

深埋洞室开挖瞬态卸荷诱发振动的衰减规律

范 勇^{1,2}, 卢文波^{1,2}, 杨建华^{1,2}, 严 鹏^{1,2}, 陈 明^{1,2}

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 深埋洞室爆破开挖过程中围岩初始地应力的瞬态卸荷会诱发振动。针对圆形隧洞开挖, 分析了地应力瞬态卸荷过程中围岩应变能、动能、径向应力做功 3 者之间的平衡机制, 并采用量纲分析, 建立了基于开挖岩体应变能的瞬态卸荷诱发振动衰减公式。结合锦屏二级引水隧洞和瀑布沟地下主厂房爆破开挖实例, 开展了瞬态卸荷诱发振动的识别分离, 并分析了诱发振动的衰减规律。研究表明: 地应力瞬态卸荷诱发振动的峰值与被开挖岩体应变能密度的二次方根成正比, 且开挖卸荷体积越大, 诱发振动越强烈; 与 Lu-Hustrulid 衰减公式相比, 新衰减公式应用范围更广, 使用精度更高。

关 键 词: 爆破开挖; 瞬态卸荷; 诱发振动; 应变能; 衰减公式

中图分类号: O 383.1; TV 554

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 02-0541-09

Attenuation law of vibration induced by transient unloading during excavation of deep caverns

FAN Yong^{1,2}, LU Wen-bo^{1,2}, YANG Jian-hua^{1,2}, YAN Peng^{1,2}, CHEN Ming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: During drilling and blasting excavations of deep caverns, the transient unloading of in-situ stress on the excavation boundary can induce vibrations in surrounding rock mass. For circular tunnel excavation, the balance mechanism of strain energy, kinetic energy and work done by radial stress during the process of the transient unloading of in-situ stress is analyzed, then a new attenuation formula is established to analyze the attenuation law of vibrations induced by the transient unloading of in-situ stress based on the strain energy of excavated rock mass with the tool of unit analysis. Case studies of Jinping II and Pubugou hydropower stations are presented to show how to identify and separate the vibrations induced by the transient unloading of in-situ stress from the monitored vibration signals. Studies indicate that the amplitudes of vibrations induced by the transient unloading of in-situ stress are proportional to the square root of strain energy density of excavated rock mass, and the bigger volume of excavated rock mass is, the intenser vibrations are induced by the transient unloading of in-situ stress. Compared with the existing attenuation formula proposed by Lu and Hustrulid, the new attenuation formula has a wider range of application and higher precision.

Key words: blasting excavation; transient unloading; induced vibration; strain energy; attenuation formula

1 引 言

随着我国经济的快速发展, 能源需求不断提高, 深埋洞室开挖工程也越来越多, 如逾千米的矿山、西南地区水电站地下洞室群、核废料的深层储存等。钻爆法仍然是当前国内外深埋洞室开挖的主要手段, 其实质是通过钻孔内炸药起爆所产生的爆炸荷载与孔壁岩体的相互作用, 实现破碎岩石和抛掷碎块。伴随爆炸产生的岩体开裂和开挖轮廓面的

形成, 被开挖岩体对保留岩体的初始应力约束瞬间移除, 即开挖面上地应力的瞬态卸荷。早在 20 世纪 90 年代, Abuov 等^[1]、Carter 等^[2]的研究就发现, 地应力的瞬态卸荷可以在围岩中激发动拉应力场, 明显地表现出与准静态开挖完全不同的动力特征; He 等^[3]通过真三轴试验发现, 某一方向的瞬态卸载会在试件内部激发弹性应力波。伴随瞬态卸荷所产生的一系列动力响应对围岩损伤区的形成、岩爆的产生都有着重要影响^[4-6]。

收稿日期: 2013-10-28

基金项目: 国家杰出青年基金项目 (No. 51125037); 国家重点基础研究计划(973)项目 (No. 2011CB076354); 高校博士点基金 (No. 20110141110026)。

第一作者简介: 范勇, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事岩石动力学的研究工作。E-mail: yfan@whu.edu.cn

通讯作者: 卢文波, 男, 1968 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石动力学的研究与教学工作。E-mail: wblu@whu.edu.cn

众所周知,炸药起爆所产生的爆炸荷载是爆破振动的激励源,爆破振动的传播规律及其对周围结构的危害受到了广泛的关注^[7-9]。但随着地下岩体开挖深度的增加和瞬态卸荷发生的应变能的释放也会在围岩中产生振动^[10-11]。张志呈等^[12]通过爆破模型试验发现,初始地应力场对爆破振动的传播具有波导作用,可以增加其振动能量及振动幅值。卢文波等^[13]和严鹏等^[14]指出,地应力较高时,瞬态卸荷诱发的振动有可能超过爆炸荷载所产生的振动而在围岩总体振动中占据主导地位。Yang 等^[15]通过幅值谱分析和低通滤波的方法,从实测振动信号中识别分离出了瞬态卸荷诱发振动的波形,并采用式(1)分析了诱发振动的衰减规律。而该公式是 Lu 等^[16]基于柱面弹性波理论提出的,当开挖边界不规则、岩体处于非静水应力场时,使用该公式来分析瞬态卸荷诱发振动衰减规律并不合理。

$$v = K_1 \frac{\sigma}{\rho C_p} \left(\frac{d}{r} \right)^\lambda \quad (1)$$

式中: v 为瞬态卸荷诱发振动的峰值速度; σ 为开挖边界上的地应力值; d 为开挖荷载等效作用半径; r 为围岩中某点与卸载中心的距离; K_1 、 λ 为与场地环境相关的系数; C_p 为弹性纵波波速; ρ 为岩体密度。

