

[文章编号] 1003—4684(2020)01-0059-05

不平衡推力法与简布法的比较分析

习常志, 朱 蕾, 卿 菁, 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] 采用传统的不平衡推力法及 Janbu(简布)法改进之后对应的部分强度折减法, 分别对杨家沱滑坡稳定性进行了分析, 对比研究结果可得: 经折减后的不平衡推力法和简布法计算出的推力均随临界状态点位置变化呈现增长趋势, 当最后一个条块达到临界状态时, 此时算出的稳定系数则是滑坡的整体稳定性系数。计算出简布法的强度折减稳定系数比不平衡推力法大, 同样可界定滑坡的稳定状态, 演示了滑坡的逐步渐进破坏过程。

[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

山体滑坡、泥石流等地质灾害的发生, 一方面导致国家经济遭受严重打击, 另一方面对附近居民造成生命威胁。这些地质灾害往往是由一些地震、暴雨、乱砍乱伐等自然和人为原因造成的。因此, 研究对滑坡的稳定性并能及时作出防范具有重大意义^[1]。

目前针对坡面失稳现象, 很多专家提出了不同的研究方法, 假设滑体为刚体, 不产生变形的情况下, 提出了多种滑坡稳定性计算方法, 如 Bishop 条分法、瑞典圆弧条分法、普遍条分法(简布 Janbu 法)、楔形体法、Fellenius 法、Sarma 法、有限元强度折减法等^[2-7]。文献[8]提出了两种剖分强度折减法, 一是针对滑面未破坏区域实行强度折减, 并计算出稳定性系数; 二是对于滑面破坏区实行强度折减, 促使其临界状态逐渐向前推移, 获得不同位置下临界状态的稳定性系数。文献[9-10]表明, 在分析边坡稳定性的工程实例中, 研究者都会用到极限平衡条分法。

以上关于滑坡的研究方法仍有不足的地方: 1) 现存的滑坡稳定性研究的方法均是假设滑面上的应力同时达到了临界状态, 但滑体实际上仅有一点是处于临界状态, 这与实际相违背, 不能突出工程实际情况^[11-12]。2) 没有考虑到滑坡的渐进破坏发展趋势, 并不适宜描述边坡渐进破坏过程, 土体发生变形能影响边坡的稳定性^[13-14]。

随着对边坡研究越来越广泛, 人们对滑坡又有

新的认识, 卢应发等^[15]针对传统强度折减法, 提出了部分强度折减法, 当临界状态一点一点向前移动时, 在未破坏区进行强度折减和在破坏区进行强度折减。本文基于传统的强度折减法, 用部分条块强度折减法对杨家沱滑坡进行了稳定性评价, 最终得出的结果为: 部分条块强度折减法可以很好地体现滑坡渐进破坏过程。

1 地质条件

杨家沱滑坡位于长江右岸, 距三峡大坝 51 km。行政区划隶属于秭归县沙镇溪镇台子湾村九组, 其地理位置坐标为: 经度 $110^{\circ}34'32.4''$, 纬度 $31^{\circ}00'15.3''$ 。交通条件较为便利。斜坡前缘位于 135 m 水位以下, 后缘高程 420 m。斜坡周围地形起伏大, 总体倾向长江, 滑坡区位于长江右岸, 斜坡平面呈箕形, 剖面直线形, 坡度 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$, 逆向坡。斜坡左侧和右侧为冲沟, 左侧边界有次级滑体出现。杨家沱滑坡滑体长约 400 m, 宽约 420 m, 面积 $13.2\times 104\text{ m}^2$, 平均厚度约 20 m, 体积 $264\times 104\text{ m}^3$, 主滑方向 49° (详见图 1、2)。滑坡左侧边界发育次级滑体, 左侧边界与杨家沱滑坡左侧边界重合, 右侧以裂缝为界, 后缘位于沙黄公路上侧高程约为 258 m, 前缘直抵长江, 次级滑体面积 1.7 万 m^2 , 均厚约 5 m, 长约 8~10 m, 体积 8.5 万 m^3 。

