

降雨诱发浅层滑坡影响因素的解析分析

李 宁^{1,2}, 刘冠麟¹, 陈有亮¹, 许建聪², 杜 曦³, 韦智友¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

3. 新南威尔士大学 土木与环境学院, 悉尼 2033)

摘要: 采用笔者提出的无限长斜坡降雨入渗解析解结合非饱和土抗剪强度理论, 提出了一个用于降雨诱发浅层滑坡安全系数计算的解析表达式, 并对浅层滑坡的多种影响因素进行解析分析. 结果表明: 基质吸力减小直至消失是降雨诱发浅层滑坡的主要途径. 减饱和系数、前期降雨强度、边坡坡度、土体储水能力是影响边坡浅层稳定性的重要因素, 而后期降雨强度只有在降雨强度较大时才会对边坡浅层稳定性有明显影响, 饱和渗透系数只有在接近降雨强度时, 对边坡浅层稳定性的影响才较大.

关键词: 降雨入渗; 浅层滑坡; 解析公式; 稳定性; 非饱和土

中图分类号: TU 4 **文献标志码:** A

Analytic Analysis on the Influencing Factors of Rainfall-Induced Shallow Landslide

LI Ning^{1,2}, LIU Guanlin¹, CHEN Youliang¹, XU Jiancong², DU Xi³, WEI Zhiyou¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney 2033, Australia)

Abstract: By virtue of the water pressure formula proposed by the author previously combined with the theory of shear strength of unsaturated soil, an analytical safety factor formula for the rainfall-induced shallow landslide was proposed. The influencing factors of the shallow landslide were analyzed. The results show that the rainfall-induced shallow landslide is mainly due to the decrease of matric suction. The desaturation coefficient, antecedent-rainfall intensity, slope gradient and soil water storage capacity have significant effects on the rainfall-induced shallow landslide. The effect of the rainfall intensity on the stability of the slope is obvious only when the rainfall intensity is large, while the saturated permeability would affect the shallow landslide significantly only when it approaches the rainfall intensity.

Keywords: rainfall infiltration; shallow landslide; analytic formula; stability; unsaturated soil

收稿日期: 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(0872179, U1765110); 上海市自然科学基金资助项目(16ZR1423300)

第一作者: 李 宁(1982-), 男, 讲师. 研究方向: 边坡及隧道稳定性研究. E-mail: lining0017@163.com

中国是一个滑坡灾害频发的国家,据资料统计显示,中国有新老滑坡约 30 万处,其中,灾害性的约 1.5 万处,每年损失高达 100 亿元以上^[1]. 尤其是在雨季,天然岩坡和铁路、公路等开挖形成的人工边坡发生失稳破坏最为严重. 众多事实表明,降雨是影响边坡稳定性,导致边坡失稳的最主要和最普遍的环境因素^[2-4]. 因此,对降雨条件下滑坡的影响因素进行研究,对于滑坡防治具有重要的现实意义^[5-6].

唐栋等^[7]分析了不同降雨形式对边坡稳定性的影响,指出前期降雨对边坡稳定性影响显著. Rahardjo 等^[8]模拟了不同降雨模式下孔隙水压力的变化,并得到边坡安全系数随降雨时间的变化,指出前期降雨强度对土坡稳定性有重要影响. 张卫民等^[9]采用数值模拟分析了地下水位线埋深位置对边坡稳定性的影响,指出地下水位线升高到一定高度后会导致土体整体滑动几率增大. Tsaparas 等^[10]通过研究,指出在降雨条件下饱和渗透系数和降雨形式能够显著影响非饱和土坡的渗流形式. Rahardjo 等^[11]通过数值模拟,指出降雨条件下土体水力参数和降雨强度是影响土坡稳定的主要因素,而初始水位和边坡几何形状为次要因素. Rahimi 等^[12]通过数值模拟,得到饱和渗透系数 k_s 对土质边坡稳定性有显著影响. Rahimi 等^[13]研究了前期降雨对高渗透率和低渗透率土坡稳定性的影响,指出前期降雨对高渗透率土坡比低渗透率土坡的影响更显著. 文献^[14-16]采用修正的 Green-Ampt 模型分析了不同倾角条件下非饱和土质边坡的稳定性,指出斜坡安全系数降低的速率随着降雨强度和斜坡坡度的增加而增加.

以上学者均对降雨滑坡稳定性影响因素进行了研究,但是,研究重点较少涉及浅层滑坡. 而浅层滑坡是我国主要的滑坡灾害形式之一,因此,有必要对浅层滑坡开展进一步的研究. 本文首先基于笔者^[17]提出的无限长斜坡降雨入渗解析解并结合 Fredlund 等^[18]提出的非饱和土抗剪强度理论,得到了一个降雨诱发浅层滑坡的安全系数解析表达式,然后对浅层滑坡的多种影响因素进行了全面分析.

1 降雨诱发浅层滑坡安全系数解析解

图 1 为降雨诱发浅层滑坡的计算模型,其中, H 为地下水埋深, H_w 为滑面深度, u_a 为孔隙气压力, 设边坡土体与大气是连通的, 则 $u_a = 0$, u_w 为孔隙

水压力, τ_m 为总剪切应力, σ_n 为滑面上总的法向应力, $\sigma_n = \gamma_t z_w \cos^2 \gamma$, γ_t 为土体重度, γ 为滑坡倾角, z_w 为地面与滑面间的竖向距离. 取单位计算长度的土条如图 1 所示,并结合 Fredlund 非饱和土抗剪强度理论,可得浅层滑坡的安全系数

$$F_s = \frac{\tan \varphi'}{\tan \gamma} + \frac{c'}{\gamma_t H_w \sin \gamma \cos \gamma} - \tan \varphi^b \frac{u_w}{\gamma_t H_w \sin \gamma \cos \gamma} \quad (1)$$

式中: φ' 为有效内摩擦角; c' 为有效黏聚力; φ^b 为与基质吸力相关的摩擦角.

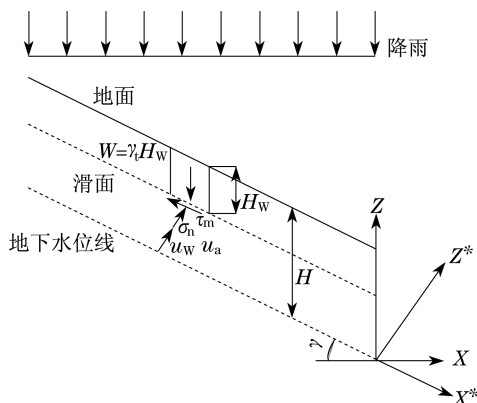


图 1 浅层滑坡计算简图

Fig.1 Schematic diagram of the shallow landslide calculation

式(1)可进一步写为

$$F_s = \frac{\tan \varphi'}{\tan \gamma} + \frac{2c'}{\gamma_t H_w \sin (2\gamma)} - \frac{2\gamma_w \tan \varphi^b h}{\gamma_t H_w \sin (2\gamma)} \quad (2)$$

式中: γ_w 为水的重度; h 为对应于滑面深度 H_w 处的压力水头.

