

持续降雨条件下黄土边坡稳定性试验研究

马蓓青¹, 杜玉鹏³, 王怀星¹, 杨傲秋², 王晓东², 田堪良^{1,2}

(1.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 滑坡是黄土丘陵沟壑区常见的重力侵蚀, 降雨是黄土边坡失稳的主要诱因。为了研究持续降雨条件下黄土边坡的稳定性, 采用人工降雨装置进行室外现场试验, 测量土体含水率、密度、滑坡剪切带位置以及裂缝的发育等情况, 并使用 FLAC3D 软件计算模拟持续降雨条件下裂缝发育对边坡稳定性的影响。结果表明: 随着降雨历时的增加, 黄土边坡土体的含水率逐渐增大, 土体强度降低, 而且自重增大, 坡面冲蚀沟逐渐发育, 坡脚出现滑塌, 坡顶出现拉裂缝, 裂缝加剧了降雨的集中入渗, 使得裂缝周边土体强度快速降低, 最终导致在降雨历时至 308.8 h 时发生滑坡, 持续降雨和裂缝引起的集中入渗加速了土体强度的降低, 导致了滑坡, 裂缝发育得越深、数量越多, 对边坡稳定性危害越大。研究结果为降雨条件下的黄土边坡稳定分析研究和地质灾害防治提供方法和技术支撑。

关键词: 滑坡; 持续降雨; 边坡稳定性; 数值计算分析; 裂缝

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0050-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.05.008

Experimental Study on Stability of Loess Slope Stability Under Continuous Rainfall

MA Beiqing¹, DU Yupeng³, WANG Huaixing¹, YANG Aoqiu², WANG Xiaodong², TIAN Kanliang^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling,

Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Landslide is the common geological disaster in loess hilly and gully areas, and rainfall is the main cause of instability of loess slopes. In order to study the stability of loess slopes under continuous rainfall conditions, an artificial rainfall device was used to carry out experimental studies on the outdoor site. The soil moisture content, density, shear zone location and crack development were measured. The FLAC3D geotechnical engineering numerical calculation software was used to analyze the slope stability. The results showed that with the increase of rainfall duration, the moisture content of the loess slope soil gradually increased, the soil strength gradually decreased, and its own weight gradually increased. The gully erosion on the slope gradually developed, the slope toe collapsed, and the tensile cracks occurred on the top of the slope. The cracks increased the infiltration of rainfall, which made the strength of soil around the crack decrease rapidly, and finally caused a landslide when the rainfall lasted 308.8 h. Rainfall infiltration and concentrated infiltration caused by cracks accelerated the reduction of soil strength and led to the landslide. The deeper and more cracks developed, the greater their damage to slope stability.

Keywords: landslide; continuous rainfall; slope stability; numerical analysis; cracks

滑坡是黄土丘陵沟壑区常见的重力侵蚀, 黄土特殊的水敏性和结构性使得降雨成为该地区滑坡的主要诱发因素^[1-2]。因此, 对持续降雨条件下边坡稳定

性的研究是十分必要的。在滑坡的众多影响因素中, 土体发育的裂缝也是导致滑坡的重要因素之一^[3-4]。裂缝的形成一方面有利于地下水的排除, 使边坡趋于

收稿日期: 2021-03-11

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504703, 2016YFE0203400); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2013KTDZ03-03-01)

第一作者: 马蓓青(1990—), 女, 硕士, 主要从事环境工程与地质灾害研究。E-mail: mabeiqing19@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 田堪良(1968—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事水土保持与防灾减灾研究。E-mail: tianknaliang@163.com

稳定;另一方面,它能改变土体的应力状态,与降雨共同作用,对边坡稳定性产生不利影响^[5]。通常情况下,在完整均匀的土体中,降雨入渗的深度局限于3.0 m范围内,并不能影响更深层的土体,然而土体中的裂隙成为地表水入渗的优势通道,使得降雨迅速渗透进入深层土体,并对边坡的稳定性造成重大影响^[6]。西北地区黄土台塬广泛发育裂隙,可分为浅穿透裂缝和深穿透裂缝,前者通常距离台塬边较近,渗透深度受到黄土节理的控制;后者距离台塬边较远,在黄土中渗透深度更深^[7]。

目前对滑坡的研究主要分为室外观测和室内模拟。室外观测的目的是对室内模拟的结果进行验证,观测的对象往往是已发生的滑坡,而进行室外模拟降雨至边坡滑坡的试验还较少。Tu等^[8]通过室外人工降雨试验发现,在40 mm/d的最大降雨强度条件下,黄土表层0.7 m范围内为渗透蒸发活动区,最大雨强为120 mm/d时,湿润锋深度约为3 m;陈伟等^[9]通过室内人工降雨试验发现,含水率增加使得土体的有效应力和抗剪强度降低,同时,水分向坡体外部的渗透力增大,从而增加了边坡的不稳定性。在观测和模拟试验中,边坡稳定的分析计算必不可少,常用的是极限平衡法和强度折减法^[10]。对于简单的均质土坡,2种方法得到的安全系数和失效模式基本一致^[11];实际工程中边坡条件往往比较复杂,但极限平衡法受到分析方法和失效机理假设的限制^[12],不能很好地适用于这些情况。强度折减法能够有效克服极限平衡法的缺陷,在边坡稳定性分析中得到广泛应用。

