

爆破振动作用下边坡极限平衡分析的 等效加速度计算方法

陈明, 卢文波, 舒大强, 周创兵

(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)

摘要: 基于波动理论, 研究边坡相同质点振动速度不同爆破振动频率下质点位移、振动加速度及边坡应力状态, 结果表明相同质点振动速度下, 边坡峰值振动位移与频率成反比、峰值振动加速度与频率成正比, 而边坡体应力峰值基本相同, 质点振动加速度与边坡体应力状态没有直接的相关性, 振动频率越高, 位移、加速度及应力峰值沿边坡深度变化越快; 综合考虑振动频率、加速度及边坡体应力状态的相互关系, 基于边坡体中相同峰值振动速度产生相同的峰值应力, 得到由高频爆破振动波加速度向低频振动波加速度的转换方法, 提出边坡极限平衡分析法的爆破振动等效加速度计算方法, 为边坡施工期爆破动力稳定分析爆破荷载确定提供理论依据。

关键词: 边坡工程; 爆破振动; 加速度; 边坡; 极限平衡分析

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)04 - 0784 - 07

CALCULATION METHOD OF EQUIVALENT ACCELERATION FOR LIMIT EQUILIBRIUM ANALYSIS OF SLOPE UNDER BLASTING VIBRATION

CHEN Ming, LU Wenbo, SHU Daqiang, ZHOU Chuangbing

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

Abstract: Based on wave theory, the displacement, the blasting vibration acceleration, and the stress state of slope under the same blasting vibration velocity but different vibration frequencies were studied. The results indicated that with the same blasting vibration velocity, the peak vibration displacement was in inverse proportion to the vibration frequency, while the blasting vibration acceleration was proportional to the vibration frequency; however, the maximum stress of the slope was unchanged. There was no direct relation between acceleration and stress state of the slope, and the higher the vibration frequency was, the more quickly the displacement, the acceleration and the peak stress varied along the depth of the slope. According to comprehensive consideration of mutual relationship between vibration frequency, vibration acceleration and stress state of the slope, the method of converting the acceleration in higher frequency to acceleration in lower frequency of blasting vibration was obtained. Based on the fact that the same peak stress in the slope was created by the same peak particle vibration velocity, the equivalent acceleration calculated method for limit equilibrium analysis of slope under blasting vibration was proposed, which provided theoretical basis of analyzing the slope stability under blasting vibration

收稿日期: 2008 - 07 - 25; **修回日期:** 2008 - 12 - 27

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50725931); 国家自然科学基金资助项目(50779050); 国家自然科学基金重点项目(50839040); “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAB29B01)

作者简介: 陈明(1977 -), 男, 2001年毕业于武汉大学水利水电工程专业, 现任讲师, 主要从事岩石动力学与工程爆破方面的教学与研究工作。
E-mail: whuchm@yahoo.com.cn

during slope construction.

Key words: slope engineering; blasting vibration; acceleration; slope; limit equilibrium analysis

1 引 言

目前, 岩石高边坡爆破振动动力稳定性问题的研究方法主要有经验判别法、极限平衡法、动力有限元法、离散元方法等, 其中极限平衡分析方法由于其原理简单, 能够给出直观判断边坡安全与否的定量性指标参数——安全系数, 一直以来在边坡稳定分析中发挥着重大作用, 被广泛应用于岩质边坡的动力稳定分析中。采用极限平衡分析法分析边坡的动力稳定性, 对爆破振动加速度的处理方法主要有两类: 一类是拟静力法, 另一类是时程分析法。

杨桂桐^[1]较早以 Sarma 法为基础, 将爆破振动动力等效转化为静力进行极限平衡分析, 即采用拟静力法研究了高边坡爆破开挖动力稳定问题; H. I. Ling 和 A. H. D. Cheng^[2]用拟静力的方法评价岩体边坡在地震激励及爆破振动作用下的稳定性; 张时忠等^[3~5]采用此种方法研究高边坡动力稳定问题。后来, 研究者张永哲等^[6~8]逐渐认识到爆破地震波的频谱特性对折减系数有着重要影响, 提出了更可靠的高边坡爆破开挖极限平衡动力稳定分析方法。

