

降雨条件下非饱和黄土边坡数值模拟研究

曹振家

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17日; 发布日期: 2023年4月24日

摘要

基于Abaqus有限元数值模拟软件, 根据试验所得的数据建立起降雨条件下二维边坡的有限元分析模型。在降雨时长为120 h的前提下, 设置降雨强度分别为10 mm/h、15 mm/h、20 mm/h, 分析了斜坡的变形特征及渗流特征。结果表明, 坡体的等效塑性变形随雨强度的增加而增大, 最大塑性应变为0.04, 有向坡底偏移的趋势; 水平位移也不断增大, 最大位移为64.62 mm; 与此同时, 由于坡脚处的积水增多, 坡脚处的孔隙水压力值也在持续增加, 最大值为41.02 kPa; 边坡安全系数不断减小, 最小值为1.025, 边坡稳定性降低。

关键词

非饱和黄土边坡, 边坡稳定性, 降雨入渗, 安全系数

Numerical Simulation Study of Unsaturated Loess Slope under Rainfall Conditions

Zhenjia Cao

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

Received: Mar. 21st, 2023; accepted: Apr. 17th, 2023; published: Apr. 24th, 2023

Abstract

Based on the Abaqus finite element numerical simulation software, a finite element analysis model of two-dimensional slope under rainfall conditions is established according to the data obtained by the experiment. Under the premise of rainfall duration of 120 h, the rainfall intensity was set to 10 mm/h, 15 mm/h and 20 mm/h, respectively, and the deformation characteristics and seepage characteristics of the slope were analyzed. The results show that the equivalent plastic deformation of the slope increases with the increase of rain intensity, the maximum plastic strain is 0.04, and there is a tendency to shift to the bottom of the slope, the horizontal displacement also increases,

the maximum displacement is 64.62 mm, at the same time, due to the increase of water at the foot of the slope, the pore water pressure value at the foot of the slope is also increasing, and the maximum value is 41.02 kPa. The slope safety factor is constantly decreasing, the minimum value is 1.025, and the slope stability is reduced.

Keywords

Unsaturated Loess Slope, Slope Stability, Rainfall Infiltration, Safety Factor

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. 概述

山体滑坡被公认为世界上三大自然灾害之一，是地震后对人类危害最大的灾害。它不仅影响交通，而且对建筑物造成破坏，对人们的生命财产构成严重威胁。边坡的失稳性和破坏受降雨入渗、土壤结构、地震破坏、人类活动等多种因素的影响。其中，降雨入渗为最常见的影响边坡稳定性的因素。长时间的降雨会使边坡顶部基质吸力降低，而导致土体有效应力的降低，从而使其抗剪强度下降。而且，雨水渗入土壤会造成可溶性盐的流失，导致孔隙变大，进一步危及黄土边坡的稳定性，最终引发滑坡等自然灾害[1][2]。在此基础上，蔡亚飞等重点研究了降雨入渗作用下非饱和土边坡的变形与稳定性，分析了塑性变形特征和安全系数的变化[3]。李威等认为抗剪强度不是影响边坡的稳定性的唯一因素，还与降雨参数、边坡高度等因素有关[4]。曹辉建立了降雨入渗的黄土边坡模型，指出雨水入渗规律在边坡不同位置有不同的规律[5]。朱婵莲等利用数值模拟软件 Geo-studio，改变降雨时间、坡高、坡脚等参数，计算得到其边坡稳定系数，从而判断边坡的安全性[6]。因此在前人基础上，选用 Abaqus 软件对不同降雨条件下边坡的变形特征进行模拟分析，对黄土斜坡在降雨作用下的失稳机制和渗流理论进行深入的研究，得到不同降雨强度下的边坡稳定系数，有利于更好地认识土坡失稳的本质。

2. 非饱和土理论

非饱和土是土壤、水和气体的三相体，其中孔隙中的气压和孔隙压力之间的差值称为基质吸力[7]。通常，当空气存在时，基质吸力等于负孔压值；所以，负的孔隙压力的增大会引起基质吸力的降低，这样就会使土体的强度有所降低。随着土壤含水量的增加，土壤的饱和度增加，渗透系数也随之增加，导致基质吸力逐渐消失，土壤强度降低。

