

doi:10.3799/dqkx.2017.050

斜坡降雨入渗的改进 Mein-Larson 模型

唐 扬¹, 殷坤龙², 汪 洋^{2*}, 陈丽霞³, 刘继芝娴²

1. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

摘要: 土壤初始含水率分布是影响湿润锋下移的重要因素之一。传统的降雨入渗模型仅假定初始含水率均匀分布, 并没有考虑非均匀分布的情况。以 Mein-Larson 降雨入渗模型为基础, 假定初始含水率随垂直于坡面方向深度呈线性分布, 推导了一种新的滑坡降雨入渗函数, 弥补了原模型只能用于初始含水率均匀分布情况下的不足。研究表明: 初始含水率分布对湿润锋下移有较大影响, 在初始含水率呈线性分布的情况下, 坡体表面含水率越大, 含水率随垂直于坡面方向深度的变化率 k 值越接近零, 湿润锋下渗速度越快, 当 $k=0$ 时, 新模型退化为 Mein-Larson 降雨入渗模型, 证明 Mein-Larson 降雨入渗模型是新模型的一个特例。与有限元法得到的结果对比表明, 提出的降雨入渗新模型计算的湿润锋下渗深度与数值解结果相接近, 证明了该方法的可靠性。

关键词: 滑坡; 降雨入渗; Mein-Larson 模型; 初始含水率分布; 水文地质。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2017)04-0634-07

收稿日期: 2016-09-12

The Landslide Rain Infiltration Based on the Improved Mein-Larson Model

Tang Yang¹, Yin Kunlong², Wang Yang^{2*}, Chen Lixia³, Liu Jizhixian²

1. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The initial soil moisture content distribution was one of the important factors that affect the moving down of wetting front. Traditional rainfall infiltration model only assumed that the initial moisture content was uniform and the situation of non-uniform was not taking into consideration. Based on the Mein-Larson rainfall infiltration model, this paper deduced a new landslide rainfall infiltration function by assuming the initial moisture content distribution linear with the increase of perpendicular to the direction of slope surface depth. It made up for the original model that only applied to the situation of uniform initial moisture content distribution. The result showed that the initial moisture content distribution had large effect on the moving down of wetting front. In the case of initial moisture content was linear distribution, the greater the slope surface moisture content, the value of k which was the one of fitting parameters was closer to the zero, the faster the wetting front infiltrated. When the value of k equaled to the zero, the new model changed to the Mein-Larson rainfall infiltration model. It proved that the Mein-Larson rainfall infiltration model was a special case of the new model. Compared with the result of FEM, the results of the calculation model agree with that of FEM. It proved the reliability of the new model.

Key words: landslide; rainfall infiltration; Mein-Larson model; initial moisture content distribution; hydrogeology.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41572292).

作者简介: 唐扬 (1991-), 男, 博士研究生, 主要从事降雨滑坡破坏机理及稳定性研究相关工作. ORCID: 0000-0003-0875-5665. E-mail: tangyang.520@163.com

*** 通讯作者:** 汪洋, ORCID: 0000-0002-4854-1223. E-mail: wangyangcug@126.com

引用格式: 唐扬, 殷坤龙, 汪洋, 等, 2017. 斜坡降雨入渗的改进 Mein-Larson 模型. 地球科学, 42(4): 634-640.

降雨诱发浅层滑坡的机制是湿润锋下移导致坡体基质吸力降低,进而导致抗滑力减小,下滑力增大,发生失稳现象(Muntohar and Liao, 2010;吴益平等,2014;罗渝等,2014;李秀珍和何思明,2015;汪丁健等,2016). 所以研究人员在计算降雨型滑坡稳定性之前,必须首先分析湿润锋随时间的变化规律. 目前,针对该类问题所提出的计算模型,例如 Green-Ampt 模型、Mein-Larson 降雨入渗模型、Philips 入渗模型等都是假定初始含水率均匀分布(Chen *et al.*, 2006;陈晓东等,2008;Yeh *et al.*, 2008;李宁等,2012;简文星等,2013;李秀珍等,2015),均没有考虑初始含水率非均匀分布的情况. 因此,本文针对初始含水率非均匀分布的情况进行了探讨.

