

动力扰动对岩爆的影响分析*

王贤能 黄润秋

(成都理工学院工程地质研究所 成都 610059)

提 要 弹性应变能的积聚是产生岩爆的内因,但岩爆的发生往往具有外界因素的扰动. 据些首先分析了动力扰动对岩爆触发的机理,然后结合某水电站引水隧洞岩爆实例,利用复反分析原理计算了动力扰动过程对岩爆的影响.

关键词 岩爆 动力扰动 影响机理 数值模拟

自 1738 年英国首次报导了岩爆现象以来,此后世界各地陆续记录并作了报导. 近年来,这种地质灾害在我国铁道、采矿、水电工程建设中逐渐突出,引起了岩石力学界和工程地质界的高度重视. 然而,由于岩体的复杂性和各种环境条件的影响,岩爆理论研究工作进展缓慢. 至今,无论在理论研究上或在实际应用上,都还不成熟. 正如英国岩石力学教授布朗(E. T. Brown)1983 年 10 月在一次专题研讨会上指出的那样:“甚至在岩爆定义上达到一致意见,都是困难的”.

对岩爆的定义有很多. 比如,张倬元教授等认为岩爆乃是洞室围岩的一种伴有突然大量潜能的剧烈脆性破坏^[1];陶振宇教授认为,岩爆是由于岩石内部积聚了很大的弹性应变能,一旦遇到机械作用的扰动时,就会突然地释放出来,形成岩爆. 这两种认识的共同点,都认为岩体内部积聚有大量的变形能或应变能,是产生岩爆的主要原因. 大多数的研究工作也正是围绕着岩石的聚能性进行的. 但是储存有大量的应变能仅仅是发生岩爆的必要条件,必须还有外界因素的扰动才能导致岩爆的发生,这就是陶振宇教授强调的“机械扰动”的影响. 隧洞施工时的外界扰动因素有很多,如放炮、机械振动、相邻岩爆产生的应力波、地震等,这些外界扰动对围岩的作用实际上是一种随机动荷载. 关于这方面的研究,国内外还不多,基于此,本文结合某水电站引水隧洞的岩爆实例,利用数值模拟方法,定量分析了动力扰动全过程对岩爆的影响.

1 应力波的反射机制及对岩爆的影响

动力扰动在岩体中造成的动应力,实质上是岩体中传播的一种应力波.

应力波在穿过某些地质界面时,由于两侧介质特性的差异,将产生反射波. 界面处的反射波应力(σ_r)、透射波应力(σ_t)与入射波应力(σ_1)之间的关系有^[1]:

$$\sigma_t = \frac{2\sigma_1}{n+1}, \sigma_r = \frac{\sigma_1(1-n)}{n+1} \quad (1)$$

式中 $n = \sqrt{\rho_1 E_1 / \rho_2 E_2}$, ρ_1, ρ_2 及 E_1, E_2 分别为界面两侧岩体的密度和弹性模量.

* 国家杰出青年科学基金(编号:49525204)和教育部跨世纪优秀人才计划基金资助项目.

收稿日期:1998-03-15,改回日期:1998-03-29.

当应力波从相对坚硬的岩体传入较软弱的岩层中,即 $E_1 > E_2$, 由于 $n > 1$, 产生的反射波为拉伸波, 则在界面处产一拉应力. 并且, 两侧介质的弹模相差越大, 拉应力值就越高, 这种性质的拉应力对岩体的稳定性极为不利.

岩体中的裂隙面, 尤其是具有一定张开度的或被充填的裂隙, 其本身就是介质特性突变部位, 也将产生反射波应力, 促进其被拉裂.

在隧道工程的开挖过程中, 由爆破产生的压缩波到达隧道围岩洞壁时反射成为拉伸波, 此拉伸波与随之而来的入射波相互作用或由不同自由表面的反射波相互作用, 在洞壁岩体内产生拉应力. 在原应力和反射波应力的共同作用下, 一旦岩体中的拉应力达到或超过其抗拉强度, 则将导致岩爆发生. 这种效应可称为应力波的边界效应.

