

[文章编号] 1003—4684(2020)02-0070-04

# 全新剪应力本构模型下的王家岭滑坡稳定性分析

江 昊, 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] 在传统的剪应力模型的基础上,提出了全新的剪应力本构模型,该模型可以很好地弥补传统剪应力模型的不足,能较好地对边坡渐进破坏的过程实施预测预报。在全新剪应力本构模型以及条分法的基础上,通过计算滑面的摩阻力和下滑力,从而得到剩余下滑力,当第  $i$  条块的剩余下滑力大于零,第  $i+1$  条块的剩余下滑力小于零,则临界条块必然位于第  $i+1$  条块内,为了使临界条块的位置更精准,可以对第  $i+1$  条块进行再次划分,以此让计算结果更精确。另外,本文采用 CDM 法计算该滑坡在下滑方向的稳定系数,当计算的第  $i$  条块的稳定系数大于 1 时,则滑坡处于稳定状态。通过研究分析表明,王家岭滑坡处于基本稳定状态。

[关键词] 渐进破坏; 全新剪应力本构模型; 稳定性系数; 剩余下滑力

[中图分类号] TU43 [文献标识码] A

滑坡一直是广大研究者喜欢研究的课题之一,其中,滑坡的稳定性分析是被研究得最为广泛的课题。滑坡的危害性主要体现在对城镇的危害、对农田的危害、对交通运输的危害、对工厂矿山的危害以及对人类生命财产的危害等。总的来说,滑坡的危害性对于人类而言是极其具有毁灭性的。因此,对于滑坡的稳定性分析是十分有必要的,通过计算滑面的摩阻力、下滑力、剩余下滑力及安全稳定系数来判定滑坡的安全状况。

滑坡稳定性的研究已有 100 多年的历史。针对不同应力状态下滑坡的力学特性,Tu 等<sup>[1]</sup>对滑坡力的传递特性进行了分析研究,对于滑动力与位移之间的关系也进行了相应地介绍。文献[2]研究了临界应变状态方程,并对该临界应变状态应用的优点与不足进行了分析,同时利用临界点法建立了应变空间状态方程。在解决边坡设计安全系数的问题上,由于安全系数具有不确定性的特点,杜时贵<sup>[3]</sup>提出了较为精准的边坡稳定性评价较为精准的定义,对边坡的设计安全系数与安全系数之间的关系做出了说明。在变形协调与力学平衡的基础上,张龙飞等<sup>[4]</sup>对各个阶段的临界荷载做出了合理的划分。针对滑坡渐进变形的问题,卢应发等<sup>[5-6]</sup>在现行本构模型的研究基础上,提出了一种全新的节理本构模型,对本构模型的确定方法做了详细的介绍说明。滑坡分为推移式滑坡和牵引式边坡,卢应发等<sup>[7]</sup>针对推移式和牵引式边坡,分别提出了关于边坡的几种破

坏机理以及对边坡的破坏方向做了解释定义。在研究滑坡稳定性的问题上,卢应发<sup>[8]</sup>基于滑坡稳定性的分析与研究,针对推移式滑坡,提出了推移式滑坡渐进破坏分析法以及确定临界条块或单元的方法。在不平衡推力方法的研究上,卢应发等<sup>[9]</sup>认为对于理想弹塑性模型并不能对边坡的渐进破坏过程进行精准描述说明。

利用全新剪应力本构模型计算分析了王家岭滑坡的剩余下滑力,以此判断临界条块的位置,同时计算其稳定性系数,从而得出滑坡的稳定性,以此来模拟滑坡从稳定到不稳定的破坏过程。该模型的好处在于考虑了材料的软化特性,在分析边坡稳定性的难题上提供了一种提高边坡稳定性的方法。

## 1 剪应力模型简介

### 1.1 传统剪应力模型

传统的剪应力模型实则是理想的弹塑性模型,该模型能够基本反映剪应力与剪应变之间的关系,当剪应力较小时,剪应力与剪应变呈正比例关系;剪应力达到临界状态的剪应力值时,随着剪应变的增加,剪应力不再增加,即达到平衡值。剪应力与剪应变的关系如图 1 所示。

### 1.2 全新剪应力本构模型

传统的剪应力本构模型的不足之处在于当剪应力随着应变达到临界剪应力时,该模型不足以描述剪应变比达到临界剪应变大时的剪应力的软化特

[收稿日期] 2019—09—26

[基金项目] 国家基金面上项目(41372363)国家主任基金(41641027)三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212015CC60005)

