

降雨入渗对非饱和土边坡稳定性影响的参数研究

宋亚亚¹, 何忠意¹, 朱佩宁², 卢廷浩^{3,4}

(1. 广东天信电力工程检测有限公司, 广东 广州 510663;

2. 中国能源建设集团 广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

3. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

4. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究饱和渗透系数与土水特征曲线对降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定性的影响, 利用GeoStudio软件进行数值计算, 对不同工况下的非饱和土边坡进行瞬态渗流分析与稳定性分析。研究表明, 饱和渗透系数是影响非饱和土渗透性的关键因素, 其对边坡稳定性与边坡破坏形式有重要影响。应力作用与干湿循环对非饱和土渗透函数形态的影响与其对土水特征曲线形态的影响一致, 考虑其影响对于非饱和土边坡稳定性计算与评价是更安全合理的。

关键词: 非饱和土; 降雨入渗; 饱和渗透系数; 土水特征曲线; 边坡稳定性

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)03-0072-07

Parametric Study of Effects of Rain Infiltration on Unsaturated Slopes

SONG Yaya¹, HE Zhongyi¹, ZHU Peining², LU Tinghao^{3,4}

(1. Guang Dong Tianxin Electric Power Engineering Test Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510663, China;

2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 510663, China;

3. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Dam Engineering of the Ministry of Education, Hohai University,

Nanjing, Jiangsu 210098, China; 4. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In order to analyze the influence of saturation permeability coefficient and SWCC on slope stability of unsaturated soil under rain infiltration, five slope models were established and a series of transient seepage and stability calculations were carried out based on Geo-studio. The results show that saturation permeability is an important factor influencing the permeability of soil which has great impacts on the slope stability and the damage form of slope. Besides, the influence of the vertical stress and wetting-drying cycle on the form of penetration function is same to SWCC. It is safer and more reasonable to consider this influence in slope stability evaluation.

Keywords: unsaturated soil; rain infiltration; saturation permeability coefficient; SWCC; slope stability

滑坡是山区中常见的一种自然灾害, 尤其在雨季, 降雨入渗是诱发边坡失稳的一个主要外因, 它通过增加土体自重和促使滑坡体抗剪强度降低等多方面来影响边坡的稳定性。深入研究降雨入渗条件下的边坡稳定性及其破坏规律对于滑坡灾害的预防有重要意义。

边坡稳定性与降雨类型、降雨强度、降雨历时、边坡形态与土体渗透能力等多种因素有关。Lumb^[1]建立了一个简单的一维垂直入渗模型并, 考

虑了边坡初始条件、降雨强度、降雨持时、土体渗透能力以及坡面防渗等多种因素, 主要分析了降雨过程中湿润锋的发展规律以及降雨停止后边坡内含水率的再分布过程。Alonso等^[2]研究了土体类型、降雨强度、降雨时间和土体渗透性等因素对边坡稳定性的影响。研究表明, 土体的饱和渗透系数与土水特征曲线的形状会影响降雨过程中边坡安全系数随时间变化的关系; 低渗透性与高强度降雨的组合将导致降雨后边坡安全系数显著降低。Tami

等^[3]通过室内试验与数值模拟相结合的方式研究了土水特征曲线的滞后性对降雨入渗过程的影响。研究表明,土水特征曲线的滞后特性对于降雨过程中边坡坡内孔隙水压力分布具有明显影响。吴宏伟等^[4]根据香港地区的降雨特征与地下水位分布特点,利用有限元方法系统地探讨了降雨强度、降雨持时、土体渗透能力以及隔水层埋藏深度等因素对边坡瞬态渗流及稳定性的影响。姚海林等^[5]针对非饱和和膨胀土边坡进行了瞬态渗流的数值计算,研究了降雨强度、土体渗透能力以及边坡表面裂缝对边坡稳定性的影响。

降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定性计算的关键在于准确计算土体中基质吸力或含水率。土水特征曲线是指土中吸力与含水率之间的关系曲线,反映了非饱和土在吸力作用下的持水能力。通过土水特征曲线可以计算非饱和土的渗透系数,结合饱和渗透系数可以推算非饱和土的渗透能力。土水特征曲线受很多因素的影响,如土体类型、矿物成分、孔隙结构、应力状态和干湿循环等^[6-8]。

