

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

穆成林, 裴向军, 王睿, 王超

Analysis on deformation characteristics of a cutting high bedding rock slope with multiple weak layers based on physical model tests

MU Chenglin, PEI Xiangjun, WANG Rui, and WANG Chao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-07>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于离散元的含软弱夹层岩质边坡滑移机理分析

§{suggestArticle.titleEn}

范昊天, 孙少锐, 王亚山, 张纪星, 刘宝生 中国地质灾害与防治学报. 2019, 30(3): 12-17

三峡库区大型斜倾顺层滑坡失稳机理分析

Instability mechanism of massive oblique bedding rock landslide in the Three-Gorges Reservoir: A case study of the Longjing landslide in Shizhu County of Chongqing City

王平, 朱赛楠, 张枝华, 吴晓宾, 杨柳, 赵慧 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(4): 24-32

云南鲁甸地震红石岩堰塞湖右岸特高边坡综合监测及变形特征分析

Comprehensive monitoring and deformation analysis of extra high slope on the right bank of Hongshiyuan Dammed Lake in Ludian Earthquake

郭延辉, 杨溢, 高才坤, 杨志全 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 30-37

地震作用下顺倾多弱层岩质边坡动力响应

Dynamic response of down-dip multi-weak-layer rock slope under earthquake

王来贵, 向丽, 赵娜, 刘向峰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 18-25

基于Mein-Larson入渗模型的凹形边坡稳定性分析

Stability analysis of concave slope based on Mein-Larson infiltration model

胡庆, 吴益平, 苗发盛, 张龙飞, 李麟玮 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 26-35

三峡库区巫峡剪刀峰顺层岩质岸坡破坏模式分析

An analysis on the destruction mode of Wuxia scissors peak down the shore slope in the Three-Gorges Reservoir area

王平, 胡明军, 黄波林, 张枝华, 郑涛, 吴坤达, 毛博 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 52-61



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-07

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.

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

穆成林¹, 裴向军², 王睿¹, 王超¹

(1. 四川师范大学工学院, 四川 成都 610101; 2. 成都理工大学生态环境学院, 四川 成都 610059)

摘要:含有多层软弱夹层的开挖边坡具有坡体结构复杂、稳定性评价及治理难度大的特点。以黔西地区现场开挖高边坡为研究对象, 建立室内物理试验模型, 通过不同的工况开挖, 呈现变形破坏演化过程, 分析变形破坏模型及形成机理, 确定失稳破坏范围。结果显示: 开挖边坡裂隙产生由表及里, 由上及下, 由最初的陡倾短小裂隙扩展延伸, 最终贯通, 形成近似平行岩层的长大裂缝; 缓坡度开挖变形破坏为浅表层, 整体稳定性较好, 失稳范围及规模较小; 陡坡度开挖变形破坏规模大, 稳定性较差, 以滑移-拉裂深层失稳为主; 浅层滑坡滑面以层间泥化夹层剪切为主, 基本呈直线状; 深层滑坡滑面以层间泥化夹层剪切以及陡倾裂隙组合形成阶梯状。该研究成果对于黔西地区的顺层开挖高边坡设计、稳定性评价、治理措施选择等具有重要的指导意义。

关键词:软弱夹层; 开挖高边坡; 变形失稳; 物理模型试验

中图分类号: P642.22 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2022)03-0061-07

Analysis on deformation characteristics of a cutting high bedding rock slope with multiple weak layers based on physical model tests

MU Chenglin¹, PEI Xiangjun², WANG Rui¹, WANG Chao¹

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

2. College of Ecological Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The excavated slope with multi-layer weak interlayer has the characteristics of complex slope structure and difficult stability evaluation and treatment. Based on the on-site excavation of high slope in western Guizhou, an indoor physical test model is carried out. Through excavation under different working conditions, the evolution process of deformation and failure is presented. The deformation and failure model and formation mechanism are analyzed to determine the instability and failure range. The results show that the fissures in the excavated slope extend from the surface to the inside, from top to bottom, from the initial steep short fissures, and finally through to form a long fissure approximately parallel to the rock layer; the deformation and failure of gentle slope excavation is shallow surface, the overall stability is good, and the instability range and scale are small; the excavation deformation and failure scale of steep slope is large, and the stability is poor, mainly in the deep instability of slip tensile fissure; the slip surface of shallow landslide is mainly sheared by interlayer argillaceous interlayer,

收稿日期: 2021-07-28; 修订日期: 2021-10-26 投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41902296); 国家重点研发计划项目(2017YFC1501000)

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

which is basically linear; the sliding surface of deep landslide is stepped by the combination of interlayer argillaceous interlayer shear and steep inclined fractures. The research results have important guiding significance for the design, stability evaluation and treatment measures of bedding excavation high slope in western Guizhou.

