

引文格式:常仕奇,董晓强,刘晓凤,等. 基于极限平衡的边坡稳定性严格计算方法[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(4): 777-783.

CHANG Shiqi, DONG Xiaoqiang, LIU Xiaofeng, et al. Rigorous calculation method for slope stability based on limit equilibrium[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(4): 777-783.

基于极限平衡的边坡稳定性严格计算方法

常仕奇^{1,2}, 董晓强^{1,2}, 刘晓凤^{1,2}, 刘晓勇³

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原; 2. 山西省土木工程防灾与控制重点实验室, 山西 太原;
3. 中铁城建集团第一工程有限公司, 山西 太原)

摘要:【目的】极限平衡法是边坡稳定性分析中最常用的计算方法。为了克服严格计算方法在安全系数求解的过程中面临的数值问题,改进计算方法,获得可靠的滑坡推力。【方法】在考虑条间力作用下(不假设条间力方向),将力的平衡方程整理成不平衡推力法的表达形式;根据相邻土条的几何关系,以及滑动土体两边最外侧土条(第1条块和第 n 条块)的水平法向力对土条底部滑面中点的力矩为零的条件,建立力矩递推关系式。分别推导出关于安全系数 F_s 和 λ (比例系数)的两个表达式。在计算安全系数时,先通过初始值 $F_s=1, \lambda=0$ 计算得到令人满意的 F_s 值,将得到的安全系数 F_s 代入方程求解对应 λ 值,再次迭代7~8次可得到公差小至0.000 1的 F_s 和 λ 。【结果】结果表明:该算法相比其他严格方法更简便,更易于收敛,且适用于任意形状滑裂面,可编写简单程序在计算机中实现,并可推广到工程界使用。

关键词:边坡稳定性;极限平衡法;条间力;安全系数;比例系数

中图分类号:TU599 **文献标识码:**A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240649

文章编号:1007-9432(2026)04-0777-07

Rigorous Calculation Method for Slope Stability Based on Limit Equilibrium

CHANG Shiqi^{1,2}, DONG Xiaoqiang^{1,2}, LIU Xiaofeng^{1,2}, LIU Xiaoyong³

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China; 2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Control, Taiyuan, Shanxi, China; 3. China Railway Urban Construction Group The 1st Engineering Co. Ltd, Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract: 【Purposes】The limit equilibrium method is the most prevalent approach in slope stability analysis. For rigorous methods applicable to any sliding surface, numerical problems often arise in the process of safety factor solving. 【Methods】Regarding the above points, the force balance equation was organized into the framework of unbalanced thrust method considering the influence of inter-bar forces without assuming their specific direction. By leveraging the geometric relationships between adjacent soil strips and the horizontal normal forces on the outermost soil strips (the first and n th strips) on both sides of the sliding mass, a moment recursion relationship was established with the condition that the moment at the midpoint of sliding surface at the base of soil strip was zero. Two separate expressions for the safety factor F_s and the proportionality factor λ were derived. In calculating the safety

收稿日期:2024-08-19;修回日期:2024-11-19

基金项目:国家自然科学基金(52378360, 51978438)

第一作者:常仕奇,博士研究生, (E-mail)changshiqi0068@link.tyut.edu.cn

通信作者:董晓强,博士,教授,主要从事岩土灾害防治与环境岩土研究, (E-mail)dongxiaoqiang@tyut.edu.cn

factor, an initial estimate was made by using $F_s=1$ and $\lambda=0$ to determine a satisfactory F_s . This safety factor was then substituted back into the equation to solve for the corresponding λ . This iterative process was repeated 7–8 times to achieve F_s and λ values with tolerances as small as 0.000 1. **【Results】** The results indicate that this algorithm is simpler, more straightforward, and converges more easily than other rigorous methods, making it applicable to sliding surfaces of any shape. Furthermore, it can be efficiently implemented on a computer through a simple program and has the potential for widespread applications in the engineering field.

