

软弱基座型滑坡形成机制离散元数值模拟研究

黄跃廷^{1,2}, 杨彦军³, 任光明⁴, 马强⁵, 任小江^{1,2}, 王云南⁶

(1. 机械工业勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710043;

2. 陕西省特殊岩土性质及处理重点实验室, 陕西 西安 710043;

3. 机械工业第四设计研究院有限公司, 河南 洛阳 471003;

4. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;

5. 西部机场集团有限公司, 陕西 西安 710005;

6. 江西科技师范大学, 江西 南昌 330013)

摘要: 软弱基座型斜坡具有“上硬下软”的双层坡体结构, 其变形破坏方式和失稳模式也较为复杂。为了详细分析该类型边坡的变形破坏机制, 以具有此类坡体结构特征的一库区古滑坡为例, 在现场调查的基础上, 采用地质分析法和离散元数值模拟方法研究天然、降雨和地震条件下边坡的变形破坏过程。结果表明: 活跃的地质时期、陡峭的地形、复杂的地质构造和双层的坡体结构特征构成了该滑坡形成的必要条件, 降雨和地震是诱发滑坡的主要外界因素; 滑坡表现为倾倒变形和滑移-压制拉裂的复合型失稳模式; 利用离散元数值模拟研究了坡体在天然重力、降雨和地震等不同条件下的变形破坏过程, 计算结果显示降雨和地震均会导致滑坡发生, 其中地震型滑坡具有持续时间更短、发生规模更大、运动距离更远的特点。

关键词: 滑坡; 形成机制; 离散元数值模拟; 软弱基座

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)06-0096-06

Formation Mechanism of Soft Foundation Landslide Based on Numerical Simulation of Discrete Element

HUANG Yueting^{1,2}, YANG Yanjun³, REN Guangming⁴, MA Qiang⁵, REN Xiaojiang^{1,2}, WANG Yunnan⁶

(1. China JiKan Research Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China;

2. Shaanxi Key Laboratory for the Property and Treatment of Special Soil and Rock, Xi'an, Shaanxi 710043, China;

3. Scivic Engineering Corporation, Luoyang, He'nan 471003, China;

4. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

5. China West Airport Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710005, China;

6. Jiangxi Science & Technology Normal University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: The soft foundation slope has a double slope structure with "hard and soft", and its deformation failure mode and instability mode are also complex. In order to analyze the denaturing failure mechanism of this type of slope in detail, an ancient landslide with such characteristics of slope structure was taken as an example, based on field investigation, geological analysis method and discrete element numerical simulation method are used to explore the formation process of landslide. The deformation and failure process of slope under natural, rainfall and seismic conditions is analyzed. The results are as follows. Active geological period, steep terrain, complex geological structure and double slope structure constitutes the necessary conditions of the landslide formation. Rainfall and earthquake are the main ex-

收稿日期: 2022-08-09

修稿日期: 2022-08-30

基金项目: 地质三维模型在建筑地基基础设计及施工中的应用(江西科技师范大学校级科研课题)

作者简介: 黄跃廷(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察及地质灾害研究等方面工作。E-mail: 605725462@qq.com

ternal factors. It is inferring that the landslide is characterized by a composite instability mode with toppling deformation and sliding and compression cracking. The slope deformation and failure process under different conditions such as gravity, rainfall and earthquake is simulated by using discrete element numerical simulation. The results show that both rainfall and earthquake can cause landslides. However, the earthquake type landslide has the characteristics of shorter duration, larger scale and farther motion distance.

Keywords: landslide; formation mechanism; numerical simulation of discrete element; soft foundation

对于软弱基座边坡失稳机制的研究较早,早在1976年 Zaruba 和 Mencl^[1]揭示软弱基座型斜坡变形破坏的原因在于上下岩体的变形差异。Mast-sukura^[2]针对软弱基座型斜坡上下软硬岩差异性,重点研究了斜坡稳定性的变化,并提出关于该类斜坡稳定性的分析方法。

