

反倾层状斜坡破裂面演化特征离心机模型试验与数值模拟

穆成林, 张御阳, 裴向军, 马浩, 周昕, 李林燕

Centrifuge model test and numerical simulation on evolution characteristics of fracture surface of the anti-dipped layered slope

MU Chenglin, ZHANG Yuyang, PEI Xiangjun, MA Hao, ZHOU Xin, and LI Linyan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210015>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于离心机和数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析

An analysis of the deformation characteristics of soft-hard interbedded anti-tilting layered rock slope based on centrifuge and numerical simulation

李彦奇, 黄达, 孟秋杰 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 141-150

基于黏聚力裂缝模型的反倾层状岩质边坡倾倒破坏模拟

A numerical study of the toppling failure of an anti-dip layered rock slope based on a cohesive crack model

马文著, 徐衍, 李晓雷, 陈敏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 150-160

基于离心试验的反倾层状岩质边坡内非贯通性裂缝变形特性分析

An analysis of non-penetration cracks in anti-dip rock slope based on centrifugal test

杨豪, 魏玉峰, 张御阳, 唐珏凌, 何宁 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 152-161

缓倾层状结构高陡采动斜坡变形特征研究

Deformation characteristics of a high and steep mining slope with gently-inclined layered structure

赵建军, 王子贤, 严浩元, 赖琪毅, 余建乐, 李清森, 朱要强, 董建辉 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 174-183

含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟

Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting

张科, 刘享华, 杨红宣, 范文臣 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 79-79

东南沿海地区玄武岩残积土雨水运移特征及滑坡失稳数值模拟

Rainfall infiltration characteristics and numerical simulation of slope instability in the basalt residual soil in the coastal area of Southeast China

张晨阳, 张泰丽, 张明, 孙强, 伍剑波, 王赫生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 42-50



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210015

穆成林, 张御阳, 裴向军, 等. 反倾层状斜坡破裂面演化特征离心机模型试验与数值模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 135-144.

MU Chenglin, ZHANG Yuyang, PEI Xiangjun, et al. Centrifuge model test and numerical simulation on evolution characteristics of fracture surface of the anti-dipped layered slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 135-144.

反倾层状斜坡破裂面演化特征离心机模型 试验与数值模拟

穆成林¹, 张御阳², 裴向军³, 马 浩⁴, 周 昕¹, 李林燕¹

(1. 四川师范大学工学院, 四川 成都 610101; 2. 四川省地震局, 四川 成都 610044;

3. 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;

4. 四川省兴冶岩土工程检测有限责任公司, 四川 成都 610084)

摘要: 破裂面形成演化特征是反倾层状斜坡研究的重点之一, 也是稳定性评价和工程设计治理的基础。利用室内大型土工离心机, 获取坡体受力和变形参数, 同时结合 PFC 数值模拟成果, 展示斜坡破裂面的形成演化过程和特征, 并讨论破裂面的形成机理。结果表明: (1) 首先在坡体内部产生压剪裂隙, 随后向中下部扩展, 坡体压剪分区; (2) 裂隙向中上部发展, 破裂面初步形成, 深部坡体发生弯折; (3) 浅层裂隙完全贯通, 形成由坡顶至坡脚的完整破裂面 I, 内部潜在破裂面 (II、III) 中上部近似平行坡面, 下部合并后至坡脚, 而稳定受压区域与弯折区分界潜在破裂面 IV 呈阶梯形, 同时浅层存在 3 条次级破裂面; (4) 斜坡的变形破坏由于重力作用, 使得岩层差异性受力, 在压剪、拉剪及弯折作用下, 裂隙由预制裂隙尖端萌生、扩展, 最终贯通形成破裂面。重力是内在原因, 而坡体结构特征是基础条件。研究成果可以为反倾层状斜坡进一步深入研究和实践提供参考。

关键词: 反倾层状斜坡; 破裂面; 演化特征; 物理模型试验; 数值模拟

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)01-0135-10

Centrifuge model test and numerical simulation on evolution characteristics of fracture surface of the anti-dipped layered slope

MU Chenglin¹, ZHANG Yuyang², PEI Xiangjun³, MA Hao⁴, ZHOU Xin¹, LI Linyan¹

(1. College of Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610101, China; 2. Sichuan

Earthquake Administration, Chengdu, Sichuan 610044, China; 3. State Key Laboratory of Geohazard

Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059,

China; 4. Sichuan Xingye Geotechnical Engineering Testing Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610084, China)

Abstract: The formation and evolution characteristics of fracture surface is one of the key points in anti-inclined layered slope research, and it is also the basis of stability evaluation as well as engineering design and treatment. In this study, the stress and deformation parameters of the slope are obtained by using the indoor large-scale

收稿日期: 2022-10-09; 修订日期: 2023-08-04

投稿网址: www.swdggcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41902296)

第一作者: 穆成林 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事工程地质与环境地质的教学与科研。E-mail: 283390229@qq.com

通讯作者: 张御阳 (1988—), 男, 博士, 工程师, 主要从事地震地质灾害研究。E-mail: 158552398@qq.com

geotechnical centrifuge. At the same time, combined with the PFC numerical simulation results, the formation and evolution process and characteristics of the slope fracture surface are displayed: firstly, the compression shear crack is generated and extends to the middle and lower part of the slope, and the compression shear zone of the slope is divided; secondly, the developments of cracks toward to the middle and upper part of the slope, and with the initial formation of fracture surface, the deep slope body is bent; finally, the shallow cracks are completely connected to form a complete fracture surface I from the top to the foot of the slope. The middle and upper parts of the internal potential fracture surface (II, III) are approximately parallel to the slope surface, and the lower parts are merged gradually at the foot of the slope. While the potential fracture surface IV at the boundary between the stable compression area and the bending area is stepped. At the same time, there are three secondary fracture surfaces in the shallow layer of the slope. The formation mechanism of the fracture surface is revealed that the deformation and failure of the slope causes the differential stress of the rock stratum due to the action of gravity. Under the action of compression shear, tension shear and bending, the crack initiates and expands from the tip of the prefabricated crack, and finally penetrates to form the fracture surface. Therefore, gravity is the internal reason, and the structural characteristics of slope are the basic conditions. The research results provide a basis for further research and practice of anti-inclined layered slope.

