

宿文姬, 杨惺, 郑志文, 等. 降雨条件下边坡体积含水率变化规律研究[J]. 华南地震, 2019, 39(1): 1-6. [SU Wenji, YANG Xing, ZHENG Zhiwen, et al. Study on the Variation Law of Volumetric Water Content of Slope Under Rainfall Conditions [J]. South China journal of seismology, 2019, 39(1): 1-6]

降雨条件下边坡体积含水率变化规律研究

宿文姬^{1,2}, 杨 惺^{1,2}, 郑志文³, 张 伟³

(1. 华南理工大学 土木与交通学院, 广州 510641; 2. 华南理工大学 华南岩土工程研究院, 广州 510640;
3. 广东省地质环境监测总站, 广州 510510)

摘要: 持续降雨是边坡发生失稳破坏的主要诱因之一, 基于饱和—非饱和渗流理论, 对梅州市大埔县某边坡的渗流场进行模拟, 研究在不同降雨工况下该边坡土体体积含水率的时空变化规律。研究表明: 相同条件下, 降雨强度越大(降雨历时越长), 边坡表层土体体积含水率变化越大; 降雨强度 60 mm/d 历时 1 d 的暴雨对边坡表层土体体积含水率的增幅作用存在着一定的滞后性, 其余工况未表现出滞后现象; 降雨强度为 120 mm/d 和 300 mm/d 的两种工况各研究点任意时段体积含水率较为接近; 当降雨强度达到 60 mm/d 以上时, 边坡内部体积含水率空间变化主要受降雨历时影响, 降雨历时越长, 降雨入渗深度和体积含水率变化越大。

关键词: 降雨强度; 降雨历时; 体积含水率

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)01-0001-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.01.001

Study on the Variation Law of Volumetric Water Content of Slope Under Rainfall Conditions

SU Wenji^{1,2}, YANG Xing^{1,2}, ZHENG Zhiwen³, ZHANG Wei³

(1. School of civil and transportation, South China university of technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China; 2. South China Institute of Geotechnical Engineering, South China university of technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China; 3. Guangdong Geological Environment Monitoring Station, Guangzhou, Guangdong 510510, China)

Abstract: Continuous rainfall is one of the main causes of instability and failure of slope, Based on the saturated-unsaturated seepage theory, this paper simulates the seepage field of a slope in Dapu County, Meizhou City, and studies the temporal and spatial variation of the volumetric water content of the slope under different rainfall conditions. The results show that: under the same conditions, the greater the rainfall intensity (the longer the rainfall duration), the greater change the volumetric water content of the slope surface soil. The rainstorm with a rainfall intensity of 60 mm/d and a duration of 1d has a certain hysteresis on the increase of the

收稿日期: 2018-11-15

项目资助: 广东省国土资源厅科技项目(编号 GDGTKJ2018004)

通讯作者: 宿文姬(1969-), 女, 博士, 副教授, 从事地质灾害监测与防护工程研究。

E-mail: tbyswj@163.com.

volume moisture content of the surface soil on the slope, while the rest of the working conditions do not show hysteresis. When the rainfall intensity was 120 mm/d and 300 mm/d respectively, the volumetric moisture content of each research point at any time period was relatively close to each other; When the rainfall intensity reaches 60 mm/d or more, the spatial change of volume water content inside slope is mainly affected by the duration of rainfall. The longer the duration of rainfall, the greater the change of rainfall infiltration depth and volume water content.

Keywords: Rainfall intensity; Rainfall duration; Volumetric water content

0 引言

持续降雨是边坡发生失稳破坏的主要诱因之一,一方面,降雨使得土体重度增加,增大了土体的下滑力;另一方面,降雨入渗造成土体的含水率发生变化,含水率的增加不同程度地降低土体抗剪强度,进而影响边坡的稳定性。很多学者针对土质边坡的降雨入渗展开了深入研究:蒋中明等^[1-4]通过数值模拟从降雨强度、降雨历时和前期降雨等方面探讨边坡渗流特征;左自波等^[5-7]采用试验手段研究了降雨入渗条件下边坡内部的渗流特性,取得了良好的结果。以上研究内容从各个角度分析了边坡在降雨条件下的渗流特征,但针对降雨条件下边坡内部体积含水率时空变化规律的分析较少。为此,本文基于饱和—非饱和渗流理论,对降雨条件下饱和—非饱和土边坡渗流场进行模拟,研究不同降雨强度和降雨历时对边坡体积含水率时空变化规律的影响,为探讨边坡失稳机理和实际工程治理提供依据^[8]。

