

文章编号: 1674-599X(2020)02-0029-06

## 降雨条件下含裂隙坡积土边坡的渗流特性研究

向延虎<sup>1</sup>, 江威<sup>2</sup>

(1. 桑植县交通建设投资有限公司, 湖南 桑植 427100;

2. 中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

**摘 要:** 为研究降雨条件下裂隙对坡积土边坡渗流特性的影响规律, 采用 Geo-studio 软件中的 SEEP/W 模块, 分析了降雨条件下不同裂隙分布对坡积土边坡的体积含水率、孔隙水压力及暂态饱和区等渗流特征的影响规律。研究表明: 降雨引起边坡表面体积含水率迅速增大; 随着降雨的持续, 湿润锋逐渐下移, 且裂隙的存在对边坡的含水率分布造成了显著影响; 裂隙的存在使边坡内部形成快速入渗通道, 导致含裂隙边坡的孔压变化幅度大于无裂隙边坡的; 在含有裂隙的边坡中, 裂隙底端易形成暂态饱和区, 随着降雨的持续, 该饱和区会逐渐扩大、下移直至与地下水连通, 造成地下水位升高。

**关键词:** 裂隙; 坡积土边坡; 渗流特性; 体积含水率; 暂态饱和区

**中图分类号:** U213.1<sup>†3</sup> **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.005

### Research on seepage characteristics of fissured soil slope under rainfall condition

XIANG Yan-hu<sup>1</sup>, JIANG Wei<sup>2</sup>

(1. Sangzhi County Transportation Construction Investment Co., Ltd., Sangzhi 427100, China;

2. Sinohydrd bureau 8 Co., Ltd., Changsha 410004, China)

**Abstract:** In order to study the influence of fissures on the seepage characteristics of slope soil slopes under rainfall conditions, numerical modeling was conducted using the SEEP/W module in Geo-studio, the influence law of seepage characteristics (e.g. volumetric water content, pore water pressure and transient saturation zone) of slope soil slopes with different fissure distribution under rainfall conditions was investigated. The results show that volumetric water content of the slope surface increased rapidly due to rainfall infiltration. The wet front gradually moved down as continuous rainfall, the moisture content distribution of the slope was significantly affected by the fissures. The fissures work as a rapid infiltration channels, causing that the change amplitude of the fissured slope is greater than that of the fissure-free slope. A transient saturation zone forms easily at the end of fissure, which will gradually expand and move down with the continuous rainfall until it connects with groundwater, causing the rising of groundwater.

**Key words:** fissures; slope with soil accumulation; seepage characteristics; volumetric water content; transient saturation zone

随着高速公路的修建, 形成了大量裸露的坡积土边坡坡面。坡积层由于地质作用、风化和人为扰动等原因易产生大量裂隙, 在降雨时, 极大地削弱

了边坡的稳定, 严重地损害了当地人们的生命财产安全<sup>[1-2]</sup>。降雨条件下, 雨水通过裂隙快速渗入到边坡内部, 使边坡内部孔隙水压力和含水率快速上

收稿日期: 2020-03-27

作者简介: 向延虎(1982-), 男, 桑植县交通建设投资有限公司工程师。

升, 导致边坡渗流场发生变化, 且边坡内基质吸力的丧失和下滑力的增大, 会诱发边坡失稳<sup>[3-5]</sup>。

目前, 研究降雨条件下边坡渗流特性的手段多为试验或数值分析<sup>[6-7]</sup>。有学者通过室内模型试验对粉砂边坡的渗流特性和稳定性进行了研究, 发现不同渗流边界条件下粉砂边坡的渗流特性和失稳模式均不相同<sup>[8]</sup>。在现有研究成果<sup>[9-11]</sup>中, 由于进行模型试验时边坡中的裂隙难以设定, 因此, 很少使用模型试验研究裂隙对边坡渗流的影响。在数值模拟方面, 韩同春<sup>[12]</sup>等人基于双重入渗模型, 探讨了裂隙土的渗流特性和含裂隙边坡的稳定性。陈善雄<sup>[13]</sup>等人通过建立膨胀土裂隙边坡地质模型, 对含裂隙膨胀土边坡的稳定性及其特征进行了深入的研究。但该裂隙特征研究过于单一, 裂隙条数对含裂隙边坡的渗流特性的影响研究尚不深入。因此, 作者以四川某坡积土边坡为例, 拟采用数值模型分析无裂隙、单裂隙及多裂隙 3 种裂隙分布的边坡在降雨条件下的渗流特征, 以期研究裂隙各向异性对边坡的稳定性提供借鉴。

