

岩石边坡倾倒稳定分析的简化方法*

陈祖煜

(中国水利水电科学研究院岩土所, 北京, 100044)

张建红

汪小刚

(清华大学水利水电工程系 北京, 100084) (中国水利水电科学研究院岩土所, 北京, 100044)

1 前 言

倾倒破坏是岩质边坡失稳的一种典型形式。Goodman 和 Bray (1976) 最早提出了基于极限平衡原理的分析方法。此方法将倾倒体离散为若干倾斜的矩形条块, 根据静力平衡条件分析边坡倾倒的危险性。本文的目的是对 Goodman—Bray 方法 (以下简称 G—B 法) 进行改进。

2 G—B 方法的局限性及其改进

2.1 基本原理

Hoek 和 Bray (1977) 详细介绍了 Goodman 和 Bray 提出的边坡倾倒稳定分析方法。设某一边坡被反倾向的结构面切割成 n 块宽度为 ΔL 的矩形条块, 对于任一条块, 作用其上的力将使该条块处于: ① 稳定; ② 倾倒破坏; ③ 滑动破坏。滑坡体分为稳定区、倾到区、滑动区三部分, 如图 1 所示。最后一个滑动块和最后一个倾倒块的编号分别为 N_S, N_t 。对滑动块和倾倒块分别建立力和力矩平衡方程, 最终计算作用于坡趾处使边坡处于极限平衡条件的外力。

2.2 G—B 法的局限及其改进

(1) 关于岩柱底滑面的连通率

在改进的 G—B 方法中, 考虑底滑面上岩桥的作用, 侧面仍假定为完全贯通。基于材料力学平面假定, 岩桥底面提供的抵抗倾倒的弯矩被计入静力平衡方程中。设岩柱底面承受有法向荷载 P_b 及力矩 M_b , 为一偏心受压构件, 如图 2。破坏时岩柱底面靠坡顶侧端点达到岩桥抗拉强度 σ_t , 因此, 式 (2) 得出的 M_b 将引入 G—B 方法中的力矩平衡方程。

$$\sigma_t = \frac{M_b}{\xi^2 \Delta L^2 / 6} - \frac{P_b}{\xi \Delta L} \quad (1)$$

$$M_b = \xi \Delta L (\sigma_t \xi \Delta L + P_b) / 6 \quad (2)$$

其中 ΔL 为底面长度; $\xi \Delta L$ 为岩桥部分长度; σ_t 为材料的抗拉强度, $\xi = 1 - k$, k 为连通率。

(2) 关于安全系数

G—B 模型以坡趾第一块岩柱所需外力作为衡量边坡稳定的标志 (Zanbak, 1983), 在实际

* 国家“八五”科技攻关资助项目。

到稿日期: 1995-01-16。

应用中不方便,有待于将计算结果更换成工程中易于接受的安全系数。安全系数 F 的定义为当 C 和 φ 按下式缩减为 C_e, φ_e 时岩体达到极限平衡状态。

$$C_e = C/F \tag{3}$$

$$\text{tg } \varphi_e = \text{tg } \varphi / F \tag{4}$$

采用这一定义,计算安全系数需要迭代。为保证迭代收敛,Sama 建议一个先计算临界加速度的方法。在每个条块上,作用一个水平体积力 $\eta \Delta w$, η 称为临界加速度。 $(\Delta w$ 为条块重量)。这个体积力使边坡进入极限平衡状态。计算 η 通常可以藉助一个显式公式,不需迭代。然后寻找使 η 等于零时相应的 C_e 和 φ_e ,此时的 F 就是所求的安全系数。在实际运用中,我们使用牛顿迭代法,可以快速求得 F 。

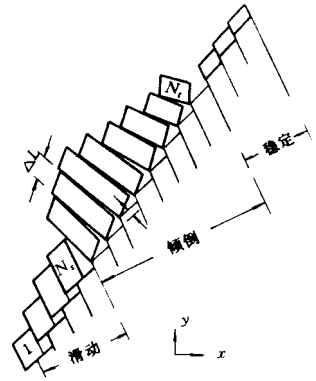


图 1 岩石边坡倾倒失稳模式

(3)关于破坏模式

G-B 方法在计算中要检验每一岩块属于稳定、倾倒、或滑动的哪一类,而 η 和 F 在每次检验中都是未知数,要得到合理的估计比较困难。这一方法原则上只适用于极限平衡状态的边坡。在改进的 G-B 方法中,我们对不同的 N_s, N_t 组合计算 η ,求得最小 η 的那组 N_s, N_t ,即为最可能的破坏模式。