由热力学定律可知,瞬态卸荷诱发振动本质上是能量驱动下的一种物理现象。因此,开展深埋洞室开挖瞬态卸荷过程中围岩能量调整机制的研究,对于认识瞬态卸荷诱发振动的机制、预测及控制具有重要意义。假定岩体是均匀且各向同性的线弹性材料,本文首先分析了圆形洞室爆破开挖围岩应变能、动能、径向应力做功三者之间的传递、转化、平衡机制;然后通过量纲分析,建立了新的瞬态卸荷诱发振动衰减公式;最后采用此公式分析了锦屏二级4#引水隧洞及瀑布沟地下主厂房爆破开挖过程中,瞬态卸荷诱发振动的衰减规律。

2 深埋洞室开挖围岩能量调整机制

深埋洞室爆破开挖瞬态卸荷诱发振动实际上是围岩应变能转移、释放的过程,可以用一个简单的例子对瞬态卸荷诱发振动的机制加以解释:一个在初始力 F_0 作用下处于压缩状态的弹簧(相当于地应力作用下岩体的初始状态),具有较高的弹性变形能,若初始作用力 F_0 缓慢移除,则弹簧的变形能逐渐释放用于克服 F_0 做功,弹簧将缓慢地恢复到原来的初始状态;若初始作用力 F_0 瞬间移除,则弹簧的变形能会转化为动能,引起弹簧回弹,并在平衡位

置上下振动。同理,深埋洞室爆破开挖时,高储能(弹性应变能)为诱发振动提供了能量源这一必要条件,而工程开挖所产生的卸载扰动进一步使得诱发振动成为必然现象。

2.1 局部能量传输

静水应力场 ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = P_0$), 在原岩中采用钻爆法开挖一条半径为 a 的圆形无限长隧洞,且处于弹性状态。初始地应力的瞬态卸荷会在围岩中产生卸载应力波,当波阵面到达时,岩体原有的初始应力及能量状态被打破,引起围岩径向应力 $\sigma_r(r,t)$ 、切向应力 $\sigma_\theta(r,t)$ 、应变能均经历先减小后增大的动态调整过程^[17]。根据能量守恒定律不难得出能量连续方程为

$$\frac{\partial \psi(r,t)}{\partial r} + \frac{\partial \phi(r,t)}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

式中: $\psi(r,t)$ 为径向应力做功的瞬时功率; $\phi(r,t)$ 为围岩动能与应变能密度之和。

根据式(2)并结合文献[17]的研究成果可以看出,伴随着开挖面上初始地应力的瞬态卸荷,围岩动能和应变能通过径向应力做功的方式传递,并相互转化。围岩应变能先减小(释放),后增大(聚集),释放的能量转化为围岩的动能,随后依靠径向应力对其做功吸收能量,出现应变能聚集现象。

2.2 整体能量平衡

瞬态卸荷整个过程结束时,围岩应力及应变能状态与准静态卸载完全相同,因此,不难得出静水应力条件下瞬态卸荷过程结束时,围岩应变能增量 J 及远区围岩(假定与卸载中心的距离 r 很大,设为 r_{∞}) 对近区围岩所做的正功 W_1 ^[17]:

$$W_1 = 2J = \frac{2\pi(1+\nu)}{E_0} a^2 P_0^2 \quad (3)$$

式中: E_0 、 ν 分别为岩体弹性模量及泊松比。

假设开挖面上质点振速为 $v(a,t)$, 开挖面上的径向应力 $P(t)$ 由 P_0 以非常快的速度卸载到 0 (卸载时间 t_d), 未卸应力 $P(t)$ 做的负功为

$$W_2 = -2\pi a \cdot 1 \cdot \int_0^{t_d} P(t) v(a,t) dt \quad (4)$$

瞬态卸荷诱发围岩产生振动的最大动能为

$$W_k = \int_a^{r_{\infty}} 2\pi r \cdot 1 \cdot \frac{1}{2} \rho v^2 dr \quad (5)$$

从瞬态卸荷开始到结束,根据能量守恒定律 $W_1 + W_2 = J + W_k$ 可得:

$$W_k = \frac{\pi(1+\nu)}{E_0} a^2 P_0^2 - 2\pi a \int_0^{t_d} P(t) v(a,t) dt \quad (6)$$

极限情况下, 若卸载时间 $t_d = 0$, 则未卸应力 $P(t)$ 做的功 $W_2 = 0$, 根据式 (2)、(4) ~ (6) 可知, 该过程中, 围岩先释放能量, 部分转化为围岩振动的动能, 随后依靠径向应力对其做功吸收能量, 且吸收的能量值是其释放能量值的两倍, 所以整个过程结束时, 围岩应变能是增大的。在释放阶段, 围岩应变能转化为围岩动能的值为

$$W_k = \frac{\pi(1+\nu)}{E_0} a^2 P_0^2 \quad (7)$$

开挖岩体的总应变能为^[17]

$$S_a = \frac{3\pi(1-2\nu)}{2E_0} a^2 P_0^2 \quad (8)$$

由式 (7)、(8) 可以看出,

$$W_k = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} S_a \quad (9)$$

若初始地应力在数毫秒卸载, 即 $t_d \neq 0$, 则围岩应变能转化为围岩动能的数值与开挖岩体的总应变能有如下关系:

$$W_k = K_2 S_a \quad (10)$$

式中: K_2 为与岩体泊松比、瞬态卸载持续时间等相关的常量。结合式 (5)、(10) 可以看出, 瞬态卸荷诱发振动的峰值振速 (PPV) 与开挖岩体应变能有着紧密的关系。

