

DOI: 10.11779/CJGE201707007

基于裂纹扩展模式的岩质斜坡阶梯状滑移破裂机制研究

朱 雷, 黄润秋, 严 明, 陈国庆

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 阶梯状滑移破裂作为节理斜坡的一种典型破坏模式, 裂隙间裂纹的扩展模式对其变形破裂机制及斜坡破裂面形态具有重要的意义。通过颗粒流程序研究了不同岩桥倾角(0° , 45° , 90° , 135°)和围压条件下双裂隙间裂纹的贯通模式、基本特征与影响因素, 揭示含双裂隙岩体在不同围压作用下裂纹扩展的细观力学机制, 并推广到含多裂隙岩体裂纹扩展模式中。主要成果如下: ①双裂隙的贯通主要通过次生共面裂纹、次生倾斜裂纹和翼裂纹; ②裂纹扩展具有明显的围压效应, 低围压条件下, 裂隙的贯通主要通过翼裂纹和次生倾斜裂纹, 高围压条件下, 裂隙的贯通主要通过次生共面裂纹和次生倾斜裂纹; ③裂隙的贯通应力受岩桥倾角影响较大, 岩桥倾角为 45° 时, 裂隙的贯通应力最小, 裂隙最容易贯通。结合双裂隙贯通模式的研究, 对多裂隙岩体贯通模式进行研究, 多裂隙岩体贯通模式可以理解为多组双裂隙的贯通模式的不同组合, 同时, 在多裂隙贯通模式中, 裂纹会寻找贯通应力最小路径扩展。最后, 结合一实际斜坡案例, 对阶梯状破坏斜坡的基本破裂特征进行了总结分析, 并提出了相应的破裂模式分区。

关键词: 裂隙岩体; 裂纹扩展; 应力状态; 阶梯状斜坡; 破裂机制

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)07-1216-09

作者简介: 朱 雷(1987-), 男, 博士, 主要从事工程地质等方面的科研工作。E-mail: aaclee@126.com。

Step-path failure mechanism of rock slopes based on crack coalescence modes in rock mass

ZHU Lei, HUANG Run-qiu, YAN Ming, CHEN Guo-qing

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The crack propagation and coalescence mode play an important role in the step-path failure mechanism of rock slopes. By using the discrete element method (DEM), the coalescence modes between two pre-existing cracks with different geometries (rock bridge angle) and confining stresses under biaxial compression are performed. Three types of cracks can be identified during the tests, which are the secondary coplanar cracks, secondary inclined cracks and wing cracks. Meanwhile, the wing cracks and secondary inclined cracks occur under a low confining stress biaxial compression and almost disappear under a high confining stress. Based on the above, the step-path failure mechanism of multiple flaws is investigated. It is found that the crack coalescence modes depend on the coalescence stress severely, and the extended modes are carried out and show the homologous view. Finally, taking a rock slope as an example, the mechanism of rock slope step-path failure is generalized. The coalescence of the joints is from bottom to upper, and the coalescence mode of the joints is subjected to the slope stress conditions. Based on the modes of crack coalescence and correlation between crack coalescence modes and stress, three zones of the failure surface are divided.

Key words: jointed rock; crack propagation; stress state; step-path slope; failure mechanism

0 引言

阶梯状滑移破坏是岩质斜坡最常见的一种破坏模式, 通常见于受平行边坡陡、缓两组结构面或一组缓倾角结构面控制的岩质斜坡中。目前对于这类破坏模式的研究主要集中在其工程地质条件, 形成机制等方面定性分析^[1-2], 其中以国内小湾水电站左岸IV[#]山梁高边坡和国外 Randa 岩崩(图1)研究成果较多。在节理岩质斜坡中, 由于结构面的不连续性, 结构面

的贯通实际上受控于岩桥中裂纹的扩展模式, 因此, 研究裂纹扩展、贯通、到岩体破裂这一演化过程, 是正确评价斜坡的阶梯状滑移破裂的关键。

国内外众多学者对裂隙岩体中裂纹起裂、扩展规律及贯通模式进行了大量的研究并取得了大量的研究成果, 系统地究了含单条、两条、三条和多条裂隙在

基金项目: 国家自然科学基金项目(41130745, 41272330, 41572283)

收稿日期: 2016-03-09

单轴压缩下强度变形特征和裂纹扩展模式: Lajtai^[3]对含单裂隙试件在单轴压缩过程中的破坏进行了系统研究, 提出了裂纹断裂模式的演化过程, 首先在裂隙尖端产生拉开型翼裂纹, 随后出现近水平的法向剪切断裂、倾斜反翼裂纹、共面裂纹; Ping 等^[4]、WONG 等^[5]和朱维申等^[6]在单轴压缩条件下研究了双裂隙岩石试样的破坏, 深入地分析了裂纹的扩展模式与裂隙之间的几何关系。这些研究成果均表明, 裂纹的扩展是一个复杂的过程, 同时也表明岩桥段是阶梯状滑移边坡控制性因素。付金伟等^[7]同时也展开了对多裂隙岩体中裂纹贯通模式进行了模拟研究, 并在实现了多裂隙岩体的阶梯状滑移破坏。而鲜有学者展开对斜坡阶梯状滑移破裂的颗粒流研究, Luis 等^[8]和岑夺丰等^[9]通过颗粒流对阶梯状斜坡滑移破裂机制进行过研究, 但是两位学者均采用概化模型进行研究, 难以代表实际情况。同时不连续断续裂隙岩石在围压作用下裂纹扩展机制的研究还相对较少, 将其结果应用到实际工程中则更少。



图 1 Randa 岩崩阶梯状滑面^[2]

Fig. 1 Step-path configuration of Randa^[2]

本文在前人研究的基础上, 考虑到裂隙岩体所处的应力环境, 研究了不同应力条件下、不同几何参数条件下, 双裂隙的贯通模式, 启动与贯通应力。同时将获得的结论推广到多裂隙岩体中, 获得有意义的研究结论, 最后, 以一斜坡作为研究案例, 从裂纹发展模式、应力特征总结出阶梯状斜坡破裂的一般特征。

