

文章编号: 1000-7598 (2013) 11-3239-10

# 考虑前期降雨过程的边坡稳定性分析

唐 栋<sup>1,2</sup>, 李典庆<sup>1,2</sup>, 周创兵<sup>1,2</sup>, 方国光<sup>3</sup>

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 武汉 430072; 3. 新加坡国立大学 土木与环境工程系, 新加坡 117576)

**摘 要:** 基于三峡库区实测降雨资料, 研究了不同初始条件对不同土体边坡稳定性影响, 建议了能够反映边坡含水状态的初始条件选取方法。在此基础上, 采用非饱和渗流分析方法研究了前期降雨对不同土体边坡稳定性影响, 以典型的砂土和黏土边坡为例初步探索了前期降雨对边坡稳定性影响规律。结果表明: 初始条件对不同土体边坡稳定性影响不同; 建议将多年平均降雨量对应的稳态渗流场作为初始条件进行非饱和渗流分析。边坡土体渗透系数越低, 边坡稳定性受前期降雨的影响越大、影响时间也越长。砂土和黏土边坡稳定性分析时建议至少考虑 15 d 以上的前期降雨, 对于砂土边坡还应根据这 15 d 前面 5 d 的降雨情况确定是否需要增加计算天数。短历时高强度前期降雨对砂土边坡稳定性影响更大, 而长历时低强度前期降雨对黏土边坡稳定性影响更大。累积前期降雨量可以作为判断边坡最小安全系数出现时刻的依据。砂土边坡出现最小安全系数时刻与 10 d 累积前期降雨量最大的时刻较为吻合, 而黏土边坡则与 15 d 累积前期降雨量最大的时刻较为吻合。

**关 键 词:** 边坡; 稳定性; 安全系数; 前期降雨; 非饱和渗流分析

**中图分类号:** TU 457

**文献标识码:** A

## Slope stability analysis considering antecedent rainfall process

TANG Dong<sup>1,2</sup>, LI Dian-qing<sup>1,2</sup>, ZHOU Chuang-bing<sup>1,2</sup>, PHOON Kok-kwang<sup>3</sup>

(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;

3. Department of Civil and Environmental Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576, Singapore)

**Abstract:** Based on the measured rainfall data in the Three Gorges reservoir area, this paper investigates the effect of different initial conditions on different types of soil slope stability. A method to reflect the real initial conditions of the water content in the slope is recommended. Unsaturated seepage analysis is adopted to study the effect of antecedent rainfall on different types of soil slope stability. The typical sand and clay slopes are taken as examples to investigate the effect of antecedent rainfall on slope stability. The results indicate that the effect of the initial conditions on different types of soil slope stability can differ considerably. It is recommended that the steady-state seepage field under average annual rainfall can be used as the initial conditions for transient seepage analysis. The lower soil permeability coefficient, the greater impact of antecedent rainfall can on slope stability, and the longer time affected by antecedent rainfall. It is recommended that more than 15 days antecedent rainfall should be considered for sand and clay slopes stability analysis. Furthermore, more computational effort for sand slopes will depend on the 5 days rainfall before these 15 days rainfall. The short term and high density antecedent rainfall has a significant effect on sand slope stability, whereas the long term and low density antecedent rainfall has a significant effect on clay slope. The cumulative antecedent rainfall can be taken as a criterion to determine the minimum factor of safety. For the sand slopes, the time corresponding to the minimum factor of safety matches well with the time corresponding to the maximum 10-day cumulative antecedent rainfall, whereas, for the clay slopes, it matches well with the time corresponding to the maximum 15-day cumulative antecedent rainfall.

**Key words:** slope; stability; safety factor; antecedent rainfall; unsaturated seepage analysis

## 1 引 言

大量统计资料表明, 绝大多数滑坡都发生在降

雨期间或降雨之后, 降雨作为诱发滑坡的主要因素之一已经被人们广泛认识<sup>[1]</sup>。有关降雨诱发滑坡的研究文献很多, 但前期降雨对边坡稳定性的影响研

收稿日期: 2012-09-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目(No. 2011CB013506); 国家自然科学基金项目(No. 51225903, No. 551329901, No. 51079112)。

第一作者简介: 唐栋, 男, 1988 年生, 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

通讯作者: 李典庆, 男, 1975 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 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: dianqing@whu.edu.cn

究并不是很多,而且观点各异。如 Brand 等<sup>[2-3]</sup>、Pitts<sup>[4]</sup>、Corominas 等<sup>[5]</sup>、Aleotti<sup>[6]</sup>分别对香港、意大利、新加坡、庇里牛斯山等地区的滑坡与前期降雨间关系进行了研究,认为滑坡与前期降雨没有直接的联系。Tan 等<sup>[7]</sup>对新加坡滑坡进行了研究,发现前期降雨是导致滑坡的关键因素之一,其中一个极具说服力的证据就是 Bukit Batok 滑坡<sup>[8]</sup>,该滑坡发生在一场大规模降雨之后,而滑坡发生时刻并没有下雨。Rahardjo 等<sup>[9]</sup>通过现场观测试验研究了新加坡 4 个斜坡在降雨后的孔隙水压力分布,得出 5 d 的前期降雨会影响边坡的稳定。上述研究得出的结论并不一致,其原因在于不同地区的土体渗透性相差很大,土体渗透性在前期降雨对边坡稳定性分析中占有十分重要的地位。

鉴于前期降雨对滑坡潜在的影响,有必要分析足够长时间的前期降雨的影响,从而减小前期降雨对边坡稳定性影响的分析误差。现有研究中所考虑的前期降雨天数并不相同,如 Lumb<sup>[10]</sup>选取 15 d 的前期降雨对香港地区边坡稳定性进行了研究。Rahardjo 等<sup>[9, 11-12]</sup>研究了 5 d 的前期降雨对新加坡地区边坡稳定性的影响。Guzzetti 等<sup>[13]</sup>系统地总结了诱发滑坡的降雨阈值,同时发现在研究前期降雨对边坡稳定性影响时,不同学者考虑的前期降雨时间并不相同,从最小的 1 d 到最大的 120 d。然而这些研究并未详细研究边坡稳定性分析中应考虑多少天的前期降雨,对考虑前期降雨影响的其他边坡稳定性分析的指导意义有限。此外,大多数研究采用假设的前期降雨类型<sup>[14-15]</sup>,不能有效地反映某一地区前期降雨过程对边坡稳定性的影响,对具体地区考虑前期降雨因素的边坡稳定性分析参考价值有限。

