

· 地基与基础 ·



降雨入渗对软土岸坡稳定性影响研究*

张华庆¹, 谭佳佳², 左殿军¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所 港口水工建筑技术国家工程实验室, 天津 300456;

2. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410000)

摘要: 软土普遍具有含水率高、抗剪强度低的特点, 且大多数的土体滑坡都发生在降雨期间或者降雨之后的某个时间, 因此研究降雨入渗诱发软土岸坡失稳的机理具有十分重要的意义。选取某软土岸坡工程作为研究对象, 基于有限元强度折减法, 采用 Abaqus 软件建立三维软土岸坡有限元模型, 分析降雨强度、时间以及饱和渗透系数对岸坡稳定的影响。结果表明: 随着雨水的入渗, 岸坡土体饱和度及孔隙水压力增大, 土体浅层基质吸力减小或消失, 导致土体抗剪强度降低, 从而引起岸坡稳定性降低; 降雨入渗诱发岸坡失稳的模式表现为渐近牵引式破坏, 其塑性破坏区域最先出现在坡脚, 并沿坡面向上发展, 逐渐形成连续的塑性贯通滑动面; 以及持续的强降雨最容易引发岸坡的失稳破坏。

关键词: 软土; 岸坡稳定; 降雨入渗; 有限元; 强度折减法

中图分类号: TU 447

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0148-06

Stability study of unsaturated soft soil slopes under rainfall infiltration

ZHANG Hua-qing¹, TAN Jia-jia², ZUO Dian-jun¹

(1. Ministry of Transport, National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology,

Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China;

2. Changsha University of Science & Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: Generally, soft soil has a high water content and low shear strength, and most of the soil landslides occur in the rain or during a certain time after the rainfall, so it is of great significance to study the mechanism of rainfall infiltration induced soft soil slope failure. This paper selects a soft soil slope engineering as the research object, based on finite element strength reduction, using Abaqus software to establish the three-dimensional finite element model of the soft soil slope, and analyzes the influence of slope stability on rainfall intensity and duration as well as saturated permeability coefficient. The results show that: Along with the rain infiltration the soil saturation and pore water pressure increase, the shallow soil matrix suction decrease or disappear, resulting in the reduction of soil shear strength and decrease of slope stability; The model of rainfall infiltration induced slope stability shows asymptotic traction damage, the plastic damage area first appears at the foot of the slope, and upwards along the slope face, and gradually forms a continuous plastic sliding surface; Continuous heavy rainfall easily leads to slope instability destruction.

Key words: soft soil; slope stability; rainfall infiltration; finite element; strength reduction method

近年来, 随着港口工程建设数量与规模的与日俱增, 越来越多的码头工程为了能获得良好的水深条件, 经常需要修筑在围海造陆的软土地基

上。但是由于软土普遍具有含水率高、抗剪强度低、承载力低的特点, 因此软土岸坡稳定性问题一直是研究的热门课题。

收稿日期: 2013-07-30

*基金项目: 国家新技术研究发展计划 (863) (2012AA112508)

作者简介: 张华庆 (1965—), 男, 研究员, 主要从事沿海及内河港口与航道工程水动力和泥沙问题研究工作。

降雨入渗是岸坡失稳的主要诱发因素之一, 因此研究降雨入渗对软土岸坡稳定性的影响更具有实际意义。据资料统计, 大量土体滑坡发生在降雨期间或者降雨之后的某个时间。2011 年 7 月陕西省略阳县持续降大到暴雨, 诱发巨大滑坡, 约 5 000 m³ 滑坡土体瞬间倾下, 造成重大人员伤亡; 2011 年 9 月, 西安市因连续多日的强降雨引发山体滑坡, 导致附近部分工厂车间被埋, 人员伤亡惨重; 2013 年 7 月 7 日四川省大范围的持续强降雨, 造成都江堰发生高位山体滑坡, 引发泥石流, 64 个县不同程度受灾, 人员伤亡惨重。由此可见, 降雨入渗无疑是引发土体滑坡至关重要的影响因素。究其原因, 一方面是因为随着雨水的入渗, 岸坡土体饱和度和孔隙水压力逐渐增大, 形成饱和-非饱和渗流, 产生暂态饱和区, 而基质吸力却逐渐降低, 使得岸坡土体抗剪强度减小, 导致岸坡稳定性也降低; 另一方面, 降雨入渗的持续, 岸坡土体含水率和容重逐渐增加, 土体有效应力减小导致岸坡土体沉降慢慢增大, 从而岸坡产生滑动变形的趋势。

