DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0741-06

爆破振动速度预测安全保证系数的确定*

梁书锋[1],王宇涛[1,2],刘殿书[1],李 奎[1],李明慧[1]
(1.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;
2.保利民爆哈密有限公司,新疆 哈密 839200)

摘要:基于爆破振动速度预测公式回归分析的基本原理,提出根据建筑物不同安全等级应选择一定的可靠性指标,并推导了预测爆破振动速度公式中所含安全保证系数的计算过程。为简化计算过程,又进一步提出了基于监测数据量、回归分析相关系数以及可靠性指标的关于安全保证系数计算的经验公式。经过大量监测数据验证了该经验公式的计算精度和可靠性均能满足工程实际需要,从而修正了萨氏公式预测精确度不够的缺陷,可为重要建筑物周边的安全爆破设计提供参考。

关键词:爆炸力学;安全保证系数;回归分析;爆破振动速度;可靠性指标
中图分类号:O382;TD235 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

对于爆破振动速度的计算,现普遍采用经验公式进行回归分析预测,而中国现主要采用萨道夫斯基公式[1]:

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

式中:v 为岩石爆破振动速度,Q 为装药质量,R 为爆破中心到测点的距离,K 为与岩石特征、爆破条件有关的系数,α 为与场地有关的指数。

采用公式(1)计算爆破振动速度时,K 值和 α 值往往因地质地形条件的不同产生较大差异。同时在利用回归分析得到爆破振速预测公式的过程中,根据数理统计的知识可知,采用这种方法得到的振动速度公式仅有 50%的可靠性[2]。这对爆破现场周围重要(构)建筑物将带来较大的安全隐患。为了保证爆破现场周围重要(构)建筑物的安全,在最新修订的《爆破安全规程》(GB6722-2011)中[3-4],给出了根据建筑物的不同等级以及不同的振动频率得到的安全振动速度范围,并提出了对于重点保护古建筑和古迹的安全允许质点振速,但缺乏定量的分析理论。

本文中,基于回归分析的基本原理,提出了根据建筑物安全等级应选择一定的可靠性指标;计算得到了爆破振动速度安全保证系数,分析了其计算原理;通过大量数据分析提出了安全保证系数的经验计算公式,极大地简化计算过程,可为重要建筑物周边的安全爆破设计提供参考。

1 安全保证系数的计算原理

在回归分析的过程中,通常会把萨道夫斯基公式进行变形,使其转化为一元线性回归分析[5]。将公式(1)两边取对数后转化为:

$$\ln v = \ln K + \alpha \ln (Q^{1/3}/R) \tag{2}$$

此时令 $y = \ln v$,$x = \ln (Q^{1/3}/R)$,$b = \ln K$,则公式(2)即可变形为一元线性方程的形式:

$$y = \alpha x + b \tag{3}$$

通过回归分析得到的 y 值是预测值,该值与爆破现场的实测振动速度往往会有一定误差。若 Y 是 y 在此处的实际值,则可知其与预测结果有关系式:$Y = y + \varepsilon = b + \alpha x + \varepsilon$。

* **收稿日期**:2014-03-28;**修回日期**:2014-06-26
基金项目:教育部博士点基金项目(20100023110001)
第一作者:梁书锋(1982—),男,博士研究生;**通讯作者**:王宇涛,w_yt2052@163.com。

虽然误差 ε 可正可负,其值无法准确计算,但由回归分析的基本原理可知其服从一定的分布[6]:

$$\varepsilon \sim N\left(0,\left[1+\frac{1}{n}+\frac{(x-\bar{x})^2}{S_{xx}}\right]\sigma^2\right) \tag{4}$$

由于 σ^2 未知,因而只能用样本数据确定其无偏估计量:

$$\hat{\sigma}^2=\frac{Q_e}{n-2}=\frac{1}{n-2}(S_{YY}-\alpha S_{xY}) \tag{5}$$

式中:$S_{YY}=\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^2$,$S_{xY}=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(Y_i-\bar{Y})$,且 $\frac{(n-2)\hat{\sigma}^2}{\sigma^2}=\frac{Q_e}{\sigma^2}\sim\chi^2(n-2)$。

则由数理统计知识可知其分布情况:

$$\frac{\varepsilon}{\hat{\sigma}\sqrt{1+\frac{1}{n}+\frac{(x-\bar{x})^2}{S_{xx}}}}\sim t(n-2) \tag{6}$$

于是对于一定的置信区间 1−β(可靠性指标)有:

$$P\left\{-t_{\beta/2}(n-2)\leqslant\frac{\varepsilon}{\hat{\sigma}\sqrt{1+\frac{1}{n}+\frac{(x-\bar{x})^2}{S_{xx}}}}\leqslant t_{\beta/2}(n-2)\right\}=1-\beta \tag{7}$$

