

不规则边坡稳定性的微积分算法

刘 阳*, 姚多喜, 宋 涛

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南
Email: *1337783508@qq.com

收稿日期: 2021年5月15日; 录用日期: 2021年6月17日; 发布日期: 2021年6月25日

摘 要

对滑坡做稳定性分析是滑坡防治的必要措施, 滑坡稳定性的影响因素有很多, 边坡坡形也是影响边坡稳定性的重要因素之一, 但目前针对于边坡坡形对滑坡稳定性影响的研究相对较少。采用微积分算法对滑坡做稳定性分析, 可以将不规则的滑坡面作为研究对象, 再利用基于微积分算法的编程软件进行分析, 确定不规则滑坡面的安全系数以及最危险滑动面。

关键词

稳定性分析, 微积分算法, 安全系数

Calculus Algorithm for Stability of Irregular Slopes

Yang Liu*, Duoxi Yao, Tao Song

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui
Email: *1337783508@qq.com

Received: May 15th, 2021; accepted: Jun. 17th, 2021; published: Jun. 25th, 2021

Abstract

The stability analysis of landslide is a necessary measure for landslide prevention and control. There are many factors affecting the stability of landslide, and the slope shape is also one of the important factors affecting the stability of slope. However, there are relatively few researches on the influence of slope shape on the stability of landslide. Calculus algorithm is used to analyze the stability of the landslide. The irregular landslide surface can be taken as the research object, and

*通讯作者。

then the programming software based on the calculus algorithm is used to analyze and determine the safety factor of the irregular landslide surface and the most dangerous sliding surface.

Keywords

Stability Analysis, Calculus Algorithm, Safety Factor

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

滑坡是自然界中最重要的地质灾害之一，近年来滑坡灾害频发，给人民的生命财产和生态环境带来了很大的威胁[1]。滑坡具有灾害影响损失大、发生次数频繁、区域范围分布广泛以及运动速度快等特点[2][3]，通过加强滑坡勘查，做好相应的治理工作，可以减少滑坡灾害所带来的经济损失，为周围居民提供一个安全、稳定的生活环境[4]。目前学者对滑坡影响因素的研究已经有了很悠久的历史，但由于滑坡的产生条件、运动机理、诱发因素具有多样性和复杂性[5]，这对滑坡的研究造成了一定程度上的困难。目前，研究滑坡稳定性系数的方法有很多，例如，根据《滑坡防治工程勘察规范》选取折线形滑面计算公式对滑面进行稳定性计算分析[6]，采用反演法确定滑带土抗剪强度指标 C 、 ψ 值，从而确定稳定性系数[7]，应用渐进破坏不平衡推力法并结合一种新的本构模型对边坡进行稳定性分析[8][9]，采用极限平衡法对边坡进行稳定性分析[10][11]等。但目前对于滑坡坡形这一稳定性影响因素的研究相对较少，在如今的滑坡当中，滑坡面往往都是不规则坡形，并且不规则滑坡面都不止一个。为了研究滑坡不规则滑坡面的稳定性因素，需要定向治理危险滑动面。可以将不规则的滑坡面作为研究对象，运用微积分算法对滑坡稳定性做分析，以此确定安全系数以及最危险滑动面。

2. 研究目的

滑坡一直都是主要的地质灾害之一，滑坡灾害往往会带来很大程度上的生命财产损失。对滑坡的防治一直以来都是很多专家学者在探讨深入的问题之一。由于滑坡的产生条件、运动机理及其诱发因素的复杂性和多样性，在对不规则边坡进行防治时往往缺乏针对性，防护不精准等问题。运用微积分方法计算出不规则边坡的安全系数，并可以根据微积分的基本原理编制不规则边坡安全系数检索软件。用编制的检索软件检索不规则边坡稳定性较弱的区间，并计算出滑面安全系数，给出最危险滑面位置，可以为后期的不规则边坡治理提供很好的技术参考。

3. 基础原理

不规则边坡是指坡形起伏较大的均值土质边坡，如图 1 所示，AB 区间内 $h(x)$ 函数代表不规则边坡坡形函数， $\psi(x)$ 为圆弧滑动面的函数。利用积分法求解两函数区间内的土体质量，最后根据瑞典条分法计算出圆弧对应的安全系数，具体步骤如下：

