

降雨诱发浅层黄土滑坡变形破坏机制

孙萍萍¹, 张茂省², 江睿君^{1,3}, 贾俊¹, 刘峰^{1,3}, 刘蒙蒙¹

SUN Pingping¹, ZHANG Maosheng², JIANG Ruijun^{1,3}, JIA Jun¹, LIU Feng^{1,3}, LIU Mengmeng¹

1. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室/中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

2. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049;

3. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054

1. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, Ministry of Natural Resources/Xi'an Centre, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

3. Department of Geological Engineering, Changan University, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:由降雨引发的浅层黄土滑坡灾害具有致灾性强、范围广、影响面积大等特点,是黄土高原地区危害严重的地质灾害类型。经典算法采用安全系数描述坡体稳定性,难以对坡体变形破坏的起始位置和实际失效面加以识别,限制了滑坡变形过程的描述和滑坡有效预测。以非饱和土吸应力理论为指导,基于Hydrus中的Slope Cube模块,建立黄土斜坡水-力耦合模型,结合黄土地区易滑坡形态统计数据,针对凸型、凹型、直线型3种坡型与30°、40°、50°三种坡度组合,计算了不同降雨条件下的坡体稳定性响应。结果表明,不同坡型的黄土斜坡对降雨条件具有明显的响应。相同降雨量、相同坡度条件下直线型坡发生浅表层破坏的可能性最低,凹型坡次之、凸型坡的稳定性最差。与之相对应的,相同条件下凸型坡失稳时间最短、凹型坡次之、直线型坡最长。本研究可为浅层滑坡的早期识别和预报提供支撑。

关键词:黄土;降雨;浅层滑坡;破坏机制

中图分类号:P642.13⁺1;P642.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)10-1617-09

Sun P P, Zhang M S, Jiang R J, Jia J, Liu F, Liu M M. Deformation and failure mechanism of rainfall-induced shallow loess landslide. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(10): 1617-1625

Abstract: The shallow loess landslides, triggered by precipitation has the characteristics of serious catastrophability, wide range of influence and large impact area, is one of the serious disaster in the Loess Plateau. It is difficult to identify the initial failure position and actual failure surface with the classical analysis method by using one safety factor to describe the slope stability, which limits the description of the failure process of slopes and consequently influence the effective prediction of landslides. Guided by the theory of unsaturated soil matric suction, the water-stress coupling model of loess slope was established based on the Slope Cube module with the Hydrus software. According to the statistics of slide-prone morphology of loess slopes, the slope stability response to rainfall conditions was calculated under different combinations of convex, concave and linear, and the three slope gradients of 30°, 40° and 50°. The results show that different loess slopes have obvious responses to precipitation, and its influence is controlled by the slope types. Under the condition of the same rainfall and the same slope, the possibility of superficial surface damage occurs on the linear slope is the lowest, followed by the concave slope and the convex slope. Correspondingly, the time consuming of instability is the shortest for convex slopes, the second for the concave slopes, and the longest for the linear slopes under the same conditions. This study can provide support for early identification and prediction of shallow loess landslides.

Key words: loess; precipitation; shallow landslides; failure mechanism

收稿日期:2020-05-06;修订日期:2021-06-15

资助项目:国家重点研发计划《重大自然灾害监测预警与防范》(编号:2018YFC1504700)、国家自然科学基金项目《黄土水敏性理学机制及致滑机理》(批准号:41530640)、中国地质调查局项目《延安革命老区综合地质调查》(编号:DD20189270)、《黄河中游生态地质调查》(编号:DD20211398)

作者简介:孙萍萍(1983-),女,博士,高级工程师,从事黄土地质灾害研究。E-mail:sunpingping203@gmail.com

黄土具有强烈的水敏性,水是黄土滑坡最积极的诱发因素。由于黄土的降雨入渗系数和渗透系数均较低,一次或几次降雨事件在黄土斜坡中引起的水分入渗深度有限,由降雨引发的多为浅层黄土滑坡,而深层的水致黄土滑坡多为地表水长期、间歇性入渗(如灌溉或管道渗漏等)导致的地下水位升高所致^[1]。降雨引发的浅层黄土滑坡通常具有致灾性强、范围广、影响面积大等特点。2013年7月,中国西部普降暴雨,黄土高原地区爆发了大量的浅层黄土滑坡、坡面泥石流等地质灾害。据当地气象部门和国土部门发布的数据,2013年7月1~26日,陕西延安市累计降水量超出常年全年降水量的一倍,引发黄土崩滑流灾害7594起,造成42人死亡,133人受伤,154万人次受灾,紧急转移安置群众78万人,累计经济损失达66.15亿元;几乎同时,甘肃天水市强降雨引发崩滑流灾害548起,造成24人遇难,1人失踪,122.26万人次受灾,紧急转移安置群众3万人,造成直接经济损失82.75亿元。将斜坡水分入渗过程与坡体稳定性相联系,国内外学者均开展了大量研究^[2-5]。有学者提出,水分入渗导致地下水位上升、岩土体工程地质性质弱化,造成斜坡失稳^[6-7];也有学者提出,水分入渗引起坡体内孔隙水压力升高,软弱面附近土体有效应力和抗剪强度降低,进而导致滑坡^[8-9]。受黄土地表入渗系数小的限制,降水、灌溉等地表水均匀入渗导致的黄土斜坡内含水率升高的深度有限,大部分水致黄土滑坡发生后,滑体和滑带只有部分饱和,从非饱和土力学角度研究降雨诱发的浅层黄土滑坡力学机制成为有效的工具。

