

# 质点振动速度与主振频率在爆破监测中的应用\*

钟祖良, 刘新荣, 梁宁慧, 瞿万波

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**通过分析爆破振动对结构的破坏机理,提出了用质点峰值振动速度和主振频率作为爆破振动的监测方法,并探讨了结构的破坏准则和部分国家的振动安全标准,以及影响爆破的因素,进而对爆破采用有效控制。

**关键词:**爆破振动; 质点峰值振动速度 (PPV); 破坏准则

**中图分类号:** TU472.9; TU413 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006 - 7329 (2006) 04 - 0038 - 04

## Discussion on Application of the Peak Particle Velocity and Main Vibration Frequency in Blast Vibration Monitoring

ZHONG Zu - liang, LU Xin - rong, LIANG Ning - hui, QU Wan - bo

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** In this paper, the peak particle velocity and main vibration frequency are put forward as a monitoring measure of blast vibrations based on the analysis of blast vibrations damage to the structure. In this paper, the damage criteria and the safety standards of vibration in some countries are shown. In addition, this paper analyzes the influence factors of the blast and give suggestions on effective control of the blast.

**Keywords:** blast vibration; the peak particle velocity (PPV); damage criteria

在隧道或隧道周围的建设中由于爆破产生的地面振动可能损坏隧道,或损坏隧道附近的建筑物。由于爆炸是个复杂的化学反应过程,人类只初步认识它的反应机理,还没有对爆炸的复杂反应作深入的了解,因此为了减少爆破振动对结构的潜在破坏,对爆破振动的监测成为有很大发展前景的研究课题。

### 1 质点峰值振动速度

在一块均质,无限大岩块中,爆破作业将产生两种类型的波:纵波(P波)和横波(S波)。这两种波的波速 $V_p$ 、 $V_s$ 分别取决于剪切模量 $G$ ,拉梅常数 $\lambda$ 和岩石的密度 $\rho$ 。于是得到:

$$V_p = \sqrt{(\lambda + 2G) / \rho} \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

其中: $\lambda$ 和 $G$ 的表达式为:

$$\lambda = \frac{E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (4)$$

当岩块不是无限大时,爆破振动将在岩块表面产生面波。这类型面波在爆破监测中十分重要,该面波为瑞雷波。该波波速 $V_r$ 取决于自由地表附近的岩块弹性模量。1976年 Telford 等人论证得出: $V_r < V_s < V_p$  [1]。

由于爆破产生质点运动,质点的振动速度由三个相互正交方向分量确定:

$V_p$ :纵向(或径向)质点运动速度; $V_s$ :横向(或水平向)质点运动速度; $V_r$ :瑞雷(或竖向)质点运动速度。

注意到质点速度的三个组成部分在数值上会变化。单一分量峰值也会随着爆破的环境和不同时间及频率而变化(Dowding, 1985) [2]。所以,取3个分量的峰值速度的平方和的平方根作为质点峰值振动速度是合理的,因此质点峰值振动速度数值PPV为:

\* 收稿日期: 2006 - 02 - 25

基金项目: 国家留学回国人员科研启动基金重点项目(教外司留[2002]247号); 四川省高校重点实验室开放基金课题  
作者简介: 钟祖良(1980 - ),男,福建龙岩人,博士生,主要从事工程爆破、地下物流、隧道和地下空间等研究。

$$PPV = (V_L^2 + V_T^2 + V_R^2)^{1/2} \quad (5)$$

Crabb等人<sup>[3]</sup>(1991)提出振动监测仪器应根据频率响应、振幅大小,和动力范围来选择。他们也提议记录及处理全时间历史和计算来自中性轴向的传感器测出的 PPV 值。

## 2 振动安全判据

质点峰值振动速度 PPV 起因于爆破,与观察和统计的损坏是相互关联(Siskind, 1973)。然而,PPV 并不产生破坏力。由爆破产生的破坏力起源于两个方面:(a)取决于波传播速度的位移差异在结构上产生的扭曲;(b)在结构上施加惯性力的质点速度矢量的变化(New, 1986)<sup>[4]</sup>。Lanfegors和 Kihlstrom(1978), Dowding(1985),及 New(1986)还发现除了考虑质点峰值振动速度之外,质点的主振频率在确定振动安全判据中也是重要的。

