

弹性波法在岩土爆破工程中的应用

黄承贤

(1983年4月7日收到)

本文概述了作者多年来将弹性波法应用于岩土爆破工程的工作实践。主要介绍试验方法和根据围岩不同的声学特性,选用的不同计算方法,计算围岩的动弹性常数和实例以及围岩加固处理效果的检测办法。给出了围岩的波阻抗分类和应力波参量衰减指数与岩体波阻抗的依赖关系;给出了岩体和坑道破坏分区的定量判据——爆前爆后围岩纵波波速变化百分比。实践证明:弹性波法对岩土爆破工程的爆破效应和破坏机理的研究是一种很重要的、快速、简便、准确的手段,直接影响到岩土爆破的安全和经济效益,有广阔的应用前景!

前 言

岩体弹性波法根据测量系统的工作频率不同,通常分为三种方法,即地震法、声波法、超声波法。地震法适宜于测试几米、几十米甚至更大范围岩体和松散介质的平均物性;声波法适于在较完整岩体的局部部位进行探测;超声波法适于在室内对岩石试件或模型的测试⁽¹⁾。这三种方法在工程岩体研究中,形成了一套完整的测试技术。多年来,我们将岩体弹性波技术用于岩土爆破工程的试验研究中,本文仅就它在这方面的应用作扼要介绍。

一、围岩动弹性常数的确定

岩土爆破工程是指人们用炸药包爆破岩土介质,从而达到一定工程目的的爆破。影响爆破作用和效果的因素很多,主要的影响因素为地质条件(其中包括岩石的物理力学特性)和爆源条件。通常用岩体(岩石)的弹性波速、密度和动弹性常数等参数表征岩体(岩石)的力学特性。因此对岩土介质的力学特性做出正确的评价,对指导爆破设计和施工;对研究爆炸应力波在岩土中传播和衰减规律及破坏机理;对评价岩土工程的动力稳定问题等抗震、抗爆工程课题的研究具有十分重要的意义,是直接关系到岩土爆破的安全和经济效益的大问题。

在岩土受到的山岩压力、残余应力及外界荷载不超过其弹性极限时,可以认为岩土为各向异性的弹性体。影响岩土各向异性的因素是:(1)组成岩土的矿物成份的不均匀性及矿物颗粒的定向排列;(2)地质构造空间组合关系及发育程度;(3)岩土中孔隙及其不均匀性;(4)岩体风化的不均匀性;(5)地应力或残余应力的方向性等等。将所测量的三个正交方向的纵波波速与其平均值之比定义为各向异性系数。尽管影响岩土各向异性的因素很多,但前二者起主导作用。而且岩土往往存在着轴向或面的对称,可视岩土介质为准各向同性体,或

横向各向同性体或正交各向异性体。

1. 正交各向异性体动弹性常数的确定:

正交各向异性体弹性性质存在轴向对称性, 则各向异性体广义虎克定律独立的弹性系数仅 9 个。9 个弹性系数与其弹性波速存在如下关系式 (注: 取 x, y, z 轴与岩体的弹性对称轴一致):

