

文章编号: 1673-9469 (2019) 03-0039-07

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.008

降雨条件下堆积层滑坡变形特征及形成机理研究

郭敏¹, 苏生瑞¹, 曾金^{1,2}

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710054)

摘要: 以陕西省岚皋县广泛发育的堆积层滑坡为研究对象, 借助土工试验、物理模拟和数值模拟手段, 揭示了降雨条件下滑坡的变形和渗透规律, 研究了降雨诱发堆积层滑坡的变形破坏特征及形成机理。物理模型试验表明: 堆积层斜坡内渗流速率与时间呈幂函数关系, 关系式为 $y=6.658\ 83x^{-0.900\ 34}$; 在降雨和地下水位变动下, 堆积层滑坡主要表现为牵引式, 其发展过程可概括为: 裂缝的产生→裂缝的扩展→裂缝的贯通→次级滑动→整体滑动五个阶段; 堆积层滑坡的二元结构是该滑坡形成的决定性因素, 降雨入渗导致地下水在基岩面附近富集是该滑坡发生的重要诱发因素。数值模拟结果表明: 随着地下水作用时间的持续, 坡体稳定性逐渐降低, 剪应变逐渐增大, 斜坡变形逐渐增加。

关键词: 滑坡; 堆积层滑坡; 物理模型; 数值模拟; 渗流

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

Deformation Characteristics and Formation Mechanism of Accumulated Landslides Under Rainfall Conditions

GUO Min¹, SU Shengrui¹, ZENG Jin^{1, 2}

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710054;

2. China Railway First Survey & Design Institute Group Co., Ltd, Shaanxi Xi'an 710054)

Abstract: This paper takes the developed landslide in Langao County of Shaanxi Province as the research object with the help of geotechnical experiments, physical simulation and numerical simulation, reveals the deformation and infiltration law of landslide under rainfall conditions, and studies the deformation and failure characteristics and formation mechanism of rainfall – induced accumulation landslide. The physical model test shows that: The relationship between seepage rate and time is exponential, and the relationship is $y=6.658\ 83x^{-0.900\ 34}$; With the rainfall and changes of groundwater level, the accumulation of landslides is mainly characterized by traction whose development process can be summarized as follows: the generation of cracks → the expansion of cracks → the penetration of cracks → secondary sliding → overall sliding five stages; It is found that the binary structure of the landslide is the decisive factor in the formation of the landslide. The rainfall infiltration leads to the enrichment of the water flow near the bedrock surface, which is an important predisposing factor for the landslide. Numerical simulation results show that the slope stability decreases with the duration of groundwater, and the shear strain and the slope deformation increase gradually.

Key words: landslides; accumulation landslide; physical model; numerical simulation; seepage

全国地质灾害通报表明, 近年来发生的地质灾害中, 滑坡灾害占 69.34%。造成滑坡灾害的主要因

素为降雨。因此在降雨条件下, 滑坡变形特征及形成机理的研究尤为重要。汤明高等人为研究库水位

收稿日期: 2019-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (4167020392)

作者简介: 郭敏 (1993-), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 从事地质灾害方面的研究。

变化的条件下滑坡变形特征和机理,对典型滑坡进行了物理模型试验,为库区滑坡工程防治和治理提供了参考依据^[1-3];于一帆,许书雅等利用振动台对堆积层滑坡进行了物理模型试验,从而得出在对峰值加速度的影响是地震波的水平分量弱于垂直分量^[4];李洁,邓华锋等人通过对在长期浸泡和干湿循环的试验条件下的岩石进行物理力学实验,分析其力学特性,得出砂岩在含水率反复变化情况下的力学特性,为库区滑坡工程研究提供依据^[5-6];唐睿旋以典型堆积层滑坡为例,通过资料收集,运用现场调查和遥感图像解译方法,对堆积层滑坡的稳定性和易发性进行了研究^[7];李清梦、苟格等在暴雨条件下开展了4组细粒土含量不同的模型试验,进而分析堆积层滑坡变形特征和机理^[8];黄鹏程等通过数值模拟等方法,对典型的库区滑坡进行了研究,得出随着滑坡水位的上升滑坡的变形速率增大^[9]。基于前人的研究成果,本文以岚皋县广泛发育的堆积层滑坡为例,用物理模型和数值分析的方法,揭示了降雨条件下滑坡的变形和渗透规律,研究了降雨诱发堆积层滑坡的变形破坏特征及形成机理。

