

基于有限元法的边坡稳定性综合评价

勾文利 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定方法的单一性, 提出基于有限元法的边坡稳定性综合评价方法。该评价方法采用了经典的瑞典条分法、Janbu法和毕肖普法等极限平衡方法对边坡稳定性进行计算分析, 同时采用大型力学分析有限元软件 ANSYS 和 FLAC-3D 软件, 分析边坡稳定性应用了强度折减法理论。二者相互印证, 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。

关键词: 极限平衡法; 有限元法; 边坡稳定; 综合评价

引言

边坡的变形破坏模式取决于其所处的工程地质条件及其相关因素。对于层状岩质边坡的变形破坏主要有五种形式: 圆弧滑动、顺层滑动、切层滑动、倾倒破坏、楔形体滑动、崩落^[1]。

该区位于采场北帮弧形部位的西段。根据IV级结构面统计分析, 该区出现五组优势IV级结构面, 其中第1组和第4组与坡面呈现大角度的相交, 第2组近于垂直, 倾向与坡面倾向相近。^[1]因此, XI区形不成平整滑面型的破坏滑面, 坡体的稳定性计算采用了圆弧型的破坏模式。

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

边坡稳定性安全系数 k 的一般表达式:

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

基于安全系数可以建立多种分析方法: 如瑞典条分法, 毕肖普法, Morgenstern-Price法, Sencer法, Sarma法, Janbu法及余推力法等。^[2]本次稳定性分析计算采用瑞典条分法、毕肖普法和 Janbu 法。

1.1.1 瑞典条分法

瑞典条分法是将滑动岩土体分为若干条块, 根据各岩土条块的剪切力和抗滑力, 达到整个滑动岩土体的力矩平衡, 从而求得安全系数, 如图1所示。^[1]

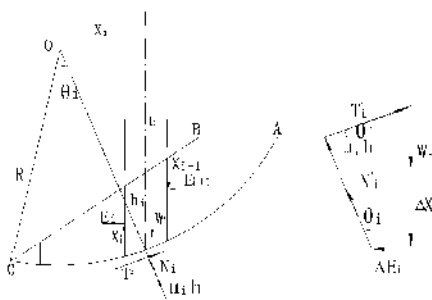


图1 瑞典法计算图示

1.1.2 Janbu法

分析复合破坏面的边坡稳定性时可用 Janbu 法, 松散、均质的边坡因为会受到基岩面的限制而产生两端为圆弧、中间为平面或折线的复合滑动, 如图2所示。^[1]

1.1.3 毕肖普法 (Bishop)

计算圆弧形破坏的最为常用的方法是 Bishop 法。这种方法将滑体分为 n 个垂直的条块, 选取其中的一块为 i , 如图3所示。^[1]

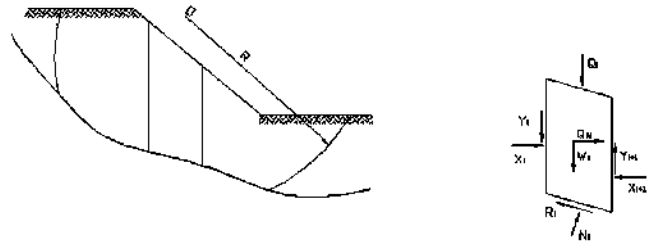


图2 Janbu法计算图示

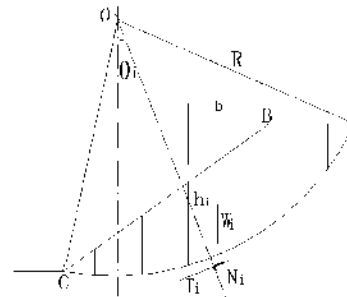


图3 毕肖普法计算图示

1.2 稳定性分析及计算成果

通过采用最优化寻优与现场实测滑面位置相结合的办法寻找出最大范围可能出现的破坏区。首先根据选择出来的特征断面, 根据优化分析方法进行搜索, 推算出危险滑动面中安全系数最小的, 然后采用 Janbu 法、瑞典条分法和毕肖普法进行分条计算, 计算出各分区的安全系数。^[3]选择特征断面 11-11', 岩石天然重度取为 $\gamma = 27\text{KN/m}^3$, 粘聚力 $c=260\text{kpa}$, 内摩擦角 34° 。经分条计算得到安全系数最小为 Janbu 法, 其值为 1.1348。

