

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 1-0060-07

降雨过程中边坡临界滑动场

沈银斌^{1,2}, 朱大勇^{1,2}, 蒋泽锋^{1,2}, 姚华彦^{1,2}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 安徽省土木工程与材料省级重点实验室, 合肥 230009)

摘 要: 降雨入渗过程中孔隙水压力的升高与基质吸力的降低引起边坡稳定性的下降, 是导致边坡滑塌的主要诱导因素。利用饱和-非饱和渗流有限元计算得到的孔隙水压力场, 基于 Fredlund 提出的非饱和土抗剪强度理论, 对边坡临界滑动场进行改进, 提出可以考虑降雨过程的边坡临界滑动场数值模拟方法, 能够方便、快速地计算出边坡局部、整体安全系数和相对应的临界滑动面在降雨过程中的变化历程。将该法用于一个典型均质边坡和一个非均质边坡在降雨过程中的稳定性计算, 分析降雨持续时间、降雨强度和非饱和强度参数取值等因素对边坡稳定性的影响, 并将计算结果与其他方法进行比较, 结果表明临界滑动场方法能搜索任意形状最危险滑面, 计算的安全系数合理。

关 键 词: 临界滑动场, 边坡稳定性, 降雨入渗, 饱和-非饱和渗流, 有限元

中图分类号: TB 115

文献标识码: A

Critical slip field of slope in process of rainfall infiltration

SHEN Yin-bin^{1,2}, ZHU Da-yong^{1,2}, JIANG Ze-feng^{1,2}, YAO Ha-yan^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Provincial Key Laboratory of Civil Engineering and Materials, Hefei 230009, China)

Abstract: The rising of pore water pressure and decreasing of matric suction in the process of rainfall infiltration into slope is the main factor of slope failures. Numerical simulation method of critical slip field of slope considering rainfall process is proposed based on proposed unsaturated soil shear strength theory and water pressure field obtained by finite element analysis of saturated-unsaturated seepage. Thus, slope local safety factor and slope whole safety factor as well as the corresponding critical slip surfaces during infiltration are calculated conveniently and rapidly. This method has been applied to the stability analysis of two example slopes and the effect study of rainfall intensity, duration and strength parameter on slope stability. The results show that the critical slip field method could search for any shape of the most dangerous slip surface; and the safety factor is reasonable.

Key words: critical slip field; slope stability; rainfall infiltration; saturated-unsaturated seepage flow; finite elements

1 引 言

降雨入渗条件下的边坡稳定性分析是近年来国内外岩土工程和工程地质界的研究热点。降雨过程中边坡体内孔隙水压力的升高与基质吸力的降低引起边坡稳定性下降, 是导致边坡滑塌的主要诱导因素。在降雨过程及降雨过后一定时期内, 边坡体内孔隙水压力、基质吸力的变化, 将导致边坡最小安全系数和对应最危险滑动面随之改变, 同一时刻也可能出现安全系数差别不大而位置显著不同的危险滑动面。

近年来, 国内外学者对降雨入渗条件下的边坡稳定性研究日益增多, 主要分析方法有极限平衡法^[1-2]、有限单元法^[3-4]和有限差分法^[5-6]等, 但在极限平衡法框架内确定安全系数和滑面位置, 具有一定的局限性。

边坡临界滑动场方法将极限平衡条分法与最优性原理有机地结合起来, 能够快速、准确和方便地找出边坡任意形状的全局临界滑动面、局部临界滑动面和其相对应的安全系数, 全面评价边坡的整体和局部稳定性^[7-8], 得到了国内外众多知名学者的高度评价, 是一种很有应用前景的边坡稳定分析方法。

收稿日期: 2012-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No.51078123, No.51179043)。

第一作者简介: 沈银斌, 男, 1983 生, 博士研究生, 主要从事岩土力学与工程方面的研究。E-mail: yinbinshen@126.com

沈银斌等^[9]将边坡渗流分析与临界滑动场法结合起来, 提出了可以考虑水位变化的边坡临界滑动场数值模拟方法, 但没有考虑基质吸力对非饱和土抗剪强度及边坡稳定性的贡献, 且条块底部水压力的计算使用了简化方法, 有待于改进。