Keywords: weak interlayers; high slope excavated; deformation instability; physical model test

0 引言

大型顺层岩质边坡具有整体稳定性差、受影响因素多、坡体结构复杂、治理难度大等特点,一旦失稳破坏,将造成巨大的经济及生命财产损失。在长期研究与实践中,大量学者针对大型顺层岩质边坡进行过深入研究,积累了丰富的成果。顺层岩质边坡坡体结构中的层间软弱夹层,是变形失稳的控制性因素。例如,1963年10月9日意大利的Vajont水库蓄水后,侏罗系地层坡体中厚5~15 cm的黏土夹层发生软化,最终滑面沿黏土层发展形成顺层滑坡^[1];2003年7月13日,三峡库区姊归县千将坪顺层岩质滑坡,造成大约 $1.5 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的滑体高速滑入清干河,滑带为侏罗系聂家山组石英砂岩上部的黄绿色炭质页岩泥化层,厚2~5 cm^[2];2009年6月5日重庆武隆鸡尾山滑坡是一起典型特大型顺层岩质滑坡,造成80多人伤亡或失踪,软弱层为二叠系栖霞组中段(P_1q^2)与上段(P_1q^3)间的含炭质和沥青质页岩,厚约30 cm^[3];2017年9月23日贵州荔波县境内的三荔高速公路在开挖支护过程中,顺层路堑边坡在持续降雨的条件下沿层间厚度为10 cm的泥化夹层发生失稳破坏^[4]。类似工程建设中顺层岩质开挖边坡变形失稳的案例举不胜数,常造成巨大人员伤亡和经济损失。

对于含有软弱夹层的边坡变形失稳特征及形成机理研究也取得了大量的成果。许强等^[3]通过数值分析和现场调查,通过特殊的岩溶型坡体结构以及控制性块体、裂缝等,揭示了武隆鸡尾山顺层滑坡形成机理;张社荣等^[5]基于Sarma法和SRM计算分析,揭示复杂多层软弱夹层边坡岩体的破坏机制及稳定性特征;许宝田等^[6]以含有3条软弱夹层的九顶山边坡为例,进行数值计算,反映了边坡变形及应力变化的全过程以及稳定性;龙建辉等^[7]建立了两种含双软弱夹层顺层岩质滑坡计算模型,考虑软弱夹层的抗剪强度在滑坡不同发育阶段的强度衰减,分析滑坡在不同的力学判定条件下滑动模式和启动机理;唐朝晖等^[8]以杉树槽滑坡为例,通过FLAC^{3D}模拟滑坡渐进破坏过程,分析顺层岩质滑坡变形破坏的发展规律;提出了迈入加速变形的能量学判据。

上述研究成果基于现场勘查、理论计算以及数值

分析等手段。然而,为了获取边坡变形破坏全过程现象和特征,或针对边坡变形破坏演化规律超前预测分析,物理模型试验是最为有效和直接的方法。例如,泮晓华等^[9]建立室内含有不同锁固段类型的岩质边坡模型,验证锁固段发生拉剪等不同的变形破坏模式,为安全分析评价提供了计算依据;陶志刚等^[10]以内蒙古长山壕露天矿区大规模倾倒失稳反倾边坡为研究对象,建立室内物理模型,通过试验再现了“叠合悬臂梁”变形特征以及NPR锚索高效性;周月等^[11]通过室内岩质边坡物理模型研究岩质滑坡冲击破碎运动过程,呈现了高度滑坡运动过程中的冲击破碎解体特征及规律;黄达等^[12]、陈达等^[13]均通过室内离心机模型试验,再现了复杂层状软岩楔形滑坡变形演化过程和软硬互层岩质反倾边坡弯曲倾倒变形演化过程;王海等^[14]建立室内物理模型,研究了含软弱结构面顺层岩质边坡在开挖及降雨条件下的变形机理和变形破坏特征;胡时友等^[15]通过不同桩间距下双排微型桩加固碎石土滑坡室内模型试验,研究微型桩受力变形特性和滑坡推力传递规律;李玉瑞等^[16]通过室内模型边坡不同工况下的试验,获得了延安北连接线黄土滑坡变形机制。

