

文章编号: 1000-7598 (2011) 08-2453-06

边坡稳定分析三维极限平衡条柱间力的讨论

袁 恒^{1,3}, 罗先启², 张振华¹

(1.三峡大学 地质灾害防治研究院, 湖北 宜昌 443002; 2.上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030;
3.中煤国际工程集团重庆设计研究院, 重庆 400016)

摘 要: 根据在自重作用下潜在滑体在斜面上运动的规律, 提出条柱底滑面上抗滑力方向垂直于底滑面与水平面交线的假定, 并引用条间抗剪强度发挥系数的概念, 运用各条柱的3个方向力的平衡和边坡整体3个方向的力矩平衡, 提出了一种计算边坡稳定性的三维极限平衡方法, 通过对算例的计算结果分析发现: 当忽略条柱间全部剪力作用时, 得到的安全系数与二维Spencer法计算结果相近; 考虑部分条柱间剪力作用时, 得到的安全系数与文献[5]计算结果相近; 当考虑条柱间横向剪力对边坡稳定性的贡献时, 即考虑条柱间全部作用力, 得到的安全系数最高, 这种假定更能反映边坡实际受力情况, 因此, 所得的结果更接近于实际。

关 键 词: 边坡稳定分析; 极限平衡; 三维分析; 抗滑力方向; 强度发挥系数

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

Discussion on force between columns of three-dimensional limit equilibrium for slope stability analysis

YUAN Heng^{1,3}, LUO Xian-qi², ZHANG Zhen-hua¹

(1. Institute of Geologic Disaster, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;
2. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;
3. Chongqing Research & Design Institute of Sino-Coal International Engineering Group, Chongqing 400016, China)

Abstract: Based on the movement law of the potential sliding body sliding in the inclined plane by dead weight effect, the assumption that the direction of the anti-sliding force is perpendicular to the intersecting line of the sliding surface and the horizontal plane are proposed. Citing a concept of played factor of inter-slice shear strength, a three-dimensional limit equilibrium method for calculating slope stability are proposed using force equilibrium of each pillar and moment equilibrium of the whole slope body in three directions. Through case study, when all the shear forces among columns are neglected, the safety factor is similar to the result of two-dimensional Spencer method. If considering part of the shear forces among columns, the safety factor is similar to the result of the reference [5]. If considering all the forces among the columns including the contribution of transverse shear force on the slope stability, the safety factor is the highest; this assumption can reflect actual conditions of slope better and the results are closer to reality.

Key words: slope stability analysis; limit equilibrium; three-dimensional analysis; direction of anti-sliding force; played factor of strength

1 引 言

边坡稳定性评价在岩土工程中是一个常见的问题, 随着我国经济的发展, 全国各地大兴土木, 边坡稳定性问题日益突出, 能否合理评价边坡稳定性, 是许多工程安全性的关键所在。在边坡稳定性的研

究领域里, 许多学者采用了不同的方法对边坡稳定性进行了评价, 如: 极限平衡法、有限元法、极限分析法等。目前最常用的研究手段是二维极限平衡法, 且许多方法已在工程中应用。但由于边坡失稳在现实中是一个三维问题, 越来越多的边坡工程提出了建立合理的三维边坡稳定分析的极限平衡方法

收稿日期: 2010-04-08

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题 (No. 2008BAB29B03); 三峡库区三期地质灾害防治重大科研项目 (No. SXKY3-2-2-200903); 国家自然科学基金项目 (No. 50839004, 50909053)。

第一作者简介: 袁恒, 男, 1983年生, 硕士, 主要从事边坡稳定性方面的研究。E-mail: yuanhengchina@yahoo.com.cn

通讯作者: 罗先启, 男, 1965年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: luoxianqi@sjtu.edu.cn

