

## 基于 Geo-Studio 的堆积体滑坡渗流分析

黄厚赞 李 阳 张国政 米冠宇

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, 四川 成都 610059

**[摘要]**堆积体滑坡广泛分布,需对此类滑坡的形成机制进行了分析,尤其在强降雨条件下。在降雨条件下,雨水改变了坡体的非饱和土的体积含水量和孔隙水压力,相应地滑带和滑体土的抗剪强度也发生变化。采用 Slope/W 软件计算滑坡的稳定性,依据降雨入渗理论和非饱和渗流基本理论,在不同降雨时间,不同降雨强度两种情况下运用 Seep/W 软件模拟坡体内的渗流情况。在此基础上,给出关于堆积体滑坡的防治建议。

**[关键词]**堆积体滑坡;非饱和土;Geo-Studio;渗流

DOI: 10.33142/aem.v2i5.2116

中图分类号: TV641;TV223.4

文献标识码: A

## Seepage Analysis of Accumulation Landslide Based on Geo-Studio

HUANG Houzan, LI Yang, ZHANG Guozheng, MI Guanyu

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

**Abstract:** Accumulation landslides are widely distributed, so it is necessary to analyze the formation mechanism of such landslides, especially under heavy rainfall conditions. Under rainfall conditions, rainwater changes the volumetric water content and interstitial hydraulic pressure of unsaturated soil and shear strength of sliding zone and the sliding soil also changes. The stability of landslide is calculated by Slope/W software. According to the rainfall infiltration theory and unsaturated seepage theory, Seep/W software is used to simulate the seepage in slope under different rainfall time and different rainfall intensity. On this basis, the prevention and control suggestions of accumulation landslide are given.

**Keywords:** accumulation landslide; unsaturated soil; Geo-Studio; seepage

### 引言

山体滑坡是山区常见的自然灾害,其往往会造成巨大损失,给工业和农业生产以及人民的生命财产造成难以承受的威胁。每类滑坡的地质力学模式都具有其特定的结构条件、形成条件和变形破坏发展过程,对滑坡形成机制的主要研究方法有以下几种:地质历史分析法,物理模拟法,数值模拟的方法,国内外众多专家都对滑坡的形成机制进行了深入研究<sup>[1]</sup>。著名地质院校成都理工大学的王兰生、张倬元等教授以工程地质学角度来看问题,对滑坡的破坏模式进行了渗入的研究,并得到一系列成果,提出必须重视斜坡岩土体变形破坏过程和形成机制,提出渐(累)进性破坏的观点,并且将斜坡变形破坏演化机制概括为5种基本地质力学模式,滑移-拉裂、滑移压致一拉裂、弯曲-拉裂、滑移-弯曲、塑流-拉裂<sup>[2]</sup>。

在传统的滑坡稳定性分析方法中,工程界应用最广泛的就是极限平衡法。极限平衡法也是定量分析方法的一种<sup>[3]</sup>。20世纪以来,计算机技术日新月异,有限单元法在1943年由美籍德国数学家 Courant(库朗)提出;1960年以后,有限单元法得到快速发展。尤其是这几年,边界单元法,离散元法,非连续变形分析,数值流形法等,这些针对岩土介质分析的方法不断地进步<sup>[4-8]</sup>。边坡稳定性分析方法大致可以分为三类:定性分析方法、定量分析方法、非确定性分析方法<sup>[9]</sup>。现如今,计算机科技水平得到空前发展,数值模拟理论也得到了更好的补充和完善,只需要一台计算机就能够在极短的时间内求解出具有数万个自由度的多种工况结合条件下的复杂三维问题<sup>[10-12]</sup>。工程实际逐渐量化,在工程设计中必须要把数值分析非做不可。

以城南村陈家岭滑坡为研究内容,通过对区域及工程区的地质条件和影响因素综合了解,从工程地质和数值模拟角度对滑坡在降雨条件下的渗流分析。采用 Geo-Studio 数值模拟软件对滑坡稳定性进行计算和分析,与理论方法形成对比,确保滑坡的稳定性分析正确合理。

