

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.05.012

爆破振动速度与加速度的等效换算研究^{*}

谢兴博^① 钟明寿^① 陈 勇^{①②} 郭 涛^①

①解放军理工大学野战工程学院(江苏南京,210007)

②南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 针对建筑结构抗震设计采用爆破振动加速度、工程爆破安全控制标准采用振动速度的不一致问题,通过理论分析和现场测试试验对爆破振动速度峰值和加速度峰值的等效换算及影响因素进行了分析。研究表明:爆破振动速度峰值和加速度峰值可通过公式进行等效换算,换算系数与最大单段药量、爆心距、起爆方式等影响因素相关。

[关键词] 爆破振动;振动速度;加速度;等效换算

[分类号] TD235.1;O384

引言

近年来,随着爆破技术的广泛使用,越来越多的爆破施工地点集中于城区,沿线地表各类建筑密集,爆破产生的振动通过介质传递到周围,会引起附近建筑结构的振动,当振动达到一定强度时,会造成地表建筑物结构不同程度的损坏。评估地震强度一般可用位移、速度、加速度、频率等参量进行描述^[1]。目前,地震研究者一般采用振动加速度荷载进行计算和校核,因为振动加速度能和地震产生的惯性力相联系,可以直接从加速度记录量出,便于对建筑结构产生影响的地震载荷换算及进行建筑结构内力分析^[2]。当爆破振动加速度小于建筑结构允许值时是安全的,否则会造成结构的破坏^[3];而爆破工程部门多采用振动速度峰值对建筑物进行安全性评估,例如 GB6722—2014《爆破安全规程》规定水工隧道、交通隧道、矿山巷道、电站(厂)中心控制室设备、新浇大体积混凝土等建(构)筑物的爆破振动判据采用保护对象所在地质点峰值振动速度和主振频率^[4]。建筑结构设计抗震标准和爆破振动控制标准不一致,经常会给爆破工程设计与施工带来不便,因此,对爆破振动速度峰值和加速度峰值之间的等效换算问题亟待解决。本文通过等效换算计算公式的理论分析,并结合上海东海大桥旁的大乌龟岛中深孔岩石爆破工程监测数据,对爆破振动速度峰值和加速度峰值的等效换算及影响因素进行了初步研究,为爆破工程施工爆破振动速度和加速度控制标

准的等效换算提供参考。

1 爆破振动特性分析

1.1 爆破振动物理量

爆破引起的振动是一个非常复杂的随机过程。它的振幅、周期和频率常常是随时间变化的,简化成质点作简谐运动。对于爆破过程来说振动的最大幅值是关键参量,这样可以满足工程的需要^[5]。众所周知,质点运动的力学状态可以用位移 X 、速度 v 和加速度 α 来表示,表达式为:

$$X = A \sin \omega t; \quad (1)$$

$$v = \frac{dX}{dt} = A \omega \sin(\omega t + \frac{2}{\pi}); \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{d^2 X}{dt^2} = A \omega^2 \sin(\omega t + \pi)。 \quad (3)$$

在确定爆破振动地面质点运动参数时,一般只选取爆破振动的最大幅值,因此得出:

$$X = A, v = A \omega = 2 \pi f A, \alpha = 4 \pi^2 f^2 A。$$

得到加速度与速度的比值为:

$$\alpha / v = 2 \pi f。 \quad (4)$$

式中: X 是时间 t 时的质点振动位移,cm; A 是质点最大振幅,cm; v 是质点振动速度,cm/s; α 是质点振动加速度,cm/s²; ω 是角频率,s⁻¹,其值为 $2 \pi f$; f 是质点频率,Hz。从以上诸式可以看出,如果已知位移、速度、加速度中任意参数,经过积分或微分可以求出其余两个参数。

* 收稿日期:2015-01-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51304218,51339006,51208508)

作者简介:谢兴博(1971~),男,硕士,副教授,主要从事爆破器材应用技术研究。E-mail:znbxie@126.com

通信作者:钟明寿(1983~),男,博士,讲师,主要从事爆炸危害控制技术研究。E-mail:zhongms7@126.com

1.2 爆破振动预报公式

爆破振动观测表明,影响爆破振动强度的主要因素是药量、爆心距和传播介质,振动强度幅值可以取下列常用函数形式:

$$A = KQ^n R^{-m} \quad (5)$$

式中: A 为地面振动最大幅值; Q 为药量; R 为测点距爆心距离; K 、 n 、 m 为场地系数。

我国 GB6722—2014《爆破安全规程》规定,以地表质点峰值振动速度作为爆破地震安全判据的主要物理量指标。通常按式(6)计算埋在地下的药包爆炸时产生的地面振动速度大小,

$$v = K(Q^{1/3}/R)^\alpha \quad (6)$$

式中: v 是地面振动速度; Q 是炸药量; R 为观测点到爆源的距离; K 、 α 是与爆破点至计算保护对象之间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数。