2.1. 非饱和土渗流理论

非饱和土壤中孔隙水的流动仍然与达西定律有关，尽管有一些显着的差异。比如：孔隙压力在饱和土和非饱和土中分别为正和负，渗透系数在饱和土中是个定值，在非饱和土中则随含水量的增幅有关。一维土体渗透方程可以用如下的公式表达：

$$K_w = \frac{d^2 h_w}{dz^2} + \frac{dh_w}{dz} + \frac{dk_w}{dz} = 0$$

2.2. 非饱和土抗剪强度理论

非饱和土的抗剪强度不仅取决于其物理结构、应力路径和密度，还取决于其含水量或饱和度，并额

外考虑基质吸力。在这样的条件下，Bishop 的剪切强度公式和 Fredlund 的双应力变量强度准则得到了广泛的应用。

$$\tau_f = c' + \sigma \tan \varphi' + u_s \tan \varphi'_b$$

3. 有限元模型建立

选用 Abaqus 软件对不同降雨条件下边坡的变形特征进行模拟分析。模型所采用的土坡为均质各项同性的非饱和黄土边坡，力学参数见表 1 所示。采用的模型高 30 m，水平长度为 50 m，地下水位设置 ab 处，模型和网格划分见图 1 和图 2。

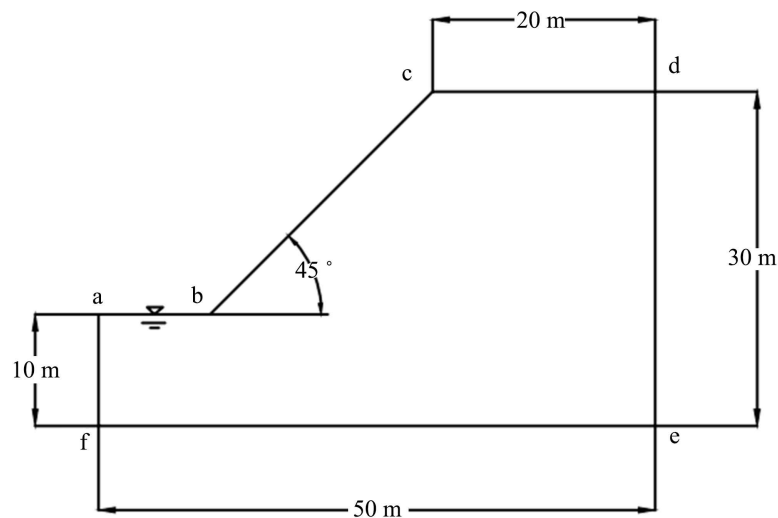


Figure 1. Model size
图 1. 模型尺寸

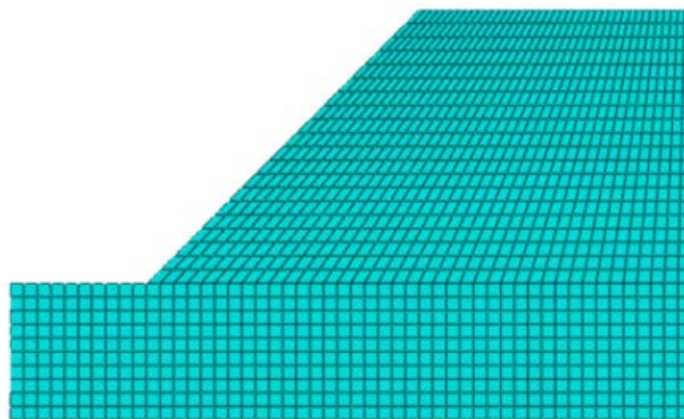


Figure 2. Meshing
图 2. 网格划分

Table 1. Mechanical parameter of loess
表 1. 黄土力学参数

初始孔隙比	干密度(g/cm ³)	弹性模量(MPa)	泊松比	粘聚力(kPa)	内摩擦角(°)	重度(kN/m ³)
1	1.4	40	0.3	15	30	20

4. 不同降雨条件下数值模拟分析

4.1. 不同降雨强度下的边坡变形特征分析

降雨引起的边坡破坏，是指雨水通过裂隙渗透到边坡中，使其在水化过程中发生明显的变形，进而降低其力学强度，进而引起岩体的失稳。在此基础上，通过对不同雨强条件下斜坡变形特性的研究，可以为斜坡的治理提供一定的理论依据。通过雨水入渗后对边坡强度进行折减，得出了在不同雨强条件下边坡等效塑性变形、位移和滑动破坏面见图 3~5。