Keywords: slope stability; limit equilibrium method; inter-bar forces; safety factor; proportionality factor

边坡稳定性分析方法主要有三种:极限平衡法、数值分析法、可靠性分析法。其中,极限平衡法原理简单,应用广泛,能够给出直观的定量结果。极限平衡法又分为两类,一类是满足力平衡或力矩平衡,即简化法,包括 Fellenius 法、简化 Bishop 法、美国陆军工程师团法、罗厄法以及不平衡推力法等^[1]。另一类同时满足力的平衡与力矩平衡,即严格方法,包括 Spencer 法、Janbu 法、Sarma 法、Morgenstern-Price(M-P)法等^[2]。

当对简单形式的边坡进行稳定性分析时,通常假定滑裂面为圆弧,可使用 Fellenius 法、简化 Bishop 法进行计算^[3]。然而,在很多情况下,实际发生的滑裂面明显偏离圆形,或者滑裂面通常发生在薄弱面,这时需要采用严格方法进行计算。在严格方法中 M-P 法的计算结果最稳定和可靠,但是,因为平衡方程是非线性且形式复杂,导致求解 F_s 和 λ 通常是复杂的,对于一般工程技术人员来讲很难掌握^[4]。

极限平衡法是边坡稳定性分析的重要方法,众多学者在极限平衡方法的基础上做出了大量的研究。在计算方法上,Ouyang 等^[5]利用高斯求积法对 M-P 法进行修正,提高了计算效率,为岩土工程的其他积分问题提供了参考。邓东平等^[6]在极限平衡理论上考虑了非线性强度准则,采用“极径-应力-强度”联合迭代法进行计算,在保证计算结果的同时可得到合理的滑面应力。蒋斌松等^[7]在极限平衡法的基础上利用积分算式代替条块进行计算,建立了准确的解析解方程来求解安全系数。传统的极限平衡法将边坡滑体划分为若干个竖直的土条。根据研究对象的具体需求,许多学者还将滑动坡体划分为水平土条或斜土条。郑跃^[8]将土条划分为与锚杆方向一致的斜土条,在极限平衡法基础上推导出适用于锚固边坡的稳定性分析方法,结果表明该方法具备可行性。胡昭等^[9]针对土坡水平加筋问题,建立基于 M-P 的水平条分法极限平衡方程,结

果表明该算法合理且具有一定的工程应用价值。土条之间的条间力是影响安全系数结果的重要因素。林志平^[10]在 Sarma 法基础上研究了不同条间力分布形式对非匀质土坡稳定性的影响,结果表明条间力呈三角形分布时对安全系数影响最小。丑亚玲等^[11]在土体抗剪强度与条间力函数方面改进极限平衡条分法,研究了基质吸力对边坡稳定性的影响。滑坡推力是边坡稳定性评估和防护设计中的重要指标。不平衡推力法因其能够在计算安全系数的同时获得滑坡推力而得到广泛应用。然而,由于该方法在条间力假设上不符合实际,导致计算出的安全系数存在较大误差,从而影响了其在实际应用中的效果。

为了克服严格计算方法中常遇到的数值问题,并在准确计算安全系数的同时获得可靠的滑坡推力,本文基于极限平衡条分法,采用 M-P 方法假设条间力,并结合不平衡推力法的形式建立力的平衡方程。同时,利用相邻土条的几何关系,以及滑动土体两边最外侧土条的法向力与底部中心力矩为零的条件,建立力矩平衡方程。在求解安全系数时,改进计算方法,避免数值问题的发生。在此基础上,探究不同条间力函数对计算结果的影响。

1 平衡方程

在确定滑动面的基础上将滑动土体划分为 n 个等宽的竖向条块,取第 i 个条块进行力学分析。

如图 1 所示,典型条块受到 7 组力作用:自重 W_i ,地震力 KW_i (K 为水平地震系数),水压力合力 U_i ,底面法向力 N_i ,抗滑剪切力 S_i ,作用于切片左边和右边的法向切片间力 X_i 和 X_{i-1} ,层间剪切力 $\lambda f_i X_i$ 和 $\lambda f_{i-1} X_{i-1}$ 。

在 N 方向上建立平衡方程:

$$N_i = (W_i + \lambda f_{i-1} X_{i-1} - \lambda f_i X_i) \cos \alpha_i + (X_i - X_{i-1} - KW_i) \sin \alpha_i - U_i \quad (1)$$

