

考虑力矩平衡的三维剩余推力法

张奇华

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 在考虑力矩平衡的二维剩余推力法的基础上, 提出了一种三维极限平衡分析方法。在忽略条柱间作用力的水平剪切分量的基础上, 建立铅直方向(Z 轴)、滑动方向(X 轴)、垂直滑动方向(Y 轴)的力平衡以及绕 Y 轴的力矩平衡共4个方程, 平衡方程中纳入地下水、地震、支护力作用。行界面上柱间力作用方向角(条间力剪切分量与水平分量的比值)为条柱底滑面在滑动方向上的倾角乘以统一的修正系数(可称为推力方向修正系数, 以进行修正), 列界面上柱间力作用方向角为条柱底滑面在 Y 方向上的倾角。通过迭代计算, 当调整稳定系数以使所有列的 X 向剩余推力和为零、改变滑动方向(X 轴方位)以使所有行的 Y 向剩余推力和为零、调整推力方向修正系数以使绕 Y 轴的总力矩为零, 求得滑坡的稳定系数、最优滑动方向及推力方向修正系数。该法适用于任意形态滑坡, 并可计算得到最优滑动方向。最后对该法进行了工程应用及讨论。

关键词: 三维极限平衡分析; 剩余推力法; 力矩平衡; 最优滑动方向; 稳定系数

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2008)09-1393-06

作者简介: 张奇华(1973-), 男, 博士, 1994年毕业于中国地质大学地质系, 高级工程师, 主要从事工程岩体稳定性分析与加固技术研究。E-mail: zqh7692@163.com。

Three-dimensional residual thrust method considering moment equilibrium

ZHANG Qi-hua

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Based on the two-dimensional residual thrust method considering moment equilibrium, a new three-dimensional limit equilibrium method was proposed. With horizontal shear component of intercolumn forces ignored, four equilibrium equations were formed, i.e., force equilibriums along the vertical direction, the sliding (X axis) direction, Y axis direction, and moment equilibrium around Y axis. The equilibrium equations contained the actions of underground water, earthquake and supporting forces. The directional angle of the force acting on the lateral vertical faces of each column was the dip of the sliding face in X direction multiplied by correction coefficient, which was named as the correction coefficient of thrust direction. The directional angle of the force acting on the longitudinal faces was the dip of the sliding face in Y axis direction. By means of iteration, when the total residual thrust along X direction of all rows became zero by adjusting the factor of safety, the total residual thrust along Y direction became zero by changing the sliding direction, as well as the total moment around Y axis became zero by adjusting the correction coefficient of thrust direction, the factor of safety of landslide, the optimized sliding direction and the correction coefficient of thrust direction could be solved. The proposed method was suitable for any landslide shape, and the slide direction could be calculated rather than guessed. At last, the method was used in practical engineering and the results were discussed.

Key words: three dimensional limit equilibrium analysis; residual thrust method; moment equilibrium; optimized slide direction; factor of stability

0 引言

实际滑坡形态几乎均表现为三维特性, 因此二维极限平衡分析已不能完全满足目前工程分析的需要。三维分析可以较真实地反映滑坡的实际形态, 更全面描述滑坡不同部分对稳定性的影响及总体稳定状况,

因此三维极限平衡分析是滑坡稳定分析领域的一个重

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(50509003); 水利部岩土力学与工程重点实验室开放基金项目

