

【水土保持】

持续降雨入渗对黄土边坡稳定性的影响

钟佩文¹, 张慧莉¹, 田堪良^{2,3}, 陈航¹, 聂抗意¹

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院 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.中国科学院 水利部 水土保持研究所 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探索黄土边坡在持续降雨条件下的入渗规律及其对边坡稳定性的影响,采集陕北治沟造地工程中开挖边坡的土样,在室内模拟土体垂直方向一维降雨积水入渗过程,观测分析土体含水率的变化和湿润锋运移特征,研究含水率变化对边坡土体抗剪强度的影响。根据降雨积水入渗试验得到的不同时刻土体饱和区分布情况,结合饱和区土体重量、黏聚力、内摩擦角的具体数值,采用FLAC3D岩土工程数值计算软件分析了持续降雨条件下边坡的安全稳定性以及潜在滑动面的变化情况。研究结果表明:在降雨积水入渗条件下,浅层土体中湿润锋运移速度较快,随着深度增大,湿润锋运移速度逐渐减缓;当湿润锋到达时,不同深度土体含水率均呈现先陡升再趋于平缓上升的变化规律,土体的饱和度可达到80%。降雨入渗使土体的抗剪强度显著降低,随着降雨历时的增加,边坡土体中的饱和区域增大,土体局部的剪切变形增大,进而局部发生塑性变形逐步扩展形成剪切带,从而导致滑坡。因此,黄土边坡应设置排水措施,避免降雨入渗引发滑坡等自然灾害。

关键词:黄土边坡; 降雨入渗; 渗透规律; 抗剪强度; 边坡稳定

中图分类号: S157.1; P642.22 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1000-1379.2018.01.017

Study on the Influence of Continuous Rainfall Infiltration on the Loess Slope Stability

ZHONG Peiwen¹, ZHANG Huili¹, TIAN Kanliang^{2,3}, CHEN Hang¹, NIE Kangyi¹

(1.College of Water Conservancy and Construction Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;
3.Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to explore the mechanism of continuous rainfall infiltration in loess soil and its influence on the loess slope stability, soil samples were collected on the excavated loess slope in the engineering of land reclamation in loess hilly and gully region in Northern Shaanxi. The laboratory tests were conducted to simulate the vertical one-dimensional continuous rainfall infiltration process, the change of soil moisture content and the characteristics of wetting front movement were observed and tested, and the effect of moisture content on shear strength of slope soil was analyzed by direct shear test. According to the distribution of soil saturation area at different time points obtained from the rainfall infiltration test and the specific values of unit weight, cohesion and internal friction angle in saturated zone, the changes of potential sliding surface and the stability of slope under continuous rainfall infiltration conditions were calculated and analyzed by FLAC3D software. The results show that the wetting front moves faster in the shallow soil under the condition of rainfall infiltration, and the velocity of the wetting front gradually decreases with the depth increasing. When the wetting front arrives, the water content of the soils at different depths shows a first steep rise and then a gradual increase, and the soil saturation can reach 80%. The rainfall infiltration reduces the shear strength of the soil, and with the increase of the rainfall duration, the saturated area in the slope soil increases, and the deformation of some parts in slope soil increase, and then the deformation of those parts gradually expands to form a shear band, resulting in landslides. Therefore, the loess slope should be set drainage measures to avoid landslides caused by rainfall infiltration and other natural disasters.

Key words: loess slope; rainfall infiltration; penetration law; shear strength; slope stability

降雨入渗是诱发黄土边坡失稳的主要因素之一,边坡失稳会导致滑坡等自然灾害的发生^[1]。近年来,为了解决退耕还林造成的耕地减少及粮食安全问题,延安市启动了治沟造地工程,在工程实施过程中,开挖形成了大量裸露的黄土边坡,这些边坡遇到持续的强降雨天气时发生降雨入渗过程,一方面造成土体容重增大,增大土体的下滑力;另一方面造成土体抗剪强度降低,进而使坡体的稳定性降低^[2-8]。因此,研究持续