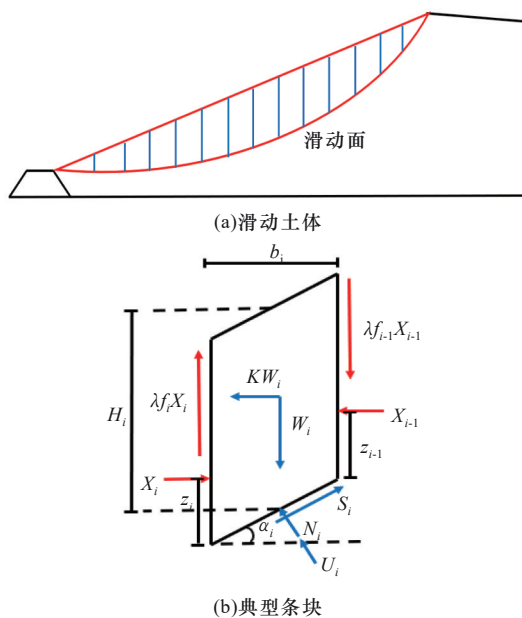


图1 滑动土体与典型条块
Fig. 1 Sliding soil and the typical slice

$$U_i = ub_i \sec \alpha_i, u \text{ 为任意点的孔隙水压力。}$$

在S方向上建立平衡方程:

$$\begin{aligned} [N_i \tan \phi + cb_i \sec \alpha_i]/F_s = & (W_i + \lambda f_{i-1} X_{i-1} - \\ & \lambda f_i X_i) \sin \alpha_i - (X_i - X_{i-1} - KW_i) \cos \alpha_i. \end{aligned} \quad (2)$$

将(1)代入(2):

$$\begin{aligned} X_i [& (\sin \alpha_i - \lambda f_i \cos \alpha_i) \tan \phi + (\cos \alpha_i + \lambda f_i \sin \alpha_i) F_s \\ & = X_{i-1} [(\sin \alpha_i - \lambda f_{i-1} \cos \alpha_i) \tan \phi + (\cos \alpha_i + \\ & \lambda f_{i-1} \sin \alpha_i) F_s] + F_s (W_i \sin \alpha_i + K W_i \cos \alpha_i) - \\ & (W_i \cos \alpha_i - K W_i \sin \alpha_i - U_i) \tan \phi - c b_i \sec \alpha_i. \end{aligned} \quad (3)$$

将(3)整理成不平衡推力法的表达式^[12,13]:

$$X_i \Phi_i = \Psi_{i-1} X_{i-1} \Phi_{i-1} + F_s T_i - R_i. \quad (4)$$

其中：

$$T_i = W_i \sin \alpha_i + KW_i \cos \alpha_i, \quad (5)$$

$$R_i = (W_i \cos \alpha_i - KW_i \sin \alpha_i - U_i) \tan \phi + cb_i \sec \alpha_i. \quad (6)$$

$$\Phi_i = (\sin \alpha_i - \lambda f_i \cos \alpha_i) \tan \phi + (\cos \alpha_i + \lambda f_i \sin \alpha_i) F_s. \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{i-1} = & (\sin \alpha_{i-1} - \lambda f_{i-1} \cos \alpha_{i-1}) \tan \phi + (\cos \alpha_{i-1} \\ & + \lambda f_{i-1} \sin \alpha_{i-1}) F_s. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Psi_{i-1} = \begin{bmatrix} (\sin \alpha_i - \lambda f_{i-1} \cos \alpha_i) \tan \phi + \\ (\cos \alpha_i + \lambda f_{i-1} \sin \alpha_i) F_s \end{bmatrix} / \Phi_{i-1}. \quad (9)$$

安全系数 F_s 可表达为:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \phi_j) + T_n}. \quad (10)$$

如图2所示,每一土条宽度均相等,对土条底部中点 O 取力矩平衡:

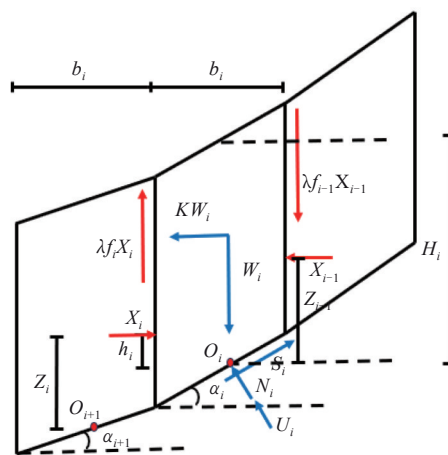


图2 典型条块的受力模型
Fig.2 Stress analysis of the typical slice

$$\begin{aligned} X_{i-1}Z_{i-1} + KW_i\frac{H_i}{2} - X_i h_i - \lambda f_i X_i \frac{b_i}{2} - \\ \lambda f_{i-1} X_{i-1} \frac{b_i}{2} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

其中:

$$h_i = Z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_{i+1}. \quad (12)$$