2. 边坡稳定性数值模拟分析

2.1 Drucker-Prager 模型与强度折减法

常用的屈服条件是 Treaca 屈服准则和 Mises 屈服准则, 但是这些屈服条件只适合金属材料, 不适合于岩土材料, 主要原因是岩土材料会随着随性流动的变形发生体胀现象, 针对这种情况, 在岩土材料中, 我们一般选用 Coulumb 屈服准则。^[3]采用 Coulumb 屈服准则的时候应该注意的是, 通过实验发现, 大多数岩土材料并没有象采用与 Coulumb 屈服条件非关联流动法则所得到的体胀结果那么大。^[4]

有限元强度折减法 (强度储备安全系数法) 基本原理是通过不断降低岩土强度使有限元计算最终达到破坏状态为止, 强度降低的倍数就是强度折减安全系数。首先将坡体抗剪强度指标粘聚力 c 和内摩擦角值同时除以一个折减系数 ω , 可以得到一组折减后的抗剪强度指标 c' 、 φ' 原抗剪强度指标



c、φ 值就会被这些值取代，然后作为新的材料参数输入进行试算，直至计算出现不收敛或者在关键部位的发生了位移突变时坡体就会达到极限状态发生剪切破坏，最后根据有限元计算结果就可以得到坡体的破坏滑动面，从而获得强度折减安全系数 ω。^[5]本文中采用基于 D-P 屈服条件与 Coulumb 屈服准则的强度折减法来模拟边坡岩体，分析边坡的稳定性。

2.2 基于 ANSYS 的有限元数值模拟分析

2.2.1 模型建立与计算参数选取

采用大型有限元软件 ANSYS10.0 对边坡进行分析。为了便于分析，我们将实际问题可以简化成平面应变的问题。

表 1 计算采用的物理力学参数

参数编号	岩性	密度 kg/m ³	弹模 GPa	泊松比	粘聚力 /MPa	内摩擦角 /°
1	灰岩	2705	15	0.25	0.260	33
2	白云岩	2754	13	0.23	0.214	34
3	二长闪长玢岩	2558	12	0.25	0.244	35
4	矿体	2430	10	0.20	0.140	30
5	二长斑岩	2500	12	0.22	0.040	32

选择特征断面 11-11'，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）。

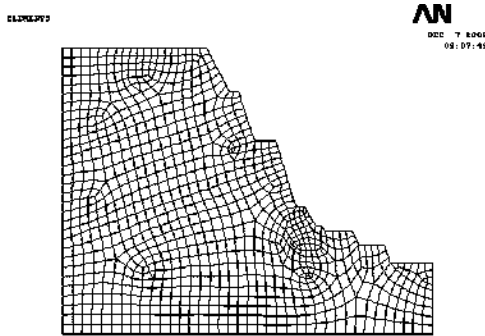


图 4 模型网格划分图

本模型考虑到边界条件会对其造成影响，竖直方向取 50m，水平方向取 100m。施加 X 方向的约束在模型两侧，在底部施加 XY 两个方向的约束，采用强度折减法进行模拟计算。^[11]

为了计算边坡的安全系数，采用目前数值分析中广泛使用的强度折减法进行分析和计算。

2.2.2 计算成果分析

通过以上的计算成果可以看出：

(1) 当 ω=1.19 时，边坡岩体的塑性区连通，同时计算表明当 ω ≥ 1.19 时，计算不收敛，因此可以认为 ω=1.19 时边坡岩体处于极限状态，因此边坡整体安全系数为 1.19；

