

DOI: 10.11779/CJGE201409015

考虑潜蚀影响的降雨入渗边坡稳定性分析

张磊^{1, 2}, 张璐璐^{1, 2}, 程演^{1, 2}, 王建华^{1, 2}

(1. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240)

摘要: 在降雨入渗作用下土坡内细颗粒会随渗流发生运移产生潜蚀作用。通过联立颗粒运移方程与非饱和土渗流方程, 结合非饱和土水力特性方程和土体潜蚀本构关系, 建立了渗流潜蚀耦合的边坡稳定性分析模型。采用有限元方法模拟了降雨入渗作用下潜蚀和入渗的相互作用, 分析了初始饱和渗透系数、进气值参数对入渗和边坡稳定性的影响。结果表明: 潜蚀主要发生在湿润锋范围内浅层土体, 潜蚀加速了湿润锋下行速度, 进一步降低边坡稳定性; 饱和渗透系数、进气值是影响渗流潜蚀作用的主要因素; 当降雨入渗强度大于饱和渗透系数时, 饱和渗透系数越大, 潜蚀对入渗和边坡稳定性的影响越显著; 进气值越小, 潜蚀作用对入渗和边坡稳定性的影响越显著。

关键词: 降雨; 边坡稳定性; 潜蚀; 耦合; 数值模拟

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)09-1680-08

作者简介: 张磊(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程数值模拟方面的研究。E-mail: leizhang0912@gmail.com。

Slope stability under rainfall infiltration considering internal erosion

ZHANG Lei^{1, 2}, ZHANG Lu-lu^{1, 2}, CHENG Yan^{1, 2}, WANG Jian-hua^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; Department of Civil Engineering,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Internal erosion and transport of fine particles may be induced by the seepage and infiltration of rainwater into a slope. In this study, the interaction between the transport of fine particles and the infiltration in a soil slope is investigated. A slope stability model considering coupling of seepage and internal erosion is established. The effects of the initial saturated permeability and air-entry value parameter on the slope stability and seepage are studied. The results of an illustrative example show that the internal erosion occurs mainly in the zone within the wetting front, which accelerates the advance of the wetting front and the slope stability is reduced consequently. The initial saturated permeability and air-entry value parameter are the main factors to affect the internal erosion in the slope. When the saturated coefficient of permeability is greater, the effect of the internal erosion on the infiltration and slope stability becomes more significant as long as the rainfall flux is equal or greater than the saturated coefficient of permeability. When the air-entry value of the soil is greater, the influence of the internal erosion on the infiltration and slope stability becomes less significant.

Key words: rainfall; slope stability; internal erosion; coupling; numerical modeling

0 引言

强降雨诱发的滑坡在全球许多地区是主要地质灾害^[1]。国内外研究者在降雨诱发滑坡方面已做了大量的工作^[2-7]。研究表明, 降雨入渗对土坡稳定性的影响主要有3方面^[8-9]: ①入渗减小了地下水位以上非饱和区土体基质吸力, 土体抗剪强度降低, 削弱了斜坡稳定性; ②顺坡向渗流增大了坡体的下滑力; ③渗流作用下细颗粒在孔隙中发生移动并被带出坡体(即渗流潜蚀^[10]), 坡体沿潜蚀通道坍塌形成失稳破坏。就整体而言, 现有的理论研究一般考虑前两种作用。野外测试和模型试验表明, 在降雨入渗作用下细颗粒逐渐由坡顶和坡面向坡脚和土体深处运移^[11-13]。细粒的流

失增加了坡体内局部的孔隙率和渗透性, 使湿润锋更快速下移; 细粒沉积后堵塞渗流通道, 减小局部土体渗透系数, 形成暂态滞水^[14], 改变土体强度, 最终形成滑坡。

目前, 潜蚀相关研究主要集中在管涌的临界水力梯度的确定和土类的判别, 一般通过室内渗透破坏试验和现场观测数据建立临界水力梯度公式或经验方程。研究表明, 潜蚀形成和发展不仅与土的颗粒级配、密实度等基本性质有关, 在很大程度上还取决于水力

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172252); 上海市青年科技启明星计划(12QA1401800); 中组部青年拔尖人才计划项目
收稿日期: 2013-11-29

条件和渗流场特性^[15-17]。斜坡的渗流潜蚀主要发生在砾石土、碎石土等粗粒土坡中,这类土具有级配宽、级配范围广、不均匀系数大、透水性强等特点^[11-13]。渗流场分布形态及渗流集中状况是引起坡体渗流潜蚀的重要原因^[18]。一些研究者将微观颗粒运移的力学分析与宏观多孔介质渗流分析结合,建立了渗流潜蚀分析模型。Sterpi^[19]通过土柱试验确定潜蚀本构关系式,将颗粒的质量守恒方程与饱和土渗流方程联立建立数值分析模型;Dahaghi等^[20]基于质量守恒建立了考虑颗粒运移和沉积的渗透系数随时间变化方程;Vardoulakis等^[21]将渗流潜蚀区域土体看作三相流体介质,基于多相流体质量守恒定律建立了一维饱和渗流潜蚀模型;罗玉龙等^[22]基于溶质运移思想建立了渗流潜蚀管涌耦合模型,跟踪堤基孔隙率和液化细颗粒体积分数的演变过程。

