

基于GeoStudio的定海区瑞金医院边坡滑坡机制研究

冯 阳¹, 张晓东¹, 焦德智², 常连远²

¹华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

²浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年3月15日; 录用日期: 2025年4月6日; 发布日期: 2025年4月17日

摘 要

舟山市定海区位于我国东南沿海地区, 雨量充沛, 经常发生强降雨, 在这一过程中部分边坡发生失稳破坏, 为探究瑞金医院边坡破坏机制, 研究采用GeoStudio软件建模分析, 分析降雨、土的抗剪强度参数和覆盖层厚度对边坡稳定性的影响。结果显示: 边坡土体在天然状态下粘聚力 c 和内摩擦角 φ 对于边坡稳定性的贡献度基本一致, 在100 mm/d的降雨持续影响下, 粘聚力降低幅度大于内摩擦角, 由于下覆基岩对上部覆盖层的支撑作用, 使得整体边坡土体在降雨后仍能保持稳定, 而临空面附近土体处于饱和状态, 抗剪强度已降低到无法抵抗其自重应力, 导致失稳破坏。

关键词

降雨入渗, 边坡失稳, GeoStudio, 抗剪强度, 覆盖层厚度

Research on Slope Landslide Mechanism of Ruijin Hospital in Dinghai District Based on GeoStudio

Yang Feng¹, Xiaodong Zhang¹, Dezhi Jiao², Lianyuan Chang²

¹College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²Zhejiang Engineering Survey and Design Institute Group Co., LTD, Hangzhou Zhejiang

Received: Mar. 15th, 2025; accepted: Apr. 6th, 2025; published: Apr. 17th, 2025

Abstract

Dinghai District of Zhoushan City is located in the southeast coastal area of China, with abundant

文章引用: 冯阳, 张晓东, 焦德智, 常连远. 基于 GeoStudio 的定海区瑞金医院边坡滑坡机制研究[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 739-751. DOI: 10.12677/hjce.2025.144080

rainfall and frequent heavy rainfall. In this process, some slopes are destabilized and damaged. In order to explore the failure mechanism of Ruijin Hospital slope, GeoStudio software is used for modeling and analysis, the effects of rainfall, soil shear strength parameters and overburden thickness on slope stability were analyzed. The results show that the contribution of soil cohesion c and internal friction Angle φ to the stability of slope is basically the same, under the continuous influence of 100 mm/d rainfall, the reduction of cohesion is greater than the internal friction Angle. Due to the supporting effect of the underlying bedrock on the upper overlying layer, the overall soil mass of the slope can still maintain stability after rainfall, while the soil near the free surface is in a saturated state, and the shear strength has been reduced to the point that it cannot resist its own weight stress, resulting in instability and failure.

Keywords

Rainfall Infiltration, Slope Instability, GeoStudio, Shear Strength, Overlay Thickness

Copyright © 2025 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

舟山市定海区位于我国东南沿海,属于典型的亚热带海洋性季风气候,降雨频繁,且多为持续性降雨,因此定海区经常发生滑坡或崩塌等自然灾害。

降雨是诱发边坡滑坡的重要原因,由降雨引发的滑坡占滑坡总数的 90% [1]-[3],部分学者针对降雨诱发的滑坡展开研究。顾玉明等[4]利用 GeoStudio 软件,通过设置不同渗透系数比值研究边坡渗流场和稳定性变化情况,结果表明土体的各向异性对边坡稳定性的影响程度小于粘聚力和内摩擦角,大于重度;周亦良等[5]考虑渗流-应力耦合情况下,非饱和土体在不同降雨条件下的稳定性变化规律;李宁等[6]考虑坡面倾斜的影响及非饱和土特性,进行了低强度长时间降雨和高强度短时间降雨两种情况下浅层边坡稳定性计算,得到稳定性系数与降雨强度、历时的变化关系;马世国等[7]认为在降雨入渗作用下湿润锋和基岩面处存在两个危险滑动面,并统一分析,得出强降雨和地下水对浅层边坡的综合影响规律。欧阳琦[8]等利用 GeoStudio 软件的多模块耦合,分析了不同边坡坡度和不同土层厚度在降雨条件下的渗流场和稳定性分析了紫鹊界梯田的失稳机制。刘亮[9]等通过多种极限平衡方法,计算多种组合条件下露天煤矿开采边坡的稳定性系数,评价边坡安全状态并确定最优边坡角。何毅[10]等通过深入研究边坡天然状态下和地震作用下空间裂隙特征与边坡稳定性的关系,揭示含裂隙边坡的破坏形式,为防治此类边坡产生灾害提供技术依据。叶永[11]等分析了三峡库区卧沙溪滑坡机理,研究结果表明库区水位下降对滑坡的影响程度大于降雨。许家臣[12]等研究了强降雨条件下电石渣堆场失稳特性,结果表明在降雨条件下边坡不同位置入渗速率不同,最终位移变化量也不同。

综上分析,目前有关边坡稳定性方面的研究非常成熟且深入,但是还是以边坡整体为研究对象,而实际上在边坡发生滑坡的过程中,通常是边坡的某一部分先出现了张拉裂缝,进而导致整体失稳,可见边坡失稳过程中局部与整体的受力情况并不相同,但是目前很少有涉及到边坡整体与局部的对比性研究。因此,本文基于 GeoStudio 软件结合实际滑坡案例对定海区瑞金医院边坡进行建模分析研究,主要进行边坡整体与局部在降雨情况下稳定性变化情况,以研究边坡破坏机制,为周边相似边坡的加固和防治提供理论帮助。

2. 基本理论

2.1. 饱和和非饱和渗流理论

土体是由固体、液体和气体三相物质组成, 其中, 液体和气体可以在固体颗粒之间的孔隙中流动, 这种流动称为渗流, 一般情况下孔隙之间会同时存在气体和液体, 当液体未完全充满孔隙时, 为非饱和渗流; 相反, 当液体充满孔隙时, 为饱和渗流。

大多数边坡都会存在饱和与非饱和土体, 在降雨过程中, 边坡土体会在入渗作用下由非饱和转为饱和, 在这一过程土体的渗透性会发生变化, 因此在研究降雨过程边坡稳定性时要综合考虑饱和与非饱和渗流。

