

引用格式: 柳万里, 周春宏, 程万强, 王滨, 王磊. 含向斜软硬互层岩质边坡失稳离心模型试验[J]. 山地学报, 2025, 43(1): 132-143.

LIU Wanli, ZHOU Chunhong, CHENG Wanqiang, WANG Bin, WANG Lei. Centrifugal model test on instability of synclinal soft-hard interbedded rock slope [J]. Mountain Research, 2025, 43(1): 132-143.

## 含向斜软硬互层岩质边坡失稳离心模型试验

柳万里<sup>1</sup>, 周春宏<sup>1\*</sup>, 程万强<sup>1</sup>, 王滨<sup>1</sup>, 王磊<sup>2</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122;

2. 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)

**摘要:** 中国西南地区超过 76% 的深层倾倒地发育于软硬互层边坡中。工程界对这类特殊结构体的认知深度不足, 现有工程模型多忽略地质构造影响, 对构造-岩性耦合效应考虑不足。本研究以卡拉水电站一江滑坡为研究对象(杂谷脑组典型软硬互层边坡), 创新性构建含向斜构造的地质概化模型。通过大型离心模型试验(以石英砂、水泥、重晶石粉、石膏、水为原料制作相似材料), 实现构造控制型倾倒地变形的全过程动态模拟, 揭示软硬岩层差异破坏的时空演化规律。研究发现: (1) 位移场呈现显著空间分异。坡面各监测点的竖向位移曲线按演化趋势可划分为 6 个阶段。坡顶处累计竖向位移最大, 约 81.1 mm; 坡体中部位移次之, 约 10 mm; 坡脚位移最小, 约 8.3 mm。(2) 破坏演化具阶段性。边坡模型由坡顶开始发生倾倒地变形破坏, 位于坡体中部的向斜产生压缩变形与小角度旋转( $\leq 3.1^\circ$ ); 大量压致拉裂缝集中发育于向斜上部坡体内, 并贯通形成倾倒地折断面。(3) 构造缓冲效应显著。软硬互层岩体结构导致的非协调变形与坡体中部向斜构造压缩变形的缓冲作用, 削弱了边坡上部岩体对向斜下部坡体的推挤压缩作用, 宏观表现为向斜以下坡体无明显变形。(4) 含向斜软硬互层反倾岩质边坡的变形失稳模式为自上而下的非协调式深层倾倒地破坏。本研究能够丰富软硬互层这一特殊结构岩质边坡的孕灾变形与成灾失稳理论, 并为西南地区同类型边坡的防治设计提供科学依据。

**关键词:** 离心试验; 软硬互层; 复杂结构边坡; 倾倒地变形; 失稳机制

**中图分类号:** P642.2

**文献标志码:** A

倾倒地作为岩质斜坡中广泛发育的典型变形现象<sup>[1]</sup>, 特指层状反坡向结构及陡倾角顺层斜坡的表层岩体在自重作用下发生蠕变, 向临空方向持续弯曲、折断或倾覆。传统认知中, 此类变形多局限于浅表层, 鲜有大规模滑坡案例。然而随着中国西南地区高陡边坡水利水电工程的密集开发, 工程揭露的深层倾倒地变形体已呈现显著增加趋势, 其中雅砻江上游互层斜坡(变形深度  $> 200$  m)<sup>[2]</sup>、澜沧江右岸古滑坡(变形深度 200 m)<sup>[3]</sup>, 以及二古溪滑坡(倾

倒地深度  $> 100$  m)<sup>[4]</sup>等典型案例表明, 深层倾倒地已逐渐成为威胁重大工程安全的关键地质隐患<sup>[5]</sup>。学术界通过模型试验、数值分析、理论计算等多种手段, 对反倾倒地深层倾倒地变形的影响因素<sup>[6]</sup>、破坏模式<sup>[7-8]</sup>、失稳机理<sup>[9]</sup>及稳定性<sup>[10]</sup>进行了深入探究, 这些成果为深层倾倒地变形研究奠定了理论基础。

由软硬互层岩体构成的反倾倒地是一类特殊倾倒地构造。工程实践发现, 中国西南地区超过 76% 的深层倾倒地发育于软硬互层边坡中<sup>①</sup>。在差异岩性

收稿日期(Received date): 2024-11-02; 改回日期(Accepted date): 2025-02-19

基金项目(Foundation item): 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司科技立项目(KY2022-KC-02-03)。[Science and Technology Project of Power China Huadong Engineering Corporation Limited(KY2022-KC-02-03)]

作者简介(Biography): 柳万里(1993-), 男, 安徽宿州人, 博士, 主要研究方向: 工程地质、地质灾害。[LIU Wanli (1993-), male, born in Suzhou, Anhui Province, Ph. D., research on engineering geology and geological disasters] E-mail: liu\_wl@hdec.com

\* 通讯作者(Corresponding author): 周春宏(1965-), 男, 本科, 正高级工程师, 主要研究方向: 工程地质、水利水电。[ZHOU Chunhong (1965-), male, B. S., professor of engineering, research on engineering geology and hydraulic and hydropower] E-mail: zhou\_ch@hdec.com

① 《第一次全国自然灾害综合风险普查公报》。

作用下,岩层即使经历大变形仍能维持整体连续性,从而发育深层倾倒变形体<sup>[11]</sup>。相较于均质岩坡,软硬互层体系在几何形态(层厚比、倾角组合)、结构特征(界面接触关系)及力学行为(刚柔耦合效应)等方面均表现出高度复杂性。其硬岩层以脆性破裂为主导,而软岩层则呈现塑性流变特征,这种变形机制的时空差异导致破坏进程显著滞后,大幅增加了失稳机理的解析难度。

为揭示软硬互层边坡的失稳机制,学者们开展了系列研究,取得了丰富的成果:(1)岩体结构对倾倒发育具有层级控制效应<sup>[12]</sup>,软硬岩层厚比对破裂面形态具有显著调控作用<sup>[13]</sup>;(2)倾倒变形影响因素敏感性由高到低依次为边坡形态、层面参数、岩体力学参数的主控序列<sup>[14-16]</sup>;(3)岩层倾角与坡角的空间耦合影响反倾互层边坡倾倒稳定性<sup>[17]</sup>。

物理模型试验成功复现了软硬互层边坡的渐进破坏过程<sup>[18]</sup>,而离心模型技术凭借应力场高还原度(相似度>92%)<sup>[19]</sup>,已成为揭示孕灾-成灾全过程的核心工具,以国内学者黄达、马昊等研究具有代表性<sup>[20-24]</sup>。黄达团队提出三阶段演化模型(起始蠕变-稳态变形-失稳破坏),发现坡角与变形规模呈指数关系( $R^2 = 0.87$ )<sup>[20-22]</sup>,为工程预警提供了量化依据。

尽管取得系列进展,但当前研究仍存在局限:其一,现有成果多聚焦于理想化均质边坡,对软硬互层这类特殊结构体的认知深度不足,而且研究参数多局限于岩性、坡度等常规因素<sup>[25-27]</sup>;其二,现有模型多忽略地质构造影响,对褶皱、断层等地质构造的耦合效应关注不足,而实际案例显示向斜区滑坡发生率较背斜区高出42%<sup>[28]</sup>,如忠县向斜控制的边坡

