

# 岩质边坡稳定性分析及工程应用

张社荣<sup>1</sup>, 彭敏瑞<sup>1</sup>, 董绍尧<sup>2</sup>

(1. 天津大学建工学院, 天津 300072; 2. 中国水电顾问集团昆明勘测设计院, 昆明 650051)

**摘要:**岩质边坡的稳定性分析一直是岩土工程中的重要课题之一。综述了岩质边坡稳定分析的现有方法及研究进展,对主要计算方法极限平衡法和有限元法做了详细介绍,并联合使用二者对某个具体工程进行了稳定性分析。计算结果表明,采用有限元法和极限平衡两种方法结合使用来评价岩质边坡稳定性能是可行的,而对于复杂的岩质边坡,采用多种方法相互校核可以提高评价分析的准确度,这也是今后的研究方向。

**关键词:**岩质边坡;极限平衡法;有限元强度折减法;稳定分析

**中图分类号:**TV223

**文献标识码:**A

## 0 引言

岩质边坡的稳定分析是岩土工程中重要的研究内容之一。在我国,随着国民经济的发展,特别是西部大开发政策的实施,水利工程、铁路、公路及城市等基础设施建设方兴未艾,在这些工程中出现了许多岩石边坡工程,如三峡高边坡等。实际工程建设中又尤以岩石边坡的失稳给交通、建筑等造成极大的危害。而由于实际岩体中含有大量不同构造、产状和特性等不连续结构面(比如层面、节理、裂隙、软弱夹层、岩脉和断层破碎带等),给岩质边坡的稳定分析带来了巨大的困难。为了对边坡进行准确的稳定性分析,从而采取适当的开挖和支护措施,国内外学者和工程人员提出了许多理论和方法,大大促进了岩质边坡稳定性分析方法的发展。本文将首先对其中主要的研究方向和成果做简要介绍,然后采用不同分析方法联合使用来评价某具体的工程实例。

## 1 边坡稳定性分析的方法

目前工程实践中岩质边坡稳定性分析方法主要有两大类方法,一种是在边坡滑动面确定的情况下,根据滑裂面上抗滑力和滑动力比值直接计算安全系数。这类方法以极限平衡法最为经典,此外,关键块理论也属于这样的确定性分析方法。另外一类方法则是借助计算机进行数值分析(例如有限元、离散元、块体元和DDA等)从而确定边坡的位移场和应力场,再用超载法、强度折减法使边坡处于极限状态,从而间接得到安全系数。这种方法同时可以考虑位移协调条件和岩体本

构关系等。现将几种主要的岩石边坡的稳定性方法做简要叙述。

### 1.1 极限平衡法

极限平衡理论是经典的确定性方法,具体做法是将滑动趋势范围内的边坡岩体按某种规则化为一个个小块体,通过块体的平衡条件来建立整个边坡的静力平衡方程,从而求解安全系数<sup>[1]</sup>。其基本出发点是把岩块看作刚体,不考虑岩体应力应变关系,因此无法考虑边坡的变形与分布。国内外学者针对刚体极限平衡法进行大量的研究,也取得了一定的成果:杨松林(1999)提出了适用范围更广泛的广义条分法,广义条分法考虑了条块间分界面的应力变形关系,并采用优化搜索的方法给出了相对最危险的潜在滑动面及其安全系数;D. Stark等(1998)将二维极限平衡法推广到三维计算;李冬田(2001)提出一种三维的岩石边坡极限平衡法,应用岩石边坡多层DEM几何模型,参照简化Bishop法的假定,进行边坡稳定性分析的层分析方法。

### 1.2 数值分析法

数值分析方法主要包括有限单元法(FEM)、边界单元法(BEM)、离散单元法(DEM)以及不连续变形分析方法(DDA)等。由于岩质边坡工程所处的边界条件和地质环境复杂,加上岩体本身不连续性、不均匀性等特性,使得边坡工程问题十分复杂,而数值分析方法可以根据岩体的破坏准则,确定边坡的塑性区、拉裂和压碎区,可以得到岩质边坡的应力和位移场,可以模拟岩质边坡的开挖和支护,可以考虑地下水渗流、地震等因素对边坡稳定性的影响等,因此在岩质边坡稳定性分析中正发挥着越来越重要的作用。