本研究采用自制的持续降雨试验装置,在室外开展了持续降雨条件下黄土边坡稳定性试验,并采用FLAC3D岩土数值计算软件对降雨和裂缝对稳定性的影响进行了模拟计算分析,为降雨条件下的黄土边坡稳定分析试验研究和地质灾害防治提供方法和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验装置与材料

持续降雨条件下黄土边坡稳定性试验于2019年8—10月在中国科学院水利部水土保持研究所杨凌水土保持野外科学试验站进行。采用高精度贴片式灌水带制作模拟降雨装置,通过调节阀门可模拟不同的雨强;人工开挖边坡,降雨区坡长6 m、坡高3 m,边坡坡比为1:1。为了监测降雨过程中边坡土体的含水率变化情况,在坡顶和坡面各埋设了1根柱状YM—GS07型管式土壤湿度测定仪,对水分进行实时测量。

试验区边坡土体属Q₃黄土(马兰黄土),呈灰黄色,6 m深度范围内土质较为均一。在边坡中部采样,测得

边坡黄土的天然含水率为16.3%,天然干密度为1.47 g/cm³,液限为35.6%,塑限为18.3%,塑性指数为17.3,比重为2.71,根据颗粒组成分类,属于粉质黏土。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 降雨设计 地质灾害发生频率与日降雨量有密切关系。张茂省等^[1]提出陕北黄土高原地区地质灾害气象预警临界日降雨量为50 mm。当日降雨量为50.1~60.0 mm时,地质灾害发生频率最高,并且1次降雨可诱发多处地质灾害^[13]。因此,模拟降雨强度设置为2.2 mm/h(对应单个滴水孔流量为2.57 s/滴),即日降雨量为52.8 mm/d。试验模拟降雨强度计算公式为:

$$I = \frac{10n_1n_2m}{MA} \quad (1)$$

式中: I 为降雨强度(mm/h); n_1 为滴水孔总数; n_2 为单个滴水孔每小时流出水滴数; m 为单个水滴质量(g); M 为水的密度(g/cm³); A 为模拟降雨面积(cm²)。

在降雨装置设计中,灌水带和滴水孔间距均为20 cm,为了获得较均匀的降雨,相邻2条灌水带上的滴水孔相互错开,呈梅花形分布。模拟降雨前经试验测定,灌水带滴水孔水流为15.9滴/g,单个滴水孔可控流量区间为0.5~4.0 s/滴,则模拟降雨强度可在1.42~11.32 mm/h进行调控。试验开始前,通过高精度水流速表、流量计以及5个阀门(供水管上3个,每条灌水带两侧各1个)控制降雨强度至设计值,每隔12 h进行1次流量校正。降雨装置布设见图1。