本文在已有工作基础之上, 将非饱和土渗流分析与临界滑动场方法结合起来, 利用饱和-非饱和渗流有限元计算得到的孔隙水压力场, 采用 Fredlund 提出的非饱和土抗剪强度公式, 对边坡临界滑动场进行改进, 根据不同降雨过程模拟边坡动态临界滑动场, 计算边坡局部、整体安全系数及潜在危险滑动面位置在降雨过程中随时间的变化历程, 有利于揭示降雨滑坡的触发。

2 降雨过程中的边坡临界滑动场基本理论

2.1 临界滑动场基本理论

临界滑动场是将极限平衡条分法与最优性原理有机地结合在一起, 按照推力最大原则, 通过数值方法模拟出边坡体内任意一状态点的危险滑动方向, 最终追踪出一簇任意形状临界滑动面的计算方法。条块应力图如图 1 所示。任意状态点剩余推力 P_k 计算公式为

$$P_k = \frac{1}{\cos(\alpha_k - \theta_k - \phi'_k)} [\cos(\alpha_k - \theta_{k-1} - \phi'_k) P_{k-1} + \sin(\alpha_k - \phi'_k) W_k + \cos(\alpha_k - \phi'_k) K_c W_k + \sin(\alpha_k - \alpha_k - \phi'_k) \sin(\phi'_k U_k) - \cos(\phi'_k c'_k l_k)] \quad (1)$$

式中: P_{k-1} 为上一条块最大剩余推力; W_k 为体力; $K_c W_k$ 为地震力, K_c 为地震影响系数; Q_k 为坡面外力; U_k 为条底水压力合力; N_k 为条底有效正应力合力; l_k 为条块底部长度; α_k 为条块底部倾角; ϕ'_k 、 c'_k 分别为极限平衡状态时滑面发挥的内摩擦角和黏聚力。

用改进的 Morgenster-Price 法计算固定滑面安全系数时, 除条间力之外条块上所有力所提供的抗剪力之和 R_k 计算公式^[10]为

$$R_k = \frac{[W_k \cos \alpha_k - K_c W_k \sin \alpha_k + Q_k \cos(\omega_k - \alpha_k) - U_k]}{\tan \phi'_k + c'_k l_k} \quad (2)$$

从式 (1)、(2) 及图 1 (图中 ϕ_k^m 、 c_k^m 为平衡状态时土体内摩擦角和黏聚力) 可以看出, 条底部的孔隙水压力 U_k 和黏聚力 c'_k 的取值方法不同, 求得的边坡最小安全系数和最危险滑面位置也会不

同。本文提取饱和-非饱和渗流有限元计算得到的孔隙水压力为计算孔隙水压力值, 并采用 Fredlund 提出的非饱和土抗剪强度公式, 把基质吸力引起的抗剪强度作为黏聚力的一部分考虑到最大剩余推力和抗剪力的计算中。

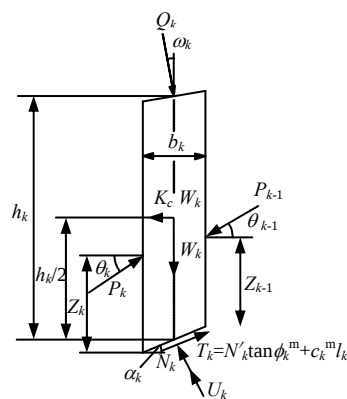


图 1 条块受力示意图
Fig.1 Sketch of forces on slices

2.2 非饱和土抗剪强度理论

由于边坡水位线以上存在负孔隙水压力, 所以 Mohr-Coulomb 准则已不再适用。目前, 非饱和土抗剪强度公式主要是分别由 Bishop 等^[11]提出的单应力状态变量公式和 Fredlund 等^[12]提出的双应力状态变量公式。Bishop 单应力状态变量抗剪强度公式为

$$\tau_f = c' + [\sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi' \quad (3)$$

