

文章编号:1674-599X(2022)04-0046-07

改进的降雨入渗模型及其在滑坡防治中的应用

雷光宇,潘璐

(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:针对在分析降雨对滑坡稳定性的影响时,不论降雨强度大小和持续时间长短,均将滑体土视为全面饱和进行处理的问题。基于非饱和土一维垂直入渗理论,依据 Green-Ampt 入渗模型和 Philip 入渗模型参数之间的联系,对两个模型进行改进,既解决了 Green-Ampt 入渗模型无法表达成以时间 t 为自变量的显式形式的缺陷,也解决了 Philip 入渗模型不能单独用来计算湿润锋深度的问题,还为分析暴雨作用下的滑坡稳定性提供依据。以重庆市某土质滑坡在 50 a 一遇连续 3 d 暴雨作用下的滑坡体为例,用改进的 Philip 入渗模型计算了滑体土饱和和湿润锋深度、滑坡稳定系数及滑坡推力,并将其与按滑体土全面饱和的经验计算结果进行对比,研究表明:滑坡稳定系数明显提高,滑坡推力显著减小,该改进模型可为滑坡稳定性分析和设计提供借鉴。

关键词:改进的入渗模型;湿润锋深度;滑坡防治

中图分类号:X43

文献标志码:A

Improved rainfall infiltration model and its application on landslide prevention

LEI Guangyu, PAN Lu

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: When the influence of rainfall on the stability of landslide is analyzed, the sliding-body soils are roughly regarded as fully saturated ignoring the rainfall intensity and duration. In this paper, based on the theory of one-dimensional vertical infiltration of unsaturated soils, considering the connection of parameters of the Green-Ampt infiltration model and the Philip infiltration model, those models were improved. This new method not only deals with the defect that the explicit form can not be expressed with time t as independent variable using the Green-Ampt infiltration model, but also solves the problem that the depth of wetting front can not be calculated separately using the Philip infiltration model. Which provides a theoretical basis for the stability analysis of landslide disturbed by the rainstorm. A case study of a soil landslide induced by the action of 50 - year continuous 3 d rainstorm in Chongqing was carried out. The improved Philip infiltration model was used to calculate the saturated wetting front depth, landslide stability coefficient and landslide thrust. The results was compared those from the empirical method that sliding-body soil was fully saturated. The research shows that the landslide stability coefficient is significantly improved, while the landslide thrust is significantly reduced. The improved model can provide reference for landslide stability analysis and design.

Key words: improved infiltration model; wet front depth; landslide prevention

降雨是诱发滑坡地质灾害最常见的因素之一。研究表明:降雨是影响滑坡稳定性的主要外部因素。在长时间小雨或短时暴雨后,斜坡会有大量的张江伟等人^[1]分析了滑坡灾害产生的原因及特征,

收稿日期:2021-04-29

作者简介:雷光宇(1962—),男,长沙理工大学高级工程师,博士。

雨水渗入,增加了岩石与土壤的重量,抗剪强度变弱^[2]。由于地下水的溶解作用,岩石与土壤中的可溶物逐渐被溶解,坡体内岩石与土壤的组成及结构发生变化导致坡体滑坡。在滑坡防治工程中,由于非饱和土入渗过程的复杂性,在分析暴雨对滑坡稳定性的影响时,一般不考虑暴雨入渗的过程,即不论降雨强度大小、降雨持时长短和滑体厚度大小,均将滑体土视为全面饱和,再简化计算^[3]。在《滑坡防治工程设计与施工技术规范》(DZ/T 0219-2006)^[4]中,明确了暴雨工况为校核工况,但未明确暴雨作用的取值标准和暴雨作用效应的计算方法,所以只能保守地加以简化处理。其结果是对规模较大的厚层土质滑坡的计算过于保守,造成不必要的投资浪费。