Keywords: anti-dipped layered slope; fracture surface; evolution characteristic; centrifuge model test; crack gravity

反倾岩质斜坡是工程建设中常见一种岩层倾向与临空面相反的地质结构体。近年来在西部开发建设中发现大量深层变形倾倒斜坡,深度可达 220~300 m^[1-4]。反倾斜坡按传统工程地质观点评判通常稳定性较好,然而一旦失稳破坏,其规模和危害性巨大,如巫峡龚家坊滑坡等^[1,5]。反倾岩质边坡的破裂面是决定失稳破坏规模、稳定性以及失稳破坏模式的主要控制性因素,确定破裂面形态及演化特征是研究反倾岩质边坡的基础内容且尤为重要。黄达等^[6]以龙滩水电站左岸边坡为原型,通过两种材料模型的离心试验得出反倾边坡破裂面为双折线型;郑达等^[7-8]通过离心机试验探究反倾边坡深层岩体破坏及破裂面由坡脚至下而上渐进贯通形成的模式及特征;姚晔等^[9]通过底摩擦试验证实碎裂反倾岩质边坡以拉裂-倾倒破坏为主破坏的坡体破裂面呈阶梯状,以弯曲拉裂破坏的坡体破裂面多呈不规则折线状;杨豪等^[10]基于离心试验的反倾层状岩质边坡内非贯通性裂缝变形特性分析,展示破裂面的演化过程;吴昊等^[11]通过试验证明了破裂面有坡脚扩展贯通至坡顶,同时可通过计算位移矢量方向确定破裂面位置;蔡国军等^[12]运用离散元软件 3DEC,模拟动力条件下斜坡的变形失稳过程,研究不同地震波输入工况条件下坡体表面动力响应差异。李彦奇等^[13]通过室内离心机试验及数值模拟,获取软硬互层反倾斜坡变形破坏特征及破裂面演化过程;李

任杰等^[14]利用地摩擦实验证实不同倾角的反倾边坡失稳模式及破裂面形成的形态,从而确定失稳范围。

反倾斜坡的破裂面是在长期的地质演化过程中形成,其本质是斜坡岩体裂纹或裂隙的萌生、扩展及贯通,因此,裂隙的演化特征是破裂面研究的基础。目前关于岩体裂纹或裂隙的研究主要是室内试验和数值模拟。孟凡非等^[15]基于颗粒离散元模拟了薄层岩在不同条件下的裂隙扩展规律;张波等^[16]对含预置 X 型裂隙的类岩石试件进行了水力压裂实验,并结合 Abaqus 有限元数值分析天然岩体中的 X 型裂隙对水力裂缝扩展规律;武东阳等^[17]制作含有不同倾角裂隙试样,对裂纹的演化发展进行细化分析,同时在采用 PFC3D 进一步研究不同锚固角对裂纹扩展的影响;Kolari^[18]基于在压缩和张拉条件下含有预制裂纹试样的翼裂纹的扩展演化规律;李学华等^[19]通过单轴压缩和 PFC 模拟研究含有节理和孔洞岩体裂隙的萌生、扩展规律和特征;张艳博等^[20]通过 CT 图像堆栈矢量化处理构建岩石三维裂隙模型,并对裂纹结构特征参数进行统计分析,定量化表征岩石破裂过程中裂纹扩展情况;王辉等^[21]基于巴西劈裂试验获取含预制裂隙黑色页岩裂纹扩展过程及宏观破坏模式;周子涵等^[22]对含平行偏置裂隙的类岩石试件进行卸荷试验,研究边坡岩体在开挖扰动下内部节理裂隙的细观扩展规律。

综上所述,关于反倾层状斜坡研究成果丰富,针

对反倾斜坡变形破坏特征及机理,更多的是从宏观结果上描述破裂面最终形态,对破裂面过程演化特征的细观刻画研究较少;而针对岩体裂隙试验中,通常是预制含有裂隙试样,以常规力学试验探究裂纹演化特征,而以实际斜坡坡体结构为基础,考虑斜坡实际变形过程中岩体裂隙演化特征的研究较欠缺。在前人研究的基础上,建立反倾层状斜坡离心机试验模型,结合 PFC 数值模拟结果对比分析,通过重现斜坡变形破坏,真实记录并展示岩体裂隙萌生、扩展及贯通,综合分析反倾层状斜坡破裂面的演化特征,揭示斜坡变形破坏机理,为工程的稳定性评价、灾害预警及工程设计等提供科学的基础支撑。

1 离心模型试验设计

1.1 原型斜坡地质概述

研究对象为星光三组反倾层状斜坡,位于溪洛渡水电站库区内,斜坡高约 120 m,宽约 84 m。斜坡坡面较为平整,平均坡度 55°~63°,坡体三面临空,呈孤立山脊。地层岩性主要为白云岩,产状为:70°~90°∠50°~70°,如图 1 所示。斜坡内部结构面以Ⅳ和Ⅴ级结构面为主。Ⅳ级结构面包括构造裂隙和卸荷裂隙,其倾角发育表现为陡倾与缓裂隙交错发育展布,延伸较长,一般大于 20 m,包括构造裂隙和平行岸坡的中陡倾卸荷裂隙,优势方位为 35°∠57°,其次为 180°∠66°^[4-5]。