式中: c' 为有效黏聚力; σ 为法向正应力; u_a 为孔隙气压力, 这里 u_a 取 0; χ 为非饱和土有效应力系数, 其值取 0~1 之间; φ' 为有效内摩擦角;

Fredlund 双应力状态变量抗剪强度公式为

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

式中: $\tan \varphi^b$ 为抗剪强度随着基质吸力增加而增加的速率。从式 (4) 中可以看出, 非饱和土的抗剪强度是由有效黏聚力 c' 、净法向应力 $(\sigma - u_a)$ 引起的抗剪强度和基质吸力 $(u_a - u_w)$ 引起的抗剪强度所构成。

由于 Bishop 公式中的参数 χ 取值困难, 不易测定, 限制了其在实际工程中的应用。Fredlund 公式将基质吸力对抗剪强度的影响独立计算, 目前得到广泛应用。本文采用 Fredlund 公式, 把基质吸力引起的抗剪强度作为黏聚力的一部分进行计算。当土体饱和时, 基质吸力 $(u_a - u_w)$ 为 0, $c' = c$, 式 (4) 即变为传统的 Mor-Columb 强度准则。当土体非饱

和时, 基质吸力 $(u_a - u_w) < 0$ 时, 式 (4) 变为改进的 Mor-Columb 强度准则, 总的有效黏聚力 c' 取值为

$$c' = c + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (5)$$

大量研究表明, φ^b 是随着基质吸力的变化而变化的。本文为了方便计算, 假定 φ^b 为常数, 并通过变化 φ^b 值的大小来研究 φ^b 的取值对边坡稳定性的影响。

2.3 降雨过程中的边坡临界滑动场计算过程

与常规临界滑动场不同, 降雨过程中的边坡临界滑动场的计算过程, 首先通过饱和-非饱和和渗流有限元计算降雨过程中的孔隙水压力场, 本文采用加拿大商业软件 Geostudio 系列件的 SEEP/W 模块进行计算^[13], 然后把计算结果导入临界滑动场计算程序, 编写孔隙水压力提取模块, 计算各个条块底部所对应的水压力合力。当条块底部位于非饱和区域时, 采用 Fredlund 公式进行计算, 也就是按照公式 (4), 把基质吸力引起的抗剪强度作为粘聚力的一部分。

降雨过程中的边坡临界滑动场具体计算步骤如下:

①确定计算范围, 划分条块和状态点。

②对不同降雨时刻的边坡, 进行饱和-非饱和和渗流有限元计算, 把计算结果导入临界滑动场计算程序。

③设定初始给定的 F_{s0} 和 λ_0 值, 一般取 $F_{s0} = 1$, $\lambda_0 = 0$ 。提取所有状态点试算滑面底部的孔隙水压力值计算水压力合力值。判断试算滑面位于饱和区还是非饱和区, 如果位于非饱和区, 则用式 (5) 计算总的有效黏聚力。计算出所有状态点的危险滑动方向和坡面出口点的剩余推力, 追踪出对应最大剩余推力的最危险滑面或预定出口的危险滑面。

④采用步骤③中处理非饱和土抗剪强度的原理, 用 Morgenster-Price 法计算上一步最危险滑面的安全系数 F_{s1} 和条间力函数的形状系数 λ_1 。

⑤以步骤④求出的 F_{s1} , λ_1 计算出所有状态点的危险滑动方向和坡面出口点的剩余推力, 追踪出对应最大剩余推力的最危险滑面或依次预定出口的危险滑面。重复步骤④、⑤, 直到相邻两次安全系数 F_s 差值小于给定的精度值, 对于一般工程问题可取 0.005~0.010。如果只需计算 CSF (边坡临界滑动场), 在这一步已经完成计算。

⑥如需计算 GCSF (边坡全局临界滑动场) 临界滑动场, 则选定下一个出口, 初始的 F_{s0} 和 λ_0 值可以选择上一出口的局部临界滑动面对应的值, 以减少迭代次数, 重复步骤③~⑥, 计算出对应的局部临界滑动面。

