

基于离散元的顺倾节理岩质边坡破坏过程分析

张水华¹, 张 艳², 梁栋才^{3,4}

(1. 云南交投公路建设第三工程有限公司, 云南 昆明 650103;

2. 云南省交通投资建设集团有限公司昆明东管理处, 云南 昆明 650000;

3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 为了研究含顺倾节理岩质边坡的破坏过程, 以某露天矿西南区域边坡为研究对象, 建立典型剖面的数值模型, 并通过室内试验标定边坡数值模型细观参数, 监测数值边坡模型关键位置的速度、位移和孔隙率, 结合边坡内部的裂纹发育和力链分布情况, 分析边坡的破坏过程特征。结果表明: 基于离散元的数值模拟试验和边坡数值模型均符合实际情况, 具有可行性; 边坡的破坏过程是在剪切应力和拉应力作用下, 顺倾节理处的力链由下至上逐渐断裂, 随着断裂范围扩大, 边坡发生加速滑动, 具体表现为受顺倾节理控制的前缘牵引式剪切-张拉组合破坏; 节理上部的“拱形”力链未被破坏, 滑坡特征为沿节理面和岩桥的整体滑动。

关键词: 顺倾节理; 岩质边坡; 离散元; 破坏过程; 整体滑动

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)01-0019-07

Failure Mechanism of Inclination Joint Rock Slope Based by Discrete Elements Method

ZHANG Shuihua¹, ZHANG Yan², LIANG Dongcai^{3,4}

(1. Third Engineering Company of Yunnan Jiaotong Highway Construction Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650103, China;

2. Kunming East Management Office, Yunnan Communications Investment & Construction Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China;

3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to analyze the inclination joints failure process of rock slope, a slope of an open-pit mine was taken as an example. The numerical model of a typical profile was developed. The mesoscopic parameters of slope numerical model were calibrated by laboratory tests. The velocity, displacement, porosity, internal crack development and force chain distribution at key positions of numerical slope model are analyzed, and the failure process characteristics of slope are obtained. The results show that The numerical simulation test and slope numerical model based on discrete element method are feasible and accord with the actual situation. The failure process of the slope is as follows. Under the action of shear stress and tensile stress, the force chain at the inclined joint gradually breaks from bottom to top. With the expansion of the failure range, the slope accelerates sliding, which is characterized by the front traction shear-tension combination failure controlled by the inclination joint. The “arch” force chain at the upper part of the joint is not destroyed, and the landslide is characterized by integral sliding along the joint plane and rock bridge.

Keywords: inclination joint; rock slope; discrete element; failure process; integral sliding

收稿日期: 2021-10-14

修稿日期: 2021-11-08

基金项目: 降雨和工程扰动诱发风化混合花岗岩边坡失稳力学机制和灾害调控技术研究(云交科教[2018]45号)

作者简介: 张水华(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察设计工作。E-mail: 1315626576@qq.com

通讯作者: 梁栋才(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为边坡稳定性及灾害防治。E-mail: 1415473378@qq.com

天然岩体由岩块和结构面组成,具有不连续性、非均质性和各向异性等性质。岩块的性质一般较为稳定,强度高,完整性好,不易变形,而结构面的力学性质较复杂^[1]。结构面是岩体内部具有一定方向、规模和形态的连续或非连续面,如节理、裂隙和断层等^[2-3],其力学性质和分布状态直接影响着岩体的整体稳定性。

大量的工程实践经验表明,含有节理的岩质边坡发生破坏时,结构面往往起到主导作用。破坏沿结构面逐渐不断发育,最终贯通成滑面,导致岩质边坡发生整体滑动^[4]。因此,准确获取结构面的力学参数对岩质边坡工程的设计和防护有重要意义。

对于岩质边坡的研究,一般是通过物理试验和数值模拟多种手段相结合的方式进行。物理试验结果真实准确,但存在不可重复、成本高等弊端;数值模拟具有高效率、低成本和可重复等优点,并且可对模型内部参数进行实时监测。颗粒离散元方法能够从细观尺度模拟岩石颗粒的摩擦特性和黏结特性,能模拟岩土体的几何及力学特性,可以直观地模拟岩体中裂纹的萌生、扩展和贯通过程。