2.1.1. 饱和渗流基本理论

在通常情况下认为液体是不可压缩的, 则液体在孔隙中的运动方程如式(1)所示:

$$\frac{1}{ng} \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla h - \frac{v}{k} \quad (1)$$

式中: n 为孔隙率(%); v 为孔隙中液体的流速(m/s); h 为总水头(m); k 为饱和渗透系数(m/s); g 为重力加速度(m/s²)。

由于液体在孔隙中的流速较为缓慢, 因此 $\frac{\partial v}{\partial t}$ 一项相对其他项可以不记, 此时式(1)可以改写为式(2)

即 Darcy 定律:

$$v = -k \nabla h \quad (2)$$

流体在孔隙中流动的连续方程如式(3)所示:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

式中: v_x 、 v_y 分别为 x 、 y 方向的流体流速(m/s)。

式(2) (3)联立可以得到饱和稳定渗流状态下的微分方程, 如式(4)所示:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

式中: k_x 、 k_y 分别为 x 、 y 方向上的渗透系数(m/s)。

2.1.2. 非饱和渗流理论

假设液体在非饱和土中的渗流同样符合 Darcy 定律, 同时土体是各向同性的, 即 $k_x = k_y = k$, 且渗流速度不变, 则非饱和土的渗流微分方程如式(5)所示:

$$k \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) = C \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

式中: C 为容水度; t 为时间。

2.2. 极限平衡理论

本研究所用数值模拟软件为 GeoStudio, 其中边坡稳定性分析方法采用极限平衡法, 常用的极限平衡理论有: 瑞典条分法、Bishop 法、简化 Janbu 法、Morgestern-Price 法等。本次研究主要采用 Bishop 法, 其由法国学者 Bishop A.W. 于 1955 年提出, 其基本假设是将滑动土体视为刚体绕圆心转动, 并分条计算

其滑动力与抗滑力，最后求出安全系数，计算时考虑土条之间的相互作用力，因此其求得的安全系数相较瑞典条分法更为科学。其理论公式如式(6)所示：

$$F_s = \frac{\sum [c_i b_i + W_i \tan \varphi_i] / (\cos \alpha_i + \tan \varphi_i \sin \alpha_i / F_s)}{\sum W_i \sin \alpha_i + \sum Q_i \frac{e_i}{R}} \quad (6)$$

式中： b_i 为土条宽度； Q_i 为土条水平方向的力； e_i 为土条水平方向的力到滑动圆心的力臂； φ_i 为土条的内摩擦角； R 为转动圆弧的半径。

3. 工程概况与模型建立

3.1. 工程简介

该斜坡为早期建房切坡形成的岩土复合边坡，大地坐标为：北纬：30°4'7.0"，东经：122°10'8.4"。山体自然斜坡，坡度 25°~35°，第四系覆盖层厚 2~5 m，岩性为含砾砂粉质黏土，其中砾砂含量 20%左右，下覆基岩为下白垩统凝灰岩，凝灰结构，块状构造；斜坡坡脚处人类工程活动较强烈，前期建房切坡形成人工陡坡，坡度一般 60°~70°，坡高一般 3~5 m，人工陡坡居民多自行加固，方案以浆砌块石挡土墙为主。

滑坡点位置属人工岩土复合边坡，坡脚线长约 40 m，高 4~8 m，坡向 50°，坡度 50°~70°，坡顶残坡积层厚 2~5 m，下覆基岩以强中风化为主，少量全风化；坡顶为山体自然斜坡，坡面现状裸露，局部有松散岩土体堆积，坡脚前侧修有高约 2 m 挡墙，挡墙前侧为居民房屋，距离 1.5~2 m，在某次强降雨过程中边坡临空面发生小规模滑坡，经统计本次降雨过程历经 3 天，最大降雨量达到了 132.3 mm/d。

根据前期钻孔成果，结合实际地形绘制边坡分析剖面地层分布图，如图 1 所示。

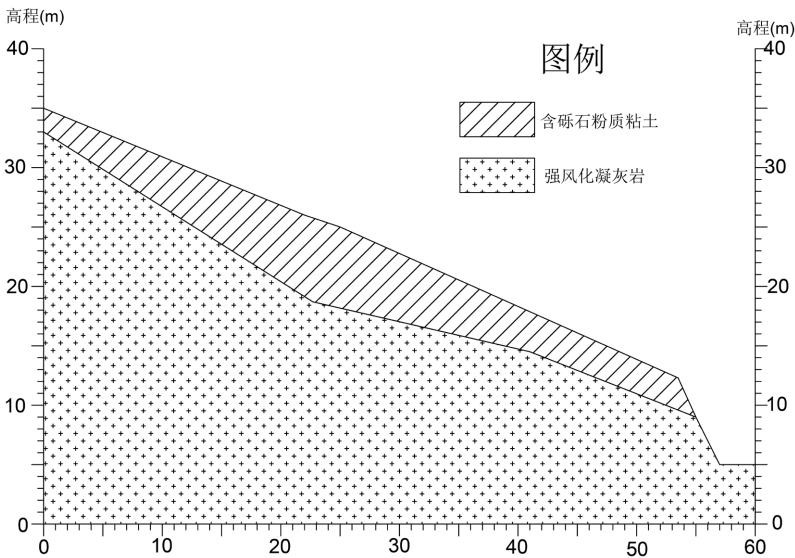


Figure 1. Stratigraphic distribution of analysis section
图 1. 分析剖面地层分布图

3.2. 建立模型

本次研究主要采用 GeoStudio 软件进行建模分析，软件支持二维和三维等边坡模型的建立，本次研究主要使用二维边坡模型，同时，软件含有关于边坡数值模拟的大部分分析模块，本次研究采用其中的

Seep/W 边坡入渗分析模块和 Slope/W 边坡稳定性分析模块，研究边坡稳定性在降雨条件下的影响，进而分析边坡破坏机理。考虑基岩岩性只有少量全风化凝灰岩，因此模型基岩设为强风化凝灰岩据分析剖面地层分布图建立如图 2(a)所示分析模型。

