

《爆破安全规程》(GB 6722—2014)边坡岩体爆破振动速度安全允许值的理论探讨

孙金山^{1,2}, 李正川³, 陈明², 卢文波², 刘贵应³, 姜清辉²

(1. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 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;

3. 中铁二院重庆勘察设计研究院有限责任公司, 重庆 400023)

摘要: 开挖爆破诱发的地震波对岩质边坡有显著影响, 我国《爆破安全规程》(GB 6722—2014)给出了边坡岩体的爆破振动速度允许值, 但未明确说明取值的理论依据。为此, 分析露天开挖爆破条件下邻近边坡岩体的附加动应力和质点振动速度场分布特征, 推导以坡表质点振动速度表征的岩体附加动应力表达式。以边坡岩体不发生剪切和张拉破坏为控制要求, 考虑边坡岩体分级特征和坡体结构特征, 提出基于简单边坡模型的浅层岩体的爆破振动速度允许值。分析表明, 岩体强度、边坡坡度、滑动面深度和地震波频率等均对边坡岩体的允许振动速度存在显著影响。其次, 无剪切破坏条件下计算的爆破振动速度允许值与《爆破安全规程》(GB 6722—2014)的控制标准在量级上较接近, 而无张拉破坏时各级岩体的爆破振动速度允许值差别不大, 《爆破安全规程》(GB 6722—2014)中岩质边坡爆破振动控制标准应在理论分析和工程实践基础上进一步细化。

关键词: 边坡工程; 岩质边坡; 岩体; 爆破; 振动速度; 岩体分级

中图分类号: P 64

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2017)12 - 2971 - 10

Discussion on the safety threshold of blasting vibration velocity for slope rock masses in safety regulations for blasting(GB 6722—2014)

SUN Jinshan^{1,2}, LI Zhengchuan³, CHEN Ming², LU Wenbo², LIU Guiying³, JIANG Qinghui²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 3. Chongqing Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., of CREEC, Chongqing 400023, China)

Abstract: Seismic waves induced by blasting influence the rock masses of slopes significantly. The national *safety regulations for blasting* (GB 6722—2014) specifies the permissible value of the blasting vibration velocity of the slope rock, but the theoretical basis of the value is not clearly stated. The dynamic stress and the vibration velocity field in rock slopes induced by blasting seismic wave were analyzed, and the mathematical relationship between the dynamic stress and vibration velocity of rock mass was proposed. To insure that the shear and tensile failures do not take place in rock masses, the threshold of the blasting vibration velocity of the slope surface was proposed based on the simplified slope model considering the classification characteristics of the slope rock and the slope structure. The strength of rock mass, the dip angle of slope, the depth of sliding surface and the frequency of seismic wave all have a significant effect on the threshold vibration velocity. The range of the allowable blasting vibration velocity of different classes of rock mass is proposed according to the mechanism of shallow landslide.

收稿日期: 2016 - 10 - 27; **修回日期:** 2017 - 06 - 07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379194, 51479147); 重庆市科技计划项目(cstc2014yykfB30003)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51379194 and 51479147) and Science and Technology Project of Chongqing(Grant No. cstc2014yykfB30003)

作者简介: 孙金山(1980 -), 男, 博士, 2003年毕业于武汉大学水工结构工程专业, 现任副教授, 主要从事地下工程与工程爆破方面的教学与研究。E-mail: sun99001@126.com

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.1383

The calculated threshold of the blasting vibration velocity under the condition of no shear failure is close to the control criteria of the *safety regulations for blasting* (GB 6722—2014). The threshold of the blasting vibration velocity of different classes of rock mass is similar to each other when there is no tensile failure. The safety threshold of blasting vibration velocity for rock slopes in *safety regulations for blasting* (GB 6722—2014) should be refined further on the basis of theoretical analysis and engineering practice.

Key words: slope engineering; rock slope; rock mass; blasting; vibration velocity; classification of rock masses

1 引言

在大型露天矿山、水利水电和城市深基坑等工程中，常常会形成大量高陡岩质边坡，爆破开挖诱发的人工地震波可能严重影响边坡的局部稳定性和整体稳定性，进而诱发滑坡或崩塌等地质灾害。

针对爆破振动有害效应的控制问题，20世纪20年代，国外开始进行爆破振动控制标准的研究工作，并在1950~1960年期间提出了多种控制标准^[1]。1986年，我国颁布实施《爆破安全规程》(GB6722—1986)，规定了隧洞和巷道岩体的质点安全允许振动速度，但并未规定边坡岩体的振动速度控制标准，为此，最新版的规程^[2]对此进行了修订。围绕边坡振动速度控制标准问题，许多学者开展了相关的研究，如卢文波^[3]基于实验技术提出了三峡工程坝基开挖爆破时边坡的振动速度安全控制标准。刘美山等^[4]通过爆破试验确定了小湾水电站岩石高边坡的爆破振动安全判据。罗忆等^[5]则通过理论分析的方法确定了小湾水电站边坡的允许爆破振动速度。长沙矿冶研究院曾建议矿山工程中稳定边坡坡脚允许爆破振动速度为35~45 cm/s，较稳定边坡坡脚允许爆破振动速度为28~35 cm/s，不稳定边坡坡脚允许爆破振动速度为22~28 cm/s^[4]。而许多大型水电工程的建设部门则通过理论研究和工程经验制定了专门的爆破振动控制标准，如小湾水电工程中，边坡II，III，IV级岩体的允许振动速度分别为10~15，7.5~10，5~7.5 cm/s；溪洛渡水电工程中，边坡II，III，IV级岩体的允许振动速度分别为10~15，5~10，3~5 cm/s^[4]。综合大量的研究成果，最新的规程^[2]规定了永久岩质边坡的安全允许振动速度为5~15 cm/s(见表1)。并指出永久性岩石高边坡爆破振动允

许值的确定，应综合考虑边坡的重要性、边坡的初始稳定性、支护状况和开挖高度等，但如何综合考虑却并未进一步规定和解释。

目前，工程实践中爆破振动允许振动速度的确定往往是通过多年的工程实践和工程类比来确定的，缺乏相应的理论基础。其次，新的规程^[2]中的允许振动速度并未解释应如何考虑岩体级别的差异以及边坡的几何形态(见表1)，对不同质量的岩体选择相同的振动速度控制标准可能缺乏合理性。为此本文通过对爆破地震波传播特征的分析，同时考虑边坡地质条件，对爆破振动作用下岩质边坡岩体的安全允许振动速度进行了探讨。