收稿日期: 2007-07-16

要的热门研究课题。

极限平衡法均以刚体假设为基础,在静力平衡条件和 Mohr-Coulomb 强度准则的基础上,通过分析岩土体在破坏时刻的静力平衡条件以求得滑坡稳定系数。二维极限平衡分析所研究的力学问题一般是静不定问题,因此需要引入一定的假设,使问题变得静定可解。三维分析亦如此。目前绝大多数三维极限平衡法是二维极限平衡法的三维推广:将滑坡划分为条柱,通过对条柱间作用力的方向(如 Bishop 法、Spencer 法、余推力法)、柱间力的法向分量与剪切分量满足的关系(如 Sarma 法)、或柱间力作用点(如 Janbu 法)等进行假设,以使得问题变得静定可解,如文献[1~14]。一些方法仅满足力平衡,一些方法满足力平衡和力矩平衡,但满足的平衡方程数目(理论上最多有 6 个平衡方程)均较有限。文献[15~17]避开对柱间力进行假设,通过对滑面正应力进行调整,或者采用插值函数逼近滑面的正应力分布,并求得相应未知数的办法,获得满足 5 个或全部 6 个平衡条件的解答。然而,由于问题的复杂性和多解性,真正得到较广泛认可、合理有效的分析方法非常少见。

滑动方向的确定是三维极限平衡分析的一个重要问题。文献[8, 11, 13]等给定滑动方向,并假定滑体中有一个“中性面”,中性面两侧,滑面上的剪力方向与中性面的夹角向两侧线性地增大。文献[9, 12]在其假设前提下可以计算出滑动方向。事实上,众多研究文献对滑动方向进行了“给定”,由于实际滑坡空间形态较为复杂,滑动方向进行“给定”是很困难的,而不同给定的滑动方向,势必影响计算结果。另外,众多研究文献结果都认为,各条柱滑动方向在水平面上的投影基本平行,因此可以假定为平行,这一点在实际滑坡中也不难想象。

水电工程面临的滑坡,一般为土石混合体滑坡、非对称土质滑坡或底滑面受结构面控制的岩质滑坡,滑坡具有不对称性、滑动方向不可精确预知、受地下水及库水位影响、需要考虑加固处理等特点。因此,为了研究出适合水电工程滑坡特点的极限平衡分析方法,需要着重考虑以下几个方面:①根据已有三维极限平衡分析方法及其应用情况分析,对柱间力进行较合理的假设是求解的关键;②条(柱)间力的方向对计算结果影响显著,而仅仅考虑力平衡时需要人为假定力的方向,因此应通过考虑力矩平衡予以避免;③现有文献一般都对滑坡的潜在滑动方向进行人为假定,而实际上对于工程实际中广泛存在的非对称滑坡,这种做法缺乏根据,滑动方向作为一个未知量进行求解是有必要的;④考虑地下水及库水作用,考虑支护处理措施。

文献[18]提出了考虑力矩平衡的二维改进剩余推力法。该法结合了二维剩余推力法与二维 Morgenstern-Price 法的各自优点:假定条间力方向角为上一条块底滑面倾角与未知常数 λ 的乘积,通过引入力矩平衡关系式求解 λ 。因此,条间力的方向角具有合理的物理意义,又能满足力矩平衡。本文在此基础上,提出了考虑力矩平衡的三维剩余推力法,该法满足 3 个方向的力平衡和一个力矩平衡,适用于任意形态的滑坡,并可以自动计算得到最优滑动方向。

1 计算方法原理

条柱法的行列编号分配规则,以及第 i 行第 j 列条柱的受力情况如图 1 所示,其中外荷载、水压荷载等未予标示。共有 m 行 n 列条柱,但每行、每列不一定有 n 个、 m 个条柱。

基本假定:①条柱间作用力共有 3 个分量,根据文献[6]等研究结果,水平剪切分量一般较小,对计算结果的影响小,在本文研究中予以忽略。根据二维极限平衡分析的经验,垂直剪切分量对计算结果影响较大而不予忽略,并且还考虑法向分量。②各条柱底滑面上的阻滑力方向在水平面上投影一致,为滑坡总体滑动方向的反向。