总体来说,现有研究主要针对地下水渗流作用下的潜蚀作用,不涉及降雨入渗条件下非饱和土坡内渗流与潜蚀相互作用,不考虑潜蚀产生的孔隙率变化对土体水力特性的动态影响,也未讨论潜蚀对边坡稳定性的影响。本文将颗粒运移控制方程与非饱和土渗流控制方程联立耦合,考虑渗流潜蚀产生的孔隙率变化对水力特性的动态影响,建立了考虑渗流潜蚀耦合的边坡稳定性分析方法,研究了潜蚀对入渗和边坡稳定性的影响,通过参数分析探讨了非饱和土初始饱和和渗透系数、进气值对潜蚀和边坡稳定性的影响规律。

1 渗流潜蚀耦合的边坡稳定性分析

1.1 颗粒运移控制方程

设土骨架颗粒分为粗颗粒和细颗粒,由于渗流潜蚀作用从土骨架剥离出的部分细颗粒随水运动,成为液化颗粒。液化颗粒密度满足质量守恒方程^[23]:

$$\frac{\partial \rho_{tr}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{tr} v_i)}{\partial x_i} = q_{er} - q_{dp} \quad (1)$$

式中 ρ_{tr} 为单位体积土体液化颗粒密度; v_i 为液化颗粒在 i 方向流速; q_{er} 为单位体积土体内潜蚀产生液化颗粒的速率; q_{dp} 为液化颗粒沉积到土骨架的速率。若 ρ_{r0} 表示土骨架细颗粒初始密度,则土骨架中瞬时细颗粒密度 ρ_r 表示为, $\rho_r = \rho_{r0} - \rho_{tr}$ 。

设液化颗粒随水流动,与水的流速一致。由达西定律,可得液化颗粒在 i 方向流速 v_i 为

$$v_i = q_i / n \quad (2)$$

式中, q_i 为 i 方向的达西渗流速度, n 为孔隙率。将式(2)代入式(1)控制方程可得

$$\frac{\partial \rho_{tr}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_{tr} \frac{q_x}{n} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho_{tr} \frac{q_y}{n} \right) = q_{er} - q_{dp} \quad (3)$$

潜蚀从土骨架剥离出颗粒,由质量守恒可得土骨架密度控制方程^[24]:

$$\frac{\partial \rho_{sk}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{sk} v_i^{sk})}{\partial x_i} = q_{dp} - q_{er} \quad (4)$$

式中, ρ_{sk} 为土骨架密度, v_i^{sk} 为土骨架的运动速度。土骨架密度 ρ_{sk} 为 $(1-n) \rho_s$, 其中, ρ_s 为土颗粒密度。假设土骨架不可移动,即 $v_i^{sk} = 0$ 。由式(4)可得渗流潜蚀作用下土体孔隙率 n 的控制方程:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{q_{er} - q_{dp}}{\rho_s} \quad (5)$$

1.2 非饱和土渗流控制方程

由 Darcy 定律和质量守恒,非饱和土二维非稳态渗流控制方程可表示为^[25]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (6)$$

式中, k_x , k_y 分别为 x , y 方向的非饱和和渗透系数, H 为总水头, θ_w 为体积含水率。非饱和土含水率 θ_w 和渗透系数 k 均为基质吸力(负孔隙水压力)的非线性函数。将式(6)等号右侧表示为孔隙水压力 u_w 的函数,可得

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = \frac{\partial \theta_w}{\partial u_w} \frac{\partial u_w}{\partial t} \quad (7)$$

1.3 土体潜蚀本构模型

Cividini 等^[23]在 Sterpi^[19]颗粒渗流潜蚀土柱试验的基础上,确定了描述水相潜蚀土骨架转变为液化细颗粒的潜蚀本构方程,建立了土体潜蚀本构模型。潜蚀产生液化颗粒的速率 q_{er} 为^[23]

$$q_{er}(t, v) = \beta_{er} |v| [\rho_r(t) - \rho_{fc}(v)] \quad (8)$$

式中 β_{er} 为模型参数; $|v|$ 为流速绝对值; $\rho_r(t)$ 为 t 时刻土骨架中细颗粒密度; $\rho_{fc}(v)$ 为 v 流速条件下土骨架中细颗粒稳态密度。由渗流潜蚀土柱试验, $\rho_{fc}(v)$ 可表示为^[23]

$$\rho_{fc}(v) = \begin{cases} \rho_{r0} - (\rho_{r0} - \rho_{fc}^*) v / v^* & (0 \leq v(t) \leq v^*) \\ \rho_{fc}^* - \alpha_{er} \lg(v / v^*) & (v^* \leq v(t)) \end{cases} \quad (9)$$

式中 ρ_{fc}^* 为土骨架细颗粒最低密度,表示土骨架中不能剥离的细颗粒; v^* 为土骨架细颗粒剥离运移的临界流速; α_{er} 为模型参数。现有试验方法尚不能确定液化颗粒沉积土骨架的速率,本文假设液化颗粒沉积速率为 0,即式(1)中 $q_{dp} = 0$ 。

1.4 非饱和土水力特性方程

非饱和土渗透系数 k 和体积含水率 θ_w 均为基质吸力即负孔隙水压力的函数。体积含水率 θ_w 与基质吸力的关系曲线称为土水特征曲线或持水曲线,渗透系数 k 与基质吸力的函数称为非饱和和渗透系数方程。本

文采用 van Genuchten-Mualem 土水特征曲线方程和非饱和渗透系数方程^[26-27]。

van Genuchten 土水特征曲线可表示为^[26]

$$\theta_w = \begin{cases} \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left\{1 + [\alpha_w(u_a - u_w)]^{n_w}\right\}^{m_w}} + \theta_r & (u_w < 0) \\ \theta_s & (u_w \geq 0) \end{cases} \quad (10)$$

