

软硬岩互层反倾高边坡变形破坏过程 物理模型试验研究

龚柏城¹, 苑久超², 王磊¹, 吉锋¹

(1. 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, 成都 610059;

2. 中国电建集团华东勘察设计研究院有限公司, 杭州 311122)

摘要: 反倾高边坡是工程界一类易致灾性地质体, 为揭示软硬岩组合条件下斜坡倾倒变形内在机理, 本研究通过配制相似材料, 采用底摩擦实验分析软硬岩不同组合条件下的边坡破坏模式, 并使用PIVlab工具箱进行分析。结果表明: 软硬岩边坡在变形破坏模式上有较大的差异性, 软岩边坡多以变形为主, 层间多发生倾倒弯曲, 垂直层面的裂隙产生较少, 不易形成贯通破裂面; 硬岩边坡多以倾覆折断破坏为主, 岩层内部拉张裂隙发育并连通, 最后产生阶坎状贯通破坏面; 软硬互层边坡在倾倒弯曲之后, 发生倾覆破坏, 直至形成贯通破裂面。在含有硬岩层的反倾边坡中, 更易出现“悬臂梁”式结构, 这表明硬岩层更易发生折断破坏, 所以硬岩层比例较多的反倾边坡, 更易发生整体破坏。PIVlab计算结果与试验现象过程吻合性好, 计算能正确反映边坡的位移矢量特点, 并划分出变形特征范围。

关键词: 软硬互层; 破坏机制; 底摩擦实验; PIVlab

中图分类号: TU457; TU458 **文献标识码:** A

EXPERIMENTAL STUDY ON PHYSICAL MODEL OF DEFORMATION EVOLUTION MODE OF HIGH SLOPE WITH REVERSE DIP OF SOFT AND HARD ROCK

GONG Bai-cheng¹, YUAN Jiu-chao², WANG Lei¹, JI Feng¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: Reversed high slopes are a type of geohazard commonly encountered in engineering practice. In order to unveil the intrinsic mechanisms governing the instability and deformation of slopes composed of both soft and hard rock combinations, this research adopts a method of preparing analogous materials and employs bottom friction experiments to analyze the failure patterns of slopes under different combinations of soft and hard rocks. Additionally, the PIVlab module is utilized for further analysis in this study. The results indicate significant differences in deformation and failure modes among slopes with different lithological properties. Slopes composed of soft rock mainly undergo deformation, with interlayer tilting and bending occurring frequently. Few vertical fractures are generated, and the formation of continuous rupture surfaces is less likely. On the other hand, slopes consisting of hard rock tend to experience overturning and fracturing as the dominant failure mode. Transverse joint development and connectivity within the rock mass result in the

formation of stepped continuous failure surfaces. In cases of slopes with alternating layers of soft and hard rock, after tilting and bending, fractures occur until continuous rupture surfaces are formed. In slopes containing hard rock layers, a "cantilever beam" type of structure is more likely to occur, indicating a higher propensity for fracturing failure in hard rock layers. In slopes where hard rock layers comprise a significant proportion, overall failure is more likely to take place. The results obtained from PIVlab calculations demonstrate a good agreement with observed phenomena during the experimental process. The calculated displacements accurately reflect the vector characteristics of the slopes and delineate the range of deformation features.

Key words: soft and hard interlayer; destruction mechanism; bottom friction test; PIVlab

边坡失稳及变形破坏在工程中是十分常见的工程地质问题,而岩质边坡破坏方式中有一种不易被察觉的破坏类型就是倾倒变形破坏^[1-4]。在工程中,反倾边坡由于其结构的特殊性,临空面无层面剪出口,被认为相对稳定,一般难以形成贯通性破裂面从而发生滑动。但近年来,水利水电工程的兴起,以及其他边坡相关的工程开展,越来越多反倾边坡的倾倒变形破坏现象被揭露,如秘鲁 Ghurgar 岩崩、巴东黄蜡石滑坡群等^[5, 6]。这类边坡普遍存在于河谷深切地区或人工开挖所形成的高陡地貌,若是发生倾倒破坏,将会导致滑坡等一系列次生灾害^[7],人们的生命财产和工程建设都将受到巨大的威胁。所以研究岩质反倾层状边坡的变形模式及发展破坏规律就显得尤为重要。

Talobra 等^[8]最早对反倾边坡的变形破坏做了描述;George Ter-Stepanian^[9]首次提出了钩状岩体蠕变的概念;Frietas 等^[10]明确提出将倾倒变形体划分为一个新的边坡破坏类型,并指出其发生条件的普适性;Goodman 等^[11]将反倾边坡的弯曲破坏类型细分为弯曲-倾倒、块体-倾倒和块状-弯曲-倾倒 3 种基础破坏模式,基于此,后续又引出了次生-倾倒的概念;而 Heok 等又将次生-倾倒细分为 5 种演化类型^[12];孙广忠等根据工程实践将边坡破坏类型划分为 8 种成因机制^[13]。

由于反倾边坡的特殊性,常规的边坡研究方法往往不能很好地分析其破坏模式。针对反倾边坡的变形破坏特征,Bray 等^[14]早在 20 世纪 80 年代初便提出了基底摩擦模型的理论,并进行了相应的试验及分析。更多学者基于此展开了大量的物理模型试验,并证明了该方法的可行性^[14-16]。