传统斜坡稳定性分析的极限平衡法假设所有的点沿着一个预先定义的滑动面同时达到极限平衡状态,即用一个安全系数对斜坡整体稳定性进行评价。然而,实际上,沿潜在滑动面的各点很少同时破坏,根据控制斜坡受力历史的地质和地貌因素,斜坡某些部位首先开始破坏,然后扩展^[10],表现为渐进破坏的过程。在边坡稳定性分析中,经典算法通常难以对坡体变形破坏的起始位置和实际失效面加以识别,在描述斜坡破坏过程中也存在诸多困难。

本文采用Hydrus中的Slope Cube模块,构建渗流-应力耦合的斜坡稳定性分析模型。根据Lu等^[11]提出的局部安全系数算法,计算和分析了不同坡体形态的黄土斜坡含水率、吸应力和局部安全系数二维分布及随时间的响应,计算了不同坡度的凸

形、凹形、直线形斜坡随降雨条件的响应时间,分析了斜坡变形破坏过程与破坏机制。与经典计算方法相比,局部安全系数计算方法能够更好地反映斜坡变形破坏的起始位置和变形破坏过程。

1 研究区背景

黄土高原是中国三大地质灾害最严重的地区之一,据统计,中国每年约有30%的地质灾害发生在占国土面积不到6%的黄土高原地区,且集中多发于每年6~10月的雨季^[14]。黄土斜坡的坡形、坡度和坡高是斜坡形变破坏的控制因素,凸形、直线形、阶梯形和凹形是黄土斜坡的4种基本类型,且斜坡变形多发生于 30° ~ 60° 的斜坡中^①。

延安市位于黄土高原的丘陵沟壑区,是降雨诱发黄土滑坡的多发区,年平均降水总量507.7 mm,最大年降水量921.0 mm(2013年),最小330.0 mm(1974年),日最大降水量143.7 mm(2013年)。区内年降水量分配不均,6~10月降水约占全年降水的70%。2013年7月3~31日,延安遭遇特大暴雨,累计降雨量与全年雨量相当,其降雨强度、暴雨日和持续时间均为1945年有气象记录以来之最。月累计最大降雨量589.9 mm,宝塔区日降雨量超过25 mm的大雨日数多达8次,超过50 mm的暴雨日数达6次^[15]。

2 模型构建

Hydrus中的Slope Cube模块的斜坡稳定性分析模型包括水动力分析和斜坡应力与稳定性分析两部分(图1)。水动力分析中,基于理查德方程求解水分入渗下的水动力场。斜坡应力与稳定性分析中,基于应力-应变平衡方程计算斜坡总应力场;引入吸应力参数^[11],求解水分入渗下的有效应力场。最后,基于局部安全场理论(Local Safety Factor,以下简称LSF),计算基于剖分单元的斜坡安全系数场分布。局部安全系数法(LFS)由Lu等^[12]提出,定义为单元当前的剪应力与破坏时的Mohr-Coulomb抗剪强度比值(图2)。在黄土斜坡稳定性分析的基础上,识别安全系数小于1的连续面,即斜坡变形破坏面。与传统的计算方法相比,该方法确定的初始破坏区域沿整个等值线均满足极限平衡,体现了滑动面形成和发展的渐进破坏过程^[13]。

