

不同降雨工况下滑坡稳定性数值模拟及破坏机理

葛若鑫¹, 李嘉正², 段进睿³

(1. 山西省地质工程勘察院有限公司, 太原 030024; 2. 山西省水利水电勘测设计研究院有限公司, 太原 030024;
3. 太原理工大学矿业工程学院, 太原 030024)

摘要: 通过现场勘察、应用改进 Mein-Larson 降雨入渗模型、数值模拟和理论分析等技术手段, 分析了降雨型黄土滑坡稳定性和形成机理。研究表明, 随着降雨强度和历时的增加, 在坡脚处形成暂态饱和区, 导致坡体应力场和位移范围发生变化, 表层土体抗剪强度降低, 推断出该滑坡为蠕滑-拉裂型滑坡。

关键词: 黄土滑坡; 滑坡稳定性; 数值模拟; 降雨

中图分类号: P69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)10-0247-05

随着人类工程活动的加剧, 地表原有稳定性结构遭到破坏, 在黄土高原地区表现更甚。据相关资料统计, 近年来因强降雨诱发的山体滑坡占滑坡灾害总数近 90%。因此, 构建三维数值模型研究降雨条件下黄土滑坡的变形机理对预防滑坡灾害的发生具有一定的参考价值^[1]。

降雨作为诱发滑坡的关键因素之一, 自 19 世纪开始, 国外学者 Darcy 就开创了研究降雨型滑坡稳定性的先河, 之后在诸多学者的工程实践中得到了完善, 为研究降雨入渗过程中滑坡稳定性变化特征奠定了理论基础。近年来, 国内诸多学者对降雨入渗引发滑坡机制展开了大量研究。简文彬等^[2]通过室内降雨入渗试验研究了不同雨强下土体含水率的动态变化特征, 提出了滑坡湿润锋入渗公式, 对暴雨型滑坡的孕灾机理分析和预警具有指导意义。杨校辉等^[3]通过与传统模型和现场入渗实验结果对比验证了不平衡推力法在降雨折线型滑坡稳定性研究中的适用性。凌松耀等^[4]基于非饱和土理论, 将现场监测数据与模拟结果拟合, 研究融雪水对边坡稳定性的影响。夏艺峰等^[5]使用有限元软件分析了降雨对花岗岩质边坡稳定的影响机制。由此可见, 使用数值模拟软件对降雨条件下的滑坡形成机理进行三维模拟分析, 确保了理论模型在实际应用中的可靠性, 并取得了一定成果, 但仍需要在不断的探索和研究中加以完善, 为实际滑坡预警工程提供可靠的技术支撑。

本文以山西省西部某滑坡工程为背景, 结合前人研究成果和实地勘测资料, 基于改进 Mein-Larson 降雨入渗模型和迈达斯软件, 分析在不同降雨工况下滑坡安全系数, 并对照相应规范对滑坡稳定性做出综合评价, 同时, 对比在数值模拟过程中得到的不同降雨时程和强度条件下滑坡的位移、应力模拟结果, 结合滑坡特征分析其变形破坏机理。

1 工程概况

研究区位于山西省吕梁市, 为典型的黄土地貌, 因距海洋较远, 大陆性季风气候显著, 冬季寒冷干燥, 夏季炎热多雨。区内地形起伏较大, 随着当地采矿活动和路网建设项目的日益增加, 地表植被覆盖率呈日渐降低的趋势, 坡体原有的稳定性遭到破坏, 致使斜坡处于不稳定状态, 加之黄土节理裂隙发育严重, 在强降雨的影响下, 极易诱发滑坡地质灾害, 如图 1 所示。

2 基于改进 Mein-Larson 降雨入渗模型的滑坡稳定分析

2.1 原理

坡体在降雨条件下易发生渗流现象, 为了能更准确地研究在降雨影响下实际边坡的安全性, 可以使用改进 Mein-Larson 模型进行计算, 该模型是 Mein 和 Larson 于 20 世纪 70 年代基于 Green-Ampt 模型, 使用等效时间理论将其赋予明确物理意义的入渗模型, 最初仅考虑了降雨边坡土体为理

收稿日期: 2024-03-11

作者简介: 葛若鑫(1997—), 女, 山西阳泉人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为环境与灾害地质; 通信作者李嘉正(1998—), 男, 山西太原人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为环境与灾害地质; 段进睿(2000—), 男, 山西运城人, 硕士, 研究方向为环境与灾害地质。



