顺层陡倾岩质边坡倾倒模式试验

王林康[1]，郑子涵[2]，章广成[1*]，曾鑫[3]，丁柄栋[1]，崩兴涛[1]

1. 中国地质大学（武汉）工程学院，武汉 430074；
2. 武汉市汉阳市政建设集团有限公司，武汉 430050；
3. 中国能源建设集团湖南省电力设计院有限公司，长沙 410007

第一作者，E-mail：jayce_wlk2000@163.com

* 通信作者，E-mail：zhangguangc@cug.edu.cn

2023-09-28 收稿；2023-11-16 修回；2023-11-17 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(41877263)

中图分类号：TV223.3　　文章编号：2096-8523(2025)02-0340-15　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230550

摘　要：在澜沧江中上游大华桥水电站的左岸分布着大量顺层陡倾岩质边坡，库区独特的工程地质条件为其提供了良好的变形孕育环境，因倾倒变形体失稳崩落形成的滑坡堆积物在库区分布广泛，这对水电工程的运行和维护造成了极大困难。为了研究顺层陡倾岩质边坡的演化过程、倾倒模式以及倾倒变形破坏机理，以库区左岸微风化板岩为参照原型配置相似材料，采用室内底摩擦模型试验方法，分析不同坡角、层面倾角、结构面产状条件下边坡的变形破坏特征。结果表明：①顺层陡倾岩质边坡主要倾倒破坏模式为拉裂−倾倒式，在演化初期坡脚处岩体由于应力集中最先发生弯曲变形，并由坡体前缘逐渐向中后部发展，坡表中部的岩体也逐渐由顺倾转变为直立至反倾状态，并在重力作用下加速向临空面方向弯曲倾倒，当变形到达一定程度时将沿着最大弯曲部位或结构面发生拉裂折断，最终岩块将会沿着拉裂面产生滑移甚至崩落。②通过对比试验模型的坡体参数及变形特征，将 7 组模型边坡大致分为 3 类：近直立顺层岩质缓坡、陡倾角顺层岩质陡坡、近直立顺层岩质陡坡。相较于坡角，岩层倾角对顺层陡倾岩质边坡倾倒变形破坏的影响更大；非垂直于层面的缓倾结构面比垂直于层面的结构面更容易引起顺层陡倾边坡的倾倒变形破坏，且相较于外倾结构面，当坡体发育内倾结构面时发生倾倒变形破坏的规模更大。③从变形阶段的角度将斜坡的变形演化过程划分为初始变形阶段、倾倒变形阶段、倾倒破坏阶段。④从机理上将顺层陡倾岩质边坡发生倾倒变形破坏的过程划分为应力调整阶段、弯曲−蠕变阶段、弯曲−拉裂阶段、倾倒−崩滑阶段；根据倾倒区的变形程度将变形破坏后的斜坡划分为强倾倒区、弱倾倒区和稳定区。研究成果可为顺层陡倾岩质边坡的演化过程、倾倒模式以及倾倒变形破坏机理的研究提供参考。

关键词：顺层陡倾岩质边坡；相似材料；底摩擦模型试验；倾倒模式；倾倒变形破坏

顺层岩质斜坡是指岩层倾向与坡向接近或大体一致的边坡，其常见的变形破坏模式有顺层滑移、滑移−拉裂、滑移−压致拉裂、滑移−弯曲、溃屈破坏[1-2]等。但与此同时，顺层陡倾岩质斜坡还发育一种极为特殊的变形破坏模式——倾倒变形破坏，此类破坏模式通常出现在反倾岩质斜坡中，但通过近年来的实地考察和文献查阅发现，该类破坏模式还会发育在陡倾的顺层岩质斜坡中，如澜沧江流域的大华滑坡、拉古滑坡、沧江桥−营盘滑坡等，因顺层岩质边坡倾倒破坏形成的滑坡堆积物广泛堆积于库岸，成为了较为严重的地质隐患，不利于库区的运行和维护工作，因此，剖析顺层陡倾岩质边坡的演化过程、倾倒模式和倾倒变形破坏机理成为一道亟需解决的难题。

著录信息：王林康，郑子涵，章广成，等. 顺层陡倾岩质边坡倾倒模式试验［J］. 地质科技通报，2025，44(2)：340-354.
WANG Linkang, ZHENG Zihan, ZHANG Guangcheng, et al. Test study on the toppling mode of steep bedding rock slope[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(2): 340-354.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjqb.cug.edu.cn

倾倒变形破坏作为岩质边坡一种常见的破坏形式，广泛孕育于反倾边坡中[3]。CRUDËN[4]研究发现，在GOODMAN和BRAY提出的假设的前提下，即使在没有外力辅助的情况下，顺层斜坡也有可能会发生倾倒破坏；国内的邱俊等[5]在锦屏一级水电站、黄河上游羊曲水电站等地也注意到顺层岩质边坡倾倒变形的存在，并对其发育特征和形成机制进行了初步总结分析。在倾倒变形破坏机理方面，SAGASETA等[6]假设块体厚度相对于坡体高度无穷小，给出了岩质边坡块状倾倒破坏极限平衡的一般解析解。LIU等[7]详细讨论了岩质边坡从倾倒到滑动过渡位置的确定问题，提出了倾倒稳定性分析的一种改进解析解。ZHENG等[8]通过采用UDEC三角模型和极限平衡分析方法，对岩质边坡的弯曲倾倒破坏机理进行了深入研究。ZHAO等[9]通过建立一个能够评估边坡深层变质倾倒变形破坏的工程地质模型，将倾倒边坡分为4个倾倒强度区。XIA等[10]基于在金沙江流域巴塘水电站古河坝滑坡的调查研究工作，提出了顺层陡倾岩质边坡滑移–倾倒破坏的4个发展阶段。在倾倒变形破坏因素方面，TAMRAKAR等[11]对尼泊尔某地区的顺层岩质边坡进行了分析，认为该边坡发生倾倒变形破坏的原因有坡角较陡、砂岩泥岩互层导致的岩体强度差异以及河谷的快速下切。王飞等[12]认为卸荷回弹是边坡陡倾面被拉裂的重要原因之一。总而言之，差异回弹变形、河谷快速下切[13]、地下水侵蚀软化、岩体风化形成破碎带等皆是边坡发生倾倒破坏的重要原因。

笔者以澜沧江中上游大华桥水电站左岸为研究区，在野外工程地质调查的基础上总结出研究区坡体特征，并利用相似原理设计室内缩尺物理模型试验。以库区左岸微风化板岩为参照原型配置相似材料，开展了不同工况条件下顺层岩质边坡底摩擦物理模型试验，利用粒子图像测速法（particle image velocimetry，简称PIV）获取了模型边坡不同阶段速度矢量场以及特征点位移时间曲线，得到了在不同坡角、层面倾角、结构面产状条件下模型边坡的变形破坏全过程，揭示了顺层陡倾岩质边坡的倾倒变形破坏机理。

1　底摩擦物理模型试验

为了研究不同类型的顺层陡倾岩质边坡的倾倒变形破坏机理，本次试验在大型底摩擦试验装置下进行。其基本过程如下：①选定黏土、石英砂和石膏作为主要相似材料，设计若干组配比试验，开展不同配比混合材料的物理力学性质试验，确定满足相似比原则的最佳配比方案。②选取坡角、岩层倾角和结构面产状3个因素作为变量并设计若干组正交试验，在此基础上利用最佳配比混合材料制作顺层陡倾岩质边坡物理模型。③在每个缩尺物理模型剖面上布置部分用来监测坡体位移的图钉，随后将模型放置于水平传送带，采用高速摄像机进行全程拍摄。通过记录并分析破裂面位置、破裂面形成过程等边坡模型的变形破坏特征和变形演化过程，最终达到研究不同类型顺层陡倾岩质边坡倾倒变形破坏机理的目的。

1.1　相似材料制备

（1）相似理论

岩土力学物理模型是基于相似理论，由一种或多种材料组成的地质概化模型。利用各种监测技术和手段提取相关数据，通过观察模型的破坏过程和变形特征，可以了解和判断原型中可能出现的力学现象和变形规律。在相似模型试验中最重要的准则就是模型的几何形状必须与原型相似，同时主要物理量也必须与原型相似[14-18]，在此基础上才能根据模型试验结果推断出实际岩土体中可能出现的力学现象，因此在物理模型试验中选择合适的相似材料和材料配比极其重要。

（2）相似材料配比设计

结合前人[19-22]对相似材料配比的研究工作及自身前期开展的预实验成果，最终选定黏土、石膏、石英砂3种材料作为大华桥库区板岩的相似材料，共设计9组配比试验，如表1所示。

表1　相似材料配比试验设计

Table 1　Experimental design of proportioning ratio of similar materials

试验组号	黏土：石英砂质量比	黏土：石膏质量比
1	1∶2	2∶1
2	1∶2	3∶1
3	1∶2	4∶1
4	1∶1	2∶1
5	1∶1	3∶1
6	1∶1	4∶1
7	2∶1	2∶1
8	2∶1	3∶1
9	2∶1	4∶1

（3）直剪试验

按照表1中的设计方案计算并称取各材料的用量，混合后搅拌均匀，然后再加入占材料总质量13%的水继续搅拌，随后装入涂有凡士林的环刀取样器

并用橡胶锤进行夯实。每组混合材料各制备 4 个样品，共计 36 个样品，制样完成后在四联电动直剪仪上开展直剪试验，采集各组试验垂直荷载下对应的峰值应力并绘制 τ-σ 关系（τ 为剪应力；σ 为正应力）曲线，最终得出各组混合材料的黏聚力（c）和内摩擦角（φ）。