早在 1966 年, Cook 等^[18]就指出, 开挖任意形状洞室释放的能量是被开挖岩体应变能与开挖影响区释放能量之和。释放的部分能量以振动的形式传播, 并最终热能的形式耗散掉。而弹性条件下的洞室开挖往往造成围岩向空区收敛, 岩体处于加载状态, 围岩应变能相比开挖前是增大的^[19], 因此, 弹性条件下, 被开挖岩体的应变能就是开挖过程中释放的能量, 这部分能量与瞬态卸荷诱发振动的 PPV 有着密切联系。

3 诱发振动衰减规律的推导

3.1 影响 PPV 物理量

根据以上分析, 并结合 Lu 等^[16]提出的瞬态卸荷诱发振动衰减式 (1) 可以看出, PPV 与 S_a 、 σ 、 d 、 E_0 、 ν 、 ρ 、 C_p 、 r 等因素密切相关 (爆破场地环境已知的情况下, 开挖面上初始地应力卸载时间为常量, 不作考虑)。而 σ 、 d 、 E_0 、 ν 、 C_p 均可以在开挖岩体应变能 S_a 及开挖岩体体积 V 中得以体现。因此, 影响瞬态卸荷诱发振动的 PPV 的物理量有: S_a 、 V 、 ρ 、 r , 写成函数关系式为

$$v = F_1(S_a, V, \rho, r) \quad (11)$$

3.2 量纲分析

式 (11) 中共有 5 个物理量, 各量的量纲分别为: $[v] = LT^{-1}$ 、 $[S_a] = ML^2T^{-2}$ 、 $[V] = L^3$ 、 $[\rho] = ML^{-3}$ 、 $[r] = L$, 所包含的基本量纲有 L 、 M 、 T 。根据 π 定理, 可得到由无量纲量组成的函数关系为

$$\left(\frac{\rho V}{S_a}\right)^{1/2} v = F_2\left(\frac{r}{V^{1/3}}\right) \quad (12)$$

根据常识, 瞬态卸荷诱发振动的 PPV 随距离 r 的增大是逐渐减小的, 结合式 (1)、(12) 可以得到基于开挖岩体应变能的峰值振速衰减公式为

$$v = K_3 \left(\frac{S_a}{\rho V}\right)^{1/2} \left(\frac{V^{1/3}}{r}\right)^\alpha \quad (13)$$

由式 (13) 可以看出: 地应力瞬态卸荷诱发振动的峰值与被开挖岩体应变能密度的二次方根成正比, 且开挖卸荷体积越大, 诱发振动越强烈。

圆形隧洞静水应力场条件下, 开挖岩体体积为 $V = \pi a^2$ (量纲为: $[V] = L^3$), 式 (13) 演变为

$$v = K_3 \left(\frac{S_a}{\rho V}\right)^{1/2} \left(\frac{V^{1/2}}{r}\right)^\alpha \quad (14)$$

将式 (8) 代入式 (14) 可得

$$v = K_3 \left[\frac{3\pi^\alpha (1-\nu)}{2(1+\nu)} \right]^{1/2} \frac{P_0}{\rho C_p} \left(\frac{a}{r}\right)^\alpha \quad (15)$$

一般情况下通过量纲分析得到的预测式 (13) 在圆形隧洞静水应力场条件下, 可以演变成式 (15)。对比式 (1)、(15) 可以发现, 两者形式相同。因此, 可以认为式 (1) 是式 (13) 的特例。本质上, 式 (1) 是根据应力波波阵面上的应力与质点峰值速度关系 $\sigma = \rho C_p v$ 推导的, 非静水应力条件下, 对于如图 1 所示的长方形洞室开挖, 围岩中质点 H 的振动实际是由 4 个开挖面 AB 、 BC 、 AD 、 CD 上地应力 (包括 x 向和 y 向应力) 瞬态卸荷诱发振动叠加而成。因此, 采用某一开挖面 (如 AB 轮廓面) 上的卸载应力值来分析围岩中瞬态卸荷诱发振动的衰减规律是不合理的, 会使得分析精度大大降低。而本文提出的衰减式 (13) 利用开挖岩体释放的应变能转化为动能来得到诱发振动速度峰值, 可以避免这一困难。所以, 对于静水应力场单一卸载面 (如圆形轮廓面), 式 (1)、(13) 均适用; 而对于非静水应力场方形或更复杂的开挖轮廓面, 式 (13) 就具有优越性。式 (1)、(13) 中的衰减项虽然相似, 但是被

开挖岩体体积 V 比开挖荷载等效作用半径 d (即与开挖轮廓周长相等的圆的半径) 的物理意义更明确, 更容易求得。

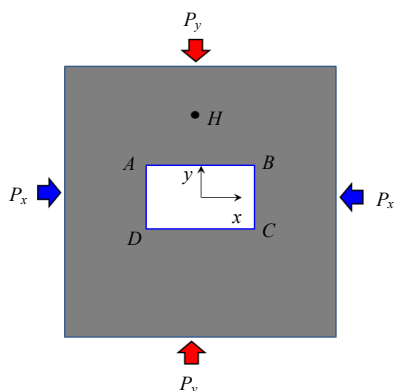


图 1 长方形洞室示意图

Fig.1 Sketch of rectangular cavity

4 工程实例分析

4.1 工程概况

锦屏二级水电站地下洞室群由 4 条引水隧洞、2 条辅助洞及 1 条施工排水洞等组成, 一般埋深为 1 500~2 000 m。1[#]、3[#]引水隧洞采用 TBM 施工, 开挖断面为圆形, 直径为 12.4 m; 2[#]、4[#]引水隧洞采用钻爆法施工, 开挖断面为马蹄形, 洞径为 13.0 m。

