

DOI: 10.11779/CJGE2015S1029

不同前期降雨与土-水特征曲线对边坡稳定的影响

唐 栋^{1, 2}, 祁小辉^{1, 2}, 蒋水华^{1, 2}, 李典庆^{1, 2*}

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 以一均质边坡模型为例, 研究了在土-水特征曲线(SWCC)中当土体饱和渗透系数保持不变, 而其它参数变化情况下, 不同前期降雨类型对边坡稳定的影响。结果表明: 边坡稳定受土-水特征曲线参数不同程度的影响, 其中进气值 a 对边坡稳定的影响最大, n 值的影响相对较小。在不考虑主降雨情况下, 当 a 值较小时, 前期降雨主要引起边坡表层孔隙水压力的变化, 对边坡安全系数影响并不大; 当 a 值较大时, 前期降雨的影响范围增大, 甚至使地下水位抬升, 对边坡安全系数影响较大, 且后锋型前期降雨影响最大。考虑有主降雨情况下, 当 a 值较小时, 前期降雨类型对主降雨阶段边坡稳定几乎没有影响; 当 a 值较大时, 前期降雨类型将导致主降雨开始时刻孔隙水压力分布差异很大, 进而导致主降雨阶段边坡最小安全系数差别很大; n 值越大, 边坡孔隙水压力受到的影响越大, 从而导致主降雨阶段边坡最小安全系数也更小。

关键词: 前期降雨; 土-水特征曲线; 非饱和渗流; 边坡稳定

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)S1-0148-08

作者简介: 唐 栋(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程可靠度分析与风险控制方面的研究。E-mail: tangdong@whu.edu.cn。

Effect of different antecedent rainfalls and SWCCs on slope stability

TANG Dong^{1, 2}, QI Xiao-hui^{1, 2}, JIANG Shui-hua^{1, 2}, LI Dian-qing^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A homogeneous slope model is taken as an example to investigate the effect of antecedent rainfall patterns and soil-water characteristic curves (SWCC) on slope stability when the saturated permeability coefficient keeps constant, while other parameters vary. The results indicate that the slope stability is affected by soil-water characteristic curve (SWCC) parameters in varying degrees, and the air entry value a has the maximum influence on the slope stability, while n has relatively small influence. Without considering the major rainfall, when a is small, the antecedent rainfall only causes changes of pore water pressure in the shallow part of the slope and has little influence on the safety factor of the slope. While a is large, the depth influenced by antecedent rainfall increases, the water table even raises, thus the slope stability is influenced more. The effect of the antecedent rainfall patterns with a peak on slope stability is more significant than that of the average rainfall type, and the delayed antecedent rainfall influences the most. If the condition with the main rainfall is considered, the antecedent rainfall type will have little influence on the stability of slope when a is small, while it will cause the difference in distribution of pore water pressure at the beginning of the main rainfall when a is large, which further leads to the difference in the minimum factor safety during the main rainfall. The larger n is, the larger pore water pressure in the slope is influenced, and the smaller the lowest safety factor at the major rainfall stage.

Key words: antecedent rainfall; soil-water characteristic curve; unsaturated seepage; slope stability

0 引言

大量的边坡失稳实例表明, 降雨是触发滑坡、泥石流等地质灾害的主要诱因之一^[1]。而前期降雨(某一特定时间点, 如灾害发生时刻之前一段时间内的降雨^[2])与边坡稳定之间的关系也已得到了充分证实^[3-5]。这些研究通常选取不同饱和渗透系数和土-水特征曲

线的几种特定土体, 研究不同降雨-历时曲线的前期降雨类型对边坡稳定的影响。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51225903, 51329901); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2014CFA001)

收稿日期: 2015-03-26

*通讯作者

关于降雨对不同类型土体边坡的影响已经有很多研究, 通常根据土体的饱和渗透系数大小来划分土的类型。姚海林等^[6]、Rahardjo 等^[7]研究了当饱和渗透系数变化时降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定的影响。然而土的非饱和特性是由多个参数共同确定的, 即使在饱和渗透系数相同的情况下, 土体的非饱和特性仍然可以差别很大。除了研究饱和渗透系数外, 还应当考虑土-水特征曲线其它参数对土体非饱和特性的影响。Alonso 等^[8]的研究中考虑了降雨历时、降雨强度、土体类型、土-水特征曲线的形状和土的渗透性对边坡稳定的影响。Zhang 等^[9]研究了不同土-水特征曲线形状对边坡孔隙水压力分布的影响。Rahimi 等^[10]研究了土-水特征曲线参数变化对具有不同排水效果边坡稳定的影响。这些研究则相对比较详细, 综合考虑了影响土体非饱和特性的多方面因素。

本文以一均质边坡模型为例, 分析了在土-水特征曲线的 Fredlund-Xing 模型中当土体饱和渗透系数保持不变, 而其它土-水特征曲线参数变化的情况下, 不同前期降雨类型对边坡内孔隙水压力分布及边坡安全系数的影响。初步探索了不同前期降雨类型和土-水特征曲线形状对边坡稳定的影响, 为降雨诱发滑坡问题提供了一定的理论参考。