以美国为首的西方国家采用:

$$v = K(Q^{1/2}/R)^\alpha \quad (7)$$

英国人引用能量比 E_R 做为破坏判据, $E_R = 10.8(\alpha/f)^2$, α 是加速度, m/s^2 ; f 是频率。由 1.1 节公式可以看到,质点的振动速度和振动加速度都与振幅成正比,速度与频率成正比,加速度与频率二次方成正比。加速度与速度的比值 $\alpha/v = 2\pi f$, 所以爆破振动与加速度的等效换算与频率有直接关系。

国内学者焦永斌提出的计算爆破振动引起的地面质点振动频率的公式如下:^[6]

$$f = (k_f C_s^{7/5} / Q^{1/3}) (Q^{1/3} / R)^{2/5} \quad (8)$$

式中: f 是介质质点的主振频率, Hz ; k_f 为频率系数, $0.01 < k_f < 0.03$; C_s 为岩石的横波波速, cm/s ; Q 为炸药量, kg , 其中延时爆破时为最大一段装药量, 齐发爆破时为总装药量; R 为爆心距, 介质质点与爆源的距离, m 。国内学者唐春海等提出的爆破振动频率计算公式则为:

$$f = k(Q^{1/3} / \log R)^{1/2} \quad (9)$$

式中: f 为介质质点的主振频率, Hz 。 k 为系数, 对于硐室爆破, $k = 0.8 \sim 5.0$; 对于台阶爆破, $k = 5.0 \sim 50.0$; 对于拆除爆破, $k = 1.0 \sim 10.0$; 药量大时系数取小值, 反之取大值。 Q 、 R 的物理意义和单位同(8)式。

该公式在计算方面简单明了, 但系数 k 的选取却不易掌握。

利用爆破振动速度作为衡量和描述爆破振动强度标准的优点是能和地震波携带的能通量所产生的地应力相联系, 并和岩土工程构筑物的应力分析相联系; 加速度能和地震产生的惯性力相联系, 可以直接从加速度量出, 便于作用于建筑物的爆破地震荷

载换算, 从而进行建筑物的应力分析^[7]。当前国内的爆破施工过程中大多都是以质点的振动速度或者加速度来衡量爆破振动强度的大小, 但都很难同时兼顾这两个指标, 但事实证明, 在爆破施工过程中控制其中一个标准时仍然可能发生由爆破振动产生的安全问题。因此, 迫切需要建立同时兼顾振动速度和加速度两个指标的衡量标准。

2 现场测试及结果分析

2.1 监测系统和测试方法

爆破振动测试仪采用成都中科动态仪器有限公司产的 EXP-3850 型爆破振动测试仪。传感器采用中国地震局工程力学研究所研制的 891-II 型磁电式拾振传感器, 它是动圈往复式传感器, 具有 4 档可调, 档位 1、档位 2、档位 3、档位 4 分别对应测试加速度、中速度、大速度和小速度参量。EXP-3850 爆破振动测试仪与 3 台 891-II 型传感器相连, 组成爆破振动速度和加速度测试系统。3 台 891-II 型传感器分别测量爆破地震波的 3 个方向的分量, 即垂直向(V)、水平径向(R)和水平切向(T)。

测试结合上海东海大桥旁的大乌龟岛中深孔岩石爆破工程进行(图 1)。爆破工程以东海大桥为界分为南北两大区域, 南侧为开山区域 1#, 北侧分为开山区域 2#。开山工程区域 1# 的边界离东海大桥南侧道路边线约 5 ~ 10 m, 开山区域东西长约 630 m, 南北宽约 140 m; 开山区域 2# 的边界距离东海大桥北侧道路边线约 20 ~ 30 m, 爆破范围东西长约 380 m, 南北宽约 95 m。