事实上,土壤初始含水率呈均匀分布的情况极其罕见,在大多数情况下,由于外界条件的不断变化,土壤水再分布时间较长(Hillel, 1971),理论上土壤水会呈线性分布(Fang and Esaki, 2012; Liu and Yan, 2013). 王千等(1993)、Liu *et al.* (2008)基于 Green-Ampt 降雨入渗模型推导了当初始含水率非均匀分布时,降雨条件下,湿润锋随时间变化的表达式,但该表达式并没有考虑坡角的影响. Liu (2013)等推导了初始含水率呈线性分布时的降雨入渗滑坡体稳定性计算表达式,但由于所需参数较多,很难应用于工程实际,且该表达式仅适用于在降雨强度小于坡体入渗能力的条件下. 因此,本文以 Mein-Larson 模型为基础,推导了初始含水率呈线性分布时,持续降雨下湿润锋随时间变化的表达式,并将改进的模型与原模型进行对比,改进模型不仅考虑了坡角的影响,也适用于降雨强度大于土壤入渗能力的情况,弥补了原模型的不足.

运用 HYDRUS-2D 数值模拟软件对上述改进模型的可靠性进行验证. 该数值模拟软件可以灵活处理各类边界条件,特别是可以设定初始含水率呈线性分布的情况,采用有限元方法,计算降雨入渗条件下含水率的分布状态.

1 降雨入渗模型

1.1 Mein-Larson 降雨入渗模型

早在 1911 年,Green and Ampt(1911)基于毛细理论提出了入渗模型,即 Green-Ampt(简称 GA)入渗模型. 该模型研究的是初始干燥的土壤在薄层积水时的入渗问题. 基本假定为:(1)入渗时存在着明确的水平湿润锋面;(2)地表处的积水深度恒定,

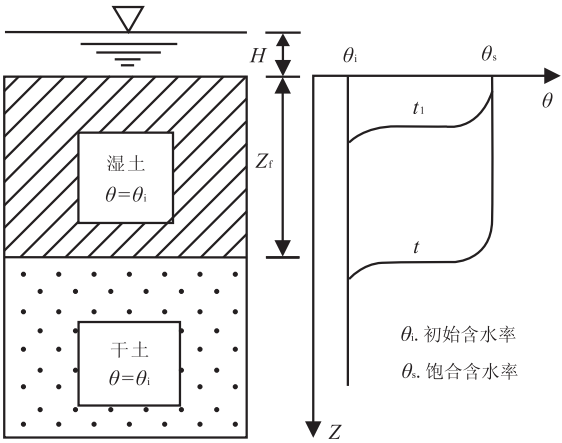


图 1 GA 入渗模型
Fig. 1 Green-Ampt model

不随时间改变;(3)湿润锋处的土壤水吸力为一定值,不随时间改变;(4)湿润区为饱和含水率,湿润锋前即为前期含水率. 基于上述假定,该模型主要能求解入渗量、入渗率及湿润锋面位置与时间的关系.

图 1 是 GA 模型的假设示意图,描述了当降雨强度大于滑体入渗能力时的入渗方式,即积水入渗.

Mein and Larson(1973)利用等效时间对 GA 入渗模型进行改进,将该模型应用于降雨条件下的坡体入渗问题(图 2),假定降雨条件下湿润锋平行向下推进,传导区含水率均匀分布,主要表达式如下:

$$i = K_s \frac{z_f^* \cos\beta + s_f + H}{z_f^*}, \quad (1)$$

$$K_s t \cos\beta = I - \frac{SM}{\cos\beta} \ln(1 + \frac{I \cos\beta}{SM}), \quad (2)$$

式中: z_f^* 为湿润锋到坡面的垂直距离(m); i 为入渗率(m/s); K_s 为饱和渗透系数(m/s); s_f 为湿润锋处的吸力水头(m); I 为累积入渗量(m); H 为地表积水的深度; $M = \theta_s - \theta_i$; $S = s_f + H$.