考虑置信区间的置信上限水平,取:

$$\varepsilon=t_{\beta/2}(n-2)\hat{\sigma}\sqrt{1+\frac{1}{n}+\frac{(x-\bar{x})^2}{S_{xx}}} \tag{8}$$

将公式(8)重新代入萨氏公式的形式后为:

$$v=e^{\varepsilon}K\ (Q^{1/3}/R)^{\alpha} \tag{9}$$

令:

$$\gamma_s=e^{\varepsilon} \tag{10}$$

γ_s 即为萨氏公式中的安全保证系数。

2 影响安全保证系数的因素分析

2.1 样本数据量

从式(8)可以看出 γ_s 主要与 $t_{\beta/2}(n-2)$、$\sqrt{1+1/n+(x-\bar{x})^2/S_{xx}}$ 和 $\hat{\sigma}$ 等 3 个未知变量有关,而前两者又与爆破振动数据量 n 存在密切的关系,因而本文中优先分析式中 $t_{\beta/2}(n-2)$ 和 $\sqrt{1+1/n+(x-\bar{x})^2/S_{xx}}$ 的计算。

对于 $t_{\beta/2}(n-2)$ 的计算,可以通过 t 函数分布表查询,且在可靠性指标(1−β)一定的情况下,随着爆破振动监测数据量的增大,$t_{\beta/2}(n-2)$ 的值存在较大差异。1−β=99% 的情况下:$n=10$ 时,$t_{\beta/2}(n-2)=3.1693$;$n=20$ 时,$t_{\beta/2}(n-2)=2.8453$;$n=40$ 时,$t_{\beta/2}(n-2)=2.7045$。1−β=95%的情况下:$n=10$ 时,$t_{\beta/2}(n-2)=2.2281$;$n=20$ 时,$t_{\beta/2}(n-2)=2.0860$;$n=30$ 时,$t_{\beta/2}(n-2)=2.0423$;$n=40$ 时,$t_{\beta/2}(n-2)=2.0211$。

从以上数值可以看出:随着数据量的增大,t 函数的值在 1−β=99%和 1−β=95%等 2 种情况下均会逐渐减小,表明通过增加爆破振动监测数据量可以适当减小爆破振动安全系数;同时可以发现随着数据量的增加,t 函数的值减小幅度逐渐降低并将最终收敛于某一值。由此可知,单纯地依靠增大爆破振动监测数据量,不能有效地减小安全保证系数。

此外,在安全保证系数的确定过程中还存在另外一个与 n 有关的计算公式:$\sqrt{1+1/n+(x-\bar{x})^2/S_{xx}}$,$S_{xx}$ 为监测数据残差平方和,其计算公式为 $S_{xx}=\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2$。

虽然对于 S_{xx} 的计算过程较复杂,但随着数据量的增加,可以发现上述公式的计算结果会逐渐趋近

于 1，如 $n=10$ 时，$\sqrt{1+\frac{1}{n}+\frac{(x-\bar{x})^2}{S_{xx}}}\approx 1.095$；$n=20$ 时：$\sqrt{1+\frac{1}{n}+\frac{(x-\bar{x})^2}{S_{xx}}}\approx 1.049$；$n=30$ 时，$\sqrt{1+\frac{1}{n}+\frac{(x-\bar{x})^2}{S_{xx}}}\approx 1.032$，$n=40$ 时，$\sqrt{1+\frac{1}{n}+\frac{(x-\bar{x})^2}{S_{xx}}}\approx 1.025$。

由此可知，在计算安全保证系数 γ_s 时，只要保证计算的数据量不是太少，则可以认为按照公式 $\sqrt{1+\frac{1}{n}+\frac{(x-\bar{x})^2}{S_{xx}}}\approx 1$ 来计算，而不会对计算结果产生较大影响。

2.2　方差分析

在样本数据量的分析过程中已经对爆破振动安全保证系数计算的 2 个未知量进行了分析计算，但方差 σ^2 的无偏估计量 $\hat{\sigma}^2$ 的计算过程却尤为复杂，下面将根据回归分析基本原理对其进行分析计算。