黔西地区某石化场地即将开挖的多个高度近百米的顺层岩质边坡,含有多层夹层,坡体结构复杂,开挖高度大,稳定性差,一旦失稳危害大的特点。那么该类型边坡在开挖过程中变形破坏模式是什么?演化过程有何规律?失稳范围有何特征?借助前人的研究思路,采用不同的材料建立室内物理模型,将现场原始边坡按一定的比例缩小,并赋以适当的力学参数,设置位移监测,在重力和外部条件作用下预测边坡变形破坏的模式、演化过程以及失稳范围等,为该场区以及区域内类似边坡的稳定性评价、工程开挖施工工况、设置治理措施等提供前提基础依据。

1 开挖边坡概况

1.1 边坡工程地质条件

研究区边坡位于黔西织金县某石化场地,在大地构造上位于上扬子地台滇东—黔中隆起东部,燕山期强烈的褶皱和断裂变形尤其复杂^[4,17],属于典型溶蚀中低山地貌。该场地整体位于后寨背斜一翼,根据规划工况,

将形成 7 处开挖边坡。边坡上覆 0.2~0.5 m 的含碎石黏土层,下伏三叠系中统关岭组 (T_2g^3) 泥质白云岩夹薄层页岩、泥岩组成,岩层产状为 $355^\circ \sim 4^\circ \angle 25^\circ \sim 32^\circ$,含有三组节理, $30^\circ \angle 26^\circ$ 、 $190^\circ \angle 56^\circ$ 、 $310^\circ \angle 62^\circ$,节理间距为 8.0~40.0 cm,成微张-张开状。坡体原始边坡坡度为 $34^\circ \sim 18^\circ$,前缘陡,后缘缓形态。

边坡岩体岩层厚度一般为 1.2~3.0 m,由于节理切割,整体呈层状、块状-碎裂状,部分节理面表层存在风化以及雨水下渗携带泥质物质,含有少量泥质填充。层间软弱夹层为构造错动作用下形成的薄层页岩、泥岩,厚度为 2.2~6.4 cm,遇水软化特征明显。

1.2 预开挖工况

根据场地规划设计,该 7 处边坡坡向为正北,开挖高度 88.2~94.6 m,形成典型的顺层岩质开挖高边坡。考虑该处边坡具有典型的含有多层夹层、坡体结构复杂、开挖高度大、稳定性差、一旦失稳危害大等特点,故施工设计为由上至下依次开挖,开挖坡比预设三种工况:

工况一:缓坡比开挖,开挖坡度为 30° ,每级边坡高度为 10.0 m,马道宽度为 2.0 m。

工况二:陡坡比开挖,开挖坡度为 50° ,每级边坡高度为 10.0 m,每 3 级设计一宽度为 10.0 m 的马道,其余马道宽度为 2.0 m。

工况三:陡缓坡度相结合,1~3 级设计开挖坡度为 30° ,4~6 级设计开挖坡度为 40° ,7~9 级设计开挖坡度为 50° ,每级边坡高度为 10.0 m,每隔 30.0 m 设置一道宽度为 10.0 m 的马道,其部分马道宽度均为 2.0 m。

2 模型试验设计

2.1 相似条件与模型材料

模型相似条件是指现场原边坡模型与室内制作边坡模型的物理相似,包括了几何尺寸相似和物理力学性质相似^[12]。试验综合考虑原边坡模型实际高度和坡体结构特征等因素,采用几何相似比为 1:60 建立试验模型,同时根据相似理论参数取值原则,确定其它相关试验参数如表 1。

现场原边坡与试验模型的相似主要体现在坡体结构特征和材料强度。原边坡坡体结构主要分为层状灰岩以及层间泥化夹层。因此,依照实际边坡的特征,试验材料采用石英砂:石膏:水泥:水=1:0.6:0.05:0.4 制作层状岩体相似材料,即预制做成不同尺寸的薄层块体,其分别为:15 cm×10 cm×3 cm;15 cm×10 cm×2 cm;15 cm×10 cm×1 cm,其目的是模拟坡体不同厚度、