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{11} = \rho V_{x,p}^2, \quad C_{22} = \rho V_{y,p}^2, \quad C_{33} = \rho V_{z,p}^2 \\ C_{66} = \rho V_{x,t}^2, \quad C_{44} = \rho V_{y,t}^2, \quad C_{55} = \rho V_{z,t}^2 \\ C_{12} = \rho \left[\sqrt{\left(\frac{4V_{x,45^\circ,p}^2 - 2V_{x,t}^2 - V_{x,p}^2 - V_{y,p}^2}{2} \right)^2 - \left(\frac{V_{x,p}^2 - V_{y,p}^2}{2} \right)^2} - V_{x,t}^2 \right] \\ C_{13} = \rho \left[\sqrt{\left(\frac{4V_{y,45^\circ,p}^2 - 2V_{y,t}^2 - V_{x,p}^2 - V_{z,p}^2}{2} \right)^2 - \left(\frac{V_{x,p}^2 - V_{z,p}^2}{2} \right)^2} - V_{y,t}^2 \right] \\ C_{23} = \rho \left[\sqrt{\left(\frac{4V_{z,45^\circ,p}^2 - 2V_{z,t}^2 - V_{y,p}^2 - V_{z,p}^2}{2} \right)^2 - \left(\frac{V_{y,p}^2 - V_{z,p}^2}{2} \right)^2} - V_{z,t}^2 \right] \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: $V_{x,p}, V_{y,p}, V_{z,p}$ 为在 x, y, z 轴方向传播的纵波波速; $V_{x,t}, V_{y,t}, V_{z,t}$ 为在 x, y, z 轴方向传播的横波波速; $V_{x,45^\circ,p}, V_{y,45^\circ,p}, V_{z,45^\circ,p}$ 为在与 x, y, z 轴成 45° 斜交方向传播的纵波波速; ρ 为岩石的密度。正交各向异性体的动弹性常数确定式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{12} = \frac{C_{12}C_{33} - C_{13}C_{23}}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2}, \quad v_{21} = \frac{C_{12}C_{33} - C_{13}C_{23}}{C_{22}C_{33} - C_{23}^2}, \quad v_{13} = \frac{C_{13}C_{22} - C_{12}C_{23}}{C_{11}C_{22} - C_{12}^2} \\ v_{31} = \frac{C_{22}C_{13} - C_{12}C_{23}}{C_{22}C_{33} - C_{23}^2}, \quad v_{23} = \frac{C_{11}C_{23} - C_{12}C_{13}}{C_{11}C_{22} - C_{12}^2}, \quad v_{32} = \frac{C_{11}C_{23} - C_{12}C_{13}}{C_{11}C_{33} - C_{13}^2} \\ E_1 = C_{11} - C_{12}v_{21} - C_{13}v_{31}, \quad E_2 = C_{22} - C_{12}v_{12} - C_{23}v_{32} \\ E_3 = C_{33} - C_{13}v_{13} - C_{23}v_{23} \\ G_{12} = C_{66}, \quad G_{13} = C_{55}, \quad G_{23} = C_{44} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: v_{mn} 为 m 方向的应力在 n 方向的应变效应; E_1, E_2, E_3 为 x, y, z 轴方向的纵向弹性常数; G_{12}, G_{13}, G_{23} 为 xy, zx, yz 之间的剪切系数。

2. 横向各向同性体动弹性常数的确定:

横向各向同性体的弹性性质存在一个面及垂直该面的轴向对称性, 则各向异性体广义虎克定律中含有 6 个弹性系数, 但独立的弹性系数仅 5 个。因为 6 个弹性系数与其弹性波速存在如下关系式 (注: 取 yoz 面为各向同性面, x 轴垂直各向同性面):

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{11} = \rho V_{x,p}^2, \quad C_{33} = \rho V_{z,p}^2, \quad C_{22} = \rho V_{y,p}^2, \quad C_{44} = \rho V_{y,t}^2 \\ C_{23} = \rho V_{z,t}^2 - 2\rho V_{x,t}^2 \\ C_{12} = \rho \left[\sqrt{\left(\frac{4V_{45^\circ,p}^2 - V_{x,p}^2 - 2V_{z,t}^2 - V_{z,p}^2}{2} \right)^2 - \left(\frac{V_{x,p}^2 - V_{z,p}^2}{2} \right)^2} - V_{x,t}^2 \right] \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: $V_{\perp p}$ 为垂直各向同性面方向纵波波速; $V_{\perp s}$ 为垂直各向同性面方向横波波速; $V_{\parallel p}$ 为在各向同性面内纵波波速; $V_{\parallel s}$ 为在各向同性面内横波波速; $V_{45^\circ p}$ 为与各向同性面相交成 45° 方向的纵波波速。所以横向各向同性体的动弹性常数确定式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} G' = C_{33}, \quad G = C_{44} \\ \nu' = \frac{C_{12}}{C_{22} + C_{33}}, \quad \nu = \frac{C_{12}^2 - C_{11}C_{23}}{C_{12}^2 - C_{11}C_{22}} \\ E' = C_{11} - 2C_{12}\nu', \quad E = 2C_{44}(1 + \nu) \end{array} \right. \quad (4)$$