由数理统计的知识可知 $\hat{\sigma}^2$ 为 σ^2 的无偏估计量，而在回归分析的过程中，回归后得到的预测值与实际值存在一定的误差：$Y=y+\varepsilon$，则有 $E\{(Y-y)^2\}=E(\varepsilon^2)=D(\varepsilon)+[E(\varepsilon^2)]=\sigma^2$。这表示 σ^2 越小，以回归函数 $y=ax+b$ 作为 Y 的近似值所导致的均方误差就越小，从而利用回归分析得到的预测函数就越有效。然而 σ^2 是未知的，因而需要利用样本去估计 σ^2。为了估计 σ^2，需要先引入残差平方和。记 $\hat{y}_i=\hat{y}|_{x=x_i}=\hat{a}+\hat{b}x_i$，且称 $y_i-\hat{y}_i$ 为 x_i 处的残差，则平方和 $Q_e=\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2=\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{a}-\hat{b}x_i)^2$，它是回归函数在 x_i 处的预测值与实际值 Y 的偏差平方和。为了计算得到 Q_e，需要将 Q_e 做如下分解：

$$Q_e=\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2=\sum_{i=1}^{n}[y_i-\bar{y}-\hat{b}(x_i-\bar{x})]^2=$$

$$\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2-2\hat{b}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})+\hat{b}^2\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2=$$

$$S_{yy}-2\hat{b}S_{xy}+\hat{b}^2S_{xx} \tag{11}$$

式中：$\hat{b}=S_{xy}/S_{xx}$，则可以得到 Q_e 的一个分解式 $Q_e=S_{yy}-\hat{b}S_{xy}$。

由回归分析基本原理已可知：

$$\hat{b}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})Y_i}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2},\qquad \hat{a}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}Y_i-\frac{\hat{b}}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i=\bar{Y}-\hat{b}\bar{x} \tag{12}$$

式中：$\bar{Y}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}Y_i$，$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$。

由残差平方和服从的分布状况为 $Q_e/\sigma^2\sim\chi^2(n-2)$，于是有 $E(Q_e/\sigma^2)=n-2$，即知 $E(Q_e/(n-2))=\sigma^2$，这样就得到了 σ^2 的无偏估计量：

$$\hat{\sigma}^2=\frac{Q_e}{n-2}=\frac{1}{n-2}(S_{yy}-\hat{b}S_{xy}) \tag{13}$$

由此即可计算得到 $\hat{\sigma}^2$，可见其计算过程非常复杂，为爆破振动速度安全保证系数的确定带来了很多不便。但在一般的爆破振动速度回归预测公式中，不仅会给出回归分析计算得到的 K 和 α 的值，同时还会给出预测结果的相关系数[7]。在此，将根据相关系数的计算原理对 $\hat{\sigma}^2$ 的计算过程进行简化分析。从而在可靠性分析的基础上，得到含安全保证系数的爆破振动速度预测经验公式。

3　安全保证系数的经验计算公式

一般在用萨道夫斯基公式进行回归分析预测时，都会给出相关系数以及预测数据量[8]。如果能够根据监测数据量及回归分析的相关系数直接计算安全保证系数，将为工程爆破振动速度的计算和预测提供便利，下面将根据相关系数的计算公式对安全保证系数进行变形计算。相关系数的计算公式为：

$$r=\frac{\sum_i (x_i-\bar{x})\,(y_i-\bar{y})}{\left[\sum_i (x_i-\bar{x})^2 \sum_i (x_i-\bar{y})^2\right]^{1/2}}=\frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} \tag{14}$$

回归参数 $\hat{b}$ 的计算公式为：$\hat{b}=S_{xy}/S_{xx}$，则将 r 和 $\hat{b}$ 代入公式(13)后可以得到：

$$\hat{\sigma}=\sqrt{(S_{yy}-\hat{b}S_{xy})/(n-2)}=\sqrt{(1-r^2)S_{yy}/(n-2)} \tag{15}$$

此时式中仍然存在未知变量 S_{yy}，但是经过大量的数据计算后发现 $S_{yy}/(n-2)$ 的值始终在 1/4 附近，因而将做如下变换：

$$\hat{\sigma}=\sqrt{(1-r^2)S_{yy}/(n-2)}\approx\sqrt{(1-r^2)/4} \tag{16}$$

又安全保证系数 $\gamma_s=e^{\varepsilon}$，$\varepsilon=t_{\beta/2}(n-2)\sqrt{(1-r^2)/4}$，即：

$$\gamma_s=\exp\left[t_{\beta/2}(n-2)\sqrt{(1-r^2)/4}\right] \tag{17}$$

从式中可以看出，对于一般的爆破振动速度预测结果，只需要知道其预测过程中采用的监测数据量 n 及其回归结果的 r，即可得到 γ_s，极大地简化了计算过程。对于式(17)的精确程度，以工程实例数据为基础与在可靠性回归分析中式(8)～(10)的计算结果进行对比，以此验证。