滑体上部为碎石土: 灰褐色或紫红色, 碎石成分为泥岩, 块径 10~250 mm, 土质为砂质粘土, 松散—

[收稿日期] 2019—09—09

[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] 习常志(1994—), 男, 湖北荆州人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为岩土力学

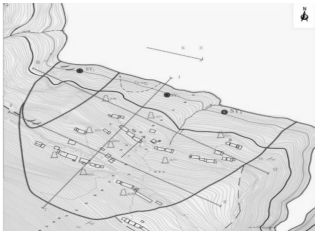


图1 杨家沱滑坡平面图

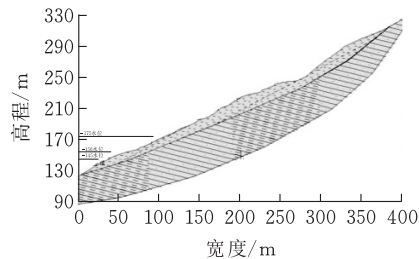


图2 杨家沱滑坡 I-I 剖面图

密实,可塑,土石分布不均,上部土石比为6:4,下部3:7。下部为块石土:紫红色,岩芯呈柱状或散块状,块石以紫红色钙质泥岩为主,块径60~500 mm,岩质较硬。土质为砂质粘土,稍密—密实,稍湿,土石比为2:8。

滑带为堆积层与基岩接触带,以碎石土为主,现场未见露头。紫红色,软塑,以粉质粘土为主,次为砂质泥岩角砾,粒径为3~9 mm,呈次棱角状,土石比为7:3,擦痕不明显,刀切面较光滑。

滑床以砂泥岩层为主,滑床为底部基岩,即三叠系中统泥岩与砂岩互层地层,紫红色,岩芯呈短柱状或碎块状,中—厚层状构造,夹钙质结核,风化程度根据深度变化呈强—微风化不等。下伏基岩为三叠系中统巴东组砂岩、泥岩互层的地层中,滑坡体地层产状 $145^{\circ}\sim 155^{\circ}\angle 38^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 。

杨家沱地层为砂岩和泥岩,泥岩为易滑地层,为滑坡形成提供了物质条件,同时坡体结构物质结构松散为滑坡提供有利的物质条件。滑坡所发育的地形坡度较陡 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$,倾向长江,前缘坡脚在长江不断冲刷下切形成的临空面,使滑坡体有了变形的空间,特定的地形地貌为滑坡体提供了空间条件。降雨透过滑体表面裂隙不断渗入,软化滑体土质及滑带土体,进而促使滑带土体抗剪强度骤减,直至完全失去力学性能指标。同时降雨作用也将抬高地下水位,增大地下水力坡度;其次滑坡体重量受到地下静水压力效应会逐渐增大;最后渗流方向上的主滑力受地下动水压力影响而增大。伴随动、静水压力的影响及滑带土体的软化效应,滑体失稳可能性更大。三峡水库水位的消落,对滑坡的稳定性产生一定的影响,此滑坡应属于动水压力型滑坡,库水位下降是导致滑坡复活的主要诱因。

2 部分强度折减法

文中引用卢应发等^[8]提出的部分强度折减法思想,介绍由传统方法改进后两种不同的部分强度折减法,进而阐述了边坡渐进破坏的基本变化规律,具体如下:

2.1 不平衡推力法

传统的不平衡推力法广泛应用于现行滑坡稳定性分析中,其计算公式具体如下:

不平衡推力法的基本假设:

- 1)假设条块在外力的作用下始终不产生变形,条块根据一定的竖向间隔进行划分。
 - 2)后一条块对前一条块会产生推力作用,前一条块中心处为作用点所在,并会产生平行后面一条块底边的作用力。
 - 3)条块的抗滑应力应满足临界状态下摩尔库伦准则。
 - 4)条块转动和条块之间的剪力都不加以考虑。
- 其基本公式推导步骤如下:

正压力

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

正应力

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

临界摩阻应力

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

摩阻力

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

抗滑力折减后的摩阻力

$$T_{i,F}^{cirt} = T_i^{cirt} / F$$
 (5)

下滑力

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

剩余下滑力

$$P_i = P_i^S - T_{i,F}^{cirt}$$
 (7)