3 算例分析

3.1 均质边坡算例

一均质土坡如图 2 所示, 重度 $\gamma = 18.2 \text{ kN/m}^3$, $c' = 13.8 \text{ kPa}$, $\varphi' = 30^\circ$, 渗透系数 $k_s = 1.67 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 相应的水-土特征曲线和渗透性函数曲线分别如图 3 所示。地下水位离坡脚 3 m。对于降雨入渗边界, 采用方法文献[14]的方法, 在降雨入渗过程中, 当降雨强度小于边界土壤的饱和渗透系数 K_s , 边界条件为流量边界; 当降雨强度大于边界土壤的饱和渗透系数 K_s , 边界条件转换为水头边界。假定初始状态时, 地下水位线 3 m 以上的区域, 其负孔隙水压力分布为一常数值 -29.4 kPa。首先, 利用 Geostudio 系列软件的 SEEP/W 模块对边坡在降雨强度分别为 1.67×10^{-5} 、 3.4×10^{-5} 、 $6.68 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 情况下不同降雨时刻进行有限元渗流分析^[13]。然后, 运用降雨过程中的临界滑动场方法对不同降雨强度、降雨持时和抗剪强度参数 φ^b 时的边坡进行稳定性分析。

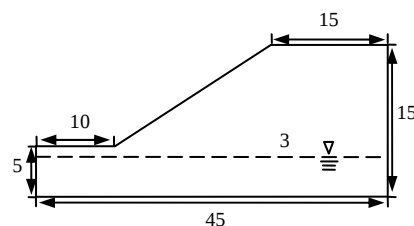
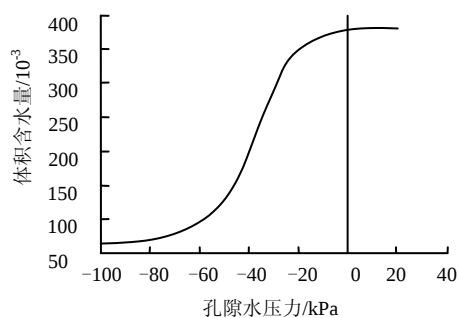
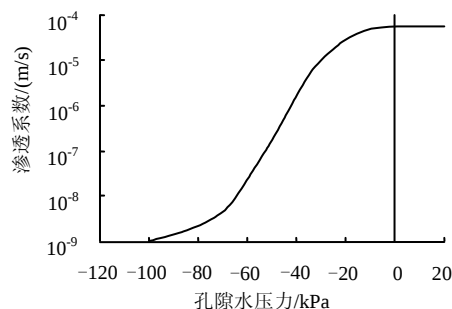


图 2 边坡几何模型(单位: m)

Fig.2 The geometry model of slope(unit: m)



(a) 体积含水率与孔隙压力的关系



(b) 渗透系数与孔隙水压力的关系

图 3 土体的土-水特征曲线

Fig.3 Soil-water characteristic curves

降雨强度为 $1.67 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 如图 4 所示, 分别为降雨持时为 0、5、10、15 h 时的孔隙水压力分布图, 地下水位为饱和区和非饱和区的分界线, 从图中看出, 随着降雨时间的进行, 地下水位上升, 非饱和区域范围变小, 土体孔隙水压力增大。

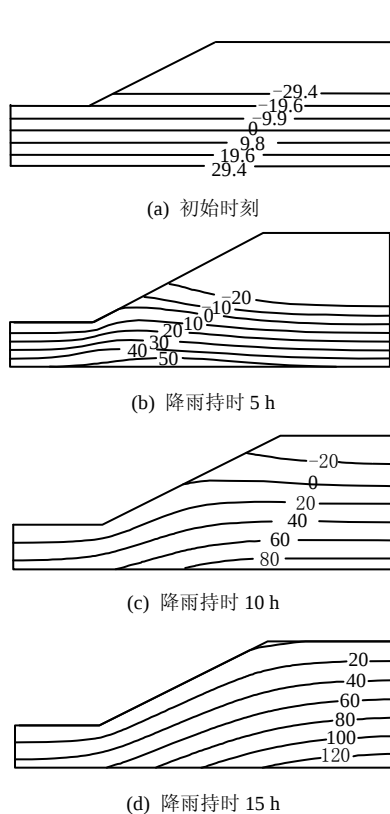


图 4 不同时刻孔隙水压力分布图(单位: kPa)

