文章编号: 1006 - 7051(2001)04 - 0076 - 07

碾压混凝土围堰爆破拆除震动安全分析

燕　琳,李世海,方　正,陈　力
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘　要: 在高坝洲水电站下游纵向碾压混凝土围堰爆破拆除中进行了爆破测震试验。对现场实测爆破震动波形的研究表明,采用使堰体翻转的爆破拆除方案时,选用条形间断装药、雷管分段延时起爆、隔震孔、预裂缝等技术措施,完全能够降低大爆破带来的结构振动,确保相邻堰体的安全。

关键词: 碾压混凝土; 爆破拆除; 延发爆破; 震动监测
中图分类号: TD235.4+1; TU746.5　　**文献标识码**: A

ANALYSIS ON VIBRATION SAFETY IN BLASTING DEMOLITION OF ROLL COMPACT CONCRETE COFFERDAM

YAN Lin, LI Shi-hai, FANG Zheng, CHEN Li
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

ABSTRACT: In blasting demolition of a downstream longitudinal roll compact concrete cofferdam in Gaobazhou Hydroelectric Power Station, the tests of monitoring blasting vibration were conducted. The research on the blasting vibration waves measured in test site has shown that the structural vibration from a mass blasting can be fully dampened and the safety of adjoined cofferdam body ensured by selection of some technological measures such as decked charging, delayed firing, vibration-separating holes and presplitting cracks when a blasting demolition scheme of tilting the cofferdam body is adopted.

KEY WORDS: Roll compact concrete (RCC); Blasting demolition; Delay firing; Vibration monitoring

1　引　言

在大型围堰的爆破拆除工程中,减少爆炸荷载引起的相邻结构物的振动是确保整个工程安全的关键技术。在这方面,尤其对于拆除碾压混凝土结构的大型围堰,国内外可借鉴的工程

收稿日期: 2001 - 04 - 27
作者简介: 燕　琳,工程科学部助理研究员,硕士。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

实例很少,因此,结合实际工程进行大尺度的模拟试验,以获得可比尺度下的爆破振动数据是很有必要的。

本试验是结合清江高坝洲水电站下游纵向围堰拆除工程进行的[1]。根据设计要求,试验中采用了条形间断装药方式和同段雷管分药包起爆方式,监测了爆破过程中保留堰体上测点的振动速度并进行了数据分析。结果表明:采用翻转的爆破方案拆除碾压混凝土围堰,只要布药方案和起爆方式选择合理,就可以确保相接堰体的振动安全; 单响药量 8kg 时,保留堰体端部的最大振动速度峰值可以控制在 15.0cm/s 左右; 围堰保留段上测点的振动主频为 15Hz 及 30～45Hz。预裂爆破完成后形成的预裂缝对后期非电毫秒延时爆破具有明显的隔振效果,保留堰体上的振动速度不随爆炸点的接近而增加。采用分药包设置雷管的方法起爆和合理的起爆顺序,预裂爆破在拆除部分与非拆除部分相接处产生的振动速度可以控制在 1cm/s 的量级。

2　现场试验环境

现场试验选址在湖北清江高坝洲水利枢纽二期下游纵向碾压混凝土(RCC)围堰上。围堰全长 270m,上游端与主坝相接,下游端为自由端,左侧为已经投入运行的溢流槽,右侧为正在清理的基坑。围堰上游部分 144m 为要保留的导墙段,下游部分 126m 为拆除段,两端之间预留有连接缝。围堰顶宽 5m,堰顶高程 ▽57m,高程 ▽52m 以上直立,以下两侧各按 1∶0.35 的坡度逐步变宽至 ▽41m,堰体的平面图和断面图分别如图 1 和 2 所示。按照设计要求,围堰分次拆除,第 1 次拆除 7m(高程 ▽57m 至 ▽50m),第 2 次拆至高程 ▽43m。本试验开始时,第 1 层大部分已经拆除,仅剩下与保留段相接的 16m 尚未拆除。爆破试验时须确保导墙段不受损害,必须保护位于导墙段端部(离预留缝最小距离为 50m)的施工用高压线架的安全,因为高压线路受损会影响整个施工现场的正常作业。按照设计单位的要求,质点最大垂直振动速度应控制在 15cm/s 以下。

