

DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2016.S1.027

强降雨作用下浅层滑坡的入渗及稳定性

王 进 冷先伦 阮 航 刘世伟 崔 臻

(中国科学院武汉岩土力学研究所岩石力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 为了研究降雨入渗对边坡稳定性的影响, 基于 Mein-Larson 入渗模型, 提出坡面供水强度和坡面入渗能力的概念, 建立了坡面降雨入渗模型. 将坡面降雨入渗模型与无限边坡极限平衡法相结合, 建立了以土、水混合物为研究对象, 考虑水对岩土体力学参数弱化的稳定性评价模型. 最后应用建立的模型对一边坡算例进行了降雨入渗和稳定性分析. 结果表明: 坡面供水强度和入渗能力均随坡角的增大而减小. 在降雨条件下, 把水和土的混合物作为研究对象和把土骨架作为研究对象所得到的稳定性计算结果是一致的. 降雨强度是控制滑坡失稳的重要参数, 它的增强会加快湿润锋的运移速度和边坡表面入渗能力的衰减. 降雨会造成湿润锋的不断下移, 湿润锋处的安全系数随之降低, 一旦安全系数达到临界状态, 边坡将发生失稳破坏.

关键词: 斜坡入渗; 浅层滑坡; 强降雨; 对象选择; 稳定性评价

中图分类号: TU431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0505(2016)S1-0153-06

Infiltration and stability of shallow landslide under intensive rainfall conditions

Wang Jin Leng Xianlun Ruan Hang Liu Shiwei Cui Zhen

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The influence of rainfall infiltration on the slope stability was improved based on a rainfall infiltration model. On the basis of Mein-Larson infiltration model, the concept of slope surface water strength and infiltration capacity was proposed. Stability evaluation models considering weakening of strength parameters by water were used for uniform slopes under rainfall conditions. The model was established by combining slope rainfall infiltration model with the infinite slope limit equilibrium method. The rainfall infiltration and the stability for a typical slope were investigated. The results show that the slope surface water strength and infiltration capacity decrease, when the slope angle increases. The calculated stability results demonstrate that the solid particles and water mixture have the same result with the soil skeleton under the condition of rainfall. The rainfall intensity is an important parameter to control the stability of landslide. The migration rate of wetting front and the attenuation of infiltration capacity velocity show a rising trend with the increase of rainfall intensity. The rainfall causes wetting front moving deeply and results in the slope safety factor decreasing. Once the safety coefficient of the slope reaches a critical state, the slope failure occurs.

Key words: slope infiltration; shallow landslide; intensive rainfall; object choice; stability evaluation

浅层滑坡是降雨直接诱发的典型地质灾害类型. 我国东南部的残积土地区和西南部的红层地区等在雨季均以浅层滑坡最为常见. 在对降雨入渗的原位监测中发现, 不论是渗透系数较小的膨胀土边

收稿日期: 2016-05-25. 作者简介: 王进(1990—)男, 博士生; 冷先伦(联系人)男, 副研究员, 硕士生导师, lengxianlun@tom.com.

基金项目: NSFC-云南联合基金重点资助项目(U1402231)、国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2015CB057905).

引文格式: 王进, 冷先伦, 阮航, 等. 强降雨作用下浅层滑坡的入渗及稳定性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2016, 46(S1): 153-158.

[DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2016.S1.027]

坡^[1]、黄土边坡^[2],还是渗透系数较大的土石混合体边坡^[3],土体含水量对降雨的响应范围均有限.多次降雨会造成边坡一定范围的土体含水量往复变化.相关试验结果^[4]表明饱和作用和干湿循环作用都会使土体的抗剪强度降低,但深层土体在上覆土体的固结压力作用下,对干湿循环的弱化响应没有浅层土灵敏^[5].因此,相对于深部岩土体而言,降雨对边坡浅层稳定性的影响更明显.

入渗和失稳是降雨诱发浅层滑坡的两个基本过程.基于入渗模型结合极限平衡法是评价降雨诱发浅层滑坡的有效方法.李宁等^[6]、简文星等^[7]、常金源等^[8]、李秀珍等^[9]针对坡面非饱和入渗的特点,对经典入渗模型进行修正,提出了适用于降雨条件下的浅层滑坡稳定性分析模型.目前,对降雨诱发浅层滑坡的稳定性研究工作取得了许多成果,以下从降雨入渗过程和稳定性评价两个方面分别阐述.