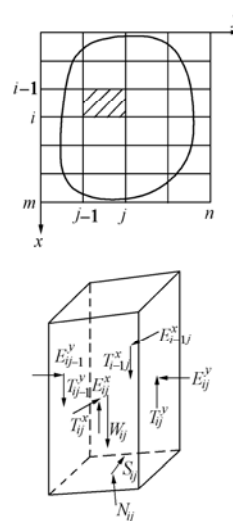


图 1 条柱法编号规则及某条柱受力情况

Fig. 1 Numbering scheme of columns and forces acting on a column

1.1 基本方程

采用矢量形式表达。铅垂向力平衡:

$$W_{ij} + (N_{ij} + U_{ij})\hat{n}_{ij}\hat{w}_0 + S_{ij}\hat{s}_{ij}\hat{w}_0 + T_{i-1,j}^x - T_{ij}^x + T_{ij-1}^y - T_{ij}^y + U_{ij}'\hat{n}_{ij}'\hat{w}_0 + P_{ij}\hat{p}_{ij}\hat{w}_0 = 0 \quad (1)$$

首先假定 X 轴向为滑动方向,该方向的力平衡:

$$(N_{ij} + U_{ij})\hat{n}_{ij}\hat{x} + S_{ij}\hat{s}_{ij}\hat{x} + E_{i-1,j}^x + P_{wi-1,j}^x - E_{ij}^x - P_{wij}^x + U_{ij}'\hat{n}_{ij}'\hat{x} + P_{ij}\hat{p}_{ij}\hat{x} = 0 \quad (2)$$

垂直滑动方向 (Y 向) 的力平衡:

$$(N_{ij} + U_{ij})\hat{n}_{ij}\hat{y} + E_{ij-1}^y + P_{wij-1}^y - E_{ij}^y - P_{wij}^y + U_{ij}'\hat{n}_{ij}'\hat{y} + P_{ij}\hat{p}_{ij}\hat{y} = 0 \quad (3)$$

绕 Y 轴总力矩 M_T 为

$$M_T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{ij} \hat{w}_0 \hat{m}_0 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (N_{ij} + U_{ij}) \hat{n}_{ij} \hat{m}_b + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij} \hat{s}_{ij} \hat{m}_b + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n R_{ij} \hat{r}_{ij} \hat{m}_r + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Q_{ij} \hat{x} \hat{m}_0 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n U_{ij}' \hat{n}_{ij}' \hat{m}_t \quad (4)$$

以上各式中 $\hat{x}$, $\hat{y}$ 为 X 轴方向矢量、Y 轴方向矢量, 分别为 $\{1, 0, 0\}$, $\{0, 1, 0\}$; W_{ij} , $\hat{w}_0$ 为第 i 行第 j 列条柱的重力大小、重力方向矢量; N_{ij} , U_{ij} , $\hat{n}_{ij}$ 为该条柱底滑面上的法向力大小、水压力大小、及其方向矢量; S_{ij} 为条柱底滑面上的阻滑力大小, 根据强度折减稳定系数的定义, S_{ij} 可表示为

$$S_{ij} = \frac{N_{ij} f_{ij}'}{F_s} + \frac{c_{ij}' A_{ij}}{F_s} \quad (5)$$

式中, c_{ij}' , f_{ij}' , F_s 分别为该条柱滑面有效黏聚力、摩擦系数、滑坡整体稳定系数; $\hat{s}_{ij}$ 为阻滑力方向矢量, 根据本文的基本假定②, 可得

$$\hat{s}_{ij} = -\frac{\hat{y} \times \hat{n}_{ij}}{|\hat{y} \times \hat{n}_{ij}|} \text{sign}[(\hat{y} \times \hat{n}_{ij}) \cdot \hat{x}] \quad (6)$$