## 1 计算模型与计算方案

### 1.1 计算模型的建立

以四川省凉山地区一典型坡积土边坡为例, 其坡高为 22 m, 坡比为 1:2, 坡积层厚度为 6 m, 基于该边坡的地质条件建立计算模型, 如图 1 所示。计算采用三节点和四节点网格。其网格单元数为 4 297 个, 节点数 4 423 个。由于裂隙极易在坡积土表层出现, 因此, 只在坡积层范围内考虑裂隙分布。考虑单裂隙时, 仅在坡顶( $x=10$  m)设置一条裂隙; 考虑多裂隙时, 在坡顶( $x=10$  m)、坡中( $x=20$  m)及坡脚( $x=30$  m)处分别设置一条裂隙, 且裂隙的倾角为  $90^\circ$ 。为监测坡积土边坡内体积含水率和孔隙水压力的变化规律, 在坡顶处设置监测面。

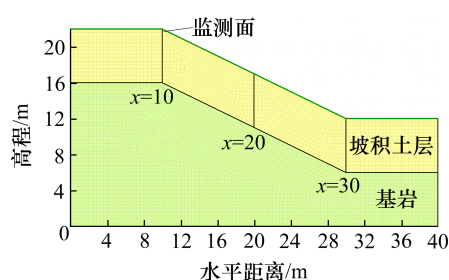


图 1 边坡数值模型

Fig. 1 Numerical analysis model of slope

### 1.2 计算原理

降雨入渗是一个饱和-非饱和渗流过程, 其渗流特征服从达西定律, 其偏微分方程为<sup>[14-15]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ k_{wx} \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k_{wy} \frac{\partial H}{\partial y} \right] + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $k_{wx}, k_{wy}$  分别为  $x, y$  方向上的渗透系数, m/s;  $H$  为总水头, m;  $Q$  为渗入土体中水的渗透量, L/s;  $\theta$  为体积含水率;  $t$  为渗流持续时间, s。

分析裂隙对边坡渗流特性的影响时, 可将裂隙两侧视为边界或者利用等效渗透系数法对裂隙进行处理<sup>[16-17]</sup>。本研究采用等效渗透系数法, 在分析过程中, 将坡积土边坡土体分为裂隙区域和原状土区域, 且将裂隙区域作为各向异性的材料。通过压水试验对坡积土边坡各土层的渗透特性进行了测定, 得到坡积土层和基岩的饱和渗透系数分别为  $k_{sat1}=1.26 \times 10^{-7}$  m/s 和  $k_{sat2}=1 \times 10^{-9}$  m/s, 裂隙土垂直裂隙方向的渗透系数  $k'_{wx}=1.80 \times 10^{-5}$  m/s。在进行裂隙渗流处理时, 通常认为裂隙土在顺裂隙方向饱和渗透系数高于垂直裂隙方向饱和渗透系数 1~3 个数量级<sup>[18]</sup>, 因此, 本研究顺裂隙方向渗透系数取  $k'_y=100 k'_{wx}$ 。同时, 坡积土饱和体积含水率和残余体积含水率通过试验获得, 它们分别为  $\theta_s=0.376$  和  $\theta_r=0.02$ 。

### 1.3 计算参数和方案

为研究降雨条件下含裂隙坡积土边坡的渗流特征, 参照四川省凉山州北部地区的降雨量及中国气象部门对降雨量等级的划分, 对降雨工况(降雨强度  $5.79 \times 10^{-7}$  m/s, 降雨历时 7 d)进行划分: 无裂隙、单裂隙和多裂隙。

## 2 结果与分析

### 2.1 裂隙对坡积土边坡含水率的影响

#### 1) 不同裂隙对坡积土边坡坡顶含水率的影响

经过计算不同裂隙分布的坡积土边坡坡顶在降雨条件下的含水率, 得到了其坡顶含水率变化规律, 如图 2 所示。从图 2 中可以看出: ①初始状态时, 无裂隙边坡表面含水率为 0.21。降雨 1 d 后, 表面含水率上升至 0.375, 此时达到坡积土的饱和体积含水率。随着降雨时间的持续增长, 土体的浸润线不断下移, 饱和区深度随之增加。停止降雨后的 0~5 d 内, 边坡表面体积含水率由 0.375 逐渐下