式(2)中的压力水头可根据笔者前期得到的无限长斜坡降雨入渗解析解^[17]确定,该解析解为前期降雨强度 q_a (m/h), 后期降雨强度 q_b (m/h), 减饱和系数 α , 饱和渗透系数 k_s (m/h), 土体储水能力 $\theta_s - \theta_r$, 边坡倾角 γ ($^\circ$) 的函数, 地下水位埋深 H (m), 其具体公式和推导过程可参看文献^[17].

2 降雨入渗对边坡浅层稳定性的影响途径分析

从式(2)可以看出,降雨诱发浅层滑坡的安全系数由 3 部分组成:第 1 部分为 $F_{s1} = \tan \varphi' / \tan \gamma$, 该部分主要与土体的有效内摩擦角和边坡的坡度有关;第 2 部分为 $F_{s2} = 2c' / (\gamma_t H_w \sin (2\gamma))$, 该部分

主要与土体的有效粘聚力及土体的重度有关;第 3 部分为 $F_{s_3} = -2\gamma_w \tan \varphi^b h / (\gamma_t H_w \sin(2\gamma))$, 该部分主要与土体中的孔隙水压力及土体的重度有关,非饱和土中的孔隙水压力往往为负值(基质吸力),因此,该部分也可看作与非饱和土基质吸力及土体的重度有关。

从以上对安全系数组成部分的分析可以看出,降雨可以通过以下 3 个途径来对边坡浅层稳定性产生影响:

a. 降雨通过物理、化学作用导致土体的抗剪强度参数(有效内摩擦角及有效粘聚力)改变,从而对式(2)中安全系数的第 1 部分及第 2 部分产生影响,从而影响边坡的浅层稳定性。

b. 在整个降雨过程中,雨水将不断进入土体,导致土体重度 γ_t 的改变;从而对式(2)中安全系数的第 2 部分及第 3 部分产生影响,从而影响边坡的浅层稳定性。

c. 降雨入渗将会改变非饱和土中的基质吸力,从而对式(2)中安全系数的第 3 部分产生影响,进而影响边坡的浅层稳定性。

综合上述分析,可将降雨影响边坡浅层稳定性的主要途径归纳为以下 4 个方面:有效内摩擦角 φ' 减小;有效粘聚力 c' 下降;土体重度 γ_t 增大;基质吸力降低。以下将结合文献[19]的算例中的土体参数,根据边坡浅层滑动的安全系数解析表达式(2),对边坡稳定性的影响程度进行分析。计算时假定地下水位深度为 5 m,边坡坡角为 70° ,与基质吸力相关的内摩擦角为 20° ,其他参数如表 1 所示。

表 1 计算参数

Tab.1 Calculation parameters

状态	体积含水率	土体重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/ ($^\circ$)	有效粘聚力/ kPa	基质吸力(深度 1 m)/kPa
初始	0.28	19.0	29	10	-30
饱和	0.42	20.4	27	5	0

在降雨过程中,随着雨水入渗,土体的含水率将不断增加,最后趋于饱和状态。从表 1 可以看出,当土体从初始状态变化到饱和状态时,土体重度、内摩擦角、有效粘聚力及基质吸力都会发生相应的改变。因此,需要单独考察在此过程中每一种改变对滑面深度为 1 m 处的安全系数的影响。为了简化分析过程,主要考察以下两种状态:降雨前,土体处于初始状态;降雨后,深度为 1 m 以上的土体处于饱和状态。

降雨前,根据表 1 中的参数,可以得到滑面深度

为 1 m 处的安全系数为 3.627;降雨后,可以得到滑面深度为 1 m 处的安全系数为 0.948;由此可以看出,降雨造成安全系数的大幅下降,下降幅度达 73.86%。以下将单独考虑降雨引起某一种因素变化而其他因素不变时,该滑面处安全系数的变化情况。

单独考虑降雨引起土体重度增加而其他因素不变时,可以得到降雨后滑面深度为 1 m 处的安全系数为 3.392,比降雨前下降了 6.48%。

单独考虑降雨引起内摩擦角减小而其他因素不变时,可以得到降雨后滑面深度为 1 m 处的安全系数为 3.611,比降雨前下降了 0.45%。

单独考虑降雨引起有效粘聚力减小而其他因素不变时,可以得到降雨后滑面深度为 1 m 处的安全系数为 2.809,,比降雨前下降了 22.57%。

单独考虑降雨引起基质吸力减小而其他因素不变时,可以得到降雨后滑面深度为 1 m 处的安全系数为 1.839,比降雨前下降了 49.29%。

如果将 4 种单独作用的影响结果总和记为 100%,则由基质吸力减小造成的影响所占比率为 63%;有效粘聚力减小造成的影响所占比率为 28%;重度增加造成的影响所占比率为 8%;内摩擦角减小造成的影响所占比率为 1%。由此可见,基质吸力的减小是构成降雨入渗影响边坡稳定的主要途径。但需要指出的是,降雨对边坡稳定性的影响是这 4 种因素共同作用的结果,而不是这 4 种因素单独影响结果的线性叠加。

综上所述, φ' , γ_t 在降雨过程中的变化范围相对较小,降雨通过改变 φ' , γ_t 的值而影响边坡稳定的比重也较小。而基质吸力的减小则是降雨诱发滑坡的主要途径,这一点与 Fredlund^[18]得到的结论是一致的,这也正是许多学者强调基质吸力在非饱和土边坡稳定性分析中的重要性的原因^[20]。

3 降雨诱发浅层滑坡影响因素的解析分析

从前面的分析可以看出来,基质吸力减小直至消失是降雨诱发浅层滑坡的主要途径。因此,要对降雨诱发浅层滑坡的影响因素进行研究,首先是要找到降雨条件下边坡上层基质吸力的影响因素。降雨条件下,非饱和土中的基质吸力受到许多内部和外部因素的影响。其中,内因主要包括土体自身的水力特性及边坡几何特性,如土体的减饱和系数、饱和渗

透系数、土体储水能力和边坡坡角;外因主要包括当地的气候条件及地下水情况,如前期降雨、后期降雨强度及持续时间、地下水位的埋藏深度.现就这些因素对基质吸力的影响进行分析,进而对边坡浅层稳定性的影响进行研究.

