

文章编号: 1001-5485(2011)01-0053-05

# 基于灰色关联度的边坡稳定影响因素分析

付建军<sup>1</sup>, 邱山鸣<sup>1</sup>, 赵海斌<sup>1</sup>, 时凯<sup>2</sup>, 邱冰<sup>3</sup>

(1 中国水电顾问集团中南勘测设计研究院, 长沙 410014 2 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430074;  
3 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

**摘要:** 强度折减法作为目前计算边坡安全系数常用方法之一, 一直应用于边坡稳定设计研究。首先介绍了强度折减法的基本原理、计算步骤, 利用 FLAC3D 内置语言 FISH 编制了相应计算控制程序, 使强度折减法在 FLAC3D 程序中得以实现; 接着, 建立了不同因素水平下的边坡数值模型, 采用强度折减法计算了各工况下边坡稳定的安全系数; 最后, 采用灰色关联度理论分析了安全系数与各影响因素的变化规律。分析结果表明: 简单均质边坡稳定各影响因素之中, 初始应力场为最重要的影响因素, 强度参数及泊松比的影响大于边坡几何参数的影响, 变形模量因素影响最小。

**关键词:** 强度折减法; 安全系数; 灰色关联度; 初始应力场; 变形模量  
**中图分类号:** O344.7 O317.3 **文献标识码:** A

## 1 概述

边坡变形稳定一直是众多学者研究的热点<sup>[1-3]</sup>, 其稳定状态不仅与边坡高度、边坡坡度、材料弹性模量、泊松比有关, 还与边坡强度参数内摩擦角、粘聚力、抗拉强度等相关。边坡稳定状态一般采用安全系数进行定量评价。国内外对边坡安全系数算法主要有极限平衡法和强度折减法 2 种。极限平衡法是假定边坡条块受力情况下按照经典力学方法求解, 一方面, 它无法准确计算条块间内力; 另一方面它无法解释边坡破坏机理, 且无法计算坡体位移。强度折减法<sup>[3-5]</sup>由于考虑了边坡岩体本构关系, 克服了条间力分布假定的缺点等原因, 逐渐成为边坡稳定安全系数计算的一种常用办法。

综上所述, 强度折减法计算边坡安全系数最重要的影响因素为边坡的工程条件和地质条件<sup>[6-8]</sup>。目前, 边坡稳定影响因素优势分析的数值算法主要为概率论统计分析法, 而概率论统计法研究的基础为“大样本”事件, 即需要大量的计算。灰色系统理论由于能解决“小样本”不确定性问题<sup>[9,10]</sup>, 且需要的计算量偏小, 是目前优势分析中一种常用方法。因此, 本文的研究思路为: 首先, 建立不同的因素水平边坡模型, 接着根据强度折减法的基本思路, 在 FLAC3D 软件中编译相应的强度折减程序, 并计算

各边坡模型中的安全系数, 最后, 采用灰色关联分析法对边坡影响因素进行优势分析。

## 2 边坡稳定分析中的强度折减法

### 2.1 强度折减法计算原理

强度折减法认为在外荷载保持不变的情况下, 边坡失稳破坏主要为岩体的剪切破坏。将边坡的安全系数定义为岩体自身固有抗剪强度与抵御外荷载所发挥的最低抗剪强度之比, 安全系数具有明显的强度储备的意义。

强度折减系数法的基本步骤是将土体参数  $c$  和  $\varphi$  值同时除以一个折减系数, 得到一组新的  $c'$  和  $\varphi'$  值, 然后作为新的材料参数代入数值计算程序进行试算, 当边坡处于临界状态时, 也即  $F$  再稍大一些, 边坡将发生破坏, 对应的  $F$  被称为边坡的稳定性系数, 此时土体即将发生剪切破坏, 即计算结果是指达到临界状态时的折减系数  $F$  具体公式为:

$$c' = \frac{1}{F} c; \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{1}{F} \tan\varphi\right). \quad (2)$$