式中, 为保证求得的 $\hat{s}_{ij}$ 使得 $\hat{s}_{ij} \cdot \hat{x} < 0$, 则需置以 $\text{sign}[x]$ (当 $x > 0$, $x = 0$, $x < 0$ 时, 其值为 1, 0, -1); P_{ij} , $\hat{p}_{ij}$ 为地震力、锚固力的合力, 合力方向矢量; Q_{ij} 为地震力, 方向考虑为最危险的 X 轴正向; R_{ij} , $\hat{r}_{ij}$ 为锚固力、锚固力方向矢量; $E_{i-1,j}^x$, E_{ij}^x , E_{ij-1}^y , E_{ij}^y 为第 i 行第 j 列条柱的 4 个侧面的法向力, 如图 1; $T_{i-1,j}^x$, T_{ij}^x , T_{ij-1}^y , T_{ij}^y 为第 i 行第 j 列条柱的 4 个侧面的垂向剪切力, 如图 1; $P_{wi-1,j}^x$, P_{wij}^x , P_{wij-1}^y , P_{wij}^y 为第 i 行第 j 列条柱的 4 个侧面的水压力; U_{ij}' , $\hat{n}_{ij}'$ 为条柱顶面的水压力、顶面方向矢量; $\hat{m}_0$ 为条柱形心坐标 (x_0, y_0, z_0) 构成的绕 Y 轴的矢径, $\hat{m}_b = \{z_0, 0, -x_0\}$; $\hat{m}_b$ 为条柱底心坐标 (x_b, y_b, z_b) 构成的绕 Y 轴的矢径, $\hat{m}_r = \{z_r, 0, -x_r\}$; $\hat{m}_r$ 为该条柱锚固力作用点坐标 (x_r, y_r, z_r) 构成的绕 Y 轴的矢径, $\hat{m}_t = \{z_t, 0, -x_t\}$; $\hat{m}_t$ 为该条柱顶部水压力作用点坐标 (x_t, y_t, z_t) 构成的绕 Y 轴的矢径, $\hat{m}_0 = \{z_0, 0, -x_0\}$ 。

在常规剩余推力法的基础上, 对行界面上条间力方向进行修正。假定行界面条间力方向角为上一条块底滑面在滑动方向上的倾角与未知常数 λ (称为推力方向修正系数) 的乘积:

$$\frac{T_{ij}^x}{E_{ij}^x} = -\tan \alpha_{ij}^x \lambda \quad (7)$$

如同二维改进剩余推力法^[18], 条间力的方向角具有较为明确合理的物理意义, 又能满足力矩平衡, 因而兼有剩余推力法与 M-P 法的优点。

列界面上条间力方向角与左侧条块的底滑面在 Y 轴上的倾角平行, 则

$$\frac{T_{ij}^y}{E_{ij}^y} = -\tan \alpha_{ij}^y \quad (8)$$

其中, $\tan \alpha_{ij}^x$, $\tan \alpha_{ij}^y$ 分别由条柱滑面倾角 α_{ij} 、倾向 β_{ij} 进行确定: $\tan \alpha_{ij}^x = -\tan \alpha_{ij} \sin \beta_{ij}$, $\tan \alpha_{ij}^y = -\tan \alpha_{ij} \cos \beta_{ij}$ 。

1.2 解题过程

将式 (3)、(5)、(7)、(8) 代入式 (1) 得

$$[\hat{n}_{ij} \hat{w}_0 + \frac{f_{ij}'}{F_s} \hat{s}_{ij} \hat{w}_0 + \hat{n}_{ij} \hat{y} \tan \alpha_{ij}^y] N_{ij} + \lambda \tan \alpha_{ij}^x E_{ij}^x + m_1 + m_2 + m_3 \tan \alpha_{ij}^y = 0 \quad (9)$$

由式 (2) 得

$$[\hat{n}_{ij} \hat{x} + \frac{f_{ij}'}{F_s} \hat{s}_{ij} \hat{x}] N_{ij} - E_{ij}^x + m_4 = 0 \quad (10)$$

