

[文章编号] 1003-4684(2019)04-0086-04

# 基于部分强度折减法的白果树滑坡稳定性分析

夏承志, 张凌晨, 邹先进, 卢应发

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘要]** 基于传统强度折减法, 提出部分强度折减法思想结合不平衡推力法, 简述相关计算方法及物理意义, 应用白果树滑坡模型分析该滑坡目前的稳定性系数和可能的渐进破坏稳定性系数。研究表明: 部分强度折减法相对于传统强度折减法更能够近似反映出滑坡的渐进破坏发展趋势, 临界状态点在逐渐前移的同时, 相关不平衡推力也对应着逐渐增大, 且当临界状态移动至最后一条块时, 经计算所得出的稳定性系数即是滑坡的整体稳定性系数。

**[关键词]** 渐进破坏; 部分强度折减; 稳定性评价; 滑坡

**[中图分类号]** TU43

**[文献标识码]** A

滑坡历来是地质灾害防范的重点。对比分析众多地质灾害相关案例, 引起滑坡、泥石流等灾害最主要的因素包括地震作用、不合理开挖和降雨等。滑坡灾害发生是一般从裂纹萌生、局部破坏最终促使整体破坏的过程, 部分滑坡灾害伴随恶劣天气将演变成泥石流, 因此研究地质灾害并进行预测是非常必要的, 于是边坡工程一直以来都是众多学者争相研究的对象。将破坏面分析于临界应力状态下, 并假设滑体为刚体进行研究, 提出了瑞典圆弧法、不平衡推力法、简化毕肖普法、简布法等。随着数值计算的快速发展, Zienkiewicz 基于此提出了有限元强度折减法等, 在边坡稳定性中运用有限元计算稳定性系数, 并在边坡极限稳定性分析中被广泛应用<sup>[1-7]</sup>。贺建清<sup>[8]</sup>对结构面岩体三轴压缩试验进行了数值模拟, 为解决结构面岩体宏观力学参数开辟了一条新途径; 文献<sup>[9]</sup>提出: 通过沿着滑动面的未破坏区域进行强度折减来得到滑坡的稳定性系数, 并令临界状态保持向前移动趋势, 进而获得不同位置的临界状态的稳定性系数。

针对传统强度折减法, 学者们研究了岩体的行为特征, 并将岩土体根据行为特性划分为三种相关类型, 由此建立了一种剪应力模型可描述材料全过程行为<sup>[10]</sup>, 针对推移式和牵引式滑坡的相关研究,

总结其破坏机理、类型和控制标准, 并将滑坡沿滑面划分为不稳定区、欠稳定区、临界状态和稳定区 4 个区域, 定义了阻滑区和驱动下滑区, 提出滑坡临界状态的特征, 即在驱动下滑区内驱动下滑力沿滑面方向与摩阻应力不连续, 与之相对的位移也不连续; 建立了基于数值分析的滑面边界法, 考虑应力与位移之间的不连续性, 可以进一步解决应变不连续求解、临界状态点的确定和沿滑面应力分布等难题。在研究滑坡破坏机理和变形基础上, 定义了五种新方法描述滑坡破坏全过程<sup>[11-12]</sup>。

笔者在前人研究成果基础上, 将条分法和部分强度折减法相结合, 对条分法做进一步改善, 以提高其在滑坡稳定性分析的应用。

## 1 强度折减法简介

笔者采用的部分强度折减法思想是在传统强度折减法基础上提出的, 边坡渐进破坏的基本规律结合实例来阐述, 介绍部分强度折减法如下。

### 1.1 不平衡推力法

现阶段我国铁路、国土、水电等部门中广泛应用了由中国学者提出的不平衡推力法(图 1), 其计算公式如下:

正压力

[收稿日期] 2019-03-05

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(41372363); 国家自然科学基金主任基金(41641027); 三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212015CC60005)

[第一作者] 夏承志(1995-), 男, 湖北鄂州人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为岩土力学的理论

$$N_i = W_i \cos \alpha_i + P_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) + \beta_i l_i \cos \alpha_i \cos \alpha_i + \Delta_i l_i \cos \alpha_i \sin \alpha_i \quad (1)$$

正应力

$$\sigma_i^n = N_i / l_i \quad (2)$$

临界摩阻应力

$$\tau_i^{\text{crit}} = c_i + \sigma_i^n \tan \varphi_i \quad (3)$$

摩阻力

$$T_i^{\text{crit}} = c_i l_i + N_i \tan \varphi_i \quad (4)$$

抗滑力折减后的摩阻力

$$T_{i,F}^{\text{crit}} = T_i^{\text{crit}} / F \quad (5)$$

下滑力

$$P_i^S = W_i \sin \alpha_i + P_{i-1} \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) + \beta_i l_i \cos \alpha_i \sin \alpha_i + \Delta_i l_i \cos \alpha_i \cos \alpha_i \quad (6)$$