降雨入渗分析的理论依据是达西定律,基于对入渗剖面的概化和入渗方式的假定.研究中所涉及的关键点包括降雨边界、入渗能力两个方面:

(1) 降雨边界是控制实际入渗的因素之一,它的设置关乎着入渗分析的准确性.目前把降雨视为垂直于坡面方向还是按照矢量分解的方法得到垂直于坡面方向的分量,并以此作为实际的降水边界是学术界的两种不同观点.

(2) 入渗能力是控制实际入渗的另一因素.Green 等^[10]给出了平面积水入渗的入渗能力模型(G-A 模型).Chen 等^[11-12]围绕着坡面入渗时水的运移路径和是否会产生积水的问题,对 G-A 模型进行了修正.

降雨诱发的浅层滑坡一般按无限边坡的形式利用极限平衡法对其稳定性进行评价.研究的关键在于研究对象的选择.常金源将土骨架视为研究对象,在稳定性分析模型中考虑了渗流力的影响.李宁、李秀珍将浸水土体作为研究对象,将渗流力和浮力视为内力,在稳定性分析模型中不予考虑.近代土力学的观点认为把土骨架作为研究对象或把浸水土体作为研究对象在本质上是一样的.陈祖煜利用散度定理证明了潜水作用下两种研究对象选择方式的一致性.

1 斜坡降雨入渗模型

1.1 降雨边界条件

研究表明,降雨入渗受坡面供水强度的控制^[13].当入渗面水平时,降雨强度与坡面供水强度相等,但当入渗面倾斜时,坡面供水强度的计算方

法推导如下.

首先给出坡面供水强度的定义.坡面供水强度即降雨作用于坡面后所形成的供水能力,是单位时间作用于单位面积的降雨量,单位为 mm/h,设为 i ;降雨强度设为 p ,方向竖直向下;坡面倾角为 α .如图 1 所示,取整个坡面进行研究,建立作用于坡面的总降雨量与坡面总供水量的等量关系:

$$p \cdot x = i \cdot l \tag{1}$$

$$x/l = \cos\alpha \tag{2}$$

得到坡面供水强度与降雨强度的关系为:

$$i = p \cos\alpha \tag{3}$$

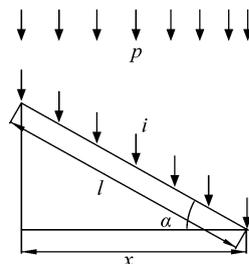


图 1 坡面降雨入渗示意图

由此说明,当坡面发生倾斜时,坡面的供水强度不仅受降雨强度的影响,还受坡角的控制.这是由于坡面倾斜造成了单位面积降雨作用坡面面积改变的结果.

1.2 坡面入渗能力

坡面入渗能力是控制降雨入渗的又一关键因素.当供水方式为降雨且入渗面倾斜时,对坡面入渗能力做如下推导.

1.2.1 基本假设

(1) 在高强度的降雨作用下,将土体入渗剖面的含水量概化为饱和区 θ_s 和初始区 θ_0 .本文仅考虑高强度降雨的情形.

(2) 雨水入渗过程中,湿润锋面始终与坡面平行.

(3) 整个降雨过程都不会发生积水,当供水强度大于入渗能力时,产生坡面径流,不考虑径流对入渗的影响.

1.2.2 坡面入渗能力模型

图 2 为坡面入渗示意图,取宽度为 x 的土条进行研究.将其分为无数个小宽为 dx 的小土条,当小土条宽度足够小时,将每个小土条按照图中右下的方式重新设置成土柱,按平面入渗处理.那么根据 M-L 模型,得到该土柱的入渗能力 m 为:

$$m = k(\theta_s) \frac{z+S}{z} \tag{5}$$

由土条与土柱的入渗能力相等得:

$$q = m \cdot x = j \cdot l \quad (6)$$

则坡面入渗能力:

$$j = k(\theta_s) \frac{z+S}{z} \cos\alpha \quad (7)$$

式中, S 为初始区的吸力水头 (mm); z 为湿润锋的竖直深度 (mm); $k(\theta_s)$ 为饱和渗透系数 (mm/h).