图1 坡体现状

想状态下的安全程度,忽略了坡体各处降雨量的差异和坡度对降雨入渗量的影响。基于此,诸多学者尝试使用土体含水率函数对其进行修正,并通过室内实验验证其适用性^[6-7],与传统的 Mein-Larson 模型比较,改进 Mein-Larson 模型引入了土体持水性参数计算土体初始含水率^[8],考虑了不同地形坡度土体初始含水率的分布情况,弥补了传统模型只能应用于土体含水率为理想情况的不足,能更加准确地表达实际边坡降雨入渗过程,在降雨型滑坡稳定性研究中得到广泛应用^[9-14]。当降雨强度小于土体饱和渗透系数时,边坡稳定性系数 F_s 的计算公式为

$$F_s = \frac{c' + (\gamma_{\text{sat}} Z_w \cos^2 \beta - \gamma_w Z_w) \tan \varphi'}{\gamma_{\text{sat}} Z_w \sin \beta \cos \beta} \quad (1)$$

式中: c' 为土体有效内聚力,kPa; φ' 为土体有效内摩擦角($^\circ$); γ_w 为水的重度,kN/m³; γ_{sat} 为土体的饱和重,kN/m³; β 为边坡的坡角($^\circ$); F_s 为边坡稳定性系数; Z_w 为降雨入渗深度。

其中,降雨入渗深度是基于达西定律和水量平衡原理表征降雨累积入渗量与降雨入渗深度的关系的物理量,其计算公式为

$$Z_w = \frac{I}{(\theta_s - \theta_i) \cos \beta} = \frac{pt}{(\theta_s - \theta_i) \cos \beta} \quad (2)$$

式中: I 为累计降雨入渗量; p 为降雨强度; t 为降雨时间; θ_s 为土体饱和含水率; θ_i 为土体初始含水率。

2.2 降雨工况设计

研究区属温带大陆性季风气候区,根据相关气象资料,研究区降雨主要集中在7月和8月,月最大

降雨量为349.3 mm,日最大降雨量为124.2 mm,极端天气影响下,出现了冬季无降雨的情况。为研究在相同降雨时间下不同的降雨强度对滑坡稳定性的影响,依据降雨量等级划分标准和研究区实际情况,设置以下三种工况对边坡进行模拟,如表1所示。

表1 降雨工况

降雨事件	工况Ⅱ	工况Ⅲ	工况Ⅳ
降雨强度	50 mm/d	100 mm/d	200 mm/d

2.3 滑坡稳定性计算与分析

通过实际调查发现,边坡土体为各项同性材料,内部无地下水作用,坡体表面在降雨过程中未积水,并且降雨强度小于土体饱和渗透系数,因此,本文仅考虑降雨强度小于土体饱和渗透系数时,不同降雨强度下滑坡的稳定性,并结合实地勘测资料和工程类比,确定参与计算的边坡物理力学参数,具体数值如表2所示。

基于式(1)和式(2)的计算结果绘到降雨入渗曲线(图2)和安全系数曲线(图3)。由图2可以看出,当降雨时间相同时,随着降雨强度的增加,降雨入渗深度值逐渐增大,当降雨强度相同时,降雨入渗深度与降雨时间呈线性关系增加。由图3可以看出,边坡稳定性系数随着降雨强度和持时的增加,呈不断降低趋势;当降雨强度超过50 mm时,稳定性系数出现显著降低,说明降雨强度对边坡安全性的影响较大。

表2 土体物理力学参数

土体有效内聚力 c' / kPa	土体有效内摩擦角 $\varphi' / (^\circ)$	水的重度 $\gamma_w / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	土体的饱和重度 $\gamma_{\text{sat}} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	边坡坡角 $\beta / (^\circ)$	土体饱和含水率 $\theta_s / \%$	土体初始含水率 $\theta_i / \%$
10	20	1	19.6	32	64	35