其中

$$\begin{aligned} m_1 &= -\lambda \tan \alpha_{i-1,j}^x E_{i-1,j}^x - \tan \alpha_{ij-1}^y E_{ij-1}^y + U_{ij}' \hat{n}_{ij}' \hat{w}_0 + P_{ij} \hat{p}_{ij} \hat{w}_0 + U_{ij} \hat{n}_{ij} \hat{w}_0; \\ m_2 &= W_{ij} + \frac{c_{ij}' A_{ij}}{F_s} \hat{s}_{ij} \hat{w}_0; \\ m_3 &= U_{ij} \hat{n}_{ij} \hat{y} + E_{ij-1}^y + P_{wij-1}^y - P_{wij}^y + U_{ij}' \hat{n}_{ij}' \hat{y} + P_{ij} \hat{p}_{ij} \hat{y}; \\ m_4 &= \frac{c_{ij}' A_{ij}}{F_s} \hat{s}_{ij} \hat{x} + U_{ij} \hat{n}_{ij} \hat{x} + E_{i-1,j}^x + P_{wi-1,j}^x - P_{wij}^x + U_{ij}' \hat{n}_{ij}' \hat{x} + P_{ij} \hat{p}_{ij} \hat{x}. \end{aligned}$$

将式 (9)、(10) 看成求解 N_{ij} , E_{ij}^x 的二元线性方程组, 并设

$$\begin{aligned} a_1 &= \hat{n}_{ij} \hat{w}_0 + \frac{f_{ij}'}{F_s} \hat{s}_{ij} \hat{w}_0 + \hat{n}_{ij} \hat{y} \tan \alpha_{ij}^y, \\ a_2 &= \hat{n}_{ij} \hat{x} + \frac{f_{ij}'}{F_s} \hat{s}_{ij} \hat{x}, \\ b_1 &= \lambda \tan \alpha_{ij}^x, \\ b_2 &= -1, \\ m_5 &= m_1 + m_2 + m_3 \tan \alpha_{ij}^y, \end{aligned}$$

则有

$$N_{ij} = \frac{-m_5 b_2 + m_4 b_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (11)$$

$$E_{ij}^x = \frac{m_5 a_2 - m_4 a_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \quad (12)$$

相应地, 解题过程如下:

(1) 首先给定未知常数 λ 取 1.0; 如常规的剩余

推力法, 通过设定稳定系数 F_s 的初值, 利用式 (11)、(12) 先从上至下 (增加行编号)、后从左至右 (增加列编号) 循环地推求每个条柱的 N_{ij} , E_{ij}^x , 并采用式 (3)、(5)、(7)、(8) 求取 E_{ij}^y , S_{ij} , T_{ij}^x 和 T_{ij}^y 。

(2) 计算每列最后一个条柱的剩余推力之和 (X 向剩余推力和) $\sum_{j=1}^n E_{mj}^x$ (事实上, 每列不一定都有 m 行) 是否为零, 若不为零则调整 F_s 的取值, 直至其为零, 得到相应的 F_s , 这一点如同剩余推力法的解题方法; 并计算每行最后一个条柱的剩余推力和 (Y 向剩余推力和) $\sum_{i=1}^m E_{in}^y$ (每列也不一定都有 n 行)。

(3) 改变滑动方向即 X 轴相对于滑坡的方位角, 并重新划分条柱, 重复上述的计算。对不同滑动方向时的 Y 向剩余推力和 $\sum_{i=1}^m E_{in}^y$ 进行图解, 求得 $\sum_{i=1}^m E_{in}^y = 0$ 时对应的滑动方向, 即为计算所求的最优滑动方向, 不同滑动方向与 $\sum_{i=1}^m E_{in}^y$ 关系总是如单调函数关系。文献[19]也是通过改变滑动方向, 当与滑动方向垂直的方向上达到力平衡时, 求得最优滑动方向。

(4) 在最优滑动方向下, 假定 λ 取 0.1, 0.2, ..., 2.0 等不同值, 利用式 (4) 计算绕 Y 轴总力矩 M_T 。作 $\lambda - M_T$ 关系图, 求得力矩 M_T 为 0 时对应的 λ , 以及相应的 F_s 。如考虑力矩平衡的二维剩余推力法^[18], $\lambda - M_T$ 关系图总是如单调函数关系。

上述解题过程的特点为①假定 λ 的不同取值, 通过调整 F_s (如剩余推力法解题过程), 使得滑动方向上剩余推力和为 0, 得到 F_s 。因此在利用方程 (9)、

