

文章编号: 1000-7598-(2013)增1-0117-05

基于滑面正应力分布的爆炸震动荷载作用下边坡稳定性分析

刘华丽¹, 宫云祥¹, 李宏伟¹, 朱大勇²

(1. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 南京 210007; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009)

摘要: 假定滑面正应力分布为2个待定参数的拉格朗日函数, 推导出爆炸震动作用下滑体的水平力、垂直力和力矩平衡方程。通过算例分析证实计算方法的可行性, 说明爆炸振动拟静力系数与边坡安全系数的关系。研究结果表明, 垂直向下、水平指向坡外的爆破振动荷载以及两者的联合爆破荷载对边坡稳定性安全系数有很大的影响; 爆破荷载拟静力系数从0增加到0.3, 每步增加0.05, 爆破振动水平指向坡外时, 边坡安全系数减少6.65%~23.54%, 爆破振动垂直向下时, 边坡安全系数减少1.18%~2.52%, 联合爆破荷载的方向对边坡稳定性也有影响。

关键词: 爆炸力学; 边坡; 稳定; 拟静力法; 安全系数

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Study of slope stability under blasting vibration based on distribution of normal stress over slip surface

LIU Hua-li¹, GONG Yun-xiang¹, LI Hong-wei¹, ZHU Da-yong²

(1. Engineering Institute of Corps of Engineers, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The initial distribution of normal stresses over the slip surface is assumed, which is then modified by a Lagrangian function involving two parameters to satisfy the complete equilibrium conditions of the sliding body. Reliability of the proposed method was verified and relation between pseudo-static coefficient under blast seism and safety factor of on slope was explained by using calculatiexamples. Computed results in some engineering cases show that the horizontal and vertical dynamic loads as well as their combined dynamic load make the greatest impact on the safety factor of slope stability. When horizontal dynamic load pseudo-static coefficient is added 0.05 from 0 to 0.3, the safety factors are reduced 6.65% -23.54 %. When vertical dynamic load pseudo-static coefficient is added 0.05 from 0 to 0.3, the safety factors are reduced 1.18 % -2.52 %. The combined load action direction has also some impact on the slope stability.

Key words: mechanics of explosion; slope; stability; pseudo-static analysis; safety factor

1 前言

爆破振动荷载作用下边坡稳定性研究是岩土工程界研究的热门课题^[1-4], 它的稳定性直接影响着人类重大的生命和财产安全。目前爆破振动荷载作用下岩土边坡稳定性分析方法主要有拟静力法^[5]、Newmark 滑块分析法^[6]、数值分析法^[7-8] (有限单元法、离散单元法和拉格朗日元显式有限差分法)。拟静力法将爆破振动作用简化为水平方向或垂直方向的不变加速度, 此加速度产生作用于不稳定地质

心的惯性力(用水平和垂直拟静力因子表示), 再根据极限平衡理论, 将所有作用于潜在滑动体上的力沿滑动面进行分解, 得出沿滑动面的安全系数。

极限平衡理论通过分析临近破坏状态 (极限状态) 下土体外力与内部强度所提供的抗力之间的平衡, 计算爆破振动作用下土体的稳定性程度。传统的极限平衡理论基于条块间作用力分布的假设, 计算过程比较复杂, 不同的假设对应的安全系数差别较大, 基于滑面正应力分布的极限平衡法在很大程度上克服了这些缺点^[9-10]。本文在改进和发展这一

新的极限平衡法的基础上, 研究爆破振动作用下边坡二维稳定性问题。利用滑体的平衡条件, 根据极限平衡法的定义, 推导出爆破振动作用下边坡二维安全系数显式解, 形成基于滑面正应力调整的爆破振动荷载作用下边坡二维稳定性分析新方法。这种方法不需要考虑条块间具体作用力, 严格满足平衡条件, 计算过程简单, 结果稳定可靠, 可应用于边坡实际工程中, 验证其理论推导的合理性, 同时也研究垂直向下、水平向外以及两者联合的爆破振动荷载对边坡稳定性安全系数的影响。

