

岩质边坡施工爆破振动加速度近似计算方法*

何蕴龙

(武汉水利电力大学 武汉 430072)

提要 在大量有限元计算成果的基础上,经过详尽的分析,归纳总结出岩质边坡爆破振动加速度的近似计算方法。该近似算法能较好地体现岩质边坡的动力响应特征,方法简便适用,对实际工程应用有一定的参考价值。

关键词 岩质边坡,爆破,动力响应,加速度,近似算法

1 引言

岩质边坡开挖时在爆破振动激励下的动力响应规律研究一直是矿山、水电等部门的重要科研课题。从60年代开始,长沙矿冶研究院就在大连石灰石矿结合大区多排微差爆破试验,系统地进行了爆破振动的观测研究。随后又相继在眼前山铁矿、南芬铁矿、东鞍山铁矿等5个露天矿进行了爆破振动观测。其他一些矿山研究院也在不同的大型露天矿山进行了大量爆破观测研究。水电部门结合水电站建设中的爆破开挖工程也进行了大量的岩质边坡施工爆破振动现场观测工作。比如北京水科院近年在李家峡水电站岩质高边坡开挖过程中进行了系统的现场爆破振动观测。所有这些现场实测资料为岩质边坡施工爆破振动响应的研究提供了可靠的依据。另外,许多学者运用波动理论研究爆破产生的振动波在岩质边坡中的衰减规律,取得了不少卓有成效的成果^[1,2]。

科技工作者长期以来所进行的上述工作对岩质边坡爆破振动响应规律的认识作出了重大的贡献。但是,在实际工程中尚缺乏易于为工程技术人员所接受、又能在一定程度上体现岩质边坡爆破振动动力响应特征的简便易行的近似计算方法,也未见到有关这个问题的国内外公开发表的文献。本文在大量有限元动力分析的基础上,研究了边坡坡度、坡体弹模以及爆源位置等因素对岩质边坡爆破振动响应的影响,经归纳总结提出了一个计算岩质边坡爆破振动加速度的近似计算方法,对实际工程应用有一定的参考价值。

2 有限元动力分析方法简介

采用二维动力有限元法进行岩质边坡的爆破振动动力响应分析,结构运动方程为:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M][S]\{a_0\} \quad (1)$$

式中, $[M]$ —— 质量矩阵;

1994年7月11日收到初稿,1994年11月29日收到修改稿。

* 本文属国家八五科技攻关项目

[C] —— 阻尼矩阵;

[K] —— 刚度矩阵;

[S] —— 衰减因子矩阵;

$\{U\}, \{\dot{U}\}, \{\ddot{U}\}$ —— 分别为节点位移、速度和加速度列阵;

$\{a_b\} = \begin{cases} a_{br} \\ a_{bv} \end{cases}$ —— 爆源振动加速度。

衰减因子矩阵 [S] 是为考虑爆破振动随爆心距增大而逐渐衰减的特点特别引进的。衰减矩阵元素为对应节点的振动加速度衰减因子, 其值小于 1.0, 随爆心距增大而减小。

本文采用反应谱法进行岩坡的动力分析。反应谱法不是针对某一特定的爆破振动过程分析岩坡动力响应过程, 而是针对统计意义下岩坡动力响应规律进行分析, 这也正是我们的目的。反应谱采用的是文献[3]推荐的爆破振动加速度反应谱。这个反应谱是在近 200 条爆破实测地震记录的基础上, 通过外包络方式计算整理出来的, 具有较好的代表性和可靠性。

采用的计算程序是专门为本课题编制的爆破振动二维有限元动力分析程序。单元为平面 8 节点高精度等参单元, 特征方程的求解采用子空间迭代法, 质量矩阵采用集中质量矩阵。爆源振动在水平和竖向的振动加速度相同。

3 岩质边坡爆破振动加速度分布

施工爆破作用下, 岩质边坡的动力响应受很多因素的影响, 要精确求解是十分困难的。岩体弹模、边坡坡度、爆源位置和一次起爆药量及岩坡的岩体地质结构等因素对岩坡的爆破振动响应均有很大的影响。