目前,研究降雨入渗对边坡稳定性的影响,大都是考虑雨型、雨量、降雨历时等外界因素,对于土体本身持水特性对边坡稳定性影响的研究尚少。本文利用 GeoStudio 软件中的 SEEP/W 模块和 SLOPE/W 模块对不同工况下的非饱和土边坡进行数值计算,研究了土水特征曲线与饱和渗透系数对降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定性的影响。

1 降雨入渗条件下的边坡渗流分析

与饱和土渗流相同,非饱和土渗流也符合达西定律,只不过非饱和土的渗透系数不仅与土体的孔隙结构有关,还取决于土体中吸力大小,是一个与含水率有关的函数。非饱和土渗流二维偏微分方程如下所示^[9]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = m_v \left(\frac{\partial u_w}{\partial t} \right) \quad (1)$$

式中: h 为总水头; k_x 和 k_y 分别为水平和垂直方向的渗透系数; m_v 为土水特征曲线的减湿率; u_w 为孔隙水压力; t 为时间。式(1)是高度非线性的偏微分方程,其中渗透系数不仅与含水率有关,而且随空间和时间的变化而变化。本文中假设土体为各向同性材料,即 $k_x = k_y$,并且渗流分析时不考虑土体的变形问题。

渗透系数是描述土体渗透性的重要指标,它的准确性直接影响渗流控制方案的合理性和渗流计算

的正确性。非饱和土的渗透系数可以通过稳态渗透试验和瞬态渗透试验两种方法直接量测,但是由于试验具有一定难度和不确定性,这种方法并不常用,通常利用饱和渗透系数和土水特征曲线间接推导出非饱和土的渗透系数。SEEP/W 模块中提供了两种通过土水特征曲线间接推测非饱和渗透系数的方法,分别是 FX 模型方法和 VG 模型方法。在建模过程中,只需选择所需的模型类型并输入相应的土水特征曲线参数和饱和渗透系数就可以获得相应的渗透函数。本文使用的是 FX 模型方法。

另外,降雨入渗的非饱和渗流分析中必须考虑的一个问题就是降雨过程中入渗量的大小,在数值计算中通常把入渗量作为边界条件来处理。边界条件的设定对于数值模拟的计算结果非常重要,一般有以下三种边界条件^[10-11]:(1) 流量边界条件,此时降雨强度小于土体的饱和渗透系数,假设降雨全部渗入土中;(2) 水头边界条件,降雨强度大于土体的饱和渗透系数,此时入渗边界处形成积水,根据非饱和渗透系数和水力坡降计算渗入土中的水量;(3) 混合边界条件,当降雨强度小于土体饱和渗透系数时,降雨全部入渗,此时边界条件采用边界流量条件,否则,采用水头边界条件。本文采用的是第一类边界条件,即流量边界条件。

2 降雨入渗条件下边坡稳定性分析

降雨入渗导致土体自重增加和土体抗剪强度降低,从而导致边坡失稳。考虑降雨入渗条件下的边坡稳定性实际上可以看作是在计算中考虑了孔隙水压力变化对边坡稳定性的影响。而在降雨过程中,土体的孔隙水压力分布或者说含水率分布是随着时间和空间而变化的,这就需要在明确降雨条件下土体渗流场的基础上进行边坡稳定性分析。

目前,边坡稳定性分析中应用最广泛的还是极限平衡法,许多学者在传统极限平衡法的基础上做了大量有益的探索和改进。使用极限平衡法分析边坡稳定性时,一般采用 Fredlund 等^[12]提出的双应力变量抗剪强度公式来表征土体强度,见公式(2)。

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \quad (2)$$

通过土水特征曲线可以将其与含水率直接联系起来。将它们应用到简化毕肖普法中便可以推出安全系数为^[13]:

$$F_s = \frac{\sum \frac{1}{m_{ai}} (W_i \tan \varphi' + u_{si} b \tan \varphi_b + c' b)}{\sum W_i \sin \alpha_i} \quad (3)$$

式中： c' 和 φ' 分别是滑动面上土条的有效黏聚力和有效内摩擦角； φ_b 是与吸力相关的摩擦角； u_{si} 为土条处的负孔隙水压力即吸力； W_i 是土条的重量； α_i 是土条底面与水平方向夹角； b 是土条宽度。当 u_{si} 为正值即土体饱和时，式中 $\varphi_b = \varphi'$ ，公式即转化为常规毕肖普法的安全系数公式。