在数值模拟过程中，网格的形状和疏密是影响计算精度的重要因素，网格划分数量少，计算结果不精确，网格太多又会使计算花费大量时间；网格划分主要以四边形和三角形为主，本文以四边形网格为主，三角形网格作为四边形网格在转角处的过度网格。同时，根据模型的大小，为保证计算精度，将网格单元尺寸设置为 0.5 m，共划分节点 5476 个，网格单元 5327 个。网格划分如图 2(b)所示。

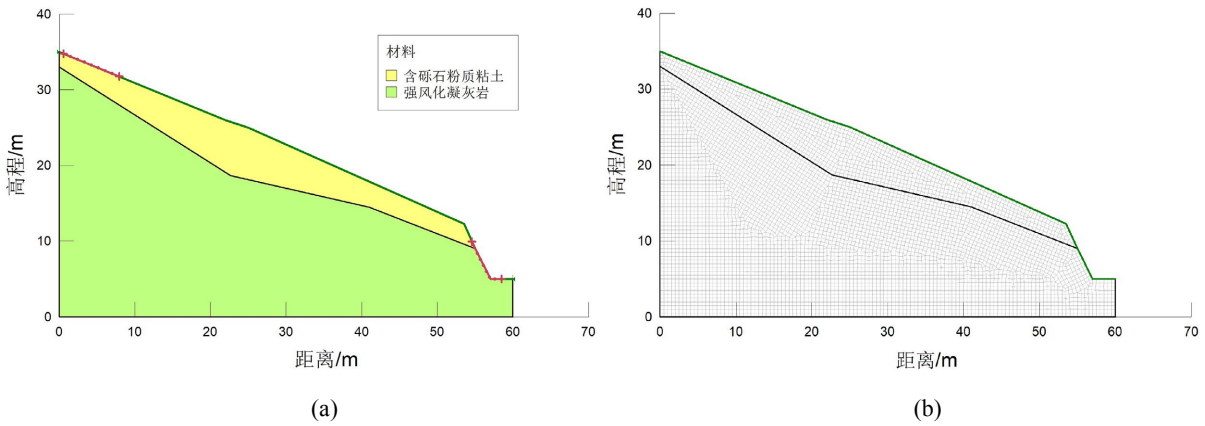


Figure 2. Model establishment. (a) Slope analysis model; (b) model grid division
图 2. 模型建立。(a) 边坡分析模型；(b) 模型网格划分

3.3. 参数设置

在使用 Seep/W 渗流分析模块对降雨入渗过程进行瞬态分析时，需要确定土体的体积含水量函数以及渗透性系数函数(软件中为水力传导率函数)。体积含水量函数通过软件中内置的体积含水量数据点函数进行估计，水力传导率函数使用 Van Genuchten 模型确定，Van Genuchten 模型公式如式 7 所示。

$$\omega = \omega_r + \frac{\omega_s - \omega_r}{\left[1 + (a\varphi)^n\right]^m} \tag{7}$$

式中： ω 为体积含水率(%)； ω_s 为饱和体积含水率(%)； ω_r 为残余体积含水率(%)； φ 为基质吸力(kPa)； a 、 m 、 n 均为拟合参数，其中 $m = 1 - 1/n$ 。

模型中确定含砾石粉质粘土和凝灰岩的上述两个函数的参数如表 1 所示，其中饱和土水含量与残余含水量由室内试验测定。

Table 1. Material function parameters list
表 1. 材料函数参数一览表

	估计方法	样本材料	饱和土水含量	残余含水量
含砾石粉质粘土	样本函数	粉质粘土	0.6	0.05
强风化凝灰岩	样本函数	砾石	0.4	0.02

两种材料的物理力学参数经实验测得，结果如表 2 所示。
根据以上数据及方法得到含砾石粉质粘土和强风化凝灰岩体积含水量函数和渗透性系数函数曲线如

图 3 所示。

Table 2. Physical and mechanical parameters of materials
表 2. 材料物理力学参数

	重度 γ /kN		粘聚力 c /kPa		内摩擦角 φ /°		饱和渗透系数 $k/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
	天然	饱和	天然	饱和	天然	饱和	
含砾石粉质粘土	19.5	23.6	21.5	13.2	13	8.3	1.8×10^{-6}
强风化凝灰岩	24	25	1850	2000	50	46	3.6×10^{-9}