2.1 概念模型

本次计算选取直线形坡、凹形坡和凸形坡3种

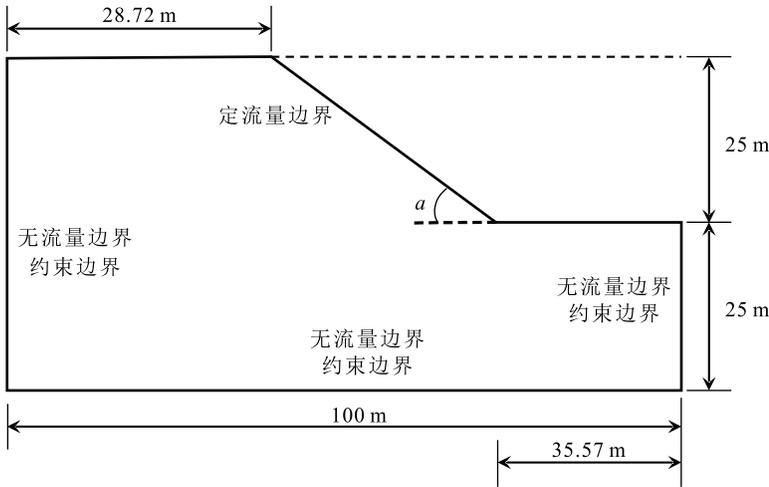


图3 斜坡几何模型与边界条件

Fig. 3 Geometric model of slope and boundary conditions

表1 模型主要参数取值

Table 1 Main parameters selected for modeling

参数	量纲	参数取值
饱和含水量(θ_s)	-	0.4
残余含水量(θ_r)	-	0.078
饱和渗透系数(K_s)	m/h	0.00104
进气值参数(α)	1/m	3.6
有效粘聚力(c)	kPa	45.0
摩擦系数(Φ)	°	28.5
重度(G_s)	-	2.60
空间参数(n)	-	1.56
干密度(ρ_d)	g/cm ³	1.43
液性指数(w_L)	%	28.8
塑性指数(w_p)	%	9.5

Hydrus 2D-Slope Stability Cube 渗流分析结果,将模型含水量、孔隙水压力分布结果导入 Hydrus 2D-Slope Stability Classic 模块,获取不同降雨特征条件下斜坡稳定性随时间变化的曲线,进一步对不同降雨条件对斜坡稳定性的影响进行探讨。

3.1 直线形黄土斜坡

3.1.1 降雨时长对斜坡稳定性的影响

图4为持续降雨条件下不同时刻直线形坡体含水量分布情况。计算前,坡体为天然含水量,随着降雨时间的增长,坡体内湿润锋从坡表逐渐向下发展,并变得更加扩散,在斜坡浅表层附近形成一个近似饱和的区域。降雨5~15 h,水分入渗深度从0.3 m增加至1.2 m,坡脚位置降雨入渗深度略大于斜坡其他部位;含水量分布随深度呈近线性变化,坡表处含水量最大,最大值接近饱和含水量0.4,最小值约为0.1;图5为持续降雨条件下不同时刻直线形坡吸力的分布情况。总体看,斜坡吸应力的分布及变化与含水量类似。降雨初始阶段,斜坡浅表层吸应力由-85.0 kPa逐步减小为-35.0 kPa,随着降雨时间的增长,吸应力进一步降低至0 kPa,并逐步由负的吸力值转化为正的孔隙水压力;降雨10 h斜坡坡表形成厚度约0.7 m的正孔隙水压力区,降雨15 h孔隙水压力区的作用深度增加至约1.2 m处,孔隙水压力的平均值基本在50 kPa左右,该区域范围由于孔隙水压力的作用,有效应力减小,土体易产生变形破坏。

图6为斜坡局部安全系数场随降雨历时的响应。降雨开始前,斜坡坡面各点局部安全稳定性系数均大于1.0,斜坡整体处于稳定状态,但由于坡脚处应力集中,使得坡脚位置的局部安全系数较斜坡其他位置处局部安全系数偏小。随着降雨过程的发展,斜坡浅层产生局部安全系数小于1的不稳定区域,与吸应力变化区域基本保持一致。降雨过程中,不稳定区域首先出现于斜坡坡脚,随着时间的增加,潜在不稳定区域的范围逐渐增大,基本平行于坡面向上发展,降雨10 h斜坡坡面形成厚度约0.7 m的贯通性连续不稳定区;降雨15 h斜坡浅表层局部安全系数显著降低,潜在不稳定区域进一步扩大(图6-c),不稳定区域深度达到1.2 m,坡脚处不稳定区域的范围明显大于其他位置,局部安全系数等值线在斜坡中下部深度2.5~3.0 m范围内产生扰动变化。

从上述模拟结果可以看出,在持续降雨的影响下,直线形坡从坡脚至坡顶形成近似平行于坡面的等厚度局部安全系数小于1.0的区域,坡脚厚度略大于坡顶,此类斜坡变形破坏类型主要以浅表层坡面泥流与中、下部浅层滑动破坏为主。

3.1.2 降雨强度对斜坡稳定性的影响

图7为不同降雨强度条件下直线形坡稳定性系数随时间的变化曲线。由不同坡度对比图(图7)可以看出,降雨强度对不同坡度斜坡的稳定性具有明显的控制作用,即相同降雨历时条件下暴雨引发斜坡失稳