当地表积水很浅,或入渗时间较长时, H 相对于 z_f^* 可以略去,此时积水入渗状态下的地表入渗

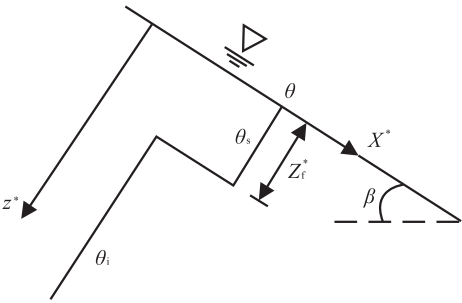


图 2 斜坡降雨入渗模型
Fig. 2 The rainfall infiltration model of landslide

率可以表示为：

$$i = K_s(\cos\beta + \frac{s_f}{z_f^*}). \tag{3}$$

式(1)、(2)便是 Mein-Larson 降雨入渗模型的核心公式。 θ_i 一般假定为常数,即初始含水率均匀分布。然而,在实际情况中,土壤初始含水率呈均匀分布的情况极其罕见,由于外界条件的不断变化,土壤水再分布时间较长,在理论上,土壤初始含水率常常呈线性分布(Liu and Yan, 2013; Fang and Esaki, 2012)。故本文以 Mein-Larson 入渗模型为基础,推导了土壤初始含水率为线性分布时,湿润锋随时间变化的表达式。最后,笔者利用数值模拟的方法来验证公式的可靠性。

1.2 改进的 Mein-Larson 降雨入渗模型

利用 Mein-Larson 入渗模型(图 3),其他假定条件不变,同时,为了便于计算,假定土层初始含水率为垂直于坡面方向深度 z^* 的线性函数：

$$\theta_i = \theta_0 + kz^*, \tag{4}$$

式中： θ_0 为坡体表面含水率； k 为含水率随垂直于坡面方向深度的变化率。

根据水量平衡原理,当湿润锋到达 z_f^* 处时,累计入渗总量可以用下式计算：

$$I = \int_0^{z_f^*} (\theta_s - \theta_i) dz = (\theta_s - \theta_0)z_f^* - \frac{1}{2}k(z_f^*)^2. \tag{5}$$

根据累积入渗量与入渗率的相互关系,我们可以得到：

$$i = \frac{dI}{dt} = (\theta_s - \theta_0 - kz_f^*) \frac{dz_f^*}{dt}, \tag{6}$$

将(3)带入式(6),即：

$$K_s(\cos\beta + \frac{s_f}{z_f^*}) = (\theta_s - \theta_0 - kz_f^*) \frac{dz_f^*}{dt}, \tag{7}$$

两端同时积分,并将初始条件 $t=0$ 时, z_f^* 代入：

$$K_s t \cos^3 \beta = - \frac{1}{2} k (z_f^*)^2 \cos^2 \beta + z_f^* [(\theta_s -$$

$$\theta_0) \cos^2 \beta + k s_f \cos \beta] - [k (s_f)^2 + (\theta_s - \theta_0) s_f \cos \beta] \ln \frac{s_f + z_f^* \cos \beta}{s_f}, \tag{8}$$

式(8)便是改进的 Mein-Larson 降雨入渗模型表达式,它将原模型初始含水率均匀分布的假定,修改为初始含水率随垂直于坡面方向深度呈线性分布,这样更贴近实际的含水率分布情况。

随着降雨的持续进行,入渗边界会发生一定的转变。在降雨强度保持恒定的情况下,初始阶段,降雨强度小于入渗能力,入渗边界由降雨控制；随后,入渗能力开始逐渐下降,在某一时刻,降雨强度开始大于入渗能力,此时转变为积水入渗阶段。

在积水入渗前,入渗边界条件由降雨强度控制,入渗率可以由下式表达：

$$i = R \cos \beta, \tag{9}$$

式中： R 为降雨强度(m/s)。

假设在某一时刻 t_p ,土壤表面开始积水,则满足上述积水入渗时的表达式,式(8)便可转化为：

$$K_s [t - (t_p - t_s)] \cos^3 \beta = - \frac{1}{2} k (z_f^*)^2 \cos^2 \beta + z_f^* [(\theta_s - \theta_0) \cos^2 \beta + k s_f \cos \beta] - [k (s_f)^2 + (\theta_s - \theta_0) s_f \cos \beta] \ln \frac{s_f + z_f^* \cos \beta}{s_f}, \tag{10}$$