2 动力扰动对岩爆影响的数值模拟

2.1 动力响应的复反应分析原理

岩爆是由于动力扰动(主要指的是爆破影响)触发的, 这种随机动荷载的定量计算可采用下述有限元方程

$$[K]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [M]\{u\} = F(t) \quad (2)$$

式中 $[M]$ 为质量矩阵, $\{u\}$ 为加速度向量, $[C]$ 为阻尼矩阵, $\{\dot{u}\}$ 为速度向量, $[K]$ 为刚度矩阵, $\{\ddot{u}\}$ 为位移向量, $F(t)$ 为计算模型中爆破动荷载.

求解(1)式的经典方法有很多, 如振型迭加法和直接积分法, 这些方法不能很好地处理阻尼问题, 而采用复反应法就能很好的处理这个问题, 其基本原理请参阅文献[2].

在复反应法中, 岩土体的粘弹性可采用复弹性模量 E^* 和能量损耗系数 η 来描述

$$E^* = E + iE', \quad (3)$$

$$\eta = E'/E \quad (4)$$

式中 E 为杨氏弹性模量, 反应岩土体的弹性性质; E' 为损耗模量, 反应岩土体由于变形而损耗能量的特性.

2.2 岩爆发生准则的选取

根据国内外对岩爆的实例介绍, 岩爆多呈两种破坏状态: 劈裂破坏和剪切破坏. 这两种破坏形式是由于围岩所处的应力水平不同造成的. 而岩石的脆性断裂和极限破坏时的应力状态分别服从于格里菲斯(Griffith)准则和莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)准则.

值得指出的是, Griffith 准则只反映岩石的脆性断裂, 不能反映是否发生岩爆. 岩爆发生时应满足裂缝尖端的能量释放率 G 大于临界能量释放率 G^c , 此时岩石释放的多余能量成为裂缝高速扩展、产生应力波扩散及供应破坏后的岩片弹射脱离母体的能源. 因此, Griffith 准则用作岩爆准则有一定的近似性.

同样, 围岩应力达到峰值后, Mohr-Coulomb 准则只是产生剪切破坏型岩爆的强度准则. 岩爆发生时还必须满足岩石失稳准则, 即岩石失稳系统中微裂隙呈应变软化也是岩爆发生的必要条件. 根据大量脆性岩石样品试验结果, 这类岩石达到峰值后都呈应变软化性质. 这说明, 对于脆性岩石, 强度准则与稳定准则具有一致性.

2.3 静力作用下岩爆的数值模拟

取某水电站(该电站位于黔桂交界南盘江下游的广西隆林县和贵州安龙县境内)* I 主洞 6+500m 断面处的岩爆作为计算实例. 该处隧洞埋深 440m, 水平地应力 σ_1 大致为垂向地应力 σ_2 的 1.3 倍. 图 1 为静力计算模型, 模型尺寸为 $60 \times 60\text{m}^2$, 隧洞半径取为 5.0m, 顶部作用垂直荷载为 11.3MPa, 右边界作用水平荷载 14.7MPa; 网格全部剖分成四边形单元. 计算参数如表 1 所示.

表 1 岩石力学参数取值表

Table 1 Values of mechanical parameters for rock

参数名称	取值
容重 $\gamma(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.76
弹性模量 $E(\text{MPa})$	3×10^4
泊松比 μ	0.30
抗拉强度 $\sigma_t(\text{MPa})$	3.00
内聚力 $C(\text{MPa})$	7.75
内摩擦角 $\phi(^{\circ})$	68
损耗系数 $\eta(\%)$	1.3

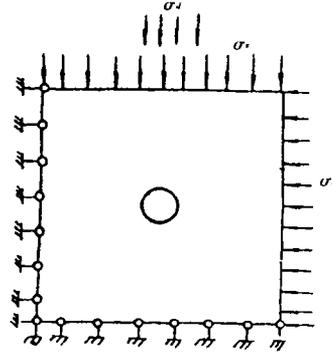


图 1 计算模型图

Fig. 1 Model for calculation

假定岩石的应力应变是线性的, 利用线弹性有限元计算上述模型的静应力场. 有限元计算过程中, 采用 3×3 高斯积分法求四边形单元刚度矩阵. 对任一高斯点, 求出应力分量 $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$ 后, 转成应力主值 σ_1 和 σ_3 , 利用这两个主值判断各高斯点是否发生岩爆. 计算得到的岩爆位置见图 2(a) 所示. 图 2(b) 为实测岩爆位置图. 从图中可以看出, 计算得到的岩爆位置与实测岩爆位置吻合.