### 2.2 FLAC3D 中强度折减法实现

Fish 语言是 FLAC3D 程序的内置编程语言, 其编写精练, 同时兼顾大家操作习惯, 不但可以嵌入命令流文件里工作, 而且还可以引用 FLAC3D 本身的

收稿日期: 2010-04-26 修回日期: 2010-07-06

作者简介: 付建军 (1983-), 男, 湖南浏阳人, 博士, 主要从事岩土工程计算、设计、安全监测及试验工作, (电话) 15874194479 (电子信箱) fjj71st@126.com

任何命令,突破了一般标准程序代码的限制,实现了读者对 FLAC3D软件的完美控制。通过 FISH语言使强度折减法在 FLAC3D上得到了实现。强度折减法程序流程图见图 1。

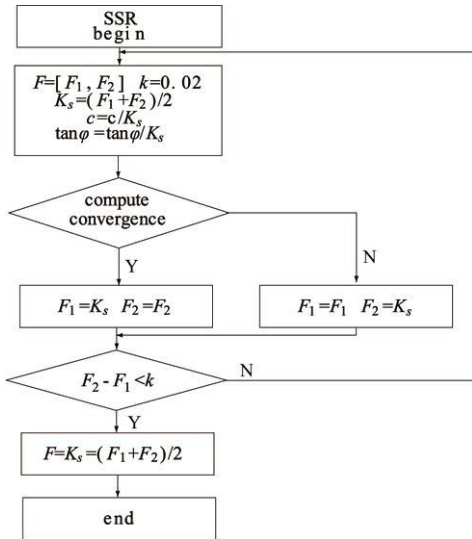


图 1 强度折减法流程

Fig 1 Flow process chart of strength reduction method

模型底部、左右边界、前后边界施加法向位移约束;  
④整个数值模型区域材料属性值相同。

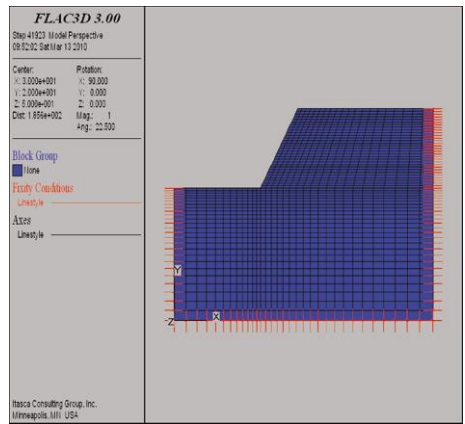


图 2 边坡数值计算模型

Fig 2 Numerical simulation model of slope

数值计算的步骤为:①根据表 1 中各因素的水平值建立数值模型;②计算初始平衡;③采用强度折减法计算边坡稳定安全系数。此状态即为临界状态,临界状态下坡体位移见图 3 临界状态下塑性区见图 4。各工况下边坡安全系数结果见表 2。

### 3 边坡安全系数计算

#### 3.1 因素水平选择

边坡稳定安全系数是初始应力场、边坡高度、边坡角度、弹性模量、泊松比、内摩擦角、粘聚力相互作用的结果。为便于分析计算,本文主要是对直线边坡进行分析,根据边坡因素水平建立了多种数值仿真分析模型,见表 1。

表 1 边坡安全稳定因素水平

Table 1 Factor and level of slope stability

水平	h/m	$\theta / (^{\circ})$	E/GPa	$\mu$	c/kPa	$\phi / (^{\circ})$	$\sigma_x / \text{MPa}$	$\sigma_y / \text{MPa}$
1	8	25	1	0.20	25	17	-1.0	-1.5
2	9	30	1.5	0.21	29	19	-1.5	-1.8
3	10	35	2	0.22	31	21	-2.0	-2.4
4	11	40	2.5	0.23	33	23	-2.5	-3.4
5	12	45	3	0.24	35	25	-3.0	-4.2
6	13	50	3.5	0.25	37	27	-3.5	-4.6
7	14	55	4	0.26	39	29	-4.0	-5.0
8	15	60	4.5	0.27	41	31	-4.5	-5.4
9	16	65	5	0.28	43	33	-5.0	-7.0