关于降雨入渗对岸坡稳定性影响的研究, 国内外学者做了大量的工作^[1-9]。Lumb^[10] 针对香港地区降雨与滑坡情况做了大量的研究工作, 采用一种简化的一维垂直渗流模型, 并根据当地土体抗剪强度和饱和度的经验关系对土体特性及降雨特征对边坡稳定性的影响进行分析; Sammori 等^[11] 基于 Galerkin 有限单元法模拟分析了恒定降雨强度条件下的边坡暂态渗流过程, 并在此基础上提出最不利于边坡稳定的参数取值组合; 姚海

林等^[12] 通过研究降雨入渗对非饱和膨胀土边坡稳定性的影响, 指出降雨强度对膨胀土边坡的影响程度与土体本身的渗透性密切相关。

笔者在前人研究的基础上基于强度折减法, 采用 Abaqus 软件建立软土岸坡降雨入渗的三维有限元模型, 计算过程中考虑降雨强度和历时及饱和和渗透系数 3 个影响因素, 得到降雨入渗条件下软土岸坡失稳破坏的机理及变形与应力的若干规律, 并分析其对岸坡稳定性的影响。计算分析结果对软土岸坡滑坡机理的认识具有指导意义。

1 工程地质概况

根据地质勘察资料, 某软土岸坡工程地基为深厚的淤泥质软土, 其土层分布特点见图 1。由上而下依次为: 1) 1-1 素填土; 2) 2-1 黏土; 3) 3-1 淤泥质黏土; 4) 4-1 粉质黏土。淤泥质黏土呈流塑状, 强度低, 为高压缩性软土; 淤泥质粉质黏土为含水率高、承载能力低、物理力学性质较差的软土层。表 1 给出了软土地基各土层物理力学指标。

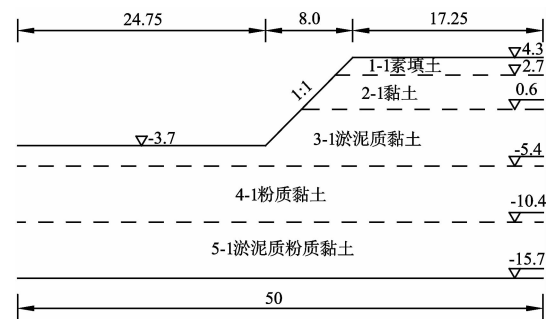


图 1 软土岸坡土层分布 (单位: m)

表 1 地基各土层物理力学指标

土层编号	土层名称	土层底面高程/ m	土层厚度/ m	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量 E ₀ /MPa	泊松比 ν	内摩擦角 φ/(°)	粘聚力 C/kPa
1-1	素填土	2.7	1.6	1 830	6.25	0.39	15.3	12.0
2-1	黏土	0.6	2.1	1 840	3.48	0.30	12.9	13.3
3-1	淤泥质黏土	-5.4	6.0	1 710	3.68	0.35	12.3	14.5
4-1	粉质黏土	-10.4	5.0	1 880	4.38	0.33	13.7	12.9
5-1	淤泥质粉质黏土	-15.7	5.3	1 820	2.67	0.40	14.0	17.8

2 岸坡降雨入渗有限元模型的建立

2.1 数值计算模型

实际工程中土体的应力—应变关系复杂, 具

有非线性、非均质及复杂边界条件等问题, 根据地质勘察资料可以看出各土层物理力学性能指标相差不大, 本文为了分析的方便, 对岸坡的计算

模型进行了适当的简化。将模型作为均质岸坡来处理，建立三维软土岸坡有限元模型，岸坡坡高为 8 m，坡度为 1:1，岸坡底面假定为不透水面，岸坡坡面与坡顶为降雨入渗面，模型范围 x 方向（平行岸坡）取为 40 m， y 方向（垂直岸坡）取为 12 m， z 方向取为 20 m。图 2 给出了本次有限元计算的模型简图。