目前,利用颗粒流离散元数值模拟结合物理试验对结构面性质的研究取得了一定的进展。在物理试验方面,Homand 等^[5]对花岗岩人工结构面循环加载,拟合出结构面循环剪切强度经验公式。Lee 等^[6]建立考虑结构面表面粗糙度的结构面剪切本构模型。Jafari 等^[7]和瞿佳美^[8]使用水泥砂浆研究了剪应力和法向应力应变的变化特征。夏才初等^[9]明确了随着法向应力的增大,结构面峰值抗剪强度增大。刘博等^[10]等详细分析了结构面的变形破坏特征以及峰值剪切强度的劣化效应,拟合出了结构面循环剪切强度计算公式。由于物理试验监测手段有限,尤其是对结构面内部的监测不充分,大部分物理试验不能反映内部变形特征。在数值模拟方面,常文斌等^[11]、Liu 等^[12]、Yoon^[13]、何春梅^[14]、黄达等^[15]、王刚等^[16]以及刘新荣等^[17-18]、王雅婷等^[19]、郑泽松等^[20]通过考虑不同的法向压力、接触面粗糙度、边界条件等因素,使用 PFC 离散元法获得了岩体结构面细观损伤演化全过程及典型破坏模式。

上述内容为利用 PFC^{2D} 软件研究含结构面岩质边坡破坏特征提供了强有力的借鉴。研究区露天矿边坡西南区域出现较大范围垮塌。根据地质调查结果,该区域边坡主要由灰岩组成,并发育有顺倾节理。本文采用颗粒流离散元软件 PFC^{2D} 对边坡破坏过程进行模拟仿真,基于工程实地采集的灰岩样本

和结构面样本的强度试验结果对离散元模型细观参数进行标定,监测边坡数值模型内部的位移、速度、裂隙发育和力链的发展过程,研究了顺倾节理对岩质边坡失稳破坏过程、破坏模式影响。

1 离散元模型细观参数

试验是确定岩体力学参数最基本的手段和方法。对于边坡工程,可通过室内试验,取得符合实际的岩体力学参数,再通过标定等手段将力学参数赋予数值模拟模型中,可直接检测到岩土体内部参数的动态变化,实现多角度岩土力学问题研究。在离散元模型研究中,细观参数选择的合理性直接影响到模拟结果的真实性。通常在选定离散元颗粒基本模型后,采用“试错法”反复试算标定模型细观参数。本节使用单轴压缩试验确定边坡主要岩层灰岩的细观参数,通过室内结构面剪切试验确定边坡体顺倾节理面的细观参数。

1.1 灰岩细观参数选取

根据某矿露天边坡的实际情况,选取有代表性的矿岩进行物理力学参数的试验测定。单轴压缩试验采用数字控制的电液伺服试验机 RMT-150C 岩石力学试验系统。试验时,采用力-位移的加压方式,以 0.002 mm/s 的速度均匀加荷,直到试样破坏。试验过程中试样加载前后对比如图 1 所示。

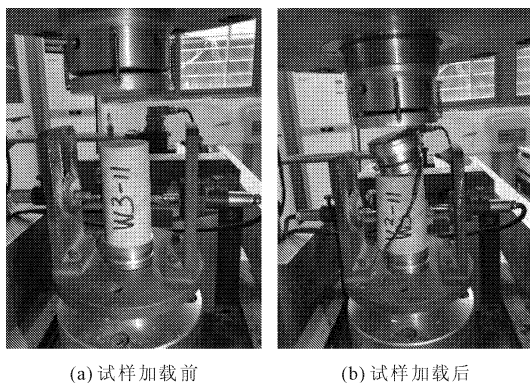


图 1 试样加载前后对比图

依据《工程岩体试验方法标准》^[21] (GB/T 50266—2013) 中相关规定采用下式计算岩石抗压强度:

$$R = \frac{P}{A} \quad (1)$$

式中: R 为岩石抗压强度, MPa; P 为最大破坏荷载, N; A 为垂直于加荷方向的试样面积, mm^2 。

采用离散元软件建立单轴压缩试验模型时,颗粒间的接触选取平节理模型。平节理模型通过将接触模拟成由许多子接触组成的平线(2D)或圆盘(3D)来

克服平行黏结模型的缺陷,在颗粒间接触破坏后,阻碍其旋转,能得到较为符合实际的压拉比。在软件中生成 10 cm 宽 5 cm 的岩石样本,长度方向在岩石两个端面上以恒定速度 0.002 mm/s 来实现加载,借助软件中的 FISH 语言记录应力和应变。采用“试错法”最终得到数值模拟模型参数如表 1 所示。

表 1 灰岩数值模型参数

颗粒半径/m	0.00050~0.00075
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2500
颗粒摩擦系数	0.577
法向切向接触刚度比	1