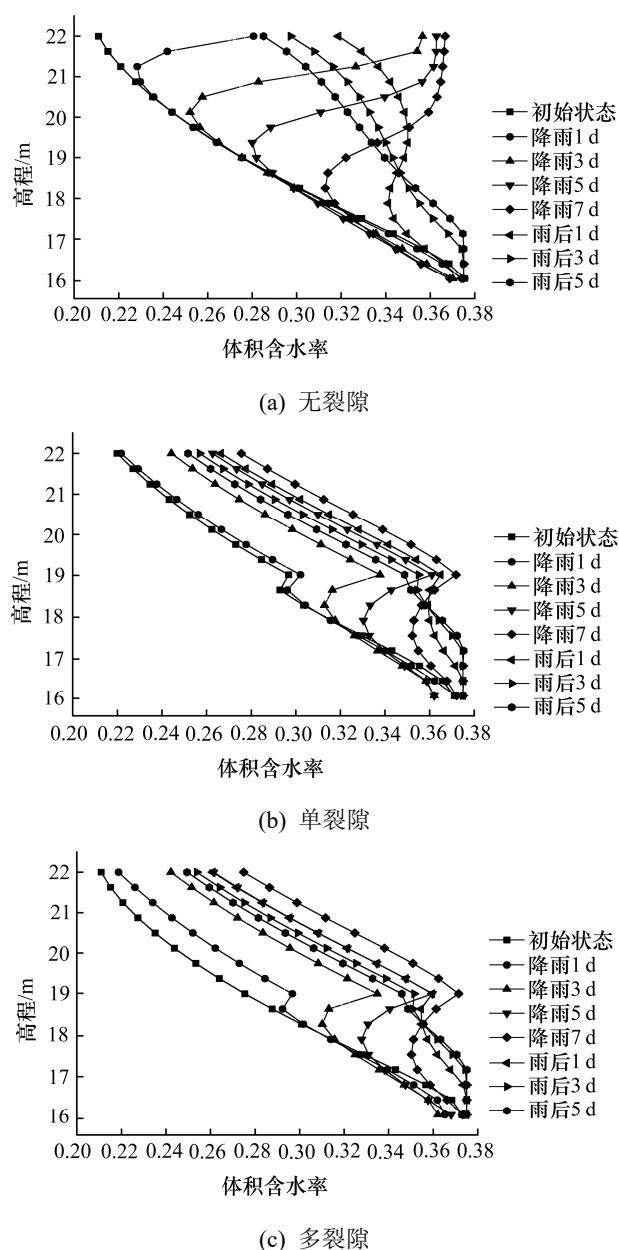


图2 降雨作用下坡积土边坡坡顶含水率  
随高程的变化曲线

Fig.2 Variation curve of slope top moisture content with  
elevation under the action of rainfall

降至 0.304, 饱和区逐渐消散, 水分缓慢向边坡深处下渗并消散。②边坡存在裂隙时, 随着降雨时间的持续增长, 裂隙范围的内体积含水率也逐渐增大, 且单裂隙与多裂隙的含水率随高程的变化曲线相似。这是由于裂隙渗透系数远大于其周围土体的。降雨期间, 单裂隙和多裂隙均形成了雨水快速入渗通道, 导致雨水快速入渗至裂隙底部。无裂隙边坡雨水入渗深度最小, 且雨水在裂隙底端的集聚更易在裂隙底端产生暂态饱和区。

## 2) 不同裂隙对坡积土边坡的含水率的影响

降雨结束时, 不同裂隙分布坡积土边坡的含水率分布云图如图3所示。从图3中可以看出: ①相同降雨条件下, 同一埋深处裂隙周围土体的含水率明显高于坡内其他位置的, 表明裂隙为雨水提供了快速入渗通道, 水分可通过裂隙侧面和底部快速向周围土体入渗, 从而导致裂隙区域周围的土体含水率迅速升高。②裂隙分布会对坡内含水率分布造成显著影响, 由于裂隙与周围土体渗透性的差异, 雨水沿裂隙入渗后会在裂隙尖端与土体交界处集聚, 造成该处含水率迅速升高, 并在一定范围内达到饱和状态。③裂隙区域附近靠近坡顶侧的土体含水率小于靠近坡脚侧的土体含水率, 这与水力梯度作用造成的水分向坡下聚集有关。同理, 裂隙位置越靠近坡脚, 裂隙底端形成饱和区越容易扩大、下移至与地下水位连通, 直至造成地下水位升高。