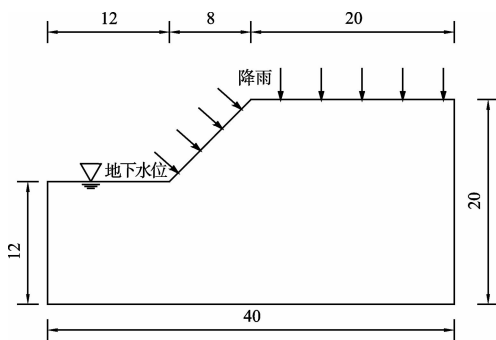


图 2 土质岸坡模型平面简图 (单位: m)

有限元分析软件采用大型商业软件 ABAQUS，岸坡及地基各土层采用六面体实体单元模拟，图 3 给出了建立的三维有限元模型，共生成节点数为 10 036 个，网格单元为 8 532 个。模型设定初始地下水位为 12 m，得到未降雨情况下稳态分析下的计算结果，包括初始地应力、初始孔隙水压力以及初始饱和度与初始孔隙比等初始分布情况，并以此作为降雨入渗影响下软土岸坡稳定性分析的初始条件。

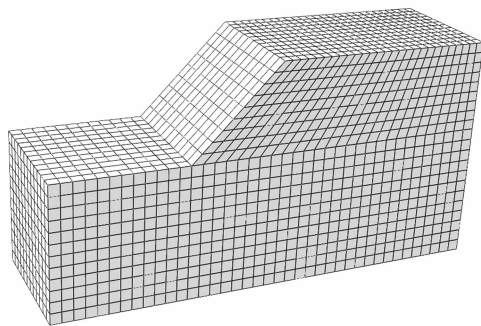


图 3 有限元模型

2.2 本构模型及计算参数

有限元计算中，岸坡土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型，并以岸坡面特征点的位移突变作为失

稳判据，由此来确定岸坡稳定安全系数，并以塑性区的贯通作为补充。其屈服条件为：

$$\frac{1}{3}I_1 \sin\varphi - (\cos\theta_0 + \frac{1}{\sqrt{3}}\sin\theta_0 \sin\varphi) \sqrt{J_2} + c \cos\varphi = 0 \quad (1)$$

式中： I_1 、 J_2 分别为应力张量的第一不变量和应力偏张量的第二不变量； θ_0 是应力罗德角； φ 为土的内摩擦角， c 为土的粘聚力。

图 4 和图 5 给出了非饱和软土的渗流计算中渗透系数函数曲线与土水特征曲线^[13]。从图中可以明显看出当岸坡土体处于完全饱和状态时，土体渗透系数最大值为 $5.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ，此时土体的基质吸力为 0。而且随着饱和度增大，土体的渗透系数逐渐增大，基质吸力却逐渐下降。表 2 是有限元模型计算采用的土体参数，根据地质勘察资料综合确定，地下水位线以下土体材料采用浮密度。

