

爆破动力作用下边坡稳定性的积分解法与应用

陈泽观¹ 林从谋¹ 黄志辉²

(1. 华侨大学岩土工程研究所, 福建泉州 362021; 2. 厦门理工学院, 福建厦门 361005)

【摘要】 岩质边坡在爆破开挖过程中的稳定问题是一个亟待解决的重要问题。对实际工程进行监测, 得到适合该地区的能反应高程效应的爆破地震波传播规律, 并采用拟静力法计算爆破地震惯性力, 提出边坡在爆破动力作用下稳定安全系数的新计算方法——积分法, 同时使用 MATLAB 程序搜索边坡最危险滑裂面并计算最小安全系数。实例证明, 此方法是分析边坡动力稳定性的有效方法之一。

【关键词】 高程效应; 拟静力法; 爆破震动; 边坡动力稳定; 积分解法

【中图分类号】 TU 413.62

Integral Method and Application For Dynamic Stability of Slope Under Blasting Loads

Chen Zeguan¹ Lin Congmou¹ Huang Zhihui²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou Fujian 362021;

2. Xiamen University of Technology, Xiamen Fujian 361005 China)

【Abstract】 The stability of rock slope under the effect of blasting excavation is so important to be solved urgently. After the blasting test on the actual project, the propagation rule of blasting wave is obtained, which can take the elevation effect into account. Using the quasi-static method to calculate the inertia force of blasting. The integral method is put forward to analyze the dynamic stability of slope under the effect of blasting vibration for the first time. Besides, it searched the most dangerous sliding surface and gained the minimum safety factor through the program of MATLAB. This method is proved to be one of the most valid methods to study the dynamic stability of slope through the sample.

【Key Words】 elevation effect; quasi-static method; blasting vibration; dynamic stability of slope; integral method

0 引言

爆破震动对边坡稳定性的重大影响, 已引起人们的广泛关注。首先爆破震动会产生一种瞬时冲击作用, 从而使爆破岩体中产生了由质点震动加速度的传播而引起的动荷载, 这样边坡岩体中的剪应力增加; 而后爆破震动产生的压缩波传到坡面后, 又引导了拉伸波的产生, 使岩体产生拉应力, 由于岩体为低抗拉材料, 这样原有不连续面会进一步扩张或产生新的不连续面。可见, 爆破震动作用改变了岩体中的应力状态, 也会影响地下水的赋存和运动状态, 直接或间接地影响边坡的稳定性。目前, 对于边坡的静力学稳定性研究已取得比较好的成果, 而爆破荷载作用下岩质边坡稳定性也已成为人们的关注热点, 并也取得了一些进展, 如: 白志勇^[1]、舒大强^[2]等都将爆破地震惯性力拟静力化, 再运用条分法对边坡动力稳定性进行分析; 卢文波^[3]采用时程法和

拟静力法相结合的混和方法计算爆破地震惯性力, 也用条分法计算边坡的动力稳定安全系数; 张林、林从谋^[4]考虑爆破地震的时程效应, 利用改进的条分法分析边坡动力稳定性。

但作为最早提出来, 而且现在应用最广泛的条分法, 仍存在着一些问题, 如计算手续麻烦、计算精度受分条数目的影响等等。边坡稳定性的积分解析方法(即采用积分算式代替条块的代数求和方法), 已在边坡静力稳定性分析应用中被证明具有计算过程相对简单、计算量减少、计算精度提高等优点^[5-7]。本文基于拟静力法和文献^[7]给出的边坡静力稳定性分析的积分解法思路, 得到爆破作用下边坡动力稳定积分解法表达式。同时利用现场监测手段获得爆破地震波在岩质边坡中的传播规律, 并将其作为爆破荷载输入, 分析计算实际边坡稳定性, 为动荷载作用下边坡稳定性的预测或评判提供了新

资助项目: 华侨大学高层次人才科研启动项目资助(NO.02BS204)

作者简介: 陈泽观, 1982年生, 女, 汉族, 福建泉州人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程研究工作。E-mail: yatch 1982@126.com

的方法。

1 边坡动力稳定性系数计算方法

1.1 基本假定

1)在爆破前后,边坡岩土的各个参数不发生变化;

2)岩土条块两侧面作用力平行于条底,但其大小并不相等,并假设爆破前后岩土条间的剪力不发生变化;