2 基本假设与平衡方程

如图 1 所示, 坡面与滑面分别为 $y=g(x)$ 和 $y=s(x)$, 其两端横坐标值 $x=a$ 和 $x=b$; 单位宽度的条块重为 $w(x)$; 水平地震力为 $K_h w(x)$; 垂直方向地震力为 $K_v w(x)$, 其中 K_h 为水平方向地震影响系数; K_v 为垂直方向地震影响系数; 滑面上的正应力和剪切力分别为 $\sigma(x)$ 和 $\tau(x)$; 孔隙水压力为 $u(x)$ 。

由摩尔-库仑强度准则:

$$\tau = \frac{1}{F_s} (\sigma \psi - u \psi + c) \quad (1)$$

式中: F_s 为安全系数; $\psi = \tan \phi$, ϕ 、 c 分别为滑面有效内摩擦角和黏聚力; ‘(x)’ 省略不写。

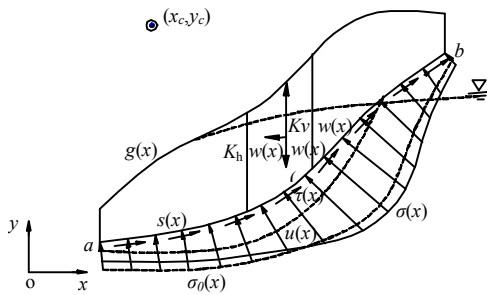


图 1 边坡剖面示意图

Fig.1 Sketch of slope cross-section

假定 $\sigma(x)$ 的分布如图 1 所示滑体水平力和垂直力平衡方程, 以及关于任选一点 (x_c, y_c) 的力矩平衡方程分别为

$$\int_a^b (-\sigma s' + \tau) dx = \int_a^b K_h w dx \quad (2)$$

$$\int_a^b (\sigma + \tau s') dx = \int_a^b (w - K_v w) dx \quad (3)$$

$$\int_a^b [(-\sigma s' + \tau)(y_c - s) + (\sigma + \tau s')(x - x_c)] dx = \int_a^b (w - K_v w)(x - x_c) dx + \int_a^b K_h w (y_c - 0.5s - 0.5g) dx \quad (4)$$

$$s' = \frac{ds(x)}{dx} = \tan \alpha \quad (5)$$

式中: α 为在 x 点的条底面倾角; ‘(x)’ 省略不写。

设

$$F_x = \int_a^b K_h w dx; F_y = \int_a^b (w - K_v w) dx \quad (6)$$

$$M_c = \int_a^b [K_h w (y_c - 0.5s - 0.5g) + (w - K_v w)(x - x_c)] dx \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} r_\sigma(x) &= -s'(y_c - s) + x - x_c \\ r_\tau(x) &= y_c - s + s'(x - x_c) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

方程式(1)代入式(2)~(4), 则以上的方程可化简为

$$\left. \begin{aligned} \int_a^b \sigma \left(-s' + \psi \frac{1}{F_s} \right) dx &= F_x + \frac{1}{F_s} \int_a^b (u \psi - c) dx \\ \int_a^b \sigma \left(1 + s' \psi \frac{1}{F_s} \right) dx &= F_y + \frac{1}{F_s} \int_a^b s' (u \psi - c) dx \\ \int_a^b \sigma \left(r_\sigma + \psi r_\tau \frac{1}{F_s} \right) dx &= M_c + \frac{1}{F_s} \int_a^b r_\tau (u \psi - c) dx \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

3 滑面正应力修正与求解

由于正应力 $\sigma(x)$ 的分布是未知的, 首先假定最初正应力的分布是 $\sigma_0(x)$ 。 $\sigma_0(x)$ 的假定分为 3 种:

(1) 采用简化的 Bishop 法^[10], 即假定条块间作用力为水平, $\sigma_0^{(1)} = \frac{w + (u \psi_0 - c_0) s'}{1 + \psi_0 s'}$; (2) 假定 $\sigma_0^{(2)} = w$; (3) 假定 $\sigma_0^{(3)} = w \cos \alpha$, 相当于瑞典法^[7], 即忽略条块界面剪切力。

