

文章编号: 1000-7598-(2006) 04-0586-05

有限单元法分析边坡稳定的若干问题研究

秦卫星¹, 陈胜宏¹, 陈士军²

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 中国水利水电建设集团公司, 北京 100000)

摘 要: 系统介绍了有限单元法分析边坡稳定的基本原理, 对安全指标与判断标准两个重要方面进行了详细论述, 并采用面向对象技术编制了相应的可视化分析软件 AFEAS。结合一个边坡稳定工程实例, 对比了有限单元法和刚体极限平衡法的分析结果。分析结果证明了所给的安全指标与判断标准是可行的, 并表明了有限单元法分析边坡稳定的优越性。

关 键 词: 边坡稳定; 有限元法; 安全指标; 判断标准; AFEAS 软件

中图分类号: TP 311

文献标识码: A

A study on some issues for slope stability analysis by finite element method

QIN Wei-xing¹, CHEN Sheng-hong¹, CHEN Shi-jun²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Sinohydro Corporation, Beijing 100000, China)

Abstract: Fundamental theories of slope stability analysis by finite element method are introduced systematically. Safety index and judging criterion are discussed in detail; and related visual analysis software AFEAS is developed by object-oriented technique. An engineering example of slope stability analysis is given; related finite element analysis results are compared with results of rigid body limit equilibrium method. Analytical results verify safety index and judging criterion feasible and show advantages of analyzing slope stability by finite element method.

Key words: slope stability; finite element method; safety index; judging criterion; AFEAS software

1 引 言

在开采矿山、兴修铁路和水利工程中经常会遇到岩石边坡稳定问题, 它不仅关系到工程的成败, 而且关系到人民的生命财产安全。因此, 获取和分析岩石边坡的特性和研究岩石边坡失稳的机理以给出边坡失稳预警具有重要意义。

评价边坡稳定性有多种方法, 不同的边坡可以采用不同力学模型与分析方法, 分析目的和精度要求也有不同方法与之适应。边坡稳定性分析方法主要有极限平衡法、极限分析法、有限单元法、块体单元法及其它数值分析方法。极限平衡法经过 70 多年的发展, 积累了丰富的经验, 但由于该方法本身没有考虑岩体的应力-应变关系^[1, 2], 不能获得坡体真实受力。极限分析法虽然克服了上述不足, 能够在一定程度上考虑土体的应力-应变关系, 但也

只能给出假定滑裂面上的应力场及速度场, 不能考虑坡体变形及其对边坡稳定的影响^[3, 4], 而实践表明稳定与变形有着相当密切的关系, 坡体失稳往往伴随较大的垂直沉降与侧向变形。有限单元法满足了静力许可、应变相容与应力-应变本构关系, 同时可以不受边坡几何形状和材料不均匀性质限制。是比较理想的分析边坡应力、变形、稳定的手段, 该方法分析边坡稳定中应用越来越广泛, 为分析和解决边坡稳定问题提供了可靠保障。国内外一些专家学者已在这方面做了卓有成效的研究工作, 特别是近十多年来, 国内外用有限单元法研究边坡稳定得到了长足发展^[1, 6-8]。

然而如何将有限单元法分析成果与传统的安全系数挂钩, 如何确定边坡稳定与否的判别依据, 仍是受到广泛重视的课题。当前确定安全系数比较典型的研究方法主要有总应力安全系数法和强度折减

安全系数法。本文在系列文献^[1,6-8]和已开发的自适应有限元软件 AFEAS^[9,10]与滑坡程序 SA^[2]的基础上较为系统地进行了阐述,以期更好地推动有限单元法在边坡工程中的应用。