1.2.2 试验过程 试验研究的主要过程分为开挖边坡安置降雨器、持续降雨、采用FLAC3D进行数值计算模拟3个部分。

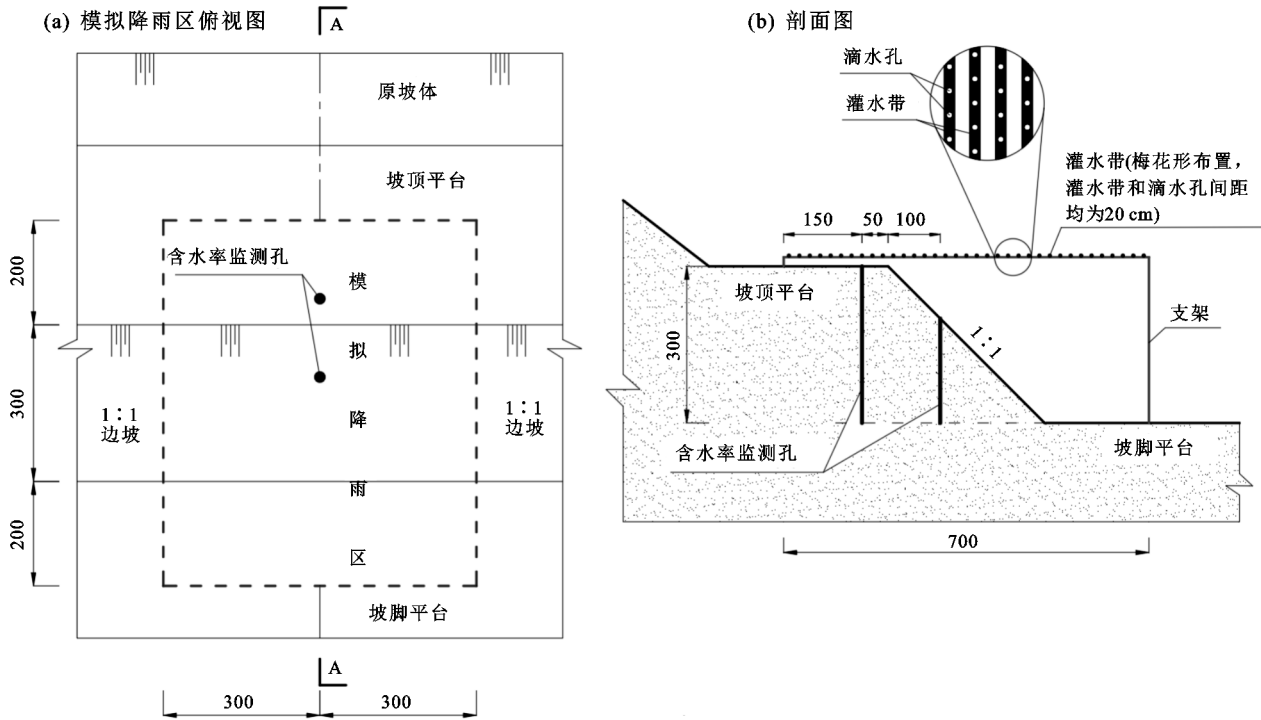
(1)试验前在边坡上开挖出45°边坡,并将降雨装置水平布设于坡顶平台上。

(2)调整模拟降雨装置,进行持续降雨。降雨6 min,坡顶及坡面表层开始湿润,坡顶和坡面出现降雨溅蚀;持续降雨72 h后,坡面面蚀和沟蚀不断加重,坡顶出现裂缝,并延伸到坡面;持续降雨至216 h,坡面上部裂缝宽度和深度加大,开始出现蠕变,向下滑动,出现局部垮塌。在试验过程中,因第10天出现天然降雨,模拟降雨停止,天然降雨持续了12 h,降雨量为17.4 mm;天然降雨结束后,继续人工降雨试验,持续降雨至308.8 h,边坡沿距坡顶边缘约30 cm处的裂缝发生整体滑动,由坡顶滑动至坡脚,此时模拟降雨总量达698.9 mm;持续降雨至310 h时,坡面侵蚀及滑坡形成;滑坡形成后静置观察2 h后,模拟降雨试验至312 h结束。整个降雨过程,降雨总量达到706.2 mm。

(3)本研究以实际试验现象结合FLAC3D边坡

数值计算模拟的方式,分析裂缝的产生对滑坡的响应
FLAC3D 是一款应用广泛的岩土工程分析软件,它可以运用强度折减法原理对边坡的安全系数进行快

速的模拟计算;同时,它还可以分析边坡的稳定性,包括模拟分析滑动面、变形过程、滑动过程以及治理措施对边坡变形的响应等^[14-18]。



注:图中尺寸单位为 cm。

图 1 降雨装置布设示意

在持续降雨试验结束后,对发生的滑坡进行了长时间观察以及对滑坡体开挖清理,观察测量可得滑动面上部约有 100 cm 深的垂直滑动面,此处正好是坡顶最大裂缝位置,此时把裂缝深度定为 100 cm 以便进行数值模拟。

采用 FLCA3D 求解边坡稳定的安全系数,并对潜在滑动面进行模拟计算。该软件对边坡稳定安全系数和潜在滑动面的计算基于强度折减法进行,主要计算原理^[19]为:

$$F = \frac{c}{c'} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi'} \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{(\delta_1 - \delta_3) \tan \varphi'}{2c' + (\delta_1 + \delta_3) \tan \varphi'} \right) \tag{3}$$

式中: F 为边坡稳定安全系数; c 、 c' 分别为边坡土体初始状态和临界状态下的黏聚力; φ 、 φ' 分别为边坡土体初始状态和临界状态下的内摩擦角; α 为最危险滑动面与最小主应力间夹角, δ_1 、 δ_3 为土体单元的第 1 和第 3 主应力。当边坡达到临界破坏状态时,边坡稳定安全系数 $F=1$, $F<1$ 时边坡稳定性表明为破坏。

2 结果与分析

2.1 滑坡机理分析

为了揭示黄土边坡的滑坡机理,在模拟降雨试验结束后,在边坡上距中心线 200 cm 的左、右两侧采集

了不同深度的土样,测试了土样的物理力学指标(表 1)。由黄土边坡土体的干密度随土层深度变化曲线(图 2)可知,边坡土体的干密度随着土层深度的增加而增大,由 50 cm 深处的 1.42 g/cm³ 增加到 550 cm 处的 1.56 g/cm³。