为满足平衡方程, $\sigma_0(x)$ 乘以一个修正函数 $\xi(x)$, 即

$$\sigma(x) = \xi(x) \sigma_0(x) \quad (10)$$

修正函数 $\xi(x)$ 取以滑面上两个端点和滑面中点为插值点构造的拉格朗日函数, 由此引进 3 个待定参数:

$$\xi(x) = \lambda_1 \xi_1(x) + \lambda_2 \xi_2(x) \quad (11)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为修正函数在插值点的函数值;

$$\xi_1(x) = x - a; \xi_2(x) = x - b \quad (12)$$

将式(10)、(11)代入式(9), 可得

$$\left. \begin{aligned}
 & \lambda_1 \int_a^b \sigma_0 \xi_1 \left(-s' + \psi \frac{1}{F_s} \right) dx + \\
 & \lambda_2 \int_a^b \sigma_0 \xi_2 \left(-s' + \psi \frac{1}{F_s} \right) dx = F_x + \frac{1}{F_s} \int_a^b (u\psi - c) dx \\
 & \lambda_1 \int_a^b \sigma_0 \xi_1 \left(1 + s' \psi \frac{1}{F_s} \right) dx + \\
 & \lambda_2 \int_a^b \sigma_0 \xi_2 \left(1 + s' \psi \frac{1}{F_s} \right) dx = F_y + \frac{1}{F_s} \int_a^b s' (u\psi - c) dx \\
 & \lambda_1 \int_a^b \sigma_0 \xi_1 \left(r_\sigma + \psi r_\tau \frac{1}{F_s} \right) dx + \\
 & \lambda_2 \int_a^b \sigma_0 \xi_2 \left(r_\sigma + \psi r_\tau \frac{1}{F_s} \right) dx = M_c + \frac{1}{F_s} \int_a^b r_\tau (u\psi - c) dx
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(13)简记为

$$\left. \begin{aligned}
 & \lambda_1 \left(A_1 + \frac{1}{F_s} A'_1 \right) + \lambda_2 \left(A_2 + \frac{1}{F_s} A'_2 \right) = A_3 + \frac{1}{F_s} A'_3 \\
 & \lambda_1 \left(B_1 + \frac{1}{F_s} B'_1 \right) + \lambda_2 \left(B_2 + \frac{1}{F_s} B'_2 \right) = B_3 + \frac{1}{F_s} B'_3 \\
 & \lambda_1 \left(C_1 + \frac{1}{F_s} C'_1 \right) + \lambda_2 \left(C_2 + \frac{1}{F_s} C'_2 \right) = C_3 + \frac{1}{F_s} C'_3
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中： A_1 、 A'_1 、 A_2 、 A'_2 、 A_3 、 A'_3 、 B_1 、 B'_1 、 B_2 、 B'_2 、 B_3 、 B'_3 、 C_1 、 C'_1 、 C_2 、 C'_2 、 C_3 、 C'_3 的数值积分形式可对照式(13)直接给出，此处从略。

根据克莱姆法则，从式(14)第1、2式可解出修正参数：

$$\lambda_1 = \frac{A_1}{\Delta}; \quad \lambda_2 = \frac{A_2}{\Delta} \quad (15)$$

式中

$$\Delta = \begin{vmatrix} A_1 + \frac{A'_1}{F_s} & A_2 + \frac{A'_2}{F_s} \\ B_1 + \frac{B'_1}{F_s} & B_2 + \frac{B'_2}{F_s} \end{vmatrix}; \quad \Delta_1 = \begin{vmatrix} A_3 + \frac{A'_3}{F_s} & A_2 + \frac{A'_2}{F_s} \\ B_3 + \frac{B'_3}{F_s} & B_2 + \frac{B'_2}{F_s} \end{vmatrix} \quad (16)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} A_1 + \frac{A'_1}{F_s} & A_3 + \frac{A'_3}{F_s} \\ B_1 + \frac{B'_1}{F_s} & B_3 + \frac{B'_3}{F_s} \end{vmatrix}$$

