

[文章编号] 1003-4684(2019)02-0098-04

新条分法在木鱼包滑坡稳定性分析中的应用

王 鹏, 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] 用新的条分法对木鱼包滑坡稳定性进行分析。传统条分法中条块底部的力学参数采用的是临界状态力学参数,认为条块底部处于“临界状态”,而这种“临界状态”对于残余应力比较为适宜。新条分法条块底部的力学特性用“一种全新的本构模型”来描述,以不平衡推力法为例,给出了决定“临界状态条块”的方法,分析了可能的破坏模式,并给出了边坡整体破坏各条块应力及位移计算方法,从而计算出相应的稳定性系数。

[关键词] 新条分法; 临界状态; 稳定性分析; 新本构模型

[中图分类号] TU43

[文献标识码] A

中国是一个地质灾害频发的国家,滑坡地质灾害每年造成直接经济损失多达两百多亿元。地质灾害实例表明:发生山体滑坡和泥石流的主要诱导因素是地震、降雨和大面积开挖等。滑坡灾害经历开裂、局部变形破坏、直至整体破坏过程,部分演化为泥石流山洪等特征,研究地质灾害的形成机理和破坏机理,并对其实施变形监测及预测预报是非常必要的^[1]。边坡工程是一个古老的研究课题,众多学者对其进行了广泛研究,在假设滑体为刚体,滑坡的破坏面处于临界应力状态下,提出了简化 Janbu 法、Bishop 法、瑞典圆弧法、不平衡推力法等^[2-6],随着数值计算迅速发展,监凯维奇(Zienkiewicz O. C.)提出了有限元强度折减法等,并应用于边坡极限稳定性分析^[7-12]。两种部分强度折减法^[13-14]:对沿滑面未破坏区域的强度进行折减,从而计算出滑坡的稳定性系数;针对滑面破坏区进行强度折减,并使临界状态一点一点逐步向前移动,从而获得临界状态在不同位置时的稳定系数,

在前人研究的基础上,本文进一步完善滑坡稳定性分析的条分法,将条分法和全新剪应力本构模型结合^[15-17],用于边坡的稳定性分析及预测预报。

1 新条分法简介

在传统条分法提出部分强度折减法的基础上,

建立了一种新的条分法,新的条分法对抗滑力不进行折减,所以使力的求解更具有真实性。新条分法用“新本构模型理论”可以将现场测得的滑坡变形反应在稳定性分析中。以下是新条分法的推导过程:

基本假设:

- 1) 假设各条块都具有足够的变形能力,各条块划分以竖直方向一定间隔划分;
- 2) 后一条块对前一条块的作用力平行于后一条块的底边,作用点位于前一条块的中心;
- 3) 条块之间的剪力不考虑;
- 4) 条块的转动不考虑;
- 5) 条块底边抗滑力满足全新剪应力本构方程;
- 6) 第 i 与 $i+1$ 条块的应变满足平行和垂直底边方向上剪应变的矢量和(图 1),其相连条块剪应变具有如下特点:

即

$$\gamma_i = \gamma_{i+1}^s + \gamma_{i+1}^n$$
$$\gamma_i = \gamma_{i+1}^s / \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})$$

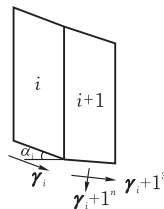


图 1 相连条块的应变关系

[收稿日期] 2018-09-21

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

[第一作者] 王 鹏(1992-), 男, 湖北孝感人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为岩土力学

基本公式推导如下：

第一条块

$$N_1 = W_1 \cos \alpha_1 + \beta_1 l_1 \cos \alpha_1 \cos \alpha_1 + \Delta_1 l_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1$$

应力

$$\sigma_1^n = N_1 / l_1$$

摩阻应力

$$\tau_1^{crit} = C_1 + \sigma_1^n \tan \varphi_1$$

摩阻力

$$T_1^{crit} = C_1 l_1 + N_1 \tan \varphi_1$$

稳定系数折减后的摩阻力

$$T_{1,F}^{crit} = T_1^{crit} / F$$

下滑力

$$P_1^S = W_1 \sin \alpha_1 + \beta_1 l_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 + \Delta_1 l_1 \cos \alpha_1 \cos \alpha_1$$