有限单元法是目前使用最广泛的一种数值方法,在边坡稳定评价中也是应用最早的方法之一。有限元法分析边坡稳定

性的步骤通常是首先算出边坡内每个单元的应力,然后根据整个滑裂面的抗剪强度与实际产生的剪应力之比来求得安全系数。Duncan(1996)指出安全系数可以定义为使边坡刚好达到临界收敛状态时对岩土体的剪切强度进行折减的程度。因此基于强度折减法的有限元分析法在工程实际中越来越广泛的应用。随着计算机技术的发展,对于岩土体材料的弹塑性、粘弹塑性本构方程的有限元模拟分析,使得岩质边坡的分析得到了进一步发展。但是,有限元法同时也存在需要进一步研究的问题,例如岩体本构模型的选择,收敛准则和流动法则的选用,网格剖分精度等等。

1.3 其他方法

由于岩质边坡形态的复杂性,确定性计算方法不能概括其复杂性,因此发展了许多不确定性分析方法。目前主要的不确定性方法包括可靠度方法、模糊数学法、人工智能法和灰色预测系统法等几种。由于边坡分析中有许多不确定性因素,使得边坡的安全系数受到人为经验的制约。可靠度方法随机变量的取值除了重度、粘聚力和内摩擦角外,同时考虑弹模、泊松比、剪胀角和侧压力系数的影响。可靠度研究是一个系统的整体设计,需要研究子系统部分和积累资料。由于设计公式本身往往有较大误差,可靠度法目前没有得到广泛研究。应用系统科学、人工智能、神经网络和模糊数学等新兴学科理论,综合研究岩质边坡工程系统的不确定性和工程经验,发展出一套智能力学方法可能是解决复杂岩质边坡工程设计问题的一条有效途径,但是由于基础研究难度大,一些基本原则受基本经验确定主观性大等等的因素制约,不确定性分析仍然处于探索阶段,目前还没有在实际工程中普遍应用。

由于岩质边坡工程实际情况的复杂性和多样性,采用单纯一种方法不能完全准确判断边坡特性,不同分析方法联合使用时岩石边坡稳定性分析的发展趋势;本文采用极限平衡法和有限元强度折减法联合使用对某岩质边坡工程实例进行了稳定性评价。

2 计算原理

2.1 强度折减法思路

边坡稳定分析中,边坡在外荷载或自重的作用下失稳破坏时,塑性区会贯穿整个坡体而形成一滑裂带,整个坡体会沿着这个滑裂带移动,从而使得滑裂带上的坡体成为机动结构,因而其有限元计算结果会不收敛。有限元强度折减系数法正是基于这一点提出来的。有限元强度折减系数法的基本思想与传统的极限平衡方法一致,均可称之为强度储备安全度。其基本原理是将岩土体参数  $c$ 、 $\varphi$  值同时除以一个折减系数  $F_{trial}$ ,得到一组新的  $c'$ 、 $\varphi'$  值,然后作为新的材料参数带入试算,当计算正好收敛时,也即  $F_{trial}$  再稍大一些(数量级一般为  $10^{-3}$ ),计算便不收敛,对应的  $F_{trial}$  被称为坡体的最小安全系数,此时岩土体达到临界状态,发生剪切破坏。

$$c' = \frac{c}{F_{trial}} \tag{1}$$

$$\varphi' = \arctan \left| \frac{1}{F_{trial}} \tan \varphi \right| \tag{2}$$

2.2 强度折减法与极限平衡法安全系数比较

极限平衡法中,边坡稳定安全系数定义为沿滑移面的

抗剪强度与滑移面的实际剪力之比。公式表示为:

$$F_s = \frac{\int_l (\sigma \tan \varphi + c) dl}{\int_l \tau dl} \tag{3}$$

上式同时除以  $F_s$ ,变为:

$$1 = \frac{\int_l (\sigma \tan \varphi / F_s + c / F_s) dl}{\int_l \tau dl} = \frac{\int_l (\sigma \tan \varphi' + c') dl}{\int_l \tau dl} \tag{4}$$

其中, $c' = c / F_s$ ,  $\varphi' = \arctan(\tan \varphi / F_s)$ ,逐渐调整系数  $F_s$ ,得到不同的  $c'$  和  $\varphi'$ ,反复分析,直至坡体处于临界收敛状态,此时对应的  $F_s$  值即为边坡稳定性安全系数。由此可见强度折减法与极限平衡法计算所得的安全系数具有相同的物理意义。

