

# 基于极限平衡法和有限元法的边坡稳定性评价

勾文利 李树豪 陈福钊

青岛黄海学院 山东 青岛 266427

**摘要:** 针对现有边坡稳定性判断方法的单一性, 提出了一种基于极限平衡法和有限元法的边坡稳定性综合评价方法。该评价方法采用瑞典条分法、Janbu 法、Bishop 法等经典极限平衡法对边坡稳定性进行计算分析。同时, 利用大型力学分析有限元软件 ANSYS 和岩土工程分析软件 FLAC-3D, 运用强度折减法理论, 分析边坡稳定的安全系数, 确定边坡稳定等级。它们相互印证, 得到了相对一致的结果, 从某种意义上验证了评价方法的可靠性。

**关键词:** 极限平衡法; 有限元法; 边坡稳定; 综合评价

## Slope Stability Evaluation Based on Limit Equilibrium Method and Finite Element Method

Wenli Gou Shuhao Li Fuzhao Chen

Qingdao Huanghai University, Shandong, Qingdao, 266427

**Abstract:** In view of the singleness of the existing slope stability judgment methods, a comprehensive evaluation method of slope stability based on limit equilibrium method and finite element method is proposed. In this evaluation method, the classical limit equilibrium methods, such as Swedish slice method, Janbu method and Bishop method are used to calculate and analyze the slope stability. At the same time, the large-scale mechanical analysis finite element software ANSYS and geotechnical analysis software FLAC-3D are used to analyze the safety factor of slope stability and determine the grade of slope stability by using the theory of strength reduction method. They confirm each other and get relatively consistent results, which, in a sense, verifies the reliability of the evaluation method.

**Keywords:** Limit equilibrium method; Finite element method; Slope stability; Comprehensive evaluation

边坡失稳是世界三大地质灾害之一。边坡失稳将严重影响国家财产和人民生命安全, 对农业、交通和环境造成严重危害, 人们必须给予足够的重视。边坡稳定性受到许多因素的干扰, 如岩石的岩性、岩体结构、水文条件和人类工程活动等, 通常由这些因素共同作用引起边坡失稳的发生。一般而言, 边坡失稳是由于外力破坏了岩体的初始应力状态, 产生了应力集中, 从而导致了边坡的失稳破坏。边坡的变形主要有三种形式: 拉裂、蠕滑和倾倒。相应的边坡破坏有三种基本形式: 崩塌、滑坡和倾倒。极限平衡法被认为是最古老的边坡稳定性计算方法, 而条分法是极限平衡分析法中最常用的处理方法。近些年来, 以计算机技术为基础的数值模拟方法由于自身的显著优越性得到迅速发展。数值模拟方法可以有效地模拟岩土材料的内应力和应变规律, 可以处理材料的非均匀性、各向异性和复杂的边界条件, 可以给出不同的岩土材料介质赋予不同的力学性质及单元属性, 能够模拟边坡受到地震、爆破、渗流等工程现象时的影响程度, 还可以进一步得到边坡的应力场、位移场和塑性变形区等。

本课题拟根据地勘资料和实测数据, 分析和建立了滑坡体的破坏模式, 并采用瑞典条分法、Janbu 法和 Bi

shop 法等经典极限平衡法对边坡稳定性进行了计算和分析。同时, 采用岩土工程中广泛使用的强度折减法, 应用大型的商业有限元分析软件 ANSYS 和专门用于岩土工程的有限差分分析软件 FLAC-3D 两种数值分析软件对矿坑边坡稳定性进行了模拟计算, 进行相互印证。最后, 确定允许安全系数, 对边坡稳定性进行综合评价。

该区域位于采场北侧弧形部分的西段。根据Ⅳ级结构面统计分析, 本区主要Ⅳ级结构面有五组, 其中第 1 组和第 4 组与边坡呈大角度相交, 第 2 组几乎垂直, 倾角接近边坡倾角。因此, XI 区结构面与坡体组合, 形不成平整滑面型的破坏滑面, 应使用圆弧型破坏模式来计算坡体的稳定性。