(10) 解 N_{ij} , E_{ij}^x 的求解过程中, λ , F_s 当作已知量处理; ②改变滑动方向, 当 Y 向剩余推力和 $\sum_{i=1}^m E_{in}^y$ 为 0 时, 得到最优滑动方向, 即通过 Y 向的力平衡得到最优滑动方向; ③在最优滑动方向下, 通过假定 λ 的不同取值, 求得绕 Y 轴总力矩 M_T , 通过作 $\lambda - M_T$ 关系图, 确定力矩 M_T 为 0 时对应的 λ ; ④通过对变量之间进行图解, 可以形象地看出变量的变化过程特征, 判断结果是否合理, 避免迭代计算中陷入局部最优或无解。并在图解的同时, 对单调函数关系采用二分法计算欲求解的量。

1.3 计算方法特点

(1) 本文的方法如同二维改进剩余推力法^[18], 兼有剩余推力法与 M-P 法的优点。

(2) 改变滑动方向, 当垂直滑动方向的剩余推力和为 0 时, 得到最优滑动方向。众多算例表明, 此时对应的稳定系数往往最小或非常接近最小 (文献[19]

也指出了这一点)。容易理解的是, 实际滑坡的主滑方向是各种力相互平衡的综合结果, 垂直主滑方向上的力要相互平衡, 否则, 滑坡可通过改变主滑方向而使之平衡。反过来, 计算时通过改变滑动方向, 使得与之垂直的方向上的力达到平衡, 从而确定最优滑动方向 (主滑方向)。

(3) 该方法的基本假定不需要针对特殊形态 (如对称) 滑坡, 主滑方向均可通过与之垂直方向的力平衡而确定, 滑坡形态不同得到的滑动方向不同, 从而达到 3 个正交方向的力平衡, 因此该法适用于一般形态滑坡。

(4) 纳入了最重要的一个力矩平衡, 即滑动方向上的转动力矩平衡, 从而保证了计算精度。

2 模型建立及前处理

建立三维极限平衡分析模型时, 首先采用曲面函数对坡面、滑面及地下水位面进行数值逼近。根据用户需要, 定义条柱的行宽度及列宽度, 程序自动对滑体进行条柱划分, 对条柱各顶点坐标进行插值, 并对条柱体积、各面面积、面的法矢、各面上的水压力等进行计算, 即完成三维极限平衡计算的前处理。在条柱划分时, 只保留具有六个面 (其顶面和底面为曲面) 的条柱, 当条柱划分较细时, 这样的简化处理对计算结果影响可以忽略。

3 算例及讨论

图 2 为一岩质边坡模型, 滑坡体形态如图 2 (b), 其中底滑面如图 2 (c)。滑面摩擦系数为 0.6, 黏聚力为 50 kPa, 滑体重度为 25 kN/m³。

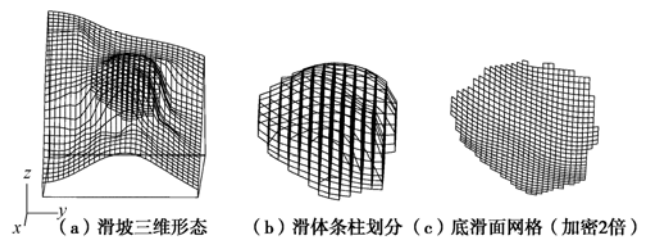


图 2 滑坡形态

Fig. 2 Images of a landslide

3.1 最优滑动方向的确定

首先人为预估滑动方向的可能变化区间 (很容易做到)。不同滑动方向时的 Y 向剩余推力和、 F_s 如图 3 所示。由图可知, 当滑动方向在一定区间内变化时, Y 向剩余推力和呈现单调变化, 且区间两侧的值正负号相反, 因此在区间内可以找到零点, 零点处计算达到 3 个正交方向的力平衡, 对应的滑动方向 55.9° 为最优滑动方向, 此时稳定系数 F_s 达到最小 (如图 3

