

# 由邻近爆炸引起的岩洞振动规律\*

杨昇田 丁兆奎 龚振鹏 杨连弟

(1982年9月13日收到)

本文对一个有空腔耦合的爆炸多次试验结果进行了总结。重点叙述了地下岩洞运动参数(加速度、速度、位移)的衰减规律及沿空腔断面分布特征。给出了可供工程应用参考的衰减指数。

## 一、前言

爆炸引起地下岩洞的振动无疑是一个具有明显实际意义的课题,由于地下岩洞的特殊用途,近年来特别注意观察它在爆炸荷载作用下的变形、破坏现象和应力状态,特别是它的振动规律,研究它的抗冲击性。而作为岩石力学领域,对这一问题的研究恰是根据所给定的荷载、应力以及岩石的强度,对它进行科学分析得出正确的设计,并对岩洞给以安全评价。岩洞振动规律的观测不仅是研究武器效应,也是研究爆炸冲击波传播规律的重要手段。因此关于这一问题的研究对于防护工程,爆炸的力学效应以及其它工程方面的研究起着重要作用。本文给出一个爆炸近区试验结果,作为该问题研究的一个参考依据。文中所述均为 $\rho \geq 0.2$ 这一范围的有关数据及规律,而这一区域的现场数据近年来很少见。

## 二、试验概述

在某试验场区进行了由吨级到百吨级的五次 TNT 浅埋爆破试验,对临近的地下岩洞进行了现场观测。岩洞的平面布置见图1。各次试验情况基本相同。岩洞分为爆炸洞和观测洞两种,利用自然的山体条件,各岩洞处于同一水平高程,各岩洞均为直墙拱顶。

爆炸洞内放置条形装药作为爆源,洞的长跨比通常在10左右,且有空腔耦合,瞬息同时起爆,一般误差在2~3毫秒左右。洞口敞开,有一定的能量逸出。爆源条件见表1。

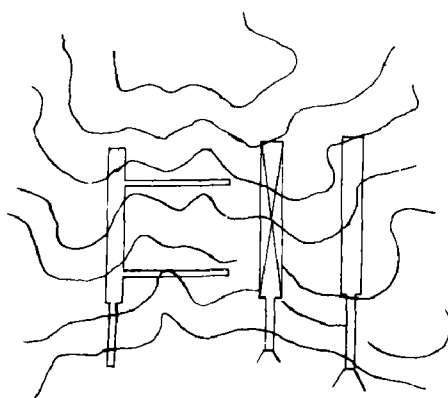


图 1

\* 参加试验工作的还有第五研究室和其他研究室的同志。



表 1

试 验 编 号		01	04	05	06	07
模 型 比 例		1 : 4	1 . 3	1 : 2	1 : 1.5	1 : 1
药 量 (吨)		7.81	18.52	62.8	148.8	500
装药耦合系数		2.11	2.10	2.11	2.12	2.11
装药尺寸	长(米)	17.5	21.3	32.0	42.7	64.0
	宽(米)	1.4	1.9	2.9	3.8	5.7

观测试验洞分为两种,一是与爆炸洞平行,主要是作为动力反应,断面特征及安全范围的试验用;另一种是垂直于爆炸洞,主要是观测各种参数的衰减规律及破坏分区。前一种岩石走向与爆炸压缩波传播方向垂直,后一种与传播方向一致。所有主岩洞的复盖层厚度一般都大于三倍岩洞的跨度。在这两种岩洞内都佈设了测点。在各次试验中为同一试验的岩洞尺寸基本相同,只有06-2~06-3之间的横洞例外。一般与爆炸洞垂直的观测洞尺寸为:墙高1.8米,跨度3.0米,矢高1.2米。与爆炸洞平行的尺寸为:墙高2.8米,跨度9.6米,矢高2.95米。

山体为燕山中期中粗粒似斑状花岗岩,岩性单一。各次试验岩洞所在部位的岩体风化程度、节理发育情况都有一定的差异。围岩内有走向不同的泥质夹层及小的破碎带,有时有硬质夹心,但均呈刚性接触,围岩尚稳定。岩石的力学参数见表2(五机部五院勘测公司提供)。