基于反层面边坡的变形破坏模式,前人的主要研究集中于对不同倾角条件下边坡的变形-破坏分析。王飞^[7, 17]等对软硬互层反倾边坡进行分析之后,发现软岩层多为倾倒-弯曲,硬岩层则多为块体-

倾倒。

综上所述,前人针对反倾边坡已通过大量的试验及分析总结,该类边坡的变形破坏分类也趋于完整。而对该类边坡的研究多以其整体结构等条件进行对比分析研究。本次研究在边坡倾角、岩层倾向等条件一定,调整软硬岩在边坡中的组合的情况下,对边坡可能发生的变形破坏模式进行分析,并将结果进行对比,分析其变形破坏机制。

1 变形体特征及变形史分析

研究区位于西藏左贡县玉区河下游段,变形体位于下游段右岸,整体坡度 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$,变形主要方向为北东向。变形体上游边界、下游边界均位于山坳处,整体上有明显下陷现象,变形体上游边界至下游边界宽约 690 m,变形方向长度约 370 m。该潜在变形体在地貌上呈圈椅状收拢,坡面较陡呈直线形,约 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ (图 1)。



图 1 变形体全貌

朵曲弄倾倒变形体为大型变形体,变形体内组成物质复杂、成因多变。据钻孔揭露,朵曲弄倾倒变形体中部滑体厚度达 65.55 m,物质组成可细分为 3 个亚层,由上至下分别为:粘土质砾;碎石、碎块石夹少量粘土;碎石、碎块石。基岩深度多在 65.55 m 以下,上部较浅。岩性为灰黑色薄层状绢云板岩与

变质砂岩互层,局部为绢云板岩。

变形体下滑挤压河道,河流被迫改道,河流侵蚀左岸。变形体底部右侧的阶地形成于第四系全新世,表明冲积物的形成在变形体的形成之后。因此变形体形成时期较早,现今已基本稳定,堆积较密实,后续无明显变形破坏迹象(图 2)。

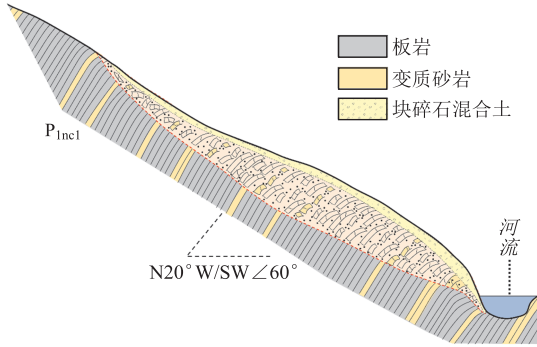


图 2 变形体地质剖面图

针对朵曲弄倾倒变形体,自重应力、不利结构面组合和卸荷变形对边坡的变形演化起到了控制性的作用,是主控因素。通过现场调查分析,朵曲弄倾倒变形体的形成及演化机制大致可分为 4 个阶段:河谷下切,前缘临空→倾倒变形,根部折裂→根部弯折段剪切破坏→完整岩体解体。

2 底摩擦物理模型试验

2.1 底摩擦试验仪器及原理

底摩擦试验,也叫基底摩擦试验。作为一种二维定性物理模拟试验方法,其取材简单、价格低廉、模拟相关性较好等特点,从而在工程上被科研人员广泛使用。经过很多学者的实践研究,该方法在模拟边坡变形破坏特征方面取得了较好的效果^[16, 18, 19]。

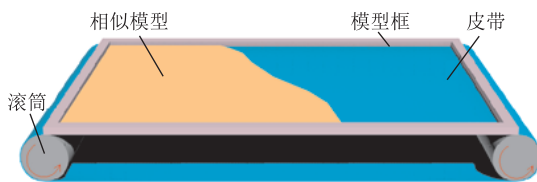


图 3 底摩擦试验仪工作原理图

底摩擦试验通过电机带动皮带转动,模型与皮带之间形成滑动摩擦力(面力)来模拟模型所受重力(体力)。试验仪原理如下:在传送带上以相似材料堆砌模型,使模型的剖面方向与传送带运动方向保持相同(图 3),模型框位于模型底部作为挡板,模型底部单位面积受到的摩擦阻力 F 为^[19]:

$$F = (\rho + \gamma_m t)\mu \quad (1)$$

式中, ρ 为作用于模型底面单位面积的法向应力/kPa; γ_m 为模型材料的重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$); t 为模型的厚度/m; μ 为模型底面与皮带之间的动摩擦因数。

依据圣维南原理,当模型的厚度控制在 0.8~1.2 cm 之间时,可认为模型底部每一点所受到的摩擦力都相同,等同于原始模型在天然条件下所处的重力状态^[16]。

本次研究底摩擦试验采用地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室的底摩擦实验仪器,如图 4 所示,该仪器的模型框尺寸大小为 80 cm×100 cm。仪器转速均匀可调控,可控制在 0.1~50 r/min 范围内,且一次性能制作的模型尺寸大,可满足大多数物理试验模型所需。

