

# 土质边坡稳定性影响因素的研究

牛越先<sup>1</sup>, 马俊<sup>2</sup>

(1. 山西省水土保持监测中心, 太原 030002; 2. 中国石油天然气股份有限公司西气东输管道分公司, 上海 200122)

**摘要:** 稳定性分析是边坡工程一项重要的工作, 目前在工程设计中常用的边坡稳定分析方法为安全系数法, 它是经过长期工程实践证明的一种有效设计方法。由于现阶段只有理论上计算边坡安全系数的公式, 并不能直观感性的认识, 不便于工程实践上应用。针对影响边坡稳定性的主要参数, 采用极限平衡原理、强度折减法对土的抗剪强度指标粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ , 边坡的坡角  $\alpha$  和坡高  $H$  进行分析, 通过不断改变单一变量的值, 得出其与边坡安全系数的关系, 并采用软件分析拟合出公式, 从而得出简单可行的判断边坡安全系数的方法。

**关键词:** 边坡稳定; 极限平衡原理; 强度折减法

中图分类号: TU4; P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)04-0273-04

## A Study of the Effect Factor on Slope Stability

NIU Yue-xian<sup>1</sup>, MA Jun<sup>2</sup>

(1. Soil and Water Conservation Monitoring Center of Shanxi Province, Taiyuan 030002, China;

2. West to East Gas Pipeline Corporation of CNPC, Shanghai 200122, China)

**Abstract:** Slope stability analysis is an important work project, now commonly used in engineering analysis of slope stability safety factor method, which is the result of long-term project proved an effective design method. Because at this stage, only the theoretical slope safety factor calculation formula, and not intuitive perceptual knowledge, engineering practice is not easy application. In this paper, the main parameters affecting slope stability, using the limit equilibrium principle, strength reduction of soil shear strength parameters  $c$  and the slope of the slope angle and slope height  $H$  analysis, by changing a single variable, was out its relationship with the slope safety factor, and using software to analyze the fitting formula to arrive at a simple and feasible method to determine the slope safety factor.

**Key words:** slope stability; limit equilibrium method; strength reduction method

边坡稳定分析方法的发展最引人注目, 它是经典土力学最早试图解决而至今仍未圆满解决的课题。经过一个多世纪的发展, 形成了多种边坡稳定分析方法, 如极限平衡法、极限分析法、数值分析法、有限元强度折减法、边坡专家系统方法等<sup>[1]</sup>。稳定性分析是边坡工程一项重要的工作, 目前在工程设计中常用的边坡稳定分析方法为安全系数法, 它是经过长期工程实践证明的一种有效设计方法。由于边坡表面倾斜, 在土体自重以及其他外力作用下, 整个土体都有从高处向低处滑动的趋势。引起失稳的根本原因在于土体内部某个面上的剪应力达到了它的抗剪强度, 稳定平衡遭到破坏。而剪应力达到抗剪强度的起因有两

个: 一是剪应力的增加, 二是由于土体本身抗剪强度的减小。由此可见, 为了有效防止滑坡, 在设计时要经过仔细的稳定分析。影响边坡稳定的主要参数为土的抗剪强度指标  $c$  和  $\varphi$ , 边坡的坡角  $\alpha$  和坡高  $H$ 。由于现阶段只有理论上计算边坡安全系数的公式, 并不能直观感性的认识, 不便于工程实践上的应用。本文针对影响边坡稳定性的主要参数, 采用极限平衡原理、强度折减法对土的抗剪强度指标粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ , 边坡的坡角  $\alpha$  和坡高  $H$  进行分析, 通过不断改变单一变量的值, 得出其与边坡安全系数的关系, 并采用软件分析拟合出公式, 从而得出简单可行的判断边坡安全系数的方法。

收稿日期: 2011-06-18

修回日期: 2011-07-18

资助项目: 山西省水利厅资助项目(晋坝科 070301)

作者简介: 牛越先(1964-), 女, 山西省万荣县人, 学士, 高级工程师, 主要从事水土保持监督监测和生产建设项目水土保持方案技术评审工作。E-mail: sltsbjnxyx@163.com

