

柘林水电站扩建工程施工期爆破振动衰减规律

胡建敏

(长江科学院岩基研究所 武汉 430010)

刘 华

(长江科学院爆破研究所 武汉 430010)

摘要 论述柘林水电站扩建工程现场施工条件下, 各部位开挖爆破振动的衰减规律。在统计的基础上, 总结了各自的特点, 并对经验公式进行验证工作。该公式已指导施工, 也可用于工程验收时的安全评估。

关键词 柘林水电站, 扩建工程, 爆破振动监测, 质点振动速度

分类号 TU 751.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2001)增-1861-04

1 概 况

柘林水电站是我国最长的土心墙水电站, 位于江西省永修县境内的修河中游, 系江西省以发电兼顾防洪、灌溉、航运、供水和发展水产事业等综合利用的水利水电工程。随着国民经济的发展, 原电站的装机容量已不能满足社会需求, 需在老电站的左侧扩建新电站厂房。新电站于1998年12月开始动工, 其地质条件复杂, 有进水口引水渠、引水隧洞和厂房段3大部分开挖工程^[1]。

该电站扩建工程进水口紧邻鲫鱼山南端的舌状延伸部分, 为一长条形挡水山体(也称为“80山包”)。开挖对“80山包”存在2个方面的影响: (1) 由于“80山包”地质条件复杂, 在山体下游被 F_{65} , F_{67} 两条大断层切割形成一倒三角楔形棱体, 且岩性较差, 部分棱体穿过开挖上部, 该棱体易受爆破影响而破坏; (2) “80山包”底部存在大量的帷幕灌浆及固结灌浆体, 爆破对灌浆体的影响不容忽视。开挖所在地地表为强风化岩层, 接近土状, 覆盖层厚10~15 m, 地质岩层为 Z_{ad} , Z_{ad} , 岩层产状为SN~N70°E, 倾向W或NW, 倾角70°。73.5 m以上为永久边坡, 最大边坡高为60 m, 坡度较缓, 为1:1, 每级台阶约17 m高; 73.5 m以下为洞脸边坡, 坡高约40 m。因此, 在此开挖, 稍有疏忽, 对“80山包”棱体、帷幕灌浆体及高边坡的稳定有较大的影响, 该地区为控制爆破区域。

该电站扩建工程厂房段开挖工程, 位于地基山古滑坡体南侧, 厂房北坡, 即为厂房后坡, 距各观

测点较远。厂房北西坡, 靠近“80山包”, 距永久边坡19 m。开关站边坡坡高50 m, 地层大部分为变质泥岩及砂岩, 距开关站、继保室等正在运行的机电设备很近, 该地区也为控制爆破区域。

目前, 大多以质点振动速度作为工程爆破振动的控制判据。现场监测仪器采用CDJ-28速度传感器和YCD-IV爆破自记仪或日本TEAC MR-30, HR-30数字磁带机记录仪, 采用CRAS软件和586微机分析处理系统数据, 振动速度测量范围为0~40 cm/s。

2 试验目的

(1) 通过现场爆破开挖工程, 探讨出(不同爆破方式)的振动效应和振动波沿地面传播的一般规律, 为爆破的优化设计提供足以信赖的科学依据。

(2) 提供经验公式的应用范围。

(3) 为提高预报精度, 在各地区监测点固定的情况下, 进行爆破振动经验公式验证工作, 并促使监测成果及时反馈到设计、施工中去, 从而确保优质工程施工, 同时也为工程的竣工验收提供科学、可靠的依据。

3 试验内容

本次试验分别在进水口、厂房段两地开挖时进行。为观测进水口开挖爆破对“80山包”的影响, 在40 m以上做了多次爆破试验, 所得的经验公式作为爆破对“80山包”棱体产生影响的控制依据。

2001年6月15日收到初稿, 2001年8月22日收到修改稿。

作者 胡建敏 简介: 女, 1957年生, 1982年毕业于电大无线电专业, 现任工程师, 主要从事爆破振动试验方面的研究工作。

为确保老电站建筑物及正在运行的机电设备在施工期安全运行，确定爆破近区开挖爆破参数，在厂区英雄山开挖段进行了爆破试验，提供可供施工单位参考的经验公式。

此次试验不区分具体的爆破方式，只根据进水口、厂房段开挖爆破作业部位不同而进行分类，即爆区在上、测点在下和爆区在下、测点在上 2 种情况设点监测。

4 振动传播规律分析

4.1 实测爆破振动波形直观分析

从实测爆破振动波振动波形图(图 1)可以看出，单响微差时间为 50 ms 左右，各响振动波形无叠加，不易有重段的现象。试验公式统计样本中的单响药量与总药量无关，但在实际开挖中，如进水口开挖、厂房开关站开挖，经常出现振速超标现象。如用试验公式计算，振速不应超标，但经检查网络设计图与实际波形图发现，所设计的爆破网络中，有个别重段现象，各单段微差时间过小，引起单响振动波叠加。由于爆破控制标准较严，本地在区爆破施工过程中，对爆破网络要求较高，严格控制单响药量。