其中,累积入渗量 I_p 可由下式进行计算：

$$I_p = \frac{(\theta_s - \theta_0) s_f}{R \cos \beta / K_s - \cos \beta} - \frac{1}{2} k (\frac{s_f}{R \cos \beta / K_s - \cos \beta})^2, \tag{11}$$

积水入渗开始的时间为：

$$t_p = \frac{I_p}{R \cos \beta}, \tag{12}$$

式(10)中： t_s 为从开始积水到累积入渗量到达 I_p 所用的时间,可以用下列表达式计算：

$$K_s t_s \cos^3 \beta = - \frac{1}{2} k (z_f^*)^2 \cos^2 \beta + z_f^* [(\theta_s - \theta_0) \cos^2 \beta + k s_f \cos \beta] - [k (s_f)^2 + (\theta_s - \theta_0) s_f \cos \beta] \ln \frac{s_f + z_f^* \cos \beta}{s_f}. \tag{13}$$

2 结果分析与验证

2.1 计算结果分析

本文以 Mein-Larson 降雨入渗模型为基础,同时考虑了初始含水率分布对湿润锋进程的影响,探讨了初始含水率呈线性分布时,湿润锋以及滑坡稳

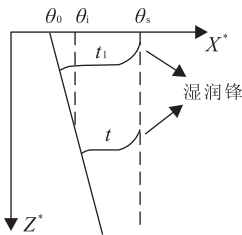


图 3 改进的 Mein-Larson 降雨入渗模型
Fig. 3 The improved Mein-Larson rainfall infiltration model

表 1 土体参数
Table 1 The soil parameters

θ_r	θ_s	K_s (m/s)	α (m ⁻¹)	n	s_f (m)
0.015	0.4	5.8×10^{-6}	1.5	1.5	0.06

表 2 计算工况
Table 2 The calculation situations

工况	初始状态含水率分布	
	θ_0	k
I	0.15	0.062 5
II	0.20	0.050 0
III	0.30	0.025 0
Mein-Larson 模型	0.30	0

定性的变化规律。选择算例对本文推导的降雨入渗模型进行分析,并与传统模型进行对比。滑坡模型倾角为 30°,土体为粉质粘土,厚度为 4 m,降雨强度设定为 7.16×10^{-6} m/s,持续 8 h,水文学参数见表 1 所示, k_s 为土体饱和渗透系数, α (m⁻¹), n 为形状参数, θ_r 、 θ_s 分别为土壤残余含水率和土壤饱和含水率。其中湿润锋处吸力水头的确定目前还较为困难 (Brakensiek, 1977),本文参考李秀珍(2015)的土壤参数, $s_f=0.06$ m。

本次计算采用 3 种不同的含水率分布,假定地下水位在模型底部,即底部含水率处于饱和状态,坡体表面的含水率有 3 种不同的情况,初始含水率随垂直于坡面方向的深度呈线性变化,含水率呈非均匀分布。传统模型初始含水率设定为 0.3 m³/m³,含水率均匀分布。

图 4 为强降雨 4~8 h 的湿润锋变化情况。首先,由式(12)计算出的积水入渗的开始时间各有不同,3 种工况下分别为 10 295.93、8 236.75 和 4 118.

