

# 基于破裂度的堆积层滑坡危险性分析方法

李世海, 周 东, 刘天苹

(中国科学院 力学研究所, 北京 100190)

**摘要:** 分析地表裂缝和滑面状态在滑坡灾害形成过程中表现出来的基本特征, 建立地表裂缝和地质体内部破坏状态之间的联系。简单介绍基于连续介质力学的离散元法, 对具体的、典型的滑坡进行数值模拟, 发现数值模拟结果中的地表裂缝和材料强度有某种相关性, 并且存在一个地表最大破裂数。同时定义滑面贯穿时对应的破裂数为滑面最大破裂数。提出破裂度的概念, 分地表破裂度和滑面破裂度, 取值为滑坡相应位置当前破裂数与最大破裂数之比。研究发现, 地表破裂度与滑面的贯通有明确的对应关系, 可以直接描述地质体的危险程度, 并基于此提出破裂度分析滑坡危险性的基本方法。地表破裂度与网格的划分数目、形状等参数的相关性不大。说明基于破裂度和 CDEM 分析方法判别滑坡体的危险度是可行的。

**关键词:** 工程地质; 滑坡; 破裂度; 地表裂缝; 基于连续介质力学的离散元法

**中图分类号:** P 642

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2013)增 2 - 3909 - 09

## RISK ANALYSIS METHOD OF ACCUMULATED LANDSLIDE BASED ON FRACTURE DEGREE

LI Shihai, ZHOU Dong, LIU Tianping

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

**Abstract:** Basic characteristics for development of surface cracks and state of slip surface during landslide disaster is studied, and relationship between surface cracks and internal fracture state is established. Continuum-based discrete element method(CDEM) is briefly introduced. Through simulation of specific and typical landslides with CDEM, relativity of strength and surface cracks is discussed and maximum number of surface cracks is found. Maximum number of slip surface cracks is defined as the number of cracks on slip surface which is already running through. The concept of fracture degree of surface and fracture degree of slip surface are proposed, which are defined as the ratio of current number of cracks to maximum number of cracks on surface and slip surface respectively. Numerical experiments show that there is a specific corresponding relationship between fracture degree of surface and state of slip surface, which could directly describe the risk of a geological body. Result shows that fracture degree does not rely on mesh division when calculation accuracy is guaranteed, which indicates that it is feasible to use this new method based on fracture degree and CDEM to evaluate the risk of a landslide.

**Key words:** engineering geology; landslide; facture degree; surface crack; continuum-based discrete element method(CDEM)

## 1 引 言

堆积层滑坡在我国分布广泛, 灾情频发, 危害

严重。此类滑坡主要由坚硬块石与松软土体随机混合组成, 具有高度非均匀、非连续、大变形等特性。当这类滑坡灾害经历孕育、成形、演化、发生、发展不同的阶段时, 通常会伴随着地表裂缝的萌生和

**收稿日期:** 2012 - 02 - 17; **修回日期:** 2012 - 04 - 28

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB731500)

**作者简介:** 李世海(1958 - ), 男, 1982年毕业于河北工业大学物理系, 现任研究员、博士生导师, 主要从事非连续介质力学及工程地质灾害方面的研究工作。E-mail: shli@imech.ac.cn。周 东(1985 - ), 男, 博士, 主要从事滑坡地质灾害以及岩土损伤理论方面的研究工作。E-mail: zhoudong@imech.ac.cn

逐步发展,甚至出现大量裂缝(见图1)。地表裂缝能够很好地反映滑坡体的状态<sup>[1]</sup>,主要体现在:(1)地表裂缝的多少反映了山体破坏的程度和破坏过程的受力状态,裂缝逐渐增多对应着山体在同一力学破坏过程中的不同阶段;(2)地表裂缝所表征的是地表位移场,提供的信息量比监测点的位移更为丰富,能够反映山体的当前状态;(3)地表裂缝数目能够反应降雨对滑坡的作用。同时,地表裂缝与表面位移监测具有互补性,获得地表裂缝的信息较地表位移信息容易和直接,可以直接通过简单的测量获取,不需要专业监测的设备、布设复杂的监测网络。因此,建立起地表裂缝与滑坡体内部破坏状态之间的联系,对于分析滑坡的危险性将有非常重要的意义。



(a) 坡顶的裂缝



(b) 斜坡上的裂缝

图1 三峡库区晒网坝滑坡的地表裂缝

Fig.1 Earth surface crack in Shaiwangba landslide in Three Gorges Reservoir Area

目前滑坡分析的主要方法极限平衡法<sup>[2-4]</sup>、有限元强度折减法<sup>[5-7]</sup>、斋藤法<sup>[8]</sup>都无法将地表裂缝的发展变化状态作为滑坡体状态分析的因素,不能建立滑坡体表面关键物理量与内部破坏状态的联系。离散元法是 P. A. Cundall<sup>[9]</sup>于 20 世纪 70 年代提出的描

述节理岩体以及不连续介质力学行为的有效数值方法。王泳嘉和邢记波<sup>[10]</sup>向我国岩石力学与工程界介绍了离散元法的基本原理及应用。之后,离散元法在我国岩土工程领域得到广泛应用,如 2000 年王泳嘉、宋文洲等编制的适合土木工程设计的块体分析系统 2D-block,刘凯欣和高凌天<sup>[11]</sup>开发的 SUPER-DEM 离散元力学分析系统。S. H. Li 等<sup>[12-13]</sup>将有限元方法与离散元方法结合,发展了 CDEM,该方法将块体内部连续介质采用有限元计算,把块体当作连续体可以计算单元变形产生的力,在接触面上它可以分开产生大变形,非常易于描述裂缝的发育、发展,适合计算滑坡体渐进破坏过程。