随着认识的不断深入, 研究者发现如果简单地将爆破振动荷载等效成静力参与到极限平衡分析中, 则不足以反映边坡在爆破振动荷载作用下的动力响应。为此, 卢文波等^[9~11]综合各种因素, 采取多种方法试图来评价边坡在爆破振动荷载作用下的动力稳定性。许红涛等^[12]基于刚体极限平衡分析方法中的 Sarma 方法提出了一种计算岩质高边坡爆破开挖情况下动力稳定性安全系数的时程分析方法。

无论是采用拟静力法还是时程分析法, 分析过程中对爆破振动峰值加速度的处理, 一般是根据质点振动速度与加速度的关系, 由振动速度转换得到, 或者是根据实际加速度监测资料得到, 对拟静力法, 计算时考虑一个折减系数, 对时程法, 则很多未考虑折减系数。上述对加速度的处理方法均忽略了振动加速度、振动频率与边坡体振动位移、应力状态的内在联系, H. D. Charles^[13]利用离散单元模型, 分析了不同频率的爆破振动下二维层状岩石边坡的变化, 结果表明在质点峰值速度或加速度为常数时, 增加的主振频率极大的减少了剪切位移, 这表明振动频率对边坡体的稳定性有重大影响。为此, 本文

基于波动理论, 根据 Rayleigh 波作用下边坡的反应, 探讨振动频率、速度、加速度、边坡体应力状态的关系, 确定边坡开挖爆破动力稳定极限平衡分析的爆破振动荷载, 为有效评价边坡施工期爆破动力稳定提供理论依据。

为研究方便, 分析过程中忽略阻尼、边坡结构面的影响, 暂不考虑振动速度、加速度、边坡应力峰值沿波传播方向的衰减。

2 Rayleigh 波作用下边坡反应

在爆源中远区, 边坡面上爆破地震波的主体为 Rayleigh 波。假设边坡为一斜的自由面, 考虑平面应变条件下的 Rayleigh 波在弹性介质中的传播。设一对不均匀 P 波和 SV 波以相同的波速沿 x 方向传播(见图 1)。

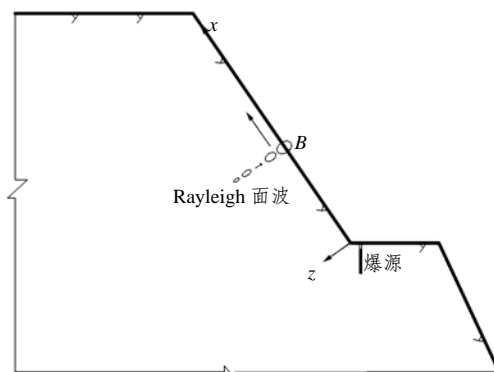


图 1 计算模型示意图

Fig.1 Diagram of calculation model

该表面波的位移势函数 φ 和 ψ 分别表示为

$$\varphi = A e^{-rz} e^{ik(x-C_R t)} \quad (1)$$

$$\psi = B e^{-sz} e^{ik(x-C_R t)} \quad (2)$$

式中: A, B 均为幅值; k 为波数; C_R 为 Rayleigh 波的波速, $C_R = \omega/k$, ω 为波的圆频率; t 为时间; r 和 s 分别为

$$\left. \begin{aligned} r &= k \sqrt{1 - \left(\frac{C_R}{C_P}\right)^2} \\ s &= k \sqrt{1 - \left(\frac{C_R}{C_S}\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： C_p 和 C_s 分别为岩土介质的纵波和横波波速。

C_R 由瑞利方程确定：

$$(2k^2 - k_s^2)^2 - 4k^2 \sqrt{k^2 - k_p^2} \sqrt{k^2 - k_s^2} = 0 \quad (4)$$

式中： k_p 和 k_s 分别为纵波和横波的波数。Rayleigh 波产生的应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \sigma_{zz} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \sigma_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \\ u_z &= \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： u_x ， u_z 分别为 Rayleigh 波在传播方向 x 和 z 的位移； λ ， μ 均为拉梅系数。