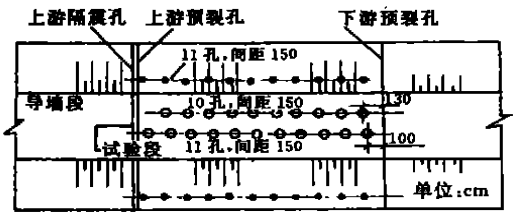

图 1　堰体平面及布孔

Fig. 1　Cofferdam plan and hole pattern

3　布药起爆及测振方案

本次爆破测振试验采用了非电导爆管起爆网路、孔内和孔外延时起爆方式。所布炮孔包括上、下游预裂孔,底部预裂孔,以及第 1～3 排爆破孔。炮孔孔径为 89mm。试验方案采用了使围堰向右侧翻转的爆破方案,即两排侧向抛掷爆破和一排底部倾斜爆破。为了避免堰体底部大范围破坏,确保下层爆破顺利,在第 3 排主爆孔以下布置了一排预裂孔,孔距 60cm,从堰体右侧倾斜向上钻孔,共 26 孔,各孔均贯穿堰体,长约 10m。

为了保护导墙段钢筋混凝土及临时高压输电线,上游段首先布设了两排密集的隔震孔,然后在隔震孔

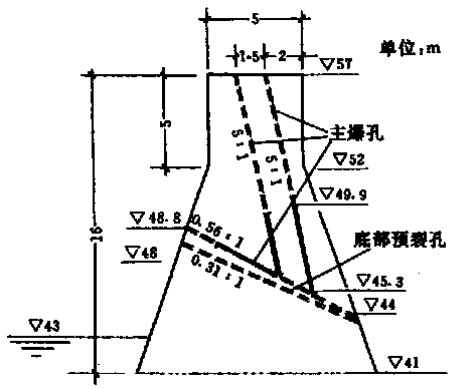

图 2　堰体断面、布孔及装药

Fig. 2　Cofferdam section, hole pattern and charging structure

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

下游设置了两排预裂孔,以减小爆破地震波的危害。这 4 排孔的排间距为 20cm、孔间距 30cm,孔深随堰底预裂面的倾斜而变化在 9.5～12.5m 之间。共计 42 孔,其中隔震孔 23 个,上游预裂孔 19 个,布孔参数及装药方式见表 1。

表 1　布孔及装药参数

Table 1　Parameters for hole pattern and charging

炮孔类型	孔深 / m	孔数 / 个	孔间距 / m	排间距 / m	抵抗线 / m	单响总药量 / kg	每孔药卷数 / 个
上游预裂孔	9.5～12.5	19	0.3	0.2	0.5～0.6	6.0～7.2	4～35
下游预裂孔	5	14	0.3	0.2	1.2	14	15
底部预裂孔	10	26	0.6	-	1.2	9.6	19
第 1 排爆破孔	11.5	11	1.5	1.5	1.6	6.4～8.0	9
第 2 排爆破孔	10.5	10	1.5	1.5	1.4	4.8	6
第 3 排爆破孔	10.5	11	1.5	-	1.2	8	6

①排间距是按照孔口的位置计算的; ②起爆方式均为同段雷管分药包设置。

现场试验起爆按照底部预裂、上游预裂、下游预裂、第 1 排爆破孔、第 2 排爆破孔、第 3 排爆破孔的顺序进行。爆破孔起爆是从爆区远端开始的。为了提高系统传爆的可靠性,采用双路起爆。图 3 给出了在整个爆区内不同时刻和该时刻不同位置起爆的药量分布,从中可以看出,单响的药量一般在 8kg 以下,设计中没有考虑在保留段近区减少一次起爆药量。

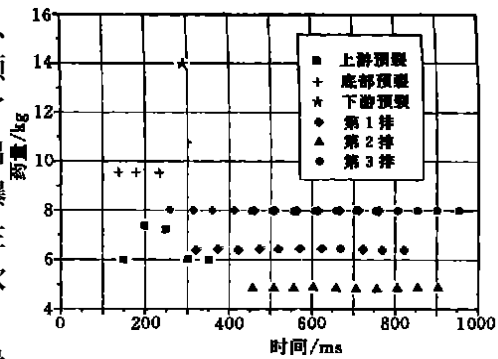

图 3　爆区内起爆药量的时域分布

Fig. 3 Time-space distribution of charges in blasting area

试验中沿导墙中轴线顺序布置测点,分别测量了垂向、径向、切向的振动速度。各个测点距导墙与碾压混凝土围堰分界线的距离见表 2,测点 6 在主坝上,位置较高。

为方便起见,根据测点与爆源的距离,将 6 个测点分为两个区域,测点 1 和 2 为近区,测点 3～6 为远区。

表 2　测点分布

Table 2　Distribution of measuring points

测点号	1	2	3	4	5	6	备注
距离/ m	2	12	32	72	136	136	到分界线的距离
高程/ m	57	57	57	57	57	83	
测向	垂向 径向 切向	垂向 径向 切向	垂向 径向	垂向	垂向 径向	垂向 径向	