Fig.4 Distribution of pore water pressure at different times(unit: kPa)

由于非饱和土抗剪强度参数 φ^b 与基质吸力之间是非线性关系, 需要通过实验数据来测定, 所以本文假定 φ^b 为一定值, 取 $\varphi^b = 20^\circ$ 。降雨强度分别为 1.67×10^{-5} 、 3.4×10^{-5} 、 $6.68 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 时, 不同降雨持时的边坡安全系数如图 5 所示。从图中可以看出, 在一定降雨强度下, 随着降雨入渗, 非饱和区域变小, 基质吸力下降, 即总的有效黏聚力 c' 降低, 边坡安全系数不断降低, 直至边坡饱和孔隙水压力分布不变, 安全系数保持稳定, 此时安全系数比起初始时刻降低了 46%; 相同的降雨持时, 降雨强度越强, 孔隙水压力上升越快, 安全系数下降也越快。边坡稳定性与降雨持时和降雨强度关系的分析结果与文献[3]和 SLOPE/W 软件的分析结果一致。

为了验算本文方法的合理性, 将本文方法计算结果和 SLOPE/W 软件的 M-P 法和 Janbu 法计算结果进行比较^[15], 当降雨强度为 $1.67 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 抗剪

强度参数 φ^b 为 20° 时, 不同方法得到的安全系数结果见表 1。从表中可以看出, SLOPE/W 利用 M-P 法计算得到的安全系数与本文方法甚为接近, 误差控制在 1% 左右, 而 Janbu 法要明显偏小。

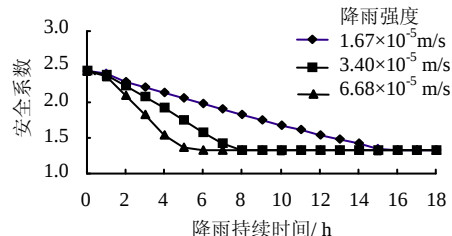


图 5 不同降雨强度降雨过程安全系数变化图

Fig.5 Variation of safety factor of slope stability for different rainfall intensities

表 1 不同方法计算的不同降雨持时的安全系数

Table1 safety factors slope stability for different rainfall durations

降雨 持时 /h	计算方法		
	本文方法 搜索的滑面	Slope 软件计算圆弧滑面 M-P 法	Janbu 法
0	2.444	2.521	2.263
1	2.403	2.351	2.092
2	2.295	2.266	2.023
3	2.206	2.188	1.961
4	2.131	2.112	1.904
5	2.05	2.038	1.841
6	1.981	1.964	1.783
7	1.908	1.891	1.712
8	1.826	1.819	1.654
9	1.748	1.748	1.582
10	1.673	1.680	1.523
11	1.611	1.615	1.461
12	1.536	1.552	1.404
13	1.479	1.488	1.342
14	1.419	1.406	1.253
15	1.354	1.359	1.204
16	1.330	1.354	1.204
17	1.327	1.354	1.204
18	1.325	1.354	1.204

为了验证非饱和土抗剪强度参数 φ^b 的取值对边坡稳定性的影响, 分别选取 $\varphi^b = 0^\circ$ 、 10° 、 20° 进行稳定性分析, 降雨强度取 $1.67 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 不同时刻的安全系数如图 6 所示。降雨初期 φ^b 取值越大, 边坡安全系数越高, 当降雨 11 h 以后, 由于土体渐渐趋于饱和状态, 基质吸力下降, 基质吸力对抗剪强度的贡献渐渐减小, 直至参数 φ^b 的取值对边坡的安全系数的影响消失。

临界滑动场方法的突出优点是能够显示边坡局部和整体的临界滑动面, 更加全面评价和了解边坡的稳定性。如图 7 所示为降雨强度为 $1.67 \times 10^{-5} \text{ m/s}$,