式中: E 为平行各向同性面方向的弹性模量; E' 为垂直各向同性面方向的弹性模量; ν 为平行各向同性面方向的应变在垂直各向同性面方向的应变效应; ν' 为垂直各向同性面方向的应变在平行各向同性面方向的应变效应; G 为各向同性面内任意方向间夹角变化的剪切模量; G' 为各向同性面内的任意方向与垂直在此平面方向之间夹角的变化的剪切模量。

3. 各向同性体动弹性常数的确定:

各向同性体是在任意方向上介质的弹性性质相同, 它是横向各向同性体的一种特例和简单的情况, 独立的弹性系数只有两个, 即:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{11} = C_{22} = \rho V_p^2 \\ C_{44} = C_{33} = \rho V_s^2 = G \text{ (动剪切模量)} \\ C_{12} = C_{23} = \rho (V_p^2 - 2V_s^2) = \lambda \text{ (拉梅常数)} \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: V_p 为各向同性体纵波波速; V_s 为各向同性体横波波速。将式(5)代入式(4)得各向同性体的动弹性常数计算式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{动泊桑比 } \nu = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2(V_p^2 - V_s^2) \\ \text{动弹性模量 } E = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \\ \quad = \frac{\rho V_p^2 (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \\ \text{动体积模量 } K = \rho (V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2) \end{array} \right. \quad (6)$$

综上所述, 只要用弹性波法测定岩土介质的纵波波速和横波波速, 就可以根据上述公式确定出岩土介质的动弹性常数。

我们在岩土爆破工程现场, 根据探测工程目的、工程特点和地质条件进行综合分析, 合理地选定 x 、 y 、 z 坐标轴, 沿坐标轴间隔一定距离布置探测工程。用国产 SYC-2 型声波岩石参数测定仪和 DZJ5-70 型地震检波器测量系统进行声波法和地震法单孔、双孔、跨孔测井和表面探测, 从而测定岩石的各向异性系数及相应的动弹性常数。表(1)表明:

按式(6)计算的动弹性常数与按式(4)、(2)算得的动弹性常数相比较,随着各向异性系数的变化,动弹性模量和动泊桑比偏差值差别都很大,这说明对一些重大岩土爆破工程设计和爆炸应力波作用下地基、边坡和地下坑道稳定分析,考虑岩体的各向异性性质是必要的。同时上述岩体各向异性的研究方法,也可作为岩体裂隙发育程度的一个量度。