通过自由表面上的应力边界条件，即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zz} \Big|_{z=0} &= 0 \\ \sigma_{zx} \Big|_{z=0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

可得

$$\left. \begin{aligned} u_x &= iAk \left(e^{-rz} - \frac{2rs}{k^2 + s^2} e^{-sz} \right) e^{ik(x - C_R t)} \\ u_z &= Ak \left(-\frac{r}{k} e^{-rz} + \frac{2rk}{k^2 + s^2} e^{-sz} \right) e^{ik(x - C_R t)} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= A \left\{ [\lambda r^2 - (\lambda + 2\mu)k^2] \exp(-rz) + \frac{4\mu srk^2}{k^2 + s^2} \exp(-sz) \right\} \cdot \exp[ik(x - C_R t)] \\ \sigma_{zz} &= A \left\{ [(\lambda + 2\mu)r^2 - \lambda k^2] \exp(-rz) - \frac{4\mu srk^2}{k^2 + s^2} \exp(-sz) \right\} \cdot \exp[ik(x - C_R t)] \\ \sigma_{zx} &= \mu A [-2irk \exp(-rz) + 2ikr \exp(-sz)] \exp[ik(x - C_R t)] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式(9)中对 σ_{xx} ， σ_{zz} ， σ_{zx} 分别取实部，有

$$\left. \begin{aligned} \text{Re}(\sigma_{xx}) &= A \left\{ [\lambda r^2 - (\lambda + 2\mu)k^2] \exp(-rz) + \frac{4\mu srk^2}{k^2 + s^2} \exp(-sz) \right\} \cdot \cos[k(x - C_R t)] \\ \text{Re}(\sigma_{zz}) &= A \left\{ [(\lambda + 2\mu)r^2 - \lambda k^2] \exp(-rz) - \frac{4\mu srk^2}{k^2 + s^2} \exp(-sz) \right\} \cdot \cos[k(x - C_R t)] \\ \text{Re}(\sigma_{zx}) &= \mu A [2rk \exp(-rz) - 2kr \exp(-sz)] \cdot \sin[k(x - C_R t)] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由式(8)可得由 Rayleigh 波引起的边坡法向振动速度值和应变分别为

$$\left. \begin{aligned} v_z &= \frac{\partial u_z}{\partial t} \\ a_z &= \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

对 u_z 及式(11)取实部，有

$$\text{Re}(u_z) = Ak \left(-\frac{r}{k} e^{-rz} + \frac{2rk}{k^2 + s^2} e^{-sz} \right) \cos(kx - \omega t) \quad (12)$$

$$\text{Re}(v_z) = Ak\omega \left(-\frac{r}{k} e^{-rz} + \frac{2kr}{k^2 + s^2} e^{-sz} \right) \sin(kx - \omega t) \quad (13)$$

$$\text{Re}(a_z) = Ak\omega^2 \left(\frac{r}{k} e^{-rz} - \frac{2kr}{k^2 + s^2} e^{-sz} \right) \cos(kx - \omega t) \quad (14)$$

对于同一边坡，当弹性模量、密度、泊松比相同时，其对应的纵波波速、横波波速及 Rayleigh 波速相同。设边坡中传播有 2 个频率分别为 f_1 ， f_2 ，位移势函数 φ 的幅值分别为 A_1 ， A_2 的波，产生的 x 向应力分别为 σ_{xx1} ， σ_{xx2} ，在边坡表面一点 B 处具有相同的峰值振动速度 v_z ，由式(13)可推算得

$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 = \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2 \quad (15)$$

即相同振动速度下，位移势函数 φ 的幅值与其频率的二次方成反比，对于同一边坡，在边坡表面点 B 处，由式(10)，(15)可推算得

$$\frac{\sigma_{xx1}}{\sigma_{xx2}} = 1 \quad (16)$$

即相同峰值振动速度时，同一边坡表面相同位置处 x 向峰值应力相同。

在边坡岩体表面，根据式(12)~(14)，可知峰值

振动位移、速度及加速度具有如下关系:

$$a_z = Ak\omega^2 = v_z \omega = u_z \omega^2 \quad (17)$$

即峰值位移、速度、加速度之间可通过其与圆频率的关系相互转换。

3 振动频率与位移、加速度及应力关系的算例分析

3.1 计算参数

设一岩质边坡弹性模量为 40 GPa, 密度为 2 600 kg/m³, 泊松比为 0.25, 其对应的纵波波速, 横波波速及瑞利波速分别为 4 296.7, 2 480.7, 2 280.8 m/s。