3)每个岩土条块的稳定系数同整个边坡的稳定系数相等。

1.2 爆破地震惯性力计算

边坡动力稳定分析常用的一种方法,是将分布在坡体上的动态爆破惯性力拟静力化,然后作为一种致滑力参与稳定计算。这种方法概念清晰,分析简便,避开爆破地震特有的复杂性,并能较好地结合现场实测资料。其计算公式如下:

$$F = \beta_d K_d W \tag{1}$$

式中: β_d ——爆破动力系数,取 0.1~0.2;

W ——岩体重力,kN;

K_d ——地震系数, $K_d = a/g$, a 为质点最大震动加速度, g 为重力加速度。

由式(1)可知,确定爆破地震惯性力 F 的关键是获得边坡坡面上介质质点最大震动加速度值。

1.2.1 反应高程效应的爆破地震波传播规律

国内比较一致地认为边坡等整体性构筑物的破坏与质点震动速度关系较密切,且采用质点震动速度可将地震波所携带的能量与所产生的动应力相联系起来,同时质点震速测试又较为简便,所以质点震速已成为衡量爆破地震效应的最常用指标^[8]。目前,爆破震动测试结果的分析很多都是对萨道夫斯基公式进行回归。但对于边坡,马鞍山矿山研究院于上世纪 70 年代就提出应考虑高程变化对其影响。金淳圭^[9]在对露天采场爆破时边坡中的震动效应分析时,发现急倾斜的地形对露天矿山采场爆破震动效应有显著影响,并认为地形倾角大于 15°时应考虑高程影响。文献^[10-11]等对如何考虑高程放大效应的计算公式进行了总结。目前使用较多的是朱传统^[12]提出的量纲为一的公式(见式(2)),文献^[13-14]等就是根据测试数据对此公式进行回归分析。

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\lambda \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{H_1} \right)^\eta \tag{2}$$

式中: Q ——最大一段起爆药量,kg;

R ——测点与爆心的水平距离,m;

H_1 ——测点与爆心之间的高程差,m;

η ——高程影响系数;

λ ——与地质条件有关的地震波衰减系数;

K ——与地质、爆破方法等因素有关的系数。

1.2.2 速度峰值与加速度峰值的转化

对于简谐震动,速度与加速度峰值间存在下面的关系:

$$a_{max} = 2\pi f v_{max} \tag{3}$$

借助于这一基本关系,可将同样的关系推广到爆破震动的统计规律中来。而此时的 f 不再是某一确定简谐震动的频率,但它应该也是具有确定统计意义的、有代表性的频率值。由于爆破波是多频率成分组成的复杂震动,但各频率成分的贡献各有大小,如果选取贡献最大的频率作为 f ,由文献^[8]知这样是偏于安全的。因此采用文献^[15]方法,将爆破振动信号进行小波包分析,可得爆破振动信号在不同频带上的能量分布图以及各频带上的主频,并将其中贡献最大的主频率作为 f 。

1.2.3 爆破动力确定

在图 1 中,对 dx 段内岩土块,爆破地震惯性力在垂直于坡面和平行于坡面的分量 dF_V 和 dF_P 分别为:

$$dF_V = \beta_d/g (a_h \sin \theta + a_{\perp} \cos \theta) dW \tag{4}$$

$$dF_P = \beta_d/g (a_h \cos \theta + a_{\perp} \sin \theta) dW \tag{5}$$

1.3 动力稳定性系数积分解法计算式

从边坡内取出一宽度为 dx 的微分条块,该条块上的诸力见图 1,将各力投影在底滑面上,可得边坡在爆破震动作用下积分解法的安全系数表达式为:

$$F_s = \int_0^l (c \sec \theta dx + \cos \theta \tan \varphi dW - \tan \varphi dF_V) / \int_0^l (\sin \theta dW + dF_P) \tag{6}$$

式中: $dW = \gamma h dx$ tag(7)

$$\theta = \arcsin(x - x_0) / \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \tag{8}$$

$$h = \begin{cases} y_1 - y_3 & 0 \leq x < L \\ y_2 - y_3 & L \leq x \leq l \end{cases} \tag{9}$$

式中: $l = x_0 + \sqrt{r^2 - (y_0 - H)^2}$, $L = H \cot \beta$; 而 y_1, y_2, y_3 分别是直线 BC 、 AB 和圆弧 AC 的方程,即:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= x \tan \beta \\ y_2 &= H \\ y_3 &= b - \sqrt{r^2 - (x - x_0)^2} \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

