

不同降雨条件下非饱和裂隙土优势流入渗特征研究

黄晓虎, 张芷宁, 张 鹏, 魏兆亨, 陈建伟

Dominant infiltration characteristics of unsaturated fissure soil under different rainfall conditions

HUANG Xiaohu, ZHANG Zhining, ZHANG Peng, WEI Zhaocheng, and CHEN Jianwei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202403005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

土垫层缓冲落石冲击力特性离散元数值模拟分析

Analysis of soil cushion buffering characteristic for rockfall impact force through discrete element numerical simulation

陈宇, 沈位刚, 宋忠友, 高攀, 鄢发斌, 雍平, 张锐 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(2): 90-97

基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析

Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall

胡华, 吴轩, 张越 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 92-97

基于LBM-DEM细观数值模拟的水力诱导覆盖型岩溶地面塌陷发育过程分析

Analysis of the formation process of the covered karst ground collapse induced by groundwater changes based on the coupled LBM-DEM numerical simulation at micro scale

陶小虎, 叶明, 龚建师, 王赫生, 胡晓雨 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 124-131

四川甘洛县比依市村滑坡运动特征分析

Analysis of the landslide movement characteristics in Biyi Village, Ganluo County, Sichuan Province, through SPH numerical simulation

涂正楠, 冯君, 邓应进, 潘激扬 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 92-99

基于水文过程和应力应变耦合的陕北黄土滑坡复活机理分析

Mechanistic analysis of loess landslide reactivation in northern Shaanxi based on coupled numerical modeling of hydrological processes and stress strain evolution: A case study of the Erzhuangkelandslide in Yan' an

王康, 畅俊斌, 李晓科, 朱文峰, 卢啸, 刘慧 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(6): 47-56

低山丘陵区典型滑坡-泥石流链生灾害特征与成灾机理

Characteristics and mechanism of landslide-debris flow chain disaster in low mountain and hilly terrain

冯文凯, 贾邦中, 吴义鹰, 吴钟腾, 白慧林 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(1): 35-44



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202403005

黄晓虎, 张芷宁, 张鹏, 等. 不同降雨条件下非饱和裂隙土优势流入渗特征研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(4): 73-84.
HUANG Xiaohu, ZHANG Zhining, ZHANG Peng, et al. Dominant infiltration characteristics of unsaturated fissure soil under different rainfall conditions[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(4): 73-84.

不同降雨条件下非饱和裂隙土优势流入渗特征研究

黄晓虎^{1,2}, 张芷宁^{1,2}, 张 鹏^{1,2}, 魏兆亨³, 陈建伟^{1,2}

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 湖北省地质局第八地质大队, 湖北 襄阳 441002)

摘要: 文章将膨胀土滑坡中的降雨入渗简化为垂直的斜坡土柱模型, 利用 Richards 方程基本理论, 基于离散孔隙-裂隙介质模型, 结合短时强降雨、长时弱降雨 2 种典型降雨工况, 以不同裂隙深度为主要变量, 从入渗过程、饱和度剖面、入渗率、表面压力、入渗量来探讨裂隙在发育演化过程中的优势流入渗特征。结果表明: (1) 裂隙处, 降雨在裂隙末端形成暂饱和区, 随后向裂隙两侧水平入渗, 饱和方式为由下向上饱和; 无裂隙处降雨主要沿土柱表面向下垂直入渗, 为由上向下饱和。(2) 短时强降雨作用下, 随着裂隙深度增加, 优势流控制着降雨入渗的过程, 入渗量和入渗深度与裂隙深度呈正比, 入渗深度与裂隙深度基本一致。(3) 长时弱降雨作用下, 优势流入渗效果减弱, 优势流现象产生较慢, 降雨沿裂隙入渗速度与在基质孔隙入渗速度基本一致, 入渗主要表现为沿土柱表面向下的垂直入渗。

关键词: 优势流入渗; 膨胀土滑坡; 离散孔隙-裂隙介质模型; 数值模拟

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)04-0073-12

Dominant infiltration characteristics of unsaturated fissure soil under different rainfall conditions

HUANG Xiaohu^{1,2}, ZHANG Zhining^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, WEI Zhaozheng³, CHEN Jianwei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Eighth Geological Brigade of Hubei, Hubei Bureau of Geology, Xiangyang, Hubei 441002, China)

Abstract: This paper simplifies the rainfall infiltration in expanding soil landslide into a vertical slope soil column model. Utilizing the basic theory of the Richards equation and based on a discrete pore-fracture medium model, combined with two typical rainfall conditions of short-term heavy rainfall and long-term light rainfall, with different fracture depths as the main variable, the study explores the preferential flow infiltration characteristics during the development and evolution of fractures from the dominant permeability, saturation profile, permeability rate, surface pressure, and permeability in the development of permeability characteristics. The results show that: (1) at the fissure, the rainfall forms a temporary saturation area at the end of the fissure, then horizontally infiltrates to both sides of the fissure, with the saturation mode being bottom-up. at non-fracture sites, rainfall mainly vertically infiltrates along the soil column surface, with the saturation mode being top-down. (2) Under

收稿日期: 2024-03-02; 修订日期: 2024-03-13

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42007237)

第一作者: 黄晓虎(1987—), 男, 河南信阳人, 地质灾害防治工程专业, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害预测与防治方面的研究。

E-mail: 88569096@qq.com

通讯作者: 张 鹏(1982—), 男, 湖北宜昌人, 自然地理学专业, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害成灾机理与风险分析方面的研究。

E-mail: pzhang@ctgu.edu.cn

short-term heavy rainfall, with the increase of fissure depth, the dominant flow controls the process of rainfall infiltration. The infiltration amount and infiltration depth are directly proportional to the fissure depth, and the infiltration depth is basically consistent with the fissure depth. (3) Under long-term weak rainfall, the infiltration effect of dominant inflow is weakened, and the phenomenon of dominant flow is slow. The infiltration speed of rainfall along the fissure is basically the same as that of the matrix pore, and the infiltration is mainly manifested as vertical infiltration downward along the surface of the soil column.

Keywords: dominant inflow; expanding soil landslide; discrete pore-fissure medium model; numerical simulation

0 引言

降雨是滑坡失稳的主要诱发因素,土体裂隙为雨水提供了入渗通道,沿此通道形成的优势流主导着降雨入渗过程,导致滑坡稳定性逐步恶化,促使变形持续发展^[1-4]。因此,在评价滑坡稳定性时,能够正确认识优势流的入渗过程非常重要。

近年来关于优势流的定量研究成为了热点问题。优势流对黏土质斜坡的孔隙水压力起着主要的控制作用^[5]。在降雨触发滑坡的过程中,孔隙水压力、含水率等参数指标的变化受到优势流入渗的影响^[6]。在研究降雨诱发震后滑坡再复活的水力学特性时发现优势流主导着降雨入渗过程,并增加垂向渗透性能和孔隙水压力,加快地下水对降雨的响应,降低土壤有效应力,进而诱发滑坡复活^[7]。通过模拟地表裂缝对滑坡水文动态变化特征的影响,发现裂缝的体积和连通性控制着滑坡中孔隙水压力的分布^[8]。边坡变形破坏期间,优势流为地表水渗透和地下水运移提供了通道,进一步加速了边坡的变形^[9]。

在膨胀土滑坡的研究中,主要关注膨胀土的胀缩性与裂隙性造成的膨胀土强度的不均匀性和应力差异导致滑坡失稳^[10-11],往往忽视了膨胀土的低渗透性,有关优势流入渗导致膨胀土滑坡的失稳机理研究较少。目前大多数的研究主要集中于笼统的均质降雨入渗进行研究,较少考虑裂隙对降雨入渗的影响,实际上,膨胀土斜坡上的细宏观变形(干缩裂隙、地表裂缝)对降雨入渗有重要影响,是诱发膨胀土滑坡发生失稳不可忽视的因素。

1 研究方法

1.1 研究对象

双重渗透介质模型可以较好地描述裂隙优势流、基质孔隙流以及裂隙-基质的流量交换^[12-13]。Indrawan 等^[14]通过实验室方法和数值模拟方法对两层土柱进行了一维入渗的全面研究,朱伟等^[15]用自行研发的土柱装置结合数值模拟的方法深入探究了土壤的降雨入