式中 θ_s 为饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; $(u_a - u_w)$ 为基质吸力, 其中, u_w 为孔隙水压力, 小于 0, u_a 为孔隙气压力, 一般假设非饱和土孔隙通道与大气连通, 即 u_a 取为 0; α_w 是进气值 (air entry value, AEV) 倒数相关的参数; n_w 是与超过进气值后土水特征曲线斜率相关的模型参数, 表示非饱和土含水率变化快慢; m_w 是与残余状态相关模型参数, 一般取 $m_w = 1 - 1/n_w$ ^[27]。

非饱和渗透系数 k 可表示为基质吸力 ($-u_w$) 的函数^[26-27]:

$$k = k_s \frac{\left\{1 - (-\alpha_w u_w)^{n_w-1} [1 + (-\alpha_w u_w)^{n_w}]^{-m_w}\right\}^2}{[1 + (-\alpha_w u_w)^{n_w}]^{m_w/2}} \quad (11)$$

式中, k_s 为饱和渗透系数。

由式 (5) 可见, 孔隙率随土骨架中细颗粒剥离发生变化。为考虑渗流潜蚀产生的孔隙率变化与水力特性参数的动态影响, 参考 Kozeny-Carman 渗透系数经验方程^[28-29]:

$$k = \frac{n^3}{c_k (1-n)^2 S^2} \quad (12)$$

式中, c_k 为 Kozeny 常数, S 为固体相比表面积。 k_s 可表示为孔隙率与初始饱和渗透系数的函数:

$$k_s = \frac{n^3}{(1-n)^2} \times \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3} k_{s0} \quad (13)$$

式中, n_0 为初始土体孔隙率, k_{s0} 为初始饱和渗透系数。

1.5 有限元求解

COMSOL Multiphysics 是一个在人机交互式环境下求解多物理耦合过程的有限元分析工具。它以有限元法为基础, 通过求解偏微分方程 (单场) 或偏微分方程组 (多场) 来实现真实物理现象的仿真。利用 COMSOL Multiphysics 软件建立有限元模型, 求解非饱和土渗流和潜蚀耦合控制方程, 即式 (3)、(5) 和 (7)。采用 Galerkin 有限元格式, 将节点液化颗粒密度 ρ_{tr} , 孔隙率 n 和孔隙水压力 u_w 作为节点自由度进行空间离散。运用隐式欧拉向后差分法 (BDF 法) 对控制方程中的时间项进行离散^[30-31]。水力特性参数方程与潜蚀本构模型均为非线性方程, 采用非线性迭代修正阻尼牛顿法求解非线性方程^[32]。有限元方程组可表示 Jacobian 矩阵形式如下:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial R^1}{\partial \rho_{tr}} & \frac{\partial R^1}{\partial n} & \frac{\partial R^1}{\partial u_w} \\ \frac{\partial R^2}{\partial \rho_{tr}} & \frac{\partial R^2}{\partial n} & \frac{\partial R^2}{\partial u_w} \\ \frac{\partial R^3}{\partial \rho_{tr}} & \frac{\partial R^3}{\partial n} & \frac{\partial R^3}{\partial u_w} \end{bmatrix}^{(m)} \begin{bmatrix} \delta \rho_{tr} \\ \delta n \\ \delta u_w \end{bmatrix}^{(m+1)} = - \begin{bmatrix} R^1 \\ R^2 \\ R^3 \end{bmatrix}^{(m)} \quad (14)$$

式中 R^1 , R^2 , R^3 分别为式 (3)、(5) 和 (7) 对应的 Galerkin 残差项; m 为非线性迭代次数。数值计算收敛准则取绝对误差 0.001, 相对误差 0.01。

1.6 边坡稳定性分析

降雨诱发滑坡一般为浅层滑坡, 在均质土坡内滑裂面一般平行于坡面, 可采用无限边坡稳定性分析方法计算边坡稳定性安全系数^[8] (图 1)。

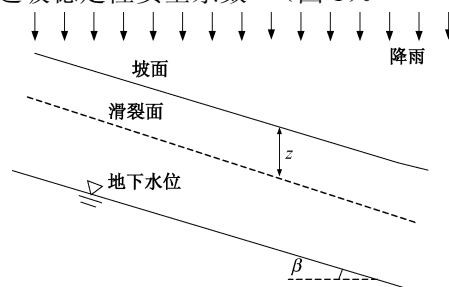


图 1 降雨入渗无限边坡简图

Fig. 1 Typical infinite slope under rainfall infiltration

设滑裂面深度为 z , 则对应稳定安全系数为^[33-34]

$$F_s = \frac{c'}{\gamma_t z \sin \beta \cos \beta} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta} - \frac{u_w(z) \tan \varphi^b}{\gamma_t z \sin \beta \cos \beta} \quad (15)$$

式中 c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; γ_t 为土体总重度; z 为沿竖直方向的滑裂面深度; β 为坡度; $u_w(z)$ 为 z 深度处孔隙水压力, 这里取有限元数值分析所得 z 深度处的孔隙水压力; φ^b 为基质吸力摩擦角, 表示土体抗剪强度随基质吸力的增长率。

2 算例分析

2.1 数值模型和参数

利用 COMSOL 软件建立均质边坡有限元模型, 如图 2 所示。坡长 17.5 m, 坡度 35°, 初始地下水位线 BC 距坡面 6 m。模型划分为 542 个四边形单元。

