

# 岩质边坡稳定性分析中极限平衡法与有限元法的对比

孙增奎 童海涛

(中交公路规划设计院, 北京 100010)

**【摘要】** 根据工程实例,对一公路岩质边坡稳定性采用极限平衡法与有限元法分别进行计算,对比二者之间的差异,分析产生差异的原因。在安全系数的选用上提出了建议。

**【关键词】** 极限平衡法;有限元法;岩质边坡;稳定性

**【中图分类号】** TU 413.62; TU 12

## Comparison of Limit Equilibrium Method and Finite Element Method on Rock Slope Stability Analysis

Sun Zengkui Tong Haitao

(Zhongjiao Highway Planning and Design Institute, Beijing 100010 China)

**【Abstract】** Based on an engineering example, stability of a highway rock slope is analyzed by limit equilibrium method and finite element method. The difference between the two methods above is expatiated and some advices are put forward.

**【Key Words】** limit equilibrium method; finite element method; rock slop; stability

### 0 引言

在进行公路岩质边坡稳定性分析中,利用极限平衡法对不同的潜在滑动面进行试算,从中寻找出安全系数最小滑动面,是一种常用的方法。因为极限平衡法的计算原理简单、清晰,计算简便、快捷,国内有很多成熟的软件都可以对其进行计算。文献[1]利用极限平衡法,推导出了斜边坡与二阶竖直边坡水平推力的计算公式,并在此基础上总结出了一般边坡水平推力计算的统一表达式。而利用有限元法计算分析边坡稳定性时,通常需要较为繁琐的建模、分网、后处理等过程才能得以实现,同时对计算人员要求有相应的有限元知识学习背景。但是,由于数值方法可以同时考虑边坡岩土体中变形与应力的相互关系等因素,可以相对较好地模拟边坡实际受力情况。因此,数值方法逐渐被越来越多的工程设计人员所采用,《公路路基设计规范》(JTG D30—2004)中也专门提出对于边坡破坏机

制复杂时,宜结合数值分析方法进行分析。

### 1 工程背景

修建于广东省北部低山重丘区的一条高速公路,经过一最大坡高为 60.16 m 的岩质挖方地段。其主要地层自上而下 0~16.5 m 为黄褐、紫红色强风化泥质粉砂岩,岩石风化强烈,原岩结构已大部分破坏,岩芯呈半岩半土状为主,遇水易软化、崩解;16.5~18.3 m 为紫红色弱风化泥质粉砂岩,泥质胶结,裂隙发育,岩质稍硬。<sup>①</sup>

根据边坡的实际情况和土石方用量,边坡共分为 8 级,最下一级边坡坡率为 1:0.75,其余边坡坡率均为 1:1,各级边坡之间设宽为 2 m 的平台<sup>②</sup>。具体边坡形式及地质情况见图 1。

### 2 计算参数的选取

根据工程地质勘察报告和边坡实际岩体状态,各层土的物理力学参数见表 1。

作者简介:孙增奎,1972年生,男,汉族,吉林抚松县人,硕士研究生,工程师,现主要从事公路边坡稳定性分析及防护方面的工作。

①天津—汕尾国家重点公路粤境蕉岭至梅县城东段详细阶段《工程地质勘察报告》,2004

②天津—汕尾国家重点公路粤境蕉岭至梅县城东段详细阶段《两阶段施工图设计》,2004

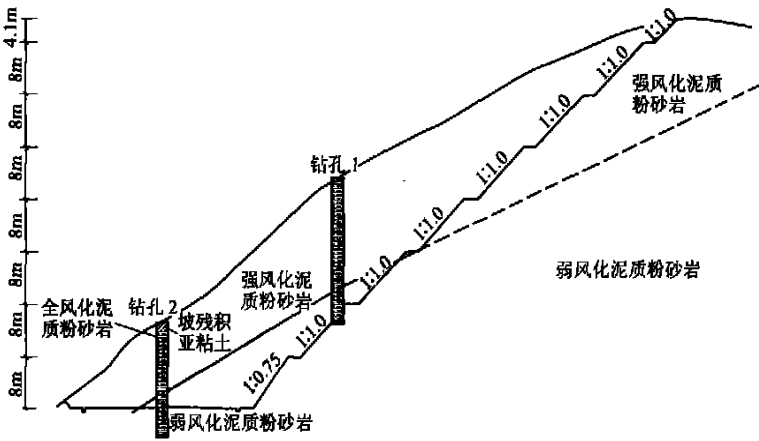


图 1 边坡形式及工程地质情况

表 1 各层土的物理力学参数

地层名称	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E / \text{MPa}$	泊松比 $\mu$	粘聚力 $c / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
强风化泥质粉砂岩	19.0	20	0.3	35	26
弱风化泥质粉砂岩	21.5	1 500	0.28	40	28

### 3 安全系数的计算

#### 3.1 极限平衡法

对于岩质边坡, 应选用滑动面为直线的形式进行计算, 按表 1 中的参数计算得到安全系数为 1.344, 最危险滑动面与水平方向的夹角为  $31^\circ$ 。

#### 3.2 有限元法

有限元法计算边坡安全系数时, 借助于大型有限元通用软件 ANSYS 进行模拟, ANSYS 中采用 D-P (Drucker-Prager) 屈服准则, 该准则是广义米塞斯的一种特殊情况, 可以用来模拟岩土体的应力-应变关系<sup>[4]</sup>。