数值模拟与室内试验破坏模式对比如图 2 所示,主要呈现为拉伸破坏与室内试验结果吻合。数值模拟试验的应力-应变曲线如图 3 所示,峰值大小与室内试验接近,由于天然岩石内部分布有一定的劣化面,因此峰值出现时间略早。总体而言,变形破坏趋势基本吻合,抗压强度的试验值 83.16 MPa 和模拟值 80.48 MPa 接近,误差小于 4%。

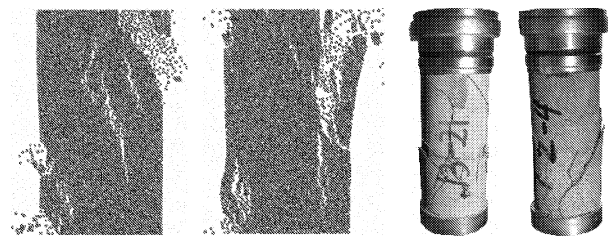


图 2 数值模拟与室内试验破坏模式对比

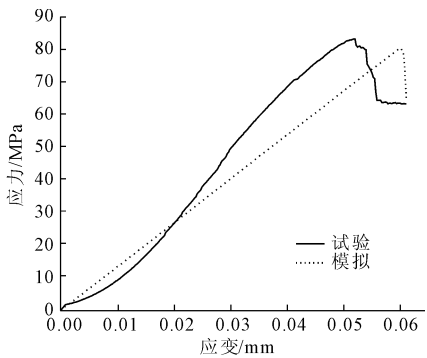


图 3 单轴压缩应力-应变曲线

1.2 结构面细观参数选取

某露天矿边坡中,灰岩缓向反倾,但边坡普遍存在一组顺坡向结构面,对台阶及局部边坡稳定性起到控制作用。为此,在研究区对顺倾结构面取样,进行室内结构面剪切试验。根据《工程岩体试验方法标准》^[21](GB/T 50266—2013)和《岩土工程勘察规范》^[22](GB 50021—2001)、《非煤露天矿边坡工程

技术规范》^[23](GB 51016—2014)等规定,本次岩石结构面剪切试验进行五级法向应力的剪切试验,分别是 500 kPa、1 000 kPa、1 500 kPa、2 000 kPa、2 500 kPa,剪应力分 5 级—10 级施加,记录峰值剪应力作为结构面破坏强度。试验过程法向应力采用伺服控制,试样及试验情况,如图 4、图 5 所示。



图 4 结构面剪切试样

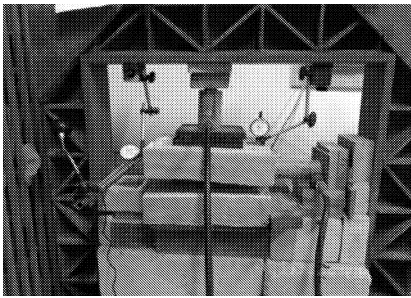


图 5 结构面剪切试验

各法向荷载下,作用于剪切面上的法向应力和剪应力应分别按下列公式计算:

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{2}$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \tag{3}$$

式中: σ 为作用于剪切面上的法向应力,MPa; τ 为作用于剪切面上的剪应力,MPa; P 为作用于剪切面上的法向荷载,N; Q 为作用于剪切面上的剪切荷载,N; A 为有效剪切面面积,mm²。

使用离散元软件中的光滑接触模型模拟结构面,试验数值模型和破坏后数值模型如图 6、图 7 所示。二维结构面剪切试验数值试块由三部分组成,分别是上部试块,下部试块和结构面,试块整体尺寸为 30 cm×30 cm,采用单轴压缩数值模拟试验标定的细观参数,结构面处采用光滑节理模型,具体参数如表 2 所示。法向应力分别设置为 500 kPa、1 000 kPa、1 500 kPa、2 000 kPa、2 500 kPa,并伺服控制,剪切速度为 0.05 mm/s。通过 FISH 函数记录剪切力大小并转化为剪应力。

表 2 结构面数值模型参数

法向接触刚度/(GPa·m ⁻¹)	100
切向接触刚度/(GPa·m ⁻¹)	100

表 3 结构面直剪试验结果

试验方法	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa
室内试验	32.94	10.89
数值模拟	31.80	14.40

