

爆破震动对土质边坡动力稳定性影响研究

张 林, 林从谋

(华侨大学 岩土工程研究所, 福建 泉州 362021)

摘 要: 采用拟静力化的惯性力法, 利用改进了的条分法来计算主动土压力, 并考虑爆破地震的时程效应, 提出了已有边坡在爆破过程中的动力稳定性系数的新的计算方法。实例证明, 所得计算结果综合考虑了爆破震动波传播过程的衰减、频谱结构及相位差等因素的影响, 因此该方法在土质边坡稳定分析中与拟静力法相比更具理论基础, 其结果也更接近工程实际。

关 键 词: 爆破震动; 边坡动力稳定分析; 拟静力法; 时程效应

中图分类号: O 382; TU 441

文献标识码: A

Study about soil slope dynamic stability due to blasting vibration

ZHANG Lin, LIN Cong-mou

(Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Considering the time distance effect of blasting vibration and the quasi-static method, and making use of the improved slice method, this paper puts forward an analytic method of slope stability under blasting vibration; and gets a new computing technology of dynamic stability of slopes under blasting vibration. The calculation of an actual engineering example shows that the method is more reasonable and closer to the actuality than the conventional methods.

Key words: blasting vibration; dynamic stability analysis of slope; quasi-static method; time-distance effect

1 引 言

边坡稳定性评价是岩土工程经常遇到的问题, 特别是近 20 年来, 随着我国基础建设的大力发展, 边坡稳定性的研究及其维护显得越来越重要。矿山、水利、交通等部门都涉及到大量的边坡问题, 正确评价边坡的稳定性, 对于确保生产建设和人民财产安全具有重要的意义, 它不仅可为工程施工提供科学的理论依据, 而且对边坡加固和滑坡的预测预报也具有重要的指导作用。

目前, 对于边坡的静力学稳定研究已取得比较好的成果, 并得到了推广应用, 但在动力学稳定性研究方面, 还不很完善。为此, 本文考虑爆破地震的时程效应, 采用拟静力化的惯性力, 根据三维滑坡刚体极限平衡方法^[1], 利用改进了的条分法^[2]来计算主动土压力, 提出了已有边坡在爆破过程中的动力稳定性系数新的计算方法, 从而可以在实际工程中采取相应的措施控制爆破震动, 使工程得以顺

利完成。

2 边坡动力稳定性系数计算方法

本文方法涉及到的假设主要有:

- (1) 在爆破前后, 土体的各个参数不发生变化。
- (2) 考虑土条间的剪力, 并假设爆破前后土条间的剪力不发生变化。土条间两侧作用力合力 ΔE_i ^[3] (两侧土条对其竖直 Y_i 和水平方向剪力 X_i 的合力) 不平行于土条底部, 其角度为 $\delta_i = \arctan(Y_i / X_i)$, 大小不相等。
- (3) 最危险滑动面通过坡脚。
- (4) 每个土条的安全系数与整个边坡的安全系数相等。

2.1 爆破地震荷载的确定

前人对爆破震动荷载的处理一般采用拟静力法, 其计算公式为

$$F_i = \frac{1}{\beta_i} \frac{\gamma_i}{g} W_i \quad (1)$$

式中 F_i 为爆破震动荷载的静力等效值; β_i 为爆破动力折算系数; W_i 为第 i 条块岩体重量; γ_i 为第 i 条块岩体中爆破震动的峰值质点振动加速度; γ_i/g 为爆破地震系数。

上述静力等效法, 对爆破震动的地震惯性力计算作了过多的简化, 在简化过程引入的诸多不确定因素, 使该法的可信度受到影响。近年来人们逐渐意识到, 在计算爆破震动荷载时必须考虑地震波的频谱特性和相位差因素, 并且需要考虑地震波波长与滑坡体特征的尺寸效应。

本文参照文献[4]中岩质边坡爆破地震惯性力的计算方法来计算爆破地震惯性力。由于爆破地震波的主要成分是面波, 故采用频谱比法来确定面波的衰减参数。面波在单一岩土介质中传播时的幅值谱函数可表示为

$$A(R, w) = \left(\frac{R_0}{R} \right)^{\frac{1}{2}} A_0(w) \cdot \exp(-aR) \exp(-iwR/C) \quad (2)$$