渗特征。本文将含裂隙坡体降雨入渗简化为含单一垂直裂隙的斜坡土柱模型进行研究,如图 1 中红色框所示。利用 Richards 方程基本理论,基于离散孔隙-裂隙介质模型,结合 2 种典型降雨工况,以不同裂隙深度为主要变量,探讨裂隙在发育演化过程中的优势流入渗特征。

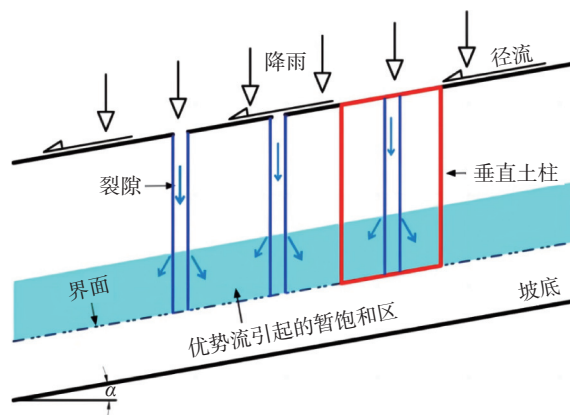


图 1 优势流入渗的无限边坡模型

Fig. 1 Infinite slope model of dominant infiltration and seepage

1.2 计算理论

Richards 方程是基于 Darcy 定律和质量守恒定律,是描述降雨入渗问题的严格数学物理模型,可以很好地模拟降雨入渗中水分在一维土体中运动的 3 个过程:即入渗、水分重分布和排水过程^[16]。因此,裂隙与基质的非饱和渗流均采用 Richards 方程进行描述:

$$(C_m + S_r S) \frac{\partial H_p}{\partial t} - \nabla \cdot [k_m (\nabla h + 1)] = 0 \quad (1)$$

式中: C_m ——容水度;

S_r ——饱和度;

S ——贮存系数;

H_p ——压力水头/m;

t ——时间/s;

k_m ——土体的渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), $k_m = k_s k_r (S_r)$;

k_s ——土体饱和渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

k_r ——基质相对渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

基质的相对渗透系数(k_r)以及其他特征参数采用

Van Genuchten(V-G)模型描述:

$$S_r = \begin{cases} \left(1 + |\alpha H_p|^n\right)^{-m}, & H_p < 0 \\ 1, & H_p \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$C_m = \begin{cases} \left(\frac{am}{1-m}(\theta_s - \theta_r)S_e^{\frac{1}{m}}\left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)\right)^m, & H_p < 0 \\ 0, & H_p \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$k_r = \begin{cases} S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^{-2}, & H_p < 0 \\ 1, & H_p \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: α 、 n 、 m ——模型拟合参数;

S_e ——有效饱和度;

θ_s ——饱和含水率/%;

θ_r ——残余含水率/%;

H_p ——压力水头/m。

采用 Brooks-Corey(BC)模型^[17]描述裂隙的非饱和特性,其表达式为:

$$S_r = \begin{cases} |\alpha H_p|^{-n}, & H_p < -1/\alpha \\ 1, & H_p \geq -1/\alpha \end{cases} \quad (5)$$

$$C_m = \begin{cases} \frac{-n}{H_p}(\theta_s - \theta_r)|\alpha H_p|^{-n}, & H_p < -1/\alpha \\ 0, & H_p \geq -1/\alpha \end{cases} \quad (6)$$

$$k_r = \begin{cases} S_e^{2/n+5/2}, & H_p < -1/\alpha \\ 1, & H_p \geq -1/\alpha \end{cases} \quad (7)$$

假设裂隙由具有一定曲折度的粗糙平板组成,则雨水在裂隙中的渗流满足立方定律^[18],裂隙的渗透系数(k_f)为:

$$k_f = C \cdot \frac{gd_f^2}{12\mu} \quad (8)$$

式中: C ——裂隙曲折度;

g ——重力加速度/($m \cdot s^{-2}$);

d_f ——裂缝开度/m;

μ ——流体的动力黏滞/($Pa \cdot s$)。

基于 K-C 模型,通过对比曲折裂隙与平直裂隙之间的渗透性差异,得到裂隙曲折度(C)^[19]:

$$C = \frac{1}{\tau^2 T_s^2} \quad (9)$$

式中: τ ——孔隙曲折系数, $\tau = \sqrt{1 - 2\ln n}$ ^[20];

n ——土体孔隙率/%;

T_s ——面曲折系数,本文考虑裂隙面具有一定起伏,取 1.04^[21]。

1.3 计算模型及参数

COMSOL Multiphysics 基于有限元方法,通过求解部分单场或多场的偏微分方程,从而来模拟真实物理现象,在岩土力学领域中,COMSOL Multiphysics 有限元软件可以通过高度准确的渗流稳定分析计算,已在双重介质渗流领域获得广泛应用^[22-24]。

模型参照十堰市郧县某滑坡,建立高 3 m,宽 1 m 的二维土柱模型,在土柱中部(即 $x=0.5$ m 处)设置一条垂直裂隙,见图 2(a)。采用有限单元分别离散裂隙和土体基质,模型中所有侧边界为不透水边界。上边界为降雨入渗边界,降雨入渗边界采用“空气单元”概念^[25],通过监测表面压力以切换流量边界与降雨边界。下边界为固定水头边界。模型共划分 7 800 个节点和 7 599 个单元,其中有裂隙单元 149 个和基质单元 7 400 个,单元边长为 0.02 m。在裂隙附近对网格进行加密,与裂隙相邻的基质单元尺寸为 0.002 m,远离裂隙的单元尺寸以等差数列逐渐增大至 0.02 m,见图 2(b)。

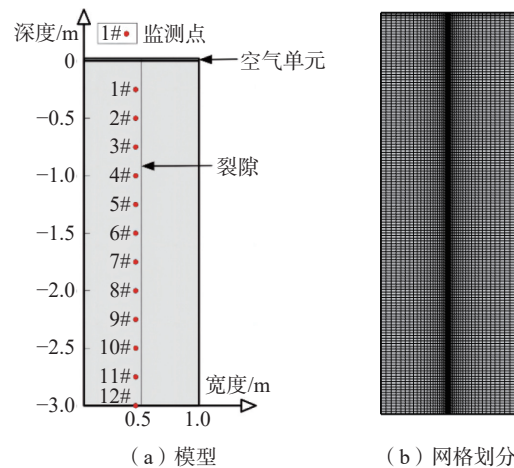


图 2 数值模拟模型

Fig. 2 Numerical simulation model

Lee 等^[26]根据降雨特性将降雨分为短时强降雨和长时弱降雨 2 种情况,结合研究区的实际降雨情况(图 3),将降雨工况设置为短时强降雨、长时弱降雨 2 种,考虑不同裂隙深度、不同裂隙宽度的优势流入渗特征, k_f 根据式(8)得到。具体工况见表 1。

饱和渗透系数为现场试验结果, Van Genuchten(V-G)模型参数^[27]、Brooks-Corey(B-C)模型参数^[24]为经验取值,具体参数取值见表 2。

2 数值计算结果

2.1 入渗过程

图 4—5 为不同工况下压力水头分布随降雨时间的

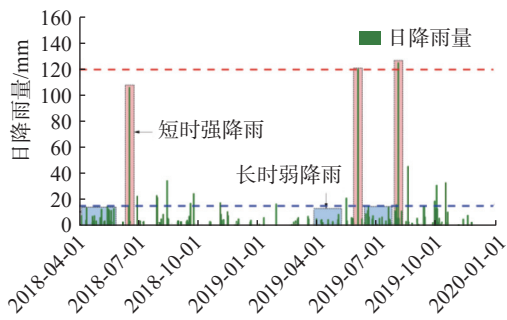


图 3 研究区降雨情况

Fig. 3 Rainfall situation in the study area

表 1 模拟工况

Table 1 Simulated working conditions

工况	编号	裂隙深度/m	裂隙宽度/mm	$k_f/(m \cdot s^{-1})$	降雨
短时强降雨	1	无裂隙	—	—	120 mm/d, 持续48 h
	2	0.5	5	0.032	
	3	1	10	0.131	
	4	2	20	0.527	
长时弱降雨	5	无裂隙	—	—	12 mm/d, 持续480 h
	6	0.5	5	0.032	
	7	1	10	0.131	
	8	2	20	0.527	