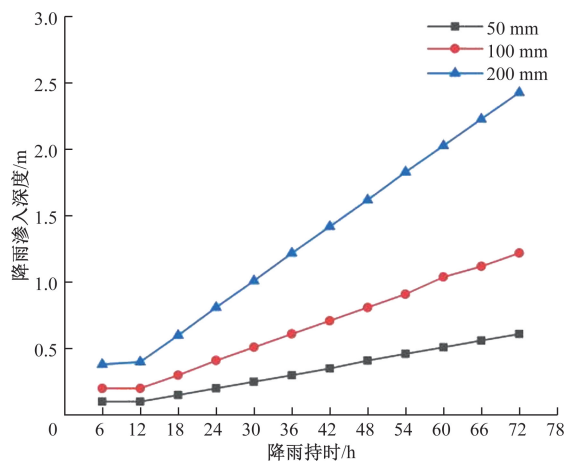


图2 降雨入渗曲线

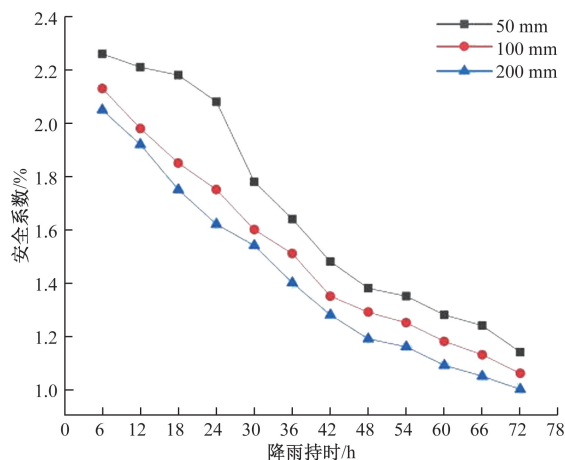


图3 安全系数曲线

3 不同降雨工况下滑坡稳定性数值模拟

3.1 模型建立

依据实际地形,采用 Midas GTS NX 有限元数值模拟软件建立单土层斜坡非饱和渗流的有限元模型,实际调查后发现研究区内无地下水埋藏,因此在模型中不设置地下水位。如图 4 所示,模型高度为 160 m,厚度为 40 m,斜坡的坡度为 38° ,同时,这个模型包含 2 421 个网格节点和 2 141 个单元。

3.2 参数选取和边界条件设置

依据土工室内实验和前人研究成果,坡体表层黄土使用 Midas-GTS NX 函数库中的 VG 函数模型拟合得到非饱和土体的土水特征曲线和渗透系数曲线。Y 轴方向约束应用于模型的左侧和右侧,X 轴方向约束适用于模型的下部,添加 9.8 m/s^2 的自重。岩土材料采用弹塑性力学模型,摩尔-库伦强度准则,结合土工试验结果和工程地质手册,并结合实地情况综合选取岩土体物理力学参数(表 2)。

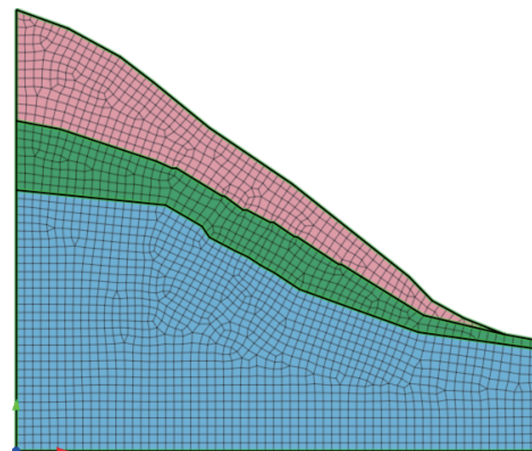


图4 模型网格单元划分

表2 物理力学参数

土体	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角 /($^\circ$)
黄土	18.62	15	10	20
风化岩	22	310	64	30
基岩	25	900	122	38

3.3 模拟结果分析

使用 Midas 数值软件分别计算天然工况和前述设计的五种工况下的边坡安全系数和位移、应力值,对比分析计算结果后发现,天然工况下边坡的安全系数为 2.65,该边坡处于稳定状态;当降雨强度为 50 mm/d、100 mm/d 时,边坡安全系数分别为 1.12、1.07,处于基本稳定状态;当降雨强度超过 100 mm 后,边坡安全系数下降为 1.02,将会出现滑塌的可能。与使用改进 Mein-Larson 降雨入渗模型的计算结果 t 检验后发现,两组数据的均值显著性为 0.9,说明两种方法的计算结果无显著性差异。

天然工况和降雨工况下的边坡位移云图如图 5 所示,随着降雨强度不断增加,边坡的最大位移从坡顶向坡角转移,坡脚的位移值增速高于坡体其他部位,坡面整体位移面积逐渐减小,其可能是因为降雨后,边坡土体内部水渗流运动相较于未降雨时发生改变,坡脚处水位线高出坡脚地面线,在坡脚发生塑性破坏,所以坡脚处位移值最大。当降雨强度超过 50 mm 后,坡角位移量增幅最大。