图 2 给出了 4[#]引水隧洞开挖爆破振动监测测点布置情况, 此时 3[#]引水隧洞开挖已经完成。引水隧洞最大主应力方向与洞轴线近似平行, 其应力大小约为岩体自重的 1.1~1.3 倍; 中间主应力方向与洞轴线近似垂直, 其应力大小为岩体自重的 1.0~1.2 倍; 最小主应力方向与洞轴线近似垂直, 其应力大小约为 0.94~1.0 倍岩体自重^[20]。

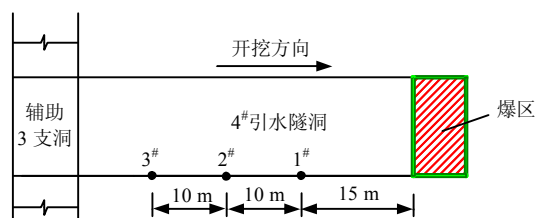


图 2 4[#]引水隧洞爆破开挖振动监测测点布置情况

Fig.2 Layout of vibration monitoring locations for blasting excavation of #4 diversion tunnel

4[#]引水隧洞爆破开挖采用 $\phi 32$ mm 乳化炸药, 孔径为 42~45 mm, 孔深为 2.7~4.5 m, 先开挖上半洞, 再开挖下半洞, 上半洞分 10 段起爆, 下半洞分 6 段起爆, 具体的爆破设计如图 3 所示。

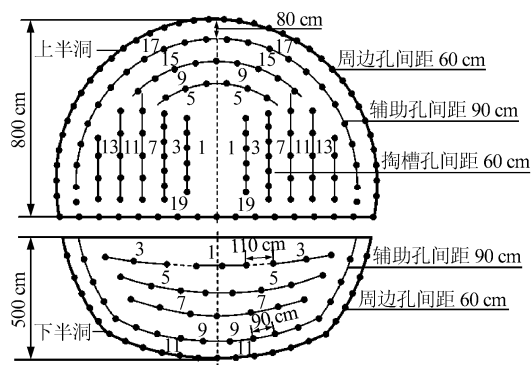


图 3 4[#]引水隧洞爆破设计图

Fig.3 The design of blasting for diversion tunnel #4

4.2 瞬态卸荷诱发振动的识别分离

为节省篇幅, 图 4 仅给出了锦屏二级水电站 4[#]引水隧洞上半洞开挖 2[#]测点垂向实测振动波形。实测的振动波形中同时包含了爆炸荷载与瞬态卸荷两种激励源所产生的振动, 二者相互耦合、叠加在一起, 在时域上没有明确的分界点, 这给瞬态卸荷诱发振动的研究分析带来了很大的麻烦。

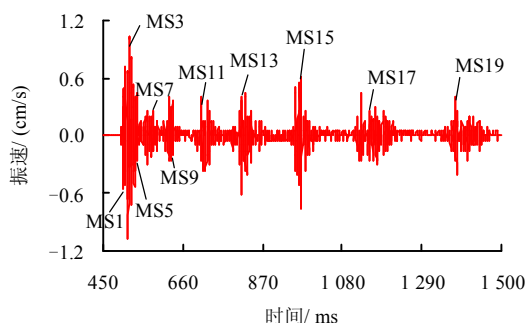


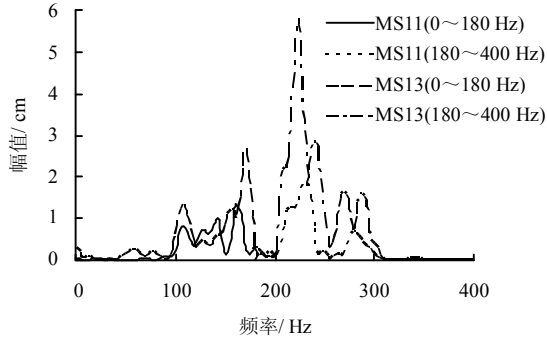
图 4 实测振动时程曲线(2[#]、铅垂向)

Fig.4 Monitored vibration curve versus time(#2, vertical)

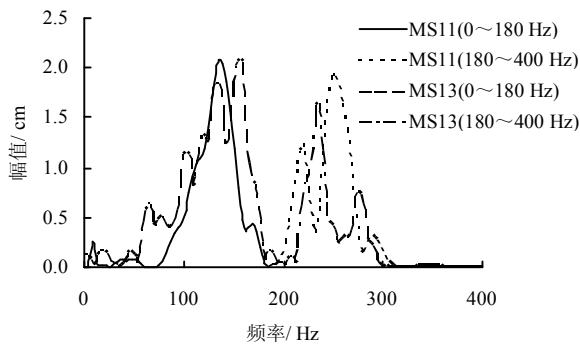
利用 Matlab 中的快速傅立叶变换函数可以得到各段振动波形的幅值谱^[15], 图 5 给出了 2[#]和 3[#]测点 MS11 段、MS13 段幅值谱对比分析图 (垂向、上半洞)。可以看到, 各段振动都具有两个优势频率 (以不同的线型表示), 且优势频率的分界点都在 180 Hz 左右。

由于爆炸荷载的上升时间短, 导致其变化梯度大, 而瞬态卸荷持续时间略长, 它所诱发的振动含有较多的低频能量, 所以实测振动波形中的低频振动成分主要由瞬态卸荷产生。采用数字信号处理的 FIR 低通滤波器从实测振动信号中分离出低频信号, 便可以得到地应力瞬态卸荷诱发振动的时程曲线^[15], 将实测波形减去瞬态卸荷诱发振动的波形可以得到爆炸荷载振动波形。以 MS9 段为例, 图 6 分别给出了锦屏二级水电站 4[#]引水隧洞 2[#]测点