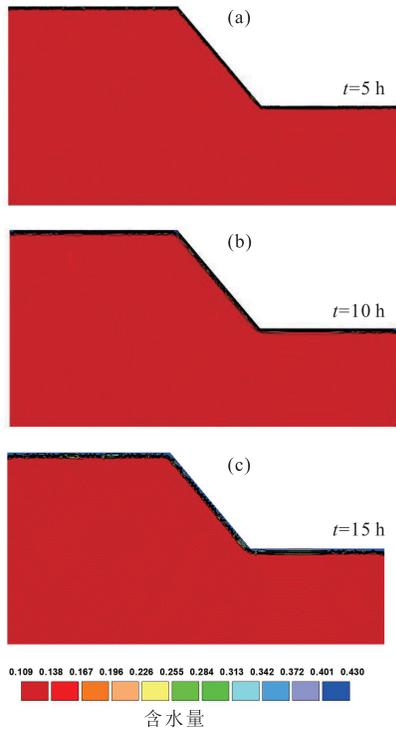


图 4 直线形坡不同时间含水量等值线

Fig. 4 Contour of water content with time for linear slope

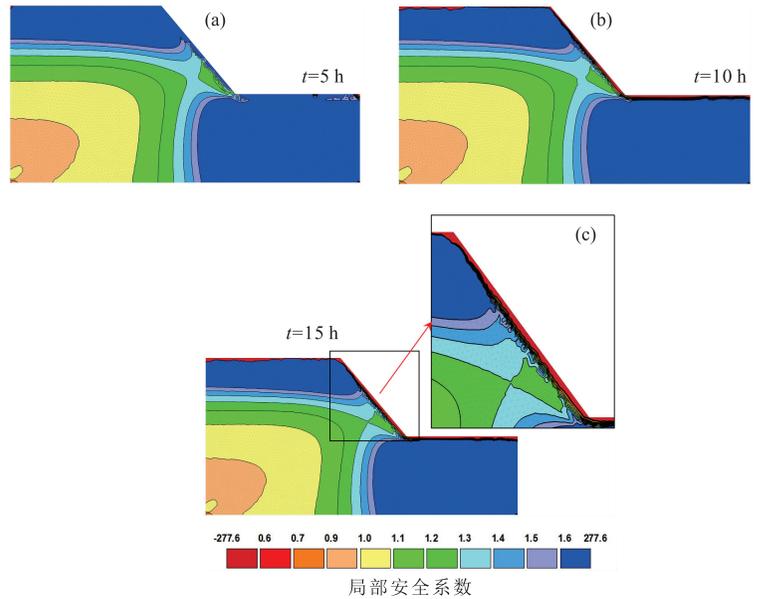


图 6 直线形坡局部安全系数场随降雨历时变化

Fig. 6 Changes of local safety factor with rainfall duration for linear slopes

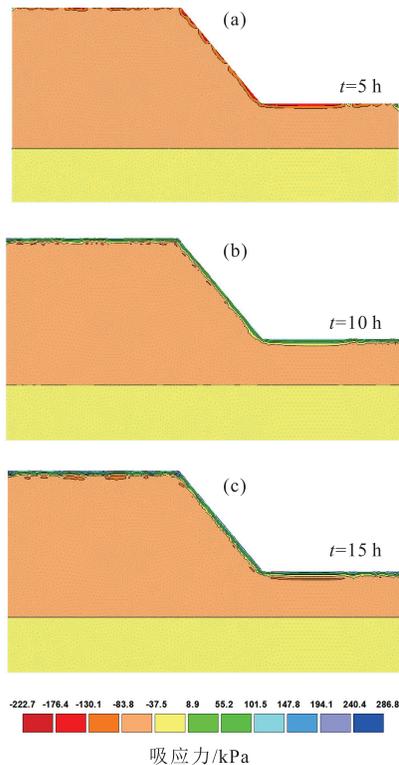


图 5 直线形坡不同时间吸应力等值线

Fig. 5 Contour of matric suction with time for linear slope

的概率更大,如在雨强为 0.02 m/h 条件下,斜坡稳定系数随时间衰减速率最大,0.012 m/h 雨强条件次之,0.008 m/h 雨强条件最小;与稳定性衰减速率相对应的是斜坡失稳时间,对于同一坡度的斜坡,其在最大雨强下的失稳时间最短,以 50°坡的斜坡为例,其在 0.02 m/h 雨强下的失稳时间约为 16 h,在 0.012 m/h 和 0.008 m/h 两种雨强下的失稳时间分别为 34 h 和 62 h。对于不同坡度的斜坡,其失稳时间同时受到坡度和雨强的影响,50°坡在 0.02 m/h 雨强下的失稳时间约为 16 h,而 30°坡在最小雨强条件下,模拟 125 h 的时间仍处于稳定的状态;初始条件下,30°、40°、50°直线形斜坡稳定性系数分别为 1.67、1.35、1.12,随着坡度的增加,斜坡稳定性逐步减小,坡度每增加 10°,稳定性系数衰减率约为 18%。

3.2 凹形黄土斜坡

3.2.1 降雨时长对斜坡稳定性的影响

图 8 为持续降雨 15 h 凹形坡含水量和吸应力分布。凹形坡的水分分布随时间变化趋势与直线形坡相近,区别在于,凹形坡的凹形区域更易汇水和下渗,形成较高含水量分布区。由图 8-a 可以看出,降雨 15 h,斜坡中部凹形区域土体含水量接近饱