表 1 试验主要物理量相似比取值

Table 1 The ratios of main physical quantities in tests

物理量	相似比符号	相似取值
几何相似	C_l	60
重度相似	C_r	1
泊松比相似	C_μ	1
摩擦系数相似	C_f	1
黏聚力相似	C_c	60
摩擦角相似	C_ϕ	1
应变相似	C_ε	60
时间相似	$C_t=(C_l)^{1/2}$	7.75

不同尺寸的岩体结构;采用贵州高岭土掺杂砂制作层间泥化夹层材料。按照相应规范及文献制作相似的模型力学参数,达到实验要求。

2.2 模型制作及开挖

在前后无遮挡的框架箱内制作边坡模型,其内部尺寸为:长 2.5 m,高 2.4 m,宽 0.6 m。根据现场原边坡的坡体结构特征,首先在模型底部铺设 25° 的斜坡,高度约 40 cm,形成顺层基础结构;然后由厚到薄依次铺设预制块体,三种厚度块体交替铺设,保证每层厚度一致;层面间铺设软弱夹层相似材料,保证均匀平整。节理以预制块体之间的搭接裂缝模拟,适当充填贵州高岭土。模型搭建完成后静置 6 小时以上,待整体稳定后进行侧面涂抹白色薄层石膏并标识 10 cm 方格网,设置拉线式位移监测计(图 1)。现场原边坡采用机械开挖,模型边坡按照设计开挖线以手工揭层为主,局部辅以块体切割。实际开挖与试验开挖均对坡体具有一定扰动,试验研究中均忽略开挖扰动对边坡变形破坏的影响。

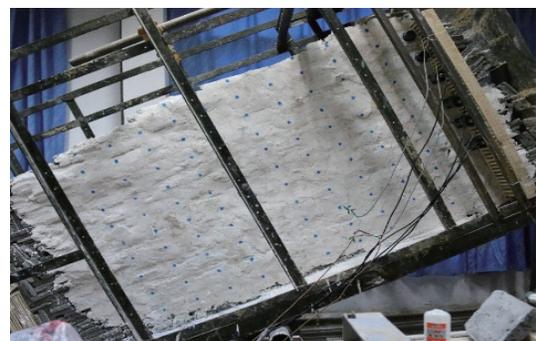


图 1 边坡模型搭建及监测布置

Fig. 1 Slope model building and monitoring layout

2.3 失稳范围阈值

在实际边坡变形失稳演化过程中,坡体不同位置变形位移是存在差异的,通常以变形位移小于某一特征值时,则判定为稳定状态。因此,失稳范围边界线确定需

要根据边坡的实际情况和安全性要求,综合考虑位移阈值。目前,边坡失稳研究通常采用位移 $\alpha=5.0\text{ mm}$ 为阈值^[18],所以文章以位移 $\alpha=5.0\text{ mm}$ 的点依次连接得到曲线,确定为边坡失稳范围界线。

3 试验结果与分析

边坡模型依据现场实际施工情况,由上及下,由表及里依次进行逐级开挖。同时,详细刻画坡体裂缝产生、演化规律,记录整理边坡位移数据,为变形失稳模式、形成机理以及确定失稳破坏范围提供信息。

3.1 工况一边坡模型变形破坏演化特征

(1)1~3级边坡开挖后,明显裂缝产生,4级边坡开挖后,随即浅表层产生裂缝,以竖向或垂直层面的陡倾裂缝发育最为明显,其次为顺坡向裂缝,延伸长度一般为3~5 cm,贯通性差,张开度微小,无明显位移。随着继续开挖,边坡裂缝逐渐延伸贯通,且向深部发展,尤其是顺层面裂缝发展最为迅速。最终边坡首先在6级边坡坡脚发生顺层剪切滑移,层间发生由下向上相对错动位移,竖向拉裂缝由表及里扩展延伸。边坡裂缝演化过程见图2。

