

Stability Analysis of a Landslide Based on Limit Equilibrium Method and Strength Reduction Method

Miao Zhang, Daoxi Yao, Yuan Zhang, Xiaobing Che, Bingwen Wang

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui
Email: zhangmiao199777@163.com

Received: Apr. 23rd, 2020; accepted: May 8th, 2020; published: May 15th, 2020

Abstract

The occurrence of landslide causes serious property loss and casualties. In order to ensure the safe construction of slope engineering and accurately analyze the stability of slope, the stability of landslide must be carefully analyzed. In this paper, the limit equilibrium method and the strength reduction method are used to calculate the safety factor of the slope, and the stability of the landslide body is compared and analyzed. The calculation model of landslide mass is established by using Lizheng software and FLAC3D as calculation tools. The safety factor is calculated by simplified Janbu method and strength reduction method, and its stability is evaluated according to the code for investigation of landslide prevention engineering (gbt32864-2016). Then FLAC3D is used to calculate the stability coefficient by strength reduction method to verify the reliability of the safety coefficient. The stability of a landslide mass in Tongling is studied. The results show that the calculation and analysis results of limit equilibrium method and strength in reduction method are consistent, and the overall stability of the landslide mass is good.

Keywords

Landslide, Lizheng Software, Janbu, FLAC3D, Strength Reduction Method Stability Analysis

基于极限平衡法和强度折减法的某滑坡体稳定性分析

张 苗, 姚多喜, 张 元, 车小兵, 王秉文

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南
Email: zhangmiao199777@163.com

收稿日期：2020年4月23日；录用日期：2020年5月8日；发布日期：2020年5月15日

摘要

滑坡的发生造成严重财产损失和人员伤亡，为了确保斜坡工程的安全施工和准确分析斜坡的稳定性，必须对滑坡的稳定性进行仔细的分析。分别运用极限平衡法和强度折减法计算斜坡的安全系数，对比分析滑坡体的稳定性。采用理正软件和FLAC3D作为计算工具，建立滑坡体的计算模型，运用简化Janbu法和强度折减法对其安全系数进行计算，依据《滑坡防治工程勘查规范(GBT32864-2016)》对其稳定性进行了评价。再用FLAC3D用强度折减法计算得出稳定性系数，验证所得安全系数的可靠性。研究了铜陵某滑坡体的稳定性，研究结果表明：极限平衡法和强度在折减法的斜坡稳定性计算分析上结果一致，该滑坡体整体稳定性较好。

关键词

滑坡，理正软件，Janbu法，FLAC3D，强度折减法，稳定性分析

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

为减少滑坡地质灾害对人民安全财产的威胁，斜坡工程的研究是近年来工程地质研究的重点。国际上滑坡的稳定性分析于二战后才进行系统研究。目前，针对国内外斜坡稳定性分析法主要为基于极限平衡理论的条分法和数值模拟法[1]。J. M. Duncan [2]综述了极限平衡法，极限平衡法主要有 Fellenius 法、Bishop 法、Janbu 法、Spencer 法、Morgenstern-Price 法、Sarma 法和不平衡推力传递法。而简化 Bishop 法[3]和 Janbu 法[4]由于原理简单，积累的工程经验较多，在滑坡体稳定性分析中得到了广泛的应用。国外学者 L. Jing [5]总结了有限元和离散元法，并给出了离散元和极限平衡法计算结果的异同。相较于极限平衡法，强度折减法把岩土体本身弹塑性变形的影响考虑在内，因此，更能适合复杂的边界条件并计算稳定性系数，使斜坡稳定性分析更加可靠。郑颖人、赵尚毅等[6]验证了采用摩尔-库仑等面积圆屈服准则得到斜坡稳定性系数的准确性，刘金龙[7]等、柴红保[8]等讨论了使用强度折减法如何判断斜坡体是否稳定，并给出判断依据。孙聪[9]等通过岩土体应力突变探究了斜坡稳定性；年廷凯等[10]研究了三维斜坡在不同条件的稳定性状况；宁宇等[11]应用离散元解释了斜坡的稳定性。由于强度折减法也在实践中不断改进，可以结合其他方法综合分析斜坡的稳定性。

上述研究成果在不同时期不同程度上为斜坡的稳定性的预测起到了积极的指导作用。但针对滑坡体稳定性分别采用极限平衡以及强度折减等方法系统研究还并不多见。为此，本文以某滑坡体为例，在分析其地质条件以及滑坡特征基础上，首先使用理正软件运用简化 Janbu 法求得滑坡体的滑动安全系数，采用 FLAC3D 软件的强度折减法计算出已建立模型的滑坡体的安全系数，并分析在不同工况下的稳定安全系数，研究成果可为工程操作提供参考。