1 土质边坡稳定的基本理论

1.1 极限平衡原理

极限平衡法<sup>[2-3]</sup>是边坡稳定分析中最常用的方法,它是通过分析在临近破坏状况下,土体外力与内部强度所提供抗力之间的平衡,计算土体在自身和外荷作用下的土坡稳定性程度。传统的边坡稳定性分析方法中,为了便于分析计算的进行,做了许多假设<sup>[4-5]</sup>,如假设一个滑动面、不考虑土体内部的应力-应变关系等。极限平衡理论是根据力学平衡原理分析边坡破坏模式的受力状态,采用抗滑力和下滑力之间的关系来评价边坡稳定性;毕肖普等人将稳定性定义为沿整个滑裂面的抗剪强度与实际产生的剪应力之比。条分法是一种方便有效的边坡稳定性极限平衡计算方法,于 1916 年由瑞典人彼得森提出。随着土力学学科不断发展,经费伦纽斯、泰勒等人的不断改进,条分法不断得到改进,着重致力于三方面的改进:探索最危险滑弧位置的规律,对基本假定作改进和补充;提出新的计算方法使之更加符合实际情况;利用计算机技术提高计算速度及对结果的可视化输出。

1.2 强度折减法

有限元强度折减系数法<sup>[6-7]</sup>的基本原理为:抗剪强度折减土体所发挥的最大抗剪强度与外荷载在边坡内所产生的实际剪应力之比<sup>[8-10]</sup>。系数定义为在外荷载保持不变的情况下,边坡内岩在弹塑性有限元静力计算<sup>[11-12]</sup>中,通过不断降低坡体和滑动面的强度参数(粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ ),使系统达到不稳定状态,即有限元静力计算不收敛,由此而获得的强度折减系数就是边坡的安全系数。在计算过程中将坡体和滑动面的强度参数(粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ )逐步折减,即

$$c' = \frac{c}{F} \quad \phi = \arctan \frac{\tan \varphi}{F}$$

式中:  $F$  ——折减系数。

将折减后所得参数输入进行有限元计算,若程序计算收敛,则滑坡处于稳定状态;继续折减,当程序计算不收敛,即达到失稳状态时的折减系数即为滑坡的安全系数。

2 影响土质边坡稳定性因素的分析

2.1 坡高对安全系数的影响

坡角取  $30^\circ$ ,  $c = 42 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 17^\circ$ ,土容重取  $25 \text{ kN/m}^3$ ,坡高分别取 15, 25, 35, 45, 55 m 进行分析,分析计算结果见表 1。

表 1 不同坡高的安全系数

方法	15 m	25 m	35 m	45 m	55 m
瑞典条分法	1.531	1.194	1.041	0.952	0.892
简化 Bishop 法	1.609	1.261	1.100	1.006	0.942
JanBu 法	1.633	1.284	1.120	1.021	0.956
强度折减法	1.678	1.331	1.170	1.076	1.013

随着坡高的增加,边坡安全系数不断减小,绘制其关系曲线见图 1。

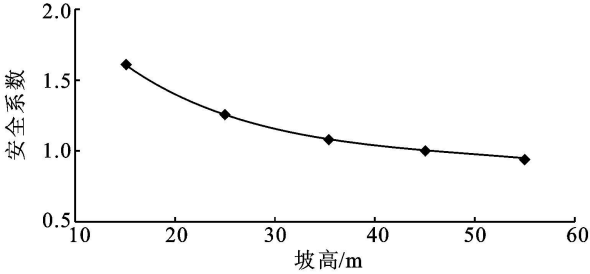


图 1 坡高与安全系数关系

可见,随着边坡高度的增加,安全系数逐渐降低,即边坡高度越高,边坡越不稳定。利用 ORINGE 6.0 软件对以上数据进行拟合,得出边坡高度与安全系数的函数关系式为:

$$K = 1.62037 + 1.1529 \exp(-H/94.77794)$$

式中:  $K$  ——安全系数;  $H$  ——坡高。

2.2 坡角对安全系数的影响

坡高取 35 m,  $c = 42 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 17^\circ$ ,土容重取  $25 \text{ kN/m}^3$ ,坡角分别取  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $40^\circ$  进行分析,分析计算结果见图 2。

表 2 不同坡角的安全系数

方法	坡角/(°)				
	10	20	30	35	40
瑞典条分法	2.393	1.399	1.041	0.932	0.847
简化 Bishop 法	2.519	1.484	1.101	0.981	0.886
JanBu 法	2.527	1.495	1.120	1.002	0.910
强度折减法	2.589	1.554	1.172	1.052	0.950