本文分析了地表裂缝在滑坡灾害形成过程中表现出来的基本特征,指出采用数值模拟的方法可以建立地表裂缝和地质体的内部破坏状态之间的联系。简单介绍了基于连续介质力学的离散元方法。提出了地表破裂度的概念,说明了地表破裂度与滑面的贯通有明确的对应关系。说明了基于破裂度和 CDEM 判别滑坡体的危险度是可行的,该方法可以将现场监测结果和数值模拟结果比较,其可靠性和实用性有待于进一步验证。

## 2 地裂缝基本表象与数值模拟中的破裂数

对于堆积层滑坡,在没有发生地裂缝之前,滑坡一般都是稳定的。通常情况下,只有地表出现了地裂缝,当地群众才会关注坡体的安全,上报给专家。地表出现了裂缝,说明有了发生灾害的迹象,距离发生灾害可能还有很长的时间。随着地表裂缝的增多,发生滑坡灾害的可能性就越大。一方面是因为坡体的运动加大了,导致了地表的破裂更多;另一方面,裂缝增加了地表渗流深入地下的通道。灾害体表面地表裂缝的形式主要包括张拉裂缝、滑移裂缝、鼓胀错动裂缝;在空间的几何形态包括水平的、沿着滑坡边缘的纵向裂缝;地表裂缝的位置早期有的在后缘、有的在前缘,后期一般会遍布整个坡面。上述的表述均可通过几何和相对位移给予定量的描述。在滑坡的某一纵剖面上,可以观测出地裂缝的条数,与此等价的是裂缝的间距。滑坡体解体越严重,裂缝的间距就会越小,沿着剖面的破裂数就越多。

借助于离散元方法可以模拟出地表的破裂现象。对于单元不可破裂的算法(DDA, 3DEC, UDEC)计算得到的破裂数对块体划分的依赖较强,但是,当单元划分较多时,如果能够确定合理的结构面强度,计算结果对划分块体的依赖性应该也不会太大。本文采用的 CDEM,可以在计算过程中允许单元破裂,这样对初始划分单元的依赖性就会较小。本文重在表述一种新的判别方法,首先分析具体的计算实例,寻求一般的规律。

### 3 基于连续介质力学模型的离散元方法及其计算模型

基于连续介质力学的离散元方法将有限元和离散元有机结合,在连续模型区域采用有限元方法计算,非连续区域采用离散元计算;连续模型的单元可以转化为离散模型的块体;单元可以在计算的过程中断裂。该方法不仅可以模拟地质体连续及非连续状态下的变形、运动特性,还可以实现地质体由连续到非连续的渐进破坏过程。CDEM 的几何描述如图 2 所示。

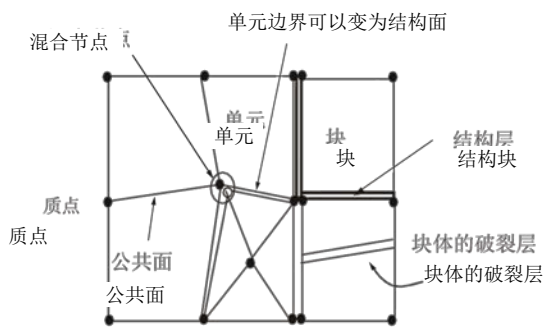


图 2 CDEM 的几何描述

Fig.2 Geometry description of CDEM

CDEM 在连续模型区域采用有限元方法,连续模型的单元可以转化为离散模型的块体,单元自身也可以在计算的过程中断裂。CDEM 中的单元同有限元的单元,是数学网格,它在计算过程中可以转换为块体。而块体是由材料的边界或内部裂缝形成的物理网格切割而成的区域。公共面为单元的共同界面。结构面夹在 2 个块体之间,两侧的质点属于不同的块体或者单元。结构层是块体间有厚度的层,模拟块体间的性质。质点分配单元或块体质量的有限元节点、块体的角点以及面心、体心。节点为分

为连续节点、混合节点,有限元中的节点为连续节点,在节点的位置上既有有限元的节点又有属于块体的角点称为混合节点。

在本文的计算中,单元采用线弹性的连续模型。单元边界可以断裂,断裂时采用给定单元尺度下的拉应力强度准则和莫尔-库仑剪应力强度准则。研究单元界面断裂与滑坡体内部破坏以及各种强度参数之间的对应关系,给出表述滑坡危险性的评价方法。

### 4 最大破裂数

如图 3 所示的一个堆积层边坡,圆弧以上是土石混合体,圆弧以下部分为基岩。坡高 20 m,坡角 26.5°,施加重力荷载。计算时不考虑基岩的破坏,以土石混合体的黏聚力  $c$ ,抗拉强度  $T$  和内摩擦角  $\phi$  作为控制参数,取  $c = T$ ,计算分析边坡强度与最大破裂数的关系。各部分的材料参数见表 1。