3.1 减饱和系数 α 的影响

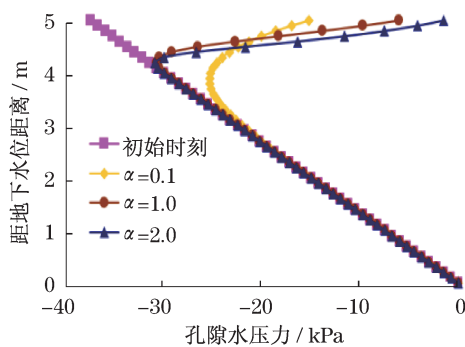
选取一坡度为 30° 的边坡,地下水位埋深为 5 m,在前期降雨强度 $q_a = 0$ 的情况下,形成初始状态;然后在后期降雨强度 $q_b = 1.08 \times 10^{-2}$ m/h 的情况下,连续降雨 21 h. 土体的饱和渗透系数 $k_s = 3.6 \times 10^{-3}$ m/h,土体的储水能力 $\theta_s - \theta_r = 0.3$,土体重度 $\gamma_t = 19$ kN/m³,内摩擦角 $\varphi' = 29^\circ$,与基质吸力相关的摩擦角 $\varphi^b = 20^\circ$,有效粘聚力 $c' = 3$ kPa. 现分别对减饱和系数为 $\alpha = 0.1, 1.0, 2.0$ 情况下的孔隙水压力分布情况及不同深度滑面处安全系数随降雨时间的变化情况进行分析.

图 2 给出了 3 种不同减饱和系数 ($\alpha = 0.1, 1.0, 2.0$) 情况下,降雨 3 h 及 21 h 后的孔隙水压力分布情况.从图 2(a)中可以看出,初始时刻对应于各减饱和系数 α 的孔隙水压是相同的.当降雨 3 h 后,减饱和系数 α 越小,则湿润锋的发展深度就越深.并且不同减饱和系数得到的水压分布曲线是相

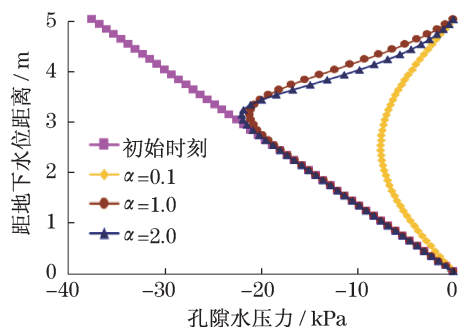
交的,在交点上方,减饱和系数 α 越小,则负的孔隙水压力(基质吸力)越大;在交点下方,情况刚好相反,减饱和系数 α 越小,则负的孔隙水压力越小.

从图 2(b)中可以看出,当降雨 21 h 后,随着减饱和系数 α 的减小,则湿润锋的发展深度将加深,这一点与降雨 3 h 后的情况是一致的.从孔隙水压力情况来看,在降雨 21 h 后,仍得到与降雨 3 h 后相似的结论, $\alpha = 1$ 与 $\alpha = 2$ 的水压分布曲线是相交的,且在交点上方, α 越小,基质吸力越大;在交点下方, α 越小,基质吸力越小.但与降雨 3 h 相比,降雨 21 h 后,3 种不同减饱和系数得到的孔隙水压力在边坡表层将更加趋于一致.

图 3 给出了 3 种不同减饱和系数 ($\alpha = 0.1, 1.0, 2.0$) 情况下,滑面深度为 0.3 m 及 1.5 m 处安全系数随降雨时间的变化情况.从图 3(a)中可以看出,随着降雨时间的增长,安全系数将不断降低.由不同减饱和系数得到的安全系数随降雨时间变化曲线是相交的,当降雨时间小于交点时间时,减饱和系数 α 越小,则得到的安全系数越大;当降雨时间大于交点时间时,情况刚好相反,减饱和系数 α 越小,则得到的安全系数越小.并且在降雨初始时刻,减饱和系数对安全系数的影响较大,随着降雨时间的增



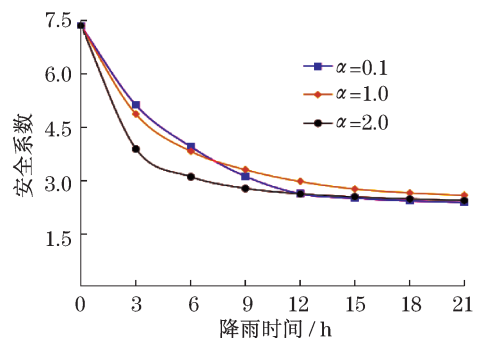
(a) 降雨3 h后



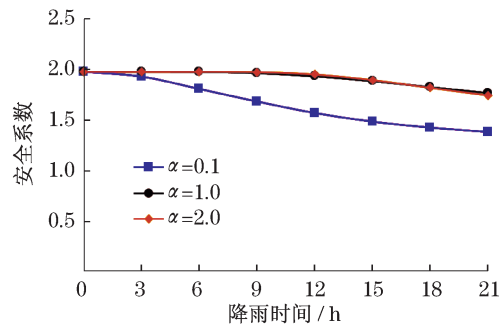
(b) 降雨21 h后

图 2 不同减饱和系数下斜坡内孔隙水压力分布

Fig. 2 Pore water pressure distribution in the slope under different reduced saturation coefficients



(a) 滑面深度为0.3 m处



(b) 滑面深度为1.5 m处

图 3 不同减饱和系数下安全系数随降雨时间变化

Fig. 3 Variation of the safety factor with rainfall time under different reduced saturation coefficients

长,减饱和系数对其影响将变小.这主要是因为选取的滑面深度为 0.3 m,相对较浅,处于边坡的表层.减饱和系数 α 越小,在初始降雨时刻边坡表层的负孔隙水压力就越大(如图 2 所示),因此,得到的安全系数相应也较大.随着降雨时间的增长,3 种不同减饱和系数得到的孔隙水压力在边坡表层将更加趋于一致(如图 2(b)所示),因此,减饱和系数对安全系数的影响也将相应变小.

从图 3(b)中可以看出,随着降雨时间的增长,安全系数将不断降低.在减饱和系数 $\alpha = 0.1$ 的情况下,安全系数随降雨时间的增长而减小的幅度较大,而在减饱和系数 $\alpha = 1, \alpha = 2$ 的情况下,安全系数随降雨时间的增长而降低的幅度并不大.这一点可以通过前面对降雨入渗深度的研究结果来加以解释:减饱和系数越小,则对应于某一降雨时间的湿润锋的发展深度越深,因此,在 $\alpha = 0.1$ 情况下的湿润锋将先于其他两种情况到达 1.5 m 深度处,进而对该处的安全系数产生影响.这里选取的滑面深度为 1.5 m,相对较深,因此,在 $\alpha = 1$ 与 $\alpha = 2$ 情况下,湿润锋需要更长的降雨时间才能到达该深度处,所以,安全系数的变化幅度较小.