表 1 降雨后边坡不同深度黄土的物理力学指标

自坡顶 深度/cm	干密度/ (g·cm ⁻³)	含水量/ %	c' / kPa	$\varphi'/(^{\circ})$	弹性模量 (E)/MPa	泊松比 (μ)
0—100	1.42	28.20	6.39	20.80	3.80	0.34
100—200	1.47	25.40	10.30	22.50	4.50	0.38
200—300	1.50	25.20	10.42	22.90	4.70	0.39
300—400	1.52	23.80	13.98	23.70	5.00	0.40
400—500	1.53	23.70	14.68	25.10	5.10	0.40
500—600	1.56	21.80	19.52	26.00	5.60	0.41

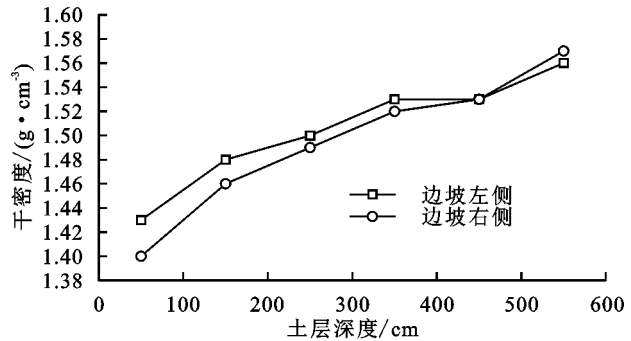


图 2 边坡土体的干密度随土层深度的变化

降雨试验前后边坡土体含水率和饱和度随土层深度的变化曲线见图 3。由图 3 可知,降雨入渗导致边坡土体的含水率和饱和度较降雨前都有明显的增大,随着土层深度的增加,增大量逐渐减小,降雨入渗对浅层土体的含水率的影响较大。随着降雨历时的

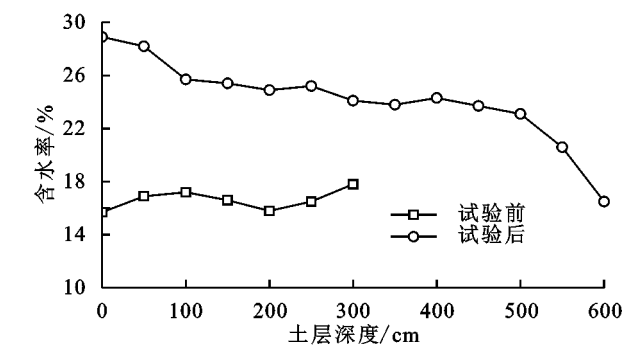


图 3 降雨试验前后边坡土体含水率和饱和度随土层深度的变化

2.2 边坡稳定性计算与分析

采用 FIAC3D 软件建立数值计算模型,由于不同深度土体物理力学性质有差异,所以对边坡土体的模拟按照不同深度进行分组,每组厚度均为 1 m,共 6 组。模型中分别对应 A、B、C、D、E、F。数值计算模型坡长为 7 m,坡体宽度为 6 m,高度为 6 m,边坡高位 3 m,坡度为 45°,坡顶及坡面为自由边界。建立的边坡数值计算模型见图 4。

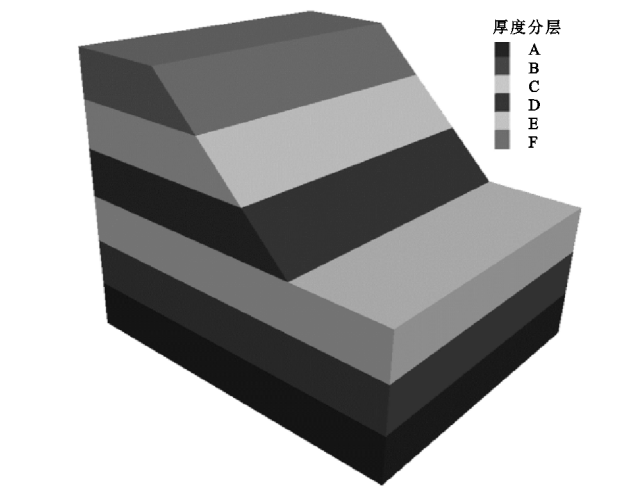
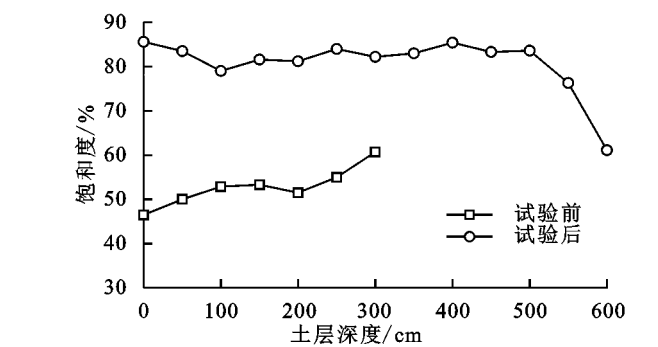