1 饱和—非饱和渗流理论

1.1 饱和—非饱和渗流达西定律

渗流是液体在多孔介质中的流动,1856年法国工程师达西通过研究砂层的渗透试验总结得到了线性渗透定律,即为达西定律,该定律主要描述了流体速度 v 与总水头梯度和渗透系数之间的函数关系,可用来表达饱和和土体中水的流动特性:

$$v_w = -k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \quad (1)$$

其中, $\frac{\partial h_w}{\partial y}$ 为水力梯度; k_w 为饱和渗透系数; v_w 为水流速度。

1.2 饱和—非饱和渗流基本微分方程

在进行降雨条件下边坡渗流场分析中,降雨

入渗的流动问题一般可简化为二维流动问题。在推导微分方程之前,首先做如下假定:(1)微元体只发生 x 、 y 两个方向流动,且土体形状不受到水流作用的改变;(2)在渗流计算中,假设渗流方向各项同性。推导得出的二维饱和—非饱和渗流微分方程为^[9-10]:

$$m_v p_w g \frac{\partial h_w}{\partial t} = \frac{\partial \left[k_w \frac{\partial h_w}{\partial x} \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right]}{\partial y} \quad (2)$$

式中: m_v 为与基质吸力变化有关的水的体积变化系数,是土水特征曲线斜率的绝对值; p_w 为土体中渗流体的密度; h_w 为某处一点的总水头,总水头大小为位置水头和压力水头之和; k_w 为土体的渗透系数。

2 数值模型

2.1 计算模型

(1)模型概况。以梅州市大埔县某一边坡为工程背景,该边坡坡高 10 m,坡角 51.34°,边坡土层自上而下分为砂质黏性土和砾质黏性土。利用 geo-studio 的 seep/w 板块建立有限元模型。模型左侧地下水位高程为 6 m,右侧地下水位高程为 2 m。模型网格尺寸为 0.25 m,整个模型包括 5942 个节点,5784 个单元(图 1)。本文以图 1 中边坡上部、中部和坡底以下 0.5 m 左右的三个节点作为研究特征点,以 I—I 截面为研究辅助截面。

(2)土层参数。土层饱和和体积含水率根据土工试验报告成果取平均值,其中,砂质黏性土的饱和和体积含水率为 0.4297,砾质黏性土的饱和和体积含水率为 0.4007。渗透系数根据单环法试验得出,砂质黏性土渗透系数取 2.97×10^{-7} m/s,砾质黏性土渗透系数取 5.56×10^{-7} m/s。各土层的土水特征曲线是根据土层的饱和和体积含水率,利用 seep/w 自带的样本函数拟合得出的,而渗透系数曲线是根据土层的土水特征曲线和饱和渗透系数,利用 Van