2 安全指标

2.1 基于滑裂面应力有限元分析的边坡稳定分析

在有限单元法发展的同时,研究者就开始研究它与边坡稳定分析中传统分析方法的关系。早期的工作^[5]是在边坡中定义一个潜在的滑裂面,先由有限单元法获得的应力计算滑裂面上各点的应力水平,然后根据加权平均原则定义安全系数。研究发现,虽然有限元计算仍处于弹性状况下,但按照该方法计算的安全系数与极限平衡法十分接近。基于此,许多研究者进一步研究在诸多滑裂面中寻找一个临界滑裂面的可能性,这项工作采用了与极限平衡法相同的计算步骤,同时也获得了与极限平衡法接近的最小安全系数和临界滑裂面。

在本文自适应有限元分析中,滑裂面用含节理的岩块模拟,节理反映强度,岩块反映变形。当滑裂面成为可能的破坏面时,在完成应力-应变分析后,滑裂面的整体安全系数 F_s 定义为抗滑力和滑动力的比值,而抗滑力和滑动力分别对应滑裂面上节理单元相应应力的积分。其定义如下:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i \sigma_i + c_i) l_i}{\sum_{i=1}^n \tau_i l_i} \quad (1)$$

式中 σ_i , τ_i , f_i , c_i 分别为滑裂面上第 i 个单元的法向正应力、剪应力、摩擦系数、凝聚力; l_i 为该单元沿滑裂面的长度; n 为滑裂面单元总数。

该方法建立在应力-应变分析的基础上,与传统刚体极限平衡法确定的安全系数具有同样的物理意义,得到的位移场、应力场满足全部基本方程和边界条件,具有正确的理论基础,概念清晰,容易理解。不足之处在于,一般只适用于事先确定滑动面且滑面为平面或圆弧面的情况。

2.2 基于强度折减有限元分析的边坡稳定分析

近期的研究沿用传统强度折减的做法,将非线性有限元数值分析计算的收敛性条件和系统状态量突变现象作为边坡是否失稳的判据,当边坡处于临界状态时折减强度指标的倍数即为安全系数。国内外学者^[6-8]在这方面做了有益探索,并取得了一些成果。笔者在已研发软件系统 AFEAS 的基础上,结合岩土工程中的边坡稳定做了进一步的研究工作。

2.2.1 基本原理

将边坡强度参数凝聚力 c 和内摩擦角 ϕ (以摩擦系数的方式),同时除以一个大于1的系数 K ,得到一组新的 c' 和 ϕ' 值,然后作为一组新的材料参数输入,进行试算。当计算由收敛突变到不收敛时,或系统状态量突变时,对应的折减系数 K 被称为边坡稳定的强度折减安全系数,此时边坡达到极限状态,发生剪切破坏,同时获得临界滑动面。

2.2.2 有限单元模型

AFEAS 软件基于陈胜宏教授提出的加锚节理岩体弹黏塑性等效力学模型开发^[7],并能考虑渗透荷载作用,具有较强大的前后处理功能。加锚节理岩体的等效隐式弹黏塑性增量本构关系见式(2)。

对岩块和节理,屈服判断分别采用 Drucker-Prager 准则和 Mohr-Coulomb 准则。先在网格模型内所有高斯点生成正应力和剪应力,然后利用上述两个屈服准则判断各高斯点应力屈服与否。如果在特定高斯点上的应力位于屈服面内,则该点仍然是弹性的;如果位于屈服面上面或外部,则该点处于屈服状态。利用黏塑性算法,屈服状态下高斯点超出屈服面的部分应力在网格中被重分配。当足够数目的高斯点发生屈服,即认为发生了整体剪切破坏,因此通过有限元分析可以预测边坡可能的破坏区域,并获取边坡的安全系数,给出危险预警。

$$\{\Delta \sigma\}^n = [D]^n (\{\Delta \varepsilon\}^n - \{\Delta \varepsilon^p\}^n) \quad (2)$$