表 2

抗压强度	极 限 抗 压 强 度		其 他 物 理 力 学 特 征				
(公斤/厘米 <sup>2</sup> )	饱 和 (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	干 燥 (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	杨氏模量 (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	泊桑比	抗 剪 特 性		比 重 (吨/米 <sup>3</sup> )
					凝聚力C值 (公斤/厘米 <sup>2</sup> )	内摩擦角 $\phi^\circ$	
23	958	962	$1.4 \times 10^5$	0.30	162	41° 6'	2.65

加速度的测量用压电式拾振器,配以阻抗变换。速度及位移采用702型拾振器,配以GZ2型放大器。所有的记录系统均采用SC-11及SC-16。

### 三、运动参数的衰减规律

考虑到该种爆炸形式能量分布的方向性,将数据根据不同区域分别整理。

#### 1. 加速度

在垂直于爆炸洞的观测洞内底板垂向加速度峰值的衰减规律为

$$a_r = 33.56 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{3.01} (g) \quad 0.41 \leq \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} = \rho \leq 3.05 \quad (1)$$



$\gamma = 0.9654$ ——相关系数,  $s = 0.0293$ ——剩余标准差

以上是利用装药当量 $Q$ 的三次方根整理,若采用 $Q$ 的平方根对该五次结果进行整理时得到

$$a_r = 0.181 \left( \frac{\sqrt{Q}}{R} \right)^{2.83} \quad 2.62 < \frac{\sqrt{Q}}{R} < 20.04 \quad (1')$$

$\gamma = 0.8837$ ,  $s = 0.09855$

这是总结了五次试验, 23个数据的综合结果。衰减曲线见图 2a、图 2b。

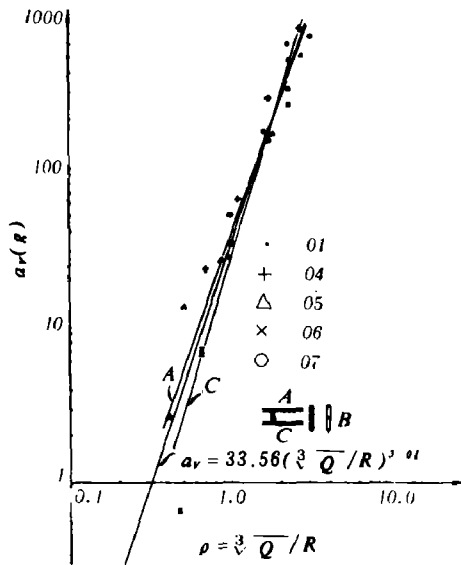


图 2a  $a_r$ —— $\rho$  曲线 ( $0.41 < \rho < 3.05$ )

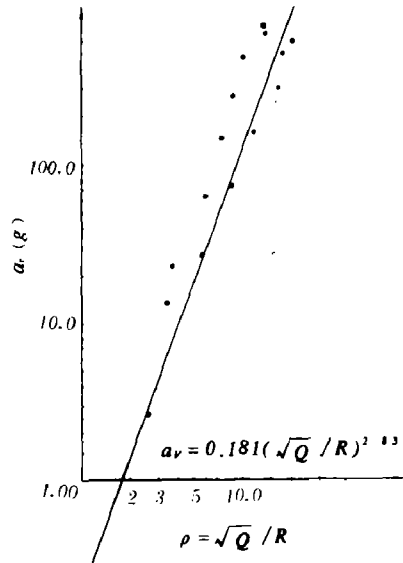


图 2b  $a_r$ —— $\rho$  曲线 ( $2.6 < \rho < 20.04$ )

如果分别整理各次试验结果,用 $k$ 及 $\alpha$ 分别表示 $(\sqrt[3]{Q}/R)$ 的系数及衰减指数,其比较见表 3。

底板径向加速度峰值衰减规律为

$$a_r = 51.17 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.39} \quad 0.87 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 2.26 \quad (2)$$

