

文章编号: 1004- 0609(2000) 01- 0136- 04

近河堤采矿爆破的震动监测与控制^①

陈寿如¹, 宋光明¹, 史秀志¹, 周胜利², 骆秉才²

(1. 中南工业大学 爆破岩土工程中心, 长沙 410083; 2. 马鞍山钢铁集团公司 姑山铁矿, 当涂 243184)

摘 要: 采用 YBJ-1 型爆破振动自记系统及 CRAS 随机信号与振动分析软件包对爆破地震振动信号进行了观测、分析和处理, 得出了爆破地震波衰减经验式, 并结合爆破现场实际与河堤防护要求建议严格按安全控制参数实施爆破, 最后还讨论了河堤的爆破地震液化问题。

关键词: 爆破地震; 河堤; 防护

中图分类号: TD236

文献标识码: A

随着爆破工程在国民经济、社会公共事业建设等各个领域的应用与扩展, 爆破过程中的有害效应, 特别是深孔爆破、硐室爆破等大药量爆破对周围环境的震动效应危害也随之增多和加强。为有效防护对大坝、河堤、边坡等整体性构筑物的损伤与破坏, 国内外建立了爆破地震效应监测和分析系统, 通过相应的经验公式或参数来评价、预测爆破地震的震动强度, 并利用爆破设计来控制震动强度, 从而达到减小爆破地震危害的目的^[1~3]。临近防护对象实施大药量爆破(爆源中心距防护对象的水平直线距离小于 150~ 250 m)时, 爆破地震的震动特征表现为: 质点垂直振速对防护对象的危害影响大于质点水平振速, 且其震动主频相对较高, 震动强度衰减相对较快^[4]。通过对爆破地震质点垂直振速的监测, 并以此预测爆破地震危害, 可有效地对爆破震动进行设计控制。

本文基于安徽某铁矿的爆破地震监测, 研究了萨氏公式 $V = k\rho^\alpha$ 中 k , α 的取值, 归纳了爆破震动预测经验式, 并根据河堤防护规程中临界垂直振速对比例药量 ρ 进行限制, 提出了临近河堤边界爆破的控制方法, 实际应用结果表明, 该控制方法的实施使河堤得到有效、安全、可靠的防护。

1 河堤防护要求

爆破地震的震动大小与爆破条件(包括钻孔参数、药量、装药结构、工程地质状况等)密切相关; 河堤的防护也应与河堤基础地质、水文地质、抗震设计、爆破地震波传播过程等因素相适应。

1.1 爆破条件

该矿区地处芜湖盆地, 属一剥蚀残丘, 基岩出露面积仅 0.13 km², 其余均被厚度在 50~ 60 m 的第四系地层覆盖。矿区露天开采使用低风压潜孔钻机钻孔倾角 75°、直径 200 mm 的倾斜孔以及装填高威力防水 XJ-1 型液体炸药, 其孔网、药量、起爆参数如下:

1) 孔网参数

台阶高 12 m, 斜孔长 13~ 15 m, 孔距 4~ 5 m, 最小抵抗线为 8 m, 炮孔堵塞长度 5~ 6 m。

2) 药量参数

每次爆破单孔药量约 400 kg, 一般段药量 0.8~ 1.6 t, 延米装药量 40~ 50 kg/m, 炸药单耗对碳酸盐化闪长岩、高岭土化闪长岩和极硬岩分别为 0.70, 0.22 和 0.75 kg/m³。

3) 起爆参数

每次爆破 10~ 12 个炮孔, 分 3~ 4 段, 段微差时间 25~ 30 ms 以上, 每段 2~ 4 个炮孔。

目前, 该矿爆破工作已下降至海拔 - 40~ - 80 m, 东部河堤下剥离与采矿约在海拔 - 20 m 处, 主要生产爆破已临近河堤边界。

1.2 河堤防护要求

1) 基础地质

该矿东部河堤地段海拔在 - 50~ 10 m 范围内, 从上至下分别为第四系全新统人工杂填土、冲积亚粘土、亚粘土—粉细砂互层、中细砂层以及第四系上更新统冲积粘土—亚粘土层、冲积砂砾卵石层。第四系地层土的密度在 2.66 g/cm³~ 2.74 g/cm³ 之间, 孔隙度为 43.5%~ 64.2%, 裂隙比在 0.565~