基于非饱和土入渗理论的滑坡稳定性分析方法是研究降雨诱发滑坡机理的最有效方法^[5]。传统的Green-Ampt入渗模型^[6]和Philip入渗模型^[7]概念清晰、形式简单,得到了国内外学者的广泛认同。Green-Ampt入渗模型虽然有入渗率、累计入渗量及湿润锋深度的解析表达式,但无法表达成时间的显函数,不便于在实际工程中应用。Philip入渗模型的入渗率和累计入渗量的解析表达式,虽然能够表达成时间的显函数,但模型本身却无法单独用来计算饱和湿润锋的深度,也就无法用于计算暴雨工况下的滑坡稳定性。朱昊宇等人^[8]对Green-Ampt模型的国内外研究现状进行了总结。BOUWER等人^[9-11]对Green-Ampt和Philip入渗模型的特征参数进行了对比分析和研究,构建了两个模型特征参数间的理论关系。作者拟运用两个模型的特征参数间的理论关系,改进这两个模型,并用改进的Philip入渗模型计算了重庆市某土质滑坡在50 a一遇且连续3 d最大降雨作用下的滑体土饱和湿润锋深度、滑坡稳定系数和滑坡推力,并与传统设计计算方法相比。

1 传统降雨入渗理论模型

1.1 Green-Ampt模型

1911年,Green和Ampt对入渗过程进行了归纳和假设,以研究薄层积水条件下最初干燥土壤的入渗情况。其基本假设为:在入渗过程中,被入渗的土壤剖面上有一条清晰的水平湿润锋面,将土壤剖面分成上下两个完全不同的区域,分别为湿润区和

未湿润区。同时,土壤含水量在湿润区达到饱和含水率 θ_s ,而未湿润区则为初始含水率 θ_0 。由此,可得到入渗率 i 、累积入渗量 I 和湿润锋面深度 Z_f 与时间 t 的函数关系式为:

$$i = K_s \cdot \frac{S_f + Z_f + H_0}{Z_f} \quad (1)$$

式中: K_s 为饱和导水率,m/s; H_0 为地表的积水深度,m; S_f 为湿润锋面处的土壤平均水吸力,m。

因为 i 与 Z_f 均为时间 t 的函数,基于模型基本假设:通过水量均衡的原理可得到累计入渗量 I 与湿润锋面深度 Z_f 间的函数关系式:

$$I = (\theta_s - \theta_0) Z_f \quad (2)$$

又由于 I 是在 t 时间内地表水以入渗速率 i 入渗到土壤内的总水量,则:

$$I = \int_0^t i dt \quad (3)$$

也可表示成:

$$i = \frac{dI}{dt} = (\theta_s - \theta_0) \frac{dZ_f}{dt} \quad (4)$$

将(4)代入(1)得:

$$\frac{dZ_f}{dt} = \frac{K_s}{(\theta_s - \theta_0)} \cdot \frac{Z_f + S_f + H_0}{Z_f} \quad (5)$$

积分后代入初始条件 $t = 0, Z_f = 0$,得:

$$t = \frac{\theta_s - \theta_0}{K_s} \left[Z_f + (S_f + H_0) \ln \frac{Z_f + S_f + H_0}{S_f + H_0} \right] \quad (6)$$

只要确定了土壤的水分特征参数和表面积水深度,根据式(2)、(4)和(6),即可求得任意时刻的湿润锋面深度 Z_f 、累积入渗量 I 和入渗率 i 。因为式(6)的反函数无法求出,所以湿润锋深度不能表达成以时间 t 为自变量的显函数形式 $Z_f = Z_f(t)$ 。因此,计算时只能根据湿润锋面向下浸润的深度,按一定的步长 ΔZ_f 列表计算其近似值。根据式(4)计算入渗率 i 时,需用设定的步距 ΔZ_f 与前后两步计算所得的时间差 Δt 的比值来近似代替导数值 dZ_f/dt 。所以Green-Ampt模型形式虽然简单,物理概念也很清晰,但计算较烦琐,不适用于工程应用。

