

失稳状态下土坡稳定分析的改进条分法

张宏¹, 李小龙², 樊强³, 蔡江碧³

(1. 杨凌职业技术学院 水利系, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省江河水库管理局, 陕西 西安 710000; 3. 西北农林科技大学 水电学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 圆弧条分法是土坡稳定性分析的常用方法之一, 但该方法以假定各土条稳定性相等且与整个土坡相等为基础, 属于不严密的刚体极限平衡法, 存在一定的不合理性。以简单土坡为研究模型, 运用改进条分法, 研究了土坡失稳且土条间稳定性不等时, 各土条间的传力特点、滑动规律及加速度协调条件; 推导出了土坡失稳情况下, 计算条间力大小及各土条稳定系数的理论公式。算例验证表明, 这种方法不仅能准确分析整个土坡的稳定性, 而且揭示了土坡内局部土条的稳定状态, 对于实际施工具有重要参考价值。

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(2007)05-0089-03

中图分类号: TV223.31

An Improved Slice Method for Slope Stability Analysis Under Instable Condition

ZHANG Hong¹, LI Xiao-long², FAN Qiang³, CAI Jiang-bi³

(1. Department of Water Resources, Yangling Vocational and Technical College, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Management Department of Rivers and Reservoirs of Shannxi Province, Xi'an, Shaanxi 710000, China; 3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The circular slice method is one of the normal methods for analyzing slope stability, which assumes that the stabilities of individual slices are equal and equaled to that of whole slope and belongs to an imprecise limit equilibrium method of rigid body with some irrationality. In this study, a simple slope was used as a model to study the features of force transferring between individual slices, discipline of slippage and compatibility condition of acceleration with improved slice method when the slope is in destabilization and the stabilities of individual slices are not equal. A theoretical formula for calculating interaction forces and the stable coefficient of individual slices under instable states was then deduced. The calculation of practical sample demonstrates that this method can be used to analyze accurately the stability of whole slope, as well as to reveal the stable circumstance of part slices within a slope. It maybe possesses some important referential values for practical construction.

Keywords: slope; stability; analysis; improvement; slice method

1 前言

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。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]。而在工程实践中, 各土条的稳定性实质上是不相等的。总

之, 这些方法均应属于不完全的刚体极限平衡法。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。这两个问题的分析和推导在前文已有详细阐述^[3,6]。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条件下, 运用条分法分析土坡失稳时的原理和方法。

收稿日期: 2007-01-20

修回日期: 2007-09-20

基金项目: 2003 年陕西省水利科技计划项目 (2003SK-12)

作者简介: 张宏 (1975-), 女 (汉族), 陕西省丹凤县人, 讲师, 从事水工结构方面的教学和研究。E-mail: zhanghong 7588@ 126. com.

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 ,容重 γ ,凝聚力 c 和内摩擦系数 f 所确定(如图 1 所示)。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:

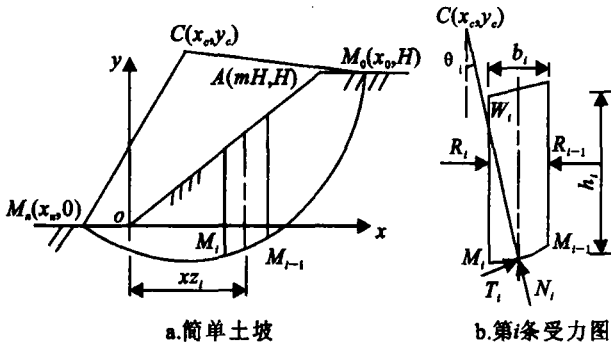


图 1 研究模型示意图

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

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:

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

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

边界条件 $R_n = 0$ 是状态判定的依据。若用式 $R_n = \frac{1}{2} (|R_{i-1} + R_i^l| + |R_{i-1} - R_i^l|)$ 算得 $R_n = 0$ ^[6] (式中 R_i^l 为土条预平衡附加力,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,故体系应处于失稳状态,此时按失稳状态进行内力分析。

3 土坡失稳定状态下土条间水平内力的计算

3.1 土条间的传力原则

依据多滑块体系的稳定和失稳机理^[7],从土坡坡顶侧依次分析土条传力,当土条处于自受力稳定或临界平衡状态时,将不向滑向侧土条传力;当土条处于自受力失稳状态时,将向滑向侧土条传力,传力的大小应使土条处于临界平衡状态。