表 1 岩体工程弹性常数计算实例

试验坑道名称	围岩名称	野外测定的弹性波速(m/s)	各向异性系数	工程弹性常数	按式(6)计算的工程弹性常数	偏差值
××工程坑道	微风化	$V_{11} = 4720$	1.2	$\nu_1 = 0.38$	0.27	-28.9
		$V_{12} = 2655$	0.8	$E_1 = 49.7 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	$47.9 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	-3.6
	$V_{13} = 3164$	$G_1 = 18.9 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$		$18.9 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	0	
	$V_{21} = 1861$	$\nu_2 = 0.22$		0.24	9	
	$V_{22} = 4280$	$E_2 = 22.7 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$		$22.9 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	10	
	花岗岩	$(\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3)$	$G_2 = 9.3 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	$9.3 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	0	
Ⅱ类岩石						
××试验 7-3#坑道	弱风化	$V_{11} = 2758.7$	0.88	$\nu_1 = 0.27$	0.33	22.2
		$V_{12} = 1394.6$	1.06	$E = 13.8 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	$13.5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	-2.2
	$V_{13} = 3327.9$	$G_1 = 5.1 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$		$5.1 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	0	
	$V_{21} = 1726.5$	$\nu_2 = 0.31$		0.32	3.2	
	$V_{22} = 2987.2$	$E_2 = 20.4 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$		$20.3 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	-0.5	
	花岗岩	$(\rho = 2.58 \text{ g/cm}^3)$	$G_2 = 7.8 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	$7.8 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	0	
Ⅲ类岩石						
××试验 5-3#坑道	微风化	$V_{11} = 4831.3$	1.28	$\nu_{11} = 0.29$	0.292	0.7
		$V_{12} = 2620.9$	0.93	$E_{11} = 31.6 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	$47.39 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	50
	$V_{13} = 3542$	$G_{11} = 18.3 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$		$18.3 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	0	
	$V_{21} = 1951.8$	$\nu_{21} = 0.31$		0.28	-10	
	$V_{22} = 2998.6$	$E_2 = 18.9 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$		$26.11 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	38	
	花岗岩	0.79	$G_{21} = 7 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	$10 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	45	
	$V_{23} = 1619.8$		$\nu_{12} = 0.24$	0.29	20.8	
	$E_3 = 15.6 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$		$18.07 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	16		
$G_{12} = 10.1 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	$7 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$		-30.9			
Ⅱ类岩石						

二、围岩的分类

人们在进行岩土爆破设计和施工时,对其围岩的分类是十分关心和感兴趣的问题。因出发点的不同,划分标准的不同,存在各种各样的分类法。由于弹性波法既是一种物理的方法,也是一种力学的方法。它不仅能够反映围岩的结构、岩性、受力状态、岩石破碎程度、裂隙以及矿物颗粒间联结强度,而且能较好地反映岩土介质的动力特性。由此,我们认为从研究

爆炸应力波传播规律及其破坏效应出发, 结合地质调查, 选用岩体波阻抗 ρV_p (单位是 g/cm^2s) 作为岩土爆破工程围岩分类标准是适合的。根据波阻抗的变化范围, 我们将围岩分为五类见表(2)

仅对围岩进行分类是不够的, 还必须对岩石露头、钻孔、掘进中揭露出来的地质特征和现象进行详细的地质描述, 进而根据岩体的地质特征和其物理力学参数来分区、段、划分特性相对均一的工程地质单元或岩组。然后在此基础上作出工程地质和弹性波法剖面图(图1), 找出围岩内潜存的危险结构面和缺陷, 从而避免爆破事故发生和提高爆破质量。

三、应力波衰减指数与波阻抗的关系

炸药包在岩土介质中爆炸时, 部分能量(约占百分之几)转化为应力波, 应力波在破坏岩体和向周围传播过程中不断衰减, 通常以下式描述应力波的一个公用参量 Φ (Φ 可代表加速度、速度、位移、应力和应变)与炸药量 Q 及距爆源距离 R 的关系:

$$\Phi = K_r \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^a \quad (7)$$

式中: K_r 为实验确定的系数对各种量是不同的; a 为应力波参量的衰减指数, 影响衰减指数的因素很多, 介质性质, 药包形状, 应力波频率……, 主要因素是介质的性质, 不同的岩石类型其衰减指数不一样。目前要想从理论解决还有许多困难, 我们在多年现场试验研究的基础上, 归纳成下列简单关系式表示应力波各参量衰减指数与岩体波阻抗的相关关系。

1. 集中药包(球形药包): 速度、应变、应力的 $a = -8.78 \times 10^{-7} \rho V_p + 2.81$ (8)
($r = 0.9413; 0.056 \leq \sqrt[3]{Q}/R \leq 2.2; 4.8 \times 10^5 \leq \rho V_p \leq 13 \times 10^5$; r 为相关系数; Q 的单位为 kg ; R 的单位为 m)。