本文基于三峡库区实测降雨资料,采用非饱和渗流分析方法研究了不同初始条件对不同土体边坡稳定性影响,建议能够反映边坡含水状态的初始条件选取方法。在此基础上,采用 GeoStudio 软件中的 SEEP/W 和 SLOPE/W 模块研究了前期降雨对不同土体边坡稳定性影响,以典型的砂土和黏土边坡为例初步探索了前期降雨对边坡稳定性影响规律,为研究三峡库区降雨诱发滑坡问题提供了一定的参考依据。

## 2 考虑前期降雨影响的边坡稳定性分析方法

### 2.1 计算模型及边界条件

本文以文献[16]中的边坡稳定性分析模型为例

进行分析,边坡几何尺寸如图 1 所示。文献[16]采用该模型研究了土体性质、降雨强度、初始地下水位、边坡形状等对边坡稳定性的影响,得出了土体性质和降雨强度是边坡稳定影响最敏感的因素,而地下水位和边坡形状的影响较小的结论。进行渗流分析时边界条件如下:(1)  $ab$ 、 $bc$ 、 $cd$  为入渗边界,当降雨强度小于土体入渗能力时,按照流量边界处理,流量大小等于降雨强度;当降雨强度大于土体的入渗能力时,一部分雨水将流失,坡面会产生径流,本文在采用 SEEP/W 软件计算过程中假定坡面不积水,此时按照定水头边界处理,水头值等于地面高程;(2)  $ah$ 、 $de$ 、 $fg$  为隔水边界;(3)  $ef$ 、 $gh$  为水头边界,总水头分别等于  $h$  点和  $e$  点的高程。图 2 给出了渗流计算的有限元网格剖分图,计算单元大部分为四边形单元,局部区域有少量三角形单元,共有 7 133 个节点和 7 143 个单元。为保证计算结果的准确性同时减少计算量,将模型的边坡部分网格划分较细,单元大小为 0.2 m,远离边坡部分取为 0.4 m,模型底部饱和和渗流区域相对较大。时间步长取为 2 h,经试算,该模型渗流计算结果合理。

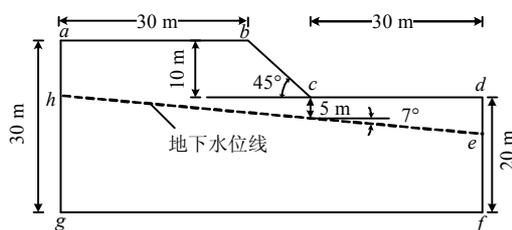


图 1 计算模型与边界条件示意图

Fig.1 Slope geometry and boundary conditions

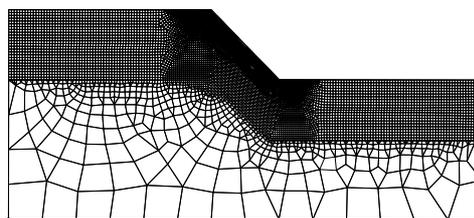


图 2 渗流计算模型网格剖分图

Fig.2 Model of finite element mesh used for the seepage analysis

为了使分析结果更具工程实用价值,本文选取三峡库区实测降雨资料<sup>[17]</sup>进行前期降雨对边坡稳定性影响分析。图 3 给出了三峡库区 1998 年日降雨量柱状图。可以看出,由于三峡库区属于亚热带季风气候区,气候温和湿润,降雨充沛,其中年降雨量的 70%集中在 5—9 月,且多为大雨和暴雨。为

此，本文选取该地区 1998 年 5—9 月共 153 d 的实测降雨资料进行分析，选取的天数如图中虚线框所示，并将每天的降雨量按 24 h 平均分摊。

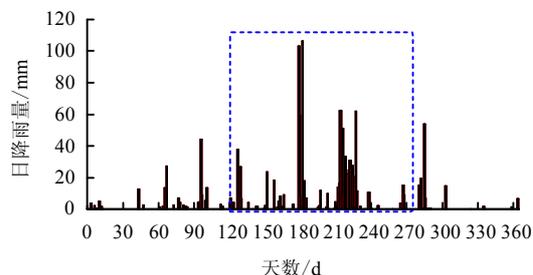


图 3 三峡库区 1998 年日降雨量及计算所采用的降雨资料  
Fig.3 Daily rainfall data of year 1998 in the Three Gorges reservoir area and the data adopted for this study

### 2.2 土体参数

以典型的黏土和砂土边坡<sup>[16]</sup>为例进行饱和-非饱和渗流分析，土-水特征曲线（SWCC）采用 Fredlund-Xing 模型，其表达式为

$$\theta_w = \theta_s C(\varphi) \left\{ \frac{1}{\left[ \ln \left( e + \left( \frac{\varphi}{a} \right)^n \right) \right]^m} \right\} \quad (1)$$

其中修正系数

$$C(\varphi) = 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\varphi}{\varphi_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{10^6}{\varphi_r} \right)} \quad (2)$$

式中： $\theta_w$  为体积含水率； $\theta_s$  为饱和体积含水率； $e$  为自然对数； $a$ 、 $n$ 、 $m$  为拟合参数，其中  $a$  为进气值相关的土性参数， $n$  为与土-水特征曲线斜率相关的土性参数， $m$  为残余含水率相关的土性参数； $\varphi$  为基质吸力； $\varphi_r$  为残余含水率  $\theta_r$  所对应的基质吸力。根据 Leong 和 Rahardjo<sup>[18]</sup> 的建议，本文取  $C(\varphi) = 1$ 。

渗透系数曲线采用如下公式<sup>[19]</sup>：

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

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

砂土和黏土边坡非饱和渗流分析时的计算参数见表 1，相应的土-水特征曲线和渗透系数曲线分别如图 4、5 所示。砂土和黏土对应的饱和渗透系数分别为  $10^{-4}$ 、 $10^{-6}$  m/s。