(4)关于条块形状

G-B 法假定被离散的条块为矩形,即条块的底面和侧面正交。可是,实际情况往往包含两组并非正交的结构面,如龙滩水电站左岸进水口边坡,其反倾向层面倾角为 60° ,另一组可能成为底裂面的顺坡节理倾角也是 60° 。这样,就形式了一个夹角为 120° 的平行四边形条块。在改进的方法中,我们考虑底面和侧面不正交的更为一般的情况,图 1 就是对 G-B 法改进后的更为一般的条块分割模式。

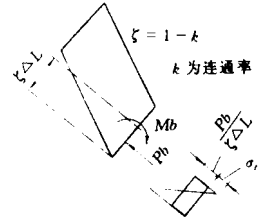


图 2 岩柱底面岩桥受力分析

3 改进的 G-B 法的计算公式

在进行条块间力的递推时,我们使用与 G-B 方法相反的方向,即从坡趾向上递推计算。对于具有一定连通率的底滑面,有效底宽为 $(1 - k) \Delta L$,则式 (1)、(2) 中的 $\xi \Delta L$ 为底面岩桥。对于某一条块,根据静力平衡条件,可得

$$P_r = AP_l + B + \eta C \tag{5}$$

其中 P_r, P_l 为右侧和左侧面作用力, A, B, C 为系数。

3.1 滑动岩柱的计算公式

参见图 3(a),将作用在滑动岩柱上的力投影到 AA' 方向上, AA' 与滑面夹角为 φ_b ,此时,底滑面法向力 P_b 和摩擦阻力 $T_b = P_b \text{tg } \varphi_b$ 的合力与投影面垂直,不作为未知数出现,即可得

$$A = [\sec \varphi_l \cos(\varphi_l + \varphi_b - \rho)] / K \quad \text{of} \tag{6}$$

$$B = [\Delta W \sin(\varphi_b - \alpha) - \eta' \Delta W \cos(\varphi_b - \alpha) + C \Delta L \cos \varphi_b + T_a \cos(\text{发行 } \varphi_b + \delta)] / K \tag{7}$$

的 $C = - [\Delta W \cos(\alpha + \rho)] / K$ (8)

其中 $K = \sec(\varphi_r + \varphi_b - \rho) \sec \varphi_r$ (9)

式中 $\varphi_b, \varphi_l, \varphi_r$ 分别为底面和岩柱左右侧面的摩擦角; $\eta' \Delta W$ 为作用在条块上的水平地震力, T_a, δ 分别为岩柱上的锚杆作用力和锚固角。

3.2 倾倒岩柱的计算公式

参照图 3(b), 将对沿 P_b 方向的力平衡方程和对 O 点的力矩平衡方程联立, 可解得

$$A = \frac{H_l + \frac{\Delta L \xi \sin(\varphi_l - \rho)}{3 \cos \varphi_l}}{K} \quad (10)$$

$$B = \frac{T_a [H_\alpha - \frac{1}{3} \Delta L \xi \sin(\alpha + \delta)]}{K} + \frac{\frac{1}{6} \sigma_t \Delta L^2 \xi^2 - \Delta W (e_w + \frac{1}{3} \Delta L \xi \cos \alpha)}{K} + \eta' C \quad (11)$$

$$C = \frac{-\Delta W (e_H - \frac{1}{3} \Delta L \xi \sin \alpha)}{K} \quad (12)$$

$$K = H_r + b + \frac{\Delta L \xi \sin(\varphi_r - \rho)}{3 \cos \varphi_r} - \Delta L \operatorname{tg} \varphi_r \cos \rho + \Delta L \sin \rho \quad (13)$$

其中 b 为台阶高; e_w, e_H 为条块重心距 O 点的 x 和 y 方向的距离; ρ 为底裂面和反倾向侧面法线方向的夹角。

3.3 计算 η 的公式

对于第 i 块岩柱, 有

$$P_{r,i} = A_i P_{l,i} + B_i + \eta C_i \quad (14)$$

令 $P_r = F_i + \eta G_i$ (15)

其中 $F_i = A_i P_{l,i} + B_i$ (16)

$$G_i = C_i \quad (17)$$

由于 $P_l = P_{r,i-1} = F_{i-1} + \eta G_{i-1}$ (18)

将式(18)代入(16)并与(14)比较可得

$$F_i = A_i F_{i-1} + B_i \quad (19)$$

$$G_i = A_{i-1} G_{i-1} + G_{i-1} \quad (20)$$

设 N_t 为最后一个倾倒块的编号, 则

$$P_{r,N_t} = F_{N_t} + \eta G_{N_t} = 0 \quad (21)$$

故有 $\eta = -F_{N_t} / G_{N_t}$ (22)