实际工程中岩质边坡是非常复杂的, 不仅外形不可能很规则, 而且岩体内部存在着明显的非均质性和非连续性。这些因素对岩坡的动力特性和爆破振动响应都有很大的影响。全面考虑上述这些因素, 将使问题变得极其复杂以致难以求解。我们这里仅按均质、连续、外形规则的简化边坡模型进行研究, 以期获得一些初步规律。

我们主要考察边坡坡度、坡体弹模以及爆源处于坡面上不同位置等因素对岩质边坡爆破振动响应的影响。按坡度 1:0.5—1:3.0, 弹模 $0.6 \times 10^4 \text{MPa}$ — $9.0 \times 10^4 \text{MPa}$, 爆源位置由坡脚至坡顶共选取 31 个计算方案进行有限元动力计算。图 1 和图 2 为其中一个计算方案的有限元网格图和坡体最大水平振动加速度等值线图。对岩质边坡进行动力分析时, 假定爆源振动加速度最大值为 1.0m/s^2 。如果爆源振动加速度为 B , 则将计算所得的岩坡坡体各点最大振动加速度扩大 B 倍即可。通过对大量有限元计算成果的分析, 对岩质边坡爆破振动加速度分布规律获得了一些有益的认识:

(1) 岩质边坡爆破振动加速度随爆心距增大呈逐渐衰减的规律。在距爆心约 40m 范围内振动加速度急剧衰减, 在此范围之外振动加速度的衰减显著变缓。

(2) 依有限元分析结果, 可按爆破振动加速度分布规律将坡体划分为三个不同的区: I 区, II 区和 III 区。在三个区内振动加速度在距爆心 40m 范围内都呈急剧衰减, 衰减规律基本相同。但在急剧衰减段以外, 各区振动加速度的衰减却表现出各自不同的衰减规律。

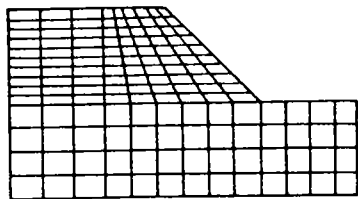


图 1 有限元计算网格图
Fig.1 The mesh for FEM

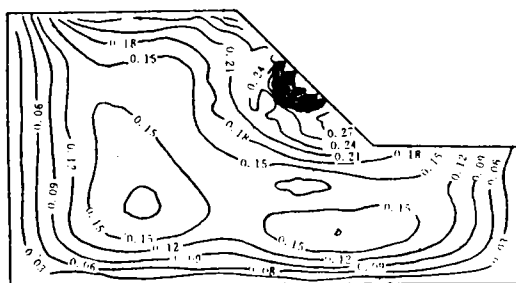


图 2 振动加速度分布图
Fig.2 The distribution of the accelerations

如图 3 所示，直线 AB 与坡面所夹区域为 I 区。B 为爆心点，AB 为坡面与水平线所成角的角平分线。BC 与坡面呈 15°，CD 为地面以下 30m 与地面平行的直线。线段 BCD 与坡面及地面所夹区域为 II 区，I、II 区以外的区域则为 III 区。

在 I 区内，振动加速度随爆心距的增大而减小，至坡顶附近振动加速度值又有所回升。这种坡顶振动加速度值的回升是现场爆破实测所观察到的坡体对振动加速度的放大效应。

在 III 区内，振动加速度随爆心距的增大而减小。在急剧衰减段以外，振动加速度缓慢衰减，直至加速度降低至某一下限值后，在较长的距离内加速度几乎不再下降。

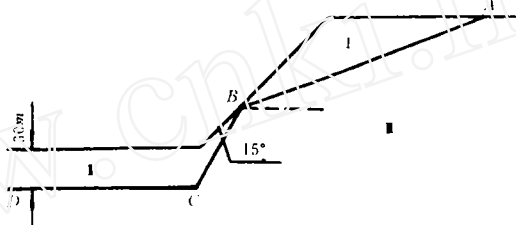


图 3 爆破振动加速度分区图
Fig.3 The regions divided for vibrating accelerations in the rock slope