岩质边坡主要包括均质碎裂边坡和受软弱结构面或层面控制的边坡，而软弱结构面的发育情况与性质均较为复杂，需具体问题具体分析，因此本文主要对爆破开挖影响下岩质边坡浅层的均质碎裂岩体的爆破振动速度控制标准问题进行了探讨。

2 边坡浅层岩体动应力与速度场解析

在岩质边坡表面或边坡附近进行露天爆破作业时，炸药破岩的同时将部分的能量转化为地震波，主要包括体波和面波(见图1)，体波包括纵波(简称P波)和剪切波(简称S波)，面波包括瑞利波(简称R波)和拉夫波等。地震波传播过程中伴随着能量的衰减，且体波衰减快于面波的衰减速率，因此不同类型地震波的影响范围存在差异。

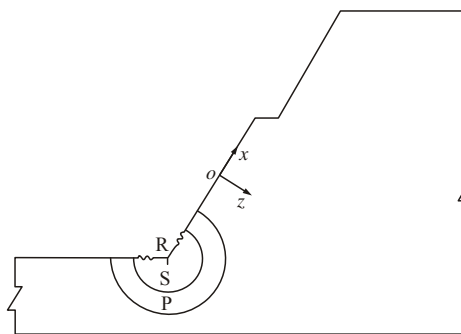


图1 边坡中爆破地震波示意图

Fig.1 Blasting seismic wave in a slope

表1 规程^[2]中边坡爆破振动安全允许标准

Table 1 Safety criterion of blasting vibration for rock slope in regulations^[2]

保护对象类别	安全允许质点振动速度 $V/(cm \cdot s^{-1})$		
	$f \leq 10$ Hz	$10 \text{ Hz} < f \leq 50$ Hz	$f > 50$ Hz
永久性岩石高边坡	5~9	8~12	10~15

实践证明, 爆破地震波的能量分布与观测点至药包中心的距离和药量密切相关, 因此, 朱传云等^[6]根据集中药包装药量 Q 和观测点至药包的距离 R 划分爆破地震波影响区。在 $R \leq 6\sqrt[3]{Q}$ 范围内, P 波强度最高, 其水平振动能量是地震波能量的主体, 该区可定义为体波主影响区; 在 $6\sqrt[3]{Q} \leq R \leq 30\sqrt[3]{Q}$ 范围内, 随着爆心距的增加, 地震波能量中 P 波占比减弱, 面波占比增长并逐渐成为主体, 该区可定义为复合影响区; $R \geq 30\sqrt[3]{Q}$ 范围内, 面波能量占地震波能量的主体, 该区定义可为面波主影响区。

工程实践中, 目前很少采用集中药包进行爆破开挖, 而是主要采用钻孔爆破方式。但距离爆源不同距离的区域中地震波能量的分布特征仍是相似的, 仍可借用体波主影响区和面波主影响区的概念。根据目前爆炸力学的基本理论, 150 倍装药半径影响范围内属于爆源近区, 即体波主影响区; 大于 150 倍装药半径的区域属于爆源远区, 即面波主影响区。但由于爆炸过程和岩土体性质的复杂性, 实际难以严格划分爆源近区和远区, 工程实践中应根据装药情况以及地震波的衰减特征进行综合判断。

除了大型硐室爆破外, 一般钻孔爆破的单响起爆药量相对较小, 因此引起的地震效应较弱且仅对距离较近的边坡岩体存在一定的影响, 同时由于其振源范围小而浅, 其影响范围也具有局部性。因此, 主要对爆破地震波局部影响条件下岩体的动态响应进行了分析, 边坡与震源采用如图 1 所示宏观整体模型。

2.1 体波主影响区

在体波影响区, 体波对岩体的作用占主导地位, 因此仅分析体波在坡体中的传播特征。单个炮孔爆炸所形成的 P 波和 S 波主要以柱面波的形式传播, 多个炮孔的体波则发生波的干涉, 特征更为复杂。但在某一观测点附近, P 波和 S 波的传播可近似为理想面波的传播问题, 且假定距离炮孔足够远处观测点附近的某一平面为振源, 且观测点与振源的距离小至可忽略地震波能量的衰减。

在远离振源的区域, 取图 1 整体模型中的局部截面进行分析。沿波的传播方向上局部岩体横截面保持为平面, 且在横截面上应力分布是均匀的, 取横截面在 x 方向点 M 处为相对振源面, 取点 M 至 N 间的单元体(见图 2, 3), 若单元点 M 断面上的附加动正应力为 σ_{xx} , 附加动剪应力为 σ_{xy} , 则单元点 N 的附加动应力为 $\sigma_{xx} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \delta_x$, $\sigma_{xy} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \delta_y$ 。设岩体密度 ρ , 单元体横截面面积为 W 。

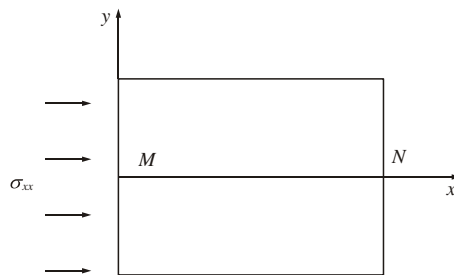


图 2 P 波传播路径上单元体

Fig.2 The cell on P wave propagation path

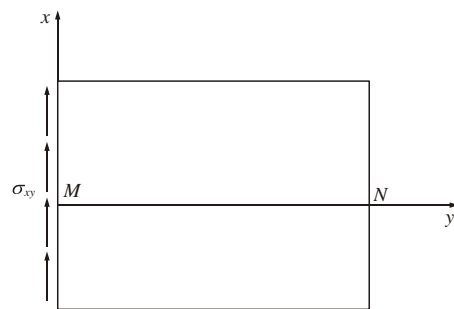


图 3 S 波传播路径上单元体

Fig.3 The cell on S wave propagation path

动应力引起的单元位移均为 u_x , 根据牛顿第二定律, 应力增量与加速度的关系得微分方程:

$$\left. \begin{aligned} \rho W \delta_x \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} &= W \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} \delta_x \\ \rho W \delta_y \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} &= W \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} \delta_y \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

且应力 - 应变关系有

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \sigma_{xy} &= \mu \frac{\partial u_x}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: λ 和 μ 为拉梅系数。设 E 为弹性模量, ν 为泊松比, 则 λ 和 μ 可表示为

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \\ \mu &= \frac{E}{2(1 + \nu)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