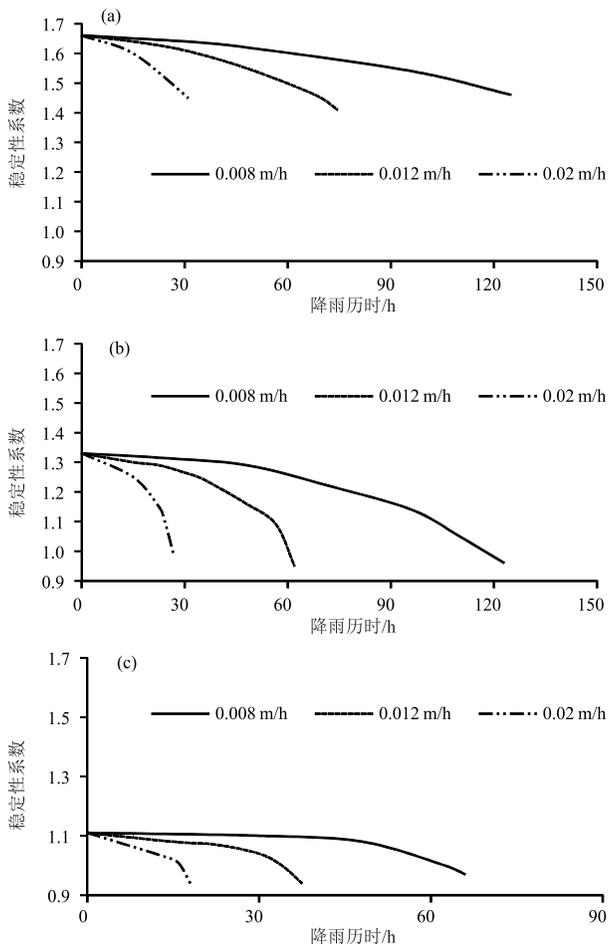


图7 不同雨强条件下直线形坡稳定系数随时间变化曲线
Fig. 7 Curves of safety factor with time under different rainfall intensity for linear slopes
a—30°坡; b—40°坡; c—50°坡

和,明显大于坡脚区域土体含水量(约0.3)。由图8-b可以看出,降雨10 h斜坡坡表形成厚度约0.5 m的正孔隙水压力区,降雨15 h孔隙水压力作用区厚度增加至1.4 m左右,斜坡坡顶位置及中部凹形区域孔隙水压力的作用明显大于斜坡其他部位,该区域土体由于有效应力的降低,易产生变形破坏。

图9为降雨15 h凹形坡局部安全系数场响应。降雨15 h斜坡浅表层局部安全系数显著下降,潜在不稳定区进一步扩大,深度达1.4 m;斜坡中部凹形区域局部安全系数小于1.0的深度相比斜坡其他位置略大,从降雨15 h斜坡局部安全系数分布图可看出,浅表层不稳定区域以下仍存在局部安全系数集

中带。

从模拟结果可以看出,受凹形斜坡坡体形态控制,斜坡凹形部位易于降水汇集入渗,浅表层变形破坏区也受此影响明显,表现为局部安全系数小于1.0的最深位置与局部安全系数等值线集中带均集中于此,因此该区域易产生浅表层坡面泥流或滑动破坏。此外,凹形坡由于坡顶位置坡度通常较陡,局部破坏区域也会出现在坡顶,该区域受降雨作用影响可产生局部滑塌破坏。

3.2.2 降雨强度对斜坡稳定性的影响

图10为不同雨强下凹形坡的稳定性系数随时间变化曲线。可以看出,雨强同样对斜坡稳定性起控制作用,与直线形坡相比,雨强对凹形坡稳定性的控制作用表现得更明显。从时间上的响应看,50°凹形坡在最大雨强下的失稳时间最短,约为10 h,30°凹形坡在最小降雨强度下失稳时间最长,约为59 h。30°、40°、50°凹形坡的起始稳定性系数分别为1.52、1.25、1.09,随着坡度的增加,斜坡稳定性逐步减小,30°到40°、40°到50°坡度每增加10°,稳定性系数衰减率分别为17.7%和12.8%。

3.3 凸形黄土斜坡

3.3.1 降雨时长对斜坡稳定性影响

含水量分布及降雨入渗形式与直线形坡相近(图11-a),坡体各部位降雨入渗深度总体保持一致;吸应力与含水量保持一致的变化趋势(图11-b),影响深度随降雨入渗深度变化,持续性降雨导致浅表层填土体吸力降为0 kPa,并逐步转为正的孔隙水压力,孔隙水压力的作用导致斜坡浅表层土体有效应力降低,加之凸形坡坡脚应力集中现象较显著,因而斜坡浅层与坡脚一定范围内土体易产生变形破坏。