将(12)代入(11)可得:

$$\begin{aligned} X_{i-1}Z_{i-1} - X_iZ_i &= \frac{b_i}{2} \lambda (f_i X_i + f_{i-1} X_{i-1}) - \\ &\frac{b_i}{2} (\tan \alpha_i + \tan \alpha_{i+1}) X_i - \frac{H_i}{2} K W_i. \end{aligned} \quad (13)$$

$$M_i = X_i Z_i. \quad (14)$$

$$M_{i-1} = X_{i-1} Z_{i-1} . \quad (15)$$

式中: M_i 、 M_{i-1} 是第 $i+1$ 、 i 条块水平法向力对滑面中心点的力矩。

方程(13)又可写为:

$$M_{i-1} - M_i = \frac{b_i}{2} \lambda (f_i X_i + f_{i-1} X_{i-1}) - \frac{b_i}{2} (\tan \alpha_i + \tan \alpha_{i+1}) X_i - \frac{H_i}{2} K W_i. \quad (16)$$

第1条块与第 n 条块的外侧水平法向力对土条底部滑面中点的力矩为0。

方程(16)左右两侧相加:

$$\begin{aligned}
M_0 - M_1 + M_1 - M_2 + \dots + M_{n-1} - M_n = \\
\frac{b_i}{2} \lambda (f_1 X_1 + f_0 X_0) - \frac{b_i}{2} (\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2) X_1 - \\
\frac{H_1}{2} K W_1 + \frac{b_i}{2} \lambda (f_2 X_2 + f_1 X_1) - \\
\frac{b_i}{2} (\tan \alpha_2 + \tan \alpha_3) X_2 - \frac{H_2}{2} K W_2. \quad (17)
\end{aligned}$$

在滑体左右两端点 $M_0=0, M_n=0$

最后可得:

$$\lambda = \frac{\frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^n (\tan \alpha_i + \tan \alpha_{i+1}) X_i + \frac{K}{b_i} \sum_{i=1}^n H_i W_i \right]}{\sum_{i=1}^n f_i X_i} \quad (18)$$

2 计算 F_s 与 λ

计算流程如下:

- 1) 将滑动体划分为宽度相同的多个土条;
- 2) 假定 $f(x)$ 的函数形式;

Morgenstern and Price (1965) 提出的 M-P 方法, 假定条块剪切力与法向力之比为一个待定常数 λ 与人为假定函数 $f(x)$ 的乘积, 即 $\lambda f(x)$ 。如果取 $f(x)=1$, 则退化为 Spencer (1967) 法; 取 $f(x)=0$, 则与简化 Bishop 法一致。

此外, 还有另一种假设, 即 $f(x)=\sin\left(\frac{x-a}{b-a}\right)\pi$, 其中 a, b 分别为滑动面两端的 x 坐标^[22]。

3) 在初次计算时, 令 $F_s=1, \lambda=0$, 求出所有的 $T_i, R_i, \Phi_i, \Phi_{i-1}, \Psi_{i-1}$;

4) 通过方程 (10) 求得新的 F_s ;

5) 利用新的 $F_s, \lambda=0$, 求新的 $\Phi_i, \Phi_{i-1}, \Psi_{i-1}$, 直到获得令人满意的 $F_s, \Phi_i, \Phi_{i-1}, \Psi_{i-1}$ 的改进值;

6) 将改进后的 F_s 代入方程 (4), 求得 X_i , 联立方程 (18) 求得 λ 的值;

7) 把求得的 λ, F_s 代入 (10) 和 (18), 重复以上步骤直到得出令人满意的 λ 和 F_s ;

8) $|\Delta\lambda| < \epsilon, |\Delta F_s| < \epsilon, \epsilon$ 为规定的公差。

3 算例分析与讨论

3.1 例 1

本文计算方法与 Zhu (2005)^[14]、Janbu (1973) 计算方法以及, 不平衡推力法进行比较。例 1 计算简图如图 4 所示, 计算结果如表 1、2 所示。

通过表 1 和表 2 计算结果可知, 在滑动面是圆弧时, 本文计算方法与 Zhu (2005) 计算结果误差为 -0.1% , 与 Janbu (1973) 方法计算结果误差为 -12.7% , 与不平衡推力法显式解计算结果误差为 $+6.78\%$, 与不平衡推力法隐式解计算结果误差为 $+0.01\%$ 。在滑动面是非圆弧时, 本文计算方法与 Zhu (2005) 计算结果误差为 -0.1% , 与 Janbu (1973) 方法计算结果误差为 -3.57% , 与不平衡推