1.2 Philip模型

1957年,J. R. PHILIP基于一维垂直入渗的Richads方程,用幂级数求解偏微分方程的方法,推导出入渗率 i 和累计入渗量 I 以时间 t 为自变量的幂级数关系式,对其前两项的近似值进行选取,其表达式为:

$$i = \frac{1}{2}St^{-0.5} + A \quad (7)$$

$$I = St^{0.5} + At \quad (8)$$

式中: A 为常数, m/s ; S 为土壤吸渗率, $m/s^{0.5}$; t 为入渗时间, s 。

由式(7)、(8)可知, Philip模型形式更加简单, 计算表达式也是时间 t 的显函数形式, 但没有湿润锋深度 Z_f 的计算表达式, 无法单独用来计算湿润锋深度。计算湿润锋深度需借助Green-Ampt模型, 同样不适用于工程应用。

1.3 两模型特征参数间的理论关系

在Green-Ampt模型的入渗公式(2)、(4)和(6)中, K_s 和 S_f 是重要的两个特征参数, 但测定难度较大。而在Philip模型的入渗公式(7)、(8)中有 S 、 A 两个特征参数。两个模型特征参数之间的关系, 国内外研究者已做过大量探索。其中, BOUWER^[9]早在1964年就提出了概化湿润锋面处的水吸力 S_f 与土壤饱和导水率 K_s 的函数关系式, 表达式为:

$$S_f = -\int_{h_{c0}}^{h_c} \frac{K(h_c)}{K_s} dh_c \quad (9)$$

式中: $K(h_c)$ 为土壤非饱和导水率, m/s ; h_{c0} 为土壤初始含水率所对应的基质吸力, m ; h_{cs} 为土壤饱和含水率所对应的基质吸力, m ; h_c 为土体的基质吸力。

PHILIP^[12]在1985年提出了大毛管特征长度的概念, 为研究土壤非饱和导水率和扩散率提供了基础。其研究发现, 大毛管特征长度 L 与土壤饱和导水率 K_s 也存在与式(9)相同的关系, 即:

$$L = -\int_{h_{c0}}^{h_c} \frac{K(h_c)}{K_s} dh_c \quad (10)$$

由式(9)、(10)可知, 大毛管特征长度 L 就等于概化湿润峰面处的水吸力 S_f 。

WHITE^[10]在1987年的时候提出的 L 与 S 间的关系式为:

$$L = \frac{S^2}{2K_s(\theta_s - \theta_0)} \quad (11)$$

比较式(10)和(11), 可得:

$$S_f = \frac{S^2}{2K_s(\theta_s - \theta_0)} \quad (12)$$

由式(12)可得:

$$S^2 = 2(\theta_s - \theta_0)K_sS_f \quad (13)$$

2002年, 王全九等^[11]人通过对比研究认为, Green-Ampt入渗模型和Philip入渗模型描述的都是

一维垂直入渗问题, 在入渗过程的任一时刻, 两个模型对应的入渗率 i 和累积入渗量 I 近似相等, 这不仅可以推出与式(13)完全相同的两模型间特征参数存在的特定关系, 而且还推出PHILIP入渗模型中的参数 A 与Green-Ampt入渗模型中的饱和导水率 K_s 相等, 即:

$$A = K_s \quad (14)$$

式(9)~(14)建立了两个人渗模型中的4个特征参数 S 、 A 、 S_f 、 K_s 之间的关系式。

2 降雨入渗模型的改进研究

由于Green-Ampt入渗模型各计算式无法表达成以时间 t 为自变量的显函数, 不适用于工程应用, 而Philip模型本身没有湿润锋深度的计算式, 要计算湿润锋深度, 还得依赖Green-Ampt模型, 因此, 在工程中应用同样不便。基于这两个模型各有优势, 两个模型的特征参数间又存在特定关系, 若将两个模型加以融合, 形成一个即能单独用来计算入渗问题的全部计算量(i 、 Z_f 、 I), 又能将这些计算量用时间 t 的显函数形式表达。因此, 本研究提出了改进方法, 得到了两种改进的降雨入渗模型。