（4）单轴压缩试验

制样操作与（3）直剪试验相同。每组混合材料各制备 1 个样品，共计 9 个样品，待制样完成后在单轴压缩仪上开展试验，在试验中以较低的加载速率进行加载直至样品破坏，获取每组试样轴向及径向的应力–应变曲线，最终得出各组混合材料的弹性模量和泊松比。

（5）悬臂梁弯曲试验

按照表 1 中的设计方案计算并称取各材料的用量，混合后搅拌均匀，然后再加入占材料总质量 13% 的水继续搅拌，填入 20 cm×5 cm×2 cm 的亚克力板模具中，每组混合材料各制备 2 个样品，共计 18 个样品，待制样完成后在桌面上开展悬臂梁抗拉试验，记录其发生拉裂破坏时的悬臂梁长度并按公式（1）求得混合材料的抗拉强度。

$$\sigma_{\max}=\frac{M_z y_{\max}}{I_z}=\frac{M_z}{W_z}, \tag{1}$$

式中：σ 为横截面弯曲正应力，y 表示横截面上某点到 z 轴的垂直距离，当 y 取最大值 $y_{\max}$ 时，σ 取最大值，即梁发生破坏时有最大强度 $\sigma_{\max}$；M_z 为截面弯矩；I_z 为截面对 z 轴的惯性矩；W_z 为弯曲截面模量。

（6）相似材料配比的选定

由于大华桥库区河谷两岸边坡高陡，平均坡高在 300 m 以上，坡角一般大于 30°，部分边坡坡高超过 400 m，因此在本试验中将所需模拟的原型边坡坡高定为 350 m。在相似系数选定方面，需要根据具体的研究对象选取材料的主要性质进行比对，而忽略一些次要性质[23]。本试验以物理模型材料的几何尺寸和材料密度这 2 个参数作为控制量，考虑到模拟原型的范围、模型试验精度以及制作模型试验所需工作量和难易程度等因素，将模型试验的几何相似比 C_L 定为 500，密度相似比 C_γ 定为 1.2，与应力有关的相似比则受几何相似比和密度相似比共同控制[24]，即 $C_{\sigma_t}=C_c=C_E=C_LC_\gamma=600$，内摩擦角和泊松比则为无次因量，相似比 C_φ 和 C_μ 定为 1，相似关系如表 2 所示。

物理模型试验材料的原型为大华桥库区左岸微风化板岩，对采集回来的岩样进行室内岩石物理力学试验，测得相应力学参数。最终选定最优的相似材料配比为黏土：石英砂：石膏 = 2：4：1，如表 3 所示。

表 2　模型材料与原型材料相似关系

Table 2　Similarity relationship between model materials and prototype materials

物理量	相似系数	比例因子
几何尺寸	C_L（控制量）	500
密度	C_γ（控制量）	1.2
黏聚力	$C_c=C_LC_\gamma$	600
内摩擦角	C_φ（无次因量）	1
抗拉强度	$C_{\sigma_t}=C_LC_\gamma$	600
弹性模量	$C_E=C_LC_\gamma$	600
泊松比	C_μ（无次因量）	1

表 3　相似材料目标值与实际值

Table 3　Target values and actual values of similar materials

参数	密度 r/(g·cm^{-3})	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/(°)	抗拉强度 σ_t/MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
板岩	2.60	1.55	30.1	3.4	8.08	0.27
目标值	2.17	0.002 6	30.1	0.005 7	0.013 5	0.27
最佳相似材料	2.15	0.002 9	29.1	0.005 3	0.010 7	0.30
理论相似比	1.20	600	1	600	600	1
实际相似比	1.21	534.5	1.03	641.5	755.1	0.9

1.2　物理模型试验原理及方案设计

（1）底摩擦试验原理

底摩擦试验是岩土工程领域一种常用的物理模型试验手段，因其能够较好地模拟不同工况下边坡的变形破坏特征和演化过程，已被科研人员广泛使用[25-29]。其试验流程及基本原理如下：将制好的边坡剖面模型平放在水平传送带上，使模型所需模拟的重力方向与传送带运动方向保持一致，当传送带转动时，模型底端由于受到固定框架的阻挡约束，会与传送带产生相对运动，从而在模型剖面一侧产生均布的摩擦力 F，其计算表达式为：

$$F=\mu'\gamma_m d, \tag{2}$$

式中：d 为模型的厚度；γ_m 为模型材料的容重；μ'为模型与传送带接触面间的动摩擦因数。

试验原理图如图 1 所示。

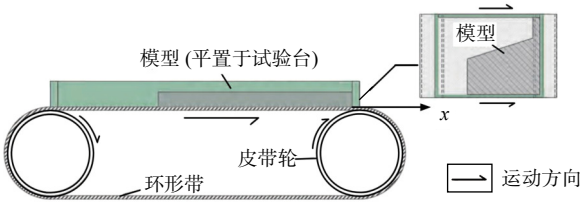


图 1　底摩擦试验原理图[30]

Fig. 1　Principle of bottom friction test

根据圣维南原理[31]可知，当模型厚度足够小时，可认为模型与传送带接触面间的摩擦力均匀作用在整个边坡模型上，与实际边坡在自重作用下的应力状态近似等效。本次试验采用中国地质大学(武汉)自主研发的底摩擦试验设备，该设备尺寸大小为 1.5 m×1.45 m，转速范围为 0 ~ 50 r/min，如图 2 所示。



图 2　底摩擦试验现场装置

Fig. 2　Field device for bottom friction testing

(2)试验方案设计

本次物理模型试验原型为澜沧江流域大华桥库区顺层陡倾岩质岸坡，研究区已搜集到的顺层倾倒变形体发育基本特征如表 4 所示，地面厂房后边坡全貌图如图 3 所示，工程地质剖面见图 4；同时对库区左岸平硐揭露的裂隙进行汇总，整理出研究区主要结构面分组特征(表 5)。结合实际调查并分析可知，研究区平均坡高在 300 m 以上，坡角一般大于 30°，多为 40° ~ 60°，岩层倾角大多为 75° ~ 85°；岩层内广泛发育缓倾角结构面，且以垂直于岩层层面的结构面为主，同时还存在少量非垂直于层面的结构面。

通过现场调查及钻孔资料分析可知，坡体表层堆积部分崩坡积碎石土层，厚度 10 ~ 20 m，结构松散–中密，局部架空。下伏基岩为白垩系紫红色、浅灰绿色绢云母板岩，单层厚度一般为 15 ~ 25 cm，局部

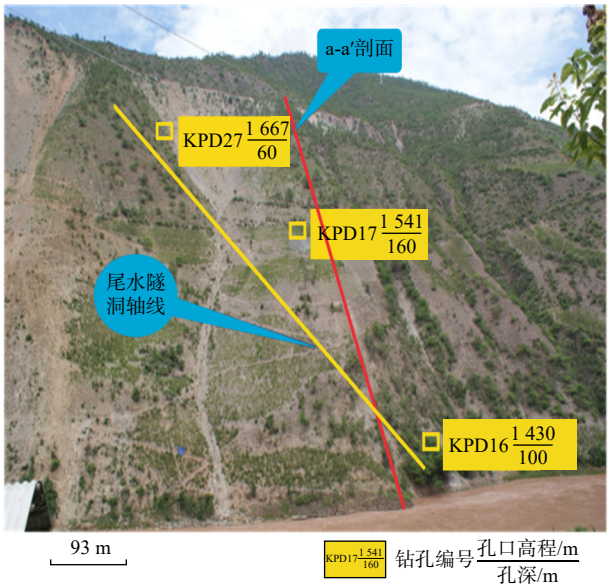


图 3　地面厂房后边坡全貌图

Fig. 3　Panorama of the slope behind the factory floor

夹石英砂岩，整体为薄层–中厚层状，靠近表层岩体风化破碎较为严重。

因此，在试验中可将坡角的范围定在 40° ~ 60°，层面倾角范围定在 75° ~ 85°；同时假定岩体单层层厚为 1 cm，结构面间距为 3 cm，模型垂直剖面方向厚度为 2 cm，模型高度保持 70 cm 不变，底宽定为 90 cm，通过观察分析前期预实验的效果，选择以坡角 60°、层面倾角 85°、结构面垂直于层面为对照组，通过控制单一变量来开展另外 6 组试验，共 7 组试验工况，如图 5 所示。

2　试验结果及分析

按表 5 中试验工况开展 7 组模型试验，每组试验选择坡体变形破坏演化开始和停止 2 个时刻进行分析。

2.1　模型试验变形破坏特征分析

模型 1 和模型 2 中结构面垂直于层面，2 个模型

表 4　研究区顺层倾倒变形体发育基本特征

Table 4　Basic characteristics of the development of toppling bedding deformation bodies in the study area

编号	灾害点或边坡	地质体状态	岩性组合	坡度α/(°)	岩层倾角β/(°)	坡高/m	倾倒深度/m
1	沧江桥滑坡体	滑坡	K_1j板岩夹砂岩	30 ~ 40	70 ~ 85	>300	40 ~ 50
2	下坝址左岸堆积体	倾倒变形	K_1j紫红色板岩、灰绿色板岩	40 ~ 50	75 ~ 80	300	60 ~ 80
3	上坝线左岸边坡	倾倒变形	K_1j板岩、石英砂岩	50 ~ 60	80 ~ 85	400	50 ~ 80
4	中坝线左岸边坡	倾倒变形	K_1j板岩、石英砂岩	48 ~ 56	80 ~ 85	>300	40 ~ 60
5	地面厂房后边坡	倾倒变形	K_1j紫红色、灰绿色绢云母板岩	38 ~ 45	80 ~ 85	460	40 ~ 80
6	尾水隧洞出口边坡	倾倒变形	K_1j板岩、石英砂岩	35 ~ 45	75 ~ 85	250 ~ 300	60 ~ 80