张倬元等^[3]将倾坡内软弱基座型斜坡演化过程划分为卸荷回弹裂缝形成阶段、前缘软岩塑流-拉裂变形阶段及坡体深部塑流-拉裂变形等三个阶段。任光明等^[4]利用离散元数值模拟方法,将某处软弱基座型斜坡的变形破坏过程概括为:陡倾结构面拉裂、前缘软岩压缩变形、上部坡体拉裂-弯曲变形、弯曲板梁根部折断、蠕滑拉裂破坏五个阶段。黄润秋^[5]深入分析了溪口滑坡的地质原型,认为斜坡的失稳与上硬下软的双层坡体结构和斜坡中部突发脆性破坏的锁固段有关。柴贺军等^[6]建立了高陡软弱基座型斜坡的力学和物理模型,并进一步指出该类斜坡的典型变形破坏模式为塑流-拉裂。陈小婷等^[7]研究了软弱基座型斜坡下部软岩厚度对其变形破坏模式的影响,确立了塑流-拉裂破坏模式(厚层软岩)和压致-拉裂破坏模式(薄层软岩)。赵建军等^[8]通过研究软弱基座的地震动力响应特征,提出了软弱基座型斜坡地震作用下的破坏机制。林峰^[9]通过地质分析和 MIDAS/GTS 分析软件对贵州腰岩脚陡崖的崩塌体做了机制研究,揭示出下部的软弱煤层和顶部的溶蚀作用是崩塌发生的主要因素^[10]。

以上研究对象的上覆岩体大多是具有层状结构的沉积岩或变质岩,而对于具有块状结构的岩浆岩体研究偏少。同时该类坡体的变形失稳过程具有相对的“固定”的模式,即塑流-拉裂或倾倒-滑移。

本文研究的滑坡为一古滑坡,所在斜坡的上覆岩体为块状结构的石英闪长岩,下伏基岩为云母石英片岩。因此,以该库区滑坡的双层结构为基础,结合其地质条件,研究滑坡的形成机制是对此类软弱基座型失稳斜坡研究的补充,也为该滑坡的后期处

理提供可靠依据。

1 滑坡基本概况

滑坡地处三江深切割强隆区和川西面状强隆区交汇部分,区域内存在多处活跃的断裂带,包括金沙江断裂带、澜沧江断裂带、甘孜-理塘断裂带、巴塘断裂带和理塘断裂带,其中距离滑坡最近的断裂带为金沙江断裂带(距滑坡 500 m)和巴塘断裂带(距滑坡 2 km),如图 1 所示。

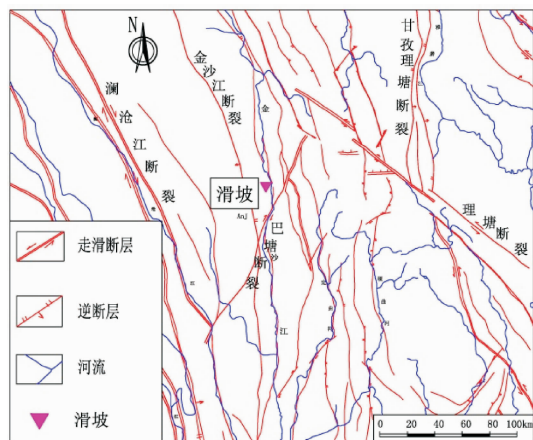


图1 区域断裂带分布图

滑坡高程范围 2 540 m ~ 3 100 m,水平距离约 1 570 m,前缘宽 400 m,后缘宽约 680 m,总面积约为 $8 \times 10^5 \text{ m}^2$,堆积方量为 $5 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。滑坡两侧以两条冲沟为界,整个滑体位于凹槽内,滑坡主滑方向为 SE170°45',与前缘河流流向大角度相交,如图 2—图 3 所示。

滑坡由崩坡积物、耕植土、滑坡堆积体碎石土组成,下部为弱风化岩体和基岩,基岩由前缘的薄层一中厚层云母石英片岩及中后缘的石英闪长岩组成,岩性分界线位于高程 2 640 m 的位置。其中前缘云母石英片岩岩层产状为 NE10°NW ∠74°。前后缘基岩存在两组主要结构面,一组陡倾坡外,一组缓倾坡外,产状分别确定为 NE40°SE ∠75°和 NW340°NE ∠20°,如图 4 所示。