3.2 土体饱和和渗透系数 k_s 的影响

选取一坡度为 30° 的边坡,地下水位埋深为 5 m,在前期降雨强度 $q_a = 0$ 的情况下,形成初始状态;然后在后期降雨强度 $q_b = 1.08 \times 10^{-3}$ m/h 的情况下,连续降雨 21 h.土体的减饱和系数为 $\alpha = 0.5$,土体的储水能力 $\theta_s - \theta_r = 0.3$,土体重度 $\gamma_t = 19$ kN/m³,内摩擦角 $\varphi' = 29^\circ$,与基质吸力相关的摩擦角 $\varphi^b = 20^\circ$,有效粘聚力 $c' = 3$ kPa.现分别对土体饱和和渗透系数为 $k_s = 3.6 \times 10^{-4}, 3.6 \times 10^{-3}, 3.6 \times 10^{-2}$ m/h 情况下的孔隙水压力分布情况及不同滑面深度处安全系数随降雨时间的变化情况进行分析.

图 4 给出了 3 种不同饱和渗透系数($k_s = 3.6 \times 10^{-4}, 3.6 \times 10^{-3}, 3.6 \times 10^{-2}$ m/h)情况下,在降雨时间 $t = 21$ h 的孔隙水压力分布情况.从图 4 可以看出,初始时刻对应于各饱和渗透系数的孔隙水压是相同的.当降雨 21 h 后,土体饱和和渗透系数越大,则湿润锋的发展深度就越深;而土体饱和和渗透系数越小,则边坡表层的负孔隙水压力减小就越大,边坡表层更易达到饱和状态.这主要是因为当土体饱和和渗透系数较大时,雨水较易下渗,因此,经过相同的降雨时间后,其湿润锋发展深度较深;而当土体饱和和

透系数较小时,雨水较难下渗,大量雨水将聚集于边坡表层,从而造成边坡表层的负孔隙水压力大幅减小,直至达到饱和状态.

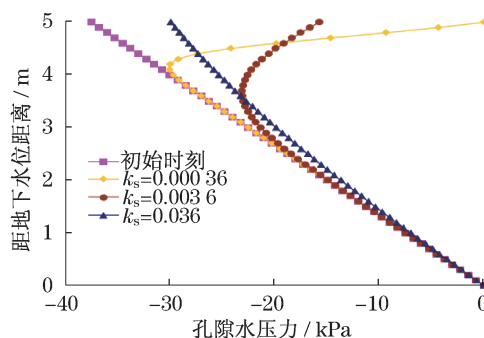


图 4 降雨 21 h 斜坡内孔隙水压力分布(1)

Fig.4 Pore water pressure distribution in the slope after 21 h of rainfall (1)

通过比较初始时刻水压分布曲线与不同饱和渗透系数情况下的水压分布曲线之间的面积可以看出,当 $k_s = 3.6 \times 10^{-3}$ m/h 时的面积是最大的.这也即是说明,在这 3 种饱和和渗透系数情况下,当 $k_s = 3.6 \times 10^{-3}$ m/h 时,负孔隙水压力总的减小量是最大的,此时的 k_s 既不是三者中的最大值亦不是三者中的最小值,这主要是因为,当 k_s 较大时,由于下渗比较容易,所以,入渗的雨水能够很快从土体下部排出;而当 k_s 较小时,由于下渗比较困难,所以,大部分雨水积聚于边坡的表层,降雨进行一段时间后,会使边坡表层出现积水,并沿着坡面流走.因此,在 k_s 较大或较小时,一部分雨水将从边坡的下部或上部流走,坡体内积聚的雨水就会相对较小,从而使负孔隙水压力总的减少量也会较小.

图 5 (见下页)给出了 3 种不同饱和渗透系数($k_s = 3.6 \times 10^{-4}, 3.6 \times 10^{-3}, 3.6 \times 10^{-2}$ m/h)情况下,滑面深度为 1 m 处安全系数随降雨时间的变化情况.从图 5 中可以看出,随着降雨时间的增长,安全系数将不断降低.在降雨的初始时刻,饱和渗透系数越大,滑面深度为 1 m 处的安全系数下降越多;而在降雨持续一段时间以后,土体饱和和渗透系数等于降雨强度的情况下,滑面深度为 1 m 处的安全系数下降最多.这一点可以通过前面的研究结果来加以解释:当土体饱和和渗透系数越大时,则对应于某一降雨时间的湿润锋的发展深度越深,因此,土体饱和和渗透系数越大,则湿润锋就越早到达 1 m 深度处,所以,在降雨的初期,饱和渗透系数越大,滑面深度为 1 m 处的安全系数下降越多.随着降雨的进行,当

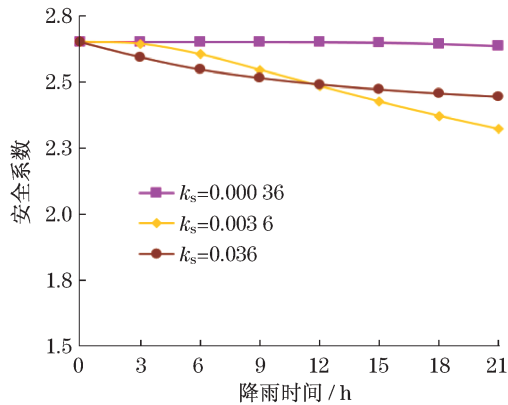


图5 安全系数随降雨时间变化图(1)

Fig.5 Variation of the safety factor with rainfall time (1)

$k_s = 3.6 \times 10^{-3}$ m/h 时(土体饱和渗透系数等于降雨强度),负孔隙水压力总的减小量是3种情况中最大的,因此,降雨持续一段时间后,该情况下的滑面深度为1 m处的安全系数下降最多。

3.3 土体储水能力 $\theta_s - \theta_r$ 的影响

选取一坡度为 30° 的边坡,地下水位埋深为5 m,在前期降雨强度 $q_a = 0$ 的情况下,形成初始状态;然后在后期降雨强度 $q_b = 1.08 \times 10^{-2}$ m/h 的情况下,连续降雨21 h。土体的饱和渗透系数 $k_s = 3.6 \times 10^{-3}$ m/h,土体的减饱和系数为 $\alpha = 0.5$,土体重度 $\gamma_t = 19$ kN/m³,内摩擦角 $\varphi' = 29^\circ$,与基质吸力相关的摩擦角 $\varphi^b = 20^\circ$,有效粘聚力 $c' = 3$ kPa。现分别对土体储水能力为 $\theta_s - \theta_r = 0.2, 0.3, 0.4$ 情况下的孔隙水压力分布情况及不同滑面深度处安全系数随降雨时间的变化情况进行分析。

图6给出了3种不同土体储水能力($\theta_s - \theta_r = 0.2, 0.3, 0.4$)情况下,在降雨时间 $t = 21$ h 的孔隙水压力分布情况。从图6可以看出,初始时刻对应于各土体储水能力的孔隙水压是相同的。当降雨21 h后,土体储水能力越大,则湿润锋的发展深度就越浅;而土体储水能力越小,则边坡中负孔隙水压力减小就越大。但总的来说,不同土体储水能力所得到的孔隙水压力剖面的形状基本上是一致的。