2. 条形药包(柱形药包): 速度、应变、应力的 $a = -2.86 \times 10^{-7} \rho V_p + 1.89$ (9)
($r = 0.9564; 0.65 \leq \sqrt[3]{Q}/R \leq 4.67; 3.25 \times 10^5 \leq \rho V_p \leq 12.61 \times 10^5$)

$$\text{加速度的 } a = -1.39 \times 10^{-7} \rho V_p + 3.59 \quad (10)$$

($r = 0.9461; 0.1 \leq \sqrt[3]{Q}/R \leq 7.22; 3.25 \times 10^5 \leq \rho V_p \leq 12.61 \times 10^5$)

$$\text{位移的 } a = -4.23 \times 10^{-7} \rho V_p + 1.16 \quad (11)$$

($r = 0.9276; 0.71 \leq \sqrt[3]{Q}/R \leq 4.31; 5.15 \times 10^5 \leq \rho V_p \leq 7.12 \times 10^5$)

上述三个参量: 速度、应变、应力的 a 由于试验误差的影响不可能一样, 其偏差值在 $\pm 5\%$, 而岩体的波阻抗由弹性波法现场测定。

四、岩体和坑道的破坏分区

岩土爆破时, 应力波在破坏岩体和从爆源向岩体四周传播过程中不断衰减, 其峰值及波形特征也随之不断发生变化, 使得岩体承受一个不同加载速率的加荷过程。因而它对岩体的破坏程度也随着距爆源距离的增加而减弱。爆前、爆后岩体中出现的变化, 使其物理力学性质发生变化, 从而导致波速发生变化。在硐库爆炸试验和基坑开挖爆破等岩土爆破中^{3,4}利用这一特征, 用弹性波法并辅以宏观调查来确定爆破对岩体和坑道的破坏范围和不同爆破方法对岩体和坑道的影响程度(见表3、4)。试验研究表明: 爆前爆后围岩纵波波速变化百分比可做为破坏分区的定量指标。对于同一种爆破方法, 坚硬岩体比软岩破坏范围要小; 对于

表 2 围岩的波阻抗分类

围岩分类	波 阻 抗 ($\times 10^3 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{s}$)	围 岩 地 质 特 征	纵波波速 (km/s)	抗压强度 (kg/cm^2)	普氏硬 度系数 (f)	岩石凿碎功比耗 ($\text{kg} \cdot \text{m/cm}^3$)	完整性系数 V_{r_0}/V_{r_1}	裂隙系数 $(\frac{V_{r_2}^2 - V_{r_1}^2}{V_{r_1}^2})$
I	>13	未风化坚硬岩浆岩、厚层沉积岩、变质岩的块状结构岩体。节理裂隙不发育，其间距大于1米。岩体完整，构造简单。	>5	>1500	>15	>40	>0.8	<0.2
II	10~13	微风化岩浆岩、厚层沉积岩、变质岩的块状结构岩体。节理裂隙发育，一般呈闭合状，无充填结构面，其间距为0.5~1米。有少量断层。	4~5	1000~1500	10~15	24~40	0.5~0.8	0.2~0.5
III	7~10	弱风化岩浆岩、层状和薄层状沉积岩、变质岩。节理断层发育，层间错动明显，有充填结构面，节理间距为0.3~0.5米。	3~4	500~1000	5~10	15~24	0.4~0.5	0.5~0.8
IV	4~7	强风化破碎岩体。结构松散，断裂密集发育，裂隙张开，充填充填，节理裂隙间距小于0.3米。岩脉穿插，岩石破碎成碎块或板片状。	2~3	100~500	2~5	9~15	0.2~0.4	0.8~0.8
V	<4	严重风化极度破碎岩体。区域性大断裂带，软弱岩层挤压错动带，胶结不良的断层交叉体。岩石破碎成岩粉、碎屑、鳞片状。有大量断层泥充填，质地疏松。	<2	<100	<2	<9	<0.2	>0.8