群分异<sup>[29]</sup>、那伦向斜主导的料场演化<sup>[30]</sup>等。这提示构造-岩性耦合机制可能是深层倾倒变形的关键诱因。基于上述科学问题,本研究以卡拉水电站一江滑坡为研究对象(杂谷脑组典型软硬互层边坡),创新性构建含向斜构造的地质概化模型。通过大型离心模型试验,首次实现构造控制型倾倒变形的全过程动态模拟,揭示软硬岩层差异破坏的时空演化规律。研究成果不仅可完善特殊结构边坡失稳理论体系,更可为西南地区在建水电工程边坡防护设计提供直接技术支撑,具有显著的科学价值与工程应用前景。

## 1 地质背景与滑坡特征

### 1.1 地质环境背景

卡拉水电站位于四川省凉山彝族自治州木里藏族自治县境内的雅砻江中游。库区自一江至草坪约30 km的河段内,沟壑纵横,地质环境复杂,坡体稳定性差,自上游至下游共发育9处巨型滑坡(图1),依次为一江滑坡、周家滑坡、八通滑坡、上田镇滑坡、田三滑坡、岗尖滑坡、下马鸡店滑坡和草坪滑坡。

库区雅砻江左右两岸地层为中生界三叠系上统杂谷脑组,岩性为变质砂岩、大理岩、砂质板岩及含炭质板岩等<sup>[31-32]</sup>,岩体多以软硬互层或夹层的形成出露(图2)。地质调查发现,电站所处河谷区地层主要为杂谷脑组二段的第2亚段( $T_3z^{2-2}$ )至第17亚段( $T_3z^{2-17}$ ),左岸出露地层为 $T_3z^{2-9} \sim T_3z^{2-17}$ ,右岸为 $T_3z^{2-2} \sim T_3z^{2-9}$ (图3)。

杂谷脑组地层的各类岩体中,变质砂岩、大理岩



图1 卡拉水电站库区滑坡分布图

Fig. 1 Distribution of landslides in the reservoir area of the Kala Hydropower Station

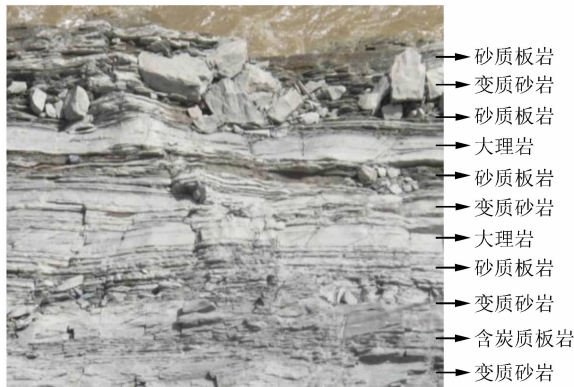


图2 杂谷脑组软硬互层岩性组合特征

Fig.2 Lithologic assemblage characteristics of the soft-hard interbedded in Zagunao Formation

及砂质板岩属硬质岩,刚度较大,变形以脆性破裂为主导;含炭质板岩岩性较软,刚度较小,相同变形量条件下较难产生切层裂隙,呈现塑性流变特征。

## 1.2 滑坡发育特征

一江滑坡发育于雅砻江左岸中倾坡内偏上游的反倾斜坡内,总体呈近东西向扇形展布(图4),左右两侧以冲沟为界,冲沟交汇于以基岩山崖为界的后缘,属典型双沟同源地形,前缘高出雅砻江江面150~200 m。滑坡体轮廓清楚,位于早期形成的滑坡圈谷内。滑坡上下游宽约1500 m,前后缘长约1300 m,面积约 $145.9 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,平均厚度57.81 m,体积约 $8433.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,属特大型滑坡。坡体地形前陡后缓,总体坡度约 $33^\circ$ ,高程2460 m以上坡度

较缓、以下坡度较陡。

一江滑坡为古滑坡体,其滑体由表层崩坡积层( $Q_4^{\text{col+dl}}$ )碎石混合土、滑坡堆积层( $Q^{\text{del}}$ )、滑带土等组成。下伏基岩为杂谷脑组二段( $T_3z^2$ )灰黑色薄层—中厚层炭质板岩、千枚岩及大理岩,产状变化较大,为 $N25^\circ W, NE \angle 55^\circ \sim 75^\circ$ 。滑坡不同区段的物质组成与地形坡度差异明显,坡度较陡的前部以碎石混合土为主,坡度较缓的后部以含碎石粉土、砾石为主,据此将滑坡体以2460 m高程为界划分为A、B两区。滑坡工程地质剖面见图5。

目前,滑坡体除冲沟两侧存在局部小规模崩塌破坏外,未见整体变形迹象,稳定性较好。上游侧中上部和后缘崩塌基岩处发育少量延伸约3~8 m、张开约3~5 cm的纵向裂缝,其形成与滑体内部局部地形较陡峻有关。滑坡前缘陡缓交界处的覆盖层在暴雨条件下可能产生小型滑塌或溜滑。

一江滑坡孕育于杂谷脑组软硬互层状地层构成的斜坡中,因软、硬岩力学特性差异明显,导致边坡多表现出明显的非协调变形特征。现场调查发现,不同规模类型的褶皱构造普遍存在于研究区内,其对边坡的稳定性影响显著。因此,为探究此类原始边坡如何从最初的基岩边坡发展演化为如今的古滑坡体,并探讨构造-岩性耦合机制对该演化过程的影响,在充分考虑边坡实际发育地质条件的基础上,创新性构建含向斜构造的地质概化模型,通过大型离心模型试验,实现构造控制型倾倒变形的全过程动态模拟,在

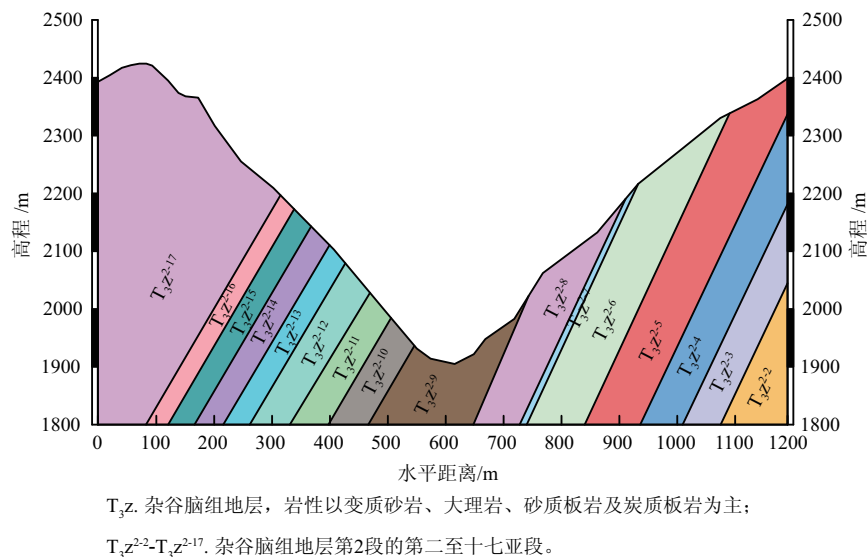


图3 河谷区某地质断面地层分段示意图

Fig.3 Schematic diagram of stratigraphic segments of a geological section in the river valley



