

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

杨 豪, 魏玉峰, 张御阳, 唐珏凌, 何 宁

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

YANG Hao, WEI Yufeng, ZHANG Yuyang, TANG Jueling, and HE Ning

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108068>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

基于离心机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

拓宽方式对软土路基工程特性影响的离心模型试验

Centrifugal test on influence of widening styles on the engineering characteristics of soft soil

叶观宝, 葛敬文, 许言, 张振, 饶烽瑞, 戚得健 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 112-117

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

A study of deformation process and failure mechanism of hard rock slope based on the bottom friction test

李任杰, 胡富杭, 石豫川, 王磊, 吕可伟 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 145-152

含折线型裂隙砂岩试件翼型裂纹起裂与扩展机制研究

Investigation of the wing crack initiation and propagation mechanism of the sandstone specimen containing a folded fissure

张科, 潘哲, 刘享华 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 103-111

上硬下软反倾边坡开挖变形响应的物理模拟

Physical simulation of the excavation deformation response of counter-tilt slope with rigid layers on the soft

郑达, 毛峰, 王沁沅, 苏杭, 李文龙 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 89-95



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202108068

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.* An analysis of non-penetration cracks in anti-dip rock slope based on centrifugal test[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 152-161.

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

杨 豪^{1,2}, 魏玉峰¹, 张御阳³, 唐珏凌⁴, 何 宁⁵

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 2. 四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000; 3. 四川省地震局, 四川 成都 610044; 4. 成都工业职业技术学院, 四川 成都 610031; 5. 甘肃电投炳灵水电开发有限责任公司, 甘肃 临夏 731600)

摘要: 坡体内不同部位结构面间岩桥断裂扩展导致了反倾层状岩坡的破坏。为研究坡体内非贯通性裂缝断裂扩展对坡体演化的控制作用, 以苗尾水电站右坝肩倾倒变形体为地质原型, 开展含多组非贯通性裂缝的反倾层状岩质边坡离心模型试验, 分析反倾层状岩质边坡内非贯通性裂缝变形特性。结果表明: (1) 坡体内含非贯通性裂缝的岩层断裂最终呈现为裂缝间岩桥贯通、缓倾裂缝与上岩层贯通、陡倾裂缝与下岩层贯通、陡倾裂缝与缓倾裂缝端口处贯通及非裂缝处岩层发生断裂等 5 类裂缝断裂模式, 并以裂缝间岩桥贯通为主要断裂模式; (2) 基于断裂力学并结合裂缝断裂叠加原理, 主折断面处岩层的不稳定系数在坡高 1/3 处最小, 并向坡脚和坡顶两侧逐渐变大, 而应力强度因子由坡高 1/3 处向坡脚和坡顶处逐渐变小; (3) 裂缝的断裂扩展控制着坡体演化, 并受裂纹率及裂缝周围的尖端应力场影响较大。在坡体演化初期, 以坡体后缘压缩沉降和局部岩层裂缝压剪破坏为主, 岩层倾角发生较大变化, 呈现由坡体上部往下逐级变大的趋势; 演化中期, 坡体后缘裂缝扩展形成主折断面, 坡体中上部岩层角度变化较大, 裂缝断裂数目的继续增加; 演化末期, 裂缝断裂数目保持平稳, 主要以断裂岩层的位置重分布为主要变形特征, 次级折断面形成, 破碎岩层之间进一步被压缩, 坡体进一步发生失稳破坏。

关键词: 反倾层状斜坡; 岩桥断裂; 裂缝扩展; 离心模型试验; 断裂机理

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)06-0152-10

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

YANG Hao^{1,2}, WEI Yufeng¹, ZHANG Yuyang³, TANG Jueling⁴, HE Ning⁵

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Sichuan College of Architectural Technology, Deyang, Sichuan 618000, China; 3. Sichuan Earthquake Administration, Chengdu, Sichuan 610044, China; 4. Chengdu Vocational & Technical College of Industry, Chengdu, Sichuan 610031, China; 5. Gansu Electric Power Investment Bingling Hydropower Development Co. Ltd., Linxia, Gansu 731600, China)

Abstract: The fracture extension of rock bridges between structural surfaces in different parts of the slope leads to

收稿日期: 2021-08-30; 修订日期: 2021-12-24

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072303); 国家重点研发计划项目(2017YFC1501000)

第一作者: 杨豪(1993-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土体稳定性方面的研究。E-mail: 2216868003@qq.com

通讯作者: 魏玉峰(1979-), 男, 博士, 教授, 主要从事地质工程、岩土工程科研和教学工作。E-mail: weiyufeng@cdu.edu.cn

the damage of the anti-dipping laminated rock slope. In order to study the controlling effect of fracture extension of non-penetrating fractures in the slope on the evolution of the slope, the centrifugal model test of the anti-dipping laminated rock slope containing multiple groups of non-penetrating fractures is carried out with the right shoulder of the Miaowei Hydropower Station as the geological prototype to analyze the deformation characteristics of non-penetrating fractures in the anti-dipping laminated rock slope. The results show that the fractures of rock formations containing non-penetrating fractures within the slope finally show five types of fracture patterns, including inter-fracture bridge penetration, penetration between gently dipping fractures and the upper rock layer, penetration between steeply dipping fractures and the lower rock layer, penetration between steeply dipping fractures and the port of gently dipping fractures, and fracture of rock layers at non-fractures, with inter-fracture bridge penetration as the main fracture pattern. Based on fracture mechanics and combined with the principle of fracture superposition, it is found that the instability factor of the rock layer at the main fracture section is the smallest at 1/3 of the slope height and gradually becomes larger towards the foot and both sides of the slope top, while the stress intensity factor gradually decreases from 1/3 of the slope height to the foot and the top of the slope. The fracture extension of cracks controls the slope evolution and is greatly influenced by the crack rate and the tip stress field around the cracks. At the early stage of slope evolution, the compression and settlement of the back edge of the slope and the compression and shear damage of the local rock cracks are the main features, and the dip angle of the rock layers changes greatly, showing a trend of becoming larger from the upper part of the slope to the lower part of the slope. At the middle of the evolution, the fracture extension of the back edge of the slope forms the main fracture surface, and the angle of the rock layers in the middle and upper part of the slope changes greatly. At the end of the evolution, the number of fractures remains stable, and the main deformation feature is characterized by the redistribution of the location of fractured rock layers, the formation of secondary fracture surfaces, further compression between broken rock layers, and further destabilization of the slope body.