表 2 模拟参数

Table 2 Simulation parameters

符号	名称	数值	来源
k_s	饱和渗透系数/($m \cdot s^{-1}$)	57.87	勘查资料
α	V-G模型本构参数	0.272	经验取值
m	V-G模型本构参数	2.3	经验取值
θ_s	饱和含水率/%	32.6	室内试验
θ_r	残余含水率/%	6.4	V-G模型拟合
α	B-C模型本构参数	6.8	经验取值
n	B-C模型本构参数	1	经验取值

变化过程。无裂隙时(工况 1、工况 5),降雨开始后,土柱表层迅速润湿,降雨均匀向下垂直入渗,浸润锋呈“直线型”,短时强降雨难以入渗到较深的位置,大部分雨水形成坡面径流流失,长时弱降雨入渗深度显著增加,最大影响深度达到 2.5 m。

裂隙存在时,在短期强降雨下(工况 2—4),降雨初期沿裂隙入渗,产生优势流。部分降雨从土柱表面均匀向下垂直入渗,部分沿裂隙入渗,入渗至裂隙末端,由于基质渗透系数较差,降雨在裂隙末端聚集形成局部暂饱和区,并向两侧水平入渗,入渗范围和最大影响深度随着裂隙发育而增加。浸润锋随降雨持续表现为“漏斗型”发展至“水滴型”最后发展至“直线型”。这是由于裂隙深度较短,土柱表面的饱和区与裂隙末端的饱和区更快连通,随着裂隙的深度增大,土柱表面的饱和区与

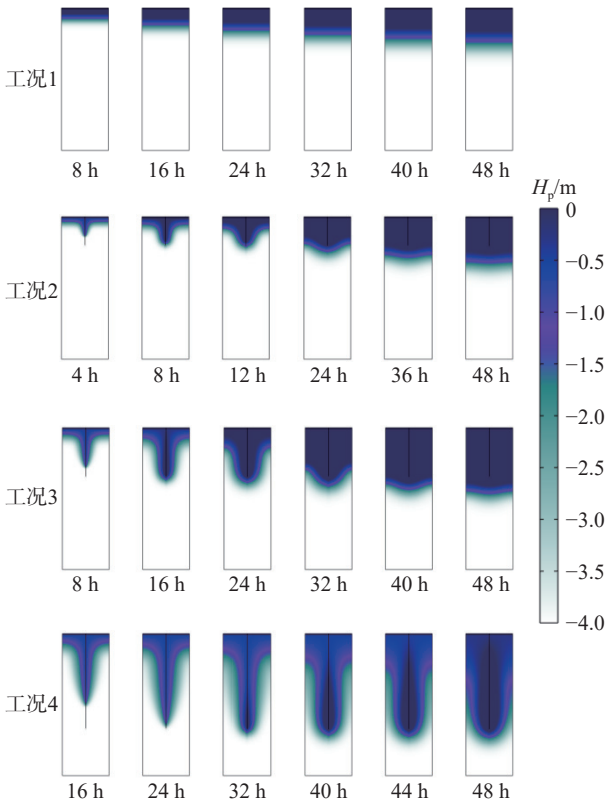


图 4 短时强降雨下压力水头分布随降雨时间的变化过程

Fig. 4 Variation process of pressure head distribution with rainfall time under short-term heavy rainfall

裂隙末端的饱和区连通缓慢。

在长时弱降雨(工况 6—8),降雨初期(240 h 内)下,4 种工况浸润锋均呈“直线型”发展,优势流入渗现象不明显,表明雨水沿裂隙入渗速度与在基质孔隙入渗速度基本一致。随着降雨持续,雨水入渗至裂隙末端,在垂直入渗与水平入渗共同影响下,裂隙深度范围内土体迅速饱和。

2.2 饱和度剖面

图 6—7 为不同工况下饱和度剖面随降雨时间的变化过程。在短时强降雨作用下,相同降雨时间内,降雨入渗深度随裂隙的出现与演化逐渐增加,无裂隙发育时,饱和度剖面随时间均匀增加。裂隙发育初期虽然饱和度总体呈均匀增加,但相较于无裂隙的情况,入渗深度显著增加。随着裂隙的进一步发育,饱和度开始不均匀增加,这是降雨在裂隙末端聚集并向两侧水平入渗导致的。

长时弱降雨作用下,几种工况的饱和度剖面随时间都均匀变化,在降雨 480 h 后饱和度剖面基本一致,入渗深度并没有随裂隙的出现与拓展明显增加,降雨入渗总体沿土柱表面均匀入渗。

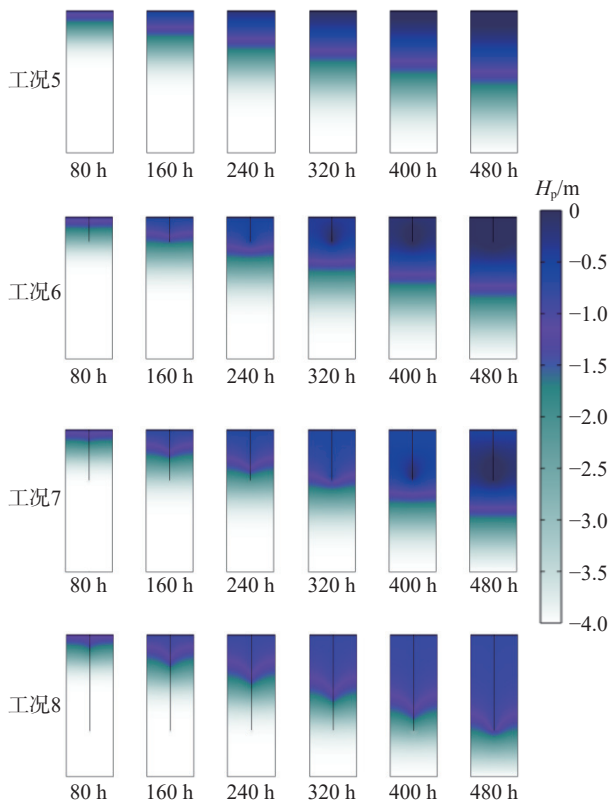


图5 长时弱降雨下压力水头分布随降雨时间的变化过程

Fig. 5 Variation process of pressure head distribution with rainfall time under long-time weak rainfall

2.3 入渗率

早期 Green 和 Ampt 作了以下假设: ①湿润锋未到达的部分吸力水头为固定值不变, ②湿润锋已经过的部分含水量和渗透系数也维持不变。则某一时刻单位横截面积的总入渗位移(q)可以计算如下^[28]:

$$q = (\theta_i - \theta_0)z \quad (10)$$

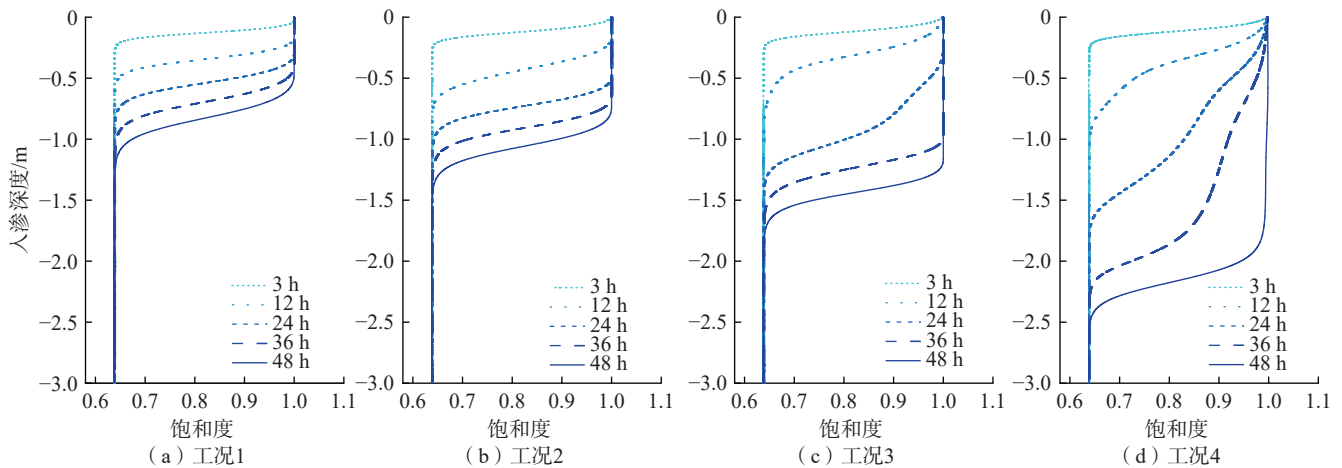


图6 短时强降雨下饱和度剖面随降雨时间的变化过程

Fig. 6 Variation process of saturation profile with rainfall time under short-term heavy rainfall