[第一作者] 江 昊(1993—),男,湖北安陆人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向岩土力学的理论

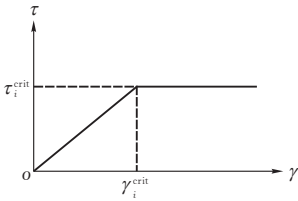


图 1 传统剪应力模型

征,另外也无法确定临界应变之后的剪应变与剪应力之间的关系,即达到临界剪应力之后就无法根据剪应力确定剪应变的大小。相比传统的剪应力本构模型,全新剪应力本构模型的最大优点在于该模型能够对边坡的稳定性实施预测预报,解决了边坡问题关于预测预报的世界性难题,全新剪应力本构模型的预测预报主要针对边坡的位移、应力以及稳定性。滑坡是一个渐进破坏的过程,其剪应力与剪应变的关系如图 2 所示。

基本方程为

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

其中:  $\tau_i$  为对应于第  $i$  条块的剪应力;  $\gamma_i$  为对应于第  $i$  条块的剪应变;  $\gamma_i^{crit}$  为对应于第  $i$  条块的临界剪应变;  $G_i$  为剪切模量;  $m_i$ 、 $S_i$ 、 $\rho_i$  为常数

临界应变空间的关系式为

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

其中:  $\gamma_i^{crit}$  为剪应力对应临界状态时的剪应变。

临界剪应力空间  $\tau_i^{crit}$  是根据材料力学中的摩尔-库伦准则来确定的,方程式如下:

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

其中:  $\tau_i^{crit}$  为第  $i$  条块的剪应力、 $c_i$  为粘聚力、 $\sigma_i^n$  为法向正应力、 $\varphi_i$  为内摩擦角。

临界剪应变空间的方程式如下:

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

其中:  $a_{i,1}$ 、 $a_{i,2}$ 、 $a_{i,3}$  为常数。

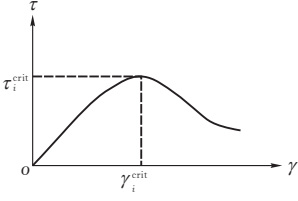


图 2 全新剪应力本构模型图

2 CDM 法稳定系数的介绍

每一条块的现状剪应变  $\gamma_i^{X,I}$  在 X 轴、Y 轴及矢量和分别为:

$$\begin{aligned} S_x^S &= \sum_{i=1}^n \gamma_i^{X,I} l_i \cos \alpha_i \\ S_y^S &= \sum_{i=1}^n \gamma_i^{X,I} l_i \sin \alpha_i \\ S^S &= \sqrt{(S_x^S)^2 + (S_y^S)^2} \end{aligned}$$

其中:  $l_i$  和  $\alpha_i$  分别为第  $i$  条块的底边长和第  $i$  条块的底边长与水平轴的夹角。

综合矢量和  $S^S$  与水平轴形成的夹角为

$$\alpha_s^S = \arctan(S_y^S / S_x^S)$$

沿滑面每个条块的位移在 X 轴、Y 轴及矢量和方向分别为:

$$\begin{aligned} S_x &= \sum_{i=1}^n \gamma_i^{P,I} l_i \cos \alpha_i \\ S_y &= \sum_{i=1}^n \gamma_i^{P,I} l_i \sin \alpha_i \\ S &= \sqrt{(S_x)^2 + (S_y)^2} \end{aligned}$$

综合矢量和  $S$  与水平轴形成的夹角为

$$\alpha_s^{crit} = \arctan(S_y / S_x)$$

CDM 法在水平、竖直及沿下滑位移方向的稳定系数分别为:

$$\begin{aligned} F_{CDM}^x &= |S_x / S_x^S| \\ F_{CDM}^y &= |S_y / S_y^S| \\ F_{CDM}^S &= |S \cos(\alpha_s^{crit} - \alpha_s^S) / S^S| \end{aligned}$$

稳定性分析:当  $F_{CDM}^S > 1$  时,滑坡处于稳定状态。

3 地质条件及崩塌体成因

王家岭滑坡位于宜昌市秭归县归州镇彭家坡村 8 组的吒溪河左岸,地理位置为经度  $110^{\circ}41'40''$ ,纬度  $31^{\circ}01'20''$ ,大地坐标为 X: 3433442.679, Y: 19470730.531。该滑坡处距离三峡大坝约 60.5 km,距离河口约 3.1 km。该滑坡的平面形状呈箕形,剖面形状呈凹形(图 3)。此处的基岩为中生界侏罗系的遂宁组,代号为  $J_3S$ ,岩性特征主要为泥砂岩和泥岩,基岩颜色主要为棕黄色和紫红色,强—中风化,局部基岩风化厚度达 5—15 公分,基岩产状为  $210^{\circ}-255^{\circ} \angle 20^{\circ}-40^{\circ}$ ,裂隙较发育,可见两组明显的裂隙,产状分别为  $85^{\circ} \angle 79^{\circ}$  和  $189^{\circ} \angle 85^{\circ}$ ,滑坡的自然坡度为  $15^{\circ}-25^{\circ}$ ,为一顺向斜坡。