* V_p 为岩石试件的纵波波速； V_{r_1} 为岩体的纵波波速。

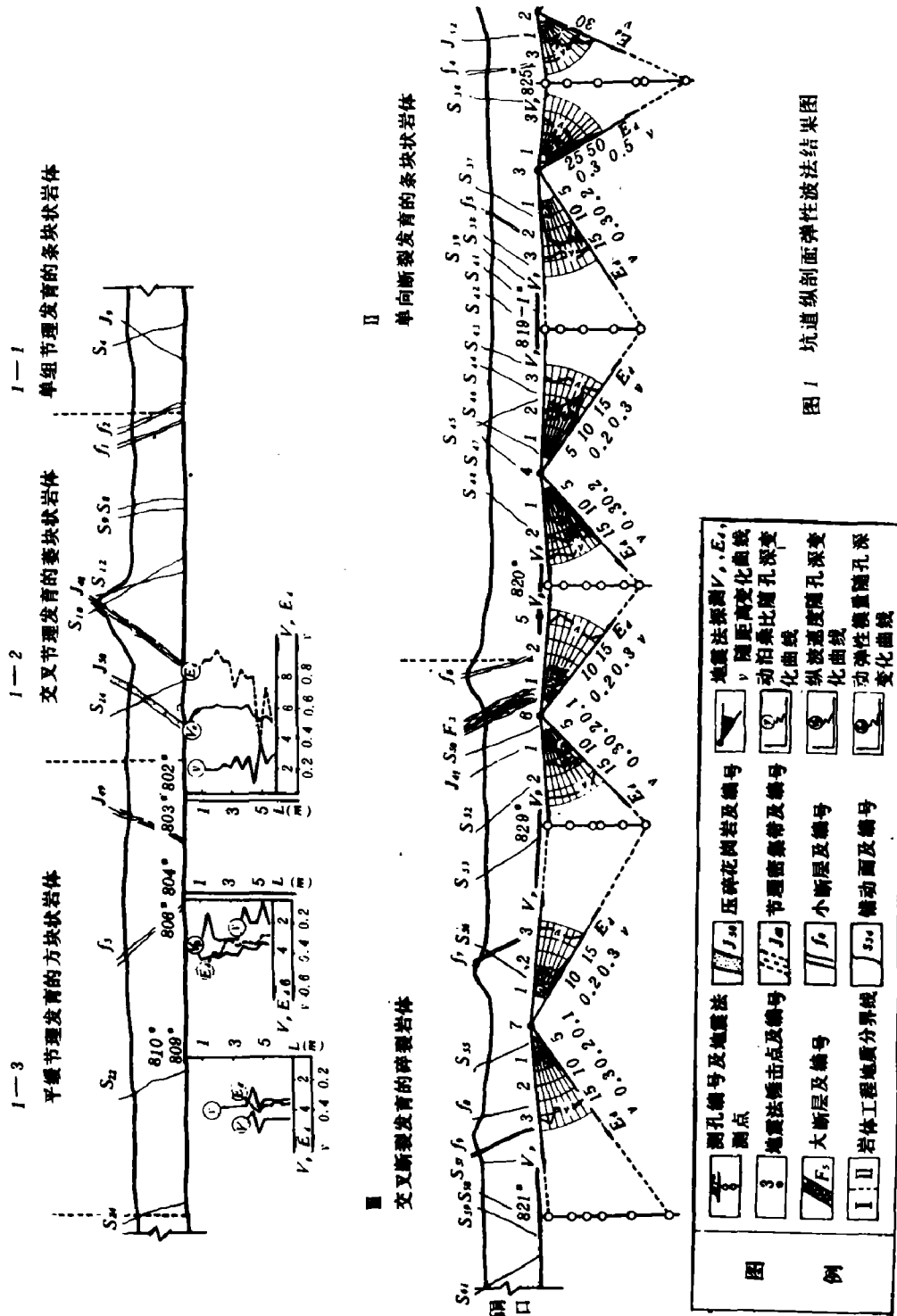


图1 坑道纵剖面弹性波法结果图

表 3 岩体自由场破坏分区外边界尺寸

破坏分区类别号	破坏区名称	岩体破坏分区外边界尺寸				岩体破坏特征	爆前爆后岩体纵波波速变化百分比(%)
		集中药包爆破	条形药包爆破	条形药包无堵塞爆破($D=4\sim6$)	毫秒延期爆破(柱形药包)		
I	破碎压密区	$2\sim4R_0$	$2\sim4R_0$	$2\sim3R_0$		经高温、高压作用,岩体中矿物颗粒完全被挤压粉碎。晶体矿物有蚀变现象,并生成少量低温矿物。岩体颜色变浅。	$-60\sim-80\%$
II	破裂区	$30R_0$	$20\sim28R_0$	$12\sim24R_0$	$15R_0$	岩体完全被挤压剪切破碎。裂隙呈网状分布,裂隙中均可见爆炸产物流浸染的痕迹。	$-30\sim-60\%$
III	强烈裂隙区	$60R_0$	$40\sim48R_0$	$26\sim36R_0$	$15\sim24R_0$	原裂隙普遍张开,并产生大量的新的径向和环向裂隙,张裂 $1\sim10mm$,裂面不平整。	$-10\sim-30\%$
IV	弱裂隙区	$100R_0$	$70\sim76R_0$	$57\sim62R_0$	$27\sim33R_0$	原裂隙闭合,并产生少量径向向裂纹。	$20\sim-10\%$
V	完整区	$100R_0$	$70\sim76R_0$	$57\sim62R_0$	$>27\sim33R_0$	岩体中原裂隙基本无变化。	$\pm 5\%$

* R_0 为单孔装药半径。

表 4 与爆源轴线垂直坑道破坏分区外边界尺寸($R=K_1 \sqrt[3]{Q}$)^{*}

破坏分区类号	破坏分区名称	集中药包爆破		条形药包无堵爆破		爆前爆后围岩纵波速度变化百分比(%)	坑道破坏特征
		变化范围	平均值	变化范围	平均值		