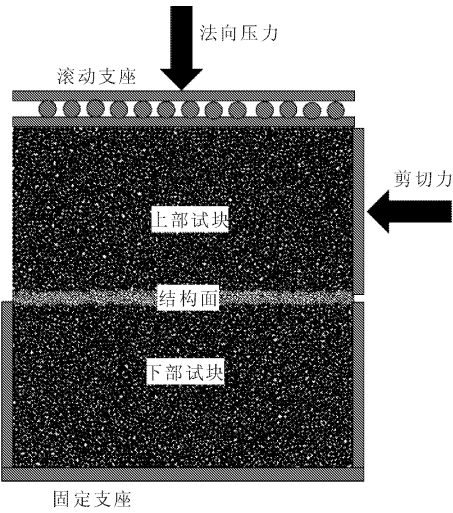


图 6 结构面剪切模拟试验模型图

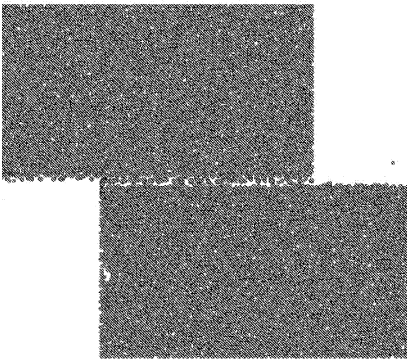


图 7 结构面剪切模拟试验终止图

数值模拟试验和室内试验剪应力和法向应力关系如图 8 所示,绘制剪应力与法向应力关系曲线,并按库仑表达式确定相应的岩石强度参数(φ, c)见表 3。数值模拟和室内试验得到内摩擦角和黏聚力接近,采用平滑接触模型模拟结构面具有可行性。

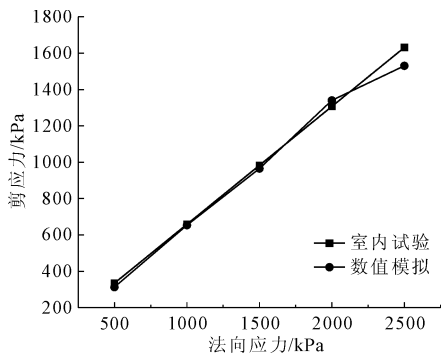


图 8 室内试验和数值模拟结构面抗剪强度

2 滑坡数值模型

2.1 滑坡区概况

研究区历史滑坡主要是多台阶局部破坏,以圆弧破坏和楔形破坏为主。研究区域边坡于 1 784 m~1 884 m 台阶出现较大范围垮塌,涉及垮塌台阶 10 个,垮塌方量约为 3.5 万 m³,如图 9、图 10 所示。该段边坡是露天矿最陡的边坡,中上段平均坡角 42°。通过现场调查,该区域岩层为灰岩,发育有一组倾角小于 30°的顺倾向节理,与坡面小角度斜交,贯通长度几米到十几米为主。如果边坡坡度较大,容易形成一定规模的崩塌破坏,即使坡度稍缓,也容易形成台阶内的崩塌破坏。

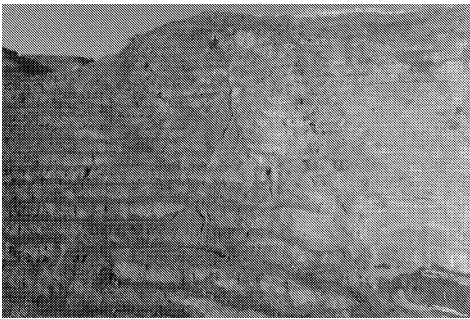


图 9 滑坡体整体状况

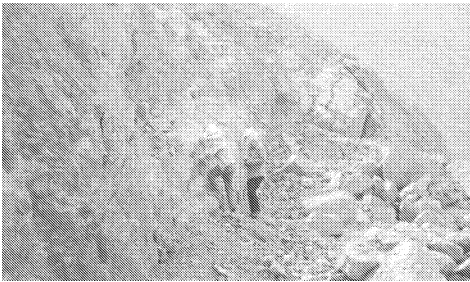


图 10 崩塌滑坡体细部

2.2 边坡数值模型

通过无人机航拍三维建模获取研究区域包含地表色彩贴图的数值高程地图。根据穿过所有岩层,坡高最高、坡比大,能代表了该区域的最不利地层分布情况的原则选取典型剖面,见图 11。典型地质剖面主要穿越地层为灰岩层,是整个矿区中最陡的部分,平均坡角达到 41°。