值得出的是, 该断面处的岩爆发生只满足 Griffith 准则, 而不满足 Mohr-Coulomb 准则. 岩爆发生的最大深度为 57cm, 平均深度为 20~40cm, 与实测资料一致.

对任一四边形单元, 若定义高斯点邻域面积, S_s 为四边形单元面积.

这样计算出 * I 主洞 6+550m 断面处岩爆发生的体积为 $6.04\text{m}^3/\text{m}$.

2.4 动力扰动对岩爆的影响

在通常的动力分析中, 为简化计算, 将动荷载假设成一脉冲荷载^[3]. 事实上, 由爆破产生的随机荷载与地震产生的地震波相似. 本文计算采用图 3 所示的动载形式. 动载全过程作用时间为 1.6s, 最大幅值为 20MPa, 取 16 个点作为计算荷载 $F(t)$, 如图 3 所示. 在用动力有限元法分析

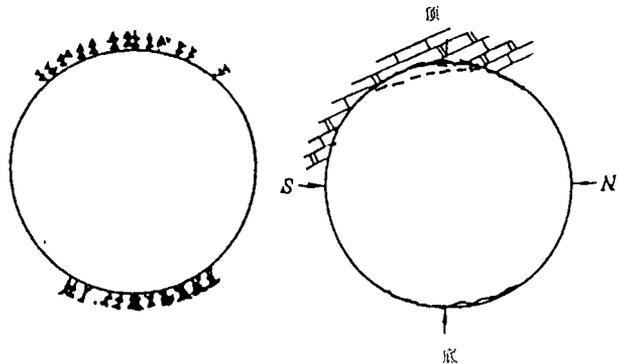


图 2 隧洞岩爆位置计算结果与实测结果比较

Fig. 2 Comparison of calculation and measured position for rock burst

爆破对岩爆的影响时,最好采用三维数值模拟,这样动荷载的作用位置便是确定的. 本文采用的是二维数值模拟,所取计算剖面离掌子面有一定的距离,因此施加爆破动荷载的位置很难确定. 作为近似分析,这里将动荷载(σ_d)加在隧洞顶部(如图 1 所示).

动荷载作用过程中,动应力是不断变化的,应力值大小、方向及拉压性质都不同. 当动应力与静应力叠加后,围岩(特别是洞壁处)的应力状态最易满足 Griffith 准则或 Mohr-Coulomb 准则,岩爆也容易发生. 图 4 为动载全过程计算断面岩爆体积随时间变化曲线.

图 3 所示的动载过程大致可分为两个阶段,0.00~0.80 秒期间为正荷载阶段,0.8~1.6 秒期间为负荷载阶段. 总体上说,当动荷载为正时,通过围岩入射到洞壁的压缩波经过反射变成拉伸波,产生拉应力,这种附加拉应力与围岩原应力叠加后,岩爆体积增加;并且正荷载越大,岩爆范围增加越大,当最大正荷载为 20MPa,岩爆体积最大,为 6.89m³/m (如图 4 所示). 当动荷载为负时,通过围岩入射到洞壁的拉伸波经过反射变成压缩波,产生压应力,这种附加压应力对围岩的稳定性有利. 于是,岩爆体积减小. 在 0.9~1.6 秒负荷载作用阶段,负荷载越大,岩爆范围减小得越多. 第 1.0、1.1、1.2 秒时刻负荷载较大,介于 12~18MPa 之间,对应的岩爆体积较小,都为 5.85m³/m.