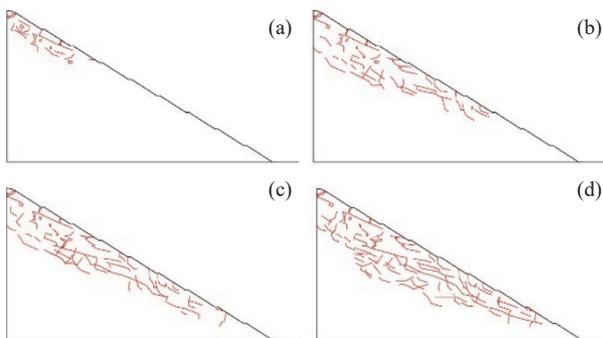


图 2 工况一裂缝演化过程素描图
Fig. 2 The sketch of deformation and fracture evolution process scheme 1 slope model

(2)开挖边坡变形失稳模式为滑移-拉裂,由下及上,由表及里牵引式渐进失稳演化机制,且形成多级失稳坡体,主滑面以直线、折线型交替出现,其中3~4级边坡处滑面埋深最大,依据相似比换算实际边坡的变形破坏范围最大深度为15.0~20.0 m。边坡变形失稳破坏滑面及裂缝见图3。

3.2 工况二边坡模型变形破坏演化特征

(1)1~2级边坡开挖后,边坡无裂缝及明显变形迹象。3级边坡开挖后,1级坡面中上部及坡顶部位出现不同程度的裂缝,延伸2~3 cm,以陡倾为主,张开度较小,3级坡脚处出现剪切错动迹象。4~6级边坡开挖



图 3 工况一边坡模型最终变形破坏特征
Fig. 3 Final deformation and failure characteristics of scheme 1 slope model

后,1级坡面拉裂缝增宽,向坡体深处延伸,且层面出现裂缝贯通,同时3级坡脚处层间错动加剧,6级坡脚出现沿层面相对错动迹象。7~9级边坡开挖后,边坡首先从1级边坡坡面沿拉裂缝向下发生滑移变形;3级坡面拉裂缝同样作为失稳坡体后缘边界,使得4~8级坡体整体沿层面向下滑移,部分坡面及层间拉裂缝明显增宽、延伸长度增加。边坡裂缝演化过程见图4。

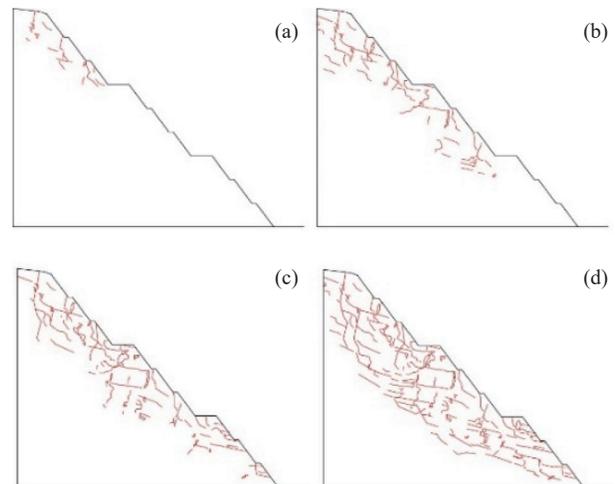


图 4 工况二裂缝演化过程素描图
Fig. 4 The sketch of deformation and fracture evolution process scheme 2 slope model

(2)模型边坡变形失稳模式为由上及下,由表及里推移式渐进失稳演化机制,变形破坏规模较大,从坡顶到坡脚可出现多级滑面。滑面形状连续多变,以阶梯状、直线状或混合状为主。依据相似比换算实际边坡的变形破坏范围最大深度为25.0~50.0 m,位于4~5级边坡处,为深层变形破坏。边坡变形失稳破坏滑面及裂缝见图5。