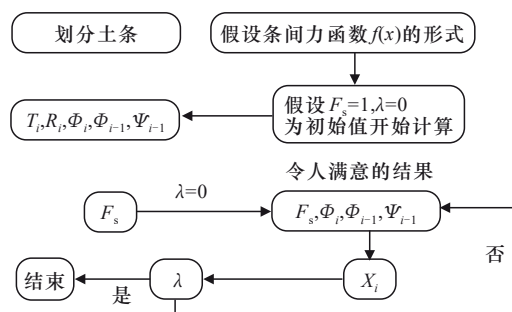
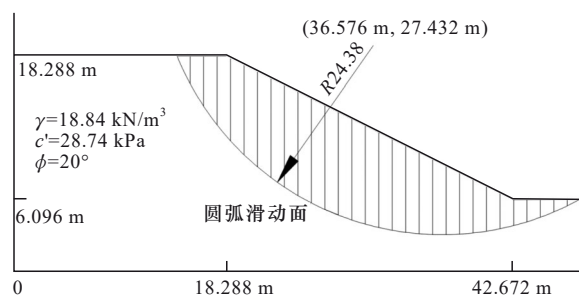
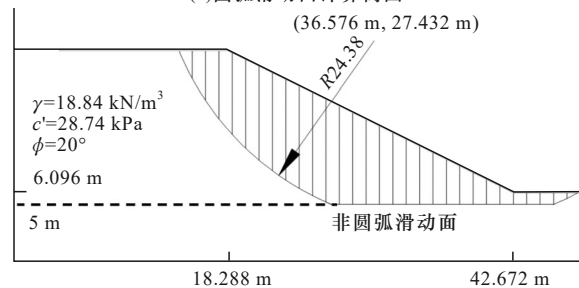


图 3 计算安全系数的计算流程

Fig. 3 Calculation process of safety factor



(a) 圆弧滑动面计算简图



(b) 非圆弧滑动面计算简图

图 4 圆弧、非圆弧滑动面计算简图

Fig. 4 Calculation diagrams of circular and non-circular sliding surfaces

表 1 不同计算方法结果对比分析(圆弧)

Table 1 Comparative analysis of results from different calculation methods (circular)

计算方法	F_s	λ	滑动面
本文方法			
条间力函数(1)	2.079 9	0.257 3	圆弧
Zhu(2005)			
条间力函数(1)	2.075	0.258	圆弧
本文方法			
条间力函数(2)	2.080 3	0.325 3	圆弧
Zhu(2005)			
条间力函数(2)	2.074	0.324	圆弧
Janbu(1973)	1.815 4	-	圆弧
不平衡推力法 (显式)	2.221	-	圆弧
不平衡推力法 (隐式)	2.083	-	圆弧

力法显式解计算结果误差为 $+11.53\%$, 与不平衡推力法隐式解计算误差为 $+7.67\%$ 。

对于非圆弧滑动面, 不平衡推力法不论显式解

表 2 不同计算方法结果对比分析(非圆弧)			
Table 2 Comparative analysis of results from different calculation methods (non-circular)			
计算方法	F_s	λ	滑动面
本文方法			
条间力函数(1)	2.299 7	0.258 31	非圆弧
Zhu(2005)			
条间力函数(1)	2.297 0	0.255 56	非圆弧
本文方法			
条间力函数(2)	2.289 3	0.334 71	非圆弧
Zhu(2005)			
条间力函数(2)	2.290 3	0.334 48	非圆弧
Janbu(1973)	2.217 5	—	非圆弧
不平衡推力法 (显式)	2.565	—	非圆弧
不平衡推力法 (隐式)	2.476 3	—	非圆弧

注:本文计算方法按 30 土条划分;条间力函数(1): $f(x)=1$;条间力函数(2): $f(x)=\sin(\frac{x-a}{b-a})\pi$ 。

还是隐式解计算结果都偏大,尤其是显式解误差更大,在工程设计中会造成很大安全隐患。通过与不同经典计算方法比较,验证了本文计算方法的正确性。

在考虑条间力函数对计算结果的影响时,从结果可以看出:在滑动面是圆弧时,本文计算方法在条间力函数(1)和条间力函数(2)的计算结果误差为 0.019%;在滑动面是非圆弧时,本文计算方法在条间力函数(1)和条间力函数(2)的计算结果误差为 0.45%。从改变条间力函数的计算结果可以看出,计算结果相差不大,这可能是因为本文计算方法满足所有平衡条件的原因。