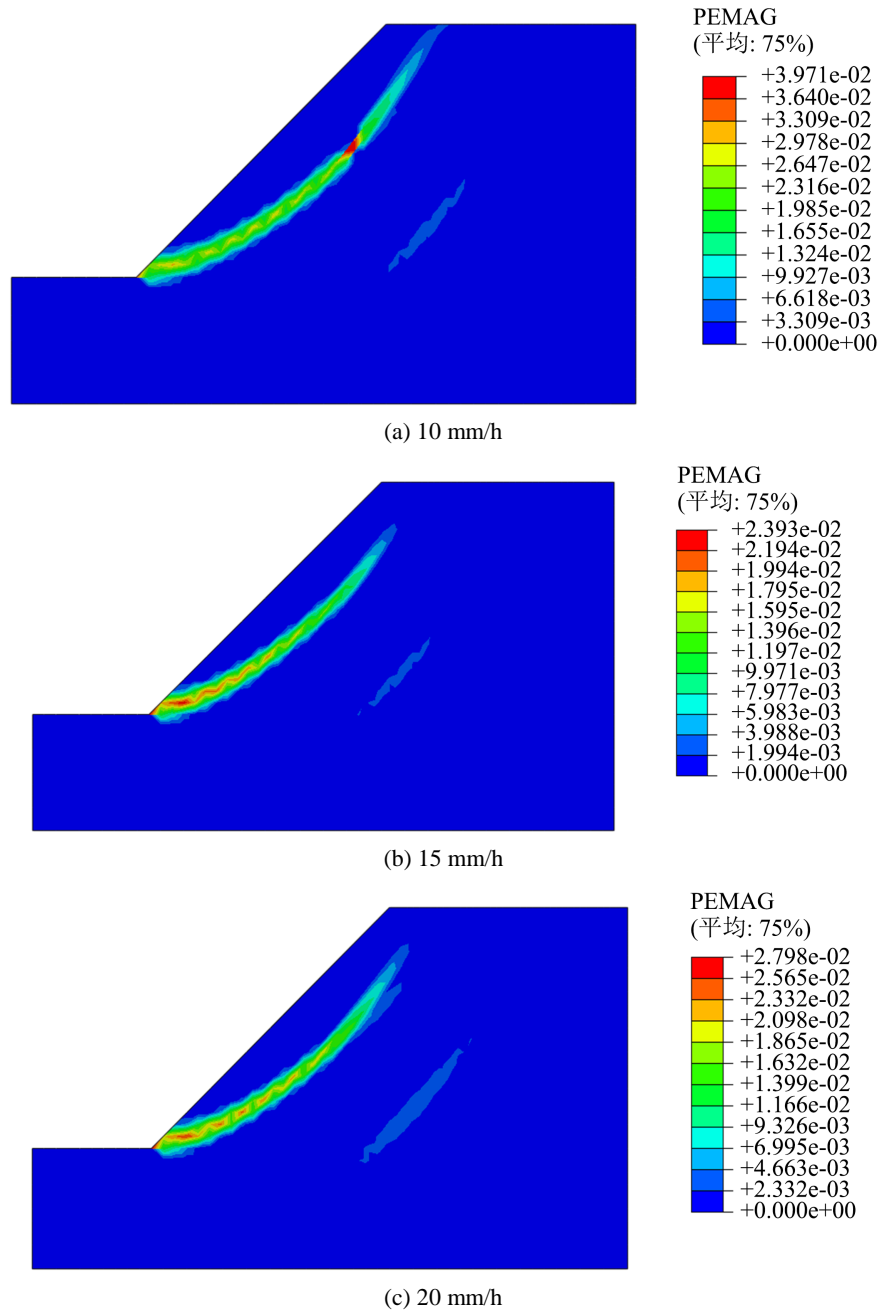


Figure 3. Cloud map of slope equivalent plastic zone for 120 h under different rainfall intensification
图 3. 不同降雨强度下持续 120 h 的边坡等效塑性区云图