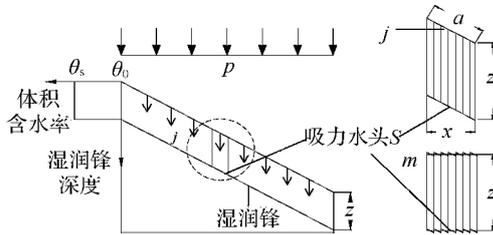


图2 坡面入渗模型及入渗能力的条分解法

可以看出, 坡面入渗能力受到坡角的影响, 随着坡角的增大而减小. 此外, 实际降雨过程中, 开始的一段时间内入渗率维持在 100%, 随后不断降低, 最终入渗率达到稳定^[1]. 由式(7)有, 在入渗的最开始阶段 $z \rightarrow 0, j_{z \rightarrow 0} \rightarrow +\infty$; 降雨持续一段时间后 $z \rightarrow +\infty, j_{z \rightarrow \infty} \rightarrow k(\theta_s) \cos\alpha$, 坡面入渗能力随着降雨的持续入渗而不断降低, 最终降至 $k(\theta_s) \cos\alpha$. 因此, 理论模型与实际情况一致.

1.2.3 实际入渗率

实际入渗率受到坡面供水强度式(3)和入渗能力式(7)的控制, 通过比较二者的大小进而对实际入渗率进行判断. 当供水强度小于等于入渗能力时, 整个降雨过程中, 雨水全部入渗; 当供水强度大于入渗能力时, 一部分降雨入渗坡体, 一部分产生径流. 因此, 将 $i = j_{z \rightarrow +\infty}$ 作为降雨过程中是否会出现径流的判据. 若 $p > k(\theta_s)$ 时, 则在降雨过程中就会出现径流, 此判据与平面降雨入渗过程中是否会出现径流的判据相同. 由此说明, 坡角不是影响降雨入渗过程中是否会产生径流因素.

1.3 斜坡入渗分析

由入渗增量与土体含水率增量相等的关系:

$$q = f \cdot dt \cdot l = dz(\theta_s - \theta_0) \cdot l \cos\alpha \quad (8)$$

式中 f 为实际入渗率. 本文考虑的是高强度降雨, 即 $p > k(\theta_s)$ 的情况, 因此降雨入渗分为全部入渗和部分入渗两个阶段(图3), 发生径流时有:

$$i = j \quad (9)$$

得到发生径流时的入渗深度以及时间:

$$z_p = \frac{S}{p/k(\theta_s) - 1} \quad (10)$$

$$t_p = \frac{S(\theta_s - \theta_0)}{(p/k(\theta_s) - 1)p} \quad (11)$$

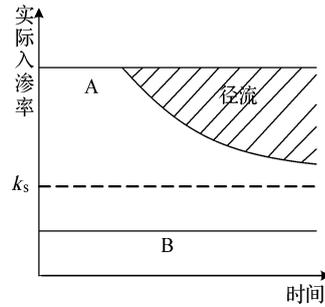


图3 降雨入渗示意图

对式(8)分别在径流点前、后积分:

$$\left. \begin{aligned} \int_0^t i \cdot dt &= \int_0^z \cos\alpha(\theta_s - \theta_0) dz, \quad t \leq t_p \\ \int_{t_p}^t j \cdot dt &= \int_{z_p}^z \cos\alpha(\theta_s - \theta_0) dz, \quad t > t_p \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

得到任意时刻湿润锋在垂直于坡面方向的深度 z :

$$\left. \begin{aligned} z &= \frac{pt}{(\theta_s - \theta_0)}, \quad t \leq t_p \\ t &= t_p + \frac{(\theta_s - \theta_0)}{k(\theta_s)} \left(z - z_p + S \ln \frac{z+S}{z_p+S} \right), \quad t > t_p \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中 $z_{M+1} = z \cos\alpha$, 如图4所示. 当 $\cos\alpha = 1$ 时, 式(13)退化为 M-L 模型的解.