对于圆弧滑动面和非圆弧滑动面,本文计算方法通过 6 次迭代可得到安全系数初值,再将通过安全系数初值计算得到的 λ 值代入方程,再次迭代 7~8 次可得到公差小至 0.000 1 的 F_s 和 λ 。显然,本方法相较于摩根普莱斯等严格方法算法更简单,迭代次数更少,更易于工程师使用。

在滑动面为圆弧滑动面时,条间力函数(1)和条间力函数(2)计算的法向力和切向力结果如图 5(a)所示,在第 14 土条,法向力和切向力均达到最大。在第 14 土条,条间力函数(1)计算的法向力为 590.95 kN,条间力函数(2)计算的法向力为 589.65 kN,条间力函数(1)计算的切向力为 152.07 kN,条间力函数(2)计算的切向力为 189.46 kN。

在滑动面为非圆弧滑动面时,条间力函数(1)和条间力函数(2)计算的法向力和切向力结果如图

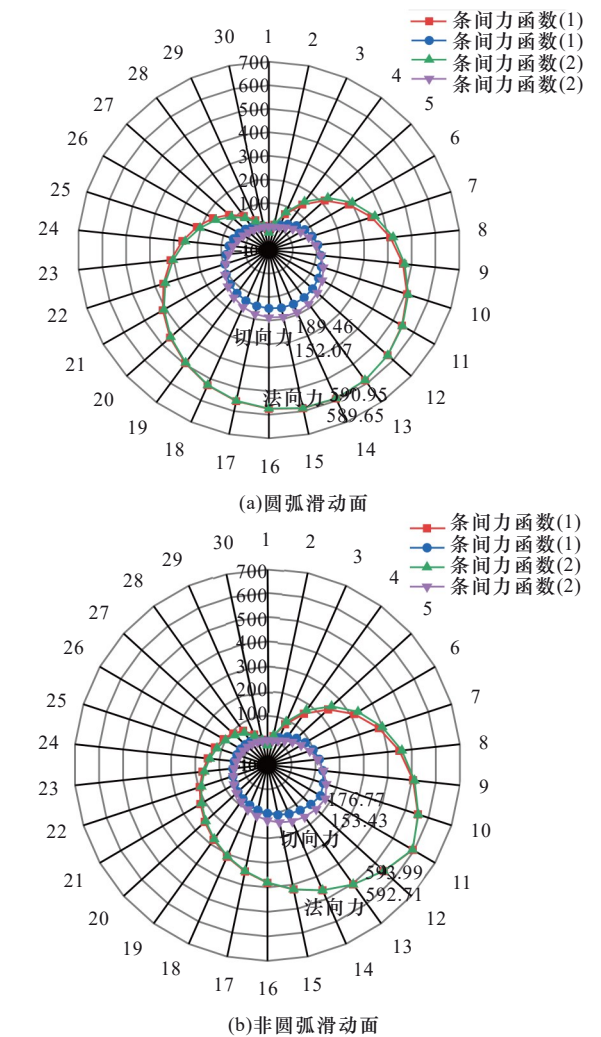


图 5 圆弧、非圆弧滑动面土条法向作用力与切向力作用力分布图

Fig. 5 Distributions of normal and tangential forces of soil strips on circular and non-circular sliding surfaces

5(b)所示,在第 11 土条,法向力和切向力均达到最大。这是因为滑动面由圆弧突变为直线造成的,最大下滑力的位置因为滑动面的改变而发生变化。在第 11 土条,条间力函数(1)计算的法向力为 593.99 kN,条间力函数(2)计算的法向力为 592.71 kN,条间力函数(1)计算的切向力为 153.43 kN,条间力函数(2)计算的切向力为 176.77 kN。

当取条间力函数(1)时,与 Spencer(1967)法一样,假定土条间的切向力与法向力之比为常数,即条间力合力方向为常数,如图 6 左侧图所示。当取条间力函数(2)时,则假定土条间的切向力与法向力之比为 $\lambda f(x)$,条间力合力倾角变化如图 6 右侧图所示,条间力倾角呈现先逐渐增加后减小的变化趋势,总体上条间力合力倾角变化曲线很平滑,这也是保证安全系数具有较高精度的原因之一。