#### 3.2 数值计算模型及结果

本次模拟主要任务是为了获得安全系数,综合考虑计算机模拟速度及模拟计算结果精确性等各方因素,在数值模型建模过程中进行了以下细化(图 2):①按平面应变问题来考虑;②为了较准确获得安全系数大小,强度折减法精度控制在 0.02;③边坡

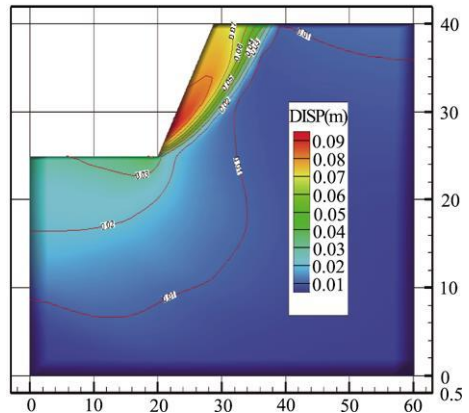


图 3 临界状态下位移等值线

Fig 3 Displacement contour under critical state

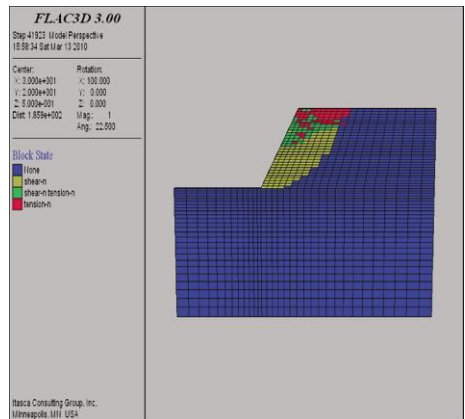


图 4 临界状态下塑性区

Fig 4 Plastic zone under critical state

表 2 各工况下边坡安全系数计算值

Table 2 Results of safety factor under different conditions

水平	1	2	3	4	5	6	7	8	9
F	2.248	2.166	2.037	1.920	1.768	1.709	1.615	1.545	1.463

### 4 基于灰色关联度的影响因素分析

边坡工程由于自身的不确定性,属于灰色系统。则相应的边坡安全系数影响因素优势分析也应属于灰色关联分析范畴。灰色关联分析方法基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密,曲线越接近,相应序列之间关联度就越大。即可根据各工况下边坡安全系数序列与内摩擦角、地应力、边坡高度、边坡角度等行为指标序列的关联度评价各因素影响。

#### 4.1 邓氏灰色关联度计算

设安全系数行为指标序列为  $X_0$  即

$$X_0 = (x_0(1), x_0(2), x_0(3), \dots, x_0(9)) = (2.248, 2.166, 2.037, 1.920, 1.768, 1.709, 1.615, 1.545, 1.463) \quad (3)$$

同理,边坡高度、坡角、变形模量、泊松比、粘聚力、内摩擦角、初始应力的行为指标序列可分别写成  $X_1, X_2, \dots, X_8$ 。

令分辨系数为  $\xi = 0.5$  则邓氏灰色关联度  $\gamma(x_0(k), x_i(k))$  为

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{m + \xi M}{\Delta_i(k) + \xi M} \quad (4)$$

式中:

$$m = \min_k \min_i |x_0(k) - x_i(k)|; \quad M = \max_k \max_i |x_0(k) - x_i(k)|; \quad \Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$$

根据式(4)运用灰色理论软件,可获得边坡各因素与稳定系数的灰色关联度,见表 3。

#### 4.2 绝对灰色关联度计算

令绝对关联度  $\epsilon_{0i}$  为

$$\epsilon_{0i} = \frac{1 + |\delta| + |\xi|}{1 + |\delta| + |\xi| + |\eta - \delta|} \quad (5)$$