式中 R 为坡脚离爆源的径向距离; A , A_0 分别为参考测点和爆源处的振幅; R_0 为装药的等效半径; C 为爆破地震波波速, w 为旋转频率。

测得的 A_1 , A_2 点振幅的比值为

$$\frac{A_2(R_2, w)}{A_1(R_1, w)} = \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\frac{1}{2}} \exp[-a(R_2 - R_1)] \cdot \exp[-iw(R_2 - R_1)/C] \quad (3)$$

略去对幅值没有影响的最后一项, 在已知 A_1 , A_2 和 R_1 , R_2 的情况下, 可以求得振幅衰减指数 a 。同时采用傅立叶变换, 将 $a(R, t)$ 转化为频域内的 $a(R, w)$, 并考虑爆破地震波沿垂直于坡面(或地表)方向的衰减以及沿边坡方向的可能放大作用进行修正, 最后可得爆破地震波传播过程中的衰减规律:

$$a(R, w) = \sum_{i=0}^{N/2} A_i(R, w_i) \left(\frac{R}{x+R} \right)^{\frac{1}{2}} \gamma_1(H, w_i) \cdot \gamma_2(D, w_i) \exp[-a(w_i)x] \cos \left[w_i \left(t - \frac{x}{C} \right) + \varphi_i \right] \quad (4)$$

式中 R_1 , R_2 为测点到爆心的距离; φ_i 为对应的初相位; x 为沿爆源径向测点至坡脚距离, 并满足 $t \geq x/C$; $\gamma_1(H, w_i)$, $\gamma_2(D, w_i)$ 分别为爆破地震波沿坡体不同高程处的放大系数和沿垂直于地表或被面方向的衰减系数; H 和 D 分别代表高程和深度; γ_1 , γ_2 可以由实测分析得到。

在图 1 中, 对 i 条块, 爆破地震惯性力在垂直于坡面和平行于坡面的分量 $F_{\perp}$ 和 $F_{\parallel}$ 分别为

$$F_{\perp} = W_i(a_{hi} \sin \alpha_i + a_{\perp i} \cos \alpha_i) \quad (5)$$

$$F_{\parallel} = W_i(a_{hi} \cos \alpha_i + a_{\perp i} \sin \alpha_i) \quad (6)$$

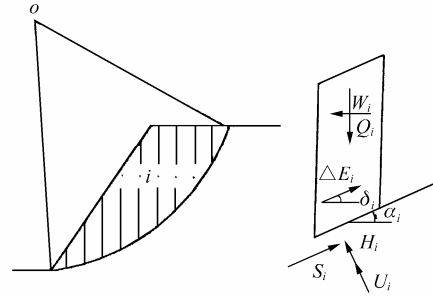


图 1 土坡稳定圆弧法

Fig.1 Circular arc analysis of simple slopes

2.2 动力稳定性系数计算公式

将图 1 中各力投影在底滑面上, 可得

$$\Delta E_i \cos(\delta_i - \alpha_i) = Q_i \cos \alpha_i - S_i + W_i(a_{hi} \cos \alpha_i + a_{\perp i} \sin \alpha_i + g \sin \alpha_i) \quad (7)$$

由强度破坏准则有:

$$S_i = (c_l i + N_i f_i) / k \quad (8)$$

其中:

$$N_i = W_i(a_{hi} \sin \alpha_i + a_{\perp i} \cos \alpha_i + g \sin \alpha_i) - Q_i \sin \alpha_i - U_i \quad (9)$$

式中 W_i 为土条自重; N_i 为土条所受法向作用力; Q_i 为土条所受外力; S_i 为土条所受摩擦力; ΔE_i 为土条两侧作用力合力; U_i 为水压力; c_i 为土的粘聚力; l_i 为土条底坡长度; δ_i 为 ΔE_i 的水平夹角; g 为重力加速度; $f_i = \tan \alpha_i$ 。

由式(7)~(9), 可得

$$\Delta E_i = \frac{W_i(a_{hi} \cos \alpha_i + a_{\perp i} \sin \alpha_i) + Q_i \cos \alpha_i}{\cos(\delta_i - \alpha_i)} - \frac{(c_l i + N_i f_i) / k}{\cos(\delta_i - \alpha_i)} \quad (10)$$

由于作用力与反作用力大小相等, 方向相反, 故有:

$$\sum_{i=1}^n \Delta E_i = 0 \quad (11)$$

即

$$\sum_{i=1}^n \frac{W_i(a_{hi} \cos \alpha_i + a_{\perp i} \sin \alpha_i + g \sin \alpha_i)}{\cos(\delta_i - \alpha_i)} + \sum_{i=1}^n \frac{Q_i \cos \alpha_i - (c_i l_i + N_i f_i)/k}{\cos(\delta_i - \alpha_i)} = 0 \quad (12)$$