3 工程应用

3.1 工程介绍

某水电站尾水隧洞边坡的开挖工程,由于出口边坡部位山坡地形较陡,垂直山坡的地形坡度一般为  $35^\circ \sim 45^\circ$ 。坡积层厚度约为  $1 \sim 3$  m,基岩为花岗岩,全强风化厚度约  $20 \sim 40$  m(受断层影响处较厚)。洞室左侧边坡的走向为  $N11.5^\circ W$ ,倾向  $SW$ ,最大坡高垂直高度约为  $150$  m。 $F_1$  断层从边坡前段通过,两断层带及其间所夹岩体的总宽度约  $50$  m,分布的其他断层有  $F_{30}$ 、 $F_7$ 、 $F_{42}$ ;发育的节理与洞脸边坡相同。由于受断层影响,边坡岩体风化较深,全、强风化底界最大深度约  $50$  m,边坡下部多为弱风化上部岩体。边坡上的地下水高度(自坡脚起)一般小于  $50$  m。全风化、少量强风化带及断层破碎带,岩石强度低,为散体结构;强风化带、少量弱风化上部及断层影响带为碎裂结构,边坡部位大部分为弱下、微新风化带岩体。边坡的破坏形式为圆弧形破坏。各岩层的物理力学指标见表 1。开挖后右侧边坡最大开挖垂直深度约  $40$  m,开挖后坡高约  $143$  m。

表 1 边坡岩体力学参数表

岩体类别	天然 容重/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	饱和 容重/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	弹性 模量/ GPa	泊松比	岩体抗剪断峰值强度	
					摩擦角/ ( $^\circ$ )	$c'$ / MPa
全风化带	22.0	23.0	0.5	0.30	27	0.10
强风化带	22.0	23.0	1.0	0.30	35	0.15
弱上风化带	25.1	25.1	8.0	0.22	45	0.80
弱下风化带	25.4	25.4	10.0	0.22	48	0.90
微新风化带	26.1	26.1	18.0	0.20	51	1.50
断层	22.0	23.0	0.6	0.30	17	0.08

3.2 稳定性有限元分析

3.2.1 有限元模型

计算模型岩体由 6 种材料单元构成。材料的本构关系采用的是摩尔-库伦准则。该有限元模型采用的是 6 结点单元,计算是将其视为二维平面应变问题。计算剖面是由边坡、原始坡及开挖后场地组成。底部向下延伸约 1 倍坡高,总体高度约  $290$  m,左边界延至开挖边坡后缘地形平缓处,沿洞轴线长约  $368$  m。选取模型底部最左端点作为坐标原点,取水平向右为  $X$  轴的方向, $Y$  向为垂直向上。共剖分  $1\,044$  个单元, $2\,171$  个节点。

3.2.2 计算成果及分析

用生死单元模拟开挖过程,进行边坡开挖之后的稳定计算。计算得到的主要结果图包括开挖之后系数折减之前的位移矢量图、总应力矢量图、通过有限元强度折减计算得出的临界收敛状态时的最大可能滑动面图以及塑性屈服点分布图。

(1)开挖后安全系数及最大可能滑动面:边坡开挖之后,通过有限元强度折减计算,当强度折减系数为 2.371 时,坡体处于临界收敛状态,也即开挖之后边坡的安全系数为 2.371。最大可能滑动面的位置是从坡顶处向内部延伸至强风化带与弱上风化带交界处处向坡面贯穿,滑出点高程约为 665 m(开挖后地面高程为 580 m)。

(2)开挖后位移场特征:从所得的位移矢量图中可以看出,边坡开挖之后出现了不同程度的卸荷回弹。开挖形成的地表面在断层 F1 出露位置,有带物质挤出的趋势。此外,开挖坡面被断层 F7 贯穿位置处,带物质滑出的趋势明显,鉴于开挖坡体表面回弹趋势明显,建议进行坡面处系统锚杆的支护。

(3)开挖应力场。边坡开挖之后,系数折减之前,总应力在初始地应力场的作用下以压应力为主,在深处基本上为最小主应力呈竖向,最大主应力呈水平向。坡脚处应力分布图可见在坡面附近最大主应力方向与坡面平行,而最小主应力则与坡面垂直。