(2) 当 ω=1.15 时，出现局部的塑性连通区，说明此时将出现局部破坏，因此边坡局部安全系数为 1.08。

2.3 基于 FLAC-3D 的有限差分数值模拟分析

FLAC-3D 软件首先将计算区域划分为若干个体单元，每个单元都会遵循给定的边界条件下的线性或非线性的本构关系，拉格朗日算法规定如果单元应力使得材料屈服或产生塑性流动，则单元网格会随着材料的变形而发生变形，模拟大变形问题非常适合采用这种算法。^[6]本文采用 FLAC-3D 软件中的边坡分析模块，分别对边坡各计算分区的稳定性进行了分析。选择特征断面 11-11'，经折减计算分析可以得到 11-11' 断面的安全系数为 1.16。

3. 边坡稳定性综合评价

3.1 允许安全系数的确定

安全系数的确定是为了既保证工程安全又做到经济合理。需要经过理论分析，计算还需要结合一定的工程经验。安全系数的准确判断至关重要，不仅关系到生命安全，还会涉及到经济效益。选取的安全系数过高，虽然安全性得到了保障，但是经济效益也会变差。相反，选取的安全系数如果偏低，虽然可以降低工程造价，但是发生安全事故的几率也会随之增加。^[6]

如何判断选取的安全系数是否合理，这里引入了允许安全系数的概念。允许安全系数是评判边坡稳定性的一项重要指标，通常我们认为安全系数大于允许安全系数就是安全的，如果小于允许安全系数就是不安全的，所以允许安全系数的正确判定尤为重要。^[6]一般来说，允许安全系数要考虑到各种因素的影响，而且更多的还要借助工程经验。

本文是在参照了国内外边坡稳定性研究及滑体加固后应达到的安全系数的成果，并充分了解这些成果中允许安全系数的取值背景之后确定了允许安全系数。^[7]

3.2 边坡稳定性分级

表 1 边坡稳定性分级表^[6]

分级	整体稳定安全系数	局部稳定安全系数	稳定性评价
I 级	$F_s \geq 1.25$	$F_s \geq 1.20$	边坡整体稳定性较好，无需加固，采用适当的工程防护。 ^[6]
II 级	$1.15 \leq F_s \leq 1.25$	$1.10 \leq F_s \leq 1.20$	边坡整体上基本处于稳定状态，局部可能有岩石松动崩落的可能，采取基本不加固或局部加固的方法，以工程防护为主。 ^[6]
III 级	$1.05 \leq F_s \leq 1.15$	$1.00 \leq F_s \leq 1.10$	浅层及表面可能会失稳，局部存在垮塌、崩落，边坡深层基本满足稳定性要求。 ^[6]
IV 级	$0.95 \leq F_s \leq 1.05$	$0.95 \leq F_s \leq 1.00$	边坡整体的稳定性达不到设计上的要求，局部在开采剥离期间有可能会失稳，因此应该分级开挖然后分级加固。 ^[6]
V 级	$F_s \leq 0.95$	$F_s \leq 0.95$	整体稳定性达不到设计要求，若在边坡未采取任何措施条件下，开采剥离期间或加固前可能会导致边坡失稳，因此需采取对边坡边开挖、边加固的措施。 ^[6]

3.3 边坡稳定性综合评价

表 2 边坡稳定性评价一览表

综合边坡角 /°		59	
极限平衡法安全系数	Janbu 法	1.1348	
	瑞典条分法	1.1592	
	毕肖普法	1.1617	
数值模拟安全系数	Ansys 模拟	整体	1.19
		局部	1.15
	局部失稳部位	+50~-7	
Flac3D 模拟		1.16	
整体稳定性评价		II	
局部稳定性评价		II	

(下转第 51 页)



时,公头的 2 号是 RXD,因而母头的 2 号是 TXD,公头的 3 号是 TXD,因而母头的 3 号是 RXD。

3.4 PTB210 气压传感器电器连接

PTB210 气压传感器通过通信串口线缆连接到电脑串口上。其中粉、蓝为传感器提供 12V 直流电源,由蓄电池等稳压电源提供,绿色、灰色分别接 DB9 母头(孔)式插座的 2、3 脚,DB9 母头(孔)式插座与电脑相连接或者 DB9 母头(孔)式插座与 DB9 公头(针)式插座轴对称连接后通过串口转 USB 与电脑连接。如图 1 所示。