剩余下滑力

$$P_1 = P_1^S - T_{1,F}^{crit}$$

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

$$\sigma_i^n = N_i / l_i$$

摩阻应力

$$\tau_i = \tau_i(\gamma_i, A)$$

摩阻力

$$T_i = \tau_i(\gamma_i, A) l_i$$

下滑力

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

剩余下滑力

$$P_i = P_i^S - T_i$$

式中： W_i 分别为第 i 块的重量， Δ_i 为边坡竖直方向均布荷载， β_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， C_i 为凝聚力， φ_i 为内摩擦角， γ_i 为条块底边剪应力， A 为力学模型参数。

2 全新剪应力本构模型

针对推移式滑坡的渐进破坏特征，必须建立描述岩土软化特征的本构模型，一种四参数的剪应力—应变方程表示，本文引用的节理本构模型^[16-17]，其应力应变曲线如图 2 所示，基本方程如下：

$$\tau_i = G_i \gamma_i [1 + \gamma_i^{m_i} / S_i]^{\rho_i}$$

式中： τ_i, γ_i ：分别为第 i 条块剪应力和剪应变， G_i ：剪切模量， $S_i、m_i、\rho_i$ ：为常系数， $\tau_i、G_i$ 的单位为 MPa 或 kPa 或 Pa， $S_i、m_i、\rho_i$ 为无单位参数，且 $-1 < \rho_i \leq 0$ 和 $1 + m_i \rho_i \neq 0$ 。

临界应变空间满足

$$S_i + (1 + m_i \rho_i) (\gamma_i^{crit})^{m_i} = 0$$

式中 γ_i^{crit} ，临界应力对应的临界应变。

临界应力空间中的 τ_i^{crit} 用摩尔库伦准则

$$\tau_i^{crit} = C_i + \sigma_i^n \tan \varphi_i$$

计算得到，式中： C_i 为粘聚力， σ_i^n 为法向应力， C_i 和 σ_i^n 的单位为 kPa， φ_i 为内摩擦角。

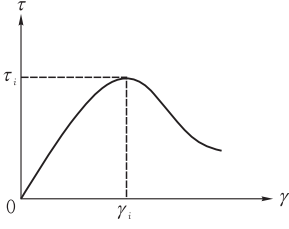


图 2 全新剪应力本构模型

新剪应力本构模型中临界应变对于同一种材料假设仅与法向应力相关，临界剪应变 γ_i^{crit} 可采用次关系式：

$$(\gamma_i^{crit})^2 = a_{i,1} + a_{i,2} \sigma_i^n + a_{i,3} (\sigma_i^n)^2$$

式中 $a_{i,1}、a_{i,2}、a_{i,3}$ 为常系数。参数 ρ_i ，参照水土特征曲线表示为

$$\rho_i = \rho_{i,0} / (1 + (\rho_{i,0} / \rho_{i,c} - 1) (\sigma_i^n / \sigma_i^{n,c})^{\zeta_i})$$

式中 $\rho_{i,0}$ 为法向应力 σ_i^n 为零时的 ρ_i 值， $\rho_{i,c}$ 为 σ_i^n 等于 $\sigma_i^{n,c}$ 时的 ρ_i 值， ζ_i 为常系数；由不同的法向压力试验曲线可获得此式子。新剪应力本构模型可以预测预报推移式滑坡渐进破坏过程中的应力、位移及稳定性分析。

3 稳定性分析

在具体滑坡中，利用上文中推导出的公式可以计算出各条块的剩余下滑力，针对文献[17]定义的稳定性系数，滑坡的应力状态和应变状态简介如下。

从第 1 条块到临界条块(第 m 条块)沿滑面每一个单元的剩余下滑力(P_i)在水平方向和竖直方向求矢量和，记水平方向和竖直方向矢量和分别为 P_{xm} 和 P_{ym} ，综合矢量和为 P^m ，且与水平方向的夹角为 α^m ，具体公式如下：