1 考虑前期降雨影响的边坡稳定性分析方法

1.1 非饱和渗流计算

非饱和渗流计算采用 GeoStudio 软件的 SEEP/W 模块来完成, 其渗流控制性方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = m_2^w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中 H 为总头; k_x , k_y 分别为 x , y 方向的渗透系数; Q 为施加的边界流量; γ_w 为水的重度; t 为时间; m_2^w 为土-水特征曲线的斜率。

土体的土-水特征曲线采用 Fredlund-Xing 模型, 其表达式为^[11]

$$\theta_w = \theta_s \left[\ln \left(e + \left(\frac{\phi}{a} \right)^n \right) \right]^{-m} \quad (2)$$

式中 a , n , m 为拟合参数, 其中 a 为进气值, 主要取决于孔隙的尺寸, 土颗粒粒径和孔隙尺寸越小, 则 a 越大; n 为当基质吸力超过土的进气值时土中流出率函数的土性参数, 与土的孔径分布相关, n 值越大, 反映了土的孔径分布越均匀^[12]; m 为残余含水量函数的土性参数, 与特征曲线的整体对称性相关; e 为自然对数; ϕ 为基质吸力; θ_w 为体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率。

渗透系数曲线采用如下表达式^[13]:

$$k_w = k_s \Theta^p \quad (3)$$

式中 k_w 为非饱和土的渗透系数; k_s 为饱和渗透系数; $\Theta = (\theta_w / \theta_s)$ 为体积含水量与饱和体积含水量比率; p 为渗透系数曲线中的拟合参数。

为研究土-水特征曲线形状对边坡稳定的影响, 选取土-水特征曲线参数中最重要的 a 和 n 作为变量, 并参照文献[9]选用了当 $n=2$ 时 a 分别为 10, 50, 200 kPa 以及当 $a=200$ kPa 时 n 分别为 1, 2, 3 共计 5 种 (其中一种重复) 土-水特征曲线和对应的渗透系数曲线 (图 1), 土体的饱和渗透系数保持为 10^{-5} m/s 不变。

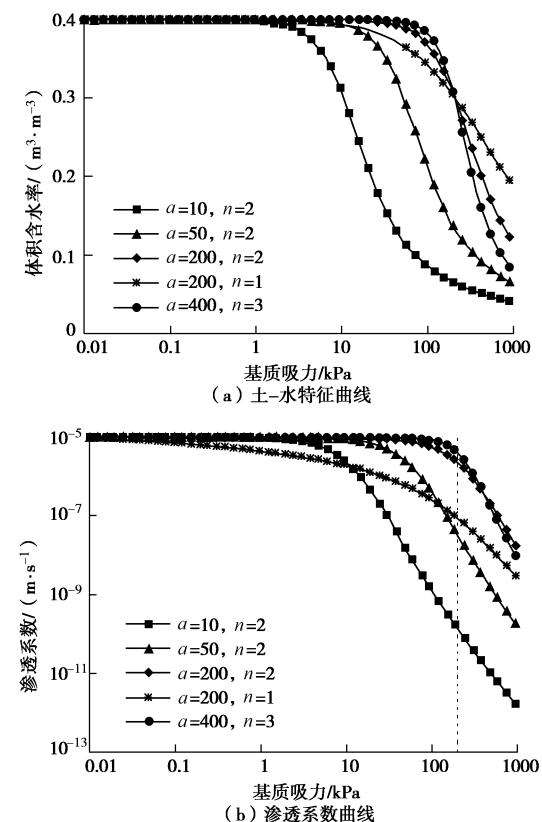


图 1 土-水特征曲线与渗透系数曲线

Fig. 1 Soil-water characteristic curves and curves of permeability coefficient

1.2 边坡稳定性计算

当利用SEEP/W模块完成非饱和渗流计算之后, 将孔隙水压力分布的结果导入SLOPE/W模块进行边坡稳定计算, 边坡稳定计算方法采用被广泛应用的简化Bishop法, 最危险滑动面由程序自动搜索确定。计算时采用Fredlund等^[14]提出的非饱和土抗剪强度公式:

$$\tau = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (4)$$

式中 τ 为非饱和土抗剪强度; c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; $\sigma_n - u_a$ 为净法向应力; $u_a - u_w$ 为基质吸力; φ^b 为基质吸力对抗剪强度的贡献所对应的摩

擦角。

为了研究土体中孔隙水压力对边坡稳定的影响, 假定在降雨过程中式(6)中土体抗剪强度参数保持不变, 参照文献[4], 相应的取值为 $c'=10 \text{ kPa}$, $\varphi'=26^\circ$, $\varphi^b=26^\circ$ 。此外, 土体重度 $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$ 。