3.2 土条间的水平内力 R_i 的计算

土坡失稳时,各土条处于彼此不沿水平方向脱开且按各自的加速度方向进行的加速运动状态。彼此不沿水平方向脱开即是各土条加速度和谐的条件。 i 土条下滑,必然有 $T_i > T_{i\max}$,切向下滑力 F_i 应为二

者之差。 F_i 当作下滑力时,其方向顺着滑向;若将 F_i 作为达朗贝尔力处理,反向加于土条,则使土条处于极限平衡状态(图 2)。

由于第 i 条上的荷载 R_i, R_{i-1} 均为未知数,故 F_i 的表达式中必含有 R_i, R_{i-1} 。进行数学变形可得 R_i 的定解矩阵。

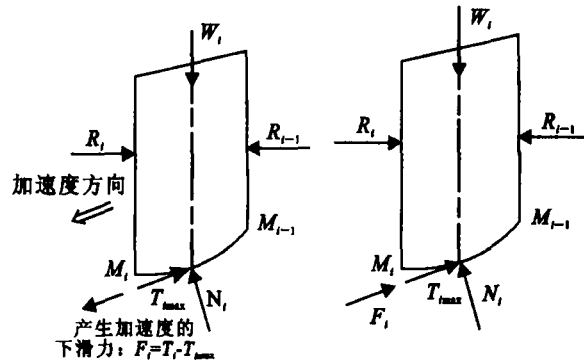


图 2 第 i 土条加速度运动状态下的受力图

依据加速度条件,可写出加速度和谐方程:

$$\alpha_i \cos \theta_i = \alpha_{i+1} \cos \theta_{i+1} \quad \text{或} \quad \alpha_i / \alpha_{i+1} = \cos \theta_{i+1} / \cos \theta_i = \text{常数} \quad (5)$$

则第 i 条土条下滑力 F_i 的运动表达式为:

$$F_i / F_{i+1} = m_i \alpha_i / m_{i+1} \alpha_{i+1} = W_i \cos \theta_{i+1} / W_{i+1} \cos \theta_i = \text{常数} \quad (6)$$

下滑力 F_i 的内力表达式

$$N_i = W_i \cos \theta_i + (R_i - R_{i-1}) \sin \theta_i \quad (7)$$

$$T_i = W_i \sin \theta_i - (R_i - R_{i-1}) \cos \theta_i \quad (8)$$

$$T_{i\max} = f N_i + cb / \cos \theta_i \quad (9)$$

所以 $F_i = T_i - T_{i\max}$

$$= W_i \sin \theta_i - f W_i \cos \theta_i - \frac{cb}{\cos \theta_i} -$$

$$(R_i - R_{i-1}) (\cos \theta_i + f \sin \theta_i)$$

为方便编程,将上式简写为:

$$F_i = A_i - (R_i - R_{i-1}) D_i \quad (10)$$

式中

$$A_i = W_i \sin \theta_i - f W_i \cos \theta_i - \frac{cb}{\cos \theta_i}$$

$$D_i = \cos \theta_i + f \sin \theta_i$$

R_i 的定解矩阵,由上式整理可得:

$$[A_i - (R_i - R_{i-1}) D_i] \frac{\cos \theta_i}{W_i} = \text{常数}$$

$$\text{或 } E_i - (R_i - R_{i-1}) G_i = \text{常数}$$

式中

$$E_i = \frac{1}{2} \sin 2\theta_i - f \cos^2 \theta_i - cb / W_i$$

$$G_i = (\cos^2 \theta_i + \frac{f}{2} \sin 2\theta_i) / W_i$$

即 $R_{i-1} G_i - R_i G_i + E_i = \text{常数}$

$$R_{i-1}G_i - R_i(G_i + G_{i+1}) + R_{i+1}G_{i+1} = E_{i+1} - E_i \quad (11)$$

根据边界条件: $R_0 = R_n = 0$, 上式可表示为矩阵形式

$$\begin{pmatrix} -(G_1 + G_2) & G_2 & & & & \\ G_2 & -(G_2 + G_3) & G_3 & & & \\ & G_3 & -(G_3 + G_4) & G_4 & & \\ & & & \dots & \dots & \\ & & & & G_{n-1} & -(G_{n-1} + G_n) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \dots \\ R_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_2 - E_1 \\ E_3 - E_2 \\ E_4 - E_3 \\ \dots \\ E_n - E_{n-1} \end{pmatrix} \quad (12)$$