注：K_1j为下白垩统景星组

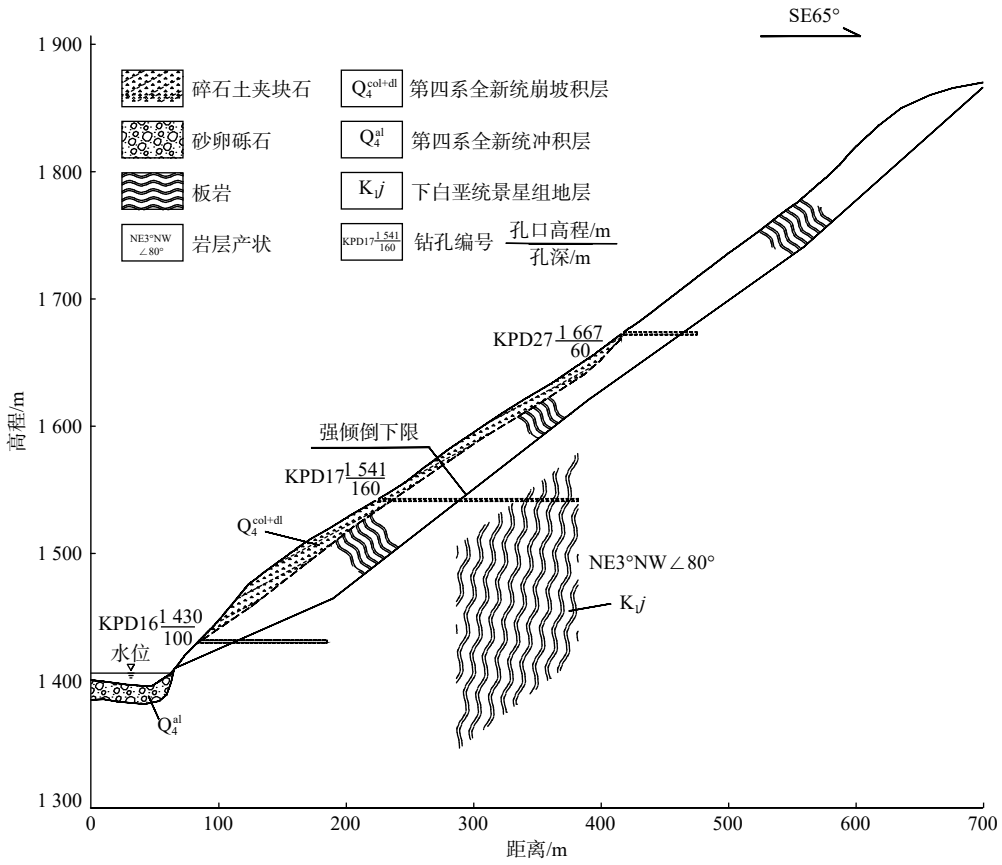


图 4　工程地质剖面图 *a*–*a*′

Fig. 4　Engineering geological profile of *a*–*a*′

表 5　研究区主要结构面分组及特征

Table 5　Groups and characteristics of the main rock discontinuities in the study area

类型	产状	宽度/cm	充填物、胶结情况及分布特征
层面	NW350°～NE10°SE（NW）∠75°～85°	多闭合	延伸长，广泛分布于坝址区
陡倾角裂隙	NW280°～290°NE(SW)∠75°～80°	0.1～0.3	多数充填岩屑，少量为泥质充填，面平直，延伸较长
缓倾角裂隙	NE5°～20°NW(SE)∠5°～25°	0.2～0.3	数量多，充填岩屑，少量泥质，泥钙质胶结，面平直，延伸短
缓倾角裂隙	NW275°～300°SW(NE)∠5°～25°	0.1～0.3	充填岩屑，少量泥质，泥钙质胶结，面平直，延伸短

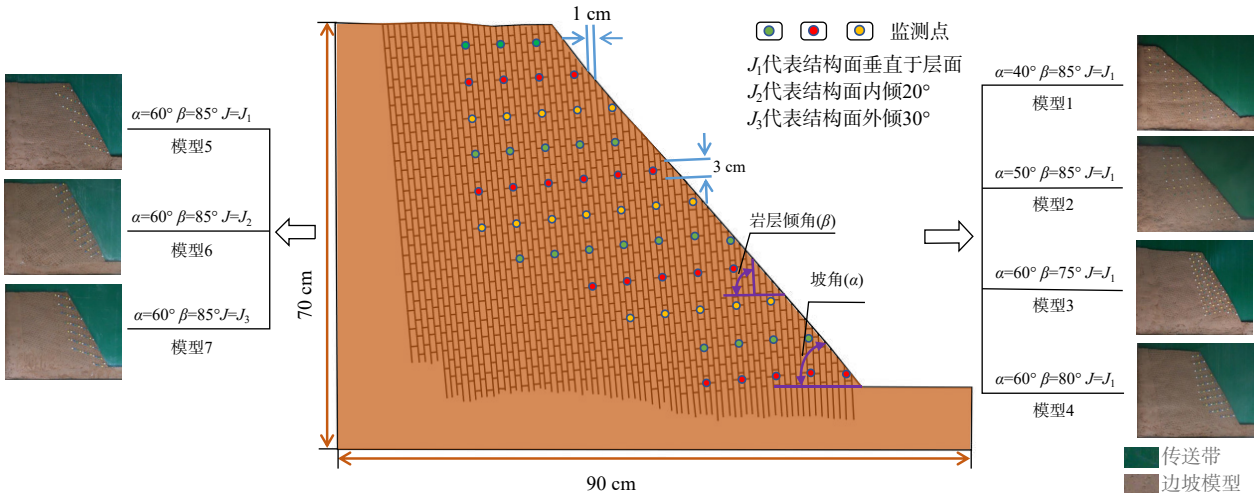


图 5　试验工况设计

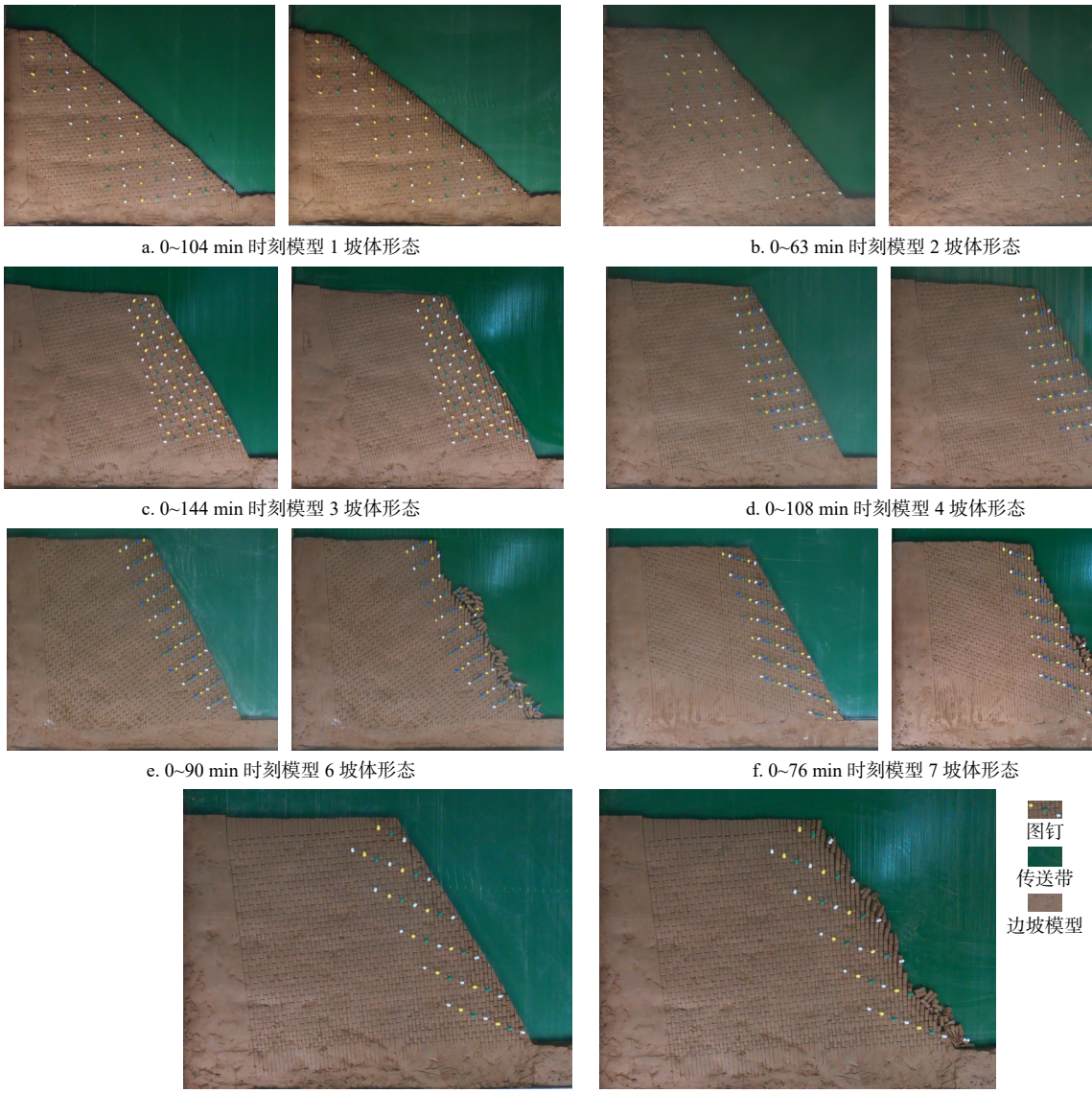
Fig. 5　Experimental condition design

最终均未发生明显的破坏，但边坡层面裂隙已经逐渐张开，坡体发生了向临空面方向的弯曲变形，其中模型 2 的变形更为强烈，在坡肩和坡面中部表层可见岩体已发生轻微的倾倒破坏(图 6a, b)。

