

# 降雨时长对边坡稳定性影响的数值分析

王启宇

西京学院土木工程学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年3月21日; 录用日期: 2023年4月18日; 发布日期: 2023年4月25日

## 摘要

通过有限元数值模拟, 研究了在相同强度但不同降水持续时间的条件下, 边坡流体与土壤之间的耦合关系。通过应用强度折减法, 将坡面监测点的位移突变和边坡塑性区域的连续贯通作为边坡失稳的判断标准, 从而通过数值方法计算出耦合后的安全系数。通过应用强度折减法, 我们可以将坡面监测点的位移变化和边坡塑性区域的连续性作为边坡稳定性的判断标准, 从而计算出安全系数。研究发现, 对于长时间降雨, 安全系数下降最显著的阶段是降雨初期阶段, 即降雨时长为0小时至24小时的阶段。之后, 安全系数下降率逐渐平缓, 并稳定于某一数值。降雨首先使岩质边坡浅层土体达到饱和状态, 对浅层土体造成危害, 进而降低边坡稳定性。降雨入渗作用下的边坡失稳主要是岩质边坡浅层土体发生滑动。本研究结果为边坡的设计管理以及降雨条件下边坡事故的预测和防治提供了分析依据和参考价值。

## 关键词

有限元法, 强度折减法, 降雨入渗, 边坡稳定性, 基质吸力

# Numerical Analysis of Effect of Rainfall Duration on Slope Stability

Qiyu Wang

School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Mar. 21<sup>st</sup>, 2023; accepted: Apr. 18<sup>th</sup>, 2023; published: Apr. 25<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Through finite element numerical simulation, the coupling relationship between slope fluid and soil under the condition of the same intensity but different precipitation duration is studied. By applying the strength reduction method, the sudden displacement of the monitoring point on the slope surface and the continuous penetration of the plastic area of the slope are used as the criteria for

judging the instability of the slope, and the coupled safety factor is calculated by the numerical method. By applying the strength reduction method, we can use the displacement change of the monitoring point on the slope surface and the continuity of the plastic zone of the slope as the criterion for judging the stability of the slope, so as to calculate the safety factor. The study found that for long-term rainfall, the most significant stage in which the safety factor decreases is the initial stage of rainfall, that is, the stage of rainfall duration from 0 hours to 24 hours. After that, the decrease rate of the safety factor is gradually flattened and stabilized at a certain value. Rainfall first makes the shallow soil of the rocky slope reach a saturated state, causing damage to the shallow soil, and then reducing the stability of the slope. The slope instability under the action of rainfall infiltration is mainly due to the sliding of shallow soil on rocky slopes. The results of this study provide an analysis basis and reference value for the design management of slopes and the prediction and prevention of slope accidents under rainfall conditions.

## Keywords

Finite Element Method, Strength Reduction Method, Rainfall Infiltration, Slope Stability, Matrix Suction

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

降雨入渗是造成边坡失稳最频繁和最显著的外界环境影响因素[1]。尽管关于降雨对边坡稳定性影响的研究很多,但很少有研究关注降雨历时对边坡稳定性的影响。大多数研究只考察了降雨强度或总降雨量对边坡稳定性的影响,而忽略了降雨持续时间的影响。然而,降雨历时是影响边坡稳定性的重要因素,忽视它会导致边坡失稳预测不准确。因此,本文选取某工程岩质边坡为例,使用 ABAQUS 通过固定降水强度改变降水时间结合强度折减法得出边坡安全系数来研究降水时间对边坡稳定性的影响。以期对降水条件下边坡稳定性预测从而保障人身安全、避免经济损失提供一定的参考价值。

## 2. 基本原理

### 2.1. 流固耦合原理

#### 2.1.1. 降雨作用下流固耦合对岩质边坡影响作用机理

雨水渗入到土质边坡形成的渗流场会随着降雨不断变化渗流场产生的渗流力作用在土体上引起应力场变化导致土体变形,土内部孔隙体积变小,孔隙率降低,雨水在孔隙中渗流作用减弱从而又反过来影响渗流场;渗流场以改变渗透能力的方式使其与应力场不断相互作用[2]。渗流体积力是渗流场产生的,同时也是影响应力场的主要因素,根据水力学原理渗流体积力会随着水力梯度成正比例变化单元的渗流体积力  $F_v$  公式[3]为:

$$F_v = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_w J_x \\ r_w J_y \end{bmatrix}$$

式中:  $F_x$ ,  $F_y$  是  $F_v$  在  $x$  和  $y$  方向上的分量;  $J_x$ ,  $J_y$  是在  $x$ ,  $y$  方向上的渗透坡降,  $r_w$  为水的重度。渗流场改变土体孔隙,孔隙率对渗透系数影响显著在没有试验测定相关性时,常采用 A. Riverra 等人提出的渗