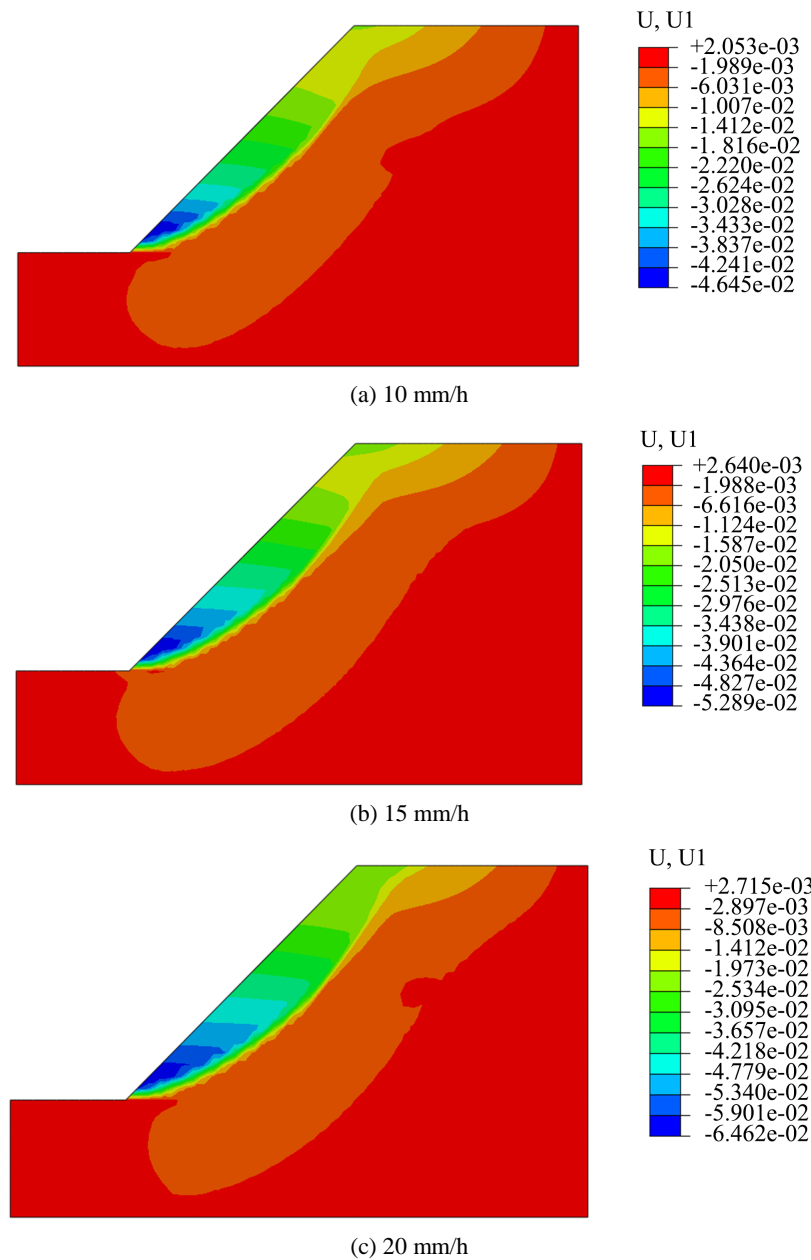


Figure 4. Cloud map of slope horizontal displacement for 120 h under different rainfall intensification
图 4. 不同降雨强度下持续 120 h 的边坡水平位移云图

图 3 分析表明, 边坡等效塑性带的分布范围随降雨强度的变化而不断变化。降雨持续时间为 120 h 时, 等效塑料带的面积随降雨强度的增加而增加。降雨强度为 10 mm/h 时, 最大塑性变形带位于边坡中上部, 最大塑性应变值为 0.04, 坡脚处的塑性应变为 0.023。降雨强度为 15 mm/h 时, 边坡最大塑性应变从边坡中心向坡脚延伸, 最大值为 0.024。降雨强度为 20 mm/h 时, 0.028 是此时边坡的最大塑性应变值。所以坡角处的塑性应变随着降雨强度的增大而增大。

观察图 4 可知, 随着雨强的增大, 坡体的水平变形范围也随之增大。在降雨历时 120 h, 雨强 10 mm/h 的情况下, 斜坡的最大水平位移为 46.45 mm。当雨势增大至每小时 15 mm 和每小时 20 mm 时, 斜坡的最大水平位移分别增大至 52.89 mm 和 64.62 mm, 且位移最大值出现在坡脚附近。