模型 3 和模型 4 中结构面垂直于层面，2 个模型最终均未表现出明显的变形特征，层面裂隙仅微微张开，仍处于初始变形阶段，其中层面倾角更大的模型 4 的变形更为强烈，坡面前缘层面裂隙张开相对较大(图 6c, d)。

模型 6 岩层内结构面倾向坡内，倾角为 30°；模型 7 的岩层内结构面倾向坡外，倾角为 20°。2 个模型都发生了整体的倾倒破坏，其中模型 7 坡表岩体经倾倒翻折后发生崩落，堆积于坡脚处，同时，坡表中上部岩体形成新的临空面，并开始沿临空方向发生弯曲蠕变，层间裂隙不断增大；模型 6 相较于模型 7 倾倒破坏更为严重，崩滑范围从坡脚一直延伸至坡表中上部，在坡体浅层形成了较为明显的贯通破裂面(图 6e, f)。

模型 5 中结构面垂直于层面。与模型 3 和模型 4 相比可知，当层面倾角分别为 75°和 80°时，边坡均未表现出明显的变形特征，仅出现层间裂隙略微张开的现象，当层面倾角增加到 85°时，坡体发生了较为严重的倾倒破坏(图 6g)。当保持层面倾角 85°和结构面产状保持不变的前提下，将坡角按 60°−50°−40°的顺序改变，通过对比模型 1、模型 2 和模型 5 的试验结果可知，将坡角减小 10°或 20°后坡体仍出现不同程度的弯曲变形，相较于模型 3 和模型 4 变形更显著；模型 5 与模型 6 及模型 7 相比较，



a. 0~104 min 时刻模型 1 坡体形态　b. 0~63 min 时刻模型 2 坡体形态

c. 0~144 min 时刻模型 3 坡体形态　d. 0~108 min 时刻模型 4 坡体形态

e. 0~90 min 时刻模型 6 坡体形态　f. 0~76 min 时刻模型 7 坡体形态

g. 0~65 min 时刻模型 5 坡体形态

图 6　物理模型试验现象图

Fig. 6　Phenomena of the physical model test

倾倒变形破坏程度则相对较轻(图 6e ~ g)。

由上述试验现象可知: 此类边坡的变形破坏模式可总结为拉裂–倾倒模式, 不同因素如层面倾角、坡角和结构面产状对边坡倾倒变形破坏的影响程度不同。单独增加坡角、岩层倾角都会进一步促进坡体发生倾倒变形破坏, 相较于坡角, 改变岩层倾角对顺层陡倾岩质边坡倾倒变形破坏的影响更大, 近直立的岩层(岩层倾角 ≥85°)是顺层陡倾岩质边坡发生倾倒变形破坏最重要的前提条件之一。结构面的存在使得岩体极易沿其发生拉裂折断, 不同产状的结构面影响程度也有所区别, 具体表现为非垂直于层面的缓倾结构面比垂直于层面的结构面更容易引起边坡的倾倒变形破坏, 且相较于外倾结构面, 当坡体发育内倾结构面时发生倾倒变形破坏的规模更大。整体上, 坡体变形范围主要集中在坡表, 相较于反倾岩质边坡的深层变形破坏特征, 其破坏规模较小, 且顺层岩质边坡破坏部位的后缘不会超过坡肩, 这也与邱俊等[5] 的统计实例和研究结果相吻合。

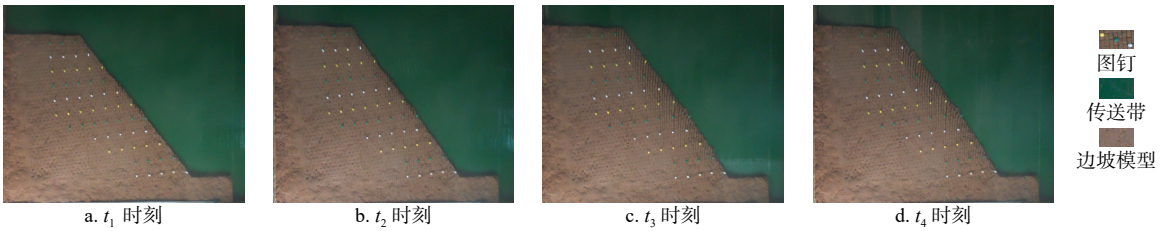
2.2　顺层陡倾岩质边坡倾倒模式演化过程

通过观察 7 组底摩擦试验的结果可知, 模型 1 和模型 2 边坡仅浅表层出现轻微倾倒崩滑现象, 坡肩倾倒变形破坏较为严重; 模型 3 和模型 4 最终均未表现出明显的变形特征, 层面裂隙仅微微张开, 仍处于初始变形阶段; 模型 5, 6, 7 皆出现岩块崩滑现象, 在坡体浅层形成了较为明显的贯通破裂面, 变形倾倒破坏最为严重。因此可以根据试验模型的坡体特征和变形特征将 7 组模型边坡大致分为 3 类: 模型 1 和模型 2 属于近直立顺层岩质缓坡; 模型 3 和模型 4 属于陡倾角顺层岩质陡坡; 模型 5 ~ 模型 7 属于近直立顺层岩质陡坡。分别选取模型 2, 4, 5 作为代表典型, 结合监测点位移及变形速率对其进行演化过程特征进行分析。最终将顺层陡倾岩质边坡的变形破坏过程划分为 3 个主要阶段, 即初始变形阶段、倾倒变形阶段和倾倒破坏阶段。

2.2.1　近直立顺层岩质缓坡演化过程

(1)变形破坏特征

模型 2 主要有以下变形破坏过程: ①边坡模型在模拟重力(底面摩擦力)的作用下坡体内部应力重新分布, 岩层错动下沉较为明显(图 7a)。②岩体开始向临空面方向弯曲蠕变, 层间裂隙逐渐张开, 靠近坡表的岩层倾角从 85°逐渐偏转为直立状态(图 7b)。③岩层在重力作用下进一步蠕变, 表现为大幅度的弯曲变形, 此时坡表岩层倾向转变为反倾状态(图 7c); ④随着试验进行, 岩体各个部位变形进一步发展, 坡肩附近岩体由于拉应力集中, 变形最为强烈, 具体表现为岩体沿着结构面发生倾倒破坏(图 7d)。



a. t_1 时刻　b. t_2 时刻　c. t_3 时刻　d. t_4 时刻

图 7　模型 2 试验现象图

Fig. 7　Test phenomena of Model 2

(2)监测点位移分析

在模型 2 坡表不同部位布置 4 个监测点 D1, D2, D3, D4, 如图 8 所示, 利用监测数据绘制位移–时间曲线图, 如图 9 所示。

由位移–时间曲线(图 9)可知, 模型 2 边坡最大位移位于坡肩(D2)附近, 从坡脚至坡肩(D4–D2), 坡体位移逐步增大, 坡肩靠坡顶一侧的 D1 则在初期应力调整阶段进行部分位移后基本趋于稳定状态, 坡脚 D4 附近的岩体由于长宽比小, 抗弯能力较强, 因此位移增量相对较小。在变形阶段, [0, 24)min 为边坡的初始变形阶段 Ⅰ, 此阶段包括前期的应力调整阶段 Ⅰ$_1$(层间错动压密、快速弯曲变形)和低速弯曲蠕变阶段 Ⅰ$_2$(坡表岩层转至直立之前); [24,48) min, 随着变形进一步加深, 岩层在自身重力作用下逐渐从直立转至反倾状态, 即为图中 Ⅱ 所代表的倾倒变形阶段; [48,62) min 为边坡的倾倒破坏阶段(Ⅲ), 此

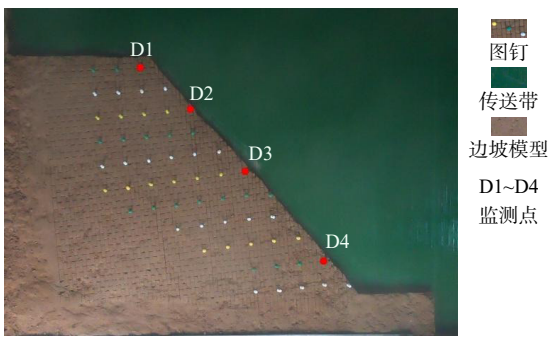
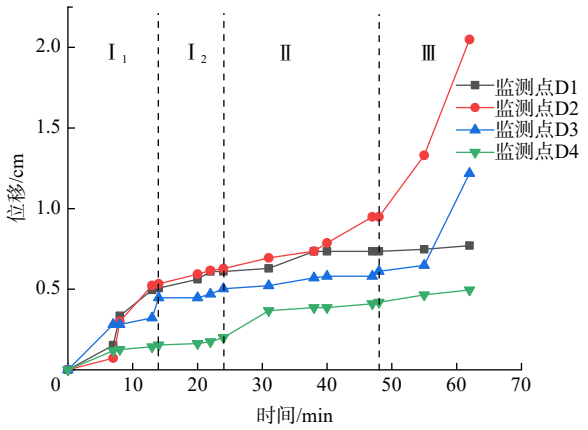