图 2 滑坡全貌图

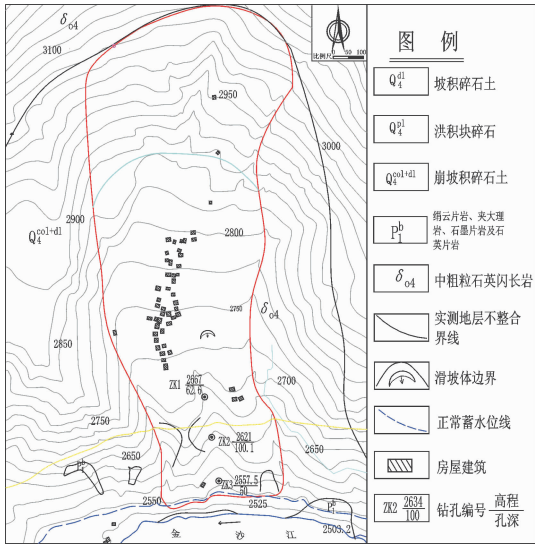


图 3 滑坡工程地质平面图

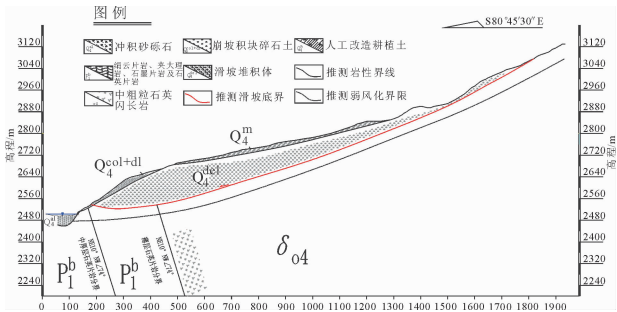


图 4 滑坡纵剖面图

2 滑坡形成机制分析

2.1 滑坡的形成条件

(1) 地形条件。根据现场勘察得知,滑坡原始地形较陡,且前后缘高差在 1 000 m 以上,巨大的高差为滑坡滑动提供了潜在势能。同时较高的坡体后缘存在放大效应,地震条件下易发生震动拉裂破坏。

(2) 坡体结构条件。原始边坡为“上硬下软”的双层结构,前缘的反倾薄层状云母石英片岩受到挤压易发生蠕变,而且遇水易软化。中后缘的石英

闪长岩为脆性岩石,抗压强度远大于抗拉强度,容易产生拉张破坏。

(3) 构造条件。研究区域处于大地构造单元边界,断裂与构造节理发育。附近的巴塘断裂第四纪以来活动强烈,影响边坡稳定性的同时产生大量构造裂隙。多组裂隙会为地下水渗流提供通道,有利于雨水入渗,加速岩石的风化,造成岩土强度的劣化,易形成潜在滑带,促成滑坡的发生。

(4) 地壳隆升、河谷下切。滑坡位于三江深切割强隆区,受新构造运动影响,该区域的地壳运动剧烈,抬升幅度明显,导致前缘河流强烈下切,形成深切割高山峡谷地貌,为滑体的形成提供了良好的临空面。

(5) 降雨。该区域属亚热带气候,年平均降雨量在 500 mm 左右,降雨集中在 6 月~8 月。统计发现,该时期也是当地地质灾害频发的阶段,降雨是主要诱发因素。

(6) 高烈度的地质环境。滑坡所在区域为高烈度区,构造运动强烈。历史记载,近百年该区域发生 4 级以上地震百余次,其中对滑坡区域影响较大的地震次数 5 次,影响烈度均在 5 度以上。

2.2 滑坡形成机制地质分析

斜坡前缘的反倾薄层状云母石英片岩是滑坡发生的基础,当河谷下切至此,在河流冲刷和重力作用下使前缘岩层朝临空方向倾倒变形,也为中后缘的石英闪长岩变形创造了临空条件。在重力和内部缓倾结构面的共同影响下,闪长岩朝前缘发生蠕滑变形,并逐渐向坡体内部发展,与已经发生倾倒变形的石英片岩折断面构成了断续的蠕滑面。后缘岩体在坡体卸荷过程中产生拉裂缝并逐渐朝坡体内部延伸。经过长期的作用后,在斜坡内形成由下部蠕滑面和上部拉裂面组成的潜在滑面,在持续遭受降雨或地震的作用下,潜在滑面抗剪强度逐渐减弱,当最大剪应力超过最大抗剪强度时,滑带贯通,滑坡启动。