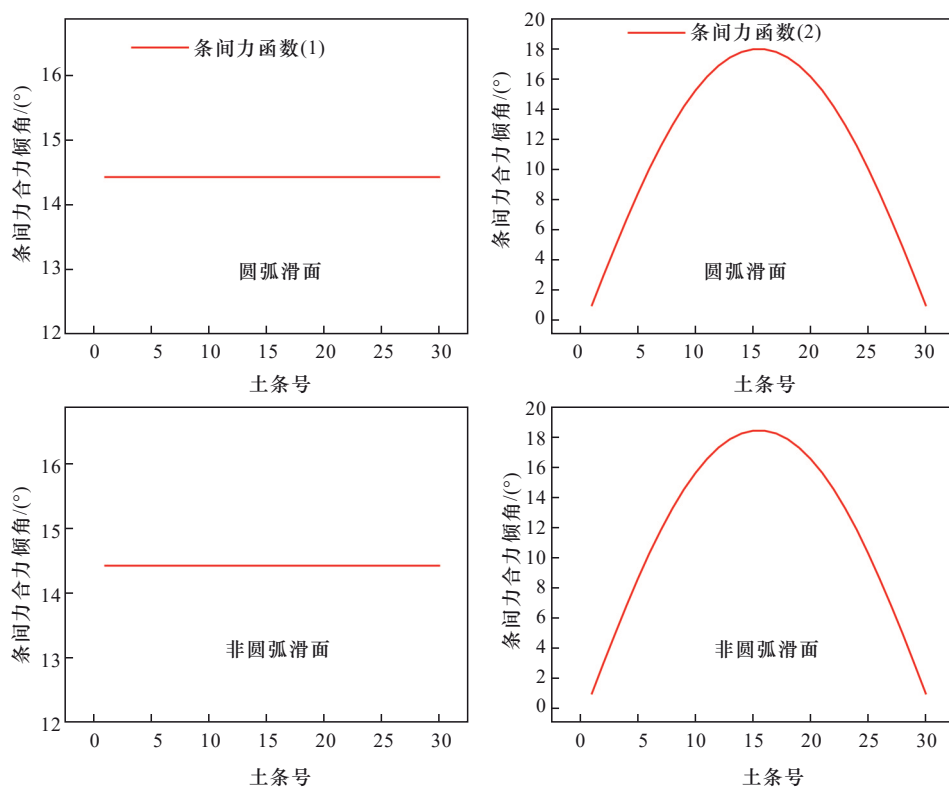


图6 圆弧、非圆弧滑动面土条条间力倾角变化图

Fig. 6 Variations of force inclination angle between soil strips on circular and non-circular sliding surfaces

3.2 例2

本文计算方法与不平衡推力法进行比较。例2计算简图如图7所示,计算结果如表3所示。

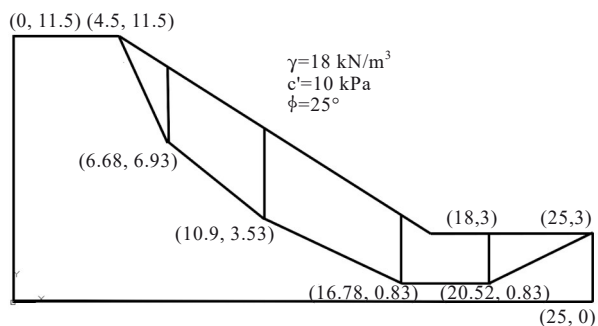


图7 折线滑动面计算简图

Fig. 7 Calculation diagram of the sliding surface of broken line

通过表3的计算结果可知,当滑动面为折线滑动面时,本文计算方法与不平衡推力法显式解计算误差为+15.77%,与不平衡推力法隐式解计算误差为+7.62%。当考虑条间力函数时,本文计算方法与不平衡推力法显式解计算误差为+13.12%,与不平衡推力法隐式解计算误差为+5.15%。

当滑动面为非圆弧时,从例1和例2的计算结果可以看出,不平衡推力法计算误差普遍偏大,且安全系数结果偏大。因此,在计算滑动面为非圆弧时,使用不平衡推力法计算安全系数是不安全的。

表3 与不平衡推力法结果对比分析

Table 3 Comparison with unbalanced thrust method

计算方法	F_s	λ	滑动面
本文方法 条间力函数(1)	1.559 6	0.305 8	折线
本文方法 条间力函数(2)	1.596 2	0.337 0	折线
不平衡推力法 (显式)	1.805 6	—	折线
不平衡推力法 (隐式)	1.678 4	—	折线

当考虑条间力函数时,本文计算方法在条间力函数(1)和条间力函数(2)的计算结果误差为2.35%,计算结果相差不大。不论滑动面是圆弧还是非圆弧,本文计算方法都可以保证其计算精度,并且可以得到下滑推力。