式中 $[D]^n$ 和 $\{\Delta \varepsilon^p\}^n$ 分别为第 n 步的弹性矩阵、黏塑性增量应变。

虽然岩体弹性参数的量值(如弹性模量与泊松比)对边坡破坏前的变形也有一定影响,但本文的研究表明它们对边坡稳定分析中安全系数的影响较小,因此在确定安全系数时,只需折减材料的强度参数即可。于是,用有限单元法与传统刚体极限平衡法分析边坡稳定时采用的参数一致,即重度、强度参数 c 和 ϕ 。该方法对应安全系数的定义和极限平衡法的基本相同,但它不需要事先确定滑裂面,并可以按一定的规则搜索出最危险临界滑裂面,因而能解决复杂的工程问题。不足之处在于,需要一个判别系统达到临界状态的判别标准。工程界目前还没有统一的标准,不同的标准所确定的安全系数是不同的,因此运用该方法的关键在于确定判断标准。

2.3 混合法

该方法是上述两种方法的综合,汲取了各自优点,概念清晰,适用于存在潜在滑裂面的边坡稳定分析。这种方法的分析过程如下:先对边坡进行强

度折减分析,再求强度折减后滑裂面的整体应力安全系数,当滑面达到临界状态时(此时整体安全系数为 1),强度参数折减程度即为该边坡的安全系数。

3 判断标准

用强度折减法求边坡安全系数,需要一个合理的临界状态判断标准。在拱坝建基面稳定研究中,任青文等^[11]对这个问题进行了较好地论述,但边坡方面的文献还较少。在文[12]研究的基础上,笔者对边坡稳定做了进一步的研究。

根据运动稳定性理论,任何状态或事物的变化都是一种运动,都存在是否稳定的问题。边坡失稳(拉裂和滑移)的实质虽是强度破坏,但当滑裂面的应力达到强度极限时,边坡处于极限平衡状态,此时只要有一个小的扰动,边坡就将偏离原平衡状态而不能恢复,即由静止状态向可动状态转变,边坡的状态发生了变化。这是一种失稳现象,笔者曾用不连续分叉对该类问题进行过研究,具体内容参考文[13]。由于其应力-变形曲线具有极值点,因而它属于极值点失稳类型,可以采用以下的失稳判据:

①收敛性判据;②能量判据;③突变性判据(包括位移突变、屈服区域贯通等)。

对于收敛性判据,是求解迭代过程中系统的位移增量曲线、荷载增量曲线或者位移变形曲线具有极值点,对应计算上就是迭代过程不收敛。因此,弹黏塑性分析的过程中,在排除其它原因之后,确实是由于塑性区发展太大引起的迭代计算不收敛,可以作为系统失稳的判据。

对于能量判据,根据功能原理,系统的内能和外力对系统所做的外功应该相等,但当强度折减到一定程度时,外功将远远大于内能,多余能量被释放,此时认为系统破坏,以此作为系统失稳的判据。

对于突变性判据,系统的极限平衡状态表示系统处于一种平衡状态向另一种平衡状态转变的临界状态,也就是说,系统的状态即将发生突变。突变性判据认为,任何能够反映系统状态突变的现象(如位移突然变大、高斯点大面积屈服和屈服区贯通等)都可以作为失稳判据。突变性判据是一种有效的判断手段,比如研究位移的突变,可以根据不同强度折减系数下特征点的位移来绘制变化图,从而由突变点的位置得到相应强度折减程度,最终获取安全系数。但这种方法受操作者主观因素影响太大,同时实施起来比较烦琐。如果采用高斯点大面积屈