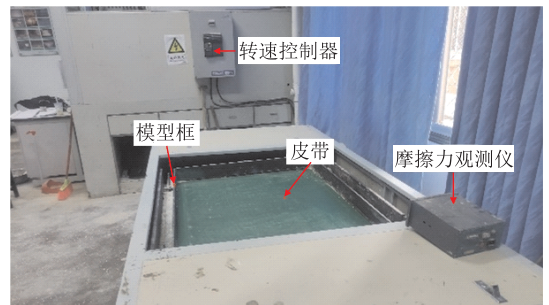


图 4 底摩擦仪器

2.2 相似模型及材料配比的确定

模拟边坡的变形破坏过程,需满足较多的相似性,包括几何相似、物理学性质相似、变形相似,这样试验结果才能比较符合实际边坡的真实变形破坏程度^[15]。即:

(1) 几何相似系数

$$C_s = \frac{S_Y}{S_M} \quad (2)$$

(2) 应力相似系数

$$C_\gamma = \frac{\gamma_Y}{\gamma_M} \text{ 或 } C_\sigma = \frac{\sigma_Y}{\sigma_M} \quad (3)$$

(3) 摩擦因数相似系数

$$C_f = \frac{f_Y}{f_M} \quad (4)$$

式中, C 为相似系数; S 为几何尺寸; γ 为材料的重度; σ 为应力; f 为摩擦系数; Y 为原型; M 为模型。上述相似系数确定的条件为

$$C_\sigma = C_\gamma C_s, C_f = 1 \quad (5)$$

模型实际长度 630 m,高度 455 m,模型几何条件相似系数 C_L 的确定,与多方面因素紧密相关,包括试验要求的精度、模拟范围、配制合理模型的难易

程度与制作模型的工作量等。合理选取几何相似系数 C_L 是试验中非常关键的环节。本次试验在综合考虑朵曲弄变形体实际的基础上,确定几何条件相似比为 $C_L = 787.5$,容重相似比为 $C_\gamma = 1$,摩擦系数相似比为 $C_f = 1$,应力相似比为 $C_\sigma = C_\gamma \times C_L = 787.5$ 。根据地质原型与相似比确定模型长 80 cm,高 58 cm。

天然边坡的力学性质及岩性组成较为复杂,本次研究主要研究硬岩层在软岩中对边坡整体破坏特征的影响,在选取相似材料方面着重考虑岩性方面的差异,而其他地质作用力对岩体强度的影响忽略不计。

宁奕冰等应用正交设计法对岩石相似材料的配比进行了深入研究,对各材料配比组的参数指标进行了试验测定,试验过后总结出了参数的规律性,可通过调整配比满足不同类型的岩石相似材料的配置需求;张波等在此基础上通过调整材料配比,总结出骨料、胶结剂及添加剂等材料对整体的模型性质的影响,给出了板岩、砂岩等常见岩性的配比;王飞等在分析软硬互层反倾边坡倾角变形机制时,发现软硬岩在变形破坏方式上有较大不同:软岩多为弯曲倾角破坏模式,而硬岩则多发生块状-弯曲倾角破坏^[17,19,20]。

基于以上资料,在查阅大量相关文献以及试验的开展,采用的材料配比为:绢云板岩相似材料及配比:重晶石粉:石英砂(60目):石蜡油=4.5:4.5:1.1;变质砂岩相似材料及配比:重晶石粉:石英砂(60目):石蜡油=3:6:0.9。根据反复试验的结果,两种材料试验过程中所产生的变形破坏符合各自所模拟岩性的破坏特征。

通过直剪试验计算出相似材料的正应力、剪应力平均值,再由库伦定律计算出相似材料的力学参数分别为:绢云板岩相似材料: $c = 5.70$ kPa, $\varphi = 40.28^\circ$;变质砂岩相似材料: $c = 10.21$ kPa, $\varphi = 47.64^\circ$ (c 为材料粘聚力,单位 kPa; φ 为材料内摩擦角)。

为了得到相似模型与皮带之间的摩擦系数 f ,采用摩擦角法获取摩擦系数。将试样放在皮带上,使试验仪器倾斜一定角度 α ,当试样刚好发生相对滑动时,记录下此时的角度 α ,此时试样的受力情况如下:

$$G = mg \quad (6)$$

$$N = mg \cos \alpha \quad (7)$$

$$F = f \cdot N \quad (8)$$

由受力平衡状态可以得出:

$$F = G \sin \alpha \quad (9)$$

由式(6)~(9)联立可得出:

$$f = \tan \alpha \quad (10)$$

式中, m 为模型质量; g 为重力加速度; α 为模型所处斜面角度; G 为模型所受重力; N 为模型所受支持力; F 为模型所受摩擦力。

经过计算,此时的摩擦系数 f 为 0.43~0.52。

2.3 试验方案设计

本次试验采用朵曲弄反倾边坡相似模型,用以研究软硬岩对岩质边坡倾角变形破坏特征及失稳演化过程的差异作用。岩层倾角根据现场地质资料设置为 70° ,坡度根据现场地形反演设置为 65° 。试验设计 3 种概化模型,软岩模型、硬岩模型及软硬互层模型,3 种模型各一组。试验过程采用相机进行记录(视频),以获取模型的变形及破坏整体情况。其中软硬互层模型板岩层为反倾层面,并夹杂少量变质砂岩层,在制备时需逐层充填,体现其层面结构,每隔一定板岩层,填制一层砂岩层。