对 u_x 的通解分别对时间和 x 求导后进行替代, 得到平行坡面 x 方向振动速度可表示为

$$\left. \begin{aligned} V_x &= \frac{\partial u_x}{\partial t} = C_p \frac{\sigma_{xx}}{\lambda + 2\mu} = \frac{\sigma_{xx}}{\rho C_p} \\ V_x &= \frac{\partial u_x}{\partial t} = C_s \frac{\sigma_{xy}}{\mu} = \frac{\sigma_{xy}}{\rho C_s} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: C_p 和 C_s 分别为岩土介质的纵波和横波波速, 可表示为

$$\left. \begin{aligned} C_P &= \sqrt{\frac{\lambda+2\mu}{\rho}} \\ C_S &= \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2.2 面波主影响区

随着与振源间距离的增大，体波快速衰减至较低水平，此时面波对边坡岩体的作用占主导地位，因此在面波主影响区中仅分析面波在坡体中的传播特征。由于爆破地震波振源在地表附近，而天然地震波在深部地壳中，因此爆破地震波主要诱发瑞利面波，而拉夫波产生的可能相对较小或不显著。因此，边坡的面波影响区仅考虑瑞利波对岩体的影响。与上述研究方法类似，分析 R 波的传播时，假定远离爆源的坡面处为相对振源点，观测点与相对振源面的距离小至可忽略地震波能量的衰减。同样，取图 1 整体模型中的局部截面进行分析。

R 波是一定条件下非均匀 P 波和非均匀 S 波干涉所形成的，因此假定存在以相同波速 C_R 传播的一对 P 波和 S 波，其位移势函数分别由 ϕ 和 ψ 表示^[7]：

$$\left. \begin{aligned} \phi &= Ae^{-rz} e^{ik(x-C_R t)} \\ \psi &= Be^{-sz} e^{ik(x-C_R t)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中，

$$r = k \sqrt{1 - \left(\frac{C_R}{C_P}\right)^2} \quad (7)$$

$$s = k \sqrt{1 - \left(\frac{C_R}{C_S}\right)^2} \quad (8)$$

式中： A, B 为幅值； C_R 为 R 波的波速； $k = \frac{\omega}{C_R}$ ，

ω 为 R 波的圆频率。

R 波引起的边坡岩体附加动位移 u_x, u_z 可表示为

$$\left. \begin{aligned} u_x &= \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \\ u_z &= \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

对位移通解展开后得

$$\left. \begin{aligned} u_x &= iAk \left(e^{-rz} - \frac{2rs}{k^2+s^2} e^{-sz} \right) e^{ik(x-C_R t)} \\ u_z &= Ar \left(-e^{-rz} + \frac{2k^2}{k^2+s^2} e^{-sz} \right) e^{ik(x-C_R t)} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

位移函数式(10)对时间求导并取实部后，可得到 x 方向和 z 方向的速度为

$$\left. \begin{aligned} v_x &= Ak\omega \left(e^{-rz} - \frac{2rs}{k^2+s^2} e^{-sz} \right) \cos(kx - \omega t) \\ v_z &= Ar\omega \left(-e^{-rz} + \frac{2k^2}{k^2+s^2} e^{-sz} \right) \sin(kx - \omega t) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

R 波引起的边坡岩体附加动应力表示可表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \sigma_{zz} &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \sigma_{xz} &= \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将式(10)代入式(12)后取实部得附加动应力为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= A \left[(\lambda r^2 - \lambda k^2 - 2\mu k^2) e^{-rz} + \frac{4\mu r s k^2}{k^2 + s^2} e^{-sz} \right] \cos(kx - \omega t) \\ \sigma_{zz} &= A \left[(\lambda r^2 - \lambda k^2 + 2\mu r^2) e^{-rz} - \frac{4\mu r s k^2}{k^2 + s^2} e^{-sz} \right] \cos(kx - \omega t) \\ \sigma_{xz} &= 2A\mu r k (e^{-rz} - e^{-sz}) \sin(kx - \omega t) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

而自由表面上的应力边界条件为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{zz} \Big|_{z=0} &= 0 \\ \sigma_{xz} \Big|_{z=0} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由式(13)和(14)可得计算 C_R 的方程：

$$\left(\frac{C_R^2}{C_S^2} \right)^3 - 8 \left(\frac{C_R^2}{C_S^2} \right)^2 + \left(24 - 16 \frac{C_S^2}{C_P^2} \right) \frac{C_R^2}{C_S^2} + 16 \frac{C_S^2}{C_P^2} - 16 = 0 \quad (15)$$

式(15)可得 3 个精确解，取满足 $C_P > C_R$ 的解并对其函数表达式进行简化后得到其近似解为

$$C_R = \frac{0.86 + 1.14\nu}{1 + \nu} C_S \quad (16)$$

至此，上述位移和应力表达式中除了幅值 A 外，其他变量均可确定，可得到动应力和质点振动速度的解析表达式。

3 边坡浅层岩体动应力与振动速度峰值

3.1 体波主影响区

在地表进行开挖爆破时，仅在炮孔深度范围左右的深度内可认为质点的振动速度与附加动应力在不同深度内近似相等。而随着深度的增加，其能量将迅速衰减，速度和应力也迅速降低，因此，在地表进行开挖爆破时，坡面上体波产生的附加应力对表层岩体的影响是最为显著的。

根据体波主影响区振动速度的表达式(4), 可得由振动速度表示的附加动正应力和附加动剪应力的数学表达式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= V_x \rho C_p \\ \sigma_{xy} &= V_x \rho C_s \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

对比波阵面上的附加动正应力和附加动剪应力发现, 由于在体波主影响区中 P 波波速大于 S 波, 因此, 在振动速度相同时边坡岩体内附加动正应力大于附加动剪应力。

3.2 面波主影响区

(1) 附加动应力分布特征

对式(13)分析表明, 平行坡面方向的附加动正应力 σ_{xx} 在坡面上时($z=0$)绝对值最大, 且随深度 z 增大而快速减小, 在较深处变为 0。在深度方向上, 附加动正应力 σ_{zz} 在坡面上($z=0$)为 0, 随深度 z 增大其绝对值先快速增大后缓慢减小, 在较深处变为 0, 即存在一特定深度使其达到峰值。附加动剪应力 σ_{zx} 随深度 z 变化与 σ_{zz} 类似, 但其峰值间存在 $\pi/2$ 的相位差。

针对 σ_{zz} 和 σ_{zx} 存在峰值深度的问题, 为计算其峰值深度对下列方程进行求解:

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

得到 σ_{zz} 处于峰值时的深度为

$$z = \frac{1}{r-s} \ln \left[\frac{(k^2 + s^2)(\lambda r^2 + 2\mu r^2 - \lambda k^2)}{4\mu k^2 s^2} \right] \quad (20)$$

而 σ_{zx} 处于峰值时的深度为

$$z = \frac{1}{r-s} \ln \left(\frac{r}{s} \right) \quad (21)$$

两深度之比化简后为仅为泊松比 ν 的函数, 且在 $\nu=0\sim 0.5$ 区间内二者之比近似等于 1, 因此 σ_{zz} 和 σ_{zx} 处于峰值的深度近似相等, 可采用更为简洁的式(21)表示该深度 z_{cr} 。 $0\sim z_{cr}$ 深度范围可视为爆破 瑞利波强烈影响范围。

将 $z=0$ 代入式(13)中的 σ_{xx} 表达式, 将式(21)代入式(13)中的 σ_{zz} 表达式, 可得 2 个方向正应力的最大值为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx\max} &= A \left(\lambda r^2 - \lambda k^2 - 2\mu k^2 + \frac{4rs\mu k^2}{k^2 + s^2} \right) \\ \sigma_{zz\max} &= A \left[(\lambda r^2 - \lambda k^2 + 2\mu r^2) \left(\frac{r}{s} \right)^{\frac{-r}{r-s}} - \frac{4k^2 rs\mu}{k^2 + s^2} \left(\frac{r}{s} \right)^{\frac{-s}{r-s}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

分析 $\sigma_{xx\max} / \sigma_{zz\max}$ 的绝对值发现, 二者之比简化后仅为泊松比的函数, 不受其他参数的影响, 且在泊松比为 0.05~0.5 区间内 $\sigma_{xx\max}$ 约为 $\sigma_{zz\max}$ 的 3.4~3.9 倍(见图 4)。由此可见由同一 R 波在边坡岩体中所诱发的动应力中, 其最大值存在 $\sigma_{xx\max} > \sigma_{zz\max}$ 的关系。因此, 对于 R 波引起的附加动正应力而言, 可仅关注 σ_{xx} 对岩体的影响。

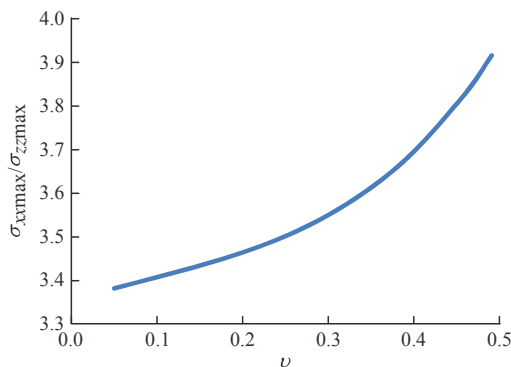


图 4 $\sigma_{xx\max} / \sigma_{zz\max}$ 随泊松比的变化

Fig.4 $\sigma_{xx\max} / \sigma_{zz\max}$ vs. Poisson's ratio

(2) 边坡岩体质点振动速度峰值分布特征

分析式(11)发现, 在波的传播方向即平行坡面方向上, v_x 在坡面上($z=0$)时绝对值最大。在深度方向上, 速度 v_z 在坡面上($z=0$)的值较高, 且随深度 z 增大先略有增大后缓慢减小至 0, 表明其速度极值并非出现在地表而是在地下且距离地表很近的位置。

令 $z=0$, 根据式(11)对比坡面上 2 个方向上的振动速度, 则 v_x 和 v_z 的峰值振动速度绝对值可简化为

$$\frac{v_{x\max}}{v_{z\max}} = \frac{k(k^2 - 2rs + s^2)}{r(k^2 - s^2)} \quad (23)$$

分析 $v_{x\max} / v_{z\max}$ 绝对值发现, 二者之比简后仅为泊松比的函数, 不受其他参数的影响, 且在泊松比为 0~0.5 区间内 $v_{x\max}$ 为 $v_{z\max}$ 的 0.77~0.54 倍(见图 5)。由此可见由同一 R 波在边坡表面同一点处所诱发的质点振动速度峰值存在 $v_{z\max} > v_{x\max}$ 的关系。

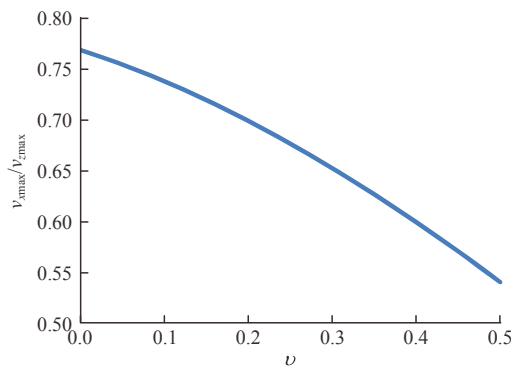


图 5 $v_{x\max} / v_{z\max}$ 随泊松比的变化

Fig.5 $v_{x\max} / v_{z\max}$ changes with Poisson's ratio

因此,为了安全起见对于R波引起的岩体振动而言,若要控制振动速度则应主要控制地震波传播方向上的振动速度即 v_x 。

(3) 附加动应力与振动速度的数学关系

工程实践中,工程技术人员希望通过振动速度的测量来考察爆破振动对边坡岩体的影响程度,因此,对速度与应力的对应关系进行分析具有实际意义,由前述分析可知,应力应主要关注 σ_{xx} , σ_{xy} , 而振动速度则应关注 v_x , 因此分别推求 σ_{xx} , σ_{xy} 与 v_x 间的关系。

首先,对 $\frac{\sigma_{xx}}{v_x}$ 的表达式进行整理得

$$\frac{\sigma_{xx}}{v_x} = \frac{4k^2rs\mu e^{rz} - (k^2 + s^2)(-r^2\lambda + \lambda k^2 + 2\mu k^2)e^{sz}}{k\omega[-2rse^{rz} + (k^2 + s^2)e^{sz}]} \quad (24)$$

由于正应力和振动速度在坡面上即 $z = 0$ 时大致处于峰值,因此重点分析坡面处的特征更有意义。因此,当 $z = 0$ 时,式(24)变为

$$\frac{\sigma_{xx}}{v_x} \Big|_{z=0} = \frac{4k^2rs\mu - (k^2 + s^2)(-r^2\lambda + \lambda k^2 + 2\mu k^2)}{k\omega(k^2 + s^2 - 2rs)} \quad (25)$$