垂向和径向的峰值加速度比如表 4。

表 3

试 验 序 号	$K$	$\alpha$
01	50.12	2.39
04	60.67	2.65
05	30.89	2.49
06	19.86	3.77
07	28.10	3.74
综 合 结 果	33.56	3.01

表 4

测 点 序 号	$a_r / a_v$
01-2-2	1.2
04-2-3	0.55
05-3-5	0.95
05-3-4	0.86
06-3-2	0.59
平 均	0.83

靠近爆炸洞尾部的岩洞底板垂向加速度峰值衰减规律为

$$a_r = 34.84 \left( \sqrt[3]{Q}/R \right)^{3.02} \quad 0.41 < \sqrt[3]{Q}/R < 2.72 \quad (3)$$



$$\gamma = 0.9488, s = 0.04537$$

$$a_r = 0.164 \left( \frac{\sqrt{Q}}{R} \right)^{2.89} \quad 2.62 < \frac{\sqrt{Q}}{R} < 17.49 \quad (3')$$

$$\gamma = 0.8851, s = 0.1018$$

靠近爆炸洞出口端的岩洞底板垂向加速度峰值衰减规律为

$$a_r = 28.55 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{3.29} \quad 0.66 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 2.25 \quad (4)$$

$$\gamma = 0.9838, s = 0.0146$$

$$a_r = 0.0415 \left( \frac{\sqrt{Q}}{R} \right)^{3.26} \quad 4.82 < \frac{\sqrt{Q}}{R} < 20.04 \quad (4')$$

$$\gamma = 0.9927, s = 0.00659$$

与爆炸洞平行的横洞底板垂向、径向、切向峰值加速度衰减规律分别为

$$a_r = 46.78 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.03} \quad 0.33 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 0.99 \quad (5)$$

$$\gamma = 0.8465, s = 0.0895$$

$$a_r = 17.89 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.79} \quad 0.51 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 1.32 \quad (6)$$

$$\gamma = 0.8092, s = 0.06785$$

$$a_r = 15.11 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.98} \quad 0.51 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 1.32 \quad (7)$$

$$\gamma = 0.919, s = 0.0387$$

横洞底板三方向分量的比值关系如表5。

表 5

测点序号	$a_r / a_r$	$a_r / a_r$
05-4 断面	1.33	2.37
4-4 断面	0.64	0.84
05-2 断面	2.37	2.49
1-1 断面	1.48	1.29
06-10-1	1.455	1.748
06-11-1		
平均		



上述各点基本上给出了各不同位置的加速度峰值衰减规律。

## 2. 速度

到目前为止, 对速度拾振器的标定表明, 一般在 300 厘米/秒以下范围, 线性度是很好的。现将垂直于爆炸洞的观测洞底板垂向速度的衰减规律表示如下, 若不考虑大于 300 厘米/秒的测点

$$v_r = 101.7 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.777} \quad 0.48 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 1.7 \quad (8)$$

$$\gamma = 0.8166, s = 0.0783$$

如果考虑到大于 300 厘米/秒的测点, 其中最大值可达 964 厘米/秒, 整理结果如下(见图 3)

$$v_r = 111.2 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.07} \quad 0.48 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 2.26 \quad (9)$$

$$\gamma = 0.8902, s = 0.0599$$

$$v_r = 11.3 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.39} \quad 3.51 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 14.56 \quad (9')$$

$$\gamma = 0.6003, s = 0.2182$$

计入全部数据, 与各次试验  $(\sqrt[3]{Q}/R)$  的系数及衰减指数比较见表 6。

与爆炸洞平行的观测横洞其垂向底板速度衰减规律为

$$v_r = 88.77 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.846} \quad 0.99 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 1.32 \quad (10)$$

$$\gamma = 0.9977, s = 0.0014$$

径向为

$$v_r = 296.3 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.192} \quad 0.51 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 1.32 \quad (11)$$

$$\gamma = 0.9742, s = 0.0176$$

切向为

$$v_r = 176.2 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.594} \quad 0.66 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 1.32 \quad (11')$$

