

文章编号: 1001-1455(2007)05-0426-05

爆破振动作用下顺层岩质边坡稳定性分析*

李维光^{1,2}, 张继春¹

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031;

2. 四川师范大学草堂校区, 四川 成都 610072)

摘要: 基于对顺层岩质边坡的受力分析, 在极限平衡理论的基础上, 应用 Mohr-Column 准则, 按照 Bishop 关于边坡稳定性安全系数的定义, 推导出在爆破振动作用下顺层岩质边坡稳定性安全系数的计算方法。通过算例分析, 证实了计算方法的可行性, 说明了爆破振动拟静力系数同顺层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的影响最大; 爆破荷载拟静力系数从 0 起每增加 0.05, 爆破振动水平指向坡外和垂直向下时, 层裂长度为 12.76 m 的顺层边坡安全系数分别减少 7.801%~10.665%、1.366%~1.978%, 无层裂的顺层边坡安全系数分别减少 7.61%~10.546%、1.473%~2.289%。同时, 爆破振动产生的层裂长度、边坡长度以及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; 安全系数; 拟静力法; 顺层岩质边坡; 爆破振动

中图分类号: O389; TU457

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引言

顺层岩质边坡是一种特殊类型的边坡, 在露天矿山、公路、铁路等的建设中经常遇到, 并造成了重大损失。在爆破振动作用下顺层岩质边坡稳定性的研究是一个重要而新颖的课题, 日益受到国内外许多学者和工程技术人员的广泛关注^[1-4]。

目前, 分析爆破振动边坡稳定性的方法主要基于极限平衡理论和应力-变形分析, 惯性失稳常采用统计分析法、结构动力分析法(拟静力法、时程分析法)、Newmark 滑块分析法、Makdisi-seed 法及有限元法; 而衰减失稳常采用流动破坏分析和变形破坏分析法^[5-6]。用拟静力法模拟爆破荷载时, 对爆破荷载的处理通常按照极端情况, 即认为不同高程处的潜在滑块同时达到爆破峰值加速度。但是由于爆破荷载下边坡应力状态是随时间变化的交变荷载^[7], 且最大爆破加速度时刻不一定是位移动力响应最大时刻, 因此, 爆破振动对边坡的作用力可能小于爆破振动位移幅值对应的瞬间极值, 以爆破振动的瞬间极值作为拟静力进行计算, 尽管有一定误差, 但拟静力法简单实用, 因此在地震边坡稳定性分析中应用广泛。本文中只考虑在爆破振动作用下最不利状况的顺层边坡稳定性问题。

2 顺层岩质边坡稳定性计算的力学方法

将潜在滑坡体沿纵向划分为 n 个垂直条块, 其中第 i 个垂直条块的受力有: 底部的法向力 N_i 、切向力 T_i 、平均孔隙水压力 U_i 、重力 W_i 、作用于质心 O 的水平爆破荷载 $K_{h,i}W_i$ ($K_{h,i}$ 为水平爆破荷载拟静力系数)、垂直爆破荷载 $K_{v,i}W_i$ ($K_{v,i}$ 为垂直爆破荷载拟静力系数)、表面的水平卸荷载 $Q_{h,i}$ 、垂直卸荷载 $Q_{v,i}$ 、左侧和右侧的平均孔隙水压力 V_i 和 V_{i+1} 、左侧和右侧的传递力 E_i 和 E_{i+1} 。如图 1 所示。

对第 i 条块进行受力分析, 则平行于其底边、垂直于底边的力平衡方程为

$$(Q_{v,i} + K_{v,i}W_i - W_i)\sin\alpha_i + T_i + E_i + (V_i - Q_{h,i} - K_{h,i}W_i - V_{i+1})\cos\alpha_i - E_{i+1}\cos\alpha_{i+1} = 0 \quad (1)$$

* 收稿日期: 2006-02-09; 修回日期: 2006-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(50574076)