(MS9、垂向)瞬态卸荷诱发振动的波形及爆炸荷载振动波形。



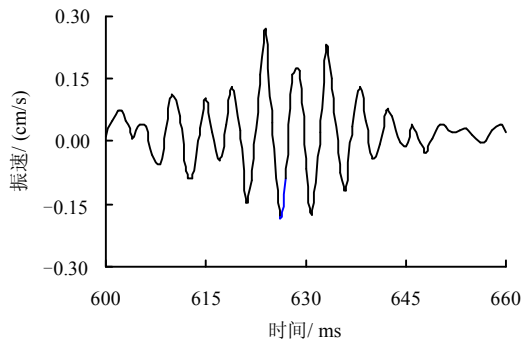
(a) 2#测点 (垂向)



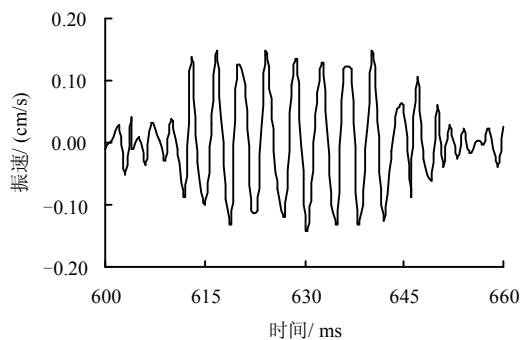
(b) 3#测点 (垂向)

图5 各对比段别振动信号幅值谱比较

Fig.5 Comparisons of amplitude spectrum of monitored vibration signals between contrastive delays



(a) 瞬态卸荷诱发振动波形(MS9)



(b) 爆炸荷载产生振动波形(MS9)

图6 锦屏二级水电站4#引水隧洞(2#、垂向)
Fig.6 Vibration waves for Jinping II diversion tunnel #4 (#2, vertical)

4.3 非线性拟合分析

根据实测的地应力分布,采用 ANSYS 计算每段炮孔起爆前爆区的二次应力分布,进而求得每段炮孔起爆所开挖岩体的应变能。锦屏二级水电站(JP II)引水隧洞岩体参数为:密度 $\rho = 2.70 \text{ g/cm}^3$ 、弹性模量 $E = 56.2 \text{ GPa}$ 、泊松比 $\mu = 0.25$ 。计算模型如图7所示。

每段炮孔起爆时,取与卸载轮廓周长相等的圆的半径,即可以得到对应的开挖荷载等效作用半径 d_i ;取与实测振动方向一致的应力平均值即可以得到对应的开挖荷载 σ_i 。

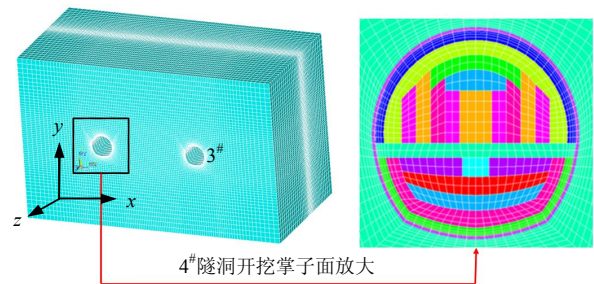


图7 计算模型

Fig.7 Computational model

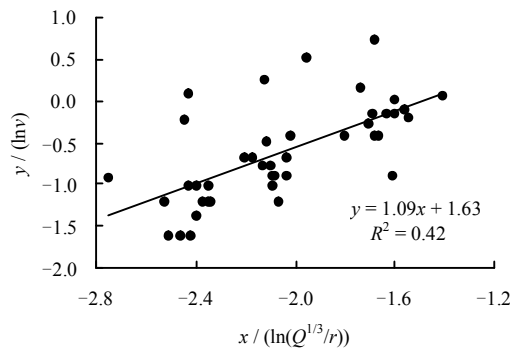
关于质点振动速度与装药量 Q 及距离 r 的关系,目前国内比较常用的是前苏联的M.A.萨道夫斯基公式^[21]:

$$v = K_4 \left(\frac{Q^{1/3}}{r} \right)^\beta \quad (16)$$

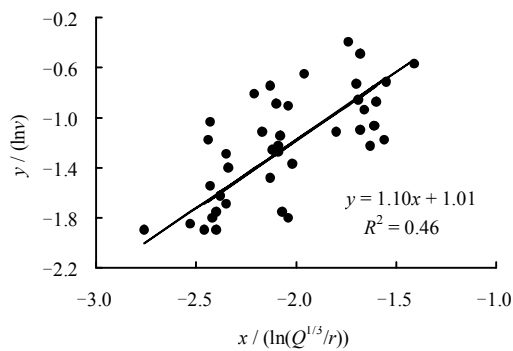
根据爆破参数及起爆网络,可以采用萨道夫斯基公式对实测振动的PPV及分离得到的爆炸荷载产生振动的PPV进行拟合,以洞轴向为例,拟合结果如图8所示(图中横坐标 x 为 $Q^{1/3}/r$ 的自然对数,纵坐标 y 为PPV的自然对数, R^2 为相关系数)。

分别采用基于开挖荷载的衰减式(1)及基于开挖岩体应变能的衰减式(13)对瞬态卸荷诱发振动的PPV进行拟合,以洞轴向为例,拟合结果如图9所示(图9(a)中横坐标 x 为 d_i/r 的自然对数,图9(b)中横坐标 x 为 $V_i^{1/3}/r$ 的自然对数,纵坐标 y 均为PPV的自然对数)。

本文对瀑布沟水电站(PBG)主厂房第IV层爆破开挖所产生的振动也进行了分析,由于文献[15]对其工程概况及现场爆破振动监测情况已进行了详细的介绍,并从实测波形中分离出了瞬态卸荷诱发振动波形,为避免重复,直接引用其分离结果进行拟合,拟合结果如图10、11所示。

