

不同降雨条件下边坡渗流及稳定性研究

马家宾, 朱忠昊, 张永朋, 杜清岭, 陈 洁

黄淮学院建筑工程学院, 河南 驻马店

收稿日期: 2024年9月20日; 录用日期: 2024年11月21日; 发布日期: 2025年2月27日

摘 要

降雨是导致边坡失稳的一项重要因素, 为了分析降雨时长和降雨强度对边坡稳定性的影响, 本文采用Abaqus有限元软件分析降雨时长和降雨强度对边坡孔隙水压力和边坡稳定性的影响, 并基于降雨入渗基本理论和强度折减法基本理论, 进一步地对边坡渗流和稳定性做出了研究。结果表明, 边坡孔隙水压力随着降雨时长和降雨强度的增大而增大, 而安全系数随着降雨时长和降雨强度的增大而减小, 从而会导致边坡发生失稳破坏; 相比于降雨时长, 降雨强度的增大使边坡更容易发生失稳破坏。

关键词

数值模拟, 有限元, 降雨特征, 安全系数, 边坡稳定性

Study on Seepage and Stability of Slope under Different Rainfall Conditions

Jiabin Ma, Zhonghao Zhu, Yongpeng Zhang, Qingling Du, Jie Chen

School of Architectural Engineering, Huanghuai University, Zhumadian Henan

Received: Sep. 20th, 2024; accepted: Nov. 21st, 2024; published: Feb. 27th, 2025

Abstract

Rainfall is an important factor leading to slope instability. In order to analyze the influence of rainfall duration and intensity on slope stability, this paper adopts Abaqus finite element software to analyze the influence of rainfall time and intensity on slope pore water pressure and slope stability based on the theory of rainfall infiltration and the basic theory of intensity reduction method. The seepage and stability of the slope are further studied. The results show that the pore water pressure of the slope increases with the increase of rainfall duration and rainfall intensity, while the safety factor decreases with the increase

作者简介: 马家宾(2003.07.17-), 河南省周口人, 本科, 研究方向: 水文水资源方向。Email: 1285604355@qq.com

文章引用: 马家宾, 朱忠昊, 张永朋, 杜清岭, 陈洁. 不同降雨条件下边坡渗流及稳定性研究[J]. 水资源研究, 2025, 14(1): 69-81. DOI: 10.12677/jwrr.2025.141008

of rainfall duration and rainfall intensity, which leads to the instability of the slope. Compared with the duration of rainfall, the increase of rainfall intensity makes the slope more easily to instability failure.

Keywords

Numerical Simulation, Finite Element, Rainfall Characteristics, Safety Factor, Slope Stability

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

降雨是影响边坡稳定性的一项重要因素,滑坡、泥石流的发生大多都与降雨有关,其主要原因是降雨的入渗会导致边坡土体内的含水量升高,土体基质吸力减小,从而改变边坡土体的强度参数,使土体的有效应力变小。同时,雨水会增大边坡向下的滑动力,进而导致滑坡灾害的发生[1]。研究表明,超过90%的滑坡由大气降雨直接诱发或与降雨间接相关[2][3]。近年来大量的滑坡实例说明降雨是影响边坡稳定性的一项重要指标,如2023年10月山西吕梁市离石区一处山体发生滑坡;2023年4月重庆市忠县忠州街道新桥社区3组部分居民房屋后侧坡体发生滑坡;2023年6月四川省泸定县得妥镇发旺村二组雨洒坪因强降雨天气而突发泥石流灾害。大量的滑坡事故证明对边坡稳定性研究的重要性。

为探究降雨对边坡稳定性的影响,郭钊等运用Abaqus软件模拟降雨条件下的三维边坡应力场和渗流场的耦合分析,得出表层土体孔隙水压力呈现非线性的分布特征,达一定深度后呈现线性分布,孔隙水压力响应的时间与坡面的距离呈正相关[4];黄明奎等探讨极端降雨条件下,随入渗时间增加基质吸力呈现出先减后增再下降的趋势[5];黄剑斌等利用不同的降雨工况下边坡安全系数和位移的关系得出残积土边坡失稳的预警方法[6];王俊等基于无限边坡算法开展降雨型滑坡的预警系统研究[7];郑颖人等论证采用强度折减求解边坡安全系数的精确性以及有限元法进行边坡稳定分析的有效性[8];张家发基于某土质边坡工程,分析土坝在饱和与非饱和条件下的渗流场,获得不同条件下的土坝变形规律[9];袁中夏以某外环路的一处标段工程为背景,对降雨入渗条件下黄土高填方边坡的稳定性进行分析[10];罗伟等研究不同降雨类型循环下边坡渗流场规律,发现循环降雨安全系数呈周期性变化[11];杨柳通过数值模拟及室内试验得出温州地区二元边坡的失稳规律,在降雨期易发生浅层滑坡[12]。

在过去的研究中,学者们对边坡的研究存在着单一性,对于边坡孔隙水压力和稳定性的综合研究成果相对较少。因此,本文选择某一具体边坡作为研究对象,利用Abaqus软件模拟不同降雨条件下边坡的渗流和稳定性。本文设置不同的降雨强度和降雨时长,并建立边坡的数值模型,以研究降雨条件变化对边坡孔隙水压力和稳定性的影响。