1 模型试验系统设计及设计方案

1.1 相似关系

本次试验物理量个数为10个,基本量纲数3个,即质量 M 的量纲,长度 L 的量纲和时间 T 的量纲,根据相似理论,选择 l 、 ρ 、 t 为基础物理量,其余的为函数物理量,建立量纲矩阵,基于 π 定理,采用量纲分析法得到以下7个相似准则:

$$\pi_1 = \frac{s}{l^2}, \quad \pi_2 = \frac{V}{l^3}, \quad \pi_3 = \frac{\gamma l^2}{\rho l}, \quad \pi_4 = \omega,$$

$$\pi_5 = \frac{ct^2}{\rho l^2}, \quad \pi_6 = \varphi, \quad \pi_7 = \frac{Et^2}{\rho l^2}$$

式中: s —面积; V —体积; ρ —密度; γ —重度; ω —含水率; c —粘聚力; φ —内摩擦角; E —变形模量; t —实验时间。

模型箱的尺寸为1.0 m×0.6 m×1.2 m,试验几何相似关系拟定为 $C_l=100$,并且由于模型的材料与原型材料相同,故有 $C_\gamma=1$, $C_\rho=1$ 等,因此确定本次试验各物理量相似常数如表1。

1.2 试验模型及系统

本次试验模型箱框架由槽钢、钢板和钢化玻璃组成。以砖头堆砌模拟基岩,水泥砂浆抹面为滑面。采用分层填筑,夯实打毛后进行下一次填筑,在填筑完成后进行砂柱的填充和水头测量装置的埋设。将间距10 cm×10 cm,竖向9排,横向7排的位移标记点布设于坡面上(图1)。

1.3 数据观测

通过观测一定时间内水渗流距离来确定水的渗流速率,通过观察量测斜坡面上布设位移标记点的位置变化,记录各位置位移变化。

2 试验结果

2.1 渗透发展阶段

观察某时刻渗流距离,从而得出入渗速率与时间的关系,数据见表2。

表1 模型试验相似常数
Tab.1 Similarity constants of model tests

物理量	相似关系	相似常数	物理量	相似关系	相似常数
长度 l	C_L	100	含水率 ω	C_ω	1
面积 s	$C_S=C_L^2$	100 ²	粘聚力 c	$C_c = C_l/C_\gamma$	100
体积 V	$C_V=C_L^3$	100 ³	内摩擦角 φ	C_φ	1
密度 ρ	C_ρ	1	变形模量 E	$C_E = \frac{C_\rho \cdot C_L^2}{C_t^2}$	100
重度 γ	C_γ	1	实验时间 t	C_t	1

表2 入渗速率与时间关系表
Tab.2 Table of relation between infiltration rate and time

历时/min	0	30	90	170	260	420	1 375	1 735	1 945
入渗速率/(cm·min ⁻¹)	0	0.316 7	0.1	0.05	0.05	0.046 9	0.027 2	0.020 8	0.033 3

采用 OriginPro 8 拟合渗流速率与时间的曲线，对渗流的时间与速率进行分析，由入渗速度与时间曲线(图2)可以得出：两者呈幂函数关系，关系式为 $y=6.658\ 83x^{-0.900\ 34}$ ，且相关系数 $R^2=0.965\ 55$ 。入渗速度随时间在逐渐减慢，最终速度趋于稳定，在这个过程中土体逐渐趋于饱和状态。