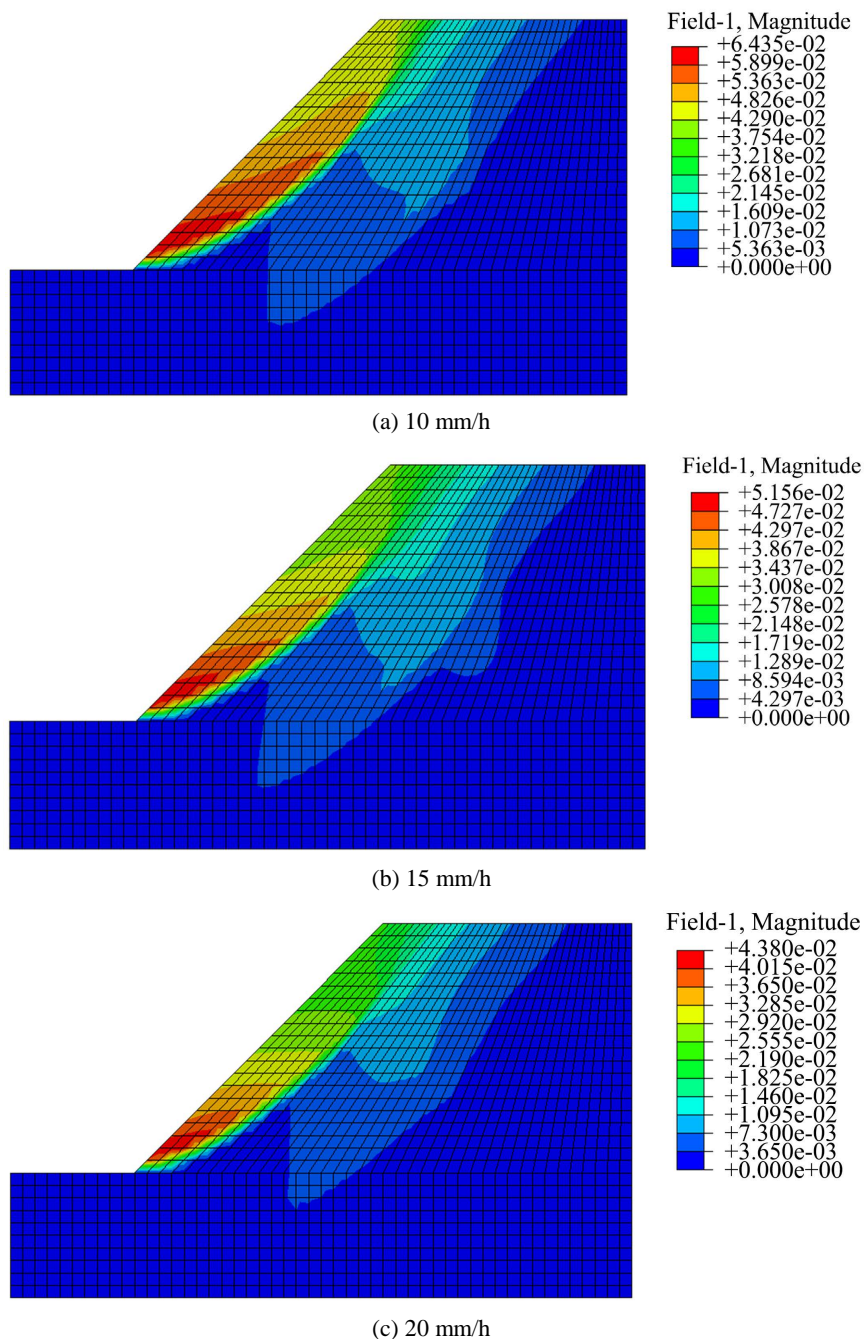


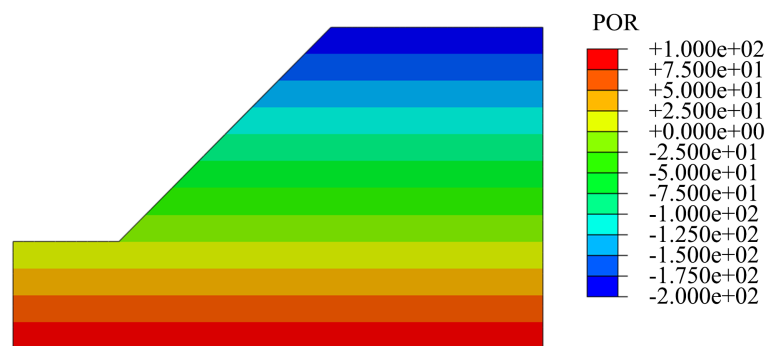
Figure 5. Incremental displacement cloud map for 120 h under different rainfall intensification
图 5. 不同降雨强度下持续 120 h 的增量位移云图

由于斜坡在不同降雨强度下的水平位移变化较小，所以进一步通过塑性应变的分布和水平位移的分布绘制出不同强度下的斜坡增量位移分布来判断边坡滑动面的破坏情况，具体如图 5 所示。雨强 10 mm/h 的情况下，增量位移处于 16 mm 至 64 mm 内时，斜坡发生破坏，破坏面为弧状，此时最大增量位移为 64 mm；雨强 15 mm/h 的情况下，增量位处于 13 mm 至 52 mm 内时，斜坡发生破坏，破坏面为弧状，最大增量位移为 52 mm；雨强 20 mm/h 的情况下，增量位移处于 11 mm 至 44 mm 时，斜坡发生破坏，破坏面为弧状，此时最大增量位移为 0.044。