将式(15)、(16)代入式(14)中第3式，可得

$$F_s = \frac{(C'_3 - C'_1 - C'_2) \Delta}{(C_1 \Delta_1 + C_2 \Delta_2 - C_3 \Delta)} \quad (17)$$

把式(17)再代入式(14)中第1、2式，反复迭代，直至收敛为止。

4 算例分析

如图2所示，两个滑面分别为圆弧形和一般形状。地震影响系数取0.1，有关力学参数见表1。以拟静力变化系数为横坐标，边坡安全系数为纵坐标建立直角坐标系，如图3所示。

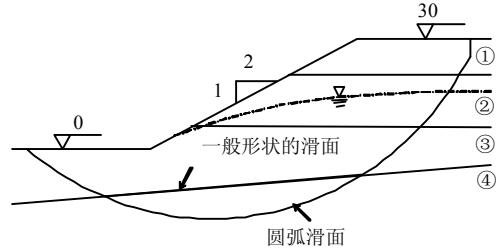
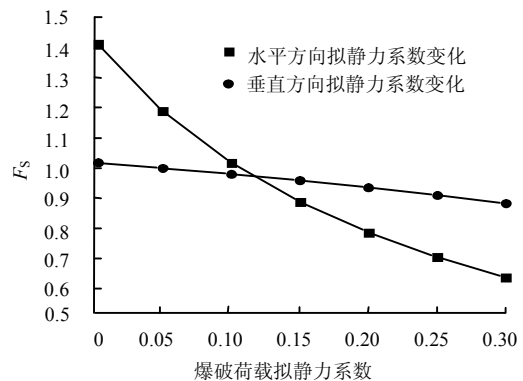


图2 边坡剖面图及滑动面(单位: m)

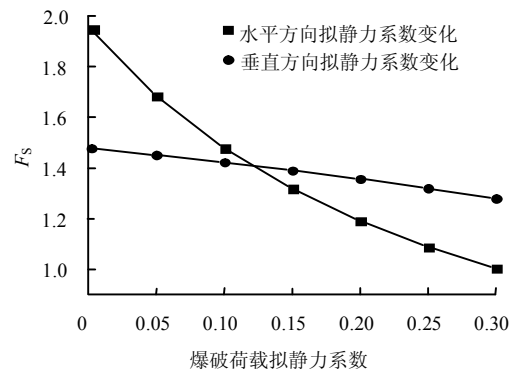
Fig.2 Cross-section of slope and slip surface(unit: m)

表1 土体力学参数

土层	$\gamma / (\text{kN/m}^3)$	c / kPa	$\phi / (^\circ)$
①	18.2	20	32
②	18.0	25	30
③	18.5	40	18
④	18.8	40	28



(a) 一般形状滑面



(b) 圆弧滑面

图3 不同滑动面安全系数变化图

Fig.3 Changes of two-dimensional safety factors of different slip surface

由图 3(a)可以看出, 爆破荷载拟静力系数从 0 增加到 0.30, 每步增加 0.05, 爆破振动水平指向坡外时, 一般形状边坡安全系数减少 6.65%~23.55%; 爆破振动垂直向下时, 一般形状边坡安全系数减少 1.18%~2.52%。由图 3(b)可以看出, 爆破荷载拟静力系数从 0 增加到 0.3, 每步增加 0.05, 爆破振动水平指向坡外时, 圆弧滑面边坡安全系数减少 8.48%~27.3%, 爆破振动垂直向下时圆弧滑面边坡安全系数减少 2.68%~3.99%, 同时联合爆破荷载的方向对边坡稳定性也有影响。

图 4 为一般形状水平和垂直方向拟静力系数变化时正应力分布曲线。图中, 1 表示 K_h 或 K_y 为 0; 2 表示 K_h 或 K_y 为 0.05; 3 表示 K_h 或 K_y 为 0.1; 4 表示 K_h 或 K_y 为 0.15; 5 表示 K_h 或 K_y 为 0.2; 6 表示 K_h 或 K_y 为 0.25; 7 表示 K_h 或 K_y 为 0.30。从图中可以看出, 随着拟静力系数的变化, 其滑面正应力分布是合理的, 说明该方法研究安全系数与拟静力系数的关系是可行的。