Genuchten 模型生成的, 两土层土水特征曲线和渗透系数曲线分别如图 2~5 所示。

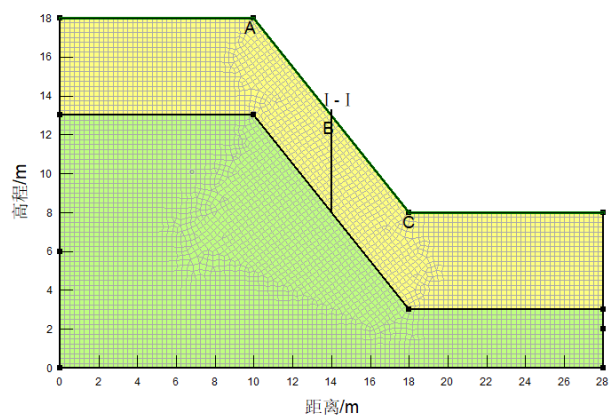


图 1 边坡数值模型

Fig.1 Slope numerical model

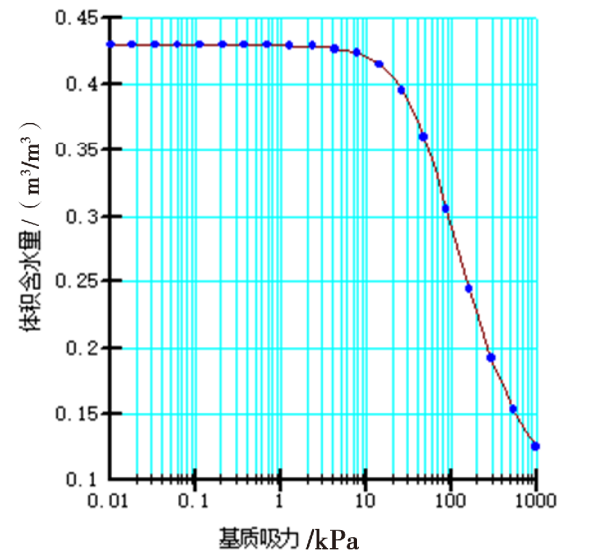


图 2 砂质黏性土土水特征曲线

Fig.2 Soil water characteristic curve of sandy clay

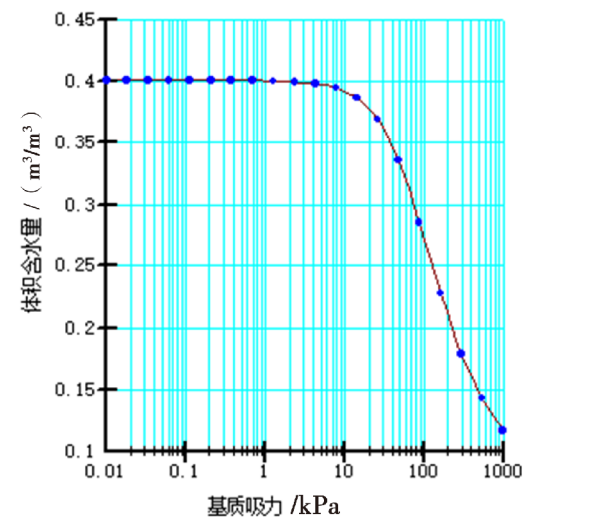


图 3 砾质黏性土土水特征曲线

Fig.3 Soil water characteristic curve of Gravel clay

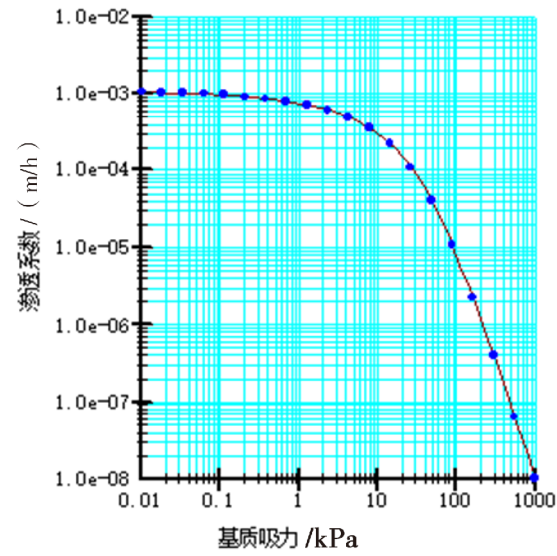


图 4 砂质黏性土渗透系数曲线

Fig.4 Permeability coefficient curve of sandy clay

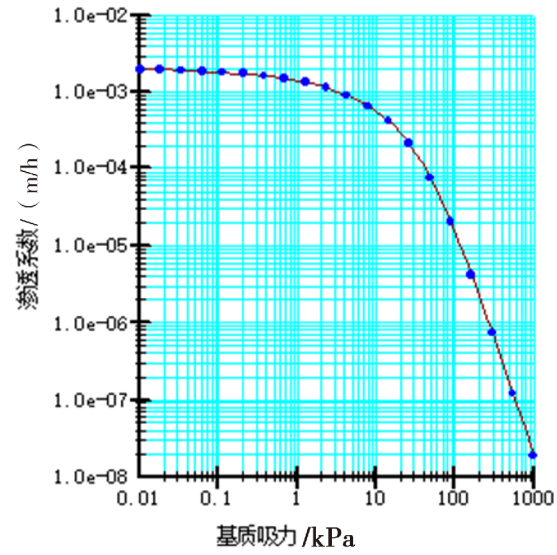


图 5 砾质黏性土渗透系数曲线

Fig.5 Permeability coefficient curve of Gravel clay

- (3)边界条件。①地下水位以下的侧边界为定水头边界, 水头值等于高程值, 模型最下部为不透水边界;
- ②地下水位以上的侧边界按零流量边界处理;
- ③坡顶和坡面设定为流量边界或定水头边界, 具体原则如下: 当降雨强度大于边坡饱和和渗透系数时, 雨水不完全入渗, 这时视作定水头边界; 当降雨强度小于渗透系数时, 雨水完全入渗, 视作流量边界。