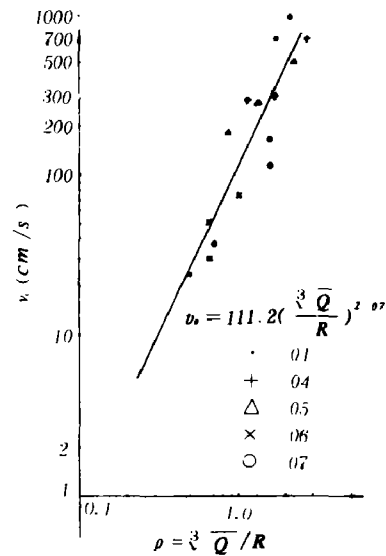


图 3  $v_r$  —  $\rho$  曲线  
( $0.48 < \rho < 2.26$ )



$$\gamma = 1, S = 0$$

两个方向的峰值见表7。

表 6

试 验 序 号	k	$\alpha$
01	317.1	0.987
04	212.9	1.120
05	211.6	1.060
06	54.86	0.95
07	63.86	1.584
综 合 结 果	111.2	2.07

表 7

试 验 序 号	$v_r/v_r$
05-2 1-1 断面	0.64
06-10-1	0.31
06-11-1	0.35
07-10-1	1.57
平 均	0.72

### 3. 位 移

沿垂直于爆炸洞的观测洞垂向位移峰值衰减规律，计入所有测点。

$$d_v = 2.016 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.42} \quad 0.7 \leq \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \leq 3.05 \quad (12)$$

$$\gamma = 0.9372, S = 0.0243$$

$$d_v = 0.302 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.47}$$

$$3.62 \leq \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \leq 20.04$$

$$\gamma = 0.6211,$$

$$S = 0.1468$$

这里反应的规律主要是靠近爆炸洞底部时的情况

(见图4)。与各次试验比较如表8。

该观测洞底板径向位移的峰值衰减规律为

$$d_r = 0.6417 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.124}$$

$$0.87 \leq \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \leq 2.26 \quad (13)$$

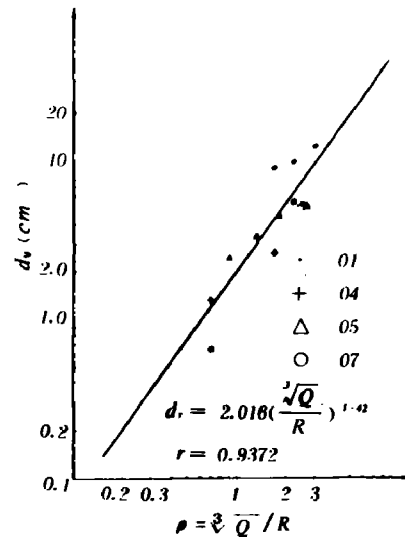
$$\gamma = 0.9983, S = 0.003328$$

两方向分量的比值如表9。

与爆炸洞平行的观测横洞底板垂直位移的峰值衰减规律为

$$d_v = 2.60 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.604}$$

$$0.66 \leq \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \leq 0.99 \quad (14)$$

图4  $d_v - \rho$  曲线

( $0.7 \leq \rho \leq 3.05$ )



表 8

试 验 序 号	K	$\alpha$
01	7.031	0.521
04	1.811	0.854
05	2.772	0.649
综 合 结 果	2.016	1.415

表 9

试 验 序 号	$d_r / d_t$
01-2-2	2.7
04-2-3	0.5
05-3-5	5
05-3-4	3.1
平 均	2.8

$$\gamma = 0.604, s = 0.1520$$

径向衰减规律为

$$d_r = 2.547 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.7811} \quad 0.51 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 1.32 \quad (15)$$

$$\gamma = 0.8298, s = 0.110$$

切向为

$$d_t = 1.894 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.556} \quad 0.51 < \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} < 1.32 \quad (15')$$