作者简介: 李维光(1963—), 男, 博士研究生, 教授。

$$(Q_{v,i} + K_{v,i} W_i - W_i) \cos \alpha_i + N_i + U_i + (Q_{h,i} + K_{h,i} W_i + V_{i+1} - V_i) \sin \alpha_i - E_{i+1} \sin \alpha_{i+1} = 0 \quad (2)$$

边坡稳定性安全系数 F_s 定义为^[8]

$$F_s = T_f / T \quad (3)$$

式中： T 、 T_f 分别为沿整个潜在滑移面的平均剪应力、平均抗剪应力。

由摩尔-库仑准则知

$$T_f = C_i (l_i - l_{i0}) + N_i \tan \varphi_i \quad (4)$$

式中： l_i 、 l_{i0} 、 C_i 、 φ_i 分别为第 i 条块底部长度、层裂长度、粘结力、内摩擦角。

从式(1)、(2)中分别解出 T_i 、 N_i ，先代入式(4)然后代入式(3)并整理得

$$F_s = \frac{\sum (C_i l_i + N_i \tan \varphi_i)}{\sum T_i} = \frac{\sum \{C_i (l_i - l_{i0}) + [(W_i - Q_{v,i} - K_{v,i} W_i) \cos \alpha_i - U_i + (V_i - Q_{h,i} - K_{h,i} W_i - V_{i+1}) \sin \alpha_i + E_{i+1} \sin \alpha_{i+1}] \tan \varphi_i\}}{\sum [(W_i - Q_{v,i} - K_{v,i} W_i) \sin \alpha_i - E_i + (Q_{h,i} + K_{h,i} W_i + V_{i+1} - V_i) \cos \alpha_i + E_{i+1} \cos \alpha_{i+1}]} \quad (5)$$

3 算 例

某石灰石矿山为坚硬厚层白云质石灰岩，层理、裂隙发育。在坡面角为 50° 的边坡上，有一倾角在 $22^\circ \sim 30^\circ$ 之间(通常为 26°)、平均厚度 7.9 m 的潜在滑移面，构成岩层的倾向与坡向一致的单斜顺层边坡。根据地质勘察报告，天然状态下潜在滑移面的粘结力为 90 kPa、内摩擦角为 33.43° ；饱水天然状态下潜在滑移面的粘结力为 0、内摩擦角为 25.17° 。

3.1 水平爆破荷载作用时顺层岩质边坡的安全系数

由式(5)知，考虑条块间无相互传递作用力、条块无静水压力和卸荷载以及无垂直爆破振动作用力，水平方向爆破荷载作用时顺层岩质边坡的安全系数

$$F_s = \frac{\sum [C_i (l_i - l_{i0}) + (W_i \cos \alpha_i - K_{h,i} W_i \sin \alpha_i) \tan \varphi_i]}{\sum (W_i \sin \alpha_i + K_{h,i} W_i \cos \alpha_i)} \quad (6)$$

(1) 由式(6)可知，爆破振动水平指向坡里的爆破荷载有利于顺层边坡的稳定。

(2) 爆破荷载拟静力系数从 0 起每增加 0.05，爆破振动水平指向坡外时，层裂长度为 12.76 m 的顺层边坡安全系数减少 7.801%~10.665%，无层裂的顺层边坡安全系数减少 7.61%~10.546%，如图 2 所示。

(3) 潜在滑坡体处于天然状态、爆破振动水平指向坡外时，层裂长度从 0 增加到 12.76 m 时，潜在滑坡体长度为 39 m 的顺层边坡安全稳定性系数减少 11.73%~17.04%；潜在滑坡体长度为 78 m 的顺层边坡安全稳

