

考虑非饱和浸润层厚度和累积入渗量的改进Green-Ampt模型

王雪冬, 李世宇, 孙延峰, 张超彪, 王 翠, 朱永东

An improved Green-Ampt model for rainfall infiltration in the inner dumping site of an open pit coal mine

WANG Xuedong, LI Shiyu, SUN Yanfeng, ZHANG Chaobiao, WANG Cui, and ZHU Yongdong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012045>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Dupuit模型的改进——具入渗补给

Improvement of Dupuit model: with infiltration recharge

陈崇希 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 1-4

基于有限元软件自定义本构模型的膨胀土边坡降雨入渗分析

An analysis of rainfall infiltration of expansive soil slope based on the finite element software custom constitutive model

饶鸿, 王金淑, 赵志明, 吴光, 冯涛 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 154-162

压实黄土水分入渗规律及渗透性试验研究

An experimental study of water infiltration and hydraulic conductivity of the compacted loess

张镇飞, 倪万魁, 王熙俊, 苑康泽, 潘登丽, 刘魁 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 97-104

空间链接器式多维通用饱和-非饱和流模型研究

A generalized multi-dimensional saturated-unsaturated flow model based on spatial linkers

杨海, 姜月华, 周权平, 杨辉, 刘林 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 31-42

膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析

A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope

陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 132-140

非饱和土蠕变力学特性试验及经验模型研究

An experimental study of the creep mechanical properties of unsaturated soil and empirical models

魏建柄, 刘卫斌 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 67-73



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012045

考虑非饱和浸润层厚度和累积入渗量的 改进 Green-Ampt 模型

王雪冬^{1,2}, 李世宇¹, 孙延峰¹, 张超彪¹, 王 翠¹, 朱永东¹

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新 123000;

2. 辽宁工程技术大学力学博士后流动站, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 矿山内排土场因其储量大、结构松散和强度低等特点, 在降雨条件下极易产生侵蚀或整体失稳破坏, 因此降雨入渗分析对预测内排土场稳定性至关重要。以元宝山露天煤矿内排土场为原型, 按相似试验理论进行物理模型试验, 研究降雨入渗特征, 根据试验结果对经典 Green-Ampt 入渗模型进行改进。结果表明: 雨水入渗过程中, 随着浸润锋的向下运移, 坡面侵蚀由溅蚀凹槽开始, 逐渐过渡为径流侵蚀, 最后呈现为溯源侵蚀破坏, 整体呈现平行于坡表面的浅层滑坡特征; 浸润锋之上非饱和和浸润层的存在, 导致经典 Green-Ampt 模型计算结果不准确; 在考虑浸润层厚度和累积入渗量基础上, 推导出改进的 Green-Ampt 模型; 改进后的 Green-Ampt 模型为分段函数, 能够反映降雨入渗使坡面由非饱和和向饱和过渡的实际特征。验证结果显示, 使用改进模型, 浸润锋入渗深度和累积入渗量的预测精度显著提升, 虽然冲蚀破坏和初始含水率的差异导致降雨入渗后期的预测精度有所下降, 但相关结果对煤矿内排土场降雨初期稳定性分析具有重要意义。改进后的 Green-Ampt 模型的计算结果与实测数据更为接近, 能为分析露天煤矿内排土场降雨入渗规律及边坡稳定性研究提供参考。

关键词: 内排土场; 降雨入渗; 改进的 Green-Ampt 模型; 非饱和和浸润层; 浸润锋

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)06-0064-08

An improved Green-Ampt model for rainfall infiltration in the inner dumping site of an open pit coal mine

WANG Xuedong^{1,2}, LI Shiyu¹, SUN Yanfeng¹, ZHANG Chaobiao¹, WANG Cui¹, ZHU Yongdong¹

(1. College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. Research Station on Mechanics for Postdoctoral Fellows, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: Due to the characteristics of large reserves, loose structure and low strength, an inner dumping site in the open pit coal mine is prone to erosion or overall instability under the rainfall conditions. The analysis of rainfall infiltration is quite important to estimate the stability of a dump. The inner dump of the Yuanbaoshan open pit coal mine is taken as the prototype, the physical model test is carried out according to the similar theory to study the characteristics of rainfall infiltration, and the classic Green-Ampt infiltration model is improved. The results show that during the process of rainwater infiltration, with the downward migration of the wetting peak, the erosion of the slope surface starts from the splash groove, gradually transits to runoff erosion, and finally appears as traceable erosion damage, showing the characteristics of shallow landslide parallel to the slope surface. The existence of unsaturated wetting layer above the wetting peak leads to the inaccurate calculation results if the classical Green-Ampt model is used. Based on consideration of the thickness of the infiltration layer and

收稿日期: 2020-12-02; 修订日期: 2021-03-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1503102); 国家自然科学基金项目(51604140; 51974144); 辽宁省教育厅基金项目(LJ2020FWL006); 中国博士后基金项目(2018M631815)

第一作者: 王雪冬(1984-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事矿山地质灾害防治研究。E-mail: jilindaxue318@163.com

cumulative infiltration amount, an improved Green-Ampt model is derived. The improved Green-Ampt model is a piecewise function, which can reflect the actual characteristics of the transition from unsaturated to saturated slope caused by rainfall infiltration. The validation results show that the prediction accuracy of infiltration depth and cumulative infiltration volume is significantly improved. Because of the erosion damage and the difference in the initial water content, the prediction accuracy of the improved model decreases for the later stage of the rainfall, but it is of great significance for the stability analysis of an open pit coal mine dump at the initial stage of rainfall. The calculation result of the improved model is closer to the measured data. The improved infiltration model can provide an important reference for the studies of rainfall infiltration and slope stability of open-pit coal mine inner dumping sites.