SLOPE/W 模块是 GeoStudio 软件中专门用来计算边坡稳定性的程序，它的计算原理是极限平衡法，其中用到的抗剪强度公式即为式(2)。在进行降雨条件下边坡稳定性分析时，首先导入利用 SEEP/W 模块计算得到的渗流场，然后输入土体的相关参数后即可进行安全系数计算。本文进行边坡稳定性计算用到的是毕肖普法。

3 案例分析

3.1 计算模型的建立

为了研究土水特征曲线和饱和渗透系数对降雨条件下非饱和土边坡渗流和稳定性的影响，设计了两个边坡模型和五个降雨模拟方案。

3.1.1 边坡模型

某黏性土边坡 BC 高 15 m，坡度为 1:1.4，坡顶 AB 宽 20 m，坡底 CD 宽 15 m，地下水位在坡底地面以下 5 m 处。边坡的几何模型和有限元网格划分见图 1。其中，为了考虑应力作用对土体渗透性的影响，将边坡划分为三个土层，以分别使用不同竖向应力作用下的土水特征曲线来推算各土层土体的渗透函数，即边坡模型 2。第一层土厚度为 1 m，接下来的 2 m 作为第二层，其余为第三层。

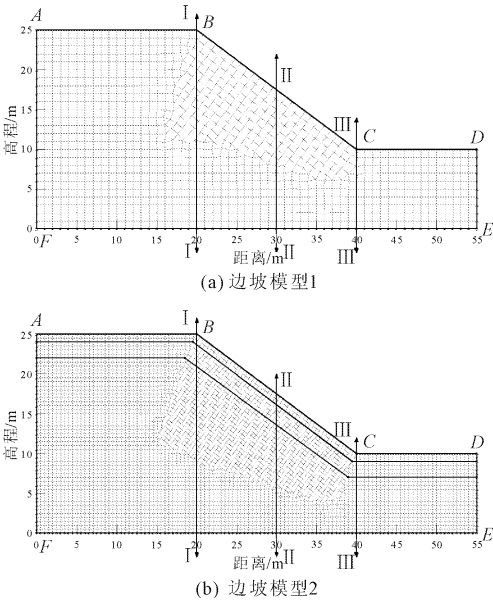


图 1 边坡几何模型和有限元网格划分

合适的网格划分对于瞬态渗流分析十分重要。GeoStudio 软件中所有网格都是自动生成的，对于每一个几何区域可以自主选择网格形式和设定网格尺寸。网格有三角形网格、四边形网格和三角形与四边形混合网格三种形式，本文模型中使用的是第三种网格。另外，模型 1 网格大小为 1 m，共有 1 076 个节点和 1 013 个网格。为了减小由于土层渗透性不同而引起的数值计算发散，模型 2 网格划分加密，网格大小为 0.5 m，共有 4 137 个节点和 4 012 个网格。

3.1.2 数值计算方案

为了得到降雨之前边坡孔隙水压力分布情况，首先进行地下水位在 0 米时静水条件下的稳态渗流分析，然后以该条件下的孔隙水压力分布作为初始条件进行降雨条件下的瞬态渗流计算。模型边界条件为：模型两侧为 0 流量边界，模型底部为地下水位，边坡表面为降雨入渗边界。由方案可知，降雨过程中，降雨强度小于土体饱和渗透系数，因此本文的降雨入渗边界类型为流量边界条件。

本文设计了 5 个降雨模拟方案，详见表 1。其中，方案 1 与方案 2、方案 1 与方案 3、方案 1、方案 4 与方案 5 分别用于研究干燥与浸湿状态下的土水特征曲线、不同应力状态下的土水特征曲线与饱和渗透系数对降雨条件下边坡稳定性分析的影响。