### 1 基于极限平衡分析方法的边坡稳定性分析

#### 1.1 边坡稳定性分析的极限平衡分析方法原理

极限平衡法一般采用垂直条分法。该方法假定初始滑动面为圆弧和折线, 然后将滑坡体划分为一系列具有垂直界面的条带。采用整体静力平衡或力矩平衡方程求解边坡稳定系数。基于上述基本假设, 极限平衡法的另一项重要工作是利用最优化方法确定临界滑动面位置。

边坡稳定性安全系数  $k$  的一般表达式:

$$k = \frac{\int F(x, y, y') dx}{\int G(x, y, y') dx}$$

**基金项目:**

青岛黄海学院校级科研项目 (项目编号: 2018KJ09)。

基于安全系数，可以建立多种分析方法：如瑞典条带法、Bishop 法、Morgenstern-price 法、sencer 法、Sar ma 法、Janbu 法和剩余推力法。稳定性分析和计算采用瑞典条分法、Bishop 法和 Janbu 法。

1.2 稳定性分析及计算成果

计算采用滑动面位置优化与现场测量相结合的方法，以找到最大可能的破坏区域。首先采用优化分析方法选择特征断面进行搜索，找出安全系数最低的危險滑动面，然后分别采用 Janbu 法、Bishop 法和 Swedish 切片法进行切片计算，得到各计算区的安全系数。选择特征断面 11-11'，岩石的自然重力为 27，内聚力  $c=260\text{kpa}$ ，内摩擦角，找出危險滑动面。条带计算得到的最小安全系数为 Janbu 法，其值为 1.1348。

2 边坡稳定性数值模拟分析

2.1 基于 ANASYS 的有限元数值模拟分析

(1) 模型建立与计算参数选取。

分析采用大型有限元软件 ansys10.0。为了便于分析，将实际问题简化为平面应变问题。选择特征断面 11-11'，其计算模型与网格划分如图 1 所示：该断面上的岩层有灰岩、白云岩、二长闪长玢岩等，并赋存着 F4 断层（二长斑岩带）。

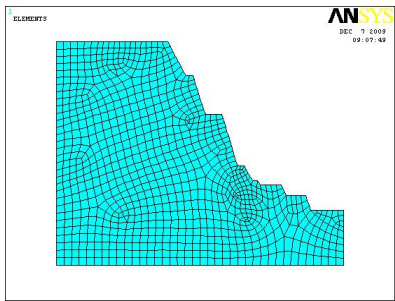


图 1 模型网格划分图

为了减少边界条件的影响，模型垂直方向从坡底向下延伸 50m，上部水平方向为 100m，根据实际情况适当选择坡底。在模型两侧应用 X 方向约束，并在模型底部应用 X 和 Y 方向约束。为了计算边坡的安全系数，采用数值分析中广泛使用的强度折减法进行分析计算。

(2) 计算成果分析。通过计算成果可以看出：

①当  $\omega=1.19$  时，边坡岩体塑性区连通，计算表明，当  $\omega \geq 1.19$ ，计算不收敛，可考虑  $\omega=1.19$ ，边坡岩体处于极限状态，边坡整体安全系数为 1.19；

②当  $\omega=1.15$  时，存在局部塑性连接区域，表明此时将发生局部破坏，因此边坡的局部安全系数为 1.08。

2.2 基于 FLAC-3D 的有限差分数值模拟分析

FLAC-3D 采用显式有限差分格式求解场的控制微分方程，并采用混合元离散模型，能够准确模拟材料的屈服、塑性流动、软化和大变形，特别是在材料弹塑性分析、大变形分析和模拟施工过程等领域。本文利用 F