2. 滑坡地质特征

2.1. 滑坡概况

勘查场地位于长江右岸笠帽山南麓。地貌上属于长江 I 级阶地上的剥蚀残丘，地貌单元类型单一。

地形复杂, 坡度 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$, 地势起伏较大, 相对高差最大可达 50 米。滑坡灾害体的边界以张拉裂缝和下错陡坎为主。坡体宽约 40 m, 斜长约 50 m。平均厚度 5.0 米, 体积 8000 m^3 。滑坡整体呈圈椅状, 滑坡主滑方向 159° 。滑坡体后缘为陡坎状, 后缘壁高度 1.5~2.4 m, 表面呈阶梯状, 横向张性裂缝发育, 裂隙可见深度 0.5~1.4 m, 裂缝宽 0.1~0.8 m, 且大部分裂缝已被破坏的土体掩埋, 裂缝出现追踪主滑面趋势, 判定为牵引式滑坡。

滑坡体的物质主要由: ①层粉质粘土、②层卵石土和③层粘土三种土层组成。①层粉质粘土, 灰褐色, 结构总体较松散, 局部未扰动处为硬塑状, 渗透性较强, 稍湿~湿, 厚 1.6~3.6 m。②层卵石土, 黄褐色, 稍密, 渗透性较强, 湿, 卵石粒径一般 5~10 cm 不等, 少量大于 30 cm, 卵石含量约占 50%~60%, 厚 0.6~1.0 m。③层粘土, 很湿~饱和, 硬塑状, 含团块状或条带状高岭土, 含量 5%~20%, 具有弱膨胀性, 厚 0.8~1.4 米。滑床主要为③层残积土, 砖红色, 很湿~饱和。该层土遇水易软化, 层厚 1.6~3.5 米。其下部为④层强风化含砾泥质粉砂岩, 渗透系数相对较小, 约为 0.65 m/d。滑动带岩性为砂质粘土, 软塑状, 砖红色, 厚度 0.3~0.5 m, 饱和状态, 结构松散, 孔隙率高, 粘聚力差。

2.2. 滑坡形成机制

勘察范围内发现了滑坡 1 处, 根据坡形和现场测量资料的综合判断, 此牵引式滑坡变形破坏过程为: 滑坡发生初期边界, 仅见张拉裂缝, 后来逐渐发展成下错陡坎。由于工程切坡、房屋加载及暴雨作用发生变形破坏, 地表出现裂缝, 根据地形地质条件分析, 其潜在的滑动带位于②层卵石土与③层残积土界面处。本次滑坡的发生, 是由于教学楼的基坑开挖, 滑坡体的前缘不断被侵蚀破坏, 使坡体阻滑段被进一步破坏, 抗滑力显著减小, 加之强降雨使土体重度加大, 雨水沿前次变形裂缝下渗至③层残积土及更深部位, ③层残积土饱水后软化形成滑动面, 饱水后的滑坡土体的静水压力和动水压力增大, 滑体容重不断增加, 抗滑力丧失, 致使滑坡体发生变形破坏。巨大的下滑力和临空面的存在使滑坡中下部产生强烈的切层作用, 滑坡体从③层残积中部剪出。

3. 滑坡稳定性对比分析

3.1. 理正软件极限平衡法计算安全系数

1、极限平衡法的基本原理

极限平衡法根据边坡上滑体或滑体垂直条分的力学平衡原理来判断边坡在各种状态下的受力破坏情况。该法将斜坡土体视为刚体, 并且忽略岩土体本身的塑性变形对边坡稳定性的影响, 简化计算边坡的安全系数。

2、简化 Janbu 法

Janbu 法针对实际工程中碰到的非圆弧滑动面的问题而提出的, 属于极限平衡法的一种。简化 Janbu 法在公式推导过程忽略条间竖向剪切力[12], 计算公式如下,

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left[(c_i b_i + W_i \tan \varphi_i) \frac{1}{\cos \alpha_i m_{\theta_i}} \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \tan \alpha_i}$$

简化 Janbu 法假定 $\Delta X_i = 0$ 。

其假设有: ①滑动面上的切向力 T_i 即是滑动面上土所发挥的抗剪强度, ②土条两侧法向力 E 的作用点位置为已知, 且一般假定作用于土条地面以 1/3 高度处[13]。如图 1 所示为 Janbu 法的受力示意图。