4　试验监测结果及分析

4.1　垂直振动速度波形分析

通过对波形的分析我们发现,近区测点振动速度的最大值发生在 400ms 左右,而远区测点振动速度的最大值是在 350ms 左右,图 4 为测点 2 和 4 的振动波形。造成近区测点垂直振动速度峰值滞后的原因,应当是上游预裂爆破带来的效果。事实上,上游预裂爆破距离测点 1

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的水平距离仅有 3m ,由此产生的振动对近区测点的影响尤为明显 ,对远区测点 ,单响起爆药量更大的第 1 排爆破起主导作用。在 400ms 以后 ,各测点的垂直振动速度都明显降低 ,其振动速度比最大振动速度低 66. 6 %～80. 0 % ,且振动速度不随爆炸点和测点之间的距离减少而增加。经分析判断 ,产生这一结果的主要原因是预裂爆破的结果。预裂爆破完成后预裂孔之间形成了裂纹 ,开始时由于这些裂纹较小 ,无论在纵向还是横向 ,还不能起到有效隔振作用 ,因此预裂爆破后的短时间内还有大的振动。经过几次振动后 ,预裂隙扩张 ,隔振作用逐渐明显。

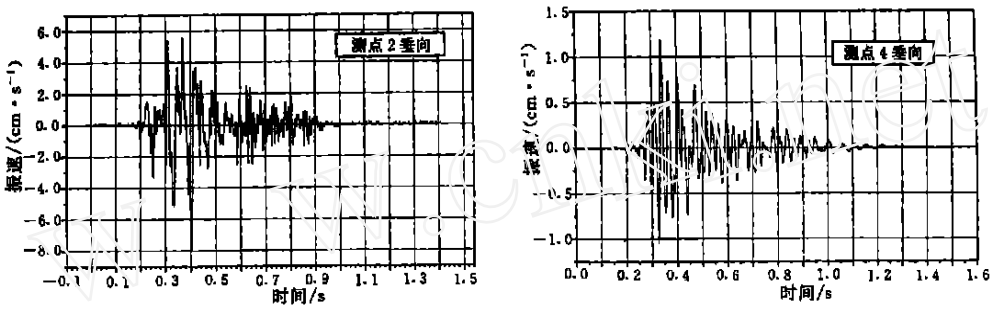

图 4　典型测点垂直振动速度波形图

Fig. 4　Waveforms of vertical vibration velocity at typical measuring points

(1) 开始阶段垂直振动速度衰减规律。不考虑预裂爆破的影响 ,取 350ms 处的最大振动幅值和对应的最大起爆药量 ,分析其衰减规律 ,图 5 所示为最大振动速度拟合曲线。根据第 1 排爆破孔的药包位置和起爆总药量以及试验给出的最大垂直振动速度 ,在对数坐标下拟合振动速度随比例距离变化的直线 ,其经验公式为:

$$v = 1023(R/Q^{1/3})^{-1.99} \qquad (1)$$

其中: v 为振动速度 ,cm/ s; Q 为药量 ,kg; R 为爆源至测点的距离 ,m。与二期围堰碾压混凝土中爆破的衰减规律相比较[2]:

$$v = 742(R/Q^{1/3})^{-1.9} \qquad (2)$$

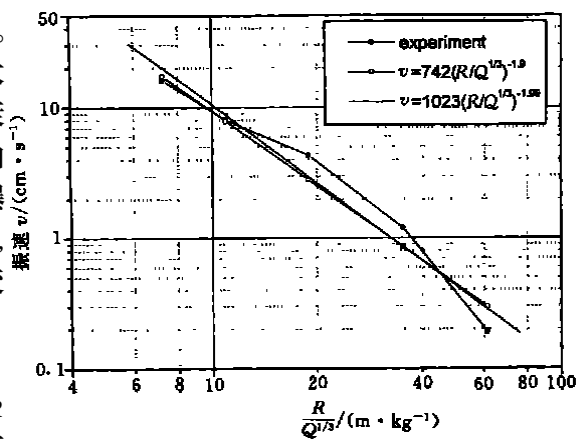

图 5　350ms 最大垂直速度衰减规律

Fig. 5 Attenuation law of peak vertical vibration velocity at 350ms

受数据拟合的影响 ,尽管两个公式中系数(K) 和指数(α) 看起来有些差异 ,但是速度值非常接近 ,爆后开始阶段的振动基本上和横向围堰的衰减规律是相同的 ,因此可以认为爆破预裂缝形成初期对振动衰减规律的影响不大。