2 强降雨诱发浅层滑坡稳定性模型

2.1 研究对象的探讨

在进行边坡稳定性计算时, 首先要明确研究对象. 陈祖煜针对有地下水存在的边坡, 研究了稳定性评价时如何选择研究对象的问题. 通过对土条的受力分析, 基于场论中的散度定理, 证明了在稳定性计算中以土和水的混合体作为研究对象与以土骨架作为研究对象的一致性^[14].

然而降雨入渗作用下边坡的水力情况与地下潜水条件下截然不同, 主要体现在:

(1) 运移方向不同. 降雨由坡面向坡内入渗, 而地下水则基本沿着平行于不透水层的方向运移.

(2) 流动速度不同. 降雨入渗过程中由于湿润锋两侧存在吸力水头差并且重力势梯度最大, 因此降雨入渗的水力梯度要比稳定地下水渗时大.

(3) 潜在滑面处的孔隙水应力不同. 降雨入渗湿润锋面可视为自由面, 该处的孔隙水压力可视为零, 而地下水则把自重作用于隔水层上, 在隔水层面形成了与地下水位高度相关的孔隙水压力^[15].

针对降雨入渗的土条受力特点, 对湿润锋以上

的土条进行受力分析,如图 4 所示.假设湿润锋面与坡面平行,由于为均质无限边坡,因此作用于条块左侧和右侧的力相等.

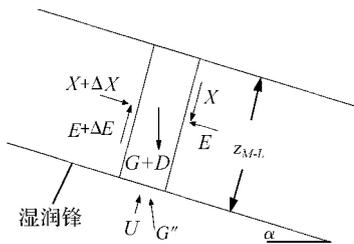


图 4 无限边坡土条受力分析

把水和土的混合物作为研究对象,那么水与土骨架之间的作用力以内力的形式存在.土条的静力平衡方程:

$$G + G' + U = 0 \tag{14}$$

把土骨架作为研究对象,则土骨架所受的外力有浮力和渗透力两部分.土骨架的静力平衡方程:

$$G' + G'' + D = 0 \tag{15}$$

式中 G 为土条的饱和重量; G' 为土条的浮重量; G'' 土条边界受到的全部骨架间有效作用力的合力; U 为土体边界上所受的水压力的合力; D 为土体所受渗透力的合力.

湿润锋为饱和自由面:

$$U = 0 \tag{16}$$

渗流力通过积分获得:

$$D = \int_v d dv \tag{17}$$

$$d = -\gamma_w \text{grad}\varphi \tag{18}$$

$$\varphi = \frac{u}{\gamma_w} + h \tag{19}$$

入渗过程中,入渗剖面的孔隙水压力为 0,则:

$$D = -\int_v \gamma_w \text{grad}\varphi dv = G_w \tag{20}$$

$$G' = G - G_w \tag{21}$$

其中: G_w 为与土条同体积的水重; d 为单位土体所受的渗流力; φ 为势函数; $\text{grad}\varphi$ 为水力梯度; h 为位置水头.

将式(20)、(21)代入式(15)即可得式(14).说明在入渗情况下,两种处理方法也是一致的.显然把土和水的混合物作为研究对象时,浮力和渗透力均视为内力,只需计算边界力.并且在降雨入渗时,只要不存在滞水层,湿润锋面的孔隙水压力都是零.

2.2 无降雨时无限边坡的稳定性评价模型

浅层滑坡的滑动面一般为平面非圆弧滑动,在稳定性分析时一般将其视为无限边坡考虑^[8].李宁等^[6]基于 Fredlund 提出的非饱和抗剪强度理论公

式给出了无限边坡任意深度 z 的安全系数表达式:

$$F_s = \frac{c' a + (N - au_a) \tan\varphi' + (u_a - u_w) a \tan\varphi^b}{G_n \sin\alpha} \tag{22}$$

土条受力为

$$G_n = z a \cos\alpha \cdot \gamma_t \tag{23}$$

$$N = G_n \cdot \cos\alpha \tag{24}$$

式中 c' 为有效粘聚力; φ' 为有效内摩擦角; φ^b 为吸力内摩擦角; u_a 为孔隙气压力,假定为零, $(u_a - u_w)$ 为基质吸力; G_n 为天然状态下土条的重量; N 为滑面上的总法向应力.