要求。许多学者已经在二维极限平衡方法的研究的基础上提出了三维边坡稳定性分析方法,并取得了一定的成就。Duncan^[1]曾经列表总结了 20 篇文献资料,分别指出了各方法的适用情况及其存在的局限性。前人研究的边坡稳定分析三维极限平衡方法,都是在二维极限平衡法研究经验的基础上发展起来的,例如 Hun 等^[2]提出了一套计算边坡稳定性安全系数的三维极限平衡方法,该方法是在简化 Bishop 法的基础上建立的。Zhang Xing^[3]假定滑动面为对称椭球面,将二维的 Spencer^[4]法扩展到三维。在国内,陈祖煜等^[5]总结了历年来各种三维极限平衡方法,并在此基础上提出了滑坡体在 3 个方向满足力平衡条件,在一个方向满足整体力矩平衡条件的三维极限平衡方法,将二维 Spencer 法扩展到三维。冯树仁等^[6]提出了一种满足部分方向整体力平衡的三维极限平衡分析法,可看作是二维简化 Janbu 法在三维条件下的推广。张均锋等^[7-8]将二维严格 Janbu 法和 Spencer 法拓展到三维的分析方法。朱大勇^[9]等建立了除绕铅垂方向的力矩平衡之外的、能满足 5 个平衡条件的准严格的三维极限平衡法。郑宏^[10]取整个滑体为受力体提出了满足所有 6 个平衡条件的严格三维极限平衡法。陈胜宏等^[11]采用剩余推力法原理,建立了一种三维边坡稳定分析方法。李同录等^[12]、曾进群等^[13]、姜清辉等^[14]、杜建成等^[15]、顾晓强等^[16]也对三维极限平衡法作了研究。总结现今提出的三维极限平衡方法,都是通过对条块间力的假设使问题静定可解。但正是由于存在着各种假设,使各种方法都有其局限性。

本文在总结已有的边坡稳定分析三维极限平衡方法的特点及局限性的基础上,提出了一种评价边坡稳定性的三维极限平衡方法。该方法通过引入条柱侧面横向抗剪强度平均发挥系数 λ_1 和竖向抗剪强度平均发挥系数 λ_2 ,并根据在自重作用下潜在滑体在斜面上运动的规律,假定各条柱底滑面上的抗滑力方向垂直于底滑面与水平面的交线,采用垂直条分的方式,将边坡离散成 m 行 n 列的条柱,对每个条柱建立静力平衡方程求得条柱底面的法向力,然后通过整体的弯矩平衡方程来求解边坡的安全系数。

2 三维极限平衡计算方法

2.1 计算模型的建立

对边坡稳定性评价一个重要的指标是边坡稳定安全系数,目前对安全系数的定义大致有两种,一

种是基于强度折减的思想算出的边坡处于极限状态下对应的强度折减系数;另一种是基于超载思想算出的边坡处于极限状态下对应的超载系数。由于边坡失稳往往表现为岩土体的抗剪强度的降低,为更好地对边坡稳定状态进行评价,因此,本文对安全系数的定义取强度折减系数。定义为:当滑面上的抗剪强度指标 $\tan \varphi$ 和 c 同时除以折减系数 F 时,滑面上处处达到极限平衡,则定义折减系数 F 为边坡稳定安全系数。设折减后的强度指标分别为 $\tan \varphi_e$ 和 c_e 。

建立如图 1 所示的坐标系,取 X 轴水平面上,正方向与边坡体倾向相同, Z 轴正方向与重力方向相反, Y 轴正方向由右手法则确定。用一组平行 XOZ 面(列界面)和一组平行 YOZ 面(行界面)去切分坡体成具有垂直界面的条柱。各条柱受力如图 2 所示,且定义面 AA_1D_1D 为左侧面,面 BB_1C_1C 为右侧面,面 ABB_1A_1 为前侧面,面 CDD_1C_1 为后侧面,图中 E_{ly} 、 E_{ly} 分别是条柱左右侧面上的法向力, E_{lx} 、 E_{lx} 分别是条柱前后侧面上的法向力, H_{ly} 、 H_{ly} 分别是作用于侧面上的横向剪切力, V_{lx} 、 V_{lx} 、 V_{lx} 分别是作用在条柱侧面上的竖向剪切力, N 为作用在底滑面上的法向力, U 为底滑面处的孔隙水压力, S 为作用在底滑面上的剪切力, W 为条柱自重,并作如下假定:

(1) 作用在条柱侧面的横向剪力 E_{ly} 、 E_{ly} 、 H_{lx} 、 H_{lx} 和 V_{lx} 、 V_{lx} 、 V_{lx} 、 V_{lx} 与各自侧面法向力有如下关系:

$$\left. \begin{aligned} H_{lx} &= \lambda_1 (cA_{ll} + E_{ly} \tan \varphi) \\ H_{ly} &= \lambda_1 (cA_{lr} + E_{ly} \tan \varphi) \\ H_{ly} &= \lambda_1 (cA_{lf} + E_{lx} \tan \varphi) \\ H_{ly} &= \lambda_1 (cA_{lb} + E_{lx} \tan \varphi) \\ V_{lx} &= \lambda_2 (cA_{ll} + E_{ly} \tan \varphi) \\ V_{lx} &= \lambda_2 (cA_{lr} + E_{ly} \tan \varphi) \\ V_{lx} &= \lambda_2 (cA_{lf} + E_{lx} \tan \varphi) \\ V_{lx} &= \lambda_2 (cA_{lb} + E_{lx} \tan \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: λ_1 为条柱侧横向抗剪强度发挥系数; λ_2 为条柱侧面竖向抗剪强度发挥系数; c 和 φ 分别是潜在滑体土黏聚力和内摩擦角; A_{ll} 、 A_{lr} 、 A_{lf} 、 A_{lb} 分别是条柱左、右、前、后侧面面积。

(2) 条块底滑面由平面拟合,底滑面的法向由拟合的平面法向替代,滑面上的力作用点为底滑面的几何中心 $C(x_c, y_c, z_c)$ 。

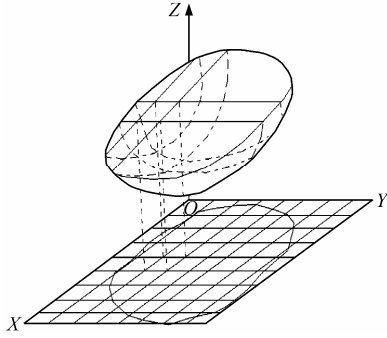


图1 坡体划分示意图

Fig.1 Sketch of slope division

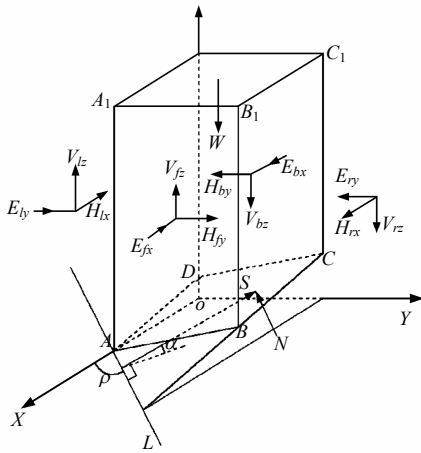


图2 条柱受力情况

Fig.2 Forces on a single column

(3) 空间两平面间存在两种关系相交和平行, 因此, 各条柱底滑面与水平面 (XOY 平面) 必有交线 L (两面平行时交线在无穷远处), 根据运动学观点: 物体在自重作用下沿斜面下滑时, 运动方向垂直于斜面与水平面的交线, 因此, 本文假定各条柱的底滑面上的抗滑力 S 的方向垂直于滑面与 XOZ 平面的交线 L 。底滑面与 XOZ 平面的夹角为 α , 当底滑面倾向与 X 轴正向夹角为锐角时, α 取正值, 交线 L 与 X 轴的夹角为 ρ , 规定抗滑力 S 在 XOZ 平面上的投影在 X 轴上的分量为正时, ρ 为正值, 如图3所示。