① 收稿日期: 1999- 03- 24; 修订日期: 1999- 06- 24

作者简介: 陈寿如(1943-), 男, 教授, 博士生导师

1.19 之间。上部冲积亚粘土薄层与粉细砂层土的弹性模量为 37.4~49.0 MPa, 灰色亚粘土与细砂互层土的弹性模量为 5.38~11.83 MPa。

2) 水文地质

河宽 200 m, 位于东部矿体东上侧, 最高洪水位 10.18 m, 实测 8.3 m; 河底淤泥层厚约 1~2 m; 据抽水试验与水位动态观测, 第四系地下水的主要补给源为区域地下径流, 基岩裂隙水直接受上覆第四系地下水的补给, 河水与矿区地下水关系不密切。堤下第四系地层及基岩裂隙含水层的渗透系数均较小。

3) 抗震状况

按全国部分县市基本烈度值规定, 该河堤所处地区基本烈度为 6 度。此外, 该河堤在建后近 50 年的历程中, 经过来往车辆的压实以及多次的填土加固。在 1969 年、1983 年经历了两次洪水高峰期及 40 多年的露天采场爆破地震, 均未出现裂缝渗水、土层沉降等破坏现象。1992 年 7 月, 某矿山研究院曾就该河堤的防护提出: 在一次爆破首段最大药量为 1.5~2.0 t 时, 质点垂直振速、水平振速极限分别为 0.2 cm/s 和 1.2 cm/s。但是, 这个振速极限却远远低于对天然地震 6 度烈度的防护要求, 安全防护过于保守。

4) 地震波传播地层

由于生产爆破施工已处在海拔 -20 m 处, 目前, 河堤距施爆点高差约 30 m、距离在 150~250 m 范围内。爆破地震波传播地层条件复杂, 从冲积砂砾卵石层、中细粉细砂层到粘土、人工杂填土层, 裂隙度在 43.5%~64.2% 之间, 层理、裂隙发育, 有利于爆破地震波的衰减, 可降低爆破对河堤影响。

2 测震系统与测震方法

2.1 测震系统

经过 20 多年的发展, 测震系统已从老式的光线示波器系统发展到磁带记录仪系统, 再发展到目前的数字化测震系统, 如 TOPBOX 爆破自记仪、DSVM 系列测震仪、ZCF-16A 型低频振动参数采集分析仪和 YBJ-1 型爆破振动自记系统等^[1,5]。根据生产爆破对河堤安全影响的测震要求, 选用 YBJ-1 型爆破振动自记系统、CRAS 随机信号与振动分析软件进行爆破地震振动信号记录、分析与处理, 更为简便。该软件对于波形分析、频谱计算、平滑处理等具有方便、快捷的优点。在海南铁矿、三峡水

利水电工程爆破地震测试中多次使用, 从实践上论证了该软件具有以上优点。

2.2 测震方法

2.2.1 地震振动强度参数的确定

国内外对爆破地震引起建筑物破坏的研究最多、历史最长, 而对爆破地震引起地下结构、边坡、大坝、河堤等整体性构筑物破坏的研究相对较少。测定的参数有位移、加速度、速度及能量比等, 但国内外专家多认为建(构)筑物的破坏与质点振速关系最为密切, 因此国内多数大型露天铁矿如南芬、大冶、水厂、海南铁矿均采用质点振速作为构筑物的破坏判据^[6~8]。