该矩阵属于三对角方程组, 可用追赶法求解^[11-12]。

3.3 土条稳定系数 K_i 的计算

$$K_i = \frac{fN_i + \frac{cb}{\cos\theta_i}}{T_i} \quad (13)$$

式中: $N_i = W_i \cos\theta_i + (R_i - R_{i-1}) \sin\theta_i$

$T_i = W_i \sin\theta_i - (R_i - R_{i-1}) \cos\theta_i$

4 根据 K_i 计算土坡稳定系数 K

文献[7]根据对水平滑面双滑块摩擦滑动模型研究, 提出了滑动系数的概念, 继而推出双滑块体系由土条稳定系数求土坡稳定系数的理论公式。

依据文献[7]的思路, 运用数学归纳法, 可得到多滑块体系的由土条稳定系数求土坡稳定系数的理论公式^[6]。

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n (W_i / K_i)} \quad (14)$$

例: 假设一均质土坡, 高 50 m 坡率为 $m=0.58$, 填土凝聚力 $c=58.86$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=20^\circ$, 重度 $\gamma=19.62$ kN/m³, 求得该土坡最危险滑弧中心坐标 $(-14.47, 45.92)$, 滑弧半径为 $R=48$ m, 试计算土坡的稳定安全系数(表 1)。

本算例取自文献[10], 在该文献中, 用有限元法算得 $K=0.736$ 。用本文提出的方法取 $n=20$, 得 $K=0.757$; 取 $n=60$, 得 $K=0.753$; $n=200$, 得 $K=0.744$; $n=400$, 得 $K=0.742$ 。按土条编号顺序, 土条稳定系数 $0 < K_i < 1$ 。条间水平力的分布规律为: 中间大, 两侧小(表 1)。

表 1 算例的稳定分析计算

土条编号	X_i/m	$\theta_i/(^\circ)$	h_i/m	W_i/kN	R_i/kN	K_i	W_i/K_i
1	31.86	74.58	16.81	1 019.17	322.29	0.705	1 446.10
2	28.72	64.13	24.54	1 487.85	1 220.34	0.314	4 733.82
3	25.63	56.62	24.65	1 494.59	1 945.45	0.530	2 822.35
4	22.54	50.44	23.51	1 425.27	2 472.22	0.663	2 148.56
5	19.45	44.97	21.58	1 308.20	2 815.06	0.741	1 765.28
6	16.36	39.96	19.08	1 156.64	2 998.15	0.783	1 477.53
7	13.27	35.31	16.13	978.08	3 048.83	0.804	1 217.26
8	10.18	30.93	12.82	777.20	2 995.77	0.817	951.77
9	7.09	26.68	9.19	557.15	2 868.60	0.838	664.58
10	4.00	22.64	5.28	320.15	2 697.98	0.897	356.81
11	0.91	18.69	1.12	67.77	2 515.95	0.876	77.36
12	-2.18	14.83	0.48	29.11	2 335.78	0.876	33.23
13	-5.27	11.05	1.19	72.16	2 148.13	0.974	74.07
14	-8.36	7.31	1.58	102.44	1 948.45	0.897	114.23
15	-11.45	3.61	1.98	120.35	1 734.55	0.838	143.55
16	-14.54	-0.08	2.08	126.11	1 506.48	0.798	158.05
17	-17.63	-3.78	1.98	119.79	1 266.56	0.777	154.25
18	-20.72	-7.48	1.67	101.32	1 019.56	0.778	130.28
19	-23.81	-11.22	1.16	70.46	773.12	0.807	87.37
20	-26.90	-15.02	0.44	26.81	0.00	0.278	96.59
Σ				22 721.20			30 013.65
K							0.757

注: ①本算例为考虑条间传力的体系失稳情况; ②土坡: $H=50$ m, $m=0.58$, $f=0.364$, $c=58.86$ kPa; ③滑弧: $X_c=-14.47$ m, $Y_c=45.92$ m, $R=48$ m; $n=20$, $B=3.090$ 1 m。