随着坡角的不断增大,边坡安全系数逐渐减小,绘制关系曲线见图 2。

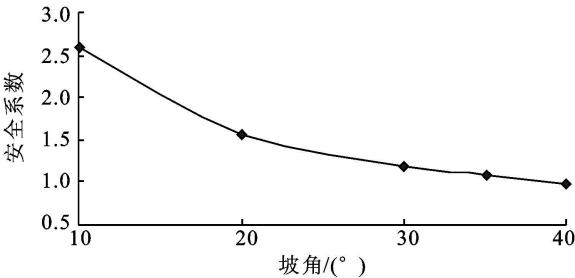


图 2 坡角与安全系数关系

可见,随着坡角的增加,安全系数逐渐降低,即边坡越陡,边坡越不稳定,当坡角达到  $35^\circ$  时,即安全系

数小于 1 时, 边坡进入不稳定状态。利用 ORINGE 6.0 软件对以上数据进行拟合, 得出边坡坡角与安全系数的函数关系式为:

$$K=5.1068-0.37637\theta^2-2.49333E-4\theta^3+1.65333E-6\theta$$

式中:  $\theta$ ——坡角。

2.3 粘聚力对安全系数的影响

坡角取  $30^\circ$ , 坡高取 35 m,  $\varphi=17^\circ$ , 土容重取  $25\text{ kN/m}^3$ 。粘聚力分别取 0, 21, 30, 42, 50 kPa 进行分析研究, 分析计算结果见表 3。

表 3 不同粘聚力的安全系数

方法	粘聚力/ kPa				
	0	21	30	42	50
瑞典条分法	0.515	0.833	0.925	1.041	1.115
简化 Bishop 法	0.515	0.877	0.978	1.101	1.179
JanBu 法	0.515	0.887	0.992	1.120	1.200
强度折减法	0.586	0.947	1.048	1.171	1.250

随着粘聚力的不断增大, 边坡的安全系数不断增大, 绘制关系曲线见图 3。

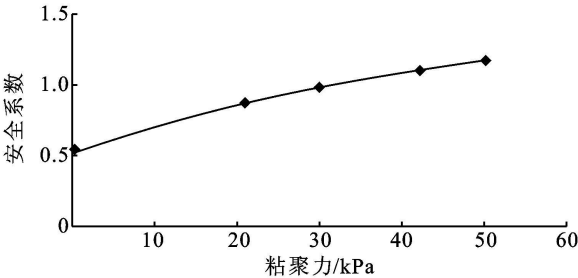


图 3 粘聚力与安全系数关系

可见, 随着土粘聚力的减小, 安全系数逐渐减小, 即粘聚力越小, 边坡越不稳定, 当安全系数小于 1 时, 边坡进入不稳定状态。

利用 ORINGE 6.0 软件对以上数据进行拟合, 得出土体粘聚力与安全系数的函数关系式为:

$$K=0.55327+0.01317c$$

式中:  $c$ ——粘聚力。

2.4 内摩擦角对安全系数的影响

坡角取  $30^\circ$ , 坡高取 35 m,  $c=42\text{ kPa}$ ,  $\varphi=17^\circ$ , 土容重取  $25\text{ kN/m}^3$ , 内摩擦角分别取  $17^\circ, 24^\circ, 30^\circ, 34^\circ, 40^\circ$  进行分析, 分析计算结果见表 4。

表 4 不同内摩擦角的安全系数

方法	内摩擦角/( $^\circ$ )				
	17	24	30	34	40
瑞典条分法	1.041	1.331	1.597	1.790	2.113
简化 Bishop 法	1.101	1.406	1.684	1.885	2.219
JanBu 法	1.120	1.425	1.705	1.904	2.279
强度折减法	1.171	1.407	1.754	1.955	2.290

随着内摩擦角的不断增大, 边坡的安全系数也不断增加, 绘制关系曲线见图 4。

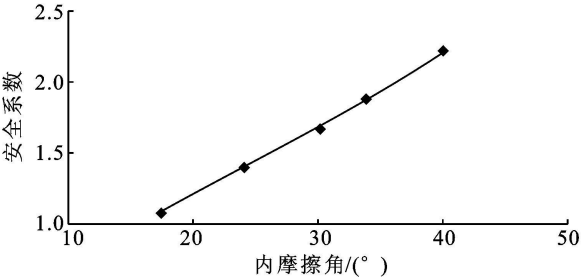


图 4 内摩擦角与安全系数关系

可见, 随着土内摩擦角的减小, 安全系数逐渐降低, 即土内摩擦角越小, 边坡越不稳定, 当安全系数小于 1 时, 边坡进入不稳定状态。

利用 ORINGE 6.0 软件对以上数据进行拟合, 得出土体内摩擦角与安全系数的函数关系式为:

$$K=0.20852+0.08227\varphi$$

式中:  $\varphi$ ——内摩擦角。

2.5 各参数影响结果分析

分析影响边坡稳定的各因素与边坡稳定系数之间的相关性<sup>[13]</sup>, 即分析各因素的变化对于边坡稳定系数的影响, 通过分析可以找到对边坡稳定影响较大的因素, 在工程实践中, 应对这些因素尤为注意。