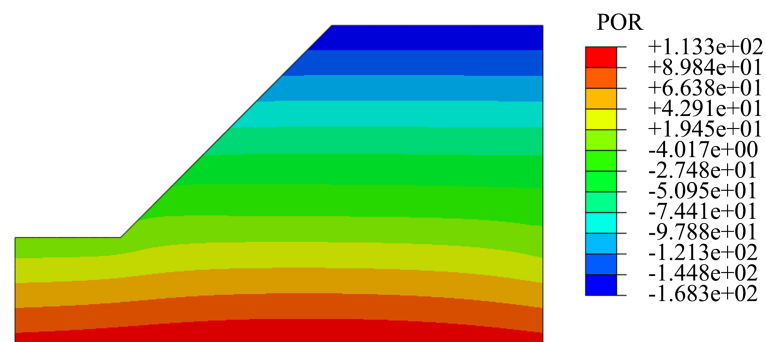
4.2. 不同降雨强度下边坡雨水入渗分析

在降雨入渗过程中, 边坡表面上的负孔隙水压力相对较低, 并向边坡土体内部逐步增大, 当降雨的强度超过边坡入渗量时, 就会在坡降处聚集, 导致边坡坡脚含水率急剧上升, 从而导致坡脚软化。雨水的入渗是由浅到深的过程, 会导致黄土坡表层的饱和度不断升高, 含水量不断增大, 土壤的基质吸力不断下降, 从而导致黄土坡的抗剪强度不断下降, 从而对边坡的稳定性产生不利影响。

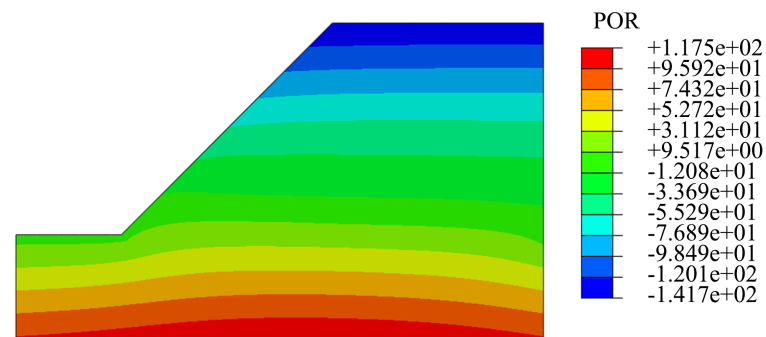
图 6 显示, 随着降雨强度的增加, 斜坡脚下的积水增加, 导致孔隙水压力变化显著。初始状态下, 坡脚处孔隙水压值为 0, 但随着降雨强度为 10 mm/h、15 mm/h 和 20 mm/h, 连续降雨量持续 120 h, 坡脚孔隙水压值分别变为 23.04 kPa、32.36 kPa 和 41.02 kPa。分析表明, 土壤渗透参数为 5.0×10^{-6} m/s, 在强降雨条件下, 当降雨强度超过土壤渗流系数时, 边坡出现瞬态饱和。随着土体达到饱和, 坡脚孔隙水压值保持稳定。这些观测结果提供了对降雨对孔隙水压力影响的见解, 并可以为制定有效的管理策略提供信息, 以减轻降雨引起的边坡破坏的影响。