暴雨条件下土体水分入渗及其对黄土边坡稳定性的影响显得尤为重要。很多学者通过室内模拟降雨试验对

收稿日期: 2017-01-20

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2013KTDZ03-03-01)。

作者简介: 钟佩文(1993—),男,江西新余人,硕士研究生,研究方向为黄土边坡稳定性。

通信作者: 张慧莉(1969—),女,河南淅川人,教授,硕士生导师,主要从事水工建筑材料研究工作。

E-mail: huilizhang163@163.com

土壤水分入渗规律进行了研究,一般将降雨入渗过程视为面源垂向一维入渗过程^[9]。Touma等^[10]通过模拟试验和数值计算分析了土壤水分入渗过程中压缩气体对湿润锋运移规律的影响;黄涛等^[11]通过模拟含软弱夹层的均质边坡模型,应用相似条件得到了均质边坡稳定性与地表水入渗量历时关系曲线;孙冬梅等^[12]根据室内土柱试验,建立了基于多相流理论的水-气二相流模型,研究了孔隙气压力的增大对入渗水流的阻碍作用;贾官伟等^[13]通过大型模型试验研究了边坡内部水分场变化对滑坡的影响。笔者针对延安市治沟造地工程中持续强降雨造成的黄土开挖裸露边坡滑坡灾害情况^[14],采用室内模型试验,研究连续暴雨状态下土体内部水分入渗与含水率变化的规律以及含水率变化对边坡土体抗剪强度的影响,采用FLAC3D岩土工程数值计算软件,分析持续降雨条件下黄土裸露边坡的稳定性以及潜在滑动面的变化情况,以期为陕北治沟造地工程中的黄土开挖边坡防护提供技术支撑。

表2 黄土土样的物理性质指标

液限/%	塑限/%	塑性指数/%	按塑性图分类	土粒相对密度	颗粒组成/%			按颗粒组成分类
					>0.050 mm	0.050~0.005 mm	<0.005 mm	
30.7	17.3	13.4	CL	2.71	13.8	71.7	14.5	粉质黏土

1.2 试验方法

降雨入渗试验采用土柱表面的积水进行入渗,试验装置为高220 cm的圆柱形有机玻璃长管,横截面内径14 cm、外径15 cm,填土高度210 cm。考虑到圆管内土样的孔隙比控制和制样的均匀程度,将长管截成5段,每段有机玻璃长管间紧密接触并使用橡胶膜和铁环箍紧,以防止装置在试验过程中漏气。为了便于观测水分入渗过程中的湿润锋,在有机玻璃表面贴上刻度尺。有机玻璃顶端与大气连通,底端插入底座土层中,便于排水和透气。试验采用马氏瓶提供水源,并通过马氏瓶控制土柱顶端表面保持2 cm的积水深度。采用安装在土柱不同深度的5支EC-5土壤水分传感器测定土体含水率,每5 min测一次,自动记录数据。降雨入渗试验装置如图1所示。

降雨入渗试验共进行2次,试验I模拟密度为1.35 g/cm³的坡体上部土体的降雨入渗情况,试验II模拟密度为1.53 g/cm³的坡体下部土体的降雨入渗情况。制样时将现场采集的扰动土粉碎,过2 mm筛,配置的含水率为12.5%,然后密封静置48 h后制备试样。制备试样前,先在有机玻璃管内表面涂抹凡士林防止边壁渗漏。采用分层(每层高度为5 cm)捣实的方法,捣实后刨毛处理,用质量法和体积总量法控制土

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用黄土土样于2016年5月10日取自陕西省延安市万花山治沟造地工程开挖的两级边坡,土样的天然含水率和密度见表1。试验测得土体表层以下2 m范围内土壤干密度和含水率变化不大,坡体上部、下部土壤的干密度平均值分别为1.35、1.53 g/cm³,天然含水率在12.5%附近,属于Q₃黄土。试验土样的物理性质指标见表2。

表1 黄土土样天然含水率和密度测试结果

坡体部位	土层深度/cm	天然含水率/%	天然密度/(g·cm ⁻³)	干密度/(g·cm ⁻³)
上部	0~70	12.27	1.48	1.32
	70~140	12.74	1.57	1.39
	140~210	13.66	1.52	1.34
下部	0~70	11.56	1.74	1.56
	70~140	12.67	1.70	1.51
	140~210	13.17	1.72	1.52

