

基于PFC2D的缓倾顺层滑移-溃曲型岩质 滑坡破坏机制分析

苗朝^{1,2}, 张勇^{1,2}, 李乾坤^{1,2}, 易靖松^{1,2}

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734;

2. 自然资源部地质灾害风险防控工程技术创新中心, 四川 成都 611734)

摘要:川东红层地区岩层倾角通常较缓,在缓倾顺向斜坡上出现了一种较为特殊的滑移-溃屈变形破坏形式。相对于缓倾岩层的顺层滑移,其破坏、受力和变形显得较为复杂。本文在分析兴浪坡滑坡变形模式的基础上,基于PFC2D软件对其进行破坏过程及微观力学分析。结果显示:受川东宽缓褶皱影响滑坡所处地形呈上陡下缓的特点,岩层变缓和老滑坡堆积造成的应力集中是斜坡发生滑移-溃曲的原因。变形破坏模式解析其分为滑移-弯曲鼓胀、强烈弯曲-隆起和滑移-溃屈破坏3个阶段。模型破坏云图位移显示滑坡中部监测点2位置存在应力集中导致的岩体错断和剪断特征,与实际调查相符合。滑坡中部溃曲处在滑动前主要表现为压应力集中,当应力集中到一定程度,岩体沿着层面或破碎带剪切贯通,形成滑移-弯曲-溃曲变形模式。研究结果对于其他类似边坡的稳定性评价和识别具有参考意义。

关键词:缓倾顺层滑坡;滑移-溃曲;变形破坏模式;数值模拟;PFC2D

中图分类号:P642.22 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)05-0011-07

The deformation mechanism analysis of gently inclined and consequent sliding-buckling rock landslides based on PFC2D

MIAO Zhao^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}, LI Qiankun^{1,2}, YI Jingsong^{1,2}

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China;

2. Technology Innovation Center for Risk Prevention and Mitigation of Geohazard, MNR, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: The dip angle in the red bed of eastern Sichuan is generally relatively small, a special form of sliding-buckling deformation appears on the gently inclined and consequent slope. Compared to bedding-sliding, its failure, stress and deformation are more complicated. In this paper, based on the analysis of the deformation mode of Xinglang slope, the damage process and micromechanical analysis are carried out based on PFC2D software. The results revealed that: due to the topographic features of steep at the top and slow at the bottom which affected by the wide and gentle folding in east Sichuan, the main reason why the sliding-buckling happens is the stress concentration caused by the gentle rock stratum and old landslide accumulation. The deformation damage mode is analyzed into three stages: sliding-bending bulging, strong bending-bulging and sliding-buckling. The displacement of the model damage nephogram shows that the rock body faults and shear characteristics due to stress concentration exist at the location of monitoring point 2 in the middle of the landslide, which is consistent with the actual investigation. The central buckling of the landslide shoed compressive stress concentration before sliding, when the stress concentrated to certern degree, the rock mass sheared along the bedding or the break zone, by which the deformation pattern of sliding-bending-buckling formed. The research has referrencial significance for the stability evaluation of other similar slope.

收稿日期:2023-07-09; 修回日期:2023-09-05 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.05.002

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“地质灾害防治技术应用”(编号:DD20230087)

第一作者:苗朝,男,汉族,1986年生,高级工程师,地质工程专业,博士,主要从事地质灾害调查评价和监测预警研究工作,四川省成都市郫都区成都现代工业港港华路139号,7940499@qq.com。

引用格式:苗朝,张勇,李乾坤,等.基于PFC2D的缓倾顺层滑移-溃曲型岩质滑坡破坏机制分析[J].钻探工程,2023,50(5):11-17.

MIAO Zhao, ZHANG Yong, LI Qiankun, et al. The deformation mechanism analysis of gently inclined and consequent sliding-buckling rock landslides based on PFC2D[J]. Drilling Engineering, 2023,50(5):11-17.