图1 模型示意图

Fig.1 Schematic of the model

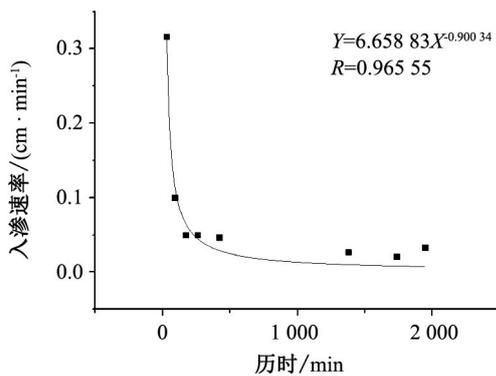


图2 入渗速率与时间关系

Fig.2 Relation of infiltration rate and time

运用统计学显著性检验检验拟合曲线的可靠性。线性化幂函数关系 $y=6.658\ 83x^{-0.900\ 34}$ ，即 $\ln y = -0.900\ 34 \ln x + \ln 6.658\ 83$ ，令 $a = \ln x$ 、 $b = \ln y$ ，则 $b = -0.900\ 34a + 1.895\ 9$ 。 a 、 b 关系见表3。

对 $H_0: \beta_1=0$ 的检验基于 t 分布进行，由于 $\hat{\beta}_1 \sim N\left(\beta_1, \frac{\sigma^2}{l_{aa}}\right)$ ， $\frac{S_e}{\sigma^2} + X^2(n-2)$ ，且与 $\hat{\beta}_1$ 相互独立，因此在此 H_0 为真时，

$$t = \frac{\hat{\beta}_1}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 / l_{aa}}} \sim t(n-2) \quad (1)$$

其中

$$\hat{\sigma} = \sqrt{S_e / (n-2)} \quad (2)$$

$$S_e = \sum (b_i - \hat{b}_i)^2 \quad (3)$$

$$l_{aa} = \sum (a_i - \bar{a})^2 \quad (4)$$

式中： x —历时； y —入渗速率； $\hat{\beta}_0$ 、 $\hat{\beta}_1$ —回归方程的参数； n —样本含量； S_e —原始值和预测值的差的平方的和； σ — b 的标准误差； l_{aa} —过程量； $\hat{\sigma}$ —预测值 \hat{b} 标准误差的估计； t —检验统计量。

取 $n=6$ ，代入数据得 $t=-6.018\ 2$ 。取 $\alpha=0.01$ ，则 $t_{1-\frac{\alpha}{2}}(n-2) = t_{0.995}(6)=3.707\ 4$ 。

由 $6.018\ 2 > 3.707\ 4$ ，即 $|t| > t_{0.995}(6)$ ，因此在显著性水平为 0.01 下回归方程是显著的。即速度与时间曲线呈幂函数关系且关系式为 $y=6.658\ 83x^{-0.900\ 34}$ 在显著性水平为 0.01 下是显著的。

2.2 滑坡发展过程

2.2.1 次级滑坡发展过程

一级滑坡发展与形成阶段：随着水入渗量的增加坡脚先达到饱和状态，且于第五天在坡脚出现横向裂纹，第六天裂缝贯通，在坡脚发生小部分滑动。二级滑坡发展与形成阶段：随着降雨和渗透的继续，于第八天一级滑坡上侧出现一条细小裂纹，随着降雨和渗透的继续发生，裂缝数量与宽度增加，于第十天裂缝呈圆弧状贯通，1 min 后发生滑动。三级滑坡发展与形成阶段：在二级滑坡裂缝发展过程中，二级滑坡后壁上侧已形成三条宽度小于 1 mm 的裂缝，随着入渗和人工模拟降雨的继续，第十一天裂缝完全贯通，在 1 min 内发生滑动(图3、图4)。



