

土坡稳定分析的改进条分法

张宏¹, 冯旭¹, 杨冬梅¹, 蔡江碧²

(1. 杨凌职业技术学院 水利系, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水建学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 圆弧条分法是土坡稳定分析常用方法之一, 但该方法假定各土条稳定性相等且与整个土坡相等, 这种假定存在一定的不合理性, 属于不严密的刚体极限平衡法。以简单土坡为研究模型, 将圆弧条分法加以改进: 假定土条间传递水平内力, 考虑土条稳定性不等时, 研究各土条间的传力规律, 提出土坡稳定状态的判别条件, 分析并推导出土坡稳定情况下, 计算条间力大小的理论公式; 并按照分合性原则和滑动系数的重量加权平均原则, 推导了由土条稳定系数计算土坡稳定系数的理论公式。

关键词: 土坡; 稳定性分析; 改进; 条分法

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2005)01-0060-04

中图分类号: S151.92

An Improved Slice Method for Stability Analysis of Slope

ZHANG Hong¹, FENG Xu¹, YANG Dong-mei¹, CAI Jiang-bi²

(1. Water Resources Dept., Copyright Yangling Vocational and Technical College, Yangling District 712100,

Shaanxi Province, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering,

Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling District 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: The circular slices method is one of the normal method for analyzing stability of slope which assumed the stabilities of individual slice is equal and equaled to that of whole slope, and belongs to an imprecise limit equilibrium method of rigid body with some irrationality. With a simple slope as research model, the circular slices method is improved. Postulating the slices can transfer internal force each other and the stabilities of individual slice are not equal, the differentiating condition of slope stabilization states is put forward via studying the transmission principle of slices force interacted by each other, and the theory formula calculating interaction forces of individual slices is deduced at a stable slope. Based on above, the theory formula calculating stability factor of whole slope from the stability factors of individual slice is also deduced according to the principle of disjoin-join and the principle of weight weighted average of sliding factors.

Keywords: slope; stability analysis; improved slices method

本文提出土条之间仅传递水平内力且考虑各土条稳定性不等时用条分法分析土坡稳定的原理和方法。条分法本质上为刚体极限平衡法, 滑床和每一土条均为刚体。土条间仅传递水平内力即为简化毕肖甫法的计算条件, 但简化毕肖甫法以及基于瑞典圆弧法的各种分析方法, 均假定土条的稳定性相等^[1-2]。各土条的稳定性实质上是不相等的。当考虑这一因素进行土坡稳定分析时, 要解决两个关键问题: 如何求土条间的传力和如何由土条的稳定安全系数求土坡的稳定安全系数。

1 前言

现行条分法为不完全的刚体极限平衡法, 本文以瑞典条分法^[3-4]为例, 剖析先行条分法的缺陷(如图 1 所示)。

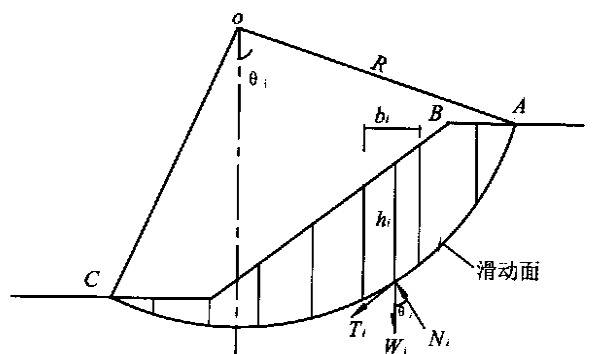


图 1 瑞典条分法

土坡稳定系数 $K = \sum T_{imax} / \sum T_i^{[5]}$, 但并不能保证 $K = T_{imax} / T_i$ 。这说明现行条分法可保证整个土条体系满足刚体极限平衡条件而不能使每一土条满

足刚体极限平衡条件; 按等稳定性假定计算土条的最大抗滑力, 但计算结果不能保证各土条稳定性相等。以稳定土坡为例分析, 观察图 2 所示土坡。

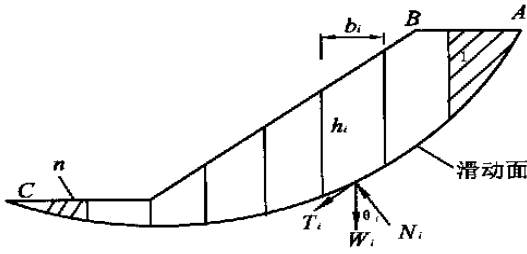


图 2 稳定土坡分析图

最右侧“1 土条”由于处于土坡滑弧最顶端, 需要依靠相邻土条支撑而不下滑, 因而它的实际稳定系数

应为 $K_{右} = 1$ (当弧面不足够陡时, $K_{右} > 1$); 而最左侧第“n 土条”同滑向相反的逆坡位置, 因而具有逆滑向趋势, 必有 $0 > K_{左} > -1$ 。进一步的分析可知土条从右向左, 稳定系数呈 $1, > 1, < -1, < 1$ 且 > -1 的顺序排列。