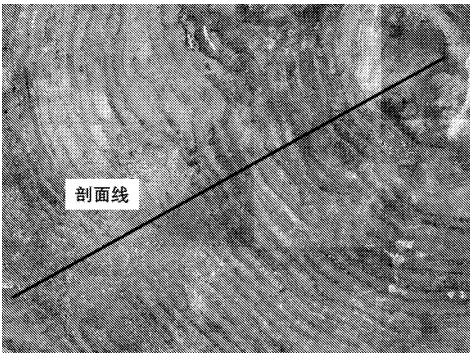


图 11 包含地表贴图的数字高程地图

根据边坡特征建立包含节理面的岩质边坡二维模型,如图 12 所示。坡高 341.3 m,高度为 183 m ~ 313 m 范围内沿坡表等间距设置 5 组倾角为 20°的节理面。距离节理面上下各 2 m 处分别设置 2 个测量圆,用来监测节理面两侧应力、应变、孔隙率、颗粒运动和位移。其余部位沿坡表每隔 50 m 距坡面的垂直距离为 15 m 左右设置一测量圆,依次进行编号。边坡整体采用平节理模型,结构面使用平滑模型,将室内试验标定过的自然状态下的参数代入模型中。6 号—15 号测量圆监测节理分布区域,1 号—5 号测量圆监测岩性中下部岩性较完整区域,16 号—19 号测量圆监测坡顶区域。

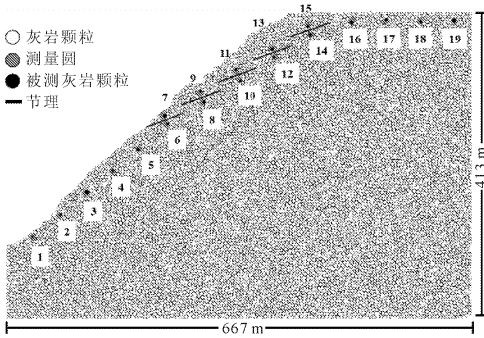


图 12 典型剖面离散元模型

3 边坡数值模拟结果

3.1 整体破坏趋势分析

如图 13 所示,随着计算步增加,节理面上部颗粒的位移逐渐增大,下部受节理控制较小,随着上部颗粒卸载过程结束,位移趋于稳定。由于围岩完整性较好,边坡中下部基本趋于稳定,无较大位移。根据图 14,当计算结束时,由于节理处颗粒间的强度较低,上层岩体受重力作用不断累积蠕滑变形,边坡节理分布区上方发生较大位移,滑面贯通,形成了滑坡体。边坡其余位置保持稳定。计算结束时,节理

分布区上方测量圆的位移仍具有增加的趋势。15 号测量圆靠近坡顶,其位移最小。除 15 号测量圆外,其余位于节理上方的测量圆位于节理上方的测量圆位移均大于节理下方。

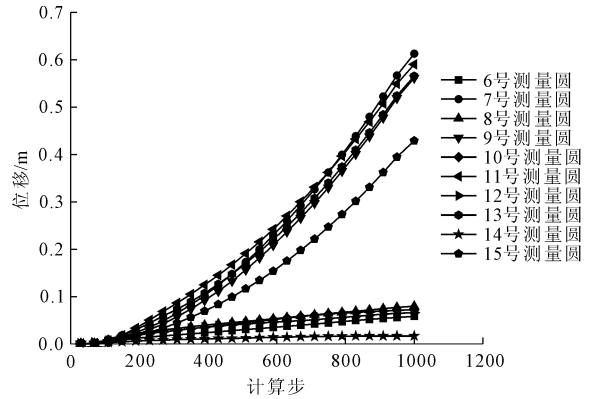


图 13 测量圆位移散点图

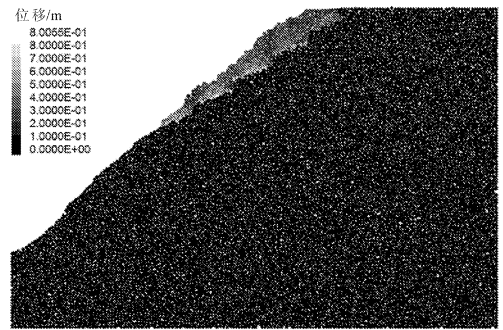


图 14 最终状态(计算步 1 000)边坡位移云图

根据图 15、图 16 可知,滑坡体的前缘运动速度最大,节理上颗粒运动速度次之,靠近坡顶位置最低。在前缘的牵引下,节理上方的岩体沿节理加速下滑。此外,边坡中下部和坡顶没有位移,速度为 0。节理分布区上方岩体逐渐沿节理面与坡体脱离,并且速度越来越快,呈上升趋势。节理分布区下方颗粒运动速度经历了初期短暂增长后,逐渐下降趋于平稳,摆脱滑坡体运动的影响。