(a) 初始孔压分布



(b) 10 mm/h



(c) 15 mm/h

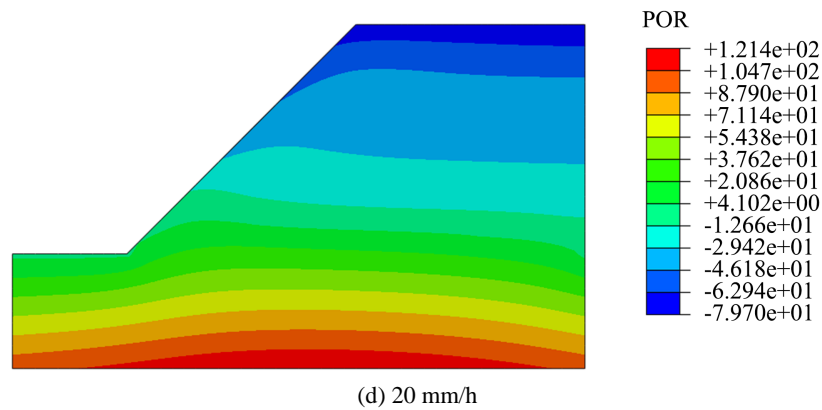
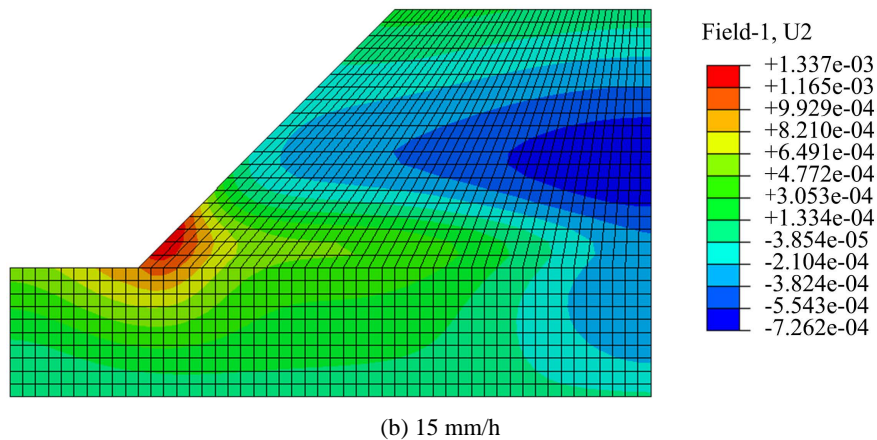
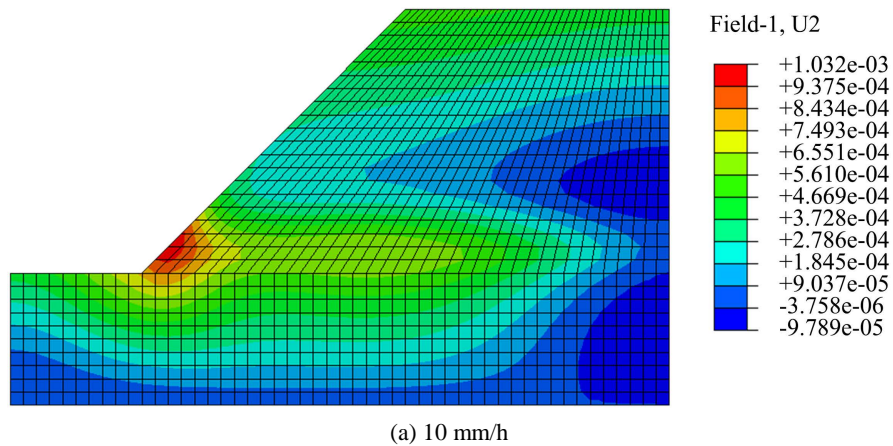


Figure 6. Pore pressure distribution of slope for 120 h under different rainfall intensities
图 6. 不同降雨强度下持续 120 h 的边坡孔压分布图

图 7 显示，当雨水持续地入渗时，斜坡的沉降量出现了变化，坡脚处的沉降量最大，且降雨强度为 10 mm/h、15 mm/h 和 20 mm/h，连续降雨量持续 120 h 时，斜坡的最大沉降量分别为 1.032 mm、1.337 mm 和 1.665 mm。而最大沉降量未发生在斜坡顶部，其原因在于降雨后的吸力下降，即孔内压力上升，使有效应力下降，从而产生了卸荷回弹。同时，在降雨作用下，土壤的水分含量、容重都会增加，且边坡会发生滑移，其稳定性也会随之下降。因此，在一定的降雨时间下，降雨强度越高，边坡产生的沉降量越大，且最大沉降可能在坡角处，所以要在坡角处做好防护措施。



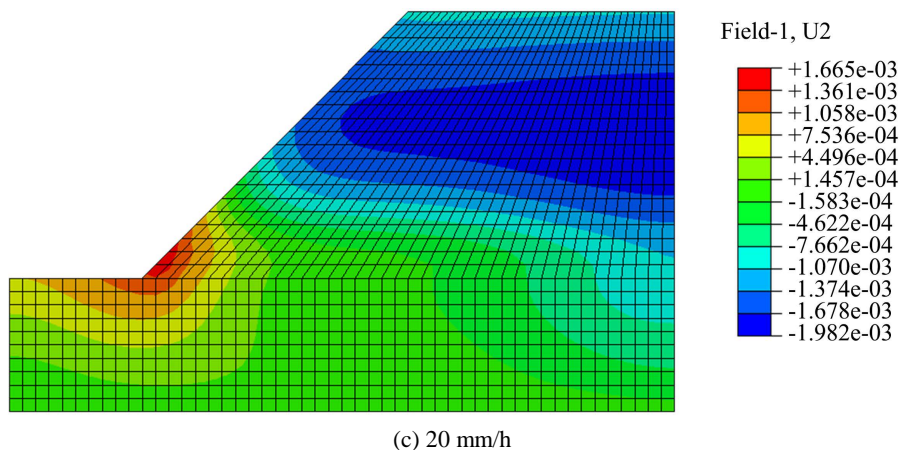


Figure 7. The precipitation distribution lasting 120 h under different rainfall intensities
图 7. 不同降雨强度下持续 120 h 的沉降量分布