在计算安全系数时,使用条间力函数(1)计算可以得到较为精确的安全系数。在不需要考虑条间力函数时,可使本文计算方法变得极为简便,这样可以方便工程人员的理解与使用。

对于非圆弧滑动面,例2通过6次迭代可得到安全系数初值,再将通过安全系数初值计算得到的 λ 值代入方程,再次迭代7次可得到公差小至0.000 1的 F_s 和 λ 。由图8可知,在使用条间力函数(1)和条

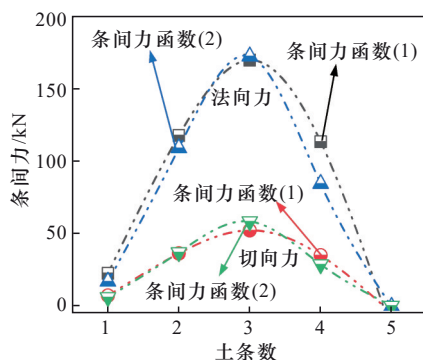


图8 土条下滑推力

Fig. 8 Sliding thrust of soil strip

间力函数(2)计算下滑推力时,两者相差不大,且都在第三个土条计算得到最大下滑推力。综合例1和例2,本方法相较于摩根普莱斯等严格方法算法更简单,更容易收敛,在得到下滑推力的同时可得到非常精确的安全系数。

4 结语

1)本文提出的基于极限平衡的边坡稳定性严格计算方法,在获得下滑推力的同时可得到准确的安全系数,对于边坡稳定性评价与防护设计具有重要参考意义。

2)通过初始值 $F_s=1, \lambda=0$ 计算得到令人满意的 F_s 值,将该值代入方程进行迭代计算可以有效避免因初值选择不当而出现的数值问题,从而简化了计算过程。

3)本文提出的严格方法适用于所有类型滑动面,仅通过14次左右迭代计算就可得到公差小至0.0001的安全系数。

4)条间力函数对安全系数的计算结果影响较小。在计算安全系数时,假设条间力函数 $f(x)=1$ 便可获得较为精确的安全系数。

参考文献:

- [1] 李忠,朱彦鹏.多阶边坡滑移面搜索模型及稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2006(S1):2841-2847.
- [2] 邓东平,李亮.水平条分法下边坡稳定性分析与计算方法研究[J].岩土力学,2012,33(10):3179-3188.
- [3] 许佳君,朱大勇,姚华彦,等.基于严格极限平衡法的边坡安全系数上下限解[J].应用力学学报,2023,40(3):580-588.
- [3] 朱大勇,邓建辉,台佳佳.简化Bishop法严格性的论证[J].岩石力学与工程学报,2007(3):455-458.
- [4] 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):183-194.
- [5] Ouyang W H, Liu S W, Yang Y. An improved morgenstern-price method using gaussian quadrature[J]. Computers and geotechnics, 2022, 148: 104754.
- [6] 邓东平,彭一航,柳梦琦,等.滑面“极径-应力-强度”耦合关联下非线性破坏特征边坡稳定性极限平衡分析方法[J].岩土力学,2024(11):1-24.
- [7] 蒋斌松,蔡美峰,吕爱钟.边坡稳定性的解析计算[J].岩石力学与工程学报,2004(16):2726-2729.
- [8] 郑跃.基于斜条分法的均质土坡稳定性分析及其在锚固边坡中的应用[D].成都:成都理工大学,2021.
- [9] 胡昭,孙树林,陶伟,等.基于M-P水平条分法的加筋土坡稳定性计算方法[J].河北工程大学学报(自然科学版),2019,36(1):22-25,35.
- [10] 林志平.条间力分布对Sarma法条间强度参数及安全系数影响分析[J].安全与环境学报,2020,20(3):900-905.
- [11] 丑亚玲,刘强,朱树顺.考虑非饱和土基质吸力的改进通用条分法[J].兰州理工大学学报,2023,49(3):121-126.
- [12] 陈文胜,戴嘉宁,蒋茂林,等.传递最大推力的不平衡推力法[J].岩土工程报,2022,44(1):181-186.
- [13] 张鲁渝,郑颖人,时卫民.边坡稳定分析中关于不平衡推力法的讨论[J].岩石力学与工程学报,2005(1):177-182.
- [14] Zhu D Y, Lee C F, Qian Q H, et al. A concise algorithm for computing the factor of safety using the Morgenstern-Price method [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(1): 272-278.

(编辑:贾丽红)