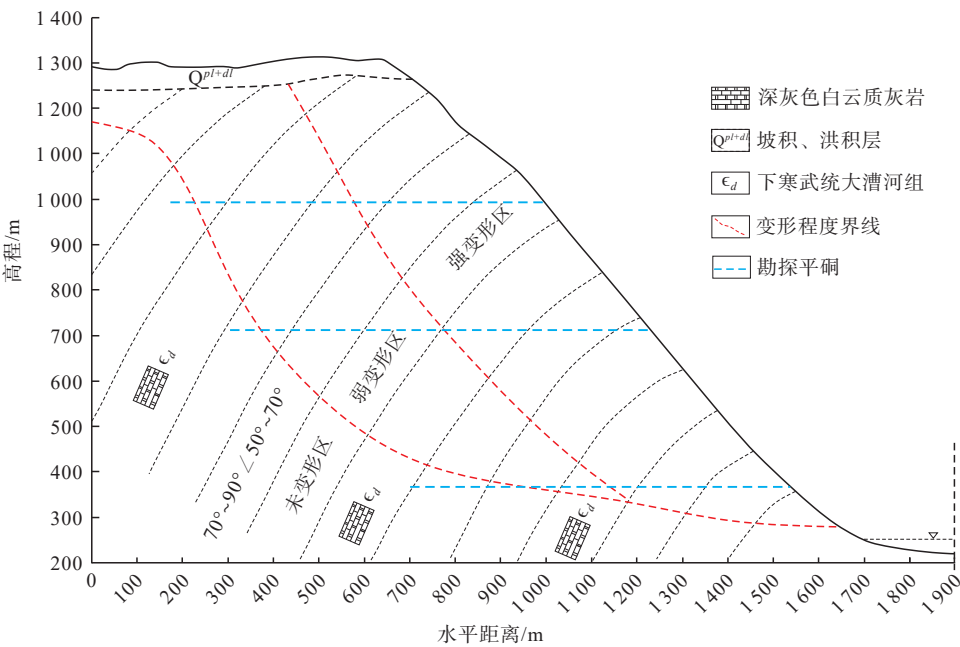


图 1 反倾斜坡工程地质剖面图 (修改自文献 [4] 及文献 [5])

Fig. 1 Engineering geological profile of the reverse sloping slope (modified after Ref. [4] and Ref.[5])

1.2 试验设备

研究所土工离心试验机设备为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的 TLJ-500 型,见图 2。该离心机有效运行半径为 4.5 m,模型箱最大容量为 500 g·t,加速度最大可以达到 250 g,选用内部尺寸为 1 000 mm×600 mm×800 mm 的试验模型箱。

1.3 试验参数

模型相似条件是指现场原边坡模型与室内制作边坡模型的物理相似,包括了几何尺寸相似和物理力学性质相似^[5-7]。综合考虑原边坡模型实际高度和坡体结构特征等因素,建立试验模型采用几何相似比为

1 : 120。根据工程地质概化的方法和离心机工作原理^[5-6],室内离心机试验模型制作为长×宽×高=1.0 m×0.4 m×0.7 m。

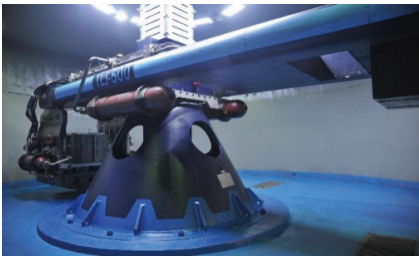


图 2 TLJ-500 土工离心机

Fig. 2 TLJ-500 geotechnical centrifuge

参考前人研究试验^[5-7],选用材料质量配比为:水泥:水:石英砂:重晶石粉=1:0.75:1:0.5作为岩板材料。制作过程见图2。根据相似理论参数取值原则,其他相关试验参数取值见表1。

表 1 离心机模型试验主要比例关系
Table 1 Major parameters of the centrifuge model tests

物理量	单位符号	相似比符号	相似比关系
几何尺寸	L	C_l	1 : 120
密度	ρ	C_ρ	1 : 1
应力	σ	C_σ	1 : 1
应变	ε	C_ε	1 : 1
位移	u	C_u	1 : 120
加速度	α	C_a	120 : 1
泊松比	μ	C_μ	1 : 1
弹性模量	E	C_E	1 : 1
黏聚力	c	C_c	1 : 1
内摩擦角	φ	C_φ	1 : 1

经过反复调配试验,最终使得模型材料力学性质与原型边坡岩体基本一致(表2)。在此基础上调整试验材料的内摩擦角和黏聚力,使之满足试验要求。

表 2 原型和相似材料物理力学参数
Table 2 Physico-mechanical parameters of prototypes and similar materials

指标	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa
原型	2.41	1.161	36.19
模型	2.40	1.592	36.16

1.4 模型设计及加载方案

按照材料配比制作试验板块,岩层厚 40 mm。然后进行裂隙的预制,单层设置陡缓两组预制裂隙,倾角分别为 80°、15°,宽 1.0 mm,长 15 mm,约为岩板宽度的 1/3,间距均为 80 mm,试验取 2 倍于岩板宽度。为了获取岩板受力特征,在 8 号、13 号、15 号、18 号岩板上表面预制陡裂隙处,由浅至深分别布置 12 个 THY 大塑性应变计;在下表面预制缓裂隙处,由浅至深分别布置 12 个 BQ 通用应变计。最终制作成坡度为 60°,岩层倾角为反倾 60°斜坡模型,见图 3、图 4。最后检测所有线路以及试验技术准备。试验加速度采用梯形分 6 次匀速加载 20 g,每级稳定时间不少于 5 min。