Keywords: inner dumping site; rainfall infiltration; improved Green-Ampt model; unsaturated infiltration layer; wetting peak

露天煤矿内排土场因运距短、占地面积少等特点被广泛采用^[1]。矿山内排土场属人工堆积的非天然土坡,具有储量大、强度低和松散等特点,在降雨入渗作用下容易产生边坡稳定性问题^[2],入渗模型是掌握降雨入渗规律和稳定性分析的基础^[3]。因此,降雨入渗模型研究对内排土场冲蚀及滑坡灾害防治与预警具有重要意义。

降雨入渗条件对边坡稳定性影响的研究较为深入,陈洪凯等^[4]以重庆库区典型松散土体为原型,利用相似模型试验,研究了不同降雨条件下滑坡启动规律。邱潇等^[5]通过室内模拟试验及数值分析探究了裂隙发育对堆积体降雨入渗的影响。王晓峰等^[6]和张勇等^[7]总结并分析了降雨入渗和滑坡之间的关系,指出准确求解降雨条件下边坡土体的水分分布场是研究难点。史振宁等^[8]分析了覆盖层厚度、初始含水率分布参数以及覆盖层边坡角度对边坡稳定性的影响规律。徐翔等^[9]利用数值模拟软件研究了不同降雨类型对边坡的入渗特征和稳定性的影响规律。已有的研究成果表明,降雨入渗定量化模型是边坡稳定性研究的发展方向。

目前,降雨入渗模型主要有 Kostiakov 模型、Horton 模型等经验模型以及 Richard 微分方程法和 Green-Ampt 模型法^[10]。其中,Green-Ampt 模型在 1911 年由 Green 和 Ampt 提出^[11],原理简单,具有实际物理意义,得到广泛应用,但忽略了入渗湿润区内非饱和区存在的问题,众多学者根据这些问题对这一模型进行了改进。王文焰等^[12]依据黄土积水入渗的土壤水分剖面变化特征,将浸润层含水量的变化视为施加于饱和区的吸力势,推导出适用于黄土区的积水入渗模型。温馨等^[13]从参数优化的角度入手,提出了改进的 Green-Ampt 模型,改进后的模型能更精准预测雨水在黄土中的入渗规律。张杰等^[14]建立了入渗分层假设,

预测了雨水的入渗规律,得出边坡稳定性随浸润锋运移之间的关系。潘永亮等^[15]考虑了坡体的初始含水率、地下水位和非饱和特性,建立了一种适用于多种降雨工况下的改进入渗模型。

由于露天煤矿内排土场具有典型的“人造”特征,考虑内排土场土体特性的降雨入渗模型很少。本文以内蒙古自治区赤峰市元宝山露天煤矿内排土场为研究对象,通过模型试验得到坡面降雨入渗特征,建立相应的降雨入渗模型,可为露天煤矿内排土场降雨入渗规律及边坡稳定性研究提供依据。

1 物理模型试验

1.1 研究区概况

元宝山露天煤矿位于内蒙古赤峰市,属于季风性气候,夏季雨量集中,一般为 230~270 mm,占全年降水量总量的 68%,常以大雨或暴雨的形式出现。研究区内发育的地层自下而上为新近系和第四系,岩性以泥质粉砂岩、砾岩、砂砾岩和泥岩为主(图 1)。内排土场填方体高度超过 180 m,高度、方量超过公路、铁路、机场等领域大部分的填方工程^[16]。本文以该内排土场南帮一典型剖面为研究对象,内排土场基底由第四系和新近系地层构成,上覆排土为煤矿剥离的黄褐色细粒土质砂。

根据现场测量取样可知,内排土场每级台阶平均高 12 m,平台宽度约 12 m,坡角范围为 33°~40°。依据土工试验方法标准^[17]测得内排土场典型土料的物理力学参数,如表 1 所示。