2.2.2 地震振速方向的确定

由于爆源引起岩石内部质点振动有垂直、径向和切向三个速度分量, 一般切向较小, 垂直和径向振速较大, 根据情况不同起控制作用的速度分量不同。与天然地震相比, 其最具破坏性的构造地震释放能量大、振幅强、频率低、危害大、影响区域广, 往往是径向速度分量起控制作用; 而在该矿生产爆破中, 其爆心距被保护河堤一般只有 150~250 m。在这种距离小、高差不大的情况下, 一般是垂直速度分量对爆破地震起控制作用, 而且在实地测试中发现水平振速仅为垂直振速的 50% 左右, 所以在此项研究工作中采用垂直振速作为测定振速方向分量^[4]。又由于在测试过程中发现垂直、径向振动频率有差异, 垂直振动频率一般在 20~40 Hz 范围内, 径向振动频率一般在 18~20 Hz 范围; 而当振速相同时, 频率低者对河堤的稳定影响较大, 故在以垂直振速作为判据时, 应考虑一定径向分量作用的安全系数^[9]。

2.2.3 测点布置与埋设

根据生产爆破振动对临近河堤的影响, 在河堤与爆心之间布置测点。每组测点 5~8 个, 尽量置于爆心正后方, 测点间距数十米。为了能准确分析处理测试结果, 在距爆心 30~200 m 范围内均相应布设了测点, 在 5 次观测中共布置了 14 个测点。在土层或松石层埋设测点时, 应挖开松石层或土层至基岩, 否则可挖一个深为 0.3~0.5 m、边长为 0.3 m 的土石坑, 垂直埋设一根直径约为 0.3 m, 高为 0.5~0.7 m 的水泥涵管, 管外用土石回填, 并夯实, 管内用混凝土浇灌, 表面抹平, 以便固定传感器; 对基岩或现有水泥基础表面, 先洗净其表面, 然后用砂浆抹平后即可使用。测震前, 在测点上倒少许石膏粉, 加少量水调匀, 固定好速度传感器, 5 min 后石膏固化, 即可进行垂直振速的测试。

3 安全控制参量

3.1 现场实验

根据河堤防护要求和测点布置情况,在该矿临近河堤开挖爆破时共测得 16 项垂直振速测试结果,所有的数据均列入了表 1。

3.2 回归分析

据萨道夫斯基公式^[10]:
$$v = k \left[\sqrt[3]{Q/R} \right]^\alpha = k \rho^\alpha \tag{1}$$
式中 v —质点垂直振速, cm/s; Q —一次爆破首段药量, kg; R —测点到爆心距离, m; k —与岩石、爆破方法等因素有关的系数; α —与地质条件有关的地震波衰减系数; ρ —比例药量, $\rho = \sqrt[3]{Q/R}$ 。按表 1 中 16 组数据 $\lg \rho$, $\lg v$ 进行线性回归得 $r = 0.9043$, 满足回归精确性要求; 但作线性回归时发现 02 和 04 组数据偏离回归线较远(见图 1 之 ②、④), 故将其删除后再回归得 $r = 0.9608$, 结果更理想, 并由此求得: $k = 130.71$, $\alpha = 1.9006$ 。故对河堤而言, 爆破地震波质点垂直振速的衰减经验式为:

$$v = 130.71 \rho^{1.9006} \tag{2}$$

3.3 安全控制参量

由河堤地震基本设防烈度 6 度可知其质点振速在 3.0~ 6.0 cm/s 范围内^[11], 由于开挖爆破已临近河堤, 且堤下地层为粘土层、中细砂和粉细砂层及冲积砂砾卵石层等软弱结构层面, 其安全振速宜取

