

文章编号: 1000-7598 (2012) 08-2359-07

# 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析

付宏渊<sup>1</sup>, 曾 铃<sup>1</sup>, 王桂尧<sup>1</sup>, 蒋中明<sup>2</sup>, 杨晴霞<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 长沙 410076; 2. 长沙理工大学 水利工程学院, 长沙 410076)

**摘 要:** 降雨条件下软岩边坡的失稳模式是进行边坡处治的基本依据之一。为研究软岩边坡在降雨条件下的稳定性, 提出了一种既能考虑渗流场对边坡稳定性的影响, 又能体现岩石软化效应对边坡失稳所带来的不利作用的新方法。运用二维渗流数值计算方法, 对降雨条件下的边坡孔隙水压力大小及暂态饱和区面积在空间及时间上的分布进行了模拟。并将渗流场计算结果与暂态饱和区岩石软化试验所得岩石物理力学参数随时间的取值相结合, 采用强度折减法分析软岩边坡在降雨入渗条件下的稳定性。对算例边坡的研究表明: 降雨入渗条件下软岩边坡的失稳在降雨初期表现为边坡表层局部分层垮塌。随着降雨历时的增长, 失稳形式则表现为局部分层垮塌与整体滑移相结合。降雨停止后, 边坡负孔隙水压力的消散, 对软岩边坡安全系数的继续降低具有一定的延缓作用。

**关 键 词:** 降雨入渗; 暂态饱和区; 软化效应; 稳定性分析

**中图分类号:** TU 42

**文献标识码:** A

## Stability analysis of soft rock slope under rainfall infiltration

FU Hong-yuan<sup>1</sup>, ZENG Ling<sup>1</sup>, WANG Gui-yao<sup>1</sup>, JIANG Zhong-ming<sup>2</sup>, YANG Qing-xia<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China;

2. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China)

**Abstract:** Instability mode of soft rock slope in rainy condition is one of bases for slope disposal. In order to research the stability of soft rock slope under rainfall infiltration, this article put forward a new method which not only can consider the impact of seepage field on the slope stability but also can reflect the adverse effect on the slope instability caused by rock softening effect. Two-dimensional seepage numerical calculation method is used to simulate the slope pore water pressure size and the distribution of transient saturated zone area on space and time in rainy condition. Combined the seepage field calculation results with the value of physico-mechanical parameters of rock which are obtained from transient saturated zone area soften rocks test versus time, and strength reduction method is used to analysis the stability of soft rock slope under rainy infiltration condition. The research of example slope indicates that: in early rainfall period the representation of soft rock slope instability is the local layered collapsing of slope surface under rainy infiltration condition. With the growth of rainfall duration, the representation form of the instability is the combined local layered collapsing with whole sliding. After rainfall stopping, the recovery of slope negative pore water pressure has certain delayed effect for the continuous reduction of safety coefficient of soft rock slope.

**Key words:** rainfall infiltration; transient saturated zone area; softening effect; stability analysis

## 1 引 言

统计资料表明<sup>[1]</sup>, 边坡失稳的主要诱因在于降雨入渗。在日本, 每年由于降雨引起的边坡失稳多达上万个。而在我国<sup>[2]</sup>, 天然岩坡和铁路、公路等开挖形成的人工边坡发生失稳破坏也多在雨季。近些年来, 广大学者普遍认识到了边坡失稳的发生与降雨存在着关联性。并认为降雨导致边坡原有非饱

和区负孔隙水压力发生比较强烈的变化。按照非饱和和抗剪强度理论分析, 认为负孔隙水压力的降低甚至消失将在很大程度上降低边坡土体抗剪强度, 并且入渗雨水将在一定程度上暂时地增大降雨入渗区域边坡土体自重, 这对边坡稳定性是极其不利的。文献[3-6]利用有限元软件 Geostudio(seep)对降雨条件下的边坡渗流场进行了分析, 并以此为基础计算了边坡安全系数在降雨过程中的变化, 文中主要