Keywords: anti-dipping layered slope; rock bridge fracture; crack propagation; centrifugal model test; fracture mechanism

在中国西部山区,存在大量天然或人工开挖形成的反倾层状岩质边坡。强震会引发反倾层状岩质边坡体内部结构发生破坏,造成坡体内部形成大量未贯通的强震裂缝,出现所谓的“裂”而未“滑”,“松”而未“动”的震裂斜坡。以往对反倾层状岩质边坡的研究多集中于反倾层状岩质边坡的倾倒模式、弯折带的演化特征和斜坡在地震作用响应等方面。而对于受强震作用后内部发生损坏的坡体破坏机理的研究相对较少,因此对坡体内含非贯通性裂缝的反倾层状岩质边坡进行研究具有重要意义。

物理模型试验是研究反倾层状边坡变形的常用手段,主要包括离心模型试验、振动台模型试验及基底摩擦模型试验。黄达等^[1-2]基于模型试验与数值模拟,发现软硬互层岩质反倾边坡在倾角与坡角之和大于等于 120°时才较易破坏。吴昊等^[3]基于反倾层状岩质边坡离心模型试验,指出边坡的坡角及岩层反倾角影响坡体破坏时的临界坡高与破裂面位置。姚晔等^[4]通过基底摩擦物理模型试验揭示了反倾层状破碎结

构岩质边坡的倾倒破坏及空间受力演化机制。陶志刚等^[5]研究了 3 种不同工况下防止反倾边坡倾倒失稳的加固措施。郑达等^[6-8]通过物理模型试验研究了不同坡角、不同岩层性质及自重条件下的反倾层状岩质边坡的倾倒变形演化机理及关键致灾因子。杨国香等^[9]采用振动台模型试验方法,进一步证明了反倾层状岩质边坡在地震作用下,动力加速度放大系数在坡体内分布的非线性。李祥龙等^[10]采用离心模型试验研究发现次级结构面在反倾斜坡发育过程中对折断面形状形成的具有影响作用。Zhang 等^[11]采用离心模型试验探究了次级结构面在反倾斜坡发育过程中对折断面形状形成的影响机理。Chen 等^[12]将离心试验和数值模拟结合,对比分析了反倾岩质边坡倾倒变形机理。

理论和数值分析法可以对物理模型法未能揭示的原理做进一步的补充。代仲海等^[13]、吴季寰等^[14]采用理论方法解释了反倾层状岩质边坡的变形机理及滑动面的时空演变规律。高旭等^[15]基于理论与数值模拟的方法,认为岩层层厚是影响边坡最大折断深度

和最大锚固力的主要因素。岑夺丰等^[16]、胡康等^[17]基于数值模拟的研究方法,认为反倾巨厚层状岩质边坡稳定性受岩块的尺寸及层间裂隙间距控制。蔡静森等^[18]在边坡原型破坏的基础上采用理论分析和数值模拟相结合的方法研究了反倾层状岩质边坡的悬臂梁模型。王宇等^[19]进行了多工况因素的分析,确定了层状岩质边坡优势角的范围。程东幸等^[20]进行了多工况因素的分析,确定了层状岩质边坡优势角的范围。Alzo'ubi 等^[21]和 Majdi 等^[22]认为岩体间的抗拉强度是影响反倾斜坡破坏的主要因素,拉应力控制着岩层间的弱面变形。马文著等^[23]采用模型试验和数值模拟相结合的方法,研究了开挖条件下层间抗剪强度对反倾层状岩质边坡的影响。李彦奇等^[24]将离心模型试验与数值模拟相结合,分析了不同几何因素对软硬互层反倾岩坡的破坏特征影响。

综上,以往的研究很少考虑坡体内存在的裂缝对反倾坡体倾倒变形的影响。本次研究以苗尾水电站右坝肩倾倒变形体为坡体原型,通过在边坡不同部位预置非贯通裂缝,开展离心模型试验,采用对裂缝应变监测与图像分析相结合的方法研究在自重条件下反倾层状岩质边坡内非贯通性裂缝变形特性。

1 模型试验坡体原型

本次离心模型试验原型为苗尾水电站右坝肩倾倒变形体^[25]。坝肩的反倾斜坡为单一斜坡,高程在 1 360 m 以上时,斜坡的整体坡度为 50°~60°;高程 1 360 m 以下地形较为平缓,坡度为 15°~35°。岩层走向 NNW、倾角近直立,总体产状为 N8°~12°W/NE(或 SW)∠73°~90°。该倾倒体岩层走向与河谷走向接近一致,岩性主要以板岩、砂板岩及变质石英砂岩为主,同时沿层面及裂隙可见石英岩脉侵入。反倾斜坡的典型剖面图如图 1 所示。

2 离心模型试验设计

2.1 离心设备简介

本次模型试验采用成都理工大学 TLJ-500 型土工离心机,离心机的最大容量为 500 g·t,有效运行半径为 4.5 m,最大加速度为 250 g,模型试验采用的模型箱内径尺寸为 100 cm(长)×60 cm(宽)×75 cm(高)。