图 8　模型 2 监测点布设图

Fig. 8　Layout of monitoring points for Model 2



Ⅰ1. 应力调整阶段；Ⅰ2. 低速弯曲蠕变阶段；Ⅱ. 倾倒变形阶段；Ⅲ. 倾倒破坏阶段；下同

图 9　模型 2 位移–时间曲线

Fig. 9　Displacement-time curves of Model 2

时位移–时间曲线将会发生突变，即图中 D2, D3 点所表现出的位移陡然增加段。

（3）PIV 速度场分析

PIV 技术[32-38] 的基本原理是运用影像技术获得连续的位移图片，通过图像分析技术分析研究对象运动前后的 2 张图片，最终计算出相应区域的速度。具体过程如下：首先将整个图像划分为几十个小正方形探测区域，将每个正方形区域视为一个子区域；然后将测得的位移与 2 张连续图像之间的测量时间相除，计算出速度矢量；最后将速度矢量分配到子区域的中心，这样即完成了 PIV 处理过程。本研究利用 PIV 技术获取了模型在各个关键演化阶段的速度矢量场分布情况，如图 10 所示。

在初始变形阶段（[0,24) min），斜坡在模拟应力（底面摩擦力）的作用下，各部分之间错动挤压，最大变形速率区集中于坡肩部位，达到 7.13×10^{-6} m/s（图 10a）；在 [24,48) min 斜坡进入倾倒变形阶段，具体表现为坡表岩体速度矢量沿水平方向指向临空面，最大变形速率降至 3.15×10^{-6} m/s（图 10b）；[48,62) min，随着变形进一步发展，斜坡进入倾倒破坏阶段，最大变形速率增大到 9.42×10^{-6} m/s（图 10c）。

2.2.2　陡倾角顺层岩质陡坡演化过程

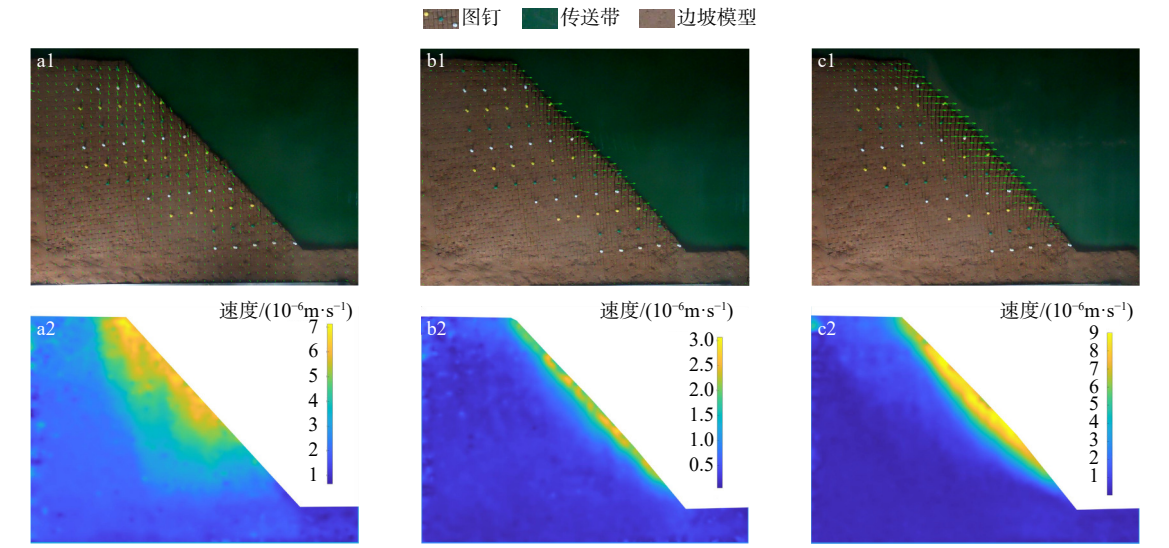
（1）变形破坏特征

模型 4 在整个试验过程中变形缓慢，首先边坡在重力作用下应力重分布，岩层间错动下沉，挤压变形（图 11a）；随后顺层岩体向临空面方向缓慢弯曲蠕变，岩层间裂缝逐渐张开（图 11b），边坡并未经历完整的倾倒变形破坏阶段，仍处在初始变形阶段。

（2）监测点位移分析

在模型 4 坡表不同部位布置 4 个监测点 D1, D2, D3, D4，如图 12 所示，利用监测数据绘制位移–时间曲线图，如图 13 所示。

由图 13 可知，模型 4 最大位移位于坡表中部附近，边坡位移从坡脚至坡肩（D4–D2）呈先增大后减小的趋势，说明现阶段的变形主要发展到坡表中部附近，其中 [0,12) min 为应力调整阶段（I_1），此阶段应力重新分布，坡体变形较为迅速，其中监测点 D4 变形较小的原因在于：相对于其余倾倒变形破坏较为明显的模型，模型 4 所对应的岩层倾角较小，同时坡脚附近的岩体因受岩层长度的限制抗弯能力较强，不易变形。[12,100) min 岩体处于低速弯曲蠕变阶



a. [0, 24) min速度矢量 (a1) 及速度云图 (a2)　b. [24, 48) min速度矢量 (b1) 及速度云图 (b2) c. [48, 62) min速度矢量 (c1) 及速度云图 (c2)

图 10　模型 2 各阶段速度矢量及速度云图

Fig. 10　Velocity vectors and velocity cloud images of Model 2 at each stage



a. t_1 时刻　　b. t_2 时刻

图 11　模型 4 试验现象

Fig. 11　Test phenomena of Model 4

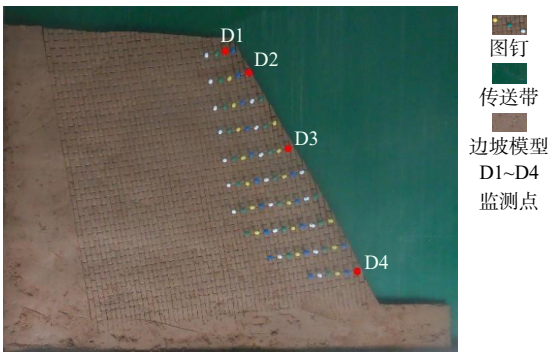


图 12　模型 4 监测点布设

Fig. 12　Layout of monitoring points for Model 4

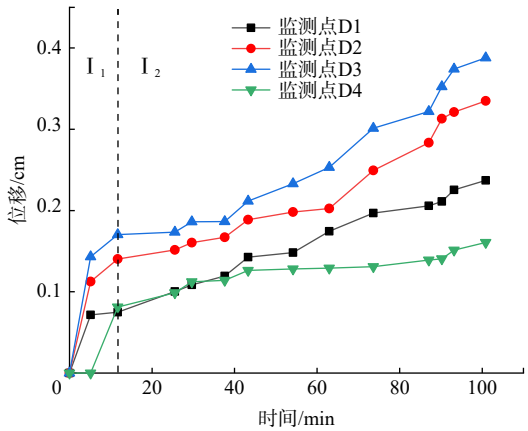


图 13　模型 4 位移–时间曲线

Fig. 13　Displacement-time curves of Model 4

段(I_2), 变形速度极其缓慢。总体而言, 坡体整体位移变形较小, 最大不超过 0.4 cm, 整个过程边坡都处在初始变形阶段。

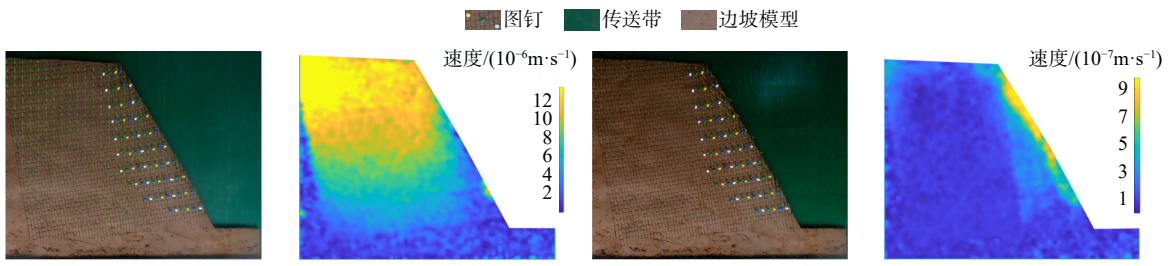
(3)PIV 速度场分析

对模型 4 几个典型时间段的速度矢量场分析如下: [0,12) min, 边坡在重力作用下应力重分布, 坡体最大变形速率区域主要集中在中上部, 最大达到 1.27×10^{-5} m/s, 位移矢量以垂直向下为主, 靠近坡面时发生偏转, 逐渐平行于坡面, 证明边坡此时正处于固结沉降与应力调整阶段(图 14a, 14b)。[12,100) min, 坡表层间裂隙逐渐张开, 附近岩体位移矢量逐渐向临空面方向偏转, 斜坡在此范围表现为低速弯曲蠕变运动特征, 最大变形速率降至 9.65×10^{-7}m/s(图 14c, d)。

2.2.3　近直立顺层岩质陡坡演化过程

(1)变形破坏特征

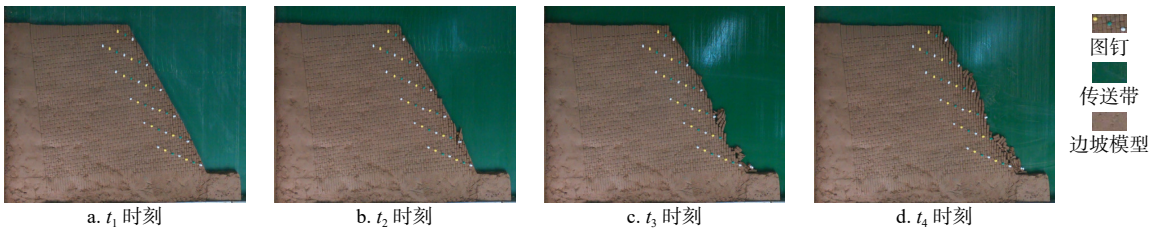
模型 5 主要有以下变形破坏过程: ①边坡在自重作用下坡体内部应力重分布, 顺层岩体向临空面方向弯曲蠕变, 岩层间裂缝逐渐张开, 同时边坡坡脚处由于应力集中且岩层倾角高达 85°, 其局部岩体迅速沿结构面倾倒弯折, 岩块下侧棱角会嵌入下部岩层裂缝之中, 使坡脚表层附近的岩层因受压(抗倾覆)而发生弯曲–拉裂(图 15b); ②由于坡脚表层岩体的脱落, 中上部岩层在卸荷作用下发生进一步弯曲, 开始由近直立向反倾状态转变, 坡表部分岩体因拉裂



a. [0, 12) min 速度矢量　b. [0, 12) min 速度云图　c. [12, 100) min 速度矢量　d. [12, 100) min 速度云图