图7给出了3种不同土体储水能力($\theta_s - \theta_r = 0.2, 0.3, 0.4$)情况下,滑面深度为1 m处安全系数随降雨时间的变化情况。从图7中可以看出,随着降雨时间的增长,安全系数将不断降低。在整个降雨过程中,土体储水能力越小,则在同一降雨时间,安全系数降低越多。这一点与前面对孔隙水压力的研究结论是一致的,土体储水能力越小,则负孔隙水压力的减小就越大,所以,造成安全系数的降低就越多。

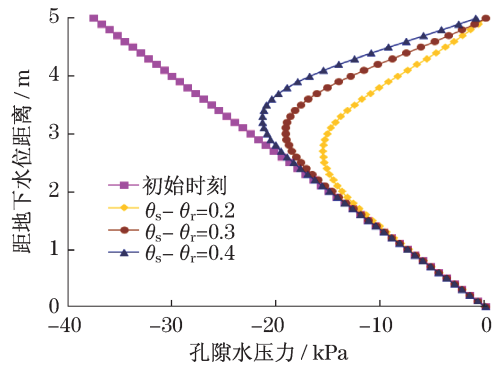


图6 降雨21 h 斜坡内孔隙水压力分布(2)

Fig.6 Pore water pressure distribution in the slope after 21 h of rainfall (2)

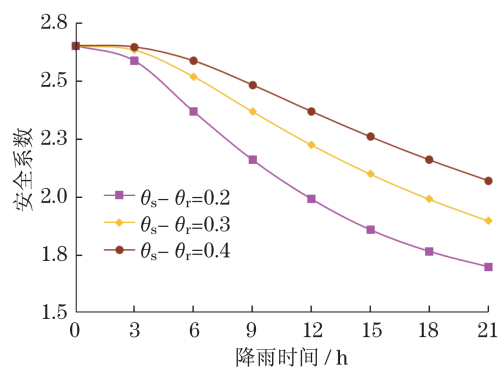


图7 安全系数随降雨时间变化图(2)

Fig.7 Variation of the safety factor with rainfall time (2)

3.4 前期降雨强度 q_a 的影响

选取一坡度为 30° 的边坡,地下水位埋深为5 m,分别在前期降雨强度 $q_a = 0, 3.6 \times 10^{-4}, 7.2 \times 10^{-4}$ m/h 的情况下,形成初始状态;然后在后期降雨强度 $q_b = 1.08 \times 10^{-2}$ m/h 的情况下,连续降雨21 h。土体的饱和渗透系数为 $k_s = 3.6 \times 10^{-3}$ m/h,土体的减饱和系数为 $\alpha = 0.5$,土体的储水能力 $\theta_s - \theta_r = 0.3$,土体重度 $\gamma_t = 19$ kN/m³,内摩擦角 $\varphi' = 29^\circ$,与基质吸力相关的摩擦角 $\varphi^b = 20^\circ$,有效粘聚力 $c' = 3$ kPa。现分别对这3种初始状态下经过后期降雨得到的孔隙水压力分布情况及不同滑面深度处安全系数随降雨时间的变化情况进行分析。

图8给出了3种不同前期降雨强度($q_a = 0, 3.6 \times 10^{-4}, 7.2 \times 10^{-4}$ m/h)情况下,初始时刻的孔隙水压力分布情况。从图8可以看出,前期降雨强度对初始斜坡内孔隙水压力分布具有较大影响,前期降雨强度越强,则负孔隙水压力就越小。

图9给出了3种不同前期降雨强度($q_a = 0, 3.6 \times 10^{-4}, 7.2 \times 10^{-4}$ m/h)情况下,在降雨时间 $t =$

21 h 的孔隙水压力分布情况.从图 9 可以看出,前期降雨强度越大,则在降雨 21 h 后,得到的负孔隙水压力就越小.在相同的后期降雨强度降雨 21 h 后,在边坡表层,比较 3 种不同的前期降雨强度情况下,初始时刻与降雨 21 h 后水压分布曲线之间的面积,可以看出:前期降雨强度越大,则面积越小,即前期降雨强度越大,边坡表层的负的孔隙水压的变化幅度越小.这主要是因为,当前期降雨强度较大时,在初始时刻得到的负孔隙水压力较小,而较小

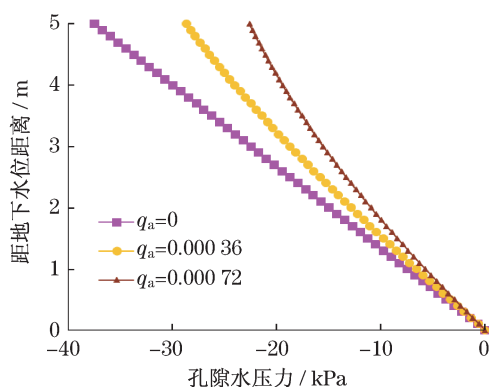


图 8 初始时刻斜坡内孔隙水压力分布(1)

Fig.8 Distribution of pore water pressure in the slope before rainfall (1)

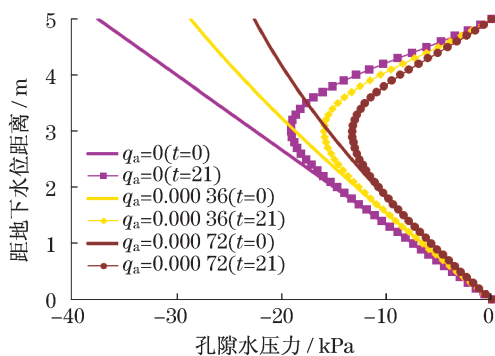


图 9 降雨 21 h 斜坡内孔隙水压力分布(3)

Fig.9 Pore water pressure distribution after 21 h of rainfall (3)

的负孔隙水压力对应于较大的土体渗透系数,此时雨水较易下渗并排出,因此,边坡表层的负孔隙水压力的变化幅度较小.由此可以看出,前期降雨不仅影响初始时刻的孔隙水压力和含水率分布,而且还影响着土体的渗透系数,从而影响以后的降雨入渗过程.

图 10 给出了 3 种不同前期降雨强度($q_a = 0, 3.6 \times 10^{-4}, 7.2 \times 10^{-4}$ m/h)情况下,滑面深度为 1 m 处安全系数随降雨时间的变化情况.从图 10 中可以

看出,随着降雨时间的增长,安全系数将不断降低.前期降雨强度越大,不论是在初始时刻还是在随后的降雨过程中,其安全系数就越大;但从安全系数下降的幅度来看,当前期降雨强度越小时,其安全系数随降雨时间而降低的幅度就越大.这一点可以用前面对孔隙水压力的研究结果来加以解释:当前期降雨强度越小时,初始时刻得到的负孔隙水压力较大,因而土体的渗透系数较小,不利于雨水的下渗,雨水将更易在边坡浅层聚集,从而使边坡浅层的安全系数随降雨时间的增长而降低的幅度较大.