此外,在动荷载作用过程中,荷载局部的变化也引起岩爆范围发生变化. 比如,在前 0.6 秒正荷载作用阶段,第 0.2 秒时刻的荷载最小,岩爆范围也最小(如图 4 所示). 在第 0.6~0.9 秒时间,荷载正负交替变化,岩体受拉压交替作用,第 0.8 秒时刻的荷载虽然是正荷载,但对应的岩爆范围却是最小的,为 5.71m³/m.

在动荷载作用过程中,岩爆最大深度为 57cm,平均深度为 20~40cm,与静力判断岩爆相比,没有多大变化. 这里的岩爆范围是指潜在岩爆范围. 然而,用 Griffith 准则判断岩爆的发生具有一定的近似性,该准则只能判断能量释放率 G 大于临界值 G_c 的情形,因此,图 4 的岩爆体积是指潜在的岩爆体积,并不指实际岩爆发生时岩片弹离母体的体积. 对于未脱离母体的部分,当应力发生变化时,可能又变成稳定岩体了. 因此,随动荷载变化,岩爆范围也在变化.

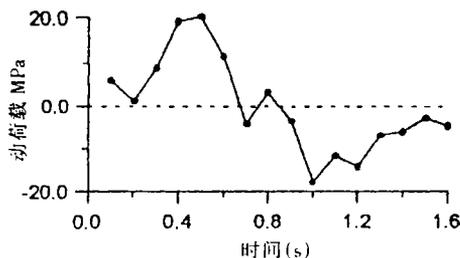


图 3 动荷载作用过程曲线

Fig. 1 Curve of dynamic load versus time

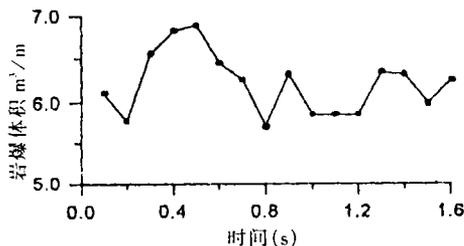


图 4 岩爆体积随时间变化曲线

Fig. 1 Curve of rock burst volume versus time

4 结 论

影响岩爆的因素有很多,有内因也有外因. 其中,影响岩体聚集能量的各因素是内因,如围岩应力的的大小、岩石性质、岩体结构特征等,而各种动力扰动因素则是外因. 当岩体中积聚有大量的弹性应变能时,在动力扰动的影响下将触发岩爆. 本文通过有限元计算表明,动力扰动不仅仅是触发岩爆,还使岩爆规模发生变化. 总体上说,当入射波为压缩波时,岩爆范围增大,而当入射波为拉伸波时,岩爆范围减少.

参 考 文 献

- [1] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理. 北京:地质出版社,1992. 86~298.
- [2] 黄润秋,王贤能. 深埋隧道工程山体动应力响应的复反应分析. 工程地质学报,1997,5(1):1~5.
- [3] 赵辛源. 隧道爆破开挖动力分析模型和有关参数选取分析. 见:岩石力学在工程中的应用. 北京:知识出版社,1989. 373~380.

第一作者简介 王贤能,男,28岁,工学博士. 主要从事岩土力学与工程方面的理论与实践工作,多次获国家及省、部级奖励,已在国内外发表学术论文20余篇.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE DYNAMIC DISTURBANCE ON ROCK BURST

Wang Xianneng Huang Runqiu

(Institute of Engineering Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract

There are many factors having influences on rock burst, which can be divided into internal and external ones. When large amount of elastic energy is accumulated in the rock mass, rock burst will be triggered by dynamic disturbance. In this paper, combining with a case of rock burst in a deep lying tunnel, the dynamic stress caused by the blasting is calculated by using Complex Analysis, then Griffith criterion and Mohr-Coulomb criterion are used to judge rock burst. The results show that, the dynamic disturbance not only can trigger rock burst, but also can change the scale of rock burst. Generally, if the wave of incidence is compressive, the scale of rock burst will enlarge, and if the wave of incidence is tensile, the scale of rock burst will descend.

Key words rock burst, dynamic disturbance, mechanism, numerical simulation