2 裂纹扩展的几种基本模式

本节中, 针对最基本的几种裂隙组合模式, 进行双轴试验, 研究其在不同围压条件 (0, 2, 4, 6, 8, 10 MPa) 下裂纹的扩展模式及启动、贯通应力。

2.1 几何模型与细观参数校核

一般来说, 裂隙的几何交接关系主要由叠合和非叠合 2 类, 叠合是指两条裂隙在自定义平面上投影有重合部分, 有部分学者^[10-11]对裂隙的叠合率和贯通模

式进行了研究, 但是存在一个问题, 叠合其实是一个空间概念, 应该是有空间各向异性的, 因此其力学意义并不明确。因此, 大部分学者在研究裂纹扩展模式时, 均将岩桥角度作为一个变量。同样, 本文也以岩桥倾角作为变量, 其他要素例如裂隙倾角、岩桥长度、裂隙长度等, 其实很多要素在力学上是具有同等意义的, 因此本文仅考虑岩桥倾角作为唯一变量。

两条断续贯通的裂隙试样中定义预制裂隙长度为 α , 裂隙倾角为 30° , 岩桥角度 (与裂隙夹角) 为 α (0° , 45° , 90° , 135°), 其几何分布见图 2, 这有, 试验中 2 条平行裂隙的排列方式分为: 共面排列、叠合排列、非叠合排列, 基本涵盖所有的组合类型。

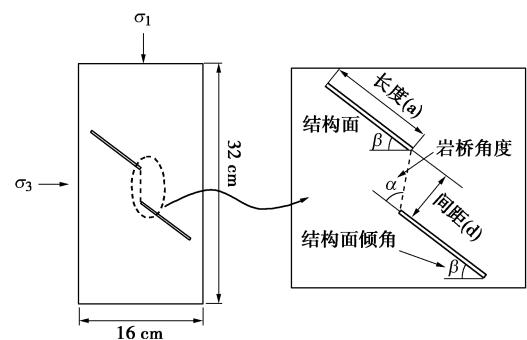


图 2 裂隙几何关系

Fig. 2 Geometry of flaws

通过试错法^[12]进行, 经反复调试, 最终获得一组颗粒流模拟细观参数: 颗粒密度 $\rho = 3100 \text{ kg/m}^3$, 颗粒接触模量 $E_c = 20 \text{ GPa}$, 颗粒刚度比 $k_p/k_s = 2.5$, 颗粒摩擦系数 $\mu = 0.7$, 平行链接半径乘子 $\lambda = 1$, 平行链接刚度比 $k_{nb}/k_{sb} = 2.5$, 平行链接模量 $E_b = 20 \text{ GPa}$, 平行链接法向强度 $\sigma_{cb} = 40 \text{ MPa}$, 平行链接切向强度 $\tau_{cb} = 60 \text{ MPa}$ 。

图 3 为采用的细观参数模拟的完整试件在单轴试验的应力 - 应变曲线, 通过应力 - 应变颗粒流模拟曲线所得的宏观参数与实际吻合较好。

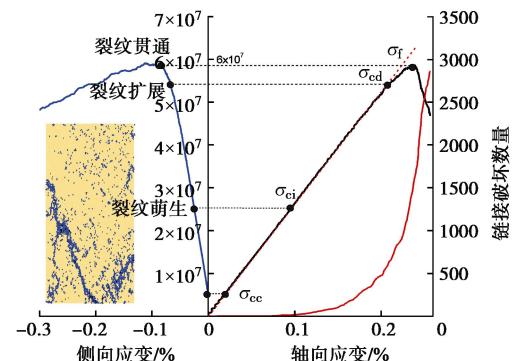


图 3 校核参数对应试件的应力 - 应变曲线

Fig. 3 Stress-strain relations of DEM model

2.2 裂纹扩展模式分析

(1) 裂纹类型

a) 翼裂纹

当围压较低时或在加载的初始阶段, 观察试样破坏形态可以发现, 其裂纹类型主要为翼裂纹。翼裂纹起裂于裂隙端部, 起裂时刻一般早于其他类型的裂纹, 其初始扩展方向近乎垂直预置裂隙, 并随荷载的增大以一定的扩展角向外进行稳定扩展, 扩展方向与最大主应力方向基本一致, 直到隙间次生共面裂纹或次生倾斜裂纹产生, 其主要由平行于裂隙端部的拉应力作用生成, 表现出张性特征; 随着围压的增大, 翼裂纹的扩展受到明显的限制, 其产生的力学机制也有明显变化, 受平行于裂隙拉应力和垂直于裂隙的剪应力共同作用, 表现出张剪复合型。具体来说, 翼裂纹可以分为翼裂纹和反翼裂纹(与翼裂纹扩展方向相反), 在本文的试验中, 反翼裂纹仅在较小围压的条件下才会出现, 表现出张性特征, 对裂隙贯通贡献有限。

b) 次生共面裂纹

次生共面裂纹一般出现在较高的围压条件下, 在围压条件下, 其扩展有限。次生共面裂纹起裂时刻相对较晚, 起裂于裂隙两端, 低围压条件下, 仅在裂隙内部端点才会产生, 起裂后稳定扩展, 其扩展方向与裂隙的角度一致。已有的数值分析结果表明次生共面裂纹扩展方向上存在着较大的剪切应力, 因此通常描述为剪切型裂纹。

c) 次生倾斜裂纹

次生倾斜裂纹的产生与裂隙之间的几何关系较为密切, 一般来说, 较高的岩桥倾角, 即较高的叠合率, 有利于次生倾斜裂纹的产生, 次生倾斜裂纹的起裂时刻与次生共面裂纹几乎同时产生。次生倾斜裂纹一般出现在较高围压条件下, 在荷载作用下, 预置裂隙内部端点的翼裂纹向荷载方向扩展, 在岩桥中部形成了一个椭圆形区域, 当翼裂纹扩展到一定长度并停止, 次生倾斜裂纹和次生共面裂纹起裂, 并快速贯通, 且以张性为主。