综上所述,经过地质分析,滑坡的形成过程大致分为三个阶段:斜坡初期变形阶段、累积变形阶段和最终形成滑坡阶段,主要的地质力学模式为倾倒变形(弯曲-拉裂)和滑移-压致拉裂。

3 滑坡形成机制离散元模拟

离散元法是用来解决不连续介质问题的数值模拟方法,避免了有限元或边界元法对介质连续和小变形的限制,适合具有节理结构的块裂介质不连续

变形及破坏分析。本文采用 UDEC 离散元数值模拟分析滑坡的渐进破坏及失稳运动过程。

3.1 离散元模型的建立及参数选取

根据恢复的滑坡地质剖面建立如图 5 所示的概化模型,分为坡表的风化岩体和内部的微新岩体。为了便于计算,坡表风化部分岩体内设置了较密集的结构面,包括层面和节理面,节理面为两组倾向坡外的优势结构面。

模型中设置 1#—7#监测点,用来监测滑坡变形过程中的位移时程变化。模型中单元体本身的变形相对于运动位移可忽略,因此岩体统一选用各向同性弹性模型,结构面均选用节理面接触-库仑滑移模型^[11-15]。模型两侧采用单向水平约束,底面采用单向竖向约束。通过试验和工程类比法,模型中岩体和结构面参数见表 1、表 2。

表 1 岩体主要计算参数

岩体类型	重度 /(kN·m ⁻³)	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa
微新闪长岩	27.0	19.2	12.1
微新片岩	27.2	12.8	8.1
风化闪长岩	25.8	6.4	4.0
风化片岩	26.0	5.1	3.2

表 2 结构面主要计算参数

结构面类型	法向刚度 /(GPa·m ⁻¹)	剪切刚度 /(GPa·m ⁻¹)	内摩擦角 /(°)
闪长岩区	4.6	3.15	52
片岩区	4.0	2.75	47
风化闪长岩区	2.3	1.43	25
风化片岩区	2.0	1.22	15

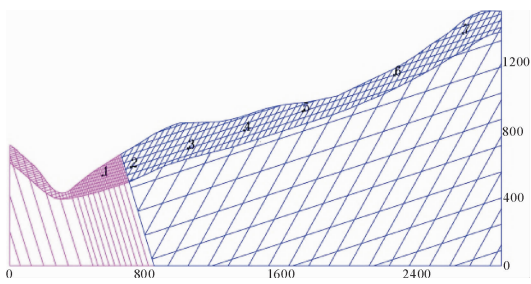


图 5 滑坡数值计算模型及监测点分布

3.2 计算方案

计算首先模拟边坡在重力作用下的变形。在此基础上,分别计算降雨条件和地震条件下的边坡的变形破坏过程,分析各种条件下边坡的最终状态。

其中降雨条件采取降低坡表岩体和结构面强度参数的方法实现(根据工程经验:降雨条件下参数

按天然条件的 90% 折减),地震则是加载地震波的方式(采用汶川地震时文县台网监测到的地震波)。

3.3 离散元计算结果分析

3.3.1 自重条件下数值模拟分析

首先发生变形的部位为边坡前缘反倾的薄层云母石英片岩。计算至 6 万步(迭代计算,以下相同)时,最前缘的反倾岩层开始向河谷方向发生倾倒变形(见图 6(a))。计算至 30 万步,前缘岩层沿着缓倾结构面整体朝临空方向弯折,弯曲最大的位置发生断裂,呈现倾倒变形,部分岩体滚入河谷内,其余部分无明显变形(见图 6(b))。

计算继续进行,该阶段边坡变形集中在坡体中后缘。前缘岩体的倾倒变形,为后部石英闪长岩变形提供了空间,岩体沿着缓倾结构面朝河谷方向发生蠕滑,且变形区域逐渐超后缘发育。由于拉应力集中作用,在与滑移面接触的陡倾结构面上产生自下而上尖灭状的裂缝(见图 6(c))。

计算至 100 万步,在上述变形的基础上,坡表后缘开始发育拉张裂缝,与已变形的中前缘坡体内部破碎带相向发育,但尚未贯通,构成潜在滑面(见图 6(d))。至此,边坡在自重条件下的变形结束。边坡的整体位移如图 7 所示,最大变形范围集中在前缘坡表区域。图 8 为重力条件下滑坡的最大不平衡力随时间变化的曲线,印证了在无外界因素干扰的情况下,滑坡最终达到了平衡状态。