所示)。

事实上, 众多计算实例表明, Y 向剩余推力和在一定区间内均呈现“单调变化”, 因此通过 Y 向剩余推力和为 0 确定主滑方向是合理可行的。

由于针对不同滑动方向的计算需要重新划分条柱(程序自动完成), 因此当条柱划分较粗时可能由于舍弃的非六面条柱较大, 而对计算结果造成影响, 出现 Y 向剩余推力和曲线有所震荡, 但条柱划分较细则完全可以避免该问题。本例中, 条柱行、列间距为 5 m 时曲线有所震荡, 行、列间距为 2.5 m 时则呈现光滑的单调变化。

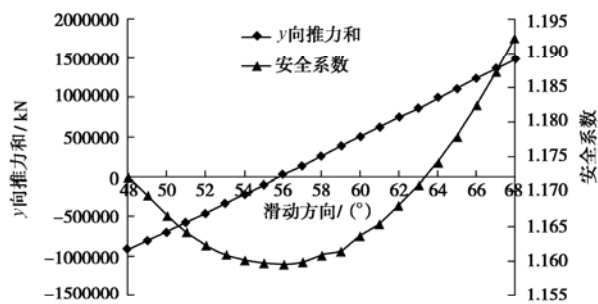


图 3 不同滑动方向时的 Y 向剩余推力和 F_s

Fig. 3 Total residual thrust along Y direction and variation of F_s with slide direction

3.2 力矩平衡修正确定稳定系数

最优滑动方向 55.9° 情况下, 不同修正系数 λ 时对应的绕 Y 轴总力矩 M_T 如图 4 所示。当 M_T 为 0 时, 对应的 λ 即为所求。此时 λ 为 0.90, 对应的稳定系数为 1.156。

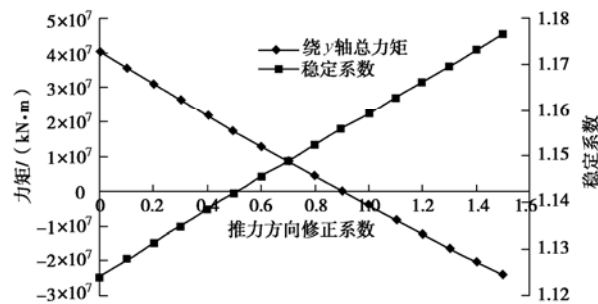


图 4 绕 Y 轴总力矩及 F_{os} 随推力方向修正系数而变化

Fig. 4 Variation of total moment around Y axis and F_{os} with correction coefficient of thrust direction

为了对计算结果进行比较, 研究中同时开发了一般的三维剩余推力法和三维简化 Janbu 法。一般三维剩余推力法中, 行、列界面上柱间力作用方向平行条柱在该方向的视倾角, 满足 3 个正交方向的力平衡, 不采用力矩平衡对方向角进行修正, 也即本文方法省去力矩平衡修正这一环节。三维简化 Janbu 法中, 忽略条柱间作用力的垂直分量, 可采用 Aitken 法直接对

稳定系数进行迭代求解。这两种方法也通过 Y 方向的剩余推力为 0 或不平衡力为 0, 确定最优滑动方向。采用这两种方法对本例进行计算的结果如表 1。

计算结果表明, 本算例采用三维简化 Janbu 法因考虑条柱间的作用力方向为水平, 稳定系数计算结果最小; 三维剩余推力法相当于改进三维剩余推力法中 λ 为 1 时的情况, 计算结果比本文方法大一些。

表 1 不同计算方法得到的计算结果

Table 1 Results of different calculation methods		
计算方法	稳定系数	最优滑动方向/(°)
考虑力矩平衡的三维剩余推力法	1.156	55.86
一般三维剩余推力法	1.159	55.86
三维简化 Janbu 法	1.122	55.94

4 结 语

本文在二维改进剩余推力法基础上, 提出了考虑力矩平衡的三维剩余推力法。该方法忽略柱间力的水平剪力分量, 满足三个方向的力平衡和最主要的一个力矩平衡, 并可确定最优滑动方向。

当前有些学者研究出多于 4 个平衡的三维极限平衡分析方法, 但尽管如此, 由于本文的方法假定合理, 并满足了最关键的 4 个平衡, 诸多实例分析表明, 计算结果往往相当稳定, 且与其它分析方法具有很好的可比性, 完全可以满足工程问题分析的需要。

参考文献:

[1] HOVLAND H J. Three-dimensional slope stability analysis method[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1977, 103(9): 971 - 986.