将式(25)改写后可得到坡面上由振动速度表示的附加正应力的计算公式:

$$\sigma_{xx} \Big|_{z=0} = \frac{4k^2rs\mu - (k^2 + s^2)(\lambda k^2 - r^2\lambda + 2\mu k^2)}{k\omega(k^2 + s^2 - 2rs)} v_x \Big|_{z=0} \quad (26)$$

其次,对 $\frac{\sigma_{zx}}{v_x}$ 的表达式进行整理,由于应力与速度存在相位差,因此仅取其峰值表达式进行相比,整理得

$$\frac{\sigma_{zx}}{v_x} = \frac{2r\mu(k^2 + s^2)(e^{sz} - e^{rz})}{\omega(k^2 e^{sz} + s^2 e^{rz} - 2rse^{rz})} \quad (27)$$

坡面上附加动剪应力 σ_{zx} 为 0,对边坡无影响,因此需通过坡面振动速度推求某一深度 z 处振动速度,进而获得该深度处的附加动剪应力。垂直坡面方向任意深度 z 处的振动速度峰值 v_x 与坡面振动速度峰值之比可表示为

$$\frac{v_x \Big|_z}{v_x \Big|_{z=0}} = \frac{k^2 e^{-rz} + s^2 e^{-sz} - 2rse^{-sz}}{k^2 + s^2 - 2rs} \quad (28)$$

由此可得由 $v_x \Big|_{z=0}$ 确定的任意深度 σ_{zx} 为

$$\sigma_{zx} = \frac{\sigma_{zx}}{v_x \Big|_z} \frac{v_x \Big|_z}{v_x \Big|_{z=0}} v_x \Big|_{z=0} \quad (29)$$

得到由坡表振动速度表示的垂直坡面方向任意

深度 z 处的附加动剪应力计算公式:

$$\sigma_{zx} = \frac{2r\mu(k^2 + s^2)(e^{-rz} - e^{-sz})}{\omega(k^2 - 2rs + s^2)} v_x \Big|_{z=0} \quad (30)$$

因此,由式(26)和(30)即可表示岩体附加动应力与坡面质点振动速度间的数学关系。

4 岩体无剪切破坏振动速度允许值

4.1 岩体无剪切破坏时振动速度控制要求

爆破地震波作用下,边坡岩体将承受一定的附加动态剪切作用,当静态剪应力与附加动态剪应力之和超过其抗剪能力时将发生损伤破坏。

判断边坡岩体是否发生剪切破坏可通过计算坡体任意点处的剪应力进行判断,但由于的边坡几何形状和岩体力学参数对其岩体应力均有影响,任意点的剪应力的难以计算,因此也无法进一步进行允许振动速度的分析。

实践表明,爆破振动诱发的边坡岩体的滑动往往规模小,且主要集中在边坡的表层和浅层,其圆弧状滑动面形态不显著,因此为计算坡体任意深度处的剪应力状态,采用如图6所示边坡模型进行计算。假定边坡的主滑动面和坡面倾角均为 θ ; Z 为垂直于坡面方向的滑动面深度, γ 为岩体容重。

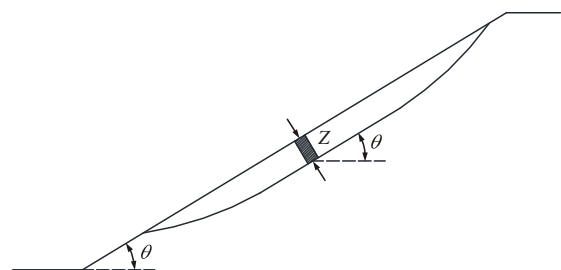


图6 无限边坡分析模型
Fig.6 Model of an infinite slope

偏于安全考虑,不考虑滑体顶部和底部的过渡滑动面对边坡稳定性的贡献时,边坡主滑动面处的剪应力可近似表示为

$$\tau \approx \gamma z \sin\theta \quad (31)$$

爆破地震R波作用下,滑动面上的附加动剪应力沿坡面方向呈正弦或余弦分布。当滑动面长度超过波长时,附加动应力将相互抵消。偏于安全考虑,假定滑体的滑动面远小于波长,近似认为滑动面上附加剪应力相同。此时静态剪应力附加动态剪应力后可表示为

$$\tau + \tau_d \approx \gamma z \sin\theta + \sigma_{zx} \quad (32)$$

要使岩体不发生剪切破坏, 则抗剪强度应大于剪应力, 同时考虑一定的安全系数 f_s 时, 得

$$c + \gamma z \cos \theta \tan \varphi > f_s (\sigma_{zx} + \gamma z \sin \theta) \quad (33)$$

式中: c 为岩体黏聚力, φ 为岩体内摩擦角, 得到岩体的允许动剪应力为

$$\sigma_{zx} < \frac{c + \gamma z \cos \theta \tan \varphi}{f_s} - \gamma z \sin \theta \quad (34)$$

根据动应力与速度间的关系式(式(17)), 并以坡面质点振动速度为控制指标时, 联立式(34)得到体波主影响区允许爆破振动速度为

$$v_x |_{z=0} < \frac{1}{\rho C_s} \left(\frac{c + \gamma z \cos \theta \tan \varphi}{f_s} - \gamma z \sin \theta \right) \quad (35)$$

根据动应力与速度间的关系式(30), 联立式(34)得到面波主影响区允许爆破振动速度为

$$v_x |_{z=0} < \frac{\omega(k^2 - 2rs + s^2) \left(\frac{c + \gamma z \cos \theta \tan \varphi}{f_s} - \gamma z \sin \theta \right)}{2r\mu(k^2 + s^2)(e^{-rz} - e^{-sz})} \quad (36)$$

根据式(35)和(36), 在确定岩体的物理力学参数和边坡的几何特征时则可得到其爆破振动速度的允许值。

4.2 不同级别岩体物理力学参数估算

目前岩体的物理力学参数主要通过工程类比法确定。我国岩体分级标准^[8]给出了各类岩体级别定性和定量的分级方法, 并给出了 I~V 级岩体的物理力学参数的取值范围(见表 2^[8])。

表 2 岩体物理力学参数^[8]

Table 2 Physico-mechanical parameters of rock mass^[8]

级别	BQ 值	$\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\varphi / (^\circ)$	c / MPa	E / GPa	ν
I	>550	>26.5	>60	>2.1	>33	>0.2
II	550~451	>26.5	60~50	2.1~1.5	33~16	0.2~0.25
III	450~351	26.5~24.5	50~39	1.5~0.7	16~6	0.25~0.3
IV	350~251	24.5~22.5	39~27	0.7~0.2	6~1.3	0.3~0.35
V	<250	<22.5	<27	<0.2	<1.3	>0.35