服和屈服区贯通,则具有直观、形象、简单的特点。

本文同时以迭代计算的收敛性,能量判据和塑性区贯通形成滑移通道作为失稳判据。

4 算例

4.1 滑坡工程概况

大岩淌滑坡位于清江左岸大崖东侧脚下,上距水布垭水电站大坝轴线 800 余米。滑坡原为一微顺层基岩滑坡,经过局部解体形成现状,由主滑体及东、西两级次滑体组成,结构较复杂。滑坡地表总面积为 0.196 km^2 ,滑体厚度一般为 $25 \sim 40 \text{ m}$,最厚约 64.8 m ,总体积约为 $588 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡形成以后主体已达新的平衡。滑体地表和地下水径流条件好,大气降水入渗量小,滑体内地下水欠丰。滑体物质主要为粉质黏土、砾质粉土、黏土,其结构疏松,透水性较强;滑床较为平坦,由于对岸马崖高陡边坡的现代崩解,较多的大块岩石堆积于滑体前部,对滑坡前缘起到了压脚及防冲蚀的作用。

大岩淌主滑体在平面上呈狭长带状分布,东西向宽 $120 \sim 180 \text{ m}$,南北向长约 870 m ,分布面积为 0.124 km^2 ;滑体厚 $25 \sim 40 \text{ m}$,滑体方量为 $390 \times 10^4 \text{ m}^3$,占总方量的 66.3% ;滑坡前缘剪出口高程约 205 m ,后缘高程 430 m ,滑体相对高差 225 m ,具有较高的势能。

采用有限单元法和刚体极限平衡法对该滑坡进行了稳定分析和对比。表 1 给出了材料的物理力学参数。

表 1 不同材料的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of different materials

类型	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 /MPa	泊松比	凝聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)
滑坡体	23.0	29	0.40	16.5	22.0
滑带	23.0	19	0.40	10.0	18.0
基岩	26.0	2500	0.34	650.0	35.0

4.2 边坡稳定分析

自适应有限元分析的初始网格模型如图 1 所示,优化网格模型见图 2。在自重应力作用情况下,强度折减前后的局部变位见图 3 和图 4,强度折减前后的屈服区图见图 5 和图 6。滑坡体整体应力安全系数按式(1)计算。在自重条件下滑坡体的整体总应力安全系数 WFEA 法为 1.31。按照文中的混合法进行降强度分析,强度折减安全系数 LFEA 法为 1.30,此时位移发生突变,屈服区贯通,滑带处于临界状态。