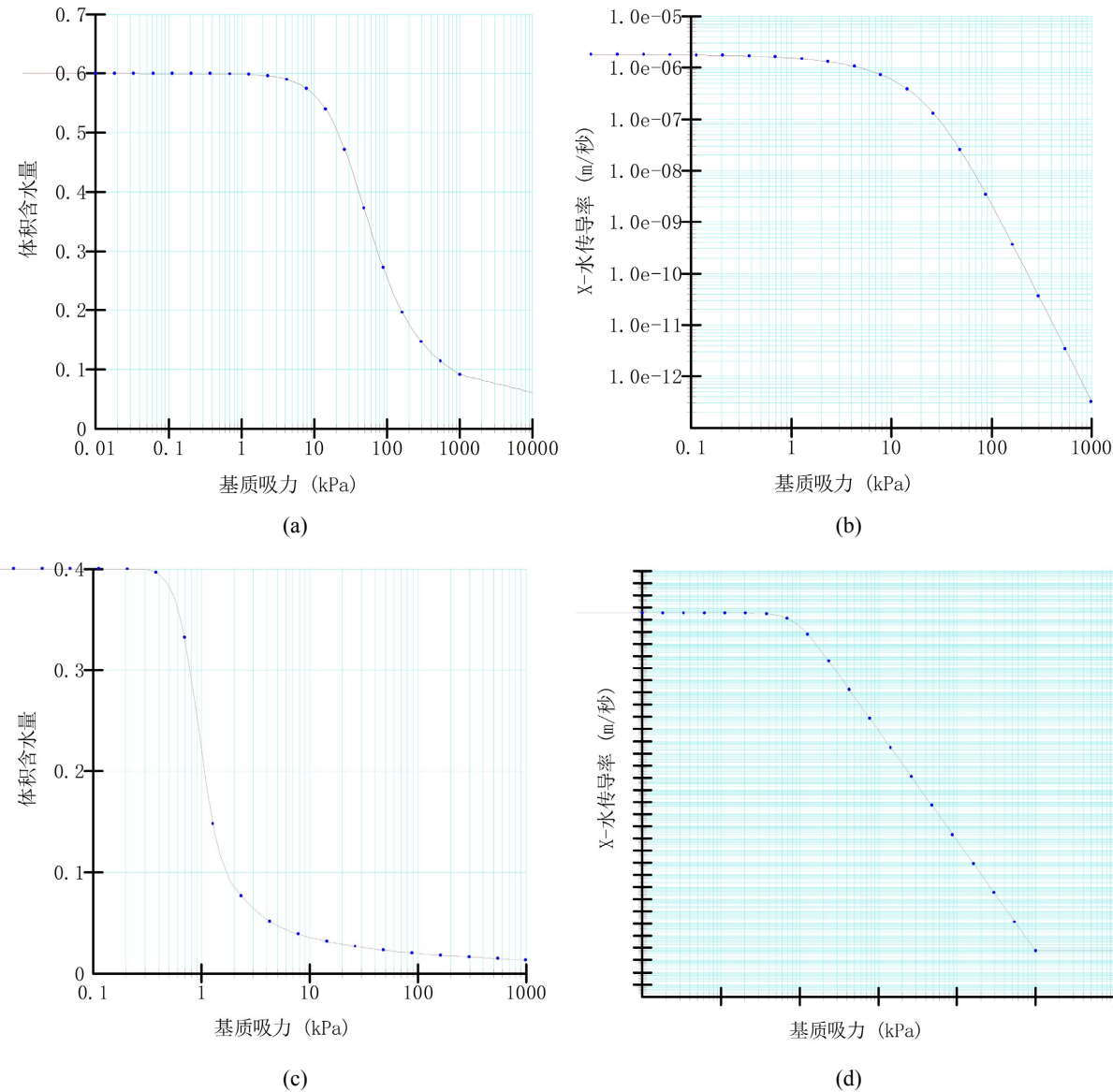


Figure 3. Characteristic curves of soil and water in each layer of slope. (a) Volumetric moisture content function of silty clay containing gravel; (b) permeability coefficient function of silty clay containing gravel; (c) volume water content function of strongly weathered tuff; (d) permeability coefficient function of strongly weathered tuff

图 3. 边坡各层水土特征曲线。(a) 含砾石粉质粘土体积含水量函数；(b) 含砾石粉质粘土渗透系数函数；(c) 强风化凝灰岩体积含水量函数；(d) 强风化凝灰岩渗透系数函数

4. 边坡土体稳定性研究

本章通过 GeoStudio 建立的二维边坡模型，模拟在降雨情况下边坡的入渗过程和边坡稳定系数的变化情况，探究降雨入渗对边坡安全系数的影响，进而研究边坡发生破坏的机理。

4.1. 边坡孔隙水压变化规律

由于本次降雨过程最大降雨量达到了 132.2 mm/d，为使得模拟降雨条件与实际情况保持一致，因此在数值模拟过程中将降雨量设为 100 mm/天，连续降雨三天，模拟结果如图 4 所示。

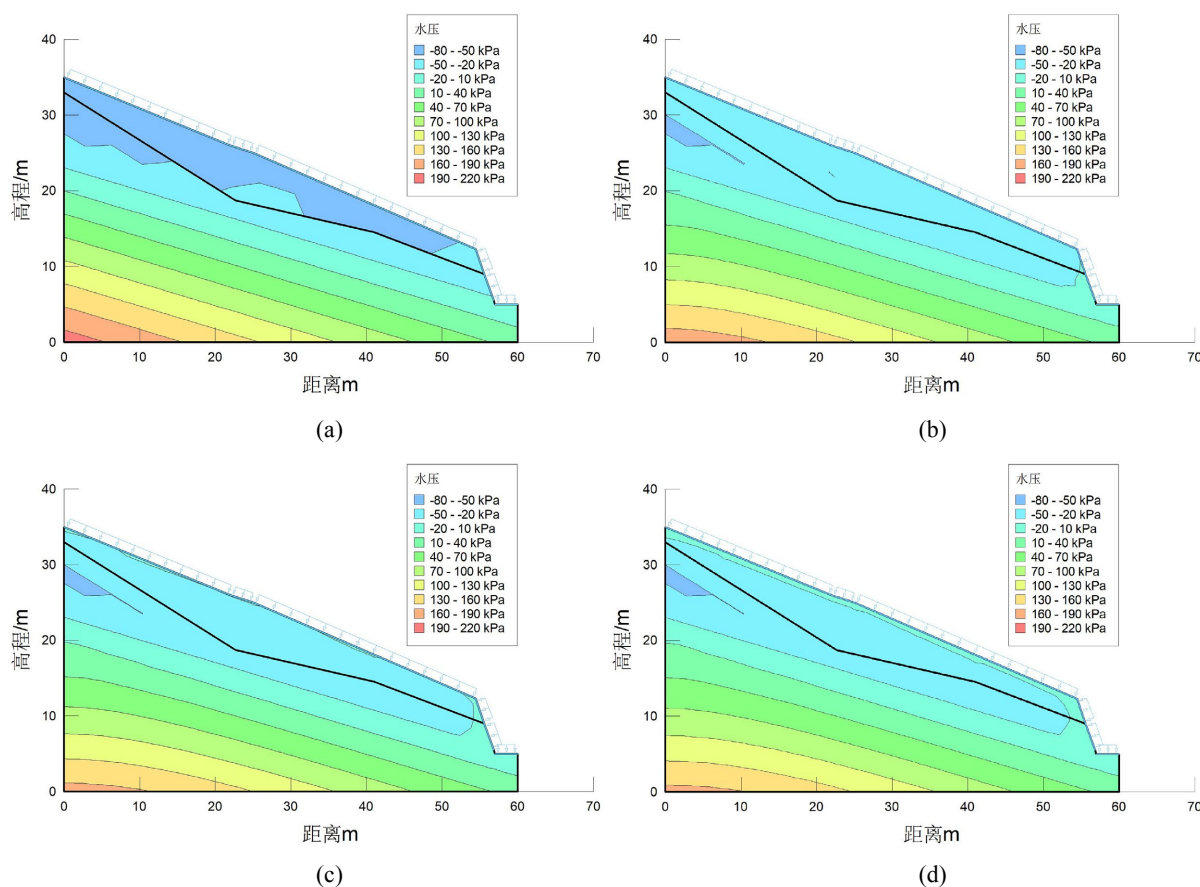


Figure 4. Cloud map of pore water pressure distribution in slope. (a) Natural state; (b) one day of rain; (c) two days of rain; (d) three days of rain