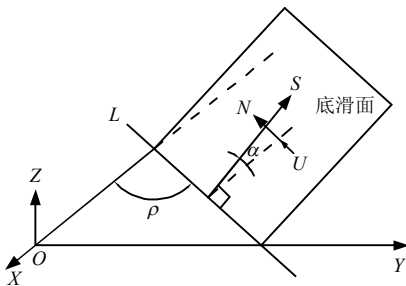


图3 抗滑力的方向

Fig.3 Direction of anti-sliding force

若滑面位置确定, 则滑面与 XOY 平面的夹角 α 和交线与 X 轴的夹角 ρ 已知, 因此, 有

$$\left. \begin{aligned} S_{ix} &= S_i \cos \alpha_i \sin \rho_i \\ S_{iy} &= S_i \cos \alpha_i \cos \rho_i \\ S_{iz} &= S_i \sin \alpha_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} N_{ix} &= N_i \sin \alpha_i \sin \rho_i \\ N_{iy} &= N_i \sin \alpha_i \cos \rho_i \\ N_{iz} &= N_i \cos \alpha_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

并假定当底滑面与 XOY 平面平行时, $\alpha = 0$,

$\rho = 0$ 。

2.2 建立静力平衡方程

本文在安全系数求解过程中未考虑地震力和外部荷载的作用, 在实际应用中, 地震力和外部荷载已知, 可直接加到平衡方程中去, 文中只考虑均质边坡在自重作用下建立静力平衡。

静力平衡建立如下:

(1) 分析作用在条柱 i 上的作用力, 求其 X 轴上力的平衡有

$$(E_{ibx} - E_{ifx}) + (H_{itx} - H_{ilx}) - S_{ix} + N_{ix} = 0 \quad (4)$$

(2) 分析作用在条柱 i 上的作用力, 求其 Y 轴上力的平衡有

$$(E_{ily} - E_{ify}) + (H_{ity} - H_{ily}) + S_{iy} - N_{iy} = 0 \quad (5)$$

(3) 分析作用在条柱 i 上的作用力, 求其 Z 轴上力的平衡有

$$(V_{ilz} - V_{itz}) + (V_{ifz} - V_{ibz}) + S_{iz} + N_{iz} - W_i = 0 \quad (6)$$

由式 (1) 可得,

$$\left. \begin{aligned} \Delta H_{ix} &= H_{itx} - H_{ilx} = \lambda_1 [c(A_{it} - A_{il}) + \tan \varphi (E_{ity} - E_{ily})] \\ \Delta H_{iy} &= H_{ity} - H_{ily} = \lambda_1 [c(A_{it} - A_{il}) + \tan \varphi (E_{ifx} - E_{ibx})] \\ \Delta V_{ilz} &= V_{ilz} - V_{itz} = \lambda_2 [c(A_{il} - A_{it}) + \tan \varphi (E_{ily} - E_{ity})] \\ \Delta V_{ifz} &= V_{ifz} - V_{ibz} = \lambda_2 [c(A_{if} - A_{ib}) + \tan \varphi (E_{ifx} - E_{ibx})] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

若假定条柱各左右侧面面积相等, 前后侧面面积相等, 且设 $\Delta E_{ix} = E_{ifx} - E_{ibx}$, $\Delta E_{iy} = E_{ity} - E_{ily}$, 则式 (7) 可写为

$$\left. \begin{aligned} \Delta H_{ix} &= \lambda_1 \tan \varphi \Delta E_{iy} \\ \Delta H_{iy} &= \lambda_1 \tan \varphi \Delta E_{ix} \\ \Delta V_{ilz} &= \lambda_2 \tan \varphi \Delta E_{iy} \\ \Delta V_{ifz} &= \lambda_2 \tan \varphi \Delta E_{ix} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (4) ~ (6) 有

$$\Delta E_{ix} + \lambda_1 \tan \varphi \Delta E_{iy} - S_{ix} + N_{ix} = 0 \quad (9)$$

$$\Delta E_{iy} + \lambda_1 \tan \varphi \Delta E_{ix} + S_{iy} - N_{iy} = 0 \quad (10)$$

$$\lambda_2 \tan \varphi (\Delta E_{ix} + \Delta E_{iy}) + S_{iz} + N_{iz} - W_i = 0 \quad (11)$$