## 2.2 裂隙对坡积土边坡孔隙水压力的影响

### 1) 降雨条件下, 裂隙对坡积土边坡孔隙水压力的影响

采用数值模型, 分析了降雨条件下不同裂隙分

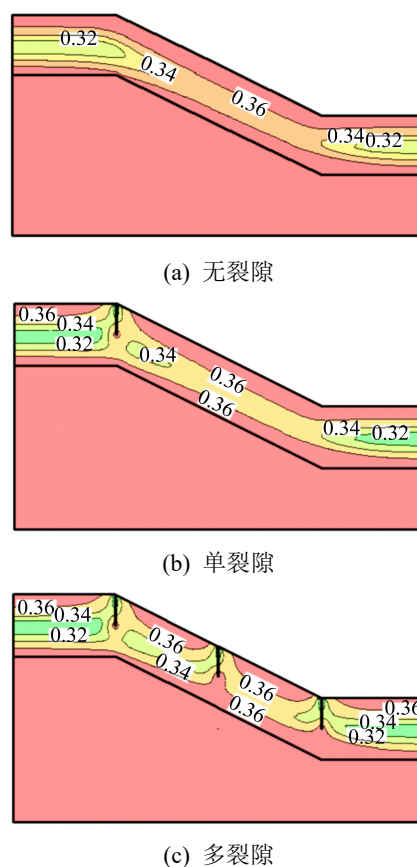


图3 不同裂隙分布下坡积土边坡的含水率分布云图

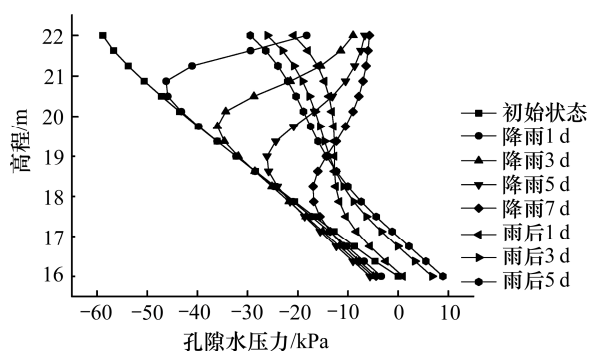
Fig.3 Cloud map of water content distribution of downhill  
slope with different fissure distribution

布的坡积土边坡孔隙水压力随高程的分布规律,其分布曲线如图4所示。从图4中可以看出:①若边坡为无裂隙坡积土边坡时,在降雨初期,由于雨水的入渗,无裂隙边坡表面孔隙水压力急剧升高,且雨水入渗的影响范围随着降雨时间持续增长而逐渐扩大;降雨停止后,边坡内孔隙水压力沿高程的分布迅速恢复至与初始状态平行。②边坡中存在裂隙时,其与无裂隙的孔隙水压力分布具有明显差异。裂隙深度范围内孔隙水压力分布曲线与初始分

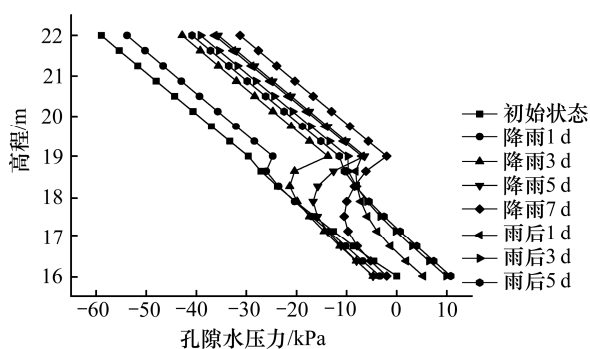
布曲线平行,降雨1~3 d期间边坡孔隙水压力的增量最大,随后逐渐减小。③裂隙的存在促进了边坡深层孔隙水压力的升高。降雨停止时,单、多裂隙边坡高程为16 m处的孔隙水压力分别为-1.6 kPa和-2.02 kPa,明显大于无裂隙边坡同一高程处的。