I	完全破坏区	$0.12 \sim 0.7 \sqrt[3]{Q}$	$0.37 \sqrt[3]{Q}$	$0.2 \sim 0.24 \sqrt[3]{Q}$	$0.22 \sqrt[3]{Q}$	-60 ~ -90%	岩体被冲压破碎, 洞形毁坏, 结构体破碎裂成不规则具有棱角的块石, 围岩完全失去整体性, 坑道全部被堵死。 坑道坍塌, 洞形改变, 底板堆积物多, 坑道可被乱石全部堵塞, 有的仍可见部分拱顶或侧壁, 堆积物多形成带棱角的不规则岩块。围岩中原因合裂隙普遍张开2~12cm, 大的有几十厘米。爆破裂隙发育, 裂隙率一般增加10倍, 局部地段达10倍。
II	严重破坏区	$0.82 \sim 1 \sqrt[3]{Q}$	$0.98 \sqrt[3]{Q}$	$0.39 \sim 0.76 \sqrt[3]{Q}$	$0.54 \sqrt[3]{Q}$	-30 ~ -60%	坑道破坏受结构面影响大, 有的顶板和侧坪岩体滑塌严重, 洞形改变明显, 有的洞形改变不大。有的堆积物多, 有的少, 底板堆积物多为原生结构体。部份裂隙有张开, 一般是0.5~3cm, 个别达10cm, 沿夹泥结构面错动可达2~10cm, 甚至更大。裂隙率一般增加4~10倍。
III	中等破坏区	$1.11 \sim 1.42 \sqrt[3]{Q}$	$1.32 \sqrt[3]{Q}$	$0.95 \sim 1.18 \sqrt[3]{Q}$	$1.08 \sqrt[3]{Q}$	-10 ~ -30%	部份裂隙有张开现象, 一般张开是小于1mm, 最大2~5mm, 少数达几公分。洞形基本完好, 洞内堆积物少, 有的甚至没有, 破坏形式主要发生于原结构面或局部软弱带。
IV	轻微破坏区	$1.75 \sim 2.7 \sqrt[3]{Q}$	$1.99 \sqrt[3]{Q}$	$1.95 \sim 2.14 \sqrt[3]{Q}$	$2.03 \sqrt[3]{Q}$	±10%	坑道围岩中原裂隙基本无变化, 仅坑道中不稳定的已松动岩块被震落。
V	完整区	$1.75 \sim 2.7 \sqrt[3]{Q}$	$2.08 \sqrt[3]{Q}$	$1.95 \sim 2.14 \sqrt[3]{Q}$	$2.03 \sqrt[3]{Q}$	±5%	