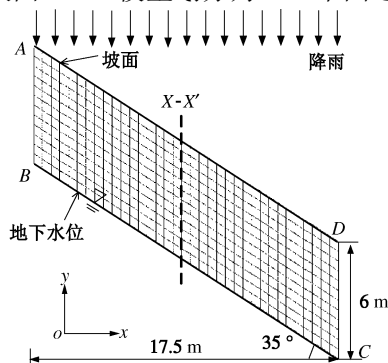


图 2 算例有限元网格

Fig. 2 Finite element model of illustrative example

坡内土体为残积土, 土体抗剪强度、水力特性及潜蚀模型参数参考文献[23, 35], 如表 1 所列。细颗粒初始密度 ρ_{f0} 取土体总密度 ρ_t 的 20%, 土骨架细颗粒最低密度 ρ_{f0}^* 取 ρ_{f0} 的 95%, 即 ρ_t 的 19.3%^[19]。假设土体的 x, y 方向渗透系数相等。

表 1 计算模型参数

Table 1 List of input parameters			
参数	数值	参数	数值
ρ_{f0} / ρ_t	0.2	θ_r	0
ρ_{fco} / ρ_t	0.193	θ_s	0.25
ρ_s / ρ_t	1.184	n_0	0.25
$v^* / (m \cdot s^{-1})$	3.6×10^{-7}	α_w / kPa^{-1}	0.08
α_{er}	4.76	n_w	2
β_{er}	6.95×10^{-3}	$\beta / (^\circ)$	35
$g / (m \cdot s^{-2})$	9.81	$\varphi' / (^\circ)$	34
R_b	10^3	c' / kPa	2
$q / (m \cdot s^{-1})$	2×10^{-5}	$\varphi^b / (^\circ)$	25
$k_{s0} / (m \cdot s^{-1})$	2×10^{-5}	$\rho_t / (g \cdot cm^{-3})$	2.0

2.2 边界条件

非饱和土渗流控制方程(式(7))对应边界条件如下: AB 、 BC 、 CD 为定水头边界, 水头保持与地下水位相同。坡面 AD 采用入渗边界。给定降雨强度 q , 为确保坡面不产生积水, 坡面 AD 实际入渗强度为^[36]

$$\text{flux} = m_N(u_w)q + m_b(u_w)R_b(-u_w / \gamma_w)。$$
 (16)

式中 flux 为入渗强度; m_N, m_b 为平滑函数(如图 3 所示); R_b 为积水系数, 根据经验取较大数值。式(16)表明, 当坡面 AD 孔压为负时, 实际入渗强度为 q ; 当坡面孔压为正时, 实际入渗强度为负值。通过迭代计算, 使得坡面孔压不超过 0, 即坡面无积水。

颗粒运移控制方程(式(3))边界条件选取如下: AB 、 BC 、 AD 边界液化细颗粒不能流入流出; CD 边界设为液化细颗粒流的自由边界条件, 即在边界 CD 上细颗粒可以自由无约束地移动。

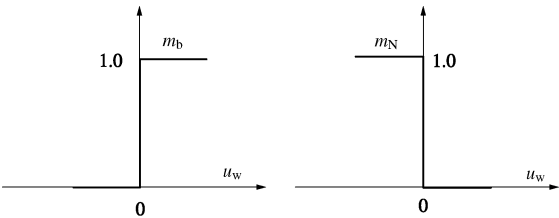


图 3 m_N 和 m_b 函数

Fig. 3 Functions of m_N and m_b

3 潜蚀作用的影响分析

运用本文模型的计算方法, 对前文算例进行分析, 参数选取如表 1 所示。比较单纯入渗和耦合分析的结果, 研究潜蚀对边坡稳定性的影响。

如图 4 所示为 $X-X'$ 剖面孔压分布随降雨入渗变化图。由图 4 可见, 考虑潜蚀影响情况下入渗速度较不考虑潜蚀影响的入渗速度快。降雨入渗 2 h 后, 不考虑潜蚀影响情况下湿润锋的深度为 1.2 m, 考虑渗流潜蚀湿润锋深度达到 1.4 m; 降雨 5 h 后, 不考虑潜蚀影响湿润锋的深度为 2.3 m, 而考虑渗流潜蚀情况下湿润锋深度达到 2.8 m; 降雨 8 h 后, 不考虑潜蚀影响坡内仍有部分区域土体非饱和, 而考虑渗流潜蚀情况下非饱和区已完全饱和。

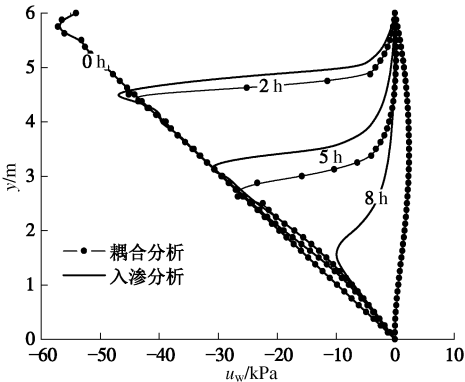
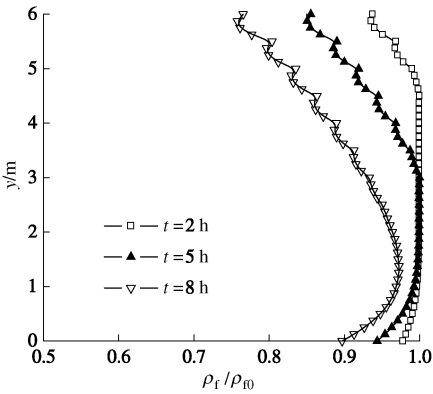