群地面工程土地整治措施的落实完成较好,只要坚持整治完移留问题,总结好经验,还是完全可以落实好方案要求的。

3.5 其它

3.5.1 水土保持资金落实及补偿费 对于水土保持工程措施尚未实施的地区,未能进行水土保持投资统计,对工程已基本完成的地区,建设单位已投资部分资金进行了农地复垦,实施了具有水土保持功效的水工保护工程。总体来说,投资额度还有一定的差距。

另外,依据新疆维吾尔自治区水土流失补偿费征收办法的规定,建设单位已按水土保持方案要求标准和当地水行政主管部门正在协商交事宜。

3.5.2 监理监测工作 该项目的监测监理工作由黄河监理工程咨询公司承担,黄河监理公司负责总监和具体监理任务。在建设单位与监理公司的“HSE”合同中,涉及到与“HSE”相关的水土保持内容,但没有签订专项水土保持监理合同和任务。另外,监理人员无专门的水土保持专业监理工程师。监测工作基本没有开展,缺乏监测实施方案,这样对工程质量无疑将造成较大影响。

4 综合评价

英买力气田群地面工程项目区虽然地形地貌不复杂,但生态环境脆弱,在主体工程建设中,遵循“三同时”制度,按标准、按要求实施水土保持方案,对于改善项目区生态环境,实现“一流工程”“水土保持示范园”的目标具有重要意义。项目建设单位和施工单位具有较强的水土保持意识和环境保护意识,树立

“HSE”新理念,能够采取积极的预防保护措施,并取得了一定的成效。工程建设侧重于对主体工程的保护,与水保方案要求的实施措施相比,仍有较大差距,工程建设只是在部分地段采取了一些措施,大部分地段水土保持防护措施基本没有到位,个别严重的地段未采取任何防护措施。

应整修地段的植被恢复工作基本没有开展,特别是气田内部集输管网工程、气田外输管网工程、道路工程的植被恢复和重建工作开展很少,不仅对交通运输和工程整体安全运营等构成威胁,而且还降低了整体防护功能。

监测和监理工作,在整个工程建设中具有重要的地位和作用,但该项工程的监测工作尚未开展,监理工作制度不够完善,这对工程质量影响较大。

至于方案实施中存在的问题,建议建设单位与施工单位要严格按照水土保持方案要求尽快落实、补充和完善防护措施,并按两费征收管理办法和座谈会纪要的精神,尽快与当地协商解决补偿费问题。

[参 考 文 献]

- [1] 新疆水利科学研究院,中科院水利部水土保持研究所. 新疆水土保持建设规划[R]. 乌鲁木齐:新疆水利科学研究院,1998.
- [2] 锥美玲,荆振民,于振江. 新疆的水土流失及防治对策[J]. 中国水土保持,1999(2):17—19.
- [3] 焦锋,张晓萍,韦红波,等. 关于新疆水土流失若干问题的讨论[J]. 干旱区研究,2000,17(1):49—53.
- [4] 马乃喜,惠浹河. 生态环境保护理论与实践[M]. 西安:陕西人民出版社,2002. 88—107.
- [5] 硕士论文,2003.
- [4] 邹广电,蒋婉莹,边坡稳定性分析的一个改进条分法[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(12):1953—1959.
- [5] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析(原理. 方法. 程序)[M]. 北京:水利电力出版社,2003.
- [6] 张宏. 土坡稳定分析的改进条分法[J]. 水土保持通报,2005,25(1):60—63.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 杨唐宇,赵少飞. 土坡稳定分析圆弧滑法的解析解[J]. 工程力学,1998(A02):440—444.
- [10] 史颜宏. 用有限元法分析土坡静力稳定性的算法[J]. 汕头大学学报(自然科学版),2001, 5(1):84—90
- [12] 李庆扬,吴治,白峰彬. 数值计算原理[M]. 北京:清华大学出版社,2001.

(上接第91页)

5 结论

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,当体系处于失稳状态,各土条处于不相互沿条间面脱离的加速度运动状态,根据加速度和谐条件,分析各土条产生加速度的力,并将该力用未知条间力的矩阵表示出,求解出条间力。并用多滑块体系由滑块稳定系数求体系稳定系数的理论公式^[6],求得土坡的稳定系数。

[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