

文章编号: 1000-7598-(2012)06-1724-06

基于最小二乘法的边坡稳定性分析

贺建清, 刘秀军

(湖南科技大学 湖南省普通高等学校土木工程施工过程与质量安全控制重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 利用经典土压力理论设定合理土条推力线范围, 根据静力平衡及力矩平衡条件建立以条块界面安全系数 F_v 为变量的线性超定方程组, 应用 MATLAB 软件基于最小二乘法对方程组求解, 依据极大值原理及合理性条件: $F_v \geq F_s$, 最终获得边坡整体安全系数 F_s 。经算例验证得出如下结论: 当条块界面与条块整体安全系数相等时, 边坡抗剪能力发挥最大; 安全系数随推力线位置的升高而减小, 但影响并不大; 由于考虑了极大值原理, 该法求得的安全系数略微偏大于其他方法。

关 键 词: 最小二乘法; 边坡稳定性分析; 线性方程组

中图分类号: TU 441.35

文献标识码: A

Slope stability analysis based on least square method

HE Jian-qing, LIU Xiu-jun

(Hunan College Key Laboratory of the Construction Process, Quality and Safety of Civil Engineering,
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: Utilizing the classical earth pressure theory for setting the reasonable thrust line position of soil slice, the linear equations including F_v as variable are established by the condition of static equilibrium and torque equilibrium, where F_v is safety factor of slice side. Least square method is applied to solving the above linear equations by means of MATLAB program based on the maximum principle and reasonable conditions: $F_v \geq F_s$. Case studies show that the capacity for resisting shear deformation of slope is brought into play when $F_v = F_s$. The slope safety factor decreases with thrust line position increasing; but the impact of thrust on slope safety factor is negligible. The safety factor obtained by the above method is little larger than those by other methods.

Key words: least squares method; stability analysis of slope; linear equations

1 引 言

20 世纪 70 年代, 潘家铮提出了边坡稳定性分析的两条基本原理——极大值和极小值原理。这两条原理是对边坡稳定分析力学原理的精辟总结和重要发展^[1]。他指出: 滑坡体如有可能沿许多滑面滑动, 则失稳时它将沿抵抗力最小的那个滑面破坏(极小值原理); 滑坡体的滑面确定时, 则滑面上的反力及滑坡体内的内力皆能自行调整, 以发挥最大的抗滑能力(极大值原理)。

目前众多的边坡稳定性分析方法, 虽然所求得的安全系数各不相同, 但其搜索出的最危险滑面位置却相差甚微^[2-4]。因此, 对于一个未知的边坡滑动面, 可采用较简单的方法来搜索其最危险滑动面, 再采用相对较合理的计算方法对该滑面上的滑动土

体进行力学分析, 同样可以得到比较满意的结果。然而, 如何对一个滑面确定的边坡采用极大值原理来调整滑坡体内力, 使其发挥最大抗滑能力, 仍需值得研究和探讨的。

传统条分法都是通过一些假定条件, 使得静不定问题变为静定问题, 即方程数目与未知数相等^[5-6]。据此可将条分法分为两类, 一类是假定条间力作用方向法, 有 Morgenstern-Price 法、Spencer 法等; 另一类是假定条间力作用点法, 有 Janbu 法、王复来法等。由于条间力作用方向非常复杂, 因而假定有很大的盲目性, 而利用经典土压力理论可以很好地假定条间推力线范围。因此, 相对而言, 后者比前者的假定更具合理性。然而, 假定推力线位置严格来说将会得到 $3m$ 个方程 (m 个水平方向力平衡方程、 m 个垂直方向力平衡方程、 m 个条块对底面中

收稿日期: 2011-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50874043); 湖南省科技计划项目 (No. 2009SK3037)。

第一作者简介: 贺建清, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 主要从事地基处理及边坡加固方面的教学与研究工作。E-mail: hjqing2000@163.com