获取到试验全过程高清视频后,对其进行矫正剪辑,以确保后续分析的顺利进行。Matlab 作为一种常用的数据分析、图像处理软件,具有使用简便,处理速度快,适用性广泛等特点。William Thielicke^[21]等开发的,用于 Matlab 粒子图像测速的 PIVlab 工具模块和应用程序,广泛运用于流动分析,也可用于其他运动轨迹分析,其良好的图像互相关性可以很好地量化图片之间粒子群的位移。近几年来,PIVlab 在岩土体的领域也被广泛使用,其优秀的位移监测功能对边坡的变形、破坏等有着良好的处理效果,一些难以取得数据的物理试验模型也不再只处于定性分析^[22]。

3 试验现象及结果分析

3.1 破坏现象分析

3.1.1 软岩试验

如图 5(a)所示,在最初变形阶段,边坡受到重力作用的影响,坡顶处及坡肩产生些许变形,此时边坡整体变形较小,主要集中于坡肩附近。

如图 5(b)所示,随着重力场的持续作用,坡体的变形程度逐渐加快,坡肩位置的变形更为明显。此时坡体由于差异性变形的原因,坡肩位置形成空腔,变形程度相对于第 1 阶段提高较显著。

如图 5(c)所示,在摩擦力模拟的重力场以及边坡后面部分岩体的推力持续作用下,边坡的倾角-弯曲程度提升,坡肩仍然是变形程度最大的区域,此时由于变形加剧,形成的空腔闭合,层状岩体也进一步

弯曲变形。随着岩层的持续倾倒-弯曲变形,坡体中部及弯曲变形处的岩层产生细微的垂直层面的拉张裂隙。

如图 5(d)所示,此时边坡整体变形程度明显变

小,整个边坡逐渐趋于缓慢的蠕动变形,阶段 3 产生的拉张裂隙有少许闭合,靠近坡脚处岩柱产生新的拉张裂隙,边坡整体变形趋于稳定,坡肩处弯曲变形程度较大。

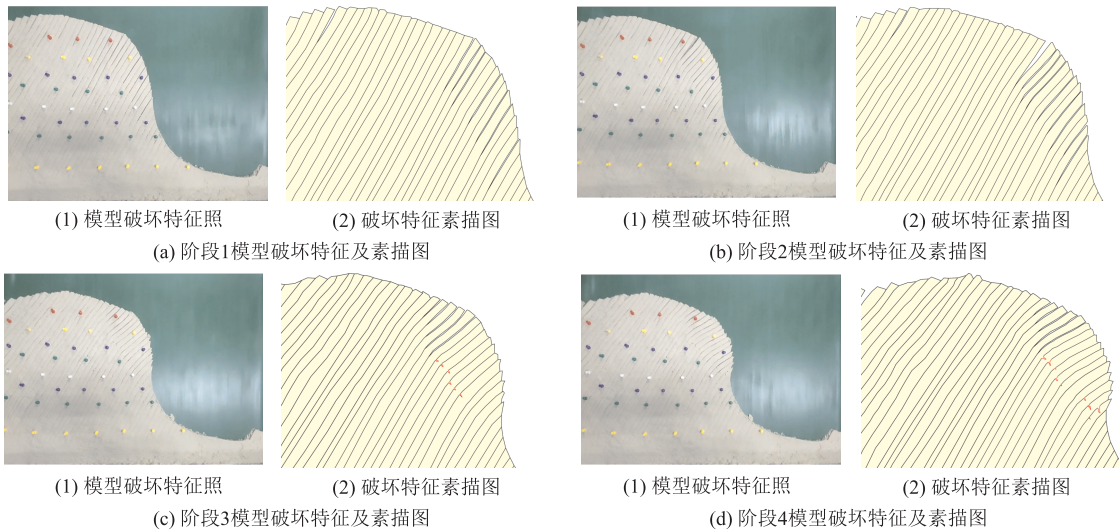


图 5 软岩边坡模型倾倒变形过程图

根据图 6 所示,软岩反倾边坡的弯曲倾倒现象是在重力持续作用下,岩层向临空面发生明显的倾倒-弯曲现象。变形量从坡内向坡外逐渐增大,其中坡肩处形变程度最明显。边坡顶部的变形出现截断现象,当岩层弯曲末端处受到的正应力超过自身的

抗拉强度时,该点垂直岩层的方向会产生较小的拉张裂隙,但是确定潜在破裂面的位置较难。边坡整体变形速度缓慢,随着岩层弯曲程度的加深,最终趋向于自稳定状态。

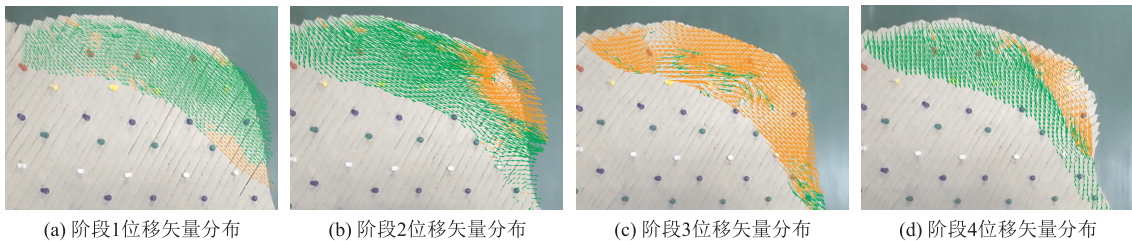


图 6 软岩边坡变形特征及位移矢量分布

3.1.2 硬岩试验

如图 7(a)所示,边坡坡肩处出现轻微弯曲,反倾岩层因为重力作用开始向临空面出现轻微的整体倾覆倾斜,并在坡体后缘形成较为明显的空腔结构。岩层的变形在坡肩处最为明显,整体表现出与软岩相似的倾倒-弯曲。