式中: W_i 分别为第 i 块的重量, β_i 为边坡竖直方向均布荷载, Δ_i 为水平方向的均布荷载, l_i 为条块底边的长度, α_i 为水平方向与条块底边的夹角, F 为稳定系数, σ_i^n 为法向应力。

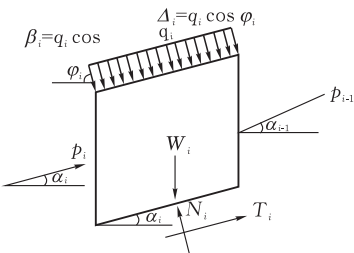


图3 不平衡推力法受力图

2.2 简布法

简布(Janbu)法适用于各种滑体模型且滑动面不需要为圆弧,求解时滑体各个条块满足极限平衡条件和静力平衡条件,整体满足力矩平衡。其主要

特征是假设前面条块受到后面条块的作用力,作用点位于前面条块侧面高度的下 1/3 处。

简布(Janbu)法的基本假设:

- 1)假设条块在外力的作用下始终不产生变形,条块根据一定的竖向间隔进行划分。
- 2)假定在同一时刻所有条块底部均处于极限状态,滑裂面上的稳定性系数均一样。
- 3)假定每个条块间推力的作用点的连线为直线分布,作用点位于前面条块的三分之一的位置上。
- 4)假定土条上全部滑裂面的交点和竖直荷载的合力作用线与 ΔN 的作用点位置重合;此时滑坡稳定性问题可看作平面应变问题。

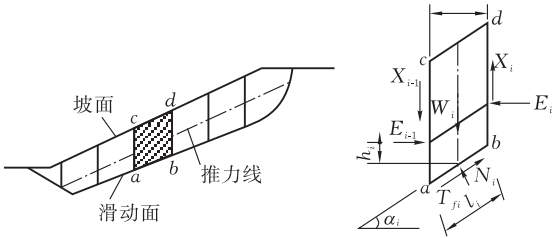


图 4 简布法受力分析图

力的平衡,竖直方向合力为零,有

$$N_i = \frac{1}{\cos \alpha_i} (W_i + \Delta X_i - T_{fi} \sin \alpha_i) \tag{8}$$

其中, $\Delta X = X_{i+1} - X_i$, 力的平衡,水平方向合力为零,有

$$\begin{aligned} \Delta E_i &= N_i \sin \alpha_i - T_{fi} \cos \alpha_i = \\ &= (W_i + \Delta X_i) \tan \alpha_i - T_{fi} \sec \alpha_i \end{aligned} \tag{9}$$

对于整个滑动土体 $\sum \Delta E_i = 0$, 可得

$$\sum (W_i + \Delta X_i) \tan \alpha_i - \sum T_{fi} \sec \alpha_i = 0 \tag{10}$$

根据安全系数的表达和 C-M 准则要求,有

$$T_{fi} = \frac{\tau_{fi} l_i}{K} = \frac{c l_i + N_i \tan \varphi}{K} = \frac{c b_i \sec \alpha_i + N_i \tan \varphi}{K} \tag{11}$$

联合求解式,得

$$\begin{aligned} T_{fi} &= \frac{c b_i \sec \alpha_i + N_i \tan \varphi}{K} = \\ &= \frac{c b_i \sec \alpha_i + \sec \alpha_i (W_i + \Delta X_i - T_{fi} \sin \alpha_i) \tan \varphi}{K} \end{aligned} \tag{12}$$

化简可得:

$$T_{fi} = \frac{1}{K} [c b_i + (W_i + \Delta X_i) \tan \varphi] \frac{1}{m_{ai}} \tag{13}$$

$$K = \frac{\sum \frac{1}{\cos \alpha_i m_{ai}} [c b_i + (W_i + \Delta X_i) \tan \varphi]}{\sum (W_i + \Delta X_i) \tan \alpha_i} \tag{14}$$

其中, $m_{ai} = 1 + \frac{\tan \varphi \tan \alpha_i}{K}$ 。对条块底边上的中点 o 点进行力矩平衡, $\sum M_o = 0$, 有

$$E_i (b_i \tan \alpha_i + h_i) + \frac{1}{2} \Delta X_i + X_i b_i = E_{i+1} h_i \tag{15}$$