点的力矩平衡方程)且这 $3m$ 个方程都是相互独立的。如果对条块底面和侧面同时考虑摩尔-库仑准则,可以确定条块底面法向力和切向力的关系,以及条块侧面法向力和切向力的关系,则未知个数可减少为 $2m+1$ 个(m 个条块底面法向力、 $m-1$ 个条块侧面法向力、1个整体安全系数、1个界面安全系数),因而所组成的方程组为超定方程组。针对上述情况,笔者利用经典土压力理论设定土条推力线范围,根据静力平衡及力矩平衡条件建立以条块界面安全系数 F_v 为变量的性超定方程组,应用MATLAB软件基于最小二乘原理对方程组求解,依据极大值原理及条块界面安全系数不小于条块安全系数的合理性条件: $F_v \geq F_s$,最终获得整体安全系数 F_s 。由于该方法是由求解超定方程组来获得结果,因此,笔者称其为超定法。经算例验证得出如下结论:

(1)当条块界面安全系数与条块整体安全系数相等时,边坡抗剪能力发挥最大;(2)推力线位置升高时,边坡整体安全系数减小,但推力线位置对安全系数的影响并不大;(3)由于考虑了极大值原理,该法求得的安全系数略微偏大于其他方法。

2 基本假定和方程组的建立

2.1 安全系数的获取

即假定每个土条受一个 $K_c W_i$ 的水平力后处于极限平衡状态, K_c 为临界加速度系数, W_i 为土条 i 所受重力。这样,土条底滑面上的抗剪强度指标黏聚力 c 、摩擦角 φ 不再按式(1)强度折减;土条界面上的抗剪强度指标黏聚力 c^j 、摩擦角 φ^j 不再按式(2)强度折减。

$$\left. \begin{aligned} c_e &= c / F_s \\ \tan \varphi_e &= \tan \varphi / F_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} c_e^j &= c^j / F_v \\ \tan \varphi_e^j &= \tan \varphi^j / F_v \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

为了和传统方法定义的安全系数接轨,采用文献^[2]所述方法求得按强度折减定义的安全系数,具体求解方法如下:

(1)对任意一个选取的 F_v ,假定一系列安全系数 F_s ,按式(1)获得 c_e 和 $\tan \varphi_e$;

(2)根据不同的 c_e 和 $\tan \varphi_e$ 求得 K_c 。变换 F_s 值,可获得一个新的 K_c 值。最终可绘制成如图1所示的 $F_s - K_c$ 曲线;

(3) $F_s - K_c$ 曲线与水平轴的交点对应的 F_s 值即为按传统方法定义的安全系数。

(4)选取不同的 F_v ,可以绘制一系列 $F_s - K_c$ 曲

线,进而得到一系列按传统方法定义的安全系数;应用极大值原理及条块界面安全系数不小于条块安全系数的合理性条件: $F_v \geq F_s$,可获得最终计算结果。

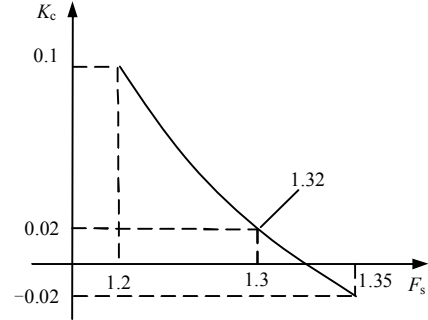


图1 安全系数与临界加速度系数的关系
Fig.1 Relationship between of safety factor and critical acceleration coefficient

2.2 推力线位置的设定

实际上土条分界面上推力线位置是未知的,它与条块自身性质有关,但总不会落在滑体以外或紧靠滑面处。依据经典土压力理论可知,条块侧面水平推力线高度 y_i 介于水平力作用侧面高度的 $1/3 \sim 1/2$ 之间,推力线位置略为偏高或偏低对安全系数的影响甚微^[1],因此,一般情况下可采用Janbu法假定,土条侧的水平土压力呈三角形分布,即统一取 $y_i = h_i / 3$ 。为研究推力线对安全系数的影响,计算时可在该范围内分别假定不同的推力线位置,计算获得不同的安全系数来进行比较。

