

DOI: 10.11779/CJGE2022S1035

持续降雨作用下折线型滑裂面堆积体滑坡稳定性分析

杨校辉^{1,2}, 张志伟^{1,2}, 郭楠^{1,2}, 朱彦鹏^{1,2}

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心(兰州理工大学), 甘肃 兰州 730050)

摘要: 青藏高原边缘地带堆积体滑坡的发生与降雨密切相关, 其中不少滑坡的滑裂面为折线型。为研究折线型滑裂面堆积体边坡在持续降雨作用下的稳定性, 首先, 基于传统降雨入渗 Green-Ampt (G-A) 模型, 同时考虑边坡倾角、饱和区渗流和非饱和区渗透系数变化的影响建立适用于有限长边坡的降雨入渗模型; 其次, 结合不平衡推力法和降雨入渗模型, 推导折线型滑裂面堆积体边坡在持续降雨作用下稳定性动态变化的计算公式; 最后, 对比现场入渗试验结果验证所提出入渗模型的合理性, 并基于舟曲江顶崖堆积体滑坡与传统入渗模型下稳定性算法进行对比。研究结果表明: ①降雨强度、边坡坡面倾角、渗透系数等都影响着坡体饱和层的形成快慢以及湿润层厚度的扩展速度; ②降雨入渗开始阶段, 三种模型得到的湿润层扩展速率相同, 随着降雨的持续, 本文模型计算的湿润层扩展速率大于 G-A 模型而小于分层假定入渗模型; ③江顶崖堆积体滑坡的稳定性随着降雨的持续逐渐减小, 降雨初期, 滑坡稳定性下降较快, 降雨后期, 稳定性下降速率逐渐放缓; 提出的稳定性计算方法得到的边坡滑动时间要早于传统入渗模型下稳定性计算结果。研究成果可供持续降雨作用下堆积体边坡稳定性分析参考。

关键词: 持续降雨; 折线型滑面; 堆积体滑坡; 降雨入渗; 稳定性分析

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S1-0195-06

作者简介: 杨校辉(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事非饱和土地基处理、支挡结构及滑坡防治等方面的研究工作。E-mail: yxhui86@126.com。

Stability of accumulation landslides with broken-line slip surface under action of continuous rainfall

YANG Xiao-hui^{1,2}, ZHANG Zhi-wei^{1,2}, GUO Nan^{1,2}, ZHU Yan-peng^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050)

Abstract: The occurrence of accumulation landslides on the edge of the Qinghai-Tibet Plateau is closely related to rainfall, and many of the landslides are those with broken-line slip surface. In order to explore the stability of the accumulation slope with broken-line slip surface under the continuous rainfall, firstly, based on the traditional rainfall infiltration Green-Ampt (GA) model, considering the influences of the slope angle, seepage in saturated zone and seepage coefficient in unsaturated zone, a rainfall infiltration model suitable for finite-length slopes is established. Secondly, combining the unbalanced thrust method and the rainfall infiltration model, the formula for calculating the stability of the accumulation slope with broken-line slip surface under the continuous rainfall is derived. Finally, the results of field infiltration tests are compared to verify the rationality of the proposed infiltration model and with those of the traditional stability algorithm based on the Jiangdingya accumulation landslide of Zhouqu county. The results shows that: (1) The rainfall intensity, slope angle and permeability coefficient all affect the formation speed of the saturated layer of the slope and the spreading speed of the thickness of wetting layer. (2) At the beginning of rainfall infiltration, the three models obtained the same wetting layer expansion rate. With the continuous rainfall, the wetting layer expansion rate calculated by the model provided in this paper was higher than that of the G-A model but lower than that of the infiltration model with assumption of stratification. (3) The stability of the Jiangdingya accumulation landslide gradually decreases with the continuous rainfall. At the beginning of the rainfall, the stability of the landslide decreases rapidly. At the later stage of rainfall, the rate of stability decline gradually slows down. The slope sliding time obtained by the proposed stability method is earlier than that by the traditional infiltration model. The research results can be used as a

基金项目: 甘肃省地质矿产勘查开发局创新基金项目 (2020CX09); 甘肃省住房和城乡建设厅科研项目 (JK2021-46, JK2021-55); 国家自然科学基金项目 (52168051)。

收稿日期: 2022-09-25

reference for the stability analysis of accumulation slopes under the continuous rainfall.