2.2 相似材料及相似关系确定

由于原型坡体的复杂性,考虑到离心机的容量、模型的尺寸及试验目的,本次模型试验概化了反倾坡体的几何形状。通过相似原理确定了相似比 $N=120$,

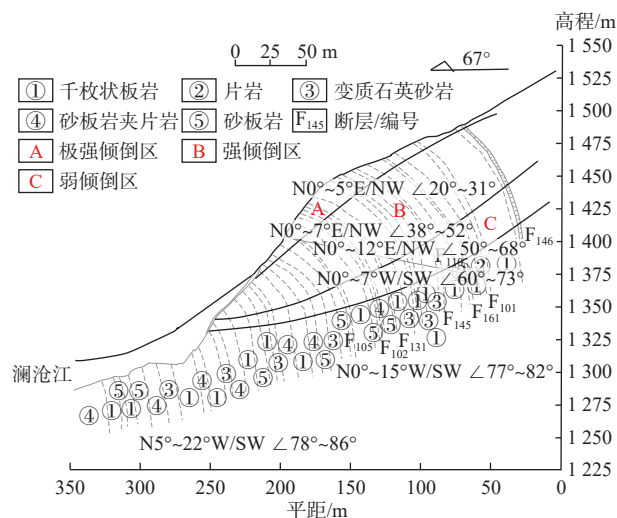


图 1 边坡的工程地质剖面图

Fig. 1 Engineering geological profiles of slope

即采用的最大离心加速度为 120 g。本文选择变质石英砂岩作为原型材料,结合岩石相似材料配合比的研究^[26]和为了便于在监测裂缝处粘贴应变片,选择水泥、水、石英砂及重晶石粉作为岩层相似材料,其水溶液作为岩层间的黏结材料。为了得到与原型岩石及层间黏结材料物理性质接近的材料,通过多次配比试验确定了相似材料的配合比例为水泥:水:石英砂:重晶石粉=4:3:4:2。分别对预置岩板、层间材料进行单轴抗压、直接剪切试验,得到相似材料在自然环境(1 g 重力)下的物理力学参数(表 1)。

表 1 原型及相似材料基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of similar materials

材料种类	密度 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 /MPa	抗压强度 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / $(^\circ)$
原型岩石	2 670	1 160	25.19	-	-
模型岩石	2 600	1 155	16.19	-	-
原型黏结材料	-	-	-	28	36
模型黏结材料	-	-	-	29	34

注:“-”表示无法获得

2.3 反倾斜坡离心模型确定

反倾岩体内部的裂缝通常包括沿岩层结构面方向发展及沿切割结构面方向发展 2 种类型,在岩层中具有一定张开度、断续发育和贯通性差等特点^[27]。切割结构面型的裂缝往往成组(陡倾裂缝和缓倾裂缝)出现在反倾斜坡中,因此根据岩层的长度设置不同数量的非贯通裂缝。

相似材料岩板终凝后,根据原型斜坡的坡角概化得到斜坡的坡角为 60°,岩层倾角选择优势倾倒角^[20, 28]

为 60° 。根据离心模型示意图(图2)将整块岩板切割成型,并在岩板表面按照一定角度和深度切割出深度10 mm、宽度1 mm的裂缝,沿岩层方向相邻裂缝距离均为80 mm;将切割完成后的整块岩板用相似材料水溶液黏结拼装成图2所示的边坡模型,不同深度的岩层分别编号为1—20。试验模型尺寸为25.75 cm(顶长) \times 70 cm(高) \times 100 cm(底长) \times 40 cm(宽),通过相似比 $N=120$,换算得到反倾斜坡尺寸为30.9 m(顶长) \times 84 m(高) \times 120 m(底长) \times 48 m(宽)。

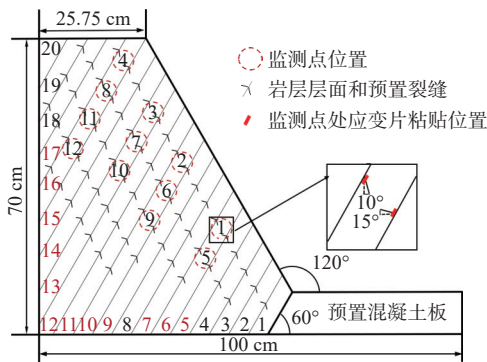


图2 反倾岩坡离心模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the centrifugal model of anti-dipping slope

2.4 试验监测点及加载方案确定

利用固定在离心机吊篮上的高速相机实时记录试验过程中裂缝外观的变化情况,并在坡体内不同部位的裂缝处粘贴应变片(图2),监测试验过程中裂缝

的应变情况。1个陡倾裂缝与其对应的缓倾裂缝组成1对监测点,共监测了坡体内不同部位的12对裂缝。一般反倾坡体中上部为倾倒变形明显区域,因此将应变片平均布设在坡体中上部;此外为了保证2个传感器之间不会相互干扰,其距离定为6倍传感器直径,监测点的位置如图2所示。

本次试验的加载方案为连续6级加载,分别连续加载到20, 40, 60, 80, 100, 120 g,并在每次到达设定的离心加载速度后保持5 min,使坡体内裂缝能够充分地断裂和扩展。

3 裂缝岩桥裂纹扩展及破坏模式分析

3.1 不同时刻坡体裂缝断裂特征分析

利用高速相机对模型边坡进行实时监测,得到了不同阶段坡体内裂缝的断裂扩展演化特征。

坡体裂缝演化初期,由于坡体内含未贯通岩层的裂缝,在离心力作用下,坡体内裂缝将会闭合,形成摩擦阻面,阻碍裂缝面处岩层的相对滑移。随着离心加速度的持续增加,近坡面岩层在重力作用下向临空面方向倾倒,坡体后缘的岩层发生张拉破坏,为坡体后缘沉降提供了变形空间。由于坡体内部裂缝处岩层的相对摩擦力,后缘岩层与坡体上部岩层的变形量存在差异,导致坡体中部岩层出现局部架空现象。该阶段坡体内裂缝断裂扩展数量较少,零散分布于坡体不同部位,如图3(a)所示。