## 1 滑坡概况

滑坡区为斜坡地貌, 坡度较小, 在 20 到 30° 之间, 滑坡区内在顺层滑动方向上, 整体上呈上下部较陡, 而中部平缓的形态。滑坡前缘高程 449m, 坡度 24°; 滑坡中部为两级宽而缓的平台, 坡度 9-16°; 后缘高程 481m, 坡度在 20° 左右; 滑坡后缘与前缘相对高差约 30m。坡体上为农村一到两层的低矮多为砌体结构的建筑物, 耕地常见于后缘, 坡体上植被茂密, 多为枇杷, 油桃等一些果树。工作区内第四系滑坡堆积物、崩坡积层和基岩层为主要地层。滑坡全貌见图 1。



图 1 滑坡全貌

陈家岭滑坡主要的坡体物质含碎石的粉质粘土, 坡体材料渗透性好。雨水在自身重力的作用下下渗进入坡体, 使坡体重度变为饱和重度, 软化和泥化土体, 影响边坡稳定性。目前, 滑坡体上存在许多个裂缝。这就为雨水更加快速入渗提供了更为有利的条件。当雨水沿着裂缝渗入滑动面, 由于第四系土体松散和基岩的渗透性有差异, 就可能产生浮托力, 从而影响斜坡的整体稳定性。

## 2 滑坡形成机制分析

### 2.1 工程地质分析

滑坡区属于剥蚀宽谷中丘地区, 在新构造运动作用下形成了台状至折线状低山, 各单元地貌的应力处于相对的稳定状态。在后期的风化剥蚀堆积后形成了目前的中丘地貌、斜坡呈陡缓相间的阶梯状地形, 为滑坡的形成创造了有利的地形条件。在 2017 年暴雨的外力作用下, 破坏了原有堆积体的稳定性, 出现了多处的拉张裂缝。影响滑坡稳定性的因素有滑坡的物质成分、结构, 坡面及基岩原始侵蚀面的形态、地下水等内部因素, 和降雨入渗以及人类工程活动等外部因素。

影响滑坡稳定性外在的最主要因素就是降雨, 尤其是在持续时间长、强度在中等以上的持续降雨对滑坡稳定性的影响最大。通过调查可以总结出, 蠕滑变形发生在雨季、地面裂缝开裂的时间也大部分集中于雨季, 特别是暴雨来袭之时。许多地面裂缝在暴雨再次来袭的时候进一步加剧变形。值得注意的是, 滑坡变形形成的大量裂缝, 为降雨直接入渗补给地下水创造了有利条件, 随着地下水位的上升静水压力的增大, 降雨对滑体稳定性的影响越来越显著。

### 2.2 渗流分析

本节运用 GeoStudio 中的 SEEP/W 渗流有限元模块对陈家岭滑坡的稳定性进行了模拟。考虑到该滑坡的稳定性主要与极端天气有关。正是因为这种原因, 在稳定性模拟计算中首要考虑降雨状态。具体计算过程如下: 先利用 SEEP/W 渗流有限元模块对陈家岭滑坡进行建模, 在 SEEP/W 稳态渗流场中添加降雨边界条件, 获得瞬态渗流场。

#### 2.2.1 计算参数选取

在降雨条件下, 滑坡存在饱和区和非饱和区两部分。利用 Van-Genuchten 经验曲线模拟非饱和区渗流情况。本章根据现场调查及室内试验结果的整理并且参考已有的规范和自己的一些工程经验, 同时考虑岩体的风化情况及结构面发

育程度，对岩土体物理力学参数进行折减后，得到的参数详见表1。岩土体水力学特性(土-水特征曲线)见图2。

表1 岩土体物理力学参数

土体类型	重度(kN/m <sup>3</sup> )		黏聚力(kPa)		内摩擦角(°)		饱和渗透系数 (m/d)
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和	
滑体土	19.5	20.5	20	15	15	10	0.564
滑带土	19.5	20.5	20	15	15	10	0.45
滑床土	23.5	25.5	354	350	32.5	30	0.001