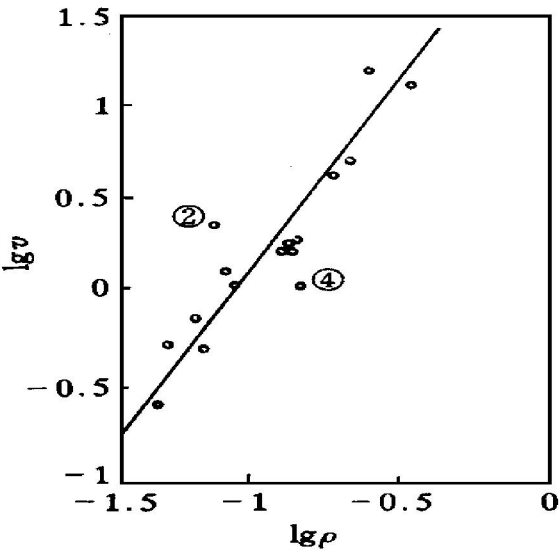


图 1 质点振速与比例药量关系
Fig.1 Relationship of particle velocity and rating charges

较小值。为安全起见, 取安全质点振速 $[v] = 3.0$ cm/s; 并根据式(2), 考虑振动频率和高差影响, 采用比例药量 ρ 作为安全控制参量:

$$[v] = 130.71 \cdot E \cdot H_i \cdot \rho^{1.9006} \tag{3}$$

式中 E —考虑质点振速水平分量及振动主频等因素的安全系数, 按实测, 垂直振速是水平振速的 2 倍左右, 考虑合速度应是垂直振速的 $\sqrt{5}/2$ 倍左右, 又水平径向振动主频较低, 则从安全实际角度着眼, 取 $E = 1.2$; H_i —高差影响系数, $H_i = 1.0 \sim 1.3$, 据经验, 当爆心与河堤坡底线垂直高 H

表 1 垂直振速测试结果

Table 1 Testing results of vertical vibration velocity

Item	R/m	Q/kg	$v/(cm \cdot s^{-1})$	ρ	$\lg \rho$	$\lg v$	f/Hz
01	70.7	766.8	1.9500	0.1294	- 0.8880	0.2900	20.89
02	138.2	766.8	2.3800	0.0662	- 1.1791	0.3766	20.49
03	196.2	766.8	0.5400	0.0466	- 1.3313	- 0.2676	18.96
04	59.0	440.2	1.0980	0.1288	- 0.8900	0.0406	23.27
05	122.8	440.2	0.5078	0.0619	- 1.2084	- 0.2943	-
06	179.0	440.2	0.2600	0.0425	- 1.3720	- 0.5850	25.60
07	164.2	795.2	0.7400	0.0564	- 1.2485	- 0.1308	13.84
08	116.3	795.2	1.1170	0.0797	- 1.0987	0.0481	16.79
09	75.4	795.2	1.8900	0.1229	- 0.9105	0.2765	-
10	41.4	795.2	15.7350	0.2238	- 0.6502	1.1969	49.95
11	59.0	482.8	1.7580	0.1330	- 0.8763	0.2450	-
12	47.4	482.8	4.3950	0.1655	- 0.7812	0.6430	32.51
13	41.9	482.8	5.0650	0.1872	- 0.7276	0.7046	22.26
14	127.3	795.2	1.3130	0.0728	- 1.1380	0.1183	-
15	81.2	795.2	1.7290	0.1141	- 0.9427	0.2378	21.33
16	30.4	795.2	13.4340	0.3048	- 0.5160	1.1280	11.38

分别为 0, 20, 40, 60 和 80m 时, H_i 取值分别为 1.0, 1.5, 1.11, 1.19 和 1.30。

将数据代入式(3)中可求得当高差分别为 0, 20, 40, 60 和 80 m 时安全控制参量 $[P]$ 分别为: 0.124, 0.121, 0.118, 0.113 和 0.108。

4 爆破地震液化问题探讨

砂土液化是指因爆破振动引起饱和砂土和粘土的颗粒趋向紧密, 同时孔隙水来不及排出, 致使颗粒间有效应力减少, 甚至完全丧失抗剪能力, 呈液体状态, 可导致喷水、冒砂、地面沉陷、坡面失稳、漂移或地基失效等。由于矿区东部河堤下确实存在粘土层、中细砂和粉细砂层及冲积砂砾卵石层, 有可能发生液化现象; 但同时, 以下因素又阻碍砂土发生地震液化^[12, 13]:

1) 砂土层含水不饱和, 一是青山河底 1~2 m 的淤泥层阻止河水向砂土层渗水; 二是砂土层的下部疏水工程减少了该层含水量。从实际情况来看, 矿区东部开采时很少渗水也说明该砂土层含水不饱和。

2) 砂土层上部覆盖较厚, 该覆盖层即人工堆积土、填土、粘土等组成的青山河堤为非液化层, 厚度达 15m 左右, 经多年沉降和行车压实加固, 使砂土的相对密度较大, 液化不易发生。

3) 由于爆破地震振动持续时间短, 最长仅数百毫秒或数千毫秒, 且控制允许振速为 3.0 cm/s, 根本无法使上述砂土层发生液化。

REFERENCES

[1] CHEN Shou-ru(陈寿如), *et al.* 无线自记测震系统在

露天矿山爆破地震控制中的应用 [J]. *Explosive Materials(爆破器材)*, 1998, 27(1): 18~20.

[2] Lizotte Y C. Controlled blasting at the CANMET experimental mine [J]. *Mining Engineering*, 1996, (6): 74~78.

[3] Dowding C H. Blast Vibration Monitoring and Control [M]. Prentice Hall, 1985: 246~251.

[4] GONG Ya-li(龚亚丽). 爆破引起的地面振动及其衰减规律 [J]. *Research on Blasting Surveying Technology(爆破量测技术研究)*, 1982: 114.

[5] LI Ming-neng(李名能). 爆破进展 [J]. *Blasting(爆破)*, 1995, (1): 66~68.

[6] ZHU De-da(朱德达). 我国爆破地震效应的研究 [J]. *Quarterly of Changsha Mine Institute(长沙矿山研究院季刊)*, 1988, (1): 39~45.

[7] HUANG Xing-li(黄兴礼). 工程爆破地震问题的探讨 [J]. *Nonferrous Metal Mine and Metallurgy(有色矿冶)*, 1992, (3): 1~6.

[8] GAO Xiao-chu(高晓初). 我国露天铁矿大区多排微差爆破技术 [J]. *Blasting(爆破)*, 1995, (1): 33~38.

[9] LI Xiang-can(李香灿), *et al.* 露天矿边坡爆破振动响应谱的研究 [J]. *Metal Mine(金属矿山)*, 1992, (12): 29~32.

[10] ZHANG Xue-liang(张雪亮), *et al.* Effect of Blasting Ground Vibration(爆破地震效应) [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1981: 36.

[11] ZHANG Zhi-cheng(张志呈). 浅谈爆破地震效应的方法和标准 [J]. *Explosive Materials(爆破器材)*, 1998, 27(3): 32.

[12] GU Xiao-lu(顾晓鲁), *et al.* Toft and Foundation(地基与基础) [M]. Beijing: Architectural Industry Publishing House of China, 1993: 125.

[13] GBJ9-87. 建筑抗震设计规范 [S]. Beijing: Architectural Industry Publishing House of China, 1989: 134.

Controlling blasting ground vibration near bank

CHEN Shou-ru¹, SONG Guang-ming¹, SHI Xiur-zhi¹, ZHOU Sheng-li², LUO Bing-cai²

1. Blasting Engineering Centre, Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China;

2. Gushan Iron Mine In Maanshan, Dangtu 243184, P. R. China

Abstract: YBJ-1 blasting vibration self-recording system and CRAS (The random signal and vibration analysis system) software were selected to survey, analyse and deal with the signal of blasting ground vibration. A practical equation about attenuation of blasting ground vibration wave was derived and blasting according to Safe Controlling Index was suggested. Finally, the problem on blasting vibration liquefaction under the river bank was discussed.

Key words: blasting ground vibration; river bank; protection

(编辑 何学锋)