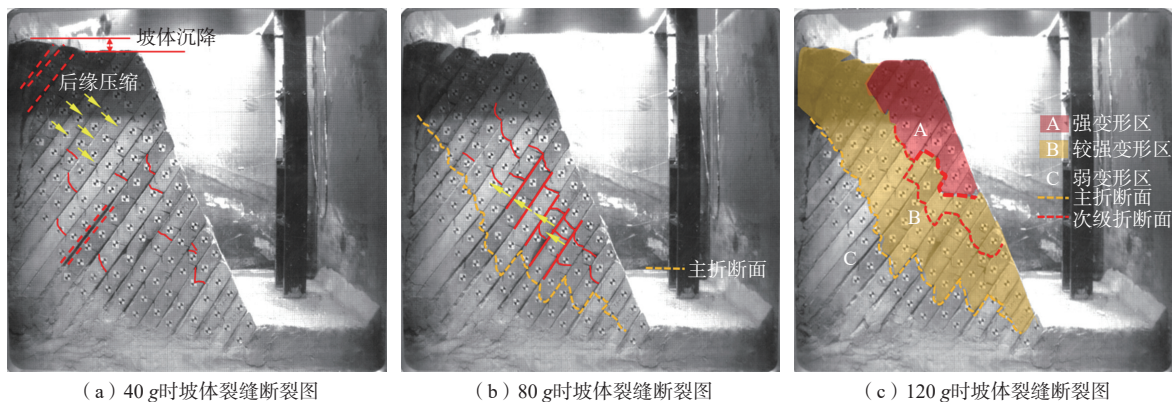


图3 不同时刻坡体内裂缝断裂图

Fig. 3 Broken fracture in the slope at different times

随着离心加速度的继续增加,坡体后缘持续沉降,裂缝处岩层层间剪切作用加剧,裂缝处的摩阻力不足以阻碍裂缝的扩展,坡体内部多处裂缝断裂扩展。此外,坡体内部应力不断调整,位于坡体深部的裂缝不断断裂并扩展延伸至坡脚,坡体内部出现应力

集中区,形成参差状的主折断面,如图3(b)所示。在此过程中,由于岩层间张拉作用及裂缝岩层处的剪切作用进一步加强,坡体中部岩层发生反向弯折。

随着主折断面的形成,位于其上部的强变形区和较强变形区(已发生断裂的岩层)的剪切和张拉效应

逐步加强,导致坡体表面的裂缝进一步断裂扩展,岩体结构更加破碎,最终形成次级折断面,如图 3(c)所示。次级折断面的形成标志着坡体内裂缝的演化进入末期。此阶段,裂缝的断裂扩展数目较中期有所下降,主要以断裂岩层在上部压力作用下的位置重分布为变形特征,破碎岩层之间进一步被压缩,坡体进一步发生失稳破坏。

3.2 岩层裂缝断裂扩展类型

反倾岩质边坡体岩层内未贯通的陡倾与缓倾裂缝间形成的岩桥断裂贯通是坡体破坏的主要原因。在岩层自重、层间相互作用力及上部岩层压力的综合作用下,裂缝尖端应力发生集中,导致裂缝断裂扩展模式复杂。根据反倾坡体内不同部位裂缝破坏形态,可将岩层间裂缝的断裂扩展归为 5 种类型(图 4)。

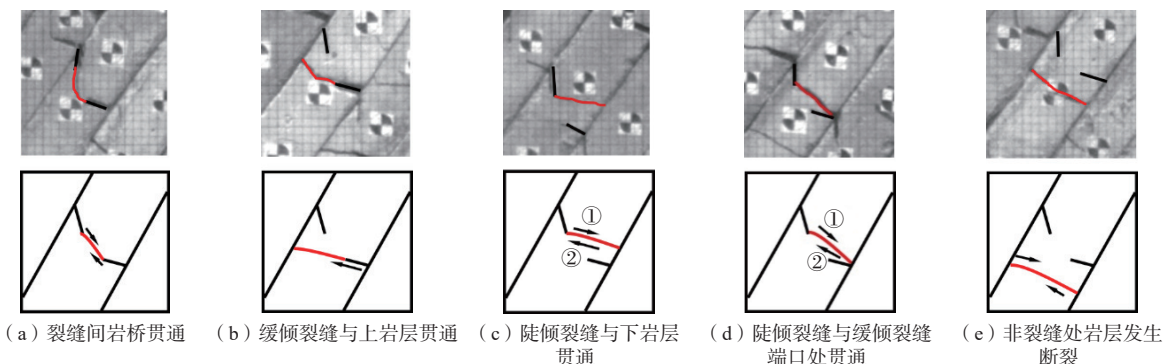


图 4 5 种岩层裂缝断裂示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fracture of 5 rock strata

(1) 裂缝间岩桥贯通

常发生于坡体深部,在上部岩层倾倒作用下及裂缝层间相互作用下,从裂缝尖端处扩展,是典型的拉剪复合断裂模式,如图 4(a)所示。该类裂缝扩展贯通模式主要发生在主折断面处。

(2) 缓倾裂缝与上岩层贯通

起裂点发生在缓倾裂缝尖端处,在受到外界荷载作用下,沿尖端产生张拉裂纹;裂纹的贯通具有随机性,通常沿岩层胶结最弱处发生贯通,导致岩层断裂。如图 4(b)所示。该类裂缝贯通模式主要发生在坡体表面处,岩层断裂时会发生较大角度的弯折。

(3) 陡倾裂缝与下岩层贯通

起裂点分为 2 种:第 1 种发生在陡倾裂缝尖端处,裂缝尖端受张拉作用产生的裂纹沿陡倾裂缝处发生随机延展,最终导致岩层贯通;第 2 种随机发生在岩层下部胶结薄弱处,裂纹受断裂岩层的剪切作用,与上部陡倾裂缝发生贯通。如图 4(c)所示。该类断裂贯通模式多发生在裂缝受到较大压力的坡体下部及坡表处。