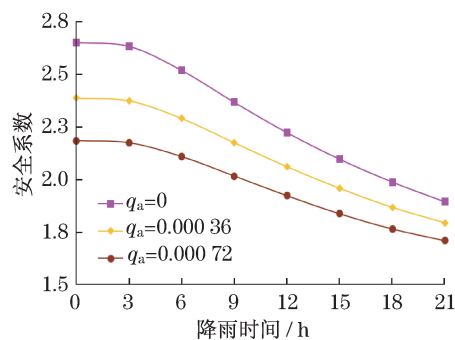


图 10 安全系数随降雨时间变化图(3)

Fig.10 Variation of the safety factor with rainfall time (3)

3.5 后期降雨强度 q_b 的影响

选取一坡度为 30° 的边坡,地下水位埋深为 5 m,在前期降雨强度 $q_a = 0$ 的情况下,形成初始状态.土体的饱和渗透系数 $k_s = 3.6 \times 10^{-3}$ m/h,土体储水能力为 $\theta_s - \theta_r = 0.3$,土体的减饱和系数为 $\alpha = 0.5$,土体重度 $\gamma_t = 19$ kN/m³,内摩擦角 $\varphi' = 29^\circ$,与基质吸力相关的摩擦角 $\varphi^b = 20^\circ$,有效粘聚力 $c' = 3$ kPa.现分别对降雨强度 $q_b = 3.6 \times 10^{-4}, 3.6 \times 10^{-3}, 3.6 \times 10^{-2}$ m/h 的情况下,连续降雨 21 h 后的孔隙水压力分布情况及不同滑面深度处安全系数随降雨时间的变化情况进行分析.

图 11(见下页)给出了 3 种不同后期降雨强度($q_b = 3.6 \times 10^{-4}, 3.6 \times 10^{-3}, 3.6 \times 10^{-2}$ m/h)情况下,在降雨时间 $t = 21$ h 的孔隙水压力分布情况.从图 11 可以看出,降雨强度越大,则在相同的降雨时间下,湿润锋发展的深度就越深,负孔隙水压力的减小就越大.这主要是因为,在相同的降雨时间下,降雨强度越大,则进入土体的水分越多,因此其湿润锋发展的深度就会越深,负孔隙水压力的减少也就越大.

图 12(见下页)给出了 3 种不同后期降雨强度($q_b = 3.6 \times 10^{-4}, 3.6 \times 10^{-3}, 3.6 \times 10^{-2}$ m/h)情况

下,滑面深度为1 m处安全系数随降雨时间的变化情况.从图12中可以看出,随着降雨时间的增长,安全系数将不断降低.后期降雨强度越大,则在相同的降雨时间下,其安全系数就越小;但从安全系数下降的幅度来看,后期降雨强度越大,其安全系数随降雨时间而降低的幅度就越大.这是因为降雨强度越大,在相同降雨时间内,进入土体的雨量就越多,因此,其安全系数就越小;同时湿润锋发展的深度也越深,这也表明降雨强度越强,湿润锋就越早到达1 m滑面深度处,并对其安全系数产生影响,因此,其安全系数随降雨时间降低的幅度就越大.

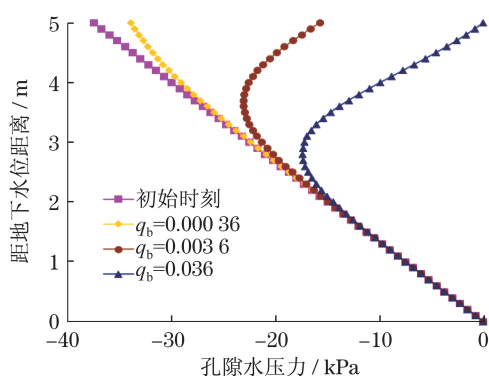


图11 降雨21 h斜坡内孔隙水压力分布(4)

Fig.11 Pore water pressure distribution in the slope after 21 h of rainfall (4)

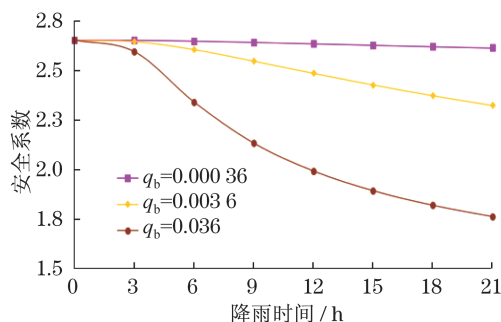


图12 安全系数随降雨时间变化图(4)

Fig.12 Variation of the safety factor with rainfall time (4)

3.6 边坡倾角 γ 的影响

设边坡的地下水位埋深为5 m,在前期降雨强度 $q_a = 0$ 的情况下,形成初始状态;然后在后期降雨强度 $q_b = 1.08 \times 10^{-2}$ m/h 的情况下,连续降雨21 h.土体的饱和渗透系数 $k_s = 3.6 \times 10^{-3}$ m/h,土体储水能力为 $\theta_s - \theta_r = 0.3$,土体的减饱和系数为 $\alpha = 0.5$,土体重度 $\gamma_t = 19$ kN/m³,内摩擦角 $\varphi' = 29^\circ$,与基质吸力相关的摩擦角 $\varphi^b = 20^\circ$,有效粘聚力 $c' = 3$ kPa.现分别对边坡倾角 $\gamma = 30, 45, 60^\circ$ 的

情况下的孔隙水压力分布情况及不同滑面深度处安全系数随降雨时间的变化情况进行分析.

图13给出了3种不同边坡倾角($\gamma = 30, 45, 60^\circ$)情况下,初始时刻的孔隙水压力分布情况.从图13可以看出,边坡倾角对初始斜坡内孔隙水压力分布具有较大影响,边坡倾角越大,则负孔隙水压力就越小.