如图 5 所示,本文以水和土的混合物作为研究对象,将无限边坡安全系数表达式与斜坡降雨入渗模型(式(13))相结合,考虑强度参数的弱化,建立一套适用于降雨诱发浅层滑坡的稳定性评价模型.

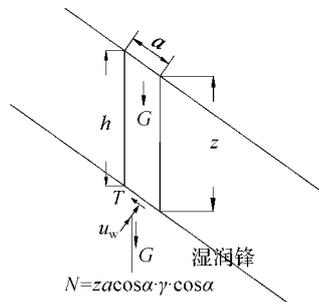


图 5 浅层边坡稳定性评价模型

2.3 降雨作用下均质边坡的稳定性

如图 5 所示,湿润锋深度为 z (本文中湿润锋深度均由式(13)求得)时所对应的土条受力为:

$$G = z a \cos\alpha \gamma_{\text{sat}} \tag{25}$$

$$N = G \cdot \cos\alpha \tag{26}$$

则湿润锋处 ($u_w = 0$) 的安全系数为:

$$F_s = \frac{c'_{\text{sat}} a + (N - u_w a) \tan\varphi'_{\text{sat}}}{G \sin\alpha} = \frac{\tan\varphi'_{\text{sat}}}{\tan\alpha} + \frac{c'_{\text{sat}}}{\sin\alpha \cos\alpha \gamma_{\text{sat}}} \cdot \frac{1}{z} \tag{27}$$

式中 c'_{sat} 、 φ'_{sat} 分别为土体饱和时的有效粘聚力和内摩擦角.由式(27)可以看出随着降雨入渗的持续,安全系数不断降低,但不会低于 $\tan\varphi'_{\text{sat}}/\tan\alpha$.

3 算例分析

本节利用前文提出的分析模型对降雨入渗及浅层滑体稳定性进行分析,揭示不同降雨强度对入渗和稳定性的影响.选取降雨强度分别为 2.5、5 mm/h,持续降雨 72、24 h,降雨量分别达到 60、120 mm,分别属于暴雨和大暴雨雨型.

3.1 模型及参数

按照上述对浅层滑坡的处理方法,选取坡度为25°的均质无限边坡进行分析,滑体土按粉砂处理.参考文献[6-7],运用工程类比法获得具体的土性参数,见表1、表2,土水特征曲线见图6.

表1 滑体土的物理指标

天然重度/ (kN·m ⁻³)	饱和重度/ (kN·m ⁻³)	残余体积 含水率	天然体积 含水率	饱和体积 含水率
19	20	0.06	0.19	0.26

表2 滑体的力学参数

土层及状态	有效粘聚力/kPa	有效内摩擦角/(°)	吸力内摩擦角/(°)	饱和渗透系数/(m·h ⁻¹)
滑体	7	30	15	0.003
天然				
饱和	5	25	—	

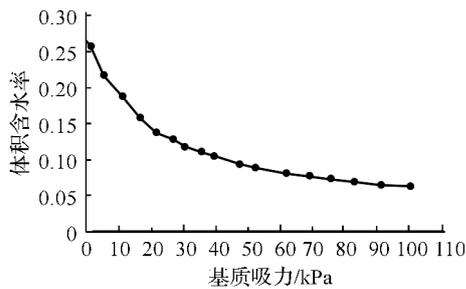


图6 土水特征曲线

3.2 降雨入渗分析

由式(3)、(7)、(13)得到不同降雨强度下坡面入渗能力、实际入渗率和湿润锋深度随时间的变化规律.如图7、8所示,坡面入渗能力随着降雨的持续由无穷大以指数形式衰减,并最终趋于饱和坡面入渗能力2.7 mm/h.坡面的实际入渗率受到坡面入渗能力和坡面供水强度的双重控制,当降雨强度分别为2.5和5 mm/h时,在径流点之前的实际入渗率分别为2.3和4.5 mm/h.径流点之后,实际入渗量曲线与入渗能力曲线重合.湿润锋深度随着降雨的持续不断深入,在径流点之前湿润锋深度随时间线性增加,其运移速度分别为36和71 mm/h.当