LAC-3D 中的边坡分析专用模块，对边坡各计算区的稳定性进行了分析。选择特征截面 11-11'。通过折减计算分析，得出 11-11'段的安全系数为 1.16。

2.3 数值模拟结论

(1) 通过模拟计算可以发现，边坡的失稳破坏一般会发生塑性区的穿透和特征部位位移的突变，这是判断边坡失稳的重要依据；

(2) 根据 ANSYS 和 FLAC-3D 数值模拟计算获得的塑性应变图及位移矢量图可以发现：边坡的失稳破坏均是从坡脚地段开始，坡脚的塑性区贯通是导致边坡整体失稳的主要因素。确保坡脚部位的稳定性，是避免发生局部破坏和维护边坡整体稳定性的关键所在。

3 边坡稳定性综合评价

3.1 容许安全系数的确定

如何确定既能保证工程安全又经济合理的安全系数，必须经过理论分析、计算和工程经验。安全系数的确定是否正确，直接关系到工程的安全和经济效益。安全系数越高，经济效益越差。两者成反比。因此，必须引入“容许安全系数”的概念。容许安全系数是评价边坡稳定性的重要指标。一般认为，当计算的安全系数大于允许的安全系数时，工程是稳定的；当小于允许的安全系数时，它是不稳定的。其确定取决于对各种影响因素的考虑，在很大程度上取决于工程经验。本文中容许安全系数的确定参考了国内外边坡稳定性研究成果和滑坡体加固后应达到的安全系数，充分理解了这些成果中容许安全系数的取值背景。

3.2 边坡稳定性综合评价

根据边坡稳定性分类表，可以确定该边坡整体基本稳定，局部可能存在岩石松动和崩塌，基本未加固或部分加固，主要是工程防护。

4 结论

表 1 边坡稳定性评价一览表

| 综合边坡角/ $^{\circ}$ |           |            | 59     |
|-------------------|-----------|------------|--------|
| 极限平衡法<br>安全系数     | Janbu 法   |            | 1.1348 |
|                   | 瑞典条分法     |            | 1.1592 |
|                   | 毕肖普法      |            | 1.1617 |
| 数值模拟安<br>全系数      | Ansys 模拟  | 整体         | 1.19   |
|                   |           | 局部         | 1.15   |
|                   |           | 局部失稳<br>部位 | +50~-7 |
|                   | Flac3D 模拟 |            | 1.16   |
| 整体稳定性评价           |           |            | II     |

|         |    |
|---------|----|
| 局部稳定性评价 | II |
|---------|----|

本文根据地质勘探资料和实测资料,分析建立了滑坡体的破坏模式,采用瑞典条分法、Janbu 法、Bishop 法等经典极限平衡法对边坡稳定性进行了计算分析,并采用岩土工程中广泛使用的强度折减法,应用大型的商业有限元分析软件 ANSYS 和专门用于岩土工程的有限差分分析软件 FLAC-3D 两种数值分析软件对边坡稳定性进行了模拟计算,相互印证,得到了较为一致的结果,从某种意义上验证了该评价方法的可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 丁参军,张林洪,于国荣,等.边坡稳定性分析方法研究现状与趋势[J].水电能源科学,2011,29(8):4.
- [2] 张明,王大锋,胡荣华.边坡稳定性分析方法探讨[J].岩土工程技术,2017,31(3):8.
- [3] 孙玉科,等.边坡岩体稳定性分析[M].科学出版社,1988.
- [4] 孙广忠.岩体结构力学[M].科学出版社,1988.

[5] 孙玉科,古迅.赤平极射投影在岩体工程地质力学中的应用[M].科学出版社,1980.

[6] Jiang S H , Li D Q . Slope reliability analysis using a non-intrusive stochastic finite element method[C]//4th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2013).2013.

[7] Hammouri N A , Malkawi A , Yamin M. Stability analysis of slopes using the finite element method and limiting equilibrium approach[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment,2008, 67(4):471.

[8] 巩留杰.基于有限元计算的边坡稳定极限平衡法研究[D].湖南大学,2012.

[9] 谢全敏,夏元友.岩体边坡治理决策的模糊层次分析方法研究[J].岩石力学与工程学报,2003.

[10] 刘子振.边坡稳定性极限平衡法和有限元法综合分析[D].中南林业科技大学,2007.

[11] 师访.岩石破裂过程的扩展有限元法研究[D].中国矿业大学,2015.