2) 降雨结束时,裂隙对坡积土边坡孔隙水压力的影响

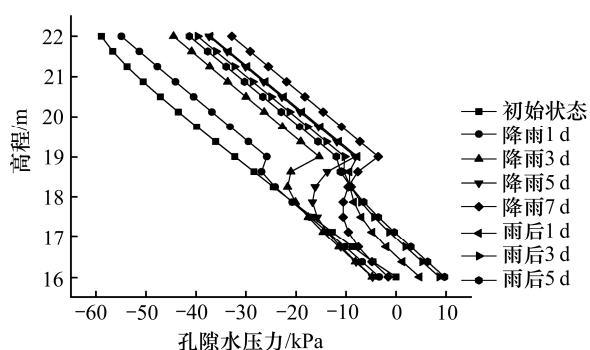
降雨结束时,不同裂隙分布的坡积土边坡孔隙水压力的分布情况如图5所示。从图5中可以看出:①降雨入渗时,随着边坡土体深度的增加,边坡孔隙水压力逐渐升高。②若边坡中存在裂隙时,其孔隙水压力的分布显著变化。③同一高程下,裂隙上端孔隙水压力小于周围土体,而裂隙下端孔隙水压力大于周围土体。表明:降雨条件下,裂隙的高渗透性引起雨水向裂隙内集聚,从而导致裂隙上端的孔隙水压力较小。雨水通过裂隙快速下渗,在裂隙底端与土体交界处汇集,并在裂隙水头和持续降雨的作用下向下部土体入渗,导致裂隙下端的孔隙水压力的迅速升高。此外,裂隙位于坡顶时,对地下



(a) 无裂隙



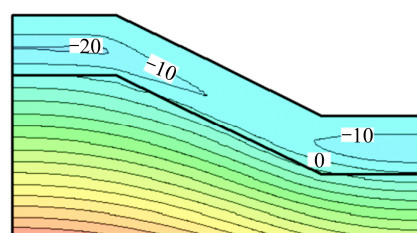
(b) 单裂隙



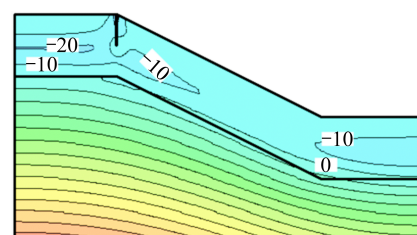
(c) 多裂隙

图4 降雨条件下坡积土边坡坡顶孔隙水压力  
随高程的分布曲线

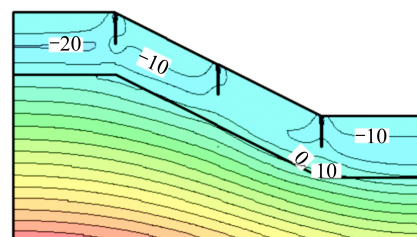
Fig. 4 Distribution curve of pore water pressure on the top of slope with elevation under rainfall conditions



(a) 无裂隙



(b) 单裂隙



(c) 多裂隙

图5 不同裂隙分布下边坡孔隙水压力的分布云图

Fig. 5 Distribution cloud diagram of pore water pressure in slope under different fracture anisotropy



水位基本没有造成影响,而裂隙位于坡中和坡脚时,造成地下水位大幅升高,对孔隙水压力分布的影响更显著。

### 2.3 裂隙对坡积土边坡暂态饱和区的影响

在实际工程中,饱和度达到95%的黏性土视为完全饱和土。对于该边坡工程,当土体体积含水率达到0.357时,认为已经完全饱和。降雨停止时,不同裂隙分布的坡积土边坡中暂态饱和区的分布情况如图6所示。从图6(a)中可以看出,降雨停止时,无裂隙边坡表层形成了深度为1.5 m的连续且较为均匀的暂态饱和区。从图6(b), (c)中可以看出:①对于裂隙边坡而言,雨水入渗首先导致边坡表层体积含水率达到饱和。同时,由于裂隙为雨水入渗提供了优势通道,雨水通过裂隙快速下渗至裂隙底端,造成其表层暂态饱和区出现断裂。②在裂隙底端形成了较大区域的暂态饱和区,这是由于裂隙内被雨水充满后形成的水头促使水分向周围土体入渗造成的。③表层暂态饱和区分布呈现出坡顶较浅、坡脚较厚的形态。此外,裂隙位置越靠近坡脚,

