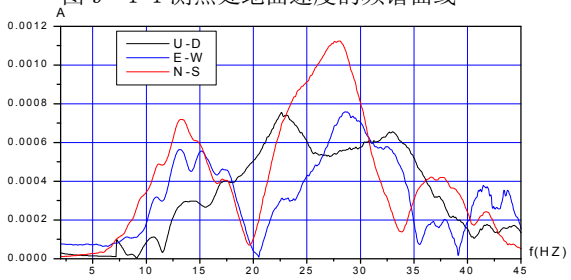


图11 1-3 测点处地面速度的频谱曲线

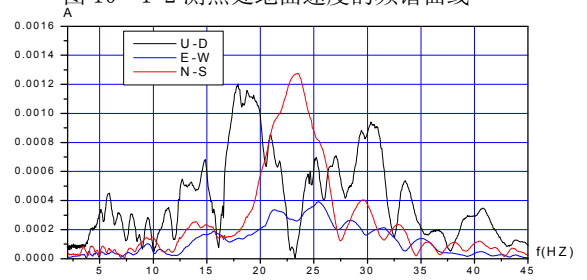


图12 1-4 测点处地面速度的频谱曲线

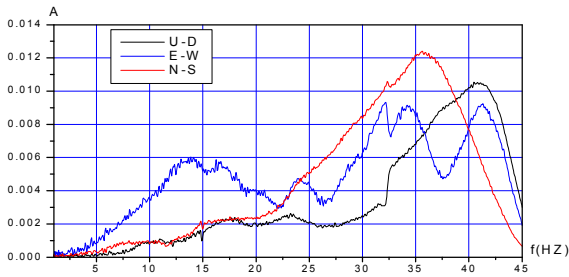


图9 1-1 测点处地面速度的频谱曲线

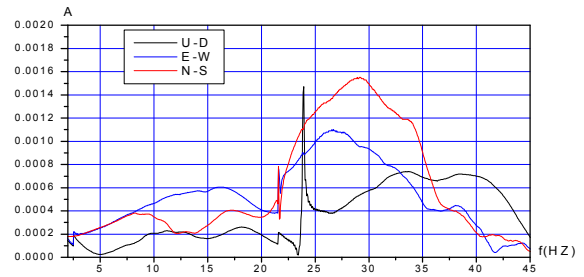


图10 1-2 测点处地面速度的频谱曲线

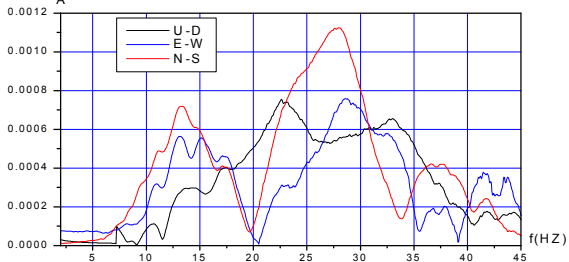


图11 1-3 测点处地面速度的频谱曲线

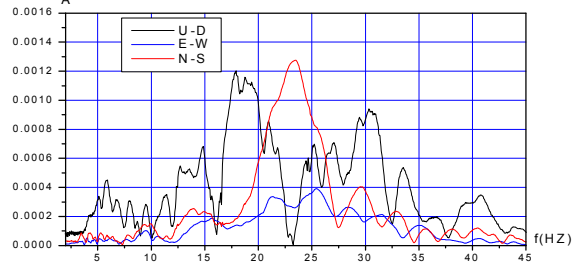


图12 1-4 测点处地面速度的频谱曲线

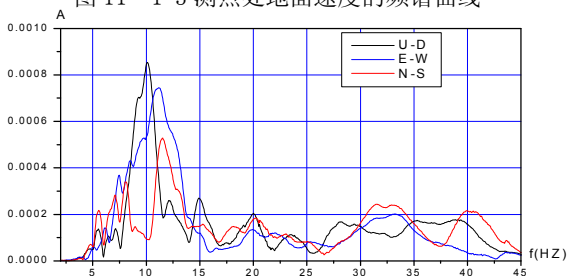


图13 1-5 测点处地面速度的频谱曲线

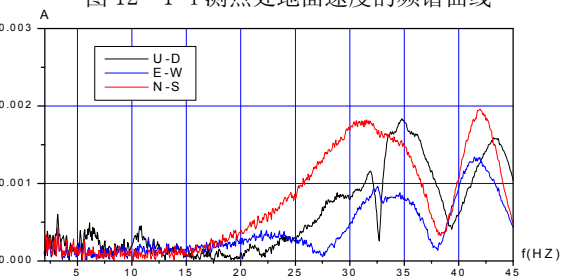


图14 2-1 测点处地面速度的频谱曲线

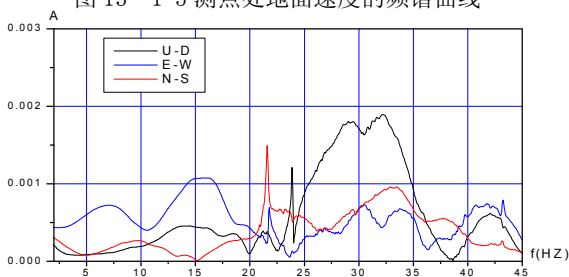


图15 2-2 测点处地面速度的频谱曲线

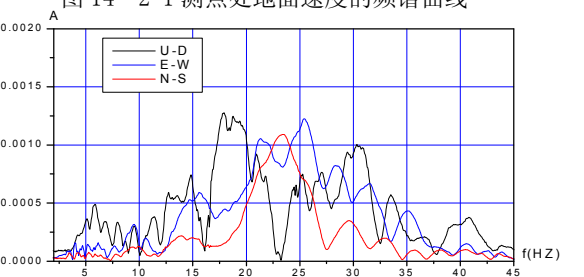


图16 2-3 测点处地面速度的频谱曲线

## 4 振动影响评价

### (1) 爆破振动测试结果分析

依据国家标准《爆破安全规程》(GB6722-2003)第6.2条爆破振动安全允许标准,在主振频率小于10Hz情况下,对于土窑洞、土坯房、毛石房屋,振动速度不应大于0.5cm/s,一般砖房、非抗震的大型砌块建筑物不应大于2.0cm/s。评价爆破振动对建筑物的影响,采用现场爆破振动测试结果与规范规定的计算公式相结合的方法,确定安全允许距离。

#### ① 现场爆破振动测试结果

根据上述 I—I' 测线振动速度的回归关系推算,并结合 II—II' 测线的测试结果,可以得到如下测试结果:距爆破源119m以外,振动速度小于0.5cm/s;距爆破源29m以外,振动速度小于2.0cm/s。

#### ② 《爆破安全规程》(GB6722-2003)规定的理论计算结果

爆破振动安全允许距离计算公式为:  $R = (K/V)^{1/\alpha} * Q^{1/3}$

式中:  $R$ —爆破振动安全允许距离,  $Q$ —延时爆破最大一段炸药量,  $V$ —振动安全允许距离,

$K$ 、 $\alpha$ —岩性的地质系数和衰减系数。