表 1 两种非饱和土体计算参数  
Table 1 Parameters of two types of unsaturated soil

土体类型	土-水特征曲线参数				渗透系数曲线参数		
	$a/\text{kPa}$	$m$	$n$	$\theta_s/\%$	$k_s/(\text{m/s})$	$k_s/(\text{m/d})$	$p$
砂土	10	1	1	45	$10^{-4}$	8.64	4
黏土	100	1	1	45	$10^{-6}$	0.0864	4

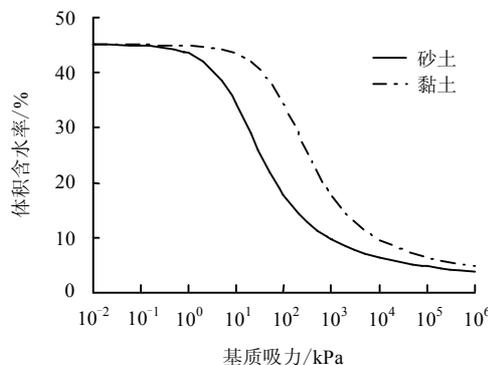


图 4 两种土体的土-水特征曲线  
Fig.4 Soil-water characteristic curves of two types of soils

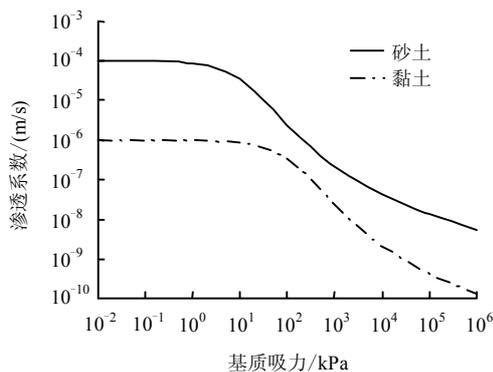


图 5 两种土体的渗透系数曲线  
Fig.5 Permeability coefficient curves of two types of soils

边坡稳定计算时采用 Fredlund 等<sup>[20]</sup>提出的非饱和土抗剪强度公式为

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

式中： $\tau$  为非饱和土抗剪强度； $c'$  为有效黏聚力； $\varphi'$  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； $\varphi^b$  为基质吸力对抗剪强度的贡献所对应的摩擦角。

本文中相应的取值为  $c' = 10$  kPa、 $\varphi' = 26^\circ$ 、 $\varphi^b = 26^\circ$ 。此外，土体重量  $\gamma = 20$  kN/m<sup>3</sup><sup>[16]</sup>。

### 2.3 初始条件

罗红明<sup>[15]</sup>在进行边坡非饱和渗流分析时，假设了初始最大孔隙水压力为 -75、-50、-25 kPa 共 3 种情况，据此研究了不同初始孔隙水压力对具有不同渗透系数边坡稳定性的影响，但对于具有不同渗透系数的土体选用相同的初始孔隙水压力与实际情

况有一定的差异,如在相同的气候条件下,砂土和黏土的湿润状况是不同的,采用相同初始孔隙水压力显然不符合实际情况。为了使选取的初始孔隙水压力能真实地反映土体含水状况,基于实际观测资料, Rahardjo 等<sup>[16]</sup>选用允许最大孔隙水压力为  $-75\text{ kPa}$  作为初始计算条件。Rahimi 等<sup>[11]</sup>指出:在降雨边界上施加一个很小的雨强并作用很长时间来确定初始条件,但并未给出这个很小的雨强的具体值。詹良通等<sup>[21]</sup>将计算地区的多年平均降雨量作为流量边界施加于边坡表面,进行稳态渗流分析,将得到的边坡孔隙水压力作为初始条件。GeoStudio 用户手册<sup>[22]</sup>中也认为施加一个小的、非零的表面流量所给的初始孔隙水压力比地表流量为 0 的估计更符合实际情况。总体来说,文献[21]的方法能够更合理地模拟天然状况下的边坡含水情况。

为了全面地考虑初始条件对边坡稳定性的影响,基于上述分析本文选取了最大允许孔隙水压力分别为  $-25$ 、 $-45$ 、 $-75\text{ kPa}$  以及将该地区多年平均降雨量作为边界条件进行稳态渗流分析得到的渗流场作为初始条件 4 种情况进行了计算。

## 2.4 数值分析方法

本文采用 GeoStudio 软件中的 SEEP/W 和 SLOPE/W 模块分别进行渗流分析和边坡稳定分析,主要计算步骤如下:

(1) 通过稳态渗流分析确定计算初始条件。在 SEEP/W 模块中,将该地区多年平均降雨量作为流量边界条件施加在边坡表面,计算稳态渗流场,得到边坡孔隙水压力分布,将其作为下一步瞬态渗流计算的初始条件。对于给定最大允许孔隙水压力的初始条件则无此步,直接进入第(2)步。

(2) 考虑不同前期降雨天数,在 SEEP/W 模块中对整个降雨过程进行瞬态渗流分析,得到每天结束时刻孔隙水压力分布。例如,要计算考虑 10 d 前期降雨时第 20 天末(第 20 天是针对本文选取的降雨总天数而言)对应的安全系数,则将该时刻前面 10 d(即第 11 天至第 20 天)的降雨施加到边坡表面,进行 10 d 的瞬态渗流计算,得到第 20 天末孔隙水压力分布。

(3) 通过 SLOPE/W 模块进行边坡稳定性分析,采用简化 Bishop 法得到最后时刻的边坡安全系数。需要说明的是,本文主要目的是研究前期降雨对边坡稳定性的影响规律,因此,选择了一简单的边坡模型进行稳定性分析。所选模型为均质边坡模型,而且不考虑边坡中存在裂缝情况。最危险滑动面通