2 试验结果

2.1 裂隙应变分析

离心机试验过程中,全程记录预制裂隙的应变特征。在设置的 24 个应变片中,H8、D9 应变计未获取

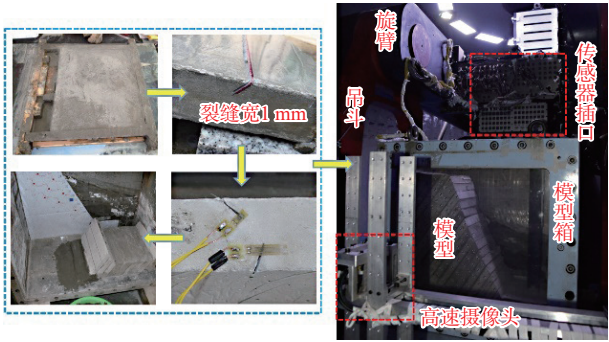


图 3 模型制作及监测布置

Fig. 3 The physical model for slope

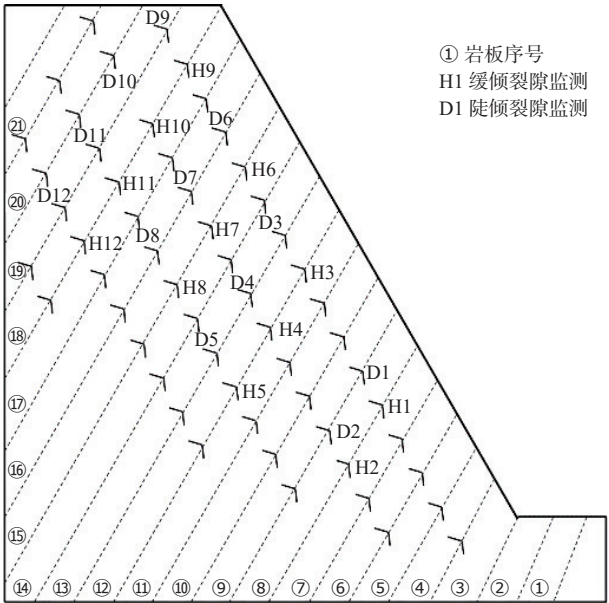


图 4 应变监测布置图

Fig. 4 The arrange blueprint of strain monitoring

有效数据,其他应变计的有效数据整理后,如图5所示。

8号板的陡倾裂隙D1应变计在的第一级加载起始被拉断,无后期数据;D2应变计在的第一级加载期间稳定受压,第二至三级加载受压逐渐增大,期间存在波动现象;第五级加载时陡然转变为受拉状态,第六级加载后拉压应力大幅增加后趋于稳定。H1第一级加载处于受压状态,直至压断;H2整个加载过程处于波动受压状态,最终趋于稳定。8号岩板下表面上覆岩层压缩作用,处于持续受压状态。

12号板D3应变计自始至终处于受拉状态,且状态稳定;D4应变计在的第一级加载过程中受压,变形调整后基本稳定,第二级加载后逐步受拉,随后陡变为稳定受压。D5应变计前期小幅度受压,第三级陡变受拉,且存在瞬间大幅度突变现象。H3加载初始即出现大幅度拉应变而断裂;H4初始阶段受拉,在H3

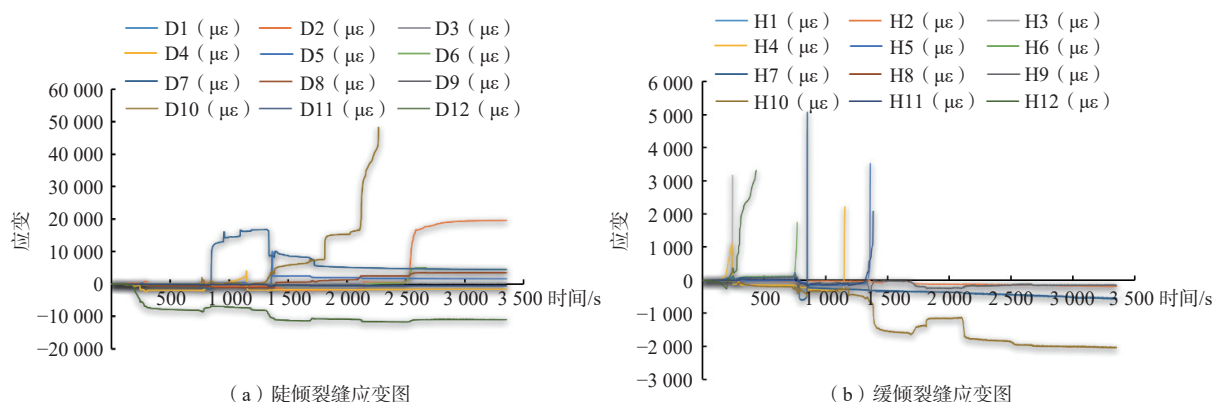


图5 模型斜坡位移变形图

Fig. 5 Displacement and deformation measurements of the model slope

被拉断即突然转为受压状态,在第二加载阶段受压且陡变受拉后断裂;H5初始处于小幅受拉状态,随后第二加载阶段小幅受压状态,第三加载阶段开始后陡变为受拉而断裂。

15号板D6应变计前期处于微小受拉,随后为小幅度受压,最终阶段为转变为受拉状态;D7应变计第一加载阶段受压,第二加载阶段转变了陡增受拉,其后阶段逐步降低受拉状态并保持稳定;D8应变计由始至终呈现阶梯形增加受拉状态并最终保持稳定。H6、H7应变计均在第一加载阶段小幅度受拉,在第二加载阶段H6应变计受拉陡增且随即拉断;H7应变计则首先受压随即陡增受拉,岩板变形后陡降到微小受压状态。

18号板D10应变计在第一加载阶段微小受拉,在第二加载阶段末期突变成阶梯状增加受拉至断裂;D11应变计全程微小受拉;D12应变计则全程呈现较小起伏的受压。H9应变计在第一加载阶段为微小受拉,其后则转为微小受压;H10应变计在前两加载阶段受压,第三、第四加载阶段出现陡变增大或减小特征,然后保持稳定受压;H11应变计在第一、第二加载阶段先受微小受拉后转变为微小受压,第三加载阶段陡变受拉至断裂;H12应变计第一阶段陡变受拉至断裂。

2.2 斜坡演化特征分析

通过裂隙发育及坡体变形破坏特征结合上述应变计数据分析,将斜坡变形破坏分为4个演化过程。

(1)岩板差异受力,裂隙萌生。在试验离心力加速初期,斜坡岩板重力增大。浅层坡体的岩板上层面以受拉为主,下层面以受压为主。深部坡体整体受压,且由于岩板存在相对位移趋势,由于岩板间摩擦力较大,使得岩板上层面受压,下层面受拉为主。深部岩板预

制裂隙尖端萌生裂纹,坡体深部缓倾裂隙以向下的“弧形”或近似弧形向上延伸,在陡裂隙尖端近直线贯通,张开度下宽上窄;坡体浅部预制陡倾裂隙尖端萌生拉伸-剪切裂纹,以直线型或折线型延伸至缓倾裂隙尖端。坡体整体压密,坡顶存在下沉现象。

(2)裂隙扩展,坡体压剪分区。随着离心加速度的增加,斜坡岩板受力增大,萌生裂隙进一步延伸、扩展至贯通,劣化坡体,降低岩层完整性,形成受压剪分区。此过程中,浅层岩体由于临空条件好,产生剪切错动,尤其是坡脚裂隙发育较多;中部岩体则以压剪为主,形成较多弯折裂隙;深部岩体则主要受压,裂隙发育较少。