注意到条块的宽度 b_i 较小,则高阶微量 $\Delta X_i b_i$ 可忽略不计,整理上式得:

$$X_i = \frac{\Delta E_i h_i}{b_i} - E_i \tan \alpha_i \tag{16}$$

E_i 值是条块 i 一侧各土条的 ΔE_i 的总和,即 $E_i = E_1 + \sum_{i=1}^{i-1} \Delta E_i$, 其中 E_1 是第一个条块边界上的水平法向作用力。 $\Delta E_i = E_{i+1} - E_i$, 而 $\Delta X_i = X_{i+1} - X_i$, 由上述公式可以计算得到 ΔX_i 。以上为简布法相关安全系数计算公式,但该式的求解过程中仍需运用迭代法。

假设 $\Delta X_{mai} = 0$ (可看作简化的 Bishop 法), 假定 $K = 1$, 求解出 m_{ai} 带入式 (10) 得到 K , 若所得出的 K 值与假定值相隔甚远,则由新的 K 值再次计算 m_{ai} 和 K , 反复逼近至假定值即满足要求,计算出 K 的第一次近似值。由式 (9)、式 (13) 及式 (16) 分别求出每一土条的 T_i , ΔE_i , 及 X_i , 并计算出 ΔX_i 。

重复步骤 1, 求解出新的 ΔX_i , 通过计算得到 K 的第二次近似值, 并以此值反复计算出每一土条对应的 T_i , ΔE_i , 及 X_i , 直到前后计算的 K 值满足计算的精度要求。

式中: i 为分条号; α_i 为第 i 条块底边与水平方向的夹角, 度; φ 为内摩擦角, 度; c 为内聚力, KPa; b_i 为第 i 条块的宽度, m; l_i 为第 i 条块底面长度, m; h_i 为推力线距滑裂面的垂直距离, m; γ 为第 i 条块的重度, kN/m³; W_i 为第 i 条块的重量, kN; X_i 为第 i 条块右边的竖向剪力, kN; X_{i+1} 为第 i 条块左边的竖向剪力, kN; ΔX 为第 i 条块左边的竖向剪力对右边的竖向剪力的差值, kN; E_i 为作用于条块右边的水平推力, kN; E_{i+1} 为作用于条块左边的水平推力, kN; ΔE 为两者的差值; $\Delta E = E_{i+1} - E_i$, kN; T_{fi} 为作用于条块底部的总切向力, kN; N_i 为作用于条块底部的总法向力, kN。

2.3 部分强度折减法

建立边坡模型见图 5, 不平衡推力法和简布法求解过程如下: 利用公式 (1) ~ (7) 及公式 (8) ~ (16), 计算出滑坡的稳定系数, 得出的稳定性系数即该滑坡的整体稳定系数, 其反映着最后条块的下滑力刚好等于其对应的临界摩阻力, 即最后条块处于临界状态。

部分强度折减法的计算过程是先按照不平衡推力法中的公式 (1) ~ (7) 和简布法中的公式 (8) ~ (16) 的推导过程进行计算, 使获得的稳定系数为 1, 则与之相对应的条块处于临界状态, 若此条块是第 m 条块, 然后从第 1 条块至第 $m + 1, m + 2, \dots, n - 1, n$ 分别计算出不同的稳定性系数, 实施这种计算

的物理意义是:临界状态点是在缓慢的向前移动,即从第 m 条块移至第 $m+1, m+2, \cdots, n-1, n$ 条块,当移到第 n 条块时即为滑坡的整体稳定系数。

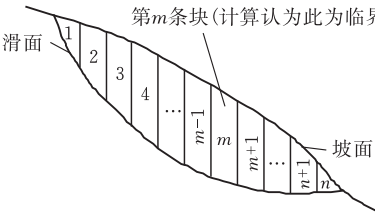


图 5 边坡稳定分析土条块划分图

3 实例分析

以杨家沱滑坡 I-I 剖面为例分析,取滑体重度为 19 kN/m^3 ,根据现场的土质情况决定凝聚力为 25 kPa 、摩擦角为 37° ,条块划分情况见表 1,条块划分见图 6。