(2) 400ms 后垂直振动速度衰减规律。图 6 给出了 400ms 以后振动速度衰减规律 ,400ms 后的振动幅值基本上是相同的 ,而爆点到测点的距离是变化的。为了描述这一特点 ,图中根据最远和最近距离分别给出了(F) 和(D) 两条曲线。可以看出 ,对数坐标下的衰减规律不再是直线 ,近测点的幅值明显减小。事实上 ,预裂缝的深度为 14m ,第 1 和第 2 测点到裂缝的距离均小于该距离 ,爆破波不能直接穿过预裂缝 ,近区测点受到预裂缝的影响就会比较大 ,振动速度相对比较低。

(3) 经验公式计算最大速度与波形的比较。利用公式(2) ,将所有炮孔按照单响药量计算

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

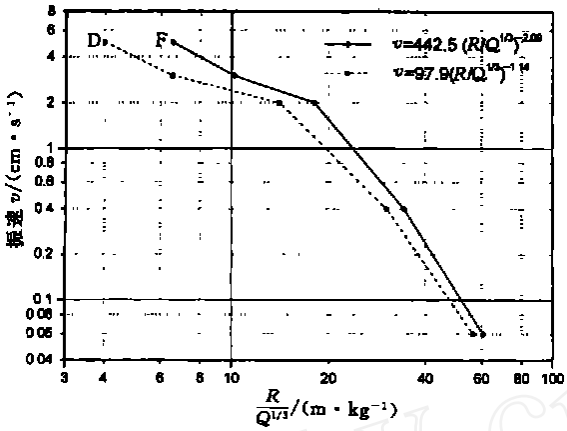

图 6　400ms 后最大垂直速度衰减规律

Fig. 6　Attenuation law of peak vertical vibration velocity after 400ms

得到的最大振动速度与测量的振动速度波形相比较,见图 7。可以发现,除最大速度与经验公式计算的结果相接近外,振动速度的峰值在 400ms 后大部分低于计算结果。这就表明,在有预裂缝的情况下,波的传播规律有很大的不同。预裂缝的隔振效果是非常明显的,尤其是在近区,经验公式给出的最大振动值与波形的幅值相差几倍。

4.2　径向振动速度波形分析

对于径向振动无论测点的距离远近,在 350ms 处的振动速度达到最大,见图 8。比较药包的起爆时间可以判断,产生如此大幅度径向振动的原因主要是接近同时起爆的下游预裂孔(14kg,280ms)、上游预裂孔

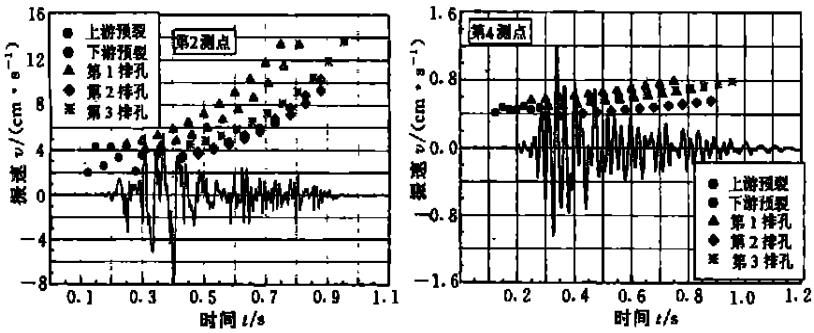

图 7　最大振速计算值与实测值之比较

Fig. 7　Comparison between calculated and measured values of peak vibration velocity

(6kg,300ms)和第 1 排炮孔(8kg,310ms)叠加的结果。下游预裂孔所有药包均匀布置在同一个平面内同时起爆,产生平面波的效果,因此,它对径向的振动影响最大。