求取不规则边坡坡形函数 $h(x)$ 时，本软件采用分段函数拟合坡形，公式如下：

$$h(x) = k_i x + b_i \quad (x_i < x \leq x_{i+1}) \quad (1)$$

其中， k_i 为分段函数的斜率； b_i 为分段函数在 y 轴上的截距； $(x_i, x_{i+1}]$ 为第 i 个分段函数所在区间， $i = 1, 2, 3, \dots$ 。

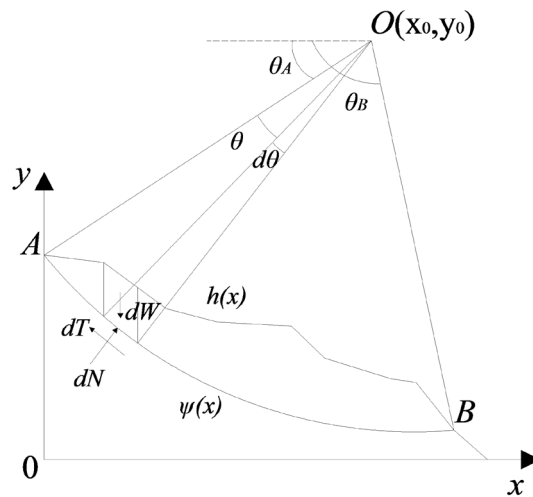


Figure 1. Irregular slope model
图 1. 不规则边坡模型

在检索圆弧滑动面时，圆心坐标以 A 点为起点，其位置在坡形分段函数上任意一点处。检索时圆心分别以 Δx 与 Δy 为检索步距(默认值为 3 m)进行检索，直至圆弧 AB 与坡形函数再无交点时停止检索。

检索时圆弧滑动面 \widehat{AB} 函数 $\psi(x)$ 如下。

$$\psi(x) = y_0 - \sqrt{R^2 - (x - x_0)^2} \quad (2)$$

其中， (x_0, y_0) 为圆弧圆心坐标； R 为圆弧半径。

在对两函数间的土体进行条分后，土条宽度对应的宽度 dx 如下：

$$dx = \sin(\theta + \theta_A) R d\theta \quad (3)$$

依此可得出单宽土条体积以及质量为：

$$\begin{aligned} dV &= (h(x) - \psi(x)) dx \\ dW &= \gamma dV \end{aligned} \quad (4)$$

在对土条进行力学分析后建立 X 与 Y 方向上的平衡方程，得到的公式如下：

$$\begin{cases} \sum X = 0 : dN \cos(\theta + \theta_A) - dT \sin(\theta + \theta_A) \\ \sum Y = 0 : dW - dN \sin(\theta + \theta_A) - dT \cos(\theta + \theta_A) \end{cases} \quad (5)$$

其中 dN 与 dT 分别表示土条在滑面处受到的支持力与抗滑力， θ 、 θ_A 以及 θ_B 表示点 A 与 B 与水平方向间的夹角。

求解式(5)后得出土条的支持力与抗滑力函数公式如下：

$$\begin{aligned} dN &= \frac{\tan(\theta + \theta_A)}{\cos(\theta + \theta_A) + \tan(\theta + \theta_A) \sin(\theta + \theta_A)} dW \\ dT &= \frac{1}{\cos(\theta + \theta_A) + \tan(\theta + \theta_A) \sin(\theta + \theta_A)} dW \end{aligned} \quad (6)$$

再根据瑞典条分法求解安全系数，公式如下[12]：

$$F_s = \frac{cL_{\text{弧}AB} + \tan\varphi \sum dN}{\sum dT} \quad (7)$$

联合式(6)与(7)可得到安全系数求解的微积分解, 如下:

$$F_s = \frac{c \int_{x_A}^{x_B} \psi(x) dx + \tan \varphi \int_{x_A}^{x_B} dN}{\int_{x_A}^{x_B} dT} \quad (8)$$

其中, c 为土质边坡内聚力, KPa; φ 为土的内摩擦角, °; (x_A, x_B) 为检索积分区间, 即 A 与 B 点的横坐标。

4. 实例分析

4.1. 工程概况

以一不规则边坡为例, 该边坡坡形内的若干坐标及土的强度参数实测参数如表 1, 边坡坡形如图 2。

Table 1. Slope shape and soil strength parameters

表 1. 边坡坡形及土的强度参数

x/m	0	8	15	22	28	35	46	52	66	72	79	85	95	110
y/m	50	50	45	40	45	40	35	30	35	40	20	15	20	10
参数	内聚力(c): 10 KPa; 内摩擦角(φ): 20°; 重度(γ): 15 KN/m ³													