各方案中的土水特征曲线取自文献[6]，土水特征曲线参数见表 2。在 SEEP/W 程序中，使用 FX 渗透函数模型并选择相应的土水特征曲线即可获得所需的渗透函数曲线，见图 2。渗流计算完成后使用 SLOPE/W 程序进行边坡稳定性计算。计算中需要的土体强度参数如下：有效黏聚力 $c' = 24$ kPa；有效内摩擦角 $\varphi' = 22^\circ$ ；与吸力相关的内摩擦角 $\varphi^b = 16^\circ$ ；土的饱和重度 $r_{sat} = 19$ kPa。

3.2 计算结果及分析

为了更直观地了解降雨过程中边坡坡内的孔隙水压力分布情况，选取三个典型剖面 I - I、II - II 和 III - III，分别位于 $x = 20$ m、30 m 与 40 m 处。

3.2.1 初始条件下稳态渗流分析

经过计算可知，五种方案初始条件下的孔隙水压力分布规律相同，如图 3 所示。在静水条件下，土水特征曲线与饱和渗透系数对边坡内孔隙水压力的分布没有影响。这是因为稳态分析不需要定义渗透函数，渗透函数只在瞬态方程中才会用到。图 4 为初始条件下边坡 II - II 剖面孔隙水压力分布，从图 4 中可以看出，负孔隙水压力随着深度增加而线形

减小,即土体中吸力随深度增大而减小,直至模型底部为零。

表 1 降雨模拟方案

方案	土水特征曲线	饱和渗透系数 /(cm·s ⁻¹)	降雨强度 /(mm·h ⁻¹)	降雨持时 /d	边坡模型
1	$p=0$ 的干燥曲线	3.0×10^{-4}	2.16	7	1
2	$p=0$ 的浸湿曲线	3.0×10^{-4}	2.16	7	1
3	$p=0$ 的干燥曲线	3.0×10^{-4}	2.16	7	2
	$p=100$ 的干燥曲线	2.5×10^{-4}			
4	$p=200$ 的干燥曲线	2.0×10^{-4}	2.16	7	1
	$p=0$ 的干燥曲线	6.0×10^{-3}			
5	$p=0$ 的干燥曲线	3.0×10^{-2}	2.16	7	1

表 2 土水特征曲线参数

干湿循环 阶段	竖向应力 p/kPa	a /kPa	n	m
干燥曲线	0	24	1.40	0.291
	100	42	1.32	0.279
	200	72	1.29	0.157
浸湿曲线	0	15	4.45	0.092

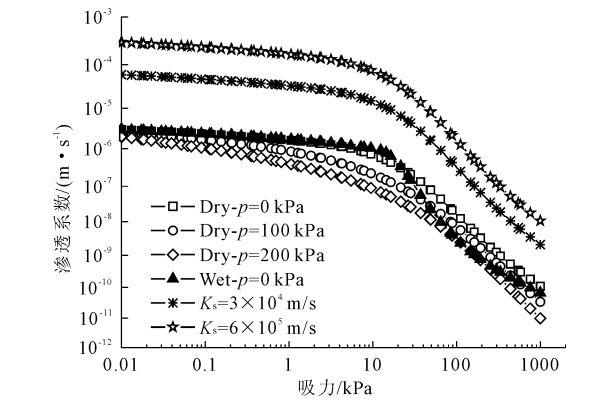


图 2 各方案中由土水特征曲线推测的渗透函数曲线

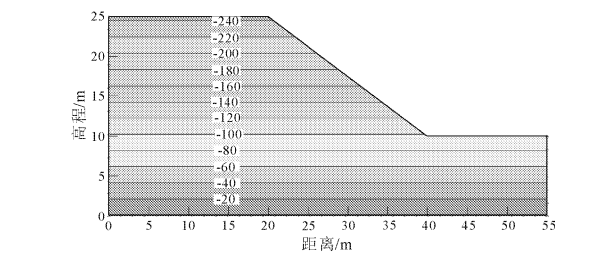


图 3 初始条件下边坡孔隙水压力分布

3.2.2 降雨条件下瞬态渗流分析

图 5—图 9 分别为降雨结束时 5 个降雨模拟方案的边坡孔隙水压力分布图。由图 5—图 7 可以看出,在该降雨量下该 3 个方案中雨水的入渗深度相对较浅,大约在 5 m 左右,降雨入渗对孔隙水压力的影响主要发生在边坡浅层。方案 3 中边坡第二个土