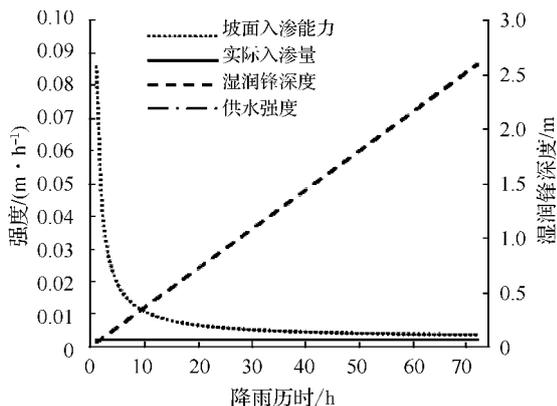


图7 降雨强度为2.5 mm/h时的入渗分析

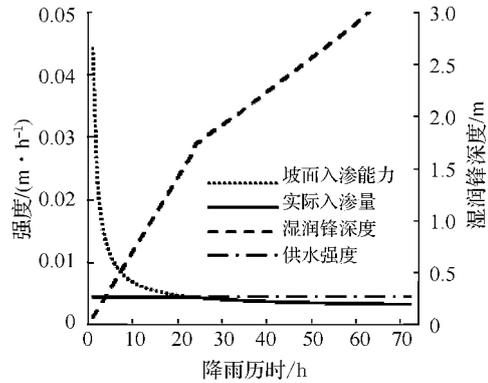


图8 降雨强度为5 mm/h时的入渗分析

出现径流后湿润锋深度曲线出现拐点,湿润锋的运移速度随降雨时间的增加而逐渐减小.不同降雨强度作用下,湿润锋的运移速度不同,随着降雨强度的增大而增加.因此,在高强度降雨条件下,湿润锋到达某一深度的时间会早于低强度的情况.由式(5)可知,湿润锋深度是控制入渗能力的参数,湿润锋越深,入渗能力越小.因此,在同一时刻,高强度的降雨作用下的边坡所具有的入渗能力低,也就是说降雨强度的提高会加快边坡表面入渗能力的衰减.

3.3 浅层滑坡稳定性分析

如图9所示,随着湿润锋的下移,湿润锋处的安全系数由2.6降至0.97,并且降低的速度不断减小.

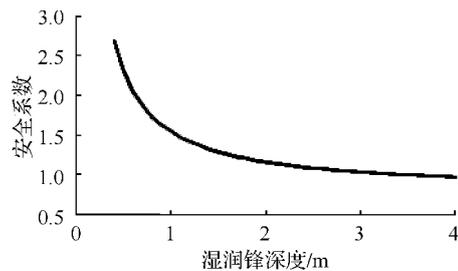


图9 降雨强度对浅层滑坡安全系数的影响

如图10所示,不同降雨强度对湿润锋处的安全系数随时间的变化有显著影响.当降雨强度为2.5、5 mm/h时,边坡的安全系数降至1时所用的时间分别为67、45 h.由此说明降雨强度越大,坡体的安全系数下降越快.

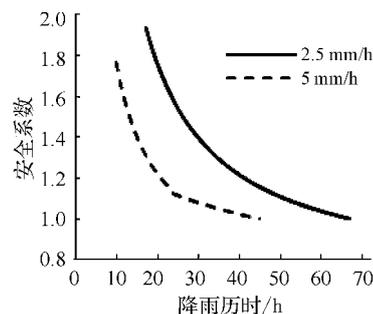


图10 湿润锋处安全系数随时间的变化

4 结论

1) 坡面供水强度是降雨作用于坡面后所形成的供水能力,其大小受降雨强度和坡角的影响.在相同的降雨强度下,坡面供水强度随着坡角的增大而减小.

2) 坡面入渗能力是单位坡面单位时间内能够入渗的最大水量,是控制降雨入渗的关键因素.与平面入渗不同,坡面入渗能力不仅受到渗透系数、入渗深度和吸力水头差的影响,还受斜面角度的影响,坡面的入渗能力随坡角的增大而减小.但坡面入渗情况下对降雨过程中是否会出现积水情况的判据标准与平面入渗一致,不受坡角的影响.