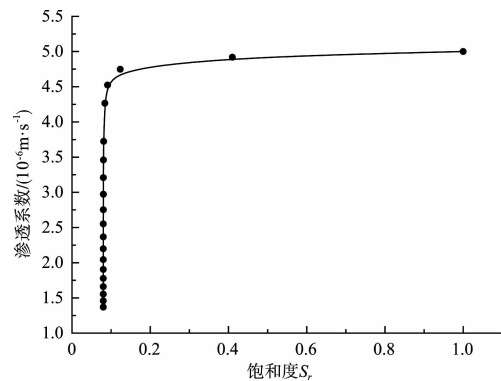


图 4 渗透系数函数曲线

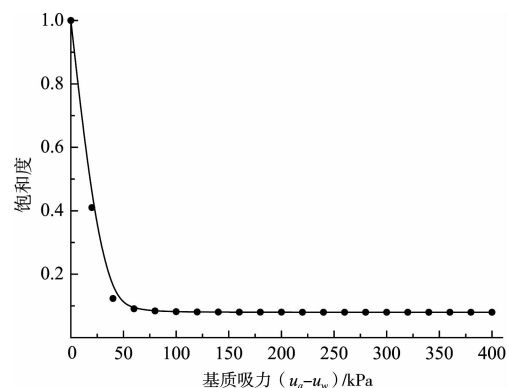


图 5 土水特征曲线

表 2 土体计算参数

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力/kPa	摩擦角/($^\circ$)	弹性模量/MPa	泊松比	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	孔隙比
180	15	15	4.0	0.35	1.0×10^{-7}	0.54

2.3 边界条件

有限元计算时位移边界条件比较简单, 模型底部为全部固定边界条件 ($U_1 = U_2 = UR_3$), 前后与左右侧面均采用法向约束, 其他位置无任何约束。对于水头边界条件, 岸坡底面设置为完全不透水边界, 而 Abaqus 有限元软件默认所有的边界都是不透水的, 因此不需要另外设置。前后两端以及自由水面以下坡面位置均设为总水头边界, 其孔隙水压力值^[2]为:

$$u_w = (H_1 - z) \rho_w g \quad (1)$$

式中: H_1 为边界上某点的高程, z 为岸坡模型底面高程, ρ_w 为水的密度。

2.4 计算方案

为了充分说明降雨入渗过程中各因素对非饱和软土岸坡稳定性的影响规律, 根据我国气象部门的降雨强度标准并依据当地水文气象资料, 共对比计算了 13 种方案, 考虑的影响因素分别为降雨强度、降雨历时及土体饱和渗透系数, 将降雨强度定为 20, 50, 80, 100 mm/h, 强度标准分别介于中雨与大暴雨之间, 表 3 ~ 5 给出了本文所有计算方案。

表 3 不同变量对岸坡稳定性的影响

变量	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨历时/ h	渗透系数/ (10 ⁻⁶ m·s ⁻¹)
	0		3.6
降雨强度	20	72	3.6
	50	72	3.6
	80	72	3.6
	100	72	3.6
降雨历时	20	12	3.6
	20	24	3.6
	20	48	3.6
	20	72	3.6
	降雨系数	20	72
20		72	3.0
20		72	4.0
20		72	5.0

3 计算结果与分析

3.1 降雨入渗分析

图 6 和图 7 给出了降雨之前岸坡内孔隙水压力以及饱和度分布情况。从图中可以看出, 降雨

之前, 地下水位线以下岸坡土体饱和度为 1, 地下水位线以上饱和度快速减小到 0.08, 这与非饱和岸坡实际情况是相符合的。而降雨之前孔隙水压力的分布呈线性分布, 岸坡底部为 120 kPa, 顶部出现负孔隙水压力, 为 -80 kPa, 在浸润面上初始孔隙水压力为 0, 沿岸坡向上基质吸力逐渐增大, 此时岸坡整体处于稳定状态。