图 4 边坡数值计算模型

采用 Mohr—coulomb 模型计算分析,得到的边坡稳定安全系数及位移云图(图 5)和最大剪应变增量云图(图 6)。由图 5 可知,边坡的安全稳定系数为 1.87,最大位移为 13.4 cm,安全系数>1.0,表明塑性区未贯通,边坡处于稳定状态。

从图 6 可以看出,坡体内部应变变化明显,最大剪应变增量发生在坡脚处,表明坡体本身会在自重作用下存在潜在的塑性变形贯通区域即潜在滑动面,潜在滑动面下部与实际滑动面基本吻合,而上部的垂直滑动面与实际滑动面相背离。这主要是由于在边坡稳模拟计算时没有考虑裂缝的影响,计算得到的边坡

延长,边坡土体的含水率不断增大,土体的强度逐渐减小,土体自重逐渐增大,同时坡顶裂缝的集中入渗使得裂缝周边土体强度快速下降,土体沿裂缝不断发生剪切破坏,裂缝也不断发育,最后形成贯通的剪切破坏滑动面,边坡发生整体滑坡。



稳定安全系数为 1.87,而实际上黄土边坡已经发生滑坡,因此裂缝对边坡稳定性有重要影响,在边坡稳定计算分析时必须考虑裂缝的影响。

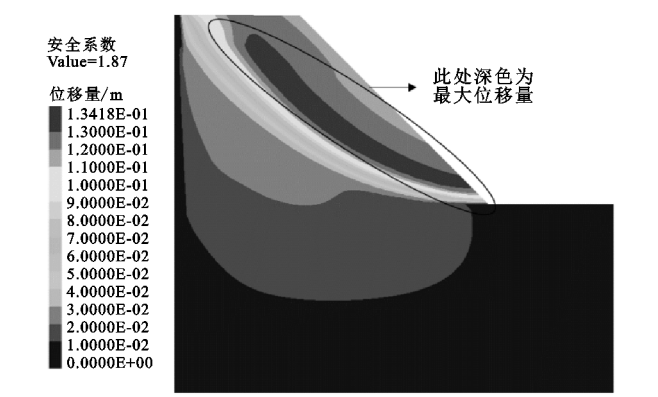


图 5 边坡稳定安全系数及位移云图

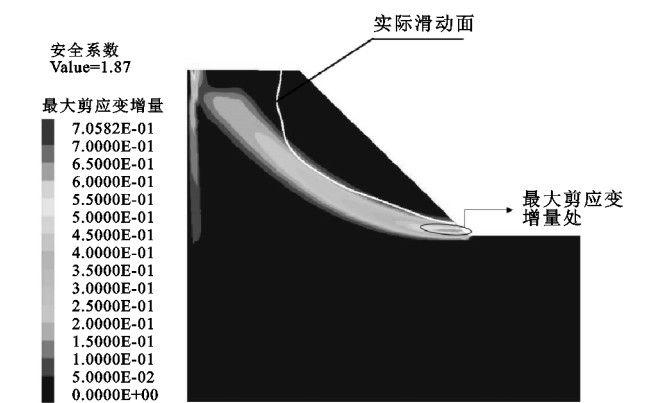


图 6 最大剪应变增量云图

2.3 裂缝对边坡稳定性的影响分析

为了定量分析裂缝的深度、数量以及裂缝到坡顶边缘的距离 3 种因素对边坡稳定性的影响,利用 FI-AC3D 数值计算软件将裂缝参数加载到边坡模型中,裂缝开口宽度为 5 mm,末端宽度为 0 mm,并假定裂缝形状和方向与实际滑动线相同。

2.3.1 单因素计算分析 在计算模型中分别考虑不同裂缝深度(0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 cm)、不

同裂缝数量(0,1,2,3,4,5,6,7)以及裂缝与坡顶边缘的距离(20,40,60,80,100,120,140,160 cm)对边坡稳定性的影响。研究不同裂缝深度的影响时,每次设置 1 条裂缝,并假定裂缝沿实际滑动线方向发育,裂缝与坡顶边缘的距离为 20 cm;研究不同数量的裂缝

时,设置裂缝深度为 100 cm,第 1 条裂缝到坡顶边缘的距离为 20 cm,后续裂缝间距为 20 cm;研究裂缝与坡顶边缘的距离对边坡稳定性的影响时,每次仅设置 1 条裂缝,并控制裂缝深为 1 m。分别得到 3 种因素影响下边坡稳定安全系数的变化曲线见图 7。