表 1 条块划分情况

条块号	条块底边长/m	条块宽度/m	滑面倾角/(°)
0	0	0	0
1	20.0443	11.6829	54.3485
2	19.7252	11.1266	55.6617
3	20.5221	11.1266	57.1683
4	20.8290	11.6829	55.8823
5	19.4168	10.5703	57.0173
6	20.8301	11.6829	55.8843
7	14.0836	11.1266	37.8109
8	13.6483	10.5703	39.2427
9	13.6491	10.5702	39.2472
10	13.9805	11.6829	33.3157
11	14.0844	11.1266	37.8151
12	13.6491	10.5702	39.2471
13	14.5279	11.6829	36.4698
14	14.0844	11.1266	37.8151
15	14.0852	11.1266	37.8194
16	13.0634	10.5702	35.9874
17	14.0844	11.1266	37.8151
18	13.0658	10.5702	36.0015
19	13.9805	11.6829	33.3158
20	13.5183	11.1266	34.6063
21	13.5198	11.1266	34.6155
22	13.5190	11.1266	34.6109
23	13.5183	11.1266	34.6062
24	12.0610	10.0139	33.8733
25	13.9798	11.6829	33.3112
26	13.5198	11.1266	34.6155
27	14.0844	11.1265	37.8151
28	11.6134	10.5702	24.4706
29	12.5311	11.1266	27.3878
30	12.5317	11.1266	27.3932
31	13.0282	11.6829	26.2674
32	12.5311	11.1266	27.3878
33	11.6129	10.5702	24.4646
34	12.5260	10.5702	32.4498
35	13.0294	11.6829	26.2779
36	12.1209	11.1266	23.3698

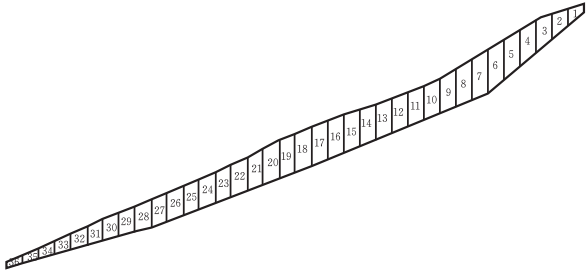


图 6 杨家沱滑坡条块划分图

针对杨家沱滑坡,按照本文给出部分强度折减法的推导公式,分别计算出滑坡的稳定系数结果详见表 2 和表 3。随着临界状态点从第 m 条块一点一点向前移动,其不平衡推力也不断地增大(图 7),当临界状态点移至最后一个条块时,获得的稳定系数即为滑坡整体稳定系数。

表 2 不平衡推力稳定系数与稳定度

临界状态条块	稳定系数	稳定度
26	1.0174	0.0500
29	1.0278	0.0403
32	1.0567	0.0134
36	1.0710	0.00

表 3 简布法稳定系数与稳定度

临界状态条块	稳定系数	稳定度
26	1.0214	0.0683
29	1.0362	0.0548
32	1.0836	0.0116
36	1.0963	0.00

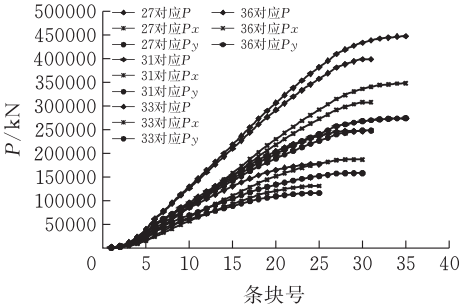


图 7 不同临界条块的不平衡推力曲线图

从表 2 和表 3 可推断出:经折减后的 Janbu 法和不平衡推力法,临界状态移至 26 条块时,求得稳定系数分别为 1.0214 和 1.0174(稳定度分别为 0.0683 和 0.0500),即表示杨家沱滑坡的 26 号条块位置处于欠稳定状态;临界状态移至 29 条块时,其稳定系数分别为 1.0362 和 1.0278(稳定度分别为 0.0548 和 0.0403),说明滑坡至 29 条块处于仍欠稳定状态;临界状态移至 32 条块时,求得稳定系数分别为 1.0836 和 1.0567(稳定度分别为 0.0116 和 0.0134),说明滑坡至 32 条块处于基本稳定状态;临界状态移至 36 条块时(即最后一条块),求得稳定系数分别为 1.0963 和 1.0710(稳定度都为零),此时所