基于上述分析,重力条件下坡体主要表现累进变形破坏、潜在滑面孕育的演化过程,以倾倒变形、滑移-压致拉裂变形模式为主,但滑面尚未完全贯通,坡体尚未整体失稳破坏。

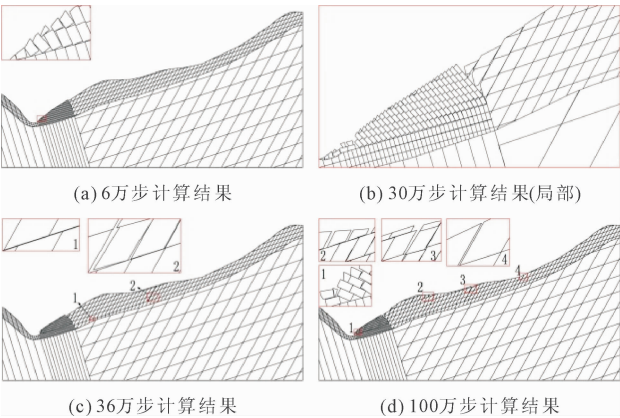


图 6 滑坡变形演变过程

3.3.2 降雨条件下数值模拟分析

改变岩体和结构面为降雨状态下的参数、同时考虑水压力的条件下继续计算。根据监测点位移曲

线图 9 显示,6#、7#位移监测点没有变化,1#—5#位移监测点的位移变化明显。根据位移点的分布表明,前缘至后缘的变形量依次递减。根据曲线的变化特征将边坡的变形破坏过程分为 5 个阶段:滑坡启动阶段,高速滑动阶段,减速滑移阶段,二次加速滑移阶段和稳定阶段。