在 II 区内，振动加速度衰减规律与 III 区基本相同，但衰减更为缓慢一些，衰减的加速度下限值也比 III 区略大一些。

(3) 改变岩质边坡的坡度，边坡 I 区内爆破振动加速度受其影响较大，II 区、III 区的振动加速度却基本不受边坡坡度的影响。坡度变陡，I 区内靠坡顶的振动加速度增大，即边坡对振动加速度的放大作用加强；反之，随坡度变缓，这种放大作用减弱。通过对有限元计算成果的分析，我们注意到当边坡坡度陡于 1:2 时，边坡对爆破振动的放大效应较为显著。而当坡度比缓于 1:2 时，并不存在明显的放大效应，这时 I 区振动加速度的衰减规律与 II 区基本相同，即 I 区退化为 II 区。

(4) 改变坡体弹模，随弹模增大坡体刚度增大，固有频率增大，坡体爆破振动加速度随之增大。爆破属高频激励，爆破振动加速度所表现出的随弹模增大而增大的规律是符合动力学规律的。

(5) 改变爆源在坡面上的位置，II 区、III 区振动加速度衰减规律因此而发生的变化是很微小的，但 I 区受其影响较大，随着爆源接近坡顶，I 区内爆破振动加速度显著增大。

4 爆破振动加速度近似计算方法

在大量有限元动力计算成果的基础上，通过详尽的分析，我们归纳整理出一个计算岩质边坡爆破振动加速度的近似计算方法。

首先，可根据岩坡坡体的弹模(岩体的平均弹模)由表 1 查出特征加速度 a 、 a_1 、 a_2 。关于特征加速度的含义见图 5—图 9。

表 1 特征加速度表

Table 1 The table for characteristic accelerations

弹模 $E(\times 10^4\text{MPa})$	$a(\text{m/s}^2)$	$a_1(\text{m/s}^2)$	$a_2(\text{m/s}^3)$
$E < 1.0$	0.22	0.15	0.07
$1.0 \leq E \leq 3.0$	0.30	0.20	0.12
$E > 3.0$	0.35	0.25	0.15

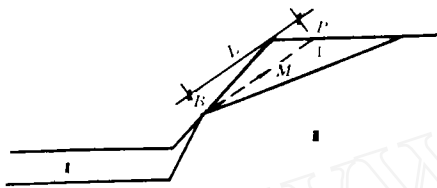


图 4 I 区图
Fig. 4 The region I

下一步按所求质点(或某一岩块形心点)位于边坡的哪一个区，按不同的方法计算其爆破振动加速度。有一点需要再次说明，我们这里所求得的振动加速度是在假设爆源振动加速度为 1.0m/s^2 时的数值，如果震源最大振动加速度为 B ，则将计算所得的坡体振动加速度值扩大 B 倍即可。