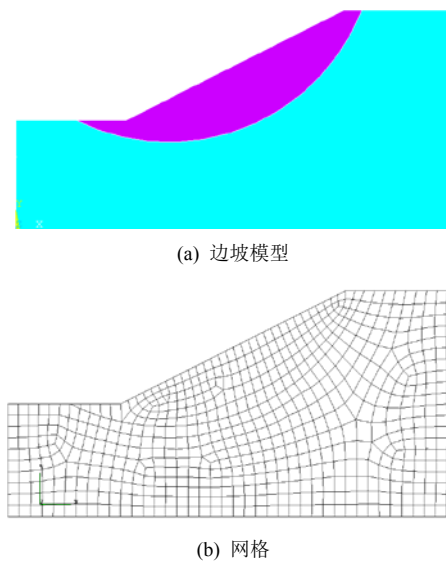


图 3 边坡模型及网格

Fig.3 Model and mesh of slope

表 1 边坡的主要材料参数

Table 1 Basic material parameters of slope

介质	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E / \text{Pa}$	$\nu$	$c / \text{kPa}$	$T / \text{kPa}$	$\phi / (^\circ)$
土石混合体	1 800	$5 \times 10^9$	0.3	15~30	15~30	5~30
基岩	2 100	$3 \times 10^{10}$	0.3	-	-	-

研究发现,对于一个给定的滑坡体,当进入碎裂性破坏阶段,随着边坡总体强度的降低,破裂数会逐渐增加,并最终趋于一个定值,称这一特征量

为最大破裂数。最大破裂数又分地表最大破裂数和滑面最大破裂数，它们与坡体的当前状态无关，描述的是一个确定滑坡体地表和滑面的最终破坏状态。

对于滑坡灾害现场，后期地表破裂数的统计应该是非常困难的，事实上到现场全方位统计破裂数也非常危险。这里的最大破裂数是针对计算模型而定义的，对于具体的滑坡体，最大破裂数的值与网格数目有关，当计算网格确定之后，最大破裂数是确定的。

图 4 给出了不同强度参数下的破裂数(图中横坐标 5 - 10 表示  $c = 5 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 10^\circ$ ; 10 - 10 表示  $c = 10 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 10^\circ$ , 其他类推)。由图 4 可见，对于本算例，当边坡的强度小于  $c = 15 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 15^\circ$  时，破裂数趋于一个较为稳定的值，此时可确定该边坡模型的最大破裂数为 38。

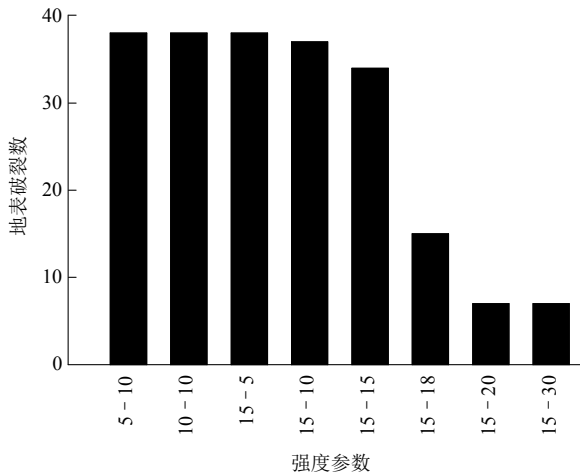


图 4 不同强度参数下的破裂数

Fig.4 Number of fracture under different strength parameters

### 5 地表破裂数与材料强度及坡体稳定性的关系

对于一个给定的边坡，边坡的强度直接决定了其稳定性。那么，建立起地表破裂数与边坡强度的联系，是实现直接通过地表裂隙判定边坡稳定性的关键。从图 4 中可以看出，两者之间具有某种对应关系。为了更清楚的揭示地表破裂数与边坡强度的关系，仍采用上文的计算模型，取  $c = 15 \text{ kPa}$ , 改变  $\varphi$ , 其他条件不变，计算得到不同强度参数下的地表破裂数。

从图 5, 6 可以看出： $c = 15 \text{ kPa}$ , 当边坡内摩擦角较高时，地表破裂数保持在一个较低的水平；

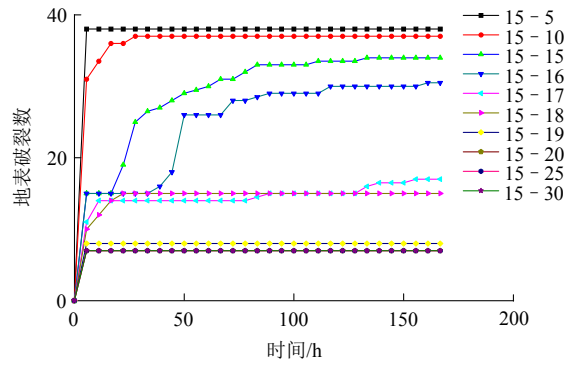


图 5 不同强度参数下地表破裂数随时间的发展关系

Fig.5 Development of number of earth surface crack with time under different strength parameters