[2] CHEN R H, CHAMEAU J L. Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes[J]. Geotechnique, 1982, 32(1): 31 - 40.

[3] XING Z. Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114: 658 - 671.

[4] HUNGR O. An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions[J]. Geotechnique, 1987, 37(1): 113 - 117.

[5] LESHCHINSKY D, HUANG C C. Generalized three-dimensional slope stability analysis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(11): 1748 - 1764.

[6] LAM L, FREDLUND D G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30: 905 - 919.

- [7] 冯树仁, 丰定祥, 葛修润, 等. 滑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. (in Chinese))
- [8] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 滑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. (in Chinese))
- [9] HUANG C, TSAI C, CHEN Y. Generalized method for three-dimensional slope stability analysis[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(10): 836 - 848.
- [10] 郑榕明, 朱禄娟, 谷兆祺. 非对称旋转破坏的三维 Bishop 边坡稳定算法[J]. 岩土工程学报, 2002, **24**(6): 706 - 709. (CHENG Yung-ming, ZHU Lu-juan, GU Zhao-qi. Rotational failure of 3D non-symmetric slope predicted by Bishop method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, **24**(6): 706 - 709. (in Chinese))
- [11] 李同录, 王艳霞, 邓宏科. 一种改进的三维滑坡稳定性分析方法[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. (in Chinese))
- [12] 张均锋, 丁桦. 滑坡稳定性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. (in Chinese))
- [13] 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, 2005, **38**(3): 69 - 73. (CHEN Sheng-hong, WAN Na. Study on three-dimensional residual thrust method for slope stability analysis[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, **38**(3): 69 - 73. (in Chinese))
- [14] 谢谟文, 蔡美峰, 江崎哲郎. 基于 GIS 滑坡稳定三维极限平衡方法的开发及应用[J]. 岩土力学, 2006, **27**(1): 117 - 122. (XIE Mo-wen, CAI Mei-feng, ESAKI Tetsuro. GIS-based three-dimensional slope stability limit equilibrium method and application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(1): 117 - 122. (in Chinese))
- [15] 朱大勇, 刘华丽, 范鹏贤, 等. 旋转对称边坡三维安全系数显式解[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2006, **7**(5): 446 - 449. (ZHU Da-yong, LIU Hua-li, FAN Peng-xian, et al. Explicit solution to three-dimensional factor of safety of rotational symmetrical slope[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2006, **7**(5): 446 - 449. (in Chinese))
- [16] 朱大勇, 钱七虎. 三维边坡严格与准严格极限平衡解答及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(8): 1513 - 1528. (ZHU Da-yong, QIAN Qi-hu. Rigorous and quasi-rigorous limit equilibrium solutions of 3D slope stability and application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1513 - 1528. (in Chinese))
- [17] 郑宏. 严格三维极限平衡法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(8): 1519 - 1537. (ZHENG Hong. A rigorous three-dimensional limit equilibrium method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1529 - 1537. (in Chinese))
- [18] 张奇华, 彭容生. 考虑力矩平衡的剩余推力法及其应用[J]. 长江科学院院报, 2008, **25**(6). (ZHANG Qi-hua, PENG Rong-sheng, LUO Jian-yu. Residual trust method considering moment equilibrium and its application[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, **25**(6). (in Chinese))
- [19] 张奇华. 多滑面块体的分块极限平衡分析法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(8): 1625 - 1632. (ZHANG Qi-hua. Block-dividing limit equilibrium analysis method with multiple sliding-planes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1625 - 1632. (in Chinese))