Key words: continuous rainfall; broken-line slip surface; accumulation landslide; rainfall infiltration; stability analysis

0 引言

中国西部地区大多数山坡是由风化岩石、坡积物、残积层等堆积形成的堆积体边坡,其中有很多边坡由于长历时、大强度的降雨入渗形成滑坡,给人民生命财产带来严重损失^[1],尤其是青藏高原东北边缘。究其原因,强烈的新构造运动使得青藏高原东北边缘地形陡峻、地震频发,构造应力以及地震会使边坡土石的内部结构变形或破坏,从而产生新的构造结构面^[2-3],受降雨、构造应力等影响逐渐发展为潜在滑裂面,其形态大多为折线型。降雨入渗对滑坡稳定性有着较大影响,降雨诱发的滑坡稳定性定量评价通常是在选取合理的降雨入渗模型后采用合适的稳定性评价方法来计算其稳定性系数。

国内外许多学者开展了丰富的研究,得到了一些分析降雨入渗的经典模型,如 Green-Ampt(G-A)模型^[4]、基于 G-A 假设的 Mein-Larson 模型^[5]、利用级数表述的 Philip 模型^[6],以及 Iveson 和 Baum 等发展的 Trigrs 模型^[7]等。其中 G-A 模型由于物理意义明确、参数较少,在降雨型滑坡分析中应用较广。Mein 等^[8]以 G-A 模型为基础,将降雨入渗过程分为自由入渗和积水入渗两个阶段,但其并未考虑斜坡效应;为考虑斜坡效应,Chen 等^[9]在 G-A 模型的基础上得到了一个统一的斜坡降雨入渗模型;汪丁建等^[10]、苏永华等^[11]基于 G-A 模型,建立了适用于有限长坡且能综合考虑湿润层土体含水率分布情况与饱和层内平行于坡面渗流作用的降雨入渗分析(LSGA)模型,然而其忽略了坡体非饱和区的存在。

为进一步考虑非饱和区的影响,Yao 等^[12]考虑了饱和区与非饱和区厚度各占湿润锋深度的 50%,并将其用于边坡稳定性分析;雷文凯等^[13]将非饱和区土体体积含水率按椭圆形分布考虑,但其假设的非饱和区厚度同样占湿润层厚度的 50%;然而实际上随着降雨的持续,饱和层占湿润层的比例会不断变大,而非定值,非渗透系数也会随着降雨的持续而变化。张杰等^[14]研究了适用于斜坡降雨的 G-A 模型,但其将渗透系数采用饱和渗透系数的一半,未考虑渗透系数随着湿润锋的推进而不断变化的情况。此外针对降雨作用下堆积体滑坡稳定性评价的算法多是在土体条块上假定湿润线,然而在持续降雨作用下,堆积体边坡上的湿润线是动态变化的,导致边坡稳定系数也不断变化。

综上,在前人研究的基础上,首先基于 G-A 模型,同时考虑坡面倾角、非饱和区及饱和区内渗流的影响,

建立持续降雨作用下堆积体边坡的入渗模型,其次结合不平衡推力法,推导折线型滑裂面堆积体边坡在持续降雨作用下稳定性算法,最后通过对比现场入渗试验结果和分析工程案例来验证本文算法的合理性。

1 持续降雨下堆积体边坡稳定性计算

1.1 边坡降雨入渗公式

为描述堆积体滑坡在持续降雨作用下水入渗过程,基于 G-A 模型同时考虑边坡倾角、饱和区渗流和非饱和区渗透系数变化建立堆积体边坡降雨入渗模型。取堆积体边坡其中一个条块进行降雨入渗分析,如图 1 所示,建模分析假定如下:①滑坡基岩上部坡体为均匀堆积体,基岩不透水,且不考虑地下水的影响。②降雨入渗过程分为 2 个阶段。第 1 阶段为饱和层形成前,此时土体按体积含水率分为过渡层和未湿润层,如图 1(a)所示;第 2 阶段为饱和层形成后,此时土体按体积含水率分为饱和层,过渡层和未湿润层,饱和层和过渡层统称为湿润层,如图 1(b)所示,湿润层的厚度为湿润锋至边坡表面的垂直距离。③饱和层和未湿润层土体体积含水率为定值,而过渡层体积含水率分布规律采用椭圆形曲线来描述^[13],因此可得到持续降雨下边坡土体体积含水率分布规律为