2.2 计算工况

根据国家气象部门关于降雨量标准的规定, 当降雨强度大于 50 mm/d 时为暴雨, 降雨强度大于 100 mm/d 为大暴雨, 降雨强度大于 250 mm/d

为特大暴雨。由于大浦县边坡失稳多发生在降雨较大情况下,根据近十年部分监测站点显示日最大降雨量达 230 mm,因此,结合本文研究目的和实际不利情况设置了如下 5 种降雨工况,各工况对应的降雨强度和降雨历时如表 1 所示。其中,工况 1~3 旨在研究相同降雨时间下不同降雨强度对边坡体积含水率分布的影响,工况 1、4、5 旨在研究在同一降雨强度不同降雨历时对边坡体积含水率的影响。

表 1 不同工况下降雨强度和降雨历时表

Table 1 Rainfall intensity and rainfall duration under different conditions

工况	降雨强度/(mm/d)	降雨时间/(d)	计算时长/(d)
1	60	1	5
2	120	1	5
3	300	1	5
4	60	2	5
5	60	3	5

3 数值模拟结果分析

3.1 不同降雨强度入渗对体积含水率的影响

经过对模拟结果进行整理,得出三个节点在不同降雨强度下体积含水率的变化趋势,分别如图 6~8 所示。

对比三种工况,可以发现不同降雨强度下,同一节点土体含水率在降雨过程中都随着降雨时间增大而增大,其中,降雨强度越大,土体含水率增加的幅度越大;当降雨停止一段时间后,土体含水率逐渐减小。由图 6~8 可知,工况 1 中 A 点含水率在 27 h 达到最大值,位于边坡中部的 B 点体积含水率则在 30 h 达到最大值,而坡脚处的 C 点体积含水率于 24 h 达到最大值,其他两种工况下各节点体积含水率均在 24 h 达到最大值。这说明了当降雨强度较小时,降雨对土体含水率的增幅作用不是在雨停后立即消散,表现出滞后特点,也间接验证了边坡在降雨条件下出现最不稳定的状态相对于雨停时间存在滞后性这一普遍结论的正确性。

对比图 6~8 的工况 2(降雨强度 120 mm/d)和工况 3(降雨强度 300 mm/d)各研究节点体积含水率变化趋势,可以发现在这两种工况下,各研究节点在同一时段体积含水率差值不大,说明土体含水率变化幅度不仅与降雨强度有关,而且很大

程度取决于土体的渗透系数,由于工况 2 和工况 3 降雨强度远大于渗透系数,大部分降雨形成地表径流,沿坡面流出,导致两者有效入渗量接近,因此体积含水率变化幅度相近。同时,从图 8 可以看出,三种工况下坡脚体积含水率变化较为接近,说明降雨对边坡坡脚影响较大。

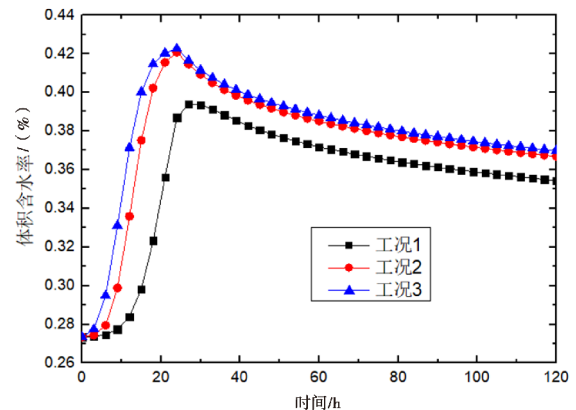


图 6 A 点不同降雨强度体积含水率变化图

Fig.6 Change in volumetric water content of different rainfall intensity at point A