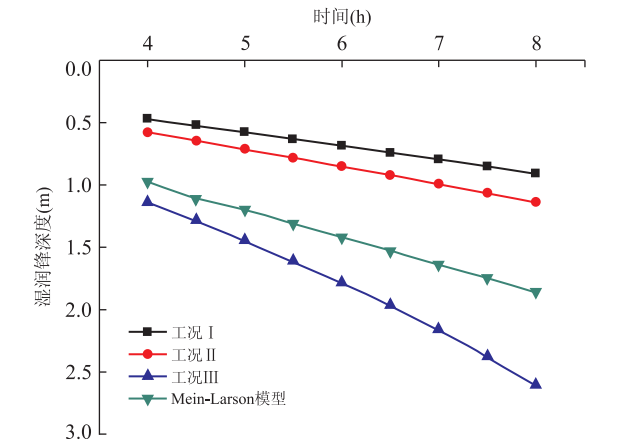


图 4 湿润锋随时间的变化情况

Fig. 4 The changes of wetting front with time

37 s,Mein-Larson 降雨入渗模型计算的积水入渗开始时间为 4 765.03 s. 再者,湿润锋的前进速度也各有不同,强降雨发生 8 h 过后,3 种工况下的湿润锋分别到达距地表以下 0.906、1.137 和 2.608 m,而 Mein-Larson 降雨入渗模型计算的湿润锋在经历相同时间以后到达地面以下 1.856 m. 以上现象表明,初始含水率的分布对降雨过程的湿润锋运移有较大影响,地表含水率越大, k 值越接近零,湿润锋的前进速度越快,当 k 值为零时,本文模型退化为传统的 Mein-Larson 降雨入渗模型。

2.2 模型验证

目前,国内外对初始含水率为非均匀分布情况下的坡体入渗问题研究较少,也缺乏相应的试验研究,大多数入渗试验都是建立在初始含水率为均匀分布的前提下。本文利用 International Ground Water Model Center (IGWMC)推出的数值模拟软件 HYDRUS-2D 来验证计算结果的准确性。

HYDRUS-2D 是 Šimunek *et al.* (2006, 2008) 等人开发的数值模拟软件,可以用来模拟二维空间上变饱和和多孔介质中水流运动、热量迁移、溶质迁移过程。程序可以灵活处理各类水流边界,包括零通量边界、常通量边界、变水头边界、常水头边界、大气边界和渗流面边界等。模拟过程中一般忽略空气对土体和水流运动的影响,同时,采用修正的 Richards 方程作为水流运动的控制方程(图 5)。

模型选取坡度为 30°,长为 45 m,厚度为 4 m 的斜坡进行模拟,由于模型长度和厚度的比值较大,可以近似的假定为无限斜坡模型。模型上端设定为大气边界,下端设置为地下水位的位置,两端设置为零通量边界。同时,初始含水率设定为随垂直于坡面方向深度呈线性变化,变化方式与上述 3 种工况相同。对模型进行三角形网格剖分,共有 5 100 个节点,