由式 (9) ~ (11) 得,

$$\frac{1 + \lambda_1 \tan \varphi}{\lambda_2 \tan \varphi} (W_i - S_{iz} - N_{iz}) - S_{ix} + N_{ix} + S_{iy} - N_{iy} = 0 \quad (12)$$

由摩尔-库仑定律有

$$S_i = c_e A_i + (N_i - U_i) \tan \varphi_e \quad (13)$$

式中: A_i 为各条柱底滑面面积。

将式 (2)、(3)、(13) 代入式 (12) 得,

$$N_i = \frac{B c_e A_i - D U_i - K W_i}{A} \quad (14)$$

式中: $K = \frac{1 + \lambda_1 \tan \varphi}{\lambda_2 \tan \varphi}$; $A = \sin \alpha_i \sin \rho_i - \sin \alpha_i \cdot$

$\cos \rho_i - \tan \varphi_e \cos \alpha_i \sin \rho_i + \tan \varphi_e \cos \alpha_i \cos \rho_i - K \cdot$
 $\tan \varphi_e \sin \alpha_i - K \cos \alpha_i$; $B = K \sin \alpha_i - \cos \alpha_i \cos \rho_i + \cos \alpha_i \cdot$
 $\sin \rho_i$; $D = K \tan \varphi_e \sin \alpha_i - \tan \varphi_e \cos \alpha_i \cos \rho_i + \tan \varphi_e \cdot$
 $\cos \alpha_i \sin \rho_i$ 。

根据假定 (2), 并绕 X 、 Y 和 Z 轴分别建立力矩平衡方程

$$\left. \begin{aligned} M_x &= \sum [(S_{iz} + N_{iz} - W_i) y_{ic} - (S_{iy} - N_{iy}) z_{ic}] = 0 \\ M_y &= \sum [(S_{iz} + N_{iz} - W_i) x_{ic} + (N_{ix} - S_{ix}) z_{ic}] = 0 \\ M_z &= \sum [(N_{ix} - S_{ix}) y_{ic} + (S_{iy} - N_{iy}) x_{ic}] = 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

将式 (14) 代入式 (15) 得到关于未知数 F 和抗剪力发挥系数 λ_1 、 λ_2 的 3 个方程式, 未知数个数与方程数相等。

2.3 应用 Newton-Rapson 法迭代求解安全系数

假定 F 和 λ_1 、 λ_2 的初值 F_0 和 λ_1^0 、 λ_2^0 , 得到一个非零的 $\Delta \Sigma M_x$ 、 $\Delta \Sigma M_y$ 和 $\Delta \Sigma M_z$, 使 $\Delta \Sigma M_x$ 、 $\Delta \Sigma M_y$ 和 $\Delta \Sigma M_z$ 接近于 0 的 F_1 和 λ_1^1 、 λ_2^1 可用下式求得:

$$\left. \begin{aligned} \Delta F &= F_{i+1} - F_i = -K_F / D \\ \Delta \lambda_1 &= \lambda_1^{i+1} - \lambda_1^i = -K_{\lambda_1} / D \\ \Delta \lambda_2 &= \lambda_2^{i+1} - \lambda_2^i = -K_{\lambda_2} / D \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中:

$$D = \begin{vmatrix} \frac{\partial M_x}{\partial F} & \frac{\partial M_x}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial M_x}{\partial \lambda_2} \\ \frac{\partial M_y}{\partial F} & \frac{\partial M_y}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial M_y}{\partial \lambda_2} \\ \frac{\partial M_z}{\partial F} & \frac{\partial M_z}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial M_z}{\partial \lambda_2} \end{vmatrix}$$

$$K_F = \begin{vmatrix} \Delta M_x & \frac{\partial M_x}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial M_x}{\partial \lambda_2} \\ \Delta M_y & \frac{\partial M_y}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial M_y}{\partial \lambda_2} \\ \Delta M_z & \frac{\partial M_z}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial M_z}{\partial \lambda_2} \end{vmatrix}$$

$$K_{\lambda_1} = \begin{vmatrix} \frac{\partial M_x}{\partial F} & \Delta M_x & \frac{\partial M_x}{\partial \lambda_2} \\ \frac{\partial M_y}{\partial F} & \Delta M_y & \frac{\partial M_y}{\partial \lambda_2} \\ \frac{\partial M_z}{\partial F} & \Delta M_z & \frac{\partial M_z}{\partial \lambda_2} \end{vmatrix}$$

$$K_{\lambda_2} = \begin{vmatrix} \frac{\partial M_x}{\partial F} & \frac{\partial M_x}{\partial \lambda_1} & \Delta M_x \\ \frac{\partial M_y}{\partial F} & \frac{\partial M_y}{\partial \lambda_1} & \Delta M_y \\ \frac{\partial M_z}{\partial F} & \frac{\partial M_z}{\partial \lambda_1} & \Delta M_z \end{vmatrix}$$

通过以上迭代, 求得安全系数 F , 在计算中可根据需要设置精度, 文中要求 ΔF 和 $\Delta \lambda_1$ 、 $\Delta \lambda_2$ 均小于 0.001。

2.4 对 λ_1 、 λ_2 讨论

对于均质边坡, 若 $\lambda_1 > 1/F$ (或 $\lambda_2 > 1/F$), 则说明条柱的侧面抗剪强度发挥得比底滑面上还要充分, 说明边坡破坏是从侧面开裂, 潜在滑体不是整体下滑; 若 $\lambda_1 \leq 1/F$ (或 $\lambda_2 \leq 1/F$) 则说明条柱侧面抗剪强度发挥得没有底滑面上充分, 说明边坡破坏是从底滑面开始, 潜在滑体整体下滑。

若 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 \neq 0$, 即假定各条柱侧面横向剪力为 0, 与文[5]假定类似, 可以看作是二维 Spencer 法扩展到三维; 若 $\lambda_1 \neq 0$, $\lambda_2 = 0$, 即假定各条柱侧

面竖向剪切力为 0, 与文[6]假定类似, 可以看作是二维 Janbu 法扩展到三维; 若 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 0$, 即假定各条柱侧面剪切力为 0, 与三维简化 Bishop 法假定类似。

3 算例分析

本文以文献[4]的一算例为例采用本文提出的算法进行边坡安全稳定系数计算。例题如下: 一无水均质土坡, 坡高为 12 m, 坡比为 1:2, 假定其滑裂面为一旋转椭球面, 如图 4 所示, 其方程为

$$\frac{(x-13.4)^2}{24.4^2} + \frac{(y-60)^2}{48^2} + \frac{(z-27)^2}{24.4^2} = 1 \quad (17)$$

