

地下工程开挖爆破的地面振动特征

李玉民 倪芝芳

(山东矿业学院爆破研究所 泰安 271019)

提要 依据工程爆破的大量实测数据, 拟合得到了地下工程岩石开挖爆破地面振动速度的变化规律。对实测波形时域、频域、响应谱的系统分析, 给出了地面振动波几个重要的特征。这为爆破工程的设计、爆破振动控制提供了重要的参考。

关键词 地下工程, 岩石爆破, 地面振动, 变化规律, 谱分析

1 前言

岩石爆破地振效应是爆破安全的重要研究课题之一, 国内外对此进行了大量的研究工作。特别是对露天深孔、浅孔爆破振动波的传播规律、危害作用及减振技术的研究已相当充分^[1-3], 地下矿山爆破振动效应也已作了一些工作^[4]。随着道路、城市交通事业的迅速发展, 大量地铁、隧道的修筑, 浅埋地下结构的开挖爆破振动对地面设施, 特别是对城市地面建筑的危害效应越来越显著。轻则引起人员的惊吓及其他生理反应, 重则引起地面建筑的开裂, 甚至倒塌破坏, 引起人们的抱怨、财产的损失。与矿山地下工程不同, 地铁、隧道多为浅埋结构, 其开挖过程中, 爆破振动对地面影响较大, 因此, 开展浅埋结构岩石开挖爆破振动地面效应的研究工作, 寻求经济合理的减振爆破技术及建筑物防振抗振方法具有

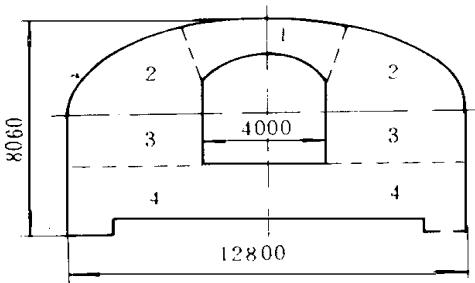


图1 爆破开挖方式

Fig 1 Pattern of blasting excavation

重要的理论意义和实用价值。我们结合某城市地下工程的爆破开挖进行了这方面系统的测试分析工作。该地下工程长700多米, 设计净跨度12m, 硐体位于砂岩中, 围岩坚固系数 $f = 3 \sim 6$, 裂隙少, 硐顶覆盖层厚度14~15m, 其中杂填土厚1~2m。因硐体是在原跨度为4m的旧防空洞作导坑的基础上扩大而成, 故其开挖顺序为先拱部, 后两帮, 如图1所示(图中1, 2, 3, 4为开挖顺序)。爆破开挖的地面振动测试系统框图示于图2。两系统均具有: 通道多、信号的动态测量范围宽、频率特性好, 分析软件丰富、性能稳定、抗干扰能力强、信噪比高、操作简便、可实现信号的实时处理等特点。

1996年4月30日收到初稿。

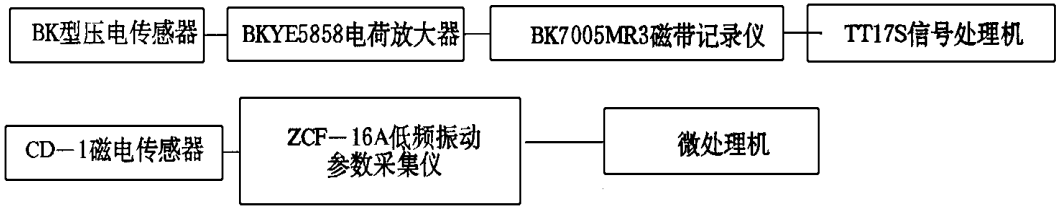


图 2 爆破振动测试系统

Fig 2 Measuring system of blasting vibration

2 岩石开挖爆破地面振动强度的规律

爆破地振波在上覆岩层中的传播是一个复杂的动力学过程。炸药的性能、药量、装药结构、引爆方式、堵塞条件以及爆破的地形地质条件都会影响爆破地振的强度。此外，土岩介质的动力学性质也很难用计算方法精确确定。因此要寻求土岩爆破地振效应主要参数的理论解是非常困难的。在工程中，一般都采用经验公式来估计爆破地振的主要参数。根据现场测试的实际：即岩性不变(砂岩)，上覆岩层厚度不变(均为 14~ 15 m)，地面地形基本不变，炸药均为 2# 岩石硝铵炸药，装药结构、堵塞条件不变。故可推论出影响爆破振动速度的物理量唯有药量和爆心距。按符合爆破相似律的基本公式

$$v = k \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

拟合，即可得到地面振动速度的变化规律。现场实测的爆破振动 3 向速度的多项统计平均值列于表 1。据此表，采用最小二乘法进行线性回归，得到拱部爆破开挖时地面振动速度的变化规律为：

$$V_L = 105.6 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.7} \quad (2)$$

$$V_R = 83.8 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.74} \quad (3)$$

$$V_T = 30.74 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.56} \quad (4)$$

