

[文章编号] 1003—4684(2022)02-0075-06

基于条分法对边坡渐进破坏分析及多参量评价

胡 鹏

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 在滑坡传统条块法分析的基础上,应用部分强度折减法及理想弹塑性模型,用推广的条块法模拟边坡的渐进破坏过程,提出临界状态条块的决定方法,使边坡的传统条块稳定分析与变形紧密相关。在边坡临界状态逐步移动过程中滑体整体曲线表现出摩阻力随之减小,剩余推力和驱动下滑力随之增大,当所划分的最后条块达到临界状态,则边坡发生破坏。以巴东青干河桥头边坡为例,以不平衡推力数值条分法理想弹塑性模型揭示边坡的渐进破坏过程中各物理力学参量的演化特征,对边坡全过程渐进破坏中的点、面进行多参量评价分析。研究结果表明:数值模拟的条块分析法较好地描述巴东青干河桥头边坡的渐进破坏过程,并为边坡检测以及防范提供支撑。

[关键词] 渐进破坏; 条分法; 多参量评价; 数值模拟

[中图分类号] TU43 [文献标识码] A

随着边坡段数量增加,关于坍塌、滑坡和落石的故事也频频发生,造成不利影响。由于受到地形地貌、地质条件的限制,边坡相关问题研究变得十分重要。边坡滑体是具有侧向临空面的岩土体,复杂地质状况下边坡问题成为建筑物建造和养护以及人生安全的关键问题之一,它直接关系到工程安全,对于边坡破坏预防意义重大。诸多学者对于边坡临界应力状态破坏面在假设边坡为刚体的情况下进行分析,提出了简化 Bishop 法、Janbu 法、圆弧法、不平衡推力法等^[1-6]。李涛、胡晓东等^[7]利用瑞典条分法研究边坡破坏的机理,但此方法并未考虑条块之间相互的作用;魏久坤、李泽、唐高朋等^[8-9]建立非线性数学规划边坡模型来求解最大稳定安全数最优解,但所得参数较为复杂,不能够综合考虑影响边坡稳定性各个因素,存在较大误差。张福海、梁喆等根据极限平衡法基本假定,利用条分法圆弧滑动机理将滑动土体径向条分,结合相关特点对边坡进行受力分析,同样也没有考虑到条块之间的相互作用以及条块本身可能发生的转动。条分法因简单的特点在工程界得到广泛使用,但仍存在简化条块与力的传递时忽略了对于严密性产生的损害,对抗滑力的折减使得模型计算与工程实际状况有较大的差距,从而难以接近真实工况。本文在前者基础上将条分法与部分强度折减法相结合,对条分法进行进一步优化,将滑坡沿滑面划分为不稳定区、欠稳定区、临界状态和稳定区等四个区域,定义了阻滑区和驱动下

滑区,提出滑坡临界状态的特征,并结合传统条分法,利用理论计算、有限元分析及 matlab 数值模拟出边坡渐进破坏全过程,考虑了各条块之间相互作用以及传递形式,并且分析了条块中各个受力点的破坏状态从而延伸到整体破坏状态。最后对边坡多指标进行稳定性评价分析且与实际情况进行比较,为后面的边坡防治工作提供理论依据。

1 条分法

1.1 传统不平衡推力法简介

条分法在工程中应用极为广泛。其缺点是简化条块的模型以及力在条块中传递;条分法与滑块变形不相关,在传统极限平衡条分法中实测变形难以体现出来。

基本公式如下所示,对于第 i 条块:

正压力

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

正应力

$$\sigma_{i,n} = N_i / l_i$$

临界摩阻应力

$$\tau_{i,\text{peak}} = c_i + \sigma_{i,n} \tan \varphi_i$$

摩阻力

$$T_i^{\text{crit}} = c_i l_i + N_i \tan \varphi_i$$

抗滑折减摩阻应力

$$\tau_{i,f} = (c_i + \sigma_{i,n} \tan \varphi_i) / f$$

[收稿日期] 2021-05-12

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(42071264);三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212015CC60005)

[第一作者] 胡 鹏(1996—),男,湖北黄石人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向为岩土力学理论