层出现积水,第三层土孔隙水压力变化很小,这是因为两个土层的渗透性相差较大,第三层土的渗水速度小于第二层从而造成积水现象。由图 8—图 9 可以看出,降雨入渗对边坡的影响深度较大,约在 15 m 左右,但是对边坡内孔隙水压力大小的影响较小,尤其是方案 5。这主要是因为该两个方案中土体的渗透性强,雨水可以很快地下渗,由此可以看出饱和渗透系数是决定非饱和土的渗透性的关键指标。降雨结束时方案 5 中边坡顶面孔隙水压力为 -140 kPa,土体吸力仍较大,可以预测方案 5 的边坡安全系数最大。

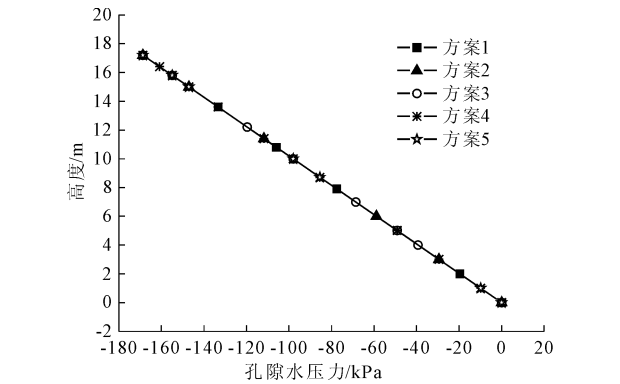


图 4 初始条件下边坡 II - II 剖面孔隙水压力分布图

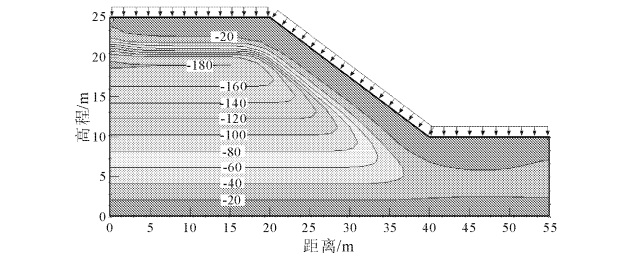


图 5 降雨结束时方案 1 边坡孔隙水压力分布

图 10—图 12 分别为降雨结束时 5 个方案中 I - I、II - II 和 III - III 剖面的孔隙水压力沿深度变化情况。

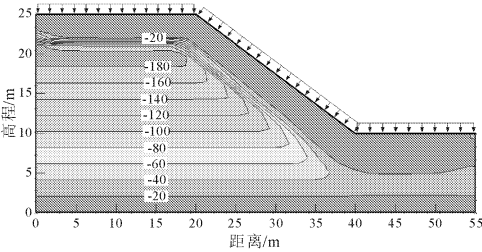


图 6 降雨结束时方案 2 边坡孔隙水压力分布

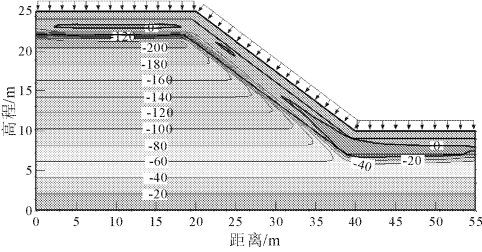


图 7 降雨结束时方案 3 边坡孔隙水压力分布

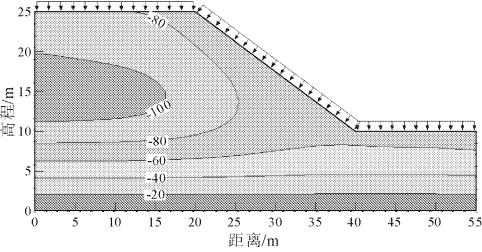


图 8 降雨结束时方案 4 边坡孔隙水压力分布

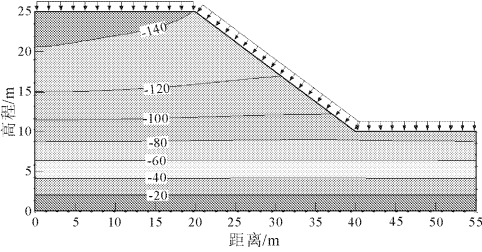


图 9 降雨结束时方案 5 边坡孔隙水压力分布

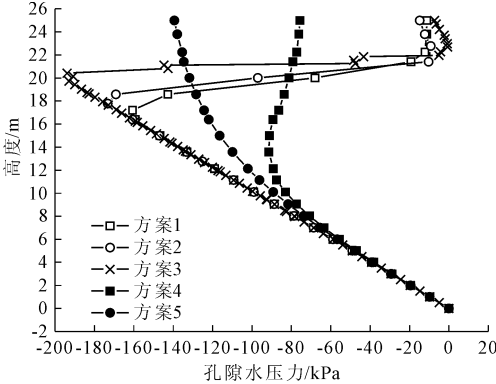


图 10 降雨结束时 I - I 剖面孔隙水压力分布

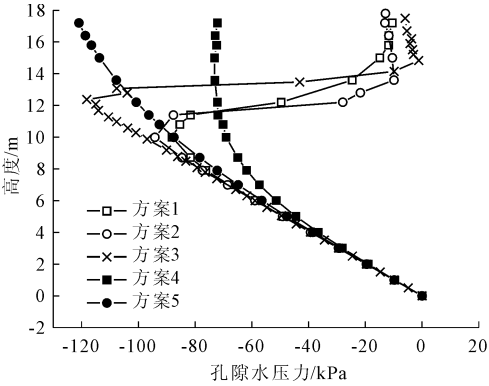


图 11 降雨结束时 II - II 剖面孔隙水压力分布