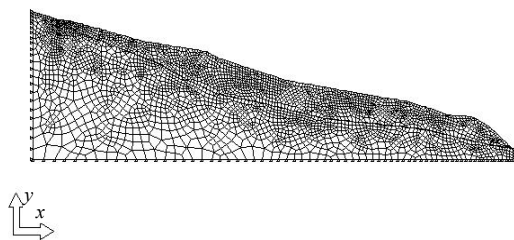


图1 初始网格模型
Fig.1 Initial mesh model

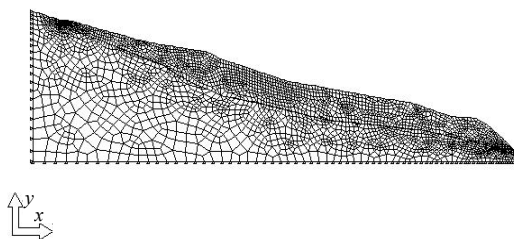


图2 优化网格模型
Fig.2 Optimized mesh model

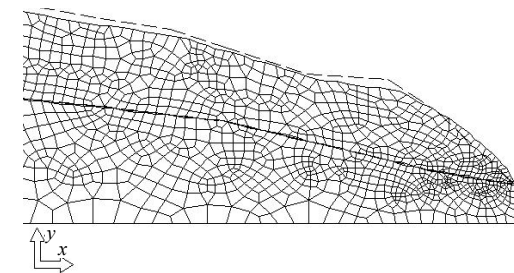


图3 强度折减前的局部变位
Fig.3 Local deformation before strength reduction

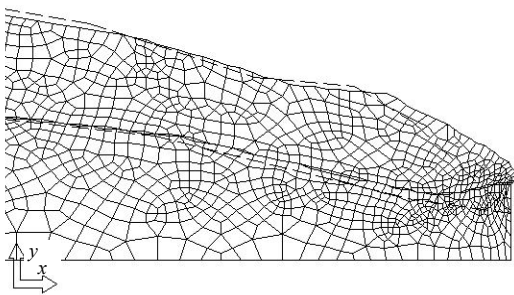


图4 强度折减后的局部变位
Fig.4 Local deformation after strength reduction

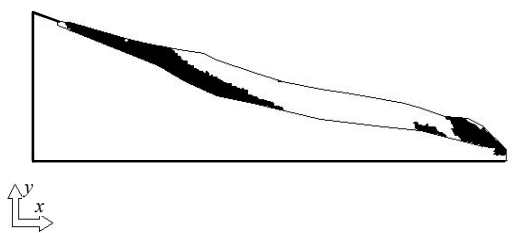


图5 强度折减前的屈服区
Fig.5 Yield zone before strength reduction

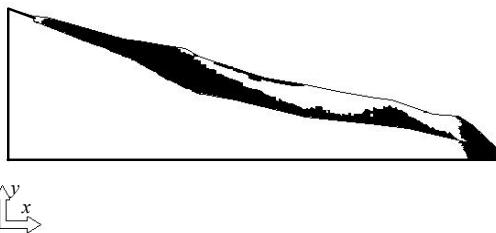


图6 强度折减后的屈服区
Fig.6 Yield zone after strength reduction

将主滑坡体划分为 20 个条块, 如图 7 所示。采用传统刚体极限平衡法分析^[2], 得到相应的稳定安全系数结果: Sarma 法为 1.419, RTM 法为 1.430, RTMI 法为 1.417, 汇总结果见表 2。结果表明, 两种分析方法获得的结果接近, 且有限单元法得到的安全系数较小。

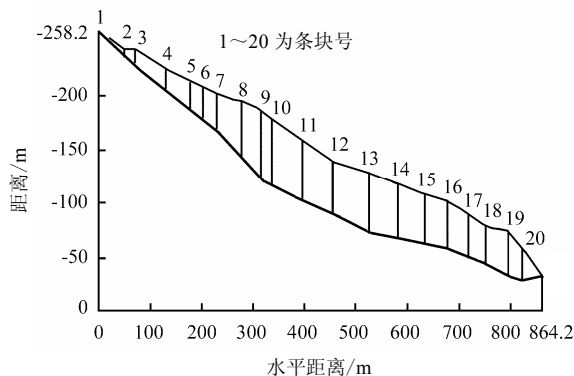


图7 极限平衡法分析模型
Fig.7 Analysis model of limit equilibrium method

表2 各种方法的稳定安全系数

Table 2 Stability safety factors of different methods

Sarma	RTM	RTMI	WFEA	LFEM
1.419	1.430	1.417	1.310	1.300

5 结 论

边坡稳定在很多工程中具有重要地位, 因此研究其稳定具有重大意义。传统的刚体极限平衡法已不能很好地适应高边坡稳定分析的需要。随着有限单元法的臻至完善, 它在边坡稳定分析中的应用日益广泛, 但如何将有限单元法分析成果与传统的安全系数挂钩, 如何确定边坡稳定与否的判别依据, 还不太成熟。本文比较系统地介绍了有限单元法分析边坡稳定的基本原理, 重点对安全指标和判断标准两个重要方面进行了探讨, 给出了一个实际的边坡稳定分析算例, 并将有限单元法和传统刚体极限平衡法的分析结果进行了对比。该算例结果显示两

种方法得到的安全系数比较接近,表明本文针对有限单元法分析边坡稳定提出的安全指标与判断依据是可行的。研究同时也表明继续探讨并确定有效的安全指标和判断标准是有限单元法高效分析边坡稳定的关键。