图3 次级滑坡滑动正面图

Fig.3 The front view of the secondary Landslide sliding

表3 入渗速率与时间线性化关系表

Tab.3 Linearization relationship between infiltration rate and time

$a=\ln x$	3.401 2	4.499 8	5.135 8	5.560 7	6.040 3	7.226 2	7.458 8	7.573 0
$b=\ln y$	-1.149 8	-2.302 6	-2.995 7	-2.995 7	-3.059 7	-3.604 5	-3.872 8	-3.402 2
预测值 \hat{b}	-1.166 3	-2.155 4	-2.728 1	-3.110 6	-3.542 4	-4.610 1	-4.819 6	-4.922 6



图4 次级滑坡滑动侧面图

Fig.4 The side view of the secondary landslide sliding

在主滑坡发生前,有三级滑坡发生。滑动发展过程均为:随着降雨的发生滑坡土体重力不断增加,坡面产生细小裂纹,裂纹宽度加大、深度加深直至裂纹横向贯通,次级滑坡发生滑动。

2.2.2 主滑坡发展过程

主滑坡发展与形成:第八天滑坡后壁内部出现大量竖向细微拉张裂缝。第十天裂缝继续发展,发展至基岩面(图5),且在表面也出现了细小裂缝。

同时靠近后壁处,于第十一天14:35出现8条长度在2.5~15 cm之间、宽度小于1 mm的横向裂缝;同日15:45裂隙加长加宽,部分裂隙贯通发



图5 第十天后壁拉张裂缝

Fig.5 The tenth day back wall tension crack

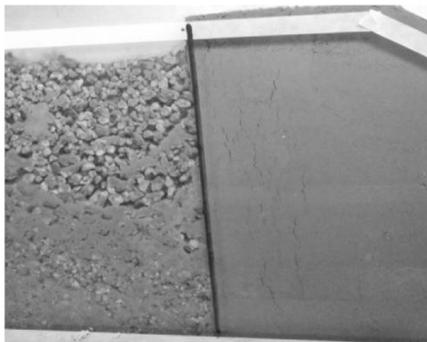


图6 第十一天15:53 裂缝向深度延伸

Fig.6 The eleventh day 15:53 crack extends deep

展为3条宽达4 mm,长在15~23 cm之间的主裂隙;15:53三条主裂隙加宽至5 mm、长度在21~25 cm之间,且在深度方向延伸至6.5 cm(图6);16:00裂缝宽度加至7 mm,且产生一条长12 cm宽3 mm的新裂缝;17:00裂缝宽度增至9 mm,其中两条裂缝贯通,裂缝长度在13~41 cm之间,向深度方向上延伸至7 cm;17:35裂缝贯通,宽度增加至1.5 cm,同时在1 min内滑坡后壁裂缝加宽,滑坡滑动滑面产生,滑坡后壁位错3.5 cm(图7、图8);18:30裂缝宽度加至3 cm、向深度方向延伸至10 cm,滑坡位错6 cm,滑带清晰可见;第十二天7:30裂缝宽至4 cm,滑坡位错8.5 cm,之后观测到滑坡不再滑动,裂缝也不再发展(图9)。

2.3 滑面土体位移

斜坡的位移:坡面上布有9个位置点,各点间距离为10 cm,分别对其进行编号如图10所示,并观测各点的位移。对不同观测时间点的同一点的位移进行分析,观测位移变化规律(图11)。由图分析得出位移由下到上逐渐增大,故该滑坡为牵引式滑坡,但在编号C处出现异常,这是由于D点位移大于C点,而使C点附近土隆起所致。由位移可知在