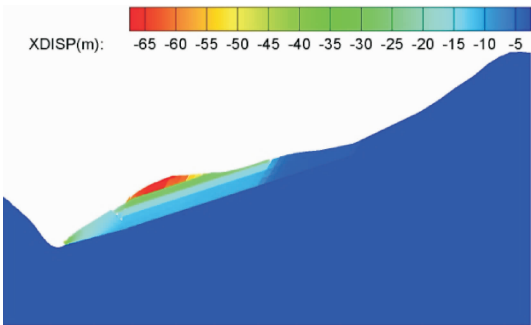


图 7 计算 100 万步滑坡水平位移云图

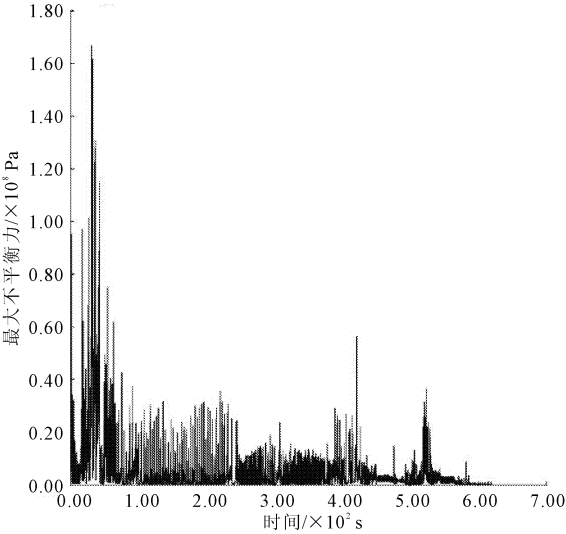


图 8 自重条件下最大不平衡力变化曲线

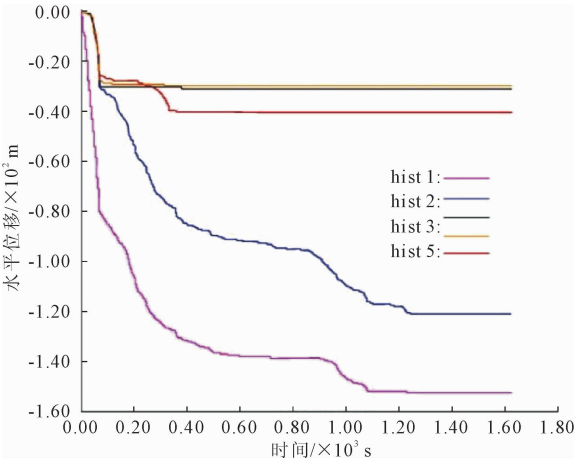


图 9 降雨作用下水平位移监测点曲线图

以前缘 2#监测点为例:前缘的石英闪长岩在第 39 s 开始滑动,保持较高的滑速至 68 s,速率减缓;约 867 s 突然加速滑动,1 244 s 左右运动停止。由曲线的运行轨迹得知,中后缘的石英闪长岩启动时间要明显滞后于石英片岩。坡体最终的堆积和位移情况,见图 10,滑体的水平位移沿滑带递减,前缘坡体水平位移最大接近 300 m,后缘位移在 100 m 左右。

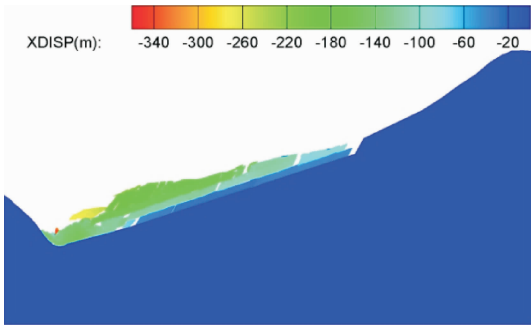


图 10 降雨作用下滑坡最终位移云图

3.3.3 地震条件下数值模拟分析

图 11 为滑体中 1#—5#监测点的水平位移监测曲线图,由曲线的变化特征可以大致将边坡变形破坏过程分为 4 个阶段:滑坡启动阶段、高速运动阶段、渐稳阶段和稳定阶段。以 1#监测点为例,前缘石英片岩大约在动力荷载施加的第 5 s 开始滑动,5 s~18 s 高速运动,18 s~40 s 运动速度逐渐降低,40 s 之后运动逐渐减弱、停止。

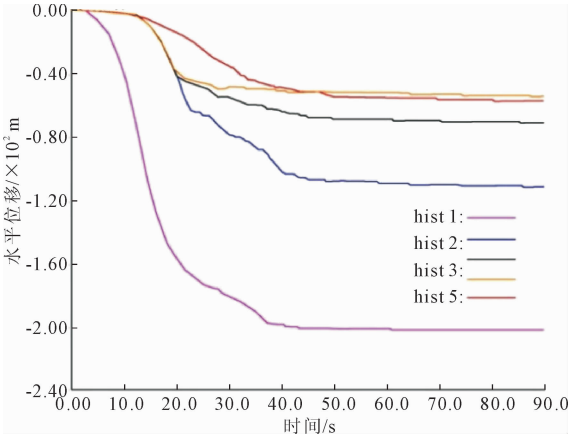


图 11 地震作用下位移监测点曲线图

坡体的位移变化量随着高程增加而降低,其中后缘坡体内 5#监测点的位移量最小,前缘石英片岩内的 1#监测点位移变化最大且启动最早,在地震荷载施加 10 s 以内即开始快速滑动。其余部位的坡体具有相近的敏感性,即荷载施加 15 s 以后开始加速滑动,40 s 后趋于稳定。

滑坡最终的堆积状态和位移情况如图 12 所示。

滑坡碎石块体堆积在前缘河谷内和坡体上,后缘形成完整滑坡壁陡坎。整个地震过程中,位于前缘的石英闪长岩横向位移接近 500 m;位移最小的部分位于后缘,横向位移小于 50 m。