* R—坑道破坏分区外边界距爆源距离(m); K_1 —实验确定系数; Q—炸药量(kg)。

同一种的岩体,光面爆破和预裂爆破及毫秒延期爆破比一般爆破破坏范围要小;在总药量相等的情况下,条形药包爆破比集中药包爆破破坏范围要小20~33%;毫秒延期爆破(柱形药包)又比齐发爆破(条形药包)破坏范围要小25~53%^[4,5,6]。

五、在应力波作用下围岩加固效果的检测

炸药包爆炸释放出巨大的能量,要把挖掉的岩石炸碎,又不会使邻近开挖面的岩体或建筑物遭到破坏。为了维护工程岩体如边坡、地下坑道、基岩在静动载荷作用下的稳定性,通常要对岩体采取一些加固措施,如地下工程围岩的锚喷支护、基岩的灌浆处理……,其加固的效果可以用弹性波法加以检测。

六、结 论

根据岩土爆破工程现场不同区域岩体声学性质不同,选用不同的计算方法计算岩体的物理力学参数,这是合理的,也是比较客观地反映实际情况;采用波阻抗对围岩分类和实验确定应力波参量衰减指数与波阻抗的关系及以岩体弹性波探测技术为主的综合分析法给出的岩体和垂直爆源轴线坑道的破坏分区尺寸等具有实用价值,对研究爆破效应和确定最小安全距离等都有现实意义。实践表明:弹性波法在岩土爆破工程中有多方面的用途。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院武汉岩土力学研究所,用弹性波法对花岗岩岩体物理力学特性的探测,土岩爆破文集,冶金工业出版社(1980),171.
- [2] 邢念信,地下工程,5(1980),52.
- [3] 朱瑞庚,黄承贤,岩土爆破中岩体和坑道破坏分区的确定,第二届全国爆炸力学学术会议论文集(1981).
- [4] 湖北省爆破学会,湖北电视塔基础开挖爆破工程中有关的安全问题,第二届土岩爆破学术会议论文集(1982).
- [5] Olson, J.J., Willard R.J. et al., Rock Damage From Small Tharge Blasting in Granite, *Report of Investigations 7751*, Bureau of Mines (1973).
- [6] Ханукаев, А.Н., *Снижение Напряженности Горного Массива С Помощью Взрыва*, М. изд. Наука (1979).

APPLICATIONS OF ELASTIC WAVE METHOD IN THE BLASTING IN SOIL AND ROCKS

Huang Chengxian

Abstract

The author describes his engineering work in the blasting of soil and rocks with the method of elastic waves in this paper. The experimental method, the different methods for calculating the dynamic elastic constants according to different acoustic characteristics of the surrounding rocks, the calculated examples and the method of testing the effectiveness of reinforced surrounding rocks are stated. The classification of the wave impedance of rocks as well as the relation between exponential attenuation constants of stress waves and the rock impedance are given. The author also proposes a quantitative criterion of rock and tunnel failure zoning—the percentage change of longitudinal wave velocity, before and after explosion.

Practice demonstrates that the elastic wave method is a very important, fast, simple and reliable method in the study of the effectiveness and the failure mechanism of rocks in engineering blasting. For safety and economy in engineering blasting, it is concluded that the elastic wave method has a wide perspective.