王家岭滑坡左侧以山脊为界,山脊走向  $190^{\circ}$ ,长约 250 m,在滑坡的中下方为一临空面。滑坡右侧以冲沟为界,右侧边界外侧有一个养殖场,养殖场到滑坡边界途中,基岩出露,基岩主要为粉砂岩和泥岩。该滑坡呈折线形,上缓下陡,滑坡中部有个平台。

王家岭滑坡的成因主要有内因与外因两个方面,内因主要是王家岭滑坡处于秭归向斜核部及吒溪河左岸自然斜坡上,是顺向坡,为崩滑体滑移提供了充分条件;其次是因为滑坡组成岩石主要由岩层砂岩与泥岩组成,泥岩经水浸泡容易软化形成软弱层,为滑坡的发生提供了自然条件;外因有很多,最主要的外因是耕种破坏了坡体的原有结构,对雨水及库水的渗入提供了条件,增加了滑体土重量,降低

了其力学强度,为滑坡的发生提供了必要条件。

滑坡形成及变形破坏过程分析如下:

1)斜坡为易滑地形,滑体结构松散,降雨后,地表水下渗,易于在岩土接触面上形成滑坡。

2)降雨、地表水下渗,降低了土体及滑面的粘聚力及内摩擦角值,同时增大了静水压力。

3)人类工程活动的影响(如修房、筑路),改变了坡形并增加了载荷。

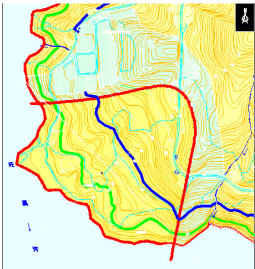


图 3 王家岭滑坡平面图

4 实例分析

以王家岭滑坡为例,主要采用全新的剪应力本构模型分析该滑坡的稳定性。采用条分法对王家岭滑坡中的 I-I 剖面图(图 4)进行条块划分,划分为 24 个条块,滑坡的滑体重量取  $18\text{ kN/m}^3$ ,粘聚力  $C$  取  $24\text{ kPa}$ ,剪切模量  $G_0$  取  $3000\text{ kPa}$ ,内摩擦角取  $24^\circ$ 。采用全新剪应力本构模型进行分析<sup>[10-11]</sup>,原始数据如表 1 所示。

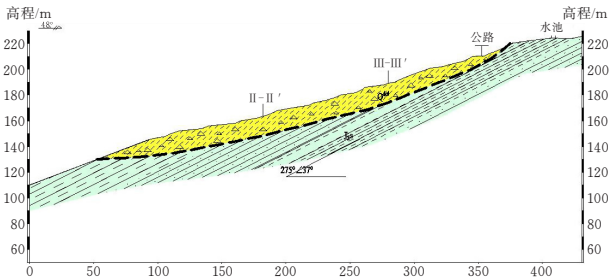


图 4 王家岭滑坡 I-I 剖面图

表 1 条块原始数据表

编号	角度/(°)	底边长/m	编号	角度/(°)	底边长/m
1	63.294	15.761	13	18.370	7.464
2	50.632	11.167	14	15.990	7.368
3	33.382	8.483	15	12.739	7.262
4	29.148	8.110	16	11.633	7.232
5	26.421	7.910	17	10.706	7.209
6	24.727	7.798	18	7.902	7.151
7	23.183	7.705	19	6.159	7.124
8	22.163	7.648	20	4.687	7.107
9	22.118	7.646	21	3.002	7.093
10	22.078	7.644	22	1.725	7.087
11	21.657	7.621	23	0.854	7.084
12	20.031	7.539	24	0.000	7.083