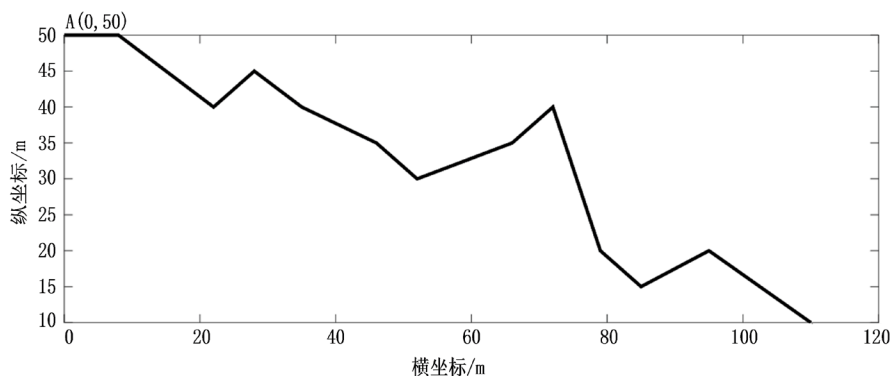


Figure 2. Slope shape
图 2. 边坡坡形

4.2. 计算结果

通过观察该坡形发现, 在 B 的横坐标 0~50 m、50~90 m、90~120 m 的三个范围内均存在发生滑坡的可能性, 利用编制的检索软件对三个区间分别进行检索最危险滑面后发现: 0~50 m 内的最危险滑面在 0~21.8 m 范围内, 安全系数为 0.9391 (如图 3); 50~90 m 内的最危险滑面在 0~84.5 m 范围内, 安全系数为 1.0657 (如图 4); 而在 90~120 m 内的最危险滑面在 0~109.6 m 范围内, 安全系数为 1.0985 (如图 5)。

在上述三个区段内均可能发生滑坡灾害, 0~50 m 范围内安全系数最低, 最有可能发生滑坡灾害, 但因其规模最小, 发生滑坡灾害的危害性相对较小。相对而言, 90~120 m 区段内, 安全系数最高, 但是因其规模最大, 在发生滑坡灾害时, 危害性也是最大的。所以, 在对这一不规则滑坡进行防治时, 应先处理 50~90 m 和 90~120 m 两个范围内的最危险滑动面。