由以上分析可看出, 经典条分法是不完全的刚体极限平衡法。毕肖普法考虑了土条间传力, 显然较瑞典条分法要合理, 但二法均假定土条稳定性相等, 因而具有同样的缺陷。

2 研究模型

为突出研究思路, 本文选取的研究对象为简单土坡。简单土坡由坡高 H , 坡率 m , 黏土重度 γ , 凝聚力 c 和内摩擦系数 f 所确定, 如图 3 所示。

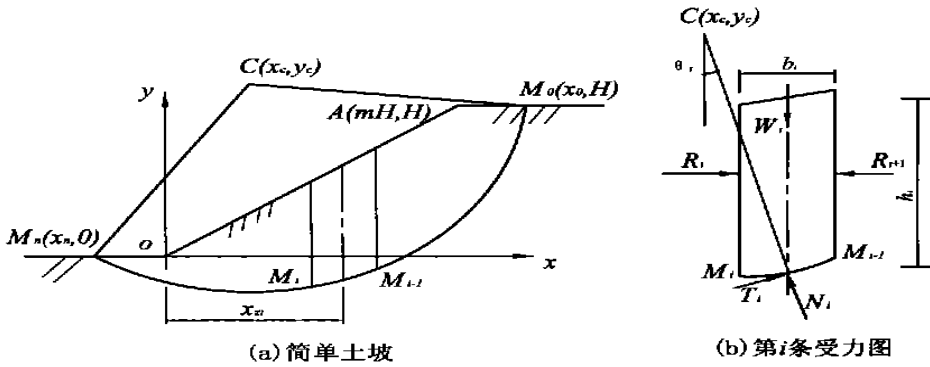


图 3 研究模型

坐标原点取在坡脚。包括坡顶、坡面和坡底在内的坡形方程为:

$$y = F(x) = \frac{1}{2m}(|x| - |x - mH| + mH) \quad (1)$$

圆心为 $c(x_c, y_c)$, 半径为 R 的滑弧方程为:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2 \quad (2)$$

假定滑弧同坡顶交于点 M_0 , 同坡底交于点 M_n , 由式(1)、(2) 联解, 可得点 M_0, M_n 的横坐标分别为:

$$x_0 = x_c + \sqrt{R^2 - (y_c - H)^2} \quad (3)$$

$$x_n = x_c - \sqrt{R^2 - y_c^2} \quad (4)$$

3 土条的几何分析

假定将滑体分为 n 条等宽土条, 则条宽:

$$B = \frac{x_0 - x_n}{n} \quad (5)$$

土条自点 M_0 起沿滑向编为 $1, 2, \dots, i, \dots, n$ 号, 第 n 号土条终于点 M_n 。第 i 号土条(图 3) 的中心线横坐标为:

$$x_{zi} = x_0 + \left(\frac{1}{2} - i\right)B \quad (6)$$

相应半径的垂线偏角为:

$$\theta_i = \arcsin \frac{x_{zi} - x_c}{R} \quad (7)$$

土条中心线的上端点在坡面上, 由式(1) 知其纵坐标为 $F(x_{zi})$, 下端点在滑弧上, 其纵坐标可用式(2) 算出。以中心线高作为土条高 h_i , 可得:

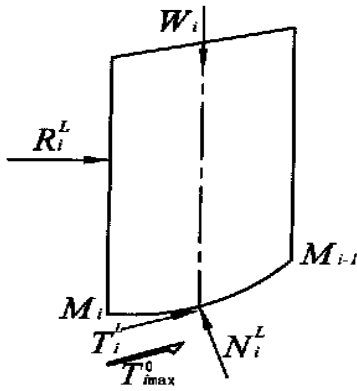
$$h_i = F(x_{zi} - y_c + \sqrt{R^2 - (x_{zi} - x_c)^2} \quad (8)$$

近似以弦线 $\widehat{M_i M_{i+1}}$ 代替弧线长 $\widehat{M_i M_{i+1}}$, 作为土条底宽, 则:

$$l_i = B / \cos \theta_i \quad (9)$$

4 土条的力学分析

分析目的是为土条体系稳定分析作准备。以下均为对第 i 条的分析(图 4)。

图 4 第 i 土条预平衡分析

土条预平衡状态是指在滑向侧加水平荷载 R_i^l 使土条达到临界平衡状态。由力平衡方程和条件 $T_{i\max}^l = T_i^l$, 可得:

$$R_i^l = \frac{W_i(\sin\theta_i - f\cos\theta_i) - cB/\cos\theta_i}{f\sin\theta_i + \cos\theta_i} \quad (10)$$