图4 一江滑坡体全貌及分区图

Fig. 4 Panoramic and zoning map of the Yijiang landslide

阐明软硬岩层差异破坏时空演化规律的基础上,揭示含向斜软硬互层反倾岩质边坡的失稳机理。

## 2 离心模型试验设计

### 2.1 大型离心机设备

试验在成都理工大学 SKLGP 的 TLJ-500 土工离心机(图6)上进行,该设备采用单吊斗、不对称臂结构,最大容量  $500\text{ g} \cdot \text{t}$  (重力加速度  $g$  取值为  $9.8\text{ m/s}^2$ ),有效旋转半径  $4.5\text{ m}$ ,离心加速度范围  $10g \sim 250g$ ,有效荷重为  $2\text{ t}$ 。

### 2.2 相似关系确定

边坡地质原型剖面长约  $1600\text{ m}$ ,若选用  $1.2\text{ m}$

长的试验模型箱,假设制作的边坡模型长度为  $1\text{ m}$ ,根据相似原理,应选用  $1600g$  的离心加速度方能保证边坡原型与模型处于同等应力状态,而这显然远超离心机设备的工作范围,因此对大尺寸边坡地质原型而言,仅进行一次缩尺是远远不够的。为解决该问题,李龙起<sup>[33]</sup>等提出采用串联模型对原始边坡进行换算,即按照地质原型→常规模型→试验模型的换算流程,首先利用地质力学模型试验原理将边坡原型缩小  $1/n$  倍转化为常规模型,再根据离心模型试验相似原理将常规模型缩小  $1/m$  倍转化为试验模型,具体换算流程如图7所示。

综合考虑试验所用离心机的最大载重和加速度、边坡模型尺寸、岩体强度等后,取  $n$  为  $60$ 、 $m$  为  $20$  来确定相似材料配比。此外,在进行软、硬岩相似材料岩板制作时,按理来说岩层的厚度也应同步予以放缩,但由于缩尺值过大,放缩后的理论岩板厚度很薄,无法按照该理论厚度制作软、硬岩岩板。因此,为更好地呈现试验效果,并满足模型缩放要求,设置相似岩板厚度为  $9\text{ mm}$ ,以期能够尽量真实地反映该岩质边坡的动态破坏过程。

### 2.3 相似材料研配

试验所需的软、硬岩岩板与地质构造相似材料,采用石英砂、石膏、水泥、重晶石粉和水为原材料按照不同的配比来制备。基于正交试验设计方案制作了不同材料配比的压缩、剪切试样,通过对其开展单轴压缩、直接剪切等试验,得到相似材料的物理力学

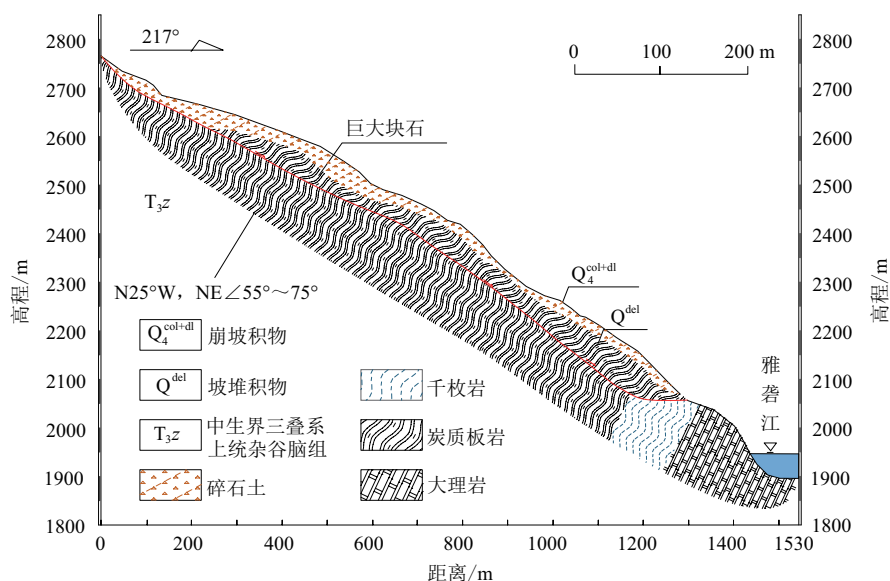


图5 一江滑坡工程地质剖面图

Fig. 5 Engineering geological profile of the Yijiang landslide



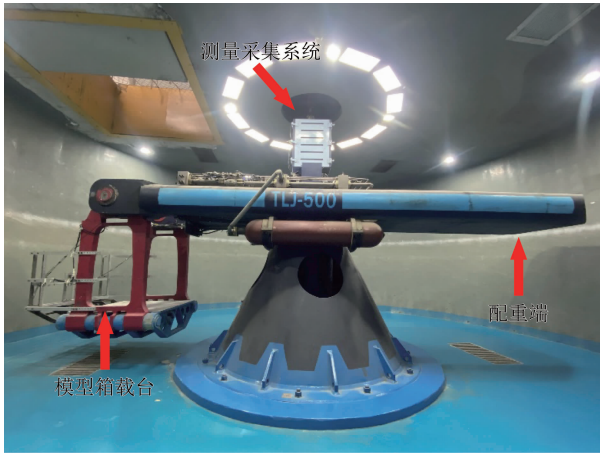


图 6 TLJ-500 大型土工离心机

Fig. 6 TLJ-500 large geotechnical centrifuge

参数,并与表 1 中的岩体原型参数作对比。最终确定软岩相似材料石英砂、水泥、重晶石粉、石膏和水的质量配比为 10: 10: 10: 3: 12,硬岩相似材料石英砂、水泥、石膏和水的质量配比为 10: 10: 3: 7。

## 2.4 地质模型概化

离心机试验采用的固定边壁式模型箱尺寸为 1.20 m × 1.00 m × 0.80 m (长 × 宽 × 高),鉴于箱体侧壁会对边坡模型侧向产生约束,通过粘贴 2 mm 厚的有机亚克力板并涂抹凡士林,最大程度上消除了边界效应对模型产生的不利影响。