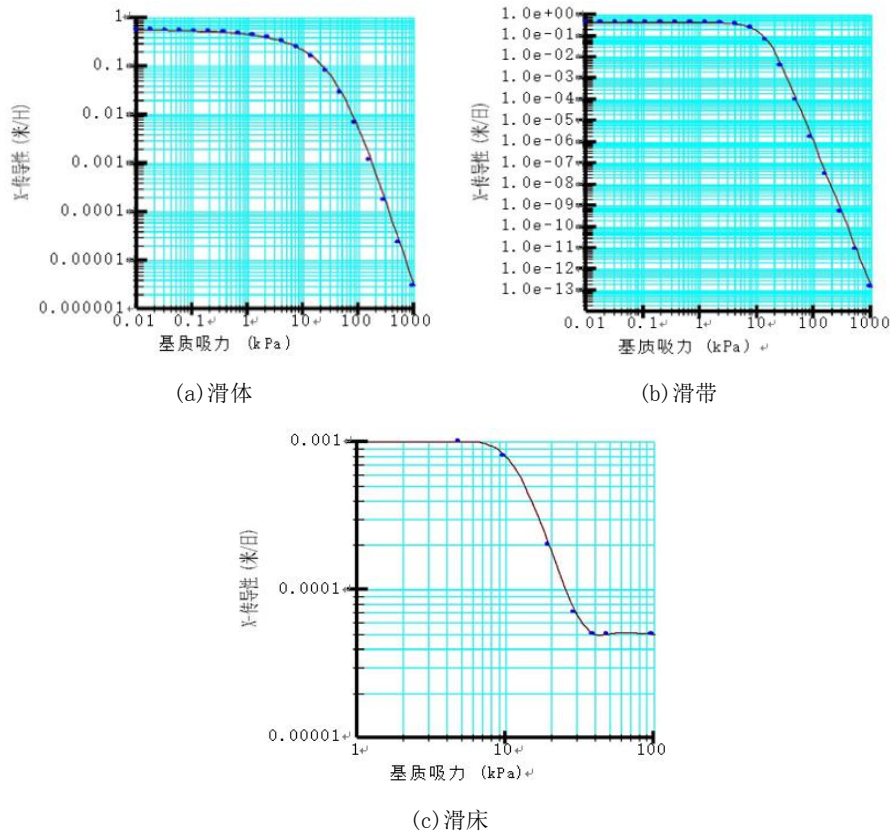


图2 土-水特征曲线

### 2.2.2 降雨入渗机制分析

考虑两种情况，一种是持续3天的强降水，第二种是持续30天的降雨，降雨强度见图3。

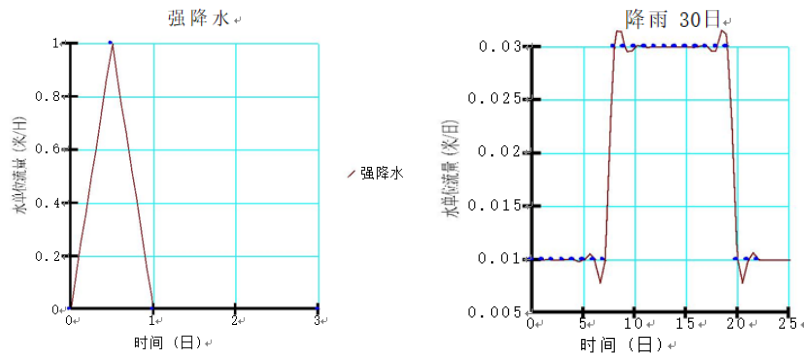


图3 两种情况下的降雨情况



在上述两种降雨情况下，利用 SEEP/W 渗流有限元模块对陈家岭滑坡进行非稳定渗流分析。在 3 日强降雨条件下，选择了初始阶段和三日后的的孔隙水压力情况进行对比。在 30 日降雨情况下，选择了第 10 天和第 30 天的孔隙水压力情况进行对比，坡体孔隙水压力变化见图 4。并分别绘出 3 日强降雨和 30 日降雨后的体积含水量分布图，见图 5。