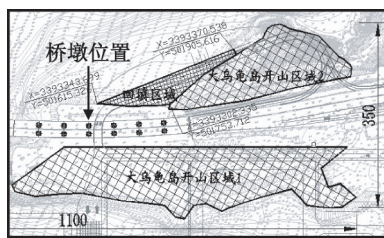


图 1 爆破区域平面位置图

Fig. 1 Plane graph of blasting area

测试试验时每个桥墩位置布设两台仪器, 共 12 个桥墩, 24 台仪器。分别调至不同档位测试爆破振动速度和加速度, 2 个仪器布设在同一个测点, 对每次爆破均进行速度和加速度监测, 试验采集记录数据样本 142 个。

为了获得完整、准确的数据资料, 每次试验前, 到爆破施工现场详细了解爆破设计参数和装药、连线等施工情况。统计的内容包括: 爆破区域中心坐标、台阶高度的总药量、分段情况、最大段药量、钻孔的孔深、孔径、单孔装药量、孔距、排距、起爆网络的

联结形式、各起爆段所用的延期雷管的段别等。然后将统计的信息以表的形式整理记录,以便查询与分析。

2.2 振动速度和加速度的等效换算

郭涛等^[8]在减震沟对爆破振动加速度试验研究一文中得到峰值加速度 $\alpha = 158.5 (Q^{1/3}/R)^{2.01}$, 可以看出其形式与萨道夫斯基爆破峰值振动公式 $v = K(Q^{1/3}/R)^\alpha$ 完全类似,表明爆破振动速度和加速度峰值可进行等效换算。

图 2 为本次实测爆破振动速度和加速度的拟合图,从监测数据看,爆破振动加速度峰值与速度峰值存较好的相关性。可表示为

$$\alpha = \tau \cdot v。$$

(10)

式中: α 为爆破振动加速度, cm/s^2 ; v 为爆破振动速度, cm/s ; τ 为回归系数, $\tau = 42.1$ 。 τ 是根据公式 $\alpha/v = 2\pi f = \tau$ 求得。

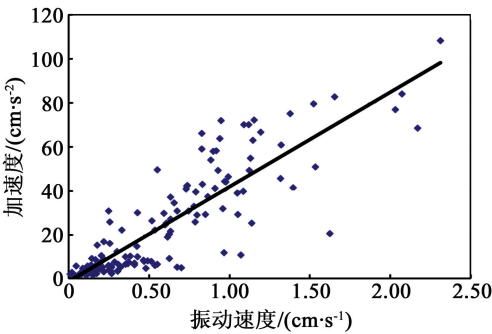


图 2 振动速度和加速度拟合图

Fig. 2 Fitting curves of vibration velocity and acceleration

上述数据是中深孔岩石爆破的工程实际监测数据,回归系数 τ 的值与距离远近、药量大小、起爆方式、地形变化等影响因素有关。

2.3 影响因素分析

实际工程中影响振动强度的因素包括距离、最大单段药量、起爆方式、地形地质等。本文对监测数据按照不同因素整理,对几种影响加速度和速度等效换算结果的因素进行分析。

2.3.1 爆心距的影响

表 1 为现场测试中最大单段药量相同、离开爆源的距离不同时,得到的测试结果。图 3 为爆心距与爆破振动加速度和速度比值的关系图,即距离与频率的关系图。

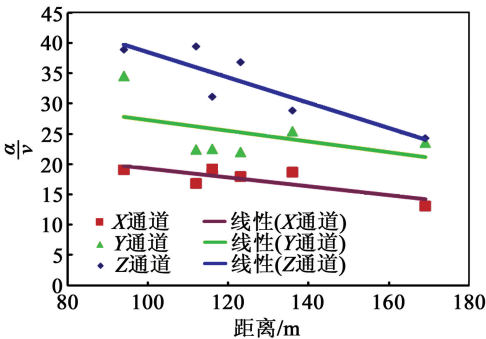


图 3 爆心距的影响

Fig. 3 Effects of burst distance

由表 1 和图 3 可知,随着爆心距的增加,爆破振动速度和加速度的幅值减小、主频降低。距离增加,振动扰动空间加大,波阵面能量密度降低,介质阻尼损耗增多,故振幅减小。不同频率振动成分随距离衰减速率不同,频率越高,衰减越快。从监测数据看,加速度与速度的比值也存在下降趋势,表明主频率随着爆心距的增加而降低。