与降雨失稳过程相比,地震条件具有历时短、滑动距离大的特点;从位移曲线来看,各个阶段过渡自然,且后缘变形量与中前缘差距较小。

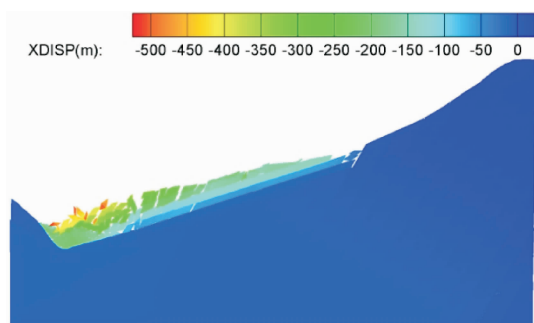


图 12 地震作用下滑坡最终位移云图

3.3.4 数值模拟小结

本次数值模拟还原了滑坡的孕育和失稳过程,通过模型的变形特点大致可以将其分为三个阶段:第一阶段变形主要集中在坡体前缘,即薄层状石英片岩率先发生向河谷一侧的倾倒变形,并逐渐于最大弯矩处形成断续延展的折断面;第二阶段,受前缘倾倒变形的扰动,坡体变形蔓延至中后部石英闪长岩,使其发生缓慢的“滑移-压致拉裂”变形,同时后缘产生拉裂缝,并向坡内延伸;最终,受暴雨或地震触发,形成滑坡。该结果与上文的地质分析结论基本一致。

比较地震和降雨条件下滑坡的最终状态,地震作用下滑坡的运动距离更远,失稳规模更大,持续时间更短,而且滑坡堆积体更加破碎,滑坡后壁出露更加明显,与滑坡的实际表现特征更相近,表明地震作用对滑坡的影响更显著。

4 结 论

根据滑坡的基本特征,分析了滑坡的形成条件,再通过定性和定量的方法分析滑坡的形成机制,得出以下结论:

(1) 滑坡的形成条件包括地形条件、构造条件、坡体结构条件、地壳的强烈隆升、降雨和地震等,其中前四点为滑坡的形成提供了必要条件,后两点是加剧滑坡变形的主要影响因素。

(2) 形成机制分析采用地质分析和离散元模拟相结合的方式,得出滑坡形成大致经历了三个阶段:即在重力主导作用下的前期和中期变形阶段,以及最后由降雨或地震触发滑坡发生的过程,主要的地

质力学模式包括倾倒变形(弯曲-拉裂)和滑移-压致拉裂。

(3) 利用离散元方法模拟了滑坡在天然自重、降雨或地震作用下的变形破坏过程,结果显示,仅在自重条件下,滑坡不会整体失稳;降雨或地震均会加剧斜坡的变形,诱发斜坡最终整体失稳,形成滑坡。但对比两种失稳过程发现,地震作用下滑坡的启动时间更早、滑动持续时间更短和滑动距离更远,而且地震模拟的结果与滑坡实际特征更相近,所以地震作用对滑坡的影响更显著。

参考文献:

- [1] Zaruba Q, Mencl V. Engineering Geology[M]. Amsterdam: Elsevier Publishers, 1976.
- [2] Mastsukura Y. Cliff instability in pumice flow deposits due to notch formation on the Asama mountain slope, Japan[J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 1988, 32: 129-141.
- [3] 张倬元,王士天,王兰生,等. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1981.
- [4] 任光明,宋彦辉,聂德新,等. 软弱基座型斜坡变形破坏过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(9): 1510-1513.
- [5] 黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 640-647.
- [6] 柴贺军,肖文. 具有软弱基座逆向边坡变形及破坏过程研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(S1): 288-291.
- [7] 陈小婷,黄波林,刘广宁,等. 三峡库区平缓层状软硬相间斜坡变形模式变化分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2009, 20(2): 57-61.
- [8] 赵建军,巨能攀,李果,等. 汶川地震诱发罐滩滑坡形成机制初步分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(2): 92-96.
- [9] 林锋,冯亮,孙赤,等. 强烈岩溶控制型崩塌形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2015(3): 408-414.
- [10] 王云南. 巴塘水电站库区尼增滑坡形成机制及稳定性研究[D]. 成都:成都理工大学, 2017.
- [11] 曹琰波,戴福初,许冲,等. 唐家山滑坡变形运动机制的离散元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2878-2887.
- [12] 周小棚. 基于数值模拟的黑方台黄土滑坡滑距预测研究[D]. 成都:成都理工大学, 2019.
- [13] 王秀菊. 反倾层状边坡变形破坏离散元数值模拟研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2017, 39(4): 36-40.
- [14] 唐红梅,延兆奇,陈洪凯. 三峡库区龚家方2号斜坡破坏过程离散元数值模拟[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(1): 40-46.
- [15] 余业. 反倾岩质滑坡成因机制及动力响应研究[D]. 成都:成都理工大学, 2011.