(2) 裂纹的贯通模式

各种不同几何组合和围压下裂纹的贯通模式见图 4~7。

a) 岩桥倾角 $\beta=0^\circ$ (见图 4)

在两条预置裂隙共面的情况下, 当围压较低时, 两条裂隙内部端点分别形成了翼裂纹, 并各自稳定扩展, 外侧端点则形成共面裂纹, 裂隙之间并未有直接的贯通, 试验的最终破坏是翼裂纹向荷载方向扩展而最终导致试样的破坏, 外侧端点形成的次生共面裂纹扩展有限, 并未对最终试件的贯通有太多贡献。在较高的围压条件下, 共面裂隙的最终贯通是通过两裂隙

内部端点起裂的次生共面裂纹。

b) 岩桥倾角 $\beta=45^\circ$ (见图 5)

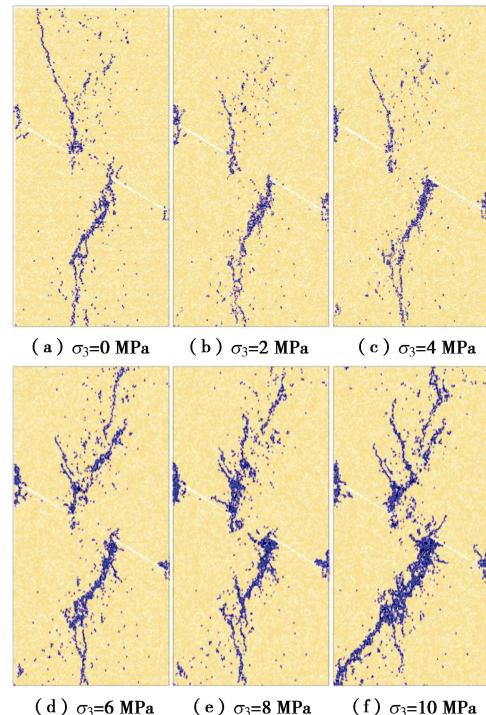


图 4 岩桥角度 $\alpha=0^\circ$ 时裂隙的贯通模式

Fig. 4 Failure modes when $\alpha=0^\circ$

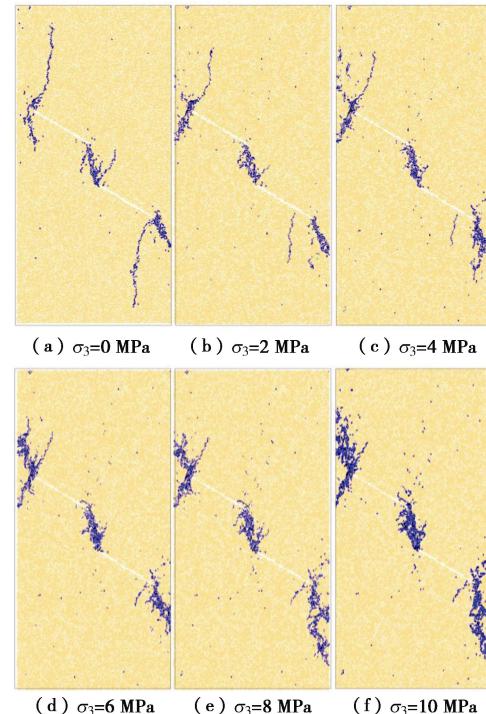


图 5 岩桥角度 $\alpha=45^\circ$ 时裂隙的贯通模式

Fig. 5 Failure modes when $\alpha=45^\circ$

较低围压水平下, 两裂隙的贯通通过次生共面裂纹和次生倾斜裂纹, 同时, 也会在裂隙端点产生翼裂纹, 但未参与贯通。随着围压的增加, 端点处起裂的

翼裂纹的扩展逐渐受到限制, 在围压达到一定水平时(4 MPa), 内部端点起裂的翼裂纹消失, 与此同时, 两裂隙外侧端点开始出现次生共面裂纹, 并随着围压的增大, 次生共面裂纹逐渐转化为次生倾斜裂纹, 因此, 高围压条件下, 两裂隙的贯通主要是通过次生共面裂纹和次生倾斜裂纹, 两种裂纹基本同时刻起裂。

c) 岩桥倾角 $\beta=90^\circ$ (见图 6)

低围压条件下, 岩桥倾角为 90° , 两裂隙的贯通主要是通过次生共面裂纹和翼裂纹, 其中, 次生共面裂隙扩展明显受限, 主要模式为翼裂纹贯通, 翼裂纹的起裂位置距离端点有一定距离, 上支裂隙外侧端点可见反翼裂纹, 并随着围压的增大消失。在较高围压条件下, 翼裂纹的扩展受限, 特别是靠近内侧端点翼裂纹, 在扩展到一定长度后停止扩展, 此时裂隙的贯通模式为次生共面裂纹和次生倾斜裂纹, 次生倾斜裂纹所占比例较大。

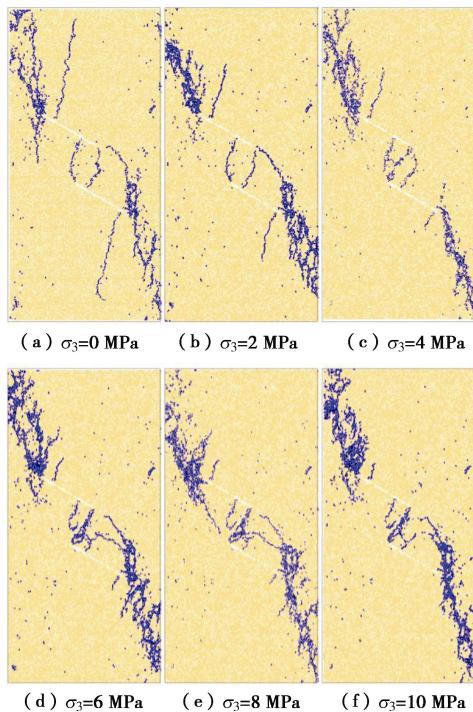


图6 岩桥角度 $\alpha=90^\circ$ 时裂隙的贯通模式

Fig. 6 Failure modes when $\alpha=90^\circ$

d) 岩桥倾角 $\beta=135^\circ$ (见图 7)