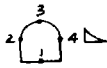
$$\gamma = 0.9317, s = 0.0344$$

以上各衰减规律的经验公式中:  $a$  是质点加速度, 单位为  $g$ ;  $v$  是质点速度, 单位为厘米/秒,  $d$  是位移, 单位为厘米;  $R$  是爆心距, 单位为米;  $Q$  是装药量, 单位为公斤。

#### 四、断面特征

速度的断面分布特征见表10。加速度垂向峰值分布、径向峰值分布及两方向比值分布见图5。

表 10

试验序号	$v_{y1} / v_{x1}$	$v_{y2} / v_{x2}$	$v_r / v_t$				备 注
			1	2	3	4	
07-10	1.05	1.27	1.57	0.56	0.79	0.75	
06-10		2.5					



## 一、讨 论

1. 上述经验公式主要适用于爆炸近区的地下岩洞。对于与爆心相垂直的岩洞, 作为一般规律, 可应用公式 (1), (8), (12) 给出各运动参数的垂直分量分布。公式 (2), (13) 分别给出径向加速度及位移的分布。该公式还可推广到相类似的爆源时相类似的岩洞的情况。

2. 如果考虑到岩洞是靠近爆源的底部, 可用公式 (3), (12)。如果考虑的岩洞是靠近爆炸洞的头部, 可用公式 (4)。

3. 在工程中常见的岩洞是与爆炸洞平行, 这时可用公式 (5), (6), (7), (10), (11), (11'), (14), (15), (15')。分别给出的是垂向、径向、切向各运动参数峰值量。

4. 表 3 表明, 加速度各次试验的衰减指数随药量的增加有增大的趋势。在垂直于爆源的岩洞内其两方向分量的比值由表 4 可

看出有垂向分量小于径向的趋势, 这时岩洞的走向与爆炸压缩波的传播方向一致。而在与爆炸洞平行的横洞内却相反, 见表 5, 有垂向大于径向的趋势, 这时岩洞的走向垂直于爆炸压缩波的传播方向, 但相差数量不大。由表 5 还可看出在该洞内, 切向分量为最小。

5. 速度由表 6 可看出, 各序号的试验其衰减指数随药量的变化无明显的改变。表 8 表明位移也有类似情况。

位移在垂直于爆炸洞的观测洞内, 其两个方向分量之比见表 9, 垂向位移大于径向位移。

6. 与爆炸洞平行的横洞断面特征, 由图 5 可见, 垂向和径向两个分量都是迎爆的一面大于背爆的一面。相差一倍左右。拱顶和底板相比, 其径向有拱顶大于底板的趋势, 而垂向却不明显。

对于速度, 拱顶和迎爆一面都分别大于底板和背爆一面。

对于加速度的两个分量比值, 一般底板偏大。

由于断面数据较少, 且离散, 上述仅作参考。

7. 国外大量地下核试验, 一般径向加速度其衰减指数在 3.16 左右, 速度在 1.79 左右, 位移在 0.75~1.75 之间。与本试验相比, 一般本试验结果低于核爆结果。

8. 与文献 [1] 列表化爆相比 ( $a$  在 1.373~2.8 之间), 无论哪种爆破方式, 测量位置, 本文结果与该表大多数数据比较接近。

9. 与地表相比, 各单次试验中岩洞的衰减指数偏低, 但总的趋势高于地表值, 一般的地表值都远离爆源。

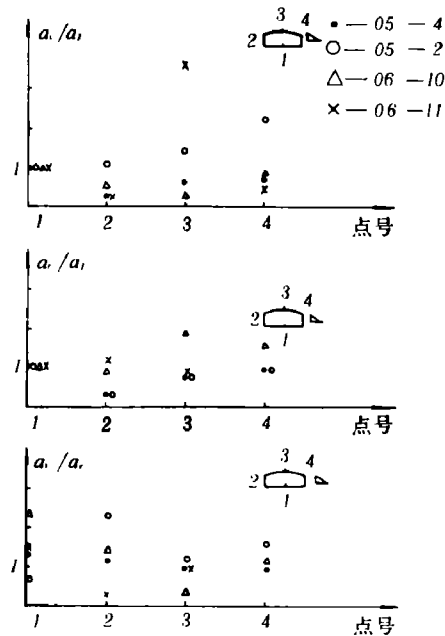


图 5



10. 分别以 $\sqrt{Q}/R$ 与 $\sqrt[3]{Q}/R$ 为比例距离整理数据结果表明, $\sqrt[3]{Q}/R$ 要比 $\sqrt{Q}/R$ 误差小。