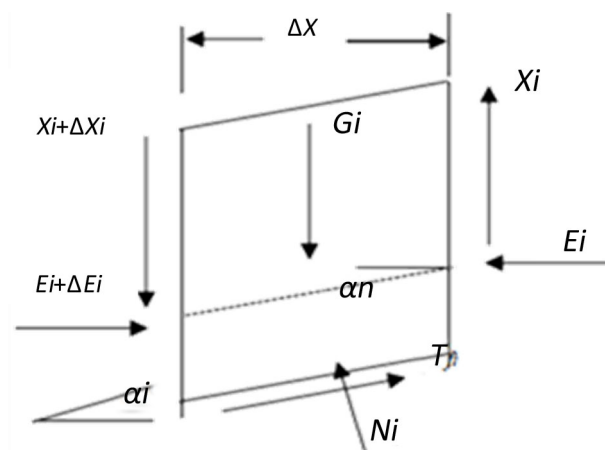


Figure 1. Janbu schematic diagram of force of general bar division method

图 1. Janbu 的普遍条分法受力示意图

3、计算剖面 and 计算参数的确定

根据滑坡的现场状况及剖面的布置安排，取主勘探剖面线作为滑坡稳定性计算的剖面。

计算参数根据取样室内土工试验成果、参数反演和相似地质滑坡地区经验值综合确定。

①滑坡岩土体参数取值

滑坡滑体土物理力学参数根据室内试验结果和经验值取加权平均值，见表 1。

Table 1. Value of natural severity and saturation severity of landslide rock and soil mass

表 1. 滑坡岩土体天然重度及饱和重度取值表

名称	天然重度(kN/m ³)	饱和重度(kN/m ³)	备注
滑体土	19.5	20.0	加权平均值

②滑带土抗剪强度(C, Φ)

滑坡现状主滑动面位于③层粉质粘土表层，滑带土以软塑状砂质粘土为主。根据取样室内试验结果，结合经验数据，确定其抗剪强度值见表 2。由于滑带土层较薄，取样深度难控制，部分样品代表性较差，造成试验结果与反演值有一定差异。

Table 2. Value of shear strength of sliding belt soil

表 2. 滑带土抗剪强度取值表

滑带岩土体名称	天然抗剪强度		饱和抗剪强度		备注
	C(kPa)	Φ(°)	C(kPa)	Φ(°)	
砂质粘土	16.6	15.9	11.4	14.3	试验值
砂质粘土	11.8	14.0	11.0	13.0	反演并参考经验数据

4、稳定性分析计算结果

根据该滑坡体的岩土体物理参数，在理正 6.0 软件中建立斜坡模型，并通过软件采用 Janbu 法对斜坡进行安全系数分析计算。在计算过程中，只考虑斜坡体自重，不考虑地震影响，得出该坡体的安全系数为 2.237，坡体是稳定的，模型的计算简图和计算结果图分别如图 2 和图 3。