参 考 文 献

- [1] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [2] 陈士军. 滑坡稳定分析方法研究[硕士论文 D]. 武汉: 武汉大学, 2003.
- [3] 李亮, 刘宝琛. 边坡极限承载力的下限分析法及其可靠度理论[J]. 岩土力学与工程学报, 2001, 20(4): 508—513.
LI Liang, LIU Bao-chen. Lower bound limit analysis of bearing capacity of slope and its reliability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(4): 508—513.
- [4] 弥宏亮, 陈祖煜, 张发明, 等. 边坡稳定三维极限分析方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 649—653.
MI Hong-liang, CHEN Zu-yu, ZHANG Fa-ming, et al. The 3D limit method for slope stability analysis and applications[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(5): 649—653.
- [5] Yamagami T, Ueta Y. Search for critical slip lines in finite element stress fields by dynamic programming[A]. **Proceedings of 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics**[C]. Australia: Innsbruck, 1988. 1 335—1 339.
- [6] Griffith D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite element[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(3): 387—403.
- [7] 陈胜宏. 高坝复杂岩石地基及岩石高边坡稳定分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [8] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫明, 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.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, SHI Wei-ming, et al. Slope safety factor analysis by strength reduction FEM[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(3): 343—346.
- [9] 秦卫星, 吴俊, 陈胜宏. 有限元软件与通用图形软件间无缝连接的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(4): 614—618.
QIN Wei-xing, WU Jun, CHEN Sheng-hong. Study and realization of seamless link between FEM software and universal graphics software[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(4): 614—618.
- [10] Qin W X, Chen S H. Developing integrated software of adaptive finite element analysis by object-oriented approach[A]. **Contribution of Rock Mechanics to the New Century, Proceedings of the ISRM International Symposium: Third Asian Rock Mechanics Symposium** [C]. Japan: Kyoto, 2004. 217—222.
- [11] 任青文, 钱向东, 赵引, 等. 高拱坝沿建基面抗滑稳定性的分析方法研究[J]. 水利学报, 2002, (2): 1—7.
REN Qing-wen, QIAN Xiang-dong, ZHAO Yin, et al. Methods for analyzing sliding resistance stability along the base surface of high arch dam[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, (2): 1—7.
- [12] 卓家寿, 邵国建, 陈振雷. 工程稳定问题中确定滑移面、滑向与安全度的干扰能量法[J]. 水利学报, 1997, (8): 80—84.
ZHUO Jia-shou, SHAO Guo-jian, CHEN Zhen-lei. Disturbing energy method for determining the slipping face and direction and the safety coefficient of engineering stability[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1997, (8): 80—84.
- [13] 秦卫星, 陈胜宏, 刘金龙. 不连续化分叉条件及其在边坡稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 1): 4 912—4 916.
QIN Wei-xing, CHEN Sheng-hong, LIU Jin-long. Discontinuous bifurcation condition and its application to slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.1): 4 912—4 916.

业内新闻

我国今年将新建高速公路约 5000 公里

新华社 1 月 15 日专电 (记者 黄富慧): 交通部部长李盛霖 15 日在全国交通工作会议上说, 2006 将实施国家高速公路网规划和加强国省干线改造升级, 建设全国公路运输大通道。全年将新建高速公路约 5 000 公里, 建成精品红色旅游线路约 700 公里。全国公路运输大通道建设主要包括: 加快国家高速公路网建设, 开工建设一批重点项目; “五纵七横”国道主干线组织实施好一批续建项目; 加快早期建成的高速公路扩容改造; 继续支持主要港口集装箱港区疏港高速公路建设。交通部还将加大国省干线公路改建力度, 提高路网技术等级; 加强红色旅游公路建设, 建成精品旅游线路约 700 公里, 提高经典景区出口路等级标准; 加强主要方向和重点地区国边防公路建设。从 2000 年到 2005 年, 中国累计公路建设完成投资 19 505 亿元, 是上一个 5 年完成投资的 2 倍。2005 年中国新增公路里程 4.9 万公里, 其中高速公路 6 700 公里。全国公路总里程达 192 万公里。

(摘自中国路桥资讯网, 本刊编辑)