式中: θ_i ——湿润锋经过部分含水量/无量纲;

θ_0 ——湿润锋未到达部分含水量/无量纲;

z ——湿润锋经过的长度(入渗深度)/m。

累计入渗量是降雨入渗到地下的总量:

$$Q = A(\theta_i - \theta_0)z \quad (11)$$

若湿润锋后面土体含水率不为常量,它是随深度增加而不断发生变化的变量,则需对含水量的增加量在深度上进行积分。瞬时入渗率等于进水边界的入渗率(i),可用达西定律表示为:

$$i = \frac{dQ}{Adt} = \frac{(\theta_i - \theta_0)dz}{dt} \quad (12)$$

式中: Q ——累计入渗量/ m^3 ;

A ——入渗表面积/ m^2 。

图8—9为不同工况下入渗率随降雨时间的变化过程,短时强降雨作用下,几种工况监测点响应个数随裂隙出现与演化增多,并且入渗率达到稳定后,其数值与土体饱和渗透系数基本一致,表明入渗率达到稳定后,土体处于饱和状态。随着裂隙的出现与演化,各监测点响应时间与达到稳定的时间有所不同。工况1—4各监测点响应时间随深度增加而增加,表现为自上向下的顺序响应。

当无裂隙发育或裂隙发育初期(工况1—2),各监测点反映的入渗率虽然依次达到稳定,但是进一步对比这2种工况可以发现1#、2#监测点入渗率达到稳定的时间工况2远短于工况1,这是由于在裂隙发育初期,雨水快速入渗至裂隙末端形成暂饱和区,土体表层在基质诱导的垂直入渗与裂隙诱导水平入渗共同影响下迅速饱和,表现为1#、2#监测点在响应后迅速达到稳定。

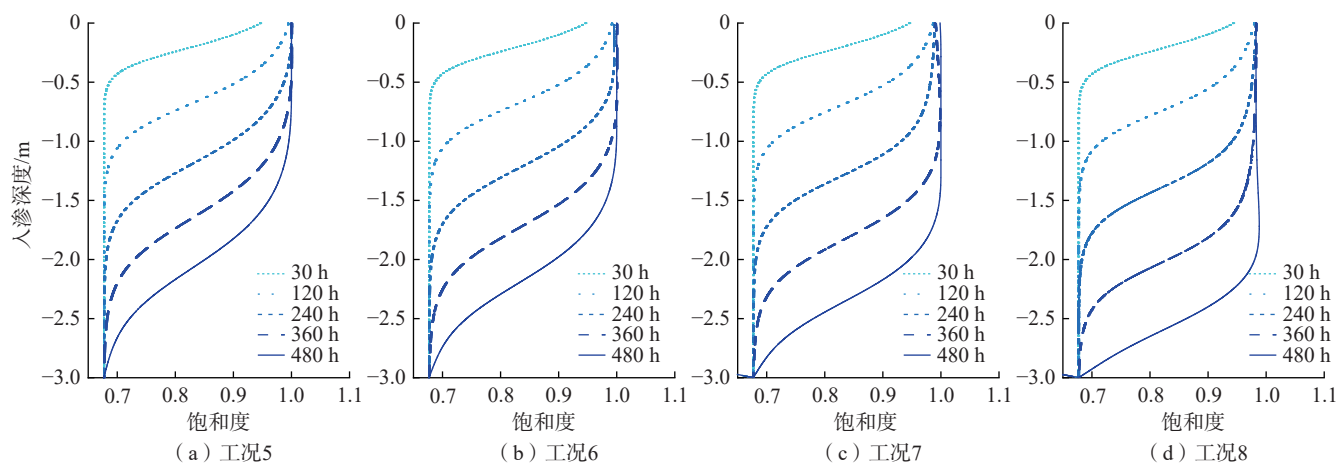


图 7 长时弱降雨下饱和度剖面随降雨时间的变化过程

Fig. 7 Variation process of saturation profile with rainfall time under long-time weak rainfall

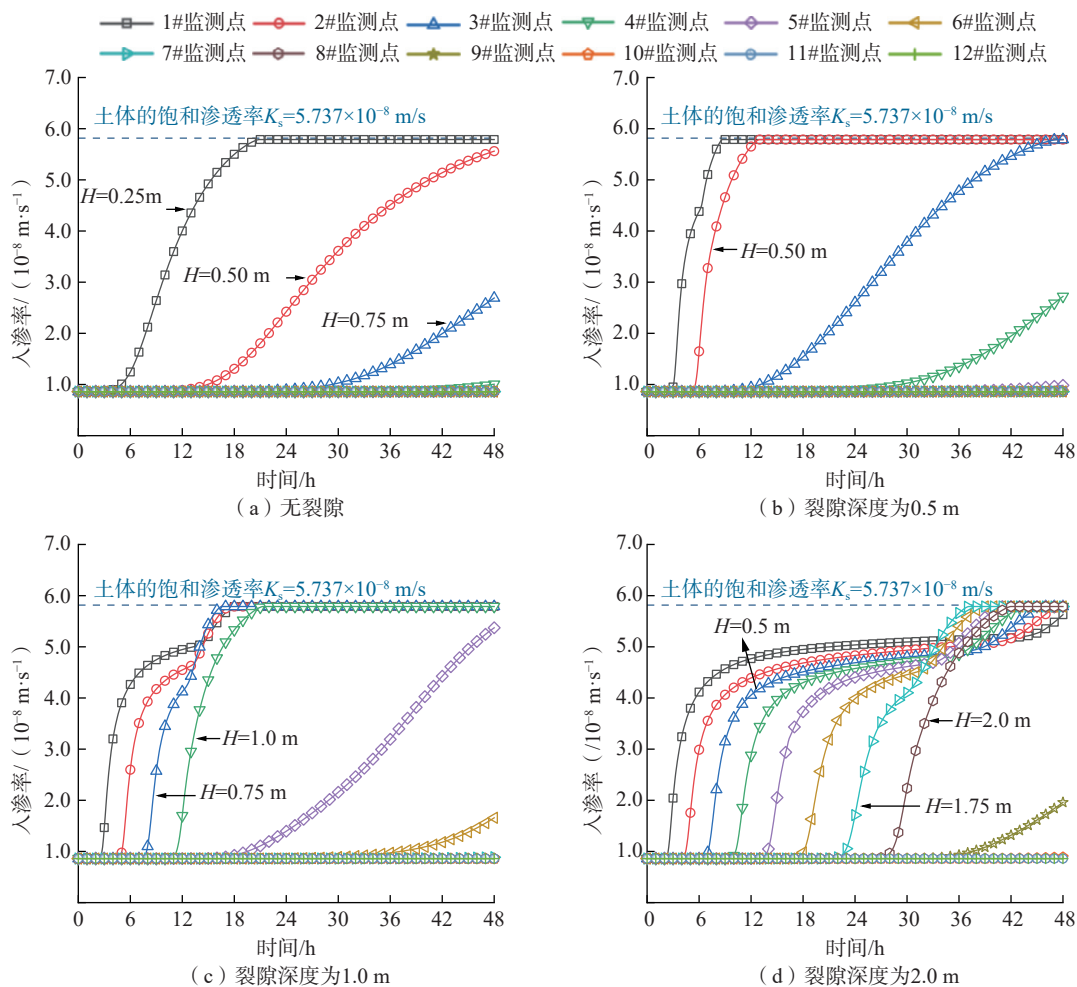


图 8 短时强降雨下入渗率随降雨时间的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of infiltration rate with rainfall time under short-term heavy rainfall