其底端形成的暂态饱和区面积也越大,且容易与地下水连通造成水位升高。暂态饱和区分布与发展的不均匀性是由重力和水力梯度造成的,位置越低,水分越容易往该处聚集,引起该处暂态饱和区的扩展。

不同裂隙分布的坡积土边坡在降雨入渗作用下的暂态饱和区分布各不相同,其暂态饱和区面积的变化速率也有显著的区别。通过数值分析,得到不同裂隙分布的坡积土边坡暂态饱和区面积随降雨历时的变化曲线,如图7所示。从图7中可以看出,随着降雨的持续,无裂隙、单裂隙及多裂隙坡积土边坡的暂态饱和区面积均随降雨历时的增加而呈现出指数型增长。饱和区面积在降雨停止时刻分别达到73.91 m<sup>2</sup>(无裂隙)、71.65 m<sup>2</sup>(单裂隙)和85.43 m<sup>2</sup>(多裂隙)。降雨停止后,不同裂隙分布的坡积土边坡中暂态饱和区的消散速率从大到小为无裂隙、单裂隙和多裂隙。其原因在于:降雨初期无裂隙边坡表面形成连续的饱和区域,而裂隙边坡由于裂隙的存在,裂隙附近表层区域未达到饱和,裂隙下端暂态饱和区也未成型,因此无裂隙边坡暂态饱和区面积略大。随着雨水持续下渗,裂隙下端开始出现暂态饱和区,该饱和区在裂隙水头及雨水的补给下不断扩大下渗,甚至下移至与地下水位连通,造成饱和区面积显著增大。在降雨停止后,由于多裂隙边坡的坡脚处暂态饱和区与地下水位连通,故其坡脚处形成的大面积暂态饱和区的消散速率最慢。

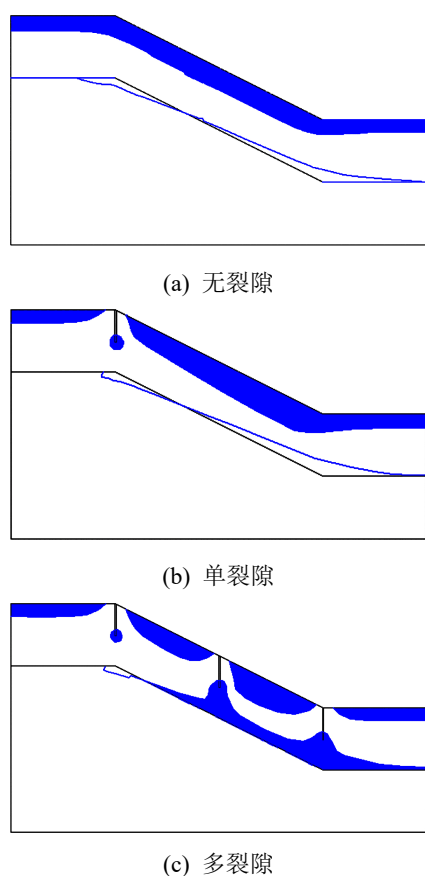


图6 降雨停止时边坡中暂态饱和区的分布

Fig. 6 Distribution of transient saturation zone in slope at the end of rainfall

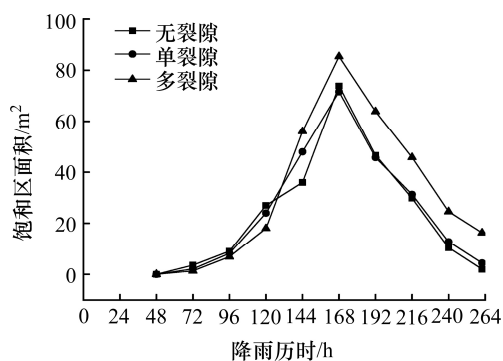


图7 暂态饱和区面积随降雨历时的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of transient saturation area with rainfall duration

## 3 结论

通过对降雨条件下无裂隙、单裂隙及多裂隙的

坡积土边坡的渗流特性进行研究,得到的结论为:

1) 雨水入渗首先会导致边坡表层含水率迅速升高。随着降雨时间的持续,边坡内部受雨水影响范围逐渐扩大。裂隙导致坡积土边坡内部含水率的分布规律发生明显变化,裂隙渗透性远大于其周围土体的,从而导致雨水可沿裂隙直接入渗至边坡深处,对边坡渗流场产生巨大的影响。