Key words: gently inclined and consequent landslide; sliding-buckling; deformation pattern; numerical simulation; PFC2D

0 引言

缓倾顺层岩质滑坡的破坏与失稳是常见的岩土工程重大灾害之一,大规模缓倾层状滑坡的变形失稳都具有一个较复杂的变形破坏过程,通过野外详细勘察定性分析结合室内数值模拟是研究滑坡变形破坏模式的重要方法^[1-6]。

学者Li等^[7]在1990年认为滑移-弯曲变形一般经历3个主要阶段:滑移-轻微弯曲→强烈弯曲-隆起→滑面贯通-整体失稳。陈自生^[8]认为拱溃型顺层岩质滑坡属于推动式滑坡。坡脚处岩层逐层拱起,并开裂脱层,发展成抗滑段,其与沿岩层层面发育的主滑段相贯通,由此呈现崩溃与滑动。滑坡经历蠕滑-滑动-剧滑三个阶段。黄润秋等^[9]以地质分析为基础,分析了天台乡特大型滑坡的发生过程,指出滑坡的过程包括地下水汇聚-顶托、挤入-楔裂和溃裂-滑动3个阶段;李强等^[10]就某些实例的形成机制进行了讨论,并提出了蠕变滑移-弯曲的破坏机制概念;魏玉峰等^[11]在野外调研的基础上,从地形、地应力和岩性组成等方面分析了软硬相间层状斜坡产生滑移-弯曲模式的成因机制;陈达等^[12]研究了顺层边坡溃曲变形形成条件与层面倾角的关系,运用数理统计的分析方法,研究了溃曲滑坡的发育规律及岩层屈曲的影响因子。陈全明等^[13]以常吉高速公路朱雀洞滑坡为例,研究了研究缓倾顺层岩质斜坡滑移-弯曲变化过程,再现了斜坡变形破坏演化过程。闫国强等^[14]以巫峡段顺层灰岩岸坡“滑移-弯曲”破坏实例,基于弹塑性板翘曲模型,考虑岩体动态劣化概念,结合广义H-B准则GSI(ι)岩体参数动态指标,推导得临界挠曲段平衡方程。余姝等^[15]研究青石-抱龙段顺层灰岩库岸,21个顺向斜坡中9个斜坡存在岩层弯曲现象,大量层面有擦痕,局部岩层强烈弯曲形成了类似逆断层的现象。王秋生等^[16]基于能量法推导了多层岩质边坡临界溃曲长度计算公式,考虑层间和交叉节理对边坡溃曲演变过程进行了模拟。

兴浪坡滑坡位于四川省宣汉县君塘镇团山村8组,受川东红层地区宽缓褶皱的影响,斜坡整体地形随岩层倾角变化由坡顶 $21^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 直至坡脚坡度逐渐变缓至 $16^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。岩层倾角的变化造成其变形破坏模式较为复杂,滑坡中部多处发现弯折-溃曲现象,

横向上形成一条隆起溃屈带,呈现出顺层滑移-弯曲溃曲的破坏形式。因此,本文在兴浪坡滑坡野外调查的基础上,总结其变形破坏特征和模式;采用PFC2D颗粒流模拟滑坡滑移-溃曲破坏过程和细观力学机制;深入研究中部阻滑段的应力变化特征,微观分析造成其中部弯折溃曲的力学机制,为此变形类型的滑坡提供一定的理论支撑。

1 兴浪坡滑坡发育特征

兴浪坡滑坡平面呈短“舌”形,长约304 m,宽约610 m,体积约148万 m^3 ,为大型岩质顺层滑坡。滑坡纵向坡度 $16^{\circ}\sim 25^{\circ}$,呈上陡下缓的折线形态。滑坡左侧以山脊为边界,右侧以下错台坎为界。前缘发育两个老滑坡堆积体,两处堆积体均为粉质粘土夹碎块石,未见基岩出露(图1)。通过滑坡地形地貌和变形破坏特征,将兴浪坡滑坡划分为3个区:

(1)滑移-拉陷区。位于滑坡后部,后缘可见沿软弱层面发生顺层滑动形成的长约15 m的“光面”石板,具有明显擦痕。石板前发育一垂直于滑坡方向的长约300 m、宽约4 m的拉裂槽,拉裂槽内充填大量的残坡积碎块石土。滑移区地表树木歪斜,分布有大量拉张裂缝(图2)。