(4) 陡倾裂缝与缓倾裂缝端口处贯通

起裂点同样分为 2 种:第 1 种为图 4(c)中断裂模式①的特殊形式,随机发生在坡体表面,具有较好的临空条件,在岩层张拉作用下产生裂纹,随机与下部缓倾裂缝端口发生贯通;第 2 种起裂点位于缓倾裂缝

端口处,由于坡体不同部位岩层的压缩存在差异,在断裂岩层的剪切作用下,缓倾裂缝端口向上延伸与陡倾裂缝贯通,岩层发生断裂。如图 4(d)所示。

(5) 非裂缝处岩层发生断裂

起裂点并非发生在裂缝处,而是随机发生在坡体深部。在上部岩层压力作用下,岩层胶结薄弱处受到岩层的压剪作用,导致岩层发生断裂。

3.3 坡体深度对裂缝应变的影响分析

图 5 为 12 对裂缝监测点在试验过程中的裂缝应变图,其中正、负数分别代表裂缝处于受拉、受压状态。

1—4 号监测点靠近坡体表部,坡体裂缝演化初期,1—3 号缓倾裂缝发生较大的拉应变,意味着在低离心加速度条件下,裂缝从缓倾裂缝处开始萌发,如图 5(a)所示。1 号监测点的陡、缓裂缝在低离心加速度条件下发生了裂缝开裂,这与裂缝所处的坡体位置有关。当离心加速度上升到 20 g 时,靠近坡脚处 1 号裂缝监测点首先发生裂缝间的岩桥断裂贯通,因此坡表处的裂缝开裂方式是由缓倾裂缝向陡倾裂缝处发展。试验过程中 4 号陡倾裂缝在坡体演化末期发生了较大的形变量,这是由于坡体内裂缝演化发展到后期,前期形变和能量积累超过了裂缝本身所能承受的拉应力。

5—8 号裂缝监测点位于坡体中部,陡倾裂缝的应变变化较明显,而缓倾裂缝的变化较平稳,大部分裂

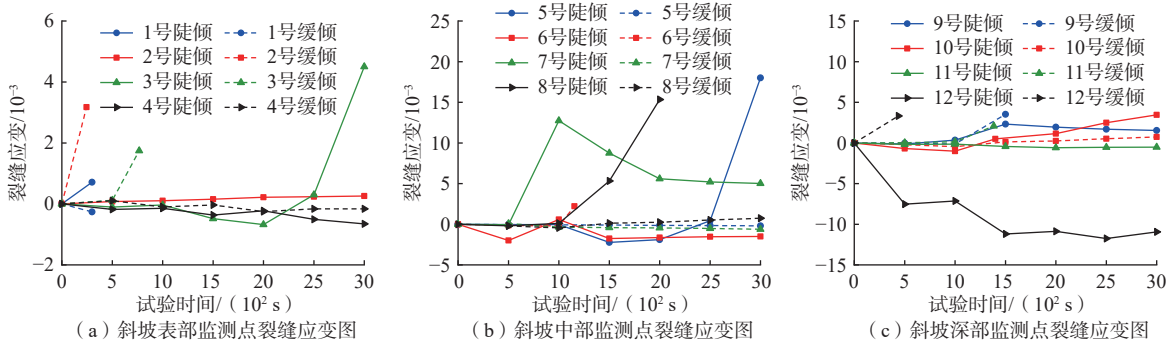


图 5 坡体内不同部位监测点裂缝应变图

Fig. 5 Fracture strains of monitoring points in slope

缝处于受压状态, 如图 5(b)所示。

9—12 号裂缝监测点位于坡体深部, 裂缝的萌开裂主要从缓倾裂缝处开始。试验初期, 12 号陡倾裂缝出现较大的压应变, 与此同时 12 号缓倾裂缝发生断裂, 如图 5(c)所示。12 号裂缝处于次级折断面上, 试验初期受到上部岩层压力作用的影响, 发生裂缝间的岩桥断裂。

通过以上分析可知: (1) 裂缝的开裂位置与裂缝所在的坡体位置有关。靠近坡体表面和深部的裂缝通常从缓倾裂缝处起裂, 而坡体中部的裂缝一般从陡

倾裂缝处起裂; (2) 坡体演化过程中, 裂缝的受力状态受裂缝角度和所处位置影响, 裂缝的起裂、断裂和扩展受周围裂缝受力状态影响较大。

3.4 裂缝断裂对岩层倾角演化的影响分析

岩层倾角控制着反倾斜坡的倾倒深度^[26], 因此岩层倾角的变化会导致反倾斜坡的破坏形式发生改变。图 6 为坡体演化过程中不同深度岩层的倾角变化(与初始岩层倾角对比), 考虑到岩层在坡体演化过程中发生的断裂, 仅统计断裂岩层转动角度较大的值, 且取顺时针转动为正。