2. 基本原理

2.1. 降雨入渗基本理论

降雨入渗可以分为两种类型:垂直入渗和侧向入渗。垂直入渗是指雨水从地表垂直向下渗入土体;而侧向入渗则是指地表水从周围渗入土体。图1展示干燥土壤在表面积水一定时间后的含水率剖面分布图。我们将这个剖面划分为四个区域:饱和区、含水量明显下降的过渡区、含水量变化不大的传导区和含水率迅速减少至初始值的湿润区。每个区域都具有独特的特点,湿润区的前沿被称为湿润锋。

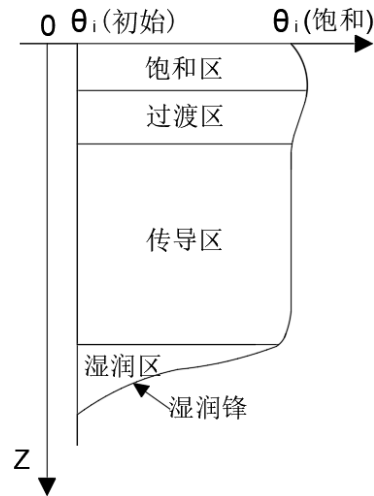


图 1. 含水率剖面图

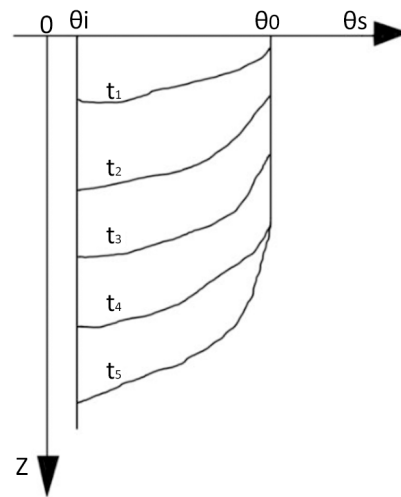


图 2. 积水后含水率随时间的变化

积水在刚开始入渗干土时,地表处的含水率梯度 $\partial_\theta/\partial z$ 的绝对值比较大,入渗率 i 也较高。当 $t \rightarrow 0$ 时, $\partial_\theta/\partial z \rightarrow \infty$; 随着入渗的不断进行, $\partial_\theta/\partial z$ 的绝对值不断地减小,导致入渗率 $i(t)$ 不断地降低; 当时间 t 足够长时, $\partial_\theta/\partial z \rightarrow 0$, $i(t) \rightarrow k(\theta_0)$ 。也就是说,入渗一定时间后,入渗率趋于一个稳定值,该值相当于地表含水量 θ_0 的渗透系数 $k(\theta_0)$, 显然 $k(\theta_0) < k(\theta_s)$ 。

图 2 为土壤含水率随时间变化的分布情况以及湿润锋的移动规律。其主要特征如下:

- 1) 在雨水降落到土壤表面的较短时间内,土体表面的含水量 $(0, t)$ 在较短时间内,由初始值增大到最大值 θ_0 。一般自然条件下,土体不可能达到完全饱和状态,因此 $\theta_0 < \theta_s$ 。
- 2) 随着入渗的不断进行,湿润锋逐渐地向边坡内部下移,含水量的分布曲线由陡直变得平缓。
- 3) 在边坡土体的表层,含水量梯度 $\partial_\theta/\partial z$ 的绝对值由大变小,当 t 足够大时, $\partial_\theta/\partial z \rightarrow 0$, 地表处含水量保持不变。

假设边坡坡面的外法线方向为 n , 当发生强度为 $R(t)$ 的竖直降雨时,降雨在坡面法线方向的分量为:

$$q_n(t) = R(t)_{nz} \quad (1)$$

根据达西定律,坡面各个方向的最大入渗能力为:

$$R_j(t) = -k_j(h_w) \frac{\partial(h_w + z)}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中： h_w ——压力水头； z ——坐标取向上为正。

将其转化为法线方向的入渗率：

$$R_n(t) = R_j(t)_{n_j} \quad (3)$$

对于边坡而言，实际入渗流量为 $q_s(t)$ ，且垂直坡面方向。根据前面的分析，可以得出降雨强度与实际入渗量的对应关系：

$$\text{当 } R_n(t) \geq q_n(t), \quad q_s(t) = q_n(t) \quad (4)$$

$$\text{当 } R_n(t) < q_n(t), \quad q_s(t) = R_n(t) \quad (5)$$

基于上述理论，本文将利用降雨入渗的特点对边坡进行分析，研究在降雨入渗的条件下，边坡孔隙水压力随时间的变化情况。

2.2. 强度折减法基本理论

强度折减法是通过不断地对粘聚力和摩擦角折减，找出土体临界抗剪强度，此时，边坡失稳的安全系数就转化成边坡破坏时的抗剪强度临界值，这种方法现如今已经广泛用于工程领域，将其计算出的安全系数作为边坡失稳临界值的一个重要依据，其强度折减法公式如下：

$$c' = \frac{c}{F_r} \quad (6)$$

$$\phi' = \arctan(\tan \phi) \quad (7)$$

其中： c ——土体的粘聚力； ϕ ——土体的内摩擦角； F_r ——边坡的稳定安全系数；根据强度折减法的理论与公式推出，含水量越大，水膜在土粒表面形成润滑剂，使摩擦力降低；对粘性土，含水量增高，薄膜水变厚。甚至增加自由水，造成粒间静电分子引力减小，粘聚力就随之减小。