1.2 试验模型的建立

物理模型试验所用模型装置如图 2 所示,主要由模型箱、降雨模拟装置、数据监测和采集装置等组成。建立的模型试验实物及传感器布置如图 3 所示,

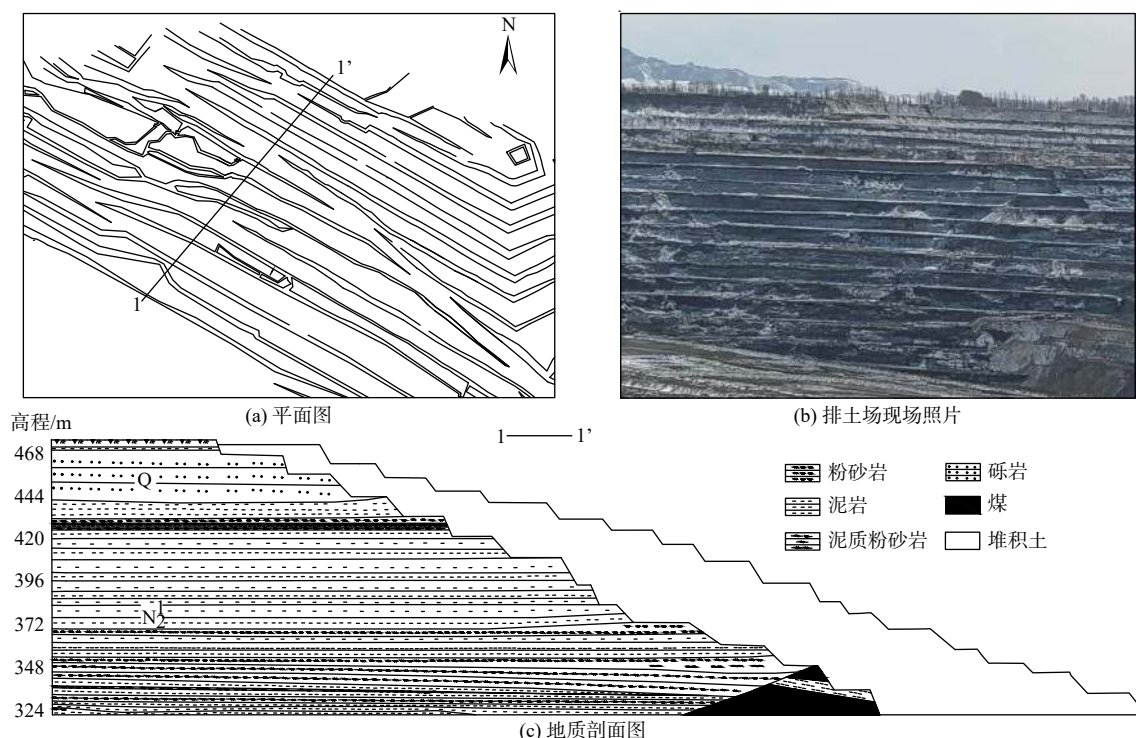


图 1 研究区地质图 (现场照片镜头西南朝向)

Fig. 1 Geological map of the study area (on-site photo lens facing southwest)

表 1 土料的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the waste dump

参数	天然干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	天然含水率/%	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	饱和渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
取值	1.63	10.4	17	35.4	22.5	0.002 3

其中模型箱的长、宽、高分别为 100, 23, 60 cm, 由厚度为 1 cm 的透明有机玻璃板搭成, 可方便观察雨水的入渗情况。降雨模拟装置由多根直径 1 cm 的平行玻璃管组成, 每根玻璃管下端均匀分布直径 2 mm 的雨滴孔, 水体在自重作用下均匀降落, 模拟降雨过程。数据监测和采集装置采用 MS10 土壤含水率传感器 (本试验中编号为 H3 和 H5) 和 YJZA-32 型智能采集仪。

试验所用土料取自现场, 结合内排土场实际情

况, 按 1 : 60 的几何比例将现场的 2 级台阶缩小放入模型箱内, 将土壤含水率传感器埋置于预定位置。考虑到几何缩尺效应, 土料粒径参考周必凡等^[18]提出的处理方法进行确定。处理前后试验土料粒径的颗分曲线如图 4 所示, 考虑到研究区短时强降雨的特征, 以降雨强度为 0.4 mm/min、持续降雨 120 min 的条件进行试验。