随着裂隙进一步发育(工况 3—4), 位于裂隙末端附近的监测点优先达到饱和, 例如, 工况 3 的 3#监测点优先于 1#、2#监测点达到饱和; 工况 4 的 7#、8#监测点优先于土柱表层其他监测点达到饱和, 这表明随着裂隙的发

育, 降雨入渗优势逐渐明显, 入渗过程由孔隙控制的垂直入渗转变为由裂隙控制的水平入渗。

长时弱降雨作用下, 不同工况监测点响应个数和响应顺序基本一致(图 9), 总体表现为沿土柱表面均匀入

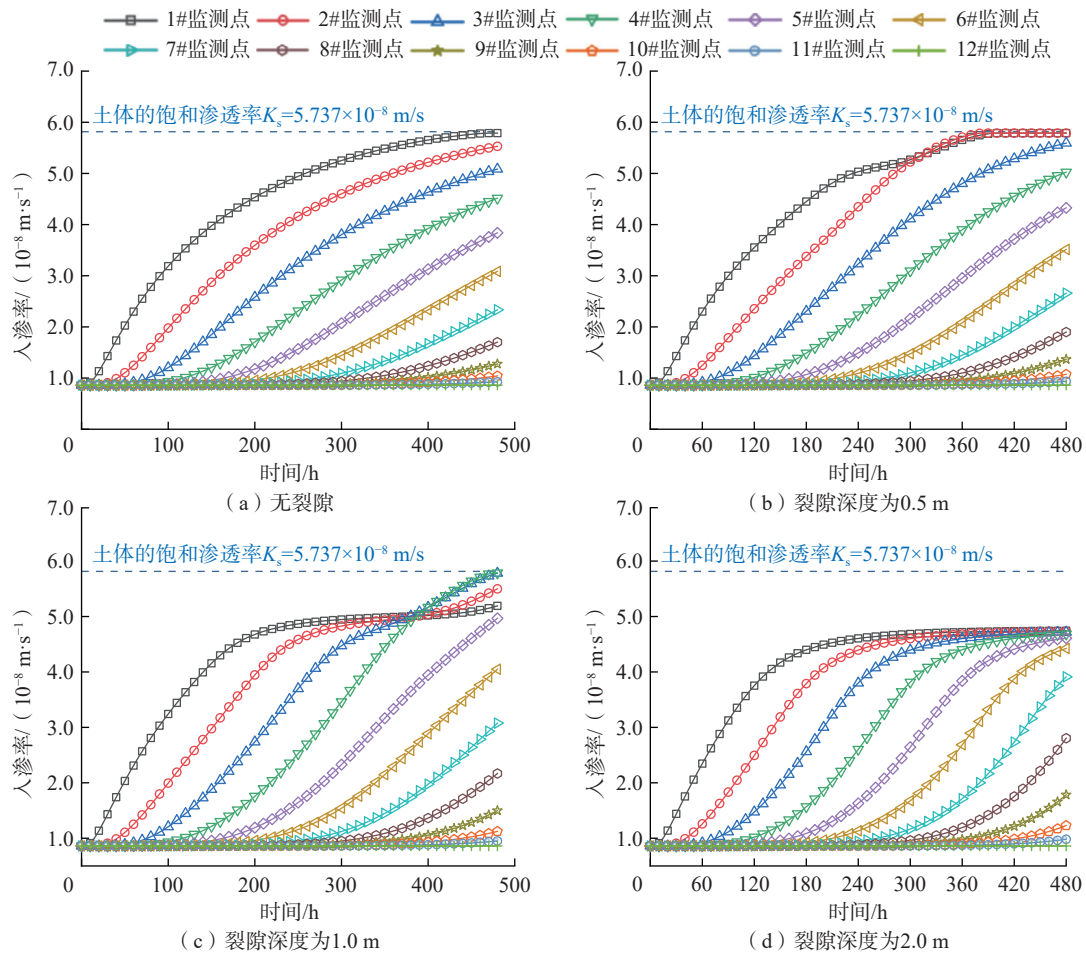


图9 长时弱降雨入渗率随降雨时间的变化曲线

Fig. 9 Variation curve of infiltration rate with rainfall time under long-term weak rainfall

渗。随裂隙出现,当降雨入渗至裂隙底部时,受基质垂直入渗和裂隙水平入渗的控制,裂隙末端附近入渗率迅速增大,裂隙影响范围内土体快速达到饱和状态。例如,工况6的2#监测点先于1#监测点达到饱和;工况7的4#、5#监测点优先于其他监测点达到饱和。

2.4 表面压力及入渗量

土壤总入渗量为基质入渗量与裂隙入渗量之和,假设土柱模型纵向厚度为1 m,对研究区域边界进行线积分,得到不同时刻下基质表面和裂隙表面的入渗量。短时强降雨工况下,如图10—11所示,工况1—4(图10)在降雨初期基质与裂隙的入渗能力均较强,降雨可以全部入渗,总入渗量均迅速增加,对应的表面压力急剧上升;随着裂隙的出现与演化,基质与裂隙的表面压力及入渗量随降雨时间的变化不同。当坡体表面无裂隙发育时,随着降雨持续,坡体表层逐渐饱和,此时降雨大部分转化为坡面径流,入渗边界主要为压力边界,入渗量受坡体本身透水能力控制,降雨开始后入渗量急剧增长至0.1 m³/d,孔隙水压力增大至0 kPa,并在后续时间内

始终大于0,入渗量逐渐降低至稳定。

随着裂隙的出现与发育,在降雨持续入渗的过程中,入渗量的变化可以分为2个阶段:

①总入渗量处于上升阶段,该阶段基质入渗量逐渐减少,裂隙入渗量逐渐增加并超过基质入渗量,未产生坡面径流。随着降雨持续,裂隙表面压力出现“阶跃”,浸润锋从“漏斗型”转化为“水滴型”。随着裂隙发育演化,降雨稳定入渗的时间增加。②随着裂隙逐渐达到饱和,总入渗量处于下降阶段,基质和裂隙表面压力处于上升阶段。面径流产生,但此时裂隙影响范围内的土体未完全饱和,大部分降雨仍沿着裂隙入渗,裂隙表面压力仍小于0。随着裂隙影响范围内的土体饱和,裂隙表面压力大于0,总入渗量逐渐降低至稳定。

在长时弱降雨工况下,无裂隙发育时降雨入渗边界转换为压力边界的时间明显延长,降雨开始后入渗量显著增长,但对应的坡体表面孔隙水压力逐渐增大至0 kPa,随着降雨持续,总入渗量逐渐稳定。随着裂隙的出现与发育,见工况6—8,图11(b)—(d),稳定入渗阶