本文主要通过对不同降雨时刻以及不同降雨强度对降雨后边坡抗剪强度值进行强度折减，只有当边坡破坏从坡脚贯通到坡顶，此时边坡发生破坏。通过所设定的场变量，找出对应发生临界失稳破坏的场变量值。

3. 数值模拟

3.1. 模型建立及参数

为能更好地表示出在不同降雨条件下对边坡稳定性的影响，本文采用 Abaqus 有限元软件进行数值模拟，通过建立相应的边坡模型，对降雨时的边坡进行稳定性分析。如图 3 所示。

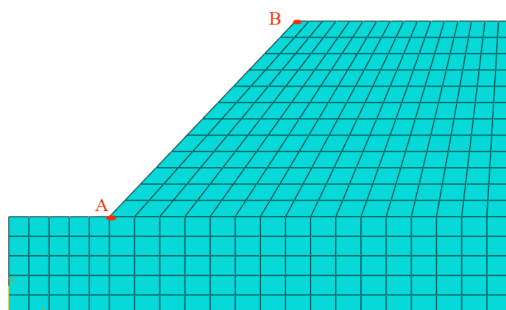


图 3. 边坡网格划分

模型坡高 20 m，底部长 50 m，最高处高 30 m，有效内摩擦角 $\phi=30^{\circ}$ ，有效黏聚力 $c=15\text{ KPa}$ ，干密度 1.3 g/cm^3 ，弹性模量 100 MPa ，泊松比 0.3，饱和渗透系数 0.018，具体参数如表 1 所示。

表 1. 边坡材料参数表

力学指标	数值	单位
干密度	1.3	g/cm^3
弹性模量	100	mPa
泊松比	0.3	/
饱和渗透系数	0.018	m/h
有效内摩擦角	30	$^{\circ}$
有效粘聚力	15	kPa

对边坡施加一个向下的重力数值设为 10 的载荷，把坡顶、坡间设置为降雨流量边界来模拟降雨。对其左右坡脚 10 m 处设置孔隙水压力数值为 1，将坡底孔隙水压力数值设置为 0。网格类型采用 CPE4 平面单元，网格划分的单元形状为四边形，网格划分技术采用结构划分，网格划分单元数为 297 个。

3.2. 边坡初始状态

3.2.1. 渗流初始状态分析

渗流分析对于研究土体内部的受力情况非常重要。在进行降雨入渗分析之前，必须先了解边坡初始孔隙水压力的分布。因此，本文首先对静水位作用进行分析，以确定后续分析所需的初始状态。

图 4 为初始孔隙水压力的等值线图。从图 4 中可以明显看出，水压力的分布呈线性变化，底部水压力为 100 kPa，而顶部水压力则为-200 kPa(吸力)，这与所给的初始条件完全相符。此外，图 4 中显示的地下水浸润线(孔隙水压力为零的线)清楚地标示出正负孔隙水压力的分界位置。这一浸润线明确划分地下水压力的不同区域，是后续分析的重要参考。

3.2.2. 边坡初始状态稳定性分析

为更准确地描述边坡在未受降雨影响时的原始状态，本研究首先在无降雨条件下对边坡进行初步分析。这样做是为建立一个基准，以便在后续研究中引入降雨因素，从而对边坡的位移和稳定性进行更深入的计算和分析。

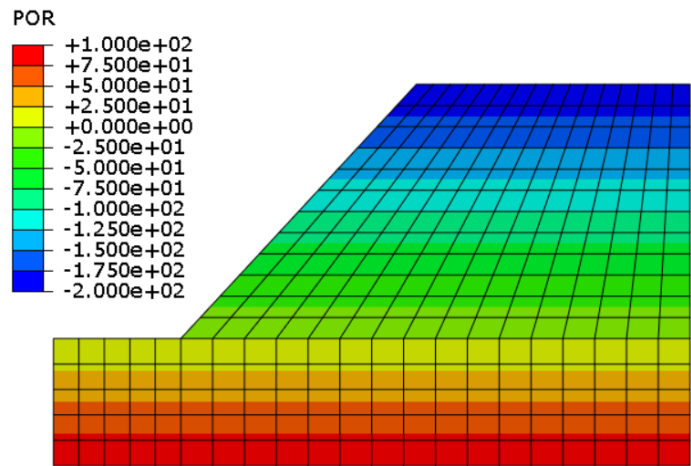


图 4. 边坡初始孔隙水压力

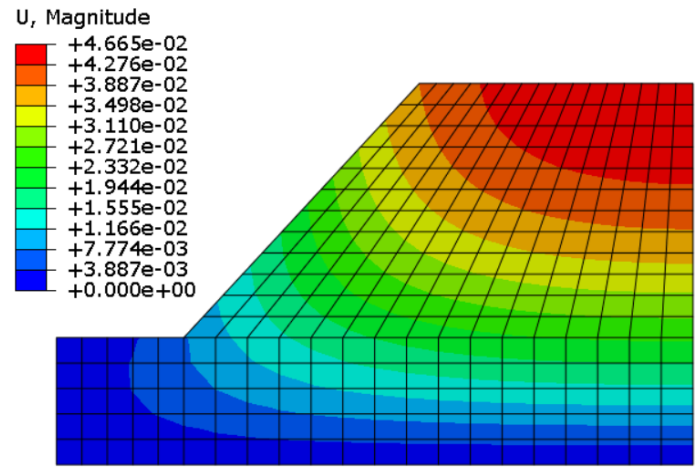


图 5. 位移等值线云图

图 5 为边坡失稳数值模拟，观察到最大位移量出现在坡脚附近的上部区域，这一现象表明该位置发生屈服现象，并且随着时间的推移，屈服区域向上方扩展。在 0.4855 秒时，塑性区在边坡中形成连通路径，这表示边坡结构发生整体破坏。将数值计算的不收敛性作为评估土坡失稳的标准，对应的场变量 FV1 的值为 1.71397，这个数值也代表边坡的安全系数 F_s ，即边坡的稳定性评价指标为 1.71397。