图14给出了3种不同边坡倾角($\gamma = 30, 45, 60^\circ$)情况下,在降雨时间 $t = 21$ h 的孔隙水压力分布情况.从图14可以看出,边坡倾角越大,则在降雨21 h后,得到的负孔隙水压力就越小,湿润锋发展的深度

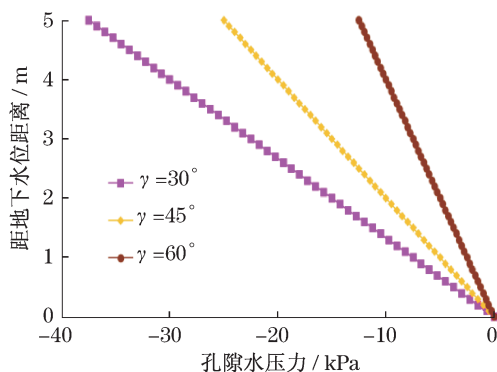


图13 初始时刻斜坡内孔隙水压力分布(2)

Fig.13 Pore water pressure distribution in the slope before rainfall (2)

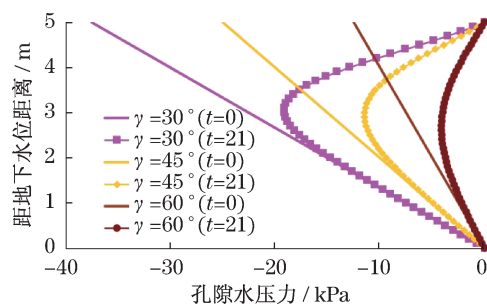


图14 降雨21 h斜坡内孔隙水压力分布(5)

Fig.14 Pore water pressure distribution in the slope after 21 h of rainfall (5)

就越深.在边坡表层,比较3种不同的边坡倾角情况下,初始时刻与降雨21 h后水压分布曲线之间的面积,可以看出:边坡倾角越大,则面积越小,即边坡倾角越大,边坡表层的负孔隙水压的变化幅度越小.这主要是因为,当边坡倾角较大时,在初始时刻得到的负孔隙水压力较小,而较小的负孔隙水压力对应于较大的土体渗透系数,此时雨水较易下渗并排出,因此,湿润锋发展的深度就越深,边坡表层的负孔隙水压力的变化幅度较小.由此可以看出,边坡倾角不仅

影响初始时刻的孔隙水压力和含水率分布,而且还影响着土体的渗透系数,从而影响以后的降雨入渗过程.

图 15 给出了 3 种不同边坡倾角($\gamma = 30, 45, 60^\circ$)情况下,滑面深度为 1 m 处安全系数随降雨时间的变化情况.从图 15 中可以看出,随着降雨时间的增长,安全系数将不断降低,这里的安全系数变化由两部分组成,一部分为边坡倾角的不同造成的,另外一部分是由孔隙水压力的变化造成的.边坡倾角越大,不论是在初始时刻还是在随后的降雨过程中,其安全系数就越小;但从安全系数下降的幅度来看,边坡倾角越小,其安全系数随降雨时间的增长而降低的幅度就越大.这与吕特等^[16]通过修正 G-A 模型对不同倾角条件下降雨边坡稳定性的研究所得的结论是一致的,这也很好地佐证了本文研究成果的正确性.

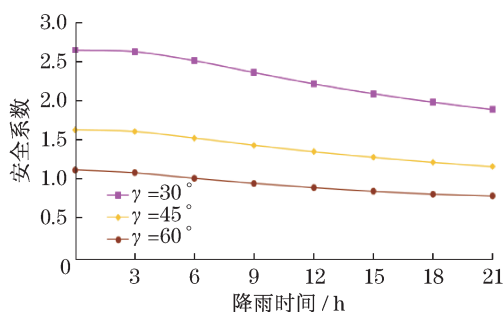


图 15 安全系数随降雨时间变化图(5)

Fig.15 Variation of the safety factor with rainfall time (5)

3.7 地下水位埋深的影响

选取一边坡倾角为 30° 的边坡,在前期降雨强度 $q_a = 0$ 的情况下,形成初始状态;然后在后期降雨强度 $q_b = 1.08 \times 10^{-2}$ m/h 的情况下,连续降雨 21 h.土体的饱和渗透系数 $k_s = 3.6 \times 10^{-3}$ m/h,土体储水能力为 $\theta_s - \theta_r = 0.3$,土体的减饱和系数为 $\alpha = 0.5$,土体重度 $\gamma_t = 19$ kN/m³,内摩擦角 $\varphi' = 29^\circ$,与基质吸力相关的摩擦角 $\varphi^b = 20^\circ$,有效粘聚力 $c' = 3$ kPa.现分别对地下水位埋深为 5,4,3 m 情况下的孔隙水压力分布情况及不同滑面深度处安全系数随降雨时间的变化情况进行分析.

图 16 给出了地下水位埋深分别为 5,4,3 m 情况下,初始时刻的孔隙水压力分布情况.从图 16 可以看出,不同的地下水埋深对初始时刻边坡表层的孔隙水压力分布具有较大影响,地下水位埋深越深,则边坡表层负的孔隙水压力就越大.

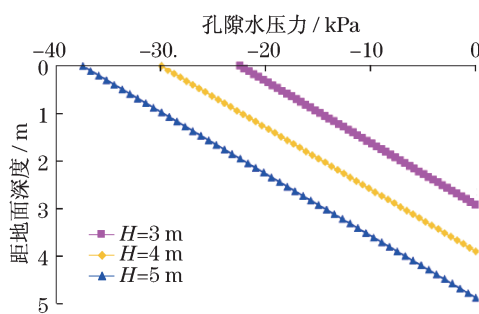


图 16 初始时刻斜坡内孔隙水压力分布(3)

Fig.16 Pore water pressure distribution in the slope before rainfall (3)

图 17 给出了地下水位埋深分别为 5,4,3 m 情况下,在降雨时间 $t = 21$ h 的孔隙水压力分布情况.

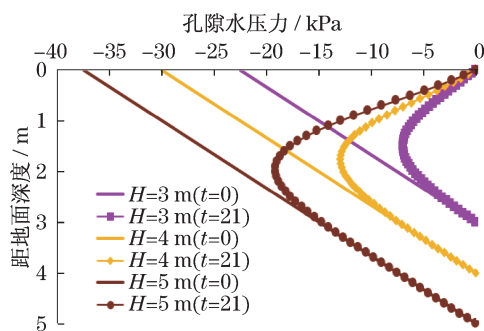


图 17 降雨 21 h 斜坡内孔隙水压力分布(6)

Fig.17 Pore water pressure distribution after 21 h of rainfall (6)

从图 17 可以看出,地下水位埋深越浅,则地下水位以上的土体在降雨 21 h 后得到的负孔隙水压力就越小.在边坡表层,比较 3 种不同的地下水位埋深情况下,初始时刻与降雨 21 h 后水压分布曲线之间的面积,可以看出:地下水位埋深越浅,则面积越小,即地下水位埋深越浅,边坡表层的负孔隙水压力的变化幅度越小.这主要是因为,当地下水位埋深较浅时,在初始时刻得到的负孔隙水压力较小,而较小的负孔隙水压力对应于较大的土体渗透系数,此时雨水较易下渗并排出,因此,边坡表层的负孔隙水压力的变化幅度较小.由此可以看出,地下水的位置不仅影响着初始时刻边坡表层土体的孔隙水压力分布,而且还影响着土体的渗透系数,从而影响以后的降雨入渗过程.