抗滑力折减后的摩阻力

$$T_{i,F}^{\text{crit}} = T_i^{\text{crit}} / f$$

下滑力

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

驱动剪应力

$$\tau_i^u = P_i^s / l_i$$

剩余下滑力为:

$$P_i = P_i^s - T_{i,F}^{\text{crit}}$$

式中: W_i 为第 i 块重量; β_i 为竖向均布荷载; Δ_i 为水平向均布荷载; $\sigma_{i,n}$ 为法向应力; l_i 为第 i 条块底边长度; α_i 为第 i 条块底边与水平夹角; c_i 为凝聚力; φ_i 为摩擦角; f 为临界状态时稳定系数^[11]。

以传统不平衡推力法为例。令条块为理想刚体,以竖向间隔按顺序划分若干条块;不考虑各条块自身转动和相互间所作用的剪力;令作用力位于各条块的中心位置且第 i 条块对第 $i-1$ 条块的作用力方向与第 i 条块的底边是平行的;对每块条块底边处于临界剪应力状态。处于临界状态的滑块在实际工程中是很难存在的,滑面底边物理力学参数只有在滑动面处于残余应力状态时才能取残余应力参数,当在残余应力状态所计算的应力折减系数大于 1 时,在实施摩阻力折减后不能与实际应力状态加以比较。

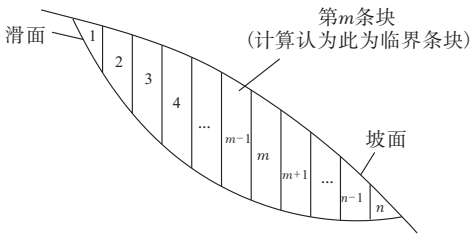


图 1 边坡条块划分图

1.2 部分强度折减法

对边坡逐步划分如图 1 所示,该法基本思想^[12-13]:考虑整个滑块稳定获得该边坡的整体稳定系数,计算实质为最后一个条块的剩余下滑力为 0,即下滑力等于摩阻力,则认为所划分最后一个条块处于临界状态。具体过程:先给定各参数利用公式计算条块,取稳定系数为 1,若此时第 m 块的剩余下滑力大于 0,第 $m+1$ 块的剩余下滑力小于 0,则认为第 m 块为稳定系数为 1 时的临界条块,而后分别开始计算从第 1~ $m+1$ 条块、第 1~ $m+2$ 条块一直到第 1~ n 条块的稳定性计算,来获得不同稳定条块下的部分强度折减系数。综上所述:在临界条块为第 m 条块时的稳定系数为 1。随临界状态条块向后移动,滑坡稳定系数逐渐增加,直至第 n 条块时,计算获得边坡整体稳定系数 f_n ,显然随临界状态逐

步移动,稳定系数越来越大。实际现场中与人们理性分析存在差距,故定义在不同临界状态条块边坡的部分强度折减富余系数^[14-15]:

$$f_{zs}^i = f_n - 1$$

由上式(f_n -边坡整体稳定系数)可知,当临界状态处于第 n 条块时,边坡整体发生破坏,此时的富余稳定系数为 0。该系数的现场实践告诉科研人员,必须去现场确定临界状态位置,且该系数为第 i 临界状态条块的富余稳定程度,可为滑坡预测预报和防治设计提供依据。

2 条分法全过程滑动多参量评价指标

对于具体的边坡,上述可得出破坏状态下的应力及应变分布,为了描述出边坡各点、面的特征,提出边坡对应的多参量稳定评估指标如下^[14]。

2.1 滑动点评价指标

1) 对于滑面上任意一点的应力破坏率

$$f_{r,i}^{\sigma} = \tau_i^u / \tau_{i,\text{peak}}, i \in 1, 2, 3, \dots$$

2) 对于滑面上任意一点的应变破坏率

$$f_{r,i}^{\epsilon} = \gamma_i / \gamma_{i,\text{peak}}, i \in 1, 2, 3, \dots$$

式中: τ_i^u 、 γ_i 分别表示某点在 i 方向上的驱动剪应力以及应变; $\tau_{i,\text{peak}}$ 、 $\gamma_{i,\text{peak}}$ 分别表示某点在 i 方向所受到的峰值剪应力以及应变。当以上应变破坏率数值大于 1 时,则认为该点已经发生破坏。