2) 降雨初期,裂隙的高渗透性使得雨水通过裂隙快速到达边坡深处,表现为裂隙区域内孔隙水压力线性分布,裂隙区域以下孔隙水压力增量变大。随着降雨持续,裂隙内的渗流主要由雨水控制,孔隙水压力增量逐渐减小。裂隙区域以下土体由于受到裂隙水的入渗,其孔隙水压力的变化幅度大于无裂隙边坡的。

3) 无裂隙边坡表面形成了连续且较为均匀的暂态饱和区。而在含有裂隙的边坡中,由于裂隙的存在,使表层暂态饱和区出现断裂。此外,不仅在边坡表面,而且在裂隙底端会形成暂态饱和区。该饱和区会随着降雨的持续逐渐扩大,下移直至与地下水连通,造成地下水位升高,该现象也使得降雨停止后饱和区的消散速率变慢。

### 参考文献(References):

- [1] 马吉倩,付宏渊,王桂尧,等.降雨条件下成层土质边坡的渗流特征[J].中南大学学报:自然科学版,2018,49(2):464-471.(MA Ji-qian,FU Hong-yuna, WANG Gui-yao, et al. Seepage characteristics of layered soil slope under rainfall conditions[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2018, 49(2): 464-471. (in Chinese))
- [2] 詹良通,李鹤,陈云敏,等.东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J].岩土力学,2012,33(3):237-245,251.(ZHAN Liang-tong,LI He, CHEN Yun-ming,et al.Parametric analyses of intensity-duration curve for predicting rainfall-induced landslides in residual soil slope in southeastern coastal areas of China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 237-245, 251.(in Chinese))
- [3] 胡庆国,袁宁,刘登生,等.多层结构土质边坡降雨入渗过程及稳定性影响分析[J].中国公路学报,2018,31(2):67-74.(HU Qing-guo,YUAN Ning,LIU Deng-sheng,et al. Analysis of rainfall infiltration process and stability of soil slope with multi-layer structure[J].China Journal of Highway and Transport,2018,31(2):67-74.(in Chinese))
- [4] 詹永祥,周波,姚海林.基于圆弧破坏模式下边坡危险性可靠度评价[J].公路工程,2019,44(5):36-41.(ZHAN Yong-xiang,ZHOU Bo,YAO Hai-ling.Hazard assessment of slope with circular failure mode based on reliability theory[J]. Highway Engineering, 2019, 44(5): 36-41. (in Chinese))
- [5] 刘龙武,陈海雄,李俊.基于应力分区的二元渗流边坡稳定性分析[J].交通科学与工程,2019,35(4):9-14.(LIU Long-wu, CHEN Hai-xiong, LI Jun. Stability analysis of binary seepage slope based on stress partitioning[J]. Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(4):9-14.(in Chinese))
- [6] 刘登生,何忠明,周科峰,等.降雨条件下裂隙各向异性对坡积土边坡渗流的影响分析[J].矿冶工程,2017,37(4):14-18.(LIU Deng-sheng,HE Zhong-min,ZHOU Ke-feng, et al.Analysis of effect on seepage of slope with colluvial soil by fissure anisotropy under rainfall conditions[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2017,37(4):14-18. (in Chinese))
- [7] 尹乾,靖洪文,刘日成,等.不同侧压力系数下裂隙网络岩体非线性渗流特性[J].岩土学报,2019,40(2):592-600.(YIN Qian,JING Hong-wen,LIU Ri-cheng,et al.Nonlinear fluid flow behaviors in fracture networks subjected to various lateral pressure ratios[J].Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 592-600. (in Chinese))
- [8] 包小华,廖志广,徐长节,等.不同渗流边界条件下粉砂边坡失稳模型试验研究[J].岩土力学,2019,40(10):3789-3796.(BAO Xiao-hua, LIAO Zhi-guang, XU Chang-jie, et al.Model test study of the failure of silty sand slope under different seepage boundary conditions[J].Rock and Soil Mechanics,2019,40(10):3789-3796.(in Chinese))
- [9] Tohari A,Nishigaki M,Komatsu M.Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2007,133(5):575-587.
- [10] Lunb P.Slope failures in Hong Kong[J].Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology,1975,8:31-65.