通过以上计算结果和曲线可以清楚看到, 土体的内摩擦角及粘聚力的变化引起安全系数较大的改变, 即土体的内摩擦角及粘聚力较坡高和坡角对安全系数影响显著。

采用灰色系统理论, 对各参数对安全系数的相关性进行分析, 计算灰色关联系数:

$$\xi_i(k) = (\min_{i=1,2,\dots,n} \min_{k=1,2,\dots,n} |x_o(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i=1,2,\dots,n} \max_{k=1,2,\dots,n} |x_o(k) - x_i(k)|) / (|x_o(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i=1,2,\dots,n} \max_{k=1,2,\dots,n} |x_o(k) - x_i(k)|)$$

$\rho \in (0, 1)$  分辨系数

$$\text{计算灰色关联度 } r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$

采用以上公式计算, 得到灰色关联度为  $\gamma_c = 0.8384$ ,  $\gamma_\varphi = 0.717$ ,  $\gamma_h = 0.634$ ,  $\gamma_\theta = 0.621$ , 由此可见, 土体的内摩擦角及粘聚力较坡高和坡角对安全系数影响显著。

3 结 语

以上研究结果表明: 边坡高度的增加, 会降低边坡的安全性, 随着边坡角度的增加, 边坡的安全性会随之降低, 土体的抗剪强度指标内摩擦角及粘聚力越大, 边坡越稳定。通过计算灰色关联度, 对边坡高度、坡角、内摩擦角及粘聚力做敏感性分析, 可以看出土体的内摩擦角及粘聚力较坡高和坡角对安全系数影

响显著。针对影响土质边坡稳定性的主要参数,采用极限平衡原理、强度折减法对土的抗剪强度指标粘聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$ , 边坡的坡角  $\alpha$  和坡高  $H$  进行分析,通过不断改变单一变量的值,得出其与边坡安全系数的关系,并采用软件分析拟合出简易公式,从而得出简单可行的判断边坡安全系数的方法。

参考文献:

- [1] 郑颖人, 赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报, 2005, 38(1): 91-98.
- [2] 高大钊. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [3] 张天宝. 土坡稳定分析和土工建筑物边坡设计[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1987.
- [4] 冯守中. 公路软基处理新技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [5] 徐泽中. 公路软土地基路堤设计与施工关键技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [6] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键, 等. 有限元极限分析法发展及

其在岩土工程中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12): 39-62.

- [7] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388.
- [8] 迟世春, 关立军. 基于强度折减的拉格朗日差分方法分析土坡稳定[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 42-46.
- [9] Matsui T, San K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. Soils and Foundations JSSMFM, 1992, 32(1): 59-70.
- [10] Jeong S, Kim B, Won J, et al. Uncoupled analysis of stabilizing piles in weathered slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2003, 30(8): 671-682.
- [11] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 3 版. 北京: 人民教育出版社, 1980.
- [12] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 112-118.
- [13] 聂士诚. 土质边坡稳定的可靠度分析及其土性参数的敏感性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2002.

## 欢迎订阅 2012 年《水土保持研究》

《水土保持研究》创刊于 1985 年, 双月刊, 中文版, 属地球科学类期刊, 主管单位为中国科学院, 由中国科学院水利部水土保持研究所主办。由《中国科技论文统计源期刊》《中国科学引文数据库统计源期刊》《中文核心期刊要目总览》等收编。本刊物为 A4 开本, 272 页/期。刊号为 ISSN1005-3409, CN 61-1272/P。国内邮发代号: 52-211, 定价 25.0 元/册。

**办刊宗旨:** 紧密跟踪水土保持学科的发展动向, 及时报道本学科前沿领域科学理论、技术创新及其实践应用研究最新成果, 积极引导和推动水土保持学科和水土保持实践的发展与繁荣。

**报道内容:** 土壤侵蚀、旱涝、滑坡、泥石流、风蚀等水土流失灾害的现状与发展动态; 水土流失规律研究、监测预报技术研发成就与监测预报结果; 水土流失治理措施与效益分析; 水土流失地区生态环境建设与社会经济可持续发展研究; 计算机、遥感工程、生物工程等边缘学科新技术、新理论、新方法在水土保持科研及其实践中的应用; 国外水土流失现状及水土保持研究新动态等。

**读者对象:** 从事水保科技研究、教学与推广的科教工作者及有关行政管理人员; 国内外环境科学、地学、农业、林业、水利等相关学科科教人员及大专院校师生。

地址: 陕西省杨凌区西农路 26 号《水土保持研究》编辑部

邮编: 712100

电话: (029) 87012705

E-mail: research@ms.iswc.ac.cn

http://www.iswc.ac.cn