样的干密度。试验I累计历时103 h,试验II累计历时402 h。试验中将地下水埋深视作无限深,现场试验观测到边坡土层土体均匀,无明显层状,无虫孔裂隙等发育,因此将水分入渗土体过程视为活塞式入渗^[15];另外,鉴于试验过程中土柱上方积水层厚度均匀,因此仅考虑湿润锋的垂向运动^[16]。

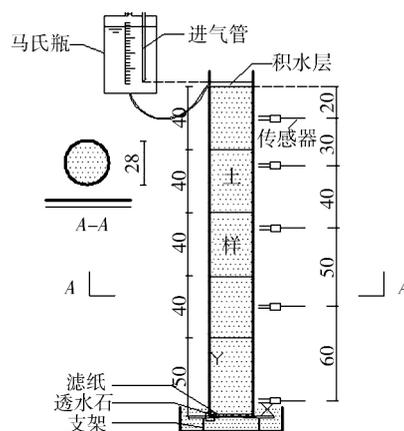


图1 降雨入渗试验装置示意(单位:cm)

试验前对传感器进行标定,通过SAS软件的REG模块对标定数据进行线性拟合,拟合表达式为

$$y = 0.982x - 0.013 \quad (R^2 = 0.956) \quad (1)$$

式中: x 为传感器输出体积含水率; y 为烘干法测得的

土壤体积含水率。

为研究降雨入渗过程中土壤含水率变化对抗剪强度的影响,采用DSJ-3型电动四联等应变直剪仪分别对干密度为1.35、1.53 g/cm³两种原状试样进行了不同含水率的抗剪强度试验,试样配置含水率分别为12%、14%、16%、18%、20%、23%、26%、29%。试验的剪切速率为0.80 mm/min,分别测量50、100、200、300 kPa 4种垂直压力下的抗剪强度。

2 试验结果分析

2.1 入渗过程中湿润锋运移规律

为研究垂向一维空间上湿润锋运移规律,根据传感器安装位置,将运移区间分为5段,分析湿润锋运移速率,见表3。

表3 不同区段湿润锋运移速率

运移区间/cm	试验 I		试验 II	
	运移时间/min	运移速率/(cm·min ⁻¹)	运移时间/min	运移速率/(cm·min ⁻¹)
0~20	105	0.191	315	0.064
20~50	450	0.067	970	0.031
50~90	795	0.050	2 175	0.018
90~140	1 200	0.042	4 175	0.012
140~200	1 710	0.035	7 910	0.008
0~200	4 260	0.047	15 545	0.013

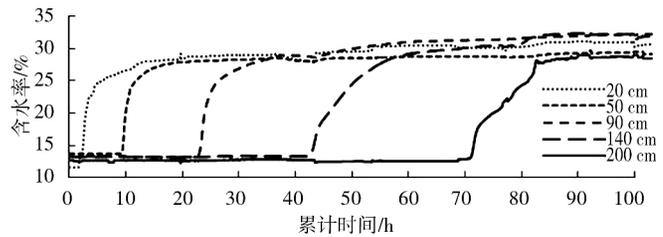
饱和区、过渡区、传导区和湿润区为水分入渗过程中含水率分布的4个典型分区。湿润锋为湿润区的前缘,试验过程中湿润锋运移速率呈减小趋势,这与土体中封闭气泡的影响有关。随着湿润锋的推移,土柱中气体不断向下运移,气泡的体积随之不断压缩,从而导致气泡体积减小而气压增大。当水流无法冲散气泡或使气泡溶解时,土体孔隙中的水分必然改变原始的运移路径,绕过气泡而流动,从而延长了水流路径,增大了入渗时间,进而导致土体非饱和渗透系数降低,宏观上导致湿润锋的运移速率不断降低。