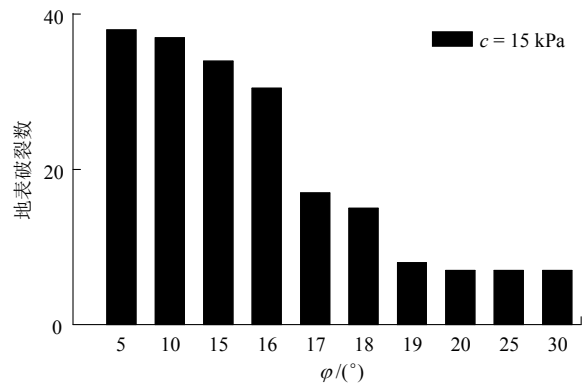


图 6 不同强度参数下的最大地表破裂数

Fig.6 Maximum number of earth surface crack under different strength parameters

随着内摩擦角的降低，破裂数开始逐渐增加，并最终趋于最大破裂数。边坡强度越低，地表破裂数发展得越快。

图 7, 8 分别给出了边坡在临界强度附近的破裂状态和监测位移时程曲线。 $c = 15 \text{ kPa}$  时，当  $\varphi \leq 18^\circ$  时，监测位移随时间不断增大，且从位移云图可以看出，边坡滑面贯穿，坡体出现不同程度的碎裂性和运动性破坏，不稳定；当  $\varphi \geq 19^\circ$  时，监测位移收敛，边坡局部破坏，整体稳定。临界强度值在  $c = 15 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 18^\circ$  到  $c = 15 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 19^\circ$  范围内。



(a)  $c = 15 \text{ kPa}$ ,  $\varphi = 10^\circ$



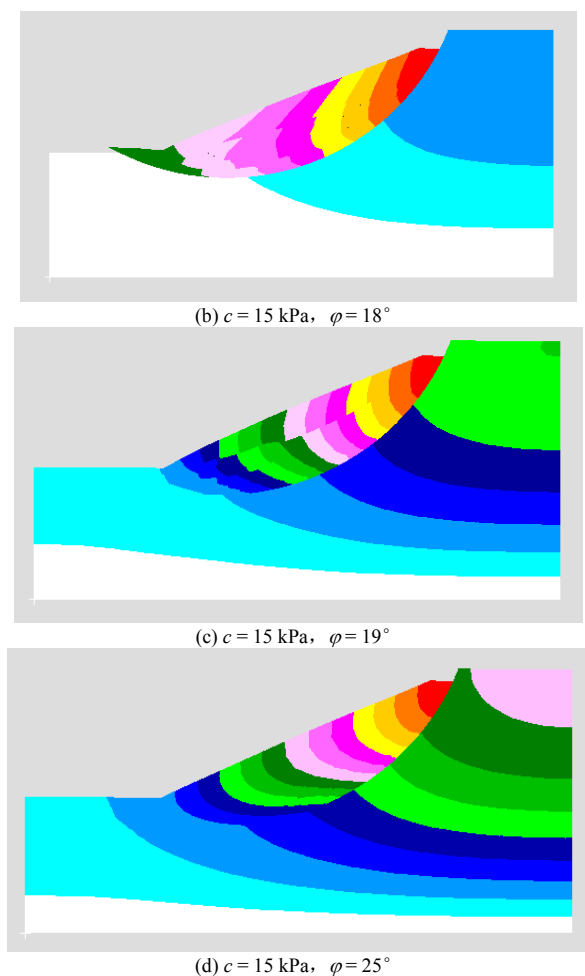


图 7 不同强度参数下的边坡位移云图和破裂状态  
Fig.7 Displacement nephograms and fracture states of slope under different strength parameters

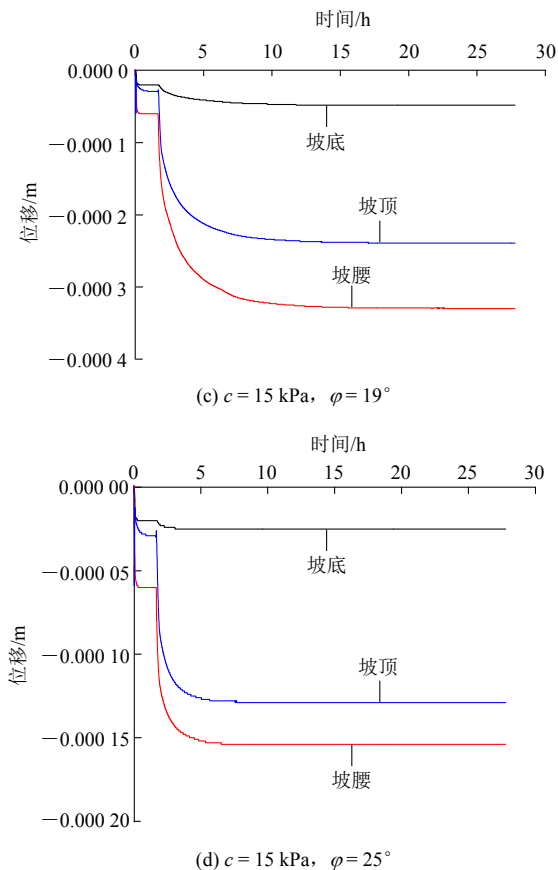
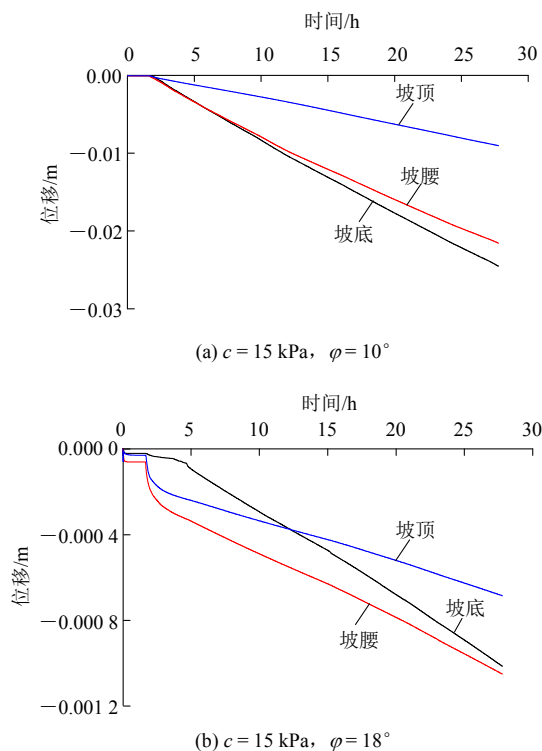