5 土坡稳定状态下土条间水平内力的计算

5.1 土条间的传力原则

所有滑面、条间面均不出现拉力^[5]; 沿滑向考虑土条传力, 后一土条只有克服该土条滑面上的最大抗滑力之后才向前一土条传力; 作用于滑向最前端的土条上的滑动力必不大于土条滑面上的最大抗滑力。

5.2 土条间的水平内力的计算

前述传力原则是计算 R_i 的根据。对于第 1 条土条, $R_0 = 0$, 若 $K_1 < 1$ 则将向第 2 条土条传力 $R_1 = R_1^l$; 若 $K_1 \geq 1$, 则 $R_1 = 0$ 。对于第 i 条土条, 若 $(R_{i-1} + R_i^l) > 0$, 则 $R_i = R_{i-1} + R_i^l$ 。因为 R_i^l 已使土条满足临界平衡, 但从高坡侧传来力 R_{i-1} , 故滑向侧须作用力 $(R_{i-1} + R_i^l)$ 方能使第 i 条土条保持临界平衡状态。若 $(R_{i-1} + R_i^l) \leq 0$ 即须在滑向侧施加拉力方使第 i 条土条达到临界平衡。但根据受力合理性原则, 土条间不能作用拉力, 故 $R_i = 0$, 同时, 第 i 条土条处于稳定状态。从以上分析可归结为:

$$R_i = \frac{1}{2}(|R_{i-1} + R_i^l| + R_{i-1} + R_i^l) \quad (11)$$

5.3 土坡稳定状态的判定

若最后用式(11)算得 $R_n = 0$ 说明土条体系处于稳定状态。若 $R_n > 0$ 说明只有在点 M_n 作用 R_n 才能使体系稳定; 但这同边界条件 $R_n = 0$ 不符, 故体系必须处于失稳状态。此时应按失稳状态进行条间力分析。

5.4 土条稳定系数的计算

当 $R_i > 0$ 时, 第 i 土条处于临界平衡状态, 即 $K_i = 1$ 。

当 $R_i = 0$ 时, 第 i 土条处于稳定或临界平衡状态, 即 $K_i \geq 1$ 。土条受力见图 4, 令 $R_i = 0$ 。此时

$$N_i = W_i \cos\theta_i - R_{i-1} \sin\theta_i$$

$$T_i = W_i \sin\theta_i + R_{i-1} \cos\theta_i$$

$$T_{i\max} = f(W_i \cos\theta_i - R_{i-1} \sin\theta_i) + cB/\cos\theta_i$$

K_i 可由 $T_{i\max}/T_i$ 算出。综合可得:

$$K_i \begin{cases} = \frac{f(W_i \cos\theta_i - R_{i-1} \sin\theta_i) + cB/\cos\theta_i}{W_i \sin\theta_i + R_{i-1} \cos\theta_i} & (R_i = 0) \\ = 1 & (R_i > 0) \end{cases}$$

6 由 K_i 计算土坡稳定系数 K

为了更好地判断体系的稳定性, 我们给出了一个衡量系统滑动性的指标——滑动系数, 并定义其为各滑体稳定安全系数的倒数。理解为单位重量的滑体提供滑动程度的指标, 公式表示为:

$$K_h = 1/K_i = T_i/T_{i\max}$$

根据分合性原则, 将双滑块体系可扩充为任意多滑块体系, 而稳定性不变^[6-7]。得到多滑块体系滑动系数的重量加权平均原则(详见参考文献 7), 其表达式如公式(12)所示:

$$K_h = \frac{\sum_{i=1}^n W_i K_{hi}}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (12)$$

将式 $K_h = \frac{1}{K}$ 和 $K_{hi} = \frac{1}{K_i}$ 代入式(12), 可得由 K_i 求 K 的公式:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n (W_i/K_i)} \quad (13)$$

例如, 一均质黏性土坡, 高 20 m 坡率为 $m = 1.732$, 填土凝聚力 $c = 42 \text{ kPa}$, 内摩 $\varphi = 17^\circ$, 重度 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, 滑弧中心坐标为 (8.2, 30.53), 滑弧半径为 $R = 40 \text{ m}$, 取土条数 $n = 20$ 。其稳定分析结果如表 1 所示。