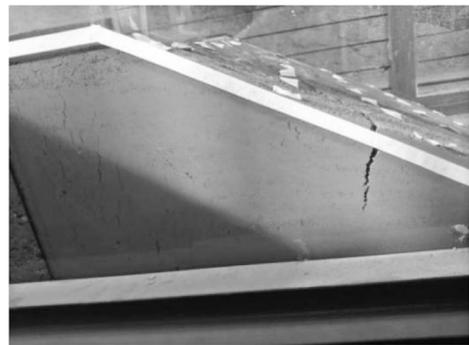


图7 第十一天17:36 坡体滑动

Fig.7 The eleventh day 17:36 slope sliding

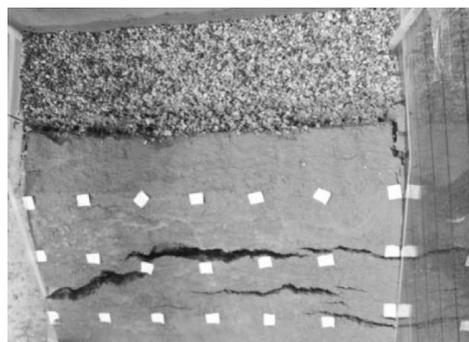


图8 第十一天17:36 坡体滑动侧面

Fig.8 The eleventh day 17:36 slope sliding side



图9 滑坡剖面及平面图

Fig.9 Landslide profile and plan

第十二天早上 7:30 滑坡已达到稳定状态。

结合滑坡发生过程，由于坡脚土体先达到饱和状态故在坡脚处先产生滑动裂缝由坡脚向上延伸，最终发生整体滑动。

模型试验结果表明：在滑坡形成过程中随着入渗的发展，坡脚达到饱和，产生裂缝，裂缝加宽至贯通，最终发生局部滑动。经多个次级滑动，坡脚形成临空面，抗滑力降低。随着时间的推移，坡体上部产生裂缝产生、发展至贯通，最终发生整体滑动。

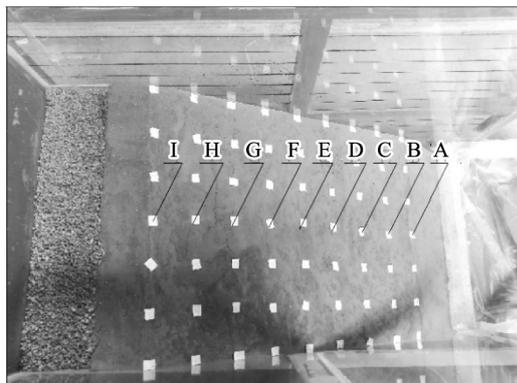


图10 位置点编号

Fig.10 Location point number

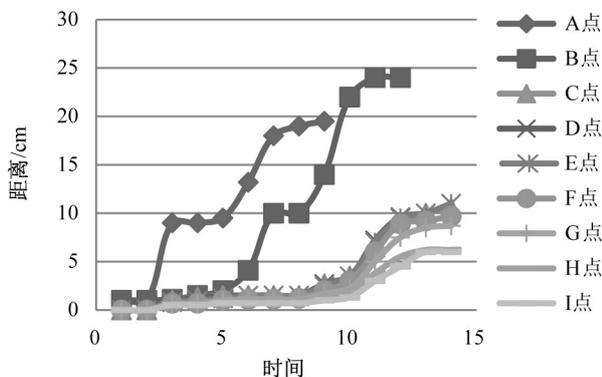


图11 不同观测时间点的同一点的位移分析

Fig.11 Displacement analysis of the same point at different observation time points

3 数值模拟

本文采用 MIDAS/GTS 对缩尺模型进行抽象化概括，通过应力渗流耦合的孔压、位移和塑性分析揭示在降雨条件下堆积层滑坡的滑动特征和形成机理。由于模型在横向上可以认为是均一的，故对该滑坡的主剖面进行二维建模。计算剖面采用物理模型的纵剖面，将上层全部设置为滑体土，底部为基岩；以 0.01 m 为尺寸，划分成四边形网格(图 12)。采用模型试验后土的参数值，即含水率平均为 31.82%，粘聚力 $c=0.012\ 743\ 3\ \text{kPa}$ ，内摩擦角 $\phi=1.596\ 268^\circ$ ，土体重度取值平均值为 $18.42\ \text{kN/m}^3$ 。

利用 Midas/NX 对降雨渗流条件下模型边坡的应力应变进行计算。设置前后及底部边界为固定边界，后缘注水处为入渗边界，压力水头设置为随时间变化的，坡体前缘设置排水边界，水压力为 0；分析持续时间为 11 d，分析步数为 11 步，以对数比例划分时间节点；荷载为自重；将渗透系数设置为 $K=0.504\ \text{m/d}^{[10]}$ (图 12)。