如图 3 所示，将岩质边坡划分为 I、II、III 三个区，在各区内爆破振动加速度遵循各自不同的衰减规律，现分别叙述各个区内爆破振动加速度的计算方法：

4.1 I 区

欲计算 I 区内任一点 M 的爆破振动加速度，过爆心点 B 和 M 点作直线并延长至坡顶，与坡顶面交点为 P。直线 BP 的长度为 L ，如图 4 所示。

当岩质边坡坡度陡于 1:2 时，振动加速度按下述方法求得。

(1) 当 $L \leq 60\text{m}$ 时，M 点的振动加速度根据爆心距 S 按图 5 求得。图 5 中 B 为爆心点，图中 b 按下式计算：

$$b = 0.75a + 0.25 \tag{2}$$

由表 1 查得特征加速度 a ，根据上式计算出 b ，则图 5 完全确定。根据 M 点的爆心距 S 即图 5 中距 B 点的距离即可求得 M 点的振动加速度。

(2) 当 $60\text{m} < L < 100\text{m}$ 时，M 点的振动加速度根据 M 点的爆心距 S 按图 6 求得。图中 c 由下式计算：

$$c = \frac{1}{3}(10 - 0.1L)(a - a_1) + a_1 \tag{3}$$

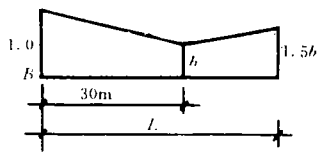


图 5 I 区加速度计算图 1

Fig. 5 The diagram No. 1 for the vibrating accelerations in the region I

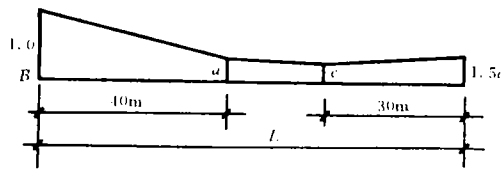


图 6 I 区加速度计算图 2

Fig. 6 The diagram No. 2 for the vibrating accelerations in the region I

式中 a 、 a_1 由特征加速度表(表 1)查得。

(3) 当 $L \geq 100\text{m}$ 时, 振动加速度根据爆心距 S 按图 7 求得。图中特征加速度 a 、 a_1 根据坡体弹模由表 1 查得。

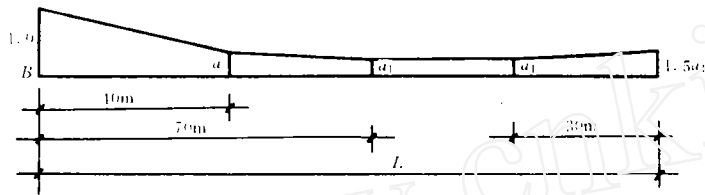


图 7 I 区加速度计算图 3

Fig. 7 The diagram No. 3 for the vibrating accelerations in the region I

当岩质边坡的坡度缓于 1:2 时, I 区退化为 II 区, I 区内的爆破振动加速度按 II 区的求解方法求得。

4.2 II 区

II 区内任一点 i 的爆破振动加速度, 根据 i 点的爆心距 S 按图 8 求得。图中 B 为爆心点, 特征加速度 a 、 a_1 由表 1 查得。根据 i 点的爆心距 S 求该点振动加速度的具体计算公式如下:

(1) 当 $S \leq 40\text{m}$ 时, i 点的振动加速度:

$$a_i = 1 - \frac{S}{40}(1 - a) \quad (4)$$

(2) 当 $40\text{m} < S < 100\text{m}$ 时, i 点的振动加速度:

$$a_i = \frac{5}{3}a - \frac{2}{3}a_1 - \frac{S}{60}(a - a_1) \quad (5)$$

(3) 当 $S \geq 100\text{m}$ 时, i 点的振动加速度 a_i 等于特征加速度 a_1 。

4.3 III 区

III 区内的爆破振动加速度, 根据爆心距 S 按图 9 求得。图中 B 为爆心点, 特征加速度

a_1, a_2 由表 1 查得。具体计算公式如下：

(1) 当 $S \leq 40\text{m}$ 时, i 点的振动加速度:

$$a_i = 1 - \frac{S}{40}(1 - \alpha) \tag{6}$$

(2) 当 $40\text{m} < S < 100\text{m}$ 时, i 点的振动加速度:

$$a_i = \frac{5}{3}a - \frac{2}{3}a_2 - \frac{S}{60}(a - a_2) \tag{7}$$

(3) 当 $S \geq 100\text{m}$ 时, i 点的振动加速度 a_i 等于特征加速度 a_2 。

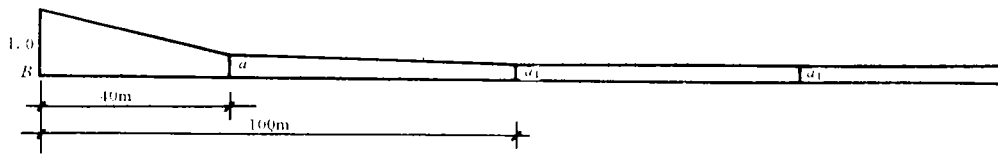


图 8 II 区加速度计算图

Fig. 8 The diagram for the vibrating accelerations in the region II

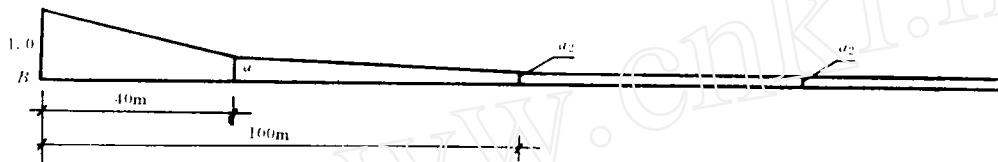


图 9 III 区加速度计算图

Fig. 9 The diagram for the vibrating accelerations in the region III

以上所述为爆源最大振动加速度为 1.0m/s^2 时, 岩质边坡坡体爆破振动最大加速度的计算步骤和方法。坡体各点爆破振动水平最大加速度与竖向最大加速度按相等考虑。实际上据有限元计算成果, 竖向加速度规律性较差, 按与水平加速度相等考虑误差不大, 却使计算方法大为简化。

爆源最大振动加速度 B 可取爆心距 R 为 10m , 采用我们所熟知的公式:

$$B = K(Q^{1/3}/R)^{\alpha} \tag{8}$$

来计算。

式中 K 和 α 按经验分别在下述范围内取值:

K 110—210

α 1.0—2.0

Q 为最大一次齐爆药量(kg)。

对应于爆源最大振动加速度 B , 坡体爆破振动最大加速度按前述方法计算值扩大 B 倍即可。

5 结语

施工爆破振动作用下岩质边坡的动力稳定性,是一个具有实际工程意义的重要课题。本文采用有限元动力分析方法,对岩质边坡爆破振动加速度的分布规律进行了分析,探讨了坡度、坡体弹模、爆源位置等因素对坡体爆破振动加速度分布的影响。首次提出了分区计算岩质边坡爆破振动加速度、边坡动力放大效应和临界坡度等概念。本文提供的爆破振动加速度近似计算方法,使用简便,概念明确,能够在一定程度上较好地体现岩质边坡的爆破振动动力响应特征。当然,由于未考虑实际岩质边坡的非均质性、非连续性、岩体内软弱结构面等因素的影响,按本算法所得结果对有些实际工程会有较大的误差。如果经过实际应用积累一定的经验,对之进一步修正完善,则有可能为实际工程应用提供一个计算岩质边坡爆破振动加速度的简易计算方法。

参 考 文 献

- 1 杨桂桐: 爆破振动效应及边坡动态分析. 爆破, 1989; (4): 63-70
- 2 北京水电科学研究所: 李家峡层状岩质高边坡开挖爆破振动效应及动力稳定分析研究. 1994
- 3 霍永基, 王湘钧, 费骥鸣: 爆破地震效应及评定方法探讨. 见:《土岩爆破文集》第二卷, 北京: 科学出版社, 1989
- 4 张雪亮, 黄树棠: 爆破地震效应. 北京: 地震出版社, 1981
- 5 李翼祺, 马素贞: 爆炸力学. 北京: 科学出版社, 1992
- 6 波林格 G. A. 著, 刘锡芸, 熊建国译: 爆炸振动分析. 北京: 科学出版社, 1975
- 7 吴其苏: 露天矿台阶深孔爆破振动效应. 爆破, 1986; (2): 31-38

AN APPROXIMATE CALCULATION METHOD FOR THE ACCELERATIONS IN THE ROCK SLOPE UNDER BLASTING CONSTRUCTION

He Yunlong

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan 430072)

Abstract Based upon a great deal of calculation data acquired in dynamic analysis by finite element method, an approximate calculation method is proposed in this paper for the vibrating accelerations in the rock slope under blasting construction. The method is simple and convenient for use. It has certain significance for the solution of practical engineering problems.

Key words rock slope, blast, acceleration, dynamic response, approximate method