(2)隆起-溃屈区。位于滑坡中部,变形破坏迹象最为明显。岩层弯曲隆起并溃曲剪出,岩体折断破碎呈倾倒状,折断及碎块状岩体零乱堆积。折断处隆起高度3~8 m,形成U型凹槽(图3)。高程约445 m处隆起溃屈带右侧可见大量岩层发生反倾折断(图4)。折断溃曲处发育多条垂直于滑动方向的横向拉张裂缝和鼓胀裂缝,裂缝拉开约10~15 cm,最长延伸约80 m。

(3)阻滑区。滑坡前缘由于岩层变缓和老滑坡堆积体压脚形成阻滑区。老滑坡堆积体整体处于基本稳定状态,可见少量的树木歪斜及裂缝、下错台坎等变形迹象。由于中上部岩体发生折断崩落,可见大量块石堆积于滑坡前缘。

2 变形破坏模式解析

滑移-溃曲变形破坏多出现在顺层斜坡中,尤其是夹有软弱结构面的层状斜坡。这种斜坡由于层状

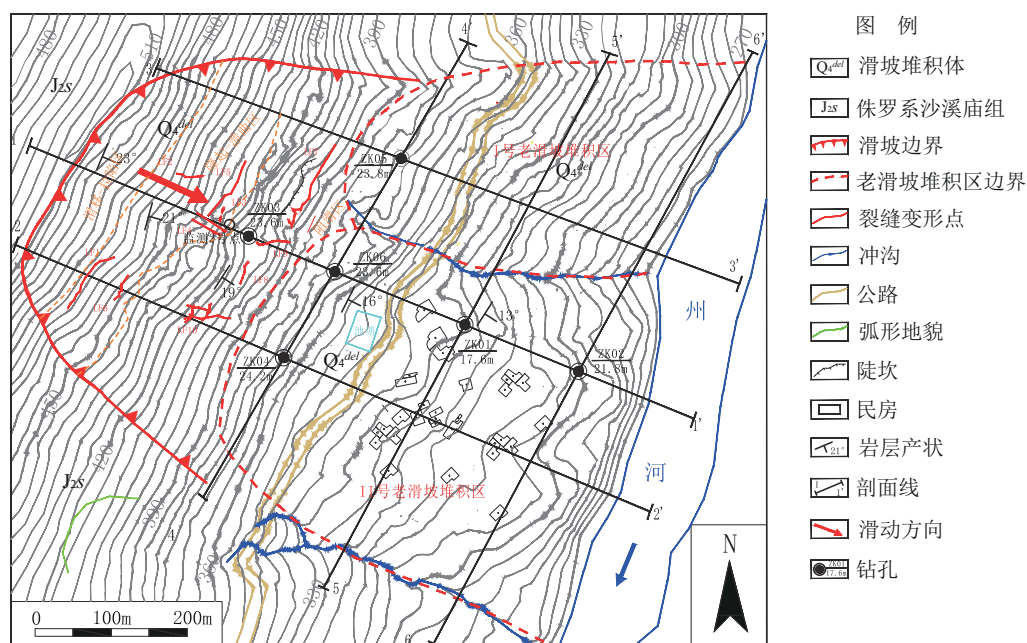


图1 兴浪坡滑坡平面图

Fig.1 Planar graph of Xinglangpo landslide



图2 滑坡后缘“光面”石板(可见明显擦痕)

Fig.2 The “glossy” stone slab at the back edge of the landslide (visible scuff marks exist)



图4 滑坡中部溃屈带岩层反倾

Fig.4 Rock reversal in the middle landslide buckling zone

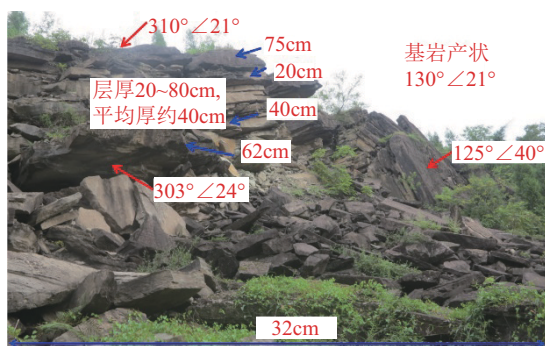


图3 弯曲隆起并溃曲剪出

Fig.3 Bending-bulging and slide-buckling

结构及软弱层、面的存在,多呈板状结构。斜坡上部岩体沿泥岩或软弱结构面产生顺层滑动,下部岩体倾角较缓形成约束,陡缓交界处易由于滑移挤压产生应力集中发生弯曲。随着应力不断累积增大,岩