1.3 计算模型及边界条件

本文以文献[9]中的均质边坡模型为例进行计算, 边坡几何尺寸、边界条件及网格划分如图2所示。渗流计算的边界条件如下: 上、下游水位以下为水头边界, 总水头分别为 60 m, 50 m; 上、下游水位以上和模型底部为隔水边界; 边坡顶部为入渗边界。计算模型的有限元网格剖分也在图中给出, 模型共有 10144 个节点和 10003 个单元。选取了边坡顶部 $X-X$ 和坡趾 $Y-Y$ 两个截面对坡内孔隙水压力分布进行观测。

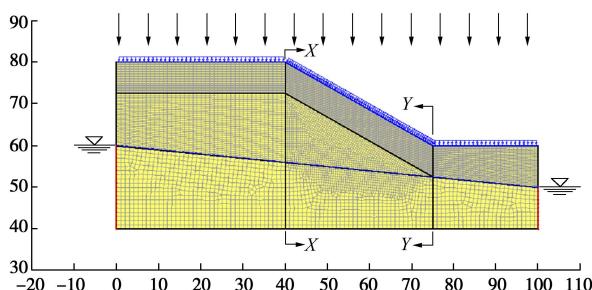


图 2 边坡网格剖分及边界条件

Fig. 2 Finite element mesh and boundary conditions of slope

1.4 前期降雨设计

Rahimi 等^[4]根据新加坡不同地区的降雨观测资料, 总结出了新加坡地区的前期降雨持续时间一般为 5 d, 降雨类型主要有 3 种, 即前峰型、中峰型、后峰型。当地的最大 5 d 前期降雨总量为 450 mm, 根据 3 种前期降雨类型中每个区间降雨的概率, 可以得到图 3 所示的典型前期降雨类型。为了对比分析, 本文还增加了均匀型前期降雨类型。根据文献[9], 非饱和渗流计算土体初始孔隙水压力分布取静水平衡状态下的压力分布。为分析前期降雨对边坡稳定的持续影响, 非饱和渗流的计算时间设为 10 d, 后 5 d 无降雨。与文献[4]相同, 本文还计算了在前期降雨结束之后考虑主降雨的情况, 即在第 120 h 之后增加一场持续 8 h, 总降雨量为 180 mm 且在时间上均匀分布的主降雨。

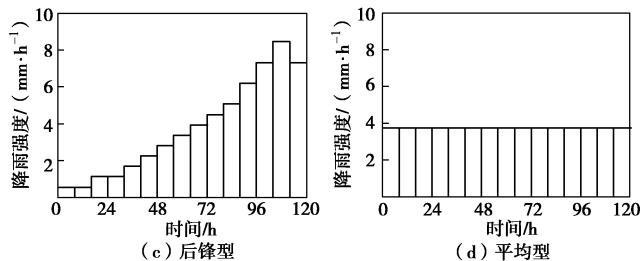
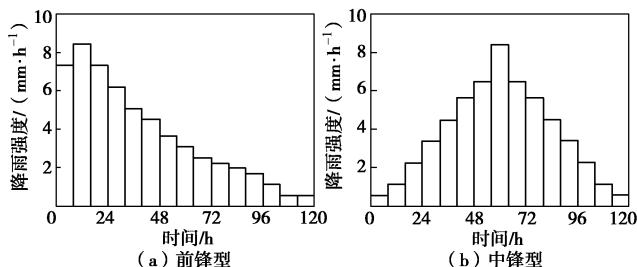


图 3 前期降雨类型^[4]

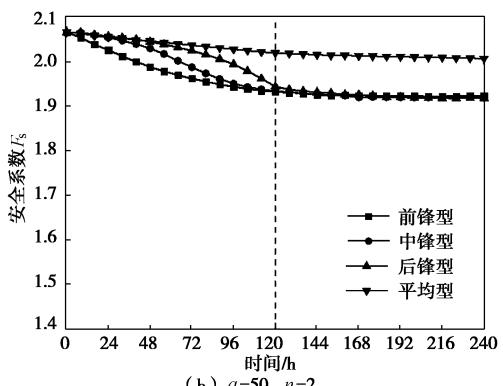
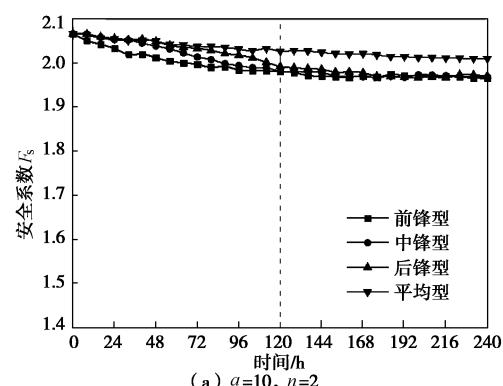
Fig. 3 Patterns of antecedent rainfall

2 计算结果分析

2.1 前期降雨类型和土-水特征曲线对边坡稳定的影响 (不考虑主降雨)