过格栅半径法由 SLOPE/W 程序自动搜索确定。

## 3 前期降雨对边坡稳定性影响分析

### 3.1 初始条件对孔隙水压力分布的影响

为了研究初始条件对不同土体边坡稳定性影响,本文选取最大允许孔隙水压力分别为  $-25$ 、 $-45$ 、 $-75\text{ kPa}$  以及将多年平均降雨量作为边界条件进行稳态渗流分析得到的渗流场作为初始条件 4 种情况进行计算。第 4 种情况中采用三峡库区多年平均降雨量,三峡库区 1995~2000 年年降雨量<sup>[17]</sup>如图 6 所示,由此降雨量资料可得 6 年间的日平均降雨量为  $2.6\text{ mm}$ 。

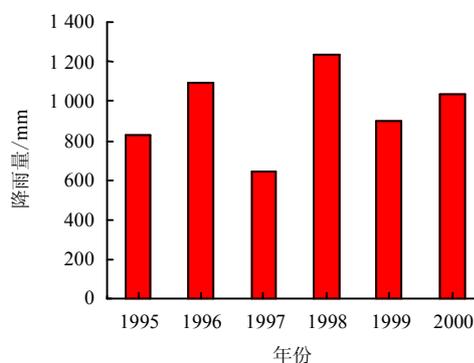


图 6 三峡库区 1995~2000 年年降雨量柱状图  
Fig.6 Annual rainfall in the Three Gorges reservoir area during 1995-2000

图 7 给出了不同初始条件下两种土体初始孔隙水压力分布图。可以看出,对不同渗透系数土体来说,将多年平均降雨量作为边界条件进行稳态渗流分析得到的初始条件存在明显的差别,在砂土中与最大孔隙水压力  $-45\text{ kPa}$  时相近,而在黏土中与最大孔隙水压力  $-25\text{ kPa}$  时更相近。

### 3.2 初始条件对边坡稳定性影响

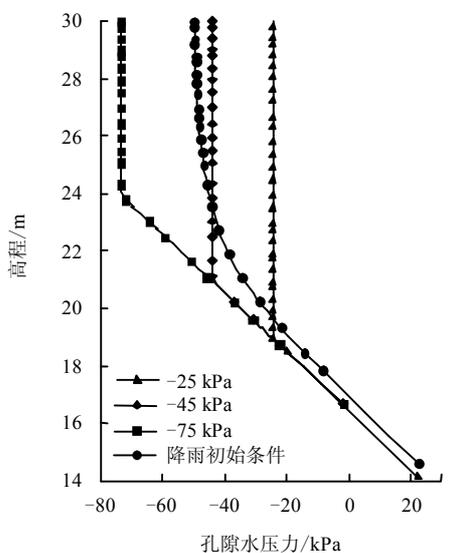
采用 2.4 节所示步骤可得不同前期降雨条件下的边坡安全系数,下面分别对砂土和黏土边坡进行分析。

#### 3.2.1 初始条件对砂土边坡稳定性影响

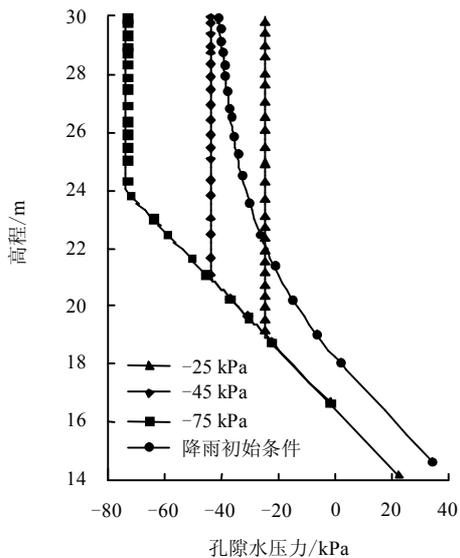
图 8 给出了不同前期降雨和不同初始条件下砂土边坡安全系数随时间的变化曲线。以图 8(a)为例, A 点值表示考虑 20 d 前期降雨(第 21 天至第 40 天)、初始最大孔隙水压力为  $-75\text{ kPa}$  时第 40 天末边坡安全系数,图中其他点的含义类似。由于考虑的前期降雨天数不同,不同图中数据点的起点也不相同,考虑 20 d 前期降雨的数据点从第 20 天开始,考虑 30 d 前期降雨的数据点从第 30 天开始,

以此类推。因数据点过于密集，为便于阅读，图中隐藏了部分数据点。

由图可以看出：①考虑前期降雨的时间越长，不同初始条件得到的安全系数曲线越接近，也就是说不同初始条件对安全系数的影响越小。②当考虑前期降雨的天数超过 50 d 时，不同初始条件对应的安全系数曲线几乎重合，可以将考虑 50 d 前期降雨的结果作为准确值。③将多年平均降雨量对应稳态渗流场作为初始条件的计算结果与初始最大孔隙水压力为-45 kPa 结果几乎重合，这与图 7 中得出的结论是一致的。

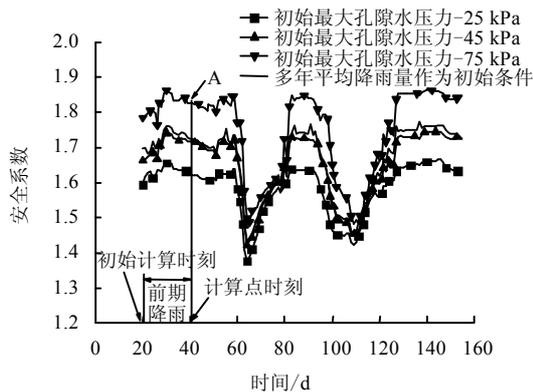


(a) 砂土

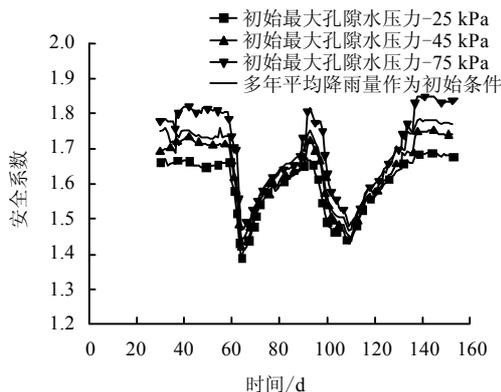


(b) 黏土

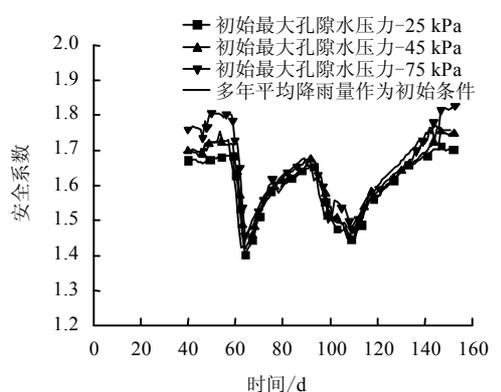
图 7 不同初始条件对应的孔隙水压力分布图  
Fig.7 Pore water pressure distributions associated with different initial conditions