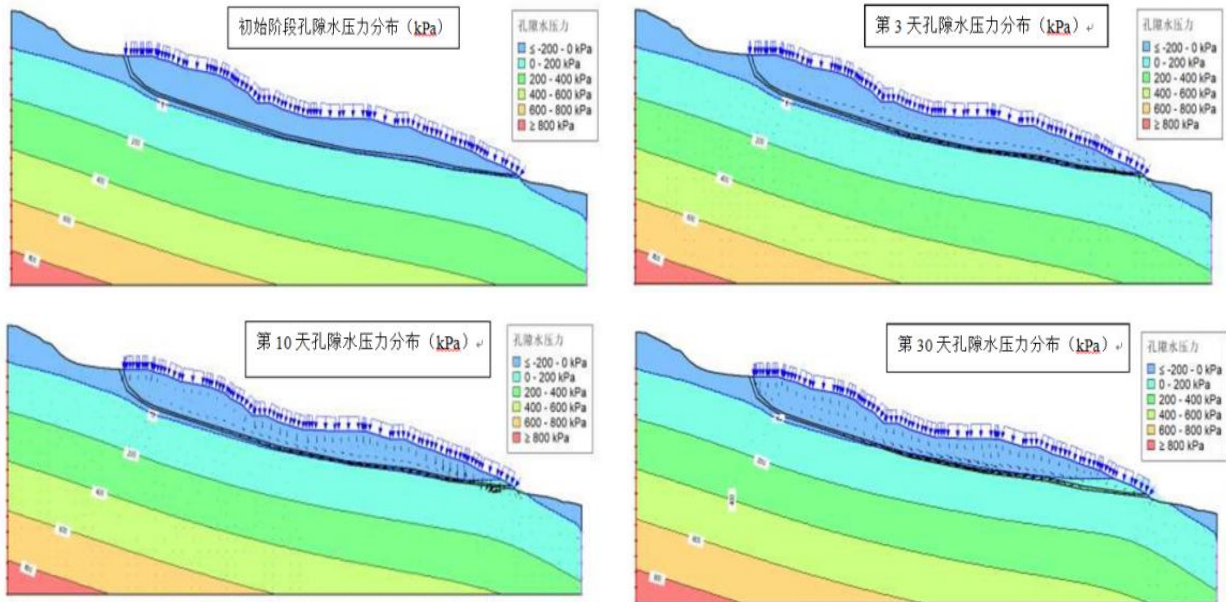


图 4 30 日降雨下坡体孔隙水压力变化

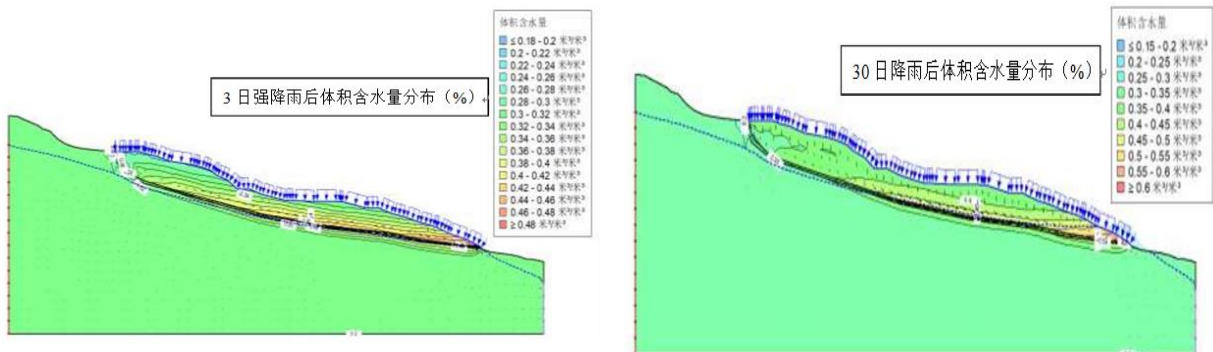


图 5 两种降雨条件后坡体体积含水量分布

图中黑色条带是由许许多多黑色的箭头组成，从上面几幅图中不难发现，箭头从左至右越来越密，渗流的方向即反应为箭头的指向，渗流速度的大小表现为箭头的长短。土体的黏聚力大小受基质吸力的控制，土体的黏聚力和基质吸力呈正相关。因此从图中可发现，地下水位线附近的渗流速度变化较他处变化的幅度明显更大<sup>[13]</sup>。伴随着降雨持续时间及强度的增大，坡体内的负孔隙水压力在不断改变。坡体顶部的负孔隙水压力(基质吸力)总是最大，负孔隙水压力正在不断减小土体位于地下水位线以上。最后滑带土附近土体在降雨条件下达到饱和状态时，负孔隙水压力(基质吸力)减小为零，此时稳定性系数应为最小值。将图 4 非稳定渗流状态与图 5 初始状态的体积含水量进行对比，可以清楚看到坡体各部分体积含水量的变化。大部分雨水伴随时间增加都渗入坡体内部，坡体非饱和区的体积含水量显然会增大，这就导致非饱和区基质吸力减小。