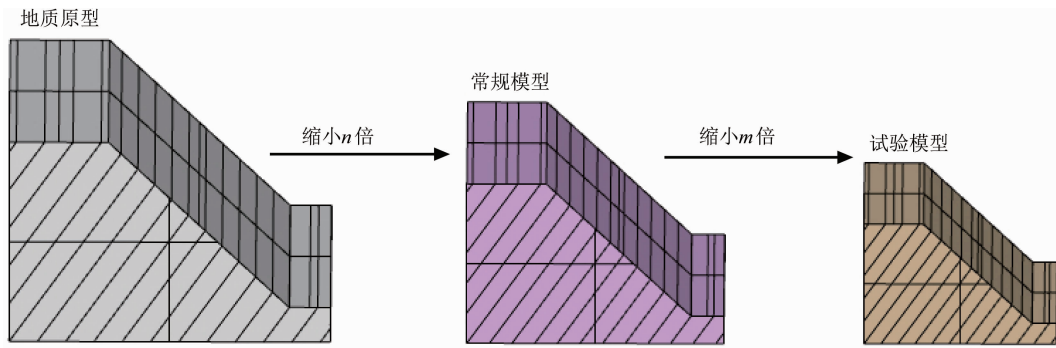


图 7 串联模型相似关系及转换示意图

Fig. 7 Similarity relation of the series model and schematic diagram of transformation

表 1 岩体原型与相似材料参数对比

Tab. 1 Comparison of parameters between rock mass prototype and simulated materials

边坡类型	岩体类型	弹性模量 $E/\text{MPa}$	抗压强度 $\sigma/\text{MPa}$	内聚力 $c/\text{MPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{ }^\circ)$
地质原型	含炭质板岩	—	24.5 ~ 78.0	—	—
	大理岩	—	70.0 ~ 120.0	—	—
试验模型	软岩	375.9 ~ 515.4	2.97	0.95	31.8
	硬岩	930.6 ~ 1372.1	7.44	2.42	40.0

基于一江滑坡现阶段勘测剖面,结合历史影像推测滑坡原始地形线,获得试验边坡模型地形特征,据此概化滑坡体物质组成与斜坡结构特征,并在坡体中部添加向斜构造,构建了经两次相似换算后的含向斜软硬互层反倾边坡离心试验模型(图 8),期间为方便模型堆砌制作,对向斜下部岩体做了概化处理。由于反倾边坡属于“跨层斜切”式锁固边坡,其锁固段位于坡脚部位<sup>[34]</sup>,即上部岩体的变形受制于坡脚,故在模型制作时,通过在坡脚设置由水泥砌筑的河道,来模拟锁固段的约束作用。

为监测试验过程中坡体各处的位移与应力变化及变形破坏特征,在模型的坡顶、坡中、坡脚各布置 2 个压力计和 1 个位移计,并利用粒子图像测速仪 (Particle Image Velocimetry, PIV) 增加 2 个位移监测点,还在边坡模型侧面等间距布置了示踪点 (图 9)。

## 3 模型制作与加载方案

### 3.1 试验模型制作

离心试验边坡模型的搭建包括模具定制、原材料称量搅拌、水泥砂浆压实、软硬岩板与向斜构造制作、软硬岩层堆砌、向斜构造安装、传感器布设、模型

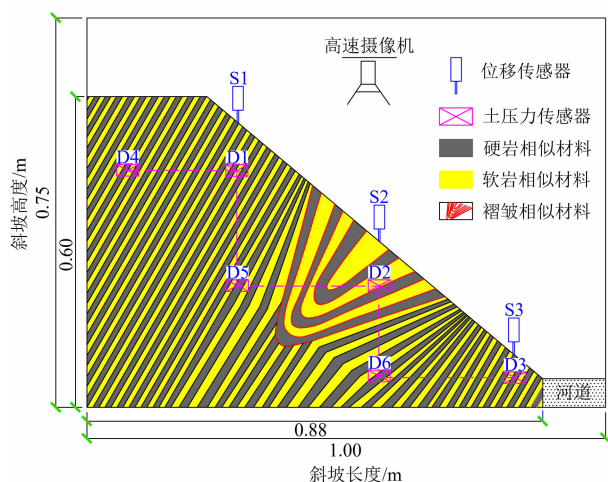


图8 边坡离心试验模型

Fig. 8 Centrifugal test model of slope

修饰与上色、示踪点安装等步骤(图 10)。制作完成待上机的软硬互层反倾边坡模型见图 11a。

### 3.2 离心加载方案

离心机试验加载过程由三阶段组成:(1)离心加速度从 0 开始逐渐加载至  $20g$ , 并使离心机保持  $20g$  匀速旋转 10 min;(2)离心加速度从  $20g$  逐渐加载至  $40g$ , 并保持  $40g$  匀速旋转 10 min;(3)离心加

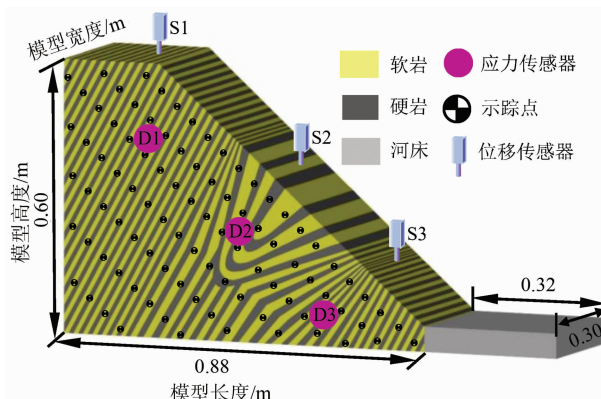


图9 传感器布置三维效果图

Fig. 9 Three-dimensional diagram of the sensor arrangement

速度从  $40g$  逐渐加载至  $60g$ , 并保持  $60g$  匀速旋转 10 min。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 变形破坏现象

根据图 11 中边坡模型在试验前后的形态特征对比可知,离心试验过程中,边坡模型的变形破坏集中分布于向斜内部及其上部坡体,向斜以下坡体未

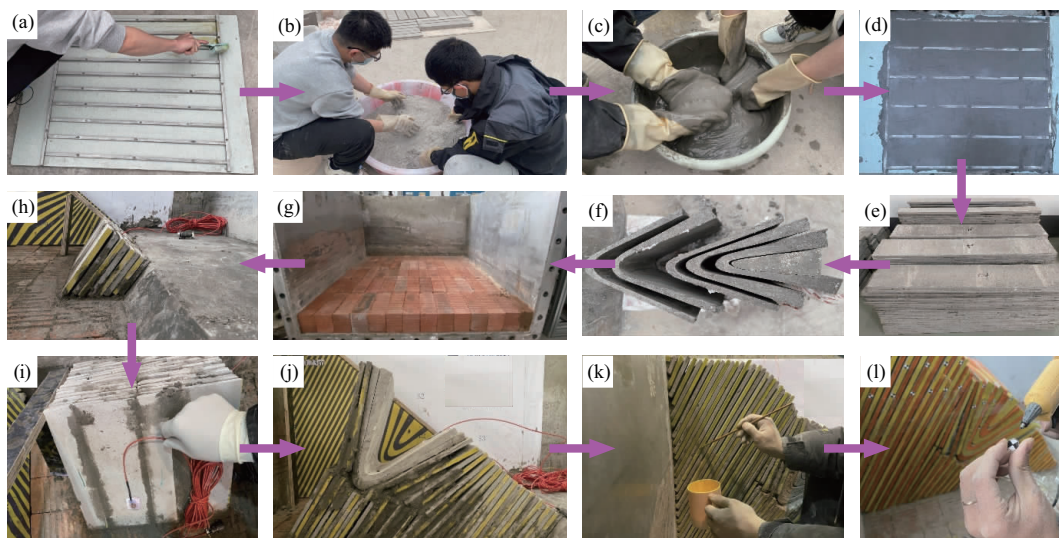


图10 边坡离心试验模型制作过程:(a)岩板模具订制;(b)按配比称量原材料;