2.3 重力偏心矩的计算

当条块为平行四边形时,条块重力 W_i 通过底滑面中点,而当条块为一般梯形时,再假定 W_i 通过底滑面中点显然是不合理的。因此,需要考虑条块重力 W_i 对底滑面中点的偏心作用。具体做法是将条块的一般梯形分成一个平行四边形和一个三角形,平行四边形的重力通过条底中点,而三角形条块的重力就必须考虑其偏心作用。基于这种思想,定义条块重力对底滑面中点的偏心力矩 M_{W_i} 如下^[7]:

$$M_{W_i} = \frac{h_i - h_{i-1}}{h_i + h_{i-1}} \cdot \frac{W_i b_i}{6} \quad (3)$$

式中: h_{i-1} 为第 i 条块上侧面高度; h_i 为第 i 条块下侧面高度; b_i 为第 i 条块宽度。

2.4 方程组的建立

如图2所示,土条 i 受重力 W_i 、水平作用力 $K_c W_i$ 、底滑面法向力 N_i 、底滑面切向力 T_i ,以及条块侧面法向作用力 E_i 、 E_{i-1} 和切向作用力 Y_i 、

Y_{i-1} , 不计外荷载和水压力。其中, 假定 N_i 、 T_i 过条块底面中点, 水平作用力 $K_c W_i$ 作用在土条重心。图中, l_i 为第 i 土条底滑面长度; y_i 、 y_{i-1} 为第 i 土条侧面推力线高度; α_i 为第 i 土条底滑面坡度; H_i 为第 i 土条重心距底面中点的距离, 可取 $H_i = (h_i + h_{i-1})/4$ 。

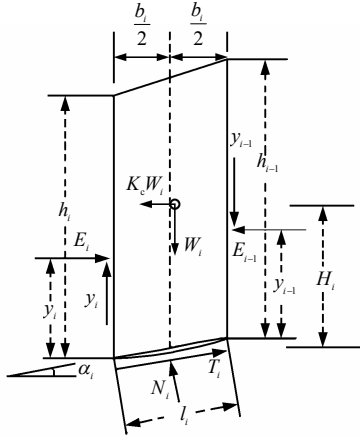


图2 第 i 条块受力示意图
Fig.2 Sketch of the i th slice's forces

如图2所示建立力和力矩平衡方程。

水平方向力平衡方程为

$$E_i - E_{i-1} + T_i \cos \alpha_i - K_c W_i - N_i \sin \alpha_i = 0 \quad (4)$$

垂直方向力平衡方程为

$$W_i + Y_{i-1} - Y_i - T_i \sin \alpha_i - N_i \cos \alpha_i = 0 \quad (5)$$

对条块底面中点的力矩平衡方程为

$$(Y_i + Y_{i-1})b_i/2 + E_i[y_i - (b_i/2)\tan \alpha_i] - E_{i-1}[y_{i-1} + (b_i/2)\tan \alpha_i] - K_c W_i H_i - M_{W_i} = 0 \quad (6)$$

对条块底滑面应用摩尔-库伦准则为

$$T_i = N_i \tan \varphi_{ei} + c_{ei} l_i \quad (7)$$

式中: c_{ei} 、 φ_{ei} 为第 i 土条底滑面强度指标经式(1)折减后的参数。

对条块侧滑面应用摩尔-库伦准则:

$$Y_i = E_i \tan \varphi_{ei}^j + c_{ei}^j h_i \quad (8)$$

式中: c_{ei}^j 、 φ_{ei}^j 为第 i 土条侧面强度指标经式(2)折减后的参数。

对所有条块均建立上述方程, 矩阵表达式为

水平方向力平衡方程组为

$$\begin{bmatrix} A_h \end{bmatrix} \{E\} + \begin{bmatrix} B_h \end{bmatrix} \{Y\} + \begin{bmatrix} C_h \end{bmatrix} \{N\} + \begin{bmatrix} D_h \end{bmatrix} \{T\} + K_c \{d_{h1}\} + \{d_{h2}\} = 0 \quad (9)$$