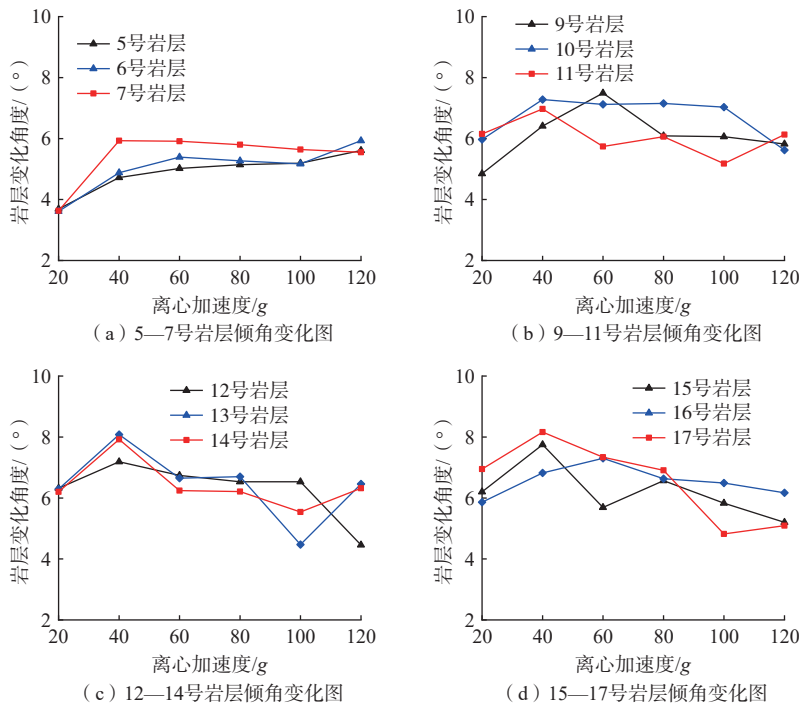


图 6 坡体不同深度岩层倾角的变化图

Fig. 6 Change of dipping of different depth of slope

根据图 6 可知: (1) 坡体演化初期, 岩层倾角变化较大, 呈现由上往下逐级变大的趋势; 随着加载的继

续增大, 离心加速度到达 40 g 时, 坡体内倾角的变化达到峰值。(2) 离心加速度达到 40 g 以后, 坡体上中

部岩层倾角变化呈现下降趋势,而处于底部岩层的倾角变化幅度不大,仅略微上升,越往上岩层倾角变化幅度越大,这与坡体内部裂缝的断裂和扩展有关,不同部位裂缝断裂模式和断裂时间存在差异,裂缝之间会相互影响,从而导致中上部岩层角度变化幅度较大。(3)当离心加速度加载到 80 g 后,随着裂缝断裂数目继续增加,断裂岩层之间发生剪切错动,导致中上部岩层倾角发生较大变化;随着离心加速度的继续变大,由于坡体下部岩层没有好的临空条件,岩层倾角几乎保持不变,而中上部岩层具有较好的临空条件,岩层倾角变化较大。

4 裂缝断裂扩展差异性分析

含多组非贯通性裂缝的反倾斜坡体的破坏是在坡体内含有多组裂缝的基础上,大量裂缝在综合荷载作用下断裂、扩展和贯通的结果。坡体内裂缝受力较复杂,一般而言,复杂裂缝的断裂计算通常分解为多个基本荷载作用下的裂缝断裂扩展模型进行计算。在荷载作用下,裂缝尖端附近的应力具有各向异性,因此常用应力强度因子来代替裂缝附近的应力场强度。

(1) 正应力引起的裂缝强度因子(K_σ)

$$K_\sigma = \sigma \sqrt{\pi a} F_\sigma(n) \tag{1}$$

$$F_\sigma(n) = 1.12 - 0.231n + 10.55n^2 - 21.72n^3 + 30.39n^4$$

式中: a ——裂缝的长度/mm;

n ——裂纹率, $n=a/b$;

b ——岩层的厚度/mm;

σ ——作用在裂缝上的正应力/kPa;

$F_\sigma(n)$ ——正应力作用下的强度因子系数。

(2) 剪应力引起的裂缝强度因子(K_τ)

$$K_\tau = \frac{2Q}{\sqrt{\pi a}} F_\tau(n) \tag{2}$$

$$F_\tau(n) = (1.03 - 0.65n + 0.37n^2 + 0.28n^3)/(1 - n)^{1/2}$$

式中: Q ——作用在裂缝上的剪力合力/kPa;

$F_\tau(n)$ ——剪应力作用下的强度因子系数。

(3) 弯矩 M 引起的裂缝强度因子(K_M)

$$K_M = 6M \sqrt{\pi a} F_M(n)/b^2 \tag{3}$$

$$F_M(n) = 1.122 - 1.4n + 7.33n^2 - 13.08n^3 + 14n^4$$

式中: M ——作用在裂缝上的弯矩/(kN·m);

$F_M(n)$ ——弯矩作用下的强度因子系数。

对于含有多组裂缝的断裂岩层,其岩体的断裂都是成组发生的,有时多组裂缝的断裂会发生相互的切

割交叉,导致每个裂缝的尖端应力场相互影响,从而从根本上改变裂缝尖端处的强度因子^[29]。因此在计算含多组裂缝的岩层断裂的裂缝尖端强度因子时,需采用叠加原理。

假设有 n 个裂缝存在于裂缝 A 周围,在未受其他裂缝影响时,其作用在裂缝 A 处的应力强度因子为 K_i^0 ,在考虑 n 个裂缝对裂缝 A 产生应力场叠加后,其强度因子为 K_i ,则

$$dK_i = K_i - K_i^0 \tag{4}$$

而在 1 个裂缝叠加后其强度因子为:

$$K_i^1 = K_i^0 + \frac{\partial K_i}{\partial x_1} dx_1 \tag{5}$$

在 n 个裂缝叠加后,有:

$$\sum_{j=1}^n K_i^j = nK_i^0 + \sum_{j=1}^n \frac{\partial K_i}{\partial x_j} dx_j = nK_i^0 + dK_i \tag{6}$$

则:

$$K_i = K_i^0 + dK = \sum_{j=1}^n K_j + (1 - n)K_i^0 \tag{7}$$

或

$$K_i = K_i^0 + dK = \sum_{j=1}^n (F_j - 1)K_i^0 + K_i^0 \tag{8}$$

式中: F_j ——裂缝 A 附近第 j 个裂缝对其强度因子的影响系数;

K_j ——在裂缝 j 影响下,裂缝 A 的强度因子,其中 $K_j = F_j K_i^0$ 。

$$K_j = \begin{cases} K_\sigma + K_M & \text{I型断裂} \\ K_\tau & \text{II型断裂} \\ K_I + K_{II} & \text{复合型断裂} \end{cases} \tag{9}$$