2.2 滑动面评价指标

1) 综合应力破坏面积比

$$f_{s,xy}^{\sigma} = \sqrt{(f_{s,x}^{\sigma})^2 + (f_{s,y}^{\sigma})^2}$$

其中 $f_{s,x}^{\sigma}$ 为 x 方向的应力破坏面积比,其公式为

$$f_{s,x}^{\sigma} = \sum_{i=1}^m l_i \cos \alpha_i / \sum_{i=1}^n l_i \cos \alpha_i$$

其中 $f_{s,y}^{\sigma}$ 为 y 方向的应力破坏面积比,其公式为

$$f_{s,y}^{\sigma} = \sum_{i=1}^m l_i \sin \alpha_i / \sum_{i=1}^n l_i \sin \alpha_i$$

2) 综合应力破坏比

$$f_{f,xy}^{\sigma} = \sqrt{(f_{f,x}^{\sigma})^2 + (f_{f,y}^{\sigma})^2}$$

其中 $f_{f,x}^{\sigma}$ 为 x 方向的应力破坏比,其公式为

$$f_{f,x}^{\sigma} = \sum_{i=1}^n f_{r,i}^{\sigma} l_i \cos \alpha_i / \sum_{i=1}^n l_i \cos \alpha_i$$

其中 $f_{f,y}^{\sigma}$ 为 y 方向的应力破坏比,其公式为

$$f_{f,y}^{\sigma} = \sum_{i=1}^n f_{r,i}^{\sigma} l_i \sin \alpha_i / \sum_{i=1}^n l_i \sin \alpha_i$$

3) 不同状态综合方向摩阻力变化系数

$$F_{ff,xy} = \sqrt{(F_{ff,x})^2 + (F_{ff,y})^2}$$

其中 $F_{ff,x}$ 为 x 方向摩阻力变化系数,其公式为

$$F_{ff,x} = \sum_{i=1}^n \tau_i^x l_i \cos \alpha_i / \sum_{i=1}^n \tau_i^{p,b} l_i \cos \alpha_i$$

其中 $F_{ff,y}$ 为 y 方向摩阻力变化系数,其公式为

$$F_{ff,y} = \sum_{i=1}^n \tau_i^x l_i \sin \alpha_i / \sum_{i=1}^n \tau_i^{p,b} l_i \sin \alpha_i$$

4)不同状态综合驱动下滑力变化系数

$$F_{df,xy} = \sqrt{(F_{df,x})^2 + (F_{df,y})^2}$$

其中 $F_{df,x}$ 为 x 向驱动下滑力变化系数,其公式为

$$F_{df,x} = \sum_{i=1}^n \tau_i^u l_i \cos \alpha_i / \sum_{i=1}^n \tau_i^{u,p,b} l_i \cos \alpha_i$$

其中 $F_{df,y}$ 为 y 向驱动下滑力变化系数,其公式为

$$F_{df,y} = \sum_{i=1}^n \tau_i^u l_i \sin \alpha_i / \sum_{i=1}^n \tau_i^{u,p,b} l_i \sin \alpha_i$$

5)不同状态综合方向正压力变化系数

$$F_{nf,xy} = \sqrt{(F_{nf,x})^2 + (F_{nf,y})^2}$$

其中 $F_{nf,x}$ 为 x 方向正压力变化系数,其公式为

$$F_{nf,x} = \sum_{i=1}^n \sigma_{i,n}^x l_i \cos \alpha_i / \sum_{i=1}^n \sigma_{i,n}^{p,b} l_i \cos \alpha_i$$

其中 $F_{nf,y}$ 为 y 方向正压力变化系数,其公式为

$$F_{nf,y} = \sum_{i=1}^n \sigma_{i,n}^x l_i \sin \alpha_i / \sum_{i=1}^n \sigma_{i,n}^{p,b} l_i \sin \alpha_i$$

6)不同状态综合法向位移变化系数

$$F_{sd,xy} = \sqrt{(F_{sd,x})^2 + (F_{sd,y})^2}$$

其中 $F_{sd,x}$ 为 x 方向法向位移变化系数,其公式为

$$F_{sd,x} = \sum_{i=1}^n \gamma_i^u l_i \cos \alpha_i / \sum_{i=1}^n \gamma_i^{p,b} l_i \cos \alpha_i$$

其中 $F_{sd,y}$ 为 y 方向法向位移变化系数,其公式为

$$F_{sd,y} = \sum_{i=1}^n \gamma_i^u l_i \sin \alpha_i / \sum_{i=1}^n \gamma_i^{p,b} l_i \sin \alpha_i$$