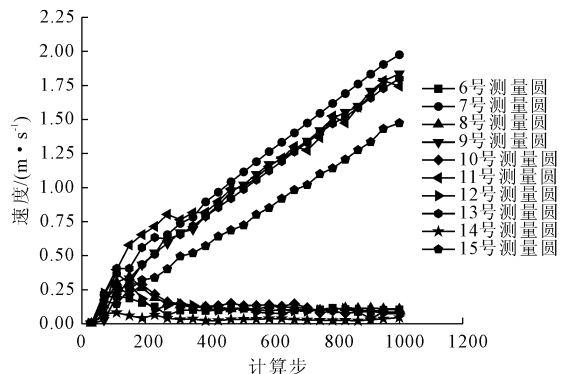


图 15 测量圆速度散点图

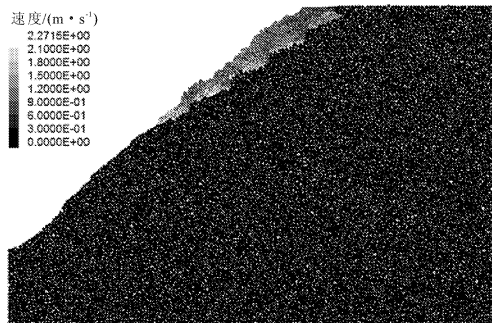


图 16 最终状态(计算步 1 000)边坡速度云图

1 号—5 号测量圆和 16 号—19 号测量圆监测到坡顶和边坡中下部速度和位移基本为 0。节理分布区 6 号—15 号测量圆监测范围颗粒位移小于 0.7 m 之间,运动速度均小于 2 m/s,且均有继续增大的趋势。随着时间推移,节理面上方颗粒的位移和运动速度大于下部且不断增大,有加速变形的趋势。根据速度和位移的变化规律,边坡破坏为受顺倾节理控制的加速滑动破坏。

3.2 内部表现分析

边坡内部应力和裂隙分布直接影响其破坏模式。边坡内部裂隙的发育、贯通导致的应力重分布是边坡失稳的主要模式。裂隙发育过程(左侧)和力链分布(右侧)如图 17 所示。

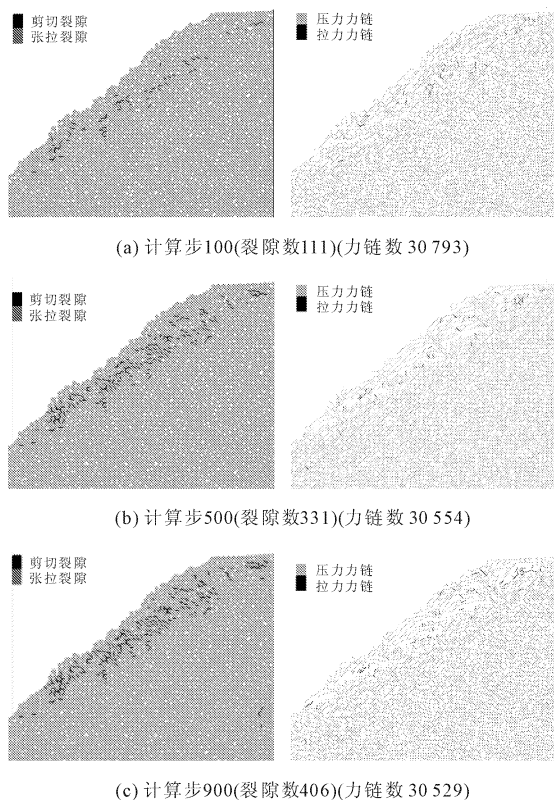


图 17 顺倾节理分布区裂隙及力链分布图

计算步 100 时,裂隙快速发育,位置集中在顺倾节理之间岩桥区域,且多为张拉破坏;根据力链分布图中顺倾节理附近的拉力力链,可知节理附近产生了拉力,滑坡体的滑面将岩节理方向逐渐贯通。计算步 500 时,前缘区域裂隙已贯通至边坡表面,形成前缘滑动体,滑坡体其他区域也快速发育大量裂隙;节理区域的力链完全断开,滑面完全形成,上方的滑坡体与边坡基本脱离。计算步 900 时,裂隙发育已趋于稳定,没有明显新增裂隙;随着颗粒的移动,逐渐形成了“拱形”力链。力链是散体材料内部颗粒间作用力沿着接触网络传递的路径。节理面附近的颗粒对其上方岩体不起支撑作用,滑坡体自重依靠力链形成的拱传递到边坡体上。根据 3.1 节,该区域的位移和速度也较大。前缘的位移造成滑坡体其余部分失去支撑,随着计算步的增加,在滑坡体内部各个位置逐渐发育出密集的张拉裂隙,但增长速度逐渐减慢。随着裂隙的发育,颗粒间的力链断开,发生位移,形成新的力链。随着计算步的滑坡体内逐渐形成了顺倾力链,每条力链之间缺乏连接,这种结构极易产生滑动。滑坡体内部的颗粒不断位移最终形成了“拱形”力链。