式中  $\eta = \int_0^1 (X_i - x_i(1)) dt$  当  $i=0$  即为  $\eta_0$  绝对

关联度的计算结果见表 3。

#### 4.3 相对灰色关联度计算

由于边坡行为指标序列  $X_0, X_1, X_2, \dots, X_8$  长度相同且初值不等于 0 设  $X'_0, X'_i$  分别为  $X_0, X_i$  的初值像,则  $X'_0$  与  $X'_i$  的绝对关联度即为  $X_0$  与  $X_i$  的相对关联度  $\delta_i$ 。相对关联度的计算结果详见表 3。

初值像计算为

$$X'_i D_i(x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)) = \left( \frac{x_i(1)}{x_i(1)}, \frac{x_i(2)}{x_i(1)}, \dots, \frac{x_i(n)}{x_i(1)} \right) \quad (6)$$

#### 4.4 综合灰色关联度计算

设  $\epsilon_0$  和  $\delta$  分别为  $X_0$  与  $X_i$  的灰色绝对关联度和相对关联度,  $\theta \in [0, 1]$ , 则称  $X_0$  与  $X_i$  的灰色综合关联度为

$$\rho_{0i} = \theta \epsilon_{0i} + (1 - \theta) \delta_i \quad (7)$$

灰色综合关联度既体现了  $X_0$  与  $X_i$  的近似程度,又体现了  $X_0$  与  $X_i$  相对于始点的变化率接近程度,能较为全面表征序列之间是否紧密的一个数量指标,因此,本文主要是对边坡稳定状态下各参数进行敏感性分析,故取  $\theta = 0.25$ 。综合关联度计算结果见表 3。

#### 4.5 灰色关联度计算结果分析

从表 3 可以看出:邓氏关联度计算结果表明,泊松比、粘聚力、内摩擦角、边坡高度变化与边坡稳定的安全变化系数变化规律非常相似,关联度接近 0.8 初始应力场次之,变形模量最小。绝对关联度计算结果表明,各因素下绝对关联度基本处于 0.5015~0.5280 之间,泊松比变化规律与安全系数变化规律最接近。相对灰色关联度计算结果表明,初始应力的变化率与安全系数变化率最接近,数值处在 0.7456~0.7485 之间,变形模量变化率与安全系数变化率相差最大。综合灰色关联度计算结果表明,初始应力场从曲线变化规律到曲线变化速率最接近安全系数,取值为 0.6872~0.6901,即初始应力场被认为是影响边坡安全稳定最重要的因素。变形模量综合灰色关联度 0.5118 最小,这说明,就安全系数而言,变形模量影响力最小。泊松比综合灰色关联度大于弹性模量与泊松比的综合度,

表 3 因素与安全系数关联度分析

Table 3 Correlation analysis of impact factors and safety factor

灰色关联度	关联度因素							
	$h/m$	$\theta / (^\circ)$	$E/GPa$	$\mu$	$\tau/kPa$	$\varphi / (^\circ)$	$\sigma_x/MPa$	$\sigma_y/MPa$
邓氏	0.7433	0.694	0.5611	0.7854	0.7612	0.7487	0.6849	0.6983
绝对	0.5062	0.5015	0.5101	0.528	0.5028	0.5034	0.5148	0.5189
相对	0.5304	0.5235	0.5124	0.5562	0.5339	0.5313	0.7485	0.7456
综合	0.5243	0.518	0.5118	0.5491	0.5261	0.5243	0.6901	0.6872

这说明边坡稳定状态安全系数变化对泊松比的敏感性可能大于粘聚力及内摩擦角的影响。

综上所述,可见采用不同的关联度可能获得截然不同的结果。就邓氏关联度和绝对关联度而言,边坡稳定安全的因素优势分析宜采用邓氏关联度。与绝对关联度相比,综合关联度由于能考虑相似程度和变化率影响,宜优先采用。根据简单边坡灰色关联度分析的结果,可以认为,初始应力场为最重要的影响因素,强度参数及泊松比的影响大于边坡几何参数的影响,变形模量因素影响最小。