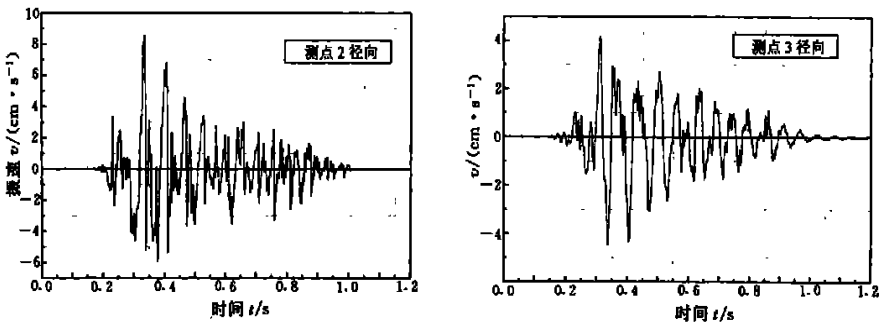

图 8　2、3 测点的径向振速波形图

Fig. 8　Waveforms of radial vibration velocity of measuring points No 2 and 3

4.3　条形间断装药分药包起爆方式对振动速度的影响

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

条形间断装药分药包起爆方式可以充分利用雷管分段延时技术,隔离爆破振动的峰值,由于单个药包引起的碾压混凝土结构的振动持续时间较短,这一技术在试验中得到了很好的实现。试验中在底部预裂孔爆炸到前排爆破孔起爆之前的时间内这一现象表现得尤为明显,其间第 1、2 测点的垂直振动速度在 4～8cm/ s 范围,与第 1 排爆破孔产生的振动速度接近,而其它各测点的速度相对更小,然而 3 次底部预裂爆破的单响起爆药量 9.6kg 均比第 1 排爆破孔的药量还要大。经分析判断,底部预裂孔爆破由于药包分散、采用了不耦合装药以及分药包设置雷管分段延时的起爆方法,对减小爆破振动效果明显。该结论对爆破设计尤其重要。

4.4　振动主频

对试验测量的波形进行频谱分析可知,围堰上各个测点均有 15Hz 振动主频,随着距离的增加,出现一个 30～45Hz 的振动,见图 9。目前我们尚不能确定各个频率产生的原因,简单的分析是:同排孔与孔之间的延时为 50ms,药包起爆频率为 20Hz(接近 15Hz),而考虑排间的延时为 25ms,则排间药包的起爆频率为 40Hz(与 30～35Hz 之间的主频接近)。

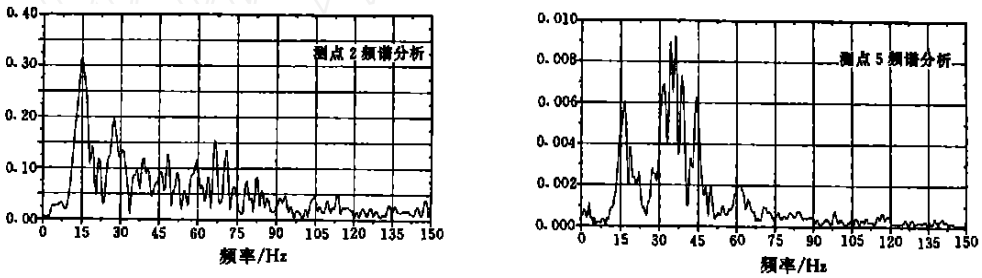

图 9　2、5 测点振速频谱图

Fig. 9　Frequency spectrums of vibration velocity of measuring points No 2 and 5

4.5　高度对振动的影响

测点 5 和测点 6 到爆区的距离相同,只是高程不同,比较波形可以看出,坝顶的振动没有“台阶”现象,也就是说预裂缝的影响较小一些; 垂直振动速度大约是坝底的 1.2 倍,径向振动速度约是坝底的 1.5 倍,见图 10; 坝顶的大振幅振动主频约为 15Hz。

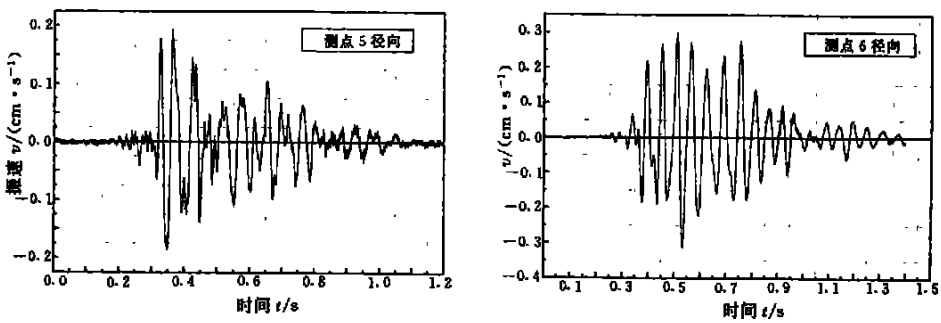

图 10　5、6 测点径向振速波形对比

Fig. 10　Comparison between waveforms of radial vibration velocity of measuring points No5 and 6