剩余下滑力

$$P_i = P_i^S - T_{i,F}^{\text{crit}} \quad (7)$$

式中:  $W_i$  为第  $i$  块重量;  $\beta_i$  为作用于地表上竖向均布荷载;  $\Delta_i$  为水平向均布荷载;  $l_i$  为条块底边长度;  $\alpha_i$  为条块底边与水平夹角;  $F$  为稳定系数;  $\sigma_i^n$  为法向应力。

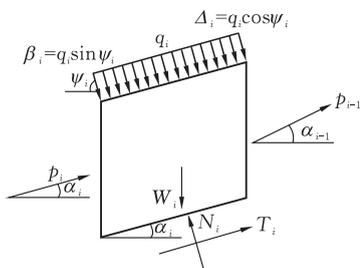


图 1 不平衡推力法受力图

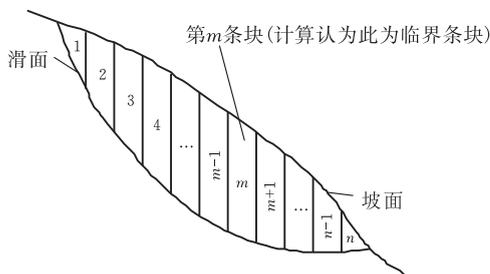


图 2 边坡稳定分析土条划分图

## 1.2 部分强度折减法

相比于类似图 2 中普遍性的边坡,不平衡推力法的计算过程是首先将所有条块整体考虑,然后式(1)~(7)进行计算,进而得出边坡稳定性系数,即边坡整体稳定系数,以此方法可知处于临界状态的条块为第  $n$  块条块(亦即:最后条块的临界摩阻力等于其下滑力)。

部分强度折减法的计算步骤为:同样采用公式 1~7 进行计算,且使条块为临界状态条块时,计算稳定系数等于 1,若取某一条块为第  $m$  条块,稳定性计算从第 1 块分别计算至第  $m+1, m+2, \dots, n$  块,以此获得每一次计算的稳定系数,这种计算过程描

述的物理意义可以表述为:临界状态点由第  $m$  条块逐渐向第  $m+1, m+2$  块移动,直至移动到第  $n$  条块,临界状态点在第  $n$  块条块时的稳定系数即为传统方法所获得的边坡整体稳定系数。部分强度折减法的计算过程正好体现了滑坡动态破坏的过程,不仅为岩土工作者确定滑坡临界状态提供了计算方法,而且能够为滑坡预测预报和工程防治提供理论基础。

## 2 地质条件

白果树滑坡地位于湖北省宜昌市秭归县青干河左岸,与河口相隔 3.6 km,距三峡大坝 45.6 km,其滑坡所处地理位置坐标为:经度  $110^\circ 36' 31''$ ,纬度  $30^\circ 58' 35''$ 。白果树滑坡位于水位 115 m 以下的斜坡前缘,后缘海拔 530 m。斜坡坡面形成多条冲沟,地形起伏大,总体倾向青干河。滑坡所处斜坡为顺向坡。

白果树滑坡体系(滑坡群),东起青干河大桥左岸,西至上游 500 m 大沟壑,根据微地貌形态及形成条件分为白果树西、小学、桥头等 3 个滑坡,平面形态总体呈不规则的扇形,前缘高程 115 m,宽度约 500 m,后缘高程 340~450 m,纵向长度约 560 m,总面积约  $28 \times 104 \text{ m}^2$ ,总体积约  $944 \times 104 \text{ m}^3$ (图 3)。



图 3 白果树滑坡平面图

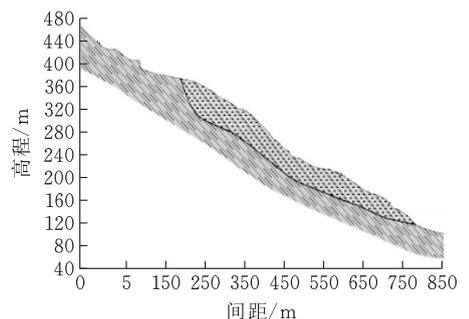


图 4 白果树滑坡 I-I 剖面图

白果树滑坡区岩性特征如下:

第四系(Q4):第四系主要分布于斜坡中部和下部,内含漂石,块径达 1~2 m,土为砂质粘土,可塑,碎块石含量差异较大,土层内一般粘土及碎块石含量分布为 7:3~5:5,局部块石较多,含量达 80%。