4. 计算结果与分析

4.1. 降雨强度对边坡孔隙水压力的影响

孔隙水压力在边坡体内的变化是评估边坡稳定性的一个重要指标，其可以揭示降雨对边坡体内孔隙水压力大小和分布范围的影响。为深入研究降雨强度对边坡入渗效应的作用，在土壤的渗透系数保持不变，降雨持续时间相同的前提下，本实验设计四种不同降雨强度(5 毫米/小时、10 毫米/小时、15 毫米/小时、20 毫米/小时)的模拟方案，以便通过比较分析不同降雨条件下边坡入渗特性的差异。

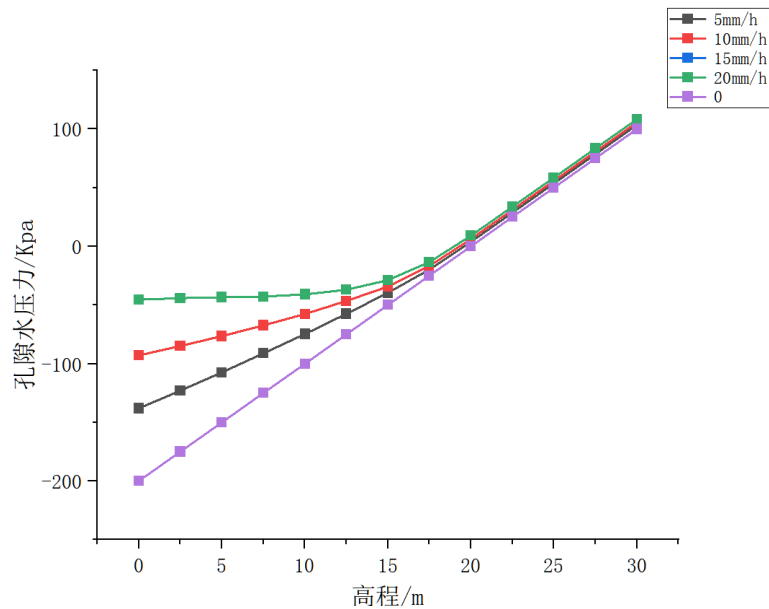


图 6. 不同雨强孔隙水压力随高程变化图

如图 6 所示, 经过不同降雨强度处理的边坡, 在降雨结束时, 可以观察到坡肩处孔隙水压力随土体深度的变化规律。随着降雨强度的逐步增大, 边坡内部的孔隙水压力在降雨结束后呈现出逐渐上升的趋势, 在坡顶位置, 孔隙水压力的增加幅度最为显著。在边坡土体的上层部分, 尽管孔隙水压力从初始的 -138 kPa 增加到 -48 kPa , 变化 90 kPa , 但孔隙水压力并没有达到或超过 0 kPa , 这表明上层土体并未进入饱和状态, 没有形成暂态饱和区域。通过分析可以得出, 降雨对边坡稳定性的影响深度约为 17.5 m 。对于此类边坡来说, 虽然降雨会引起基质吸力的变化, 并进一步影响土体的抗剪强度, 但是在超过一定深度之后, 降雨对土体抗剪强度的影响变得非常微小。需要注意的是, 边坡的渗透系数会影响降雨对其稳定性影响深度的大小。

4.2. 降雨时长对边坡孔隙水压力的影响

为探究降雨持续时间对边坡入渗效应的具体影响, 实验设定固定的土体渗透系数, 并保持降雨强度恒定不变。在这样的前提下, 设计四个不同降雨时长(10 h , 20 h , 30 h , 40 h) 的模拟方案。目的是通过分析比较, 明确不同降雨时长对边坡入渗特性及其可能引发的稳定性变化的具体作用。