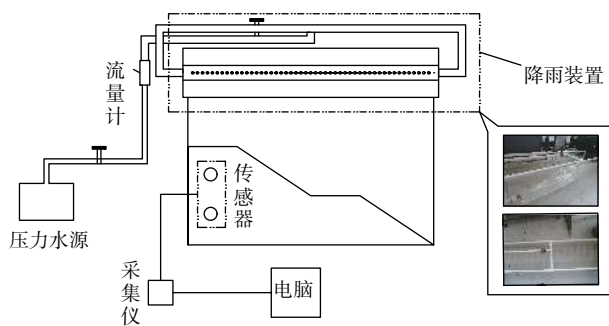


图 2 模型装置图

Fig. 2 Model installation diagram

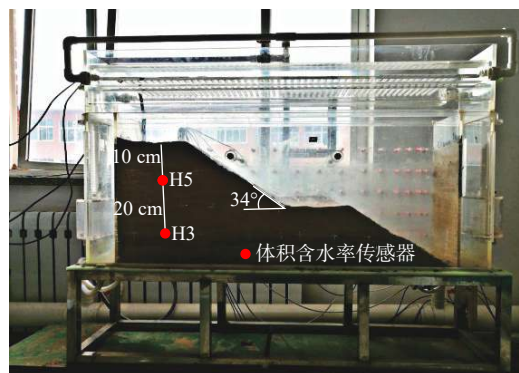


图 3 模型试验及传感器布置图

Fig. 3 Model test and sensors layout

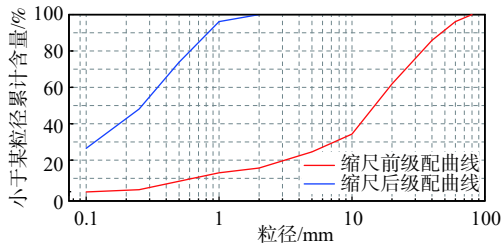


图4 土料颗粒级配曲线图
Fig. 4 Soil grading curve

1.3 试验结果

连续记录试验过程。其中,浸润锋运移到 2 cm 和 10 cm 时的坡面侵蚀情况见图 5。

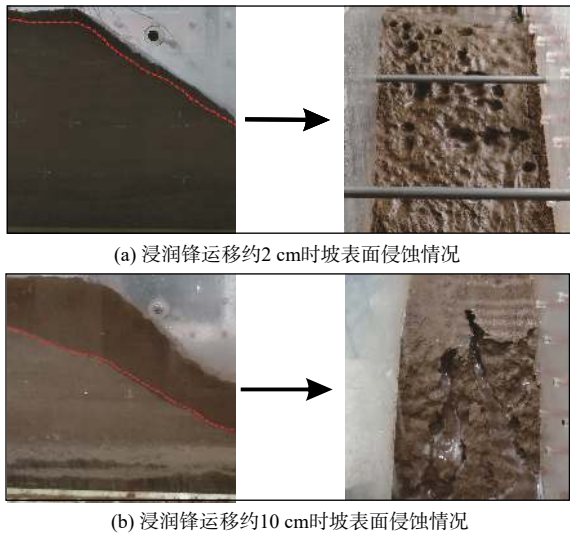


图5 浸润锋运移时的坡表面侵蚀情况
Fig. 5 Slope erosion during migration of the wetting peak

从图 5 可以看出,降雨过程中内排土场整体稳定性较好:降雨初期,在雨滴冲击作用下,坡面形成大小不一的溅蚀凹槽;随着降雨的持续、雨水的不断入渗,浸润锋不断向下运移,导致坡面趋于饱和;当径流达到一定程度时,坡体表面开始发生溯源侵蚀破坏,破坏规模逐渐增大。

此外,王乐等^[19]和苏永华等^[20]分别研究了不同降雨雨型和间歇性降雨对边坡稳定性的影响,发现也存在呈平行于坡表的浅层滑坡的类似特征。因此本文结合研究区的实际降雨特征,选取一定降雨强度进行试验研究。

通过试验观察和体积含水率传感器(编号为 H3 和 H5)的响应情况可以发现,降雨入渗过程中,雨水的入渗特征与经典 Green-Ampt 模型所得结果相近,但在湿润区和饱和区之间多了一个浸润层,如图 6、图 7 所示。这是由于非饱和区土体内部基质吸力的

存在,使得饱和区中的雨水在吸力势的作用下吸附在非饱和区一定厚度范围内的土颗粒表面形成浸润层^[12]。这一差异使经典 Green-Ampt 模型在预测内排土场入渗情况时产生误差,给后续研究带来不利影响。因此,下面结合降雨入渗非饱和和浸润层特征,对经典 Green-Ampt 模型进行改进。

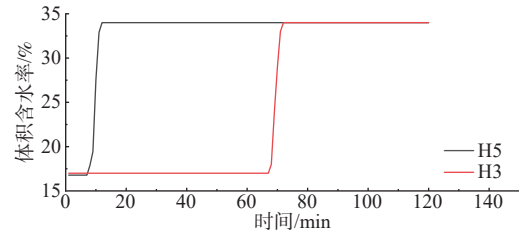


图6 体积含水率随时间的变化
Fig. 6 Change in volume water content with time

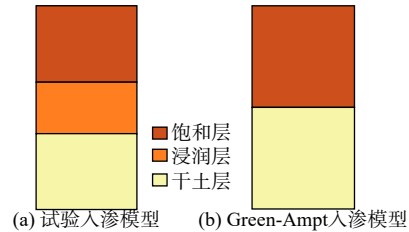


图7 试验结果与经典模型计算结果的对比
Fig. 7 Test results with those from the classical model

2 经典 Green-Ampt 入渗模型的改进

经典 Green-Ampt 模型和改进 Green-Ampt 模型计算简图如图 8 所示。

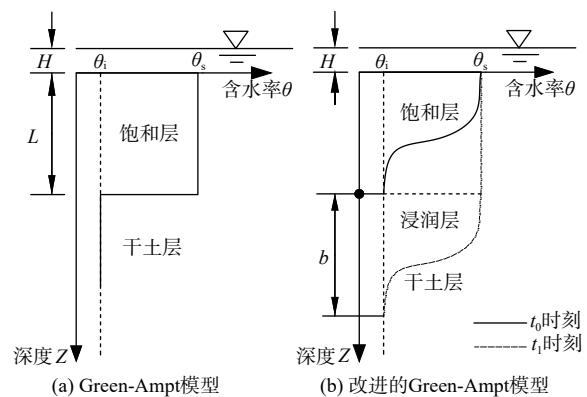


图8 入渗模型计算简图
Fig. 8 Diagram showing infiltration model calculation

2.1 经典 Green-Ampt 模型

根据质量守恒定律得:

$$i = \frac{dI}{dt} = K_s \frac{Z_f + S_f + H}{Z_f} \quad (1)$$

$$I = (\theta_s - \theta_i) Z_f \quad (2)$$

$$t = \frac{(\theta_s - \theta_i)}{K_s} \left[Z_f - (S_f + H) \ln \frac{Z_f + S_f + H}{S_f + H} \right] \quad (3)$$