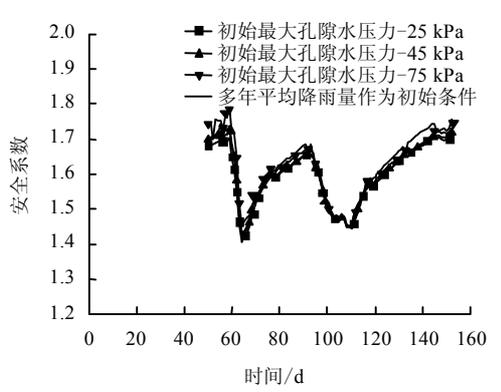
(a) 考虑 20 d 前期降雨



(b) 考虑 30 d 前期降雨



(c) 考虑 40 d 前期降雨



(d) 考虑 50 d 前期降雨

图 8 考虑不同前期降雨和不同初始条件时砂土边坡安全系数随时间变化关系

Fig.8 Influence of initial conditions on safety factor with time considering different antecedent rainfalls

### 3.2.2 初始条件对黏土边坡稳定性影响

采用类似的方法可得不同前期降雨条件下黏土边坡安全系数，结果见图 9。可以看出：①与图 8 中砂土边坡结果类似，考虑前期降雨的天数越多，不同初始条件得到的安全系数曲线越接近。②初始条件对黏土边坡的影响大于砂土边坡，即使考虑前期降雨的天数超过 50 d 时，不同初始条件对应的黏土边坡安全系数变化曲线只是比较接近，但并不像图 8(d)中那样几乎重合。③将多年平均降雨量对应稳态渗流场作为初始条件的计算结果与初始最大孔隙水压力为-25 kPa 结果几乎重合，由此可见，二者对边坡稳定性影响规律基本相同，这与图 7 中得出的结论也是一致的。

对比砂土和黏土边坡在不同初始条件下的安全

系数变化曲线可知，初始条件对不同土体边坡稳定性影响程度是不一样的，选取合适的初始条件可以得到合理的边坡稳定性分析结果。在相同气候条件下对具有不同渗透系数的土质边坡进行非饱和渗流分析时，假定一个相同的最大孔隙水压力作为初始条件进行渗流分析是不合理的。上述分析中，在相同的多年平均降雨条件下，砂土和黏土边坡对应的稳态渗流场分别与初始最大孔隙水压力-45 kPa 和 -25 kPa 相近，其原因在于不同类型土体的储水能力不同，在相同气候条件下，黏土将比砂土更加湿润。此外，将多年平均降雨量对应的稳态渗流场作为初始条件进行非饱和渗流分析具有一定的合理性，更加符合实际情况。

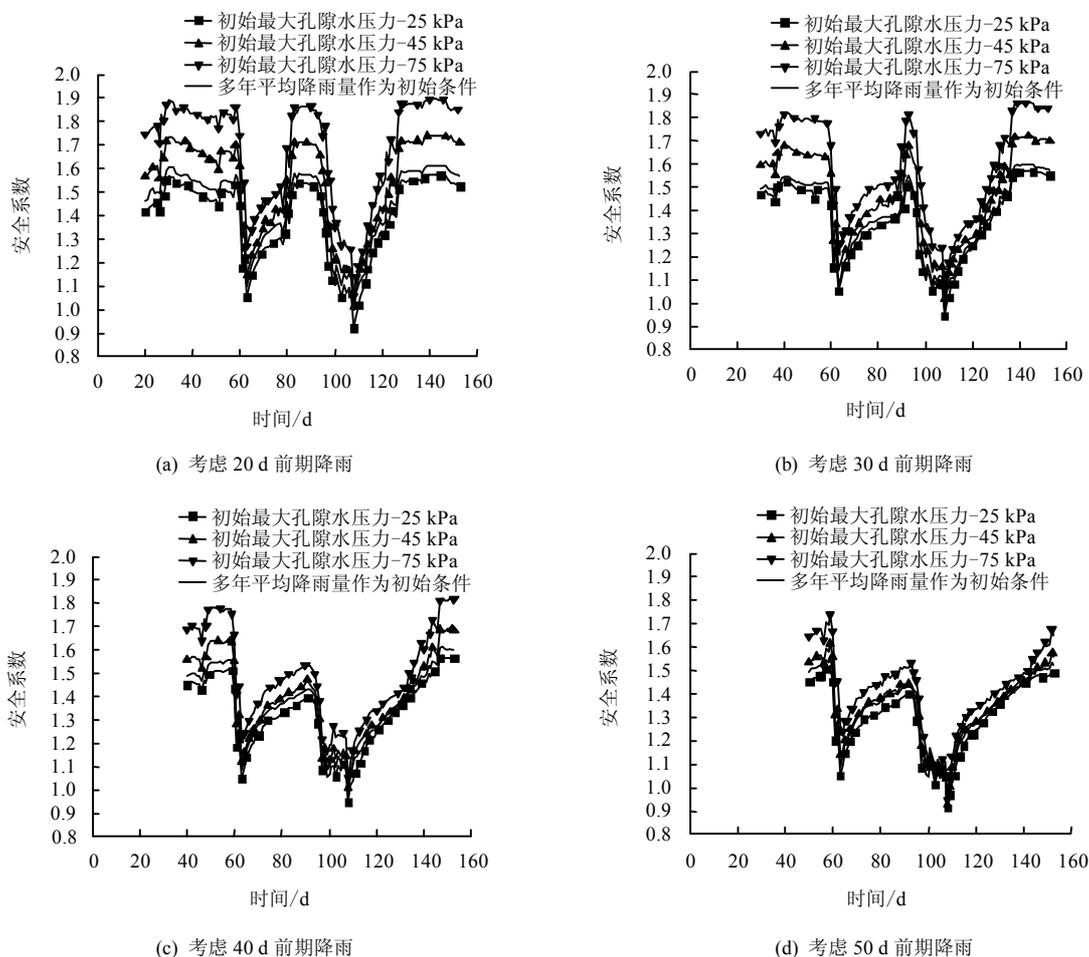


图 9 考虑不同前期降雨和不同初始条件时黏土边坡安全系数随时间变化关系  
Fig.9 Influence of initial conditions on safety factor with time considering different antecedent rainfalls