图 8 不同强度参数下，坡底、坡腰和坡顶 3 个监测点的监测位移时程曲线

Fig.8 Time-history curves of monitoring displacement at bottom, middle and top of slope under different strength parameters



## 6 破裂度

在进行数值分析时，地表破裂数和地表最大破裂数都与网格数量相关。为更准确地描述地表裂隙与边坡稳定性的关系，本文引入一个无量纲量——破裂度。破裂度又分地表破裂度和滑面破裂度。

地表破裂度是指边坡在某一强度参数下的地表破裂数与地表最大破裂数的比值，用  $D_b$  ( $0 \leq D_b \leq 1$ ,  $D_b$  越大，越危险)表示，即

$$D_b = N_s / N_{sm} \tag{1}$$

式中： $N_s$ 为地表破裂数， $N_{sm}$ 为地表最大破裂数。

滑面破裂度是指边坡在某一强度参数下的滑面破裂数与滑面最大破裂数的比值，用  $I_b$  (滑面贯穿时， $I_b = 1$ ；滑面未贯穿时， $0 \leq I_b \leq 1$ )表示，即

$$I_b = N_l / N_{lm} \tag{2}$$

式中： $N_l$ 为滑面破裂数， $N_{lm}$ 为地表最大破裂数。

定义：

$$A = 1 - D_b \tag{3}$$

式中： $A$  为边坡的安全性， $A$  值越大，边坡越安全。

### 7 地表裂缝与滑面裂隙的联系及破裂度与滑坡稳定性状态的关系

众所周知，滑面的贯穿性破坏是造成滑坡灾害的重要原因。如果建立起地表裂缝和地质体的内部破坏状态之间的联系，即地表破裂度与滑面破裂度之间的关系，便可以直接通过地表的裂隙来评判边坡的状态。

对上文的数值算例进行进一步的分析，得到不同强度参数  $c$ ， $\varphi$  下的破裂度(见表 2)。对  $c = 15 \text{ kPa}$  时的情况进行更细致的分析，得到不同内  $\varphi$  下边坡的滑面破裂度和地表破裂度如图 9 和表 3 所示。

$c = 15 \text{ kPa}$  时，当  $\varphi \leq 18^\circ$ ，滑面贯穿，滑面破裂度保持为 1，地表破裂度随着坡体强度的降低而增大，此时边坡不稳定；当  $\varphi \geq 19^\circ$ ，滑面未完全贯穿，滑面破裂度随着边坡强度的降低而增大，表面破裂度保持在一个较小的水平，此时边坡稳定。在

临界强度值处，滑面破裂度由一个小于 1 的数增

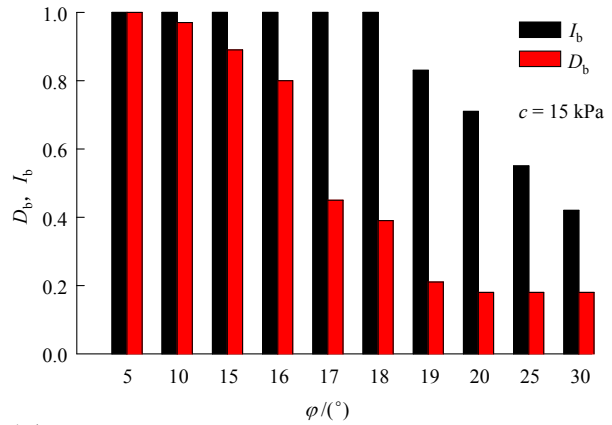


图 9  $c = 15 \text{ kPa}$  时不同  $\varphi$  值对应的滑面破裂度和地表破裂度  
Fig.9 Fracture degree on slip surface and earth surface under different values of  $\varphi$  when  $c = 15 \text{ kPa}$

大到 1；表面破裂度则存在一个突变。地表破裂度和滑面破裂度以一种“互补”的形式变化，借此便可以得到临界强度下对应的表面破裂度，进而可通过地质体当前的破裂度来评价其稳定性状态。

表 2 边坡在不同强度参数下的破裂度

Table 2 Fracture degree under different strength parameters

$\varphi / (^\circ)$	$c = 15 \text{ kPa}$					$c = 20 \text{ kPa}$					$c = 30 \text{ kPa}$					边坡状态
	表面破裂数	$D_b$	滑面破裂数	$I_b$	$A$	表面破裂数	$D_b$	滑面破裂数	$I_b$	$A$	表面破裂数	$D_b$	滑面破裂数	$I_b$	$A$	
5	38	1.00	66	1.00	0.00	38	1.00	66	1.00	0.00	36	0.95	66	1.00	0.05	不稳定
10	37	0.97	66	1.00	0.03	36	0.95	66	1.00	0.05	34	0.89	66	1.00	0.11	
15	34	0.66	66	1.00	0.34	19	0.50	66	1.00	0.50	13	0.34	66	1.00	0.66	
20	7	0.18	47	0.71	0.82	4	0.11	47	0.71	0.89	2	0.05	47	0.71	0.95	
25	7	0.18	36	0.55	0.82	4	0.11	35	0.53	0.89	2	0.05	34	0.52	0.95	稳定
30	7	0.18	28	0.42	0.82	4	0.11	27	0.41	0.89	2	0.05	27	0.41	0.95	