在所给点上观察到质点峰值振动速度取决于每次定时爆炸的炸药重量  $w$ 、从观察点与爆破点之间的距离  $D$  和岩块的传播特性。在理论探讨还不够成熟的情况下,一般采用经验公式来预测爆破振动和评价潜在的破坏。

PPV 的简化形式为:

$$PPV = K \left( \frac{D}{W^a} \right)^{-b} \quad (4)$$

式中:  $K$  为与所选场地有关的常量,  $a$  为比例因子,  $b$  为 PPV 与在图表上用比例尺测量的距离比值的斜率(Siskind, 1973)<sup>[5]</sup>。

最普遍的测量距离  $D$  及每次定时爆炸装填的炸药量  $w$  之间关系方法有两种:一种为立方根测绘,由 Ambraseys和 Hendron(1968)<sup>[6]</sup>提出;另一种为平方根测绘。平方根法测绘的实例如图 1 所示。各种优化曲线表示如下:线 A、B 代表典型数据的变化范围。由 Oriaid(1971)<sup>[7]</sup>从地下洞室的爆破获得。线 C 代表非常规约束(预裂)的影响线。

New(1990)<sup>[8]</sup>认为如果 PPV 预测值已超过所需填装炸药的重量变化范围或轴向爆破覆盖距离;运用立方根或平方根测绘将产生较大差异。Hendron和 Oriand(1972)建议对场地响应的探测应贯穿始终。且测绘的方法的选择应考虑实验的数量和实验结果的分散情况的影响。

由爆炸振动造成的建筑物潜在的破坏是与振源、地表、及建筑物的特性有关的函数。所涉及的动力学是复杂的。任何一种振动安全判据都不应该作为固定的快速的判断标准(New, 1990)。

Hendron和 Oriand(1972)使用 PPV 值建立了判定

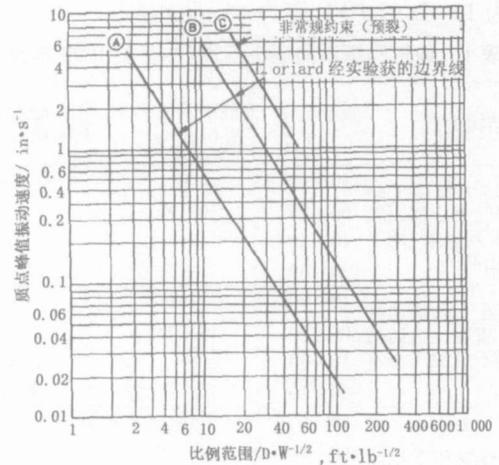


图 1 质点峰值振动速度与比例范围的关系图  
结构破坏的临界值。根据 124 件实例分析, Duvall和 Fogelson(1962)提出 PPV 的临界值为 50 mm/s, 对不位于同一条线上的隧道, Lanfegors<sup>[9]</sup>和 Kihlstrom(1978)提出 PPV 值超过 300 mm/s 时才发生岩块的掉落。

到目前为止,还没有一个国际标准对 PPV 值进行限定。New(1986)曾经报道了各个国家在确立振动安全准则上的尝试结果。然而,这些准则都倾向于保守的。例如,德国标准(DIN 4150, 1984)限制 PPV 在低频率范围内( $< 10$  Hz)为 20 mm/s, 避免对办公楼产生损坏(见图 2)。瑞士协会标准(1978, 表 1)也是较保守的,在 10 ~ 60 Hz 频率的范围内把 PPV 值限制到 30 mm/s。