在爆破安全监测中, 监测的物理量一般为质点振动速度, 为讨论振动频率的影响, 设在边坡表面点 B 处监测得到的质点振动速度峰值一样, 但是主频率不同。由于天然地震的频率一般在 1~5 Hz, 爆破振动频率一般在 10~100 Hz, 为了分析方便, 假设爆破地震产生 3 种主频率分别为 1, 10, 100 Hz 的波, 比较 3 种不同振动频率相同峰值振动速度情况下, 边坡的峰值位移、质点振动加速度、应力的分布情况。设 1, 10, 100 Hz 主频的波的峰值振动速度分别为 v_{z-1} , v_{z-10} , v_{z-100} , 峰值振动速度相同, 即: $v_{z-1} = v_{z-10} = v_{z-100}$, 在边坡表面 B 处获得相同的质点振动速度, 根据式(15)可知, 1 Hz 时 Reyleigh 位移势函数 ϕ 的幅值为 100 m², 100 Hz 时 Reyleigh 位移势函数 ϕ 的幅值为 1/100 m²。

3.2 计算结果分析

计算结果分析中仅考虑振动位移、速度、加速度及应力的峰值, 不考虑峰值的周期变化, 分析振动频率分别为 1, 10, 100 Hz 的波的峰值位移、速度、加速度及应力的变化规律。