图 14　模型 4 各阶段速度矢量及速度云图

Fig. 14　Velocity vectors and velocity cloud images of Model 4 at each stage



a. t_1 时刻　b. t_2 时刻　c. t_3 时刻　d. t_4 时刻

图 15　模型 5 试验现象

Fig. 15　Test phenomena of Model 5

已崩落至坡脚处(图 15c)。③随着试验的进行，岩体各个部位变形进一步变形发展，坡表一定深度内出现明显贯通破裂面(图 15d)。

(2)监测点位移分析

在模型 5 坡表不同部位布置 4 个监测点 D1，D2，D3，D4，如图 16 所示，利用监测数据绘制位移−时间曲线图，如图 17 所示。

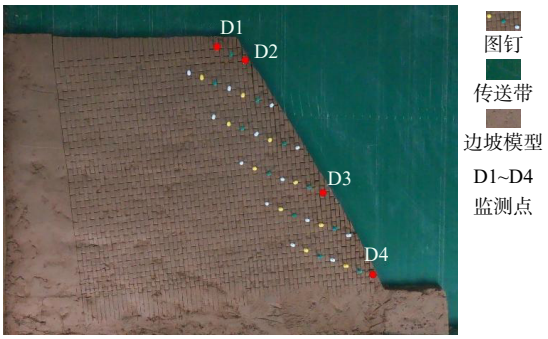


图 16　模型 5 监测点布设

Fig. 16　Layout of monitoring points for Model 5

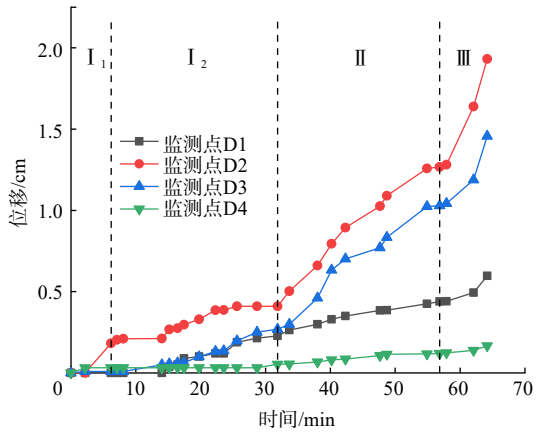


图 17　模型 5 位移−时间曲线

Fig. 17　Displacement-time curves of Model 5

4 个监测点中最大变形位移处位于坡肩附近(D2)，坡脚 D4 附近的岩体由于长宽比小，抗弯能力较强，因此位移增量相对较小。由于坡体不同位置破坏阶段不同步，对应监测点的位移−时间曲线发展趋势不同，因此可以选取变形破坏程度较大且变形趋势较为一致的监测点曲线进行分析，即图 17 中的 D2 和 D3 监测点曲线。其中 [0,5) min 为边坡前期的应力调整阶段(层间错动、快速弯曲变形，图中 I_1 阶段所示)，[5,32) min 为低速弯曲蠕变阶段(坡表岩层转至直立之前，图中 I_2 阶段所示)；[32,57) min，随着变形进一步加深，岩层在自身重力作用下逐渐从直立转至反倾状态，即为倾倒变形阶段(图中Ⅱ阶段所示)；[57,62) min 为边坡的倾倒破坏阶段(图中Ⅲ阶段所示)，此时位移−时间曲线将会发生突变，即图中 D2，D3 点所表现出的位移陡然增加段。

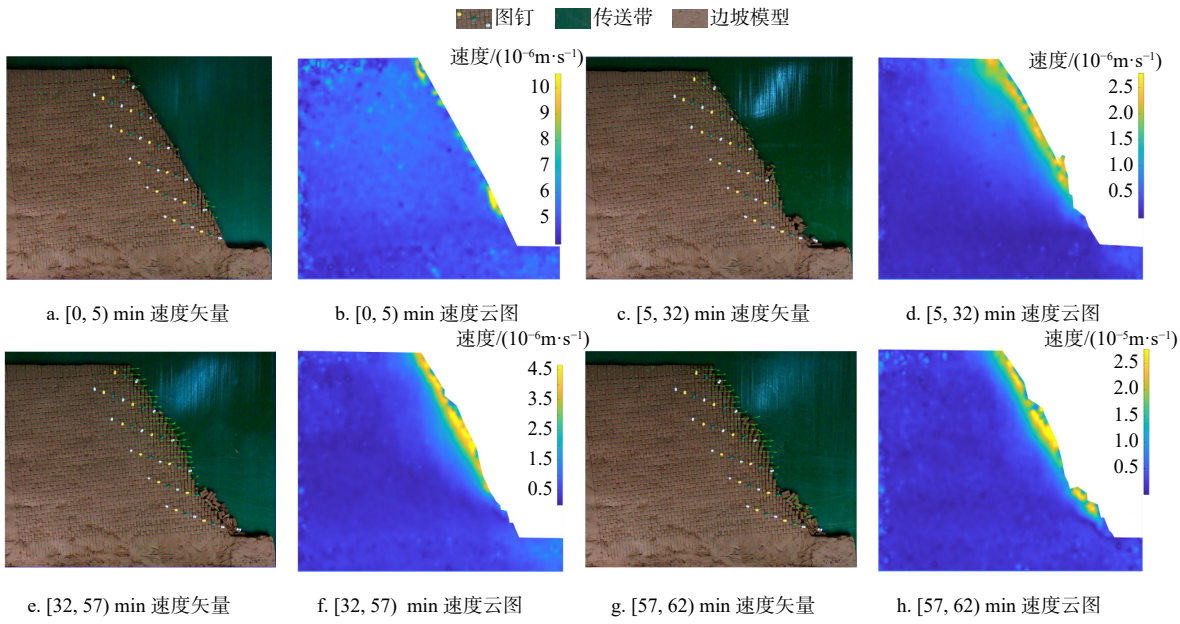
(3)PIV 速度场分析

对模型 5 几个典型时间段的速度矢量场和云图分析如下：考虑到模型 5 的变形倾倒破坏程度较大，部分岩块在变形破坏过程中会与母岩脱落，不利于进行完整变形倾倒破坏的分析，因此在速度云图中选择将崩落的岩块进行剔除。[0，5)min，坡表裂隙逐渐张开，坡脚局部变形速率较大，达到 1.05×10^{-5} m/s(图 18a，b)；边坡在 [5，32)min 范围表现为低速蠕变运动特征，最大变形速率降至 2.93×10^{-6} m/s(图 18c，d)；随后，边坡中上部岩体在临空条件下进一步变形，岩层整体由顺倾方向过渡到反倾，速度矢量接近于水平方向，最大变形速率增至 4.72×10^{-6} m/s(图 18e，f)，位于坡表中上部；最终进入倾倒破坏阶段，最大变形速率继续增大到 2.97×10^{-5}m/s(图 18g，h)。

3　典型倾倒变形破坏机理分析

前文对顺层陡倾岩质边坡倾倒变形破坏试验的现象、特征及演化过程进行了详细分析，本节在以模型 2 为原型的前提下，结合其余 6 组底摩擦试验过程及其他学者的研究成果[39-41]，对顺层陡倾岩质边坡倾倒变形破坏机理进行了分析，最终总结出 4 个阶段：应力调整阶段、弯曲−蠕变阶段、弯曲−拉裂阶段、倾倒−崩滑阶段，如图 19 所示。

(1)应力调整阶段　此阶段持续时间较短，变形幅度相对较大。具体表现为：斜坡在自重应力场(底



a. [0, 5) min 速度矢量　b. [0, 5) min 速度云图　c. [5, 32) min 速度矢量　d. [5, 32) min 速度云图

e. [32, 57) min 速度矢量　f. [32, 57) min 速度云图　g. [57, 62) min 速度矢量　h. [57, 62) min 速度云图

图 18　模型 5 各阶段速度矢量及速度云图

Fig. 18　Velocity vectors and velocity cloud images of Model 5 at each stage

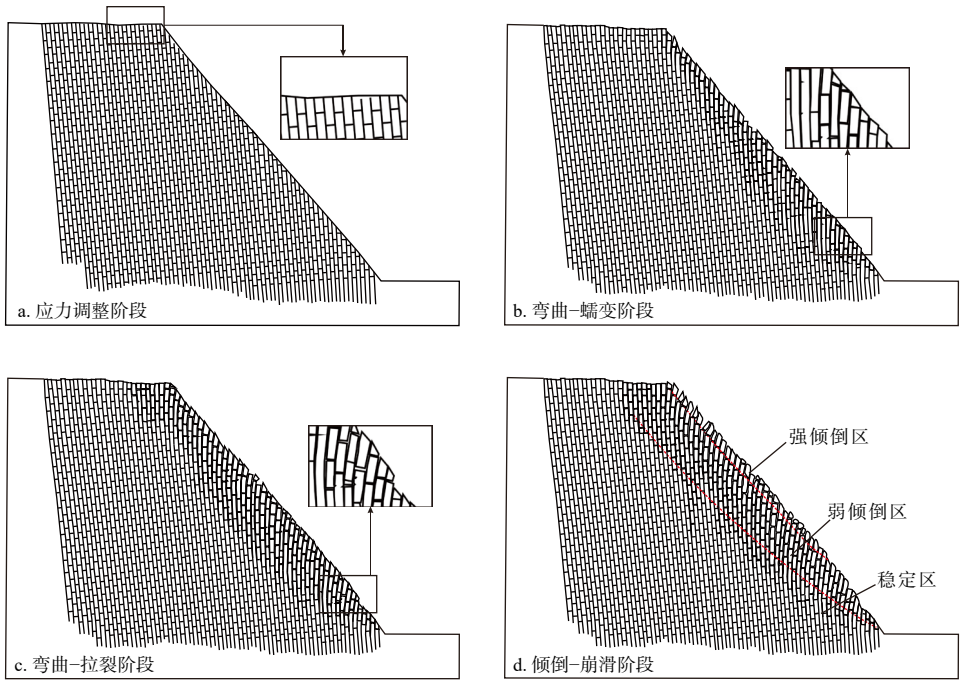


图 19　典型顺层陡倾岩质边坡倾倒变形破坏机理

Fig. 19　Toppling deformation and failure mechanism of the typical steep bedding rock slope