抗剪强度参数 ϕ^b 为 20° , 降雨持时分别为初始时刻、20 h 时的边坡临界滑动场。各个整体和局部最危险滑动面光滑连续但并非圆弧状, 且随着降雨的进行, 滑面位置也发生了变化。

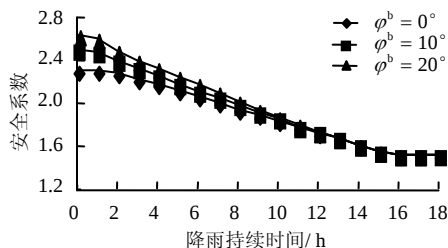


图 6 不同抗剪强度参数 ϕ^b 降雨过程安全系数变化
Fig.6 Variation of the safety factors of slope stability for different shear strength parameters ϕ^b

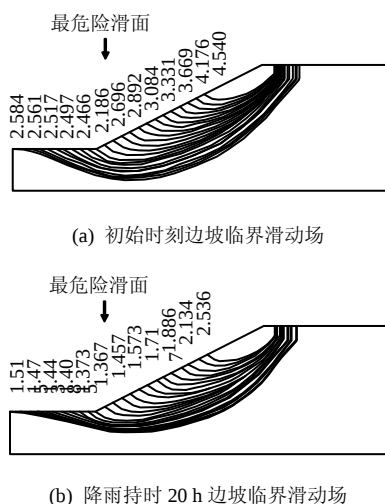


图 7 不同降雨持时边坡临界滑动场图
Fig.7 Gloval critical slip field at slope of different rainfall durations

从以上结果可以看出本文方法得到的安全系数是合理的, 且搜索出的危险滑面是任意形状, 较为合理。

3.2 带有软弱夹层的非均质边坡算例

在算例 1 的基础上, 在离坡顶距离为 7~8 m 处加上 1 层厚 1 m 的软弱夹层, 如图 8 所示。边坡物理力学参数见表 2。降雨强度为 1.67×10^{-5} m/s, 软弱夹层的非饱和土强度参数 ϕ^b 取 10° 、饱和和渗透系数 $k_s = 5 \times 10^{-5}$ m/s, 其土-水特征曲线如图 9 所示。

表 2 算例 2 边坡物理力学参数

土层	重度 (kN/m ³)	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 ($^\circ$)
均值土体	18.2	13.8	30
软弱层夹层	19	5	20

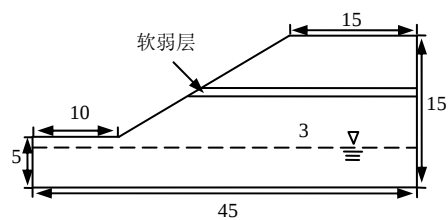
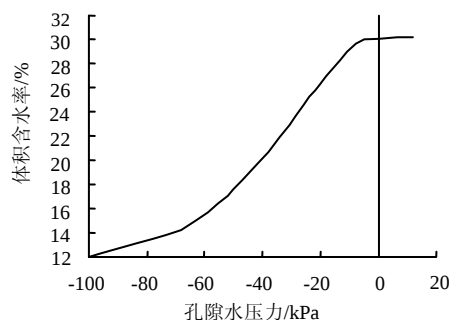
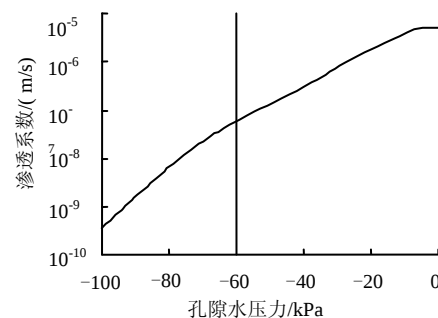


图 8 边坡几何模型(单位: m)
Fig.8 The geometry model of slope(unit: m)