2.3.2 最大单段药量的影响

表 2 为现场测试中最大单段药量不相同、爆心距相同时的测试结果。图 4 为最大单段药量与爆破振动加速度和速度比值的关系图,即最大单段药量与频率的关系图。由表 2 和图 4 可知,振动加速度与速度的比值存在先下降、后增加的趋势,表明:药量较小时,主频率随着最大单段药量的增加而降低,但是当最大单段药量增加到一定量后,主频率有增大的趋势。

2.3.3 起爆方式的影响

中深孔爆破一般采用毫秒时间间隔延期起爆,延期时间取 25 ~ 100 ms 不等。表 3 为采用单个药包

表 1 不同爆心距的试验结果

Tab. 1 Experimental results of different absolute distances

最大单段药量/ kg	爆心距/ m	振动速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)			振动加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)		
		通道 X	通道 Y	通道 Z	通道 X	通道 Y	通道 Z
24	94	0.552	0.405	0.715	10.558	14.01	27.844
24	112	0.470	0.389	0.408	7.906	8.712	16.067
24	116	0.266	0.187	0.312	5.114	4.205	9.719
24	123	0.464	0.311	0.294	8.308	6.836	10.829
24	136	0.220	0.115	0.239	4.115	2.921	6.905
24	169	0.174	0.105	0.169	2.266	2.476	4.108

表 2 不同最大单段药量的试验结果

最大单段药量/ kg	爆心距/ m	振动速度/(cm·s ⁻¹)			振动加速度/(cm·s ⁻²)		
		通道 X	通道 Y	通道 Z	通道 X	通道 Y	通道 Z
20	112	0.044	0.018	0.025	2.287	1.551	1.449
27	112	0.117	0.092	0.295	5.810	6.404	17.967
32	112	0.608	0.321	0.592	25.382	14.983	19.122
40	112	0.615	0.618	0.826	19.083	38.809	21.504
56	112	1.145	1.037	0.505	43.051	27.012	17.877
80	112	1.378	0.752	0.509	55.031	25.390	19.420

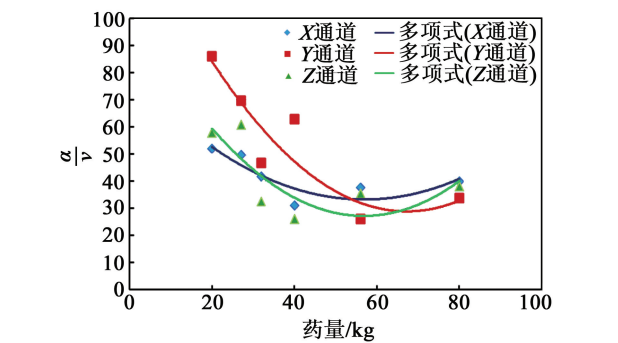


图 4 最大单段药量的影响

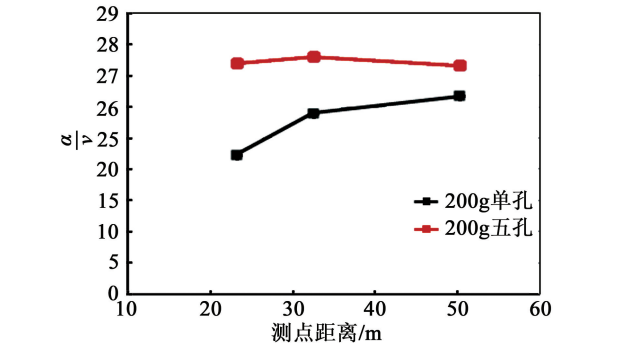


图 5 起爆方式的影响

表 3 不同起爆方式的试验结果

总药量/ g	最大单段 药量/g	爆区距 离/m	频率/Hz		
			X	Y	Z
200	200	50.3	31.75	34.19	31.01
200	200	32.5	28.99	31.75	35.71
200	200	23.2	22.35	28.57	38.46
200×5	200	50.3	36.70	111.10	41.24
200×5	200	32.5	38.10	38.46	41.24
200×5	200	23.2	37.04	40.82	48.19

200 g 和 5 个单个药量分别 200 g,按 50 ms 时间间隔起爆方式的试验结果,图 5 为齐爆、延期爆破与频率的关系。由表 3 和图 5 可知,由于各段药量产生振动的相互作用,加上传播距离和方位的不同,延期起爆最大段药量和不延期同药量起爆相比,主频更大,但随着距离的增加,其大小越来越接近。