(c)原材料混合搅拌;(d)水泥砂浆压实并抹平;(e)制备完成的软硬岩岩板;(f)制备完成的向斜;(g)模型箱底部的砖块铺设;  
(h)模型前缘堆砌与混凝土河床;(i)传感器安装;(j)向斜构造安装;(k)模型修饰与上色;(l)模型侧面示踪点安装

Fig. 10 Process of making centrifugal test model of slope:

(a) customization of rock slab molds;(b) weighing raw materials proportionally;(c) mixing raw materials;  
(d) compacting and leveling cement mortar;(e) prepared soft and hard rock slabs;(f) prepared syncline;  
(g) brick laying at the bottom of the model box;(h) piling at the model front edge and concrete riverbed;(i) installation of sensor;  
(j) installation of syncline structure;(k) decoration and coloring of model;(l) installation of tracing points on the side of the model



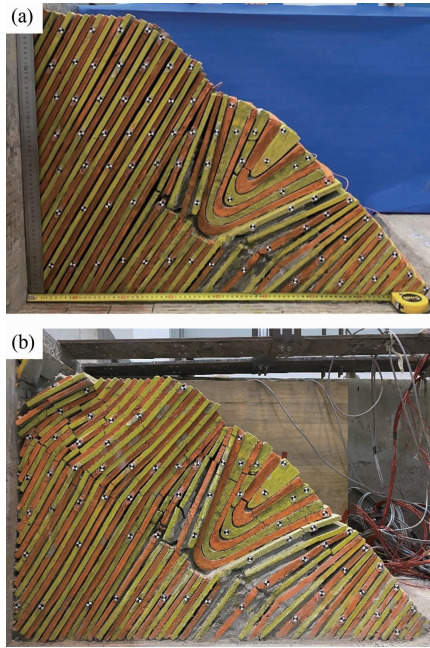


图 11 离心试验前后边坡模型形态特征对比:  
(a) 试验前;(b) 试验后

Fig. 11 Comparison of morphological characteristics of the slope models: (a) before test; (b) after test

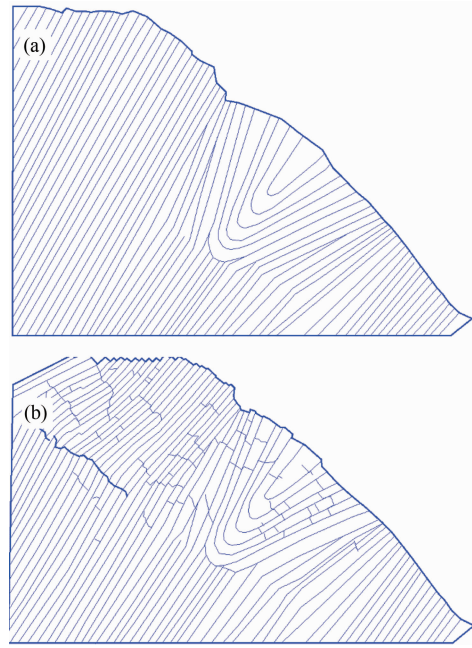


图 12 离心试验前后边坡模型素描图对比:  
(a) 试验前;(b) 试验后

Fig. 12 Comparison of the slope model sketches: (a) before test; (b) after test

产生明显变形破坏。含向斜构造软硬互层反倾边坡的宏观变形破坏特征为:(1)向斜上部坡体弯曲倾倒破坏明显,坡内发育大量压致拉裂缝,硬质岩以折断破坏为主,软质岩产生了相对明显的弯曲变形;(2)受上部坡体弯曲倾倒影响,向斜产生压缩变形与小角度旋转( $\leq 3.1^\circ$ ),并且内部发育裂缝;(3)向斜下部坡体无明显变形,模型侧面示踪点的运移量可忽略不计。

为深入揭示含向斜软硬互层反倾边坡的变形破坏特征,绘制了图 12 所示的离心试验前后边坡模型素描图,可见:(1)变形破坏明显的向斜上部坡体内发育大量压致拉裂缝,并在距坡面至坡底的  $1/2 \sim 1/3$  处贯通形成倾倒折断面,即此处坡体的弯曲倾倒属深层倾倒变形;(2)倾倒折断面以上的部分破裂岩层间存在错层滑动,坡面呈反向阶坎状;(3)向斜及其上部坡体内的硬质岩层以折断破坏与拉裂缝发育为主,软质岩层则以弯曲变形为主;(4)倾倒破坏的坡体内部因岩性特征差异,产生了一定程度的非协调性变形。

#### 4.2 位移演化特征

由图 13 可知,坡面各监测点(S1、S2、S3)的竖向位移曲线按演化趋势可划分为 6 个阶段,坡体各

处位移在不同阶段的演化特征如下:

(1)阶段 I:加速度从 0 增至  $20g$ ,各监测点的竖向位移均逐渐增大,坡顶 S1 监测点的竖向位移最大,约 15 mm;坡脚 S3 监测点的竖向位移最小,约 1 mm。

(2)阶段 II:加速度保持  $20g$  不变,除 S1 监测点的位移量增至约 21 mm,其余监测点的竖向位移均变化不大。

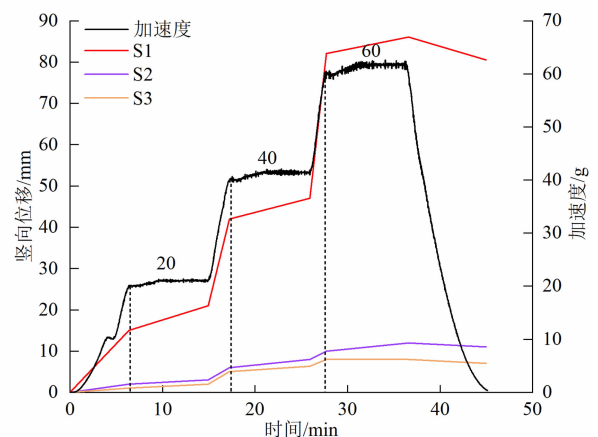


图 13 边坡模型不同监测点处的竖向位移曲线  
Fig. 13 Vertical displacement curves at different monitoring points in the slope model

(3)阶段Ⅲ:加速度从  $20g$  增至  $40g$ ,各监测点的竖向位移均迅速增大,但增幅区别明显;坡顶 S1 监测点的竖向位移增量为  $21\text{ mm}$ ,坡脚 S3 监测点的竖向位移增量及累计位移最小,增幅仅  $3\text{ mm}$ 。