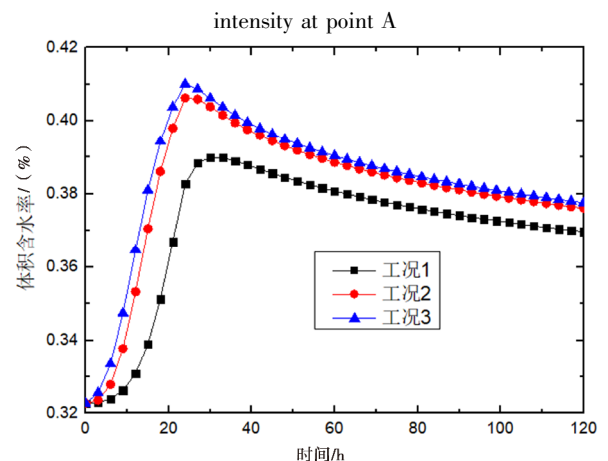


图 7 B 点不同降雨强度体积含水率变化图

Fig.7 Change in volumetric water content of different rainfall intensity at point B

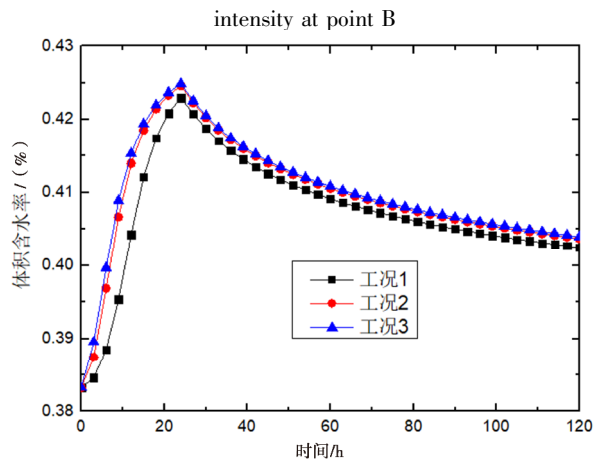


图 8 C 点不同降雨强度体积含水率变化图

Fig.8 Change in volumetric water content of different rainfall intensity at point C

3.2 不同降雨历时对体积含水率的影响

为研究不同降雨历时对边坡体积含水率的影响,设置 60 mm/d 的降雨强度,分析降雨历时分别为 1 d、2 d、3 d 时边坡上部、中部和坡底三个节点体积含水率的变化情况,整理结果如图 9~11

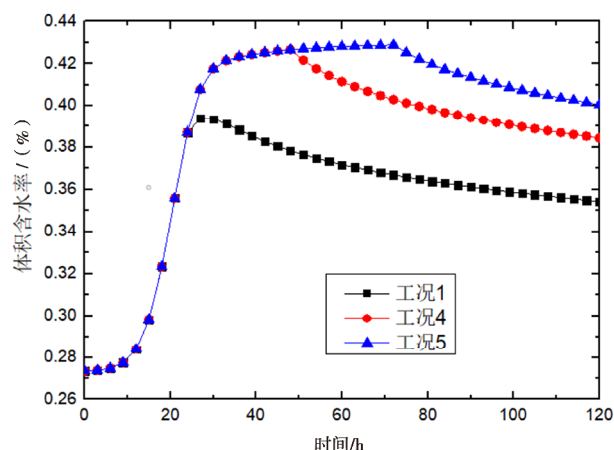


图9 A点不同降雨历时体积含水率变化图

Fig.9 Change in volumetric water content of different rainfall durations at point A

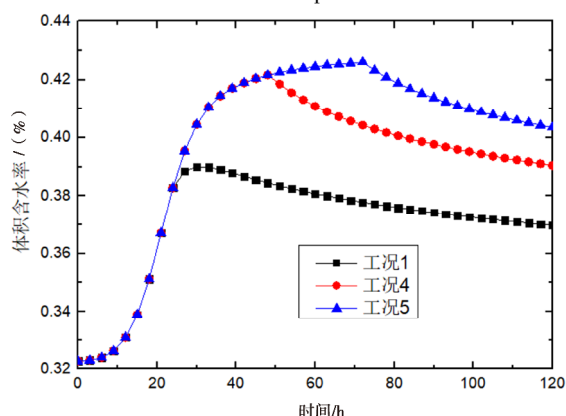


图10 B点不同降雨历时体积含水率变化图

Fig.10 Change in volumetric water content of different rainfall durations at point B