由图12可以看出,凸形坡特殊的形态导致凸形坡坡脚较直线形坡和凹形坡应力集中现象更为明显,未降雨前凸形坡坡脚即存在应力集中区,局部安全系数在1.0左右,但从整体看斜坡基本稳定;降雨15 h斜坡浅表层局部安全系数显著下降,潜在不稳定区向坡体内部扩展,深度可达1.3 m。凸形斜坡坡脚处局部安全系数小于1.0的集中区域明显大于斜坡其他位置,与直线形、凹形斜坡相比,潜在不稳定区域也较大。凸形坡局部安全系数小于1.0的区域向斜坡内部发展深度可达8~10 m,斜坡坡脚位置处土体最先产生变形破坏,进一步导致凸形斜

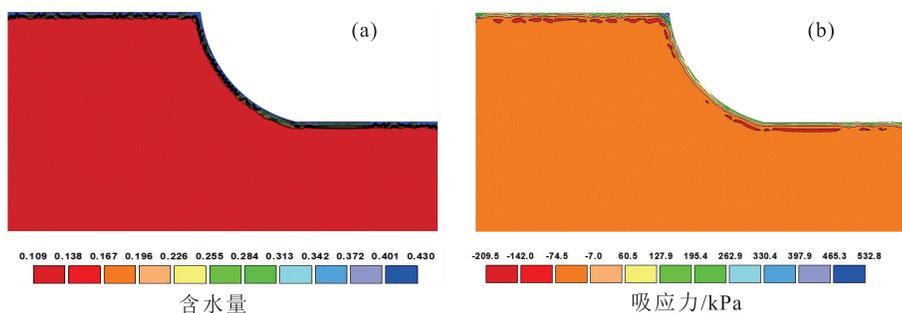


图 8 凹形坡降雨 15 h 含水量及吸应力分布

Fig. 8 Distribution of water content and matric suction for concave slopes after 15 hours' rainfall

坡整体失稳;同时,降雨入渗导致斜坡体内产生明显的局部安全系数等值线突变带,斜坡浅表层也可产生浅层滑动或坡面泥流等变形破坏。

3.3.2 降雨强度对斜坡稳定性影响

图 13 为不同雨强下凸形坡稳定性系数随时间的变化曲线。可以看出,在 3 种坡形中,凸形坡受雨强和坡度的控制作用最明显。50°凸形坡在未降雨条件下的稳定性系数很低,为 1.05,中雨(0.012 m/h)条件下较容易失稳。即使是 30°的凸形坡,在 3 种降雨工况达到一定的模拟时间,也会失稳破坏。这与坡形对黄土斜坡稳定性的控制作用分析结果一致。

由以上分析可知,相同降雨量、相同坡度条件下直线形坡稳定性最高、凹形坡次之、凸形坡的稳定性最小;与之相对应,相同条件下凸形坡失稳时

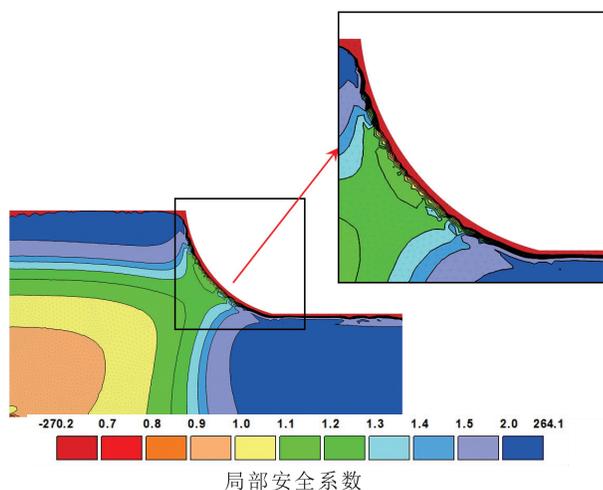


图 9 凹形坡降雨 15 h 局部安全系数等值线

Fig. 9 Contour of local safety factor for concave slopes after 15 hours' rainfall