研究区的剪应变云图如图 6 所示,随着降雨强度的增加,坡脚的剪应变值迅速增加,并向坡面扩散,这是由于降雨后坡脚位置先形成暂态饱和区,导致滑带土抗剪强度不足,发生剪切破坏。

4 滑坡形成机理分析

根据数值模拟结果显示,降雨是对边坡应力

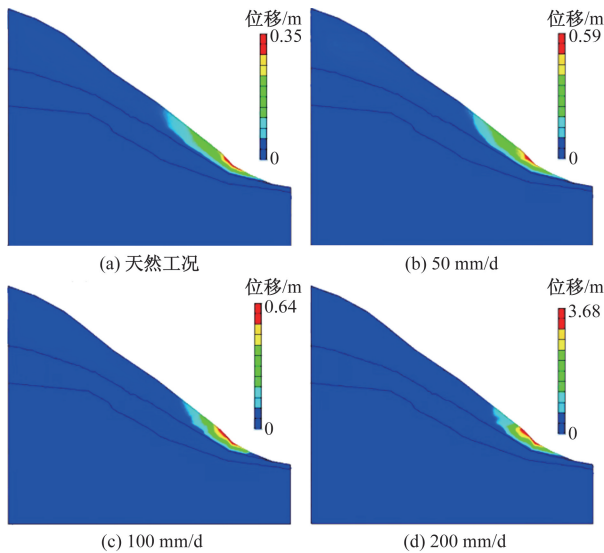


图5 位移云图

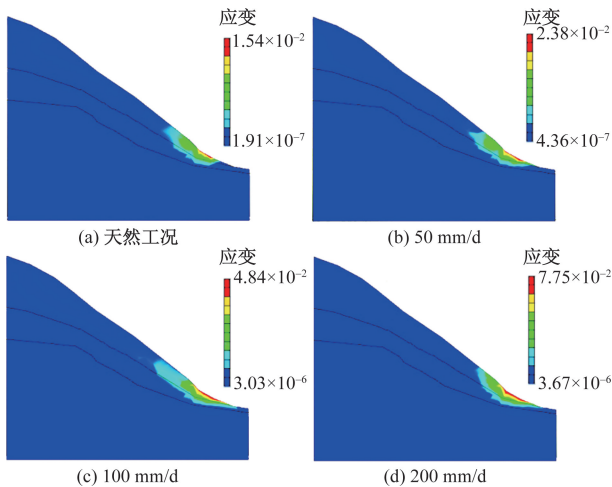


图6 剪应变云图

和位移产生影响的主要因素。黄土中存在着裂隙,当降雨通过这些裂隙渗入黄土泥岩的接触界面时,会形成滞水层,从而降低接触界面上的岩土抗剪强度,形成了一个薄弱的区域。孔隙水压力计算云图如图7所示,随着降雨进一步渗透,坡脚的孔隙水压力逐渐增大并向坡面传播,导致滑坡前缘滑动带土壤含水量增加,抗剪强度下降,开始发生蠕变变形。在滑坡发生蠕变过程中,滑坡前缘的岩土体会受到滑坡推力的挤压滚动,导致孔隙被细颗粒物填充,孔隙比例显著降低,渗透性降低,因此滑坡上方的积水更难排出。滑坡区域的土体长时间被水浸泡,导致抗剪强度降低,发生水解泥化作用,最终滑坡发生。根据滑坡的形成过程,可以将其归类为蠕变拉裂型滑坡。