4.6　高频成分对振速峰值的影响

通过滤波将 150Hz 以上的频率成分滤掉,其对振动速度峰值影响不大,见图 11。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

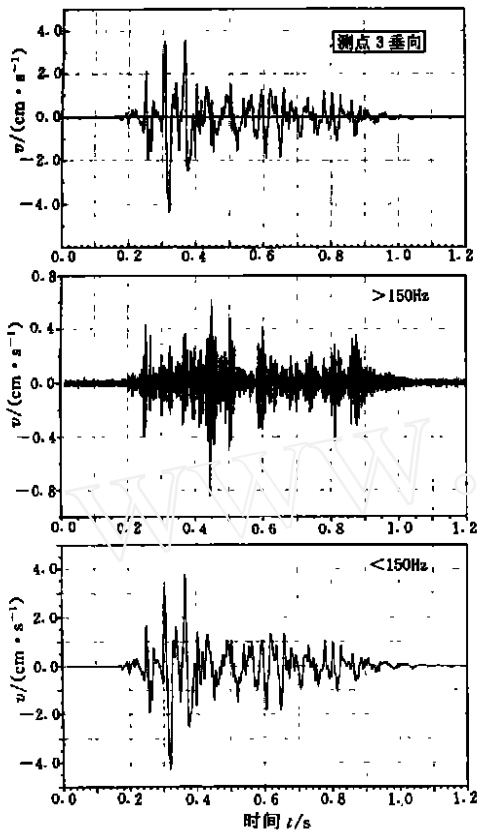

图 11　振动波形中的高频与低频分解

Fig. 11 High and low frequencies separated from a vibration wave

5 结 论

在高坝洲水利枢纽碾压混凝土纵向围堰倾倒翻转拆除现场试验中,进行了爆破震动实测。通过对振动波形的分析,阐述了预裂缝、条形间断装药分药包起爆、利用雷管延时隔离振动峰值等减震措施的有效性。通过试验中的监测,可以得到如下结论:

(1) 采用翻转的爆破方案拆除碾压混凝土围堰,选择合理的布药方案和起爆方式可以确保相接堰体的振动安全。单响药量 8kg 时,保留堰体端部的最大振动速度峰值不超过 15cm/ s。

(2) 碾压混凝土中爆破产生的振动有其自身的特点,主要表现在单响药包产生的振动持续时间较短,从起振到振动结束,持续时间大约在数十毫秒,其中可能对建筑物产生破坏的较大速度值的持续时间则更小。

(3) 利用雷管延时技术,在不降低爆破效果的前提下,使各段起爆引发的振动峰值错开,从而达到降低爆破振动的效果。这一方案在试验中证明是有效的。

(4) 预裂爆破产生的预裂缝对连续爆破具有明显的隔振效果。

参考文献:

[1] 刘以钢,李世海. 碾压混凝土纵向围堰拆除倾倒翻转方案现场试验研究[J]. 爆破器材,2001,30(1):21 - 26.

[2] 方　正,李世海,等. 水中爆炸气泡脉动周期的试验研究[J]. 工程爆破,2001,7(2):29 - 33.

(上接第 50 页)

(3) 施工中,在 2、3 层楼的承重柱、梁上以跳跃隔段方式布孔既能保证爆破切口的形成,也可减少钻孔量。布药时,应大小药量相结合,对于同种规格、材质的柱或墙,底层和墙角需大药量,使墙、柱炸散,而上部只要求使混凝土疏松,可用小药量。

(4) 前排柱爆高过大易产生后坐或偏移,而后排柱爆高过小易出现倒塌不彻底的现象。

参考文献:

[1] 刘清荣. 控制爆破[M]. 武汉:华中工学院出版社,1986.

[2] 刘殿中. 工程爆破实用手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1999.

[3] 李守巨. 拆除爆破中的安全防护技术[J]. 工程爆破,1995,1(1):71 - 75.

[4] 刘湘波,刘学强. 电容式发爆器起爆能力评估[J]. 西部探矿工程,2001,13(1):92 - 93.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net