(1) a 值变化, n 值不变

图 4 给出了在进气值 a 变化, n 值不变时不同前期降雨类型对应的边坡安全系数随时间的变化曲线。可以看出, 在相同前期降雨条件下, 不同 a 值土体的边坡安全系数受降雨的影响不同, a 值越大, 边坡稳定受降雨的影响越明显。具体说来, 当进气值 $a=10 \text{ kPa}$ 时, 不同类型前期降雨条件下边坡安全系数受到的影响极为有限, 在前期降雨结束时, 3 种不同土体对应的边坡安全系数几乎相同。而当进气值 $a=200 \text{ kPa}$ 时, 受前期降雨影响, 边坡安全系数迅速降低, 边坡安全系数在降雨峰值时降低到最小值。在前期降雨结束时, 3 种不同土体对应的边坡安全系数差别非常明显。



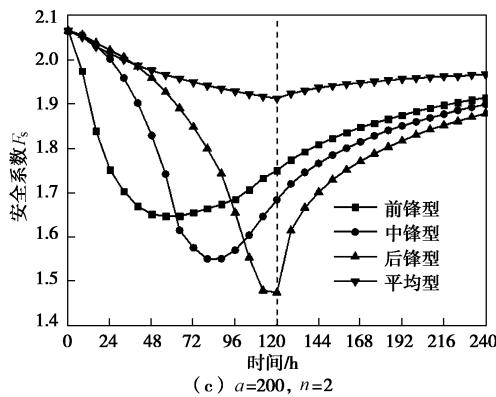


图 4 不同 a 值时前期降雨类型对边坡安全系数的影响(不考虑主降雨)

Fig. 4 Effects of antecedent rainfall patterns on slope F_s with variable a (without major rainfall)

4 种前期降雨类型对不同 a 值土体的边坡安全系数影响也不相同。总体说来, 平均型前期降雨对边坡稳定性影响最小, a 取不同值时平均型前期降雨条件下边坡安全系数随时间变化非常小。 a 值较小时(10 kPa 和 50 kPa)3 种有锋型前期降雨对边坡稳定的影响大体相同, 在前期降雨峰值处安全系数下降较快, 降雨强度较小时则变化缓慢, 但最小安全系数均出现在降雨停止时刻。 $a=200$ kPa 时不同前期降雨类型对边坡稳定性影响差别很大, 首先, 不同前期降雨类型对应的边坡最小安全系数出现的时刻不一样, 平均型前期降雨对应的最小安全系数出现在降雨停止时刻, 其它 3 种有锋型前期降雨分别出现在降雨峰值时刻附近; 其次, 边坡最小安全系数的量值不一样, 后锋型前期降雨对 $a=200$ kPa 对应的边坡稳定性影响最大。

虽然 3 种土体的饱和渗透系数相同, 但是对应的边坡稳定性计算结果却相差甚大, 其根本原因在于不同形状的土-水特征曲线对应的边坡内孔隙水压力分布的不同。图 5 给出了在前峰型前期降雨情况下不同 a 值土体对应的边坡 $X-X$ 截面和 $Y-Y$ 截面孔隙水压力在不同时刻的分布。由图 5 中可知, 当 $a=10$ kPa 时, 由渗透系数曲线可知土体透水性相对较差, 边坡内孔隙水压力变化主要在浅层区域, 浅层土体接近饱和, 深层土体未受到影响, 这对边坡整体安全系数影响并不大。当 $a=50$ kPa 时, 降雨的影响深度增大, 地下水位线也有所抬升, 从而边坡安全系数受到的影响比 $a=10$ kPa 时要大; 降雨停止之后, 降雨继续下渗, 但边坡表层土体孔隙水压力逐渐减小, 边坡安全系数基本上保持不变。当 $a=200$ kPa 时, 坡内地下水位线明显抬升, 这对边坡安全系数影响很大, 在第 40~80 小时(降雨峰值附近)地下水位线最高, 因此对应的边坡安全系数也最小; 降雨停止后, 地下水位迅速下