根据式(10)计算得到边坡在 x, z 及 xz 向的峰值应力与深度的关系分别见图 2~4, 由图 2~4 可知,

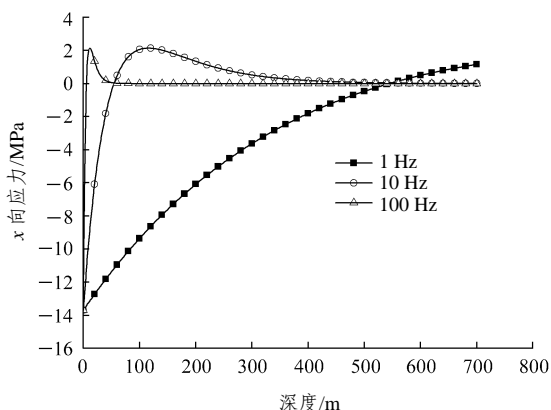


图 2 边坡在 x 向的峰值应力与深度的关系

Fig.2 Relationship between peak stress in x-direction and depth of slope

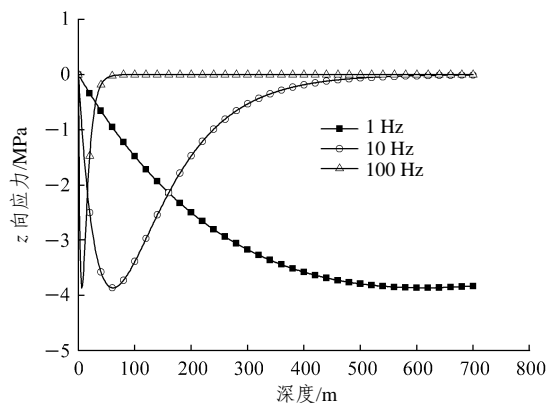


图 3 边坡在 z 向(法向)的峰值应力与深度的关系

Fig.3 Relationship between peak stress in z-direction and depth of slope

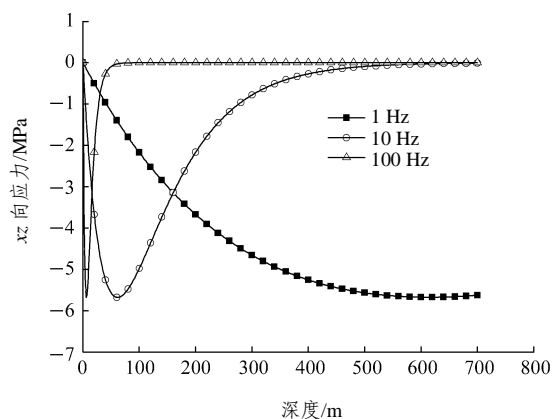


图 4 边坡在 xz 向的应力与深度的关系

Fig.4 Relationship between peak stress in xz-direction and depth of slope

3 种不同频率的波, 当振动速度相同时, 应力波在边坡各个方向上产生的峰值应力基本一致。x 向峰值应力都在边坡表面, 而 z 及 xz 向峰值应力出现部位逐渐转向边坡深部, 频率越低, 应力值变化越慢。事实上, 由式(16)可知, 当 v_z 峰值相等时, 边坡表面相同点处的 σ_{xx} 峰值必然相等。

根据式(12), 计算得到 1, 10, 100 Hz 三种不同频率的波在点 B 处产生的边坡法向峰值位移分别为 0.170 9, 0.017 09 及 0.001 709 m, 法向峰值位移与边坡深度的关系曲线见图 5, 可见, 边坡法向峰值位移与波的主频率有反比关系, 且由法向位移与深度的关系曲线可知, 频率越低, 位移越大, 衰减越慢。

根据式(13), 计算得到边坡法向峰值振动速度与深度的关系见图 6, 由图 6 可知, 边坡表面质点振动速度峰值一致, 但是频率越高, 振动速度沿边坡深度方向衰减越快, 当频率为 100 Hz 时, 在边坡

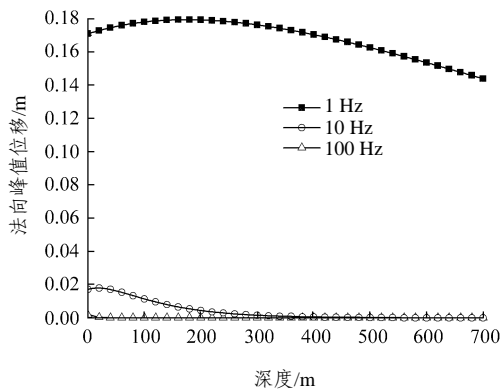


图 5 边坡法向峰值位移与深度的关系曲线

Fig.5 Relationship between peak displacement in normal direction and depth of slope

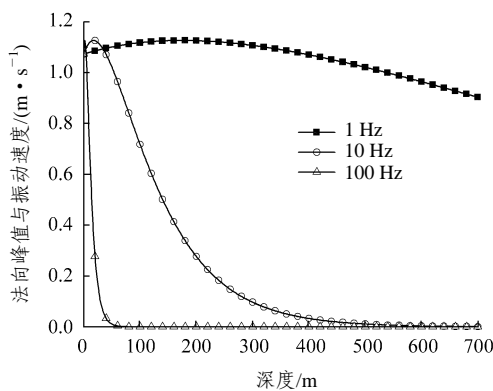


图 6 边坡法向峰值振动速度与深度的关系

Fig.6 Relationship between peak particle vibration velocity in normal direction and depth of slope

表面以下约 50 m 深度的振动速度就衰减为不到表面的 1%，而频率为 1 Hz 时，到边坡表面以下约 700 m 深度的振动速度仍为表面振速的 90% 左右。

根据式(14)，边坡表面质点振动速度一致时，计算得到边坡法向峰值振动加速度与深度的关系见图 7。1, 10, 100 Hz 三种不同频率的波产生的边坡法向振动加速度分别为： $-6.747\ 38$ ， $-67.473\ 8$ 及 $-674.738\ \text{m/s}^2$ ，可见边坡法向的振动加速度与波的主频率有正比关系，由图 7 可知，频率越低，振动加速度越小，衰减越慢，而频率越高，衰减越快，当频率为 100 Hz 时，在边坡表面以下 50 m 深度左右的振动加速度就衰减为表面加速度的约 1%。