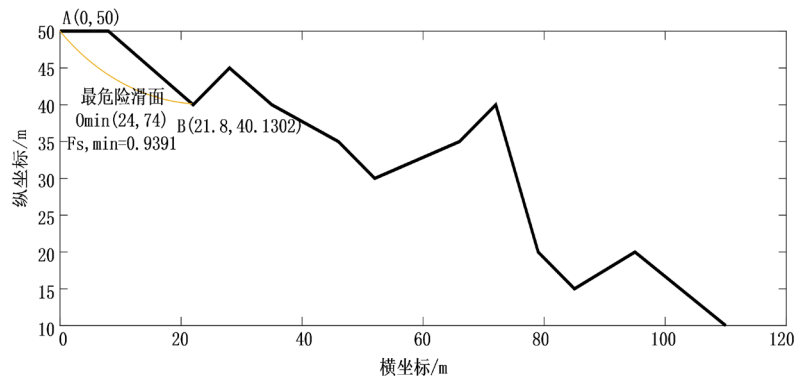


Figure 3. Within the range of 0~50 m
图 3. 0~50 m 范围内

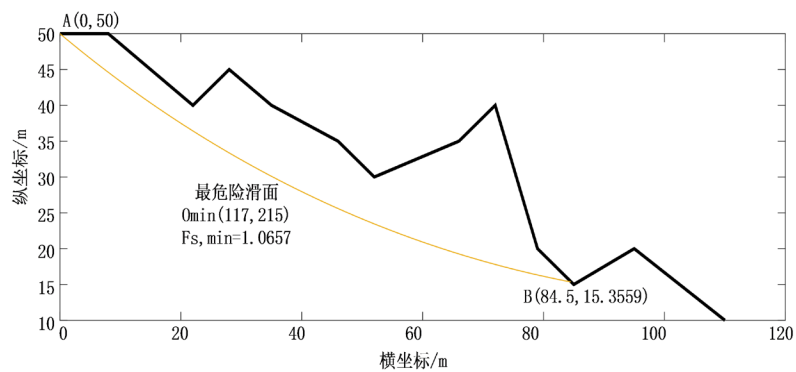


Figure 4. Within the range of 50~90 m
图 4. 50~90 m 范围内

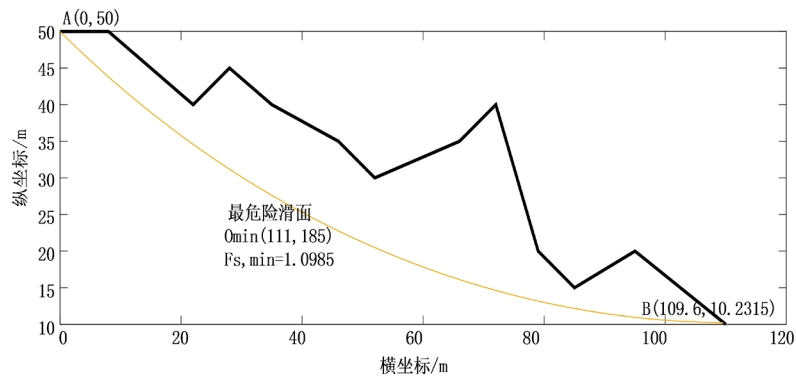


Figure 5. Within the range of 90~120 m
图 5. 90~120 m 范围内

5. 结论

- 1) 利用微积分法代替传统的条分法来对不规则滑坡进行稳定性分析, 并结合瑞典圆弧法推导出微积分法滑坡安全系数的推导公式, 可以有效地提高安全系数计算的精度。
- 2) 采用微积分算法对不规则边坡进行稳定性分析的优点是可以计算不规则滑坡面各范围内的安全系数, 并可以运用基于微积分算法的检索软件来确定不规则边坡的最危险滑动面, 从而达到动态分析的效果。

3) 目前大多数边坡为不规则边坡,影响不规则边坡稳定性的因素有很多,本身的边坡坡形也是影响不规则边坡稳定性的重要因素之一。在实际工程运用中,采用微积分算法对不规则滑坡面做稳定性分析,对于大多数情况下的不规则滑坡面都能有效的计算出不规则滑坡面内各个连续段的安全系数以及最危险滑面,这对于滑坡的防治能够起到很好的技术参考。

参考文献

- [1] 李行. 滑坡成因分析及防治策略研究[J]. 工程技术研究, 2020, 5(14): 36-37.
- [2] 成永刚. 近二十年来国内滑坡研究的现状及动态[J]. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(4): 1-2.
- [3] 程温鸣, 彭令, 牛瑞卿. 基于粗糙集理论的滑坡易发性评价: 以三峡库区秭归县境内为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 1083-1090.
- [4] 巩云鹏. 滑坡勘察及治理设计研究[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(9): 58-59.
- [5] 李军. 基于 Verhulst 预测模型与现场监测的滑坡预报[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(3): 108-110.
- [6] 杨恩祈. 六家岩脚滑坡稳定性计算与评价[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(2): 8-9.
- [7] 周维星, 吴易. 反演法在滑坡稳定性评价中的应用分析[J]. 世界有色金属, 2020(9): 165-166.
- [8] 刘珉玮, 夏承志, 卢应发. 边坡渐进破坏不平衡推力法在滑坡治理中的应用[J]. 湖北工业大学学报, 2019, 34(4): 90-93.
- [9] 张凌晨, 卢应发. 基于滑坡破坏渐进特征的新不平衡推力法及其应用[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(26): 10875-10880.
- [10] 冯炜, 张菊峰. 基于极限平衡法的某边坡稳定性分析与抗滑桩支护[J]. 四川建筑, 2020, 40(6): 134-136.
- [11] 崔中良, 张东方, 姚艳领. 极限平衡法在边坡稳定性分析中的应用[J]. 中国锰业, 2016, 34(5): 135-137.
- [12] 冯辉荣, 窦博, 王国金. 基于 Visual Basic 的路基边坡稳定性分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2020, 38(5): 12-15.