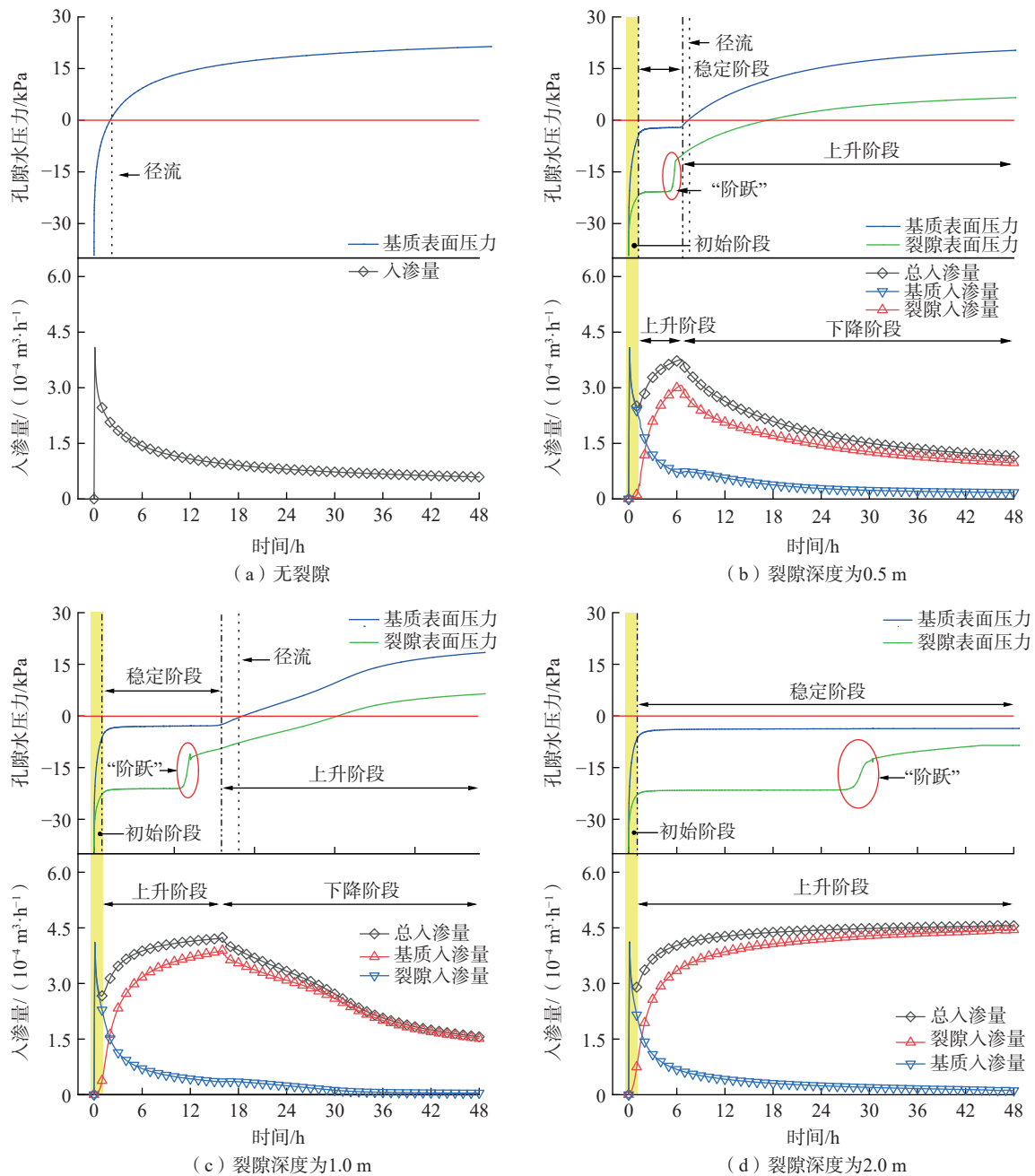


图 10 短时强降雨下入渗量及表面压力变化曲线

Fig. 10 Variation curve of infiltration volume and surface pressure under short-term heavy rainfall

段时间延长,在裂隙深度 $H=1\text{ m}$ 时,降雨持续时间内入渗量基本处于稳定入渗阶段,表面压力在持续时间内小于 0,未产生坡面径流。

3 优势流入渗规律

图 12—13 为 2 种典型降雨工况下的降雨入渗深度和总入渗量情况。短时强降雨作用下,无裂隙时入渗深度为 0.45 m ,总入渗量为 $0.46\times 10^{-1}\text{ m}^3$ 。裂隙深度(H)为 $0.5, 1.0, 2.0\text{ m}$ 时,入渗深度分别为 $0.72, 1.16, 2.11\text{ m}$,

总入渗量分别为 $0.96\times 10^{-1}, 1.44\times 10^{-1}, 2.07\times 10^{-1}\text{ m}^3$ 。相同降雨时间条件下,入渗深度和入渗量与裂隙深度呈正比,降雨入渗深度与裂隙深度基本一致。长时弱降雨作用下,无裂隙时入渗深度为 1.31 m ,总入渗量仅为 $1.13\times 10^{-1}\text{ m}^3$ 。裂隙深度 $H=0.5, 1.0, 2.0\text{ m}$ 时,降雨 480 h 内,入渗深度分别为 $1.51, 1.78, 2.00\text{ m}$,总入渗量分别为 $1.57\times 10^{-1}, 1.68\times 10^{-1}, 1.81\times 10^{-1}\text{ m}^3$ 。随着裂隙出现与深度增加,其入渗量和入渗深度增幅较小,优势流作用不显著。

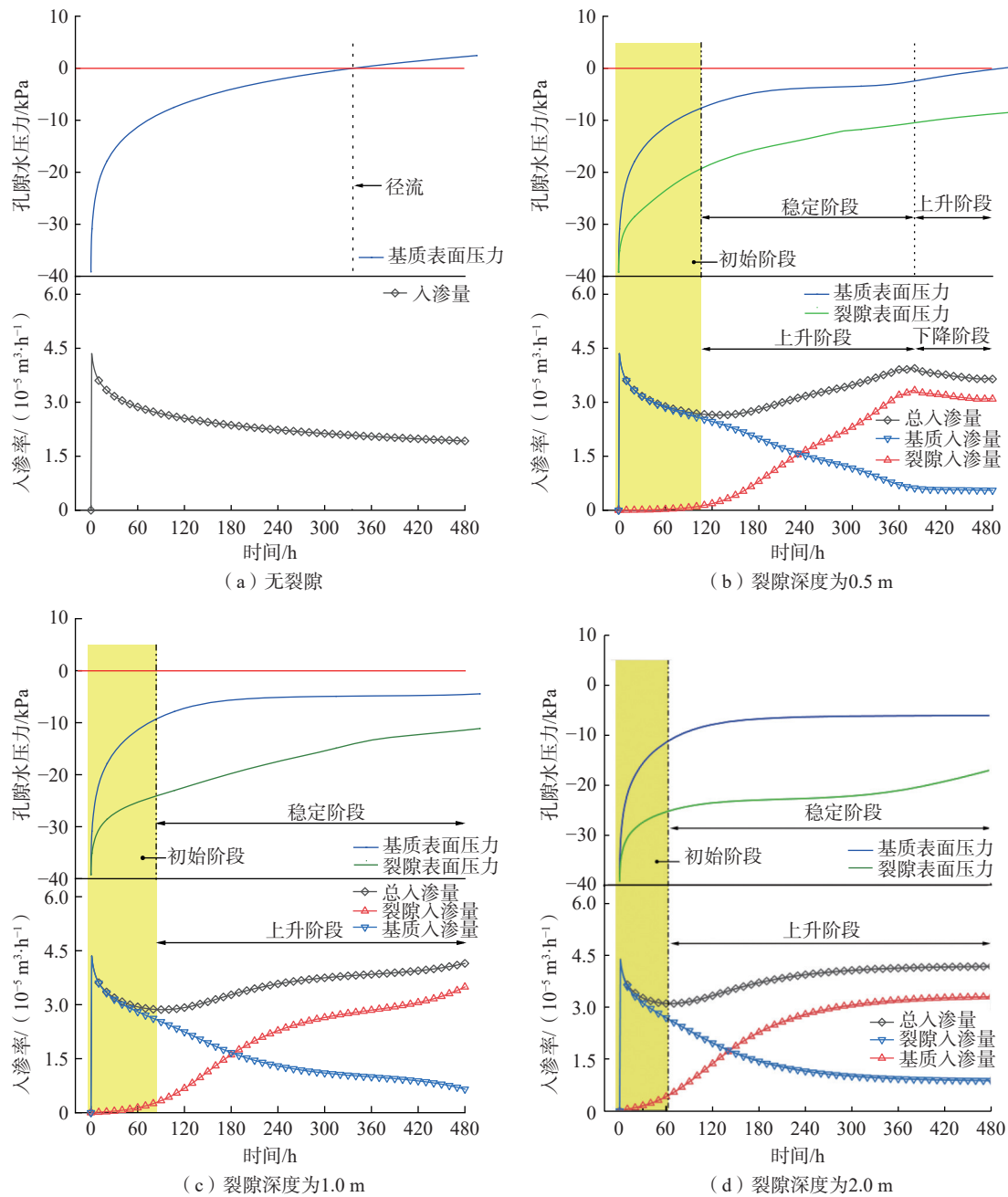


图 11 长时弱降雨下入渗量及表面压力变化曲线

Fig. 11 Variation curve of infiltration volume and surface pressure under long-term weak rainfall

优势流入渗过程示意图如图 14—15。短时强降雨作用下,在降雨初期,见图 14(b),基质与裂隙的入渗能力都较强,此时降雨可全部入渗,基质与裂隙入渗边界均为流量边界,入渗量受降雨强度控制,此时降雨入渗为土体基质控制的垂直入渗,浸润锋总体表现为“水平型”。随着降雨持续,见图 14(c),基质表面饱和出现积水,降雨强度超过基质入渗能力,基质表面的入渗边界将转化为压力入渗边界,而裂隙的入渗能力较大,裂隙表面的入渗边界仍为流量边界,并且超过基质入渗能力