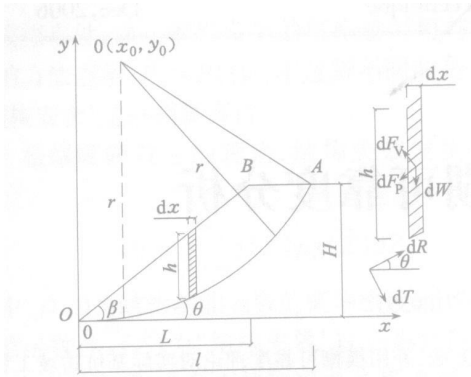


图1 边坡圆弧滑动

2 滑动圆弧圆心的确定

边坡最危险滑裂面圆心的范围可按潘家铮在文献[16]中提出的方法确定(见图2),边坡的水平投影长度为L,过边坡中点做边坡垂线MD,并作铅垂线MG,分别以 $R_1=L/2$, $R_2=3L/4$ 为半径,以M点为圆心作弧,则一般情况下,最危险滑弧的圆心在DEFG范围内。

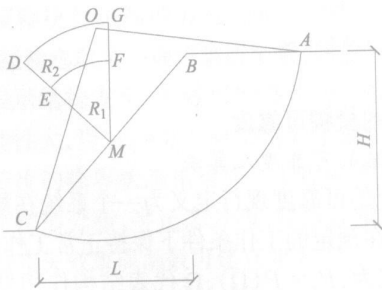


图2 搜寻最危险滑弧圆心

3 计算实例

为了检验文中提出的边坡爆破动力稳定积分解法的合理性与有效性,选取笔者曾监测的泉州清溪开发区一强风化花岗岩并夹有一定含砂粘土的边坡进行计算分析。其边坡水平投影长 $L=67.004\text{ m}$,坡高 $H=37.756\text{ m}$,黏聚力 $c=200\text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi=27^\circ$,岩体重度 $\gamma=23.5\text{ kN/m}^3$ 。

爆破开挖采用多段微差深孔爆破方式,其中最大段药量为336 kg。选用IDTS3850型爆破振动记录分析系统对该边坡爆破开挖进行监测,得到的水平、竖直方向的主频率及质点峰值振速(单位为cm/s)等数据。假设该边坡无限长,因此不考虑水平2方向(水平且垂直爆区)影响,运用实测数据对式(2)分竖直和水平方向进行拟合得到:

$$v_{\perp}=7.1456(Q^{1/3}/R)^{0.0286}(Q^{1/3}/H_1)^{-0.0422}$$

$$v_h=8.4174(Q^{1/3}/R)^{0.2174}(Q^{1/3}/H_1)^{-0.2028}$$

假设震源在坐标圆心,于是上式中 $R=x$, $H_1=$

$x \tan \beta$ 。

接着采用Matlab6.5编程对几条典型的速度时程曲线进行小波分析得到主频f,然后整理得到与滑裂面圆心有关的边坡稳定性积分解法安全系数表达式,其次计算出D、E、F、G坐标,并以D点为滑裂面圆心试算点,在DEFG范围内划分网格,用Matlab6.5编制的计算机程序进行搜索,可得最小稳定安全系数 F_{smin} 及对应的滑裂面。计算结果见表1,从表中安全系数发现爆破震动对边坡稳定性是产生一定的影响,但并不显著。只是爆破震动后,边坡岩体中产生大量的不连续面,在有地下水后降雨的情况下,影响便不可忽视,因此在工程实践中应予重视。大量实践证明瑞典法偏于安全,而采用本文方法有效地提高了工程的安全性,可以说更符合工程实际。

表1 计算结果

最小安全系数	本文方法		瑞典圆弧法	
	考虑爆破震动	未考虑爆破震动	考虑爆破震动	未考虑爆破震动
F_{smin}	2.953	3.024	2.876	2.911

4 结语

爆破震动对边坡的影响非常复杂,本文在瑞典条分的基础上,提出一种新的计算边坡动力稳定性的积分解法,完善了极限平衡理论,避免了传统条分计算的繁琐工作,为边坡的动力稳定分析提供了一种有效、实用的分析计算方法,具有重要的实际意义。

参考文献

- [1] 白志勇,黄素珍,鲁勉. 爆破对边坡岩体稳定性的影响[J]. 路基工程,1995(3):19-23.
- [2] 舒大强,何蕴龙,董振华. 岩质高边坡开挖爆破震动荷载及其对边坡稳定性影响的研究[J]. 工程爆破,1996,2(4):39-43.
- [3] 卢文波,赖世骧,朱传云. 岩石高边坡爆破振动动力稳定性分析[J]. 矿冶工程,1996,16(1):1-7.
- [4] 张林,林从谋. 爆破震动对土质边坡动力稳定性影响研究[J]. 岩土力学,2005,26(9):1499-1501.
- [5] 杨庚宇,赵少飞. 土坡稳定分析圆弧滑动法的解析解[J]. 工程力学,1988(5):440-444.
- [6] Gao Jinggang, Zaman M M. Short communications: analytical method for analysis of slope stability[J]. Int. J. Numer. Anal. Meth Geometh. 1999(23):439-449.
- [7] 蒋斌松,蔡美峰,吕爱钟. 边坡稳定性的解析计算[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(16):2726-2729.