式中:

$$\begin{bmatrix} A_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & & \\ & -1 & 1 & \\ & & \dots & \dots \\ & & & -1 & 1 \end{bmatrix}_{n \times (n+1)},$$

$$\begin{bmatrix} B_h \end{bmatrix} = [0]_{n \times (n+1)},$$

$$\begin{bmatrix} C_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \alpha_1 & & & \\ & -\sin \alpha_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & -\sin \alpha_n \end{bmatrix}_{n \times n},$$

$$\begin{bmatrix} D_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & & & \\ & \cos \alpha_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \cos \alpha_n \end{bmatrix}_{n \times n},$$

$$\{d_{h1}\} = \{-W_1 \quad -W_2 \quad \dots \quad -W_n\}^T,$$

$$\{d_{h2}\} = \{0\}_{n \times 1},$$

$$\{E\} = \{E_0 \quad E_1 \quad \dots \quad E_n\}^T,$$

$$\{Y\} = \{Y_0 \quad Y_1 \quad \dots \quad Y_n\}^T,$$

$$\{N\} = \{N_1 \quad N_2 \quad \dots \quad N_n\}^T,$$

$$\{T\} = \{T_1 \quad T_2 \quad \dots \quad T_n\}^T$$

垂直方向力平衡方程组为

$$\begin{bmatrix} A_v \end{bmatrix} \{E\} + \begin{bmatrix} B_v \end{bmatrix} \{Y\} + \begin{bmatrix} C_v \end{bmatrix} \{N\} + \begin{bmatrix} D_v \end{bmatrix} \{T\} + K_c \{d_{v1}\} + \{d_{v2}\} = 0 \quad (10)$$

式中:

$$\begin{bmatrix} A_v \end{bmatrix} = [0]_{n \times (n+1)},$$

$$\begin{bmatrix} B_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & \\ & 1 & -1 & \\ & & \dots & \dots \\ & & & 1 & -1 \end{bmatrix}_{n \times (n+1)},$$

$$\begin{bmatrix} C_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \alpha_1 & & & \\ & -\cos \alpha_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & -\cos \alpha_n \end{bmatrix}_{n \times n},$$

$$\begin{bmatrix} D_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \alpha_1 & & & \\ & -\sin \alpha_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & -\sin \alpha_n \end{bmatrix}_{n \times n},$$

$$\begin{aligned} \{d_{v1}\} &= \{0\}_{n \times 1}, & [A_m]\{E\} + [B_m]\{Y\} + [C_m]\{N\} + \\ \{d_{v2}\} &= \{W_1 \cos \alpha_1 \quad \dots \quad W_n \cos \alpha_n\}^T & [D_m]\{T\} + K_c \{d_{m1}\} + \{d_{m2}\} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

对条块底面中点的力矩平衡方程组为

式中:

$$[A_m] = \begin{bmatrix} -[y_0 + (b_1/2) \tan \alpha_1] & [y_1 - (b_i/2) \tan \alpha_1] & & \\ & \dots & \dots & \\ & & -[y_{n-1} + (b_n/2) \tan \alpha_n] & [y_n - (b_n/2) \tan \alpha_n] \end{bmatrix}_{n \times (n+1)}$$

$$[B_m] = \begin{bmatrix} b_1/2 & b_1/2 & & & \\ & b_2/2 & b_2/2 & & \\ & & \dots & \dots & \\ & & & b_n/2 & b_n/2 \end{bmatrix}_{n \times (n+1)}$$

$$[C_m] = [0]_{n \times n},$$

$$[D_m] = [0]_{n \times n},$$

$$\{d_{m1}\} = \{-W_1 H_1 \quad -W_2 H_2 \quad \dots \quad -W_n H_n\}^T,$$

$$\{d_{m2}\} = \{-M_{w_i} \quad -M_{w_i} \quad \dots \quad -M_{w_i}\}^T$$

式(7)化为矩阵形式为

$$\{T\} = [K_1]\{N\} + \{d_{c1}\} \quad (12)$$

式中:

$$[K_1] = \begin{bmatrix} \tan \varphi_{e1} & & & \\ & \tan \varphi_{e2} & & \\ & & \dots & \\ & & & \tan \varphi_{en} \end{bmatrix}_{n \times n},$$

$$\{d_c\} = \{c_{e1} l_1 \quad c_{e2} l_2 \quad \dots \quad c_{e(n-1)} l_{n-1}\}^T$$