$$\theta(z) = \begin{cases} \theta_s & (0 \leq z < Z_s) \\ \theta_i + \frac{\theta_s - \theta_i}{Z_w} \sqrt{Z_w^2 - (z - Z_s)^2} & (Z_s \leq z < Z_f) \\ \theta_i & (Z_f \leq z) \end{cases} \quad (1)$$

式中 θ_s 为土体饱和体积含水率(%); θ_i 为土体天然体积含水率(%); Z_s 为坡体饱和层厚度(m); Z_w 为坡体过渡层厚度(m); Z_f 为坡体湿润层厚度(m)。

在第 1 阶段,饱和层尚未出现,湿润层仅包括过渡层,饱和层厚度为 0,此时雨水入渗速率等于降雨强度。此阶段的极限状态为饱和层初始出现的时刻,即雨水入渗速率等于第 2 阶段开始时土体的初始入渗速率,即

$$f_i(t) = q \cos \alpha \equiv \bar{k} \frac{Z_w \cos \alpha + s_f}{Z_w} \quad (2)$$

式中 q 为降雨强度(m/h); α 为边坡倾角($^\circ$); s_f 为未湿润层相对饱和层的基势水头(m),根据文献[15]的建议,取土体进气压力值对应水势的一半; \bar{k} 为非饱和层的等效导水率,取值参考何忠明等^[16],则

有

$$\bar{k} = \frac{k_s - k_i}{\ln k_s - \ln k_i}, \quad (3)$$

式中, k_s 为土体饱和渗透系数 (m/s); k_i 为土体干燥层的导水率 (m/s)。

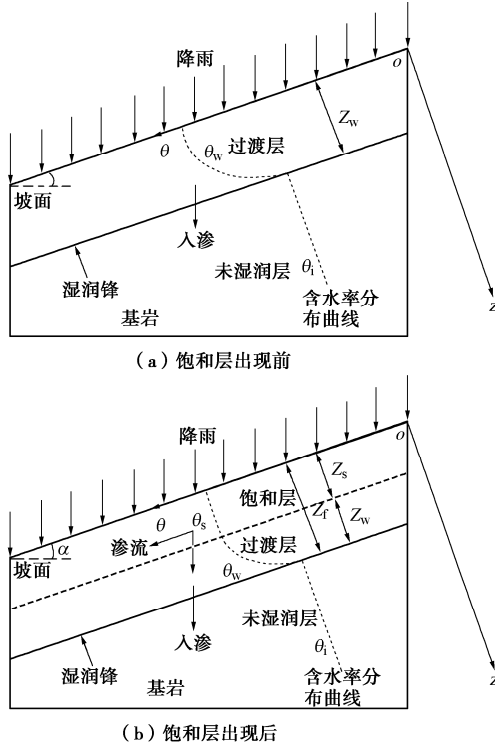


图 1 边坡降雨入渗过程图

Fig. 1 Process of rainfall infiltration of slope

根据图 1 (a) 及式 (1), 对过渡层体积含水率积分可得到饱和层初始出现的时刻雨水入渗总量为

$$I_1 = \int_{Z_s}^{Z_s+Z_w} \theta(z) dz = \frac{\pi Z_w}{4} (\theta_s - \theta_i) \quad (4)$$

根据质量守恒定律, 结合式 (2) 和式 (4), 可得第 1 阶段 t_p 时间内降雨入渗量的等价关系式为

$$t_p q \cos \alpha = \frac{\pi Z_w}{4} (\theta_s - \theta_i) \quad (5)$$

结合式 (2) 和 (5) 可得到饱和层初始出现时对应的时刻 t_p 和湿润锋厚度 Z_f 。

在第 2 阶段, 边坡内饱和层已经形成, 此时湿润层包括饱和层和过渡层。渗入坡体的雨水一部分在饱和层平行于坡表向下流动, 另一部分将继续渗入下方非饱和层土体, 直至土体完全饱和, 如图 2 (b) 所示。根据彭振阳等^[17]成果, 随着湿润层厚度不断增大, 过渡层体积占湿润层体积的比例沿湿润层厚度线性减小, 有

$$\frac{Z_w}{Z_f} = \alpha z_f + b \quad (6)$$

式中, a, b 为经验参数, 取值可参考文献[16]。

第 2 阶段的降雨入渗速率为^[15]

$$f_2(t) = \frac{Z_f \cos \alpha + s_f}{Z_f} \cdot \frac{k_s}{n Z_f + m} \quad (7)$$