由图 2~7 可知，当边坡表面峰值振动速度一致时，不同频率的波在边坡产生的峰值位移及加速度不同，边坡法向的峰值位移与波的主频率成反比，而边坡法向的峰值振动加速度与波的主频率成正比，在边坡中产生的应力峰值却一致，不过出现的

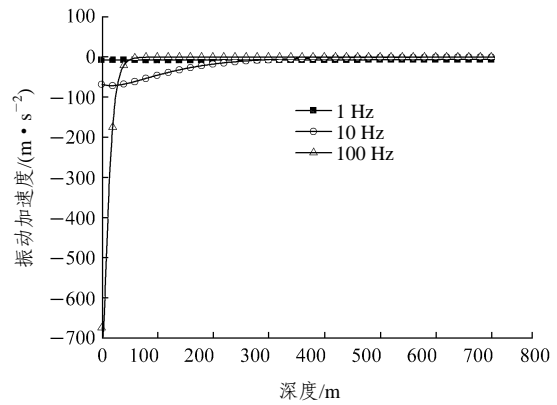


图 7 边坡法向振动加速度与深度的关系

Fig.7 Relation between peak particle vibration acceleration in normal direction and depth of slope

部位稍有区别。振动频率越高，峰值振动位移，速度，加速度， x ， z 及 xz 向应力沿边坡深度增加或者衰减越快。

由分析可知，峰值振动加速度与边坡体的峰值应力状态并无直接关系，若峰值振动速度一致，振动频率越高，则振动加速度越大，而振动位移越小，在边坡中产生的峰值应力相同。这也说明爆破振动荷载作用下，当在边坡体中产生相同的振动速度时，振动频率越高，则爆破对边坡稳定性的影响越小。且根据位移、应力沿边坡深度的变化规律可知，对于边坡爆破开挖中常见的主频在 20~60 Hz 的爆破地震波，主要影响边坡的浅层滑体的稳定性。

4 极限平衡分析等效加速度的确定

基于刚体极限平衡法的边坡稳定性分析中，采用拟静力法进行爆破动力作用下的边坡稳定性计算时，通常将爆破振动惯性力等效成静力荷载，其计算公式为

$$F = \beta_0 K_0 W \tag{18}$$

式中： β_0 为爆破动力折减系数； K_0 为地震系数， $K_0 = a/g$ ， a 为爆破振动加速度， g 为重力加速度； W 为边坡中潜在滑体计算条块的质量。有研究建议粗略计算时直接取 $\beta_0 = 0.1 \sim 0.3$ ^[14]，李海波和吴绵拔^[15]利用反应谱法确定爆破动力荷载的折减系数为 0.008~0.152。

由节 3 分析可知，质点峰值振动速度与边坡的峰值应力具有较好的相关性，质点峰值振动加速度与边坡内的峰值应力基本上没有相关性，而在边坡

的稳定分析中采用的边坡岩体、结构面的力学参数, 如内摩擦角及黏聚力, 都是与边坡的应力状态相关, 而且爆破振动加速度荷载对边坡岩体的作用属于瞬间作用, 采用式(18)计算惯性力的等效静力荷载, 因未考虑爆破振动频率的影响, 忽略了爆破荷载的累积作用效应在边坡体中对应的位移、应力状态等, 且根据式(17), (18), 峰值振动速度相同而频率不同时, 得到的结果是振动频率越高, 折算后的静力荷载越大, 显然边坡的稳定性系数将越低, 这与实践监测结果及常规认识有较大差别, 因此忽略加速度与频率的关系, 直接利用实测或转换折减后的加速度分析边坡的爆破动力稳定性具有一定的局限性。

工程实践经验表明, 建(构)筑物的爆破振动破坏与质点峰值振动速度具有良好的相关性。由式(17)可知, 相同振动速度下, 爆破振动加速度与振动频率成正比, 因此, 利用质点峰值振动速度与峰值应力之间的相关性, 考虑振动频率的影响, 通过相关转换, 从而使振动加速度与边坡应力状态、边坡的稳定性密切相关。