对于复合型裂缝的起始扩展的判据为:

$$K_{IC} = K_I + \lambda K_{II} \tag{10}$$

式中: K_{IC} ——岩石的断裂韧度;

λ ——压剪系数。

而采用叠加原理计算含有多组裂缝的起始扩展的判据为:

$$K_{IC} = \sum K_I + \lambda \sum K_{II} \tag{11}$$

当 $K_i > K_{IC}$ 时,裂缝发生扩展断裂; $K_i = K_{IC}$ 时,裂缝处于临界状态; $K_i < K_{IC}$ 时,裂缝处于稳定状态。

定义岩体的不稳定性系数^[30]为:

$$F_i = \frac{K_{IC}}{\sum K_I + \lambda \sum K_{II}} \tag{12}$$

图 7 为主折断面附近岩层不稳定系数与应力强度因子之间变化关系图。根据图 7 可知, 主折断面位于坡脚处的岩层不稳定系数最大, 应力强度因子最小; 随着坡高的上升, 岩层的不稳定系数逐渐变小, 而应力强度因子逐渐变大。在约 1/3 坡高处, 岩层的不稳定系数达到最小, 应力强度因子达到最大, 后随着坡高的上升, 岩层不稳定系数缓慢变大, 应力强度因子逐步减小。

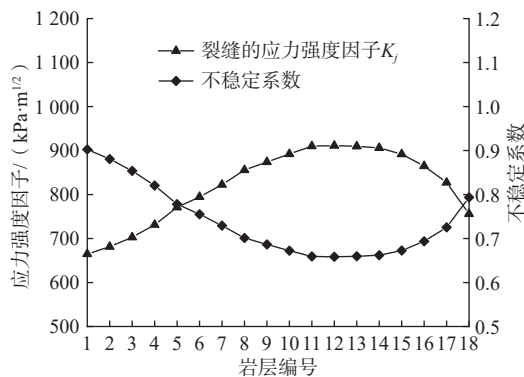


图 7 主折断面上应力强度因子及不稳定系数变化关系图

Fig. 7 Relationship between stress intensity factor and instability coefficient on the main fracture surface

岩层不稳定系数与应力强度因子之所以发生这样的变化趋势, 主要与坡体结构有关。约在坡高 1/3 处下方, 断裂岩层的临空面受到限制, 岩层断裂以压剪断裂为主。此处应力强度因子最大, 说明该处裂缝的叠加效应明显, 不稳定系数最小。此外, 坡脚处所受上部岩层压力大, 裂缝的扩展受到阻碍, 不稳定系数最大, 但裂缝的叠加效应最小, 应力强度因子最小。因此, 裂缝的断裂扩展控制着坡体演化, 而坡体内裂缝的断裂扩展不仅与加载方式有关, 还与裂缝裂纹率、裂缝的尖端应力场和坡体结构有关。

5 结论

(1) 裂缝的断裂扩展控制着反倾斜坡的演化: 在坡体演化初期, 坡体后缘压缩沉降和局部裂缝处的剪切变形使裂缝局部发生断裂, 岩层倾角变化较大, 并呈现出由上往下逐级变大的趋势; 演化中期, 主折断面形成, 裂缝断裂数目继续增加, 坡体中上部岩层倾角变化较大; 演化末期, 裂缝断裂数目保持平稳, 以断裂岩层在上部压力作用下的位置重分布为主要变形特征, 次级折断面形成, 破碎岩层之间进一步被压缩, 坡体进一步发生失稳破坏。

(2) 含非贯通性裂缝的反倾岩质边坡内裂缝断裂

共有 5 种贯通模式: 裂缝间岩桥贯通、缓倾裂缝与上岩层贯通、陡倾裂缝与下岩层贯通、陡倾裂缝与缓倾裂缝端口处贯通及非裂缝处岩层发生断裂, 其中裂缝间岩桥贯通为主要贯通模式。

(3) 基于断裂力学, 采用叠加原理分析了裂缝断裂扩展的差异性, 得到了主折断面岩层的不稳定系数和应力强度因子之间的关系: 坡高 1/3 处, 应力强度因子最大, 向坡顶和坡脚两侧逐渐减小, 而不稳定系数在该处最小, 并向坡顶和坡脚两侧逐渐变大; 裂缝的断裂扩展受裂缝的裂纹率和裂缝周围的尖端应力场影响较大。

参考文献 (References):

- [1] 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 anaclinal rock slopes with soft-hard interbedded structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1286 - 1295. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 黄达, 马昊, 石林. 反倾层状岩质边坡倾倒变形机理与影响因素的离散元模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(6): 1770 - 1782. [HUANG Da, MA Hao, SHI Lin. Discrete element simulation of toppling mechanism and influencing factors of anti-dip layered rock slope[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(6): 1770 - 1782. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 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)]
- [4] 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)]
- [5] 陶志刚, 任树林, 郝宇, 等. 层状反倾边坡破坏机制及