在高叠合率低围压条件下, 两裂隙的贯通模式翼裂隙, 从图可见, 两裂隙端点均可见翼裂隙产生, 但是对裂隙贯通起贡献作用的为上支裂隙内侧端点产生的翼裂纹, 除此之外, 裂隙外侧端点均有次生倾斜裂纹产生, 但不参与裂隙的贯通。高围压条件下, 两裂隙贯通模式为次生共面裂纹和次生倾斜裂纹, 次生共面裂纹产生于裂隙的内侧端点, 次生倾斜裂纹产生于外侧端点, 其中, 翼裂纹为主要的贯通模式, 除此之

外, 两裂隙外侧端点同时也产生反翼裂纹, 并顺着最大荷载相反方向发展, 但未参与裂隙的贯通。从总体来说, 岩桥倾角为 135° 时, 试件的总体破坏是通过裂隙间的裂纹扩展和裂隙外侧端点起裂的翼裂纹共同作用的, 这一点与岩桥倾角为 0° 时的情况较为一致, 因此, 在实际中, 这两种岩桥倾角的宏观破坏模式可能一致。

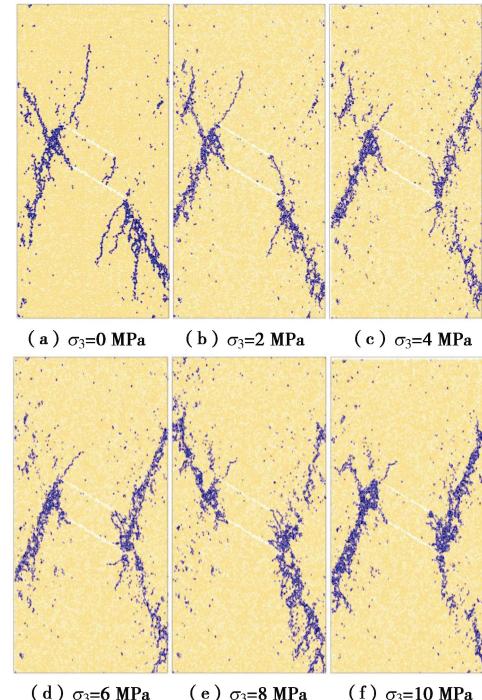


图7 岩桥角度 $\alpha=135^\circ$ 时裂隙的贯通模式

Fig. 7 Failure modes when $\alpha=135^\circ$

(3) 裂纹的贯通应力

综上所述, 裂隙系中最初产生的裂纹为翼裂纹, 然后才会产生次生共面裂纹和次生倾斜裂纹, 因此, 裂纹的启动应力分别从翼裂纹启动和次生共面、次生倾斜裂纹分别阐述, 需要指出的是, 由于次生共面裂纹和次生倾斜裂纹启动时刻基本一致, 因此将两者综合考虑。

a) 翼裂纹的启动应力

通过对试验过程进行观察, 翼裂纹为最先启动的裂纹, 一般在加载应力还处在较低水平时, 便会产生。从图 8 可以看出, 在岩桥倾角一定时, 随着围压的增加, 翼裂纹启动应力增大。岩桥倾角为 45° 时同等围压下, 翼裂纹启动应力最低, 也就是说翼裂纹最容易产生。岩桥倾角在 0° 和 90° 时, 围压越高, 两种组合下的翼裂纹启动应力越接近, 但总体来说, 除去岩桥倾角为 45° 这一组合, 启动应力随岩桥倾角增加而增加。从叠合率角度来说, 叠合率越高, 越不利于翼裂纹的形成, 反之, 越有利于翼裂纹的形成。

b) 次生裂纹的启动应力

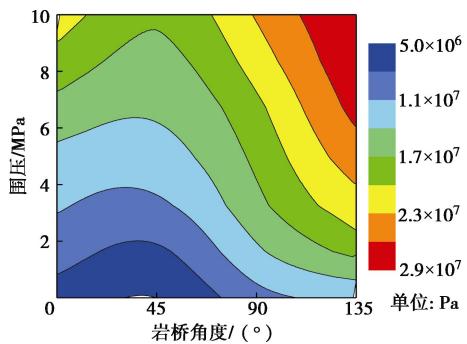


图 8 翼裂纹启动应力与围压及岩桥角度关系

Fig. 8 Wing crack initiation stress as a function of confining stress and ligament angle

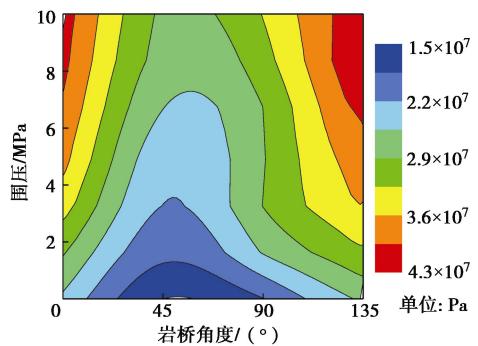


图 9 次生裂纹启动应力与围压及岩桥角度关系

Fig. 9 Secondary inner crack initiation stress as a function of confining stress and ligament angle