层弯曲隆起更为强烈,滑坡后缘或弯曲隆起部位发育拉张和挤压裂缝。最后岩体发生弯曲折断,斜坡沿着破碎带剪出发生溃曲破坏。主要分为以下几个阶段:

(1)滑移-弯曲鼓胀阶段。缓倾顺层斜坡在自重、构造应力与地下水等综合作用下,斜坡沿着物理力学性质较低的软弱结构面发生顺向滑动。受前缘地形条件或岩层倾角变缓的约束,顺层滑移下滑受阻。为了平衡坡脚集中的应力,近坡脚部位轻微隆起,有类似岩层褶曲的拉裂面和剪切面发育在弯曲部位。层面的切向应力和坡面的径向应力的差异导致斜坡表面出现轻微弯曲鼓胀变形(图5)。

(2)强烈弯曲-隆起阶段。随着滑坡变形破坏持续增加,坡表形成拉应力集中的张力带。越靠近

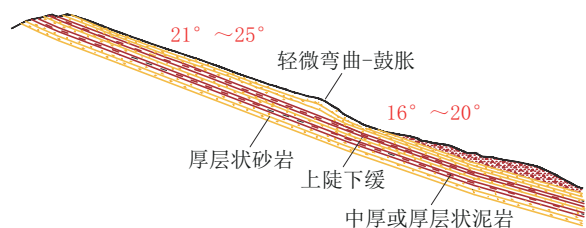


图5 滑移鼓胀阶段

Fig.5 Sliding and bulging stage

坡表,层面越易被拉裂形成拉张裂面,坡脚的约束使弯曲变形更加剧烈。随着斜坡岩层弯曲变形量持续增大,弯曲隆起顶部发育拉张裂缝,而在两侧则发育共轭剪切裂隙,这一阶段岩体更加破碎,岩层发生更加强烈的弯曲隆起,变形也逐渐向坡体深部发展(图6)。

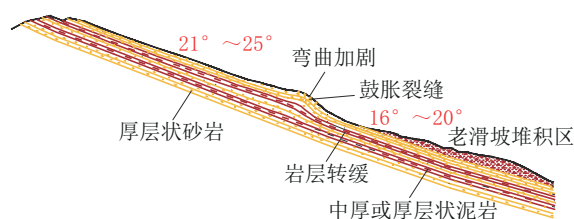


图6 弯曲鼓胀阶段

Fig.6 Bending and bulging stage

(3)滑移-溃曲破坏阶段。此阶段上覆岩体继续滑动,易在坡脚或岩层变缓部位产生应力集中,岩层继续弯曲并拉裂。应力集中处岩体折断破碎成为潜在剪出口。当应力集中到一定程度斜坡沿着破碎带发生滑移剪出,剪出口岩体发生溃曲、折断、断裂。滑坡中上部发育大量的裂缝,后缘可能会出现拉陷槽。除溃曲段外滑体的成层性依旧保持的较好,形成滑移-溃曲型滑坡(图7)。

3 PFC2D数值模拟

3.1 数值模型建立

数值模型通过内嵌FISH语言建立,采用粒径膨胀法生成斜坡初始颗粒集合体。由于本文重点研究滑移-弯曲-溃曲的变形破坏过程,重点关注滑带以上坡体的变形破坏特征,因此斜坡下部稳定基岩采用大粒径颗粒,变形破坏位置则采用小粒径颗粒,