表 3  $c = 15 \text{ kPa}$  时不同内摩擦角所对应的地表破裂度和滑面破裂度

Table 3 Fracture degree on slip surface and earth surface under different values of  $\varphi$  when  $c = 15 \text{ kPa}$

$c/\text{kPa}$	$\varphi / (^\circ)$	地表破裂数	$D_b$	滑面破裂数	$I_b$	$A$	边坡状态
15	5	38	1.00	66	1.00	0.00	不稳定
15	10	37	0.97	66	1.00	0.03	
15	15	34	0.89	66	1.00	0.11	
15	16	31	0.82	66	1.00	0.18	
15	17	17	0.45	66	1.00	0.55	
15	18	15	0.39	66	1.00	0.61	
15	19	8	0.21	55	0.83	0.79	稳定
15	20	7	0.18	47	0.71	0.82	
15	25	7	0.18	36	0.55	0.82	
15	30	7	0.18	28	0.42	0.82	

### 8 网格的相关性检验

为了检查破裂度是否受网格数量的影响，仍采用上述边坡模型，将网格加密至原来的 2 倍(见图 10)。其他各项参数不变。选取前文中使用的 4 个典型强度参数，以便对比分析。

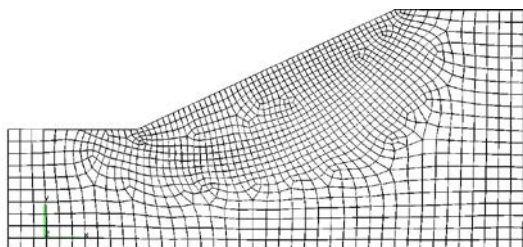


图 10 加密后的网格

Fig.10 Mesh after refinement

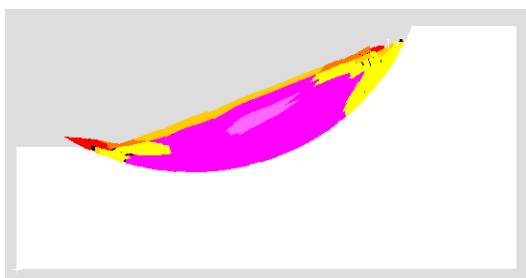
由表 4 知，不同网格条件下，计算结果趋于一致。网格的改变不影响地表破裂度和滑面破裂度的关系，也几乎不影响表面破裂度随强度的变化规律。

表 4 不同网格下四组典型强度参数下破裂度的对比

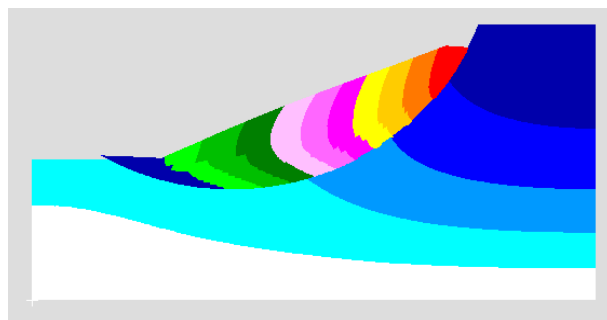
Table 4 Comparison of fracture degree under different meshes

c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	加密后的网格				原网格				边坡状态
		地表		滑面		地表		滑面		
		破裂数	$D_b$	破裂数	$I_b$	破裂数	$D_b$	破裂数	$I_b$	
15	10	49	1.00	130	1.00	37	0.97	66	1.00	不稳定
15	18	17	0.35	130	1.00	15	0.39	66	1.00	
15	19	11	0.22	97	0.75	8	0.21	55	0.83	稳定
15	25	11	0.22	65	0.50	5	0.18	36	0.55	

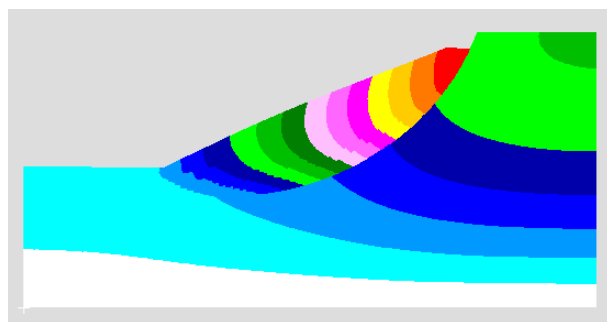
图 11, 12 给出了网格加密后，边坡在这 4 组强度参数下的破裂状态和监测点位移时程曲线，从另一个角度给出了边坡的状态：临界强度在  $c = 15$