试验 I 中0~20 cm 区间段湿润锋运移速为0.191 cm/min,20~50 cm 区间段湿润锋运移速率大幅度降低至0.067 cm/min,之后运移速度降低较缓,试验 II 中也出现类似现象。说明土柱浅层水分入渗较快,到达一定深度之后,封闭气泡无法再从表层土体逸出到空气中,而是被湿润锋推移至深层土体内,从而引起运移速度骤降。

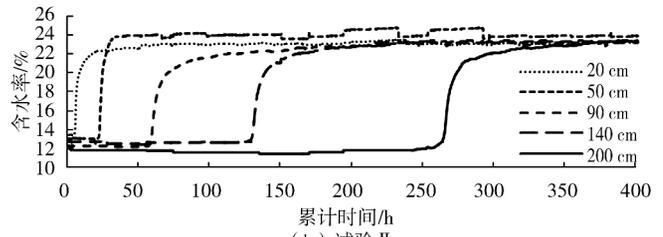
相对于试验 I,试验 II 干密度增大,孔隙比减小,土样中孔隙的体积较小,渗透面积减小,从而使水流向下扩散更加困难。试验 II 的孔隙比相比试验 I 减小23.0%,导致湿润锋运移速率减小72.6%,说明土体孔隙比对水分入渗影响显著。

2.2 同一深度土体含水率变化特征

不同深度土体含水率随入渗时间推移的变化情况如图2所示。可以看出,当湿润锋到达时,不同深度土体含水率均呈现先陡升再趋于平缓上升的变化。土体含水率变化过程可使用 Logistic 函数拟合,采用 SAS 软件中内置的 NLIN 模块拟合得到拟合公式。表4及图3为试验 I 的拟合结果。拟合优度均在0.95以上,拟合效果良好。



(a) 试验 I



(b) 试验 II

图2 不同深度土体含水率随时间变化曲线

表4 试验 I 拟合公式和相应参数

土体深度/cm	K	A	B	R ²
20	25.921	0.324	-0.017	0.984
50	26.917	0.036	-0.019	0.980
90	26.652	0.272	-0.013	0.987
140	25.977	-0.060	-0.006	0.988
200	23.191	-0.385	-0.006	0.952

注:拟合公式为 $Y = \frac{K}{1 + e^{-(A+Bx)}}$; R² 为拟合优度

2.3 不同深度土体饱和经历时间

不同深度土体含水率从开始变化时刻到稳定状态所经历的时间见表5。天然状态下土体在水分入渗过程中难以达到完全饱和状态,试验 I 不同深度土壤含水率稳定时饱和度平均值为77.27%,试验 II 为82.39%。

试验结果表明,土体饱和所需时间随土层深度增加而延长,这是封闭气泡向下扩散的累积效应造成的,深处土层中封闭的气泡较多,减小了渗透面积,不容易达到饱和。相比之下,试验 II 中土体饱和经历时间更长,原因是干密度大的土样孔隙比小,土体中封闭的气泡逸出路径更狭窄,气泡更难扩散,渗透面积减小更多,更不容易达到饱和。