透系数随孔隙率变化经验公式[3]:

$$k = k_0 \left[ \frac{n(1-n_0)}{n_0(1-n)} \right]^3$$

式中:  $n_0$  为土体初始孔隙率,  $n$  为变化后的孔隙率,  $k$ ,  $k_0$  是与  $n$ ,  $n_0$  对应的渗透系数。

### 2.1.2. ABAQUS 中流固耦合运行原理

在 ABAQUS 中, 流固耦合问题一般采用 Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)方法进行求解, 其中涉及到以下几个公式[4]:

#### 1) 体积守恒方程

在 ALE 方法中, 流体部分的体积守恒方程可以写成以下形式:

$$\partial \rho / \partial t + \text{div}(\rho u) = 0$$

其中,  $\rho$  表示流体的密度,  $u$  表示流体的速度矢量,  $t$  表示时间,  $\text{div}$  表示散度运算符。

#### 2) 动量守恒方程

流体部分的动量守恒方程可以写成以下形式:

$$\partial(\rho u) / \partial t + \text{div}(\rho u u) = -\text{grad} p + \text{div} \tau + f$$

其中,  $p$  表示流体的压力,  $\tau$  表示流体的应力张量,  $f$  表示外力项。

#### 3) 渗流方程

在流体渗透问题中, 可以采用 Darcy 定律来描述流体的渗透速度, 其数学形式为:

$$q = -k \text{grad} h$$

其中,  $q$  表示单位面积上的流量,  $k$  表示渗透系数,  $h$  表示压力势。

#### 4) 热传导方程

如果模拟的是流固耦合问题中的热传导现象, 还需要考虑热传导方程, 其数学形式为:

$$\rho C_p \partial T / \partial t - \text{div}(k \text{grad} T) = Q$$

其中,  $\rho$  表示物质密度,  $C_p$  表示比热容,  $T$  表示温度,  $k$  表示热导率,  $Q$  表示热源项。

在 ABAQUS 中, 以上公式可以通过对应的模块和材料模型进行设置和求解[4]。

## 2.2. 有限元强度折减法

强度折减法的优点是安全系数可以直接得出, 不需要事先假设滑裂面的形式和位置, 另外可以完整地展现出岩质边坡破坏的全过程[2], 即使用强度折减法可以真实模拟边坡失稳和塑性变形过程, 因此本文采用该方法求解瞬态渗流场和应力场的耦合作用后, 分析边坡整体稳定性的安全系数。在外荷载保持不变的情况下, 通过对边坡整体土体的  $c'$  和  $\varphi'$  进行折减运算, 折减系数  $Fr$  可以确定边坡安全系数[2]。当边坡因强度折减至下滑力等于土体抗剪强度时, 即处于失稳临界状态。因此, 强度折减系数  $Fr$  可以视为边坡的安全系数。经过折减的抗剪强度参数可以表示为[5]:

$$c_m = c' / Fr$$

$$\varphi_m = \arctan(\tan \varphi' / Fr)$$

强度折减法边坡失稳判断依据一共有以下三种:

#### 1) 坡面位移突变;

- 2) 塑性区域贯通;
- 3) 数值计算不收敛。

其中边坡塑性贯通区域形成的同时，坡面控制点位移发生突变是边坡失稳最准确的判断依据，因此本文算例选用坡面控制点位移、边坡塑性贯通区域形成来作为边坡失稳临界状态的判断依据[6]。

### 2.3. 非饱和土强度理论

非饱和土的孔隙中含有气体无法应用传统的摩尔 - 库伦强度理论。在工程中最广泛应用的非饱和土强度理论是由 Fredlund 等提出，公式如下[7]：

$$\tau_f = c' + (\sigma - p_a) \tan \phi' + (p_a - p_w) \phi^b$$

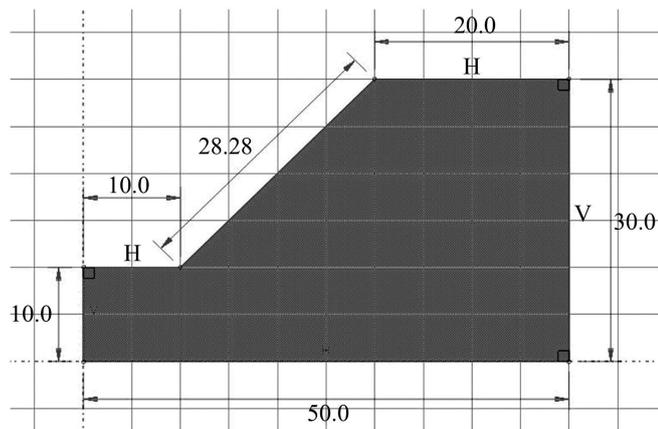
式中： $\phi'$ 为有效内摩擦角  $c'$ 为有效黏聚力  $p_w$ 为孔隙水压力  $p_a$ 为孔隙气压力  $\phi^b$ 为随基质吸力( $p_a - p_w$ )变化的内摩擦角为方便分析此处设为常数  $\tau_f$ 为非饱和土抗剪强度。