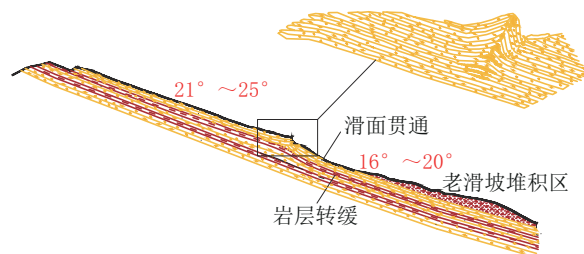


图7 滑移溃曲阶段

Fig.7 Sliding and buckling stage

监测点参照宏观斜坡变形最为显著的部位进行布置,用来监测斜坡演化过程中应力变化特征,计算模型如图8所示。由于斜坡是在长期重力作用下发展的变形破坏,为此,计算时仅考虑重力作用。

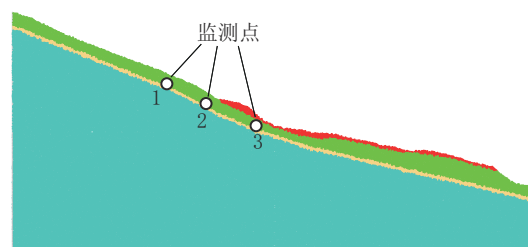


图8 数值模型及监测点建立

Fig.8 Numerical model and monitoring point establishment

3.2 重力平衡设置

对边坡颗粒进行重力加速度的初始平衡,初始不平衡力和地应力如图9所示。从平均接触力、不平衡力及应力监测曲线可以看出,初始应力和最大不平衡力 $<10^{-4}$ 量级,满足重力平衡要求。

3.3 颗粒粘结设置

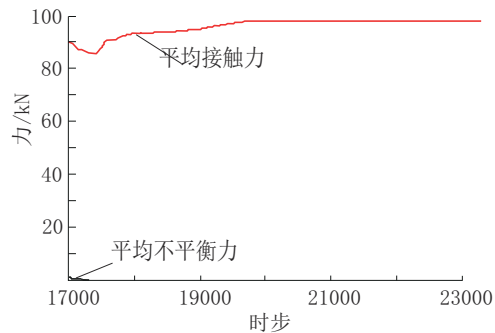
图10为采用的细观参数模拟的完整试件在单轴试验的应力-应变曲线,通过颗粒流模拟获得的应力-应变模拟曲线所得宏观参数与实际吻合较好。颗粒密度、刚度和粘结等模型参数见表1。对模型底部和左右边界进行法向约束,并删除斜坡表面墙。

4 结果分析

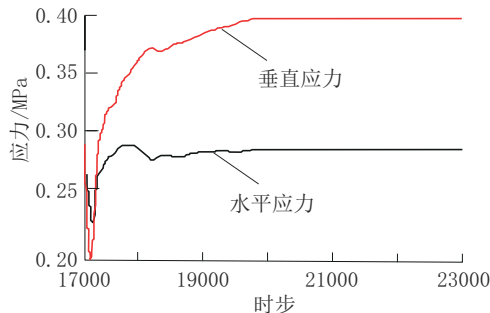
4.1 模型破坏过程

从边坡模型破坏位移云图(图11)可以看出:

(1)位移矢量图显示由于颗粒粒径的分组导致滑动面以上坡体位移明显较大,有自上而下的分异特征。滑坡中下部位移大于坡体上部,具有推移式



(a) 平均不平衡力和接触力



(b) 测量环监测曲线

图9 重力平衡过程监测曲线

Fig.9 Monitoring curve in the gravitational equilibrium process

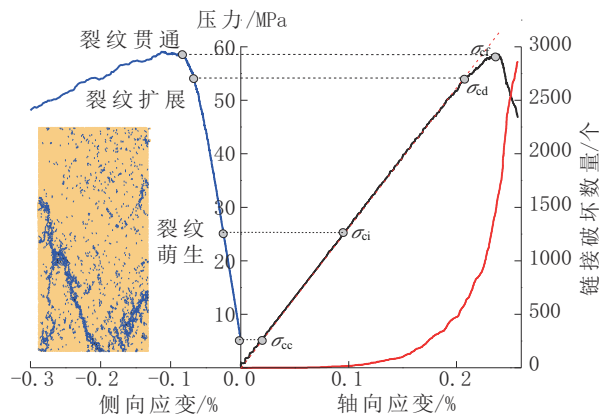
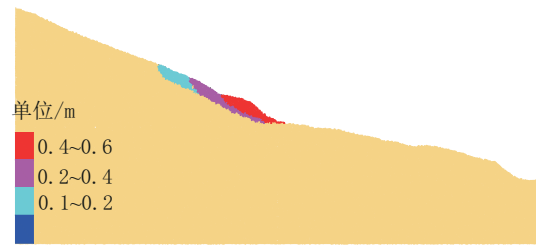
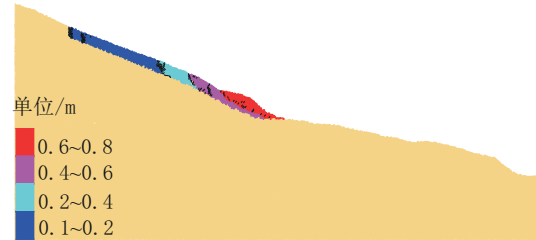


图10 校核参数对应试件的应力-应变曲线

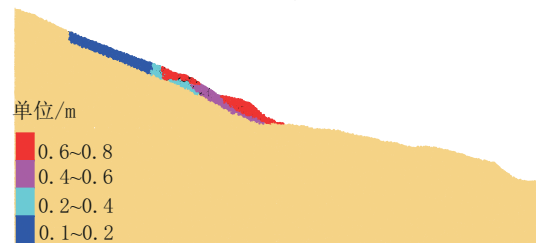
Fig. 10 Stress-strain relations of the DEM model



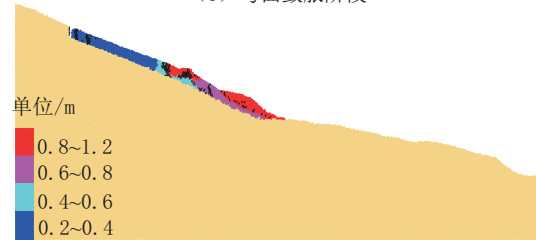
(a) 顺层滑移阶段



(b) 滑移弯曲阶段



(c) 弯曲鼓胀阶段



(d) 错断剪出(大量黑色裂纹)

图11 斜坡变形破坏云图

Fig.11 Nephogram of slope deformation

部的位移显著大于前缘的位移,因此,从变形特征上来看,具有推移式滑坡特征。

(2)滑坡中前部坡脚由于前缘公路开挖先产生滑动,由于破坏斜坡平衡坡体出现大量裂缝。滑坡后缘出现明显拉张裂隙,中部由于挤压出现挤压裂

滑坡特征。在斜坡宏观变形最为严重的区域,其后

表1 颗粒流模型参数

Table 1 Parameters of the particle flow model

岩石类型	颗粒密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	颗粒接触模 量 E_c/GPa	颗粒刚度 比 k_n/k_s	颗粒摩擦 系数 μ	平行链接 半径乘子 λ	平行链接刚 度比 (k_{nb}/k_{sb})	平行链接模 量 E_b/GPa	平行链接法向 强度 σ_{cb}/MPa	平行链接切向强 度 τ_{cb}/MPa
砂岩	3100	20	2.5	0.7	1	2.5	20	40	60
泥岩	2800	10	2.5	0.5	1	2.5	10	20	40
风化砂岩	3000	15	2.5	0.6	1	2.5	15	30	50

缝,具有被裂隙切割的分区特征。同时各个分区位移较大,表明滑坡具有在整体位移下由于裂隙切割导致的局部块体分离的特征。

(3)模型各时步破坏形态显示,滑坡滑动在中部块体存在明显错断剪出特征。破坏过程中滑坡体发生多处裂纹,斜坡中部由于应力集中导致出现岩体错断、剪断等特征。

4.2 应力分析

用粘结力场的演化对岩质边坡模型的滑移变形机制进行研究,并对斜坡的应力特征进行全过程监测(压为正,拉为负)。

由图12可知:各监测点的水平和竖向应力曲线有较好的对应性。滑坡后缘监测点1出现水平拉应力峰值点a,而在点a和点b之间水平拉应力不断降低。而垂直压应力则在不稳定增加后出现陡降,这一过程表明岩体的应力集中及破坏释放阶段;峰值a点之后水平应力由拉变为压,而垂直应力在陡降之后出现不稳定反弹,这一阶段岩体进入残余应力状态。综上可以分为以下3个阶段(图12):