图 18 (见下页)给出了地下水位埋深分别为 5,4,3 m 情况下,滑面深度为 1 m 处安全系数随降雨时间的变化情况.从图 18 中可以看出,随着降

雨时间的增长,安全系数将不断降低.地下水位埋深越浅,不论是在初始时刻还是在随后的降雨过程中,其安全系数就越小;但从安全系数下降的幅度来看,地下水位埋深越深,其安全系数随降雨时间而降低的幅度就越大.

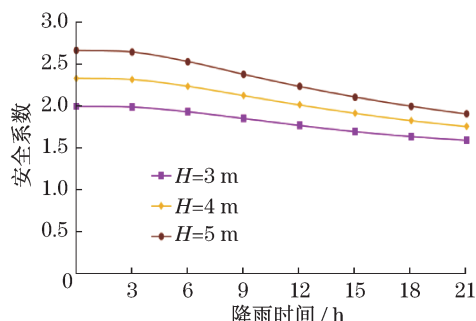


图 18 安全系数随降雨时间变化图(6)

Fig.18 Variation of the safety factor with rainfall time (6)

4 结 论

将笔者前期提出的无限长斜坡降雨入渗解析解结合非饱和土抗剪强度理论,提出了一个用于降雨诱发浅层滑坡安全系数计算的解析表达式,并利用该表达式对降雨诱发浅层滑坡的影响途径进行了研究,发现基质吸力减小直至消失是降雨诱发浅层滑坡的主要途径.然后对基质吸力的影响因素进行分析,并以若干滑面深度处的安全系数变化情况为例,对这些因素在边坡浅层稳定性方面的影响进行了研究,通过研究发现:

a. 减饱和系数 α 越小,越利于雨水入渗,因此,湿润锋的发展深度就越深;减饱和系数 α 越大,越不利于雨水的下渗,入渗的雨水将更多地集中于边坡表层,从而对边坡的浅层稳定性影响较大.随着降雨时间的增长,在不同减饱和系数下,边坡表层都将逐渐趋于饱和,因此,不同减饱和系数对边坡浅层稳定性的影响也将趋于一致.

b. 饱和渗透系数 k_s 越大,雨水越易下渗,因此,经过相同的降雨时间后,其湿润锋的发展深度就越深.当饱和渗透系数 k_s 较小时,由于下渗比较困难,因此,坡面易出现积水,并沿坡面流走,而当 k_s 较大时,由于下渗容易,所以,雨水能够很快汇入地下水,并流走.因此,这两种情况下,坡体内集聚的雨水都相对较小,基质吸力总的减小量也会较小,所

以,对边坡浅层稳定性的影响也较小.只有当土体饱和和渗透系数接近于降雨强度时,对边坡浅层稳定性的影响才较大.

c. 土体储水能力 $\theta_s - \theta_r$ 越大,其湿润锋向下推进的速度越慢,在相同的降雨时间下,湿润锋的发展深度也较浅;反之,土体储水能力越小,基质吸力变化越大,对边坡的浅层稳定性的影响也越大.

d. 前期降雨强度 q_a 越小,初始时刻在坡体内形成的基质吸力越大,不利于后续降雨中雨水的下渗,雨水将更易在边坡浅层聚集,从而对边坡浅层稳定性产生较大影响.

e. 后期降雨强度 q_b 越强,在相同的降雨时间下,进入土体的水分越多,因此,湿润锋的发展深度越深,基质吸力的减小也越大,从而对边坡浅层稳定性的影响也越大.

f. 边坡坡角越大,初始时刻基质吸力就越小,在降雨过程中雨水较易入渗,因此,湿润锋的发展深度越深;反之,边坡坡角越小,初始时刻基质吸力就越大,不利于雨水的下渗,雨水较易在边坡浅层聚集,所以,对边坡浅层稳定性的影响较大.

g. 地下水位越深,初始时刻得到的边坡表层的基质吸力越大,在降雨过程中不利于雨水下渗,雨水将更易在边坡浅层聚集,从而对边坡浅层稳定性产生较大影响.

参考文献:

- [1] 刘新喜,晏鄂川,王鹏飞,等. 滑坡稳定性评价的非线性方法[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(1): 34-36.
- [2] 曾铃,付宏渊,何忠明,等. 饱和-非饱和渗流条件下降雨对粗粒土路堤边坡稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3614-3620.
- [3] 吴俊杰,王成华,李广信. 非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 732-736.
- [4] 陈仁朋,尹鑫晟,汤旅军,等. 考虑渗流条件下开挖面失稳离心试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S1): 225-229.
- [5] 孙广忠. 中国典型滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [6] 田东方,郑宏,刘德富. 考虑径流影响的滑坡降雨入渗二维有限元模拟及应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1179-1186.
- [7] 唐栋,李典庆,周创兵,等. 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3239-3248.

- [8] RAHARDJO H, LI X W, TOLL D G, et al. The effect of antecedent rainfall on slope stability[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2001, 19(3/4): 371 - 399.
- [9] 张卫民, 陈兰云. 地下水位线对土坡稳定的影响分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(S2): 5319 - 5322.
- [10] TSAPARAS I, RAHARDJO H, TOLL D G, et al. Controlling parameters for rainfall-induced landslides[J]. *Computers and Geotechnics*, 2002, 29(1): 1 - 27.
- [11] RAHARDJO H, ONG T H, REZAUR R B, et al. Factors Controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133 (12): 1532 - 1543.
- [12] RAHIMI A, RAHARDJO H, LEONG E C. Effect of hydraulic properties of soil on rainfall-induced slope failure[J]. *Engineering Geology*, 2010, 114 (3/4): 135 - 143.
- [13] RAHIMI A, RAHARDJO H, LEONG E C. Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2011, 137 (5): 483 - 491.
- [14] 张洁, 吕特, 薛建峰, 等. 适用于斜坡降雨入渗分析的修正 Green-Ampt 模型[J]. *岩土力学*, 2016, 37(9): 2451 - 2457.
- [15] 吕特, 张洁, 薛建峰, 等. Green-Ampt 模型渗透系数取值方法研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(S1): 341 - 345.
- [16] 吕特, 张洁, 郑文棠, 等. 降雨条件下双层土斜坡稳定性的简化分析方法[J]. *南方能源建设*, 2015, 2(2): 119 - 123, 114.
- [17] 李宁, 许建聪. 无限长均质斜坡降雨入渗解析解[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(12): 2325 - 2330.
- [18] FREDLUND D G, RAHARDJO H. *Soil mechanics for unsaturated soils* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1993.
- [19] 李兆平, 张弥. 考虑降雨入渗影响的非饱和土边坡瞬态安全系数研究[J]. *土木工程学报*, 2001, 34(5): 57 - 61.
- [20] RAHARDJO H, LEE T T, LEONG E C, et al. Response of a residual soil slope to rainfall [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(2): 340 - 351.

(编辑: 石 瑛)