4 工程实例验算

对安全系数经验公式验证时，采用青岛某码头建设过程中采石场至油库方向的 28 组监测数据，见表 1，表 1 中 q_{max} 为单段最大药量，$v_{h,t}$ 为水平横向振动速度，$v_{h,l}$ 为水平纵向振动速度，v_v 为垂直向振动速度。运用式(2)和(3)分别对上述 28 组监测数据进行空间 3 个方向的回归分析，见图 1～3。

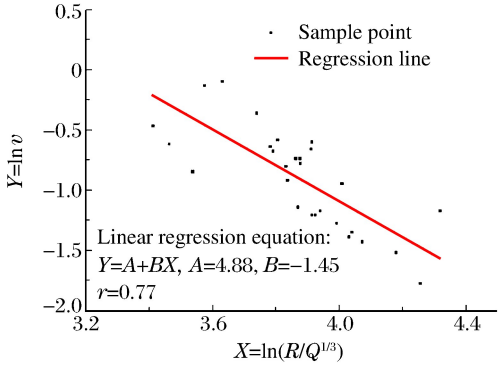

图 1 水平横向回归分析结果

Fig. 1 Lateral regression analysis results

由回归方程(3)通过变换得到 $K=e^A$ 以及 $\alpha=B$，并分别采用经验公式(17)及回归分析基本原理计算得到安全保证系数，其结果整理如表 2 所示，表中 $\gamma_{s,r}$ 为采用回归分析法得到的安全系数，$\gamma_{s,e}$ 为采用经验公式法得到的安全系数。

由计算结果可看出，采用经验公式得到的安全保证系数与采用回归分析基本原理得到的结果很接近，误差为 5%～10%，且采用经验公式的计算结果稍大[9]。这表明采用经验公式得到的计算结果仍然满足安全保证要求，对于重要构建筑物的安全爆破设计更具可靠性。同时仅根据回归分析得到的 K、α 以及相关系数 r 就能够直接计算得到安全保证系数，计算方法简便易行，为实际工程计算带来了便利。

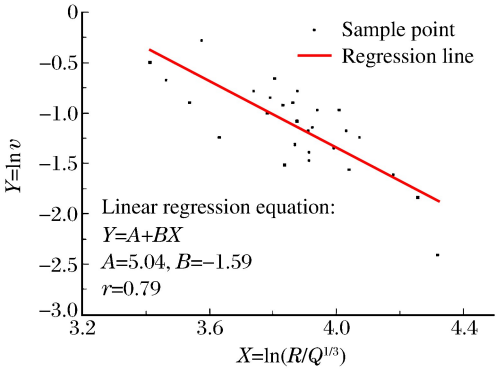

图 2 水平纵向回归分析结果

Fig. 2 Longitudinal regression analysis results

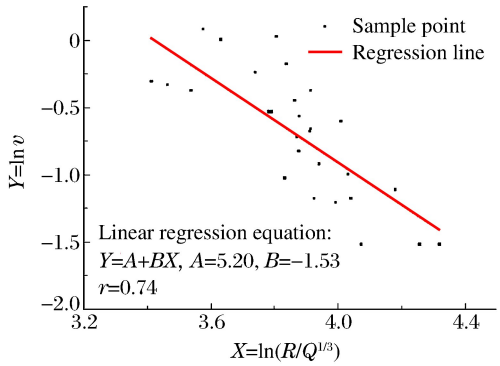

图 3 垂直向回归分析结果

Fig. 3 Vertical regression analysis results

表 1 油库方向监测数据

Table 1 Data monitored along the direction from the quarry to the oil depot

测点编号	R/m	Q/kg	q_{max}/kg	$v_{h,t}$/(cm·s^{-1})	$v_{h,l}$/(cm·s^{-1})	v_v/(cm·s^{-1})
1	335	6 420	350	0.48	0.41	0.64
2	340			0.46	0.46	0.57
3	339	2 872	288	0.31	0.38	0.40
4	387			0.24	0.29	0.22
5	431			0.22	0.20	0.33
6	465			0.17	0.16	0.22
7	495			0.31	0.09	0.22
8	297	2 040	264	0.40	0.22	0.84
9	307			0.32	0.27	0.49
10	242			0.91	0.29	1.01
11	288	2 408	276	0.51	0.43	0.59
12	300			0.45	0.40	0.36
13	232			0.88	0.76	0.99
14	364	2 832	386	0.55	0.25	0.69
15	363			0.52	0.31	0.51
16	327			0.56	0.52	0.73
17	275	3 168	280	0.70	0.46	0.79
18	287			0.53	0.37	0.59
19	401	7 000	387	0.39	0.38	0.55
20	410			0.25	0.31	0.37
21	181	2 848	183	0.54	0.51	0.62
22	173	3 720	186	0.63	0.61	0.64
23	196			0.43	0.41	0.59
24	309	4 928	264	0.48	0.34	0.44
25	324			0.30	0.32	0.31
26	321			0.30	0.23	0.52
27	347			0.28	0.26	0.30
28	364			0.26	0.21	0.31