如图 7(b)所示,在重力和上覆岩层推挤力的共同作用下,坝肩处的层状岩体出现明显的拉张裂隙,导致靠近坡脚处岩层发生明显的剪切破坏和倾覆变形。

如图 7(c)所示,由于上个阶段靠近坡脚处岩层的破坏,支撑坡体中上部岩层的支持力消失,坡体中上部发生更为明显的倾覆,拉张裂隙逐渐贯通,形成

台阶状裂隙,其中坡肩位置的变形最为明显。

如图 7(d)所示,随着拉张裂隙扩展并相互贯通连接,最终形成台阶状贯通破裂面,拉张裂隙演变为折断破坏,坡体发生进一步的倾覆,裂隙相互贯通形成连续的台阶状破坏面,边坡开始进入整体破坏阶段。

硬岩边坡的变形位移量分布如图 8 所示。在摩擦力和上层岩层的推动情况下,块体沿着潜在的破裂面整体倾向坡外。这种变形是通过每个独立的岩层下部端点为支点发生折断破坏,从而形成层叠式悬臂梁结构,导致整体的倾覆破坏。破裂面呈现处阶坎状,由于破裂面两边岩层的形变程度差异较大,岩层的折断较明显。整体的倾覆比软岩局部的

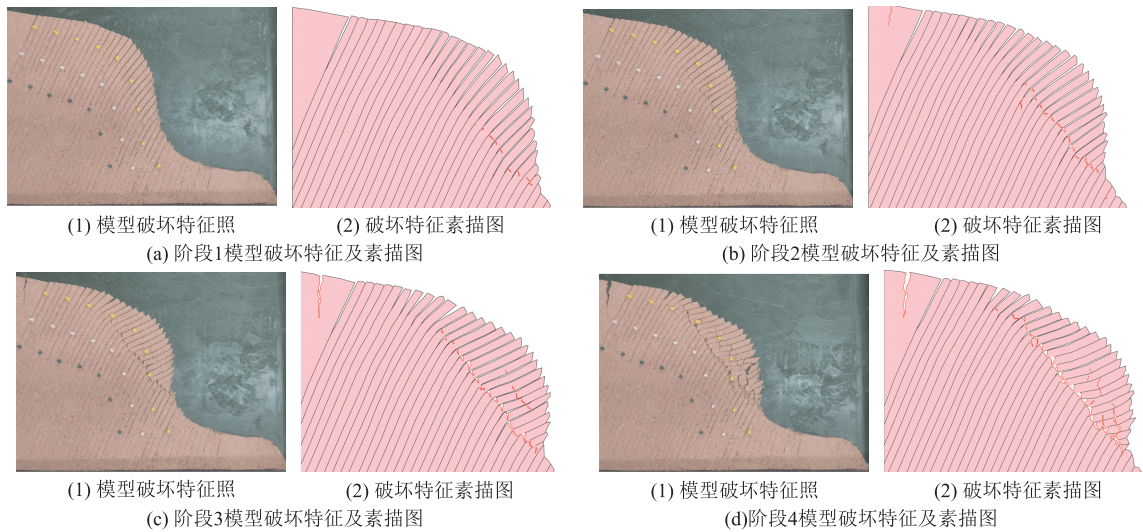


图7 硬岩边坡模型倾倒变形过程图

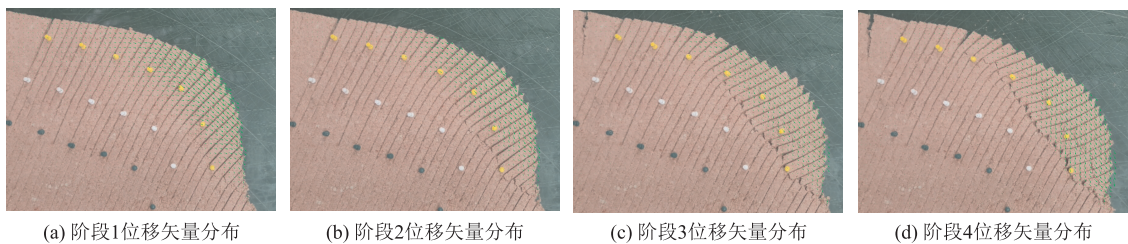


图8 硬岩边坡变形位移矢量分布

弯曲倾倒的程度更为剧烈,发生过程也较快,更容易导致边坡整体失稳破坏。

3.1.3 软硬岩互层试验

如图9(a)所示,互层边坡的变形首先在中上部出现,此时软岩层和硬岩层的变形差异并不明显,均表现为轻微的弯曲变形。在试验开始阶段,边坡模型显示微弱的变形现象,主要集中在坡顶附近,以塑性变形为主,边坡模型的变形主要表现为层面的张开。

随着应力的持续作用,如图9(b)所示,边坡的变形不断向坡内和坡脚扩展,岩层开始出现弯曲现象,并局部可见切层裂隙发育,这些裂隙主要出现在硬层和较硬层中,而在软层中几乎未见切层裂隙,变形主要以弯曲为主。然而,坡体中下部并未出现明显的变形现象。