降, 边坡安全系数也随之增大。其他类型前期降雨条件下边坡内孔隙水压力分布与前峰型类似, 此处不再列出。

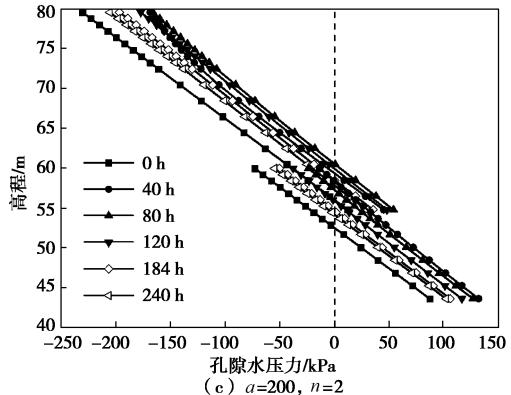
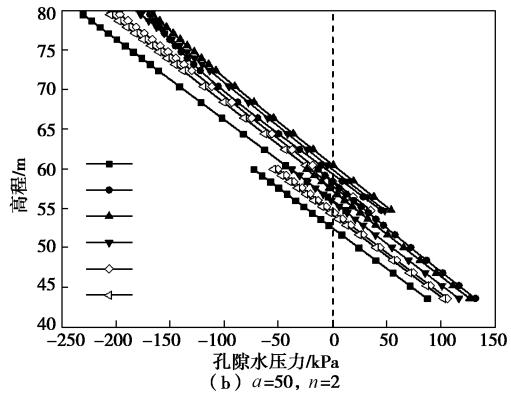
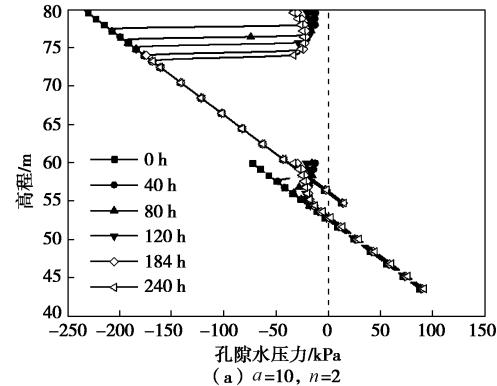


图 5 不同 a 值变化时边坡孔隙水压力在不同时刻的分布(不考虑主降雨)

Fig. 5 Distribution of pore water pressure in slope at different time with variable a (without major rainfall)

(2) n 值变化, a 值不变

图 6 是土体进气值 $a=200$ kPa, n 值分别取 1, 2, 3 时, 不同前期降雨类型对应的边坡安全系数随时间的变化。总体看来, 边坡安全系数都有随时间先减小后增加的趋势, 最小安全系数发生在降雨过程中或降雨末期, 其发生的先后次序为前峰型、中峰型、后峰型、平均型前期降雨, 其值按大小排序的顺序依次为

平均型、前锋型、中锋型和后锋型前期降雨。平均型前期降雨条件下边坡安全系数随时间变化曲线波动幅度最小。参数 n 对边坡稳定安全系数的影响体现在两个方面。第一, n 值越大, 最小安全系数值越小。第二, n 值越大, 最小安全系数发生的时间越早。

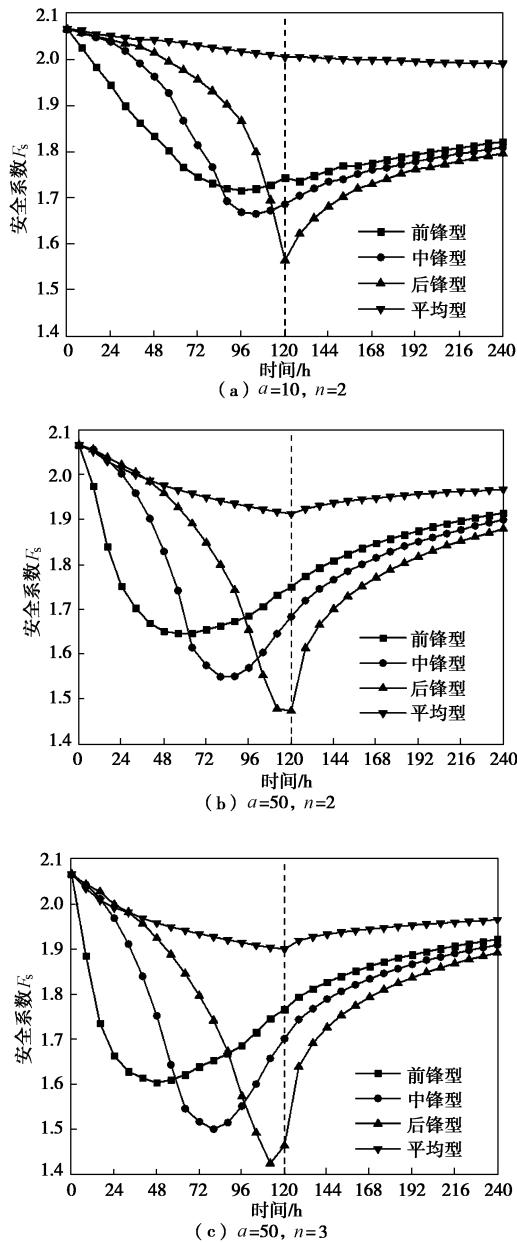


图 6 不同 n 值时前期降雨类型对边坡安全系数的影响(不考虑主降雨)

Fig. 6 Effects of antecedent rainfall patterns on slope F_s with variable n (without major rainfall)

2.2 前期降雨类型和土-水特征曲线对边坡稳定的影响(考虑主降雨)