以上系数均具有 x 及 y 两方向分量和矢量特征。上式中 m 为临界条块编号, n 为总划分条块数, l_i 、 α_i 分别为所分割条块的底边边长以及倾角。

3 实例分析

3.1 边坡概况

青干河桥头边坡位于巴东县城青干河左岸。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。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 $944 \times 104 \text{ m}^3$ 。

滑面形态总体上中、后部呈直线形,基本顺层,倾斜角多 25° 左右,前部滑面呈比较平缓的弧线形,为切层,倾角一般 $10^\circ \sim 14^\circ$ (图 2、图 3)。

3.2 计算分析

将上述边坡按条分法分割原则进行条分法分割成 35 块如图 6 所示。根据室内试验及现场经验,模型参数取值如下:凝聚力 $c = 26 \text{ kPa}$,摩擦角 $\varphi = 24^\circ$,剪切模量 $G = 1000 \text{ kPa}$, $\rho_{i,0} = -0.9999$, $\rho_{i,c} = -0.53$, $\sigma_i^{u,c} = 600 \text{ kPa}$, $\zeta_i = 1.35$, $a_1^0 = 5500 \text{ kPa}$, $a_2^0 = 2500 \text{ kPa}$, $a_3^0 = 0.0093$, $b_1 = 65$, $b_2 = 0 \text{ kPa}^{-1}$ 。

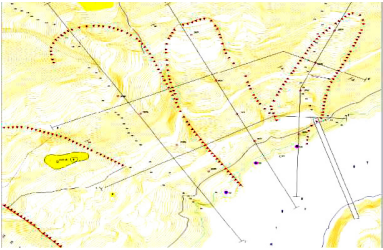


图 2 青干河桥头边坡平面图

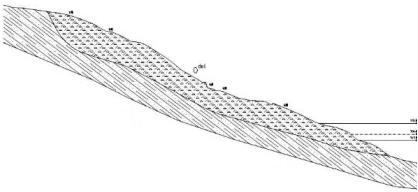


图 3 青干河桥头边坡剖面图

按照传统临界状态条分法,在饱和状态下,其稳定系数为:1.153621,处于稳定状态(即此时所划分的条块中一直到最后一块刚好为临界条块),在该稳定系数条件下各条块受力与条块号的对应关系如图 5 所示。从图中可以看出先逐步增加到第 5 块之后出现驱动力(下滑力)及剩余下滑力逐步下降到第 9 块,后又逐步上升到第 17 块的驱动力和剩余下滑力最大,然后逐步下降直到最后一块条块剩余下滑力为 0。中间所出现的拐点是因为所分割的第 5 块到第 9 块之间滑动面相对于之前变得平缓,到第 9 块之后又变得相对更陡。

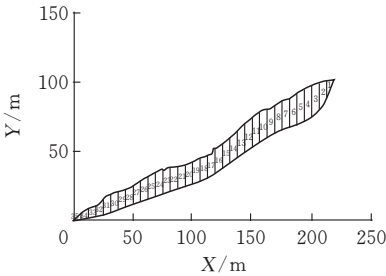


图 4 边坡条分法图

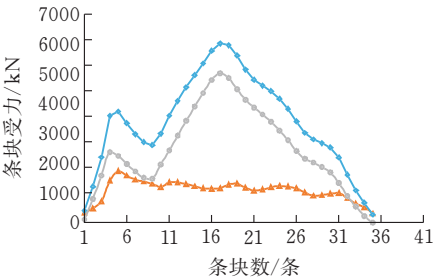


图 5 传统临界各条块受力

当稳定系数=1 时,其临界状态条块为第 23 号条块。随着边坡渐进破坏过程中临界状态逐步向后移动,其临界状态折减稳定系数越来越大。图 6 和图 7 分别描述了边坡稳强度折减系数随临界状态条块逐步向后推进随之增加及部分强度折减富余稳定