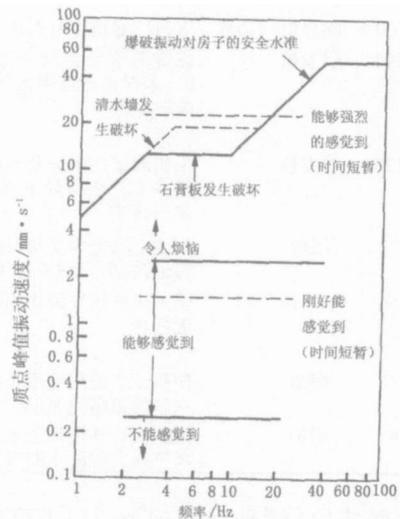


图 2 安全爆破和人在振动临界值作用下的感觉

Siskind等人(1980)对在地表采矿中采用爆破对结构产生的破坏进行综合说明。New(1986)证实了他们的结论,并绘制成图如图 2 所示。从该图中可以看到频率超过 40 Hz 时 PPV 的安全标准为 50 mm/s, 但是,该安全标准很大程度上减少了低频率的情况(在

频率为 10 Hz 时 PPV 值为 15 mm/s)。

表 1 建筑物振动的瑞士标准 (New 于 1990 年绘)

结构类型	频带宽度 /Hz	爆破引发的 PPV 值 /mm · s <sup>-1</sup>	交通或机器引发的 PPV 值 /mm · s <sup>-1</sup>
钢筋预应力混凝土结构如工厂、挡土墙、桥、铁塔、露天水渠、地下隧道和山洞	10 ~ 60	30	—
	60 ~ 90	30 ~ 40	—
	10 ~ 30	—	12
	30 ~ 60	—	12 ~ 18
含有混凝土地基墙建筑物、混凝土或砖石墙、全砖石的地下洞室和隧道	10 ~ 60	18	—
	60 ~ 90	18 ~ 25	—
	10 ~ 30	—	8
	30 ~ 60	—	8 ~ 12
含有砖石墙和木质天花板的建筑	10 ~ 60	12	—
	60 ~ 90	12 ~ 18	—
	10 ~ 30	—	5
	30 ~ 60	—	5 ~ 8
历史名胜或其它敏感性建筑物	10 ~ 60	12	—
	60 ~ 90	12 ~ 18	—
	10 ~ 30	—	3
	30 ~ 60	—	3 ~ 5

Cbver(1986)<sup>[10]</sup>对爆破振动的影响进行文件性总结并给出了强制性的极限值(见表 2)。最低的由爆破引发的 PPV 为 56 mm/s,而最低的强制性 PPV 限值为 30 mm/s。

表 2 爆破的影响和特定的 PPV 极限值的文件性总结

位置	PPV / mm · s <sup>-1</sup>	类型	岩石	注释
地下爆破实验,美国	460	引发值	砂岩	在直径为 2 ~ 10 m 的未衬砌隧道中进行高强度爆炸振动的实验,在的实验中有的一些岩石下落。
Koi 隧道,日本	338	引发值	花岗岩	混凝土衬砌中出现小裂缝
瑞典	300	临界值	杂岩	未衬砌隧道中有石块下落
加利福尼亚和阿拉斯加州(美国),日本	200	引发值		在隧道承受振动强度低于地震时,未衬砌隧道中无石块下落,无裂缝
Dworshak 大坝(美国)	125	引发值		采矿洞室在该振动水准的初始阶段除了一小部分下落物外,无连续下落物
瑞典	70	限值		当地下洞室承受短时间连续施工爆破时,要强制实行该限值
北美空防联合司令部(美国)	56	引发值		受旁边隧道爆破作用时地下洞室无损坏
瑞士	30	限值		使用或未使用混凝土衬砌的地下室和隧道需强制实行该限值
Dinorwic(英国)	45	限值		强制实行该限值主要在于防止破坏预应力混凝土和安装的仪器

我国目前使用《爆破安全规程》(GB 722 - 2003)作为安全判据,该安全判据同时考虑了爆破振动的峰值振动速度和主振频率的影响,能对爆破振动进行较好的监测。

吴德伦等人建议的爆破振动标准<sup>[11,12]</sup>如表 3 所示,他们根据建筑物的结构形式和构筑质量,考虑对地面振动的敏感性程度,将建(构)筑物分为五类,并参