2.4 降雨入渗对土体抗剪强度的影响

土体的含水率随着降雨入渗不断增加,通过测试

不同含水率条件下黄土的抗剪强度,分析降雨入渗对土体强度的影响。不同含水率条件下两种干密度黄土试样的抗剪强度试验结果见表6。分别用二次曲线与

直线的方程式拟合了黏聚力 C 与内摩擦角 φ 随含水率 ω 的关系,拟合优度均在 0.95 以上,拟合结果分别见图4及表7。

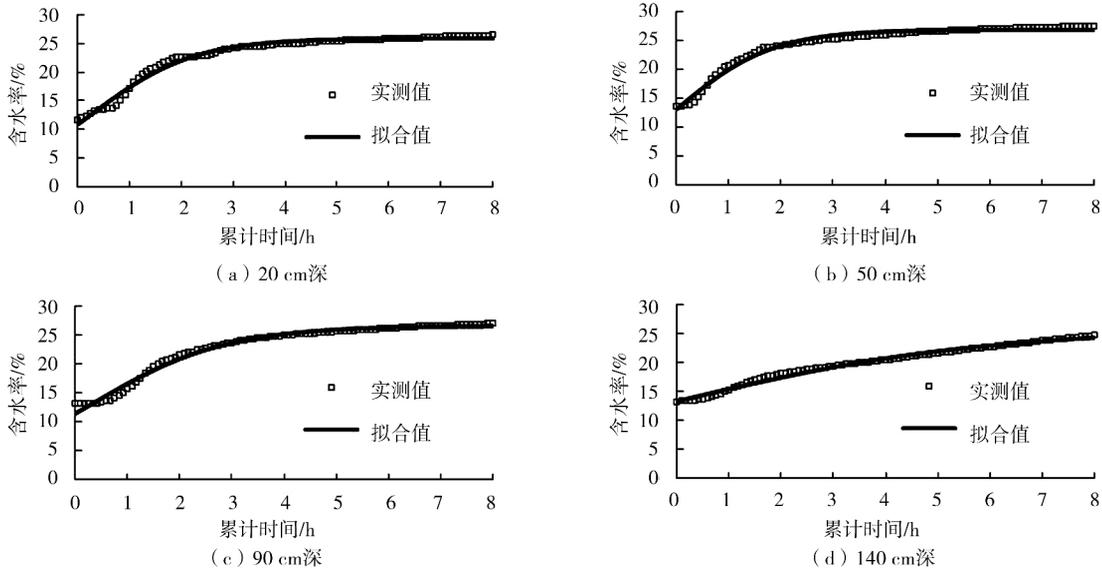


图3 试验 I 不同深度土体含水率与累计时间拟合曲线和实测值对比

表5 不同深度土体饱和经历时间

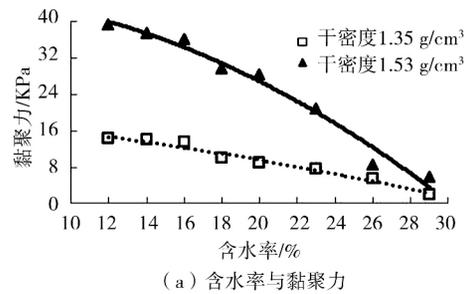
土体深度/cm	试验 I				试验 II			
	初始含水率/%	稳定含水率/%	饱和时间/h	饱和度/%	初始含水率/%	稳定含水率/%	饱和时间/h	饱和度/%
20	11.56	28.00	12.75	75.88	13.42	23.45	12.92	82.40
50	13.66	28.01	13.17	75.91	13.04	23.95	17.92	84.15
90	13.17	28.81	14.75	78.08	12.27	23.18	56.83	81.45
140	13.35	29.24	18.25	79.24	12.73	23.33	68.83	81.97
200	12.92	28.50	17.92	77.24	12.05	23.33	89.58	81.97

表6 直剪试验强度参数

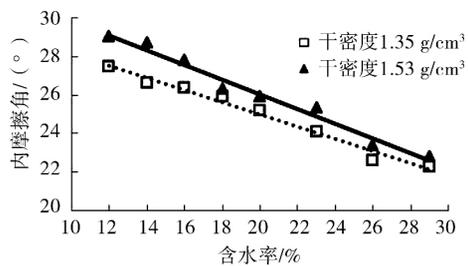
干密度/(g·cm ⁻³)	含水率 ω /%	黏聚力 C /kPa	内摩擦角 φ /(°)
1.35	12	14.246	27.5
	14	14.023	26.6
	16	13.384	26.3
	18	9.904	25.9
	20	8.934	25.2
	23	7.603	24.1
	26	5.597	22.6
1.53	29	2.004	22.3
	12	39.116	29.0
	14	37.450	28.7
	16	36.010	27.8
	18	29.577	26.3
	20	28.332	25.9
	23	20.784	25.3
26	8.543	23.4	
29	5.672	22.8	

试验结果表明:土体的黏聚力 C 与内摩擦角 φ 随含水率的增大而减小,对于干密度为 1.53 g/cm³ 的土样,当含水率从 12% 增加到 29% 时,黏聚力从 39.116 kPa 降低到 5.672 kPa,内摩擦角从 29.0° 降低到 22.8°。原因是当土体的含水率增加时,土颗粒之间的化学胶