系数随之逐步下降的特征,即随着临界应力状态逐步向后移动变化时,滑坡的稳定程度随之越来越低。

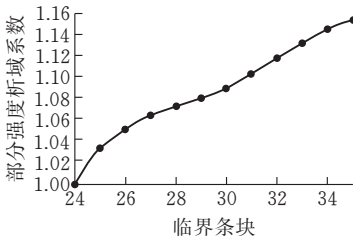


图6 各临界条块部分强度折减系数

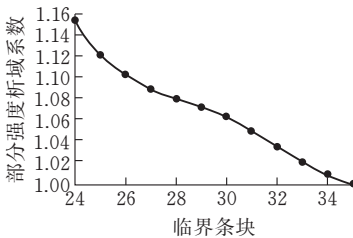


图7 强度折减冗余稳定系数

以下在基于部分强度折减法进行下的理想弹塑性模型对边坡的各受力计算,来分析边坡在渐进破坏中各点、面等多参量稳定评价。为了更加清晰描述边坡在渐进破坏中的特点,选取其中几种临界条块时各个受力情况(图8—12)以及多参量点、面评价指标参数进行分析。

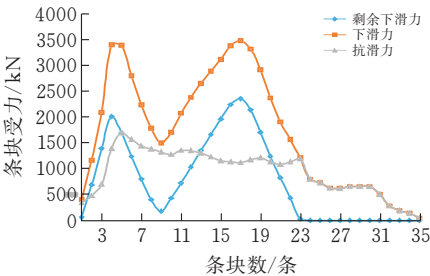


图8 (第23块为临界条块时)各条块受力

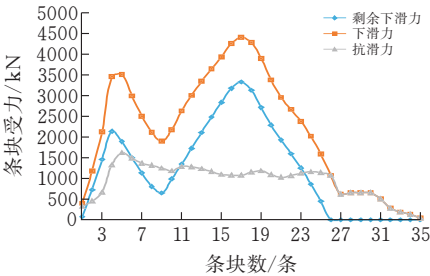


图9 (第26块为临界条块时)各条块受力

综上可以分析出,随着滑坡后缘变形的增加,沿滑面的临界状态逐步向前移动,当最后一个条块处于临界状态时,滑坡整体处于破坏状态,在临界状态条块逐步向后变化时,因第5块到第9块滑动面出现平缓,各条块受力图也因此出现明显剩余下滑力及驱动力先减小又增大而后再减小的趋势。初始临界条块为23,在往后变化的过程中,第17条块的驱动力和下滑力均保持最大值,可以看出此块为受力

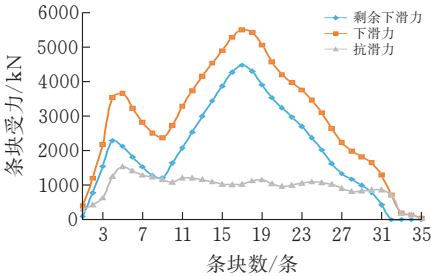


图10 (第32块为临界条块时)各条块受力

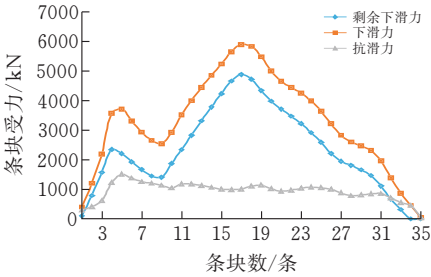


图11 (第34块为临界条块时)各条块受力

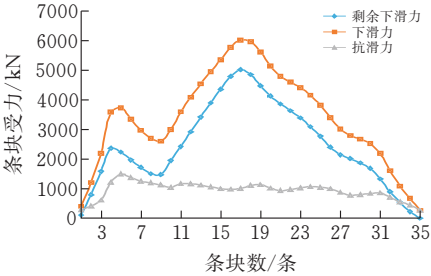


图12 (第35块为临界条块时)各条块受力

最大条块,且随着临界状态条块的变化,驱动力在不断地增大,从3474.67 kN增大到6020.24 kN;剩余下滑力也随之不断地增大,从2356.18 kN增大到5016.62 kN;而抗滑力相对于前两者趋于一个稳定值。这是由折减系数变化增加的原因而引起。综上所述:随着折减系数的增加,临界状态的持续变化,边坡未破坏区域的驱动力以及剩余下滑力的越来越大,破坏区的土逐渐软化,直到最后一块为临界条块,整个边坡都发生破坏。