$$P_{xm} = \sum_{i=1}^m P_i \cos \alpha_i$$

$$P_{ym} = \sum_{i=1}^m P_i \sin \alpha_i$$

$$P^m = \sqrt{(P_{xm})^2 + (P_{ym})^2}$$

综合矢量和为 P^m ，与水平方向的最小夹角 α^m 为： $\alpha^m = \arctan(P_{ym} / P_{xm})$

沿滑块第 $m + 1$ 条块到第 n 条块，沿滑面每一单元的临界抗滑应力 $\tau_i^{N+1,m}, i \in (m + 1)$ 和现状抗滑力 $\tau_i^{N+1}, i \in (m + 1, n)$ 之差在水平方向和竖直方向及综合矢量和(即： T^{xm}, T^{ym} 和 T^m)，其综合矢量和与水平方向的最小夹角为 α_f^m 。

$$T^{xm} = \sum_{i=m+1}^n (\tau_i^{N+1,m} - \tau_i^{N+1}) l_i \cos \alpha_i$$
$$T^{ym} = \sum_{i=m+1}^n (\tau_i^{N+1,m} - \tau_i^{N+1}) l_i \sin \alpha_i$$
$$T^m = \sqrt{(T^{xm})^2 + (T^{ym})^2}$$
$$\alpha_f^m = \arctan(T^{ym}/T^{xm})$$

水平方向稳定富余系数

$$F_{MTM}^x = T^{xm}/P_{xm}$$

竖直方向稳定富余系数

$$F_{MTM}^y = T^{ym}/P_{ym}$$

主下滑方向的定义稳定富余系数

$$F_{MTM}^s = \frac{T^m \cos(\alpha_f^m - \alpha^m)}{P^m}$$

4 工程实例

本文以木鱼包滑坡为实例:木鱼包滑坡坡体容重为 24 kN/m³,分条块数为 36 条。计算模型见图 3。

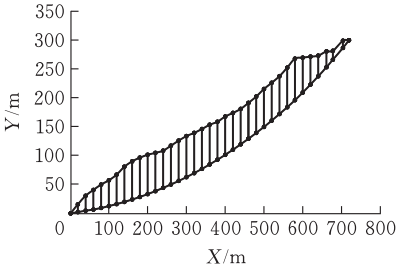


图 3 条块划分模型

模型的相关计算参数为:粘聚力 $C=24$ kPa,内摩擦角 $\varphi=23^\circ$,剪切模量 $G=3200$ kPa, $\rho_{i,0}=-0.999$, $\sigma_i^{n,c}=600$ kPa, $\zeta_i=0.9821$, $\alpha_{i,1}=0.0129$, $\alpha_{i,2}=0.0235(\text{kPa}^{-1})$, $\alpha_{i,3}=0$ 。

在上述参数的情况下新本构模型模拟出的剪应力与剪应变的关系曲线如图 4 所示。

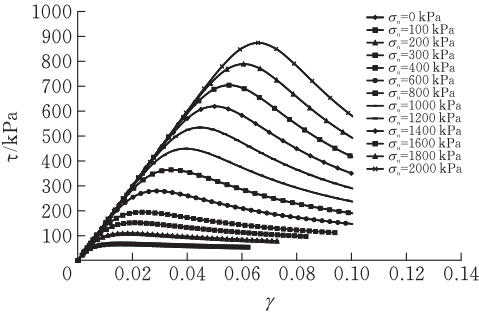


图 4 新的剪应力本构模型计算图

笔者运用上述理论对木鱼包滑坡加以计算,采用全新本构模型对木鱼包滑坡的稳定性计算结果见表 1—表 3。

表 1 剩余下滑力

$P_{xm}/(\text{kN})$	$P_{ym}/(\text{kN})$	$P_{xm}/(\text{kN})$	$\alpha_m/(\text{^\circ})$
579180.268	270897.9936	639402.4599	25.06

表 2 富余摩阻力

$T^{xm}/(\text{kN})$	$T^{ym}/(\text{kN})$	$T^m/(\text{kN})$	$\alpha_f^m/(\text{^\circ})$
41922.4757	7219.13119	42539.5090	9.77