随着变形量的差异增大,如图9(c)和图9(d)所示,较硬层与软层之间出现较大的间距,甚至形成空腔,使得较硬层的临空条件变好,呈现出“悬臂梁”特征。这些变形现象表明软硬层发生差异变形。其机制为:为适应边坡的变形,岩层开始出现较大的弯曲变形,由于硬岩的刚度较大,产生切层拉张裂隙所需的弯曲变形量较小。而软岩的刚度较小,塑性较强,

在相同变形条件下,依靠自身的塑性变形就能满足边坡的变形需求。然而,在坡体内部,由于岩体受到自身重力较大的影响,足以使硬岩产生拉张裂隙。但在坡表附近,岩体受到的重力较小,自身重力在短时间内不足以使硬岩产生切层裂隙,从而导致软硬岩层之间产生较大的变形差异,宏观表现为形成空腔。

软硬互层反倾边坡兼具硬岩与软岩变形破坏的特点,但又存在差异。如图10所示,软岩层在重力作用下逐渐向临空面发生渐变的弯曲变形,当弯曲变形的应力超过其抗拉强度时,会产生垂直层面的拉张裂隙。然而,由于变形过程具有整体性,潜在的破坏面位置难以确定,最终边坡趋于稳定。相比之下,硬岩层在重力作用下呈现向坡外倾覆的趋势,形成层叠式“悬臂梁”特征。坚硬的岩层以最下方的端点为支点进行刚性倾覆式破坏,导致块体之间形成空腔,呈台阶状。由于“悬臂梁”的存在,空腔两侧的岩柱变形差异较大,随着重力作用,最终岩层折断,形成贯通的破坏面,导致整体失稳破坏。当软硬岩层结合在一起时,由于硬岩的倾覆特征,即使软岩达到其变形极限,仍存在变形的空间,边坡无法达到自稳定状态。垂直的拉张裂隙进一步扩展,最终与硬

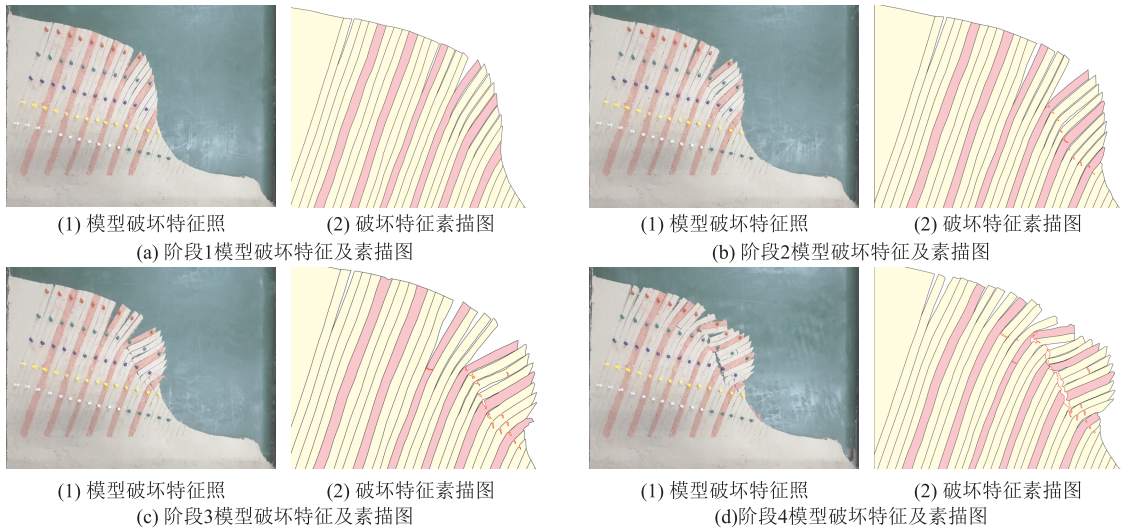


图 9 硬岩边坡模型倾倒变形过程图

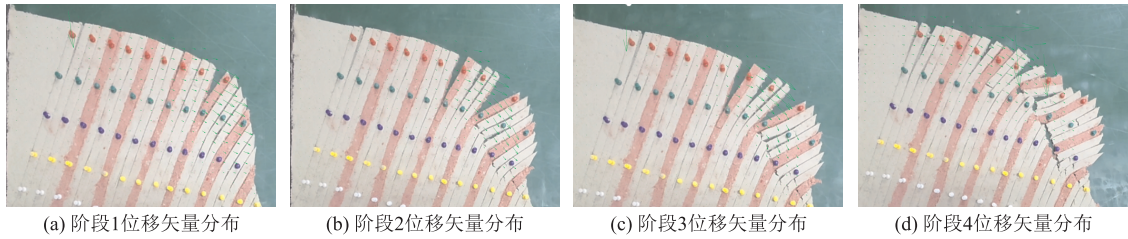


图 10 软硬互层边坡变形特征及位移矢量分布

岩的破坏面贯通,导致整体失稳破坏。因此,这类边坡的变形过程既包含了软岩的弯曲变形破坏,也包括了硬岩的倾覆式刚性破坏,并最终形成层叠式“悬臂梁”特征,导致整体破坏。