式(8)化为矩阵形式为

$$\{Y\} = [K_2]\{E\} + \{d_{c2}\} \quad (13)$$

式中:

$$[K_2] = \begin{bmatrix} \tan \varphi_{e0}^j & & & \\ & \tan \varphi_{e1}^j & & \\ & & \dots & \\ & & & \tan \varphi_{en}^j \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)},$$

$$\{d_{c2}\} = \{c_{e0}^j h_0 \quad c_{e1}^j h_1 \quad \dots \quad c_{en}^j h_n\}^T$$

将式(12)、(13)代入式(4)中得

$$\begin{aligned} ([A_h] + [B_h][K_2])\{E\} + ([C_h] + [D_h][K_1])\{N\} + \\ [B_h]\{d_{c2}\} + [D_h]\{d_{c1}\} + K_c \{d_{h1}\} + \{d_{h2}\} = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

简写为

$$[G_h]\{E\} + [J_h]\{N\} + K_c \{d_{h1}\} + \{d_{h2}\} = 0 \quad (15)$$

式中:

$$[G_h] = [A_h] + [B_h][K_2],$$

$$[J_h] = [C_h] + [D_h][K_1],$$

$$\{d_h\} = [B_h]\{d_{c2}\} + [D_h]\{d_{c1}\} + \{d_{h2}\}$$

将式(12)、(13)代入式(5)中得

$$\begin{aligned} ([A_v] + [B_v][K_2])\{E\} + ([C_v] + [D_v][K_1])\{N\} + \\ [B_v]\{d_{c2}\} + [D_v]\{d_{c1}\} + K_c \{d_{v1}\} + \{d_{v2}\} = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

简写为

$$[G_v]\{E\} + [J_v]\{N\} + K_c \{d_{v1}\} + \{d_{v2}\} = 0 \quad (17)$$

式中:

$$[G_v] = [A_v] + [B_v][K_2],$$

$$[J_v] = [C_v] + [D_v][K_1],$$

$$\{d_v\} = [B_v]\{d_{c2}\} + [D_v]\{d_{c1}\} + \{d_{v2}\}$$

将式(12)、(13)代入式(6)得

$$\begin{aligned} ([A_m] + [B_m][K_2])\{E\} + ([C_m] + [D_m][K_1])\{N\} + \\ [B_m]\{d_{c2}\} + [D_m]\{d_{c1}\} + K_c \{d_{m1}\} + \{d_{m2}\} = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

简写为

$$[G_m]\{E\} + [J_m]\{N\} + K_c \{d_{m1}\} + \{d_{m2}\} = 0 \quad (19)$$

式中:

$$[G_m] = [A_m] + [B_m][K_2],$$

$$[J_m] = [C_m] + [D_m][K_1],$$

$$\{d_m\} = [B_m]\{d_{c2}\} + [D_m]\{d_{c1}\} + \{d_{m2}\}$$

将式 (15)、(17)、(19) 分别化为

$$[R_h]\{x\} + \{d_h\} = 0 \quad (20)$$

$$[R_v]\{x\} + \{d_v\} = 0 \quad (21)$$

$$[R_m]\{x\} + \{d_m\} = 0 \quad (22)$$

式中:

$$[R_h] = [[G_h] : [J_h] : \{d_{h1}\}]_{n \times (2n+2)},$$

$$[R_v] = [[G_v] : [J_v] : \{d_{v1}\}]_{n \times (2n+2)},$$

$$[R_m] = [[G_m] : [J_m] : \{d_{m1}\}]_{n \times (2n+2)},$$

$$\{x\} = \left\{ \{E\}^T \quad \{N\}^T \quad K_c \right\}^T$$

式 (20) ~ (22) 可以合写为

$$[R]\{x\} + \{d\} = 0 \quad (23)$$

式中:

$$[R] = \begin{bmatrix} [R_h] \\ [R_v] \\ [R_m] \end{bmatrix}_{3n \times (2n+2)}, \quad \{d\} = \begin{Bmatrix} \{d_h\} \\ \{d_v\} \\ \{d_m\} \end{Bmatrix}_{3n \times 1}$$