表 2 条块计算数据表

条块编号	剩余下滑力/ kN	稳定系数
1	760.802	0.721
2	1958.560	0.394
3	2094.785	0.445
4	2294.270	0.414
5	2340.222	0.417
6	2289.365	0.427
7	2130.001	0.451
8	1911.121	0.480
9	1717.471	0.5019
10	1537.338	0.522
11	1348.746	0.546
12	1085.581	0.594
13	786.272	0.669
14	425.345	0.824
15	0.000	1.221
16	0.000	2.643
17	0.000	2.
18	0.000	3.928902
19	0.000	5.016
20	0.000	6.578
21	0.000	10.26
22	0.000	18.221
23	0.000	39.664
24	0.000	—

表 3 CDM 法计算的稳定系数

计算方法	稳定系数
$F_{CDM}^x$	2.449
$F_{CDM}^y$	1.914
$F_{CDM}^s$	2.255

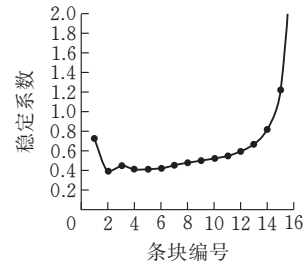


图 5 稳定系数图

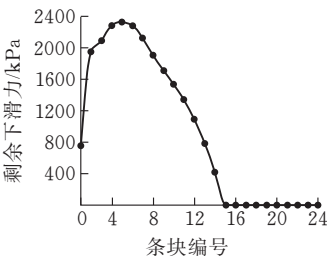


图 6 剩余下滑力分布图

5 结 论

通过采用全新剪应力本构模型分析王家岭滑坡的稳定性,可以得出如下结论:

- 1)滑体处于基本稳定状态,各条块安全系数并非为一定值,安全系数从第 1 条块到第 14 条块的值小于 1,从第 15 条块之后安全系数大于 1,第 15 条块为该滑坡的临界条块。
- 2)滑坡的剩余下滑力从第 1 条块到第 14 条块的数值大于零,从第 15 条块之后的条块数值基本等于零,故第 15 条块为该滑坡的临界条块,之前的条块处于破坏后区,15 条块以后都起着抗滑作用。
- 3)由 CDM 法计算的稳定系数(表 3)可知,CDM 法计算的稳定系数在水平方向的大小为 2.449,在垂直方向计算的稳定系数为 1.914,综合位移法稳定系数为 2.255,CDM 法在下滑位移方向的稳定系数大于 1,该滑坡目前处于基本稳定状态。

[参 考 文 献]

[1] Tu,Lu,Liu. Study of mechanical properties of landslides in different stress state[J]. Materials Research Innovations,2014,18(2):863-868.

[2] Lu,Tu,Liu. Joint constitutive model and new methods

of stable factor calculation of landslides[J] Materials Research Innovations,2014,18(2):768-774.

[3] 杜时贵.大型露天矿山边坡稳定性等精度评价方法[J].岩石力学与工程学报,2018,37(6):1301-1331.

[4] 张龙飞,吴益平,苗发盛,等.推移式缓倾浅层滑坡渐进破坏力学模型与稳定性分析[J].岩土力学,2019,40(12):4767-4776.

[5] 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.

[6] 卢应发,杨丽平,刘德富.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,2013,32(12):2431-2438.

[7] 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.

[8] 卢应发. 边坡渐进破坏机理及稳定性分析[C]. 中国地质学会工程地质专业委员会.2015 年全国工程地质学术年会论文集.中国地质学会工程地质专业委员会:《工程地质学报》编辑部,2015:462-474.

[9] 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.

[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] 卢应发,杨丽平,刘德富.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,2013,32(12):2431-2438.

Stability Analysis of Wangjialing Landslide Based on New Shear Stress Constitutive Model

JIANG Hao, LU Yingfa

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

**Abstract:** The traditional shear stress model has some limitations in analyzing slope stability. Based on the traditional shear stress model, this paper puts forward a new shear stress constitutive model, which can compensate for the shortcomings of the traditional shear stress model and predict the progressive failure process of slope. Based on the new shear stress constitutive model and slitting method, the residual sliding force is obtained by calculating the friction and sliding force of the sliding surface. When the residual sliding force of the  $i+1$  block is greater than zero and the residual sliding force of the  $i+1$  block is less than zero, the critical block must be located in the  $i+1$  block. In order to make the position of the critical block more accurate, the  $i+1$  block can be redrawn. In addition, in order to make the calculation more accurate, CDM method is used to calculate the stability coefficient of the landslide in the sliding direction. When the stability coefficient of the  $i$  block is greater than 1, the landslide is in a stable state. According to the above analysis, Wangjialing landslide is basically stable.

**Keywords:** progressive failure; new shear stress constitutive model; stability coefficient; residual sliding force