式中, $m = \frac{\ln k_s - \ln k_i}{k_s - k_i} b k_s + 1 - b$, $n = \frac{\ln k_s - \ln k_i}{k_s - k_i}$ 。

($a k_s - a$)。

根据图 1 (b), 结合式 (6) 和 Darcy 定律对式 (2) 积分可得第 2 阶段 t 时刻内土体累计入渗量为

$$I_2 = \frac{\pi(a Z_f^2 + b Z_f) + 4[(1-b) Z_f - a Z_f^2]}{4} \cdot (\theta_s - \theta_i) + k_s [(1-b) Z_f - a Z_f^2] \sin \alpha \quad (8)$$

将式 (8) 对时间 t 求导可得降雨入渗速率为

$$f_2(t) = \frac{dI}{dt} = \left\{ \frac{\pi(2a Z_f + b)}{4} + [(\theta_s - \theta_i) + k_s \sin \alpha] \cdot (1-b) - 2a Z_f \right\} \frac{dZ_f}{dt} \quad (9)$$

结合式 (7) 和式 (9), 可得

$$\left[\frac{\pi(2a Z_f + b)}{4} + [(\theta_s - \theta_i) + k_s \sin \alpha] [(1-b) - 2a Z_f] \right] \frac{dZ_f}{dt} = \frac{Z_f \cos \alpha + s_f}{Z_f} \cdot \frac{k_s}{n Z_f + m} \quad (10)$$

对式 (10) 进行数值积分可得到饱和层出现后湿润层厚度 Z_f 随降雨时间 t 的关系式。

结合式 (9) ~ (13), 可得到整个降雨入渗过程中堆积体边坡湿润层厚度随降雨时间的变化式为

$$Z_f(t) = \begin{cases} \frac{4qt \cos \alpha}{\pi(\theta_s - \theta_i)} & (0 \leq t < t_p), \\ \left[\frac{\pi(2a Z_f + b)}{4} + ((\theta_s - \theta_i) + k_s \sin \alpha)((1-b) - 2a Z_f) \right] \cdot \frac{dZ_f}{dt} = \frac{Z_f \cos \alpha + s_f}{Z_f} \cdot \frac{k_s}{n Z_f + m} & (t_p \leq t \leq t_d). \end{cases} \quad (11)$$

从式 (11) 可以看出, 坡体湿润层厚度的扩展速率与边坡坡面倾角, 降雨强度, 坡体含水量和渗透系数等有关, 湿润层的厚度随降雨的持续而动态变化。值得注意的是, 由于堆积体边坡各条块的坡面倾角及条块厚度存在差异, 各条块内湿润层厚度的扩展速率及坡体到达完全饱和状态的时间也不一致。

1.2 堆积体滑坡稳定性计算公式

基于不平衡推力法, 结合 1.1 节滑坡降雨入渗公式推导适用于折线型滑裂面堆积体边坡随降雨变化下的稳定性计算公式。忽略各条块饱和层产生的渗流对下一条块的影响, 将整个滑坡沿滑面折线段分为 n 个条块, 则每个条块可视为有限坡长滑坡体, 折线型滑