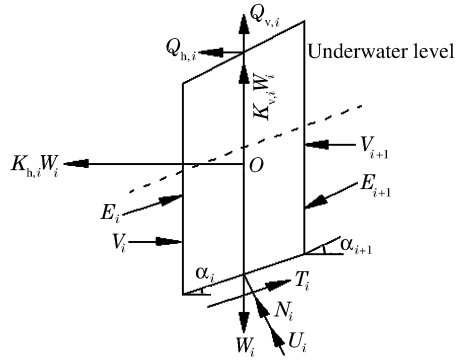


图 1 第 i 条块的作用力分析

Fig. 1 Acting forces analysis on i th slice

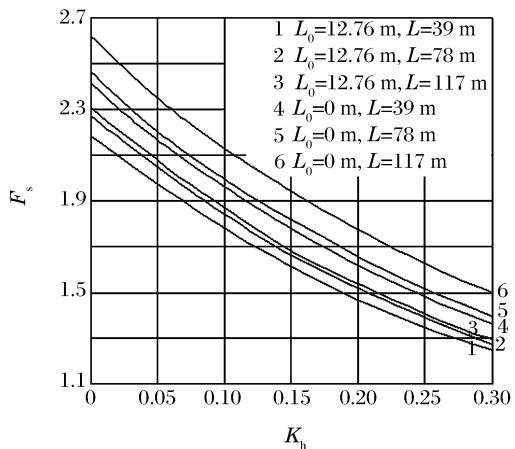


图 2 爆破振动水平指向坡外时拟静力系数与安全系数的关系

Fig. 2 Relation between horizontal pseudo-static coefficient and safety coefficient

定性系数减少 5.56%~7.96%;潜在滑坡体长度为 117 m 的顺层边坡安全稳定性系数减少 3.63%~5.19%。说明潜在滑坡体滑面长度对顺层边坡稳定性的影响较大;潜在滑坡体滑面层裂长度对顺层边坡稳定性的影响较大,尤其是潜在滑坡体长度短时。

3.2 垂直方向爆破荷载作用时顺层岩质边坡的安全系数

由式(5)知,考虑条块间无相互传递作用力、条块无静水压力和卸荷载以及无水平方向爆破振动作用力,垂直方向爆破荷载作用时顺层岩质边坡的安全系数

$$F_s = \frac{\sum [C_i(l_i - l_{i0}) + (W_i - K_{v,i}W_i)\cos\alpha_i \tan\varphi_i]}{\sum (W_i - K_{v,i}W_i)\sin\alpha_i} \quad (7)$$

(1) 由式(7)可知,爆破振动垂直向上时的爆破荷载有利于顺层边坡的稳定。

(2) 爆破荷载拟静力系数从 0 起每增加 0.05,爆破振动垂直向下时,层裂长度为 12.76 m 的顺层边坡安全系数减少 1.366%~1.949%,无层裂长度的顺层边坡安全系数减少 1.473%~2.289%。说明爆破振动产生垂直向下作用于边坡的爆破荷载不利于顺层岩质边坡的稳定,但处于天然状态的潜在顺层岩质滑坡体受爆破振动产生垂直向下爆破荷载的影响很小,如图 3 所示。

(3) 当潜在滑坡体处于天然状态、爆破振动垂直向下、层裂长度从 0 增加到 12.76 m 时,潜在滑坡体长度为 39 m 的顺层边坡安全稳定性系数减少 10.37%~15.34%;潜在滑坡体长度为 78 m 的顺层边坡安全稳定性系数减少 4.77%~7.12%;潜在滑坡体长度为 117 m 的顺层边坡安全稳定性系数减少 3.1%~4.63%。说明潜在滑坡体滑面层裂长度对顺层边坡稳定性的影响较大,尤其是潜在滑坡体较短时。

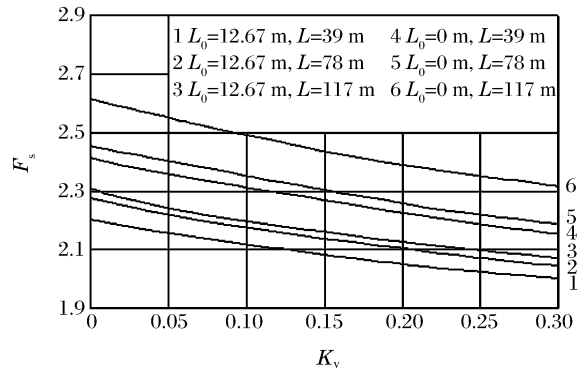


图 3 爆破振动垂直向下时拟静力系数与边坡安全系数的关系

Fig. 3 Relation between vertical pseudo-static coefficient and safety coefficient