(4)阶段Ⅳ:加速度保持  $40g$  不变,各监测点的竖向位移在该阶段均变化不大,S1 监测点的竖向累计位移仍最大,约  $47\text{ mm}$ 。

(5)阶段Ⅴ:加速度从  $40g$  增至  $60g$ ,各监测点的竖向位移明显增大,但增幅差距明显;坡顶 S1 监测点的竖向位移增幅最显著,高达  $35.1\text{ mm}$ ,累计位移为  $77.1\text{ mm}$ ;位于坡体中部(S2)与坡脚处(S3)的监测点竖向位移曲线演化趋势基本相似,位移增量仅为  $3\text{ mm}$ 。

(6)阶段Ⅵ:加速度保持  $60g$  不变,仅 S1 监测点处的位移曲线继续爬升,但增幅明显降低,其余两处监测点所在位置几乎无变形;至该阶段末期,坡顶、坡中、坡脚处 S1、S2、S3 监测点的累计竖向位移分别为  $81.1\text{ mm}$ 、 $10\text{ mm}$ 、 $8.3\text{ mm}$ 。

此外,根据布置于坡体下部监测点 S3 的位移演化特征可知,模型堆砌时在坡脚设置了固定式河道来模拟锁固段的约束作用,导致边坡中下部坡体的变形空间受限、位移量较小,故而无法给位于其上部的向斜构造提供更多向下弯折的变形空间,最终导致位于其上部的向斜构造变形量也较小,宏观表现为布置于此处的监测点 S2 的位移较小。

## 5 讨论

学术界以往虽开展过反倾岩质边坡离心模型试验研究,但多数针对的是单一硬岩或无构造软硬互层边坡,并普遍聚焦在岩层倾角与厚度、层间剪切强度、软硬岩层厚比等常规因素对反倾边坡破坏形态与折断面发育特征等的影响上,鲜少关注坡体内部构造-岩性耦合机制及其对软硬互层反倾边坡倾倒变形的影响。

### 5.1 常规反倾边坡倾倒变形特征

通过总结前人针对无构造软硬互层、单一硬岩等常规反倾边坡开展过的离心试验成果,将其与本文试验结果进行对比,以期查明含向斜软硬互层反倾岩质边坡变形演化发展与失稳破坏机理的特殊性,并在揭示此类复杂结构反倾边坡防治设计相较于常规边坡差异特征的基础上,提出针对性的防治

建议。

#### (1)无构造软硬互层反倾边坡

李彦奇<sup>[22]</sup>等关于无构造软硬互层反倾边坡的研究表明(图 14):(1)软硬岩层厚比为  $1:1$  的反倾边坡倾倒破坏从坡脚出现弯曲变形开始,后缘随之发育拉张裂缝,边坡整体向临空面弯曲倾倒,并由坡内至坡表形成三级破裂面;(2)软硬岩层厚比影响着坡体滑动的整体性与破裂面形态,表现为软岩占比越大、坡顶位移越大且破裂面形态越趋近于圆弧状,硬岩占比越大、坡顶位移越小且坡体滑动的整体性越强。

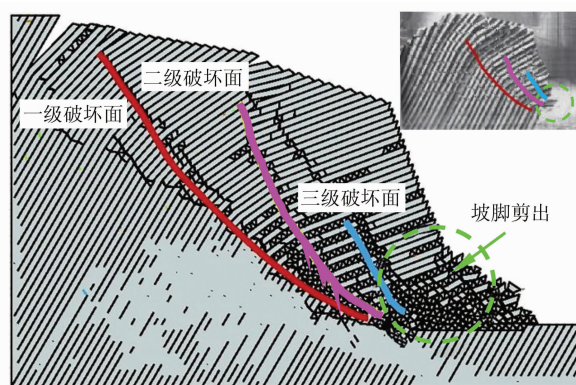


图 14 软硬互层反倾边坡倾倒变形特征<sup>[22]</sup>

Fig. 14 Toppling deformation characteristics of the soft-hard interbedded counter-tilted slopes<sup>[22]</sup>

#### (2)单一硬岩反倾边坡

马文著<sup>[35]</sup>等揭示了开挖工况下单一硬岩反倾边坡的倾倒破坏机制(图 15),研究发现:(1)坡体前缘率先产生局部弯曲折断,后缘形成明显拉裂缝,岩层由上至下依次折断,直至在倾倒坡体中部形成一级破裂面,随后因前缘表部岩层挤出形成二级破裂面,并逐渐延伸至坡体后缘;(2)岩层厚度越大,一级破裂面发育越深,坡体垮塌区范围越大且滑动的整体性越强。

### 5.2 含向斜软硬互层反倾边坡失稳机理

本文针对含向斜软硬互层反倾岩质边坡开展的离心模型试验结果表明,坡体中部发育的向斜构造对其倾倒变形特征影响显著,具体表现为:(1)坡体的变形破坏集中于向斜及其上部反倾岩层中,以压致拉裂缝的发育为主,并在距坡面至坡底的  $1/2 \sim 1/3$  处贯通形成倾倒折断面,坡内无次级破裂面发育,向斜下部坡体变形不明显;(2)边坡的孕灾演化



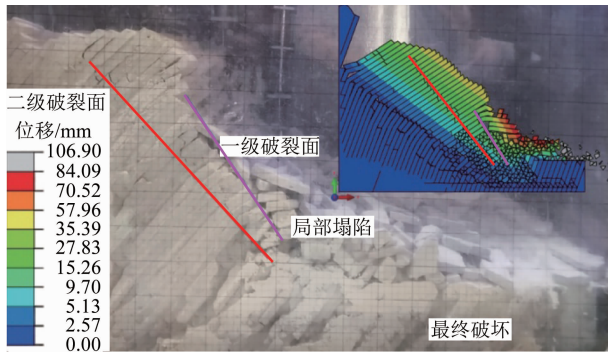


图 15 单一硬岩反倾边坡倾倒变形破坏<sup>[35]</sup>

Fig. 15 Toppling deformation and failure of the single hard rock counter-tilted slopes<sup>[35]</sup>

自坡顶岩层倾倒变形开始,在弯曲倾倒破坏明显且折断裂缝发育显著的上部岩层挤压作用下,向斜产生旋转式压缩变形,并在两翼发育拉裂缝。

此类边坡产生上述变形破坏特征主要与自身特殊的斜坡结构有关,虽然整体坡度相对较缓,但较陡的岩层倾角导致中上部岩板弯曲力矩较大,随着离心加速度的增加,向斜上部的反倾岩层发生明显倾倒破坏,并且受其推挤压缩的影响,向斜产生压缩变形与小角度旋转。与此同时,软、硬岩互层岩体结构导致的非协调变形与向斜构造压缩变形的缓冲作用,又削弱了边坡上部岩体对向斜下部坡体的推挤压缩作用,导致应力传导受阻,宏观表现为坡脚部位的稳定性较好。上述因素的耦合作用下,致使含向斜软硬互层反倾边坡的倾倒破坏模式区别于无构造软硬互层或单一硬岩等常规反倾边坡,表现为自上而下的非协调式深层倾倒破坏。