土层结构差异较大,表层松散,向深部渐变密实,大部分土体呈稍密-密实状态。前缘青干河河谷地带分布有冲积物,成分为砂及卵石,厚度5~10 m,散体结构。

侏罗系中统千佛崖组(J2p):该地区岩石性质为中厚层状泥质砂岩和砂质泥岩,部分区域夹杂碳质页岩,常导致岩层炭质页岩滑动,在风化之后强度会相对降低,岩层倾向 $140^{\circ}\sim 150^{\circ}$ ,倾角 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。

白果树滑坡区位于秭归向斜翼,受构造影响,裂隙相对发育,岩体被分裂成块状。两组节理的发育情况为: $204^{\circ}\angle 80^{\circ}$ , $287^{\circ}\angle 73^{\circ}$ 。

该地区的地表含水层分布情况主要是第四系松散岩孔隙水和碎屑岩基岩裂隙水。

地下水埋深相对较浅,在第四系土层中主要分布松散岩石孔隙水。大气降水为地下水主要补充来源,该区为相对丰富的水域,具有较好的富集条件。

裂隙岩体基岩裂隙水透水性较弱,大体处在裂隙发育的基岩中。地下水向下渗透,流至坡脚青干河。

虽然白果树滑坡产生雨季坡面坍塌以及前缘侵蚀塌岸,但规模不大,目前滑坡处于基本稳定状态,整体无明显变形,主要表现为前缘局部塌岸。由于三峡水库动态运行多年,前缘消落带岸坡浪蚀作用强烈,岸坡已经具有明显的坍塌特征,经过长久以来的侵蚀和塌岸已使得滑坡应力重分布。结合相关调查资料分析,滑坡体前缘部分已产生局部坍塌破坏,三峡水库水位持续下降时,前缘可能会继续产生塌岸,根据三峡库区水位监控,预测1.2 m日降幅工况下,滑坡将处于基本稳定状态。

### 3 实例分析

以白果树滑坡为工程实例进行说明,取图4中的I-I剖面图进行条块划分,多滑面倾角分布如表1所示。各力学参数取值如下:粘聚力为24 kPa,内摩擦角 $23^{\circ}$ ,重度值为 $24\text{ kN/m}^3$ ,剪切模量5000 kPa,条块划分示意如图5所示。

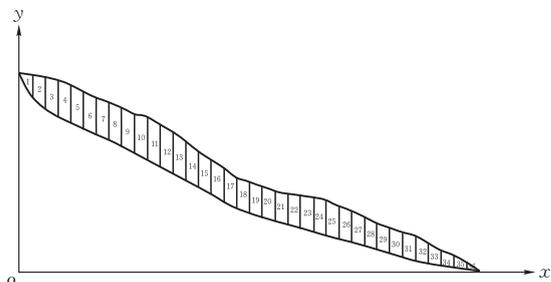


图5 滑坡条块划分图

不同于传统条分法为获取稳定系数将计算公式

进行多次迭代,并将最后一个条块剩余下滑力调整为零的计算思想,部分强度折减法的计算思想是:凝聚力( $c_i$ )和摩擦角( $\Phi_i$ )给定的情况下,找出稳定系数为1的条块的位置,假设第 $m$ 条块即为稳定系数为1的条块,然后计算第1块分别至第 $m+1, m+2, \dots, n$ 块的稳定系数,第 $n$ 块条块的稳定系数也就是滑坡整体的稳定系数,相对应的物理意义可描述为:第 $m$ 条块为现阶段的临界条块,但是随着变形以及时间的增加,临界条块从第 $m$ 条块转移到第 $n$ 条块,此刻滑坡的整体形态将从部分稳定状态演变成为完全破坏状态。

表1 各条块滑面倾角分布

条块号	滑面倾角/ $(^{\circ})$	条块号	滑面倾角/ $(^{\circ})$
1	64.7615	19	23.4145
2	42.0772	20	18.3868
3	35.5204	21	16.1843
4	27.7247	22	16.4407
5	26.6998	23	17.1400
6	24.5867	24	17.3641
7	24.4479	25	16.8939
8	28.4446	26	16.1710
9	27.5584	27	15.7374
10	29.5959	28	14.5742
11	29.8824	29	18.0087
12	64.7615	30	19.4019
13	30.2464	31	19.2160
14	30.6669	32	18.0557
15	31.0289	33	13.4551
16	31.3713	34	10.1236
17	31.2896	35	9.4645
18	28.8439	36	8.8726

对于白果树滑坡模型进行分析计算,由图6可以看出:对于单个条块不平衡推力由大减小,峰值推力出现15-20号条块间。随着临界状态点逐渐向前移动,其不平衡推力随之增大(图7),当临界条块移动至最后一块时,可得滑坡的整体稳定系数为1.15,即滑坡处于稳定状态,其他条块相对于采用部分强度折减方法的稳定系数详如表2所示。