3.3 水平指向坡外、垂直向下爆破荷载联合作用时顺层岩质边坡的安全系数

由式(5)知,水平指向坡外、垂直向下联合爆破荷载作用时顺层岩质边坡的安全系数

$$F_s = \frac{\sum \{C_i(l_i - l_{i0}) + [(W_i + K_{v,i}W_i)\cos\alpha_i - K_{h,i}W_i\sin\alpha_i] \tan\varphi_i\}}{\sum [(W_i + K_{v,i}W_i)\cos\alpha_i + K_{h,i}W_i\sin\alpha_i]} \quad (8)$$

(1) 爆破荷载拟静力系数从 0.05 起每增加 0.05,爆破振动水平向外和垂直向下联合作用时,有层裂长度的顺层边坡安全系数减少 8.287%~9.531%,无层裂的顺层边坡安全系数减少 8.155%~9.414%,如图 4 所示。

(2) 当潜在滑坡体为天然状态时,即使爆破振动联合爆破荷载拟静力系数相同,若联合爆破荷载作用方向不同,同一潜在滑面、同一层裂长度的顺层边坡安全系数也相差 8.37%~18.47%;且联合爆破荷载作用方向与水平指向坡外方向夹角大时,爆破振动联合爆破荷载对顺层岩质边坡的稳定性影响大。

(3) 潜在滑面长度相同时,当顺层边坡层裂长度从 0 增加到 12.76 m 时,潜在滑面长度为 39 m 的顺层边坡安全稳定性系数减少 11.52%~15.53%;潜在滑面长度为 78 m 的顺层边坡安全稳定性系数减少 5.34%~7.22%;潜在滑面长度为 117 m 的顺层边坡安全稳定性系数减少 3.38%~4.56%。说明潜在滑坡体滑面长度对顺层边坡稳定性的影响较大;潜在滑坡体滑面层裂长度对顺层边坡稳定性的影响较大,尤其在潜在滑坡体较短时。

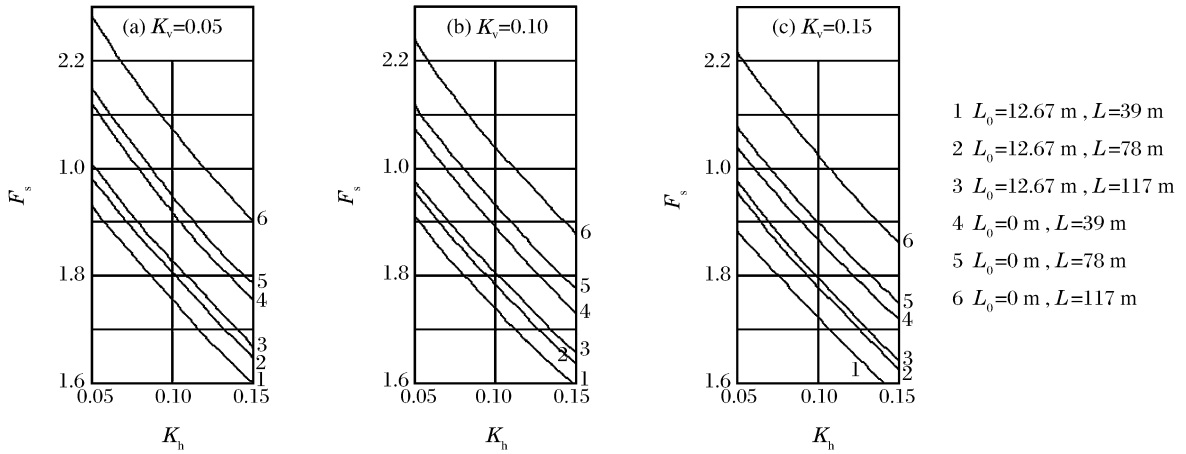


图 4 联合爆破荷载拟静力系数与边坡安全系数的关系

Fig. 4 Relation between combined dynamic load pseudo-static coefficient and safety coefficient