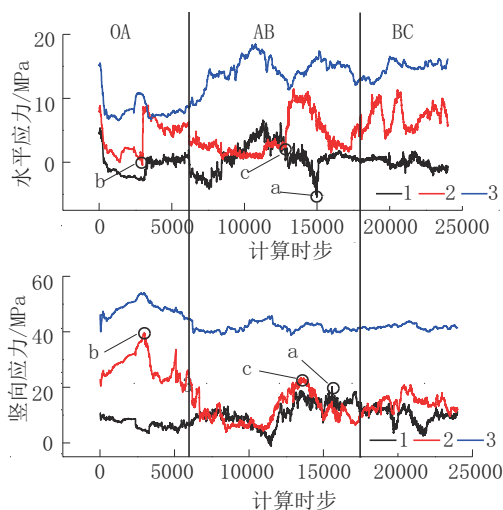


图12 岩体应力状态及微断裂过程曲线

Fig.12 Curves of rock mass stress state and micro-fracture process

(1)OA段:该阶段监测点2即滑坡中段垂直应力持续增加,水平应力降低,表明区域2即斜坡中部岩体由于不断的应力集中,岩体发生挤压错断,岩体裂隙裂缝不断增加。黑色的线代表裂纹的产生。

(2)AB段:该阶段监测点2曲线显示滑坡中部岩体水平应力和垂直应力均陡然降低,表明岩体已

经完全贯通破坏,岩体裂隙裂缝急剧增加。因此,可以认为B点为临界失稳点,且滑坡变形主要受监测点2区域即滑坡中部岩体控制。

(3)BC以后:垂直压应力监测曲线显示一定的波动并趋于稳定。该阶段为滑裂面贯通之后的继续滑移阶段,微断裂数增加逐渐趋于稳定,岩体应力进入残余应力状态。

5 结论

(1)兴浪坡滑坡为“上陡下缓”椅型面顺层岩质滑坡,滑坡的变形破坏可分为三个区,即后缘拉陷区、隆起-溃屈区、前缘阻滑区。

(2)由滑坡分区和变形迹象可知,由于前缘老滑坡堆积和岩层变缓形成阻滑区,中后部岩体由于牵引发生顺层滑移在过渡区形成应力集中,是形成滑移-溃曲模式的前提。斜坡破坏过程可分为滑移-弯曲鼓胀阶段、强烈弯曲-隆起阶段、溃曲3个阶段。

(3)数值模拟显示滑坡中部溃曲处在滑动前主要表现为压应力集中,存在应力集中导致的岩体错断和剪断特征,与实际调查相符合。垂直压应力监测曲线显示一定的波动并趋于稳定,为滑裂面贯通之后的继续滑移阶段,岩体应力进入残余应力状态。

参考文献(References):

- [1] 陈祖煜,汪小刚,杨健,等.岩质边坡稳定性分析——原理·方法·程序[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
CHEN Zuyu, WANG Xiaogang, YANG Jian, et al. Rock Slope Stability Analysis—Theory, Methods, Programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.
- [2] 王宇,李晓,王声星,等.滑坡渐进破坏运动过程的颗粒流模拟[J].长江科学院院报,2012,29(12):46-52.
WANG Yu, LI Xiao, WANG Shengxing, et al. Grain flow simulation of landslide progressive failure movement process[J]. Journal of the Yangtze River Academy of Sciences, 2012,29(12):46-52.
- [3] 曾远.土体破坏微观机理及颗粒流数值模拟[D].上海:同济大学,2006.
ZENG Yuan. Micro mechanism of soil failure and numerical simulation of Grain flow[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [4] 周健,王家全,曾远,等.土坡稳定分析的颗粒流模拟[J].岩土力学,2009,30(1):86-90.
ZHOU Jian, WANG Jiaquan, ZENG Yuan, et al. Grain flow simulation of soil slope stability analysis[J]. Geotechnical Soil mechanics, 2009,30(1):86-90.
- [5] 肖拥军,邓敏,杨昌才.库岸复杂滑坡体形成机制的数值分析[J].自然灾害学报,2015,24(2):74-80.