现在对边坡渐进破坏过程进行多参量稳定评估,首先进行滑动点评价,见图13所示,随着临界条块逐步往后移动,应力破坏率逐渐等于1,认为滑动点完全破坏。图中在临界条块为23时出现转变是由于在第26块的滑动面长度相对于其左右两侧条块较长,是这一块较为陡的缘故。但整体上最终都趋向于1,符合实际滑坡最终完全破坏现象。

其次对边坡渐进破坏进行滑动面稳定评价,从图14—20可以看出随着临界条块逐步往后移动,正压力破坏比变化系数呈现逐渐加速,当达到临界条块为27块时逐渐变为平缓上升,直到临界条块为31块时又呈加速上升,最终趋向于1(图19);而各临界条块法向位移变化系数随着临界条块逐步往后

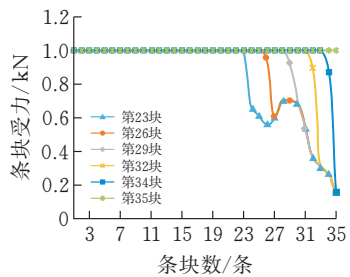


图 13 各条块应力破坏率

移动时变化值并不大,整体非常平缓(图 20);其他各面稳定评价参数随着临界条块的逐步变化移动都呈现逐步上升的趋势,但并未出现突然或者较大的变化率,并最终都趋向于 1,综上表明:随着变化渐进破坏的过程不断进行,临界条块逐步往后移动,各面评价稳定指标描述数值最终都等于 1,此时滑面被贯穿,出现整体破坏。

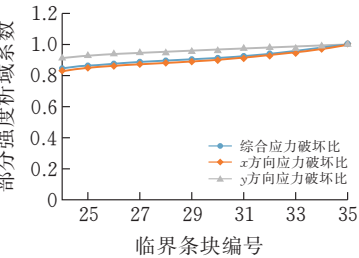


图 14 各临界条块应力破坏比

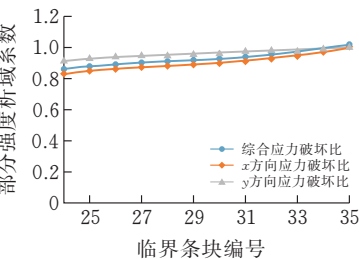


图 15 各临界条块应变破坏比

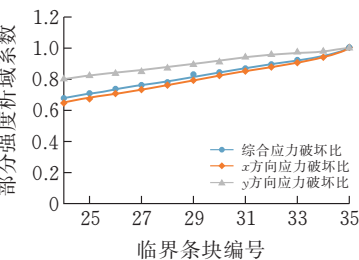


图 16 各临界条块应力破坏面积比

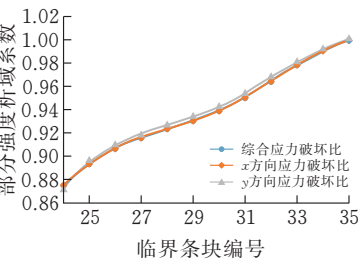


图 17 各临界条块摩阻力变化系数

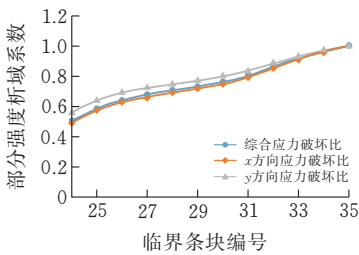


图 18 各临界条块驱动下滑力变化系数

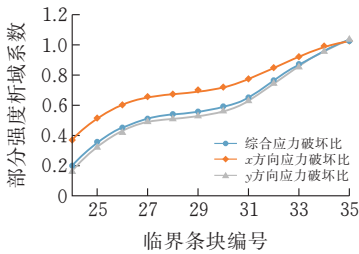


图 19 各临界条块正压力变化系数

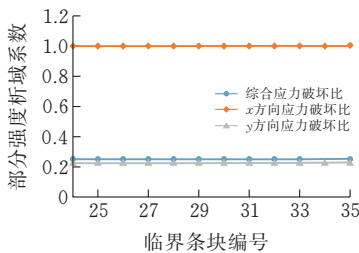


图 20 各临界条块法线位移变化系数

4 结论

利用边坡全过程渐进破坏特征,基于条分法对边坡临界条块的分析,对点、面等多参量稳定性评价,得出了滑坡在全过程中受力及位移的变化关系,使得力与位移紧密相连,文本得出以下结果:

- 1)随着临界条块的逐步往后移动,部分强度折减系数随之逐渐增加,从 1 增加到 1.154,规范认为该系数在 1.15 以上即认为滑坡处于基本稳定状态。
- 2)在分析各临界条块的驱动力、下滑力及摩阻力时,可以看出第 17 条块所受到的驱动力及下滑力始终最大,可以得出此条块为受力最大块,用来在实际工程进行很好的检测。
- 3)进一步说明了部分强度折减法的基本过程以及其物理意义,并且充分反映了边坡全过程渐进破坏的演化过程,得出全过程受力及位移的关系。
- 4)对边坡全过程进行多参量稳定性评价,为边坡的检测预防提供了理论参考依据,便于处理实际边坡工程的问题。

[参 考 文 献]

[1] LÜ XILIN, DAWEI X, QIUSHI C, et al. Centrifuge model test and limit equilibrium analysis of the stabili-

ty of municipal solid waste slopes[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(4): 3011-3021

[2] ZHOU X P, CHENG H. The long-term stability analysis of 3D creeping slopes using the displacement-based rigorous limit equilibrium method[J]. Engineering Geology, 2015, 195:292-300.

[3] BENMEDDOUR D, MELLAS M, FRANK R, et al. Numerical study of passive and active earth pressures of sands[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 40: 34-44.

[4] 何木,张颀.基于 Bishop 条分法的边坡稳定分析及支护方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(5):65-71.

[5] 刘子振,言志信.降雨入渗非饱和黏土边坡稳定性的极限平衡条分法研究[J].岩土力学,2016,37(2):350-356.

[6] YIN Y P, HUANG B, CHEN X, et al. Numerical analysis on wave generated by the qianjiangping landslide in three gorges reservoir, China[J]. Landslides, 2015, 12(2):355-364.

[7] 李涛,胡晓东,王伟.瑞典条分法在边坡稳定中的应用[J].河南水利与南水北调,2020,49(6):47-49.

[8] 魏久坤,李泽,薛龙,等.基于非线性规划的边坡稳定性分析条分法研究[J].路基工程,2016(1):7-12.

[9] 唐高朋,李亮,赵炼恒,等.非线性破坏准则下边坡稳定性极限分析斜条分法[J].岩土力学,2015,36(7):2063-2072.

[10] 张福海,梁喆,陈雷.土质边坡稳定性分析向心条分法[J].防灾减灾工程学报,2016,36(4):544-550.

[11] 卢应发,黄学斌,刘德富.边坡力的分布特征和稳定性分析[J].岩土工程学报,2017,39(7):1321-1329.

[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):2787-2798.

[13] 卢应发,黄学斌,刘德富.推移式滑坡渐进破坏机制及稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):333-345.

[14] 卢应发.一种新的本构模型及参数标定[J].岩土力学,2016,37(08):2138-2144.

[15] YING-FA L U. Deformation and failure mechanism of slope in three dimensions[J]. Journal of Rock Mechanics and Geo-technical Engineering, 2015, 7(2): 109-119.

Progressive Destruction Analysis and Multi-parameter Evaluation of Slopes Based on Slice Method

HU Peng

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

Abstract: The analysis and prevention of landslide failure process is a hot research topic nowadays. On the basis of the traditional strip method analysis of landslides, the partial strength reduction method and the ideal elastoplastic model are used to simulate the progressive failure process of the slope with the popular strip method, and the critical state strip determination method is proposed to make the slope. Traditional bar stability analysis is closely related to deformation. During the gradual movement of the critical state of the slope, the overall curve of the sliding body shows that the friction resistance decreases, and the remaining thrust and driving sliding force increase accordingly. When the last divided block reaches the critical state, the slope is destroyed. Taking the slope at the bridgehead of Badong Qinggan River as an example, the ideal elastoplastic model of the unbalanced thrust numerical slice method is used to reveal the evolution characteristics of various physical and mechanical parameters in the progressive failure process of the slope, and to determine the point in the progressive failure of the slope in the whole process by performing multi-parameter evaluation and analysis. The research results show that the block analysis method of numerical simulation can better describe the progressive failure process of the slope at the head of the Qinggan River in Badong, and provide support for slope detection and prevention.

Keywords: progressive destruction; section method; multi-parameter evaluation; numerical simulation

[责任编辑:裴 琴]