的降水也将由优势的表面入渗。此时大部分为裂隙控制的水平入渗,浸润锋总体表现为“水滴型”。降雨持续一段时间后,见图 14(d),在基质垂直入渗与裂隙优势流入渗的共同影响下,裂隙影响范围内的土体达到饱和,坡面开始出现径流,裂隙域与基质域均转化为积水入渗边界。此时降雨入渗为土体基质控制的垂直入渗,浸润锋总体表现为“水平型”。长时弱降雨作用下,降雨在基质和裂隙中的入渗作用均较强,降雨可全部入渗,入渗边界为流量边界,入渗量受降雨强度控制。并

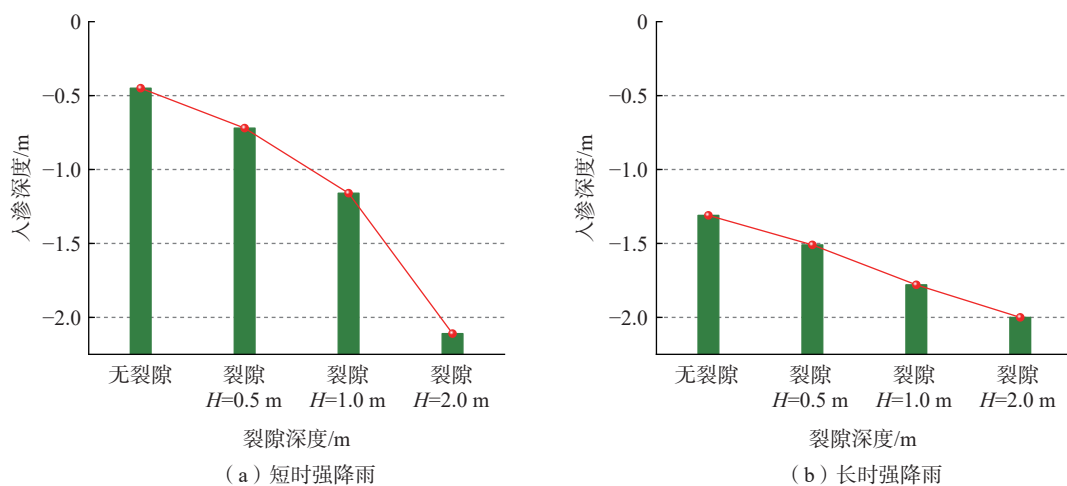


图 12 不同工况下降雨入渗深度变化曲线

Fig. 12 Variation curve of rainfall infiltration depth under different working conditions

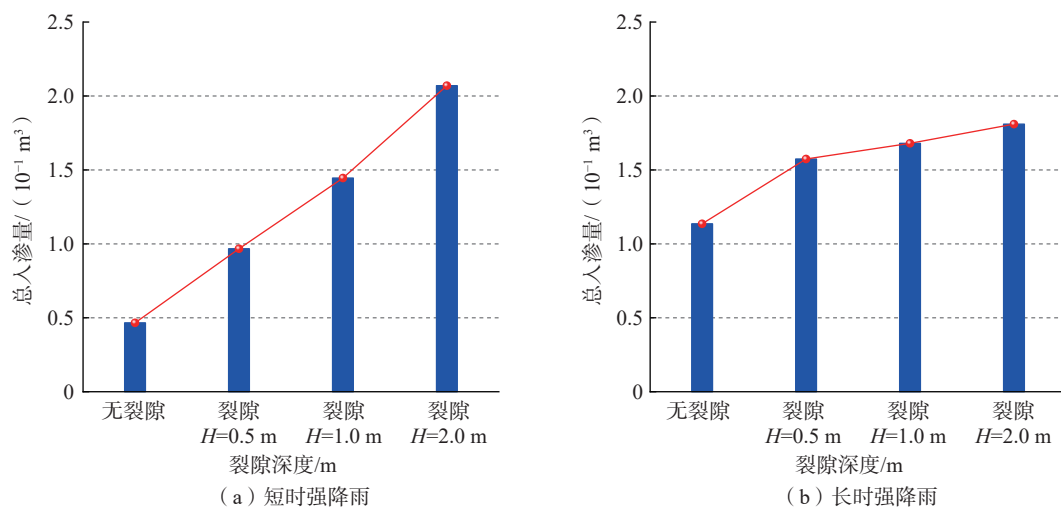


图 13 不同工况下总入渗量变化曲线

Fig. 13 Variation curve of total infiltration volume under different working conditions

且降雨在裂隙和土体基质中的入渗速度相差不大,此时降雨入渗为土体基质控制的垂直入渗,浸润锋总体表现为“水平型”,见图 15(a)(b)。

以徐洼滑坡为例,研究表明,累计位移较大的监测点附近明显的地表裂隙形成的优势通道是此类滑坡失稳的关键因素。在短时强降雨条件下,随着裂隙的出现与发育,入渗量逐渐提高,雨水入渗逐渐转变为受优势流控制的优势流入渗^[29]。与本文数值模拟分析结果一致。

以黏土为主的膨胀土滑坡其滑体饱和和渗透系数较小,在降雨作用下,雨水只有小部分入渗进入坡体,大部分降雨转化为坡面径流排泄^[29],降雨入渗的深度有限,理论上不易发生失稳破坏。但本文研究认为,因膨胀土黏土矿物含量高,对水分变化十分敏感,易吸水膨胀失

水收缩,因此膨胀土易产生裂隙,裂隙发育形成的各类优势流通通道是控制膨胀土滑坡发生失稳破坏的关键因素。受膨胀土滑坡土质性质的影响,滑坡表面分布大量裂隙,裂隙为雨水入渗提供了通道,而裂隙末端土体完整性较好,渗透性较差,在强降雨或者持续降雨作用下,容易在此位置形成暂饱和区,构成膨胀土土体内部的潜在滑动面。研究膨胀土中存在的各类优势入渗通道的渗流特征,以及优势流持续作用下滑坡的稳定性演化规律,对深化认识膨胀土滑坡触发和变形破坏机制,优化该类灾害的预警模型,具有较高的理论意义和工程实用价值。

4 结论

(1) 裂隙处与无裂隙处的入渗模式不同,无裂隙处

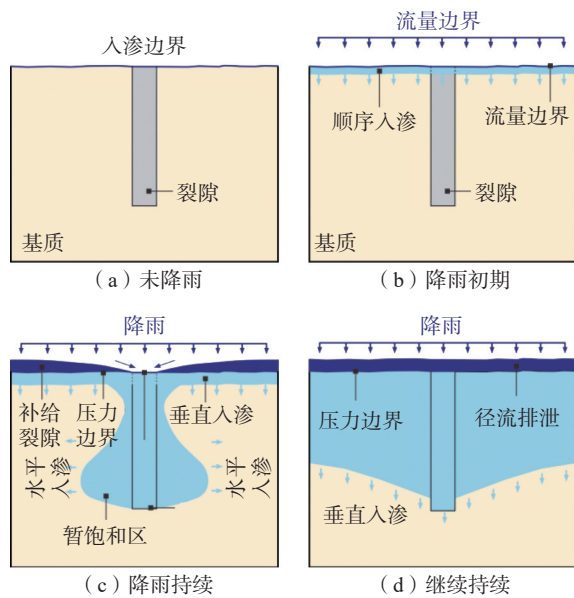


图 14 短时强降雨作用下优势流入渗过程示意图

Fig. 14 Schematic diagram of dominant inflow and infiltration process under short-term heavy rainfall

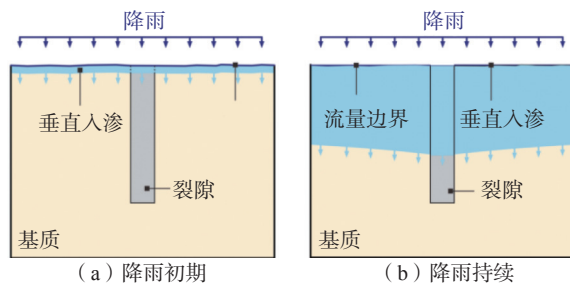


图 15 长时弱降雨作用下优势流入渗过程示意图

Fig. 15 Schematic diagram of dominant inflow and infiltration process under long-term weak rainfall