式中： V_L 、 V_R 、 V_T 分别为垂直向、水平径向、水平切向最大振动速度， cm/s ； Q 为 100m s 段间间隔起爆的最大一响齐爆药量， kg ； R 为测点至爆点的距离， m 。上述公式的适用范围为： $0.025 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 0.078$ 。

由以上公式可见：垂直向速度始终占主要地位，其次是水平径向，而水平切向振速较小。

3 地面振动波的若干基本特征

3.1 地面振动波波形

采用两种微差爆破方案，即 25m s、100m s 段间间隔爆破方法进行了测试，发现：100

表 1 实测地面振动速度
Table 1 Measured vibration velocity

序号	药量 /kg	距离 /m	垂向速度 /cm · s ⁻¹	水平径向速度 /cm · s ⁻¹	水平切向速度 /cm · s ⁻¹	统计次数
1	1.8	17.5	1.6	1.0	0.68	2
2	1.65	16.5	1.1	0.9	0.6	2
3	1.725	20.5	1.2	0.7	0.36	2
4	1.5	14.6	1.23	0.96	0.7	6
5	1.5	15.7	1.2	0.94	0.64	2
6	1.5	17.6	0.98	0.65	0.37	2
7	1.5	27.8	0.62	0.4	0.26	3
8	1.35	14.9	1.0	0.9	0.6	2
9	1.35	26.9	0.6	0.4	0.3	2
10	1.2	14.0	1.1	0.9	0.45	4
11	1.2	15.7	1.0	0.75	0.44	4
12	1.2	16	0.96	0.73	0.41	4
13	1.2	16.3	0.95	0.7	0.38	4
14	1.2	17.2	0.93	0.65	0.33	3
15	1.2	17.8	0.9	0.6	0.31	3
16	1.2	18.4	0.85	0.52	0.35	2
17	1.2	19.1	0.83	0.48	0.33	2
18	1.2	19.8	0.80	0.46	0.29	2
19	1.2	20.5	0.75	0.45	0.27	3
20	1.2	26.9	0.47	0.39	0.22	2
21	1.2	34.0	0.28	0.33	0.19	3
22	1.2	38.6	0.25	0.3	0.17	2
23	0.9	14	1.0	0.85	0.55	2
24	0.9	15.2	0.91	0.74	0.42	3
25	0.9	16.5	0.84	0.63	0.4	3
26	0.9	18.5	0.75	0.59	0.36	2
27	0.9	20	0.71	0.56	0.31	4
28	0.9	21	0.52	0.41	0.25	2
29	0.9	23	0.48	0.315	0.2	2
30	0.9	24	0.45	0.25	0.17	4
31	0.9	25	0.4	0.23	0.159	3
32	0.9	27.5	0.35	0.2	0.15	6
33	0.9	30	0.3	0.14	0.117	3
34	0.9	31.5	0.285	0.117	0.11	9
35	0.9	34	0.25	0.15	0.15	2
36	0.9	38.6	0.2	0.2	0.18	2
37	1.05	16.5	0.85	0.6	0.4	2
38	1.05	27	0.42	0.35	0.2	2
39	0.75	18.4	0.6	0.46	0.3	2
40	0.6	14	0.88	0.58	0.25	2
41	0.6	32	0.117	0.078	0.059	2

m s 微差间隔爆破, 各段所产生的振动波形基本独立, 无叠加现象, 25 m s 微差间隔, 则出现各段所产生的地面振动波首尾波相连的状况, 可能发生了波的叠加, 此时仍用最大一响齐爆药量计算振速会出现一定的误差。

3.2 地面振动波主频率

对实测波形的 FFT 分析, 得到表 2 的数据。从中可见, 地下开挖爆破的地面振动频域较宽, 垂向主频较高, 为 30 ~ 90 Hz; 水平径向、切向的主频较低, 多数在 16 ~ 36 Hz, 此主频较接近于建筑物的自振频率 (3 ~ 18 Hz), 所以同样幅值情况下, 水平向振动比垂向振动对建筑物的危害大。因而, 水平向振动, 特别是水平径向振动是一个不可忽视的参数。