11.  $a \sim \rho$ 图可以看出,在一定 $\rho$ 范围内,对于确定的 $\rho$ ,靠近尾部的岩洞A的垂直振动加速度大于C,而在另一范围内则相反。

12. 关于与爆炸洞平行的横洞的规律因为数据较少,还有待于进一步研究。

13. 爆炸效应是个很复杂的现象,受到各种因素的制约。所得到的这些上述现场实测数据,除受仪器本身精度的影响外,还受其它许多因素的影响,诸如水文、地质、地形,但归根结底是受岩体力学性质的影响。对于岩洞,还要受到结构形状的影响。因为本文主要是讨论岩洞的振动规律,所有数据都来自岩洞内测点,受地形影响不大,主要受岩体性质控制。因此上述的实测数据与岩体性质有紧密的关系,也就是说,所提供的数据又可作为研究岩体性质时参考。

14. 由表11比较各次试验的频率情况可以看出,在该范围内频率无明显变化。

15. A洞和C洞相应位置加速度的比,尾部洞有偏大的趋势,而横洞有大于A及C洞的可能,见图7。

16. 上述试验其爆炸形式既非球形,也不是条形,是介于二者之间偏于球形爆炸。如果把经验公式表成

$$a(v, d) = k Q^{\beta} R^{-\alpha}$$

那么对于上述相同数据处理结果见表12。

表 11

力学量 频率 试验 序号	加速度	速度	位移
01	300	95	47
04	300	10-20	2-9
05	200	16-60	16
06	75-300		
07	300		

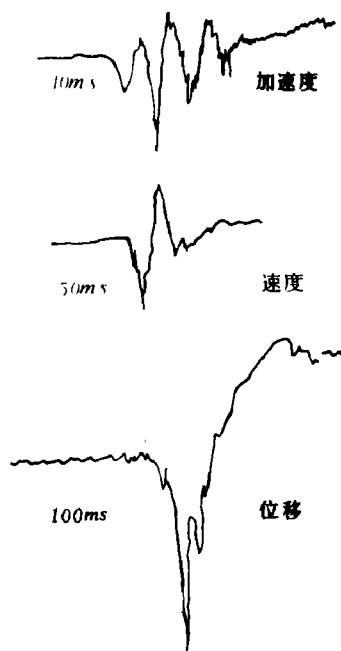


图 6

图6是各量实测波形图。作用时间一般在100-150ms。

表 12

	$k$	$\beta$	$\alpha$
加 速 度	65.81	0.933	2.9808
速度(总数据)	65.32	0.1711	1.851
速度(分数据)	70.17	0.1861	1.6372
位 移	14.42	0.279	1.2476

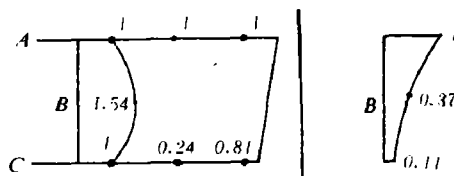


图 7



参 考 文 献

- 〔1〕朱瑞康, 李 铮, 地下工程, No. 4 (1981), 26—33.

**VIBRATION LAWS OF CAVITY IN ROCK  
SUBJECTED TO ADJACENT BLASTING**

Yang Shengtian      Ding Zhaokui

Gong Zhenpeng      Yang Liandi

**Abstract**

This paper presents the results of blasting tests with cavity coupling, discusses the attenuation laws and cross characteristics of motion parameters of the cavity (acceleration, velocity and displacement). The attenuation exponents for engineering purposes are given.