间最短、凹形坡次之、直线形坡最长。这也充分说明,除雨强和坡度外,斜坡形态对稳定性与失稳时间有直接影响,主要原因是凸形坡坡脚应力集中现

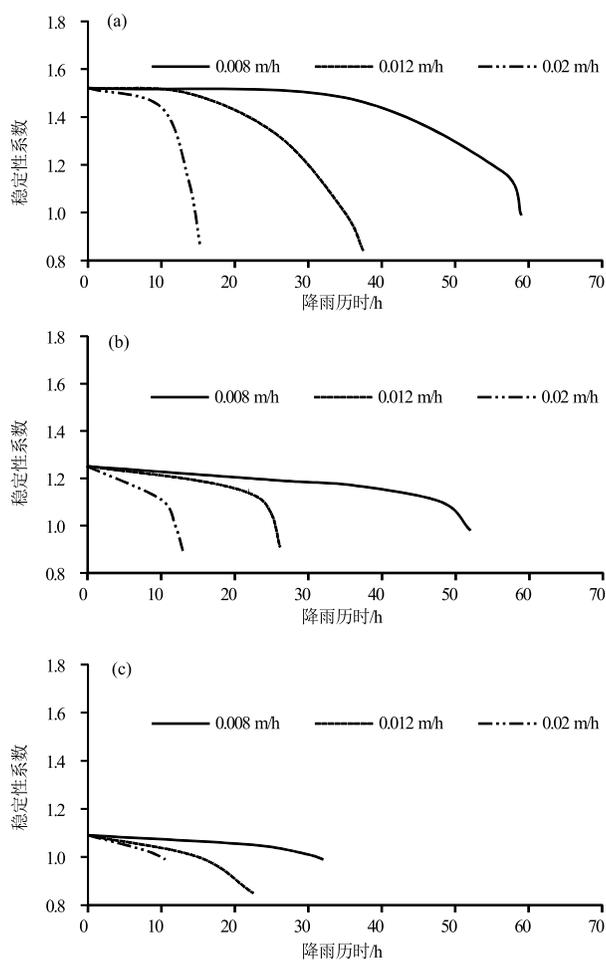


图 10 不同雨强条件下凹形坡稳定系数随时间变化曲线

Fig. 10 Curves of safety factor with time under different rainfall intensity for concave slopes
a—30°坡;b—40°坡;c—50°坡

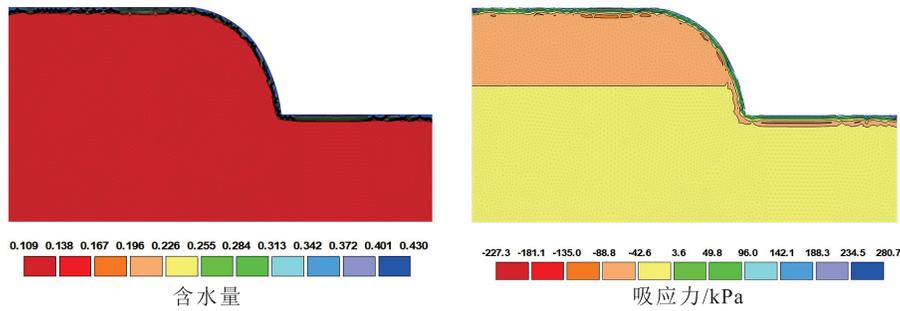


图 11 凸形坡 15 h 含水量与吸应力分布

Fig. 11 Distribution of water content and matric suction for convex slopes after 15 hours' rainfall

象较其他 2 种类型斜坡更显著,而凹形坡坡形易于降水的汇集入渗,因此凸形坡与凹形坡稳定性状态较差,易于失稳破坏。

4 结论

(1) 直线形坡局部安全系数小于 1 的集中带基本平行坡表,降雨条件下易产生浅表层坡面泥流;凹形坡局部安全系数小于 1 的区域集中分布于凹形区,破坏时间早于直线形坡;凸形坡坡脚处应力集中显著,降雨条件下除发生浅表层滑动外,亦可沿突变带产生较深层的滑动。