根据表 2 给出的不同级别岩体的物理力学参数建议值, 可得到 II~V 岩体参数的上限值(见表 3)。

表 3 各级岩体参数的上限值

Table 3 Upper limit of rock mass parameters of all classes

类别	$\gamma /$ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	$\varphi / (^\circ)$	c / MPa	E / GPa	ν
II 级岩体上限	26.5	60	2.1	33.0	0.20
III 级岩体上限	26.5	50	1.5	16.0	0.25
IV 级岩体上限	24.5	39	0.7	6.0	0.30
V 级岩体上限	22.5	27	0.2	1.3	0.35

4.3 不同级别岩体爆破振动速度允许值

根据我国《建筑边坡工程技术规范》(GB50330—2013)等规范关于边坡安全系数的规定, 地震作用下, 边坡的动力安全系数一般可取 1.05~1.15。由于爆破地震波作用较天然地震要弱的多, 因此爆破地震波作用下的边坡安全系数 f_s 达到 1.05 时可满足工程要求。

在体波主影响区, 炮孔作用区域与保留区域的应力差是形成剪切波的主要原因之一, 因此在爆源近区炮孔深度范围内岩体的附加动剪切力较为显著, 因此在无法准确确定潜在滑动面位置时, 深度 z 可取炮孔深度 h 进行估算, 分别取 5 和 10 m 两种工况, 并由式(35)计算允许振动速度, 且所述的振动速度方向为正对震源方向且平行坡面的振动速度。

计算结果(见表 4)表明, 采用 II, III 级岩体参数上限值进行计算时, 得到的允许振动速度接近。岩体质量进一步下降后, 允许振动速度则大大降低。且深度 5 和 10 m 处的允许振动速度也较为接近。

表 4 体波主影响区 x 方向(平行坡面)允许振动速度

Table 4 Allowable velocity in x -direction (parallel to surface) in the main influence zone of bulk wave cm/s

参数类别	$z = 5 \text{ m}$			$z = 10 \text{ m}$		
	$dip = 30^\circ$	$dip = 45^\circ$	$dip = 60^\circ$	$dip = 30^\circ$	$dip = 45^\circ$	$dip = 60^\circ$
II 级岩体上限	49	34	33	37	35	33
III 级岩体上限	36	35	34	38	35	33
IV 级岩体上限	29	27	26	30	26	23
V 级岩体上限	17	14	-	17	11	-

在 R 波主影响区, R 波传播造成的附加动剪应力在 z_{cr} 处达到峰值, 因此滑动面深度可近似取 z_{cr} 。由于 V 级岩体很难在 60° 坡度下自稳, 因此未考虑该工况。分别取 R 波振动频率 f 为 10 和 50 Hz 时, 由式(36)计算岩体允许振动速度。

计算结果表明(见表 5), 随着岩体级别的降低, 岩体的允许振动速度显著降低。而岩体的振动频率对不同的级别岩体的允许振动速度影响也有所差异, 岩体质量好时低振动频率对岩体更为有利, 而岩体质量较差时高振动频率对岩体更有利, 其原因是振动频率和岩体参数对附加动剪切力最大值所处深度有影响。

表5 面波主影响区 x 方向(平行坡面)允许振动速度
Table 5 Allowable velocity in x -direction(parallel to surface)
in the main influence zone of surface wave cm/s

参数类别	$f = 10 \text{ Hz}$			$f = 50 \text{ Hz}$		
	$dip = 30^\circ$	$dip = 45^\circ$	$dip = 60^\circ$	$dip = 30^\circ$	$dip = 45^\circ$	$dip = 60^\circ$
II级岩体上限	50	40	29	34	32	30
III级岩体上限	38	31	23	31	29	28
IV级岩体上限	24	18	12	22	21	20
V级岩体上限	11	6	-	12	11	-

综合分析发现, 爆源近区和远区, 不同深度, 不同振动频率条件下各级岩体的允许振动速度较为接近, 因此由表4和5综合得到边坡不发生浅层滑动时的允许振动速度值(见表6)。

表6 岩体无剪切破坏 x 方向(平行坡面)允许振动速度
Table 6 Allowable velocity in x -direction(parallel to surface)
of rock mass without shear failure cm/s

岩体级别	体波主影响区	面波主影响区	
		$f = 10 \text{ Hz}$	$f = 50 \text{ Hz}$
I~II级岩体	33~49	23~50	28~34
III级岩体	23~33	12~23	20~28
IV级岩体	11~23	6~12	11~20
V级岩体	<11	<6	<11

由表4, 5, 6可知, 以局部岩体不发生剪切破坏为控制条件时, 岩体的强度和边坡的形态对允许振动速度有较大的影响, 且不同级别岩体的允许振动速度差别较大, 计算得到I, II级岩体的允许振动速度可达30 cm/s的量级, 这与长沙矿冶研究院建议的稳定和较稳定矿山边坡坡脚允许振动速度为28~45 cm/s的量级较为接近的。而计算得到的III~V级岩体允许振动速度5~12 cm/s则与规程^[2]规定的5~15 cm/s量级也较接近。

必须指出的是, 以上为了得到便于工程应用的振动速度允许值, 对简单边坡模型进行了简化计算分析。而对于软弱结构面控制的复杂边坡, 由于结构面地质特征更为复杂, 且其与边坡形态存在多种组合关系, 采用简化计算可能存在较大的误差, 本文并未进行讨论, 上述振动速度控制值也不适用, 应根据其具体条件进行更加准确的分析。

5 岩体无张拉破坏安全允许振动速度

5.1 岩体无张拉破坏时振动速度控制要求

爆破开挖诱发的体波和面波所诱发的附加动应力中, 坡面上的附加动正应力是最大的, 尽管由于作用时间短且应变量小的原因, 一般无法造成岩体的强烈张拉破裂, 但仍可能造成岩体的张拉损伤, 因此爆破地震波诱发的附加动应力应低于岩体的抗

拉强度, 根据应力速度关系式(17)和(26)得到体波影响区正应力应满足:

$$\sigma_{xx} = V_x \Big|_{z=0} \rho C_p < \sigma_{tm} \quad (37)$$

而面波影响区正应力应满足:

$$\sigma_{xx} \Big|_{z=0} = \frac{4k^2 rs \mu - (k^2 + s^2)(-r^2 \lambda + \lambda k^2 + 2\mu k^2)}{k \omega (k^2 + s^2 - 2rs)} v_x \Big|_{z=0} < \sigma_{tm} \quad (38)$$