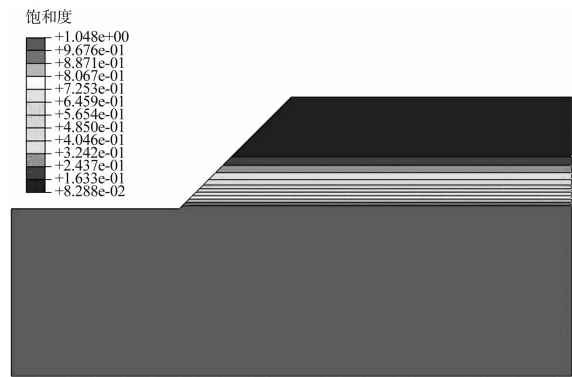


图 6 降雨之前的饱和度分布等值线

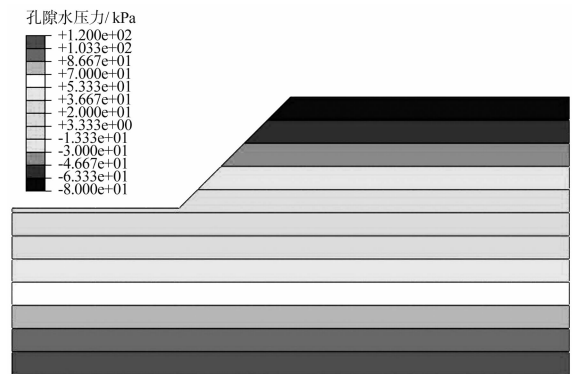


图 7 降雨之前的孔隙水压力分布等值线

图 8 ~ 11 给出了降雨入渗过程中部分时刻岸坡内的孔隙水压力和饱和度分布情况。根据计算结果, 可以明显看出, 降雨入渗后的孔压及饱和度分布情况与初始状态有很明显的区别。本文只选取降雨 24 h 后和 48 h 后的计算结果进行对比分析。从分析结果可以看出: 随着降雨时间延长, 土体饱和度增大, 孔隙水压力也逐渐增大; 随着孔隙水压力上升, 岸坡非饱和土体的浅层基质吸力则减小或消失, 导致土体抗剪强度降低。另一方面, 随着降雨入渗的持续, 岸坡土体含水率和

密度有所增加,根据有效应力原理可以知道岸坡的有效应力也减小,从而导致坡体沉降和应力增大。

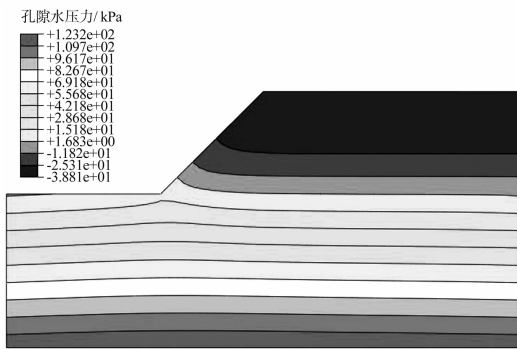


图8 降雨24 h后孔隙水压力分布等值线

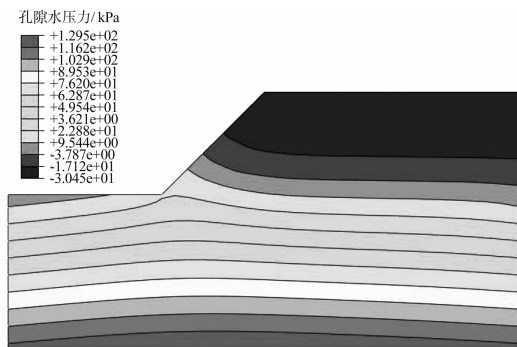


图9 降雨48 h后孔隙水压力分布等值线

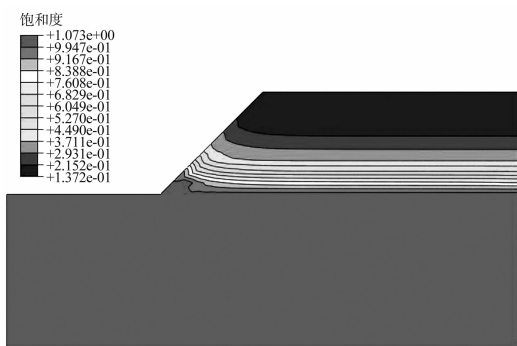


图10 降雨24 h后饱和度等值线

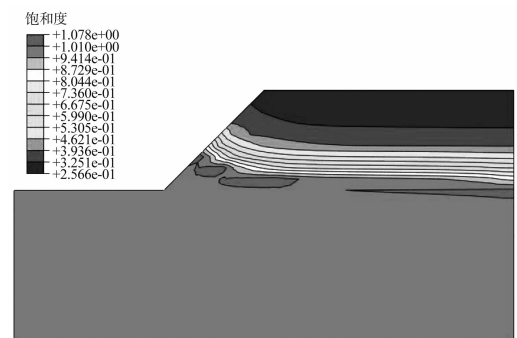


图11 降雨48 h后饱和度等值线

图12~14给出了降雨过程中部分时刻岸坡土体位移等值线图。对比图12和13可以看出岸坡最大位移由1.8 mm增大到了5.2 mm,由此可知土体的水平位移与竖直位移都在随着降雨时间的延长而逐渐增大。图14中给出了降雨72 h后岸坡位移矢量图,从图中可以明显看出坡体有向下滑动的趋势,因此可以预见在降雨入渗的影响下岸坡稳定性是降低的。