图 4 孔压分布变化图

Fig. 4 Pore-water pressure profiles along cross-section $X-X'$

图 5 为剖面 $X-X'$ 细颗粒含量与土体孔隙率分布随时间变化图。这里采用 ρ_f / ρ_{f0} 百分比表示土骨架细颗粒含量变化。由图可见, 随着降雨时长增加, 细颗粒含量减少, 孔隙率增大。对比图 4 可见, 土体潜蚀主要发生在湿润锋范围内浅层非饱和土体。地下水位处土体接近饱和, 渗流速度也较大, 细颗粒同样也发生一定程度流失, 孔隙率微有增加。因此, 细颗粒浓度在靠近地下水位线处略微有所减小, 相应地, 孔隙率略微有所增加。

图 6 所示为安全系数随假定滑裂面深度的变化图。由图可见, 考虑潜蚀的情况下, 边坡更快达到不稳定状态。降雨 8 h 后, 不考虑潜蚀情况下边坡安全系数仍超过 1.0。若考虑潜蚀作用, 不稳定坡体深度约 2.5 m。



(a) 细颗粒浓度分布变化图

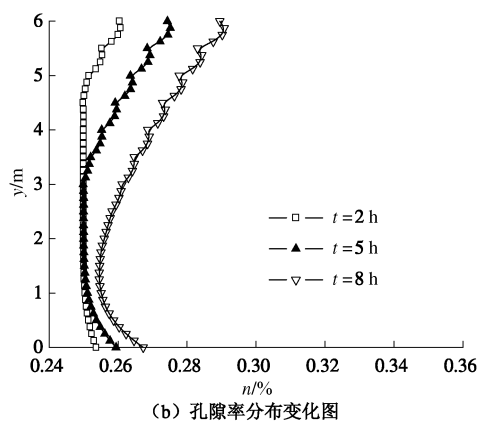


图 5 潜蚀对细颗粒浓度和孔隙率的影响

Fig. 5 The effects of erosion on fine particle content and porosity

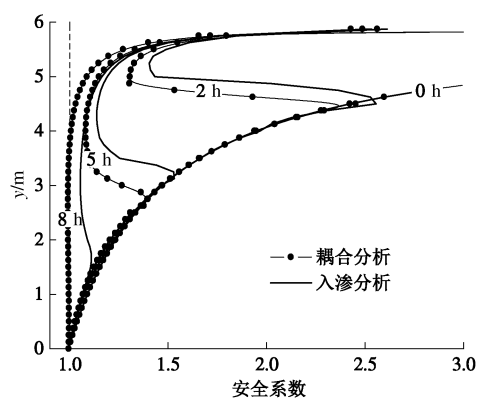


图 6 边坡安全系数变化分布图

Fig. 6 Profiles of factor of safety along cross-section $X-X'$

上述结果表明, 渗流潜蚀作用可加速湿润锋向下推进速度, 使得边坡稳定性进一步降低, 增大了滑坡的可能性。

4 参数分析

4.1 初始饱和渗透系数的影响

对初始饱和渗透系数 k_{s0} 进行参数分析, 研究其对渗流潜蚀的影响。降雨强度 q 仍为 2×10^{-5} m/s, k_{s0} 分别为 5×10^{-6} m/s 和 8×10^{-5} m/s。

如图 7 所示, 当饱和渗透系数为 k_{s0} 为 5×10^{-6} m/s 时, 降雨 6 h 之内, 潜蚀对孔压分布和湿润锋推进速度的影响很小。降雨 6 h 后, 考虑潜蚀作用的情况下湿润锋推进速度显著增加。图 8 所示为 $X-X'$ 剖面安全系数分布随时间变化图。由图可见, 降雨 6 h 后, 潜蚀对边坡稳定性的影响更为显著。与 k_{s0} 为 2×10^{-5} m/s 的结果比较可知, 当降雨强度超过饱和渗透系数时, 相同降雨强度情况下, k_{s0} 越大, 潜蚀作用对入渗和边坡稳定性的影响越显著。

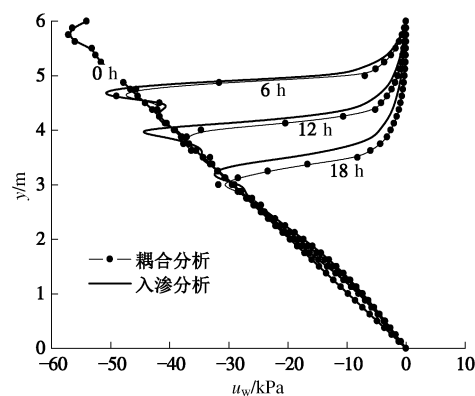
图 7 孔压分布变化图($k_{s0} = 5 \times 10^{-6}$ m/s)

Fig. 7 Pore-water pressure profiles ($k_{s0} = 5 \times 10^{-6}$ m/s)