鉴于天然地震振动频率较低, 振动加速度与边坡破坏状态相关性较好, 且地震作用下极限平衡分析中对低频振动加速度的处理相对合理可靠^[16, 17], 因此可基于相同峰值振动速度下边坡体中峰值应力相同, 以在边坡体产生相同峰值应力为基础, 以 1 Hz 的振动频率为基准, 从而将高频的爆破振动加速度转换为频率与地震频率相当的、与边坡稳定性密切相关的 1 Hz 频率的加速度, 该转换得到的加速度称为等效加速度。根据峰值振动速度与加速度、振动速度与应力的关系, 则相同振动速度下振动频率为 f' 的加速度 a'_f 可转换为 1 Hz 振动频率的等效加速度:

$$a_1 = \frac{1}{f'} a'_f \quad (19)$$

式(19)可将高频爆破振动波加速度向低频振动波加速度转换。需要说明的是, 该转换后的加速度仅仅表示其在边坡体可产生相同的峰值应力, 由节 3 的分析可知, 高频与低频振动加速度在边坡体内产生的峰值振动位移、振动速度及应力的分布及变化规律有很大区别, 低频的振动波对边坡的有害影响较高频的大。

考虑到振动频率越高, 振动位移、加速度及边坡体应力衰减或者变化越快、爆破振动对边坡的有害影响越低, 计算等效加速度需考虑一个与频率相关的影响系数。设 a' 为频率为 f' 的爆破地震波的振

动加速度, 则考虑频率影响的等效加速度峰值 a'_1 可按式计算:

$$a'_1 = \frac{1}{f'^{\alpha}} a' \quad (20)$$

式中: α 为等效加速度的频率影响系数, 可取为 1.05~1.20, 频率高的可取大值。

基于在边坡体中产生相同峰值应力的原则得到的等效加速度, 考虑了爆破振动频率对边坡稳定的影响。在规范^[17]中, 天然地震加速度的拟静力可以考虑动态分布系数以及地震作用的效应折减系数, 本文提出的等效加速度已经折算为一个频率很低的振动加速度, 且考虑了频率作用效应的影响, 因此计算中可不再考虑动态分布系数及效应折减系数, 但是由于高频爆破振动波加速度沿边坡深度方向变化较快, 因此分析中需要考虑爆破振动加速度沿边坡深度的衰减。

5 结 论

通过以上分析, 可得以下初步结论:

(1) 当边坡表面振动速度一致时, 不同频率的波在边坡产生的峰值位移及加速度不同, 边坡法向的峰值位移与波的主频率成反比, 而边坡法向的峰值振动加速度与波的主频率成正比, 振动波在边坡中产生相同的峰值应力。

(2) 振动频率越高, 位移、振动速度、振动加速度及 x 向(波的传播方向)应力沿边坡深度衰减越快, z 及 xz 向应力峰值随深度先增大, 然后逐渐减小, 随频率的增大应力增加或衰减都增快。

(3) 爆破振动加速度必须考虑频率的影响。边坡峰值质点振动加速度与边坡体峰值应力状态没有直接的相关性, 通过振动加速度与振动频率、振动频率与应力峰值的关系, 基于在边坡体中产生相同峰值应力的原则, 可将高频爆破振动波的加速度转换为低频振动波的加速度, 进而提出了可供边坡爆破动力稳定极限平衡分析的等效加速度计算方法。

参考文献(References):

- [1] 杨桂桐. 爆破振动效应及边坡动态分析[J]. 爆破, 1989, 6(4): 9 - 14.(YANG Guitong. Blast shock effect and slope dynamic state analysis[J]. *Blasting*, 1989, 6(4): 9 - 14.(in Chinese))