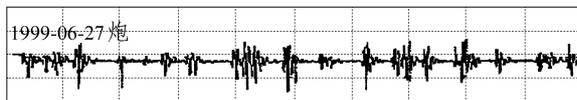


图 1 实测典型波形图

Fig.1 The measured typical waveform

另外，同一测点不同方向观测的质点振动速度峰值也有不同，最大值的测试方向与爆破的相互位置关系有关。一般最大振速方向与爆源传至测点的波阵面法线方向相一致；同一平面，实测的振动峰值，后冲向振动大于侧向振动。

一般振动频率越高，振动持续时间越短，爆破振动效应对邻近建筑物的扰动或危害就越小。实测结果表明：振动频率为 20~80 Hz。振动波形的持续时间与微差爆破设计延时等相关，爆破规模越大，设计起爆雷管段数越多，则振动的持续时间就越长。实测每一起爆段序的振动波形，主振段持续时间均在几毫秒至几十毫秒范围以内。

4.2 回归分析

4.2.1 振动传播规律经验公式

为了解爆破振动波在岩体内的传播规律，其幅

值(质点振动速度)的衰减特性可用下式来拟合^[2-4]：

$$V = K \times \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^a \tag{1}$$

式中：Q 为单响药量(kg)；R 为测点至爆心的直线距离(m)， $R = \sqrt{\ddot{A}X^2 + \ddot{A}Y^2 + \ddot{A}Z^2}$ ；V 为质点振动速度峰值(cm/s)；K，a 分别为反映爆破方式与地质条件等综合影响的回归待定统计系数。

(1) 对进水口开挖进行了爆破振动试验，获得的沿“80 山包”边坡的爆区侧后冲振动规律如下所述。为以后图解方便，本次统计全部采用一元回归。

① 进水口 103 m 以上开挖梯段爆破(孔径 f110 mm)振动速度的公式为

$$V = 36.2 \times \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{1.469} \tag{2}$$

式中： $0.014 \leq \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}\right) \leq 0.506$ ， $R=5 \sim 105$ m， $Q=2 \sim 30$ kg。经计算， $r=0.934$ ， $F=414$ ， $s=0.423$ 。查表得： $(F_{a=0.01}=4.82) < (F=414)$ ， $(r_{a=0.01}=0.267) < (r=0.934)$ 。

② 进水口 103 m 以下开挖梯段爆破(孔径 f70 mm)振动速度的公式为

$$V = 20.3 \times \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{1.35} \tag{3}$$

式中： $0.0312 \leq \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}\right) \leq 0.432$ ， $R=9 \sim 168$ m。经计算， $r=0.913$ ， $F=257$ ， $s=0.431$ 。查表得： $(F_{a=0.01}=5.17) < (F=257)$ ， $(r_{a=0.01}=0.304) < (r=0.913)$ 。

③ 进水口 103 m 以下预裂爆破(孔径 f70 mm)振动速度的公式为

$$V = 11.49 \times \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{1.003} \tag{4}$$

式中： $0.0476 \leq \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}\right) \leq 0.15$ ， $R=26 \sim 87$ m。经计算， $r=0.892$ ， $F=105$ ， $s=0.467$ 。查表得： $(F_{a=0.01}=5.49) < (F=105)$ ， $(r_{a=0.01}=0.47) < (r=0.892)$ 。

(2) 对厂区英雄山、尾水渠开挖的施工进行爆破振动试验，获得沿“80 山包”边坡和开关站、继保室边坡的振动速度衰减规律如下所述。

① 厂区 40 m 以上梯段爆破(孔径 f110 mm)振动速度的公式为

$$V = 98.23 \times \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R}\right)^{1.97} \tag{5}$$

式中： $0.023 \leq (\frac{Q^{1/3}}{R}) \leq 0.319$, $R=7 \sim 95$ m。经计算， $r=0.968$, $F=94$, $s=0.397$ 。查表得： $(F_{a=0.01}=5.49) < (F=94)$, $(r_{a=0.01}=0.325) < (r=0.968)$ 。