变式的沉降变形规律无疑对路面结构不利。

4) 填石料在压实到一定程度后,其综合长期性能优于土质路堤,完全可以用作路堤填料。从 $2^{\#}$ 、 $5^{\#}$ 试样的试验结果可以看出,成型压实度较高的大粒径试样,其总沉降大大小于土质路堤。特别是含砾砂岩填料,无论总沉降量还是循环沉降变形量都大大低于土质路堤,是一种优良的路堤填料,尽管 $2^{\#}$ 泥质板岩填料在饱水时产生了较细粒填料大的沉降变形,但其变形总量仍小于土质路堤,考虑到施工过程中雨水侵蚀可消除一部分沉降变形量,可以认为,压实度较高的泥质板岩填料完全可以用于路基填筑。反之,对于成型密实度低的软质岩填料(或容易风化的填料)在路基长期运营期受到雨水侵蚀时,会产生较大的沉降变形。因此,对于软质岩填料,在施工中必须对压实标准作出严格控制。

5) 对于强度较高的含砾砂岩试样,在成型密实度较低时(如 $4^{\#}$ 试样),在短期内其沉降变形不是很明显,这并不说明强度较高的软岩填料可以采用较低的密实度修筑路堤。因为这一方面有岩石短期不易风化的原因,另一方面,模型试验的尺寸较小,其侧壁对试样有较强的约束,这与实际情况差异较大,这种影响对于强度越高的试样越明显。

6) 大粒径软岩填料的长期沉降变形过程是一个漫长而又复杂的过程,模拟试验由于试验设备的限制,对试样尺寸和边界条件作了较大程度的简化。软岩填料的长期沉降变形规律仍需要通过实际工程来检验。

3 结论

综上所述,本文采用现场试验和室内模型试验

相结合的方法对软岩填筑的路堤长期沉降变形机理进行了探讨,可以得出以下结论:

软岩填料的长期沉降变形特性表明,路堤长期性能的稳定性与其岩性、风化程度、颗粒大小、压实度、强度和环境有关,水的侵蚀是后期产生较大工后沉降变形的主要原因,其长期沉降变形过程与细粒土填料明显的不同,但压实到一定程度后,其综合性的长期性能优于土质路堤。

参 考 文 献

- [1] 何满潮,景海河,孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社,2002.
- [2] 铁道部第三勘察设计院. 铁建设[2003]13 京沪高速铁路设计暂行规定[S]. 北京:中国铁道出版社,2003.
- [3] 邓学钧. 路基路面工程[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [4] 卿启湘,王永和,李光耀,等. 软岩岩土填筑高速铁路路堤施工与质量控制[J]. 施工技术,2005(5):22-25.
- [5] 付宏渊. 高路堤沉降稳定的影响因素及取值标准研究[J]. 湖南交通科技,2003,29(4):20-22.
- [6] Loganathan N. Deformation Analysis of Embankment [J], Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(8):1185-1206.
- [7] 郑 治. 填石料的长期变形性能模拟试验研究[J]. 中国公路学报,2001,14(2):18-21.
- [8] 邓凯宇. 高速公路红砂岩的路用性能及施工工艺研究[J]. 岩土工程技术,2003(5):253-257.
- [9] 陈秀方. 轨道工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [10] 赵学亮. 爆破震动对岩质边坡稳定性影响的研究及其工程应用[D]. 北京:北京科技大学,2001.
- [11] 金淳圭. 露天采场爆破在边坡中的震动效应[J]. 金属矿山,1995(5):18-20.
- [12] 许红涛. 岩石爆破动态卸载机理及震动效应研究[D]. 武汉:武汉大学,2003.
- [13] 姚 尧. 爆震的放大效应与二元回归分析[J]. 爆破,1992(4):5-8.
- [14] 王在泉,陆文兴. 高边坡爆破开挖震动传播规律及质量控制[J]. 爆破,1994(3):1-4.
- [15] 凌同华,李夕兵. 多段微差爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(7):1117-1122.
- [16] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京:水利出版社,1980.

收稿日期:2006-09-21

收稿日期:2006-09-06

(上接第 277 页)