潜在滑体土的重度为 18.8 kN/m³, 黏聚力 c 为 29 kPa, 内摩擦角为 20°。

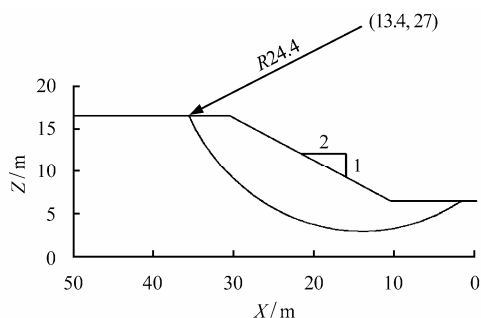


图 4 椭球体滑面算例

Fig.4 An illustrative example with an ellipsoid failure surface

本文分别采用了 3 种条间力的假定对边坡的安全系数进行计算, 计算结果如下表 1。

$\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 0$ (假定 (1)) 即忽略掉所有条间剪力的作用, 这种假定可以看作二维 Bishop 法在三维上的扩展。 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 \neq 0$ (假定 (2)) 即假定各条柱侧面横向剪切力为 0, 这种假定可以看作二维 Spencer 法在三维上的扩展。 $\lambda_1 \neq 0$, $\lambda_2 \neq 0$ (假定 (3)) 这种假定全面考虑了条间力对边坡稳定的贡献, 相比上面两种假定更合实际。

表 1 不同算法的安全系数

Table 1 Safety factors by different methods

算法	假定	λ_1	λ_2	F
文中算法	(1)	0.00	0.00	2.017
	(2)	0.00	0.38	2.201
	(3)	0.32	0.30	2.243
Spencer 法	二维计算方法			2.073
文献[4]算法	条柱间作用力平行于列界面			2.122
文献[5]算法	忽略条柱间横向剪力			2.187

分析 3 种假定计算结果可以看出, 假定 (1) 的结果明显小于其他两种假定所得的结果, 即当不考虑条柱侧面剪切力时所得到的安全系数偏小。当只考虑条柱间的竖向剪力时 (假定 (2)) 比假定 (1) 安全系数增大了 9.1%, 而考虑条柱间的全部作用力时 (假定 (3)) 得到的安全系数比假定 (2) 安全系数只增大了 1.9%, 说明该边坡条柱间的横向剪切力对边坡的整体稳定贡献不如竖向剪力大。计算获得的 $\lambda_1 < 1/F$ 、 $\lambda_2 < 1/F$, 说明本算例边坡整体性较好。分析 3 种假定计算结果, 当 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = 0$ 时, 得到的安全系数为 2.017, 与二维 Spencer 法算得结果很相近; 当 $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 \neq 0$ 时得到的安全系数为 2.201, 与文献[5]算法相近; 当 $\lambda_1 \neq 0$, $\lambda_2 \neq 0$ 时得到的安全系数为 2.243, 所得的安全系数比文献[4—5]计算结果大, 主要由于考虑了横向剪力边坡稳定性的贡献。假定 $\lambda_1 \neq 0$, $\lambda_2 \neq 0$ 的受力情况更能反映边坡实际受力情况, 其算得的结果更接近于实际。

为了验证本文方法的合理性, 还将用 Spencer^[3]法、文献[4]算法和文献[5]算法得到的结果与本文方法算得的结果比较, 对比结果可以发现, 三维极限平衡法算得的安全系数比二维极限平衡法算得的安全系数要大, 而假定 (1) 不考虑边坡侧向剪切力作用时得到的安全系数为 2.017, 与二维极限平衡法得到的安全系数相近, 假定 (2) 不考虑条柱横向剪切力的作用时得到的安全系数为 2.201, 与文献[5]的结果很相近, 在考虑条柱间全部剪力作用时 (假定 (3)) 得到的安全系数为 2.243, 比文献[4—5]算得的安全系数大, 这种算法考虑了条柱间横向剪力对边坡稳定性的贡献。

4 结 论

(1) 本文计算边坡稳定安全系数的三维极限平衡方法相比其他的三维极限平衡方法, 在对条柱间作用力假定上, 有以下两点不同之处: ①假定边坡底滑面上的抗剪力方向垂直于底滑面与平面的交线, 这种假定是在进行条柱划分时, 不需要预先确定潜在滑体的主滑方向, 这与实际情况相符; ②在对条柱侧面力假定时, 引入了条间剪力发挥系数的概念, 这一假定充分考虑到条间全部作用力对边坡稳定的影响, 算得的安全系数更接近实际。