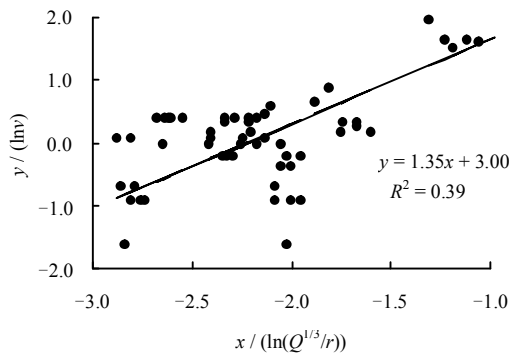


(a) 实测振动 PPV 拟合(洞轴向)

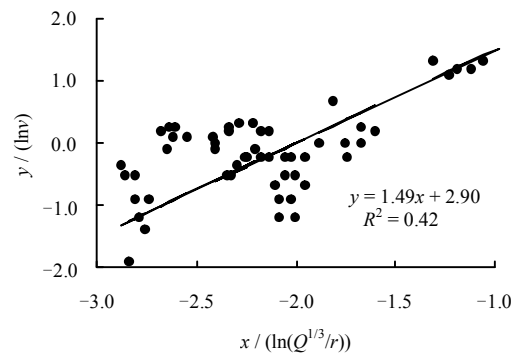


(b) 分离爆炸荷载产生振动 PPV 拟合(洞轴向)

图 8 萨道夫斯基公式拟合结果(JP II)
Fig.8 Fitting results with Sadov's formula (JP II)

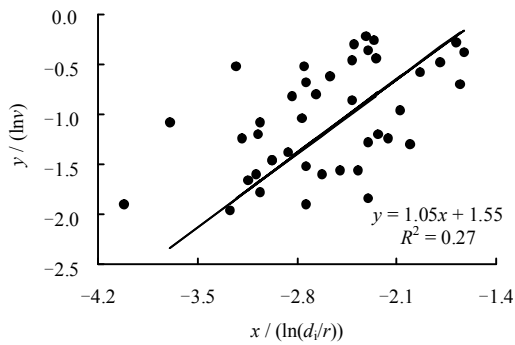


(a) 实测振动 PPV 拟合(洞轴向)

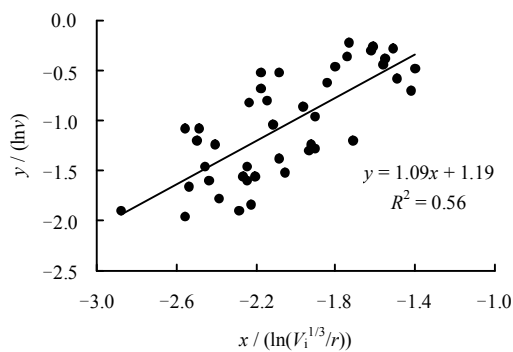


(b) 分离爆炸荷载产生振动 PPV 拟合(洞轴向)

图 10 萨道夫斯基公式拟合结果(PBG)
Fig.10 Fitting results with Sadov's formula(PBG)

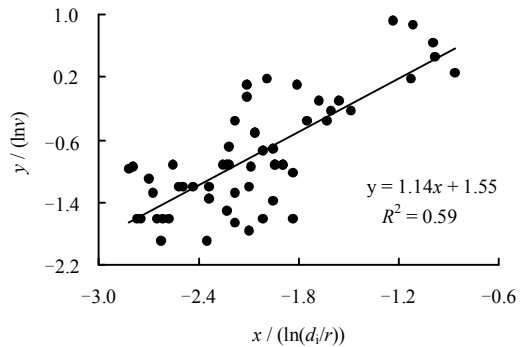


(a) 基于开挖荷载预测公式的拟合(洞轴向)

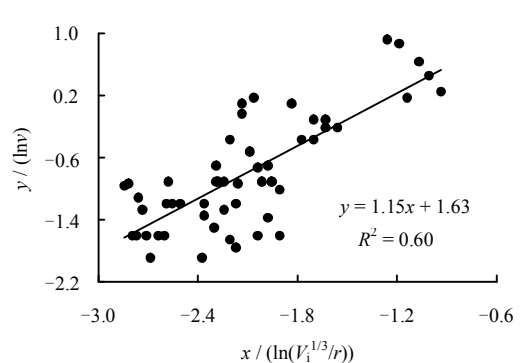


(b) 基于开挖岩体应变能预测公式的拟合(洞轴向)

图 9 瞬态卸荷诱发振动拟合结果(JP II)
Fig.9 Fitting results of vibration induced by transient unloading(JP II)



(a) 基于开挖荷载预测公式的拟合(洞轴向)



(b) 基于开挖岩体应变能预测公式的拟合(洞轴向)

图 11 瞬态卸荷诱发振动拟合结果(PBG)
Fig.11 Fitting results of vibration induced by transient unloading(PBG)

通过对图 8~11 的比较发现, 在洞轴向相比整个实测总响应振动, 采用萨道夫斯基公式对分离的由爆炸荷载产生振动的 PPV 进行非线性拟合时, 拟合系数有所提高; 相比 Lu-Hustrulid 衰减公式, 采用本文新提出的衰减公式对洞轴向瞬态卸荷诱发振动衰减规律进行分析时, 相关系数也有所提升。

表 1、2 给出了两个工程实例(锦屏二级 4[#]引水隧洞、瀑布沟主厂房)爆破开挖时, 采用不同衰减公式对 3 个方向实测总响应振动、爆破荷载产生振动、瞬态卸荷诱发振动 PPV 衰减规律进行分析时的参数值, 表中 ΔP 表示拟合精度提高的百分比。由于瀑布沟主厂房另外两个方向的实测波形较差,