结物质部分被溶解,同时土体的基质吸力减小,土颗粒之间的黏结强度降低,因而黏聚力 C 减小。另外,随着土体含水率增大,土颗粒表层的水膜增厚,甚至自由水增加,土体破坏时土颗粒之间的摩擦力减小,内摩擦角 φ 减小。



(a) 含水率与黏聚力



(b) 含水率与内摩擦角

图4 含水率与抗剪强度参数的关系

表7 含水率与抗剪强度参数的拟合公式

参数	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	拟合公式	拟合优度
C	1.35	$C = -95.698\omega^2 - 33.356\omega + 20.076$	0.971
	1.53	$C = -549.17\omega^2 + 11.125\omega + 46.594$	0.977
φ	1.35	$\varphi = -31.787\omega + 31.339$	0.982
	1.53	$\varphi = -38.371\omega + 33.728$	0.978

3 降雨条件下边坡稳定性数值计算分析

在降雨入渗条件下,土体的抗剪强度明显降低,直接影响着黄土边坡的安全稳定性,采用FLAC3D岩土工程数值计算软件对这种影响进行定量分析。根据延安地区治沟造地工程实践,建立两级台阶的边坡几何模型,选取边坡坡高8m,单级坡高4m,单级坡比1:0.5,两级中间留有2m宽的平台。为了简化模型,根据延安地区实用水文手册中不同重现期最大7d暴雨量和特征值表等系列水文资料,认为在连续暴雨状态下,坡顶、坡底以及平台将维持2cm的稳定积水层,持续向下入渗。研究区坡体地下水位较深,降雨期间水分没有入渗至地下水位处。根据上文积水入渗试验所得到的不同土体降雨入渗的湿润锋运移速度,可以计算出不同时刻湿润锋到达的位置,湿润锋以上土体处于饱和状态,饱和含水率为试验过程中传感器测得的稳定含水率。湿润锋以下土体为天然状态,含水率为现场试验所测得的数据。不同分区及不同含水率条件下土体的物理力学性质指标见表8,暴雨持续48h后

的边坡分区及饱和土体分区的模型示意图见图5。

表8 边坡各个分区物理力学性质指标

土体分区	土体状态	干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水率/%	容重/ ($kN \cdot m^{-3}$)	C/kPa	$\varphi/(^\circ)$
I区	饱和	1.35	28.51	17.349	2.786	22.28
II区	天然	1.35	12.47	15.183	14.428	27.38
III区	饱和	1.53	23.45	18.888	19.009	24.73
IV区	天然	1.53	12.89	17.272	38.903	28.78

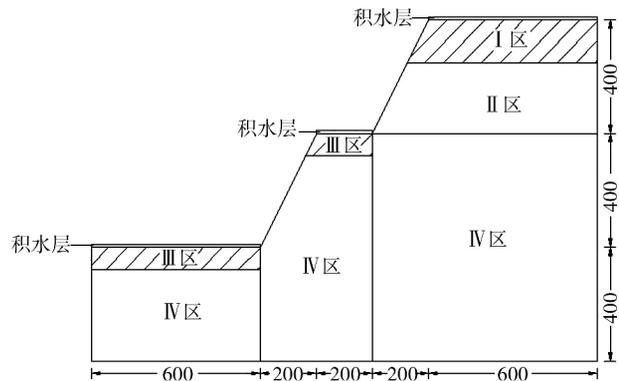


图5 边坡模型分区示意(单位:cm)