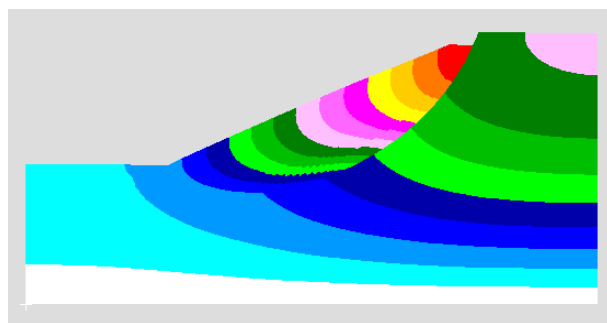
(a)  $c = 15 \text{ kPa}, \varphi = 10^\circ$



(b)  $c = 15 \text{ kPa}, \varphi = 18^\circ$



(c)  $c = 15 \text{ kPa}, \varphi = 19^\circ$

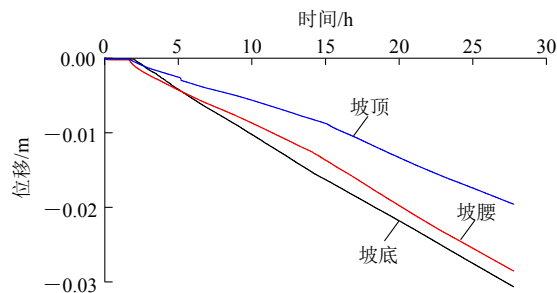


(d)  $c = 15 \text{ kPa}, \varphi = 25^\circ$

图 11 网格加密后不同强度参数下的边坡破裂状态

Fig.11 Fracture states of the slope under different strength parameters after refinement

kPa,  $\varphi = 18^\circ$ 到  $c = 15 \text{ kPa}, \varphi = 19^\circ$ 范围内，结论与破裂度判定方法的结果一致，进一步说明了破裂度判定方法的可靠性。与图 6, 7 的结果对比，说明网格对破裂度结果影响很小，验证了破裂度分析方法的可行性。需要注意的是，这里的网格相关性讨论需要排除计算误差的影响，即网格数量和尺寸的划



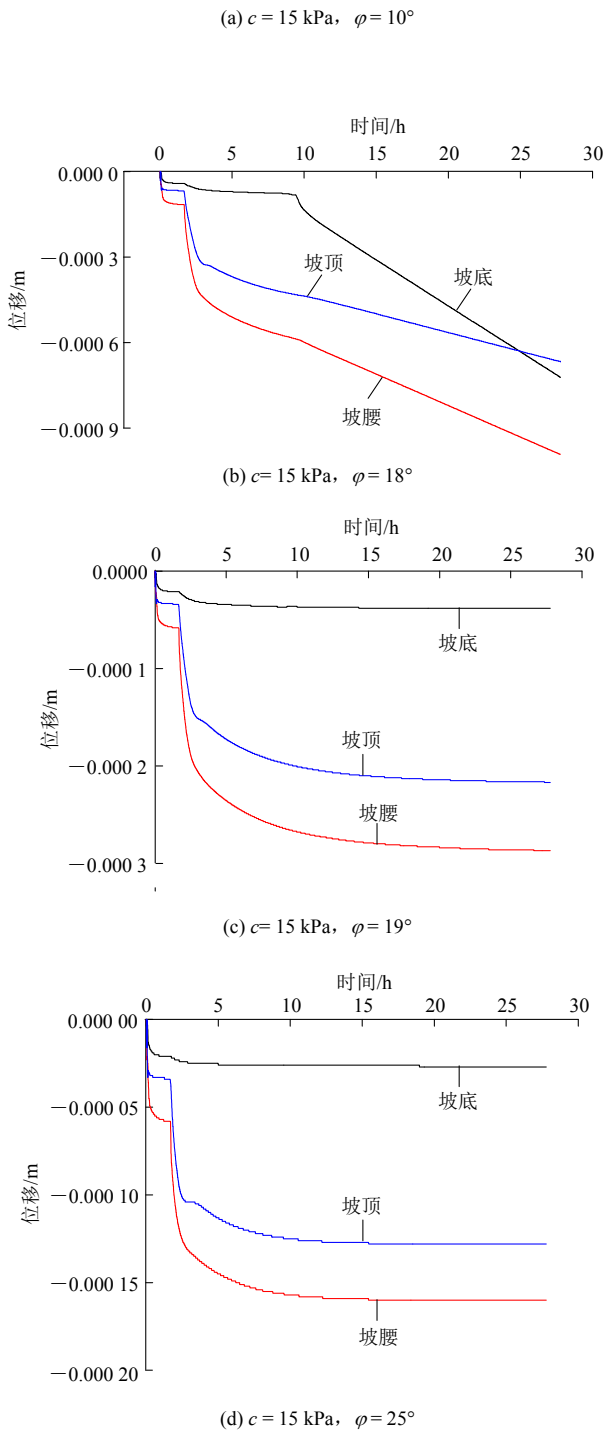


图 12 网格加密后不同强度参数下, 坡底、坡腰和坡顶 3 个监测点的监测位移时程曲线

Fig.12 Time-history curves of monitoring displacement at bottom, middle and top of slope after refinement

分需要满足一般计算精度的需求。

## 9 结 论

本文建立了地表裂缝和滑坡内部破坏状态之间

的联系, 将地表裂缝的发展变化状态作为滑坡体状态分析的因素, 提出了一种基于破裂度的新的判别滑坡体危险度的方法。通过数值模拟建立了地表破裂度和材料强度的关系以及地表破裂度和滑面破裂度之间的联系, 将地表破裂度和滑面破裂度相结合, 确定堆积层滑坡的危险性。不同强度参数和不同网格模型的计算结果表明, 该方法是可行的。本文的主要结论有:

(1) 对于一个给定的滑坡计算模型, 存在最大破裂数。研究表明, 一个确定的滑坡体, 当滑面贯通, 进入碎裂性破坏阶段, 随着边坡总体强度的降低, 破裂数会逐渐增加, 并最终趋于一个定值, 称最大破裂数。最大破裂数分地表最大破裂数和滑面最大破裂数, 描述的是一个确定滑坡计算模型在不同位置的最终破坏状态。

(2) 滑坡体的稳定性可用一个无量纲量——破裂度表示。破裂度又分地表破裂度和滑面破裂度。地表破裂度是地表破裂数与地表最大破裂数的比值, 滑面破裂度是滑面破裂数与滑面贯穿时对应的滑面最大破裂数的比值, 它们分别表征滑坡体表面和滑面上的破裂状态, 是与坡体强度相关的量, 并且彼此之间具有明确的对应关系: 若滑坡体的强度在临界值以下, 滑面贯穿, 滑面破裂度始终为 1, 地表破裂度随强度的降低而增大, 边坡不稳定; 若滑坡体的强度在临界值以上, 滑面未贯穿, 滑面破裂度随强度的降低而增大, 地表破裂度保持在一个较小的稳定的水平, 边坡稳定; 滑坡体在临界强度处, 滑面破裂度由一个小于 1 的数变为 1, 地表破裂度则存在一个突变。利用破裂度与坡体强度的关系以及地表破裂度和滑面破裂度的联系, 可以方便地确定滑坡体的稳定性状态。

(3) 在网格划分能够满足计算精度的前提下, 网格对破裂度的计算结果影响很小。不同网格模型的计算结果表明, 破裂度受网格数目的影响很小, 说明了基于破裂度和 CDEM 判别滑坡体的危险度是可行的。

破裂度是基于计算方法的特征量, 可以对应现场观测的物理量。与破裂度相关的地表裂缝信息可以很方便地获取, 所以该方法实施起来较为简单, 却可以处理很复杂的问题。基于破裂度的滑坡危险性分析方法作为一种新方法, 对滑坡的危险性评估提供了一个新的思路。



**参考文献(References):**

- [1] 李世海, 刘天莘, 刘晓宇. 论滑坡稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 2): 3 309 - 3 324.(LI Shihai, LIU Tianping, LIU Xiaoyu. Analysis method for landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.2): 3 309 - 3 324.(in Chinese))
- [2] DUNCAN J M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 22(7): 577 - 596.
- [3] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 525 - 529.(CHEN Zuyu, MI Hongliang, WANG Xiaogang. A three-dimensional limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 525 - 529.(in Chinese))
- [4] 张均锋, 丁 桦. 边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 365 - 370.(ZHANG Junfeng, DING Hua. Generalized 3D limit equilibrium method for slope stability analysis and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 365 - 370.(in Chinese))
- [5] 刘金龙, 栾茂田, 赵少飞, 等. 关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1 345 - 1 348.(LIU Jinlong, LUAN Maotian, ZHAO Shaofei, et al. Discussion on criteria for evaluating stability of slope in elastoplastic FEM based on shear strength reduction technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1 345 - 1 348.(in Chinese))
- [6] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3 381 - 3 388.(ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3 381 - 3 388.(in Chinese))
- [7] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键, 等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用[J]. 中国工程科学, 2006, 12(8): 39 - 61.(ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, DEDG Chujian, et al. Development of finite element limit analysis method and its applications in geotechnical engineering[J]. Engineering Science, 2006, 12(8): 39 - 61.(in Chinese))
- [8] 郑孝玉. 滑坡预报研究方法综述[J]. 世界地质, 2002, 19(4): 370 - 374.(ZHENG Xiaoyu. Summary on the Methods of Prediction to Landslide[J]. World Geology, 2002, 19(4): 370 - 374.(in Chinese))
- [9] CUNDALL P A. The measurement and analysis of acceleration in rock slopes[Ph. D. Thesis][D]. London: University of London, 1971.
- [10] 王泳嘉, 邢纪波. 离散元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991: 1 - 7.(WANG Yongjia, XING Jibo. Distinct element method and its applications to geotechnical engineering[M]. Shenyang: Northeast University of Technology Press, 1991: 1 - 7.(in Chinese))
- [11] 刘凯欣, 高凌天. 离散元法研究的评述[J]. 力学进展, 2003, 33(4): 483 - 490.(LIU Kaixin, GAO Lingtian. A review on the discrete element method[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(4): 483 - 490.(in Chinese))
- [12] LI S H, ZHAO M H, WANG Y N, et al. A new numerical method for dem-block and particle model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(3): 436 - 436.
- [13] LI S H, LIU X Y, LIU T P, et al. Continuum-based discrete element method and its applications[M]. Beijing: [s.n.], 2008: 147 - 170.

# 基于破裂度的堆积层滑坡危险性分析方法

作者: [李世海](#), [周东](#), [刘天苹](#), [LI Shihai](#), [ZHOU Dong](#), [LIU Tianping](#)

作者单位: [中国科学院 力学研究所, 北京, 100190](#)

刊名: [岩石力学与工程学报](#)

ISTIC | EI | PKU

英文刊名: [Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering](#)

年, 卷(期): 2013(z2)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_yslxygcxb2013z2114.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_yslxygcxb2013z2114.aspx)