(3)坡体反向弯折,破裂面初步形成。浅层岩体裂隙快速延伸、贯通,初步形成浅层的破裂面;深部岩板预制裂隙有序带状断续贯通,基本形成潜在破裂面。坡体内部形成剪切-弯折阶梯形弯折破裂面,破裂面以上为弯折变形区,以下为稳定受压区,见图6。与此同时,坡体变形明显,顶部下沉及坡脚处剪切位移均明显。

(4)多级破裂面贯通,坡体变形破坏。浅层裂隙由坡顶至坡脚近似平行坡面贯通,虽然没有直接失稳破坏,但破裂面完成形成;坡体内部的弯折区内形成3条潜在破裂面,其中主要由拉伸-剪切形成的潜在破裂面(Ⅱ、Ⅲ)在坡体中上部近似平行坡面,中下部则贯通为一条破裂面至坡脚;深部剪切-弯折破裂面Ⅳ相对位移明显,且中部岩板存在反倾架空现象。斜坡浅层自上而下形成3条次级破裂面,且剪出口裂隙发育,位移明显。

3 数值模拟

离散颗粒流PFC常用来模拟分析岩体等非连续

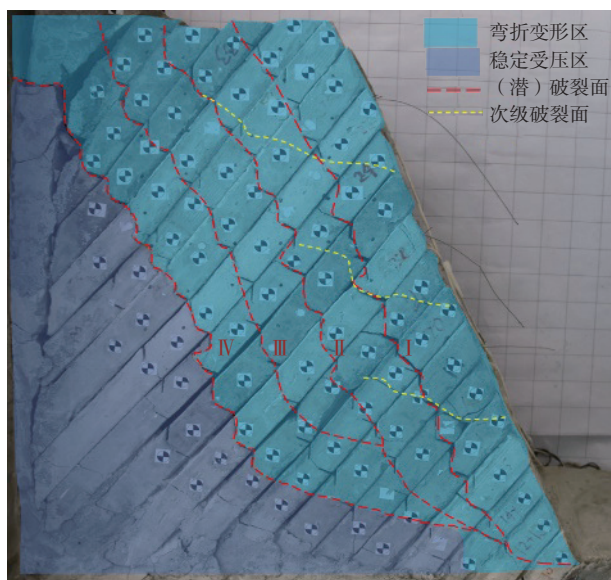


图 6 斜坡模型破裂面分布图

Fig. 6 The distribution of fracture surfaces of the slope model

介质的破断,展示变形破坏模式及裂隙演化过程及机理。本次采用 PFC2D 进行反倾斜坡层状岩体裂隙的萌生、扩展、贯通以及最终破裂面的生成的演化全过程。

3.1 模型建立

建立数值模型首先进行细观参数的标定。以室内试验获取参数为基本可靠依据,模型计算则采用“试错法”反复进行调整,最终使得模拟结果与实际值接近,达到合理的参数值为止。颗粒材料接触采用线性平行接触模型,其微观接触参数及宏观力学参数对比,见表 3。

表 3 数值模型细观力学参数
Table 3 Microscopic mechanical parameters of the numerical model

类别	参数名称	参数值
颗粒参数	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 400
	最小颗粒半径/mm	0.30
	颗粒体模量/GPa	1.428
	法向刚度/切向刚度	1.52
	摩擦系数	0.83
	颗粒阻尼	0.50
黏结参数	径比	1.55
	平行黏结模量/GPa	1.428
	法向刚度/切向刚度	1.52
	平行黏结刚度比	1.21

为了验证表 3 取值合理性,将数值模拟结果与室内试验获取试验数据进行对比(图 7)。整试样所测得抗压强度为 37.46 MPa,数值模拟得到抗压强度为

37.27 MPa,两者数值相近,且演变曲线趋势相似,主要呈现弹性变形,其中室内曲线呈下凹型,其原因为存在裂隙压密阶段,故应变相对较大,该现象不影响模拟结果。此外,剪切强度参数内摩擦角设置为 0。综合分析,表 3 所取参数及模型建立合理(图 8)。

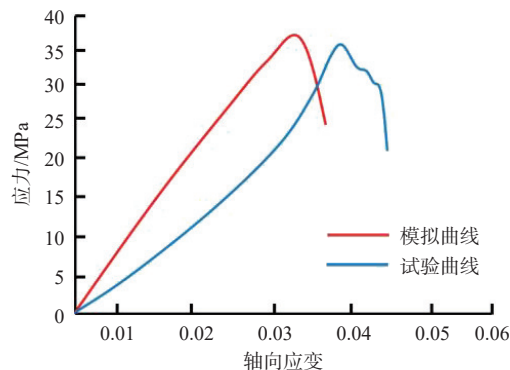


图 7 数值模拟与物理实验应力-应变曲线对比

Fig. 7 The stress-strain curve comparison between numerical simulation and physical experiment

数值模拟加载时间与离心机加载时间相拟合,设定时间步长为 0.1 s,每一级加载为 6 000 步,即时长 600 s。

3.2 裂隙演化特征

反倾边坡破裂面整个宏观演化过程可分为“深部衍生→中部向下部衍生扩展→中部向上部衍生扩展→裂纹扩展贯通形成破裂面”4个阶段,如图 8 所示。离心机试验和 PFC 数值模拟有效结合,准确展示了破裂面的细观演化主要是裂隙不同形式的衍生、扩展及贯通(图 9)。

第 1 阶段深部衍生。坡体深部岩板下层面缓倾裂隙端部萌生起裂形成裂纹,存在 3 种基本形式:第 1 种形式是由缓倾裂隙尖端萌生裂纹,并最终形成次生共面剪切裂隙,贯穿单层岩板,见图 9(a);第 2 种形式是在离坡面近范围内,缓倾裂隙尖端首先产生拉伸翼裂纹向下扩展,然后在陡倾裂隙尖端产生向下扩展翼裂纹与翼裂纹连接贯通中部衍生次生裂纹,随后两条翼裂纹在中部分别萌生次级裂纹,使得坡体岩层进一步劣化,见图 9(b);第 3 种形式是由缓倾裂隙尖端首先萌生翼裂纹向上延伸扩展直至与陡倾裂隙贯通,并在陡倾裂隙尖端萌生微细裂纹,扩展方向无明显规律,但对岩板的劣化存在明显影响,见图 9(c)。