表 2 地面振动波主频率

Table 2 Main frequency of surface vibration

爆心距 /m	药量 /kg	主频率 /Hz		
		垂向	水平径向	水平切向
19.00	0.9	68	18	18
20.50	0.9	52	46	35
23.00	0.9	82	20	20
23.10	0.9	73	36	22
24.80	0.9	76	34	19
26.35	0.9	92	35	17
29.00	0.9	83	19	18
31.35	0.9	85	30	25
19.00	0.6	31	30	17
22.30	0.6	81	34	16
24.60	0.6	75	34	19
23.50	0.6	89	36	27
30.82	0.6	34	16	17

3.3 地面振动波的反应谱

对 5 段 25 m s 微差间隔和 5 段 100 m s 微差间隔爆破时的地面垂向振动波形, 进行了阻尼为 0.03 时的响应谱分析。结果表明: 爆破地振动时间影响响应谱的形状, 振动时间愈长, 其强反应的机会就愈大。由于 25 m s 微差爆破振动波形首尾相连, 持续时间较长, 响应谱图上呈现“山峰状”, 反应幅度大, 山峰出现在较低频 12 Hz 处, 近于建筑物自振频率, 易发生共振; 100 m s 微差爆破振动, 各段波形明显分离, 每段振动持续时间短, 响应谱图在 0 ~ 40 Hz 范围内呈平缓趋势, 反应相对较小, 最大“山峰”值出现在 80 Hz 处, 远离建筑物自振频率, 因此发生爆破振动与建筑物共振的机会较小, 是一种较优的微差爆破方式。

3.4 爆破振动的合速度

从拟合经验公式可知, 垂向振速和水平径向振速相差不太大。若用单一方向振速作为衡量爆破振动的指标似有缺陷。用 3 个方向速度的合速度来作幅域的量化指标较合理。然

而测试结果表明: 同一测点 3 个方向的速度最大值并非同时到达, 而具有一时间差。最大垂向振速在波形始点的 10 ~ 50 m/s 到达, 而同一点水平径向和切向振速最大值出现在 100 m/s, 此时若用三个方向速度最大值的矢量合成并非反映真实的合速度, 而应用同一时刻采样点的三个速度值进行波形合成, 得到新的合成波形, 取该新波形的最大峰值, 才为真实的合速度峰值。

4 结论

- (1) 由现场实测数据, 拟合得到了地下工程岩石开挖爆破地面振动速度的变化规律。
- (2) 100 m/s 微差间隔爆破不会产生叠加现象, 25 m/s 微差间隔则会产生波形叠加。
- (3) 水平振动的主频较接近于建筑物的自振频率, 与垂向振动相比更易与建筑物产生共振。
- (4) 25 m/s 微差爆破振动响应谱呈现“山峰”状, 反应强烈, 山峰出现在接近建筑物自振频率处, 易与建筑物共振。相比之下, 100 m/s 微差爆破振动安全性更好些。
- (5) 同一点 3 向速度峰值常出现在不同时刻, 合速度应为 3 向波形的矢量合成较为合理。

参 考 文 献

- 1 中国力学学会 爆破量测技术研究 内部文献, 1982, 125 ~ 172
- 2 于双久 工程爆破地震安全问题 工程爆破, 1995, 1(2): 71 ~ 77
- 3 高善堂 临近民房的露天减震爆破技术 工程爆破, 1996, 2(1): 26 ~ 32
- 4 朱瑞庚, 李铮 爆破地震波的现场测量及其安全距离 爆炸与冲击, 1982, (1): 60 ~ 67

THE CHARACTERISTICS ON SURFACE VIBRATION OF BLASTING IN UNDERGROUND ENGINEERING

Li Yum in Ni Zhifang

(Shandong Institute of Mining & Technology, Tai an 271019)

Abstract According to a great number of measured data in situ, the regular patterns of surface vibration in underground blasting are worked out in this paper. Some important basic properties of surface vibration wave are also developed by systemetic analysis on timing, frequent and responding spectrum of the actual vibration wave. These are very important references in blasting design and vibration control.

Key words underground engineering, rock blasting, surface vibration, regular pattern, spectrum analysis