故可得稳定性系数 k 为

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i l_i + N_i f_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{W_i(a_{hi} \cos \alpha_i + a_{\perp i} \sin \alpha_i + g \sin \alpha_i) + Q_i \cos \alpha_i}{\cos(\delta_i - \alpha_i)}} \quad (13)$$

由于式(13)各量均可求得，故可以直接求出稳定性系数 k 来。

2.3 最危险滑动圆弧圆心的确定

土质边坡最危险滑弧中心的范围，确定方法如图 2 所示^[5]。边坡的水平投影长度为 L ，过边坡中点作边坡垂线 AD ，并作铅垂线 AC ，分别以 $R_1=L/2$ ， $R_2=\frac{3}{4}L$ 为半径，以 A 为圆心作弧，在一般情况下，最危险滑弧的圆心在 $CDEB$ 范围内。

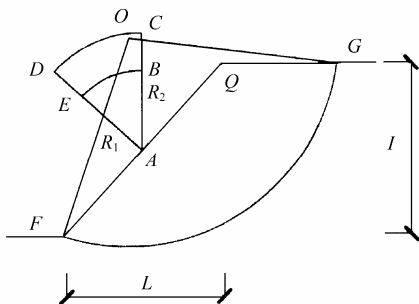


图 2 搜寻最危险滑弧中心
Fig.2 The determination of the center of circular slip surface

2.4 安全系数损失率 η

爆破振动对边坡的动力影响程度由安全系数损失率 η 定量表示，其定义如下：

$$\eta = \frac{k_1 - k_2}{k_1} \times 100 \% \quad (14)$$

式中 k_1 为未考虑爆破振动影响时的边坡安全系数； k_2 为考虑爆破振动影响时的边坡安全系数。

3 计算实例

为了检验文中提出的边坡爆破动力稳定计算方法的合理性与有效性，选取笔者曾参加治理设计的泉州市清蒙经济技术开发区内一些土质边坡实例进行计算比较分析。

为了比较不同稳定分析方法之间的区别，还分别采用了瑞典拟静力法和毕肖普拟静力法对该边坡进行了稳定性系数计算。瑞典拟静力法和毕肖普法拟静力法就是爆破震动荷载采用拟静力法^[3]计算得到，再分别采用瑞典法和毕肖普法计算。该工程爆破时采用点爆源，浅炮眼，且分别在坡脚和坡顶布置了震动监测点。根据实测的爆破震动资料，当频率 $f=80$ Hz 时，原始参数及采用本文方法和瑞典拟静力法、毕肖普拟静力法计算结果见表 1。

由表 1 可以看出，用本文方法计算的稳定性系数较其它方法有了一定的提高，并经过现场实际观测，也更加接近实际，因此具有较高的实用价值。

表 1 不同边坡稳定分析方法之间比较
Table 1 Comparison between different analytical methods of slope stability

坡高 /m	坡率	c /kPa	$\varphi/(^\circ)$	重度 /kN·m ⁻³	本文方法	瑞典 拟静法	毕肖普 拟静法
20	2	10	20	18	1.126	1.031	1.073
50	2.7	15	29.4	19.6	1.214	1.065	1.084

4 结 语

采用本文所建议的方法进行土质边坡稳定性影响分析时，能考虑条间剪力对边坡动力稳定的影响，且能综合考虑到爆破震动波传播过程的衰减、频谱特性及相位差等因素的影响，因此该方法在土质边坡稳定分析中与拟静力法相比更具理论基础，并且计算公式简便，不需要迭代计算，其结果也更接近工程实际。

参 考 文 献

- [1] 魏小林，魏挺峰. 基坑爆破对边坡变形的影响[J]. 工程爆破, 1999, 5(3): 11—16.
- [2] 刘杰，张学深，褚世洪. 简单边坡的稳定性分析[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 714—716.
LIU Jie, ZHANG Xue-sheng, CHU Shi-hong. Stability analysis of simple slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 714—716.
- [3] 王英锐，唐忠德. 考虑条间作用剪力德土坡稳定性分析方法[J]. 地下空间, 1999, 19(1): 25—29.
- [4] 卢文波，赖世骧，朱传云. 岩石高边坡爆破震动动力影响分析[J]. 矿冶工程, 1996, 16(1): 1—7.
- [5] 潘家铮. 建筑物抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京：水利出版社, 1980.