3.3 工况三边坡模型变形破坏演化特征

(1)1~3级边坡开挖后,裂缝发育较少,且张开宽

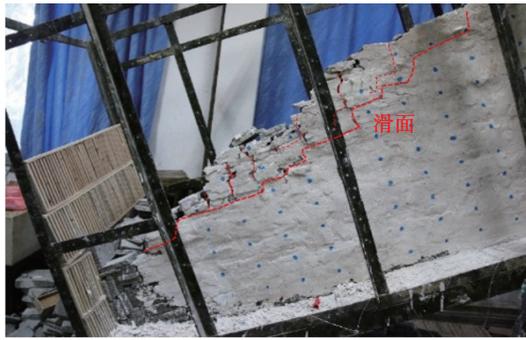


图 5 工况二边坡模型最终变形破坏特征

Fig. 5 Final deformation and failure characteristics of scheme 2 slope model

度较小, 边坡无明显位移; 4~6 级边坡的开挖, 在 3 级马道出现裂缝, 宽度较小, 延伸深度为 5.6 cm; 5 级边坡坡面以及坡脚均出现变形迹象; 7~9 级边坡开挖后, 边坡 4~5 级坡体沿层间软弱夹层剪切滑移, 随即发生失稳破坏。滑面整体呈现阶梯状, 且距离坡面埋深存在较大差异。边坡裂缝演化过程见图 6。

(2) 边坡开挖后, 4~5 级边坡发生整体式渐进变形失稳特征, 在其它坡面则存在推移式或牵引式渐进变形破坏特征; 边坡变形破坏最大范围位于 4~5 级边坡处, 依据相似比换算实际深度为 30.0~60.0 m, 为深层变形破坏。边坡变形失稳破坏滑面及裂缝见图 7。

3.4 边坡变形破坏分析与评价

通过上述三种工况的开挖试验, 模型边坡裂缝产生发展、变形破坏演化过程及形成机理具有一定的规律性和差异性。整理变形破坏裂缝发展特征、滑面贯通形态、最终失稳范围及规模等, 分析形成机理, 结合实际边坡开挖后对场地规划影响, 其认识结果列于表 2。

表 2 边坡变形破坏分析与评价

Table 2 Comprehensive analysis and evaluation of slope deformation and failure

工况	变形破坏特征	稳定性及评价复杂性	失稳规模及范围	失稳模式及机理
工况一	变形破坏特征以滑移-拉裂为主。裂缝产生由表及里, 通常先产生竖向或垂直坡面的陡倾短小裂缝, 然后裂缝进一步扩展延伸形成近似平行坡面的长大裂缝, 最终贯通引起变形破坏。缓坡度开挖, 滑面最终呈现沿软弱夹层剪切的平直滑面; 陡坡度开挖则形成分级变形破坏, 滑面呈现折线、台阶形态。	稳定性相对较好, 滑面短小, 最终贯通后整体呈折线型, 局部出现台阶, 易于识别, 评价简单。	规模较小, 最大深度为一般 4.0~8.0 m, 位于 3~4 级坡面, 易形成多级失稳。支护方便、简单。占地面积大, 不利于工程建设规划。	缓坡度开挖条件下, 坡体沿层面剪切滑移, 变形破坏模式为渐进牵引式的滑移-拉裂。重力和开挖临空面是形成失稳破坏的主要因素, 陡倾裂缝及软弱夹层剪切滑移是形成机理的重要条件。
工况二	稳定性差, 滑面长大, 形状连续多变, 以阶梯状、直线状或混合状为主。变形失稳演化过程复杂, 评价难度较大。	稳定性较差, 滑面长大, 形状多变, 阶梯状、直线状或混合状, 以台阶形态为主。变形破坏演化过程复杂, 评价难度大。	规模较大, 最大深度为一般为 20.0~50.0 m, 位于 4~5 级边坡。易形成 1~2 级失稳。支护复杂, 难度大。占地面积小, 利于工程建设规划。	陡坡度开挖条件下, 坡体呈现多级变形破坏, 通常是上部滑移-拉裂坡体对下部坡体形成一定的推力, 整体变形破坏模式为渐进推移式。边坡开挖后, 在重力和临空面的作用下, 首先沿着层间软弱夹层剪切滑移, 由于滑面埋深较大, 同时竖向裂隙发育, 在滑移错动过程中形成折线、台阶式滑面。
工况三	稳定性较差, 滑面长大, 形状多变, 阶梯状、直线状或混合状, 以台阶形态为主。变形破坏演化过程复杂, 评价难度大。	稳定性较差, 滑面长大, 形状多变, 阶梯状、直线状或混合状, 以台阶形态为主。变形破坏演化过程复杂, 评价难度大。	规模较大, 最大深度为一般为 30.0~60.0 m, 位于 4~5 级边坡。易形成 1~2 级失稳。支护复杂, 难度大。占地面积较小, 较利于工程建设规划。	陡-缓相结合的开挖条件下, 坡体上部坡体沿层间软弱夹层剪切滑移形成滑移-拉裂变形破坏, 下部则在上部失稳坡体推力以及自身重力作用下, 产生渐进推移式变形失稳。而坡体中部变形破坏则兼含了牵引式和推移式, 形成机理复杂。