- NPR锚索控制效果物理模型试验[J]. 岩土力学, 2021, 42(4): 976 – 990. [TAO Zhigang, REN Shulin, HAO Yu, et al. Physical model experiment on failure mechanism and NPR anchor cable control effect of layered counter-tilt slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(4): 976 – 990. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 郑达, 张硕, 郑光. 基于坡角变化的反倾层状岩质斜坡倾倒变形离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 439 – 447. [ZHENG Da, ZHANG Shuo, ZHENG Guang. Centrifugal model tests on toppling deformation of counter-tilt layered rock slopes based on change of slope angle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 439 – 447. (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] 杨国香, 叶海林, 伍法权, 等. 反倾层状结构岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2214 – 2221. [YANG Guoxiang, YE Hailin, WU Faquan, et al. Shaking table model test on dynamic response characteristics and failure mechanism of antidip layered rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2214 – 2221. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李祥龙, 唐辉明. 逆层岩质边坡地震动力破坏离心机试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 687 – 694. [LI Xianglong, TANG Huiming. Dynamic centrifugal modelling tests on toppling rock slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 687 – 694. (in Chinese with English abstract)]
- [11] ZHANG J H, CHEN Z Y, WANG X G. Centrifuge modeling of rock slopes susceptible to block toppling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2006, 40(4): 363 – 382.
- [12] CHEN Z, GONG W, MA G, et al. Comparisons between centrifuge and numerical modeling results for slope toppling failure[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(9): 1497 – 1508.
- [13] 代仲海, 胡再强, 尹小涛, 等. 工程荷载作用下缓倾角反倾层状岩质边坡变形稳定性分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊1): 412 – 418. [DAI Zhonghai, HU Zaiqiang, YIN Xiaotao, et al. Deformation stability analysis of gentle reverse inclined layer-like rock slope under engineering load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(Sup 1): 412 – 418. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 吴季寰, 张春山, 孟华君, 等. 抚顺西露天矿区滑坡易发性评价与时空特征分析[J]. 地质力学学报, 2021, 27(3): 409 – 417. [WU Jihuan, ZHANG Chunshan, MENG Huajun, et al. Temporal and spatial characteristics of landslide susceptibility in the west open-pit mining area, Fushun, China[J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(3): 409 – 417. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 高旭, 晏鄂川, 张世殊, 等. 弯曲倾倒模式下薄层状反倾岩质边坡锚固力研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(10): 2790 – 2799. [GAO Xu, YAN Echuan, ZHANG Shishu, et al. Research on anchorage force of a thin layered anti-dip rock slope under bending and toppling mode[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(10): 2790 – 2799. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 岑夺丰, 黄达, 黄润秋. 块裂反倾巨厚层状岩质边坡变形破坏颗粒流模拟及稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 984 – 993. [CEN Duofeng, HUANG Da, HUANG Runqiu. Simulation of deformation and failure for blocky anti-dip thick-layered rock slopes using particle flow code and analysis on its stability[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(3): 984 – 993. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 胡康, 任光明, 常文娟, 等. 基于节理不确定性的可靠度分析——以西藏某岩质边坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 53 – 60. [HU Kang, REN Guangming, CHANG Wenjuan, et al. Reliability analysis based on joint uncertainty: A case study of a rock slope in Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(2): 53 – 60. (in Chinese with English abstract)]

- abstract)]
- [18] 蔡静森,晏鄂川,王章琼,等.反倾层状岩质边坡悬臂梁极限平衡模型研究[J].岩土力学,2014,35(增刊1):15-28. [CAI Jingsen, YAN Echuan, WANG Zhangqiong, et al. Study of cantilever beam limit equilibrium model of anti-dip layered rock slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup1): 15-28. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王宇,李晓,王梦瑶,等.反倾岩质边坡变形破坏的节理有限元模拟计算[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2):3945-3953. [WANG Yu, LI Xiao, WANG Mengyao, et al. Failure mechanism of topping rock slope using jointed finite element simulation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup2): 3945-3953. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 程东幸,刘大安,丁恩保,等.层状反倾岩质边坡影响因素及反倾条件分析[J].岩土工程学报,2005,27(11):1362-1366. [CHENG Dongxing, LIU Daan, DING Enbao, et al. Analysis on influential factors and toppling conditions of toppling rock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1362-1366. (in Chinese with English abstract)]
- [21] ALZO'UBI A K, MARTIN C D, CRUDEN D M. Influence of tensile strength on toppling failure in centrifuge tests[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47(6): 974-982.
- [22] MAJDI A, AMINI M. Analysis of geo-structural defects in flexural toppling failure[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011, 48(2): 175-186.
- [23] 马文著,徐衍,李晓雷,等.基于黏聚力裂缝模型的反倾层状岩质边坡倾倒破坏模拟[J].水文地质工程地质,2020,47(5):150-160. [MA Wenzhu, XU Yan, LI Xiaolei, et al. A numerical study of the toppling failure of an anti-dip layered rock slope based on a cohesive crack model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5): 150-160. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 李彦奇,黄达,孟秋杰.基于离心机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)]
- [25] 游昆骏.澜沧江苗尾水电站右坝肩边坡倾倒岩体开挖变形响应及稳定性研究[D].成都:成都理工大学,2014. [YOU Kunjun. Study on deformation response and stability of toppling deformation rock by excavation at right bank abutment of Miaowei Hydropower Station on Lancang river[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 郑达,唐劲松.基于离心试验的边坡倾倒变形下弯折带演化特征[J].西南交通大学学报,2021,56(6):1232-1240. [ZHENG Da, TANG Jingsong. Slope toppling deformation and development characteristics of bending belts by centrifugal model test[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(6): 1232-1240. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 穆成林,裴向军,王睿,等.基于物理模型试验的含多层软弱夹层顺层开挖高边坡变形破坏特征分析[J].中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):61-67. [MU Chenglin, PEI Xiangjun, WANG Rui, et al. Analysis on deformation characteristics of a cutting high bedding rock slope with multiple weak layers based on physical model tests[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(3): 61-67. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 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)]
- [29] 黄建安,王思敬.含断续节理岩体的断裂力学数值分析[J].岩土工程学报,1983,5(3):39-52. [HUANG Jian'an, WANG Sijing. Numerical analysis of fracture mechanics for rock mass with discrete joints[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(3): 39-52. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 王建明,陈忠辉,张凌凡,等.反倾层状岩质边坡失稳的断裂力学分析[J].计算力学学报,2020,37(1):75-82. [WANG Jianming, CHEN Zhonghui, ZHANG Lingfan, et al. Instability mechanism of counter-tilt layered rock slope by fracture mechanics analysis[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2020, 37(1): 75-82. (in Chinese with English abstract)]

编辑:汪美华

实习编辑:刘真真