3.1 总位移分析

初始状态下坡体位移最大处在坡面中间部分，为 $S_{\max}=4.211\ 0^{-4}\ \text{cm}$ ，可忽略不计。在第一至九天中坡体的最大位移均在坡面中间部分，且最大位移有向上移动的变化。结合物理模型试验分析，在坡

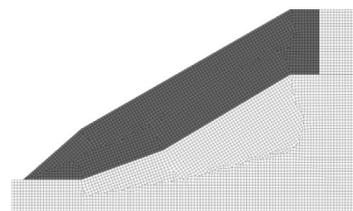


图12 模型网格划分图

Fig.12 Model gridding diagram

体未滑动前,坡体上部坡面较陡,随着地下水的渗流和模拟降雨的继续,含水率和重度增加,上部产生张拉裂缝且裂缝未衍生到滑带,产生的位移随着深度增加而减小。由于坡体下部坡面较缓对整个坡体具有抗滑力,产生的位移并未传至坡脚,使坡面上有隆起现象,故最大位移在靠近裂缝处。第五天总位移 $S_{max}=6.111 \times 10^{-4}$ cm,第八天总位移 $S_{max}=1.331 \times 10^{-3}$ cm(图 13)。

第十天主滑坡开始发生滑动,最大位移在坡脚,最大位移 $S_{max}=1.17$ cm,说明该滑坡的滑动为牵引式滑动。第十一天滑坡趋于稳定最大位移 $S_{max}=18.52$ cm(图 14)。

3.2 孔压分析

由于模拟地下水沿着堆积土层与基岩接触面发生渗流,故在两种岩性接触面上孔压最大。初始状态下的节点渗流最大孔压 $u_{max}=1.800$ kN/m²(图 15)。

在第一至第九天最大孔压的位置和大小均未发生明显变化。

在第十天坡体从坡顶至坡脚产生一条贯通的滑面,为水的渗流提供渗流通道,最大孔隙水压力减小,最大孔压为 $u_{max}=1.683$ kN/m²(图 16)。第十一天滑面完全贯通,坡体中最大孔压减小至 $u_{max}=1.064$ kN/m²。由于坡体整体孔压减小,坡顶滑面处孔压由 $u_{max}=1.403$ kN/m² 减小至 $u_{max}=1.064$ kN/m²,且变为坡体的最大孔压(图 17)。

3.3 有效塑性区

在初始状态至第四天坡体内均无塑性区产生,此时有效塑性应变的最大值 $E_{max}=0$;在第五天坡顶处产生小面积的塑性区,此时 $E_{max}=4.37 \times 10^{-6}$ (图 18);随着渗流的继续,第八天在滑面处产生塑性区,此时 $E_{max}=2.23 \times 10^{-4}$ (图 19)。