这里只给出其轴向拟合结果。

对比表 1、2 可以看出, 在垂向及水平向相比实测振动, 分离得到的爆炸荷载产生振动的衰减速度明显快很多, 而分离得到的瞬态卸荷诱发振动的衰减速度明显慢很多; 但在洞轴向这一现象并不明显。这是由于无论锦屏二级水电站 4[#]引水隧洞还是瀑布沟水电站主厂房第 IV 层爆破开挖, 在洞轴向均存在自由面, 这使得该方向卸荷应力水平较低, 从而导致瞬态卸荷诱发振动不明显。因此, 可以预见, 如果地应力水平较高, 则在爆源中远区瞬态卸荷诱发振动会超过爆炸荷载所产生的振动而在围岩总体振动中占据主导地位。

表 1 萨道夫斯基公式(式(16))参数值
Table 1 Fitting parameters of Sado's formula

工程代号	计算方向	实测振动			爆破振动			ΔP /%
		K_4	β	R	K_4	β	R	
JP II	洞轴向	5.10	1.09	0.65	2.75	1.10	0.69	6.15
	铅垂向	12.06	1.46	0.67	9.12	1.69	0.79	17.91
	水平向	4.22	0.81	0.52	21.12	1.96	0.77	48.08
PBG	洞轴向	20.09	1.35	0.62	18.17	1.49	0.65	4.81

表 2 不同衰减公式参数值
Table 2 Fitting parameters of different attenuation formulas

瞬态卸荷诱发振动（PPV）								
工程代号	计算方向	$v = K_1 \left(\sigma / \rho C_p \right) (d/r)^{\lambda}$			$v = K_3 \left(S_{ei} / \rho V \right)^{1/2} \left(V^{1/3} / r \right)^{\alpha}$			ΔP /%
		K_1	λ	R	K_3	α	R	
JP II	洞轴向	9.69	1.05	0.52	0.84	1.09	0.75	44.23
	铅垂向	1.50	1.01	0.56	0.88	1.01	0.79	41.07
	水平向	1.01	0.71	0.61	0.61	0.68	0.79	29.51
PBG	洞轴向	21.62	1.14	0.77	2.27	1.15	0.78	1.30

对比两个工程可以发现, 在垂向及水平向相比整个实测总响应振动, 采用萨道夫斯基公式对分离的由爆炸荷载产生振动的 PPV 进行非线性拟合时, 拟合系数明显提高, 这也从侧面反映出了高地应力条件下, 瞬态卸荷对围岩振动有重要影响。对比表 2 中两种不同衰减公式的拟合精度可以发现, 瀑布沟主厂房爆破开挖时, 地应力瞬态卸载边界规则(每段炮孔起爆的开挖轮廓面均为矩形, 且长远大于宽, 具体可见文献[15]中的爆破设计, 围岩振动几乎全部由长度方向瞬态卸荷产生), 相比 Lu-Hustrulid 衰减公式, 采用本文新提出的衰减公式对诱发振动衰减规律进行分析时, 相关系数提升不明

显; 而锦屏二级引水隧洞爆破开挖时, 地应力瞬态卸载边界复杂、不规则, 采用新衰减公式拟合时的相关系数明显提高约 30%~40%。这说明本文提出的衰减公式, 应用范围更广, 使用精度更高, 可以更好地用于分析瞬态卸荷诱发振动的衰减规律

5 结 论

(1) 瞬态卸荷过程中, 能量(动能和应变能)通过径向应力做功的方式在围岩中传递, 并相互转化; 围岩释放的应变能是瞬态卸荷诱发振动的能量源, 该值大小与开挖岩体应变能有定量数学关系。

(2) 瞬态卸荷诱发振动的峰值与被开挖岩体应

变能密度的二次方根成正比,且开挖卸荷体积越大,诱发振动越强烈。

(3) 相比整个实测振动以及分离得到的爆炸荷载产生的振动,瞬态卸荷诱发振动衰减的速度慢得多;与 Lu-Hustrulid 衰减公式相比,本文提出的衰减公式应用范围更广,使用精度更高。

以上基于能量角度的研究揭示了深部岩体开挖瞬态卸荷诱发振动的成因机制,改进了其预测方法,该衰减公式在深部采矿中的矿山塌陷诱发地震的预报及隧道安全性判定等方面的应用值得开展进一步研究。