4.3. 不同降雨强度与黄土边坡安全系数的关系

通过对图 8 中不同降雨强度下边坡安全系数变化曲线的分析,可以看出,在初始状态下,该边坡安全系数为 1.197,说明边坡此时处于稳定状态。结果表明,雨势越大,坡面土壤的体积含水量越大,坡面土壤的总体剪切承载力越小,边坡稳定性越差。

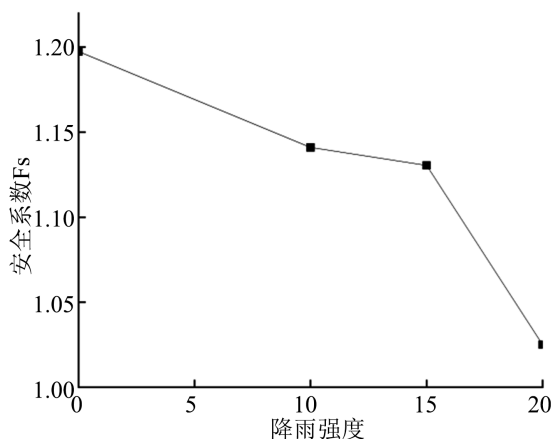


Figure 8. Variation diagram of slope safety factor under different rainfall intensity
图 8. 不同降雨强度下边坡安全系数变化图

黄土边坡的安全系数在三个不同的降雨强度下分别为 1.14102、1.13047、1.025。模拟的结果显示边坡的安全系数在降雨强度变大的时候回有一个缓慢下降的趋势,但是在 15 mm/h 到 20 mm/h 降雨强度变化的范围内,黄土边坡的安全系数下降了 0.105,相较于前几个区间的变化值有一个明显的增加,这说,当雨量达到暴雨及其以上的时候,降雨强度对于黄土边坡的安全系数的影响是很大的,因为当在大到暴雨的降雨条件下,因为坡面的面积一定,这就使得雨水会非常密集的高频率得落在整个坡面上,此时,不仅仅有渗流的作用,还会有很明显不可忽略的雨水的冲刷作用,雨水在高速下落的过程中,重力势能转化成了动能,当雨水接触到坡面的时候,动能也会对坡面做功,加速边坡的失稳破坏,所以在 15 mm/h 到 20 mm/h 强度变化时,边坡的安全系数下降的会比前几个区间来的明显,不同降雨强度下数值模拟的结果与理论值的变化趋势相符合。

5. 结语

1) 在 120 h 降雨条件下, 由于降雨强度的增大, 坡体的等效变形和位移量均有不同程度的增加, 最大变形和位移量分别为 0.04 mm 和 64.62 mm。2) 随着降雨强度的增加, 孔隙水压力的等值线开始向下移动, 在坡脚附近, 由于雨水的存在, 孔隙水压力会逐渐增加, 坡脚附近的最大孔压达到 41.02 kPa。3) 边坡安全系数随着降雨强度的增大而变小; 在最小值安全系数为 1.025 的情况下, 边坡的稳定性已经达到了一个临界值。

参考文献

- [1] 宋亚亚, 何忠意, 朱佩宁, 等. 降雨入渗对非饱和土边坡稳定性影响的参数研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3):72-78.
- [2] 董雪. 降雨入渗对填土高边坡稳定性影响研究[J]. 山西建筑, 2021, 47(15): 83-85.
- [3] 蔡亚飞. 渗流-应力耦合和降雨入渗作用下的边坡稳定性分析及加固措施[D]: [硕士学位论文]. 衡阳: 南华大学, 2019. <https://doi.org/10.27234/d.cnki.gnhuu.2019.000689>
- [4] 李威, 庄建琦, 王颖. 饱和重塑黄土抗剪强度影响因素的试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 626-632.
- [5] 曹辉. 降雨入渗对土质边坡稳定性的影响研究[J]. 江西建材, 2018(10): 53-54.
- [6] 朱婵莲, 姜啸, 焦龙进. 降雨入渗对边坡的稳定性影响研究综述[J]. 华北自然资源, 2021(2): 102-103.
- [7] 江强强, 徐杨青, 王浩, 杨龙伟. 干湿循环对滑带土基质吸力与抗剪强度的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 959-970. <https://doi.org/10.19814/j.jese.2022.09069>