由于在较低围压下（小于 6 MPa）共面裂隙（ $\beta=0^\circ$ ）内侧端点无次生裂隙的产生，而在外侧端点起裂次生共面裂纹，次生裂纹的启动应力随岩桥倾角、围压的变化趋势和翼裂纹启动应力的趋势较为一致（图 9），同样，岩桥倾角为 45° ，次生裂纹的启动应力最低，即此种几何条件下，次生裂纹最易产生，同样，低围压下，次生裂纹的启动应力也较低，在较高的围压下，岩桥倾角为 0° 和岩桥倾角为 135° 时，次生裂纹的启动应力基本一致，岩桥倾角为 90° 的情况下，次生裂纹的启动应力比岩桥倾角为 45° 稍高。因此，可以将次生裂纹启动应力做一个简单的划分，岩桥倾角为 0° 和 135° 为次生裂纹较难产生的一个裂隙组合，岩桥倾角为 45° 和 90° 为次生裂纹较易产生的裂隙组合。

c) 次生裂纹的贯通应力

低围压（小于 6 MPa）的共面裂隙（ $\beta=0^\circ$ ）无次生裂隙的产生，最后的贯通破坏是由于翼裂纹向荷载方向扩展而导致的。总体来说，岩桥倾角为 0° 和 135° 时，贯通应力基本一致（图 10），明显高于岩桥倾角为 45° 和 90° 的情况，和前面一样， 45° 时次生裂纹贯通应力最小，最容易贯通。围压越高，次生裂纹贯通应力越高，越不利于次生裂纹的贯通。

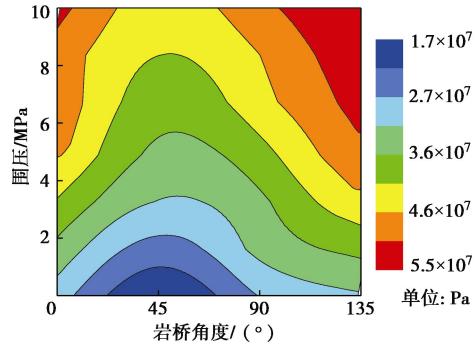


图 10 次生裂纹贯通应力与围压及岩桥角度关系

Fig. 10 Secondary inner crack coalescence stress as a function of confining stress and ligament angle

2 多裂隙的贯通模式分析

在实际的工程中，岩体中的裂隙都是成组分布的，并有类似的几何特征，本文包括很多前人都对双裂隙之间的贯通模式进行了大量的研究^[13-14]，并获取了相应的成果。对于多裂隙贯通模式的，也有较多研究，并在实现了多裂隙岩体的阶梯状滑移破坏，实际上，对于多裂隙岩体的贯通模式研究，不能简单的靠增加裂隙数量来实现，前面对双裂隙的贯通模式、应力进行了深入的研究，本节基于以上结论，对多裂隙岩体贯通模式进行探讨。

首先，建立起三条裂隙，每条裂隙之间的相对几何关系均不一样，对含三条裂隙试件进行单轴试验，试验结果见图 11。

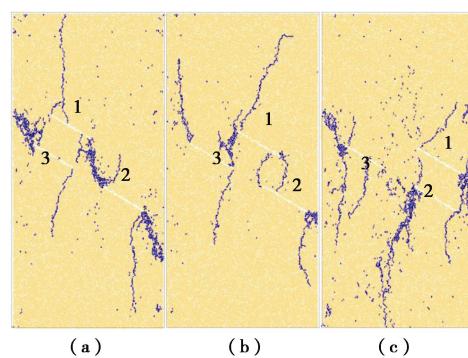


图 11 多裂隙单轴压缩试验贯通模式

Fig. 11 Failure modes of three flaws

以图 11 (a) 来对三裂隙贯通模式进行分析。其中，裂隙 1 与裂隙 2 之间岩桥倾角为 45° ，裂隙 1 与裂隙 3 的岩桥倾角为 135° ，裂隙 2 与裂隙 3 岩桥倾角为 0° 。从图可以看出，3 种组合模式中，只有裂隙 1 和裂隙 2 之间有贯通，贯通模式为次生共面裂纹和次生倾斜裂纹，其他裂隙之间未见明显贯通，仅在裂隙端点产生翼裂纹，但翼裂纹的存在对试件的最终破坏有一定的促进作用。从上节裂隙贯通应力分析中可

以得出, 单轴压缩条件下岩桥倾角为 0° 时, 贯通应力为2.9 MPa, 岩桥倾角为 45° 的贯通应力为1.74 MPa, 岩桥倾角为 135° 的贯通应力为3.1 MPa, 而整体试件的破坏应力为2.5 MPa, 不足以使岩桥倾角为 0° 和 135° 的裂隙产生贯通。图11(b)所示的结果也有类似的规律。其中图11(c)为岩桥倾角为 0° 和 135° , 试件最终的贯通模式为翼裂纹, 由于两种倾角所对应的贯通应力基本一致, 因此所对应的贯通模式同时产生。

由于岩桥的倾角不同, 导致对应的贯通模式不同, 但可以发现, 多裂隙的贯通还是存在如下规律: 在低围压下, 裂隙之间的贯通和试件整体的破坏, 翼裂纹所占比例较大; 同时翼裂纹有较低的启动应力, 并且较为稳定的扩展, 因此更为容易和其他次生裂纹搭接贯通。在高围压下, 岩桥之间的几何关系才会影响贯通模式, 主要以次生共面或者次生倾斜裂纹为主。在多裂隙岩体贯通过程中, 裂纹总是寻找最容易的贯通路径扩展, 即贯通应力最小路径。

3 阶梯状滑移破裂机制研究

3.1 工程实例

研究区位于怒江流域, 属高山深谷地貌, 见图12。



图12 研究斜坡地貌

Fig. 12 Geomorphology of study slope

研究区中缓倾角结构面裂隙较为发育, 通过精细测量, 获得中缓倾角裂隙的分布的空间规律, 主要有以下特征:

(1) 研究区中缓倾角结构面发育占优, 陡倾角结构面发育较少, 中缓倾角以NNE、NE-NEE为主, 左岸优势方位为 $N30^\circ \sim 60^\circ$ E/NW $\angle 15^\circ \sim 40^\circ$, 与河流方向近乎平行或小角度相交。