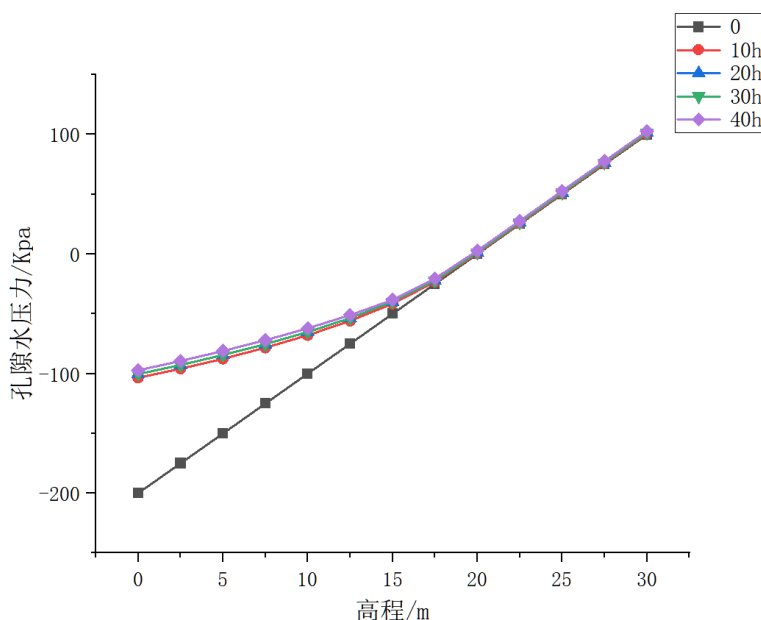


图 7. 不同雨时孔隙水压力随高程变化图

在降雨强度固定不变的条件下, 随着降雨时长的延长, 边坡上部土体内的孔隙水压力有明显的增加, 而深层土体的孔隙水压力也出现上升趋势。如图 7 所示, 边坡在不同降雨历时条件下经历降雨后, 坡肩处孔隙水压力随土体深度变化的规律。图 7 数据表明, 与降雨前相比, 降雨结束后边坡的孔隙水压力普遍上升, 在受降雨影响的深度范围内, 这种上升幅度基本保持一致, 约增加 100 kPa 。在降雨历时增长的过程中, 尽管孔隙水压力的增幅较小, 但影响深度有所扩大。当降雨历时为 10 h 时, 影响深度大约为 15 m ; 而当历时增至 40 h 时, 影响深度则扩大至大约 17.5 m 。造成这一现象的主要原因是降雨强度保持恒定且相对较低, 导致增加的雨量能够全部渗入土体中。由于没有在边坡上部形成暂态饱和区域, 孔隙水压力的变化较为均匀, 并且随着时间推移, 入渗深度逐渐增加。

4.3. 降雨强度对边坡稳定性的影响

在分析降雨强度对边坡稳定性的影响时, 选择不同的降雨强度(5 mm/h 、 10 mm/h 、 15 mm/h 和 20 mm/h) 进行研究, 并将降雨时长统一设定为 72 h 。