考虑边界条件: $E_0 = Y_0 = E_n = Y_n = 0$, 如果假定 F_s 、 F_v 已知, 则式 (23) 为一个 $3n \times 2n$ 的线性超定方程组, 即方程个数为 $3n$, 而未知数个数为 $2n$ 。

2.5 求解

(1) 先假定一定值 $F_v^{(1)}$, 由此可按式 (2) 折减所有条块界面上的强度参数得到 $c_e^{j(1)}$ 、 $\phi_e^{j(1)}$ 。

(2) 假定一系列 F_s , 可按式 (1) 折减所有条块底滑面上的强度参数得到一系列 $c_e^{(1)}$ 、 $\phi_e^{(1)}$ 。根据 $c_e^{j(1)}$ 、 $\phi_e^{j(1)}$ 及不同的 $c_e^{(1)}$ 、 $\phi_e^{(1)}$, 按前述方法计算出每一 F_s 所对应的系数矩阵 $[R]$ 和余项 $\{d\}$, 代入式 (23) 可得每一 F_s 所对应的线性超定方程组, 进而应用 MATLAB 软件基于最小二乘方法对这些方程组求解, 可得每一 F_s 所对应的 $\{x\}$ 。

$$\{x\} = -[R]^{-1}\{d\} \quad (24)$$

取出每一 $\{x\}$ 中的 K_c 值, 并绘制 $F_s - K_c$ 曲线图 (见图 1), 对应于 $K_c = 0$ 的 F_s 值即为该边坡界面安全系数为 $F_v^{(1)}$ 时的整体安全系数。

(3) 再假定不同的 $F_v^{(i)}$, 重复上述计算, 最终可作出一系列 $F_s - K_c$ 曲线图 (即 $F_v - F_s - K_c$ 曲线图) 及一系列安全系数。依据极大值原理及条块界面安全系数不小于条块安全系数的合理性条件: $F_v \geq$

F_s , 求得边坡安全系数。

3 算例验证

选取澳大利亚计算机应用协会 (ACADS) 考题, 边坡剖面 and 土层参数见图 3^[8]。

由图 4、5 可以看出, 条块界面安全系数 F_v 增大时, 整体安全系数 F_s 在减小。依据极大值原理, 应取安全系数最大值, 即取 F_v 最小值时的安全系数。再结合条块界面安全系数不小于条块安全系数的合理性条件: $F_v \geq F_s$, 可舍去 $F_v < F_s$ 时的情况。最终可得出结论: 当土条界面安全系数 F_v 与整体安全系数 F_s 相等时, 边坡发挥了最大的抗剪能力。

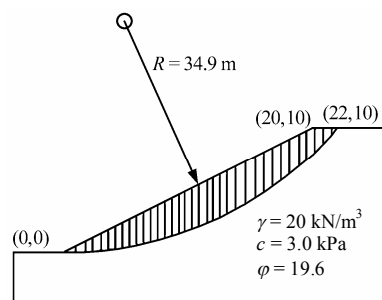


图 3 边坡剖面及土层参数
Fig.3 Slope section and soil parameters

(1) 取推力线高度 $y_i = h_i / 3$ 。

当条分数 $n = 10$ 时, 作出 $F_v - F_s - K_c$ 曲线图如图 4 所示。

当条分数 $n = 20$ 时, 作出 $F_v - F_s - K_c$ 曲线图如图 5 所示。

据此结论, 由图 4 可知, 该边坡 $n = 10$ 时的安全系数 $F_s = 1.081$; 由图 5 可知, 该边坡 $n = 20$ 时的安全系数 $F_s = 1.065$ 。表 1 为几种不同算法的计算结果。

(2) 取推力线高度 $y_i = 5h_i / 12$ 。

依据极大值原理及合理性条件 $F_v \geq F_s$, 求解该边坡安全系数。 $n = 10$ 时, $F_s = 1.074$; $n = 20$ 时, $F_s = 1.053$ 。

(3) 取推力线高度 $y_i = h_i / 2$ 。

依据极大值原理及合理性条件 $F_v \geq F_s$, 求解该边坡安全系数。 $n = 10$ 时, $F_s = 1.060$; $n = 20$ 时, $F_s = 1.041$ 。