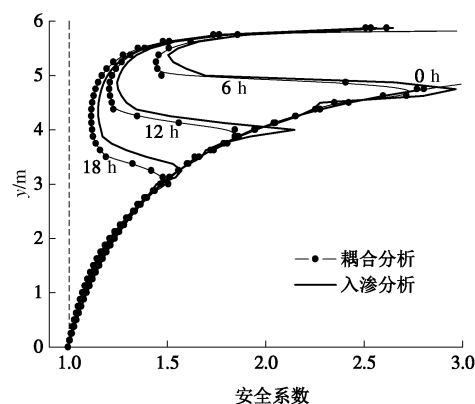
图 8 边坡安全系数分布变化图($k_{s0} = 5 \times 10^{-6}$ m/s)

Fig. 8 Profiles of factor of safety ($k_{s0} = 5 \times 10^{-6}$ m/s)

图 9 和图 10 分别为饱和渗透系数 $k_{s0} = 8 \times 10^{-5}$ m/s 时, $X-X'$ 剖面孔压分布图和安全系数变化图。由图可知, 当降雨入渗强度小于饱和渗透系数 ($q/k_{s0} < 1$) 时, 边坡非饱和区不能达到完全饱和。土体潜蚀对孔压和安全系数影响可以忽略。与前 k_{s0} 为 2×10^{-5} m/s 和 5×10^{-6} m/s 的结果比较可见, 当降雨入渗强度大于或等于土体饱和渗透系数 ($q/k_{s0} \geq 1$), 潜蚀作用对降雨入渗和边坡稳定性的影响较 $q/k_{s0} < 1$ 情况显著。

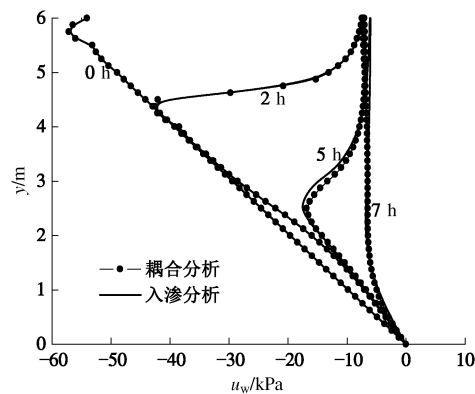
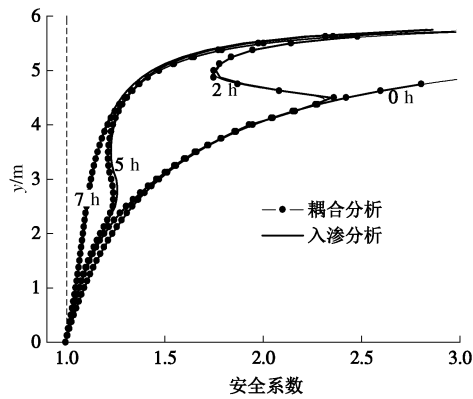
图 9 孔压分布变化图($k_{s0} = 8 \times 10^{-5}$ m/s)

Fig. 9 Pore-water pressure profiles ($k_{s0} = 8 \times 10^{-5}$ m/s)

图10 边坡安全系数分布变化图($k_{s0} = 8 \times 10^{-5}$ m/s)Fig. 10 Profiles of factor of safety ($k_{s0} = 8 \times 10^{-5}$ m/s)

4.2 进气值系数的影响

非饱和土的进气值是指空气开始进入土体时对应的基质吸力值^[37], α_w 是与进气值倒数相关的土性参数(即 $AEV \approx 1/\alpha_w$)。分别取 α_w 值为 0.06, 0.08 和 0.1, 相应的进气值分别约为 16.7, 12.5, 10 kPa。

如图 11 所示, 当进气值系数 α_w 为 0.06 时, 边坡土体在 7.5 h 后达到完全饱和。降雨 5 h 之内, 潜蚀对孔压分布和湿润锋推进速度无显著影响。降雨 5 h 后, 考虑潜蚀作用的情况下湿润锋推进速度有一定增加, 但影响程度小于进气值为 0.08。由图 12 可见, 降雨 5 h 后, 潜蚀对边坡稳定性才有一定的影响。

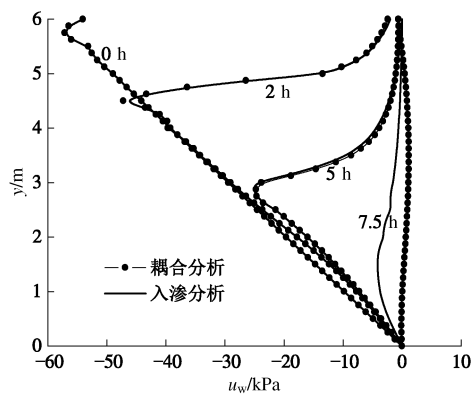
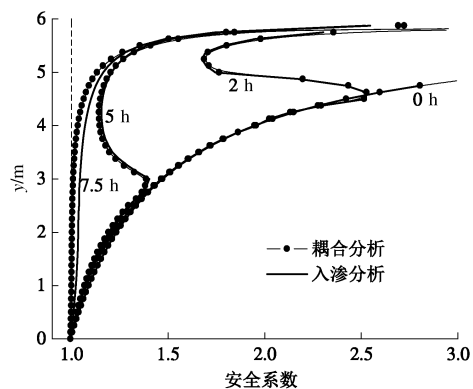
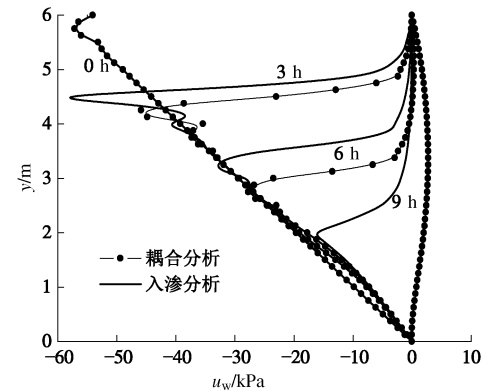
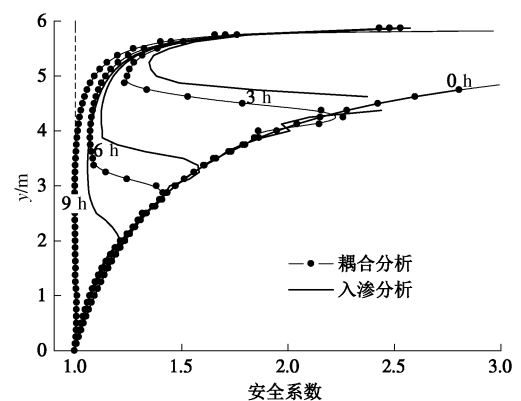
图11 孔压分布变化图($\alpha_w = 0.06$)Fig. 11 Pore-water pressure profiles ($\alpha_w = 0.06$)图12 边坡安全系数分布变化图($\alpha_w = 0.06$)Fig. 12 Profiles of factor of safety ($\alpha_w = 0.06$)