式中: θ_s ——饱和时体积含水率/%;
 θ_i ——干土时体积含水率/%;
 i ——土体的入渗速率/(cm·min⁻¹);
 K_s ——土体饱和渗透系数/(cm·min⁻¹);
 Z_f ——水分入渗浸润锋深度/cm;
 S_f ——土层内湿润锋处的土体水吸力水头/cm;
 H ——积水深度/cm;
 I ——累积入渗量/cm;
 t ——浸润锋运移时间/min。

2.2 改进的 Green-Ampt 模型

改进 Green-Ampt 模型在经典模型的基础上多考虑了客观存在的浸润层, 将浸润层的厚度和浸润层内累积入渗量引入到经典 Green-Ampt 模型计算公式当中, 从而提高了计算结果的精确性, 使其更加符合实际。

如图 8(b) 所示, 在相似模型试验的整个降雨入渗过程中, 随着降雨的持续, 雨水累积入渗总量与入渗深度关系是一个分段函数: 当入渗深度 L 小于浸润层厚度 b 时, 土体未出现饱和层, 根据实测数据将累积入渗量 I 与入渗深度 L 进行拟合可以得到 I_1 段函数; 当入渗深度大于浸润层厚度 b 时, 土体中出现饱和层, 此时累积入渗量与入渗深度之间的关系为 I_2 段函数。具体计算方程见式(4)和式(5)。

$$I = \begin{cases} I_1 = 0.028 - 0.033L + 0.010L^2 - 2.508 \times 10^{-5}L^3 \\ I_2 = (L - b)(\theta_s - \theta_i) + \theta' \end{cases}$$

$$L \in \begin{cases} (0, b) \\ [b, +\infty) \end{cases} \quad (4)$$

$$L_1 = \frac{I_2 - \theta'}{\theta_s - \theta_i} = L - b$$

$$i = K \frac{L_1 + S_{f1} + H}{L_1} \quad (5)$$

式中: b ——浸润层厚度/cm;
 θ' ——浸润层内累积入渗量/cm;
 L_1 ——饱和区厚度/cm;
 S_{f1} ——浸润层内平均基质吸力水头/cm;
 K ——浸润层内平均渗透系数/(cm·min⁻¹)。

由于由实测数据可以得到累积入渗量、浸润锋深度和时间三者之间的关系(I_1 段函数), 因此, 下面只对 I_2 段函数计算式进行推导。由式(5)得:

$$i = \frac{dI}{dt} = K \frac{L_1 + S_{f1} + H}{L_1} = K \left[1 + \frac{(S_{f1} + H)(\theta_s - \theta_i)}{I_2 - \theta'} \right] \quad (6)$$

$$Kt = I_2 - (\theta_s - \theta_i)(S_{f1} + H) \ln [(\theta_s - \theta_i)(S_{f1} + H) + I_2 - \theta'] \quad (7)$$

整理式(7), 得到 I_2 段累积入渗量与时间之间的关系:

$$t = \frac{I_2}{K} - \frac{(\theta_s - \theta_i)(S_{f1} + H) \ln [(\theta_s - \theta_i)(S_{f1} + H) + I_2 - \theta']}{K} \quad (8)$$

联立式(4)中 I_2 段函数和式(6)可得:

$$idt = (\theta_s - \theta_i)dL$$

$$\frac{dL}{dt} = \frac{i}{\theta_s - \theta_i} = \frac{K(L - b + S_{f1} + H)}{(L - b)(\theta_s - \theta_i)} \quad (9)$$

因此, I_2 段函数入渗深度与时间之间的关系为:

$$t = \frac{(\theta_s - \theta_i)}{K} [L - (S_{f1} + H) \ln(L - b + S_{f1} + H)] \quad (10)$$

考虑到地表积水深度 H 很小时或者入渗时间 t 较长而导致 L 较大时 H 可以忽略, 根据入渗深度 L 与浸润层厚度 b 之间的关系, 得到入渗时间和入渗深度的分段函数:

$$t = \begin{cases} 0.3671 + 0.96L \\ \frac{(\theta_s - \theta_i)}{K} [L - S_{f1} \ln(L - b + S_{f1})] \end{cases}$$

$$L \in \begin{cases} (0, b) \\ [b, +\infty) \end{cases} \quad (11)$$

其中, 需要确定的模型参数有 4 个, 分别是浸润层厚度 b 、浸润层内累积入渗量 θ' 、浸润层内平均渗透系数 K 和平均土体吸力水头 S_{f1} 。

2.3 改进的 Green-Ampt 模型参数的确定

2.3.1 浸润层内平均基质吸力水头 S_{f1} 和平均渗透系数 K 的确定

采用日本 H-1400pF 高速离心机进行土料基质吸力水头的测试, 将直径为 5 cm 的离心机试样放入舱室内的对称位置, 分级进行试验。在结束一级试验时, 称量试样排水的质量, 计算试验样的含水率与相应的基质吸力水头, 利用 van Genuchten 模型拟合出土水特征曲线^[21], 从而得到 4 个拟合参数(表 2)。将这些参数代入 Mualem 所提出的渗透方程^[22], 得出对应的渗透系数 K_u , 具体表达式为:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha\psi|^n)^m} \quad (12)$$

$$K_u = K_s \frac{\{1 - (\alpha\psi)^{n-1} [1 + (\alpha\psi)^n]^m\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}} \quad (13)$$