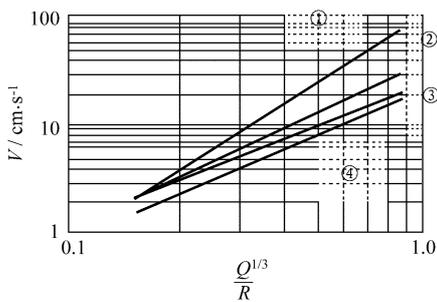
② 厂区在 40 m 以下梯段爆破(孔径 $f70$ mm) 振动速度的公式为

$$V = 23.1 \times (\frac{Q^{1/3}}{R})^{1.413} \quad (6)$$

式中： $0.019 \leq (\frac{Q^{1/3}}{R}) \leq 0.432$, $R=13 \sim 120$ m。

经计算， $r=0.876$, $F=258$, $s=0.394$ 。查表得： $(F_{a=0.01}=5.18) < (F=258)$, $(r_a=0.393) < (r=0.876)$ 。

由上用数理统计方法进行显著性检验与相关系数检验鉴定值可知，在显著水平 $\alpha=0.01$ ，方程式(2)~(6)中的样本中，质点振动速度 V 与 $(Q^{1/3}/R)$ 均线性相关，并非常显著(图 2)。



- ① $V=98.2 \rho^{1.97}$ (厂区 40 m 上)
- ② $V=36.2 \rho^{1.469}$ (进水口 106 m 上)
- ③ $V=23.1 \rho^{1.431}$ (厂区 40 m 下)
- ④ $V=20.3 \rho^{1.35}$ (进水口 106 m 下)

图 2 不同地区衰减规律曲线

Fig.2 Attenuation curves of particle velocity of different area

根据笔者在本工程所进行的爆破跟踪监测(本节公式埋设条件及爆源情况基本一致)，共进行多次抽检验证，从 546 组数据中，有 97% 的数据落在 $\pm 2s$ 偏差范围内。据此认为，本节公式对本工程预报和控制是可靠的。

4.2.2 影响质点振速峰值大小的讨论

由上述可见，爆破振动速度的峰值大小，虽然受岩石岩性特征、地质构造特征、测试部位及爆破方法等诸多因素的影响，但主要影响因素取决于测点至爆源中心的距离及爆破单响药量的大小。

将 4.2.1 节给出的不同地区爆破条件下获得的爆破质点振动速度峰值衰减关系进行图解(如图 2)，从中可以看出，当比例药量 $r (=Q^{1/3}/R)$ 相同时，以大孔径梯段爆破造成的振动效应最强(图 2 中①线，②线)，小孔径浅孔爆破造成的振动效应次之(图

2 中③线，④线)。这符合一般规律的结果，因为大孔径深孔爆破尽管采用的起爆方式一样，但由于单孔药量、药包直径比小孔径爆破要大得多，其单响药量的集中程度高。浅孔小孔径爆破方式，由于同量的单响药量(必需是多孔数量之和)相对分散，加之多个同段雷管之间存在延时误差，不可能做到同段而不同孔内炸药都同时起爆，因此就质点振动速度而言，在相同的 r 值条件下，大孔径梯段爆破的振动效应就必定大于小孔径浅孔爆破的振动效应。

比较图 2 中的曲线，①，②线是爆区在测点上方；③，④线是爆区在测点的下方。可以看出：①线比②线衰减的快($a_1 > a_2$, $k_1 > k_2$)，③线比④线衰减的快($a_3 > a_4$, $k_3 > k_4$)，这和本地区地质条件相吻合。进水口和引水渠开挖段，其爆破部位除表面岩石情况较差外，一般岩石坚硬情况较好。厂房英雄山开挖段，地质岩层大部分为变质岩及砂岩，岩石风化程度严重，故厂区开关站开挖较进水口开挖对爆破振动波的传播有很大的衰减作用，同时也说明它对爆破振动波有较强的吸收作用。

将 4.2.1 节中经验公式(2)，(3)进行图解(见图 3)。图中：在 r 相同时，梯段爆破振动效应(曲线①)大于预裂爆破(曲线②)，这和其他类似工地开挖衰减规律刚好相反。根据分析认为，由于本地区开挖控制标准要求较严($V \leq 0.5$ cm/s)，预裂爆破、间隔装药，无论距离监测点远近，都必须严格控制单响药量。这样单响药量相对较分散，振动较梯段爆破小。因此，本地区未区分预裂爆破、光面爆破、梯段爆破衰减规律，全部引用梯段爆破衰减规律代替其他几种开挖衰减规律。