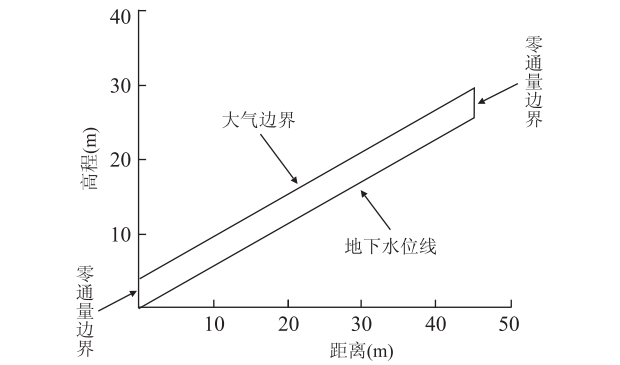


图 5 数值模拟模型

Fig. 5 The numerical simulation model

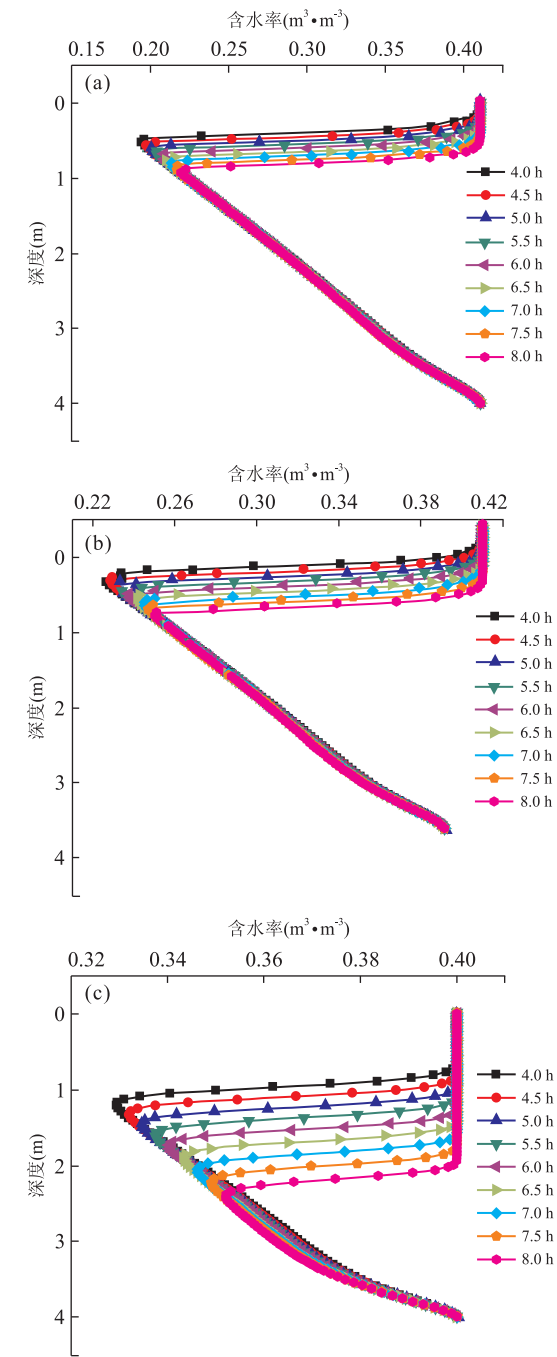


图 6 3 个工况剖面含水率随时间的变化情况

Fig. 6 The changes of the profile of moisture content with time in the 3 situations

a. 工况 I 剖面; b. 工况 II 剖面; c. 工况 III 剖面

9 900 个单元,采用 Galerkin 线状有限元法对二维饱和和非饱和流进行数值求解.模拟结果中,可以得到垂直剖面上含水率随时间的变化过程.

图 6 是在强降雨条件下,3 种不同工况的垂直剖面上含水率随时间的变化情况,从图像上可以清楚的看到湿润锋变化状况.由于坡体表面含水率较大, k 值更接近零,工况 III 的湿润锋下渗速度最快,

反之,工况 I 的湿润锋下渗速度最慢,这与上述模型解的计算结果相一致.考虑到湿润锋的作用,本文选择含水率降至初始值的那一点作为计算中湿润锋的位置(雷志栋等,1998;谭新等,2003),将数值模拟计算得到的结果与模型解的结果进行比较.

由表 3、图 7 可以看出,在强降雨的持续作用下,湿润锋逐渐向下运移,入渗深度逐渐增加.在 3 种不同工况条件下,湿润锋入渗深度在采用上述提到的模型计算结果与数值模拟计算结果相接近,最大相对误差均不超过 9%.

综上所述,在强降雨作用下,针对初始含水率非均质情况,采用上述改进的 Mein-Larson 入渗模型计算出的湿润锋随时间的变化过程是可靠的.

3 讨论

根据本文的研究内容,对以下几点展开讨论:

(1)本文的研究成果可以与无限斜坡模型相结合用于浅层滑坡稳定性计算,但在计算之前,应首先了解土壤含水率分布情况.

(2)本文假定的土壤含水率呈线性分布,其实是对自然界中土壤含水率分布的线性拟合,如果用多项式对土壤含水率分布进行拟合(王千等,1993),得到的结果应该更加贴近实际情况,这将在今后的文章中进行讨论.

(3)如果能够确定一定区域以内土体含水率的分布情况,便可将该模型应用于降雨条件下区域浅层滑坡的易发性或危险性评价当中,笔者将在今后的文章中给出研究成果.

4 结论

(1)与传统的计算模型相比,本文的计算模型既考虑了坡角的影响,又考虑了初始含水率呈线性分布时的状态,更适用于降雨强度大于土体入渗能力的情况,该模型具有更广泛的应用范围,并且更加贴近实际情况.