由公式可知基质吸力减小会引起土体强度大幅下降，因此基质吸力是研究土体强度和边坡失稳重要参考因素和指标，由于坡面直接接触空气  $p_a = 0$ ，因此负的孔隙水压力可以直接用来表示基质吸力。

## 3. 数值模拟

### 计算模型及计算方案

ABAQUS 是一种广泛应用于岩土工程领域的有限元分析软件，本研究利用 ABAQUS 进行了二维数值分析。图 1 为建立的二维分析模型示意图，其中水位线高度同坡脚保持一致。在数值分析的过程中，采用了表 1 的材料参数和合适的边界条件，以模拟真实的边坡降水入渗情况，并通过更改降水时间分析步时长来模拟不同降水时间长度并对其进行强度折减得出不同降雨入渗时长下的安全系数。为保证模拟结果的准确性，模型进行了多次优化调整以满足模拟要求，最终得到具有一定可靠性的结果并对结果加以分析处理。



**Figure 1.** Two-dimensional model of finite element numerical analysis (size unit: M)  
**图 1.** 有限元数值分析二维模型(尺寸单位: M)

**Table 1.** Material properties of rock slope  
**表 1.** 岩质边坡材料属性

干密度	粘聚力	摩擦角	弹性模量	泊松比	渗透系数	初始孔隙比
1.4 kg/m <sup>3</sup>	15 KPa	30°	40 MPa	0.3	0.018	1.0

本次数值模拟采用的本构模型采用摩尔 - 库伦准则, 底边为不透水边界, 坡面雨水渗透强度为  $0.02\cos 45^\circ$  m/h, 水平面雨水渗透强度为 0.02 m/h, 网格单元划分见图 2, 采用 CPE4P 单元, 共计 1300 个网格。降雨幅值曲线如图 3, 降水幅度从 0 h 到 24 h 逐渐从 0 增加至设置大小, 降水幅度从 96 h 到 120 h 逐渐从设置大小降低到 0 以符合现实中降水特征。