### 3.3 前期降雨对边坡稳定性影响

#### 3.3.1 前期降雨对砂土边坡稳定性影响

基于上述分析，下面将多年平均降雨量对应的稳态渗流场作为初始条件，对砂土边坡进行稳定性

分析。图 10 给出了不同前期降雨天数对应的砂土边坡安全系数随时间变化曲线，为了对比，还给出了每日降雨量柱状图。由图结果可以看出：

(1) 当前期降雨天数在 30 d 以上时，安全系数

随时间的变化趋于稳定，这表明要得到较合理的砂土边坡不同时刻的安全系数，应当考虑 30 d 以上的前期降雨。

(2) 降雨过程中边坡安全系数最小的时刻是工程师最关心的问题，由图中可以看出第 63 天和第 108 天对应的安全系数最低。当考虑的前期降雨天数超过 15 d 时，代表最低安全系数的点几乎重合，这意味着考虑 15 d 以上的前期降雨得到的最低安全系数是稳定的，相反考虑的前期降雨天数低于 15 d 计算的安全系数将不能反映边坡实际安全度。因此，对于砂土边坡，工程设计中建议考虑 15 d 以上的前期降雨。这里需要注意的是，对于砂土边坡应当再考虑一下这 15 d 前面 5 天的降雨情况。如果这 5 d 的平均降雨量小于该地区年平均降雨量，则可以不考虑这 5 d 的降雨，反之则应当把这 5 d 的降雨加入计算，这是因为砂土更易于吸排水，大于年平均降雨量的降雨将显著影响砂土的含水状况，为了得到边坡的稳定安全系数，所以要考虑更多前期降雨天数。如在计算第 63 天边坡对应的安全系数时，前期有降雨的天数并不多，边坡在考虑前期降雨天数超

过 15 d 时，安全系数已经稳定；而在计算第 108 天边坡对应的安全系数时，之前的 20 多天都有降雨，且每天的降雨量都超过了年平均降雨量，虽然考虑 15 d 前期降雨时边坡安全系数已趋于稳定，但考虑的前期降雨天数达到 20 d 时才非常稳定。

(3) 前期降雨对于砂土边坡安全系数影响整体较小，考虑不同前期降雨天数时的安全系数相差不大，尤其是在第 1 天至第 60 天之间降雨较小时，前期降雨的影响更加有限。

(4) 对于砂土边坡来说，比较第 61 天附近和第 101 天附近两场强降雨的边坡稳定性分析结果，可以看出，这两场降雨的总降雨量分别为 300 mm 和 390 mm，总降雨量相差并不大，前者的特点是降雨强度大且历时短，后者则降雨强度较小且历时长。考虑和不考虑第 61 天附近的降雨时，边坡安全系数最大相差 0.25，而第 101 天左右的降雨对应的安全系数最大相差为 0.22，后者虽然降雨总量大于前者，但后者对边坡稳定性影响小于前者。由此可见，在降雨总量相差不大情况下，短历时高强度降雨对砂土边坡稳定性影响更大。

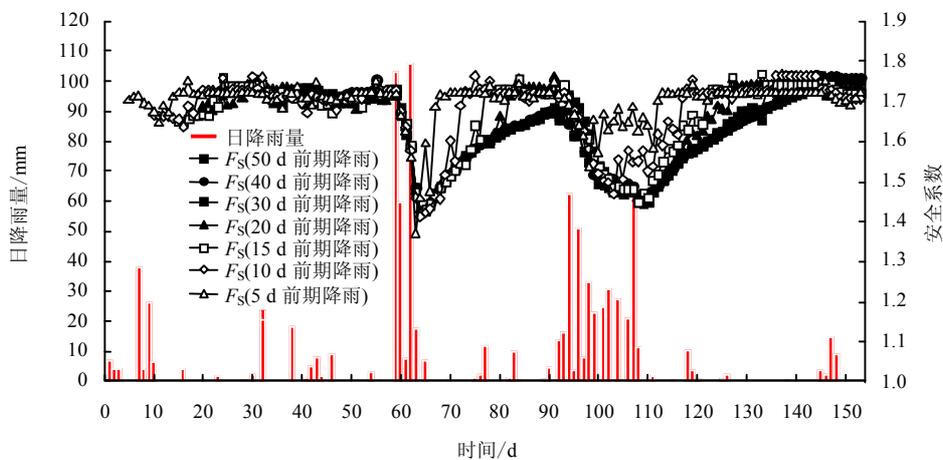


图 10 考虑不同前期降雨天数时砂土边坡安全系数随时间变化曲线

Fig.10 Safety factors for sand slope considering different antecedent rainfall days

图 10 中边坡出现最低安全系数的时刻并不是降雨过程中日降雨量最大时刻，而是在一场降雨结束的时刻，可见边坡最低安全系数与最大日降雨量并无直接关系。图 11 给出了不同天数累积前期降雨量与砂土边坡安全系数关系。可以看出，安全系数曲线与 10 d 累积前期降雨量曲线变化趋势最一致，即累积前期降雨量最大时，边坡安全系数最低，累积前期降雨量减少时，边坡安全系数逐渐增大，可见边坡安全系数变化与 10 d 累积前期降雨量关系更