(2)通过与 Mein-Larson 降雨入渗模型进行对比,发现初始含水率的分布情况对湿润锋的运移有较大影响,在强降雨持续进行下,湿润锋随时间逐渐下渗,地表含水率越大, k 值越接近零,湿润锋下渗的速度越快.当 $k=0$ 时,本文模型退化为 Mein-Larson 降雨入渗模型,证明 Mein-Larson 降雨入渗

表 3 模型解与数值解计算结果

Table 3 The results of model and numerical simulation

类型	工况	不同时间点湿润锋入渗深度(m)								
		4.0 h	4.5 h	5.0 h	5.5 h	6.0 h	6.5 h	7.0 h	7.5 h	8.0 h
模型解	I	0.466	0.521	0.575	0.629	0.683	0.739	0.794	0.850	0.906
数值解		0.484	0.565	0.606	0.686	0.727	0.767	0.808	0.889	0.929
模型解	II	0.575	0.643	0.711	0.780	0.849	0.920	0.990	1.063	1.137
数值解		0.606	0.686	0.767	0.848	0.889	0.929	1.010	1.091	1.172
模型解	III	1.137	1.288	1.445	1.609	1.782	1.965	2.161	2.374	2.608
数值解		1.212	1.333	1.454	1.616	1.777	1.939	2.060	2.226	2.505

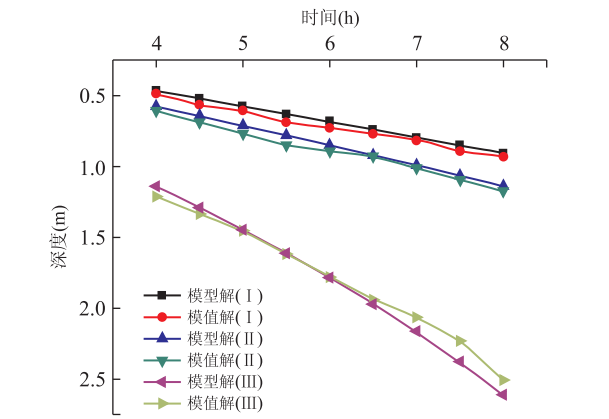


图 7 模型解与数值解的比较

Fig. 7 The comparison between model and numerical simulation

模型是改进后模型的一个特例。

(3)在强降雨条件下,本文推导的模型计算结果与数值模拟的结果相接近,最大相对误差不超过 9%,故本文的计算模型是可靠的。

(4)由于土壤初始含水率分布是降雨入渗的重要影响因素之一,不同的含水率分布条件下,湿润锋下渗的速度有较大的差别,故建议加强滑坡土体含水率的监测,这样才能准确判定降雨条件下的湿润锋运移规律。

References

Chen, X. D. , Guo, H. X. , Song, E. X. , 2008. Analysis Method for Slope Stability under Rainfall Action. *Landslides and Engineered Slopes*, (7): 1507—1515.

Brakensiek, D. L. , 1977. Estimating the Effective Capillary Pressure in the Green and Ampt Infiltration Equation. *Water Resources Research*, 13 (3): 680—682. doi: 10.1029/WR013i003p00680

Fang, W. , Esaki, T. , 2012. Rapid Assessment of Regional Superficial Landslide under Heavy Rainfall. *Journal of Central South University*, 19(9): 2663—2673. doi: 10.

1007/s11771—012—1325—6

Green, W. H. , Ampt, G. A. , 1911. Studies on Soil Physics: Flow of Air and Water through Soil. *Journal of Agricultural Science*, 4: 1—24.

Hillel, D. , 1971. Soil and Water: Physical Principles and Processes. Academic Press, New York.

Jian, W. X. , Xu, Q. , Tong, L. Y. , 2013. Rainfall Infiltration Model of Huangtupo Landslide in Three Gorges Reservoir Area. *Rock and Soil Mechanics*, 34 (12): 3528—3530 (in Chinese with English abstract).

Lei, Z. D. , Yang, S. X. , Xie, S. C. , 1988. Dynamics of Soil Water. Tsinghua University Press, Beijing (in Chinese).

Li, N. , Xu, J. C. , Qin, Y. Z. , 2012. Research on Calculation Model for Stability Evaluation of Rainfall-Induced Shallow Landslides. *Rock and Soil Mechanics*, 33 (5): 1485—1491 (in Chinese with English abstract).