3.2 倾倒理论分析

选取 3 组试验中变形程度最高的软硬岩互层模型进行 Goodman-Bray 倾倒理论分析。

根据倾倒理论分析的原理,块体稳定后应满足以下关系^[23]:

$$\frac{\Delta L}{H} < \tan \alpha < \tan \varphi \quad (11)$$

式中, ΔL 为切割后反倾岩层宽度/m; H 为岩层的垂直高度/m; α 为边坡整体坡度; φ 为岩层材料的内摩擦角。

本次研究 ΔL 取 0.015 m。通过试验获得岩层内摩擦角分别为砂岩 $\varphi_1 = 47.64^\circ$, 板岩 $\varphi_2 = 40.28^\circ$ 。

通过测量,最上部块体 $\alpha = 50^\circ$, 为砂岩层划分块体最小坡角(图 11), $H = 0.33$ m, 算得 $\Delta L/H = 0.045$, $\tan \alpha = 1.19$, $\Delta L/H < \tan \alpha$, 满足式(11)。

砂岩层内摩擦角 $\varphi_1 = 47.64^\circ$, 所以可以得到 $\tan \alpha > \tan \varphi$, 不满足式(9), 则可以得出整个边坡块体(层面划分部分)处于不稳定状态, 整个边坡均有

发生倾倒变形或者滑动的趋势。结合本次研究底摩擦模型试验, 边坡从顶部开始发生差异性变形从而导致坡肩形成空腔等, 随后进一步发生倾倒变形破坏, 这表明 Goodman-Bray 倾倒理论及底摩擦物理模型试验的准确性和可靠性。

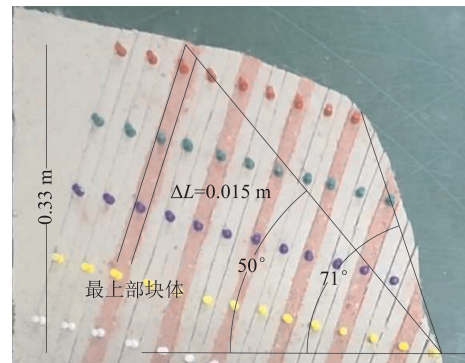


图 11 底摩擦模型坡度

4 结果对比分析

相同地质结构条件下, 不同软硬岩层的边坡变形破坏方式不同。软岩边坡变形特征表现为: 倾倒-弯曲→倾倒-拉裂→变形趋于稳定。硬岩边坡变形特征变现为: 倾倒-拉裂→倾倒-拉裂逐渐演化。软硬互层边坡变形特征表现为: 倾倒-弯曲→倾倒-拉

裂→倾覆-折断破坏。

比较3种边坡类型各自的变形破坏现象:

软岩边坡在最初变形阶段边坡整体变形不明显,主要集中于坡肩附近,随着重力场的持续作用,坡肩位置形成细小空腔,接着空腔闭合,边坡也进一步弯曲变形。随着柱状岩体的进一步弯曲变形,坡体中部及弯曲变形处岩柱产生细微的垂直层面拉张裂隙,随后整个边坡逐渐趋于缓慢的蠕动变形,阶段3产生的拉张裂隙有少许闭合,边坡整体变形趋于稳定。

硬岩边坡变形首先靠近坡肩处部分向临空面产生明显倾倒,随后下部岩层拉张裂隙扩展并贯通,坡脚处岩层沿潜在破裂面产生明显的折断及倾覆。然后靠近坡脚处岩层剪坏后,坡体中上部岩柱也随即产生自上而下的折断变形。最后伴随折断面的贯通,最后产生阶坎状连通破裂面,岩层沿破坏面产生明显折断与倾覆变形,边坡进入整体破坏阶段。

软硬互层边坡兼具软岩和硬岩的特点,但是破坏模式上略有不同,互层边坡变形首先出现在中上部,此时软岩层和硬岩层变形差异不明显,均表现为轻微的弯曲变形,边坡模型的变形主要表现为层面的张开。随着应力的持续作用,岩层开始出现弯曲现象,局部可见切层裂隙发育,且裂隙主要发育于硬层中,而软层中几乎未见切层裂隙,多以弯曲变形为主。接着由于变形量的差异,硬层与软层之间出现较大的间距从而形成空腔,使得较硬层临空条件变好,表现出“悬臂梁”特征。最后随着硬岩的倾覆断裂,软岩紧跟着弯曲变形至极限,随后出现拉张裂隙直到与硬岩层贯通。

通过比较软硬岩边坡不同组合的变形破坏特征,最终发现硬岩边坡的层面更易发生倾覆折断破坏,从而导致整个边坡出现变形破坏。而软岩层多发生倾倒变形,达到一定变形程度时边坡就会趋于自稳定状态,不会进一步形成层间贯通面从而导致边坡整体破坏。最后软硬互层边坡兼具二者的特点,在硬岩层发生倾覆折断破坏后,会影响软岩层达到最大变形后的稳定状态,从而使软岩层进一步发生倾倒变形破坏甚至达到硬岩层的破坏状态,从而导致边坡的整体破坏。整体而言,硬岩层对于边坡的破坏影响较大,若层面中存在硬岩层,那么硬岩层的破坏也会极大影响到其他岩层的变形破坏情况。

在第1章通过现场调查和勘探成果,得出朵曲弄倾倒变形体的形成及演化机制大致可分为4个阶段:河谷下切,前缘临空→倾倒变形,根部折裂→根部弯折段剪切破坏→完整岩体解体。3组模型试验