第 2 阶段中部向下部衍生扩展。裂纹演化存在 3 种典型类型:第 1 种首先由陡倾裂隙尖端萌生次生剪切裂纹并扩展至层面,与层面大角度相交,其后在

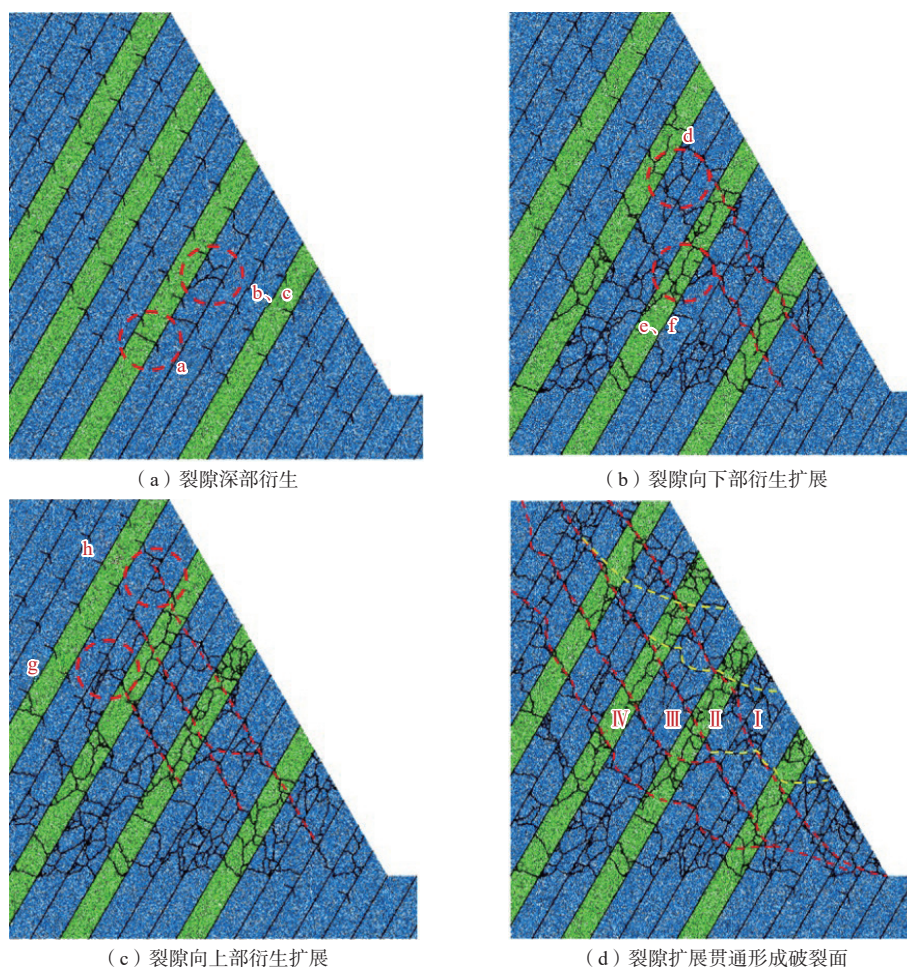


图 8 边坡破裂面演化特征图 (PFC)

Fig. 8 The evolution characteristics of slope fracture surface (PFC)

注: 图中红色的 a—h 分别对应图 9 的各个子图。

次生裂纹中部衍生裂纹, 通常与缓倾角裂隙贯通, 见图 9(d); 第 2 种类型为由陡倾裂隙尖端萌生次生裂纹直接与缓倾裂隙贯通, 然后在次生裂隙中部萌生向下的翼裂隙与预制缓倾裂隙贯通, 见图 9(e); 第 3 种类型由陡倾裂隙尖端萌生拉剪以裂隙, 向下延伸与缓倾裂隙贯通, 然后继续萌生次裂隙, 劣化岩板, 见图 9(f)。

第 3 阶段中部向上部衍生扩展。裂隙萌生主要是 2 种类型: 第 1 种类型为首先由缓倾裂隙尖端萌生共剪裂隙, 发展一定程度后, 再共剪裂隙尖端再次萌生次生倾斜裂隙与预制陡倾裂隙贯通, 见图 9(g); 第 2 种类型为预制陡倾裂隙尖端萌生次生倾斜裂隙, 预制缓倾裂隙尖端萌生倾斜次生裂隙以及拉剪翼裂隙, 其中倾斜次生裂隙与陡倾裂隙以及其次生裂隙贯通, 见图 9(h)。

第 4 阶段裂隙扩展贯通形成破裂面。此阶段断续裂隙延伸、贯通, 在斜坡浅部形成完全贯通的破裂面 I,

在坡体内部裂隙贯通形成潜在破裂面 (II、III、IV), 同时浅层形成 3 条次级破裂面, 见图 8(d)。

4 演化过程及机理综合分析

离心机物理模型试验演示了反倾层状斜坡在重力的作用下的变形特征, 分析了坡体受力特征; PFC 数值模拟了在重力作用下, 坡体内部裂隙的萌生、延伸及贯通。离心机试验斜坡的变形演化分为 4 个变形过程, 与之相对应是 PFC 数值模拟的 4 个裂隙演化阶段, 两者具有一致性, 对研究分析破裂面的演化过程具有互补性, 两者综合分析有利于揭示斜坡破裂面演化过程和机理:

(1) 坡体内部产生压剪切裂纹。此阶段在离心力增大过程中, 坡体处于初次压密, 坡顶存在下沉现象。斜坡岩板差异受力, 其中斜坡内部受力较大压力为主; 预制缓倾裂隙尖端产生压剪裂纹, 以 3 种形式