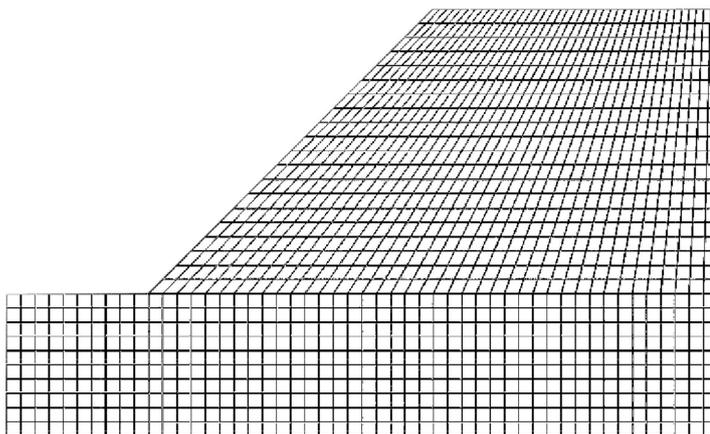


Figure 2. Model grid cell division

图 2. 模型网格单元划分

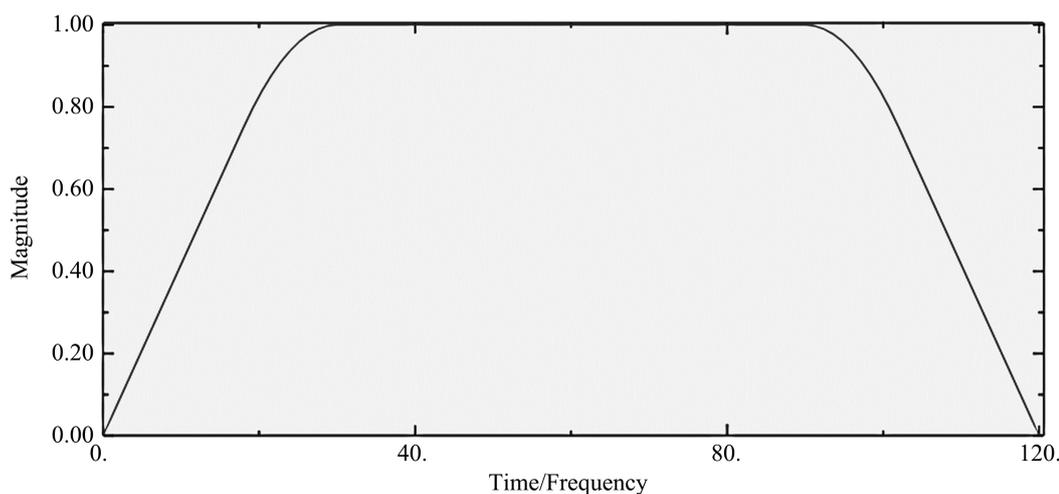


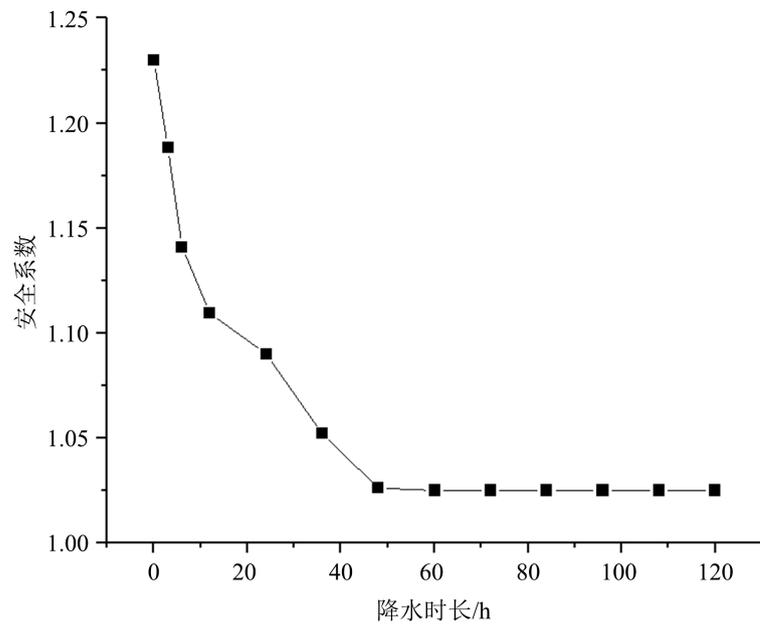
Figure 3. Rainfall amplitude curve

图 3. 降雨幅值曲线

#### 4. 数值模拟结果与分析

为研究相同降雨强度但不同降雨时间长度对边坡稳定性的影响。为了实现这一目标, 设计了 13 组不同降雨时长的模型, 从 0 到 120 小时不等。采用了强度折减法来计算边坡的安全系数, 并选取了坡顶一点作为位移突变观测点, 观察了位移突变前的安全系数以及塑性区域贯通前一刻的安全系数。

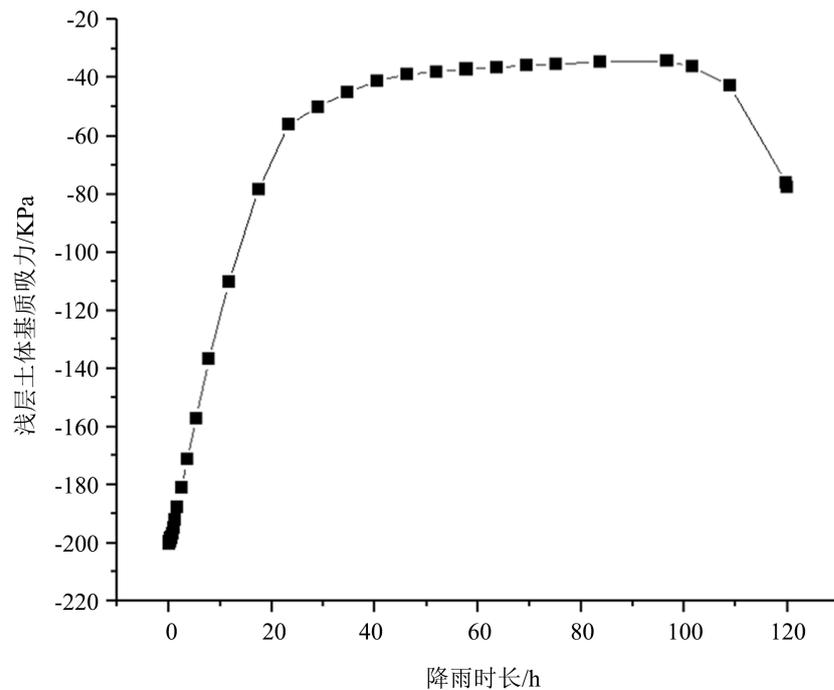
在计算中, 使用强度折减法, 直到数值计算结果不再收敛为止。这样, 从而得到了每个降雨时长下的边坡安全系数。然后选择位移突变前的安全系数和塑性区域贯通前一刻的安全系数中较小的一个值作为边坡的安全系数, 这个值更能反映边坡的稳定性情况。绘制如图 4 所示的曲线来展示不同降雨时间长度下边坡安全系数的变化情况。