##### 1) 计算模型、网格划分

计算模型与实际的边坡形式相一致, 将边坡看作二维平面应变问题进行处理。边坡的下边界(AB 边) 距离坡脚(O 点) 30 m, 左侧边界(AE 边) 距离坡脚 50 m, 右侧边界(BC 边) 距离坡脚 190 m。计算模型及网格划分形式见图 2, 模型采用三角形六节点单元, 共分为 1 547 个单元。

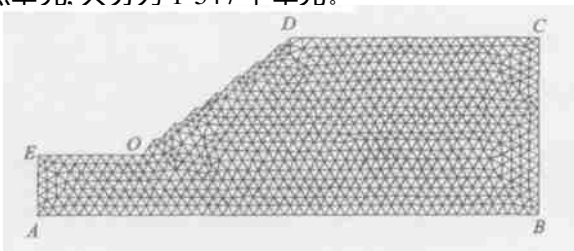


图 2 有限元模型与网格划分

##### 2) 荷载、边界条件

按边坡只受重力作用对整个模型施加竖向荷载, 下边界(AB 边) 施加竖直方向的位移约束, 侧面边界(BC、AE 边) 施加水平方向的位移约束。

##### 3) 计算结果、后处理

剪应力分布等值线图见图 3。



图 3 剪应力等值线(单位: kPa)

从剪应力等值线分布形式可以看出: 等值线整体上偏向边坡开挖后的临空面一侧, 且越靠近坡脚, 其剪应力越大。这也从数值模拟上印证了边坡防护设计中注重坡脚的加固(“固脚”原则) 的设计理念。

为了能够求出有限元方法条件下的安全系数, 对计算结果进行后处理, 与极限平衡法中自动搜索最危险滑动面的思路相同, 首先指定某一直线路径, 求解出该路径上的所有应力, 然后沿路径方向对各应力进行积分运算, 分别合成为与路径平行和垂直的两个力。可以将与指定路径相平行的力看作是下滑力, 各地层的粘聚力  $\times$  相应地层的路径长度 + 正应力  $\times \tan \varphi$  看作是抗滑力, 则安全系数即为抗滑力与下滑力之比。按一定的步长指定积分路径分别进行计算, 寻找安全系数最小的路径, 该路径即为最危

险滑动面,相应的安全系数就是边坡的最小安全系数。以不同滑动面与水平方向的夹角为横坐标,以其相应的安全系数为纵坐标,绘制图4。

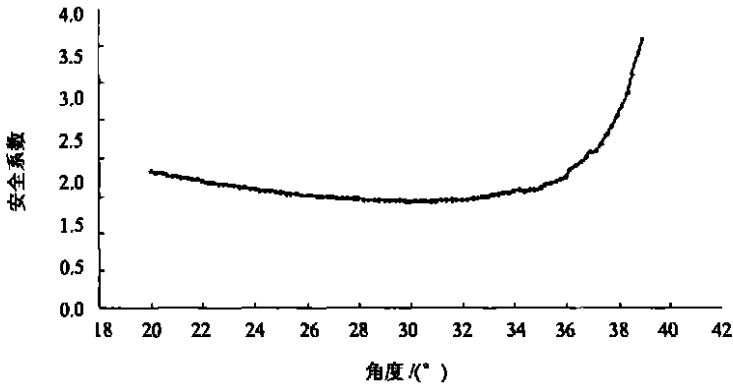


图4 安全系数与滑动面角度之间关系

### 3.3 两种计算方法得到安全系数的对比分析

按极限平衡法计算得到的最小安全系数为1.344,最危险滑动面与水平方向的夹角为 $31^\circ$ ;按有限元数值方法计算得到的最小安全系数为1.414,最危险滑动面与水平方向的夹角为 $31^\circ$ 。两者计算得到的最危险滑动面角度基本一致,利用数值方法计算得到的最小安全系数比极限平衡法大0.07,安全系数有所差异的原因在于利用有限元求解各潜在滑动面上的应力时,将岩土体的大部分物理力学性质如变形模量、泊松比等考虑在内,是在岩土体可以变形的条件下求解的,而极限平衡法计算安全系数时,将岩土体之间的相互作用做了过多的简化,同时将岩土体看作是刚性体,不能发生变形。

### 4 结论及建议

1) 利用有限元计算岩质边坡的安全系数,在方法上是可行的,同时也具有极限平衡法不具备的优点。

2) 数值方法计算得到的安全系数比极限平衡法

图4中的最小安全系数为1.414,最危险滑动面与水平方向的夹角为 $31^\circ$ 。

计算得到的安全系数稍大,如将数值方法计算得到的安全系数作为设计依据,则必须考虑到规范中提到的安全系数参考值是以极限平衡法为基础的。

3) 对于边坡水文地质、工程地质条件复杂,尤其是需要进行三维模拟时,有限元方法将比极限平衡法更加接近实际情况。

4) 与极限平衡法相比较,有限元数值方法从建模、计算以及后处理上均需要花费较多的时间,这在某种程度上也是数值方法不能得到充分应用的一个重要原因,因此,开发一些界面友好、针对性强、应用简单的有限元程序将是一项很有现实意义的工作。

### 参 考 文 献

- 1 时卫民,郑颖人. 岩质建筑边坡水平推力的计算. 岩土工程技术, 2002(3): 131~134
- 2 时卫民,郑颖人. 摩尔-库仑屈服准则的等效变换及其在边坡分析中的应用. 岩土工程技术, 2003(3): 155~159

收稿日期: 2004-12-15