(下转至第 39 页)

- [3] 刘平,刘国涛.基质沥青添加反应型活性橡胶改善性能的研究[J].交通科学与工程,2018,34(4):1-5.(LIU Ping, LIU Guo-tao.Research on improving the performance of the activated rubber with the addition of the matrix asphalt[J].Journal of Transport Science and Engineering, 2018,34(4):1-5.(in Chinese))
- [4] Davidovits J. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials[J].Journal of Thermal Analysis,1991,37(23): 1611-1656.
- [5] Duxson P, Provis J L, Lukey G C, et al. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'[J].Cement and Concrete Research,2007, 37(12):1590-1597.
- [6] Palomo A, Grutzeck M W, Blanco M T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future[J].Cement and Concrete Research,1999,29(8):1323-1329.
- [7] Zhang Y S, Sun W. Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer[J]. Journal of Hazardous Materials,2007,143(12):206-213.
- [8] Mo B H, Zhu H. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers[J]. Applied Clay Science,2014(99):144-148.
- [9] 贾德昌,何培刚,苑景坤,等.铝硅酸盐聚合物及其复合材料研究进展[J].硅酸盐学报,2017,45(12):1721-1737. (JIA De-chang, HE Pei-gang, YUAN Jing-kun, et al. Development of geopolymer and geopolymer-based composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017,45(12):1721-1737.(in Chinese))
- [10] Duxson P, Provis J L, Lukey G C, et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005,269:47-58.
- [11] Duxson P, Provis J L. Designing precursors for geopolymer cements[J]. Journal of the American Ceramic Society,2008,91(12):3864-3869..
- [12] Lahoti M, Narang P, Tan K H, et al. Mix design factors and strength prediction of metakaolin-based geopolymer[J]. Ceramics International,2017,43:11433-11441.

(上接第34页)

- [11] 丁立丰,郭啟良,王成虎.工程岩体裂隙渗透性试验方法研究及应用[J].岩土力学,2009,30(9):2599-2604.(DING Li-feng, GUO Qi-liang, WANG Cheng-hu. Research and application of testing methods for engineering rock mass fissure permeability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9):2599-2604.(in Chinese))
- [12] 韩同春,何露林,博文,等.一种裂隙土的双重入渗模型及对边坡稳定的影响[J].华南理工大学学报:自然科学版,2019,47(5):123-129,138.(HAN Tong-chun, HE Lu-lin, BO Wen, et al. A double infiltration model of fissured soil and its effect on slope stability[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2019, 47(5):123-129,138.(in Chinese))
- [13] 陈善雄,戴张俊,陆定杰,等.考虑裂隙分布及强度的膨胀土边坡稳定性分析[J].水利学报,2014,45(12):1442-1449.(CHEN Shan-xiong, DAI Zhang-jun, LU Ding-jie, et al. Stability analysis of expansive soil slope considering crack distribution and strength[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014,45(12):1442-1449.(in Chinese))
- [14] 杨秀竹,康镜,刘正夫,等.裂隙岩质边坡非饱和降雨入渗特征分析[J].水土保持通报,2016,36(4):143-147.(YANG Xiu-zhu, KANG Jing, LIU Zheng-fu, et al. Unsaturated seepage analysis of fractured rock slope under rainfall condition[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016,36(4):143-147.(in Chinese))
- [15] Dahal R K, Hasegawa S, Yamanaka M, et al. Comparative analysis of contributing parameters for rainfall-triggered landslides in the Lesser Himalaya of Nepal[J]. Environmental Geology, 2009,58(3):567-586.
- [16] 袁俊平,蔺彦玲,丁鹏,等.裂隙诱导各向异性对边坡降雨入渗的影响[J].岩土工程学报,2016,38(1):76-82. (YUAN Jun-ping, LIN Yan-ling, DING Peng, et al. Influence of anisotropy induced by fissures on rainfall infiltration of slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016,38(1):76-82.(in Chinese))
- [17] 曾铃,刘杰,史振宁.坡积土边坡裂隙各向异性特征对雨水入渗过程的影响[J].交通运输工程学报,2018,18(4): 38-47.(ZENG Ling, LIU Jie, SHI Zhen-ning. Effect of colluvial soil slope fracture's anisotropy characteristics on rainwater infiltration process[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(4): 38-47. (in Chinese))
- [18] 张家俊.干湿循环下膨胀土裂隙、体变与渗透特性研究[D].广州:华南理工大学,2010.(ZHANG Jia-jun. Study on the cracks, body deformation and permeability characteristics of expansive soils under dry-wet cycle[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.(in Chinese))