图 1 气压传感器电器连接图

4. 举例说明 PTB210 气压传感器的参数设置方法

4.1 调试串口连接

(1) 打开 sscom4.2 运行串口调试软件或者使用超级终端。
(2) 选择菜单“控制面板”-“设备管理器”-“端口”,选择电脑上与 PTB210 气压传感器相连的串口号(串口转 USB 串口,本例中为 COM6)。

(3) PTB210 气压传感器默认通信参数是波特率:9600,数据位:7,停止位:1,校验位:E。由于设备已经修改通信参数(波特率:9600,数据位:8,停止位:1,校验位:N)并用于台站,这里举例说明如何修改 PTB210 气压传感器通信参数。选择正确的串口号和端口通信参数,打开串口。

(4) 接通传感器的供电电源。“发送新行”选中后,发送“.P”,发送每条命令需要按“发送”按钮或“回车键”,串口窗口中返回气压值(998.64hPa),证明气压传感器与电脑通信成功。

4.2 PTB210 气压传感器参数设置方法

现需要将传感器通信参数修改成为波特率:4800,数据位:7,停止位:1,校验位:0。输入命令:

- .BAUD.4800 (修改通信波特率为 4800)
- .071 (修改校验位、数据位、停止位)
- .RESET (重启传感器才能生效)

4.3 测试验证

发送命令“.P”,此时未有返回的气压值。此时修改串口通信波特率为:4800,7,1,0,并再次输入命令“.P”,发现有返回的气压值(998.63hPa),说明气压传感器的通信参数已经修改成功了。

4.4 其他调试命令

- .FORM.1 (设置数据单位,单位为 hPa)

注意,发送调试命令修改 PTB210 气压传感器通信参数后,串口调试软件回显框里没有任何回应属于正常现象。

5. 结语

PTB210 气压传感器挂接在主采集器 HY3000 的 RS232-5 串口上,主采作为一个智能传感器看待集成到串口服务器中^[3],这样可以通过终端命令“打开串口透传功能(OPENCOM)”后再修改气压通信参数。但是,这种方法不能保证每次修改成功,即使修改成功后无法再次进行修改。通过以上对 PTB210 气压传感器的接线线缆分析,将气压传感器与电脑直连进行修改最直接最有效,保证了新型自动气象站气压传感器测量值的准确性,使新型自动气象站在气象观测业务系统中发挥应有的作用,保障自动气象站准确、稳定的运行。在新型自动气象站业务运行中,业务人员不仅要懂得原理,而且要分析设备运行机制,并在此基础上创新、探索,找到最有效的解决办法,确保仪器设备能够长期稳定运行。

参考文献

- [1] 中国气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社,2003.
- [2] 中国气象局气象探测中心.新型自动气象站实用手册[M].北京:气象出版社,2016.
- [3] 黄思源,刘钧.新型自动气象站观测业务技术[M].北京:气象出版社,2014.

作者简介:袁小燕(1984-),女,汉族四川人,本科学历,工程师,研究方向:装备保障。

(上接第 47 页)

根据边坡稳定性分级表,可判定该边坡整体基本稳定,局部可能有岩石松动崩落,基本不加固或局部加固,以工程防护为主。

4. 结论

本文根据地质勘察资料和实测数据,分析建立了滑体破坏模式,并采用经典的瑞典条分法、Janbu 法和毕肖普法等极限平衡方法对边坡稳定性进行计算分析,同时采用目前岩土工程广泛应用的强度折减法,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] 王绪勇.高层建筑下的节理岩体边坡稳定性研究[D].

山东科技大学,2011(5)。

- [2] 李瀛涛.复杂岩质矿山边坡的稳定性分析及加固治理研究[D].2011(9)。

- [3] 宋增春.仓上金矿露天矿北帮边坡稳定性分析[D].东北大学,2003.

- [4] 战玉宝.预应力锚索锚固段应力分布影响因素分析[J].土木工程学报,2007.

- [5] 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.

- [6] 郑兴亮.归来庄金矿露天开采转地下开采的边坡稳定性研究[D].山东科技大学,2013(4)。

- [7] 刘子振.边坡稳定性极限平衡法有有限元综合分析[D].中南林业科技大学,2007.