表 2 计算结果

Table 2 Calculation results

方向	K	α	r	$\gamma_{s,r}$		$\gamma_{s,e}$	
				$1-\beta=95\%$	$1-\beta=99\%$	$1-\beta=95\%$	$1-\beta=99\%$
水平纵向	130.4	1.45	0.77	1.75	2.15	1.87	2.34
水平横向	152.9	1.59	0.79	1.73	2.12	1.85	2.29
垂直向	179.4	1.53	0.74	1.90	2.39	1.99	2.54

5 结　语

爆破振动波的传播和衰减规律是进行工程爆破参数设计的重要依据，但是由于爆破现场复杂的地质和地形条件，仅利用萨氏公式往往不能保证振动速度的预测精度。本文通过对某爆破工程的现场数据分析研究，提出根据建筑物的重要程度选择不同的可靠性指标，计算得到安全系数以保证工程周围重要建筑物的安全，同时提出了基于监测数据量、回归分析相关系数以及可靠性指标的计算公式，极大的简化了爆破振动安全保证系数的计算过程，同时根据实际工程监测数据验证了爆破振动安全保证系数计算公式的可行性，为爆破振动速度准确预测提供了可靠的保证。

参考文献:

[1] 刘殿书.爆破工程[M].北京:科学出版社,2011:98-133.

[2] 吕涛,石永强,黄诚,等.非线性回归分析法求解爆破震动速度衰减公式参数[J].岩土力学,2007,28(9):1871-1878.
Lü Tao, Shi Yong-qiang, Huang Cheng, et al. Study on attenuation parameters of blasting vibration by nonlinear regression analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(9):1871-1878.

[3] 言志信,王永和,江平,等.爆破地震测试及建筑结构安全标准研究[J].岩石力学与工程学报.2003,22(11):1907-1911.
Yan Zhi-xin, Wang Yong-he, Jiang Ping, et al. Study on measurement of blast-induced seism and building safety criteria[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(11):1907-1911.

[4] 中国工程爆破协会.GB6722-2011,爆破安全规程[S].北京:中国标准出版社,2011.

[5] 杨佑发,崔波.爆破震动速度峰值预测[J].振与冲击,2009,28(10):195-198.
Yang You-fa, Cui Bo. Prediction for vibration intensity due to blasting induced ground motions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009,28(10):195-198.

[6] 盛骤.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2008:40-60.

[7] Kim D S, Lee J S. Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000,19(2):115-126.

[8] 杜汉清.爆破振动衰减规律的现场试验研究[J].爆破,2007,24(3):107-109.
Du Han-qing. Experimentally study on the attenuation law of blasting vibration[J]. Blasting, 2007,24(3):107-109.

[9] 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(增刊):99-102.
Bi Wei-guo, Shi Chong. Optimization selection of blasting vibration velocity attenuation formulas[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(Suppl):99-102.

Determination of safety coefficient for predicting blasting vibration velocity

Liang Shu-feng[1], Wang Yu-tao[1,2], Liu Dian-shu[1], Li Kui[1], Li Ming-hui[1]

(1. *School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing* 100083, *China*;
2. *Poly Explosives Hami Co., Ltd, Hami* 839200, *Xinjiang, China*)

Abstract: The basic principle of regression analysis was considered for the prediction formula of blasting vibration velocity. On the basis of the considered principle, an opinion was put forward that certain reliability indexes should be chosen according to the safety levels of buildings. And the calculation process was deduced for the safety assurance coefficient included in the prediction formula of blasting vibration velocity. To simplify the calculation process, an empirical calculation formula was proposed for the safety assurance coefficient based on the parameters consisting of amount of monitoring data, correlation coefficient of regression analysis, and reliability index. The accuracy and reliability of the empirical calculation formula was verified by the monitoring data in actual projects. The investigated results show that the empirical calculation formula can meet the practical needs and it can make up the shortcoming that the accuracy of Sadov's formula is not enough. So the empirical calculation formula proposed can provide a reference for the design of safety blasting surrounding important buildings.

Key words: mechanics of explosion; safety assurance coefficient; regression analysis; blasting vibration velocity; reliability index

(责任编辑 张凌云)