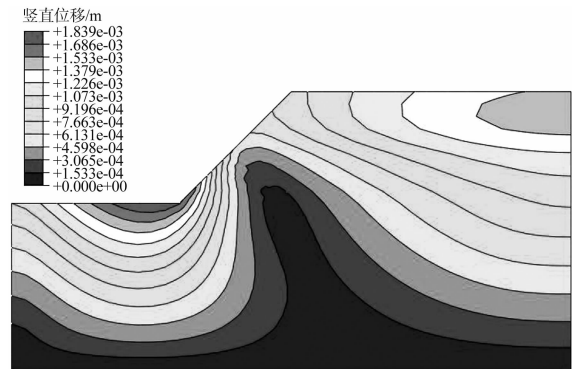


图12 降雨24 h后竖直位移等值线

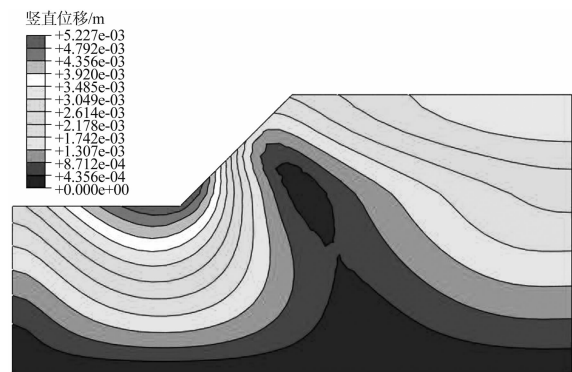


图13 降雨48 h后竖直位移等值线

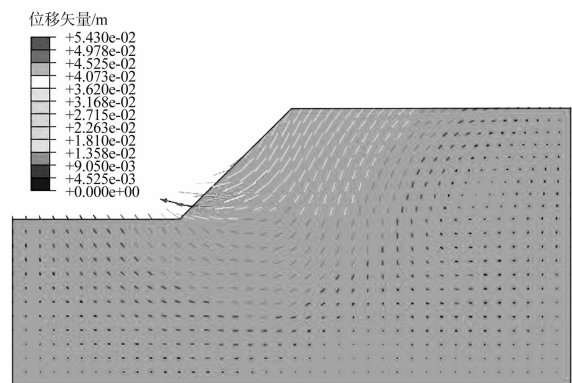


图14 降雨72 h后位移矢量图

图15给出了降雨72 h后岸坡土体的等效塑性应变。从图中可以看出在降雨入渗作用下坡脚最先出现塑性区域,并沿坡面向上发展。从上述计

算中所得到的降雨入渗过程中孔隙水压力、饱和度、位移及塑性应变总体变化情况综合反应了岸坡降雨入渗的基本规律, 根据本文介绍的方法可以方便地实现对降雨入渗过程中岸坡稳定与变形情况的分析。

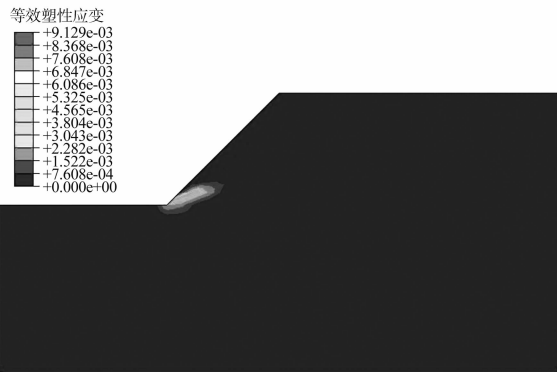


图 15 降雨 72 h 后等效塑性应变分布

3.2 不同降雨条件下岸坡稳定性分析

图 16 给出了岸坡失稳破坏的塑性区域分布云图, 该工况下只考虑土体自重对岸坡稳定性的影响, 不考虑地下水及降雨入渗的影响, 按有限元强度折减法计算的稳定系数为 1.373, 该工况反应了岸坡在天然状态下是稳定的。另外计算了考虑地下水影响下岸坡的稳定性, 计算所得的稳定安全系数为 1.332。由此可见, 地下水的影响降低了岸坡的稳定性, 与地下水的作用会减小土体的有效应力规律是相符合的。