坡条块计算简图如图 2 所示。

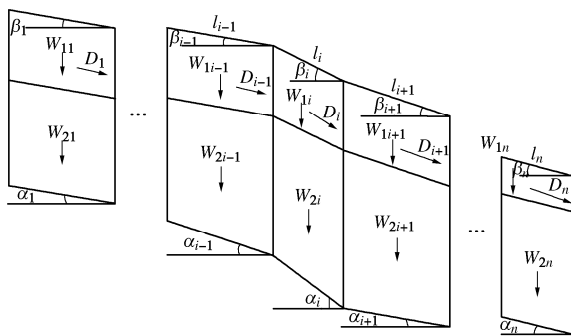


图 2 折线型滑裂面边坡稳定性计算简图

Fig. 2 Diagram of slope stability with broken-line slip surface

取过渡层土体重度为饱和重度和天然重度的均值, 得到各层土体的重度计算公式为

$$W_{1i} = l_i Z_s(t) \gamma_s, \quad (12a)$$

$$W_{2i} = \frac{l_i}{2} (\gamma_s + \gamma_t) Z_{wi}(t), \quad (12b)$$

$$W_{3i} = l_i (h_i - Z_{fi}(t)) \gamma_t. \quad (12c)$$

式中 l_i 为第 i 个条块的坡长 (m); γ_s 为土体饱和重度 (kN/m^3); γ_t 为土体天然重度 (kN/m^3); h_i 为第 i 个条块两侧厚度的较小值 (m)。

由图 2 可以得到第 i 条块的下滑力为

$$F_i = (W_{1i} + W_{2i} + W_{3i}) \sin \alpha_i + D_i \cos(\alpha_i - \beta_i). \quad (13)$$

结合 Mohr-Coulomb 准则得第 i 条块抗滑力为

$$R_i = c_i L_i + [(W_{1i} + W_{2i} + W_{3i}) \cos \alpha_i - D_i \sin(\alpha_i - \beta_i)] \tan \varphi_i. \quad (14)$$

式中 α_i 为第 i 个条块的坡底角度 ($^\circ$); β_i 为第 i 个条块的坡面角度 ($^\circ$); D_i 为第 i 条块中由于饱和带水体渗流作用, 在土条块上产生平行于坡表的渗透力 (kN), $D_i = \gamma_w l_i \sin \beta_i Z_{si}(t)$; φ_i 为滑带土的内摩擦角 ($^\circ$); c_i 为滑带土的黏聚力 (kPa)。

根据超载法可得堆积体滑坡稳定系数为

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (F_i \prod_{j=1}^{n-1} \psi_j) + F_n}, \quad (15)$$

式中, ψ_j 为第 j 块段的剩余下滑力传递至 $i+1$ 块时的传递系数

$$\psi_j = \cos(\beta_j - \beta_{j+1}) - \sin(\beta_j - \beta_{j+1}) \tan \varphi_j. \quad (16)$$

2 模型验证与案例分析

2.1 降雨入渗公式验证

采用雷文凯等^[13]开展的南昆铁路黏土塹坡入渗试验来验证本文方法的合理性。试验坡段宽 2.5 m, 坡面长度为 6 m, 坡面角度为 30° , 试验降雨强度为 25 mm/h, 喷头均布于坡面, 距坡面垂直距离为 2 m, 降雨

持续时间为 10 h。该边坡天然体积含水率为 0.22, 饱和体积含水率为 0.45; 未湿润层相对饱和层的基质势能水头取 1.5 m; 坡体天然密度为 2.12 g/cm^3 , 饱和渗透系数为 $3.37 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, 初始渗透系数为 0.001 m/d。

图 3 为不同降雨入渗模型下湿润层厚度随降雨持续时间变化图。从图 3 中可以发现, 基于本文模型和分层假定入渗模型计算得到的结果与试验结果比较接近。在入渗开始阶段 ($0 \leq t \leq 57 \text{ min}$), 3 种模型计算得到的湿润层扩展速率相同; 随着降雨的持续 ($t > 57 \text{ min}$), 在同一时刻, 本文模型湿润层抵达厚度开始大于传统 G-A 模型而小于分层假定入渗模型, 且彼此间的差值越来越大, 这是因为伴随着降雨的持续, 坡体内开始出现饱和层, 饱和层的出现将导致渗入坡体的一部分雨水在饱和层平行于坡表流出, 而分层假定入渗模型未考虑雨水流失这一情况, 其是假定雨水全部渗入下方非饱和层, 因此本文模型计算得到的湿润层扩展速率要小于分层假定入渗模型。传统 G-A 模型未考虑土体非饱和区的影响, 且其渗透系数为定值, 这导致同一时刻下传统 G-A 模型计算得到的湿润层厚度的扩展速率要低于本文模型和分层假定入渗模型。