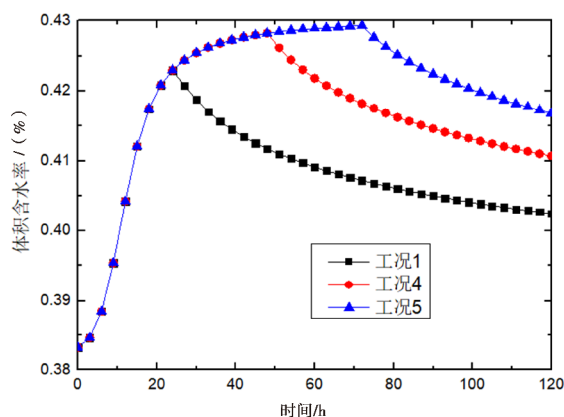


图11 C点不同降雨历时体积含水率变化图

Fig.11 Change in volumetric water content of different rainfall durations at point C

所示。从图中可知:相同降雨强度下,降雨历时越长,降雨对土体含水率的增幅作用越大,同时,当降雨历时较短时,边坡各点体积含水率达到峰值的时间不尽相同,各节点体积含水率达到峰值的顺序依次为坡脚—坡顶—边坡中部。

3.3 体积含水率空间变化规律

体积含水率的变化还表现在边坡的空间位置上,以边坡中部的 I-I 截面为研究辅面,研究边坡在工况 1(降雨强度 60 mm/d, 历时 1d)工况 3(降雨强度 300 mm/d, 历时 1d)和工况 5(降雨强度 60 mm/d, 历时 3d)下,该截面不同高程下含水率的变化规律,各工况变化趋势分别如图 12~14 所示。

对比图 12 和图 13 可以发现:降雨过程中,工况 1 降雨入渗深度在 1.5 m 左右,高程最大处节点体积含水率峰值为 0.423 5;工况 3 降雨入渗深度为 2 m,高程最大处节点体积含水率峰值为 0.426 7。说明在相同降雨时间下,降雨强度越大,入渗深度越大。

对比图 12 和图 14 可以发现:降雨过程中工况 5 中降雨入渗深度在 3.5 m 左右,高程最大处节点体积含水率峰值为 0.428 9,说明相同降雨强度下,降雨历时越长,雨水入渗深度越大。

由图 13 和图 14 可知:虽然工况 3 总降雨量(300 mm)比工况 5(180 mm)大,但是工况 5 降雨对边坡表层土体体积含水率影响更大,以高程 11 m 左右的节点为例,工况 3 该处节点体积含水率增加了 0.03,工况 5 增加了 0.06,说明了当降雨强度大于渗透系数时,长时间暴雨工况比短时间特大暴雨工况对边坡更不利。

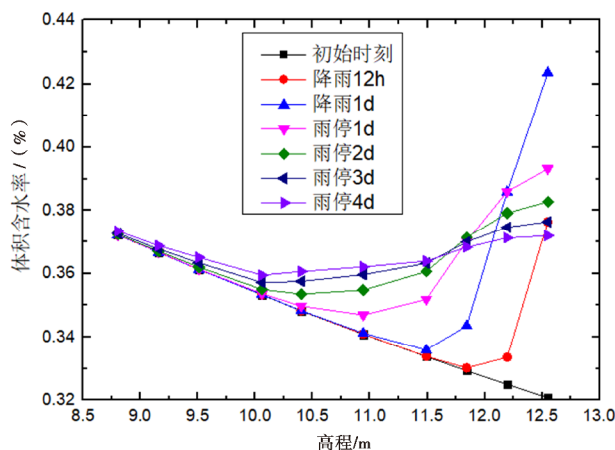


图12 I-I截面在工况1下含水率与坡高变化关系

Fig.12 Relationship between volumetric water content and slope height in I-I section under working condition of 1