(1) a 值变化, n 值不变

图 7 是增加了主降雨后不同 a 值对应的边坡安全系数随时间变化的曲线, 为了对比还增加了没有前期降雨只有主降雨情况下的曲线。可以看出, 由于主降

雨强度远远大于前期降雨强度, 考虑主降雨之后, 边坡安全系数均出现在主降雨停止时刻。当 $a=10, 50$ kPa 时, 3 种有锋型前期降雨对应的边坡安全系数在主降雨开始和结束时刻几乎相同。当 $a=200$ kPa 时, 不同前期降雨对应的边坡安全系数在主降雨过程中差距显著。图 8 给出了主降雨开始时刻 (120 h) 3 种不同 a 值对应的边坡在不同前期降雨条件下边坡 $X-X$ 和 $Y-Y$ 截面孔隙水压力分布情况, 可以看出由于前期降雨类型不同, 主降雨开始时刻边坡孔隙水压力分布而不同, 其中无前期降雨对应的边坡孔隙水压力分布由于在主降雨开始前变化很小。图 8 (a) 中仅仅边坡浅层土体

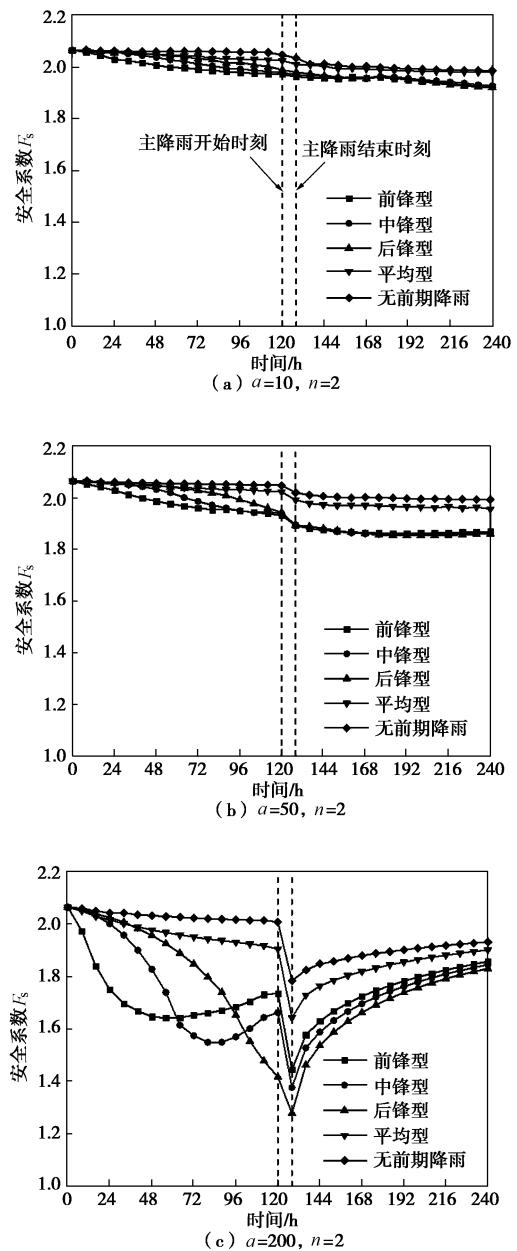


图 7 前期降雨类型对不同 a 值边坡安全系数的影响(考虑主降雨)

Fig. 7 Effects of antecedent rainfall patterns on slope F_s with variable a (with major rainfall)

接近饱和, 湿润锋位置有微小差异, 但对于边坡安全系数影响并不大, 因此图 7 (a) 中边坡安全系数在主降雨开始之后都比较接近。图 8 (b) 中 3 种有锋型前期降雨对应的边坡顶部浅层和底部孔隙水压力都有所增加, 且地下水位线有所抬升, 三者的量值也比较接近。因此在图 7 (b) 中可以看到有锋型前期降雨对应的安全系数也要低。图 8 (c) 中的孔隙水压力分布差别更大, 其中后锋型前期降雨对应的孔隙水压力增加最大, 因此在图 7 (c) 中 120 h 时刻, 边坡安全系数差别很大, 后锋型前期降雨对应的安全系数也最小。

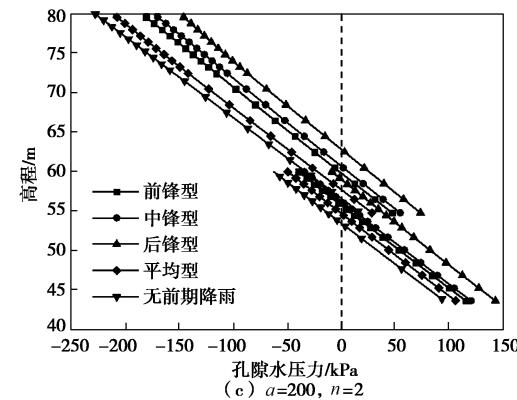
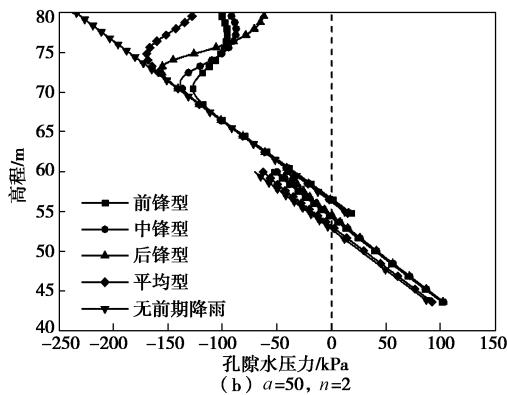
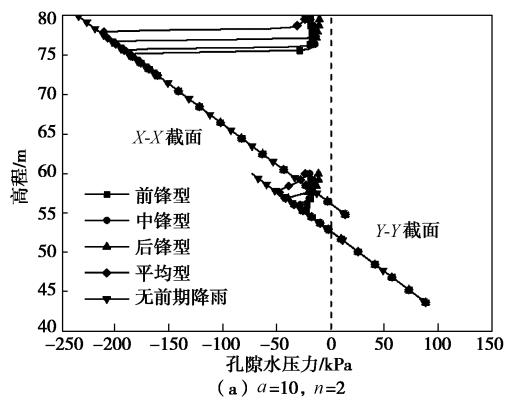