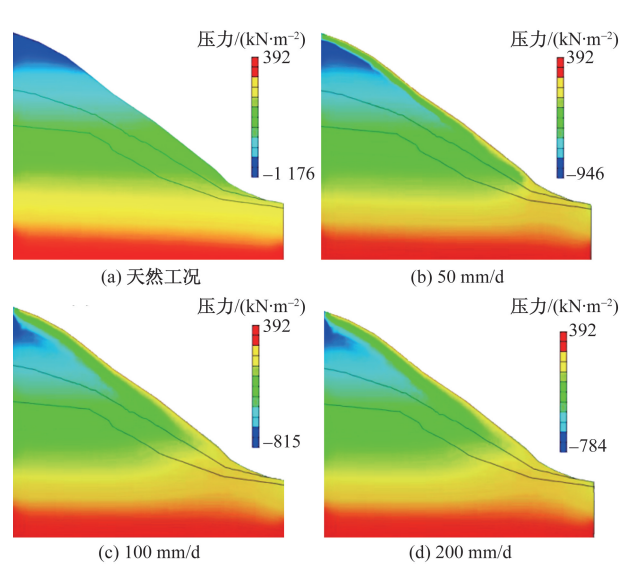


图7 孔隙水压力云图

5 结论

以山西省吕梁市某黄土边坡为工程实例,结合改进 Mein-Larson 降雨入渗模型和有限元数值模拟软件,对不同降雨强度下黄土边坡的稳定性进行分析,基于非饱和渗透理论,采用 VG 模型拟合滑体非饱和参数,对降雨影响下的滑坡变形进行模拟分析,最后总结出降雨型黄土滑坡的形成机制。主要得出如下结论。

(1)对比降雨入渗模型和有限元数值模型计算结果发现,滑坡在天然工况下处于稳定状态,随着降雨强度和历时的增加,滑坡处于欠稳定状态。

(2)降雨通过在坡脚上随着降雨历时的增加形成暂态饱和区,影响孔隙水压力,进而影响到应力场分布。

(3)通过分析降雨过程中孔隙水压力变化情况,结合滑坡成因,推断出该滑坡为蠕滑-拉裂型滑坡。

参考文献

- [1] 刘明扬,武哲,付晓东,等. 不同降雨条件下堆积体边坡响应规律与失稳力学机制分析[J]. 科技和产业, 2021, 21(7): 266-274.
- [2] 简文彬,黄聪惠,罗阳华,等. 降雨入渗下非饱和坡残积土湿润锋运移试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1123-1133.
- [3] 杨校辉,张志伟,郭楠,等. 持续降雨作用下折线型滑裂面堆积体滑坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(S1): 195-200.
- [4] 凌松耀,蹇永明,张智勇,等. 融雪-降雨型滑坡失稳机理[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(21): 8980-8987.

- [5] 夏艺峰, 贾泽庆, 周春梅. 强降雨作用下风化混合花岗岩边坡稳定性分析[J]. 科技和产业, 2024, 24(1): 267-272.
- [6] 陈俊成, 宿文姬. Mein-Larson 入渗模型的改进研究[J]. 华南地震, 2021, 41(2): 125-133.
- [7] 黄雪浪. 降雨条件下边坡非饱和渗流过程的气阻效应与变形规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [8] 白亚军, 任建民, 田敏, 等. 基于改进 Mein-Larson 降雨入渗模型的黄土边坡稳定性分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(4): 131-139.
- [9] 张生宙. 降雨条件下黄土滑坡稳定性研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [10] 唐扬, 殷坤龙, 汪洋, 等. 斜坡降雨入渗的改进 Mein-Larson 模型[J]. 地球科学, 2017, 42(4): 634-640.
- [11] 李秀珍, 张小红. 基于 Mein-Larson 入渗模型的降雨滑坡失稳破坏概率研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 219-223.
- [12] 王惠卿, 丰成君, 戚帮申, 等. 河北省顺平县李思庄滑坡稳定性分析[J]. 地质力学学报, 2020, 26(4): 595-603.
- [13] 吕文斌, 耿海深, 魏赛拉加. 基于极限平衡法和 Midas/GTS 的张家湾滑坡稳定性[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(11): 4369-4378.
- [14] 李秀珍, 何思明. 基于 Mein-Larson 入渗模型的浅层降雨滑坡稳定性研究[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 16-20.

Numerical Simulation and Failure Mechanism of Landslide Stability under Different Rainfall Conditions

GE Ruoxin¹, LI Jiazheng², GUAN Jinrui³

(1. Shanxi Geological Engineering Exploration Institute Co. Ltd., Taiyuan 030024, China;

2. Shanxi Water Resources and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co. Ltd., Taiyuan 030024, China;

3. Taiyuan University of Technology School of Mining Engineering, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Through on-site investigation, application of improved Mein Larson rainfall infiltration model, numerical simulation and theoretical analysis, the stability and formation mechanism of rainfall induced loess landslides were analyzed. The research results showed that with the increase of rainfall intensity and duration, a transient saturation zone is formed at the foot of the slope, leading to changes in the stress field and displacement range of the slope, and a decrease in the shear strength of the surface soil. It is inferred that the landslide is a creep tensile crack type landslide.

Keywords: loess landslide; landslide stability; numerical simulation; rainfall