面摩擦力)的作用下，各部分之间充分挤压紧密，即岩层间的错动下沉以及岩块的弯曲变形。在图 19a 中可见在斜坡坡顶位置有一定的下沉错动，坡体下部岩层之间挤压较为紧密。

(2)弯曲−蠕变阶段　在自重应力场的持续作用下，斜坡层间裂隙逐渐张开，坡脚处的岩体由于应力集中从下至上开始向临空面作悬臂梁式弯曲变形[42]，由顺倾状态转变为近直立状态。同时，由于层间裂隙的不断张开，斜坡中部多处岩体在牵引作用下可见发育有沿着层面的拉裂隙，部分中上部岩体的前壁将形成新的临空面[30]，促使中上部的表层岩体开始向临空面方向进行弯曲、蠕变。

(3)弯曲−拉裂阶段　随着斜坡变形的发展，坡脚附近的岩体进一步向临空面方向发生倾倒变形并继续压实，斜坡中上部的岩体在初始蠕变产生的弯矩作用下，层状岩体沿着层面发生错动滑移，因下部

受阻，层状岩体在平行坡面的最大主应力作用下继续开始从下至上作悬臂梁弯曲。当表层岩体在因弯曲达到反倾状态后，其在自重应力作用下推动下部的岩体发生进一步向临空面方向的弯曲，从图 9c 中可看出岩块已经沿着结构面发生拉裂，但坡体并未出现明显的贯通破裂面。

（4）倾倒−崩滑阶段　随着斜坡倾倒变形的加剧变形逐渐向其内部发展，当表层的岩体沿着最大弯曲部位或缓倾结构面发生拉裂到达一定程度时，岩块将沿着拉裂面产生滑移，破坏较为严重的部位甚至会有岩块脱离母岩。此外，在此阶段若有岩块下侧棱角嵌入其外侧层间的裂缝之中，使坡脚表层附近的岩层受到极大压力（倾覆力），这将极大促进外侧岩体因拉裂发生进一步的倾倒破坏，最终使得坡体表层的岩体形成了较为明显的贯通破裂面。从表层至内部大体可以将斜坡划分为强倾倒区[43]、弱倾倒区和稳定区 3 个区域，其中强倾倒区的岩体发生的倾倒变形程度最大，也是最容易发生拉裂倾倒破坏的区域，弱倾倒区较强倾倒区的倾倒变形破坏程度小，但影响深度较强倾倒区大。

4　结论

（1）顺层陡倾岩质边坡主要变形破坏模式为拉裂−倾倒式，在演化初期坡脚处岩体由于应力集中最先发生弯曲变形，并由坡体前缘逐渐向中后部发展，岩层也逐渐由顺倾转变为直立至反倾状态并在重力作用下加速向临空面方向弯曲倾倒，当变形到达一定程度时，岩体将沿着最大弯曲部位或层内结构面拉裂折断，最终岩块将沿着拉裂面发生滑移甚至崩落。

（2）通过对比试验模型的坡体参数及变形特征，将 7 组模型边坡大致分为 3 类：近直立顺层岩质缓坡、陡倾角顺层岩质陡坡、近直立顺层岩质陡坡。对这 3 类模型边坡进行对比分析可知：非垂直于层面的缓倾结构面比垂直于层面的结构面更容易引起顺层陡倾边坡的倾倒变形破坏，且相较于外倾结构面，坡体发育内倾结构面时将发生倾倒变形破坏的规模更大。相较于坡角，岩层倾角对顺层陡倾岩质边坡倾倒变形破坏的影响更大，“近直立的岩层（倾角≥85°）”是顺层陡倾岩质边坡发生倾倒变形破坏最重要的前提条件之一。

（3）从变形阶段的角度将斜坡的变形演化过程划分为初始变形阶段、倾倒变形阶段和倾倒破坏阶段 3 部分，其中初始变形阶段包括应力调整期间的快速弯曲变形、裂隙压密、层间错动以及岩块转变为近直立状态前的低速弯曲蠕变过程。倾倒变形阶段为岩块在自重应力作用下继续发生大幅度的柔性弯曲变形，岩层逐渐由直立转变为反倾状态。当表层的岩体沿着最大弯曲部位或缓倾结构面发生拉裂到达一定程度时，岩块将沿着拉裂面产生滑移，破坏较为严重的部位甚至会有岩块脱离母岩，即进入倾倒−崩滑阶段。

（4）从机理上将顺层陡倾岩质边坡发生倾倒变形破坏的过程划分为应力调整阶段、弯曲−蠕变阶段、弯曲−拉裂阶段、倾倒−崩滑阶段。根据倾倒区的变形程度将变形破坏后的斜坡划分为强倾倒区、弱倾倒区和稳定区，其中强倾倒区的岩层最容易发生倾倒变形破坏，但弱倾倒区的影响深度更大。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 丁戈媛，胡新丽. 大奔流顺层岩质滑坡溃屈型破坏力学机制研究 [J]. 地质科技通报，2020，39(2)：186-190.
DING G Y, HU X L. Mechanical mechanism of buckling failure of Dabenliu consequent bedding rockslide[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(2): 186-190. (in Chinese with English abstract)

[2] 王禹，冯霄，杜娟，等. 建设区顺层岩质滑坡地质力学演化模型：以万州铁峰乡麦地坪滑坡为例 [J]. 地质科技通报，2023，42(5)：43-51.
WANG Y, FENG X, DU J, et al. Geomechanical evolution model of bedding rock landslides in construction areas: A case study of the Maidiping landslide in Tiefeng Town, Wanzhou[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 43-51. (in Chinese with English abstract)

[3] 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 R Q, LI Y S, YAN M. 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)

[4] CRUDËN D M. Limits to common toppling: Reply[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1991, 28(3): 465.

[5] 邱俊，任光明，王云南. 层状反倾−顺倾边坡倾倒变形形成条件及发育规模特征 [J]. 岩土力学，2016，37(增刊 2)：513-524.
QIU J, REN G M, WANG Y N. Characteristics of forming conditions and development scale of toppling in anti-dip and dip stratified slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 513-524. (in Chinese with English abstract)

[6] SAGASETA C, SáNCHEZ J M, CAñIZAL J. A general analytical solution for the required anchor force in rock slopes with toppling

failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(3): 421-435.

[7] LIU C H, JAKSA M B, MEYERS A G. Improved analytical solution for toppling stability analysis of rock slopes[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(8): 1361-1372.

[8] ZHENG Y, CHEN C X, LIU T T, et al. Study on the mechanisms of flexural toppling failure in anti-inclined rock slopes using numerical and limit equilibrium models[J]. Engineering Geology, 2018, 237: 116-128.

[9] ZHAO W H, ZHANG C Q, JU N P. Identification and zonation of deep-seated toppling deformation in a metamorphic rock slope[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(3): 1981-1997.

[10] XIA M, REN G M, TIAN F. Mechanism of an ancient river-damming landslide at Batang Hydropower Station, Jinsha River Basin, China[J]. Landslides, 2023, 20(10): 2213-2226.

[11] TAMRAKAR N K, YOKOTA S, OSAKA O. A toppled structure with sliding in the Siwalik Hills, midwestern Nepal[J]. Engineering Geology, 2002, 64(4): 339-350.

[12] 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 F, TANG H M. Mechanism and evolution of toppling in interbedded slopes at upstream of Yalong River[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(6): 1501-1508. (in Chinese with English abstract)

[13] 周洪福, 聂德新, 李树武. 澜沧江某水电工程大型倾倒变形体边坡成因机制 [J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(3): 48-52.
ZHOU H F, NIE D X, LI S W. Integrated analysis of formation mechanism for large-scale toppling rock mass of a hydropower station on Lancangjiang River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 48-52. (in Chinese with English abstract)

[14] 李长冬, 唐辉明, 胡新丽, 等. 岩石相似材料变形与强度特性及数值模拟研究 [J]. 地质科技情报, 2008, 27(6): 98-101.
LI C D, TANG H M, HU X L, et al. Deformation and strength characteristics and numerical simulation of rock similar material[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(6): 98-101. (in Chinese with English abstract)

[15] 许艺林, 李远耀, 李思德, 等. 库水位下降叠加降雨作用时堆积层滑坡渗流–变形机制 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(1): 216-228.
XU Y L, LI Y Y, LI S D, et al. Seepage-deformation mechanism of colluvial landslides under the action of reservoir water level decline and rainfall[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(1): 216-228. (in Chinese with English abstract)

[16] HE J X, QI S W, ZHAN Z F, et al. Seismic response characteristics and deformation evolution of the bedding rock slope using a large-scale shaking table[J]. Landslides, 2021, 18(8): 2835-2853.