(4)塑性区:开挖之后在进行强度折减达到临界收敛状态时,塑性屈服点主要在断层 F<sub>1</sub>、F<sub>7</sub> 及 F<sub>30</sub> 内部大量分布,此外在断层 F<sub>30</sub> 上部岩体也有少量分布,同时在开挖坡顶处的全强风化带内部出现较大范围的塑性屈服区域。在坡顶处强风化带和弱上风化带交界点处塑性屈服区域贯穿,此处为开挖后的最危险滑动面。

3.3 稳定性极限平衡法分析

表 2 给出了采用不同的极限平衡法计算所得的安全系数值,几种方法计算所得的最危险滑动面位置相同。

表 2 极限平衡法计算结果				
计算方法	Ordinary	Bishop	Janbu	Morgenstern-Price
安全系数	2.203	2.261	2.173	2.256

3.4 不同分析方法的稳定性安全系数比较

为进行比较分析,表 3 给出了采用有限元法和刚体极限平衡法计算的安全系数和最大可能滑动面及滑出点高程。

表 3 不同方法所得的计算结果			
计算方法	安全系数	最危险滑动面位置	滑出点高程/m
有限元法	2.371	从坡顶处向内部延伸至强风化带与弱上风化带交界处处向坡面贯穿	665.00
刚体极限平衡法(bishop)	2.261	从坡顶处向内部延伸至强风化带与弱上风化带交界处处向坡面贯穿	665.00

最大可能滑动面位置及形状如图 1 所示。  
可见有限元法与刚体极限平衡法计算所得的安全系数二者颇为接近,有限元计算所得的安全系数与简化 bishop 的误差仅为 5%左右<sup>[8]</sup>。

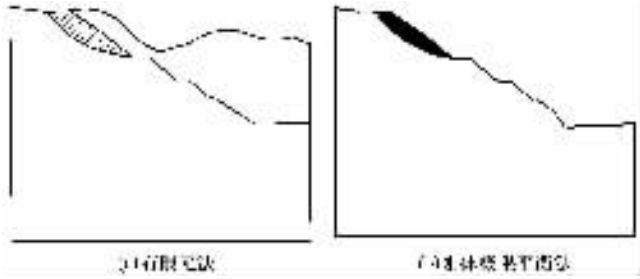


图 1 滑动面位置及形状

4 结语及建议

通过算例分析可得:采用有限元法和极限平衡两种方法结合使用来评价岩质边坡稳定性是可行的。

(1)强度折减有限元能得到与极限平衡几乎接近的安全系数和最大可能滑动面。通过算例表明有限元计算所得的安全系数与简化 bishop 的误差仅为 5%左右。二者结合来评价实际工程成为岩质边坡稳定性评价的发展趋势。

(2)有限元强度折减系数法克服传统极限平衡法的许多不足之处,得到了较符合实际情况的应力应变分布及发展趋势,分析方法概念清晰,意义明确,经由工程验证,可以用于岩质边坡的稳定分析。

(3)岩质边坡稳定性分析中虽然有很多新理论新方法,如神经网络、模糊数学等,但是由于还不是很完善,实际工程中应用的较少,需要继续发展这方面的理论和工程应用研究。

(4)岩质边坡是一个很复杂的体系,是应该结合使用的定性分析和定量分析方法来分析其稳定性的,现在通常还是考虑多种定量方法并举,相互校核来提高评价分析的准确度。本工程采用极限平衡和有限元法相互校核就是一个很好的例子。

参考文献:

[1] Duncan J M. State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996, 122 (7): 577—596.

[2] R. B. J. Brinkgreve. Plaxis2D-Version8[M]. Netherlands: A. A. Balkema publishers, 2002.

[3] 贾东远,阴 可,李艳华. 岩石边坡稳定性分析方法[J]. 地下空间,2004,24(2):250—255.

[4] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):343—346.

[5] 陈祖煜. 土质边坡稳定性分析——原理·方法·程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[6] 刘瑞玲. 岩石边坡稳定性和 Fuzzy 综合评判法[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(2):170—175.

[7] 钱家欢. 土力学[M]. 南京:河海大学出版社,1995.

[8] 杨 威,束一鸣. 边坡稳定性分析的有限元法[J]. 四川水利,2003,(6):32—35.

[9] 孙维丽,陈征宙,邓立立,等. 岩质高边坡的稳定性有限元分析[J]. 东华理工学院学报,2004,27(1):65—68.