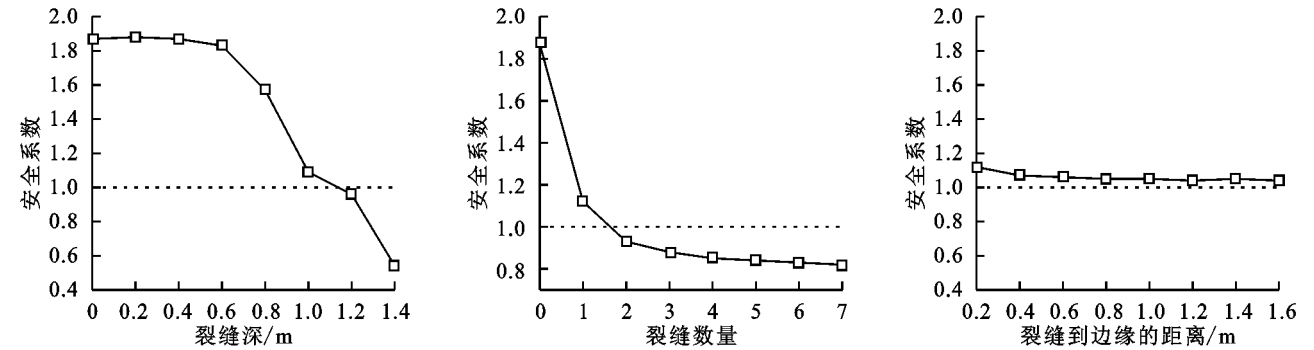


图 7 裂缝深度、裂缝数量及裂缝与坡顶边缘的距离对边坡稳定性的影响

由图 7 可知,边坡稳定安全系数随裂缝深度的增加而减小,裂缝深度<60 cm 时,安全系数减小得很慢,而当裂缝深度>60 cm 时,安全系数减小得很快。当裂缝发育深度达到 100 mm 时,边坡稳定安全系数为 1.09,处于临界滑坡状态,当裂缝继续发育加深到 120 mm 时,安全系数减小到 0.96,边坡发生失稳破坏。在裂缝深度为 1 m 的情况下,边坡稳定安全系数随裂缝数量增加而减小,当有 1 条裂缝发育时,边坡稳定安全系数减小为 1.12,接近临界失稳状态,当有 2 条裂缝发育时,边坡稳定安全系数减小为 0.93,边坡已经失稳。而当裂缝条数>3 时,边坡稳定安全系数减小很慢,表明距离滑动面较近的裂缝对边坡稳定性影响较大。当仅有 1 条裂缝且深度为 1 m 时,随着裂缝到坡顶边缘的距离的增大,边坡稳定安全系数开始有所减小,随后趋于稳定,安全系数稳定在 1.05 左右,表明仅有 1 条裂缝时,边坡是稳定的。

由表 3 整理得到的安全系数水平均值随裂缝深度、裂缝数量及裂缝与坡顶边缘距离的变化曲线(图 8)。

表 2 不同工况条件下的边坡稳定安全系数

试验组数	水平组合	影响因素			安全系数
		裂缝深 (A)/m	裂缝数量 (B)/条	裂缝到边缘 距离(C)/m	
1	A1B1C1	0.6	1	0.2	1.82
2	A1B2C3	0.6	2	0.6	1.64
3	A1B3C4	0.6	3	0.8	1.48
4	A1B4C2	0.6	4	0.4	1.42
5	A2B1C2	0.8	1	0.4	1.57
6	A2B2C4	0.8	2	0.8	1.40
7	A2B3C3	0.8	3	0.6	1.32
8	A2B4C1	0.8	4	0.2	1.26
9	A3B1C3	1.0	1	0.6	1.06
10	A3B2C1	1.0	2	0.2	0.91
11	A3B3C2	1.0	3	0.4	0.87
12	A3B4C4	1.0	4	0.8	0.85
13	A4B1C4	1.2	1	0.8	0.92
14	A4B2C2	1.2	2	0.4	0.78
15	A4B3C1	1.2	3	0.2	0.71
16	A4B4C3	1.2	4	0.6	0.68

表 3 边坡安全系数极差分析

安全系数 水平均值 F	裂缝深 (A)	裂缝 数量(B)	裂缝到边缘 距离(C)
K1	1.590	1.343	1.175
K2	1.388	1.183	1.160
K3	0.923	1.095	1.175
K4	0.773	1.053	1.163
极差	0.818	0.290	0.015

2.3.2 多因素计算分析 正交试验设计是分式析因设计的主要方法,可以同时研究多种因素共同作用。其特点是根据正交性从全面试验中挑取部分具有代表性的点进行试验,每个因素的每个水平与另一个因素的每个水平各组合 1 次。该方法可以减少试验次数并具有统计学意义,是一种高效、快速、经济的试验设计方法^[20]。计算得到不同工况条件下的边坡稳定安全系数见表 2。

由表 3 和图 8 可知,裂缝深(A 因素)的极差最

采用极差分析法分析各影响因素对边坡稳定性的影响程度。极差即每个因素的相同水平值对应的结果值均值的最大值与最小值之差,它的大小反映其对结果值的影响程度,极差越大,表明该因素对结果值的影响越大,反之越小^[21]。由表 2 计算得到每个因素不同水平下的安全系数平均值和极差见表 3。