效果都很好地印证了朵曲弄变形体变形破坏模式的合理性。其中最接近的是软硬岩互层试验组,该组试验满足朵曲弄变形体软岩比例大于硬岩比例的条件,且试验结果表明,在硬岩层发生倾覆折断破坏后,会影响软岩层达到最大变形后的稳定状态,从而使软岩层进一步发生倾倒变形破坏甚至达到硬岩层的破坏状态,从而导致边坡的整体破坏,符合朵曲弄变形体的形成演化机制特征。

5 结论

(1) 软岩边坡和硬岩边坡变形破坏模式差异较大。软岩边坡多以倾倒变形为主,层间多发生弯曲倾倒变形,垂直层面裂隙产生较少,不易形成贯通的破裂面;硬岩边坡多以块状倾覆折断破坏为主,岩体横向节理不断发育并贯通,折断面及横向节理的不断搭接,最终形成台阶状贯通破坏面。

(2) 软硬互层边坡不同于软岩和硬岩,但是又兼具二者的特点,软岩层发生弯曲倾倒变形,硬岩层发生块状倾覆折断,当硬岩层完全折断破坏时,在其之上的软岩层则会继续弯曲变形,直至形成贯通的破裂面,随后破坏的软岩层之上的硬岩层又形成悬臂梁模型,继而发生块状折断,这种变形模式一直循环,直至整个边坡形成贯通破裂面而破坏。

(3) 在包含硬岩层的边坡中,更易出现“悬臂梁”式结构,这说明硬岩层更易发生折断破坏从而影响边坡整体,硬岩层含量高的反倾边坡,更易发生整体破坏。

(4) PIVlab 计算结果与试验现象过程相吻合,计算能正确反应不同类型边坡的位移矢量特点,能够划分出变形特征范围。本次研究的试验成果与力学期望值一致性较好,不足之处是样本试验数量不足,未完全考虑物理性质相似。

参考文献

- [1] 雷杰,蔡之文,杨恩涛,等. 巴基斯坦 KKH 二期千枚岩地层某反倾边坡变形破坏模式及成因分析[J]. 灾害学,2018, 33(S1): 177-179.
- [2] 陶志刚. 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.
- [3] 白雪亮. 马来西亚某水电站倾倒地边坡成因机制分析[J]. 矿产与地质,2020, 34(4): 797-803+809.
- [4] 易武. 三峡库区秀龙村反倾岩质边坡变形破坏机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016, 27(4): 13-17.
- [5] 常宏,王旭升. 滑坡稳定性变化与地下水非稳定渗流初探——以三峡库区黄蜡石滑坡群石榴树包滑坡为例[J]. 地质科技情报,2004, 23(1): 94-98.

- [6] 乔治·普兰夫克. 秘鲁丘加(CHUNGAR)岩石崩塌及造成的涌浪[J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 1984, 2(13): 77-79.
- [7] 王飞. 基于演化过程的互层斜坡深层倾倒稳定性评价[J]. 地质科技情报, 2019, 38(5): 186-194.
- [8] TALOBRA, J. La mécanique des roches appliquée aux travaux publics[R]. 1957.
- [9] TER-STEPANIAN, G. Über den Mechanismus des Hakenwerfens[J]. Rock Mechanics and Engineering, 1965.
- [10] FREITAS D M H, W R J. Some field examples of toppling failure[J]. Geotechnique, 1973, 23(4): 495-514.
- [11] GOODMAN R E, B J W. Toppling of rock slopes [C]. Proceedings of ASCE Specialty Conference, Rock Engineering for Foundations and Slopes, Colorado; Boulder, 1976, (2): 201-234.
- [12] HOEK E, B J ed. Rock slope engineering[M]. The Institute of Mining and Metallurgy; London, 1981.
- [13] 孙广忠, 张文彬. 一种常见的岩体结构——板裂结构[J]. 地质科学, 1985, 20(3): 275-282.
- [14] BRAY J W, G R E J. The theory of base friction models[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(6): 453-468.
- [15] 陈诗才. 底面摩擦模拟试验的原理与应用[J]. 水文地质工程地质, 1988, 11(4): 38-40.
- [16] 李任杰. 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.
- [17] 王飞. 雅砻江上游深层倾倒体发育特征及形成演化机制[J]. 山地学报, 2018, 36(3): 411-421.
- [18] WHYTE R. A study of progressive hanging wall caving at Chambishi copper mine in Zambia using the base friction model concept[R]. Imperial College, London University; London, 1973.
- [19] 宁奕冰. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2009-2020.
- [20] 王飞, 唐辉明. 雅砻江上游互层斜坡倾倒变形破坏机制与演化[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1501-1508.
- [21] Thielicke, W. and R. Sonntag, Particle Image Velocimetry for MATLAB: Accuracy and enhanced algorithms in PIVlab[J]. Journal of Open Research Software, 2021, 9(1): 12: 1-14.
- [22] 李露露. 单轴压缩条件下含三叉裂隙类岩石试样力学特性的细观研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3668-3676.
- [23] 吴琴. 岩质边坡崩塌破坏机理及其稳定性分析方法[D]. 重庆交通大学, 2010.

作者简介: 龚柏城(1998—),男,硕士研究生,研究方向为地质灾害稳定性预测评价。E-mail: 1305238035@qq.com