(2) 坡形、坡度和降雨条件均对黄土斜坡稳定性有明显的控制。相同雨量和坡度条件下,直线形

坡稳定性最高、凹形坡次之、凸形坡稳定性最差。与之相对应,相同条件下凸形坡失稳时间最短、凹形坡次之、直线形坡最长。

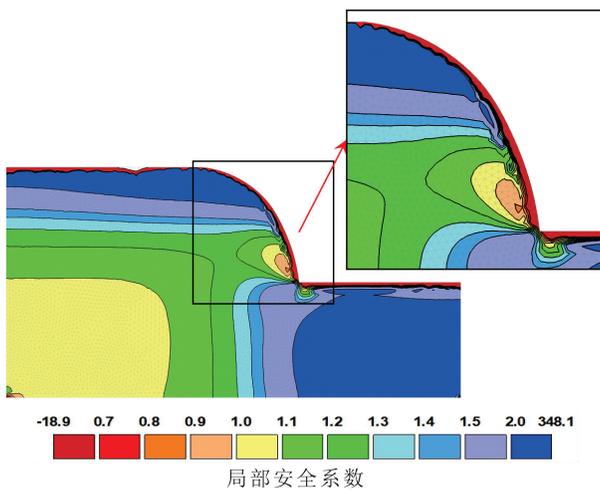


图 12 凸形坡降雨 15 h 局部安全系数等值线

Fig. 12 Contour of safety factor for convex slopes after 15 hours' rainfall

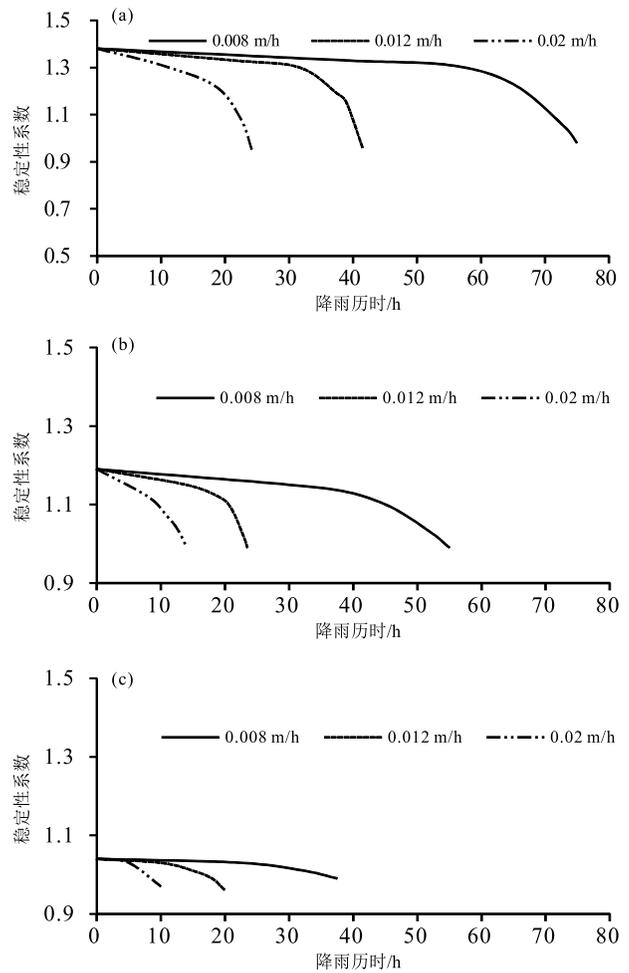


图 13 不同雨强条件下凸形坡稳定系数随时间变化曲线

Fig. 13 Curves of safety factor with time under different rainfall intensity for convex slopes
a—30°坡;b—40°坡;c—50°坡

致谢:本文是在延安地区大量调查与监测工作的基础上完成的,调查工作由项目成员程秀娟、薛强、王虎、王益民、郭怀军等共同完成,软件计算和分析过程中得到中国科学院武汉岩土力学研究所陈盼副研究员的指导和帮助,成文过程中得到长安大学李同录教授、西北大学谷天峰教授的悉心指导,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 李同录, 习羽, 侯晓坤. 水致黄土深层滑坡灾变机理[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1113-1120.
- [2] Ng C W W, Pang Y W. Influence of stress state on soils-water characteristics and slope stability[J]. J. Geotech Geoenviron., 2000, 126(2): 157-166.
- [3] Zhang M S, Dong Y, Sun P P. Impact of reservoir impoundment-caused groundwater level changes on regional slope stability: a case study in the Loess Plateau of Western China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66: 1715-1725.
- [4] 杨宗佶, 蔡焕, 雷小芹, 等. 非饱和地震滑坡堆积体降雨破坏水-力耦合行为的试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5), doi: 10.16285/j.rsm.2018.0045.
- [5] 向小龙, 孙炜锋, 谭成轩, 等. 降雨型滑坡失稳概率计算方法[J]. 地质通报, 2020, 39(7): 1115-1120.
- [6] 张茂省. 引水灌区黄土地质灾害成因机制与防控技术——以黄河三峡库区甘肃黑方台移民灌区为例[J]. 地质通报, 2013, 32(6): 833-839.
- [7] 金艳丽, 戴福初. 地下水上升下黄土斜坡稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2007, 15(5): 599-606.
- [8] 汪发武. 高速滑坡形成机制_土粒子破碎导致超孔隙水压力的产生[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(1): 64-69.
- [9] 邢鲜丽, 李同录, 李萍, 等. 黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 53-59.
- [10] Duncan J M., Wright S G. Soil strength and slope stability[M]. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2005.
- [11] Lu N, Likos W J. Suction stress characteristic curve for unsaturated soil[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2006, 48(9): 131-142.
- [12] Lu N, Basak S, Alexandra W, et al. Analysis of rainfall-induced slope instability using a field of local factor of safety[J]. Water Resources Research, 2012, 48: W09524. doi: 10.1029/2012WR011830.
- [13] Lu N, Jonathan W G. Hillslope hydrology and stability[M]. Cambridge, 2013.
- [14] 孙萍萍, 张茂省, 程秀娟, 等. 黄土高原地质灾害发生规律[J]. 山地学报, 2019, 37(5), Doi: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000455.
- [15] 黄玉华, 冯卫, 李政国. 陕北延安地区 2013 年“7·3”暴雨特征及地质灾害成灾模式浅析[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 54-59.
- ①张茂省, 孙萍萍, 程秀娟, 等. 西北黄土高原区地质灾害综合研究报告. 中国地质调查局西安地质调查中心, 2015.