(a) 体积含水率与孔隙压力的关系



(b) 渗透系数与孔隙水压力的关系

图 9 土体的土-水特征曲线
Fig.9 Soil-water characteristic curves

用降雨过程中的边坡临界滑动场, 对不同降雨持时的边坡进行稳定性分析, 不同降雨持时的安全系数见表 3、图 10, 最危险滑面如图 11 所示。

表 3 不同降雨持时的安全系数
Table 3 Safety factors for different rainfall durations

参数	降雨时间/h						
	0	8	16	24	32	40	48
安全系数	2.520	2.190	1.974	1.734	1.524	1.186	1.163
下降率/%		13.1	21.5	31.2	39.5	52.9	53.8

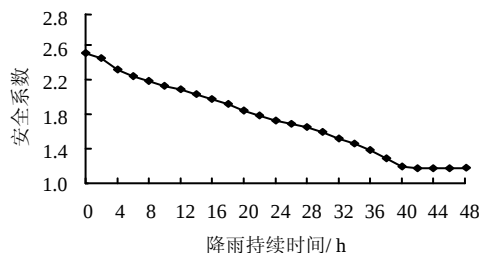


图 11 降雨过程安全系数变化图
Fig.11 Variation of the safety factors of slope stability during rainfall process

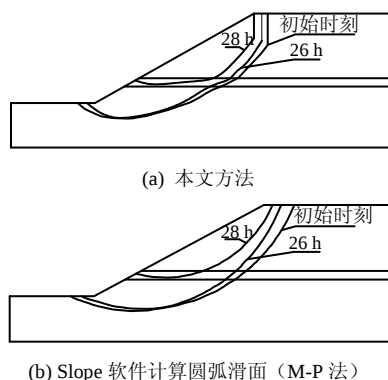


图 11 不同降雨持时最危险滑面位置图

Fig.11 Locations of slip surfaces of slope for different rainfall durations

从计算结果可以看出，随着降雨进行，边坡安全系数不断减小，与初始时刻比较安全系数最大下降率为 53.8%，边坡从安全稳定状态渐渐到不安全状态，所以降雨入渗对边坡稳定性的影响不容忽视；降雨 28 h 以内，最危险滑面从坡脚附近滑出，并且随着降雨的持续位置越来越浅。当降雨 28 h 以

后最危险滑面位置发生明显改变，滑面从软弱结构面滑出，降雨入渗不但降低了边坡的安全系数，而且滑面位置和形状也会随之变化，合理地确定危险滑面位置显得极为重要。为验证本文方法搜索滑面的准确合理性，图 11 也给出了各个降雨持时的 SLOPE/W 软件 M-P 法的圆弧滑面位置，两者位置基本一致，且都是在降雨 28 h 以后，滑面位置发生了明显改变，但本文方法的滑面更为合理。对于具有软弱夹层的非均值边坡，由于土层的物理力学参数的差别，危险滑面形状不可能为圆弧画面，本文搜索出的滑面为任意形状的，更加符合实际情况。图 12 为不同降雨持时边坡临界滑动场。从图中可以看出，当降雨持续 26 h 时，坡脚处的最小安全系数要明显小于软弱夹层与坡面交汇处附近的安全系数，这时全局最危险滑面从坡脚附近滑出；当降雨持续 28 h 时，坡脚处的最小安全系数和软弱夹层与坡面交汇处的最小安全系数值大小相差不大，说明这时达到了最危险滑面位置重大改变的临界点。

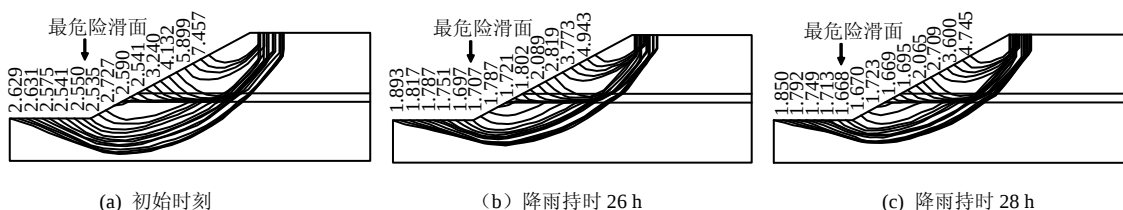


图 12 不同降雨持时边坡临界滑动场图

Fig.12 Gloval critical slip fird of slope for different rainfall durations

4 结 语

结合饱和-非饱和渗流有限元分析，提出了降雨过程中的边坡临界滑动场方法，能够考虑降雨入渗过程中非饱和区基质吸力分布的变化对边坡稳定性的影响，更加符合实际情况。本文方法依然继承了常规临界滑动场计算方法在边坡稳定性分析中的突出优点，能够方便、快速、准确地确定边坡任意形状的整体和局部临界滑动面的位置和安全系数，评价边坡的整体与局部稳定性。