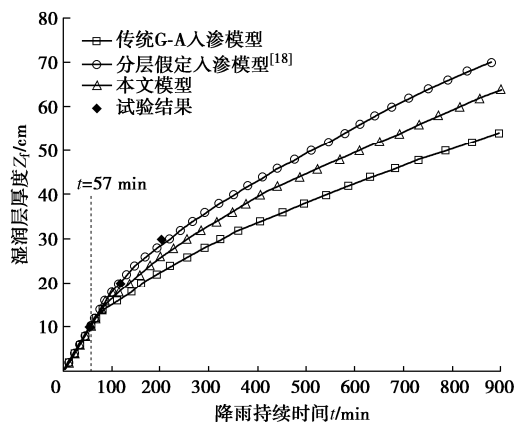


图 3 不同入渗模型下湿润层厚度随降雨时间变化图

Fig. 3 Variation of thickness of wetting layer with rainfall time under different infiltration models

2.2 工程实例分析

甘肃舟曲江顶崖 H1 滑坡为一堆积层滑坡, 目前处于稳定状态, 滑体主要由碎石土组成, 平均厚度 26.5 m, 渗透性较好, 滑带以黑色含砾黏土为主, 滑床为以板岩为主的基岩。滑面形态为折线型, 整体上缓下陡, 后部、中部较为平缓, 坡度 $13^\circ \sim 15^\circ$; 下部、前缘较为陡峭, 坡度 $20^\circ \sim 25^\circ$, 整体平均 20° , 其中某一主滑剖面图如图 4 (a) 所示, 图 4 (b) 为主滑剖面中 H1 滑坡体剖面计算简图。