(2) 中缓倾角裂隙的分布形成了明显的间隔性, 即中缓倾角结构面相对密集段、相对稀疏段相间出现。根据统计, 斜坡一般存在3~4个相对密集的中缓倾角结构面发育段。这些密集带宽度一般在10~20 m; 面密度一般 $10 \sim 18$ 条/ $10 m^2$; 带与带之间, 间距一般在

30~50 m; 面密度一般 $5 \sim 8$ 条/ $10 m^2$, 见图13。

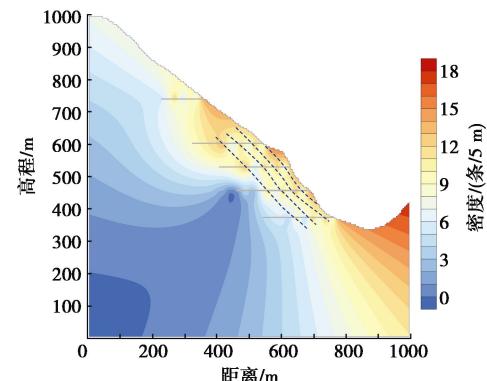


图13 缓倾角裂隙密度

Fig. 13 Density of gentle joints

3.2 数值模拟

采用动态伺服法建立起边坡模型, 并进行浮点颗粒消除。首先对模型进行重力场下的初始运算并平衡, 初始平衡后, 进行颗粒间的参数设定。

当然, 结构面是本次数值计算考虑的重点, 其生成岩体裂隙的方法是对裂隙面两侧颗粒间的黏结重新设置较弱的强度参数, 在地质结构模型的基础上, 根据发育裂隙的基本几何参数便可随机生成结构面。将裂隙面两侧颗粒间的黏结强度设为零, 同时为了获得斜坡破坏过程中的应力, 在坡体内部设置了监测环(图14)。由于初始条件下坡体完整性较好, 未发生明显的变形与破坏迹象, 因此, 本文采用增加重度法来增加坡体的初始应力, 当重度增加到初始值15倍时, 坡体开始破坏。

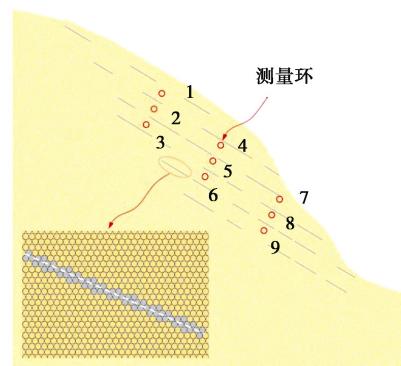


图14 边坡颗粒流模型

Fig. 14 DEM model for slope

3.3 滑移破裂模式

图15为斜坡的破裂演化图, 从图可以看出, 阶梯状滑移破裂面主要有坡体内部预先设置的结构面和在荷载作用下而萌生的裂纹共同组合而形成的。可以发现, 在坡体表层, 主要发育起裂于结构面端点处并向坡外发展的翼裂纹, 并且这些翼裂纹大部分贯通至坡

表；坡体内部主要发育次生裂纹且以次生倾斜裂纹为主。根据前面对贯通模式分析中，得到了应力与贯通模式的对应关系，即低应力区，以翼裂纹为主，中应力区，以翼裂纹+次生裂纹为主，高应力区以次生裂纹为主，对于斜坡而言，低应力区对应着斜坡的表层及坡顶，高应力区对应着坡脚一定的深度范围，本文的实例分析与上述结论基本一致。

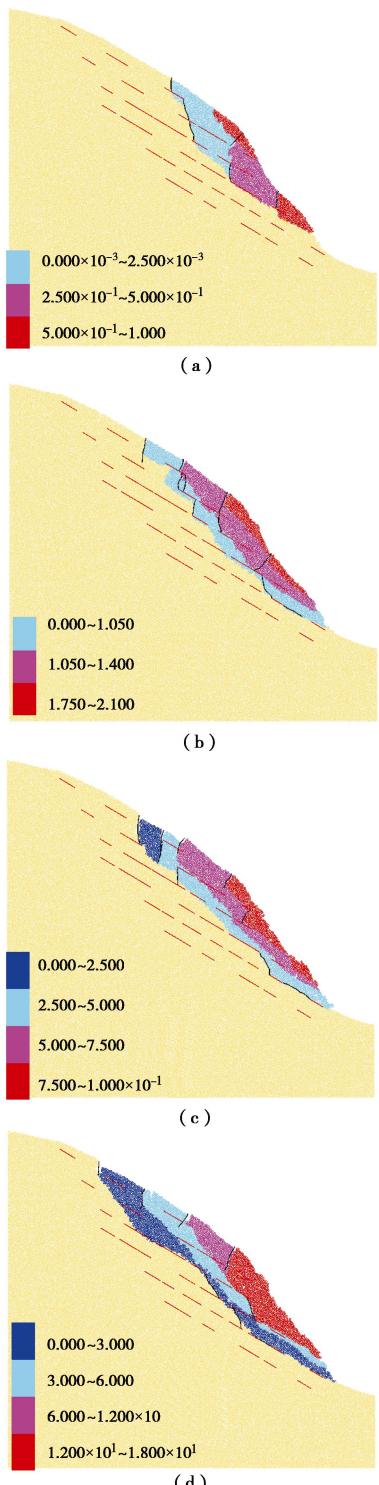


图 15 边坡位移及破裂演化

Fig. 15 Model for step-path failure mechanism of slope

同时，从破裂演化可以发现，阶梯状滑移破裂一般是从坡脚及表层开始并向坡顶及深部逐步发展的，具有渐进特征。图 16 为监测点的应力演化曲线，从应力演化角度同样可以对斜坡的破裂机制及过程做出分析，图中标注点代表应力监测环应力演化过程中的明显转折点，值得注意的是，水平应力和竖向应力转折点出现的时步基本一致，即当竖向平应力达到极大值时，水平应力为极小值，出现了明显的跃增和跌落。