第十天塑性区沿滑面几乎贯通,有效塑性应变

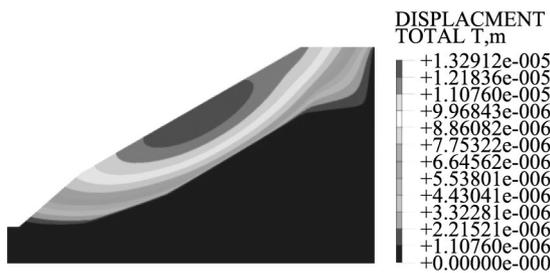


图 13 第八天位移云图

Fig.13 The eighth day displacement nephogram

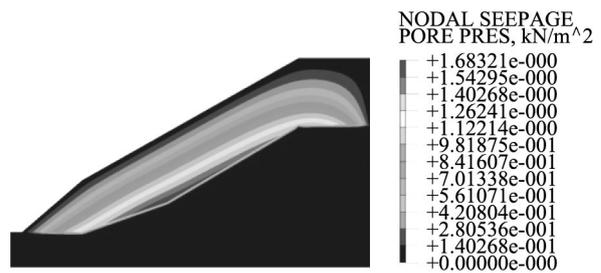


图 16 第十天的孔压云图

Fig.16 Pore pressure nephogram of the tenth day

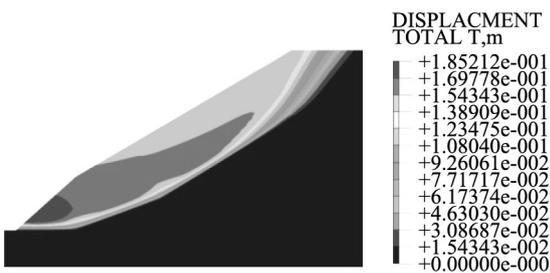


图 14 第十一天位移云图

Fig.14 The eleventh day displacement nephogram

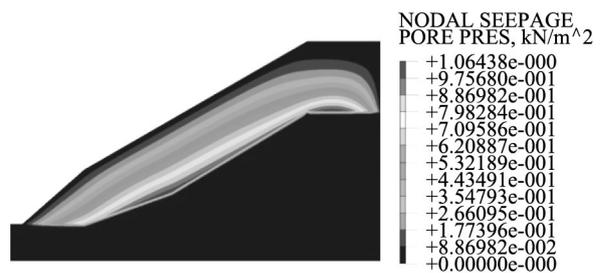


图 17 第十一天的孔压云图

Fig.17 Pore pressure nephogram of the eleventh day

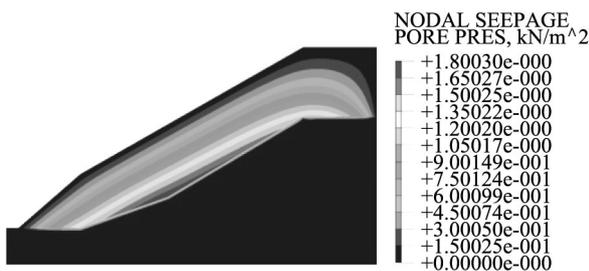


图 15 初始状态下的孔压云图

Fig.15 Pore pressure nephogram of the initial state

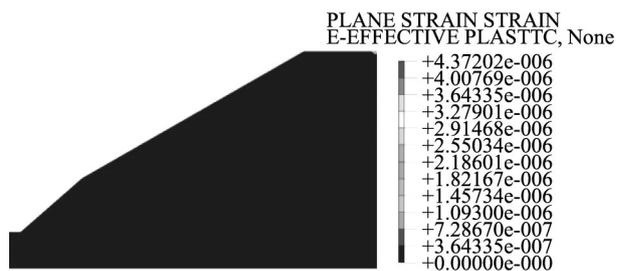


图 18 第五天有效塑性区云图

Fig.18 The effective plastic zone cloud map on the fifth day

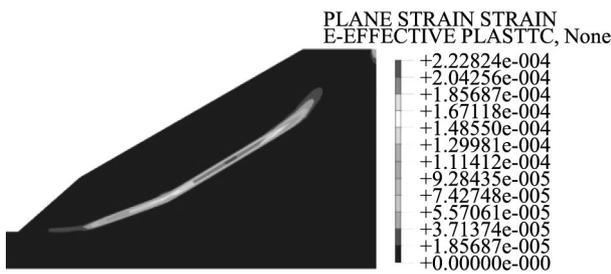


图 19 第八天有效塑性区云图

Fig.19 The effective plastic zone cloud map on the eighth day

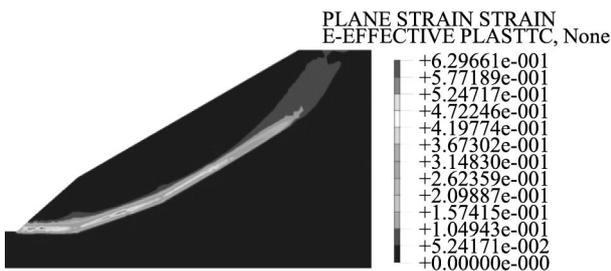


图 20 第十天有效塑性区云图

Fig.20 The effective plastic zone cloud map on the tenth day

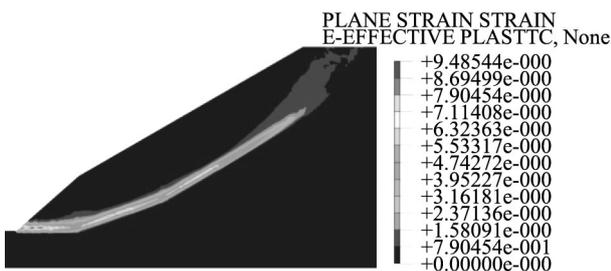


图 21 第十一天有效塑性区云图

Fig.21 The effective plastic zone cloud map on the eleventh day

极剧增加,此时 $E_{\max}=6.30 \times 10^{-1}$ (图 20); 第十一天塑性区贯通整个滑面,此时 $E_{\max}=9.49$ (图 21)。