图 8 主降雨开始时刻 (120 h) 边坡孔隙水压力分布情况
Fig. 8 Distribution of pore water pressure in slope at beginning of major rainfall

(2) n 值变化, a 值不变

图 9 是在 $a=200$ kPa, n 值分别为 1, 2, 3, 考虑主降雨时不同前期降雨对应的边坡安全系数随时间的变化曲线。图 10 给出了主降雨开始时刻边坡顶部和底部孔隙水压力分布。可见, $n=1$ 对应的边坡孔隙水压力受前期降雨的影响相对较小, $X-X$ 截面地下水位抬升并不明显, 仅在浅层区域孔隙水压力有所增加。 $n=2, 3$ 对应的边坡孔隙水压力受到的影响较大, 地下水位也有所抬升, 且 n 值越大, 受到的影响越大, 从而导致主降雨阶段边坡最小安全系数也更小。

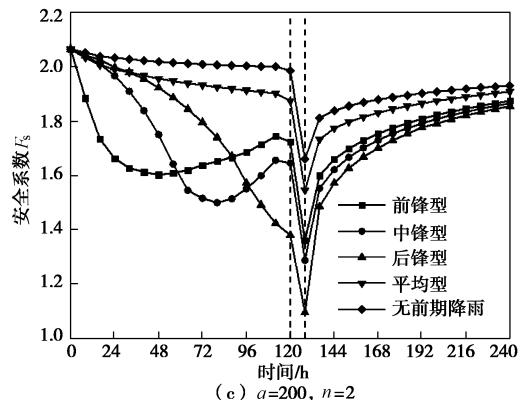
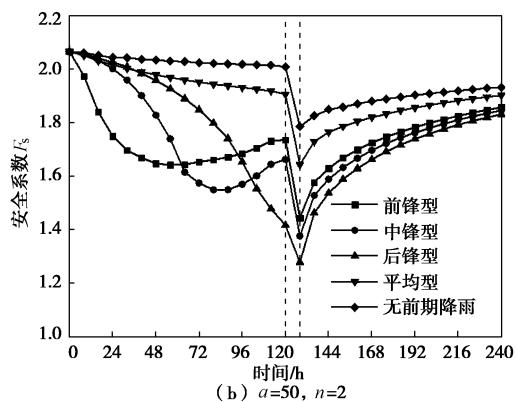
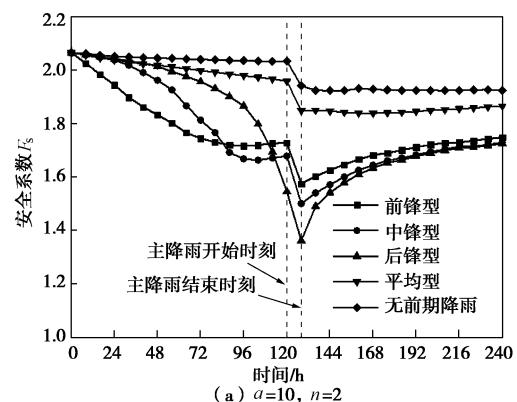


图 9 前期降雨类型对不同 n 值边坡安全系数的影响 (考虑主降雨)
Fig. 9 Effects of antecedent rainfall patterns on slope F_s with variable n (with major rainfall)