照欧洲国家的做法,将地震波的频带划分为 10、40、100 Hz 三个范围;建议峰值质点速度可采用单分量的最大值,不一定用合速度的峰值。该标准综合反映建筑物类型和重要性程度、爆破场地和建筑物基底场地的特性,与目前规程相比有所不同。

表 3 爆破振动控制建议标准

建筑物分类	频率范围 /Hz	质点振动速度 /mm · s <sup>-1</sup>
现浇钢筋混凝土结构、钢结构、坚固堡垒	< 10	35
	10 ~ 40	35 ~ 40
	40 ~ 100	40 ~ 50
良好设计的砖混结构、一般条石砌筑堡垒、挡土墙	< 10	25
	10 ~ 40	25 ~ 30
	40 ~ 100	30 ~ 35
灰砂浆砌或条石建筑、砖木混合建筑、木结构	< 10	15
	10 ~ 40	15 ~ 20
	40 ~ 100	20 ~ 25
陈旧危险建筑、精密防振设备建筑、历史性建筑	< 10	8
	10 ~ 40	8 ~ 10
	40 ~ 100	10 ~ 12
水工隧道、下水管道、良好支护的地下洞室或地下构筑物	10 ~ 50	120
	50 ~ 200	130

目前国内还有人提出以折合速度作为爆破地震的安全评定标准。认为爆破震动安全判据要把地面质点振动速度与爆破振动频率结合起来综合考虑。卢文波<sup>[14]</sup>根据多年来近 10 次大规模爆破工程震动的实测数据及宏观调查发现,建(构)筑物在爆破地震作用下,其破坏程度与爆破地震引起的地面质点振动速度成正比,与频率比(即地面震动频率人与结构物自振频率入之比)的常用对数成反比。因此引入一个频率影响系数,用折算振动速度作为估算爆破地震的安全评定标准。

定义折算速度为:

$$v_f = f \cdot v_c \quad (5)$$

式中:  $f$  为频率效应影响系数;  $v_c$  为地面质点振动速度。

$$f = [K \lg(f_b / f_g)]^{-1} \quad (6)$$

式中:  $K$  为频率比例系数;  $f_b$  为爆破地震波引起的地面质点主振频率;  $f_g$  为建(构)筑物的自振频率。

其中  $f_b$  的计算公式为:

$$f_b = \frac{K_f C_s^{7/5} Q^{1/3}}{Q^{1/2} R} \Big)^{2/5}$$

$K_f$  为频率系数,  $K_f = 0.01 \sim 0.03$ ,  $C_s$  为岩石横波的波速, cm/s。

因折合速度方法考虑了主振频率的重要影响,用它来评价爆破地震破坏程度具有较大的优越性。

#### 4 爆破控制

爆破变量可以分为不可控制变量和可控制变量<sup>[13]</sup>。

不可控制变量为: (1)法定的限值; (2)土层的特

性;(3)目标建筑物与爆破点之间的距离和环境。

可控制变量:

(1)爆破孔径大小;(2)毫秒的使用(尽管振动脉冲产生的间歇大于 8 毫秒时不会交迭,但普遍采用 25 毫秒定时)(Skiskind, 1973)。

从上可知,在隧道内实施爆破之前进行爆破实验是十分必要的。需要做足够数量的爆破实验为统计学分析提供合理的数据。Dowding (1985)建议在所给定测量距离的 PPV 分布可以采用非正态分布的模型。在所给的测量距离与 PPV 比值的数据图上可以用代表置信度的直线进行分区。例如,图 3 给出了由 Dowding (1985)通过统计开挖地表矿测得的爆破数据所绘的数据分布图及通过非正态分布假定得到代表置信度为 50%, 84%, 和 95% 的三条线。