以坡面质点振动速度为控制指标时, 式(37)和(38)可分别改写为

$$V_x \Big|_{z=0} < \frac{\sigma_{tm}}{\rho C_p} \quad (39)$$

$$v_x \Big|_{z=0} < \frac{k \omega (k^2 + s^2 - 2rs)}{4k^2 rs \mu - (k^2 + s^2)(-r^2 \lambda + \lambda k^2 + 2\mu k^2)} \sigma_{tm} \quad (40)$$

5.2 不同级别岩体抗拉强度估算

根据岩体抗拉强度则可确定不同级别岩体的允许振动速度, 而Mohr-Coulomb强度准则和Hoek-Brown强度准则均可确定岩体的抗拉强度。其中, Mohr-Coulomb强度准则中岩体的理论抗拉强度通过岩体黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 进行计算:

$$\sigma_{t,MC} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (41)$$

而Hoek-Brown强度准则^[9-10]中岩体的理论抗拉强度 $\sigma_{t,HB}$ 则由岩体的岩性参数 m_i 、岩体质量指标 GSI 和完整岩块单轴抗压强度 σ_{ci} 确定:

$$\sigma_{t,HB} = \frac{s}{m} \sigma_{ci} \quad (42)$$

其中,

$$m = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

式中: σ_{ci} 为完整岩石试样的单轴抗压强度, m_i 为完整岩石常数, GSI 为岩体的地质强度指标值, D 为表征岩体的受扰动程度的参数。

一般而言, Mohr-Coulomb强度准则计算的抗拉强度要大于Hoek-Brown强度准则的计算值。而E. Hoek等^[9]认为Mohr-Coulomb强度准则确定的岩体强度反映的是大尺度岩体的整体强度特性, 而Hoek-Brown强度准则确定的岩体强度则主要是反映岩体破坏起始点的强度特征。因此, E. Hoek等^[9]认为对于大尺度岩体整体破坏问题采用Mohr-Coulomb强度准则计算的抗拉强度相对合理。

另外, 由于爆破振动频率较高, 应变率较高, 峰值应力所保持的时间短, 因此采用较大的抗拉强

度相对更为合理。

根据我国《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014),由各级岩体物理力学参数建议值,可大致确定各级岩体的爆破振动抗拉强度取值范围(见表 7)。

表 7 岩体抗拉强度计算值

Table 7 Calculated values of tensile strength of rock masses

岩体参数	抗拉强度/MPa
II 级岩体上限	1.13
III 级岩体上限	1.09
IV 级岩体上限	0.67
V 级岩体上限	0.25

5.3 不同级别岩体爆破振动速度允许值

根据岩体的抗拉强度(见表 7)以及坡面不发生张拉损伤时的力学条件,由式(39), (40)计算得到不同岩体强度参数下岩体的允许振动速度值(正对震源方向且平行坡面的振动速度)。计算结果显示(见表 8),岩体的安全允许振动速度值几乎不受岩体级别的影响,且振动频率对安全允许振动速度影响不显著。其次,面波主影响区的允许振动速度比体波主影响区小。

表 8 岩体无拉裂破坏 x 方向(平行坡面)允许振动速度

Table 8 Allowable velocity in X -direction(parallel to surface) of rock masses without tensile failure cm/s

岩体参数	体波主影响区	面波主影响区
II 级岩体上限	11.5	6.8
III 级岩体上限	15.3	9.1
IV 级岩体上限	15.1	9.1
V 级岩体上限	11.5	7.2

需要指出的是,以不发生张拉破裂为控制条件时,不同岩体级别岩体的抗拉裂安全允许振动速度相近的结论,与“岩体越软弱安全允许振动速度应越小”的感性认识是不同的,其原因是安全允许振动速度取决于岩体抗拉强度与岩体的波阻抗等参数的比值,而岩体级别下降时,岩体抗拉强度 σ_{tm} 在降低的同时,其波阻抗 ρC_p 的参数也在同时下降,且根据我国岩体分级标准^[8]中给出的岩体参数建议值,波阻抗 ρC_p 随岩体级别并非呈线性降低的,因此,并未呈现岩体安全允许振动速度随其级别而不断降低的规律。

6 岩体爆破振动速度允许值的讨论

通过上述分析得到了分别满足抗剪切和抗张拉破裂条件时边坡浅层岩体的安全允许振动速度。其

中,抗剪切破坏的平行坡面且正对爆源方向允许振动速度是以“一定深度”内的岩体不发生破坏为控制要求的。而抗张拉破坏的平行坡面且正对爆源方向允许振动速度是以边坡“表面”岩体不发生破坏为控制要求的。

由附加动拉应力和土压力沿深度方向的分布规律可知,张拉应力随着深度的增加而迅速衰减,但水平方向的土压力则呈线性增长,因此,仅以坡面岩体不发生张拉破坏为控制要求是过于偏于安全的。

另外,考虑边坡浅层岩体的整体稳定性时,沿潜在滑动面发生剪切破坏是边坡失稳的必要条件,而岩体发生张拉破坏则不是其必要条件,更不是充分条件,因此,边坡的爆破振动速度应以不发生浅层剪切破坏为主要控制条件,其允许的平行坡面且正对爆源方向(见图 1 的 x 方向)振动速度取值范围应为 6~50 cm/s(见表 6)。

还需指出的是,计算的允许振动速度的方向是平行坡面且正对爆源方向的,这与采用振动传感器进行爆破振动监测时的绝对水平方向是不同的。目前,工程实践中主要采用磁电式传感器,需水平安装,并要求传感器 x 方向正对爆源。因此,根据边坡面与监测点的相对位置关系可对表 6 所述的控制振动速度进行换算。设传感器的 x 方向与震源在铅直面内的夹角(即边坡在测点处的视倾角)为 γ (见图 7)。由于地震波平行坡面方向峰值速度和垂直坡面峰值速度存在相位差,因此,可根据速度分解原理,将震源至传感器连线方向的振动速度 V_x 分解为传感器 x 向和垂直 z 向的振动速度。由此可知测振仪测得的 x 向峰值速度 V_{tx} 应不大于平行坡面速度 $V_x \cos \gamma$ 。