图 4. 边坡孔隙水压分布云图。(a) 天然状态；(b) 降雨一天；(c) 降雨两天；(d) 降雨三天

由上图中可以发现，在第一天降雨过程中，边坡表面的孔隙水压与天然状态相比变化不大，但是在边坡的临空面孔隙水压开始上升，产生这种情况的原因是天然状态下边坡土体未达到饱和，因此渗透速率较低，但是边坡的临空面同时面临着来自边坡上方和前方两个方向的降雨，因此此处的孔隙水压上升速率相较于坡体表面更快。在降雨的第二天和第三天，坡体表面土体的孔隙水压也开始上升，同时，将降雨开始后的三张孔水压分布云图进行对比，可以明显发现第三天孔压上升的速率相比第二天大了很多，这是由于在降雨的第二天开始边坡表面土体饱和度上升，相对应的渗透系数增加，使得第三天的孔隙水压上升速率加快。同时边坡临空面附近土体在降雨开始的第二天就已经饱和，第三天饱和土体范围进一步扩大。

4.2. 边坡稳定系数变化规律

在上一节我们研究了在降雨条件下边坡的入渗情况,随着雨水的持续入渗,边坡土体的稳定性也受到一定影响,开始时采用边坡在天然状态下的抗剪强度参数,得出降雨前后边坡稳定性系数变化如图 5 所示。

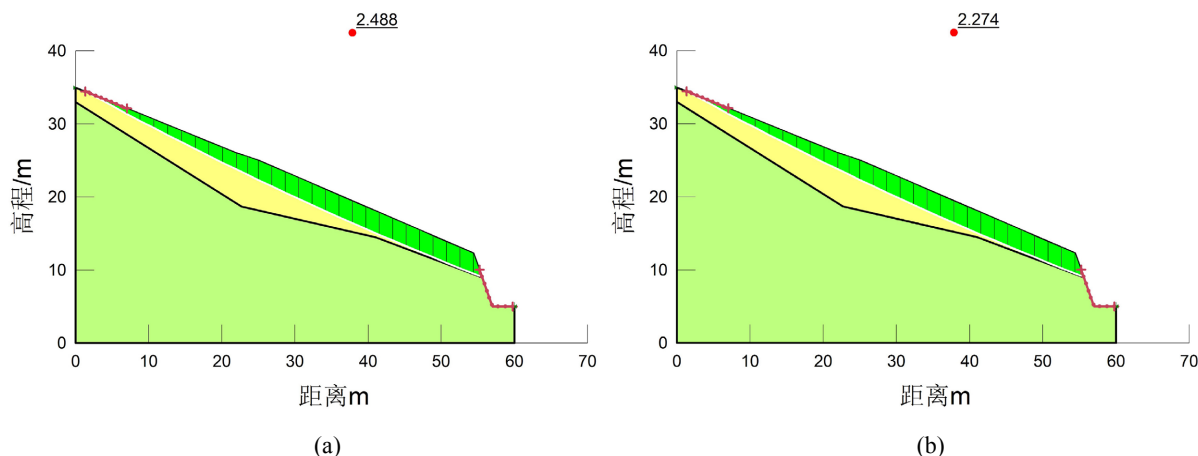


Figure 5. Comparison of stability coefficient of slope before and after rainfall. (a) Natural state stability coefficient; (b) stability coefficient after rainfall

图 5. 边坡降雨前后稳定性系数对比。(a) 天然状态稳定性系数; (b) 降雨后稳定性系数

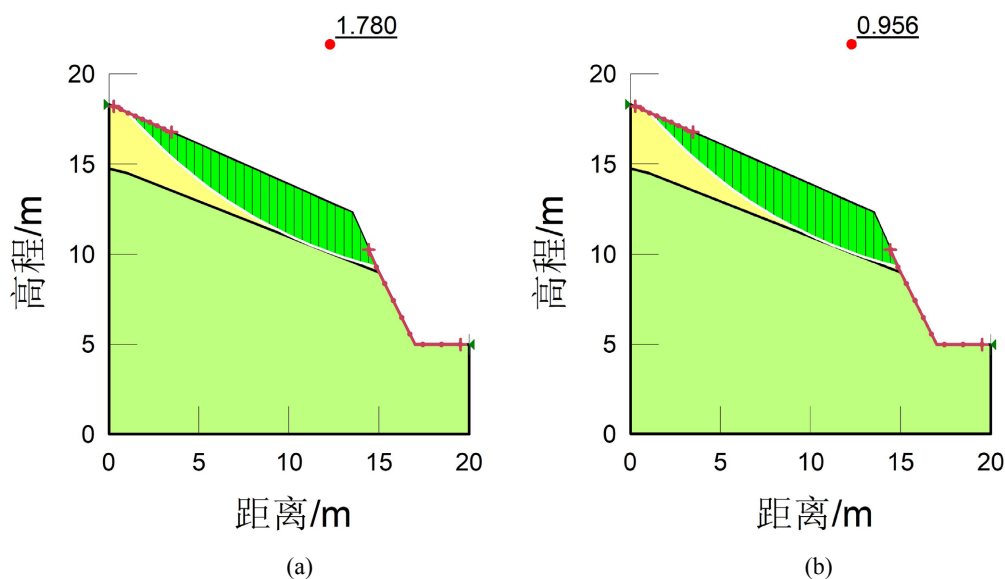


Figure 6. Stability coefficient of local soil of slope. (a) Natural state; (b) saturated state