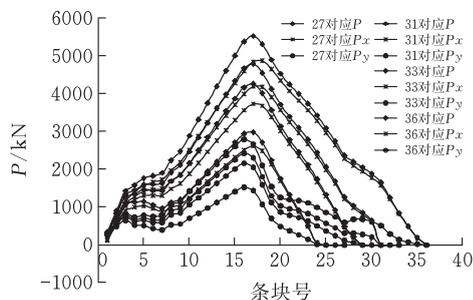


图6 不同临界条块的不平衡推力曲线图

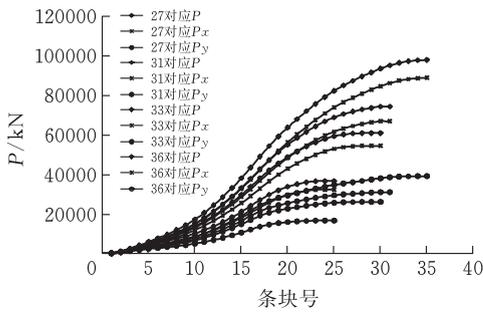


图 7 不同临界条块的不平衡推力分布图

表 2 部分强度折减法稳定系数表

临界状态条块	稳定系数
24	1.0023
29	1.0711
32	1.1034
36	1.1520

根据《滑坡防治工程勘查规范 GB/T 32864—2016》<sup>[13]</sup>可知,滑坡稳定状态可根据滑坡稳定系数进行划分,当滑坡稳定性系数 $\geq 1.15$ 时可认为滑坡处于稳定状态。从表 2 计算结果可知,临界条块从 24 号条块移动至 36 号条块时,稳定性系数由 1.00 增大至 1.15,36 号对应的稳定性系数即为白果树滑坡的整体稳定性系数,由此可确定白果树滑坡处于稳定状态。

## 4 结论

采用部分强度折减法计算得到白果树滑坡稳定性,结果表明:

1)介绍了部分强度折减法的计算方法及物理意义,经计算结果可以看出,白果树滑坡的临界条块从 24 号条块移动至 36 号条块时,稳定性系数逐渐增大,滑坡的整体稳定性系数为 1.152(表 2),可以确定该滑坡基本处于稳定状态,与工程勘察实际情况一致。

2)相对于传统的强度折减法,通过本文计算得到滑坡是渐进破坏的过程,随着临界状态点前移滑坡逐渐破坏(图 6),其不平衡推力也越来越大(图 7),由此表明部分强度折减法可以近似演示滑坡渐进破坏的过程。

- [2] LIU Yan-zhang, GE Xiu-run, LI Chun-guang, et al. Stability analysis of slope and dam foundation based on vector method safety factor [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2130-2140.
- [3] ZHU Da-yong, QIAN Qi-hu. Rigorous and quasi-rigorous limit equilibrium solutions of 3d slope stability and application to engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1513-1528.
- [4] 贺建清,刘秀军.基于最小二乘法的边坡稳定性分析 [J].岩土力学,2012,33(6):1724-1729.
- [5] LI Ning, QIAN Qi-hu. Four criteria of stability analysis and assessment of high rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1754-1759.
- [6] ZHENG Hong. A rigorous three-dimensional limit equilibrium method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1529-1538.
- [7] ZHENG H, YANG Z L, SN G H. Extreme solutions to the limit equilibrium method subjected to physical admissibility [J]. Natural Hazards, 2013, 65(1): 79-96.
- [8] 贺建清,李者,刘毅,等.含结构面岩体三轴压缩试验数值模拟研究 [J]. 矿冶工程, 2016, 36(4): 1-7.
- [9] 卢应发,邓国栋,杨丽平,等.滑坡的关键块力学行为及力传递特征和不同应力状态的稳定系数研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 884-891.
- [10] 卢应发,路韬,周建军,等.一种新的节理模型及其在基桩分析中的应用 [J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 967-973.
- [11] LU Ying-fa. Deformation and failure mechanism of slope in three dimensions [J]. Journal of Rock Mechanics and Geo-technical Engineering, 2015, 7(2): 109-119.
- [12] 卢应发,黄学斌,刘德富.边坡稳定分析条块力-位移法及其应用 [J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2780-2786.
- [13] 中华人民共和国国土资源部. GBT32864—2016. 滑坡防治工程勘查规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

(下转第 98 页)

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Guo M W, Ge X R, Wang S L. Slope stability analysis under seismic load by vector sum analysis method [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2011, 3(3): 282-288.