## 5 结 语

通过以上分析,可以得出以下结论:

(1)边坡设计最重要的一点是计算安全系数,与极限平衡法相比,强度折减法认为边坡安全系数不仅与强度参数、边坡几何参数有关,还与初始应力场、变形参数等因素有关,更符合工程实践。边坡安全系数计算宜采用强度折减法计算。

(2)采用 FLAC3D 内置语言 FISH 编制控制程序,能有效实现强度折减法在 FLAC3D 中的应用。

(3)灰色系统理论认为采用灰色关联度对“小样本”事件影响因素分析远优于概率统计分析法。因此,根据强度折减法计算各因素水平下安全稳定系数,然后采用灰色关联度对边坡稳定影响因素进行分析是有效的。

(4)简单边坡灰色关联度计算结果表明,边坡稳定各影响因素之中,初始应力场为准优因素,强度参数及泊松比优于边坡几何参数,变形模量最劣。

## 参考文献:

- [1] 梅松华,赵海斌,刘路平.拓溪水电站开关边坡变形分析[J].矿冶工程,2007,27(2):5-10 (MEI Songhua ZHAO Haibin LIU Luping Slope Deformation Analysis of Switch Station of Zhexi Hydropower Station[J]. Mining and Metallurgical Engineering 2007, 27(2): 5-10 (in Chinese))
- [2] 黄 达,何兴江,裴向军.煤矿排土场边坡变形失稳特征 FLAC3D 模拟分析[J].水文地质工程地质,2008(6):61-66 (HUANG Da HE Xingjiang PEIXiangjun. FLAC3D Simulation for Deformation Failure Characteristics of Mine Waste Accumulation Slope of a Coal Mine [J]. Hydrogeology & Engineering Geology 2008 (6): 61-66 (in Chinese))
- [3] 周太全,华 渊,宿树波.基于强度折减法的节理岩质边坡支护稳定性分析[J].金属矿山,2009(1):36-

- 39 (ZHOU Taiquan HUA Yuan SU Shubo Stability Analysis of Strengthened Jointed Rock Based on Strength Reduction Method [J]. Metal Mine 2009 (1): 36-39 (in Chinese))
- [4] 蔡晓光,范丽远,谢长旺,等.基于强度折减的加筋软土路堤边坡稳定分析[J].施工技术,2010,39(2):70-73 (CAI Xiaoguang FAN Liyuan XIE Changwang Slope Stability Analysis Method Based on Strength Reduction for Reinforced Embankment on Soft Clay Deposit [J]. Construction Technology 2010, 39(2): 70-73 (in Chinese))
- [5] 熊传治,杜维吾,彭 状,等.用有限元强度折减法求算边坡安全系数初探[J].矿冶工程,2008,28(2):13-17 (XIONG Chuazhi DU Weiwu PENG Zhuang et al The Primary Study on Safety Coefficient of Slope by Strength Reduction Finite Element Method [J]. Mining and Metallurgical Engineering 2008, 28(2): 13-17 (in Chinese))
- [6] 王云鹏,杨胜利.露井联采边坡稳定性影响因素分析[J].煤炭工程,2009(12):75-78 (WANG Yunpeng YANG Shengli Analysis on Influence Factors of Slope Stability for Surface Mining and Underground Mining Combination [J]. Coal Engineering 2009 (12): 75-78 (in Chinese))
- [7] 胡高社,任红珠.基于因素敏感性分析的人工排土场高边坡稳定性研究[J].工程地质学报,2007(4):555-558 (HU Gao she REN Hongzhu Stability Analysis of High Fill Slope Based on the Gene Sensitive Analysis [J]. Journal of Engineering Geology 2007 (4): 555-558 (in Chinese))
- [8] 谭文俊,郑海君,王运生.软岩对边坡影响的敏感性分析及工程对策[J].路基工程,2009(6):79-80 (TAN Wenjun ZHEN Haijun WANG Yunsheng Sensitivity Analysis and Engineering Countermeasures about the Impact of Soft Rock on the Slope [J]. Subgrade Engineering 2009 (6): 79-80 (in Chinese))
- [9] 王贵成,曹 平,林 杭.用灰色理论确定边坡最优监测点及安全系数[J].中南大学学报,2007,38(3):574-578 (WANG Guicheng CAO Ping LIN Hang Determination of Optimum Monitoring Point of Slope and Safety Factor Using Grey System Theory [J]. J Cent South Univ 2007, 38(3): 574-578 (in Chinese))
- [10] 韦寒波,高 谦.灰色理论在边坡岩体变形预测中的应用[J].有色金属,2008,60(2):31-35 (WEI Hanbo GAO Qian Application of Grey Theory in Slope Rock Mass Deformation Forecasting [J]. Nonferrous Metals 2008, 60(2): 31-35 (in Chinese))