4 结 论

(1) 采用极限平衡理论,按照 Mohr-Coulomb 准则,可推导出在爆破振动作用下,顺层岩质边坡稳定性安全系数的计算方法。在某些简化条件下,可得常见的评价顺层边坡稳定性安全系数的计算方法,比如 Bishop 法。通过分析、算例证明该计算方法可行。

(2) 从爆破振动荷载的方向看,垂直向下、水平指向坡外的爆破荷载以及两者的联合爆破荷载对边坡稳定性影响最大,尤以水平指向坡外的爆破荷载对边坡稳定性影响最大。爆破振动水平指向坡外、垂直向下联合爆破荷载作用方向与水平指向坡外方向夹角大时,联合爆破荷载对顺层岩质边坡的稳定性影响大。

(3) 爆破荷载拟静力系数 0 起每增加 0.05,爆破振动水平指向坡外、垂直向下时,有层裂长度的顺层边坡安全系数分别减少 7.786%~10.656%、1.366%~1.978%,无层裂的顺层边坡安全系数分别减少 7.61%~10.546%、1.473%~2.289%。

(4) 潜在滑坡体滑面长度、层裂长度对顺层岩质边坡的影响较大。

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] 孙广忠.岩体结构力学[M].北京:科学出版社,1988.

[3] Crespellani T, Madiati C, Vannucchi G. Earthquake destructiveness potential factor and slope stability[J]. Geotechnique, 1998,48(3):411-419.

[4] Hook E, Bray J W. Rock Slope Engineering[M]. 2nd ed. London: Inst Min Metal, 1977.

[5] Griffiths D V, Madiati C, Lane P A. Slope stability analysis[J]. Geotechnique, 1999,49(3):387-403.

[6] Sarma S K. Stability analysis of embankments and slope[J]. Geotechnique, 1973,23(11):423-433.

[7] 周永江,王开云,符文熹,等.高地震烈度堆积体边坡动力响应时程特性分析区[J].山地学报,2007,25(1):93-98.
ZHOU Yong-jiang, WANG Kai-yun, FU Wen-xi, et al. Analysis on time history dynamic response of a rockfall-type slope under high earthquake intensity[J]. Journal of Mountain Science, 2007,25(1):93-98.

[8] Bishop A W. The use of slip circle in the stability of slope[J]. Geotechnique, 1955,5(1):7-17.

Study on rock mass bedding slope stability under blast seism

LI Wei-guang^{1,2*}, ZHANG Ji-chun¹

(1. *Civil Engineering School, Southwest Jiaotong University,
Chengdu 610031, Sichuan, China;*

2. *Caotang School, Sichuan Normal University, Chengdu 610072, Sichuan, China*)

Abstract: Based on action force analysis of slope slice, a calculation method of safety coefficient for slope stability was proposed according to the definition of safety coefficient and the Mohr-Coulomb criteria. Reliability of the proposed method was verified and relation between pseudo-static coefficient under blast seism and safety coefficient on rock mass bedding slope was explained by using calculation examples. 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 coefficient for slope stability. When horizontal dynamic load pseudo-static coefficient is added 0.05 from 0 to 0.3, the safety coefficients are reduced 7.801%~10.665% and 7.61%~10.546% respectively for case that the cracked lengths are zero and 12.76 m. When vertical dynamic load pseudo-static coefficient is added 0.05 from 0 to 0.3, the safety coefficients are reduced 1.366%~1.949% and 1.473%~2.289% respectively for case that the cracked lengths are zero and 12.76 m. Slope length, cracked length, combined load action direction have some impacts on the slope stability.

Key words: mechanics of explosion; safety coefficient; pseudo-static analysis; rock mass bedding slope; blast seism

* Corresponding author: LI Wei-guang
E-mail address: wklhee51@163.com
Telephone: 86-28-87344882