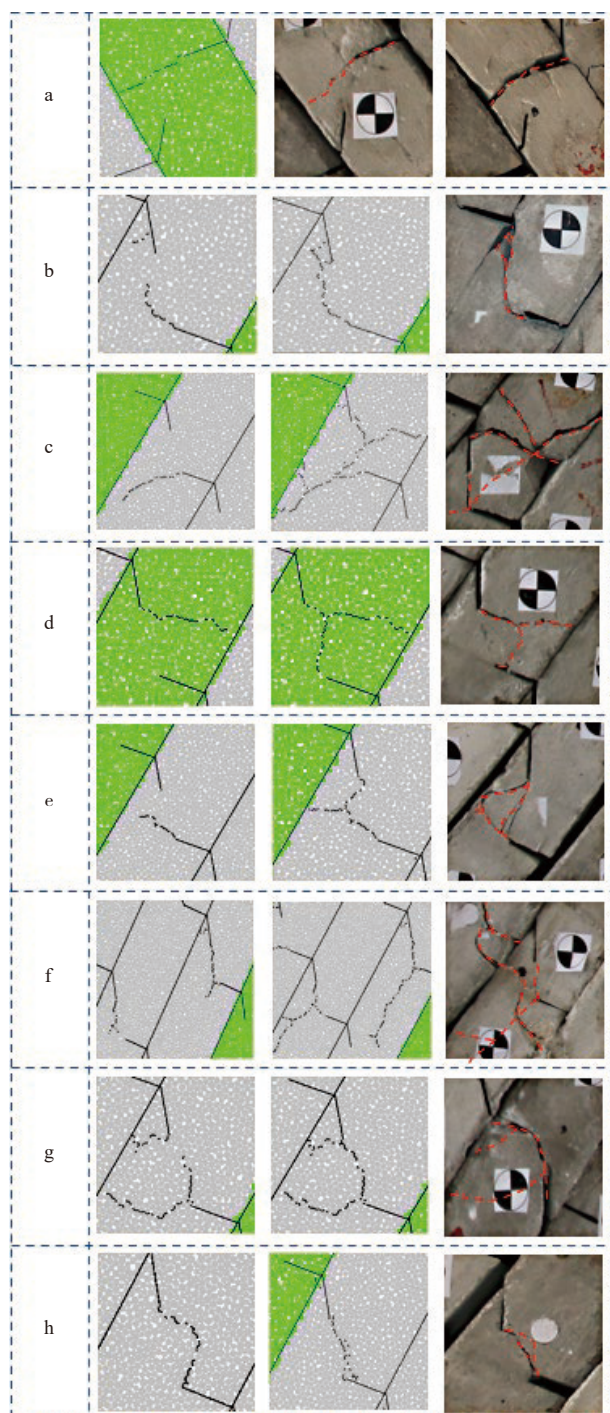


图 9 裂隙演化特征图

Fig. 9 The characteristics of fracture evolution

延伸扩展至陡倾裂隙尖端或岩板层面,劣化岩体,是破裂面形成的基础条件。

(2)裂隙向中下部扩展,坡体受压剪分区。随着离心力持续增大,坡体深部承受稳定受压,坡体中部以压剪为主,尤其坡脚部位最为明显,浅层则以拉剪切受力。裂隙向中下部扩展,坡脚裂隙发育密集,稳定受压区则裂隙发展不明显。

(3)裂隙向中上部发展,破裂面初步形成,深部坡体发生弯折。坡体内部裂隙由中部向坡顶发展,坡体内部预制陡缓裂隙基本贯通,坡脚及坡面浅层裂隙发育相对密集,坡体深部以弯-剪裂隙为界,形成稳定受压区和弯折倾倒区,中下部岩层因弯折倾倒变形形成层间空隙明显。浅层破裂面初步形成,内部潜在破裂面进一步扩展、贯通。

(4)多级破裂面贯通,坡顶沉降,后缘拉裂,坡体变形破坏。浅层裂隙完全贯通,形成由坡顶至坡脚的完整破裂面Ⅰ,内部潜在破裂面(Ⅱ、Ⅲ)中上部近似平行坡面,下部合并后至坡脚,稳定受压区域弯折区分界潜在破裂面Ⅳ呈阶梯形。同时浅层存在3条次级破裂面。

综合离心力试验和 PFC 数值模拟,揭示了斜坡破裂面形成机理:斜坡的变形破坏由于重力作用,使得岩板差异性受力,预制裂隙尖端分别在压剪、拉剪及弯折作用下萌生新的裂隙,并进一步扩展、贯通形成破裂面。因此,重力是内在原因,而坡体结构特征是基础条件。

5 结论

(1)反倾层状斜坡离心力机试验演化过程分为:岩板差异受力,裂隙萌生;裂隙扩展,坡体压剪分区;坡体反向弯折,破裂面初步形成;多级破裂面贯通,坡体变形破坏。与之相对应的 PFC 数值模拟过程为:深部衍生→中部向下部衍生扩展→中部向上部衍生扩展→裂纹扩展贯通形成破裂面。最终形成破裂面特征:浅层裂隙完全贯通,形成由坡顶至坡脚的完整破裂面Ⅰ,内部潜在破裂面(Ⅱ、Ⅲ)中上部近似平行坡面,下部合并后至坡脚,稳定受压区域弯折区分界潜在破裂面Ⅳ整阶梯形。同时浅层通常产生次级破裂面。

(2)破裂面形成机理:斜坡的变形破坏由于重力的作用,使得岩板差异性受力,预制裂隙尖端分别在压剪、拉剪及弯折作用下萌生新的裂隙,并进一步扩展、贯通形成破裂面。因此,重力是内在原因,而坡体结构特征是基础条件。

(3)离心机试验和 PFC 数值模拟有效结合,演化过程展示具有互补统一性,清晰展示了反倾层状斜坡破裂面的演化全过程及特征,揭示了形成的机理。为类似斜坡深入研究提供了理论基础,同时也为实际工程监测、设计治理提供了参考依据。

参考文献 (References):