图 6. 边坡局部土体稳定性系数。(a) 天然状态; (b) 饱和状态

由图中可以看到在天然状态下边坡的稳定性系数为 2.488,降雨后稳定性系数降低到了 2.274,同时可以明显发现滑动面范围与降雨入渗范围基本一致,这表明边坡土体的抗剪强度参数受降雨影响而降低,导致边坡土体稳定性也随之降低。同时由图 4(d)可知在降雨的后期边坡临空面附近的土体已经达到饱和,这时分析边坡的稳定性系数就不再适用天然状态的抗剪强度参数了,因此我们对边坡临空面附近土体进行单独建模,将土体参数分别设置为天然状态和饱和状态,并将其计算结果进行对比,如图 6 所示。由

图中可以看到,在天然状态时边坡临空面附近土体稳定性系数为 1.780,而当土体达到饱和状态稳定系数降低到了 0.956,此时土体发生破坏。

将图 5、图 6 两组计算结果进行对比,不难发现:对于边坡整体来讲,天然状态的稳定性系数最高,即使经历了三天强度较高的降雨,其稳定性系数由 2.488 降低到 2.274,整体降低范围不大;但是对于边坡临空面来讲,在天然状态下其稳定性系数要小于整体边坡,而当经历了三天强度较高的降雨使临空面附近土体达到饱和后,其稳定性系数由 1.780 降低到 0.956,降低幅度远大于整体边坡的降低幅度,导致降雨后期边坡临空面附近土体发生破坏。

4.3. 不同降雨工况下边坡稳定性系数变化

为探究不同降雨工况下边坡稳定性系数变化情况,将降雨条件设置为 50 mm/d、100 mm/d、150 mm/d、200 mm/d 和 250 mm/d,分别进行边坡数值模拟,结果如图 7 所示。

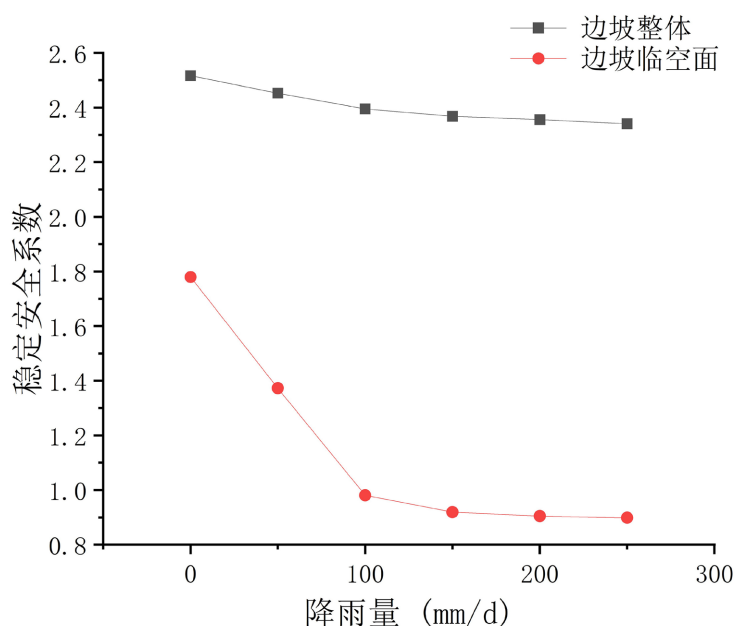


Figure 7. Comparison of stability coefficients between the whole slope and the free surface under different working conditions

图 7. 不同工况下边坡整体与临空面稳定性系数变化对比

由图可以看出,在天然状态下边坡整体与临空面的稳定性系数就存在较大差距,在降雨影响下,这种差距更加巨大,边坡临空面的稳定性系数变化率远大于边坡整体的稳定性系数变化率,这是由于边坡临空面的几何形态与土体结构相对于边坡整体而言更加不稳定,更易受到影响。同时在降雨量较小时边坡稳定性系数变化较大,随着降雨的逐渐增大,边坡稳定性系数逐渐趋于平稳,这是由于边坡在没有其他因素的影响下,其稳定性系数的变化范围是一定的,即降雨开始边坡稳定性开始迅速降低,随着降雨的增加这种变化开始达到边坡稳定性降低的极限状态,在这一状态下降雨对边坡稳定性的影响就变得极为有限了。

4.4. 抗剪强度参数对边坡稳定性的影响

在降雨入渗的过程中始终影响着边坡的抗剪强度参数,而抗剪强度参数又直接影响边坡的稳定性,同时,不同的边坡对于抗剪强度参数的敏感度不同,本次研究的边坡也需探讨这个过程。具体操作是分

别改变边坡天然状态下 c 和 φ 的抗剪强度取值, 计算每种取值下边坡稳定性系数的变化情况, 并分别计算在其变化率, 计算变化率的公式如式(7)和(8)所示。

在 c 不变时改变 φ 值, 边坡稳定性系数平均变化率为 k_1 :

$$k_1 = \frac{\sum \Delta t}{\Delta \varphi} \tag{7}$$

同理, 在 φ 不变时改变 c 值, 此时边坡稳定性系数平均变化率为 k_2 :

$$k_2 = \frac{\sum \Delta t}{\Delta c} \tag{8}$$

式中: Δt 为稳定性系数改变量; $\Delta \varphi$ 、 Δc 分别为对应抗剪强度参数改变量。

由于边坡下覆基岩强度远高于上部覆盖层, 因此在改变抗剪强度的过程中只改变上部覆盖层的抗剪强度参数, 抗剪强度参数取值范围及取值方式如表 3 所示, 计算结果如表 4 所示。

Table 3. Range and mode of shear strength parameters

表 3. 抗剪强度参数取值范围及方式

参数类型	取值范围	取值方式
c	13~21 kPa	间隔 1 kPa
φ	8°~13°	间隔 1°

Table 4. Stability coefficients of slope with different values

表 4. 不同取值边坡稳定性系数

$\varphi \backslash c$	21	20	19	18	17	16	15	14	13
13	2.456	2.385	2.315	2.244	2.173	2.102	2.031	1.960	1.889
12	2.380	2.309	2.238	2.167	2.096	2.025	1.954	1.883	1.812
11	2.304	2.233	2.162	2.091	2.020	1.949	1.878	1.807	1.736
10	2.228	2.157	2.086	2.015	1.944	1.873	1.802	1.731	1.660
9	2.153	2.082	2.011	1.940	1.869	1.798	1.727	1.656	1.585
8	2.087	2.088	1.937	1.866	1.795	1.724	1.653	1.582	1.511