式中: S_e ——有效饱和度/%;
 θ ——体积含水率/%;
 θ_s ——饱和体积含水率/%;

θ_r ——残余体积含水率/%;
 K_u ——非饱和渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$);
 ψ ——基质吸力水头/cm;
 α, m, n ——土水特征曲线拟合参数, 其中 $m=1-1/n$ 。

表 2 van Genuchten 模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters of the van Genuchten model

参数	饱和体积含水率/%	残余体积含水率/%	α	n	拟合度(R^2)
取值	34	11	0.12	1.94	0.995 6

相似材料土水特征曲线和渗透系数曲线如图 9 所示。

根据实测试验数据可知, 浸润层内体积含水率均值为 21%。由图 9 的土水特征曲线和渗透系数曲线可知, 对应的基质吸力水头值 S_{f1} 为 4.5 cm, 浸润层内平均渗透系数 K 为 0.03 cm/min。

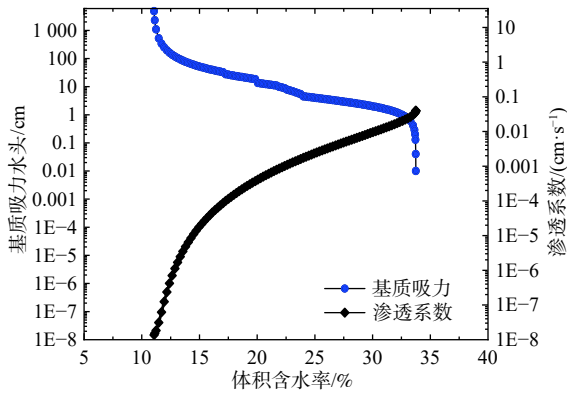


图 9 土水特征曲线与渗透系数曲线

Fig. 9 Soil water characteristic curve and permeability coefficient curve

2.3.2 浸润层厚度 b 和浸润层累积入渗量 θ' 的确定

记体积含水率传感器数据发生变化时的时刻为 t_0 , 即认为 t_0 时雨水入渗浸润锋到达此处。记体积含水率传感器数据趋于稳定时的时刻为 t_1 , 即认为 t_1 时传感器所处位置刚刚达到饱和。从时刻 t_0 到时刻 t_1 经历了从非饱和到饱和整个入渗过程, 体积含水率随时间的变化曲线见图 10。

结合体积含水率传感器距坡体表面的实际距离和传感器从非饱和到饱和和所经历的时间, 可以算出浸润层厚度 b 。具体计算公式为:

$$\frac{t_1 - t_0}{t_0} = \frac{b}{L_1} \quad (14)$$

通过对时刻 t_0 到 t_1 入渗深度与含水率的实测数据进行积分计算, 将这一时段雨水入渗总量与入渗深度之间的关系进行拟合, 得到关系式:

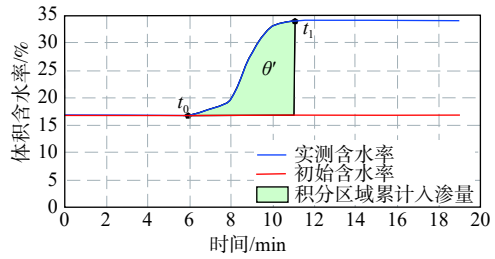


图 10 体积含水率随时间的变化曲线

Fig. 10 Variation in volume moisture content with time

$$I = 0.028 - 0.033L + 0.010L^2 - 2.508 \times 10^{-5}L^3 \quad (15)$$

拟合系数 $R^2=0.965 0$, 说明拟合效果好。当 $L=b$ 时, $\theta'=I$ 。测得 $t_0=6 \text{ min}$, $t_1=11 \text{ min}$, $L_1=10 \text{ cm}$, 代入式(14)得浸润层厚度 b 为 8 cm, 再将 $b=L=8 \text{ cm}$ 代入式(15), 得浸润层厚度内累积入渗量 $\theta'=0.381 3$ 。

将所得具体参数值代入式(4)和式(11), 得到雨水累积入渗总量与入渗深度之间的关系式:

$$I = \begin{cases} I_1 = 0.028 - 0.033L + 0.010L^2 - 2.508 \times 10^{-5}L^3 \\ I_2 = (L - 8)0.17 + 0.3813 \end{cases}$$

$$L \in \begin{cases} (0, 8) \\ [8, +\infty) \end{cases} \quad (16)$$

入渗深度和入渗时间的相应关系为:

$$t = \begin{cases} 0.3671 + 0.96L \\ 5.67 [L - 4.5 \ln(L - 3.5)] \end{cases}$$

$$L \in \begin{cases} (0, 8) \\ [8, +\infty) \end{cases} \quad (17)$$

式(16)和式(17)为改进后的 Green-Ampt 模型, 反映了降雨入渗过程中雨水入渗深度、累积入渗量和入渗时间之间的定量关系。

3 模型验证

为了检验改进的 Green-Ampt 模型的准确性, 将改进的 Green-Ampt 模型和经典 Green-Ampt 模型、实测值进行对比。图 11 为所得的浸润锋深度和时间变化关系, 图 12 是所得的累积入渗量和入渗深度变化关系。