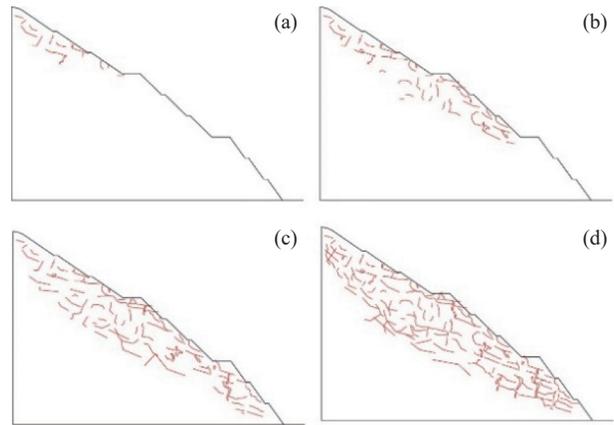


图 6 工况三裂缝演化过程素描图

Fig. 6 The sketch of deformation and fracture evolution process scheme 3 slope model

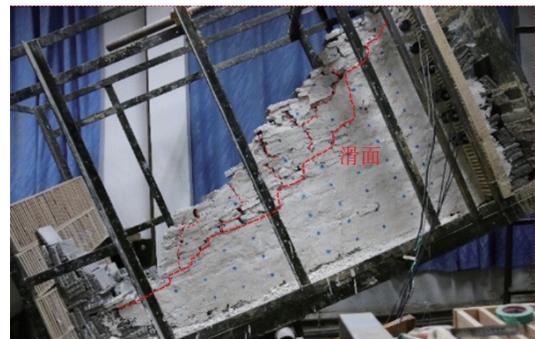


图 7 工况三边坡模型最终变形破坏特征

Fig. 7 Final deformation and failure characteristics of scheme 3 slope model

4 结论

(1) 边坡开挖变形破坏模式以滑移-拉裂为主。坡体裂缝由表及里, 由上及下产生, 扩展延伸, 最终贯通, 标识边坡失稳破坏。陡坡度开挖变形破坏规模大, 稳定

性较差,以滑移-拉裂深层失稳为主;浅层滑坡滑面以层间泥化夹层剪切为主,基本呈直线状;深层滑坡滑面以层间泥化夹层剪切以及陡倾裂隙组合形成阶梯状。

(2)依据现场实际边坡预开挖设计的 3 种工况,室内物理模型进行相应设计、试验。工况一缓坡度开挖,边坡变形破坏主要是浅表层,形成多级多层次;工况二、工况三陡坡度、宽马道开挖,边坡变形破坏呈现深层、规模大特征,失稳模式复杂,稳定性较差。

(3)依据相似原理,计算不同开挖条件下边坡变形破坏范围,差异明显:工况一变形破坏规模小,深度一般为 4.0~8.0 m,最大深度位于 3~4 级坡面;工况二变形破坏规模较大,深度一般为 20.0~50.0 m,最大深度位于 4~5 级坡面;工况三变形破坏深度可达为 30.0~60.0 m,最大深度位于 4~5 级坡面。

(4)根据室内试验成果综合分析,建议现场边坡开挖过程应进行坡体变形监测以及稳定性动态评价;每开挖 1~2 级后进行相应支护保证边坡稳定,致使不发生大规模深层边坡破坏,同时务必做好坡面排水。

参考文献 (References) :