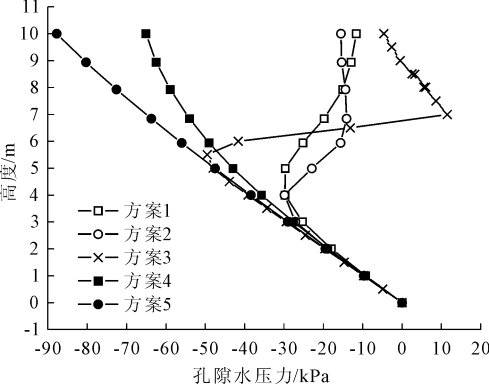


图 12 降雨结束时 III - III 剖面孔隙水压力分布

对比方案 1—方案 3 中三个剖面的孔隙水压力分布图可以看出：

(1) 孔隙水压力随深度变化规律相近,可以分为三个区域,由上至下称之为湿润区、过渡区和初始区^[5]。湿润区是雨水入渗的主要区域,该深度范围内土体孔隙水压力基本相同,土体达到或接近饱和。过渡区范围内土体孔隙水压力随深度迅速增大。初始区是雨水没有渗入的区域,保持土体初始状态。湿润区和过渡区的深度即为雨水的入渗深度。

(2) 相对于降雨前,三个剖面湿润区的孔隙水压力变化都比较大,降雨结束时表层孔隙水压力在 -10 kPa 左右,土体接近饱和。尤其是方案 3,其 III - III 剖面处浅层出现正的孔隙水压力,即该范围内出现了积水。

(3) 孔隙水压力随深度变化规律相近,但是对于同一剖面相同深度处,不同方案的孔隙水压力大小不同。在湿润区范围内,方案 2 和方案 3 的孔隙水压力比方案 1 的孔隙水压力小,即土体吸力小。另外,对 II - II 剖面,3 个方案雨水入渗深度也不相同,分别为 8 m、7 m 与 5 m 左右。而对于同一个方案,III - III 剖面的入渗深度最大,这是因为 III - III 剖面处的初始孔隙水压力最小,即土体吸力最小,土体

的渗透性相对较大,造成雨水入渗较深。

由以上几点可以看出,考虑应力作用和干湿循环对于非饱和土渗流有十分重要影响。在应力和干湿循环作用下,土体的渗透性减小,持水能力增强,这导致雨水下渗速度慢且入渗深度小,雨水聚集在边坡浅层引起土体吸力减小甚至完全丧失。

对于方案 4 和方案 5,孔隙水压力分布形规律相近,但过渡区相对不明显。另外,相同深度处孔隙水压力与雨水入渗深度随着饱和和渗透系数的增大而增大。由方案 5 Ⅲ-Ⅲ剖面的孔隙水压力分布还可以看出,由于土体渗透系数相比降雨强度大得多且边坡底面初始吸力较小,降雨对边坡底面的孔压分布几乎没有影响。由此可以看出饱和和渗透系数是影响非饱和土体导水能力的一个重要因素。