采用FLAC3D岩土工程数值计算软件按强度折减法计算不同降雨历时条件下的边坡稳定安全系数,表9为不同降雨历时的边坡安全系数,图6为剪应变增量云图。

表9 黄土边坡稳定安全系数

降雨历时 t/h	0	12	24	48	72	108
安全系数 F	1.95	1.90	1.83	1.20	1.03	0.94

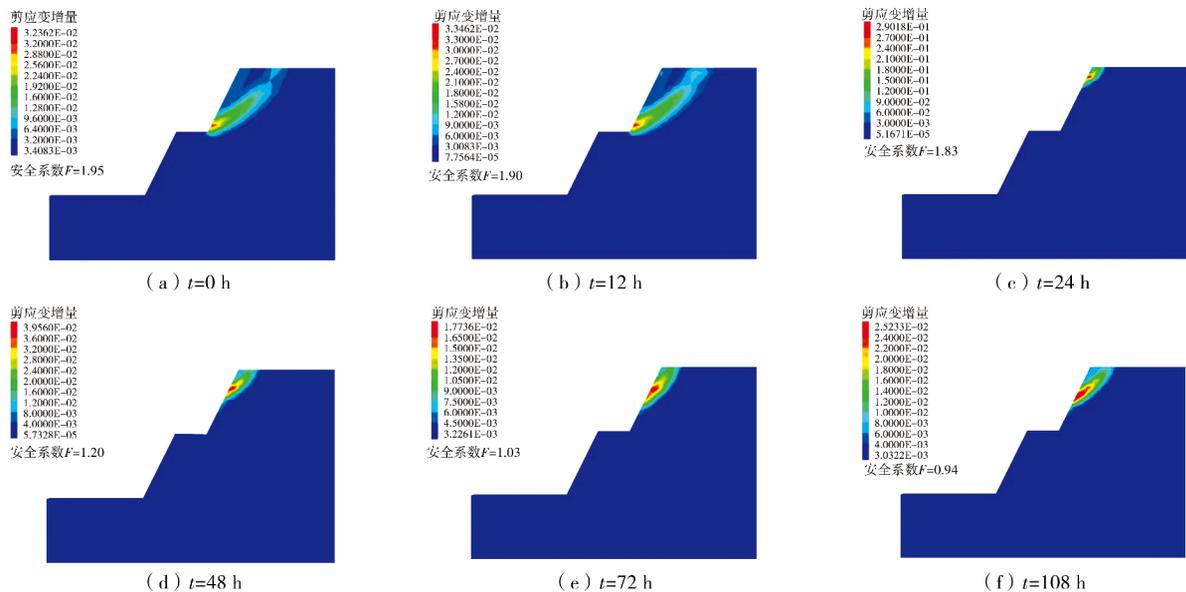


图6 不同降雨历时的黄土边坡剪应变增量云图

计算结果表明:随着降雨历时增加,雨水入渗深度增大,边坡土体中的饱和区域增大,土体的强度降低,土体局部的剪切变形增大,由应力集中引起的局部塑性变形逐步扩展至整个剪切带,从而导致滑坡;降雨

72h时边坡安全系数降至1.03,边坡濒临破坏;降雨108h时的安全系数降至0.94,坡体将产生滑坡。因此,在工程实践中,黄土边坡应设置排水措施,避免降雨入渗引起土体含水率增加而发生滑坡等自然灾害。

4 结 论

(1) 在持续降雨入渗条件下,黄土边坡浅层土体中湿润锋运移速度较快,随着深度的增加湿润锋运移速度逐渐减缓,原因是在降雨入渗过程中,随着湿润锋的推移,土体中的气泡无法再从表层土体逸出到空气中,越深的土层中封闭的气泡越多,减小了土体的渗流面积,从而降低了土体的渗透系数,导致湿润锋运移速度逐渐减缓。土体的孔隙比对降雨入渗有显著的影响,土体的密度越大,孔隙比越小,土体的渗透面积越小,渗透系数越小,湿润锋运移速度也越小。

(2) 在持续降雨入渗条件下,不同深度土体含水率均呈现先陡升再趋于平缓上升的变化,这种变化过程可用 Logistic 函数较好地进行拟合,拟合优度在 0.95 以上。天然状态下土体在水分入渗过程中难以达到完全饱和状态,饱和度仅可达到 80%。

(3) 土体的黏聚力 C 与内摩擦角 φ 随含水率的增大而减小,原因是含水率增加时,土颗粒之间的化学胶结物质部分被溶解,同时土体的基质吸力减小,土颗粒之间的黏结强度降低,因而黏聚力 C 减小;随着土体含水率增大,土颗粒表层的水膜增厚,甚至自由水增加,土体破坏时土颗粒之间的摩擦力减小,因而内摩擦角 φ 减小。

(4) 随着降雨历时增加,雨水入渗深度增大,边坡土体中的饱和区域增大,土体的强度降低,土体局部的剪切变形增大,由应力集中引起的局部塑性变形逐步扩展至整个剪切带,从而导致滑坡。黄土边坡应设置排水措施,避免降雨入渗引发滑坡等自然灾害。

参考文献:

[1] 严绍军,唐辉明,项伟.降雨对滑坡稳定性影响过程分析[J].水文地质工程地质,2007,34(2):33-36.