3 结论

1)中深孔岩石爆破振动加速度峰值与速度峰值在一定条件下可以通过等效互换确定安全控制标准。其等效性原则及峰值加速度安全控制标准可由式(10)表示,回归系数可通过实测数据的回归分析得到。

2)爆破振动加速度和速度峰值进行等效换算

时,换算系数的大小与爆心距、最大单段药量、起爆方式等多种影响因素有关。

3)实测数据表明:主频率随着爆心距的增加而降低;主频率随着最大单段药量的增加有先减小、后增大的趋势;延期起爆最大段药量和不延期同药量起爆相比,主频更大,但随着距离的增加,其大小越来越接近。

参 考 文 献

[1] 章涛,于广明,邢宾,等. 城市隧道开挖爆破对地表建筑物影响的安全评价[J]. 青岛理工大学学报,2011, 32(5):36-40.
Zhang Tao, Yu Guangming, Xing Bin, et al. Safety evaluation of the ground buildings under the tunnel blasting vibration [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2011, 32(5):36-40.
[2] 言志信,王后裕. 爆破地震效益及安全[M]. 北京:科学出版社,2011:46-48.
Yan Zhixin, Wang Houyu. Blasting vibration effect and safety[M]. Beijing: Science press, 2011:46-48.
[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Department of the People's Republic of China. GB50011—2010 Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.

- [4] 国家质量监督检验检疫总局. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: China Standards Press, 2015.
- [5] 齐世福. 军事爆破工程技术[M]. 北京:解放军出版社,2010.
- Qi Shifu. Military blasting engineering[M]. Beijing: The People's Liberation Army Press, 2010.
- [6] 李孝林,王少雄,高怀树. 爆破振动频率影响因素分析[J]. 辽宁工程技术大学学报,2006,25(2):204-206.
- Li Xiaolin, Wang Shaoxiong, Gao Huaishu. Analysis of factors affecting blasting vibration frequency[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006,25(2):204-206.
- [7] 钱七虎,陈士海. 爆破地震效应[J]. 爆破,2004,21(2):1-5.
- Qian Qihu, Chen Shihai. Blasting vibration effect[J]. Blasting, 2004, 21(2):1-5.
- [8] 郭涛,毛益明,杨力,等. 减振沟对爆破振动加速度峰值减振效应的试验研究[J]. 工程爆破,2010,16(2):76-78,90.
- Guo Tao, Mao Yiming, Yang Li, et al. Experimental study on damping effect of damping ditch on peak value of blasting vibration acceleration[J]. Engineering Blasting, 2010,16(2):76-78,90.

Research on the Equivalent Conversion of Blasting Vibration Velocity and Acceleration

XIE Xingbo^①, ZHONG Mingshou^①, CHEN Yong^{①②}, GUO Tao^①

^①School of Field Engineering, PLA University of Science & Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

^②School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] For the inconsistency problem of adopting blasting vibration acceleration for the building structures seismic design and vibration velocity in the safety control standard of blasting, the equivalent conversion and the influence factors of blasting vibration peak velocity and acceleration were studied by theoretical analysis and field test. Results show that a equivalent conversion between blasting vibration peak velocity and acceleration peak can be achieved by the formula. The conversion factor associates with the maximum explosive charge, absolute distance, detonation and other related factors.

[KEY WORDS] blasting vibration; vibration velocity; acceleration; equivalent conversion

(上接第 50 页)

An Improved DDA Method Considering the Strain Rate of Rock

YU Deyun^①, LIU Dianshu^①, HE Chenglong^②

^①School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing (Beijing, 100083)

^②State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

[ABSTRACT] In view of the problem without considering the strain rate effect in the study when the original classic DDA method analyzing the rock dynamics, the formula of rock dynamic strength associated with the strain rate was introduced into the DDA program, and the dynamic failure criteria, instead of the static contact spring failure criteria, was developed to improve the DDA program. Uniaxial tensile and uniaxial compressive experiments of rock were simulated by the original and improved DDA program, and the results were compared and analyzed. It shows that the failure stress and damage form of rock calculated by the original DDA program doesn't change with different loading rates, which is inconsistent with the experimental results. While damage form of rock calculated by the improved DDA program is consistent with the experimental results, and it could reflect the strength characteristics of rock in that the dynamic strength increases with the increase of loading rate.

[KEY WORDS] discontinuous deformation analysis; strain rate; numerical simulation