为密切。从 10 d 的累积前期降雨量来看，第 61 天左右强降雨的累积前期降雨量大于第 101 天左右强降雨，其对应的最小安全系数也更低。由此可见，对于砂土边坡，可以将 10 d 累积前期降雨量作为判断最小安全系数出现时刻的一个依据。

### 3.3.2 前期降雨对黏土边坡稳定性影响

采用类似的方法，图 12 给出了不同前期降雨天数对应的黏土边坡安全系数随时间变化曲线。同样，为了对比，还给出了每日降雨量柱状图。可以看出：

(1) 当前期降雨天数在 40 d 以上时, 安全系数随时间的变化趋于稳定, 这表明要得到较合理的黏土边坡不同时刻的安全系数, 应当考虑 40 d 以上的前期降雨。

(2) 与砂土边坡一样, 第 63 天和第 108 天对应的安全系数最低。当考虑的前期降雨天数超过 15 d 时, 代表最低安全系数的点几乎重合, 这意味着考虑 15 d 以上的前期降雨得到的最低安全系数是稳定的, 相反考虑的前期降雨天数低于 15 d 计算的安全系数将不能反映边坡实际安全度。因此, 对于黏土

边坡, 工程设计中建议也考虑 15 d 以上的前期降雨。

(3) 从整体趋势来看, 考虑不同前期降雨天数的黏土边坡安全系数间差别大于砂土边坡, 前期降雨对黏土边坡的影响较砂土边坡要大。

(4) 比较第 61 天附近和第 101 天附近两场强降雨的边坡稳定性分析结果, 可以看出, 第 101 天附近的降雨对边坡稳定性影响大于第 61 天附近的降雨。可见, 在降雨总量相差不大情况下, 历时长的前期降雨对黏土边坡稳定性影响更大, 这与砂土边坡明显不同。

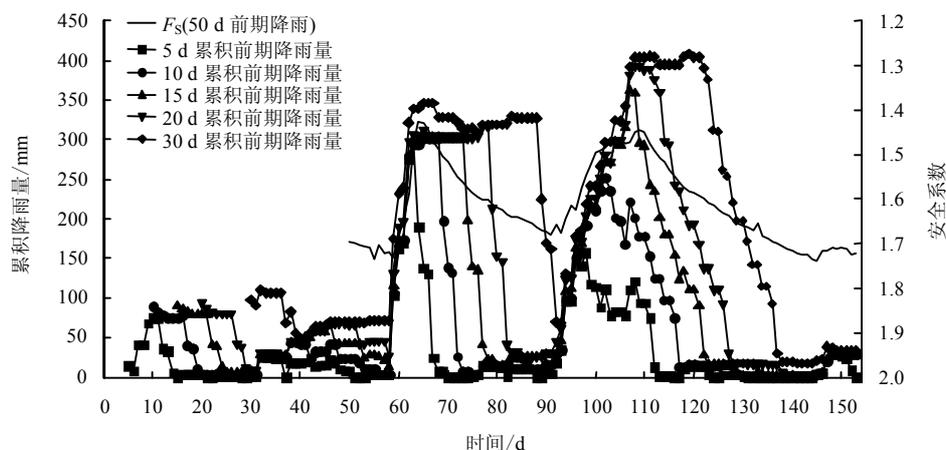


图 11 不同天数累积前期降雨量对砂土边坡安全系数的影响

Fig.11 Effect of cumulative antecedent rainfall on safety factor of sand slope

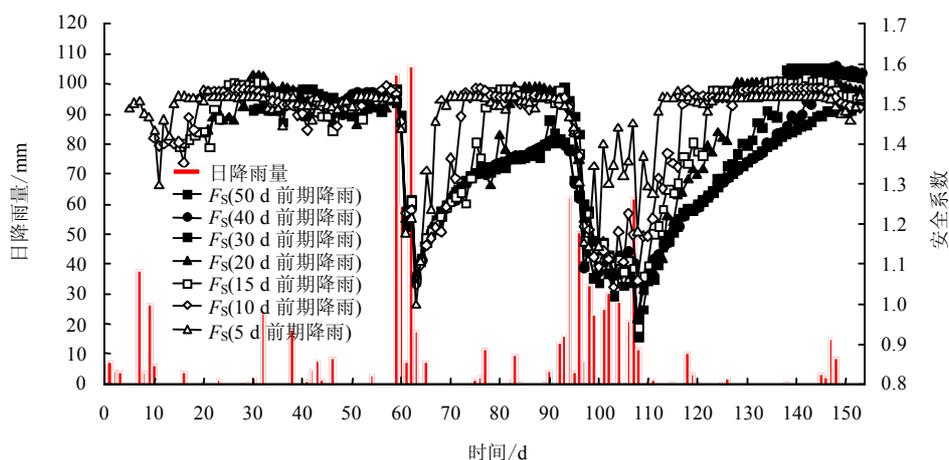


图 12 考虑不同前期降雨天数时黏土边坡安全系数随时间变化曲线

Fig.12 Safety factors for clay slope considering different antecedent rainfall days

图 13 给出了不同天数累积前期降雨量与黏土边坡安全系数关系。可以看出: 安全系数曲线与 15 d 累积前期降雨量曲线变化趋势最一致, 即累积前期降雨量最大时, 边坡安全系数最低, 累积前期降雨量减少时, 边坡安全系数逐渐增大, 可见边坡

安全系数变化与 15 d 累积前期降雨量直接关系更为密切。从 15 d 的累积前期降雨量来看, 第 101 天左右强降雨的累积前期降雨量大于第 61 天左右强降雨, 其对应的最小安全系数也更低。由此可见, 对于黏土边坡, 可以将 15 d 累积前期降雨量作为判断