根据计算公式，结合现场地质情况，岩性系数按照规程中规定范围内较为保守的取值，计算安全允许距离。安全允许距离的理论计算结果及振动测试结果见表 4。

表 4 安全允许距离计算结果

K、 $\alpha$	土房[v]=0.5 cm/s		砌(砖)房[v]=2.0cm/s	
	理论计算	振动测试	理论计算	振动测试
中硬岩石 K=210、 $\alpha=1.6$	149m		63m	
软岩石 K=350、 $\alpha=1.8$	130m	119m (IV级围岩)	60m	29m (IV级围岩)
软岩石 K=300、 $\alpha=1.8$	119m		55m	

## (2) 爆破振动对建筑物影响的安全允许距离

爆破地震与天然地震相比，具有振动频率高、持续时间短和震源浅等特点。爆破施工引起的振动是一种瞬时冲击振动，其作用时间短，频率高、动力反应衰减很快，难以使建筑结构产生持续的强迫振动，影响范围有限。

综合考虑隧道沿线的调查房屋所处的岩性差异、地形复杂及房屋结构多样化等特点，结合现场爆破振动测试结果与规范规定的计算结果。隧道施工爆破，在其延时爆破最大一段用药量、地形条件等与本次测试情况相当时，偏于安全的考虑爆破振动安全允许距离：

爆破不会对 149m 以外的土窑洞、土坯房、毛石房屋的结构造成影响；不会对 63m 以外的一般砖房、非抗震的大型砌块建筑物的结构造成影响。

需要说明的是，安全振动速度是被保护物受到爆破振动作用而不产生任何破坏（抹灰掉落、开裂等）的质点垂直振动速度峰值。

在安全允许距离内的房屋不一定受到振动作用而产生破坏，本次调查的民房中，只有距离爆破点相当近的房屋（约 20m 内）出现振动引起的破坏，且距离施工爆破点最近的 10m 处砌块房屋只是在墙体出现裂缝，没有达到严重破坏程度。

本次调查的多数民房的损害主要是由房屋自身缺陷及使用年限过长而造成的。

## 5 结束语

通过本次铁路隧道沿线建筑物因爆破振动的振害检测分析认为：隧道爆破施工法成本低、进度快、方法简单是一种可行的施工法，但在制定该施工方法时为保证沿线临近建筑物的安全应遵循以下原则：

- (1) 在确定爆破实施工艺时不仅要搞清隧道的围岩等级，也要搞清沿线可能影响临近建筑物的地基状况。
- (2) 在确定爆破实施工艺前应对可能影响范围内建筑物进行普查，了解其结构形式、结构安全等级，作为确定爆破工艺设计的依据。
- (3) 对爆破隧道沿线的危房应采取补救措施。
- (4) 由于隧道沿线各建筑物的安全性等级的差异，施工中对爆破影响范围内的建筑物进行定期检查，防止意外事故发生。

## 参考文献：

- (1) 《爆破安全规程》（GB6722-2003）中国标准出版社
- (2) 《地震及前兆数字观测技术规范》（试行）地震出版社