大,裂缝到坡顶边缘距离(C 因素)的极差最小,表明裂缝深度对边坡稳定性的影响最大,裂缝到坡顶

边缘距离对边坡稳定性的影响最小,这与单因素计算结果一致。

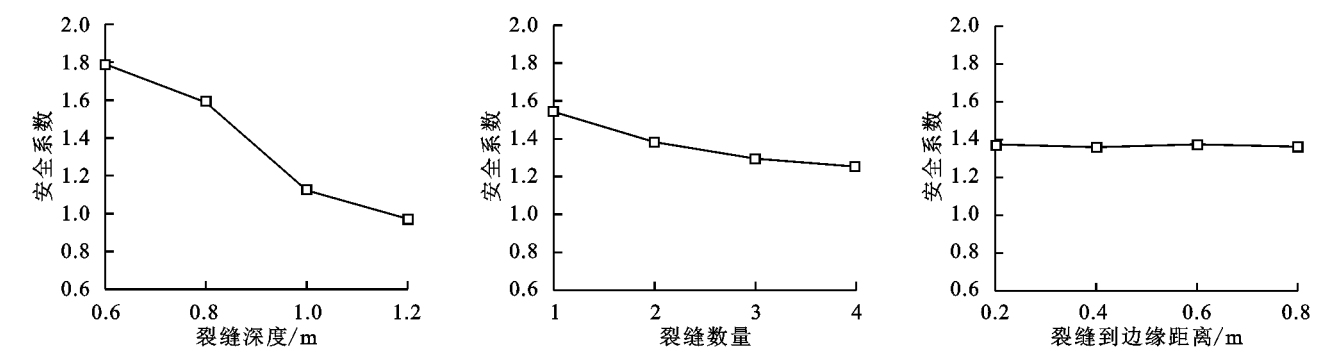


图 8 安全系数影响因素分析

3 讨论

以往对于黄土边坡失稳的研究很少考虑裂缝发育对边坡稳定性的影响,本研究结果表明,坡顶裂缝对黄土边坡稳定性有着显著的不利影响,尤其是裂缝深度越大越容易沿裂缝产生滑坡。因此,在实际工程中,计算分析边坡稳定性时,必须考虑裂缝对边坡稳定性的影响。黄土边坡裂缝主要是由于降雨或灌溉导致土体发生不均匀沉降变形而引起的。降雨或灌溉使边坡土体的水分增加,从而使得土体的强度减小、自重增大,如果土质或土体结构不一致就会产生不均匀沉降变形。由于边坡土体存在临空面,土体周边的变形约束条件不同,不均匀沉降处出现拉裂缝,随着降雨历时的增加,拉裂缝向临空面的方向发展而不断加宽,如裂缝处存在降雨或汇流的集中入渗,则加速裂缝和滑坡的发育,最终导致黄土边坡沿裂缝产生滑坡。

裂缝是预报滑坡的重要指标。滑坡往往具有突发性,但其发生一般都有先兆,比如坡顶出现拉裂缝,这些裂缝如果仅发生在土体表层,如果深度和宽度不增大,也不会引起滑坡。但如果坡顶的拉裂缝在降雨或其他荷载作用下,不断发育,深度和宽度不断增加,则很可能导致滑坡,降雨集中入渗则会加速这种趋势。因此,在滑坡调查和监测时,应重点勘察和监测坡顶是否有拉裂缝、裂缝的宽度和深度的变化发展情况。结合近期对于裂缝的研究,主要集中在裂缝分布特征的宏观观察及裂缝诱发滑坡风险的预测上^[22],例如,通过对裂缝区的判定和观察来预判滑坡的形成、通过图像识别技术得到山体或坡体的裂缝分布特征并进行滑坡的发育与形成概率预测等^[23]。本研究在进行裂缝对边坡稳定影响的数值计算模拟中,分析裂缝发育深度、数量以及裂缝距离坡顶边缘位置对边坡稳定性的影响,但裂缝产生的机理及规律发生的还有待进一步研究,以期更加深入地预测和防治滑坡灾害。

4 结论

(1)持续降雨入渗导致黄土边坡土体的含水率和自重不断增大,强度逐渐减小,进而局部土体发生剪切破坏,形成贯通滑动面,发生滑坡。

(2)持续降雨入渗也会导致黄土边坡产生不均匀湿陷变形,在边坡顶部产生裂缝,裂缝加剧了雨水的集中入渗,裂缝周边土体强度快速降低,裂缝不断发育,从而加快了边坡的失稳。

(3)黄土边坡裂缝的发育深度、数量和位置对边坡均有不同程度的不利影响,其中,裂缝深度对边坡稳定性的不利影响最大,其次是裂缝数量,裂缝到坡顶边缘的距离对边坡稳定性的影响较小。

参考文献:

- [1] 张茂省,胡炜,孙萍萍,等.黄土水敏性及水致黄土滑坡研究现状与展望[J].地球环境学报,2016,7(4):323-334.
- [2] Wang H B, Zhou B, Wu S R, et al. Characteristic analysis of large-scale loess landslides: A case study in Baoji City of Loess Plateau of Northwest China[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011, 11(7): 1829-1837.
- [3] Wang J D, Xu Y J, Ma Y, et al. Study on the deformation and failure modes of filling slope in loess filling engineering: A case study at a loess mountain airport[J]. Landslides, 2018, 15(12): 2423-2435.
- [4] 抗兴培,刘晓,王彪龙,等.黄土坡顶裂缝成因及演化过程分析[J].安全与环境工程,2019,26(2):45-51.
- [5] 许领,戴福初,邝国麟,等.台缘裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的意义[J].地质论评,2009,55(1):85-90.
- [6] Tang Y M, Xue Q, Li Z G, et al. Three modes of rainfall infiltration inducing loess landslide[J]. Nat Hazards, 2015, 79(1): 137-150.
- [7] Xu L, Dai F C, Tham L G, et al. Investigating landslide-related cracks along the edge of two loess plateforms in northwest China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(10): 1023-1033.
- [8] Tu X B, Kwong A K L, Dai F C, et al. Field monito-

- ring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides[J]. *Engineering Geology*, 2009, 105(1/2): 134-150.
- [9] 陈伟, 骆亚生, 武彩萍. 人工降雨作用下黄土边坡的室内模型试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2013(5): 100-104.
- [10] Wei W B, Cheng Y M, Li L. Three-dimensional slope failure analysis by the strength reduction and limit equilibrium methods [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(1/2): 70-80.
- [11] Cheng Y M, Lansiaara T, Wei W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods [J]. *Computers and Geotechnics*, 2007, 34(3): 137-150.
- [12] Huang M S, Jia C Q. Strength reduction FEM in stability analysis of soil slopes subjected to transient unsaturated seepage [J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(1/2): 93-101.
- [13] Martin G R, Chen C Y. Response of piles due to lateral slope movement[J]. *Computers and Structures*, 2005, 83(8/9): 588-598.
- [14] Li Z H, Jiang Y J, Tao Z G, et al. Monitoring prediction of a rockslide in an open-pit mine and numerical analysis using a material instability criterion[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(3): 2041-2053.
- [15] Lin H, Cao P, Gong F Q, et al. Directly searching method for slip plane and its influential factors based on critical state of slope [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, 16(1): 131-135.
- [16] 裴向军, 袁广, 张晓超, 等. 坡脚开挖诱发滑坡机理: 以沙井驿滑坡为例[J]. *山地学报*, 2017, 35(2): 195-202.
- [17] Jian W X, Xu Q, Yang H F, et al. Mechanism and failure process of Qianjiangping landslide in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(8): 2999-3013.
- [18] 滕宏泉, 范立民, 向茂西, 等. 陕北黄土梁峁沟壑区地质灾害与降雨关系浅析: 以陕北延安地区 2013 年强降雨引发地质灾害为例[J]. *地下水*, 2016, 38(1): 155-157.
- [19] 林杭, 曹平. 边坡稳定性强度折减数值分析方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [20] 张文彤. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [21] 李云雁. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [22] 程宏浩. 基于近景图像识别的滑坡裂缝监测技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学; 2020.
- [23] 陈菲, 王塞, 高云建, 等. 白格滑坡裂缝区演变过程及其发展趋势分析[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(5): 71-78.
- (上接第 49 页)
- [16] 李宗杰, 宋玲玲, 田青, 等. 陇南土石山区水土保持综合治理效益分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(10): 132-137.
- [17] Li C J, Pan C Z. Overland runoff erosion dynamics on steep slopes with forages under field simulated rainfall and inflow [J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(8): 1794-1809.
- [18] 马征, 董晓霞, 张柏松. 不同保水剂对土壤团聚体组成及微生物量碳、氮的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018, 277(5): 122-128.
- [19] 付晨星. PAM 和 SAP 交并施用对旱区坡耕地土壤水力特性和水肥流失的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [20] 李希. 2 种新型保水剂对土壤—作物系统的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [21] 刘川, 查轩, 黄少燕, 等. 保水剂施用方式对花岗岩红壤坡面水土保持的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 110-115.
- [22] 常松果, 胡雪琴, 史东梅, 等. 不同土壤管理措施下坡耕地产生流沙和氮磷流失特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 34-40.
- [23] 陈月娥. 榆林风沙区坡面径流冲刷侵蚀水沙变化规律试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电学院, 2012.
- [24] 覃超, 郑粉莉, 刘沛峰, 等. 玉米秸秆汁土壤改良剂对黄绵土抗侵蚀能力的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 367-378.
- [25] 郝冬宁, 郭成久, 冯洋, 等. 锯末和保水剂对坡面棕壤土含水量的影响研究[J]. *中国农村水利水电*, 2014(9): 12-15, 22.