3) 在对降雨作用下的边坡进行稳定分析时,把水和土的混合物作为研究对象和把土骨架作为研究对象所得到的结果是一致的.把土和水整体作为研究对象进行稳定性分析要简单一些.

4) 降雨强度的提高会加快湿润锋的运移速度和边坡表面入渗能力的衰减.随着降雨强度的增加径流会越早出现,此时湿润锋深度越浅.

5) 对于无限边坡,随着降雨入渗的持续,湿润锋处的安全系数不断降低.降雨强度的增加也会加速边坡达到极限平衡状态的速度.

参考文献 (References)

- [1] 詹良通,吴宏伟,包承纲,等.降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J].岩土力学,2003,24(2):151-158.
Zhan Liangtong, Ng Wangwai Charles, Bao Chenggang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(4): 151-158. (in Chinese)
- [2] 张常亮,李萍,李同录,等.黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J].水利学报,2014,45(6):728-734.
Zhang Changliang, Li Ping, Li Tonglu, et al. In-situ observation on rainfall infiltration in loess [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(6): 728-734. (in Chinese)
- [3] 周中,傅鹤林,刘宝琛,等.土石混合体边坡人工降雨模拟试验研究[J].岩土力学,2007,28(7):1391-1396.
Zhou Zhong, Fu Helin, Liu Baochen, et al. Artificial rainfall tests on a well-instrumented soil-rock-mixture slope [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1391-1396. (in Chinese)
- [4] 周健,徐洪钟,胡文杰.干湿循环效应对膨胀土边坡稳定性影响研究[J].岩土工程学报,2013,35(S2):152-156.
Zhou Jian, Xu Hongzhong, Hu Wenjie. Impact of wetting-drying cycle effects on stability of expansive soil slopes [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(S2): 152-156. (in Chinese)
- [5] 李新明,孔令伟,郭爱国,等.基于工程包边法的膨胀土抗剪强度干湿循环效应试验研究[J].岩土力学,2014,35(3):675-682.
Li Xinming, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Experimental research on shear strength of expansive soil under wetting-drying cycles based on wrapping method [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(3): 675-682. (in Chinese)
- [6] 李宁,许建聪,钦亚洲.降雨诱发浅层滑坡稳定性的计算模型研究[J].岩土力学,2012,33(5):1485-1490.
Li Ning, Xu Jiancong, Qin Yazhou. Research on calculation model for stability evaluation of rainfall-induced shallow landslides [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(5): 1485-1490. (in Chinese)
- [7] 简文星,许强,童龙云.三峡库区黄土坡滑坡降雨入渗模型研究[J].岩土力学,2013,34(12):3527-3533.
Jian Wenxing, Xu Qiang, Tong Longyun. Rainfall infiltration model of Huangtupo landslide in Three Gorges Reservoir area [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(12): 3527-3533. (in Chinese)
- [8] 常金源,包涵,伍法权,等.降雨条件下浅层滑坡稳定性探讨[J].岩土力学,2015,36(4):995-1001.
Chang Jinyuan, Bao Han, Wu Faquan, et al. Discussion on stability of shallow landslide under rainfall [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(4): 995-1001. (in Chinese)
- [9] 李秀珍,何思明.基于Mein-Larson入渗模型的浅层降雨滑坡稳定性研究[J].灾害学,2015,30(2):16-20.
Li Xiuzhen, He Siming. A study on stability of shallow rainfall-induced landslide based on mein-larson infiltration model [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(2): 16-20. (in Chinese)
- [10] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics: Flow of air and water through soil [J]. *Journal of Agriculture Science*, 1911, 4(1): 1-24.
- [11] Chen L, Young M H. Green-Ampt infiltration model for sloping surfaces [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(7): 887-896.
- [12] Mein R G, Larson C L. Modeling infiltration during a steady rain [J]. *Water Resources Research*, 1973, 9(2): 384-394.
- [13] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [14] 陈祖煜.土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [15] Rahardjo H, Lim T T, Chang M F, et al. Shear-strength characteristics of a residual soil [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1995, 32(1): 60-77.