参考文献

- [1] ABUOV M G, AITALIEV S M, ERMEKOV T M, et al. Studies of the effect of dynamic processes during explosive break-out upon the roof of mining excavations[J]. **Soviet Mining Science**, 1989, 24(6): 581—590.
- [2] CARTER J P, BOOKER J R. Sudden excavation of a long circular tunnel in elastic ground[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1990, 27(2): 129—132.
- [3] HE M C, MIAO J L, FENG J L. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2010, 47(2): 286—298.
- [4] DIEDERICHS M S, KAISER P K. Tensile strength and abutment relaxation as failure control mechanisms in underground excavations[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(1): 69—96.
- [5] MARTINO J B, CHANDLER N A. Excavation-induced damage studies at the underground research laboratory[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1413—1426.
- [6] 徐则民, 黄润秋, 范柱国, 等. 长埋隧道岩爆灾害研究进展[J]. **自然灾害学报**, 2004, 13(2): 16—24.
XU Ze-min, HUANG Run-qiu, FAN Zhu-guo, et al. Research of rock burst disaster in deep tunnel[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2004, 13(2): 16—24.
- [7] 姚勇, 何川. 并设小净距隧道爆破振动响应分析及控爆措施研究[J]. **岩土力学**, 2009, 30(9): 2815—2822.
- YAO Yong, HE Chuan. Analysis of blasting vibration response of parallel set small clear-distance tunnels and blasting control measures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2815—2822.
- [8] 王明年, 潘晓马, 张成满, 等. 邻近隧洞爆破振动响应研究[J]. **岩土力学**, 2005, 25(3): 412—414.
WANG Ming-nian, PAN Xiao-ma, ZHANG Cheng-man, et al. Study of blasting vibration influence on close-spaced tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 25(3): 412—414.
- [9] 夏祥, 李俊如, 李海波, 等. 爆破荷载作用下岩体振动特征的数值模拟[J]. **岩土力学**, 2005, 26(1): 50—56.
XIA Xiang, LI Jun-ru, LI Hai-bo, et al. UDEC modeling of vibration characteristics of jointed rock mass under explosion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(1): 50—56.
- [10] CAI M. Influence of stress path on tunnel excavation response——Numerical tool selection and modeling strategy[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2008, 23(6): 618—628.
- [11] KAISER P K, TANG C A. Numerical simulation of damage accumulation and seismic energy release during brittle rock failure——part II: Rib pillar collapse[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1998, 35(2): 123—134.
- [12] 张志呈, 肖正学, 胡健, 等. 岩体爆震传播时应力场的波导效应实验研究[J]. **化工矿物与加工**, 2005, 34(7): 21—24.
ZHANG Zhi-cheng, XIAO Zhen-xue, HU Jian, et al. Experimental study on the wave transmission effect of the initial stress field as transmitting of quake wave from rock blasting[J]. **Industrial Minerals and Processing**, 2005, 34(7): 21—24.
- [13] 卢文波, 周创兵, 陈明, 等. 开挖卸荷的瞬态特性研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(11): 2184—2192.
LU Wen-bo, ZHOU Chuang-bing, CHEN Ming, et al. Research on transient characteristics of excavation unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2184—2192.
- [14] 严鹏, 卢文波, 陈明, 等. 初始地应力场对钻爆开挖过程中围岩振动的影响研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(5): 1036—1045.

- YAN Peng, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Study on impactation of initial in-situ stress field on vibration of surrounding rock during excavation with drilling and blasting method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(5): 1036—1045.
- [15] YANG J H, LU W B, CHEN M, et al. Microseism induced by transient release of in situ stress during deep rock mass excavation by blasting[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2003, 46(4): 859—875.
- [16] LU W B, HUSTRULID W. The Lu-Hustrulid approach for calculating the peak particle velocity caused by blasting[C]//Proceeding of the 2nd World Conference on Explosive and Blasting Technique. Prague, Czech: [s. n.], 2003: 486—488.
- [17] 范勇, 卢文波, 严鹏, 等. 地下洞室开挖过程围岩应变能调整力学机制[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3580—3586.
- FAN Yong, LU Wen-bo, YAN Peng, et al. Mechanism of the adjustment of strain energy of surrounding rock mass during excavation of underground caverns and tunnels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(12): 3580—3586.
- [18] COOK M A, COOK U D, CLAY R B L. Behavior of rock during blasting[J]. **Trans. Soci. Min. Engrs**, 1966, 1: 17—25.
- [19] 潘岳, 王志强. 圆形洞室岩爆的折迭突变模型[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 175—182.
- PAN Yue, WANG Zhi-qiang. Fold catastrophe model of circular tunnel rockburst[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 175—182.
- [20] 陈明, 胡英国, 卢文波, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞爆破开挖损伤特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 172—177.
- CHEN Ming, HU Ying-guo, LU Wen-bo, et al. Blasting excavation induced damage characteristics of diversion tunnel for Jinping cascade II hydropower station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp. 2): 172—177.
- [21] 李洪涛, 卢文波, 舒大强, 等. 爆破地震波的能量衰减规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 3364—3369.
- LI Hong-tao, LU Wen-bo, SHU Da-qiang, et al. Study of energy attenuation law of blast-induced seismic wave[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp. 1): 3364—3369.
-
- 上接第 501 页
- [14] 范广勤. 岩土工程流变力学[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [15] 陈宗基. Structure mechanics of clays[J]. 中国科学, 1959, 8(1): 41—45.
- CHEN Zong-ji. Sturcture mechanics of clays[J]. **Science China**, 1959, 8(1): 41—45.
- [16] 村山朔郎, 柴田彻. 关于黏土的流变特性[M]. 石朝辉译. 南京: 南京水利科学研究院, 1956.
- [17] 黎克日, 康文法. 岩体中泥化夹层的流变试验及其长期强度的确定[J]. 岩土力学, 1983, 4(1): 40—46.
- LI Ke-ri, KANG Wen-fa. Creep testing of thin interbedded clayey seams in rock and determination of their long-term strength[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1983, 4(1): 40—46.
- [18] 舒芝琴. 长期强度在工程上的应用[J]. 水文地质工程地质, 1986, 5: 23—25.
- SHU Zhi-qin. Long-term strength applied on engineering[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 1986, 5: 23—25.
- [19] BHAT D R, BHANDARY N, YATABE R. Residual-state creep behavior of typical clayey soils[J]. **Natural Hazards**, 2013, 1—18.
- [20] 李海军. 甘肃省舟曲县锁儿头滑坡防治工程勘察报告[R]. 兰州: 甘肃地质灾害防治工程勘查设计院, 2012.
- [21] 中华人民共和国建设部. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [22] 煤炭科学研究总院抚顺分院. MT/T 795—1998 岩土直剪流变特性试验方法[S]. 北京: 中国煤炭行业出版社, 1998.
- [23] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 1—20.
- CHEN Zong-ji. The mechanical problems for the long-term stability of underground galleries[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1982, 1(1): 1—20.