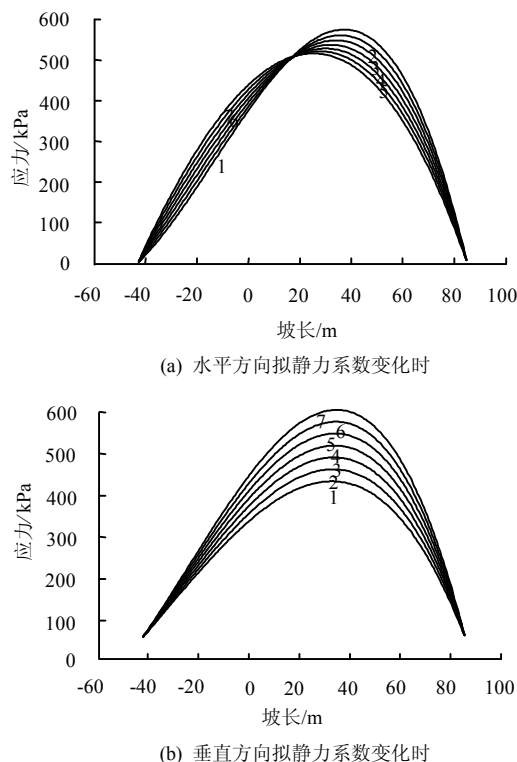


图 4 不同方向拟静系数变化时正应力分布曲线
Fig.4 Normal stress distribution curves of circular slip surface when pseudo-static coefficients is changed

5 结 论

(1) 当爆破荷载拟静力系数从 0 增加到 0.3 时、

爆破振动水平指向坡外时, 边坡安全系数减少了 6.65%~23.54%。

(2) 当爆破荷载拟静力系数从 0 增加到 0.3 时、爆破振动垂直向下时边坡安全系数减少 1.18%~2.52%。

(3) 联合爆破荷载的方向对边坡稳定性有影响。

本文方法原理简单程序易编制计算精度高, 可以在实际工程中应用。

参 考 文 献

- [1] 刘立平, 雷尊宇, 周富春. 地震边坡稳定分析方法综述[J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20(3): 83—87.
LIU Li-ping, LEI Zun-yu, ZHOU Fu-chun. The evaluation of seismic slope stability analysis methods[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University*, 2001, 20(3): 83—87.
- [2] BRAYJONATHAN D, REPETTO PEDRO C. Seismic design considerations for lined solid waste landfills[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1994, 13(8): 497—518.
- [3] LINGHOE I, CHENG, ALEXANDER HD. Rock sliding induced by seismic force[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34 (6): 1021—1029.
- [4] AUSILIO E, CONTE E, DENTE G. Seismic stability analysis of reinforced slopes[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2000, 19(3): 159—172.
- [5] DAVIK K K. Landslides caused by earthquakes[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, 95(4): 406—420.
- [6] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381—3388.
ZHEN Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction finite element method to stability of soil and rock slopes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics Engineering*, 2004, 23(19): 3381—3388.
- [7] 刘汉龙, 费康, 高玉峰. 边坡地震稳定性时程分析方法[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 553—560.
LIU Han-long, FEI Kang, GAO Yu-feng. Time history analysis method of slope seismic stability[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(4): 553—560.

- [8] 朱大勇, 李悼芬, 姜弘道, 等. 基于滑面正应力修正的边坡安全系数解答[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2788—2791.
ZHU Da-yong, LEE Dao-feng, JIANG Hong-dao. Solution of slope safety factor by modifying normal stresses over slip surface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(16): 2788—2791.
- [9] 刘华丽, 朱大勇, 刘德富, 等. 边坡安全系数的多解性讨论[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1661—1664.
LIU Hua-li, ZHU Da-yong, LIU De-fu, et al. Discussion on multiple solution of safety factor of a slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**. 2007, 28(8): 1661—1664.
- [10] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of earth slopes[J]. **Géotechnique**, 1955, 5(1): 7—17.