通过算例分析发现，降雨过程中的边坡稳定性与降雨持续时间、降雨强度和非饱和强度参数取值有关。降雨强度一定的情况下，随着降雨历时的增加，边坡安全系数急剧减小，危险滑面位置也随之发生变化，直到坡体基本达到饱和以后趋于稳定；降雨强度越大，边坡的稳定性系数下降的越快；降雨初期非饱和强度参数 φ^b 取值越大，安全系数越

高，土体渐渐趋于饱和， φ^b 的影响越来越小，直至消失。

参 考 文 献

- [1] RAHIMI A, RAHARDJO H, LEONG E C, et al. Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*[J]. 2011, 137: 483—491.
- [2] RAHARDJO H, NIO A S, LEONG Ng E C, et al. Effect of groundwater table position and soil properties on stability of slope during rainfall[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*[J]. 2010, 136: 1555—1564.
- [3] CAI F, UGAI K. Numerical analysis of rainfall effects on slope stability[J]. *Internaional Journal of Geomechanics*. 2004, 4: 69—78.
- [4] 娄一青. 降雨条件下边坡渗流及稳定有限元分析[J].

- 水利学报, 2007, 42(增刊): 346—351.
- LOU Yi-qing. Finite element analysis of slope seepage and stability due to rainfall infiltration[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007, 42(Supp.): 346—351.
- [5] 荣冠, 王思敬, 王恩志, 等. 强降雨下元磨公路典型工程边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 704—711.
- RONG Guan, WANG Si-jing, WANG En-zhi, et al. Stability analysis of Yuanmo highway slope under intensive rainfall[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(4): 704—711.
- [6] 宋晓晨, 徐卫亚, 邵建富, 等. 雾雨作用下的非饱和边坡稳定性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(6): 16—20.
- SONG Xiao-chen, XU Wei-ya, SHAO Jian-fu, et al. Stability analysis of unsaturated soil slope under atomized rain[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2002, 30(6): 16—20.
- [7] 朱大勇. 边坡临界滑动场及其数值模拟[J]. 岩土工程学报, 1997, 9(1): 63—69.
- ZHU Da-yong. Critical slip field of slope and its numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 9(1): 63—69.
- [8] 朱大勇, 钱七虎. 严格极限平衡条法框架下的边坡临界滑动场[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 68—74.
- ZHU Da-yong, QIAN Qi-hu. Critical slip fields of slopes satisfied all conditions of limit equilibrium for slices[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(5): 68—74
- [9] 沈银斌, 朱大勇, 姚华彦. 水位变化过程中边坡临界滑动场[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 2): 179—183.
- SHEN Yin-bing, ZHU Da-yong, YAO Hua-yan. Critical slip field of slope in process of reservoir water level fluctuations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.2): 179—183.
- [10] ZHU D Y, LEE C F, QIAN Q H, et al. A concise algorithm for computing the factor of safety using the Morgenstern-Price method[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005, 42: 272—278.
- [11] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1978, 15(3): 313—321.
- [12] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability of slopes[J]. **Geotechnique**, 1955, 5(1): 7—17
- [13] Geo-Slope International. SEEP/W for finite element seepage analysis (version 4a)[M]// User's Guide. Calgary, Alberta: [s.n.], 2004.
- [14] 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.
- LI Zhao-ping, ZHANG Mi. Effects of rain infiltration on transient safety of unsaturated soil slope[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2001, 34(5): 57—61.
- [15] Geo-Slope International. SLOPE/W for slope stability analysis(version 4b)[M]// User's Guide. Calgary, Alberta: [s.n.], 2004.