Li, X. Z. , He, S. M. , 2015. A Study on Stability of Shallow Rainfall-Induced Landslide Based on Mein-Larson Infiltration Model. *Journal of Catastrophology*, 30 (2): 16—20 (in Chinese with English abstract).

Liu, J. T. , Zhang, J. B. , Feng, J. , 2008. Green-Ampt Model for Layered Soils with Nonuniform Initial Water Content under Unsteady Infiltration. *Soil Physics*, 72 (4): 1041—1047. doi: 10.2136/sssaj2007.0119

Liu, Z. Z. , Yan, Z. X. , 2013. Infiltration Regulation and Stability Analysis of Soil Slope under Sustained and Small Intensity Rainfall. *Journal of Central South University*, 20 (9): 2519—2527. doi: 10.1007/s11771—013—1764—8

Luo, Y. , He, S. M. , He, J. C. , 2014. Effect of Rainfall Patterns on Stability of Shallow Landslide. *Earth Science*, 39(9): 1358—1362 (in Chinese with English abstract).

Mein, R. G. , Larson, C. L. , 1973. Modeling Infiltration during a Steady Rain. *Water Resource Research*, 9 (2): 384—394. doi: 10.1029/WR009i002p00384

Munthar, A. , Liao, H. , 2010. Rainfall Infiltration: Infinite Slope Model for Landslides Triggering by Rainstorm. *Natural Hazards*, 54 (3): 967—984. doi: 10.1007/s11069—010—9518—5

- Wang, D. J., Tang, H. M., L., C. D., et al., 2016. Stability Analysis of Colluvial Landslide due to Heavy Rainfall. *Rock and Soil Mechanics*, 37(2): 439—444 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. P., Zhang, Q. X., Tang, H. M., et al., 2014. Landslide Hazard Warning Based on Effective Rainfall Intensity. *Earth Science*, 39(7): 889—895 (in Chinese with English abstract).
- Rahardjo, H., Lim, T. T., Chang, M. F., et al., 1995. Shear-Strength Characteristics of a Residual Soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 32(1): 60—77. doi: 10.1139/t95-005
- Simunek, J., Saito, H., Sakai, M., et al., 2008. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. University of California Riverside, 68.
- Simunek, J., Sejna, M., Van, G. M. T., 2006. The HYDRUS Software Package for Simulating the Two and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Technical Manual (Version 1.0). PC Progress, Prague.
- Tan, X., Chen, S. X., Xie, C., 2003. Saturate-Unsaturated Seepage Analysis of Slope Under Rainfall. *Rock and Soil Mechanics*, 24(3): 381—384 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zeng, D. C., 1993. A New Approach to Predict Wetting Front. *Transactions of The CSAE*, 9(1): 25—28 (in Chinese with English abstract).
- Yeh, H., Lee, C. C., Lee, C. H., 2008. A Rainfall-Infiltration Model for Unsaturated Soil Slope Stability. *Journal of Environmental Engineering and Management*, 18(4): 261—268.

附中文参考文献

- 简文星, 许强, 童龙云, 2013. 三峡库区黄土坡滑坡降雨入渗模型研究. *岩土力学*, 34(12): 3528—3530.
- 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传, 1988. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社.
- 李宁, 许建聪, 钦亚洲, 2012. 降雨诱发浅层滑坡稳定性的计算模型研究. *岩土力学*, 33(5): 1485—1491.
- 李秀珍, 何思明, 2015. 基于 Mein-Larson 入渗模型的浅层降雨滑坡稳定性研究. *灾害学*, 30(2): 16—20.
- 罗瑜, 何思明, 何尽川, 2014. 降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响. *地球科学*, 39(9): 1358—1362.
- 谭新, 陈善雄, 杨明, 2003. 降雨条件下土坡饱和一非饱和渗流分析. *岩土力学*, 24(3): 381—384.
- 汪丁健, 唐辉明, 李长冬, 等, 2016. 强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析. *岩土力学*, 37(2): 439—444.
- 王千, 曾德超, 1993. 预测湿润锋进程的新方法. *农业工程学报*, 9(1): 25—28.
- 吴益平, 张秋霞, 唐辉明, 等, 2014. 基于有效降雨强度的滑坡灾害危险性预警. *地球科学*, 39(7): 889—895.