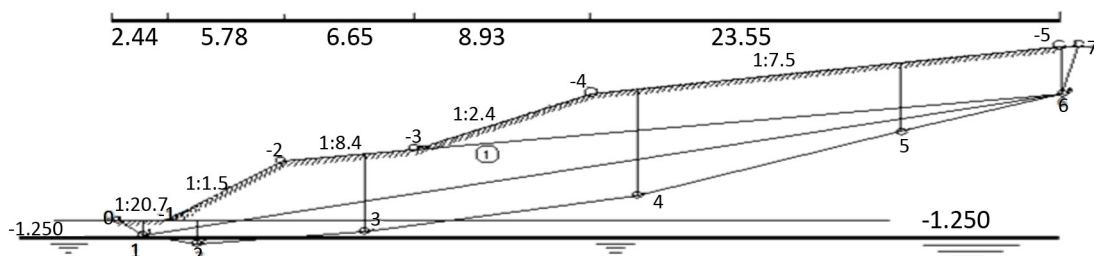


Figure 2. Schematic diagram of Janbu calculation

图 2. Janbu 计算简图

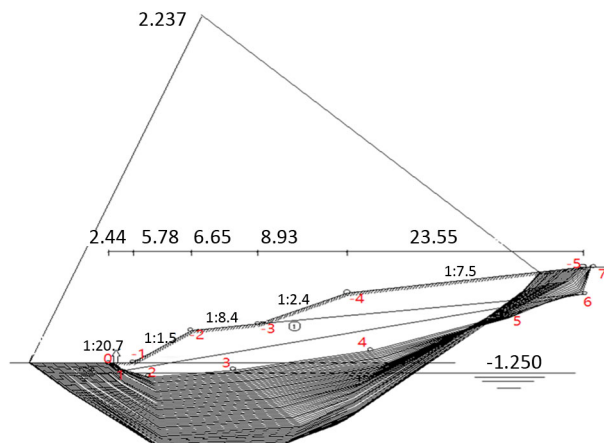


Figure 3. Calculation results of Janbu

图 3. Janbu 计算结果图

本次分析考虑到天然工况和暴雨工况两种情况进行分析。根据勘查成果，作用在滑坡上的荷载有：坡体自重、暴雨工况下的饱和状态下土体自重。表 3 计算出两种工况下滑坡体的抗滑稳定性安全系数从表中可以看出，在天然状况下，坡体的稳定性系数为 2.237，可知该坡体稳定；在暴雨工况下，抗滑稳定安全系数为 2.186，坡体仍是稳定的，但不及天然工况下坡体的安全系数大。

Table 3. Calculation results of safety factor

表 3. 安全系数计算结果表

计算工况编号	计算工况内容	荷载组合	抗滑稳定安全系数
工况 1	天然	自重	2.237
工况 2	暴雨	自重 + 20 年一遇暴雨	2.186

3.2. FLAC3D 强度折减法验算安全系数

1、强度折减法

信息技术的蓬勃发展，使工程的数据分析变得更加便捷，强度折减法在斜坡工程使用广泛，主要用来模拟斜坡岩土体的力学性质，进而分析岩土体的应力状态来判断斜坡是否存在安全隐患。相比于传统的定性分析法，强度折减法具有很多优点：

- 1) 适用的地形更广，传统定性分析法只能用来判断一般地形，对于复杂场地的分析极其困难，基于历史数据进行推断复杂；
- 2) 可以定量描述岩土体的关系，分析变形的应力变化；模拟斜坡破坏时各阶段的应力变化；

- 3) 在斜坡破坏各阶段，强度折减可以捕捉滑移面的变化形态；
- 4) 进行斜坡抗滑设计时，支护体与坡体均可模拟；
- 5) 求解安全系数时，不需要做假设，也无需岩土体进行条分[14] [15]。

2、强度折减法的基本原理

强度折减法通过有限元的分析，以此获得材料的稳定系数，在不断减小材料的粘聚力和内摩擦角，使得单元超过其应力极限导致其失稳，进而使得周围单元失稳造成材料整体的破坏，其减少的倍数被定义为安全系数，基本公式[16]为：

$$c^{trial} = \frac{c}{F_{trial}}$$

$$\varphi^{trial} = \arctan \left[\frac{\tan \varphi}{F_{trial}} \right]$$

3、斜坡失稳的判定

1) 利用数值确定

使用 FLAC3D 软件强度折减法进行稳定性分析时，可以通过计算数值的收敛与否来确定斜坡是否发生失稳，通过利用折减的原理，使得整体发生失衡破坏后，计算出的数值，如位移和塑性变形的大小不是定值。此时可判断斜坡失稳破坏。

2) 位移骤变确定

通过位移的突变来确定失稳，由于斜坡的变形一定会造成位移的变化，位移值也直接反应是斜坡的稳定性[17]。当折减到一定程度，位剧变大则认为斜坡失稳。

3) 塑性区贯通确定

岩土体是弹塑性的材料，其破坏是塑性区域的整体变化，非局部反应，当折减系数增大时，斜坡各部分的塑性变形程度不一，但如果各塑性区互相贯通，斜坡整体失稳[18]。

4、模型建立及参数的选取

在建立滑坡几何模型时，滑坡的地表形态和内部岩层的分布状态是严格遵照地质勘查相关图集资料；坡体形态及相关建筑物的空间分布形态的关键点直接从相关设计图中读取，然后在进行相应的模型构建如图 4 所示。

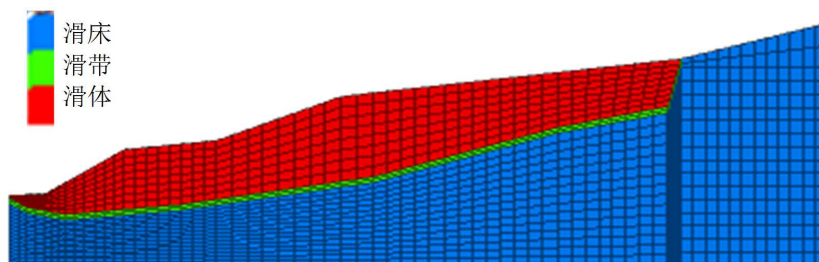


Figure 4. Landslide model diagram

图 4. 滑坡模型图

5、数值计算结果及分析

本次计算得剪切应变增量如图 5 所示。图中显示滑体上部剪应变增量数值较大，剪应变集中带已经贯通，剪切带已经形成。同时根据模拟结果可以看出滑坡体后缘和滑床保持稳定，不发生变形破坏。不稳定体主要分布在滑坡上部和滑带上以及滑坡前缘。