- [2] LING H I, CHENG A H D. Rock sliding induced by seismic force[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(6): 1 021 - 1 029.
- [3] 张时忠, 张天锡, 吴立. 爆破施工对边坡稳定性影响初探[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(1): 39 - 43.(ZHANG Shizhong, ZHANG Tianxi, WU Li. An approach to slope stability due to blasting excavation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1996, 7(1): 39 - 43.(in Chinese))
- [4] 张林, 林从谋. 爆破振动对土质边坡动力稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1 499 - 1 501.(ZHANG Lin, LIN Congmou. Study about soil slope dynamic stability due to blasting vibration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1 499 - 1 501.(in Chinese))
- [5] 李维光, 张继春. 爆破振动作用下顺层岩质边坡稳定性分析[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(5): 426 - 430.(LI Weiguang, ZHANG Jichun. Study on rock mass bedding slope stability under blast seism[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(5): 426 - 430.(in Chinese))
- [6] 张永哲, 甄胜利. 漫湾电站开挖爆破对高边坡动力稳定影响的分析研究[J]. 工程爆破, 1996, 2(1): 1 - 11.(ZHANG Yongzhe, ZHEN Shengli. Study on effect of excavation blasting on dynamic stability of high rock slope at Manwan Hydropower Station[J]. Engineering Blasting, 1996, 2(1): 1 - 11.(in Chinese))
- [7] 张永哲. 岩质高边坡开挖爆破动力稳定分析[J]. 工程爆破, 1996, 2(4): 31 - 38.(ZHANG Yongzhe. Dynamic stability analysis of blasting and excavation of rock high slope[J]. Engineering Blasting 1996, 2(4): 31 - 38.(in Chinese))
- [8] 甄胜利. 岩质高边坡开挖爆破动力稳定分析研究[C]// 工程爆破文集(第五辑). 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 110 - 113.(ZHEN Shengli. Dynamic stability analysis of blasting and excavation of rock high slope[C]// Conference of Engineering Blasting(Vol.5). Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993: 110 - 113.(in Chinese))
- [9] 卢文波, 赖世骧, 朱传云. 岩石高边坡爆破振动动力稳定分析[J]. 矿冶工程, 1996, 16(1): 3 - 7.(LU Wenbo, LAI Shixiang, ZHU Chuanyun. Analysis of the dynamic stability of rock slopes under blasting vibration conditions[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1996, 16(1): 3 - 7.(in Chinese))
- [10] 阎坤, 张云. 岩质高边坡爆破动力稳定分析方法研究[J]. 水力发电, 1996, (8): 27 - 29.(YAN Kun, ZHANG Yun. Study on dynamic stability analysis method of the high side-slope rock blasting[J]. Water Power, 1996, (8): 27 - 29.(in Chinese))
- [11] 蒋名政. 爆破振动对高陡边坡稳定性影响的试验研究[硕士学位论文][D]. 昆明: 昆明理工大学, 2002.(JIANG Mingzheng. The testing study on the stability of high slope under blasting vibration[M. S. Thesis][D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2002(in Chinese))
- [12] 许红涛, 卢文波, 周创兵, 等. 基于时程分析的岩质高边坡开挖爆破动力稳定性计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2 213 - 2 219.(XU Hongtao, LU Wenbo, ZHOU Chuangbing, et al. Time history analysis method for evaluating dynamic stability of high rock slope under excavation blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2 213 - 2 219.(in Chinese))
- [13] CHARLES H D. Dynamic stability of rock slopes and high frequency traveling waves[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114(10): 1 069 - 1 088.
- [14] 丁玲方. 爆破动荷载折算系数的确定[C]// 第三届全国岩石动力学学术论文选集. 武汉: 武汉冶金科技大学出版社, 1992.(DING Lingfang. The study of the convert coefficient of blasting vibration loading[C]// Article of Proceedings of the 3rd National Rock Dynamics Conference. Wuhan: Wuhan Metallurgy Science and Technology University Press, 1992.(in Chinese))
- [15] 李海波, 吴绵拔. 反应谱分析在确定动载折减系数中的应用[J]. 工程爆破, 1998, 4(2): 16 - 19.(LI Haibo, WU Mianba. Application of spectrum theory to determining the discounted coefficient of dynamic loading[J]. Engineering Blasting, 1998, 4(2): 16 - 19.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. DL 5073 - 2000 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL 5073 - 2000 Specifications for seismic design of hydraulic structures[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.(in Chinese))
- [17] 中华人民共和国行业标准编写组. DL/T 5353 - 2006 水利水电工程边坡设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. DL/T 5353 - 2006 Design specification for slope of hydropower and water conservancy project[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.(in Chinese))