根据式 7 计算在 c 值不变的情况下改变 φ 值, 计算得到 $k_1=0.074$; 同理 $k_2=0.071$, 表明在变化相同 c 或 φ 值时对于边坡稳定性的影响几乎一致, 可以认为边坡土体抗剪强度参数对于边坡稳定性的贡献度一致, 另一方面, 在边坡土体由天然状态转变为饱和状态时, 粘聚力由 21.5 kPa 降低到了 13.2 kPa, 降低了 8.3 kPa, 而内摩擦角由 13°降低到 8.3°, 降低 4.7°, 这表明边坡土体的粘聚力更易受到降雨影响。

4.5. 覆盖层厚度对边坡稳定性的影响

为研究边坡覆盖层厚度对边坡稳定性的影响, 增加上部粘土层厚度, 减小下覆基岩厚度, 其他条件均不变, 然后再对其进行稳定性分析, 分析结果如图 8 所示。

由图中可以看出, 覆盖层厚度对于边坡的稳定性具有重要影响, 覆盖层较薄时, 边坡稳定性系数为 2.488, 降雨后稳定性系数降低到 2.274, 此时边坡稳定性很好; 当覆盖层厚度增加到 5 m 后, 天然状态下

边坡的稳定性系数为 1.432, 降雨后稳定性系数为 1.387; 此时边坡仍然较为稳定; 当覆盖层厚度继续增加到 10 m 左右时, 天然状态下边坡稳定性系数为 1.029, 降雨后稳定性系数为 1.020, 此时边坡处于欠稳定状态, 因此边坡的覆盖层厚度对于边坡的稳定性也具有重要影响。

同时注意到, 在边坡覆盖层厚度较小时, 降雨对边坡稳定性系数的影响更明显, 随着覆盖层厚度的增加, 这种影响逐渐减小, 这是因为在覆盖层厚度较小时, 降雨入渗区域相对较薄的覆盖层来说已经很大, 降雨对边坡稳定性影响就比较明显; 相对地, 当覆盖层厚度增加时, 降雨入渗影响的区域相对较厚的覆盖层来讲并不大, 因此降雨对覆盖层较厚的边坡影响并不大。

5. 结论

在本次研究中根据实际滑坡案例及边坡数据建立边坡分析模型, 并从降雨入渗、抗剪强度参数和覆盖层厚度三个方面研究边坡稳定性系数的变化情况, 分析边坡发生破坏机理, 结论如下:

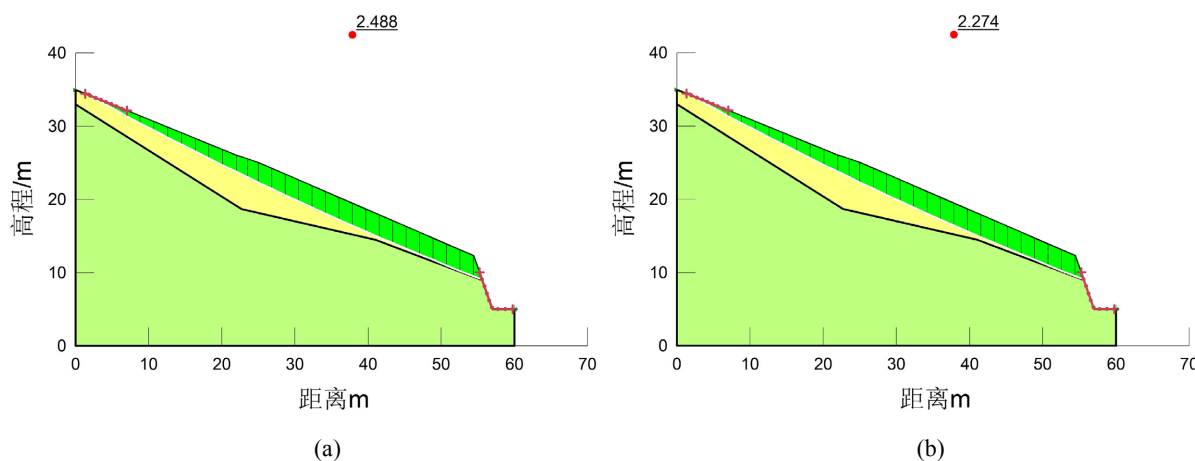
(1) 在三天 100 mm/d 的降雨强度下, 边坡土体在前期未达到饱和, 渗透系数较低, 因此在降雨前期雨水入渗速率较慢; 随着降雨的持续发展, 边坡表层土体逐渐达到饱和, 雨水入渗速率加快, 而在边坡临空面附近, 由于受到了两个方向的降雨, 附近土体先于坡体表面达到饱和, 饱和后土体强度迅速降低, 导致临空面附近发生小规模滑坡。

(2) 在不同降雨工况下, 边坡整体稳定性系数变化较为稳定, 降雨开始时稳定性系数变化稍快, 随着降雨量的增大逐渐趋于稳定; 边坡临空面的稳定性系数变化非常迅速, 随着降雨量的增加也趋于稳定, 此时边坡发生破坏, 稳定性系数变化范围就变得极为有限。

(3) 利用控制变量法分别改变 c 和 φ 的值, 分析抗剪强度参数对边坡稳定性的影响, 结果显示在变化相同范围的 c 或 φ 的值时, 边坡的稳定性系数变化率几乎一致, 表明 c 和 φ 对边坡稳定性的影响程度基本想同, 但是 c 对于降雨更加敏感, 在降雨过程中 c 的变化率大于 φ 的变化率, 表现为边坡的稳定性是受参数 c 的控制。

(4) 通过改变覆盖层厚度, 发现在覆盖层厚度较小时, 降雨对边坡稳定性的影响更严重, 随着覆盖层厚度增加, 降雨对边坡的稳定性影响降低, 同时, 越厚的覆盖层其在天然状态下的稳定性越低。

据以上结论推断, 由于边坡覆盖层厚度较小, 其稳定性易受到降雨影响, 下覆基岩对于厚度较薄的覆盖层有更好的支撑作用, 同时粘聚力在降雨的影响下降低得更快, 因此, 在降雨入渗作用下, 边坡粘聚力迅速降低, 临空面附近土体达到饱和, 但是由于基岩的良好支撑作用以及覆盖层大部分土体未达到饱和, 因此才会出现边坡整体稳定, 只有临空面发生破坏的现象。