本算例取自杨唐宇等关于土坡稳定分析圆弧滑法的解析解的有关文献中, 用简化毕肖普法算得 $K = 1.397$ ($B = 0.5 \text{ m}$), 用边坡稳定分析程序 STAB95 算得 $K = 1.400$, 用本文提出的方法计算得 $K = 1.335$; 取 $n = 150$, $B = 0.43 \text{ m}$ 得 $K = 1.332$ 。按土条编号顺序, 前端大多数土条 K_i 为 1.00, 相当于 R_i 先增大后减小; 后端一些土条的条间力 R_i 为 0, K_i 为负值且小于 -1。

表 1 算例的稳定分析考虑条间传力, 体系稳定情况

土条号	X_{zi}/m	$\theta_i/(\circ)$	h_i/m	W_i/kN	R_i^L/kN	R_i/kN	K_i	W_i/k_i
1	45.18	67.62	4.72	273.80	201.37	201.37	1.00	273.80
2	41.96	57.59	10.93	633.78	225.01	426.38	1.00	633.78
3	38.74	49.79	15.31	887.73	333.22	759.60	1.00	887.73
4	35.51	43.09	18.69	1 084.01	333.24	1 092.84	1.00	1 084.01
5	32.29	37.05	20.05	1 162.42	251.51	1 344.35	1.00	1 162.42
6	29.07	31.46	20.38	1 181.72	148.05	1 492.40	1.00	1 181.72
7	25.85	26.19	20.29	1 176.63	44.28	1 536.68	1.00	1 176.63
8	22.63	21.15	19.84	1 150.62	- 55.63	1 481.05	1.00	1 150.62
9	19.40	16.27	19.07	1 106.00	- 148.78	1 332.27	1.00	1 106.00
10	16.18	11.52	18.01	1 044.34	- 232.83	1 099.44	1.00	1 044.34
11	12.96	6.84	16.67	966.65	- 305.54	793.90	1.00	966.65
12	9.74	2.20	15.06	873.55	- 364.49	429.41	1.00	873.55
13	6.52	- 2.42	13.20	765.36	- 406.85	22.56	1.00	765.36
14	3.29	- 7.05	11.07	642.05	- 429.06	0.00	- 4.21	- 152.65
15	0.07	- 11.73	8.68	503.32	- 426.37	0.00	- 2.83	- 178.17
16	- 3.15	- 16.49	7.83	453.32	- 461.86	0.00	- 2.13	- 212.93
17	- 6.37	- 21.38	6.72	389.85	- 485.61	0.00	- 1.81	- 215.98
18	- 9.60	- 26.43	5.30	307.13	- 4859.27	0.00	- 1.72	- 178.46
19	- 12.82	- 31.71	3.51	203.37	- 461.64	0.00	- 1.58	- 128.39
20	- 16.04	- 37.32	1.29	75.02	- 382.92	0.00	- 4.14	- 92.43
\sum				14 881.19				11 147.60
K								1.335

注: 土坡: $H = 20\text{ m}$, $m = 1.732$, $f = 0.306$, $c = 42\text{ kPa}$, $\gamma = 18\text{ kN/m}^3$; 滑弧: $X_c = 8.2\text{ m}$, $Y_c = 30.53\text{ m}$, $R = 40\text{ m}$; $n = 20$;
 $B = 3.222\text{ m}$ 。

7 结 论

现行的瑞典圆弧法和毕肖普法是以假定各土条的稳定性相等为理论基础的, 但这一假定仅用以保证土条体系满足极限平衡, 而不能使各土条满足极限平衡, 是不严密的刚体极限平衡法。

本文以简单土坡为研究对象, 以土条稳定性不等为前提, 运用简化毕肖普法, 当体系处于稳定状态, 沿高坡端土条起逐次调整预平衡状态为真实受力状态, 得出条间力; 并推导出了多滑块体系由滑块稳定系数求体系稳定系数的理论公式, 运用此公式可求得土坡的稳定系数。

当土坡失稳时, 本文提出的方法失效。笔者已研究出失稳状态的土坡稳定分析方法, 限于篇幅, 只能另文刊发。

[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] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.
- [3] 赵剑丽. 对边坡稳定性分析圆弧法的改进[D]. 长安大学硕士论文, 2003 年 6 月.
- [4] 邹广电, 蒋婉莹. 边坡稳定性分析的一个改建条分法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(12): 1953—1959.
- [5] 王祖煌. 土质边坡稳定分析(原理. 方法. 程序) [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2003. 15—21.
- [6] 王铭. 重力坝深层抗滑稳定分析新法——动力系数法[D]. 西北农林科技大学硕士论文, 2004 年 5 月.
- [7] 张宏. 考虑土条稳定性不等时的土坡稳定分析[D]. 西北农林科技大学硕士论文, 2004 年 7 月.