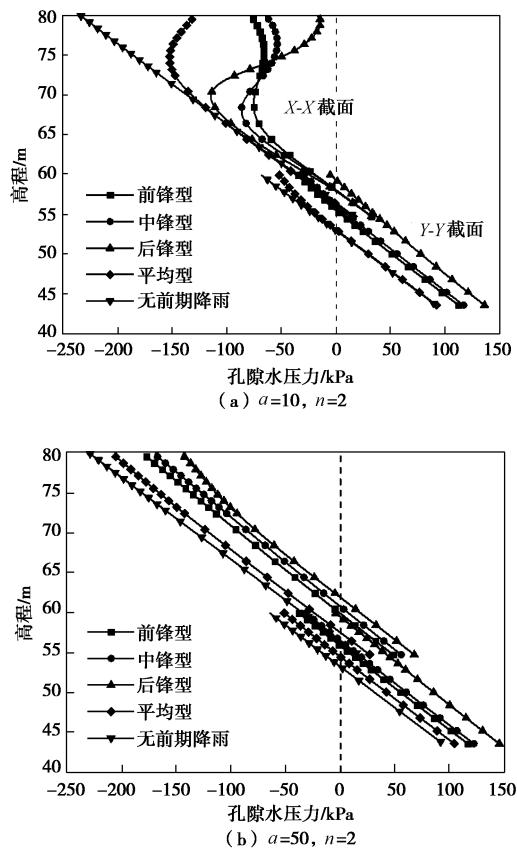


图 10 主降雨开始时刻 (120 h) 边坡孔隙水压力分布情况

Fig. 10 Distribution of pore water pressure in slope at beginning of major rainfall

3 结 论

本文选取饱和渗透系数为 10^{-5} m/s 的土坡, 研究了不同前期降雨类型和土-水特征曲线形状对边坡稳定性的影响, 得到了以下 3 点结论。

(1) 边坡稳定与土-水特征曲线参数关系很大。土-水特征曲线参数中进气值 a 对边坡稳定和孔隙水压力分布的影响最大, 当 a 值较小时, 前期降雨主要引起边坡表层孔隙水压力的变化, 对边坡安全系数影响并不大; 当 a 值较大时, 前期降雨的影响范围增大, 甚至使地下水位抬升, 对边坡安全系数影响较大。相比之下, n 值对边坡稳定和孔隙水压力分布的影响相对较小。

(2) 前期降雨类型对边坡稳定性影响不相同。当 n 值一定, a 值较小时, 前期降雨类型对边坡稳定性影响很小, 边坡安全系数变化不大, 且最小值均出现在前期降雨停止时刻; 当 a 值较大时, 有锋型前期降雨比平均型前期降雨对边坡稳定性影响整体上要大, 且后锋型前期降雨影响最大, 边坡安全系数最小值出现的时间也不相同。当 a 值一定, n 值越大, 不同前期降雨类型对应的边坡最小安全系数值越小, 最小安全

系数发生的时间越早。

(3) 考虑主降雨时, 当 a 值较小时, 前期降雨类型对主降雨开始时刻边坡内孔隙水压力分布影响较小, 导致对主降雨阶段边坡稳定几乎没有影响; 当 a 值较大时, 前期降雨类型将导致主降雨开始时刻孔隙水压力分布差异很大, 进而导致主降雨阶段边坡最小安全系数不同, 且后锋型前期降雨对边坡稳定影响最大。当 a 值一定, n 值越大, 边坡孔隙水压力受到的影响越大, 从而导致主降雨阶段边坡最小安全系数也更小。

参 考 文 献:

- [1] 周创兵, 李典庆. 暴雨诱发滑坡致灾机理与减灾方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2009, 24(5): 477 - 487. (ZHOU Chuang-bin, LI Dian-qing. Advances in rainfall-induced landslides mechanism and risk mitigation[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(5): 477 - 487. (in Chinese))
- [2] 崔鹏, 杨坤, 陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献——以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 11 - 15. (CUI Peng, YANG Kun, CHEN Jie. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: taking the Jiangjia Gully as an example[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2003, 1(1): 11 - 15. (in Chinese))
- [3] MUKHLISIN M, TAHAR M R. Numerical model of antecedent rainfall effect on slope stability at a hillslope of weathered granitic soil formation[J]. Journal of the Geological Society of India, 2012, 79(5): 525 - 531.
- [4] 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.
- [5] RAHARDJO H, LEONG E C, REZAUR R B. Effect of antecedent rainfall on pore-water pressure distribution characteristics in residual soil slopes under tropical rainfall[J]. Hydrological Processes, 2008, 22(4): 506 - 523.
- [6] 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, 21(7): 1034 - 1039. (YAO Hai-lin, ZHENG Shao-he, LI Wen-bin, et al. Parametric study on the effect of rain infiltration on stability of unsaturated expansive soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 1034 - 1039. (in Chinese))

- [7] 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.
- [8] ALONSO E, GENS A, LLORET A, et al. Effect of rain infiltration on the stability of slopes[C]// *Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT '95*. Paris, 1995.
- [9] ZHANG L L, FREDLUND D G, ZHANG L M, et al. Numerical study of soil conditions under which matric suction can be maintained[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2004, **41**(4): 569 – 582.
- [10] 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.
- [11] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, **31**(4): 521 – 532.
- [12] LU N, LIKOS W J. *Unsaturated soil mechanics*[M]. New York: J Wiley, 2004.
- [13] LEONG E C, RAHARDJO H. Permeability functions for unsaturated soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, **123**(12): 1118 – 1126.
- [14] FREDLUND D G, MORGENSEN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, **15**(3): 313 – 321.

(本文责编 孙振远)