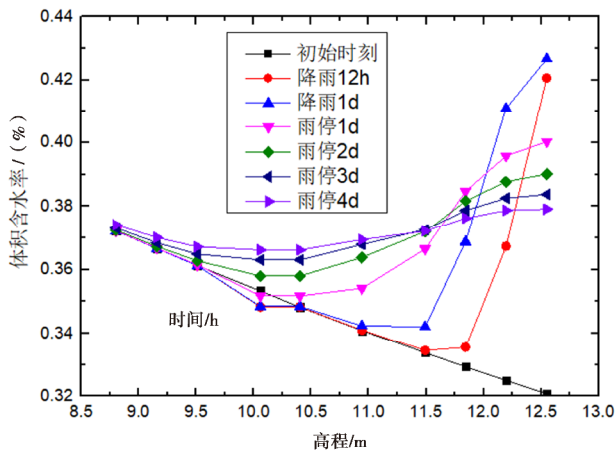


图 13 I-I 截面在工况 3 下含水率与坡高变化关系

Fig.13 Relationship between volumetric water content and slope height in I-I section under working condition of 3

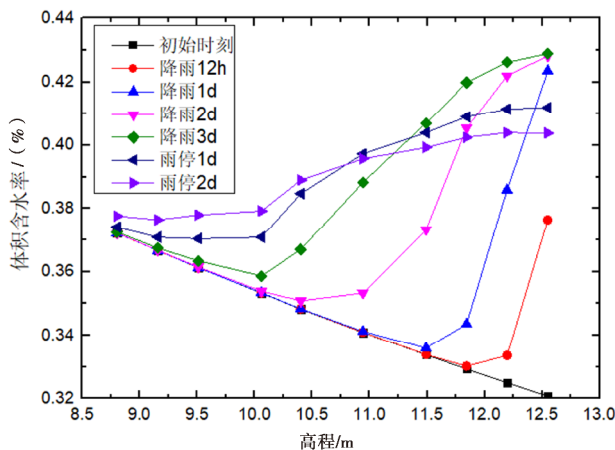


图 14 I-I 截面在工况 5 下含水率与坡高变化关系

Fig.14 Relationship between volumetric water content and slope height in I-I section under working condition of 5

对比三种工况, 由于三者降雨强度均大于渗透系数, 因此边坡表层高程最大处体积含水率峰值都接近于饱和状态, 且边坡内部体积含水率空间变化主要受降雨历时影响。

4 结论

本文利用geo-studio 建立了梅州市大埔县某边坡的降雨入渗数值计算模型, 模拟不同降雨强度和降雨历时下边坡内部体积含水率时空变化规律, 得出以下结论:

(1)相同降雨时间下, 降雨强度越大, 边坡表层土体体积含水率变化越大, 雨水入渗深度越大; 降雨强度 60 mm/d 持续一天的短时间暴雨对边坡表层土体体积含水率的增幅作用存在一定滞后性。

(2)相同降雨强度下, 降雨历时越长, 边坡表层土体体积含水率变化越大, 入渗深度越大; 各降雨工况下坡脚处体积含水率变化较大且峰值含水率较高, 因此在实际工程治理中应加强坡脚处的防护措施。

(3)当降雨强度为 120 mm/d 和 300 mm/d 时, 边坡表层各研究点任意时段体积含水率较为接近。

(4)由于本文设置的降雨强度均大于渗透系数, 边坡内部体积含水率空间变化主要受降雨历时影响, 历时越长, 降雨入渗深度和体积含水率变化越大。

参考文献:

- [1] 蒋中明, 曾铃, 付宏渊, 等. 降雨条件下厚覆盖层边坡的渗流特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(07): 2782-2788.
- [2] 李延涛, 宗金辉, 王成华, 等. 降雨条件下饱和-非饱和土边坡渗流场分析[J]. 河北农业大学学报, 2014, 37(03): 94-100.
- [3] 张书华, 张海龙, 赵中华. 降雨条件下体积含水率对堆积体边坡渗流特性的影响研究[J]. 工程地质学报, 2015, 23(05): 827-834.
- [4] 曾铃, 李光裕, 史振宁, 等. 前期降雨对非饱和覆盖层边坡性状及稳定性的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2018, 49(01): 238-246.
- [5] 左自波, 张璐璐, 王建华. 降雨触发不同级配堆积体滑坡模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(07): 1319-1327.
- [6] 李卓, 何勇军, 李宏恩, 等. 前期降雨作用下边坡滑坡模型试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(05): 400-405.
- [7] 许旭堂, 简文彬, 吴能森, 等. 降雨入渗影响下边坡中的非饱和渗流特性[J]. 地球科学, 2018, 43(03): 922-932.
- [8] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [9] Ning Lu, William J. Likos. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [10] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 1993.