图 13 和图 14 分别为进气值系数 $\alpha_w = 0.1$ 时, $X-X'$ 剖面孔压分布图和安全系数变化图。由图可知, 当进气值系数为 0.1 时, 潜蚀作用对入渗和边坡稳定性的影响程度大于进气值为 0.08。

由上述结果可知, 进气值系数越大, 即进气值越小, 潜蚀作用对入渗和边坡稳定性的影响越显著。

图13 孔压分布变化图($\alpha_w = 0.1$)Fig. 13 Pore-water pressure profiles ($\alpha_w = 0.1$)图14 边坡安全系数分布变化图($\alpha_w = 0.1$)Fig. 14 Profiles of factor of safety ($\alpha_w = 0.1$)

5 结 论

本文建立了考虑渗流潜蚀耦合的边坡稳定性分析模型, 利用有限元数值分析方法, 对强降雨条件下边坡土体内细颗粒运移和潜蚀进行了模拟, 研究了渗流潜蚀对孔压分布和边坡稳定性的影响, 探讨了饱和渗透系数和进气值对渗流潜蚀的影响。主要结论如下:

(1) 土体潜蚀主要发生在湿润锋范围内浅层非饱和土体。入渗作用下坡内非饱和区土体细颗粒密度降低, 孔隙率增大, 湿润锋向下推进速度加快, 使边坡更快达到不稳定状态。

(2) 由于渗流潜蚀影响, 滑裂面深度增加, 不稳定坡体体积增大, 滑坡的危害程度加大。

(3) 饱和渗透系数、进气值是影响渗流潜蚀作用

的主要因素。当降雨入渗强度大于或等于土体饱和渗透系数时, 潜蚀才能对入渗和边坡稳定性产生较大影响。相同降雨强度情况下, k_{s0} 越大, 潜蚀作用对入渗和边坡稳定性的影响越显著。进气值越小, 潜蚀对入渗和边坡稳定性的影响越显著。

需要指出的是, 本文采用的潜蚀本构模型未考虑细颗粒的沉积作用, 也未考虑级配曲线、潜蚀本构模型及非饱和土水力特性方程三者之间的相互关系。相关理论和试验研究将在后续的工作中开展。

参考文献:

- [1] 黄润秋, 许强, 戚国庆. 降雨及水库诱发滑坡的评价与预测[M]. 北京: 科学出版社, 2007. (HUANG Run-qiu, XU Qiang, QI Guo-qing. The evaluation and prediction of landslides induced by rainfall and reservoir[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [2] CHO S E, LEE S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[J]. Computers and Geotechnics, 2001, **28**(3): 185 - 208.
- [3] RAHARDJO H, ONG T H, REZAUR R B, LEONG E C. Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(12): 1532 - 1543.
- [4] 黄茂松, 贾苍琴. 考虑非饱和和非稳定渗流的土坡稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 202 - 206. (HUANG Mao-cong, JIA Cang-qin. Stability analysis of soil slopes subjected to unsaturated transient seepage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 202 - 206. (in Chinese))
- [5] 林鸿州, 于玉贞, 李广信, 等. 强度折减有限元法在滑坡特性预测的应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(2): 229 - 233. (LIN Hong-zhou, YU Yu-zhen, LI Guang-xin, et al. Finite element method with consideration shear strength reduction for prediction of landslide[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(2): 229 - 233. (in Chinese))
- [6] 徐晗, 朱以文, 蔡元奇, 等. 降雨入渗条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2005, **26**(12): 1957 - 1962. (XU Han, ZHU Yi-wen, CAI Yuan-qi, et al. Stability analysis of unsaturated soil slopes under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(12): 1957 - 1962. (in Chinese))
- [7] ZHANG L L, ZHANG L M, TANG W H. Rainfall-induced slope failure considering variability of soil properties[J]. Géotechnique, 2005, **55**(2): 183 - 188.
- [8] ZHANG L L, ZHANG J, ZHANG L M, et al. Stability analysis of rainfall-induced slope failure: a review[J]. Geotechnical Engineering, 2010, **164**(5): 299 - 316.
- [9] CROSTA G, DI PRISCO C. On slope instability induced by seepage erosion[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, **36**(6): 1056 - 1073.
- [10] 李喜安, 黄润秋, 彭建兵, 等. 关于物理潜蚀作用及其概念模型的讨论[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(6): 880 - 886. (LI Xi-an, HUANG Run-qiu, PENG Jian-bing, et al. Establishment of conceptual models of physical sub-ground erosion[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(6): 880 - 886. (in Chinese))
- [11] 胡明鉴, 汪稔, 孟庆山, 等. 坡面松散砾石土侵蚀过程及其特征研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(11): 1722 - 1726. (HU Ming-jian, WANG Ren, MENG Qing-shan, et al. Research on erosion process and features of loose gravelly soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(11): 1722 - 1726. (in Chinese))
- [12] 矫滨田, 鲁晓兵, 王淑云, 等. 土体降雨滑坡中细颗粒运移及效应[J]. 地下空间与工程学报, 2005, **1**(7): 1014 - 1016. (JIAN Bin-tian, LU Xiao-bing, WANG Shu-yun, et al. The movement of fine grains and its effects on the landslide and debris flow caused by raining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, **1**(7): 1014 - 1016. (in Chinese))
- [13] 许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(11): 2264 - 2271. (XU Jian-cong, SHANG Yue-quan. Influence of permeability of gravel soil on debris landslide stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(11): 2264 - 2271. (in Chinese))
- [14] 吴火珍, 冯美果, 焦玉勇, 等. 降雨条件下堆积层滑坡体滑动机制分析[J]. 岩土力学, 2010, **31**(增刊 1): 324 - 328. (WU Huo-zhen, FENG Mei-guo, JIAO Yu-yong, et al. Analysis of sliding mechanism of accumulation horizon landslide under rainfall condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(S1): 324 - 328. (in Chinese))
- [15] OJHA C S P, SINGH V P, ADRIAN D D. Determination of critical head in soil piping[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, **129**(7): 511 - 518.
- [16] WAN C F, FELL R. Assessing the potential of internal instability and suffusion in embankment dams and their foundations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(3): 401 - 407.

- [17] 陈群, 刘黎, 何昌荣, 等. 缺级粗粒土管涌类型的判别方法[J]. 岩土力学, 2009, **30**(8): 2249 – 2253. (CHEN Qun, LIU Li, HE Chang-rong, et al. Criterion of piping types for gap-graded coarse-grained soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(8): 2249 – 2253. (in Chinese))
- [18] IVERSON R M, MAJOR J J. Groundwater seepage vectors and the potential for hillslope failure and debris flow mobilization[J]. Water Resources Research, 1986, **22**(11): 1543 – 1548.
- [19] STERPI D. Effects of the erosion and transport of fine particles due to seepage flow[J]. International Journal Geomechanics, 2003, **3**(1/2): 111 – 122.
- [20] DAHAGHI A K, GHOLAMI V, MOGHADASI J. A novel workflow to model permeability impairment through particle movement and deposition in porous media[J]. Transport in Porous Media, 2011, **86**(3): 867 – 879.
- [21] VARDOULAKIS I, STAVROPOULOU M, PAPANASTASIOU P. Hydro-mechanical aspects of the sand production problem[J]. Transport in Porous Media, 1996, **22**(2): 225 – 244.
- [22] 罗玉龙, 速宝玉. 基于溶质运移的悬挂防渗墙管涌控制效果[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, **44**(10): 1870 – 1875. (LUO Yu-long, SU Bao-yu. Piping control effect of suspended cut-off wall based on solute transport[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, **44**(10): 1870 – 1875. (in Chinese))
- [23] CIVIDINI A, GIODA G. Finite element approach to the erosion and transport of fine particles in granular soils[J]. International Journal Geomechanics, 2004, **3**(4): 191 – 198.
- [24] PAPAMICHOS E, VARDOULAKIS I. Sand erosion with a porosity diffusion law[J]. Computers and Geotechnics, 2005, **32**(1): 47 – 58.
- [25] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [26] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892 – 898.
- [27] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, **12**(3): 513 – 522.
- [28] CARMAN P C. Permeability of saturated sands, soils and clays[J]. The Journal of Agricultural Science, 1939, **29**(2): 263 – 273.
- [29] CARMAN P C. Flow of gases through porous media[M]. London: Butterworth, 1956.
- [30] HINDMARSH A C, BROWN P N, GRANT K E, et al. Suite of nonlinear and differential/algebraic equation solvers[J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2005, **31**(3): 363 – 396.
- [31] STAVROPOULOU M, PAPANASTASIOU P, VARDOULAKIS I. Coupled wellbore erosion and stability analysis[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1998, **22**(9): 49 – 769.
- [32] DEUFLHARD P. A modified Newton method for the solution of ill-conditioned systems of nonlinear equations with application to multiple shooting[J]. Numerische Mathematik, 1974, **22**(4): 289 – 315.
- [33] IVERSON R M. Landslide triggering by rain infiltration[J]. Water Resources Research, 2000, **36**(7): 1897 – 1910.
- [34] CHO S E, LEE S R. Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(9): 756 – 763.
- [35] SANTOSO A M, PHOON K K, QUEK S T. Effects of soil spatial variability on rainfall-induced landslides[J]. Computers and Structures, 2011, **89**(11/12): 893 – 900.
- [36] CHUI T M, FREYBERG D L. Implementing hydrologic boundary conditions in a multiphysics model[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, **14**(12): 1374 – 1377.
- [37] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, **31**(4): 521 – 532.