根据应力监测环布置位置，以及应力演化的转折点出现的时步，具体规律为：监测环 7-9 应力转折点出现的时步要早于 1-6 号监测环，同样，对于处于同一高程位置的监测环 7-9，转折点出现的先后顺序为 9-8-7，分别代表了由表及里和由低及高的空间位置。根据前面裂纹贯通模式的分析，认为高围压条件不利于裂纹的扩展，特别是对于翼裂纹的扩展，从应力演化图也可以看出，边坡的底部及深部，特别是边坡底部位置，水平应力跌落幅度较小，其裂纹对应的贯通模式也已次生裂纹为主，翼裂纹较少；而在边坡的顶部及表层，水平应力具有较大的波动，甚至出现了拉应力，有利于翼裂纹的扩展，很好的对应了不同应力条件下各种类型裂纹的发育。同时从应力演化图也可以看出，裂纹贯通后，应力波动较小，进入了稳定阶段。

综上，阶梯状滑移破裂机制有如下特征：①阶梯状滑移破裂面是由原始结构面和岩体破坏而形成的裂纹共同组合而成的，从空间上看，中下部的破裂面主要有原始结构面和次生裂纹组成的，上部主要由原始结构面和翼裂纹共同组成的；②从力学性质来说，阶梯状滑移破裂的形成具有明显的力学区别，即高应力区以剪破坏为主，底应力区以拉破坏为主；③从模式来说，破裂过程具有时空性，破裂从坡体下部及表部开始，并由表及里，由下及上地发展，具有明显的牵引特征；④另外，需要指出的是，由于坡体内的结构面发育较随机，裂纹的发育也较为随机，但是由于裂纹的起裂与扩张及贯通需要一定的应力条件，只有在特定的部位才能形成具有工程意义的裂纹，埋深浅，应力低，裂纹的扩张与贯通受限制，埋深较大，围压大，也不利于裂纹的生产，因此，裂纹总是在一定的范围类起裂与扩张，这些均和应力大小及结构面所处位置共同决定的。解释了阶梯状滑移破裂面发育的深度问题，这些基本条件是阶梯状滑移破裂的基础条件，当上述过程完成，即裂纹贯通，才能进入下一步演化过程。

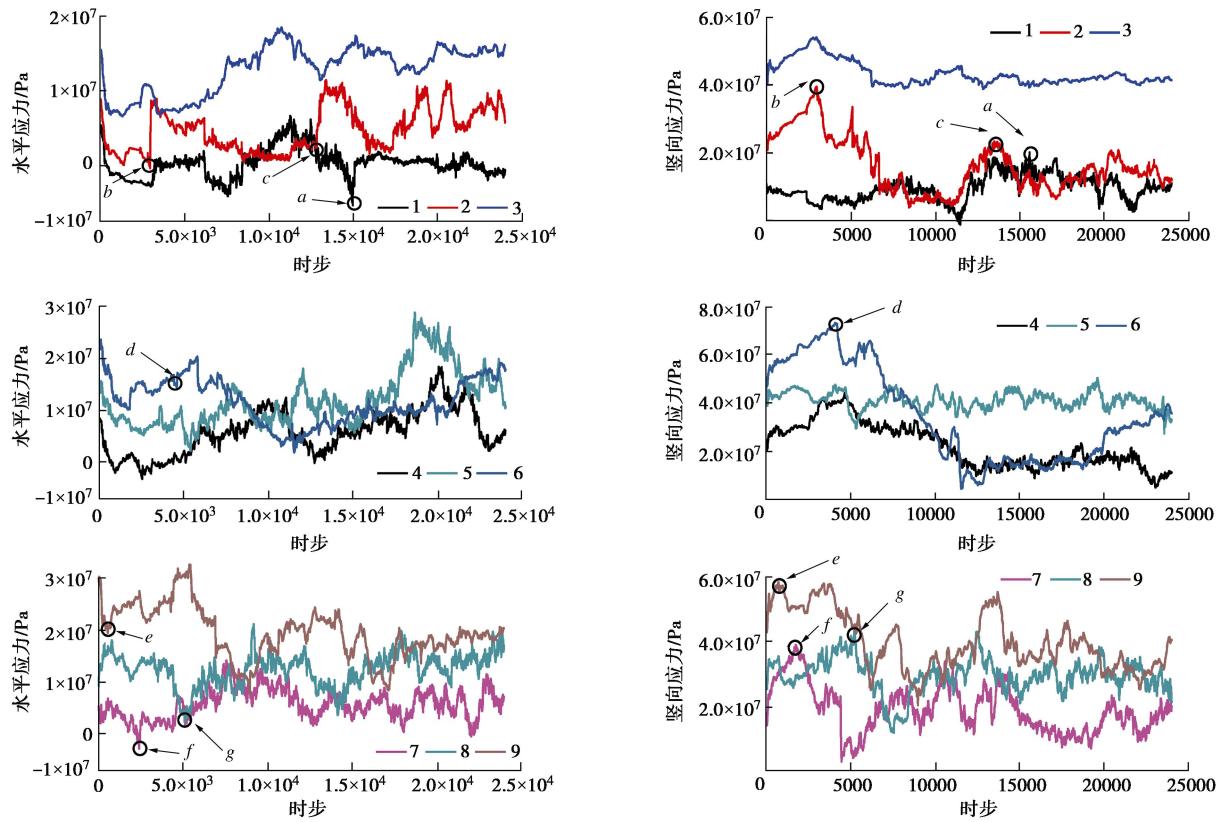


图 16 斜坡应力演化

Fig. 16 Stress evolution of measured circles in slope

4 结 论

在基于裂纹贯通模式的研究基础上, 对岩质斜坡阶梯状滑移破裂机制进行了研究, 获得了如下成果:

(1) 对裂纹贯通的基本模式进行了研究, 双裂隙的主要通过次生共面裂纹、次生倾斜裂纹和翼裂纹贯通; 同时裂纹贯通具有明显的围压效应, 低围压条件下, 贯通主要通过翼裂纹和次生倾斜裂纹, 高围压条件下, 主要通过次生共面裂纹和次生倾斜裂纹。

(2) 翼裂纹的性质为张性, 次生裂纹的力学性质为剪性或张性, 其中次生倾斜裂纹以张性为主, 次生共面裂纹以剪性为主; 同时贯通应力受岩桥倾角影响较大, 岩桥倾角为 45° 时, 裂纹的贯通应力最小, 最容易贯通。

(3) 结合裂纹贯通的基本模式, 对多裂隙的贯通模式进行了研究, 存在如下规律: 在多裂隙岩体贯通过程中, 裂纹总是寻找最容易的贯通路径扩展, 即贯通应力最小路径; 在低围压下, 裂纹的贯通和试件整体的破坏, 翼裂纹所占比例较大; 同时翼裂纹有较低的启动应力, 并且较为稳定的扩展, 因此更为容易和其他次生裂纹搭接贯通。在高围压下, 岩桥之间的几何关系才会影响贯通模式, 主要以次生共面或者次生倾斜裂纹为主。

(4) 阶梯状滑移破裂面是由原始结构面和岩体破坏而形成的裂纹共同组合而成的; 破裂过程具有时空性, 破裂从坡体下部及表部开始, 并由表及里, 由下及上地发展, 具有明显的牵引特征; 破裂的形成具有明显的力学区别, 即高应力区以剪破坏为主, 低应力区以拉破坏为主; 结构面的空间位置和应力场共同决定了破裂面的空间形态。

参 考 文 献:

- [1] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525 - 1544. (HUANG Run-qi. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1525 - 1544. (in Chinese))
- [2] EBERHARDT E, STEAD D, COGGAN J S. Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes - the 1991 Randa rockslide[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004(41): 68 - 87.
- [3] LAJTAI E. Z. Brittle fracture in compression[J]. International Journal of Fracture, 1974, 10(4): 525 - 536.
- [4] PiNG Cao a, TAOYING Liua b, CHENGZHI Pu a b, et al. Crack propagation and coalescence of brittle rock-like

- specimens with pre-existing cracks in compression[J]. *Engineering Geology*, 2015, **187**: 113 – 121.
- [5] WONG L, EINSTEIN H. Crack coalescence in molded gypsum and carrara marble: part 1 macroscopic observations and interpretation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2008, **42**(3): 475 – 511.
- [6] 朱维申, 陈卫忠, 申晋. 雁形裂纹扩展的模型试验及断裂力学机制研究[J]. *固体力学学报*, 1998(4): 355 – 360. (ZHU Wei-shen, CHEN Wei-zhong, SHEN Jin. Simulation experiment and fracture mechanism study on propagation of echelon pattern cracks[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1998(4): 355 – 360. (in Chinese))
- [7] 付金伟, 朱维申, 王向刚, 等. 节理岩体裂隙扩展过程一种新改进的弹脆性模拟方法及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(10): 2088 – 2095. (FU Jin-wei, ZHU Wei-shen, WANG Xiang-gang, et al. An improved elastic-brittle simulation method of crack propagation process in jointed rock mass and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(10): 2088 – 2095. (in Chinese))
- [8] LUIS Arnaldo Mejía Camones, EURÍPEDES do Amaral Vargas Jr, RODRIGO Peluci de Figueiredo, et al. Application of the discrete element method for modeling of rock crack propagation and coalescence in the step-path failure mechanism[J]. *Engineering Geology*, 2013, **153**: 80 – 94.
- [9] 岑夺丰, 黄达, 黄润秋. 岩质边坡断续裂隙阶梯状滑移模式及稳定性计算[J]. *岩土工程学报*, 2016, **36**(4): 695 – 706. (CEN Duo-feng, HUANG Da, HUANG Run-qiu. Step-path failure mode and stability calculation of jointed rock slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **36**(4): 695 – 706. (in Chinese))
- [10] SAGONG M, BOBET A. Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, **39**: 229 – 241.
- [11] ZHOU X P, CHENG H, FENG Y F. An experimental study of crack coalescence behaviour in rock-like materials containing multiple flaws under uniaxial compression[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2014, **47**: 1961 – 1986.
- [12] WANG C, TANNANT D D, LILLY P A. Numerical analysis of the stability of heavily jointed rock slopes using PFC^{2D}[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, **40**(3): 415 – 424.
- [13] ZHOU X P, CHENG H, FENG Y F. An experimental study of crack coalescence behaviour in rock-like materials containing multiple flaws under uniaxial compression[J]. *Rock Mech Rock Eng*, 2014, **47**: 1961 – 1986.
- [14] WONGA R H C, CHAUA K T, TANGB C A, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws: part I experimental approach[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2001, **38**: 909 – 924.

2017 年岩土工程西湖论坛: 岩土工程测试技术 (杭州·一号通知)

随着我国基本建设工程的进一步推进, 岩土工程测试面临着更严峻的挑战, 对相关测试技术也有着更高的要求。为顺应国家、社会需求, 探讨解决岩土工程测试技术面临的重大问题, 拟定于 2017 年 10 月在浙江杭州召开“2017 年岩土工程西湖论坛: 岩土工程测试技术”学术会议, 就岩土工程测试技术中的相关热点问题和研究进展进行讨论, 邀请各有关单位、学者和工程技术人员踊跃参加。

会议主题: 岩土工程测试理论、技术新进展。

主办单位: 中国工程院土木、水利与建筑工程学部; 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会; 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心。

组委会联系方式: 陆水琴、王笑笑: 电话 0571-88208775, 邮箱 lusq87@163.com; wangxiuxiu713@163.com, 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心网址: <http://www.zjdxyt.com>。

(会议组委会 供稿)