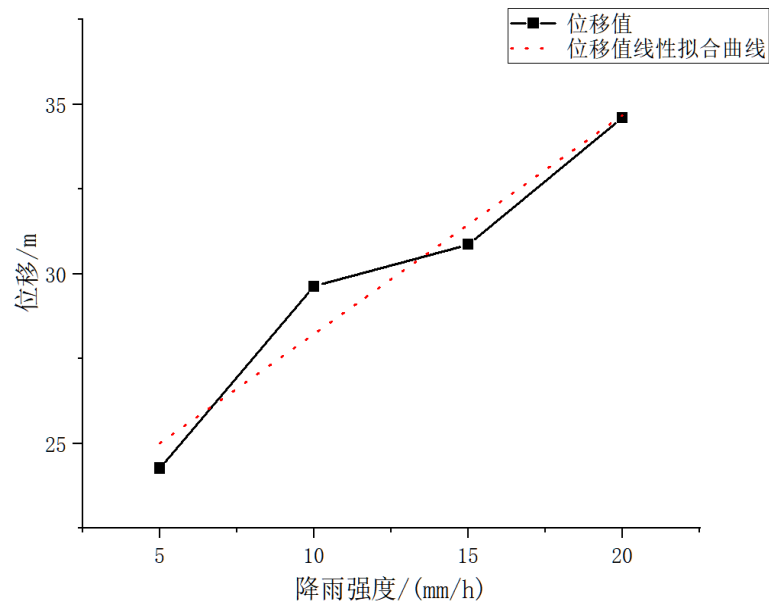


图 8. 不同降雨强度边坡位移曲线图

图 8 为特征点 A 的位移变化情况，可以清楚地看到，随着降雨强度的逐步增加，该点的水平位移值也在不断增大。这一趋势表明，边坡的水平位移值越大，其稳定性就越差。

随着降雨强度的提高，特征点 A 处边坡的水平位移从 24.2647 mm 增加到 34.6017 mm，共增加 10.337 mm。这意味着边坡的稳定性在下降。

表 2. 不同降雨强度边坡安全系数

降雨强度(mm/h)	5	10	15	20
降雨时长/h	72	72	72	72
安全系数	1.4963	1.4662	1.4385	1.4092

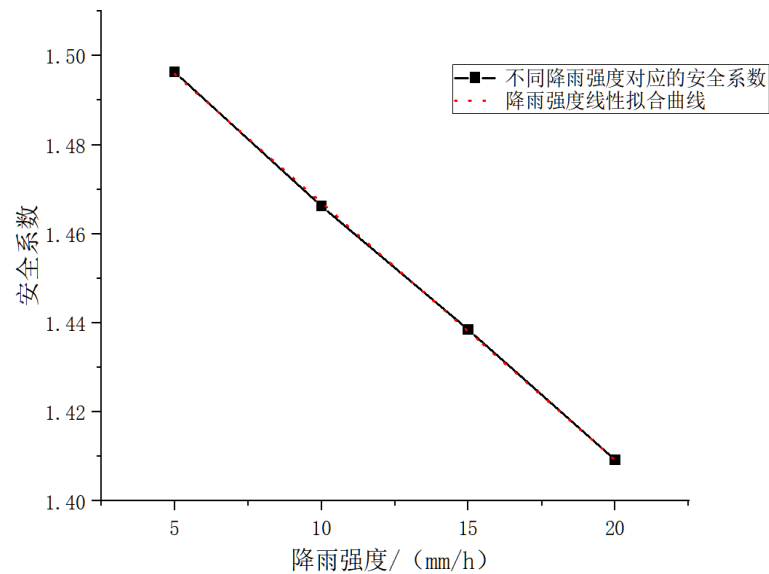


图 9. 不同降雨强度对应的安全系数

随着降雨强度的增强,边坡的抗剪强度逐渐减弱,导致边坡安全系数下降,进而可能引发边坡失稳破坏。如表 2 所示,在降雨时长保持不变的情况下,当降雨强度从 5 mm/h 上升到 20 mm/h 时,边坡的安全系数从 1.49631 降低到 1.40922。这表明,随着降雨强度的增加,雨水入渗量增多,基质吸力减少,从而导致坡体整体安全性的降低。

对于不同降雨强度下的边坡安全系数,进行线性拟合分析,得到图 9 所示的拟合结果。根据这个结果,可以预测边坡稳定性的变化趋势,其数学表达式如下:

$$[y = -0.00578x + 1.5248] \quad (8)$$

式中: (x)代表降雨强度; (y)代表边坡稳定性的安全系数。

从这个关系式可以看出,随着降雨强度的逐渐增加,边坡的安全系数呈现出持续下降的趋势。这种下降趋势意味着边坡的稳定性在减弱。具体来说,随着降雨强度的增加,滑裂面上的塑性区域会从坡脚逐渐扩展至坡顶,最终可能导致整个边坡发生失稳性破坏。

4.4. 降雨时长对边坡稳定性的影响

在研究降雨时长对边坡稳定性的影响时,选择不同的降雨时长(10 h、20 h、30 h 和 40 h)进行分析,并保持降雨强度恒定在 10 mm/h。观察到,随着降雨时长的延长,边坡特征点 A 处的塑性应变程度逐渐增加。具体来说,特征点 A 的最大应变值从 10 h 时的 31.565 mm 增加到 40 h 时的 33.4392 mm,共增加 1.8742 mm。这表明,随着降雨时长的增加,边坡的稳定性在减弱。

在较短的降雨时长内,边坡上部土体与下部土体之间的特性差异并不显著,土体沿高程的抗剪性质基本保持一致。然而,当降雨持续时间较长时,边坡浅层土体基本达到饱和状态,而深层土体的饱和度变化则不太明显。这导致土体抗剪强度沿高程呈现出明显的不均匀性:浅层土体的抗剪强度相对较低,而深层土体则保持较高的抗剪强度。

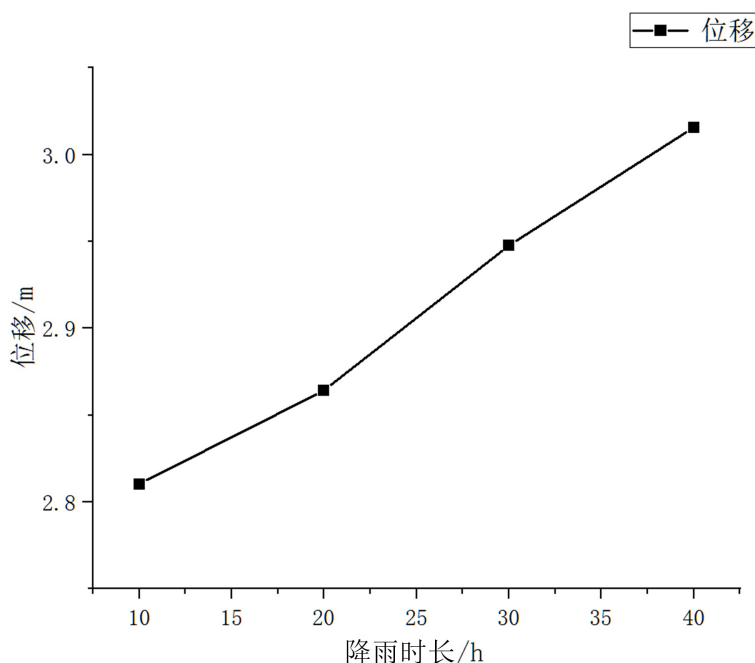


图 10. 不同降雨时长边坡位移曲线图

根据图 10 的数据,可以观察到,在降雨强度保持恒定的情况下,随着降雨时长的延长,边坡坡顶的位移值

呈现出逐渐增大的趋势。坡顶位移值从 2.81033 mm 增加到 3.01558 mm，共增加 0.20525 mm。随着位移值的增大，边坡可能面临更高的失稳风险。

表 3. 不同降雨时长边坡安全系数

降雨强度(mm/h)	10	10	10	10
降雨时长/h	10	20	30	40
安全系数	1.4941	1.4916	1.4850	1.4815

如表 3 所示，当降雨强度固定不变时，降雨时长从 10 h 上升到 40 h 时，边坡的安全系数从 1.4941 降低到 1.4815。这表明压力的增加导致土体的饱和度提高，同时基质吸力相应减少。特别是在边坡的浅层土体中，这种现象更为明显，表现为暂时性的饱和状态。相比之下，深层土体受降雨影响较小，其饱和度变化不大。