从图 11 可以看出, 当浸润锋深度为 16 cm 时, 实测时间是 11 min, 改进模型的入渗时间是 26.3 min, 经典 Green-Ampt 模型的入渗时间是 52 min, 改进模型预测精度提高了 65.12%; 当浸润锋深度为 30 cm 时, 实测时间是 67 min, 改进模型的入渗时间是 86.4 min, 经典 Green-Ampt 模型的入渗时间是 118 min, 改进模型预测精度提高了 61.96%。这说明, 相对于经典 Green-Ampt 模型, 改进 Green-Ampt 模型所得的预测精度更贴近于实际。但是, 随着深度的增加, 改进模型的预

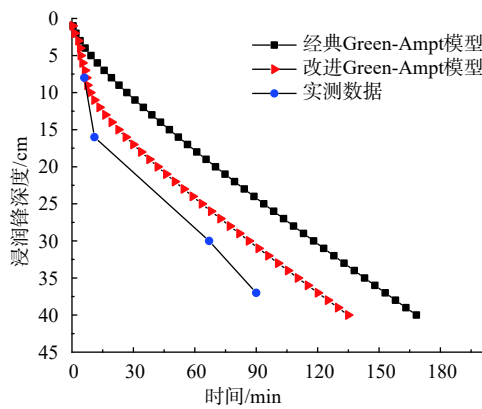


图 11 浸润锋深度随时间变化的曲线

Fig. 11 Variation with time for depth of the infiltration front

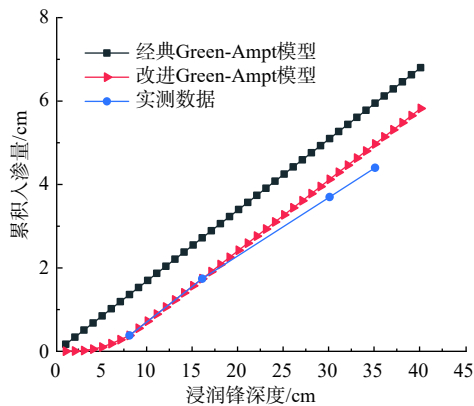


图 12 累积入渗量和入渗深度变化曲线

Fig. 12 Variation in the cumulative infiltration with the infiltration depth

测精度有所降低;这是因为,随着降雨的持续,饱和带厚度增加,坡体表面发生侵蚀破坏,降低了坡面高程,使实际浸润锋加速下移,导致预测误差增加。

从图 12 可以看出,使用经典 Green-Ampt 模型预测结果与实测值整体上误差较大,改进 Green-Ampt 模型的预测结果与实测值吻合度较高,主要原因在于经典 Green-Ampt 模型扩大了饱和区的面积,改进的 Green-Ampt 模型区分了非饱和的浸润层区域,提高了实际累积入渗量的预测精度。但是,随着入渗深度的继续加深,改进的 Green-Ampt 模型的预测误差略有增大,其原因在于,改进模型是初始含水率不变条件下的计算,实际情况是越往深处初始含水率越大,使改进模型计算结果高于实测值。

改进 Green-Ampt 模型对浸润锋位置和累积入渗量的预测精度明显高于经典 Green-Ampt 模型,与实测值吻合度高。因此,可以使用改进的 Green-Ampt 模型对以冲蚀破坏为主的煤矿排土场稳定性进行分析。

4 结论

(1)降雨入渗过程中,内排土场整体稳定性较好,但坡面由溅蚀凹槽开始、逐渐呈现溯源侵蚀破坏特征。

(2)浸润锋之上非饱和浸润层的存在导致经典 Green-Ampt 模型计算结果不准确,在考虑浸润层的厚度和累积入渗量的基础上获得了更符合实际入渗特征的改进 Green-Ampt 模型。

(3)改进 Green-Ampt 模型预测浸润锋入渗深度和累积入渗量的精度显著提升;但由于冲蚀破坏和初始含水率差异,降雨后期的预测精度有所下降。

参考文献 (References) :

- [1] 杨洪才. 浅谈临时内排土场在露天矿生产中的应用 [J]. *露天采矿技术*, 2003, 18(1): 4 - 5. [YANG Hongcai. Discussion on the application of temporary internal dump in open-pit mine production [J]. *Opencast Coal Mining Technology*, 2003, 18(1): 4 - 5. (in Chinese)]
- [2] 王雪冬, 李世宇, 孙延峰, 等. 冻融循环作用对露天矿排土场土料土水特征的影响 [J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(5): 138 - 143. [WANG Xuedong, LI Shiyu, SUN Yanfeng, et al. Influence of the freezing-thawing cycles on soil-water characteristics of soil in open-pit mine dumping sites [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(5): 138 - 143. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 庄建琦, 彭建兵, 张利勇. 不同降雨条件下黄土高原浅层滑坡危险性预测评价 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, 43(3): 867 - 876. [ZHUANG Jianqi, PENG Jianbing, ZHANG Liyong. Risk assessment and prediction of the shallow landslide at different precipitation in loess plateau [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2013, 43(3): 867 - 876. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈洪凯, 唐红梅. 散体滑坡室内启动模型试验 [J]. *山地学报*, 2002, 20(1): 112 - 115. [CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Research on start-up of loose landslide in lab [J]. *Journal of Mountain Research*, 2002, 20(1): 112 - 115. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 邱潇, 涂国祥, 赵石力, 等. 堆积体内部裂隙对降雨入渗的影响 [J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(4): 110 - 117. [QIU Xiao, TU Guoxiang, ZHAO Shili, et al. Effect of fissures in accumulation body on rainfall infiltration [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(4): 110 - 117. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王晓峰, 刘光焰, 刘均利, 等. 降雨入渗与滑坡关系研究综述 [J]. *人民黄河*, 2006, 28(8): 25 - 27. [WANG Xiaofeng, LIU Guangyan, LIU Junli, et al. Review on the