数值模拟结果表明:随着入渗的发展,坡顶产生塑性区,最终塑性区沿基岩接触面贯通,在塑性区贯通的同时,由于产生渗流通道基岩接触面附加的孔压减小,最终坡体发生整体滑动。

4 结论

随着渗透的进行坡体前缘达到饱和,坡体前缘首先出现破坏,形成临空面,引起坡体应力发生改变。由于小滑坡的形成和坡体中后部裂缝的发展,加速了降雨入渗,使坡体裂缝加宽至贯通。同时水在基岩接触面附近富集,形成软弱带,进而发展成滑带,坡体随之出现整体大规模滑动。

1) 堆积层斜坡内渗流速率与时间呈幂函数关系,且关系式为 $y=6.65883x^{-0.90034}$ 。

2) 在降雨和地下水位变动下,堆积层滑坡主要表现为牵引式,其发展过程可概括为:裂缝的产生→裂缝的扩展→裂缝的贯通→次级滑动→整体滑动五个阶段。

3) 由物理模型可知堆积层滑坡的二元结构是该滑坡形成的决定性因素,降雨入渗导致地下水在基岩面附近富集是该滑坡发生的重要诱发因素。

4) 数值模拟结果表明,随着地下水作用时间的持续,坡体稳定性逐渐降低,剪应变逐渐增大,斜坡变形逐渐增加。

参考文献:

- [1] 汤明高,李松林,许强,等.基于离心模型试验的库岸滑坡变形特征研究[J].岩土力学,2020,41(3): 1-10.
- [2] 罗先启,刘德富,吴剑,等.雨水及库水作用下滑坡模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(14): 2476-2483.
- [3] 陈晓平,黄井武,吴宏伟,等.库岸古滑坡离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(10): 1496-1503.
- [4] 于一帆,王会娟,许书雅,等.堆积层滑坡地震动力响应的物理模型试验[J].岩土力学,2019,40(1): 172-180.
- [5] 李洁,王乐华,陈招军,等.长期浸泡与干湿循环作用下砂岩损伤特性研究[J].水电能源科学,2017,35(3): 123-126.
- [6] 邓华锋,胡安龙,李建林,等.水岩作用下砂岩劣化损伤统计本构模型[J].岩土力学,2017,38(3): 631-639.
- [7] 唐睿旋.堆积层滑坡单体稳定性评估及区域易发性评价研究[D].武汉:中国地质大学,2017.
- [8] 李清梦,苟格,周家文,等.暴雨堆积层滑坡大型物理模型试验研究[J].甘肃水利水电技术,2019,55(6): 23-31.
- [9] 黄鹏程,王鸣,易武,等.库水作用下谭家河滑坡变形特征分析[J].水电能源科学,2018,36(8): 113-115.
- [10] 曾金.堆积层-基岩接触面滑坡变形特征及形成机理研究[D].西安:长安大学,2017.

(责任编辑 王利君)