**Figure 4.** Influence of precipitation duration on slope safety factor  
**图 4.** 降水时长对边坡安全系数的影响

由图 4 分析可知, 随着降雨时间的持续增加, 边坡的安全系数随之持续降低, 并且在降雨 0 h 到 48 h 时间范围内安全系数呈现断崖式下降, 从 0 h 时的  $F_r = 1.23$  下降至 1.025 并持续稳定至 120 h 不再下降。

为了进一步探究降雨入渗作用下边坡稳定性削弱的机制和原理, 选取边坡顶部水平面中点作为监控点, 从而获得浅层土体的基质吸力变化, 如图 5 所示。



**Figure 5.** Relation between precipitation duration and matric suction of shallow soil at monitoring points  
**图 5.** 浅层土体监控点降水时长与浅层土体基质吸力关系

如图 5 所示, 通过绘制浅层土体基质吸力与降水时长的关系曲线。可以发现, 这条曲线与图 4 中降水时长对边坡安全系数的影响曲线具有较强的相关性。可以明显地注意到浅层土体基质吸力的变化趋势与边坡的安全系数的变化趋势相互对应。

其中较为明显的是在降水初期 24 小时内, 浅层土体基质吸力迅速降低, 尽管初期降雨幅度较小但是地表水力传导率较大, 因此雨水得以全部入渗。同时, 随着降雨强度的越来越大, 饱和区域在岩质边坡表面形成的速度越来越快, 最终导致基质吸力迅速降低, 大大削弱了土体自身的抗剪强度, 与此同时安全系数下降幅度最大, 浅层土体基质吸力的变化对边坡稳定性的影响尤为显著。

降雨持续 24 小时以后, 浅层土体自身已经达到了饱和状态, 同时基质吸力减小的速度放缓直至降雨强度减小前不再发生剧烈变化, 安全系数的降幅减缓乃至停留在同一数值不再发生改变。

在 96 h 至 120 h 降雨逐渐减小直至停止期间, 随着浅层土体逐渐退出饱和状态, 饱和度不断降低, 同时孔隙水压力不断减小, 土体浅层的基质吸力又开始逐渐增加。

## 5. 结论

经过以上的数据, 可以得出以下结论:

- 1) 对于长时间降雨来说, 安全系数下降最显著阶段集中于降雨时长为 0 h 至 24 h 的降雨初期阶段, 之后安全系数下降率逐渐平缓并且稳定于某一数值。
- 2) 降雨首先使岩质边坡浅层土体达到饱和状态, 对浅层土体造成危害进而降低边坡稳定性。
- 3) 降雨入渗作用下的边坡失稳主要是岩质边坡浅层土体发生滑动。
- 4) 在边坡设计和管理中, 必须重视降水初期的影响, 并采取相应的预防措施, 以确保边坡的安全稳定。

## 参考文献

- [1] 李炎隆, 陈波, 马成成, 等. 基于 ABAQUS 的降雨入渗条件下基坑边坡稳定性分析[J]. 应用力学学报, 2017, 34(1): 155-161.
- [2] 王述红, 何坚, 杨天娇. 考虑降雨入渗的边坡稳定性数值分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(8): 1196-1200.
- [3] 陈丽刚. 基于 ABAQUS 渗流与应力耦合作用的边坡稳定性分析[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2010.
- [4] 费康, 彭劫. ABAQUS 岩土工程实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017: 401.
- [5] Zienkiewicz, O.C., Humpheson, C. and Lewis, R.W. (1975) Associated and Non-Associated Visco-Plasticity and Plasticity in Soil Mechanics. *Géotechnique*, **25**, 671-689. <https://doi.org/10.1680/geot.1975.25.4.671>
- [6] 刘金龙, 栾茂田, 赵少飞, 袁非凡, 王吉利. 关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土力学, 2005(8): 1345-1348.
- [7] Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993) *Soil Mechanics for Unsaturated Soil*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>