如图 18 所示,最终状态节理面上方发育的裂隙以垂直于坡面的剪切裂隙为主,伴有少量张拉裂隙,边坡中的裂隙数增长速度逐渐降低,最终趋于 0,如图 19 所示。坡体中的剪切裂隙削弱了颗粒间平行于坡面的连接,逐渐形成了如图 20 所示的“拱形”力链。这种近乎平行于坡面拱脚位于节理边缘的连续的“拱形”力链具有一定的整体稳定性,对上方岩体有一定的承载能力。若节理面强度足以维持“拱形”力链所在范围岩体的稳定,即能够承受“拱形”上方岩体重量,同时“拱形”连续完整,则该区域岩体会沿节理面整体下滑。但随着滑坡体内部不均匀滑动,“拱形”力链的“拱脚”可能逐渐破坏,滑坡体内部力链断裂,加剧裂隙发育,最终碎散。根据边坡整体破坏的特征分析,节理分布区域已经形成了滑坡体,连续的“拱形”力链不能保证边坡完整性,但滑坡体内部具有一定的整体性。

结合速度和位移的变化规律,边坡破坏应为受顺倾节理控制的以剪切为主,辅以张拉破坏的前缘牵引滑动,裂隙的发育使节理面贯通,最终节理面上方岩体沿节理面和岩桥发生整体滑动。

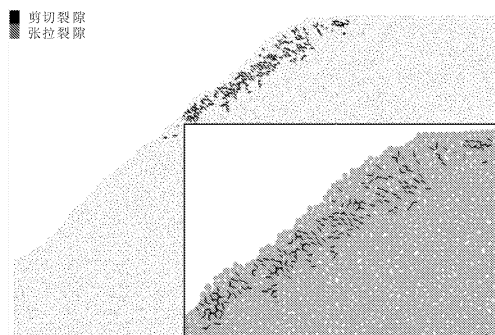


图 18 最终状态(计算步 1 000)边坡内部裂隙分布图

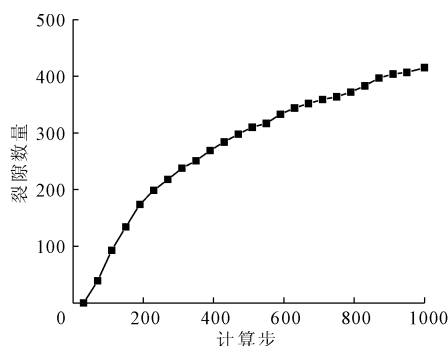


图 19 裂隙数量变化图

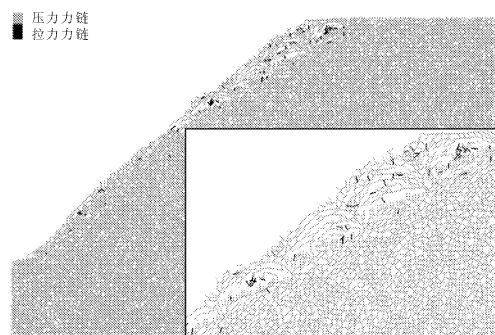


图 20 最终状态(计算步 1 000)边坡内部力链图

4 结 语

依托露天矿边坡采用 PFC^{2D} 数值分析软件建立了离散元边坡模型,并对顺倾节理岩质边坡进行了数值模拟研究,揭示了边坡的破坏过程特征:

(1) 建立了岩体单轴压缩和结构面剪切模拟试验模型,通过室内试验对岩石和结构面离散元模型细观参数进行标定和验证,数值模拟结果与试验误差较小,采用 PFC^{2D} 模拟岩质边坡结构面是可行的。

(2) 数值模拟揭示的边坡破坏特征为:中下部节理面附近岩体发生剪切破坏和拉破坏,力链开始断裂;随着变形发展,顺倾节理处力链大面积断裂,坡体发生加速滑动,表现为以剪切破坏为主、辅以张

拉破坏的牵引破坏模式;滑坡体内部形成了连续的“拱形”力链,使其具有一定的完整性,滑坡特征为沿节理面和岩桥的整体滑动。

参考文献:

- [1] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京:科学出版社,1979.
- [2] Goodman R E. Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks[M]. New York: West, 1976.
- [3] Bieniawski Z T. Engineering classification of jointed rock masses[J]. Civil Engineer in South Africa, 1973, 15(12):343-353.
- [4] 黄润秋. 岩石高边坡稳定性工程地质分析[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [5] Homand F, Belem T, Souley M. Friction and degradation of rock joint surfaces under shear loads[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 25(10):973-999.
- [6] Lee H S, Park Y J, Cho T F, et al. Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38(7):967-980.
- [7] Jafari M K, Hosseini K A, Pellet F, et al. Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 38:967-980.
- [8] 瞿佳美. 循环荷载作用下结构面剪切特性试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
- [9] 夏才初,宋英龙,唐志成,等. 粗糙节理剪切性质的颗粒流数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2012, 31(8):1545-1552.
- [10] 刘 博,李海波,刘亚群. 循环剪切荷载作用下岩石节理变形特性试验研究[J]. 岩土力学,2013, 34(9):2475-2481.
- [11] 常文斌,王 平,于一帆,等. 颗粒离散元模拟边坡动力响应的研究进展[J]. 水利与建筑工程学报,2021, 19(2):48-53.
- [12] Liu X R, Liu Y Q, Lu Y M, et al. Experimental and numerical study on pre-peak cyclic shear mechanism of artificial rock joints[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2020, 74(3):407-423.
- [13] Yoon J. Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, 44(6):871-889.

(下转第 42 页)

- 强度的影响研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(6): 113-116, 199.
- [8] 张俊, 陈红鸟, 王德强. 基于 DIC 技术的混凝土往复荷载下断裂力学特性研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(4): 1636-1643.
- [9] Wolenski A, Monteiro A B, Penna S S, et al. Damage propagation using novel G/XFEM strategies: computational aspects and numerical investigations[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 42(13): 80-93.
- [10] 吴乔, 董伟, 李杰. 长期荷载对混凝土断裂性能影响的试验与数值研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(3): 155-160, 174.
- [11] 徐世烺, 张秀芳, 郑爽. 小骨料混凝土双 K 断裂参数的试验测定[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 543-553.
- [12] Hillerborg A, Mod  r M, Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 6(6): 773-781.
- [13] 陈峰宾, 许斌, 焦华喆, 等. 玄武岩纤维混凝土纤维分布及孔隙结构表征[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 273-280.
- [14] Kabay N. Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 95-101.
- [15] 刘钢, 王伟亚, 陈北齐, 等. 粉煤灰对玻化炉渣路面混凝土界面微观结构改善影响研究[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(8): 7-11.
- [16] 王志良, 张跃, 申林方, 等. 考虑微观结构影响的混凝土界面过渡区裂隙渗流-溶蚀耦合模型[J]. 工程力学, 2021, 38(6): 133-142.
- [17] Qing L B, Li Q B. A theoretical method for determining initiation toughness based on experimental peak load[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 99(1): 295-305.
- [18] 陆洲导, 俞可权, 苏磊, 等. 高温后混凝土断裂性能研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 836-840.
- [19] Hu X Z, Duan K. Size effect and quasi-brittle fracture: the role of FPZ[J]. International Journal of Fracture, 2008, 154(1/2): 3-14.
- [20] Hu X Z, Guan J F, Wang Y S, et al. Comparison of boundary and size effect models based on new developments[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 175(7): 146-167.
- [21] 管俊峰, 王强, 等. 考虑骨料尺寸的混凝土岩石边界效应断裂模型[J]. 工程力学, 2017, 34(12): 22-30.
- [22] 管俊峰, 姚贤华, 白卫峰, 等. 由小尺寸试件确定混凝土的断裂韧度与拉伸强度[J]. 工程力学, 2019, 36(1): 70-79.
- [23] Kumar S, Barai S V. Determining double-K fracture parameters of concrete for compact tension and wedge splitting tests using weight function[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76: 935-948.

(上接第 25 页)

- [14] 何春梅. 循环动载下泥质软岩力学行为及库区软硬互层边坡动力稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [15] 黄达, 黄润秋, 雷鹏. 贯通型锯齿状岩体结构面剪切变形及强度特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7): 1229-1237.
- [16] 王刚, 张学朋, 蒋宇静, 等. 基于颗粒离散元法的岩石节理面剪切破坏微观机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 1442-1453.
- [17] 刘新荣, 许彬, 黄俊辉, 等. 多形态贯通型岩体结构面宏观细观剪切力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 406-415.
- [18] 刘新荣, 邓志云, 刘永权, 等. 岩石节理峰前循环直剪试验颗粒流宏观细观分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2103-2115.
- [19] 王雅婷, 崔精. 基于 PFC^{2D} 的断续岩桥直剪强度特征及能量演化机制研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(5): 234-238.
- [20] 郑泽松, 熊传祥, 王涛. 发育软弱结构面土坡破坏细观机理研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 92-96.
- [21] 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [22] 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [23] 非煤露天矿边坡工程技术规范: GB 51016—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.