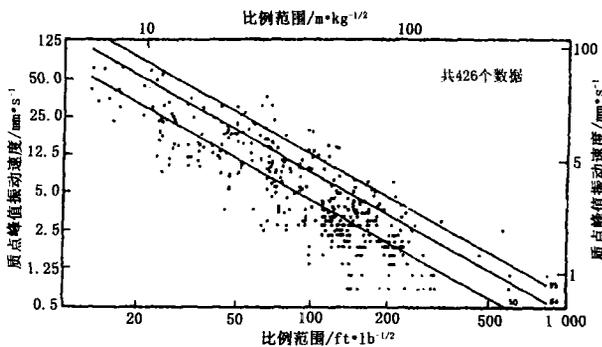


图 3 在煤矿爆破中 PPV 值与比例范围的关系图

图 3 的应用实例如下,我们假定离测点 1 000 m 远处的爆破采用 100 kg 炸药定时爆炸。则比例距离为:

$$\frac{D}{W^{1/2}} = \frac{1\ 000}{100^{1/2}} = 100\ \text{m}/\text{kg}^{1/2}$$

PPV 在置信度为 95% 时为 5 mm/s (也就是说, PPV 具有 95% 的置信度不会超过 5 mm/s)。

## 5 结语

在岩石地区进行隧道、基坑等的开挖时,爆破作业是难以避免的,如何监测爆破振动对结构产生的潜在的破坏是一个急需解决的问题。而采用质点峰值振动速度和主振频率作为爆破振动监测的方法是简易而可行的。而如何制定和健全爆破振动安全判据有待于进一步的研究和探讨。

## 参考文献:

- [1] Telford W M, Geldart L P, Sheriff R E, et al Applied Geophysics [M] Cambridge University Press, 1976
- [2] Dowding C H. Blast Vibration Monitoring and Control [J] Prentice Hall, Englewood, NJ, 1985, (3): 297 - 235.
- [3] Grabb G I, Hiller D M, New B M. Ground vibrations caused by the construction and operation of transport systems [A] Proc 3rd Int Symp. Field Measurements in Geomechanics [C] Osk A. A. Balkema, 1991, 1(1): 443 - 454.
- [4] New B M. Ground vibration caused by civil engineering works [J] Transport and Road Research Laboratory (TRL), Crowthorne, 1986, (6): 54 - 73.
- [5] Siskind D E. Ground and air vibrations from blasting [M] SME Mining Engineering Handbook SME ME, New York, 1973.
- [6] Hendron A J, Aiyer A K. Stresses and strains around a cylindrical tunnel in an elastic - plastic material with dilatancy [J] U. S Army Corps of Engineers, Omaha District, NE, Tech 1972, (4): 10 - 83.
- [7] Oriard L L. Blasting effects and their control in open pit mining [J] Symposium and Specialty Seminar on Stability in Open Pit Mines, Univ of British Columbia, Canada, 1971, (5): 32 - 39.
- [8] New B M. Ground Vibration Caused by Construction Works [J] Tunnelling and Underground Space Technology, 1990, 5 (3): 179 - 190.
- [9] Langefors U, Kihlstrom B. The Modern Technique of Rock Blasting [A] J. Wiley, New York, 3rd Edn [C] 1978
- [10] Clover A w. Appraisal of particular reference to the Tai Lam Chung water tunnel [J] Rock Engineering and Excavation in an Urban Environment, MM, London, 1986, (3): 109 - 120.
- [11] 吴德伦. 工程爆破安全振动速度综合研究 [J] 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 266 - 273.
- [12] 言志信, 吴德伦, 杨明. 镇江铁矿地下爆破振动测试分析 [J] 重庆建筑大学学报, 2000, (S0): 205 - 207.
- [13] 郑周练, 陈山林, 叶晓明. 切槽爆破研究的历史及现状 [J] 重庆建筑大学学报, 2001, 23(6): 103 - 108.
- [14] 何晓光, 张敢生. 爆破地震安全判据探讨 [J] 辽宁科技学院学报, 2005, 7(2): 26 - 29.