2.1 Green-Ampt入渗模型的改进形式

将两个模型特征参数间的关系式(13)改写成:

$$S^2 = 2(\theta_s - \theta_0)K_sS_f = \frac{2K_sS_fI}{\theta_s - \theta_0} \quad (15)$$

将Green-Ampt模型入渗公式(2)改写成为式(16):

$$Z_f = \frac{I}{\theta_s - \theta_0} \quad (16)$$

将 $A = K_s$ 代入Philip模型入渗公式(8), 得到累计入渗量 I 后, 再代入式(15)的分子, 再将式(16)代入式(15)的分母, 有:

$$S^2 = \frac{2K_sS_f(S \cdot t^{0.5} + K_s \cdot t)}{Z_f} \quad (17)$$

简化后, 则:

$$Z_f = \frac{2K_sS_f}{S} \cdot t^{0.5} + \frac{2K_s^2S_f}{S^2} \cdot t \quad (18)$$

将式(13)代入式(18)并简化得:

$$Z_f = \sqrt{\frac{2K_sS_f}{\theta_s - \theta_0}} \cdot t^{0.5} + \frac{K_s}{\theta_s - \theta_0} \cdot t \quad (19)$$

式(19)是改进的Green-Ampt入渗模型湿润锋

深度 Z_f 的计算式,由式(19)可知, Z_f 是时间 t 的显函数形式。

将式(19)代入到 Green-Ampt 模型的入渗公式(1),得到改进后的入渗率 i 的计算式:

$$i = K_s \left(\frac{S_f + H_0}{Z_f} + 1 \right) = \frac{S_f + H_0}{\sqrt{\frac{2S_f}{K_s(\theta_s - \theta_0)} \cdot t^{0.5} + \frac{1}{\theta_s - \theta_0} \cdot t}} + K_s \quad (20)$$

再将式(20)代入式(3)并对两边积分,可得改进的 Green-Ampt 入渗模型累计入渗量 I 的计算式:

$$I = \int_0^t i dt = 2(S_f + H_0)(\theta_s - \theta_0) \ln \left[1 + \sqrt{\frac{K_s}{2S_f(\theta_s - \theta_0)}} \cdot t^{0.5} \right] + K_s t \quad (21)$$

式(19)~(21)为本研究提出的改进 Green-Ampt 入渗模型的3个计算表达式,与原模型相比,各计算表达式都已变成时间 t 的显函数形式。

2.2 Philip 模型的改进形式

将改进的 Green-Ampt 入渗模型湿润锋深度计算式(19)中的特征参数 S_f 改用 Philip 模型中的特征参数 S 来表示,即将式(12)代入(19),得到:

$$Z_f = \frac{S}{\theta_s - \theta_0} t^{0.5} + \frac{K_s}{\theta_s - \theta_0} t \quad (22)$$

再将式(14)代入(7)和(8),可得:

$$i = \frac{1}{2} S t^{-0.5} + K_s \quad (23)$$

$$I = S t^{0.5} + K_s t \quad (24)$$

式(22)~(24)为本研究提出的改进 Philip 入渗模型的计算表达式,与原模型相比,不仅可以计算任意时刻的入渗率 i 和累计入渗量 I ,而且还可计算出湿润锋深度 Z_f 。

3 工程应用

定量分析暴雨工况下土质滑坡的稳定性,关键是定量计算出雨水入渗到滑体后在滑体内形成的饱和层厚度,即湿润锋深度,然后用计算出来的湿润锋深度进行滑坡稳定性分析。由于滑坡坡面存在一定坡度,与一维降雨入渗边界条件存在一定差异。因此,用改进的降雨入渗模型求得的湿润锋深度是近似值,误差与坡面的坡度相关,但计算结果