降雨主要为沿土柱表面向下的垂直入渗,饱和方式为由上向下饱和,浸润锋表现为“直线型”下移。裂隙处降雨首先充满裂隙,在裂隙末端形成暂饱和区,随后向两侧水平入渗,饱和方式为由下向上饱和,浸润锋表现为“漏斗型”—“水滴型”—“直线型”。

(2)短时强降雨作用下,随着裂隙深度增加,优势流控制着降雨入渗过程,入渗量和入渗深度与裂隙深度呈正比,入渗深度与裂隙深度基本一致。并且延长了径流产生以及表层土体受冲刷的时间,而随着深层土体达到饱和,不利于斜坡整体稳定。

(3)长时弱降雨作用下,优势流入渗效果减弱,优势流现象产生较慢。降雨沿裂隙入渗速度与在基质孔隙入渗速度基本一致,入渗主要表现为沿土柱表面向下的垂直入渗。入渗量和入渗深度增幅较小,在相同降雨时间内,最终入渗量和入渗深度与裂隙深度的相关性不显著。

参考文献 (References):

- [1] FOX G A, WILSON G V. The role of subsurface flow in hillslope and stream bank erosion: a review [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 717–733.
- [2] CHEN Hongxin, ZHANG Limin. A physically-based distributed cell model for predicting regional rainfall-induced shallow slope failures [J]. *Engineering Geology*, 2014, 176: 79–92.
- [3] 邓威,肖世国.含裂隙近水平红层软岩边坡渗透稳定性模型试验[J].水文地质工程地质,2024,51(1):57–68. [DENG Wei, XIAO Shiguo. Model test on stability of soft rock slopes composed of nearly horizontal redbeds with cracks [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(1): 57–68. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 吴玮江,宋丙辉,刘迪,等.黄土塬区包气带水分运移特征研究[J].水文地质工程地质,2023,50(3):12–22. [WU Weijiang, SONG Binghui, LIU Di, et al. Research on the characteristics of water transport in the aeration zone of loess tableland [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(3): 12–22. (in Chinese with English abstract)]
- [5] VAN ASCH T W J, HENDRIKS M R, HESSEL R, et al. Hydrological triggering conditions of landslides in varved clays in the French Alps [J]. *Engineering Geology*, 1996, 42(4): 239–251.
- [6] HENCHER S R. Preferential flow paths through soil and rock and their association with landslides [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(12): 1610–1630.
- [7] 杨宗佶,蔡焕,雷小芹,等.非饱和地震滑坡堆积体降雨破坏水-力耦合行为试验[J].岩土力学,2019,40(5):1869–1880. [YANG Zongji, CAI Huan, LEI Xiaoqin, et al. Experiment on hydro-mechanical behavior of unsaturated gravelly soil slope [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(5): 1869–1880. (in Chinese with English abstract)]
- [8] KRZEMINSKA D M, BOGAARD T A, MALET J P, et al. A model of hydrological and mechanical feedbacks of preferential fissure flow in a slow-moving landslide [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(3): 947–959.
- [9] 刘向峰,于冰,郝国亮,等.降雨作用下多软弱夹层边坡滑移机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2024,35(6):1–12. [LIU Xiangfeng, YU Bing, HAO Guoliang, et al. Analysis of sliding mechanism of the cut slopes with multi-weak interlayers under rainfall [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(6): 1–12. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李斌,郝继锋,鞠远江,等.渠坡非饱和膨胀土含水率与强度关系试验研究[J].水文地质工程地质,2022,49(5):129–136. [LI Bin, HAO Jifeng, JU Yuanjiang, et al. An

- experimental study of the relationship between water content and strength of unsaturated expansive soil on canal slope [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 129 – 136. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 等. 膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 132 – 140. [CHEN Liangsheng, WEI Bingxu, LIAO Huan, et al. A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 132 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 曹玲. 膨胀土的裂隙演化机制及其边坡稳定性分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016. [CAO Ling. Evolution law of Cracks&Slope stability analysis of expansive soil [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [13] PEI Pei, ZHAO Yanlin, NI Pengpeng, et al. A protective measure for expansive soil slopes based on moisture content control [J]. *Engineering Geology*, 2020, 269: 105527.
- [14] INDRAWAN I G B, RAHARDJO H, LEONG E C. Drying and wetting characteristics of a two-layer soil column [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44(1): 20 – 32.
- [15] 朱伟, 陈学东, 钟小春. 降雨入渗规律的实测与分析 [J]. *岩土力学*, 2006, 27(11): 1873 – 1879. [ZHU Wei, CHEN Xuedong, ZHONG Xiaochun. Observation and analysis of rainfall infiltration [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(11): 1873 – 1879. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 马佳. 裂土优势流与边坡稳定性分析方法 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2007. [MA Jia. Preferential flow and stability analysis method for fissure clay slopes [D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007. (in Chinese with English abstract)]
- [17] BROOKS R H, COREY A T. Properties of porous media affecting fluid flow [J]. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1966, 92(2): 61 – 88.
- [18] 周创兵, 熊文林. 岩石节理的渗流广义立方定理 [J]. *岩土力学*, 1996, 17(4): 1 – 7. [ZHOU Chuangbing, XIONG Wenlin. Generalized cubic theorem of seepage in rock joints [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1996, 17(4): 1 – 7. (in Chinese)]
- [19] XIAO Weimin, XIA Caichu, WEI Wang, et al. Combined effect of tortuosity and surface roughness on estimation of flow rate through a single rough joint [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2013, 10(4): 045015.
- [20] BOUDREAU B P. The diffusive tortuosity of fine-grained unlithified sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(16): 3139 – 3142.
- [21] BELEM T, HOMAND-ETIENNE F, SOULEY M. Quantitative parameters for rock joint surface roughness [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2000, 33(4): 217 – 242.
- [22] 赵宽耀, 许强, 刘方洲, 等. 黄土中优势通道渗流特征研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(5): 941 – 950. [ZHAO Kuanyao, XU Qiang, LIU Fangzhou, et al. Seepage characteristics of preferential flow in loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(5): 941 – 950. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 年庚乾, 陈忠辉, 周子涵, 等. 基于双重介质模型的裂隙岩质边坡渗流及稳定性分析 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(增刊 2): 736 – 746. [NIAN Gengqian, CHEN Zhonghui, ZHOU Zihan, et al. Seepage and stability analysis of fractured rock slope based on dual medium model [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(Sup 2): 736 – 746. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 侯晓萍, 樊恒辉. 基于 COMSOL Multiphysics 的非饱和裂隙土降雨入渗特性研究 [J]. *岩土力学*, 2022, 43(2): 563 – 572. [HOU Xiaoping, FAN Henghui. Study on rainfall infiltration characteristics of unsaturated fractured soil based on COMSOL Multiphysics [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(2): 563 – 572. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 胡静, 陈胜宏. 渗流分析中排水孔模拟的空气单元法 [J]. *岩土力学*, 2003, 24(2): 281 – 283. [HU Jing, CHEN Shenghong. Air element method for modeling drainage holes in seepage analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(2): 281 – 283. (in Chinese with English abstract)]
- [26] LEE Min, GOFAR N, RAHARDJO H. A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability [J]. *Engineering Geology*, 2009, 108(3/4): 272 – 285.
- [27] SILLERS W S, FREDLUND D G. Statistical assessment of soil-water characteristic curve models for geotechnical engineering [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(6): 1297 – 1313.
- [28] 李林翠. 压实黄土持水和降雨入渗特性试验研究 [D]. 西安: 长安大学, 2021. [LI Lincui. An experimental study on soil water retention characteristics and rainfall infiltration characteristics of the compacted soils [D]. Xi'an: Changan University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 黄晓虎, 魏兆亨, 易武, 等. 裂隙优势流入渗诱发堆积层滑坡浅层破坏机理研究 [J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(6): 1136 – 1145. [HUANG Xiaohu, WEI Zhaocheng, YI Wu, et al. Mechanism of fracture preferential flow infiltration-induced shallow damage of colluvial landslides [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(6): 1136 – 1145. (in Chinese with English abstract)]