由于这种差异，深层土体能够保持较高的抗剪强度，而浅层土体的抗剪强度则相对较弱。这种抗剪强度的不均匀分布导致滑裂面有可能从深层土体向浅层土体过渡，增加边坡失稳的风险。

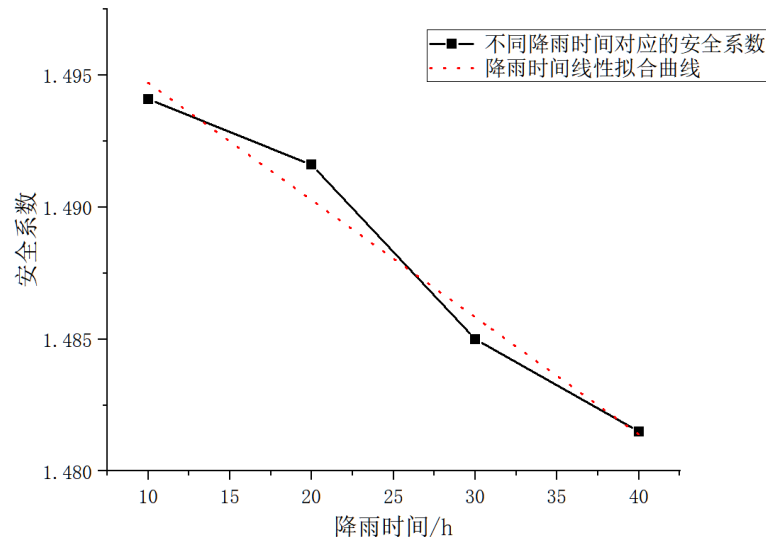


图 11. 不同降雨强度对应的安全系数

根据对不同降雨历时对应的边坡安全系数进行线性拟合分析，并得到图 11 所示的拟合结果。这一分析帮助预测边坡稳定性随时间变化的趋势，其数学模型可以表示为以下公式：

$$[y = -0.000444x + 1.49915] \tag{9}$$

式中：(x)表示降雨历时；(y)表示边坡稳定性的安全系数。

从这个线性关系中可以清晰地看出，随着降雨历时的延长，边坡的安全系数呈现出下降的趋势。这种趋势表明，边坡的稳定性在逐渐减弱，如果降雨持续，则边坡可能会发生失稳破坏。

4.5. 降雨强度与降雨时长对边坡稳定性影响的比较

当考虑降雨强度和降雨时长对边坡安全系数的影响时，注意到这两个因素都会导致安全系数下降。在这个前提下，为探究在总降雨量相同的增加幅度下，降雨强度和降雨时长中哪一个对边坡安全系数的减少以及边坡稳定性的影响更为显著。

设置降雨时长为 40h，并设置不同的降雨强度水平，包括每小时 4h、6h、8h 和 10h。结果如表 4 和图 12 所示。

表 4. 只改变降雨强度下的边坡安全系数

降雨强度(mm/h)	4	6	8	10
降雨时长/h	40	40	40	40
降雨量/mm	160	240	320	400
安全系数	1.5109	1.4974	1.4889	1.4836

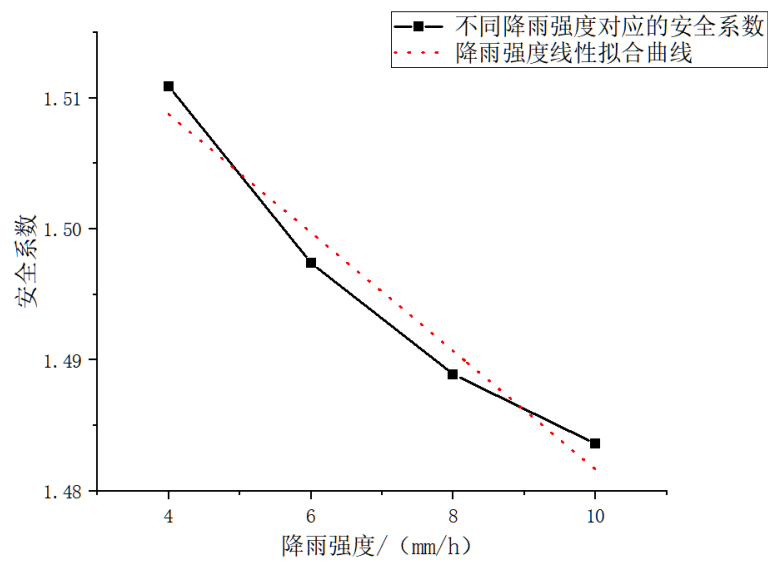


图 12. 不同降雨强度对应的安全系数

表 5. 只改变降雨时长下的边坡安全系数

降雨时长/h	16	24	32	40
降雨强度(mm/h)	10	10	10	10
降雨量/mm	160	240	320	400
安全系数	1.4924	1.4880	1.4855	1.4836