偏安全。本研究以重庆市某土质滑坡为例,用改进的 Green-Ampt 模型和 Philip 模型计算分析在 50a 一遇且连续 3 d 最大降雨作用下滑坡稳定性。

根据滑坡勘察报告,该滑坡为一中型土质滑坡,防治工程级别为 II 级,滑体土为粉质黏土,天然重度 18.1 kN/m^3 ,饱和重度 18.6 kN/m^3 , $K_s = 8.2 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, $\theta_s = 0.3987$, $\theta_0 = 0.3531$ 。滑带土为软塑状砂质黏土,黏聚力 $c = 19.5 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi = 16.5^\circ$ 。滑床为强风化至中风化状砂质泥岩,滑面位于岩土交界面,滑坡主剖面如图 1 所示。滑坡区 50 a 最大连续 3 d 降雨量 249 mm。因勘察报告没有实测滑体土的水分特征曲线和渗透系数曲线,本研究采用文献[13]的三峡库区广泛分布的壤黏土的水分特性曲线和扩散率曲线,计算得到 $S_f = 0.0041 \text{ m}$,并根据式(13)计算得到 $S = 5.5373 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{0.5}$ 。

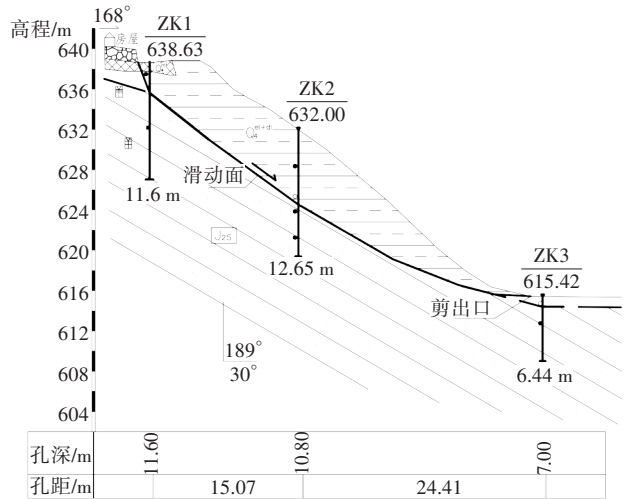


图1 滑坡主剖面

Fig. 1 The main section of the landslide

3.1 确定降雨模式

降雨这种自然现象具有极大的随机性,难以确切地把降雨及其入渗的过程进行描述,一般可按瞬时降雨模式和稳定降雨模式两种情况考虑。在滑坡稳定性分析中,可结合滑坡防治级别,根据规范规定的暴雨重现期,按稳定降雨模式分析暴雨对滑坡稳定性的影响,据此能有效地简化非常复杂的随机过程。假定降雨持续时间为 t_f (s),一次连续降雨量是 Q (mm),则稳定降雨模式下的降雨强度可表示为 $R = Q/t_f$ (mm/s)。本例中滑坡防治工程级别为 II 级,荷载组合为自重+暴雨+地下水,即工况 III(校核工况),按 50 a 一遇暴雨频率,用传递系数法进行滑坡稳定性分析和推力计算[14]。

3.2 用改进的 Philip 模型计算滑坡的湿润锋深度

由式(23)可知, Philip 入渗模型假定降雨开始时土壤入渗率为无限大, 随着时间推移, 土壤入渗率开始下降, 直至达到土壤饱和渗透率 K_s 。在实际降雨中, 其强度都是有限的, 因此, 在降雨的开始阶段, 地表的入渗率是由降雨强度控制的, 随着降雨持续进展, 地表开始出现积水之后, 地表的入渗率才转由地表土壤的入渗能力控制。因此整个降雨入渗过程可分为土壤入渗能力控制和降雨强度控制两个阶段, 两个阶段的分界点便是地面开始出现积水的时间 t_p , 称为积水点。如图2所示, 当降雨强度 R 大于土壤饱和渗透率 K_s , 土体表面就一定存在积水点, 又称理论积水点^[15]。理论积水点时间 t_{pl} 可由改进的 Philip 模型入渗率公式(23)求解得:

$$t_{pl} = \frac{S^2}{4(R - K_s)}, R > K_s \quad (25)$$

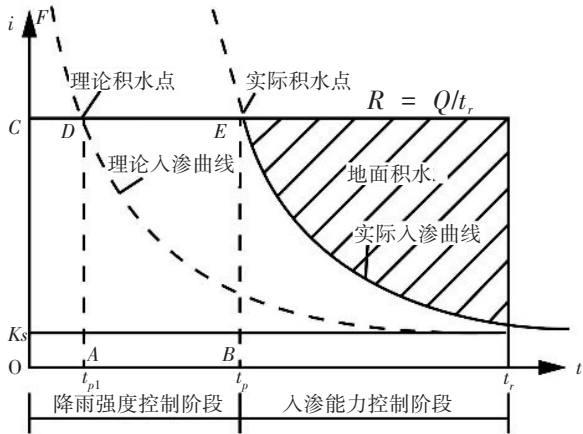


图2 实际降雨入渗模型

Fig. 2 Actual rainfall infiltration model

由图2可以看出, 到达理论积水点时, 对应的理论累积入渗量(即区域 OADFCO 的面积)比实际累积入渗量(区域 OADCO 面积)要大, 即实际上地面并没有积水。只有理论累积入渗量等于实际入渗水量时, 地面才会开始积水。故实际积水点时间 t_p 可由式(26)确定。

$$Rt_p = I_{pl} = St_{pl}^{\frac{1}{2}} + K_s t_{pl} \quad (26)$$

结合式(25)可得, 实际积水点时间为:

$$t_p = \frac{(2R - K_s)S^2}{4R(R - K_s)^2} \quad (27)$$

令 $t_c = t_p - t_{pl}$, 有:

$$t_c = \frac{S^2}{4R(R - K_s)} \quad (28)$$

只要将理论入渗曲线沿时间轴向右平移 t_c , 即可得到如图2所示的实际入渗曲线。因此, 当 $R > K_s$ 时, 改进的 Philip 入渗模型的表达式应改写为:

入渗率:

$$\begin{cases} i = R, 0 \leq t \leq t_p \\ i = \frac{1}{2}(t - t_c)^{-\frac{1}{2}} + K_s, t_p \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (29)$$

累积入渗量:

$$\begin{cases} I = Rt, 0 \leq t \leq t_p \\ I = S(t - t_c)^{\frac{1}{2}} - S(t_p - t_c)^{\frac{1}{2}} + K_s(t - t_p) + Rt_p, t_p \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (30)$$

湿润锋面深度:

$$\begin{cases} Z_f = \frac{R}{(\theta_s - \theta_0)}t, 0 \leq t \leq t_p \\ Z_f = \frac{S}{(\theta_s - \theta_0)}(t - t_c)^{\frac{1}{2}} - \frac{S}{(\theta_s - \theta_0)}(t_p - t_c)^{\frac{1}{2}} + \frac{K_s}{(\theta_s - \theta_0)}(t - t_p) + \frac{R}{(\theta_s - \theta_0)}t_p, t_p \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (31)$$

当 $R \leq K_s$ 时, 积水点不存在, 入渗率由降雨强度决定, 改进的 Philip 入渗模型的表达式为:

$$\text{入渗率为: } i = R, 0 \leq t \leq t_f \quad (32)$$

$$\text{累积入渗量为: } I = Rt, 0 \leq t \leq t_f \quad (33)$$

$$\text{湿润锋面深度为: } Z_f = \frac{R}{(\theta_s - \theta_0)}t, 0 \leq t \leq t_f \quad (34)$$

本例中 50 a 一遇连续 3 d 降雨量 249 mm, 假定 5 种降雨持时, 按式(27)~(34)分别计算相应的湿润锋深度见表1。

表1 连续3 d最大降雨量按不同持时计算的湿润锋深度
Table 1 The calculated depth of the wet front at different durations of the maximum rainfall for three consecutive days