式(22)是一个不需要迭代直接求解边坡倾倒临界加速度系数 η 的公式。

3.4 限制条件

根据上节计算获得的 η 值还要和下述两种条件下获得的 η 值比较: ① η 应比在同样的滑裂面上岩体的抗滑临界加速度系数小, 即 $\eta < \eta_s$ 。其中 η_s 可按 Sarma 法(1979)求得。否则边坡破坏的类型应是滑动而不是倾倒。② 如果岩体底滑面全部裂通, 即连通率为 100%, 其相应

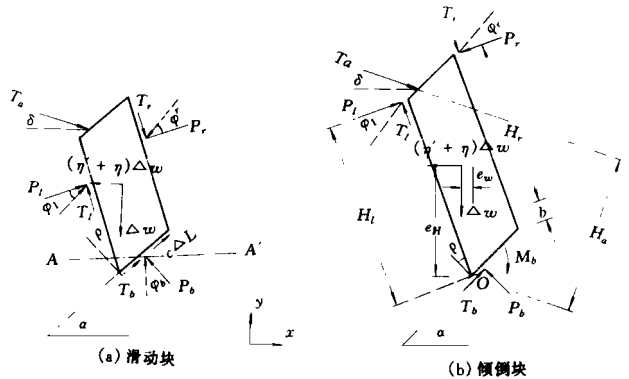


图 3 岩柱受力分析

的 η_i 仍比 η 大, 那么在临界加速度系数为 η 时, 岩体并不会最终破坏, 故应令 $\eta = \eta_i$ 。

3.5 计算步骤

改进的 G-B 法的计算步骤如下: ① 选定一个 N_S , N_t , 根据式(22)计算 η 。② 不断地改变 N_S 和 N_t , 最终找到相应最小的 η 的 N_S 和 N_t , 这样就同时确定了破坏的模式和 η 值。③ 对应这一模式, 应用 2.2 节介绍的方法计算相应的安全系数, 由于改进的方法计及了底滑面的抗倾弯矩, 对抗拉强度 σ_t 也作类似式(3), (4)的处理, 即在式中 σ_t 应以 σ_{te} 代替。

应该指出, 如果不引入本文提出的改进, 则此法将完全回归到原来的 Goodman-Bray 法。

4 验证和算例

为了验证本文提出方法的合理性, 在开发数学模型的同时, 进行了离心模型试验, 已另文介绍(汪小刚等, 1996)。

图 4(a) 为龙滩水电站左岸进水口边坡 7# 机组断面的工程地质剖面图。图 4(b) 为利用改进的 Goodman-Bray 模型开挖边坡的计算结果。边坡由 17 块岩柱组成, 不稳定模式为第一块滑动, 第 2 至 16 块倾倒, 最后一块稳定。安全系数为 1.854, 所取强度参数来源于中南院的工程地质报告。

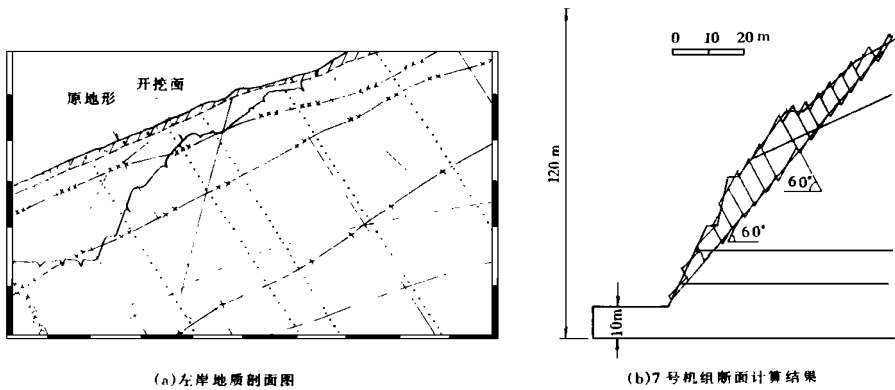


图 4 龙滩水电站左岸边坡倾倒稳定分析

参 考 文 献

- 1 Goodman R E, Bray J W. Toppling of Rock Slopes. Proceedings of the Speciality Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes ASCE/ Boulder, Colorado, 1976.
- 2 Hoek E, Bray J W. Rock Slope Engineering. Revised 2nd ED, Ed Inst Min and Metall London, 1977.
- 3 Zambak C. Design Charts for Rock Slopes Susceptible to Toppling. J of Geotech Eng ASCE, 1983, 109(8): 1039 ~ 1062.
- 4 汪小刚, 张建红, 赵毓芝, 韩连兵. 用离心模型研究岩石边坡的倾倒破坏. 岩土工程学报, 1996, 18(5): 14 ~ 21.