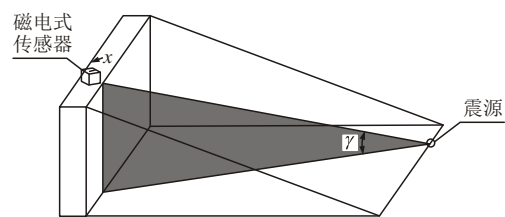


图 7 振动传感器与震源相对位置图

Fig.7 The position of vibration sensor and vibration source

因此,可得到测振仪水平安装且 x 方向正对震源时, γ 分别为 30° 和 60° 时测点处水平方向振动速度允许值分别如表 9, 10 所示。由表可知,坡度越陡,允许的爆破振动速度越小,控制越严格。在 γ 取 $0^\circ \sim 60^\circ$ 时,可通过表 9, 10 进行插值或参考确定。

对比上述理论分析结果,我国规程^[2]规定的永久岩质边坡的安全允许振动速度为 5~15 cm/s(见

表 9 测点正对震源时水平向允许振动速度($\gamma=30^\circ$)

Table 9 Allowable horizontal velocity of rock mass facing the vibration source($\gamma=30^\circ$) cm/s

岩体级别	体波主影响区	面波主影响区	
		$f=10\text{ Hz}$	$f=50\text{ Hz}$
I~II 级岩体	29~42	20~43	24~29
III 级岩体	20~29	10~20	17~24
IV 级岩体	10~20	5~10	10~17
V 级岩体	<10	<5	<10

表 10 测点正对震源时水平向允许振动速度($\gamma=60^\circ$)

Table 10 Allowable horizontal velocity of rock mass facing the vibration source ($\gamma=60^\circ$) cm/s

岩体级别	体波主影响区	面波主影响区	
		$f=10\text{ Hz}$	$f=50\text{ Hz}$
I~II 级岩体	17~25	12~25	14~17
III 级岩体	12~17	6~12	10~14
IV 级岩体	6~12	3~6	6~10
V 级岩体	<6	<3	<6

表 2), 整体上是较为合理的, 大致能够同时满足抗张拉和抗剪切破坏的双重要求, 但对于爆破近区岩体和岩体级别较高的岩体而言, 其控制标准较为保守, 工程实践中难以达到控制要求, 而要达到控制要求则其爆破施工的经济性显著下降。因此, 应结合理论分析和工程经验, 综合分析围岩特征、边坡几何特征以及爆破振动特征等因素, 对边坡的爆破振动控制标准进行细化, 使得爆破振动控制标准更科学和更具可操作性。

另外, 对于既有滑坡体或具有深层滑动面的潜在滑坡体而言, 仅仅控制坡脚或坡面上的爆破振动速度往往存在较高的风险, 需通过工程地质分析并结合动力极限平衡或动力有限元等方法综合确定更为可靠的爆破振动速度允许值。

7 结 论

针对工程爆破中岩质边坡允许振动速度未考虑岩体地质特征且缺乏理论依据问题, 对露天开挖爆破条件下, 爆源近区体波和远区面波的传播特征进行了理论分析, 并根据边坡浅层岩体的抗剪与抗拉要求计算了岩体的安全振动速度允许值, 得到如下主要结论和成果:

- (1) 露天爆破诱发的地震波在边坡浅层岩体中引起的附加动应力较为显著。
- (2) 同一瑞利波在边坡浅层岩体中所诱发的附加动应力中沿传播方向上正应力总是最大的, 对岩体的影响最显著。
- (3) 瑞利波在坡体中引起的附加动剪切应力和

垂直坡面方向附加动拉应力在某一深度处达到峰值。当该深度与边坡潜在滑动面重合时对边坡的抗滑稳定性最不利。

(4) 岩体强度、边坡坡度、滑动面深度和爆破地震波频率等均对边坡的安全允许振动速度存在影响。

(5) 根据爆破地震波引起的动应力特征和边坡的失稳机制, 提出了不同级别岩体的安全允许振动速度推荐值, 但由于岩体质量等级、力学参数和爆破地震波附加动应力难以准确确定, 提出的边坡安全允许振动速度应进一步研究细化。

参考文献(References):

- [1] 言志信, 彭宁波, 江 平, 等. 爆破振动安全标准探讨[J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1 281 - 1 284.(YAN Zhixin, PENG Ningbo, JIANG Ping, et al. Research about blasting vibration safety criteria[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1 281 - 1 284.(in Chinese))
- [2] 中华人民共和国国家标准编写组. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2015.(in Chinese))
- [3] 卢文波. 三峡工程临时船闸与升船机开挖中的爆破方案优化和爆破振动控制[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497 - 502.(LU Wenbo. Optimization of blasting procedure and vibration control during excavation of temporary ship lock and ship lift in Three Gorges project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497 - 502.(in Chinese))
- [4] 刘美山, 吴从清, 张正宇. 小湾水电站高边坡爆破震动安全判据试验研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(1): 40 - 43.(LIU Meishan, WU Congqing, ZHANG Zhengyu. Experimentation on judging standard of blasting vibration safety in high slope excavation of Xiaowan hydropower station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(1): 40 - 43.(in Chinese))
- [5] 罗 忆, 卢文波, 陈 明, 等. 爆破振动安全判据研究综述[J]. 爆破, 2010, 27(1): 24 - 27.(LUO Yi, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. View of research on safety criterion of blasting vibration[J]. Blasting, 2010, 27(1): 24 - 27.(in Chinese))
- [6] 朱传云, 卢文波, 董振华. 岩质边坡爆破振动安全判据综述[J]. 爆破, 1997, 14(4): 3 - 17.(ZHU Chuanyun, LU Wenbo, DONG Zhenhua. A review of the safety criterion of blasting vibration for rock slope[J]. Blasting, 1997, 14(4): 3 - 17.(in Chinese))
- [7] 陈 明, 卢文波, 舒大强, 等. 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 784 - 790.(CHEN Ming, LU Wenbo, SHU Daqiang, et al. Calculation method of equivalent acceleration for limit equilibrium analysis of slope under blasting vibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 784 - 790.(in Chinese))
- [8] 中华人民共和国国家标准编写组. GBT50218—2014 工程岩体分级标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GBT50218—2014 Standard for engineering classification of rock mass[S]. Beijing: Chinese Plan Press, 2014.(in Chinese))
- [9] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown criterion—2002 edition[C]// Proceedings of the NARMS-TAC Conference. Toronto: [s.n.], 2002: 267 - 273.
- [10] HOEK E, DIEDERICHS M S. Empirical estimation of rock mass modulus[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(2): 203 - 215.