三天最大降雨量/mm	饱和渗透系数/(mm·h ⁻¹)	降雨持时/h	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	开始积水时间/s	湿润锋深度/m
249	29.5	4	62.3	14.1	2.707
		8	31.1	4196.7	5.323
		24	10.4	$R \leq K_s$, 无积水	5.461
		48	5.2	$R \leq K_s$, 无积水	5.461
		72	3.5	$R \leq K_s$, 无积水	5.461

3.3 暴雨工况下滑坡的稳定性计算

暴雨工况下滑坡的稳定性计算方法在现行规范中没有做出具体规定,由设计人员依据经验处理。工程中普遍的做法是:不论暴雨强度大小和滑体土厚薄,将滑体土一律按饱和土状态处理。这样处理明显偏于保守,尤其是对一些厚度较大的滑体,会造成经济上不必要的浪费。用本研究提出的改进降雨入渗模型定量计算暴雨工况下滑坡的稳定性,可有效避免经验方法的不足。用改进的Philip入渗模型计算出滑坡的饱和湿润锋深度后,先在计算剖面上标出与坡面线平行且竖直高度等于湿润锋深度的湿润锋线,然后竖向划分条块后从上至下逐块编号。计算时,湿润锋线与坡面线之间的滑体取饱和重度,湿润锋线与地下水位线之间的滑体取天然重度,地下水位线以下的滑体在计算下滑力时取饱和重度,计算抗滑力时取浮重度。由于雨水入渗以垂直方向为主,因而可忽略渗透压力对滑坡稳定性的影响,但当湿润锋深度大于或等于地下水埋深时,入渗雨水按地下水对待。以滑坡主剖面为例如图1所示,分别用传统的经验方法和改进的降雨入渗模型方法计算该滑坡的稳定性,计算结果表明:用传统的经验方法考虑滑体土全面饱和时,其稳定系数为0.73,滑坡推力为582 kN/m,用改进的降雨入渗模型方法考虑5.461 m饱和入渗厚度时,其稳定系数为0.99,滑坡推力为189 kN/m。用本研究方法计算的稳定系数比用传统经验方法计算的稳定系数明显提高,同时滑坡推力显著减小,依体计算结果进行支挡结构设计,可避免不必要的材料浪费,节约工程造价。但本研究提出的改进的降雨入渗模型计算滑坡稳定性的方法,仍然是一个近似的方法,还有诸多问题有待今后进一步研究和改进,特别是计算结果的安全可靠性还需要经过更多实际工程的检验。

4 结论

1) 基于Green-Ampt入渗模型和Philip入渗模型各参数间存在的特定联系,经过融合,提出了两种入渗模型的改进形式。与传统模型相比,改进的入渗模型不仅形式更加统一,内容更加全面,而且各计算表达式均可表达成以时间 t 为自变量的显函

数形式,能快速有效地确定地表入渗过程中任意时刻的入渗速率、累积入渗量和湿润锋位置深度,更方便工程应用。

2) 将改进的降雨入渗模型近似应用于暴雨工况下土质滑坡稳定性分析和推力计算,以重庆市某土质滑坡为例,计算了滑坡体在50 a一遇且连续3 d最大降雨作用下的饱和湿润锋深度、滑坡稳定系数及滑坡推力,计算表明,与按滑体土全面饱和的传统经验方法相比,滑坡稳定系数明显提高,同时滑坡推力显著减小,既保证了滑坡安全,又降低了工程造价。

3) 用改进的降雨入渗模型定量计算滑坡的稳定性方法,其出发点是要合理确定滑体土饱和入渗深度,在确保滑坡防治工程安全的前提下尽量降低工程造价,避免采用传统经验方法过于保守造成不必要浪费。但该方法仍是一个近似方法,还有诸多问题有待今后进一步研究和改进,特别是计算方法的安全可靠性问题,还需要经过更多实际工程的检验。