[2] 王晓峰,刘光焰,刘均利,等.降雨入渗与滑坡关系研究综述[J].人民黄河,2006,28(8):25-27.
 [3] 李峰,郭院成.降雨入渗对边坡稳定性作用机理分析[J].人民黄河,2007,29(6):44-48.
 [4] 杨姗姗,邓华锋,黄坚,等.滑坡灾害与降雨关系研究[J].人民黄河,2010,32(8):128-131.
 [5] 刘汉东,党灿,刘顺,等.滑坡体在降雨条件下的稳定性分析[J].人民黄河,2012,34(3):65-67.
 [6] 周跃峰,谭国焕,甄伟文,等.入渗诱发黄土滑坡的力学机制[J].岩土力学,2013,34(11):3173-3179.
 [7] 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.
 [8] 任佳,巩立国.降雨模式对土质边坡稳定性的影响[J].人民黄河,2016,38(4):85-88.
 [9] 刘海军,龚时宏.喷灌条件下土体水分入渗的数学模拟[J].灌溉排水学报,2006,25(2):15-19.
 [10] TOUMA Jaoudat, VAUCLIN Michel. Experimental and Numerical Analysis of Two-Phase Infiltration [J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52: 10-16.
 [11] 黄涛,罗喜元,邱强.地表水入渗环境下边坡稳定性的模型试验研究[J].岩土力学与工程学报,2004,23(16):2671-2675.
 [12] 孙冬梅,朱岳明,张明进.考虑气相影响的降雨入渗过程分析研究[J].岩土力学,2008,29(9):2307-2313.
 [13] 贾官伟,詹良通,陈云敏.水位骤降对边坡稳定性影响的模型试验研究[J].岩土力学与工程学报,2009,28(9):1798-1803.
 [14] 贺春雄.延安治沟造地工程的现状、特点及作用[J].地球环境学报,2015,6(4):255-260.
 [15] 王大纯,张人权,于青春.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,1995:63-65.
 [16] ZHAO P P, SHAO M A, MELEGY A A. Soil Water Distribution and Movement in Layered Soils of a Dam Farmland [J]. Water Resources Management, 2010, 24(14): 3871-3883.

【责任编辑 张华兴】

(上接第61页)

[20] 施玉群,刘亚莲,何金平.关于突变评价法几个问题的进一步研究[J].武汉大学学报(工学版),2003,36(4):132-136.
 [21] 李宗坤,葛巍,王娟.改进的突变评价法在土石坝施工期风险评价中的应用[J].水利学报,2014,45(10):1256-1260.
 [22] 李绍飞,唐宗,王仰仁.突变评价法的改进及其在节水型社会评价中的应用[J].水力发电学报,2012,31(5):48-55.
 [23] 朱党生,张建永,程红光,等.城市饮用水水源地安全评价(1):评价指标和方法[J].水利学报,2010,41(7):778-785.
 [24] 石济开,邵超峰,鞠美庭.石油化工企业环境风险分级评价

指标体系研究[J].安全与环境学报,2015,15(2):324-330.
 [25] 蔡灵,吴渝婷,吴耀建.滨海石化项目环境综合风险评估方法研究[J].环境工程,2016,41(3):187-190.
 [26] 王亚伟,钱瑜,张伟,等.次生环境风险的系统识别方法[J].环境科学与技术,2009,32(12):199-202.
 [27] 戴树和.工程风险分析技术[M].北京:化学工业出版社,2007:101-110.
 [28] 姚志麒.关于采用环境质量指数的几个问题[J].环境科学,1979(2):39-47.

【责任编辑 翟成亮】