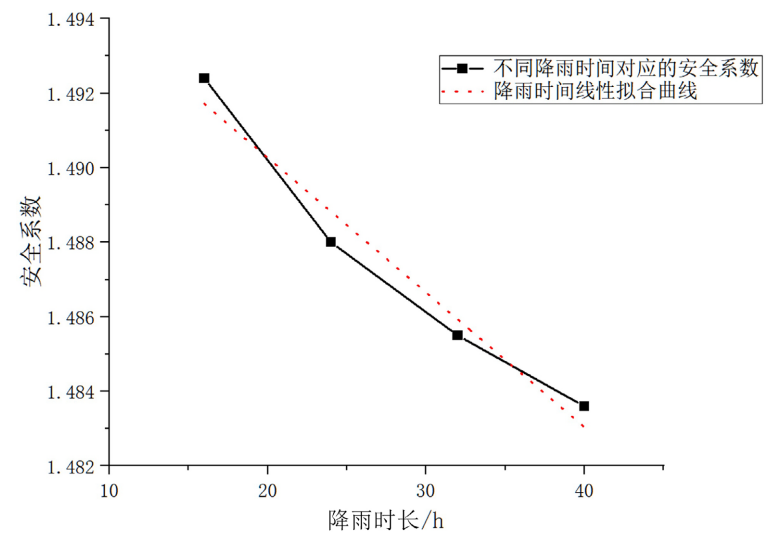


图 13. 不同降雨时长对应的安全系数

设置降雨强度恒定每小时 10 mm, 改变降雨时长, 具体设置为 16 h、24 h、32 h 和 48 h。结果如表 5 和图 13 所示。

实验结果表明, 无论是改变降雨强度还是降雨时长, 边坡的安全系数都会随着总降雨量的增加而下降。然而, 这两种情况下安全系数的减少幅度存在差异。在改变降雨强度的情况下, 可以观察到边坡安全系数的下降幅度(即曲线斜率的绝对值)大于仅改变降雨时长的情况。具体来说, 当增加降雨强度时, 安全系数的下降幅度为 0.009; 而当增加降雨时长时, 安全系数的下降幅度为 0.0029, 前者比后者高出 0.61 个百分点。

5. 结论

1) 在研究中, 可以发现当降雨时长固定时, 随着降雨强度的增加, 边坡内部的孔隙水压力会逐步上升。特别是在坡顶位置, 这种压力上升的幅度最为显著。至于边坡是否能够达到饱和状态, 这不仅取决于降雨强度本身, 还与土壤的渗透系数有关。另一方面, 当降雨强度保持不变时, 随着降雨时长的延长, 可以观察到边坡内孔隙水压力持续增加。在本研究案例中, 由于考虑的降雨强度相对较低且保持恒定, 且随着时间的推移雨水增加并全部渗入土体中, 因此没有在边坡上部形成暂态饱和区域。这导致孔隙水压力的变化相对均匀, 主要表现为入渗深度的增加。

2) 在降雨过程中, 可以注意到随着降雨强度的逐步增加, 边坡内的孔隙水压力呈现出一个持续上升的趋势。具体来说, 当降雨强度低于土壤的入渗能力时, 坡顶的基质吸力保持相对稳定, 不会出现显著变化。然而, 一旦降雨强度超过土壤的入渗能力, 坡顶区域会暂时出现饱和状态。在这种情况下, 坡顶土体的抗剪强度会显著减弱, 这使得边坡在抗剪破坏方面变得极为脆弱, 安全系数急剧下降, 从而极有可能导致边坡失稳和破坏。随着降雨时长的延长, 孔隙水压力也呈现出逐渐上升的趋势。这种持续的压力增加导致边坡基质吸力逐步减少, 进而降低坡顶的抗剪能力。这些变化可能会导致边坡失去稳定性并发生破坏。

3) 在进行边坡稳定性分析时, 可以发现在总降雨量保持不变的情况下, 降雨强度和降雨时长对边坡安全系数的影响存在显著差异。当降雨量的增加幅度相同时, 降雨强度的增加对边坡稳定性的负面影响要大于降雨时长的延长。

基金项目

黄淮学院省级大学生创新创业训练计划项目(202310918013)。

参考文献

- [1] 杨新平. 砂砾体围堰渗流场及稳定性分析研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2020.
- [2] 谭洋洋, 杨洪耕, 徐方维, 等. 降雨型滑坡诱发电网连锁故障风险评估模型研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(33): 8-13.
- [3] 林泽雨, 刘爱华, 张巍, 等. 降雨及坡体组成对堆积型边坡稳定性的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 11875-11882.
- [4] 郭钊, 党进谦, 王志浩. 降雨条件下闽北残积土边坡渗流场演化规律及边坡稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(11): 154-157+183.
- [5] 黄明奎. 极端降雨对边坡土体强度的影响及其稳定性分析[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 6-9.
- [6] 黄剑斌, 许旭堂, 徐祥, 等. 降雨条件下多级残积土坡渗流稳定性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(5): 150-156+161.
- [7] 王俊, 黄润秋, 聂闻, 等. 基于无限边坡算法的降雨型滑坡预警系统的模型试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3503-3510.
- [8] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388.
- [9] 张家发. 土坝饱和与非饱和稳定渗流场的有限元分析[J]. 长江科学院院报, 1994, 11(3): 41-45.
- [10] 袁中夏, 李德鹏, 叶帅华. 地震和降雨条件下黄土高填方边坡稳定性分析[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(4): 119-125.

- [11] 罗伟, 姜智予, 李佳宝, 等. 不同降雨类型循环作用下边坡渗流场及稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(25): 10918-10925.
- [12] 杨柳. 降雨条件下温州地区二元结构边坡稳定性规律研究[D]: [硕士学位论文]. 温州: 温州大学, 2021.