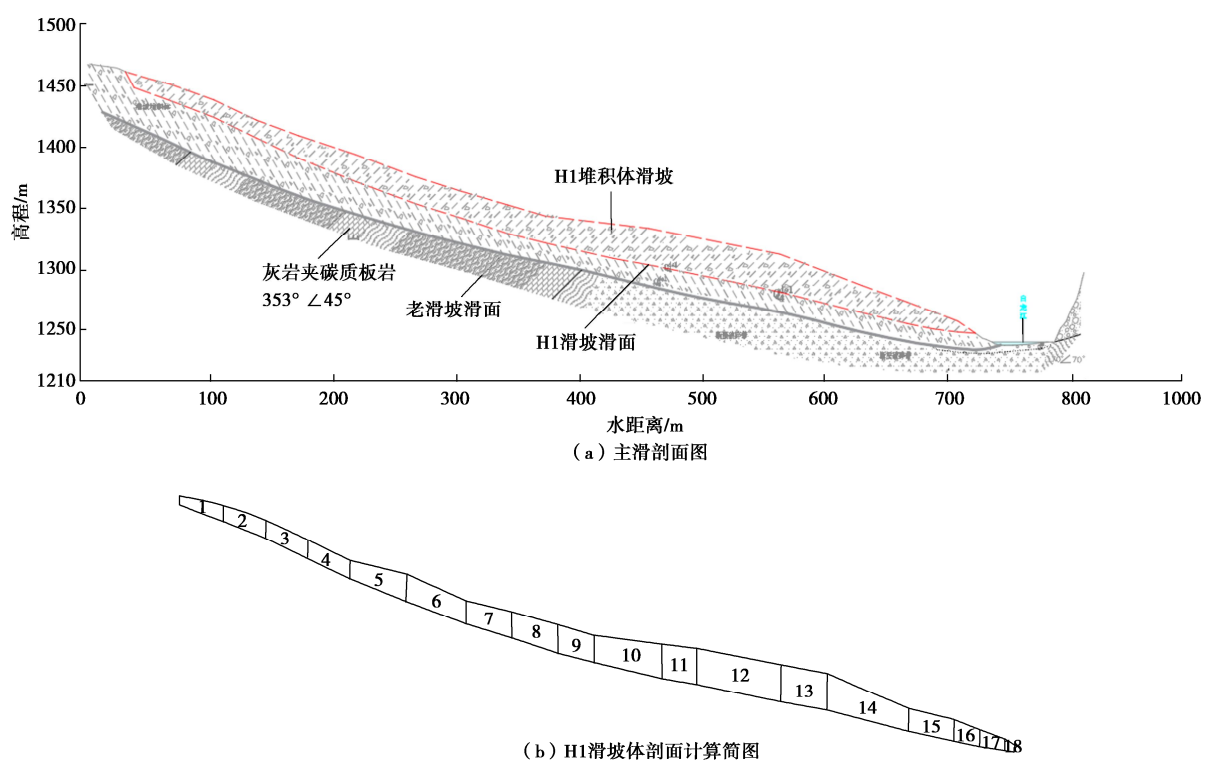


图 4 江顶崖 H1 滑坡剖面图

Fig. 4 Profile of Jiangdingya H1 landslide

据舟曲县气象站和中国气象数据网统计资料得知舟曲多年平均降水量为 420.6 mm, 24 h 最大降水量为 63.3 mm, 1 h 最大降水量为 47.0 mm, 降水常以连续阴雨形式出现, 因此给定降水强度 $q=35\text{ mm/h}$ 。土体基本参数: 天然重度为 20.5 kN/m^3 , 饱和重度为 22.0 kN/m^3 , 天然含水率为 13.1%, 饱和含水率为 43.7%, 饱和渗透系数为 $1\times 10^{-6}\text{ m/s}$, 基质势水头为 50 cm, 黏聚力为 6 kPa, 内摩擦角为 15° 。

对江顶崖 H1 堆积体滑坡进行持续降雨下不同方法的稳定性计算, 边坡稳定性系数随降雨持续时间变化规律如图 5 所示。

由图 5 可见, 随着降雨的持续, 两种模型计算得到的滑坡稳定性逐渐下降, 降雨初期, 滑坡稳定性下降较快, 降雨后期, 稳定性下降速率逐渐放缓。传统 G-A 模型计算得到的稳定系数 $F_s=1$ 的时间为 163 h, 而本文模型计算得到的稳定系数 $F_s=1$ 的时间为 210 h, 比传统 G-A 模型计算的结果提前 47 h。这是因为传统 G-A 模型未考虑非饱和区以及饱和区内渗流的影响, 导致其湿润层厚度的扩展速率小于本文模型, 且计算时未考虑饱和层内沿坡表向下的渗透力, 造成稳定性系数计算结果偏大。

3 结 论

(1) 推导的降水入渗公式同时考虑了边坡倾角、饱和区渗流和非饱和区渗透系数变化的影响, 降雨强度、边坡坡面倾角、渗透系数等都影响着饱和层的形成快慢以及湿润层厚度的扩展速度。

(2) 本文模型和分层假定入渗模型计算得到的结果较传统 G-A 模型与试验结果更接近, 在降雨入渗开始阶段, 三种模型得到的湿润层扩展速率相同; 随着降雨的持续, 本文模型计算的湿润层扩展速率大于传统 G-A 模型而小于分层假定入渗模型。

(3) 江顶崖折线型滑裂面堆积体边坡的稳定性随着降雨的持续逐渐减小, 降雨初期, 滑坡稳定性下降较快, 降雨后期, 稳定性下降速率逐渐放缓; 提出的

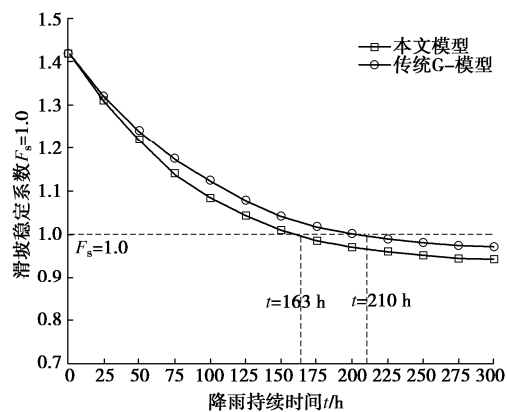


图 5 滑坡稳定系数随降雨持续时间变化规律

Fig. 5 Variation laws of stability coefficient of landslide with rainfall duration

稳定性计算方法得到的边坡滑动时间要早于传统入渗模型下稳定性计算结果。

参考文献:

- [1] SENTHILKUMAR V, CHANDRASEKARAN S S, MAJI V B. Rainfall-induced landslides: case study of the marappalam landslide, nilgiris district, Tamil Nadu, India[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, **18**(9): 05018006.
- [2] 桑 凯. 近 60 年中国滑坡灾害数据统计与分析[J]. 科技传播, 2013(10): 129 - 129, 124. (SANG Kai. Statistics and analysis of landslide disaster data in China in recent 60 years[J]. Public Communication of Science & Technology, 2013(10): 129 - 129, 124. (in Chinese))
- [3] 刘 刚, 燕云鹏, 刘建宇. 青藏高原西部地质灾害分布特征及背景分析[J]. 中国地质调查, 2017, **4**(3): 37 - 45. (LIU Gang, YAN Yun-peng, LIU Jian-yu. Analysis of distribution character and background of geological hazards in western Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geological Survey of China, 2017, **4**(3): 37 - 45. (in Chinese))
- [4] HEBER GREEN W, AMPT G A. Studies on soil physics[J]. The Journal of Agricultural Science, 1911, **4**(1): 1 - 24.
- [5] 于宁宇, 范 文, 魏婷婷. 基于 Mein - Larson 模型的非饱和和锐利浸润锋模型[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(9): 1668 - 1675. (YU Ning-yu, FAN Wen, WEI Ting-ting. Unsaturated sharp wetting front model based on Mein-Larson saturated infiltration model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(9): 1668 - 1675. (in Chinese))
- [6] PHILIP J R. The theory of infiltration[J]. Soil Science, 1957, **83**(5): 345 - 358.
- [7] BAUM R L, SAVAGE W Z, GODT J W. TRIGRS-a Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, Version 2.0[R]. US Geological Survey Open-File Report, 2008.
- [8] MEIN R G, LARSON C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resources Research, 1973, **9**(2): 384 - 394.
- [9] CHEN L, YOUNG M H. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces[J]. Water Resources Research, 2006, **42**(7): .
- [10] 汪丁建, 唐辉明, 李长冬, 等. 强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2016, **37**(2): 439 - 445. (WANG Ding-jian, TANG Hui-ming, LI Chang-dong, et al. Stability analysis of colluvial landslide due to heavy rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(2): 439 - 445. (in Chinese))
- [11] 苏永华, 李诚诚. 强降雨下基于 Green-Ampt 模型的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2020, **41**(2): 389 - 398. (SU Yong-hua, LI Cheng-cheng. Stability analysis of slope based on Green-Ampt model under heavy rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(2): 389 - 398. (in Chinese))
- [12] YAO W M, LI C D, ZHAN H B, et al. Time-dependent slope stability during intense rainfall with stratified soil water content[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, **78**(7): 4805 - 4819.
- [13] 雷文凯, 董宏源, 陈 攀, 等. 考虑倾角的土质边坡 Green-Ampt 改进入渗模型[J]. 水利水运工程学报, 2020(6): 101 - 107. (LEI Wen-kai, DONG Hong-yuan, CHEN Pan, et al. Improved Green-Ampt infiltration model of soil slope considering inclination[J]. Hydro-Science and Engineering, 2020(6): 101 - 107. (in Chinese))
- [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 Tong-chun, DOU Hong-qiang, 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))
- [15] BOUWER H. Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis[J]. Water Resources Research, 1966, **2**(4): 729 - 738.
- [16] 何忠明, 钟 魏, 刘正夫, 等. 基于改进的 Green-Ampt 入渗模型的炭质泥岩粗粒土路堤边坡稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, **52**(7): 2179 - 2187. (HE Zhong-ming, ZHONG Wei, LIU Zheng-fu, et al. Stability analysis of carbonaceous mudstone coarse-grained soil embankment slope based on improved Green-Ampt infiltration model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, **52**(7): 2179 - 2187. (in Chinese))
- [17] 彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 基于分层假设的 Green-Ampt 模型改进[J]. 水科学进展, 2012, **23**(1): 59 - 66. (PENG Zhen-yang, HUANG Jie-sheng, WU Jing-wei, et al. Modification of Green-Ampt model based on the stratification hypothesis[J]. Advances in Water Science, 2012, **23**(1): 59 - 66. (in Chinese))

(编校: 孙振远)