最小安全系数出现时刻的一个依据。

对比砂土和黏土边坡结果可以看出, 边坡土体

渗透系数越低, 边坡稳定性受前期降雨的影响越大、影响时间也越长。

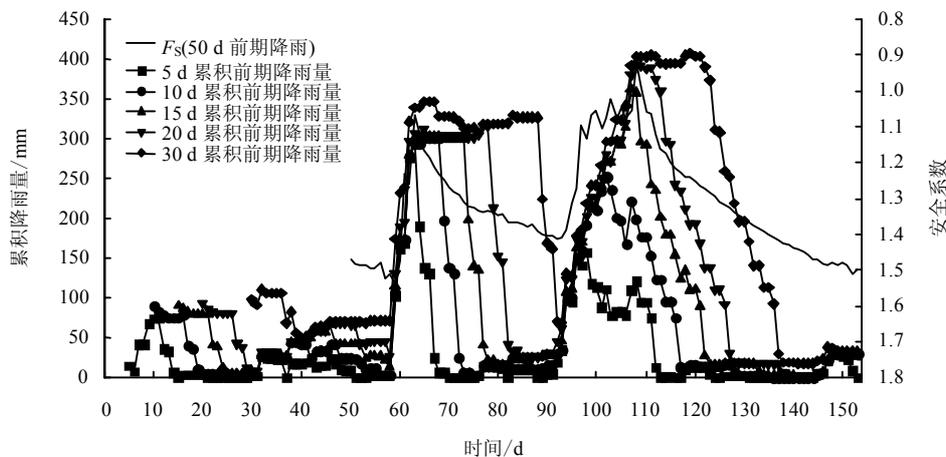


图 13 不同天数累积前期降雨量对黏土边坡安全系数的影响

Fig.13 Effect of cumulative antecedent rainfall on safety factor of clay slope

## 4 结 论

(1) 非饱和渗流计算中的初始条件对边坡安全系数影响很大, 且对不同土体影响程度不同, 建议将多年平均降雨量对应的稳态渗流场作为初始条件进行非饱和渗流分析。

(2) 边坡土体渗透系数越低, 边坡稳定性受前期降雨的影响越大、影响时间也越长。对砂土(黏土)边坡, 当前期降雨天数考虑到 30 d (40 d) 以上时, 前期降雨对边坡稳定性影响很小。要得到较合理的砂土(黏土)边坡不同时刻的安全系数, 应当考虑 30 d (40 d) 以上的前期降雨。

(3) 考虑降雨过程中安全系数最小的时刻, 考虑的前期降雨天数低于 15 d 计算的安全系数不能很好地反映边坡实际安全度。砂土和黏土边坡稳定性分析时建议考虑 15 d 以上的前期降雨, 对于砂土边坡还应根据这 15 d 前面 5 d 的降雨情况确定是否需要增加计算天数。

(4) 不同土体边坡受前期降雨类型影响程度不同, 在降雨总量相同情况下, 短历时高强度前期降雨对砂土边坡稳定性影响更大, 而长历时低强度前期降雨对黏土边坡稳定性影响更大。

(5) 边坡安全系数与累积前期降雨量之间存在一定的关系, 累积前期降雨量可以作为判断边坡最小安全系数出现时刻的依据。三峡库区砂土边坡出现最小安全系数时刻与 10 d 累积前期降雨量最大的时刻较为吻合, 而黏土边坡则与 15 d 累积前期降雨

量最大的时刻较为吻合。

## 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-bing, LI Dian-qing. Advances in rainfall-induced landslides mechanism and risk mitigation[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(5): 477—487.
- [2] BRAND E W, PREMCHITT J, PHILLIPSON H B. Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides. Toronto: Canadian Geotechnical Society, 1984: 377—384.
- [3] BRAND E W. Slope instability in tropical areas[C]//Proceedings of the 6th International Symposium on Landslides. Christchurch, New Zealand: A. A. Balkema, 1992: 2031—2051.
- [4] PITTS J. An investigation of slope stability on the NTI campus, Singapore[R]. Singapore: Nanyang Technological Institute, 1985.
- [5] COROMINAS J, MOYA J. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain[J]. *Geomorphology*, 1999, 30(1—2): 79—93.
- [6] ALEOTTI P. A warning system for rainfall-induced

- shallow failures[J]. **Engineering Geology**, 2004, 73(3): 247—265.
- [7] TAN S B, TAN S L, LIM T L. Landslide problems and their control in Singapore[C]//Proceedings of the 9th Southeast Asian Geotechnical Conference. Bangkok, Thailand: Southeast Asian Geotechnical Society, 1987: 25—36.
- [8] WEI J, HENG Y S, CHOW W C, et al. Landslide at Bukit Batok sports complex[C]//Proceedings of the 9th Asian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Bangkok, Thailand: Rotterdam, 1991: 445—448.
- [9] 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.
- [10] LUMB P. Slope failures in Hong Kong[J]. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, 1975, 8(1): 31—65.
- [11] 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.
- [12] RAHARDJO H, LI X W, TOLL D G. The effect of antecedent rainfall on slope stability[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2001, 19(3): 371—399.
- [13] GUZZETTI F, PERUCCACCI S, ROSSI M. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe[J]. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 2007, 98(3): 239—267.
- [14] NG C W W, WANG B, TUNG Y K. Three-dimensional numerical investigations of groundwater responses in an unsaturated slope subjected to various rainfall patterns[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2001, 38(5): 1049—1062.
- [15] 罗红明. 降雨入渗条件下滑坡非饱和渗流特性与稳定性研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2008.
- [16] RAHARDJO H, ONG T H, REZAUR R B. Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2007, 133(12): 1532—1543.
- [17] 中国气象局国家气象信息中心. 中国气象科学数据共享服务网 [EB/OL]. [2012-1-30] <http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp>.
- [18] LEONG E C, RAHARDJO H. Review of soil-water characteristic curve equations[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(12): 1106—1117.
- [19] LEONG E C, RAHARDJO H. Permeability functions for unsaturated soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(12): 1118—1126.
- [20] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- [21] 詹良通, 李鹤, 陈云敏, 等. 东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析[J]. **岩土力学**, 2012, 33(3): 872—880.
- ZHAN Liang-tong, LI He, CHEN Yun-min, et al. Parametric analyses of intensity-duration curve for predicting rainfall-induced landslides in residual soil slope in Southeastern coastal areas of China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 872—880.
- [22] GEO-SLOPE International Ltd. Seepage modeling with SEEP/W 2007[M]. Calgary, Alberta, Canada: Geo-Slope International Ltd., 2010.