得稳定性系数即为滑坡整体稳定性系数。综上对比可知:经折减后求得每个状态的不平衡推力法的稳定系数都略小于 Janbu 法,表明了不平衡推力法相对于 Janbu 法更能精确的描述出滑坡的真实稳定性。

4 结论

- 1)通过对比传统的滑坡稳定性求法,采用部分强度折减法,借用杨家沱滑坡实例进行求解分析,计算出滑坡的整体稳定系数和稳定度,根据计算结果知:杨家沱滑坡处于基本稳定状态,并阐明了部分强度折减法可以近似展现滑坡的渐进破坏的基本规律。
- 2)不平衡推力法和简布法均对强度进行折减来求解滑坡整体稳定性系数,但简布法所得相关整体稳定性系数大于不平衡推力法所得结果。
- 3)根据文中采用的部分强度折减法知,所求得推力随临界状态点位置变化呈现增长趋势,当最后一个条块达到临界状态时,算出的稳定系数则是滑坡的整体稳定性系数;但是采用强度折减法表征滑坡的渐进破坏过程难以与变形紧密相关。

[参 考 文 献]

[1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报,2006,26(3):433-454.

[2] 谢健全.地质灾害防治工程技术及措施分析[J].低碳世界,2018(5):351-352.

[3] 卢应发,刘德富,石峻峰.基于牵引式斜坡变形破坏机理的稳定性分析和预测预警方法:中国,ZL201410180387.3[P].2014-07-23.

[4] 卢应发,石峻峰,刘德富.一种边坡稳定性计算的滑面边界法:中国,ZL20141002508.1.0[P].2014-04-16.

[5] 卢应发,石峻峰,刘德富.基于边坡变形破坏机理的临界位移预测预警方法:中国,ZL201410014057.7[P].2014-04-09.

[6] 殷坤龙. 降雨对滑坡的作用机理及动态模拟研究[J]. 地质科技情报,2002,21(1): 75-78.

[7] 姚海林,郑少河,陈守义. 考虑裂隙对雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报,2001,23(5):606-609.

[8] 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.

[9] ZHU Dayong, Qian Qihu. 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.

[10] LI Ning, Qian Qihu, Four criteria of stability analysis and assessment of high rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (9): 1754-1759.

[11] 周跃峰,谭国焕,甄伟文,等.入渗诱发黄土滑坡的力学机制[J].岩土力学,2013,34(11):3173-3179+3186.

[12] 柴海峰,申月芳,郭磊,等.临界状态下滑坡稳定性分析方法研究[J].长江科学院院报,2013,30(05):70-75+91.

[13] 杨丽平.一种黄土滑坡渐进破坏过程分析[J].岩土力学,2018,39(7):2591-2598.

[14] 王振,叶晓明,刘永新.考虑滑坡渐进破坏的改进简布条分法[J].岩土力学,2018,39(2):675-682.

[15] LU Yingfa. Mechanism and stability analyses of progressive failure of pull-type landslide [J]. Proceedings of the third Academic Conference of Geology Resource Management and Sustainable Development, 2015, 2(1):281-291.

Comparative Analysis of Unbalanced Thrust Method and Janbu Method

XI Changzhi, ZHU Lei, QING Jing, LU Yingfa

(School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068,China)

Abstract: In this paper, the stability of Yangjiatuo landslide is analyzed by partial strength reduction method, including unbalanced thrust method and Janbu method. The results show that the unbalanced thrust increases with the position of the critical state point. When the last block reaches the critical state, the stability coefficient calculated is the landslide. The overall stability coefficient is calculated, and the strength reduction stability coefficient of the simplified method is larger than that of the unbalanced thrust method. At the same time, the stability of the landslide can be calculated, which can also be used to stabilize the stability of the landslide. It shows that the landslide is progressively destroyed. The strength reduction method of some slices can approximately reflect the destroying trend of the landslide.

Keywords: progressive failure; partial strength reduction method;safety factor evaluation;landslide