表 3 稳定富余系数

F_{MTM}^x	F_{MTM}^y	F_{MTM}^s
0.0723	0.0266	0.0642

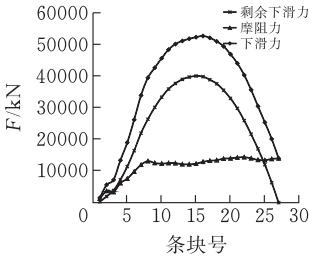


图 5 各条块的剩余下滑力的曲线图

5 结论

利用以上滑坡稳定性计算方法,已经获得木鱼包滑坡的稳定系数,得出如下结论。

1)新条分法底部的力学特性用全新剪应力本构模型加以描述,给出了相应公式的推导过程。这种计算方式所得的计算结果可以初步给出沿滑面的位移变化特征,可以利用改进的条分法初步实施边坡位移的预测预报。

2)论证了全过程剪应力—应变本构模型可以描述地质材料全过程力学行为,该模型可以描述岩土材料的力学行为特征,反映出滑坡各个条块之间动态的应力—应变关系,新本构模型考虑了材料的软化特性,由图 4 可知:当应力增长至高于某一值时,随着剪应变的逐渐增大而剪应力是逐渐减小的,在滑坡计算中考虑岩土软化的特性,使计算结果更真实地反映各条块的变形和受力情况,这样计算出的稳定性系数更符合真实情况。

3)木鱼包滑坡在 X 方向富余稳定系数是 0.0723,在 Y 方向富余稳定系数是 0.0266,综合力富余稳定系数是 0.0642,由图 5 可知临界条块出现在 28 号条块,根据计算的稳定性系数,该滑坡基本处于稳定状态。

[参 考 文 献]

[1] 张珍,李世海,马力.重庆地区滑坡与降雨关系的概率分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):3185-3191.

[2] 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,CN103942446A[P].2014-07-23.

- [3] 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,CN103729521A[P],2014-04-16.
- [4] 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.
- [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,CN103712587A [P]. 2014-04-16.
- [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] 王冬勇,陈曦,吕彦楠,等.基于二阶锥规划理论的有限元强度折减法及应用[J].岩土工程学报,2018,62(9): 1-8.
- [8] 孙超伟,柴军瑞,许增光,等.基于 Hoek-Brown 强度折减法的边坡稳定性图表法研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(4):838-851.
- [9] 曹伟,李文静,张红芬.边坡安全系数的有限元计算方法对比研究[J].公路,2018,63(6):19-23.
- [10] 李永亮,周国胜,李永鹏.有限元强度折减法边坡失稳判据的适用性研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(5):125-129.
- [11] 王伟,陈国庆,朱静,等.考虑张拉 - 剪切渐进破坏的边坡强度折减法研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(9):2064-2074.
- [12] 江卫华,熊峰,刘乳燕,等.强度折减法在三维有限元边坡稳定分析中的应用[J].水电能源科学,2018,36(3): 145-149.
- [13] YingfaLu, Xianqi Luo, Yanchun Wu etal. Study of fundamental properties of soil-water characteristic curve, Proceeding of the 3rd Asian conference on unsaturated soils, Science Press, 2007,12(1):243-249.
- [14] 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.
- [15] 卢应发,吴延春,罗先启.等.土水特征曲线及其相关性研究[J].岩土力学. 2008, 29(9): 2481-2486.
- [16] 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.
- [17] 卢应发,杨丽平,华国辉.一种新的节理本构模型及几种新的滑坡稳定系数计算方法[J].岩石力学与工程学报,2013(12): 433-454.

Application of New Section Method in Stability
Analysis of Muyubao Landslide

WANG Peng, LU Yingfa

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

Abstract: This paper analyzes the stability of Muyubao landslide by a new strip method. In the traditional strip method, the mechanical parameters at the bottom of the strip are critical state mechanical parameters. The bottom of the strip is in a "critical state", while this "critical state" is suitable for residual stress. The mechanical properties at the bottom of the new strip method are described as "a new constitutive model". Taking the unbalanced thrust method as an example, the method of determining the "critical state bar" is provided, and the possible failure modes are analyzed. The calculation method of stress and displacement of each block of the overall failure of the slope is then proposed, based on which the corresponding stability coefficient is calculated.

Keywords:new strip method; critical state; stability analysis; new constitutive model

[责任编辑: 裴 琴]