3.2.3 降雨条件下边坡稳定性分析

针对以上 5 种降雨模拟方案,在瞬态渗流分析结果的基础上,利用改进的毕肖普法计算得到了降雨结束时刻边坡的安全系数,见图 13—图 17。

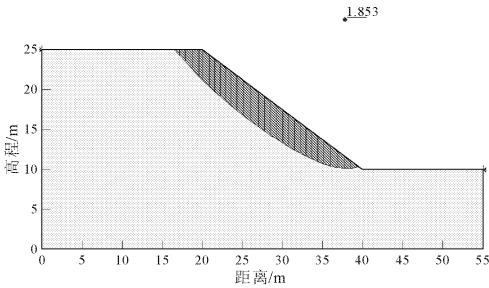


图 13 降雨结束时方案 1 边坡稳定性情况

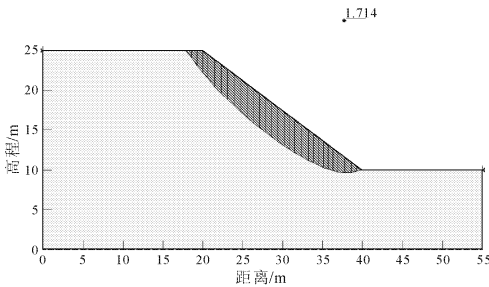


图 14 降雨结束时方案 2 边坡稳定性情况

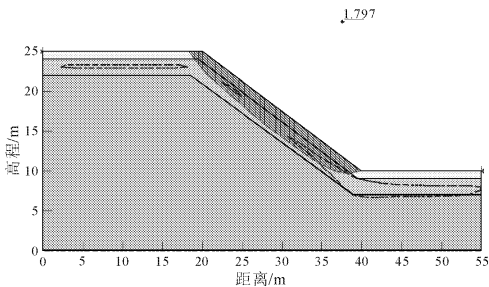


图 15 降雨结束时方案 3 边坡稳定性情况

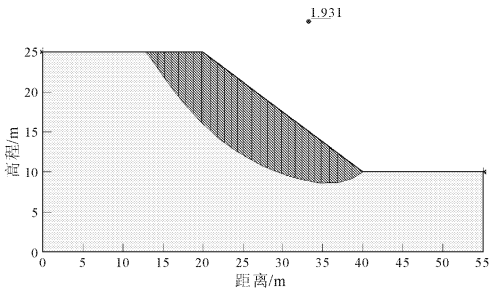


图 16 降雨结束时方案 4 边坡稳定性情况

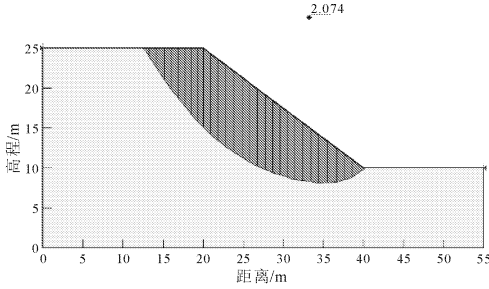


图 17 降雨结束时方案 5 边坡稳定性情况

由图可以看出,方案 1—方案 3 的边坡滑动面位于边坡浅层,且其安全系数较方案 4 和方案 5 小,而方案 4 和方案 5 边坡滑动面较深。也就是说,降雨条件下土体渗透性强的边坡不容易发生滑坡,但是如果发生滑坡,其规模较大,造成的破坏越严重。

图 18 为不同方案的边坡安全系数随降雨时间的变化曲线。由图 18 可以看出,整体而言边坡安全系数随着降雨时间的延长而降低,且降雨结束时方案 1 的边坡安全系数最大。这说明,考虑应力作用和干湿循环的影响对于边坡的稳定性计算及评价是更安全的。