Figure 5. Shear strain increment diagram

图 5. 剪切应变增量图

此外, 针对暴雨工况下的滑坡稳定状况, 由 Flac3D 软件计算两种工况下安全系数如表 4, 天然工况下坡体安全系数为 2.97, 稳定状态, 在暴雨工况, 坡体安全系数为 2.73, 仍然稳定, 但低于天然工况下的安全系数, 与理正岩土软件计算数值存在差异, 但结论一致。

Table 4. Calculation results

表 4. 计算结果

工况	荷载	安全系数
天然工况	自重	2.97
暴雨工况	自重+暴雨	2.73

4. 结论

运用极限平衡 Janbu 法在对其稳定性进行计算, 求出在暴雨工况、天然工况下的安全系数值, 依据《滑坡防治工程勘查规范(GBT32864-2016)》对其稳定性进行了评价。用 FLAC3D 用强度折减法计算得出稳定性系数, 验证所得安全系数的可靠性。得出结论:

- 1) 在自然状态下, 该滑坡体处于一个稳定的状态, 在没有外力作用下发生滑坡的可能性不大;
- 2) 在暴雨状态下滑坡仍处于稳定状态, 发生滑坡的可能性不大。
- 3) 由数值模拟方法得出的安全系数比 Janbu 法计算得到的安全系数略高一些, 存在差异的原因在于两种方法都受到人为因素和计算模型建立简略的影响。但依据规范, 得出的结论是一致的。
- 4) 本文采用的简化 Janbu 法计算简单并避免了计算不收敛, 因而在边坡稳定性研究中得到了广泛应用, 但该法仅在条分较密时能够满足计算。而强度折减法考虑材料间相互作用, 适用条件更广。两者结合分析, 结果更准确。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(51479008)。

参考文献

- [1] 章广成. 水位变化对滑坡稳定性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2005.
- [2] Duncan, J.M. (1996) State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, **22**, 577-596. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:7\(577\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:7(577))
- [3] Hungr, O. (1987) An Extension of Bishop's Simplified Method of Slope Stability Analysis to Three-Dimensions. *Geotechnique*, **37**, 113-117. <https://doi.org/10.1680/geot.1987.37.1.113>

-
- [4] Hungr, O., Salgado, F.M. and Byrne, P.M. (1989) Evaluation of a Three-Dimensional Method of Slope Stability Analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, **26**, 679-686. <https://doi.org/10.1139/t89-079>
- [5] Jing, L. (2003) A Review of Techniques Advances and Outstanding Issues in Numerical Modeling for Rock Mechanics and Rock Engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **40**, 283-353. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00013-3)
- [6] 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.
- [7] 刘金龙, 栾茂田, 赵少飞, 等. 关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1345-1348.
- [8] 红保, 曹平, 林杭, 赵延林. 采用边坡稳定性强度折减法分析弹性应变能突变判据[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 1054-1058.
- [9] 孙聪, 李春光, 郑宏, 等. 基于软化特性的三维边坡强度折减有限元分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(SI): 407-413.
- [10] 年廷凯, 张克利, 刘红帅, 等. 基于强度折减法的三维边坡稳定性与破坏机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(1): 178-185.
- [11] 宁宇, 徐卫亚, 郑文棠. 应用离散元强度折减对复杂边坡进行稳定性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(SI): 569-574.
- [12] 李志刚, 曹磊. 严格 Janbu 法不收敛原因及其改进的探讨[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1053-1056.
- [13] 蔡志远, 马石城, 蔡志坚. 基于 C 语言程序的简布法边坡稳定分析[J]. 长沙大学学报, 2012, 26(5): 20-22+25.
- [14] 许冬丽, 於汝山. 三峡库区新集镇典型高切边坡破坏机理研究[J]. 路基工程, 2010(1): 42-44.
- [15] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 谭儒蛟, 李仁江, 曾如意. 虎跳峡龙蟠右岸边坡稳定性的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1996-2004.
- [16] 蒋鑫, 邱延峻, 凌建明. 强度折减法软件在评价边坡稳定性上之比较[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 302-309.
- [17] 黄鸿, 王遐莽. 高速公路边坡稳定性 FLAC3D 分析案例[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(1): 83-85.
- [18] 梁艳, 李同春. 边坡稳定分析有限元强度折减法失稳判据探讨[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2012, 34(2): 28-31.