- relationship between rainfall infiltration and landslide[J]. *Yellow River*, 2006, 28(8): 25 - 27. (in Chinese)]
- [7] 张勇, 温智, 程英建. 四川巴中市滑坡灾害与降雨雨型关系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 178 - 182. [ZHANG Yong, WEN Zhi, CHENG Yingjian. A discussion of the relationship between landslide disaster and rainfall types in Bazhong of Sichuan[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 178 - 182. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 史振宁, 戚双星, 刘登生. 考虑初始含水率分布的覆盖层边坡非饱和入渗过程与稳定性计算方法[J/OL]. 工程地质学报 [2020-06-19]. [SHI Zhenning, QI Shuangxing, LIU Dengsheng. Unsaturated infiltration process and stability calculation method of overburden slope considering initial water content distribution[J/OL]. *Journal of Engineering Geology*[2020-06-19]. (in Chinese with English abstract)] <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-009.2020-06-19>.
- [9] 徐翔, 王义兴, 方正. 降雨和库水联合作用下边坡稳定性变化规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 51 - 58. [XU Xiang, WANG Yixing, FANG Zheng. Analysis on stability of a slope under rainfall and reservoir water level variation[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(2): 51 - 58. (in Chinese with English abstract)]
- [10] KALE R V, SAHOO B. Green-Ampt infiltration models for varied field conditions: a revisit[J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(14): 3505 - 3536.
- [11] GREEN W H, AMPT G A. Studies of soil physics I. The flow of air and water through soils[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1911, 4: 1 - 24.
- [12] 王文焰, 汪志荣, 王全九, 等. 黄土中Green-Ampt入渗模型的改进与验证[J]. 水利学报, 2003, 34(5): 30 - 34. [WANG Wenyan, WANG Zhirong, WANG Quanjiu, et al. Improvement and evaluation of the Green-Ampt model in loess soil[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(5): 30 - 34. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 温馨, 胡志平, 张勋, 等. 基于Green-Ampt模型的饱和-非饱和黄土入渗改进模型及其参数研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1991 - 2000. [WEN Xin, HU Zhiping, ZHANG Xun, et al. Modified infiltration model for saturated-unsaturated loess based on Green-Ampt model and its parametric study[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(6): 1991 - 2000. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张杰, 韩同春, 豆红强, 等. 基于降雨入渗分层假定的黄土边坡稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(12): 4355 - 4361. [ZHANG Jie, HAN Tongchun, DOU Hongqiang, et al. Stability of loess slope considering infiltration zonation[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(12): 4355 - 4361. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 潘永亮, 简文星, 李林均, 等. 基于改进Green-Ampt模型的花岗岩残积土边坡降雨入渗规律研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2685 - 2692. [PAN Yongliang, JIAN Wenxing, LI Linjun, et al. A study on the rainfall infiltration of granite residual soil slope with an improved Green-Ampt model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2685 - 2692. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李三川, 王晨光, 白润才, 等. 元宝山露天煤矿内排土场变形特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(3): 85 - 89. [LI Sanchuan, WANG Chenguang, BAI Runcai, et al. Study on deformation features of in-pit dumping site in Yuanbaoshan Surface Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(3): 85 - 89. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019 [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Geotechnical test method standard: GB/T 50123—2019*[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese)]
- [18] 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991. [ZHOU Bifan, LI Deji, LUO Defu, et al. *Guidelines for debris flow prevention and control* [M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese)]
- [19] 王乐, 秦世伟. 不同降雨类型与库水位波动耦合作用下的土质滑坡稳定性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(6): 103 - 111. [WANG Le, QIN Shiwei. Landslide instability induced by sudden lower in water level combined with different rainfall types[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(6): 103 - 111. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 苏永华, 李诚诚. 间歇性强降雨下基于Green-Ampt入渗模型的边坡稳定性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 28 - 36. [SU Yonghua, LI Chengcheng. Slope stability analysis based on Green-Ampt infiltration model under intermittent heavy rainfall[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2020, 47(3): 28 - 36. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 陈卫金, 程东会, 陶伟. van Genuchten模型参数的物理意义[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6): 147 - 153. [CHEN Weijin, CHENG Donghui, TAO Wei. Physical significance of the parameters in the van Genuchten model[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 147 - 153. (in Chinese with English abstract)]
- [22] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1976, 12(3): 513 - 522.