### 5.3 反倾边坡防治设计建议

对不同岩性组合与斜坡结构特点的反倾边坡的研究表明,虽然倾倒变形的起始部位(坡脚或坡顶)不同,但坡脚始终是导致边坡产生整体滑移-拉裂的关键部位,常作为“锁固段”存在。尤其是对于文中含构造反倾边坡而言,因边坡的倾倒变形是由坡顶逐渐朝坡脚发展的,一旦折断破裂面延伸突破构造部位,便将会与坡脚处的弯曲破裂面贯通而形成滑移面,导致弯曲倾倒拉裂破坏明显的坡体沿其整体滑移。由此可见,在易于产生非协调性倾倒破坏的反倾边坡防治设计中,保证坡脚的稳定至关重要,因此结合工程实践经验,建议采用削坡压脚、堆载压脚、锚固坡脚等措施予以防治。

本文基于离心模型试验动态模拟了构造控制型软硬互层反倾边坡倾倒变形的全过程,在揭示软硬岩差异破坏时空演化规律的基础上,阐明了含向斜软硬互层反倾边坡失稳机理。但是,构造的类型、分布位置、几何形态及轴面倾角等,均可能对边坡的变形特征与破坏发展产生不同类型与程度的影响。鉴于此,笔者后续将通过系统的离心模型试验与数值模拟分析,深入探讨不同的构造类型及其特征参数对岩质边坡稳定性影响的作用规律,以便为构造-岩性耦合作用下的边坡治理工程设计提供更全面的理论指导。

## 6 结论

(1)位移场呈现显著空间分异。坡面各监测点的竖向位移曲线按演化趋势可划分为6个阶段。坡顶处累计竖向位移最大,约81.1 mm;坡体中部位移次之,约10 mm;坡脚位移最小,约8.3 mm。

(2)破坏演化具阶段性特征。边坡模型由坡顶开始发生倾倒变形破坏,位于坡体中部的向斜产生压缩变形与小角度旋转( $\leq 3.1^\circ$ );大量压致拉裂缝集中发育于向斜上部坡体内,并贯通形成倾倒折断面。

(3)构造缓冲效应显著。软硬互层岩体结构导致的非协调变形与坡体中部向斜构造压缩变形的缓冲作用,削弱了边坡上部岩体对向斜下部坡体的推挤压缩作用,宏观表现为向斜以下坡体无明显变形。

(4)软、硬岩岩性特征等不同导致的变形破坏时空演化差异,致使含向斜软硬互层反倾岩质边坡的变形失稳模式表现为自上而下的非协调式深层倾倒破坏。

## 参考文献(References)

- [1] GOODMAN R E, BRAY J W. Toppling of rock slopes [G]// American Society of Civil Engineers. Proceedings of the specialty conference on rock engineering for foundations and slopes. Boulder: American Society of Civil Engineers, 1976: 15 - 18. DOI: 10.1007/BF01020126
- [2] 王飞. 雅砻江上游互层斜坡深层倾倒变形破坏机制及稳定性评价[D]. 武汉: 中国地质大学, 2020: 1 - 118. [WANG Fei. Failure mechanism and stability assessment of deep-seated toppling in interlayered rock slopes at upstream of Yalong River [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2020: 1 - 118] DOI: 10.27492/d.cnki.gzdu.2019.000091
- [3] TU Guoxiang, DENG Hui, SHANG Qi, et al. Deep-seated large-

- scale toppling failure: A case study of the Lancang slope in southwest China [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, **53**(8): 3417 – 3432. DOI: 10.1007/s00603-020-02132-0
- [4] LIU Ming, LIU Fangzhou, HUANG Runqiu, et al. Deep-seated large-scale toppling failure in metamorphic rocks: A case study of the Erguxi slope in southwest China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, **13**(12): 2094 – 2110. DOI: 10.1007/s11629-015-3803-4
- [5] 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] DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.03.001
- [6] HUANG Runqiu. Understanding the mechanism of large-scale landslides [J]. *Engineering Geology for Society and Territory*, 2015, **2**(10): 13 – 32. DOI: 10.1007/978-3-319-09057-3-2
- [7] 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. [WANG Fei, TANG Huiming. Mechanism and evolution of toppling in interbedded slopes at upstream of Yalong River [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, **25**(6): 1501 – 1508] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017.06.013
- [8] 王飞, 唐辉明, 宁奕冰, 等. 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. [WANG Fei, TANG Huiming, NING Yibing, et al. Stability analysis of deep-seated toppling in interlayered rock slopes based on evolution process [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, **38**(5): 186 – 194] DOI: 10.19509/j.cnki.dzkg.2019.0519
- [9] 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灾变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] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1484
- [10] 宁奕冰. 澜沧江中上游深层倾倒体变形失稳过程及稳定性评价研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2022: 1 – 232. [NING Yibing. Study on the deformation and instability process and stability evaluation of deep-seated toppling in the upper-middle Lancang River [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2022: 1 – 232] DOI: 10.27492/d.cnki.gzdu.2022.000041
- [11] 黄达, 谢周州, 宋宜祥, 等. 软硬互层状反倾岩质边坡倾倒变形离心模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, **40**(7): 1357 – 1368. [HUANG Da, XIE Zhouzhou, SONG Yixiang, et al. Centrifuge model test study on toppling deformation of anti-dip soft-hard interbedded rock slopes [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, **40**(7): 1357 – 1368] DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0912
- [12] ZHANG Zelin, LIU Gao, WU Shuren, et al. Rock slope deformation mechanism in the Cihaxia Hydropower Station, northwest China [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015, **74**(3): 1 – 16. DOI: 10.1007/s10064-014-0672-y
- [13] LIU Yang, HUANG Da, PENG Jianbing, et al. Analysis of the effect of rock layer structure on the toppling failure evolution of soft-hard interbedded anti-dip slopes [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, **145**: 107005. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.107005
- [14] 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] DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.20200028
- [15] HUANG Da, MA Hao, HUANG Runqiu. Deep-seated toppling deformations of rock slopes in western China [J]. *Landslides*, 2022, **19**(12): 809 – 827. DOI: 10.1007/s10346-021-01829-9
- [16] HUANG Da, MA Hao, HUANG Runqiu, et al. Deep-seated toppling deformations at the dam site of the Miaowei Hydropower Station, southwest China [J]. *Engineering Geology*, 2022, **303**(4): 106654. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106654
- [17] GUO Hui, YAN Chengzeng, ZHANG Guohua, et al. Mechanical analysis of toppling failure using FDEM: A case study for soft-hard interbedded anti-dip rock slope [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, **165**: 105883. DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105883
- [18] DONG Menglong, ZHANG Faming, LYU Jingqing, et al. Study on deformation and failure law of soft-hard rock interbedding toppling slope base on similar test [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, **79**: 4625 – 4637. DOI: 10.1007/s10064-020-01845-4
- [19] CHIKATAMARLA R, LAUE J. Centrifuge scaling laws for guided free fall events including rockfalls [J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2006, **6**(2): 15 – 26. DOI: 10.1680/ijpimg.2006.060202
- [20] 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] DOI: 10.11779/CJGE202007012
- [21] 马昊. 层状岩质反倾边坡倾倒变形离心模型试验的数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021: 1 – 155. [MA Hao. Numerical simulation of centrifugal model test for toppling