参考文献

- [1] 张江伟,李小军,迟明杰,等.滑坡灾害的成因机制及其特征分析[J].自然灾害学报,2015,24(6):42-49. (ZHANG Jiangwei, LI Xiaojun, CHI Mingjie, et al. Analysis of formation mechanism and characteristics of landslide disasters [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(6): 42-49. (in Chinese))
- [2] 严捷.潮惠高速公路路堑边坡滑坡分析与治理[J].交通科学与工程,2018,34(2):35-38,101. (YAN Jie. Analysis and treatment of slope slope on chaohui expressway [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(2): 35-38+101. (in Chinese))
- [3] 姚海林,郑少河,李文斌,等.降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性影响的参数研究[J].岩石力学与工程学报,2002(7):1034-1039. (YAO Hailin, ZHENG Shaohe, LI Wenbin, et al. Parameter study on the influence of rainfall infiltration on the stability of unsaturated expansive soil slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002(7): 1034-1039. (in Chinese))
- [4] 中国地质调查局.DZ/T 0219—2006滑坡防治工程设计与施工技术规范[S].北京:中国标准出版社,2006. (China Geological Survey. DZ/T 0219—2006 Technical code for design and construction of landslide prevention

- engineering [S]. Beijing: China Standard Press, 2006. (in Chinese))
- [5] 戚国庆. 降雨诱发滑坡机理及其评价方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2004. (QI Guoqing. Study on the mechanism of rainfall-induced landslide and its evaluation method [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004. (in Chinese))
- [6] GREEN W H, AMPT G A. Studies on soil physics: I. Flow of air and water through soils [J]. Journal of Agricultural Science, 1911, 4(1): 1-24.
- [7] PHILIP J R. An Infiltration Equation With Physical Significance[J]. Soil Science, 1954, 77(2): 153-158.
- [8] 朱昊宇, 段晓辉. Green-Ampt 入渗模型国外研究进展 [J]. 中国农村水利水电, 2017(10): 6-12, 22. (ZHU Haoyu, DUAN Xiaohui. Foreign research progress of Green-Ampt infiltration model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(10): 6-12, 22. (in Chinese))
- [9] BOUWER H. Unsaturated flow in ground water hydraulics [J]. J Hydraul Div Amer Soc Civil Eng, 1964 (90): 121-144.
- [10] WHITE, SULLY M J. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration [J]. Water Resour Res, 1987, 23(8): 1511-1522.
- [11] 王全九, 来剑斌, 李毅. Green-Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析 [J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 13-16. (WANG Quanju, LAI Jianbin, LI Yi. Comparative analysis of Green-Ampt model and Philip infiltration model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18 (2) : 13-16. (in Chinese))
- [12] PHILIP J R. Reply to "Comments on steady infiltration from spherical cavities" [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(3): 788-789.
- [13] 程冬兵, 蔡崇法. 室内基于土壤水分再分布过程推求紫色土导水参数 [J]. 农业工程学报, 2008.24(7): 7-12. (CHENG Dongbing, CAI Chongfa. Estimating water conductivity parameters of purple soil based on the process of soil water redistribution indoors [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008.24(7): 7-12. (in Chinese))
- [14] 葛绪祯, 王雄江. 山区高速公路超长滑坡体变形机制及治理方案研究 [J]. 公路与汽运, 2018(3): 99-102. (GE Xuzhen, WANG Xiongjiang. Research on deformation mechanism and treatment plan of super-long landslide in mountainous expressway [J]. Highway and Transportation, 2018(3): 99-102 (in Chinese))
- [15] EIGLE J D, MOORE I D. Effect of rainfall energy on infiltration into a bare land [J]. J RANS of ASAE, 1983, 26(6): 189-199. (责任编辑: 欧兆虎; 校对: 罗容 李脉; 英文编辑: 陈璐)