由此可知, 当推力线位置 y_i 升高时, 边坡整体安全系数减小。推力线位置对安全系数的影响不大, 在合理的推力线范围内, 最高推力线位置与最低推力线位置的误差仅为 1.9% ($n = 10$ 时) 和 2.2% ($n = 20$ 时)。

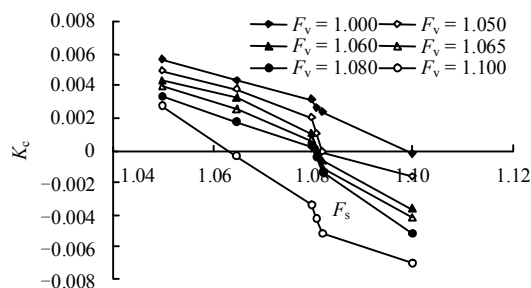


图4 $n=10$ 时的 F_v - F_s - K_c 曲线图
Fig.4 Curves of F_v - F_s - K_c when $n=10$

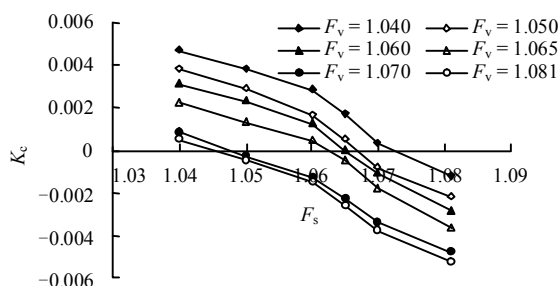


图5 $n=20$ 时的 F_v - F_s - K_c 曲线图
Fig.5 Curves of F_v - F_s - K_c when $n=20$

表1 不同算法的计算结果

Table 1 Results of different calculation methods

计算方法	安全系数
Donald (推荐)	1.000
瑞典法	0.967
Bishop 法	0.992
Janbu 法	0.963
Morgenstern-Price 法	0.991
超定法 ($n=10$)	1.081
超定法 ($n=20$)	1.065

4 结 论

(1) 从设定土条合理推力线位置出发, 避免了对条间力函数的不合理设定, 使得计算结果更趋于精确; 采用 MATLAB 软件求解线性方程组得解, 克服了求解非线性方程组不能迭代收敛得解的缺点, 应用范围更加广泛; 同时考虑条块底面和侧面的破坏条件, 使计算结果更偏于合理;

(2) 条块数对超定法的计算结果影响不大, 计算时可取适当条分数计算便可获得相对满意的结果。一般当宽高比 b_i/h_i 的值取 0.3~0.5 左右时的条分数比较适中, 此时超定法的计算结果已有较高的精度;

(3) 当推力线位置升高时, 边坡整体安全系数

减小, 但推力线位置对安全系数的影响并不大, 在合理的推力线范围内, 最高推力线位置与最低推力线位置的误差很小。为计算方便, 可按 Janbu 法假定土条侧的水平土压力呈三角形分布, 即统一取取 $y_i = h_i/3$;

(4) 基于上述方法分析边坡的稳定性, 计算结果相对其他方法偏大, 这是由于考虑了极大值原理, 使边坡发挥了最大抗剪能力, 因而安全系数也相对偏大。

参 考 文 献

- [1] 张天宝. 土坡稳定分析和土工建筑物的边坡设计[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1987.
- [2] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [3] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [4] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [5] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [6] 陈昌富, 杨宇, 龚晓南. 基于遗传算法地震荷载作用下边坡稳定性分析水平条分法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1919—1923.
CHEN Chang-fu, YANG Yu, GONG Xiao-nan. Horizontal slice method of slope stability analysis under seismic load based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1919—1923.
- [7] 童志怡, 陈从新, 徐健, 等. 边坡稳定性分析的条块稳定系数法[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1393—1398.
TONG Zhi-yi, CHEN Cong-xin, XU Jian, et al. A slice-stability method for stability analysis of slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1393—1398.
- [8] 朱大勇, 李焯芬, 黄茂松, 等. 对 3 种著名边坡稳定性计算方法的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 184—194.
ZHU Da-yong, LEE C F, HUANG Mao-song, et al. Modifications of three well-known methods of slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 184—194.