[17] LI L Q, JU N P, ZHANG S, et al. Shaking table test to assess seismic response differences between steep bedding and toppling rock slopes[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(1): 519-531.

[18] ZANG M D, YANG G X, DONG J Y, et al. Experimental study on seismic response and progressive failure characteristics of bedding rock slopes[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(5): 1394-1405.

[19] ZHU C, HE M C, KARAKUS M, et al. Investigating toppling failure mechanism of anti-dip layered slope due to excavation by physical modelling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53(11): 5029-5050.

[20] 谭明健, 周春梅, 孙东, 等. 软硬互层顺层岩质边坡破坏试验 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 274-281.
TAN M J, ZHOU C M, SUN D, et al. Failure experiment of soft-hard interlayer bedding rock slope[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 274-281. (in Chinese with English abstract)

[21] ZHANG B C, NING Y B, TANG H M, et al. Study on the evolutionary process of interbedded anti-inclined slope block-flexure toppling in the upper Yalong River[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(7): 240.

[22] DING B D, HAN Z Y, ZHANG G C, et al. Flexural toppling mechanism and stability analysis of an anti-dip rock slope[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2021, 54(8): 3721-3735.

[23] 杨登芳, 胡新丽, 徐楚, 等. 基于物理模型试验的多层滑带滑坡变形演化特征 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 300-308.
YANG D F, HU X L, XU C, et al. Deformation and evolution characteristics of landslides with multiple sliding zones based on physical model test[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 300-308. (in Chinese with English abstract)

[24] 宋娅芬, 陈从新, 郑允, 等. 缓倾软硬岩互层边坡变形破坏机制模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 487-494.
SONG Y F, CHEN C X, ZHENG Y, et al. Model experimental study of deformation and failure mechanism of low-angled slopes with interbedding of soft and hard rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 487-494. (in Chinese with English abstract)

[25] 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 R J, HU F H, SHI Y C, 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)

[26] 孙书伟, 李圆, 杨晓锐, 等. 不同岩层倾角顺倾层状岩质边坡破坏机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(7): 1607-1620.
SUN S W, LI Y, YANG X R, et al. Study on the failure mechanism of rock slopes with dipped layered structures under various rock dip conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(7): 1607-1620. (in Chinese with English abstract)

[27] 张令非, 陈忠辉, 唐岳松. 含弱层边坡分区滑动破坏模式及演化规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(6): 1145-1154.
ZHANG L F, CHEN Z H, TANG Y S. Study on regional sliding failure modes and evolution regularity of slopes with weak layers[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(6): 1145-1154. (in Chinese with English abstract)

[28] 宁奕冰, 唐辉明, 张勃成, 等. 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.
NING Y B, TANG H M, ZHANG B C, et al. Investigation of the rock similar material proportion based on orthogonal design and its application in base friction physical model tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2009-2020. (in Chinese with English abstract)

[29] ZHANG L F, CHEN Z H, NIAN G Q, et al. Base friction testing methodology for the deformation of rock masses caused by mining in an open-pit slope[J]. Measurement, 2023, 206: 112235.

[30] 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 Y, ZHANG G C, CHEN H J, 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)

[31] BENG X T, ZHANG G C, YANG Y C, et al. Flexural toppling characteristics of anti-dip soft rock slope with base friction test[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(1): 21.

[32] PATEL A, DHARPURE J K, SNEHMANI, et al. Estimating surface ice velocity on Chhota Shigri glacier from satellite data using particle image velocimetry (PIV) technique[J]. Geocarto International, 2019, 34(4): 335-347.

[33] 阮博阳, 杨盼瑞, 郭会荣, 等. 基于 PIV 技术研究不连通孔隙中残余 DNAPL 的溶解速率影响因素 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(4): 241-249.
RUAN B Y, YANG P R, GUO H R, et al. Factors influencing the dissolution rate of residual DNAPL in unconnected pores based on PIV technology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(4): 241-249. (in Chinese with English abstract)

[34] CHEN G Q, LI L, ZHAO C, et al. Acceleration characteristics of a rock slide using the particle image velocimetry technique[J]. Journal of Sensors, 2016, 2016(1): 2650871.

[35] KANG S, ZHAO Q H, LIU C W. Calculative width of pile foundation on slope based on particle image velocimetry (PIV)[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 7084791.

[36] TERWISSCHA VAN SCHELTINGA R C, COCO G, FRIEDRICH H. Sand particle velocities over a subaqueous dune slope using high-frequency image capturing[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(10): 1881-1894.

[37] WANG D Y, ZHU H H, WANG B J, et al. Performance evaluation of buried pipe under loading using fiber Bragg grating and particle image velocimetry techniques[J]. Measurement, 2021, 186: 110086.

[38] WANG Z, LI C, DING X M. Application of transparent soil model tests to study the soil-rock interfacial sliding mechanism[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(4): 935-943.

[39] 王东, 刘金尧, 李广贺, 等. 露天矿顺倾软岩边坡内排追踪压帮治理工程: 以贺斯格乌拉南露天煤矿首采区南帮为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 80-87.
WANG D, LIU J Y, LI G H, et al. Open-pit mine soft rock slope internal row tracking pressure side control engineering: A case study at the south side of the first mining area of Hesigewula south open-pit coal mine[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 80-87. (in Chinese with English abstract)

[40] 程雨柯, 李亚虎, 夏金梧, 等. 无人机技术在超高陡边坡危岩体半自动识别中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(1): 143-154.
CHENG Y K, LI Y H, XIA J W, et al. Application UAV technology semi-automatic identification dangerous rock masses on ultra-high steep slopes[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(1): 143-154. (in Chinese with English abstract)

[41] 曾启强, 王立朝, 刘伟, 等. 广州地区岩质边坡崩塌影响范围计算方法初探 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 159-168.
ZENG Q Q, WANG L C, LIU W, et al. Calculation methods of the collapse influence range of a simple rock slope in the Guangzhou area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 159-168. (in Chinese with English abstract)

[42] 汪鸣飞, 章广成, 包刘磊, 等. 顺层陡倾岩质边坡变形机理探究 [J]. 安全与环境工程, 2021, 28(5): 107-120.
WANG M F, ZHANG G C, BAO L L, et al. Research on deformation mechanism of steep bedding rock slope[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(5): 107-120. (in Chinese with English abstract)

[43] LIU M, LIU F Z, HUANG R Q, 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.

Summary for “顺层陡倾岩质边坡倾倒模式试验”

Test study on the toppling mode of steep bedding rock slope

WANG Linkang[1], ZHENG Zihan[2], ZHANG Guangcheng[1*], ZENG Xin[3], DING Bingdong[1], BENG Xingtao[1]

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China;
2. Wuhan Hanyang Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China;
3. China Energy Engineering Group Hunan Electric Power Design Institute Co., Ltd., Changsha 410007, China

First author, E-mail: jayce_wlk2000@163.com

* Corresponding author, E-mail: zhangguangc@cug.edu.cn

Abstract: There are a large number of steep bedding rock slopes along the left bank of Dahuaqiao Hydropower Station in the middle and upper reaches of Lancang River. The unique engineering geological conditions in the reservoir area provide a good breeding environment for deformation. The landslide deposits formed by the collapse of the toppling deformed body are widely distributed in the reservoir area, which causes great difficulties for the operation and maintenance of the hydropower project. [**Objective**] In this paper, in order to study the evolution process, toppling mode, toppling deformation and failure mechanism of steep bedding rock slope, [**Methods**] we used the slightly weathered slate on the left bank of the reservoir as a reference prototype for the similar material material, then we choose to use the bottom friction test method to analyze the deformation and failure characteristics of slope under different condition of slope angles, plane inclination angles and structural plane occurrences. [**Results**] The results show that: ①The main toppling failure mode of the steep bedding rock slope is the tensile-toppling type. In the early stage of evolution, the rock mass at the foot of the slope is the first to topple due to stress concentration, and gradually develops from the front edge of the slope body to the middle and back. The rock mass in the middle of the slope surface also gradually changes from the forward dip to the upright to the reverse dip state, and accelerates to bend and topple towards the free surface under the action of gravity. When the deformation of rock mass reaches a certain extent, it will fracture along the maximum bending part or structural plane, and eventually slip along the tensile fracture plane or even collapse directly. ②By comparing the slope parameters and deformation characteristics of the test models, the 7 groups of model slopes are roughly divided into 3 categories: near-vertical bedding rock gentle slope, steep dip bedding rock steep slope, near-vertical bedding rock steep slope. Compared with slope Angle, the rock layer dip Angle has more influence on the toppling deformation and failure of the steep bedding rock slope. The gently inclined structural plane that is not perpendicular to the plane is more likely to cause the toppling deformation and failure of the steep bedding slope than the one perpendicular to the plane, and the scale of toppling deformation and failure is larger when the slope body develops the inward structural plane compared with the outward inclined structural plane. ③From the perspective of deformation stage, the deformation evolution process of slope is divided into initial deformation stage, toppling deformation stage and toppling failure stage. ④The toppling deformation and failure process of steep bedding rock slope is divided into stress adjustment stage, flexural-creep stage, flexural-sliding stage and toppling-sliding-collapse fracture stage from the mechanism. According to the deformation degree of the toppling area, the deformed slope can be divided into three zones: a strong toppled zone, a weak toppled zone, and a stable zone. [**Conclusion**] The research results can provide reference for the research of the evolution process, toppling mode, toppling deformation and failure mechanism of steep bedding rock slope.

Key words: steep bedding rock slope; similar material; bottom friction physical model test; toppling mode; toppling deformation and failure

Received: 2023-09-28; Revised: 2023-11-16; Accepted: 2023-11-17

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230550