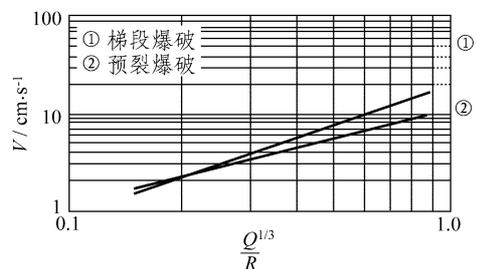


图 3 梯段与预裂爆破衰减规律曲线

Fig.3 Attenuation curves of particle velocity with bore-hole blasting and presplitting blasting

4.3 实测爆破振动波振动效应影响范围分析

将 4.2.1 节公式(1)按不同的单响药量条件绘制

V-R 曲线(图 4)。由图可见：在爆心距小于 50 m 范围内振动影响较大；随着爆心距的增大，单响药量的变化对爆破振动效应影响较小。也就是说，较强的振动效应集中在爆心距较小区域内，这是爆区作业中应加以重视的危险区段。

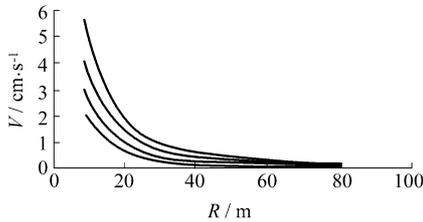


图 4 不同单响药量条件下的 V-R 曲线

Fig.4 V-R curves with different quantity of single dynamite

5 爆破试验成果的应用

5.1 单响药量的控制依据

根据建筑物(构筑物)所允许的安全控制标准，由爆破振动衰减规律公式求得允许的最大单响药量，从而对爆破单响药量进行控制。单响药量计算公式为

$$[Q] = R^3 \times \left(\frac{[V]}{K}\right)^{\frac{3}{a}} \quad (7)$$

式中：[Q]为允许最大单响药量(kg)，[V]为允许安全振动速度(cm/s)。

5.2 邻近建筑物(构筑物)安全控制

试验成果可以作为本地区高边坡开挖对新浇预应力锚索、新浇混凝土的安全评价。当单响药量和距离已知时，可利用衰减规律公式预报振动速度，并与安全值比较。也可利用控制标准控制爆破单响

药量或爆破安全距离。

5.3 爆破安全评估

当已知爆破单响药量或爆源距建筑物(构筑物)距离时，可用试验成果计算允许建筑物(构筑物)的质点振动速度(V)，并把它与安全允许值[V]进行比较：当 $V \leq [V]$ 时，安全；当 $V > [V]$ 时，不安全。

6 结 语

(1) 根据控制标准，对照本地区开挖对各建筑物振动影响实测值，认为用 4.1 节中的 4 个质点振动衰减规律经验公式来预报是可行的，反映了该地区不同的爆破方式下的振动效应特征。

(2) 爆破振动衰减规律对确定爆破单响药量起指导作用，为工程优化爆破设计提供了科学依据。

(3) 由爆破试验结果得到以下规律：在 $r (= Q^{1/3}/R)$ 相同的情况下，厂房段开挖振动比进水口开挖衰减得快；大孔径开挖振动比小孔径大；梯段爆破开挖振动比预裂爆破开挖大。较强的振动效应集中在爆心距较小的区域内，该区域已引起足够的重视。

参 考 文 献

- 1 贵阳设计院. 《柘林水电站扩建工程》招标文件[R]. 贵阳：贵阳设计院，1998
- 2 上海师范大学数学系. 回归分析及试验设计[M]. 上海：上海科学技术出版社，1978
- 3 陈华腾. 爆破计算手册[M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社，1991
- 4 中国科学院数学物理统计组. 常用数理统计方法[M]. 北京：科学出版社，1973

ON THE ATTENUATION OF BLAST-INDUCED VIBRATION DURING CONSTRUCTION OF EXTENSION PROJECT FOR ZHELIN HYDROPOWER STATION

Hu Jianming, Liu Hua

(Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010 China)

Abstract The research results on the attenuation of blast-induced vibration during construction of extension project for Zhelin hydropower station are presented. Based on the statistical data, the experiential formula is derived and can be used to control blast for the project. The formula can also be used to evaluate the safety of the near building.

Key words Thelin hydropower station, extension project, measurement of blast vibrtion, particle velocity of vibration