(编辑:周晓雁)

## Study on Impact Factors of Slope Stability Based on Grey Correlation Analysis

FU Jian-jun<sup>1</sup>, QIU Shan-ming<sup>2</sup>, ZHAO Hai-bing<sup>3</sup>, SHI Kai<sup>1</sup>, QU Bing<sup>1</sup>

(1. Mid-South Design and Research Institute China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Changsha 410014, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China; 3. China Railway First Survey and Design Institute Group Co. Ltd, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The strength reduction method is used widely in design of slope stability as a common method for calculating safety factor. This paper introduces the basic principle and computational procedure of the strength reduction method. Programs the calculation program in FISH language built in FLAC3D, establishes numerical slope models under different factors and levels and calculates out the safety factors of slope stability under different working conditions using the strength reduction method. Finally, the relationship between safety factor and impact factors is obtained using grey correlation analysis. The results indicate that the initial stress field is the maximum one of all impact factors on simple isotropic slope, the intensity parameters and Poisson ratio have a bigger impact than geometric parameters, and the deformation modulus are the smallest.

**Key words:** strength reduction method, safety factor, grey correlation analysis, initial stress field, deformation modulus

(上接第 52 页)

[14] 余卫平, 汪小刚, 杨健, 等. 地下洞室群围岩稳定性分析及其结果的可视化[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3730—3736. (YU Wei-ping, WANG Xiao-gang, YANG Jian, et al. Stability Analysis of Surrounding Rock of Underground Excavations and Visualization of Its Results[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3730—3736. (in Chinese))

稳定三维有限元分析研究报告[R]. 南京: 河海大学, 2003. (REN Qing-wen. Report of 3D FEM Analysis of the Stability of Surrounding Rock for Underground Cavern Group of Right Bank of Suofengying Hydropower Station [R]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))

[15] 任青文. 乌江索风营水电站右岸地下厂房洞室群围岩

(编辑: 罗玉兰)

## Numerical Simulation of Stability of Surrounding Rock for Cavern Group of Underground Powerhouse at Right Bank of Suofengying Hydropower Station

LEI Jin-bo<sup>2</sup>, LIU Xiaom-in<sup>1</sup>, REN Qing-wen<sup>1</sup>, CHEN Cong-xin<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. School of Mechanics and Material, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to estimate the stability of the surrounding rock for cavern group of underground powerhouse at right bank of Suofengying Hydropower Station, the numerical simulation of the initial stress field, the excavating scheme, the excavating process, reinforced measures, stress and deformation of the surrounding for the underground cavern group are carried out by adopting a self-developed 3D Elastoplastic FEM Program. The results of numerical simulation indicate that the stability of the underground cavern group is good enough to meet the requirement of engineering design and provide the guidance for engineering design and construction.

**Key words:** Suofengying Hydropower Station, cavern group of underground powerhouse, stability of surrounding rock, numerical simulation