- deformation of layered anaclinal slope [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021: 1 – 155] DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2019.000484
- [22] 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] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000 – 3665.202007062
- [23] 谢周州. 软硬互层反倾边坡倾倒破坏机制及稳定性研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2021: 1 – 93. [XIE Zhouzhou. Study on the toppling failure mechanism and stability of the anti-dip soft-hard interbedded rock slope [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2021: 1 – 93] DOI: 10.27105/d.cnki.ghbgu.2021.001183
- [24] 黄达, 马昊, 孟秋杰, 等. 反倾软硬互层岩质边坡倾倒变形破坏机理与影响因素研究[J]. 工程地质学报, 2021, **29**(3): 602 – 616. [HUANG Da, MA Hao, MENG Qiujie, et al. Study on toppling mechanism and affecting factors of anti-dip rock slopes with soft-hard interbedded structure [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, **29**(3): 602 – 616] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2020 – 417
- [25] 霍逸康, 石振明, 郑鸿超, 等. 软硬互层反倾岩质边坡稳定性影响因素分析及破坏模式研究[J]. 工程地质学报, 2021, **31**(5): 1680 – 1688. [HUO Yikang, SHI Zhenming, ZHENG Hongchao, et al. Study on influence factors of stability and failure modes of anti-dip rock slope with soft and hard interbed [J]. Journal of Engineering Geology, 2021, **31**(5): 1680 – 1688] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2021 – 0159
- [26] WANG Runqing, ZHENG Yun, CHEN Congxin, et al. Theoretical and numerical analysis of flexural toppling failure in soft-hard interbedded anti-dip rock slopes [J]. Engineering Geology, 2023, **312**: 106923. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106923
- [27] LI Jinduo, GAO Yuan, YANG Tianhong, et al. Integrated simulation and monitoring to analyze failure mechanism of the anti-dip layered slope with soft and hard rock interbedding [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2023, **33**(9): 1147 – 1164. DOI: 10.1016/j.ijmst.2023.06.006
- [28] ARBANAS Z, BENAC C, GROSIC M. Remedial works on landslide in complex geological conditions [C]//17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ICSMGE 2009, October 5, 2009 – October 9, 2009: Vol. 3. Alexandria, Egypt: IOS Press, 2009: 2638 – 2641.
- [29] 朱伟, 王孔伟, 魏东, 等. 三峡库区忠县向斜内部滑坡空间分布特征[J]. 水土保持通报, 2018, **38**(4): 98 – 102. [ZHU Wei, WANG Kongwei, WEI Dong, et al. Spatial distribution characteristics of internal landslides of Zhongxian County syncline in Three Gorges reservoir area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, **38**(4): 98 – 102] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.016
- [30] 王汉臣, 邓华锋, 刘健, 等. 那伦水库料场边坡岩土体开挖变形及破坏特征[J]. 水电能源科学, 2024, **42**(12): 82 – 86. [WANG Hanchen, DENG Huafeng, LIU Jian, et al. Relationship between rock-soil body structure and excavation deformation failure in quarry of Nalun reservoir [J]. Water Resources and Power, 2024, **42**(12): 82 – 86] DOI: 10.20040/j.cnki.1000 – 7709.2024.20240108
- [31] 鲍利发, 陈建林. 卡拉地下厂房位置及轴线方向选择 [C]//雅砻江虚拟研究中心, 2014 年度学术年会论文集. 2014: 384 – 388. [BAO Lifa, CHEN Jianlin. Selection on the location and axis for the underground powerhouse of Kala Hydropower Station [C]// Yalong River Virtual Research Center, Proceedings of the 2014 annual academic conference of Yalong River Virtual Research Center. 2014: 384 – 388]
- [32] 方丹, 韩钢, 鄢江平, 等. 卡拉水电站地下洞室群稳定性分析及洞室间距优化研究[J]. 长江科学院院报, 2023, **40**(11): 93 – 101 + 110. [FANG Dan, HAN Gang, YAN Jiangping, et al. Stability analysis of underground caverns and optimization of cavern spacing of Kala hydropower station [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, **40**(11): 93 – 101 + 110] DOI: 10.11988/ckyyb.20220649
- [33] 李龙起, 李昌林, 何川, 等. 新型离心机串联模型试验方法及其初步应用研究[J]. 水利水电技术, 2019, **50**(4): 200 – 204. [LI Longqi, LI Changlin, HE Chuan, et al. Study on method of a new centrifugal tandem model test and its preliminary application [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, **50**(4): 200 – 204] DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.04.027
- [34] 泮晓华, 薛雷, 秦四清, 等. 潜在锁固型滑坡的类型、形成条件和预判方法研究[J]. 工程地质学报, 2014, **22**(6): 1159 – 1167. [PAN Xiaohua, XUE Lei, QIN Siqing, et al. Types, formation conditions and pre-decision method for large landslides with potential locked patches [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, **22**(6): 1159 – 1167] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2014.06.021
- [35] 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] DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000 – 3665.201909028



## Centrifugal Model Test on Instability of Synclinal Soft-Hard Interbedded Rock Slope

LIU Wanli<sup>1</sup>, ZHOU Chunhong<sup>1\*</sup>, CHENG Wangqiang<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, 311122, China;

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

**Abstract:** Over 76% of deep-seated toppling geo-bodies in southwestern China develop within soft-hard interbedded slopes. Available engineering models inadequately address the structural complexity of such slopes, particularly neglecting the tectonic-lithological coupling effect.

In this study, it took the Yijiang landslide at the Kala Hydropower Station (a typical hard-soft interbedded slope in the Zagunao Formation) as research object. An innovative generalized geological model incorporating synclinal structures was developed. Large-scale centrifugal model tests were conducted using simulated materials (quartz sand, cement, barite powder, gypsum, and water) to dynamically replicate the entire syncline-controlled toppling process, revealing spatiotemporal evolution mechanisms of differential failure in soft-hard interlayers.

(1) Significant spatial differentiation in displacement fields: Vertical displacement curves at monitoring points exhibited six evolutionary stages. Maximum cumulative vertical displacement occurred at the slope crest (81.1 mm), followed by mid-slope (10 mm) and slope toe (8.3 mm).

(2) Stage-dependent failure evolution: Deformation initiated from the crest, with synclinal compression and minor rotation ( $\leq 3.1^\circ$ ) observed at mid-slope. Compression-induced tensile cracks concentrated in the upper syncline zone, coalescing into through-going toppling surfaces.

(3) Remarkable structural buffering effect: Non-coordinated deformation from lithological contrasts and synclinal compression at mid-slope reduced thrust transmission efficiency, resulting in negligible deformation below the syncline.

(4) A “top-down non-coordinated deep toppling” failure mode was identified for syncline-containing soft-hard interbedded counter-tilted slopes.

This study advances the theoretical framework for hazard evolution in structurally complex slopes and provides scientific guidelines for slope reinforcement in southwestern China.

**Key words:** centrifugal test; soft-hard interbedded; complex structural slope; toppling deformation; instability mechanism

(责任编辑 朱颖彦 李 嵘)