(2) 本文在求解安全系数时, 满足了各条柱 3 个方向上的力的平衡及整体方向上 3 个力矩的平衡。这相比一些只满足部分力和力矩平衡的计算方法, 其力学平衡条件更加严格。

(3) 通过算例计算, 将本文计算方法的结果与前人的计算方法算得的结果, 较相近, 说明本文计算方法正确。

参考文献

- [1] DUNCAN J M. State of the art: Limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 22(7): 577—596.
- [2] HUNGR O. An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions[J]. **Geotechnique**, 1987, 37(1): 113—117.
- [3] ZHANG X. Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1998, 114: 658—671.
- [4] PENCER E, TECH M SC. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces[J]. **Geotechnique**, 1967, 17(1): 11—26.
- [5] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 525—529.
CHEN Zu-yu, MI Hong-liang, WANG Xiao-gang. A three-dimensional limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(5): 525—529.
- [6] 冯树仁, 丰定祥, 葛修润, 等. 边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 657—661.
FENG Shu-ren, FENG Ding-xiang, GE Xiu-run, et al. 3D limit equilibrium method for slope stability and its application[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 657—661.
- [7] 张均锋, 丁桦. 边坡稳定分析的三维极限平衡法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 365—370.
ZHANG Jun-feng, DING Hua. Generalized 3D limit-equilibrium method for slope stability analysis and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(3): 365—370.
- [8] 张均锋. 三维简化 Janbu 法分析边坡稳定性的扩展[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2876—2881.
ZHANG Jun-feng. Extension of three-dimensional simplified Janbu's method for slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(17): 2876—2881.
- [9] 朱大勇, 丁秀丽. 三维边坡稳定准严格极限平衡解答[C]// 三峡库区地质灾害与岩土环境学术研讨会论文集. 重庆: [s. n.], 2006: 166—177.
- [10] 郑宏. 严格三维极限平衡法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1529—1537.
ZHENG Hong. A rigorous three-dimensional limit equilibrium method[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(8): 1529—1537.
- [11] 陈胜宏, 万娜. 边坡稳定分析的三维剩余推力法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(3): 69—73.
CHEN Sheng-hong, WAN Na. Study of three-dimensional residual thrust method for slope stability analysis[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2005, 38(3): 69—73.
- [12] 李同录, 王艳霞, 邓宏科. 一种改进的三维边坡稳定性分析方法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 611—614.
LI Tong-lu, WANG Yan-xia, DENG Hong-ke. An improved method for three-dimensional slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(5): 611—614.
- [13] 曾进群, 刘东燕, 严春风. 边坡稳定性三维极限平衡分析的新探讨及其应用[J]. 地下空间, 2001, 21(4): 332—336.
ZENG Jin-qun, LIU Dong-yan, YAN Chun-feng. New study of three-dimensional limit equilibrium slope stability analysis and its application[J]. **Underground Space**, 2001, 21(4): 332—336.
- [14] 姜清辉, 王笑海, 丰定祥, 等. 三维边坡稳定性极限平衡分析系统软件 SLOPE-3D 设计及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1121—1125.
JIANG Qing-hui, WANG Xiao-hai, FENG Ding-xiang, et al. SLOPE-3D—a three-dimensional limit equilibrium analysis software for slope stability and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(7): 1121—1125.
- [15] 杜建成, 黄大寿, 胡定. 边坡稳定的三维极限平衡分析法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2001, 33(4): 9—12.
DU Jian-cheng, HUANG Da-shou, HU Ding. A 3D limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2001, 33(4): 9—12.
- [16] 顾晓强, 陈龙珠. 边坡稳定分析的三维极限平衡法[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(6): 970—973.
GU Xiao-qiang, CHEN Long-zhu. A 3D limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2007, 41(6): 970—973.