- [1] MÜLLER-SALZBURG L. The Vajont catastrophe—A personal review [J]. *Engineering Geology*, 1987, 24(1/2/3/4): 423–444.[LinkOut].
- [2] 杨海平,王金生.长江三峡工程库区千将坪滑坡地质特征及成因分析[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(2): 233–239. [YANG Haiping, WANG Jinsheng. Geological features and cause analysis of Qianjiangping landslide of July 13, 2003 on Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(2): 233–239. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 许强,邓茂林,李世海,等.武隆鸡尾山滑坡形成机理数值模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(11): 2012–2021. [XU Qiang, DENG Maolin, LI Shihai, et al. Numerical simulation for formation of Jiweishan landslide in Wulong County, Chongqing City of China [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(11): 2012–2021. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 穆成林.顺层岩质高边坡开挖过程变形失稳演化机制及预测评价研究——以织金石化场区边坡为例[D].成都:成都理工大学, 2017. [MU Chenglin. Study on deformation instability evolution mechanism and prediction during excavating process of bedded rock slope: A case of slope as the studied object in the gasoline construction site [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张社荣,谭尧升,王超,等.多层软弱夹层边坡岩体破坏机制与稳定性研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(6): 1695–1702. [ZHANG Sherong, TAN Yaosheng, WANG Chao, et al. Research on deformation failure mechanism and stability of slope rock mass containing multi-weak interlayers [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(6): 1695–1702. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 许宝田,钱七虎,阎长虹,等.多层软弱夹层边坡岩体稳定性及加固分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊 2): 3959–3964. [XU Baotian, QIAN Qihu, YAN Changhong, et al. Stability and strengthening analyses of slope rock mass containing multi-weak interlayers [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Sup 2): 3959–3964. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 龙建辉,任杰,曾凡桂,等.双软弱夹层岩质滑坡的滑动模式及变形规律[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(10): 3031–3040. [LONG Jianhui, REN Jie, ZENG Fangui, et al. Sliding mode and deformation law of double weak interlayer rock landslide [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(10): 3031–3040. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 唐朝晖,余小龙,柴波,等.顺层岩质滑坡渐进破坏进入加速的能量学判据[J]. *地球科学*, 2021, 46(11): 4033–4042. [TANG Zhaohui, YU Xiaolong, CHAI Bo, et al. Energetic criterion of entering acceleration in progressive failure process of bedding rockslide: A case study for Shanshucao landslide [J]. *Earth Science*, 2021, 46(11): 4033–4042. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 洋晓华,秦四清,薛雷.岩质斜坡锁固段破坏模式的物理模型试验研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(6): 13–18. [PAN Xiaohua, QIN Siqing, XUE Lei. Study on failure modes of various locked segments in rock slopes based on physical model tests [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2018, 39(6): 13–18. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 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)]
- [11] 周月,廖海梅,甘滨蕊,等.滑坡运动冲击破碎物理模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(4): 726–735. [ZHOU Yue, LIAO Haimei, GAN Binrui, et al. Physical modeling test on impacting fragmentation during landslide moving [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(4): 726–735. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 陈达, 许强, 郑光, 等. 基于离心模型试验的复杂层状软岩楔形滑坡变形演化研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3374-3384. [CHEN Da, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Study on deformation evolution of wedge landslide in complex layered soft rock based on centrifugal model test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3374-3384. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王海, 张梓钦, 杨国香, 等. 五孟高速公路顺层岩质边坡变形破坏模型试验 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3754-3762. [WANG Hai, ZHANG Ziqin, YANG Guoxiang, et al. Model tests of deformation and failure of bedding rock slope in Wuyu expressway [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3754-3762. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 胡时友, 蔡强, 李超杰. 双排微型桩加固碎石土滑坡物理模型试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 114-120. [HU Shiyu, CAI Qiang, LI Chaojie. Physical model test study of debris landslide reinforcement with double row micro-piles [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 114-120. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李玉瑞, 程晓伟, 赖天文, 等. 延安北连接线黄土滑坡变形机制地质分析与模型试验研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 35-42. [LI Yurui, CHENG Xiaowei, LAI Tianwen, et al. Geological analysis and model test study on the deformation mechanism of loess landslide in the North connection line of Yan'an [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(2): 35-42. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 穆成林, 裴向军, 裴钻, 等. 基于岩体结构特征和未确知测度评价模型的岩质开挖边坡稳定性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(4): 150-158. [MU Chenglin, PEI Xiangjun, PEI Zuan, et al. A study of the stability of rock excavated slope based on rockmass structure and unascertained measure evaluation models [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4): 150-158. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 马洪生, 庄卫林, 刘阳, 等. 顺层岩质边坡静力开挖物理模拟试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 37-43. [MA Hongsheng, ZHUANG Weilin, LIU Yang, et al. Physical excavation test research on a bedding rock slope [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 37-43. (in Chinese with English abstract)]