在天然状态下的滑坡，岩土体处于非饱和状态，降雨入渗速率的大小很大程度上受到渗透系数和保水性能的影响，降雨入渗直接导致的结果就是增加了滑体的重量，也使得岩土体粘聚力和内摩擦角减小，滑带土的抗剪强度也因此而减小。此外渗透压力随之产生，动水压力(渗透压力)随着水力坡度增高而变大，坡体稳定性降低，发生滑坡。该滑坡

的地形地貌特征与岩土体结构特征为滑坡的发生提供了良好的渗透条件, 降雨使得雨水沿着坡面和之上的裂缝发生入渗, 在土体与基岩接触面上形成滞水, 而滑床上含有大量的泥岩, 因为泥岩受地下水作用极易软化, 软化后的强度大幅降低, 形成弱面, 产生滑移。

### 3 结论

(1) 滑坡产生蠕滑变形的原因: 滑坡中后部岩土体密实度差, 结构松散, 孔隙率大, 渗透性好, 形成了雨水入渗的有利条件。在滑坡中前部相反, 从而导致了在降雨或农户灌溉过程中坡体的不同部位含水量不同, 所以重量也不同。同时, 从地貌角度来看, 滑坡的后缘外侧是一个平台。降雨之后, 雨水容易积聚并渗入坡体内部, 特别是沿着地面缝隙, 增加滑体的重量。其结果是, 下滑力增加, 抗滑力下降, 滑坡变形破坏加速, 导致滑坡变形。

(2) 通过滑坡的渗流分析可知, 降雨入渗直接导致的结果就是增加了滑体的重量, 渗透压力随之产生, 坡体非饱和区的体积含水量显然会增大, 这就导致非饱和区基质吸力减小, 动水压力(渗透压力)随着水力坡度增高而变大, 坡体稳定性降低, 发生滑坡。

(3) 针对此类堆积体滑坡, 早发现早治理, 尽可能的在蠕滑阶段就开展一系列的防治措施。

#### [参考文献]

- [1] 贺可强, 阳吉宝, 王思敬. 堆积层边坡位移矢量角的形成作用机制及其与稳定性演化关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 185-192.
  - [2] 张倬元, 士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
  - [3] 汤罗圣. 三峡库区堆积层滑坡稳定性与预测预报研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
  - [4] 王卫. 堆积层滑坡发生机理及防治措施[J]. 铁道建筑, 2015(6): 121-124.
  - [5] 赵建军. 公路边坡稳定性快速评价方法及应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
  - [6] 黄润秋, 严明, 林锋, 等. 锦屏一级水电站枢纽区工程边坡稳定性及支护对策研究[D]. 成都: 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, 2005.
  - [7] 刘建, 冯夏庭, 张杰, 等. 三峡工程左岸厂房坝段深层抗滑稳定的物理模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 993-998.
  - [8] 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): 43-454.
  - [9] 冯文凯, 石豫川, 柴贺军, 等. 缓倾角层状高边坡变形破坏机制物理模拟研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 32-36.
  - [10] 刘辉. 堆积层滑坡机理及其稳定性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2012.
  - [11] 赵洲. 陕南山区县域滑坡灾害风险管理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
  - [12] 朱雷, 黄润秋, 陈国庆, 何思明. 节理岩体边坡破坏路径的等效计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(01): 22-33.
  - [13] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 堆积层滑坡野外模拟试验方案设计[J]. 公路, 2006, 51(1): 74-79.
- 作者简介: 黄厚赞(1996-), 男, 硕士, 主要从事岩土体稳定性及工程环境效应研究。