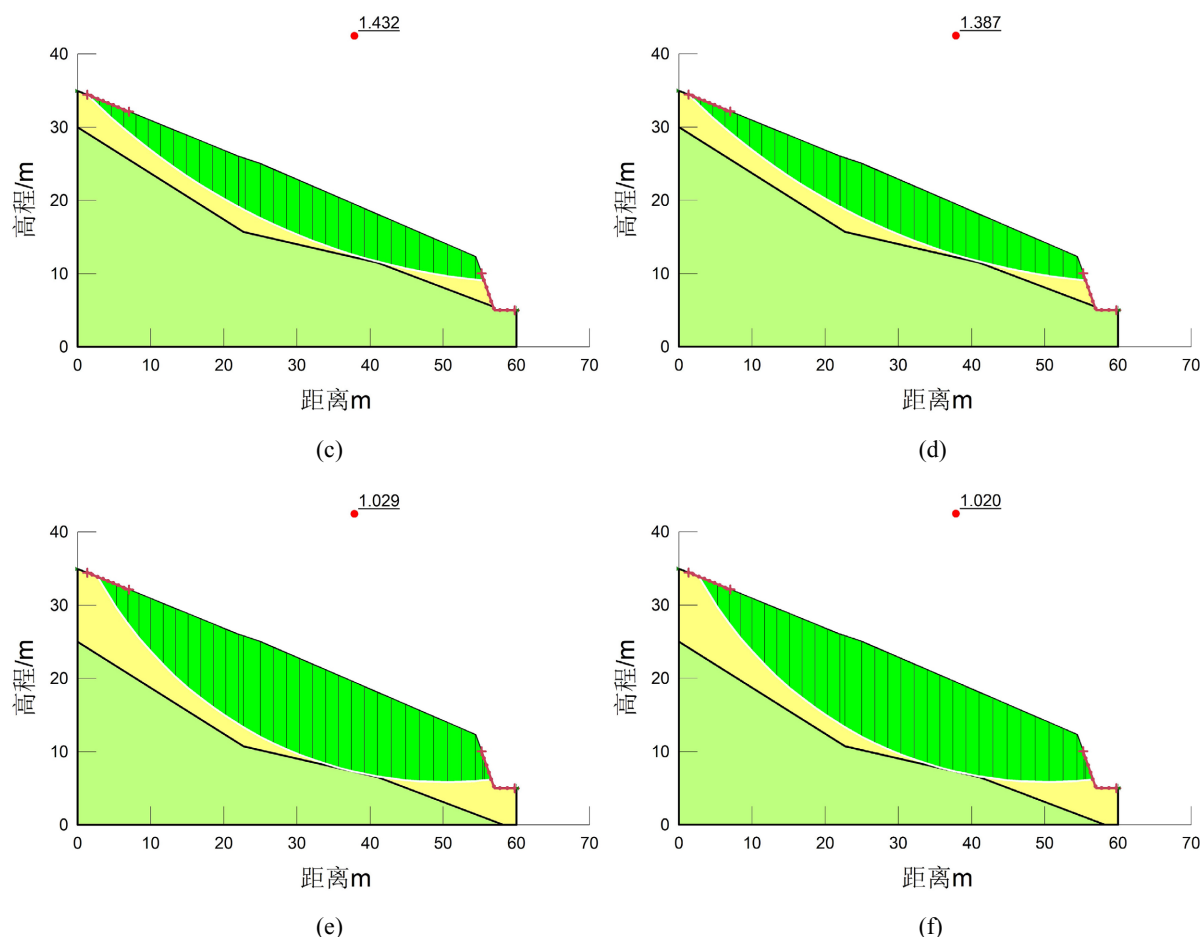


Figure 8. Variation of slope stability coefficient under different thickness of bedrock. (a) Natural state; (b) after the rain; (c) increase the natural state by 5 m; (d) after an additional 5 m of rainfall; (e) increase the natural state by 10 m; (f) increase the natural state by 10 m

图 8. 不同厚度基岩下边坡稳定性系数变化。(a) 天然状态; (b) 降雨后; (c) 增加 5 m 天然状态; (d) 增加 5 m 降雨后; (e) 增加 10 m 天然状态; (f) 增加 10 m 降雨后

参考文献

- [1] 蔡欣育, 任旭华, 张继勋, 等. 不同降雨类型对边坡稳定性影响的研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(2): 34-39.
- [2] 邱胜光. 降雨入渗对非饱和土体边坡稳定性影响及治理对策[J]. 金属矿山, 2019(11): 62-67.
- [3] 叶帅华, 时铁磊. 降雨入渗条件下多级黄土高边坡稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1648-1656.
- [4] 顾玉明, 袁云星, 李希琨. 降雨条件下土体各向异性渗透对边坡稳定性的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(S1): 43-49.
- [5] 周亦良, 贺其, 李明, 等. 考虑渗流-应力耦合的不同降雨条件下非饱和土边坡稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(8): 57-63.
- [6] 李宁, 许建聪, 钦亚洲. 降雨诱发浅层滑坡稳定性的计算模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1485-1490.
- [7] 马世国, 韩同春, 徐日庆. 强降雨和初始地下水对浅层边坡稳定的综合影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(3): 803-810.
- [8] 欧阳琦, 陈欣, 危润初, 等. 紫鹊界梯田失稳机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(2): 581-591.
- [9] 刘亮, 徐森民, 王迪, 等. 基于最优边坡角的露天矿山边坡稳定性分析与安全评价研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(S2): 98-104.

-
- [10] 何毅, 王文法, 余军炎, 等. 土质边坡三维裂隙空间特征及对稳定性影响分析[J]. 铁道学报, 2024, 46(12): 135-145.
 - [11] 叶永, 毛旭巍, 谢旋. 三峡库区卧沙溪滑坡变形机理及稳定性的研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2024, 46(5): 25-32.
 - [12] 许家臣, 夏雨, 宋浩然, 等. 强降雨条件下电石渣堆场失稳特性研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(4): 1675-1682.