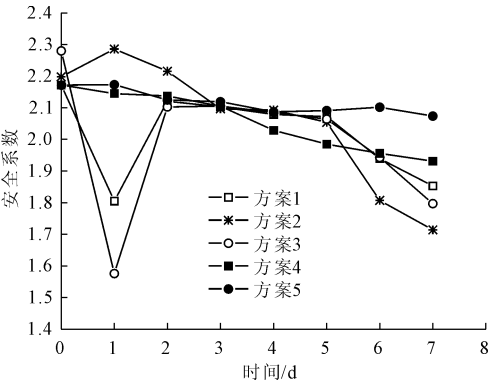


图 18 各方案边坡安全系数与降雨时间关系图

另外,降雨第一天方案 1 和方案 3 的边坡安全系数减小很大,而方案 2 的安全系数却有所增大。分析降雨过程中边坡孔隙水压力分布可知,降雨第一天,边坡表面初始吸力较大,渗透性小,雨水入渗慢而聚集在土层表面形成积水,出现正压区。所不

同的是,方案 1 和方案 3 的积水区出现在边坡顶面,造成坡顶土层重量增大且吸力丧失,边坡下滑力增大而抗剪强度减小,安全系数迅速减小。降雨第二天,雨水渗入深层土体,积水区消失,安全系数随之增大。而对于方案 2,积水区出现在边坡底面距坡脚滑动面有一定距离处。积水区的正孔隙水压力相当于对边坡有一个向上的推力,造成边坡安全系数有所增大。随着时间延长,雨水下渗,积水区消失,安全系数慢慢减小。

对于方案 5,由于此方案的土体渗透系数较大,降雨过程对于边坡坡内孔隙水压力分布影响较小,边坡安全系数有所降低但变化很小。

4 结 论

本文利用 GeoStudio 软件对不同方案下的边坡进行渗流计算与稳定性分析,探讨了土水特征曲线与饱和渗透系数对降雨条件下非饱和土边坡稳定性的影响。

(1) 应力作用与干湿循环对非饱和土渗透函数形态的影响与其对土水特征曲线形态的影响是一致的。

(2) 静水条件下的稳态分析中,不同土水特征曲线和饱和渗透系数对边坡孔隙水压力分布没有影响;降雨条件下的瞬态渗流分析中,降雨结束后,雨水入渗剖面的孔隙水压力分布形式相近,沿深度可以划分为三个区域:湿润区、过渡区和初始区;考虑应力作用和干湿循环的方案中雨水入渗深度小,且浅层孔隙水压力小;饱和渗透系数是影响非饱和土渗透性的重要因素。

(3) 边坡安全系数随着降雨时间的延长而降低;考虑应力作用和干湿循环对于降雨入渗条件下的边坡稳定性计算及评价是更安全的;土体渗透性越好,边坡越安全,但一旦发生滑坡,其滑坡的规模越大,造成的破坏越严重。

参考文献:

- [1] Lumb P. Effect of rainstorm on slope stability[C]//Proceedings of Symposium on Hong Kong soils, Hong Kong: Hongkong University Press, 1962:73-87.
- [2] Alonso E, Gens A, Lioret A, et al. Effect of rain infiltration on the stability of slopes[C]//Proceedings of the First International Conference of Unsaturated Soil, Paris, 1995: 241-249.
- [3] Tami D, Rahardjo H, Leong E C. Effects of hysteresis on steady - state infiltration in unsaturated slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2004, 130(9):956-967.
- [4] 吴宏伟,陈守义,庞宇威.雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J].岩土力学,1999,20(1):1-14.
- [5] 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.
- [6] 宋亚亚.干湿循环作用下非饱和土持水与变形特性研究[D].南京:河海大学,2013.
- [7] Fredlund D G. 非饱和土的力学性能与工程应用[J].岩土工程学报,1991,13(5):24-35.
- [8] Bishop A W, et al. Factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils[C]//Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. London, 1960:503-532.
- [9] Lam L, Fredlund D G, Barbour S L. Transient seepage model for saturated - unsaturated soil systems: A geotechnical engineering approach [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(4):565-580.
- [10] 肖 武.基于强度折减法和容重增加法的边坡稳定分析及工程研究[D].南京:河海大学,2005.
- [11] 朱 伟,陈学东,钟小春.降雨入渗规律的实测与分析[J].岩土力学,2006,27(11):1873-1879.
- [12] Fredlund D G, Morgenstern N R, Wildger R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3):313-321.
- [13] 殷宗泽,等.土工原理[M].北京:中国水利水电出版社,2007.