- XIAO Yongjun, DENG Min, YANG Changcai. Numerical analysis of the formation mechanism of complex landslides on reservoir banks[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(2): 74-80.
- [6] Salmi E F. Slope stability assessment using both empirical and numerical methods: A case study[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74:13-25.
- [7] Li Q, Zhang Z Y. Mechanism of buckling and creep-buckling failure of the bedding rockmass on the consequent slope[C]. Proceeding of the 6th International Congress of IAEG, Rotterdam: A A Balkema, 1990:257-260.
- [8] 陈自生. 浅论拱溃型顺层岩质滑坡[J]. 山地研究, 1991, 9(4): 231-235.
- CHEN Zisheng. A discussion on yield-break landslide of bedding rock[J]. Journal of Mountain Research, 1991, 9(4):231-235.
- [9] 黄润秋, 赵松江, 宋肖冰, 等. 四川省宣汉县天台乡滑坡形成过程和机理分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, (1):13-15.
- HUANG Runqiu, ZHAO Songjiang, SONG Xiaobing, et al. Analysis of landslide formation process and mechanism in Tiantai Township, Xuanhan County, Sichuan Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005(1):13-15
- [10] 李强, 张倬元. 顺向斜坡岩体弯曲及蠕变-弯曲破坏机制[J]. 成都地质学院学报, 1990(4):97-103.
- LI Qiang, ZHANG Zhuoyuan. Bending and creep-bending failure mechanism of rock mass on the consequent slope[J]. Journal of Chengdu Institute of Geology, 1990(4):97-103.
- [11] 魏玉峰, 聂德新, 吕生弟, 等. 溃曲软硬相间顺层斜坡滑移-弯曲破坏机制分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(3):287-291.
- WEI Yufeng, NIE Dexin, LÜ Shengdi, et al. The mechanism analysis of sliding-bending destruction mode of consequent bedded slope in the alternatively distributed soft and hard rock layers[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 36(3):287-291.
- [12] 陈达, 许强, 郑光, 等. 顺层边坡溃曲变形形成条件及其与层面倾角的关系[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7):2616-2625.
- CHEN Da, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Formation of buckling along bedding and its relationship with bedding dip[J]. Science and Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2616-2625.
- [13] 陈全明, 方琼, 罗冠枝, 等. 缓倾顺层岩质斜坡破坏条件和变形机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2):19-32.
- CHEN Quanming, FANG Qiong, LUO Guanzhi, et al. Failure conditions and mechanism of the gentle dip bedding slopes[J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 2020, 31(2):19-32.
- [14] 闫国强, 黄波林, 王勋, 等. 基于岩体劣化顺层灰岩岸坡滑移-弯曲失稳机理和评价[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 668-679.
- YAN Guoqiang, HUANG Bolin, WANG Xun, et al. Sliding-ending failure mechanism and evaluation of bedding limestone bank slope based on rockmass deterioration in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3):68-679.
- [15] 余姝, 张枝华, 黄波林. 三峡库区青石-抱龙段顺层灰岩库岸坡变形破坏机理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(3): 19-23.
- YU Shu, ZHANG Zhihua, HUANG Bolin. Deformation mechanism of bedding limestone bank slope from Qingshi to Baolongthe Three Gorges Area[J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 2019, 30(3):19-23.
- [16] 王秋生, 张瑞涛, 郑宏. Malvern Hills边坡溃曲破坏分析及数值流形法模拟[J]. 岩土力学, 2022, 32(7):1951-1960.
- WANG Qiusheng, ZHANG Ruitao, ZHENG Hong. Buckling failure analysis and numerical manifold method simulation for Malvern Hills slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 32(7):1951-1960.

(编辑 王文)