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 - 454. [HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 - 454. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 黄润秋, 李渝生, 严明. 斜坡倾倒变形的工程地质分析[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1165 - 1181. [HUANG Runqiu, LI Yusheng, YAN Ming. The implication and evaluation of toppling failure in engineering geology practice[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5): 1165 - 1181. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 马洪生, 庄卫林, 刘阳, 等. 顺层岩质边坡静力开挖物理模拟试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 37 - 43. [MA Hongsheng, ZHUANG Weilin, LIU Yang, et al. Physical excavation test research on a bedding rock slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 37 - 43. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 母剑桥. 反倾边坡倾倒破裂面优势形态及变形稳定性分析方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017. [MU Jianqiao. Study on dominant shape and deformation stability analysis method of toppling fracture surface of reverse slope[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张御阳. 陡缓结构面反倾层状岩质斜坡变形破坏演化机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019. [ZHANG Yuyang. Study on the evolution mechanism of deformation and failure of layered rock slope with steep and gentle structural plane[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 黄达, 马昊, 孟秋杰, 等. 软硬互层岩质反倾边坡弯曲倾倒离心模型试验与数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(7): 1286 - 1295. [HUANG Da, MA Hao, MENG Qiujie, et al. Centrifugal model test and numerical simulation for anacinal rock slopes with soft-hard interbedded structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1286 - 1295. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 郑达, 毛峰, 王沁沅, 等. 上硬下软反倾边坡开挖变形响应的物理模拟[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 89 - 95. [ZHENG Da, MAO Feng, WANG Qinyuan, et al. Physical simulation of the excavation deformation response of counter-tilt slope with rigid layers on the soft[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 89 - 95. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 郑达, 王沁沅, 毛峰, 等. 反倾层状岩质边坡深层倾倒变形关键致灾因子及成灾模式的离心试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(10): 1954 - 1963. [ZHENG Da, WANG Qinyuan, MAO Feng, et al. Centrifuge model test study on key hazard-inducing factors of deep toppling deformation and disaster patterns of counter-tilt layered rock slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 1954 - 1963. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 姚晔, 章广成, 陈鸿杰, 等. 反倾层状碎裂结构岩质边坡破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 365 - 381. [YAO Ye, ZHANG Guangcheng, CHEN Hongjie, et al. Study on the failure mechanisms of counter-tilt rock slopes with layered cataclastic structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 365 - 381. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 杨豪, 魏玉峰, 张御阳, 等. 基于离心试验的反倾层状岩质边坡内非贯通性裂缝变形特性分析[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 152 - 161. [YANG Hao, WEI Yufeng, ZHANG Yuyang, et al. Analysis of deformation characteristics of non-penetrating cracks in anti-dip layered rock slope based on centrifugal test[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 152 - 161. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 吴昊, 赵维, 年廷凯, 等. 反倾层状岩质边坡倾倒破坏的离心模型试验研究[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 223 - 231. [WU Hao, ZHAO Wei, NIAN Tingkai, et al. Study on the anti-dip layered rock slope toppling failure based on centrifuge model test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(2): 223 - 231. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 蔡国军, 陈锡锐, 孙文鹏, 等. 强震作用下斜坡表面放大效应的三维离散元模拟[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 104 - 112. [CAI Guojun, CHEN Xirui, SUN Wenpeng, et al. Three-dimensional discrete element simulation of the amplification effect of the slope surface under the action of strong earthquakes[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 104 - 112. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李彦奇, 黄达, 孟秋杰. 基于离心机和数值模拟的软硬互层反倾层状岩质边坡变形特征分析[J]. 水文地

- 质工程地质, 2021, 48(4): 141 – 150. [LI Yanqi, HUANG Da, MENG Qiujie. An analysis of the deformation characteristics of soft-hard interbedded anti-tilting layered rock slope based on centrifuge and numerical simulation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 141 – 150. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李任杰, 胡富杭, 石豫川, 等. 基于底摩擦试验的硬岩岩质边坡变形过程及破坏机制研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 145 – 152. [LI Renjie, HU Fuhang, SHI Yuchuan, et al. A study of deformation process and failure mechanism of hard rock slope based on the bottom friction test[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 145 – 152. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 孟凡非, 浦海, 陈家瑞, 等. 基于颗粒离散元的薄基岩裂隙扩展规律 [J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 421 – 428. [MENG Fanfei, PU Hai, CHEN Jiarui, et al. Extension law of thin bedrock fissure based on particle discrete element[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(2): 421 – 428. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 张波, 郭帅, 杨学英, 等. 含 X 型裂隙类岩石材料水力裂缝扩展研究 [J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2066 – 2073. [ZHANG Bo, GUO Shuai, YANG Xueying, et al. Hydraulic fracture propagation of rock-like material with X-type flaws[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(7): 2066 – 2073. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 武东阳, 蔚立元, 苏海健, 等. 单轴压缩下加锚裂隙类岩石试块裂纹扩展试验及 PFC^{3D} 模拟 [J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1681 – 1692. [WU Dongyang, YU Liyuan, SU Haijian, et al. Experimental study and PFC^{3D} simulation on crack propagation of fractured rock-like specimens with bolts under uniaxial compression[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(6): 1681 – 1692. (in Chinese with English abstract)]
- [18] KOLARI K. A complete three-dimensional continuum model of wing-crack growth in granular brittle solids[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, 115/116: 27 – 42.
- [19] 李学华, 牛志军, 姚强岭, 等. 孔洞式三叉裂隙砂岩裂纹扩展特征颗粒流分析 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3735 – 3747. [LI Xuehua, NIU Zhijun, YAO Qiangling, et al. Particle flow analysis of crack propagation characteristics of hole-type trident cracks sandstone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(11): 3735 – 3747. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张艳博, 徐跃东, 刘祥鑫, 等. 基于 CT 的岩石三维裂隙定量表征及扩展演化细观研究 [J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2659 – 2671. [ZHANG Yanbo, XU Yuedong, LIU Xiangxin, et al. Quantitative characterization and mesoscopic study of propagation and evolution of three-dimensional rock fractures based on CT[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(10): 2659 – 2671. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王辉, 李勇, 曹树刚, 等. 含预制裂隙黑色页岩裂纹扩展过程及宏观破坏模式巴西劈裂试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(5): 912 – 926. [WANG Hui, LI Yong, CAO Shugang, et al. Brazilian splitting test study on crack propagation process and macroscopic failure mode of pre-cracked black shale[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(5): 912 – 926. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 周子涵, 陈忠辉, 王建明, 等. 卸荷条件下岩石平行偏置双裂隙的扩展规律研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(4): 721 – 730. [ZHOU Zihan, CHEN Zhonghui, WANG Jianming, et al. Propagation of offset parallel cracks in rock under unloading conditions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(4): 721 – 730. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农