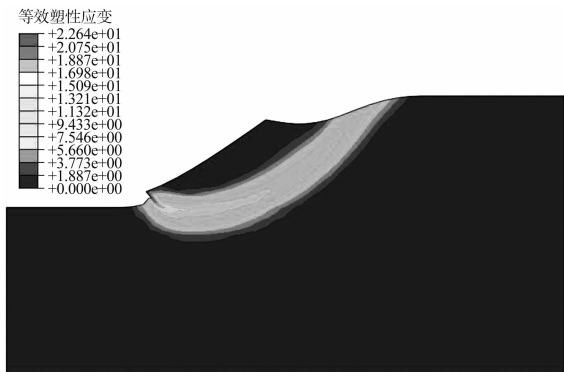


图 16 塑性区域分布云图

图 17 给出了降雨入渗情况下软土岸坡稳定安全系数随降雨强度以及降雨历时的变化规律。从图中可以看出, 在相同降雨历时情况下, 随着降雨强度的增大, 岸坡安全系数逐渐减小, 而且在

降雨强度变化不是很大的情况下, 安全系数变化幅度也不大, 但是随着降雨强度持续增大, 岸坡稳定安全系数受高强度降雨的影响非常明显, 甚至造成岸坡失稳破坏。

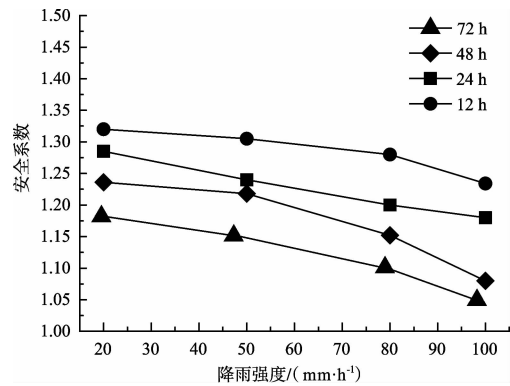


图 17 安全系数与降雨强度/历时的关系

另一方面, 在相同降雨强度下, 随着降雨入渗的持续, 岸坡稳定安全系数逐渐减小, 并且从图中可以看出, 在强降雨的持续作用下, 岸坡的稳定性是最低的, 甚至容易造成岸坡的整体失稳。

图 18 中给出了在相同降雨历时情况下, 岸坡稳定安全系数随土体渗透系数的变化规律。从图中可以看出, 在相同降雨强度情况下, 随着渗透系数的增大, 安全系数逐渐减小, 并且当土体渗透系数相同时, 降雨强度越大, 安全系数越小, 越容易引发土体滑坡。

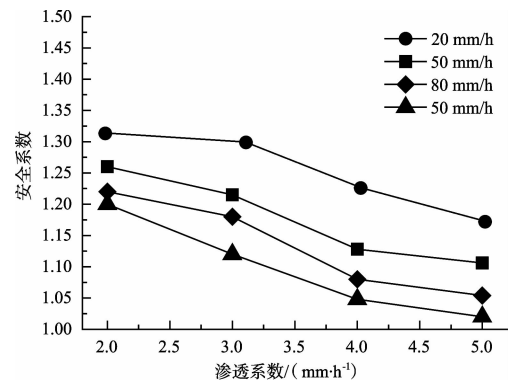


图 18 渗透系数与安全系数的关系

4 结论

基于饱和-非饱和渗流理论, 利用 Abaqus 考虑有限元强度折减法研究了不同降雨条件对某软土岸坡稳定性影响, 进一步认识了降雨入渗诱发岸坡失稳的机理, 得出如下结论:

(下转第 167 页)