收稿日期: 2011-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51078042); 湖南省交通科技计划项目(No. 2009003); 西部交通科技计划项目(No. 2009318000048)。

第一作者简介: 付宏渊, 男, 1965 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程, 道路工程方面的科研教学工作。E-mail: Fuhyl1@163.com

考虑了边坡非饱和区负孔隙水压力的变化对边坡稳定性的影响。文献[7-8]对降雨的入渗过程及暂态饱和区的形成及消散过程进行了深入的研究,提出了暂态饱和区中由于降雨入渗所增加的边坡岩土体自重将影响边坡稳定性的观点。由此可见,目前研究降雨对边坡稳定性的影响,主要从降雨入渗将增加边坡表层暂态饱和区的自重及雨水使入渗深度内的负孔隙水压力减小这两个方面来考虑。但对于软岩边坡而言,考虑这两点还不能对边坡稳定性进行全面的分析。软岩边坡在降雨条件下由于雨水对岩石的软化作用,多表现为边坡表面局部垮塌与整体滑动相结合的破坏模式,所以在分析降雨条件下边坡稳定性时考虑岩石遇水产生的软化效应是不可避免的。另一方面,在边坡稳定性计算中,大家普遍采用的商用极限平衡计算软件在考虑降雨过程中的渗透作用时,计算结果存在一定误差<sup>[9]</sup>。一些学者在认识这一缺陷的基础上,采用自行编制计算程序的方法加以解决,但由于其计算程序编制的复杂性以及运用的针对性较强,所以很难得到广泛的推广。

本文对软岩边坡在降雨条件下的稳定性分析既考虑了软岩遇水软化导致的岩石物理力学参数的变化,同时还能如实地反映孔隙水压力对边坡稳定性的影响。本文研究的目的是通过数值计算来研究降雨条件下边坡中孔隙水压力的存在及暂态饱和区内岩体物理力学参数的变化共同作用下的边坡破坏模式及稳定性在空间和时间上的演化规律,为软岩边坡失稳的预测和采取合理的治理措施提供参考。

## 2 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析方法

根据软岩边坡在降雨条件下存在的实际情况,采用如下方法来对降雨条件下的稳定性进行分析。

(1) 采用饱和-非饱和和渗流计算理论对设计降雨条件下边坡渗流场进行研究,得出不同降雨时刻边坡体内的孔隙水压力、暂态饱和区在时间和空间上的分布。

(2) 以二维饱和-非饱和和渗流计算结果为基础,将不同时刻孔隙水压力  $u_w$  导入 FLAC<sup>3D</sup> 中,利用强度折减法计算相应时刻边坡稳定性。对于 Mohr-Coulomb 材料,强度折减安全系数可以表示为

$$\tau' = \frac{\tau}{F_s} = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{F_s} = \frac{c}{F_s} + \sigma \frac{\tan \varphi}{F_s} = c' + \sigma \tan \varphi' \quad (1)$$

其中:

$$\sigma = \sigma' + u_w \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} c' &= \frac{c}{F_s} \\ \varphi' &= \arctan \left( \frac{\tan \varphi}{F_s} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $\sigma$ 、 $\sigma'$  分别为破坏面上的法向应力及法向有效应力;  $\tau$ 、 $\tau'$  分别为任一平面的抗剪强度及有效剪应力;  $c$ 、 $\varphi$  为土体实际的抗剪强度指标;  $c'$ 、 $\varphi'$  为土体达到极限状态时的抗剪强度指标;  $F_s$  为折减系数。

这一方法很好地避免了普通商用极限平衡计算软件计算边坡稳定性时不能将饱和-非饱和和渗流计算结果中节点孔隙水压力进行精确表达这一缺陷。

(3) 利用室内岩石饱水软化试验所得的软岩物理力学参数变化规律来对降雨条件下边坡暂态饱和区域内岩体的物理力学参数进行取值,再结合岩体内孔隙水压力的变化(步骤(2))来研究降雨条件下暂态饱和区内岩石软化对边坡稳定性的影响。

考虑降雨条件下的边坡稳定性计算是在二维饱和-非饱和计算软件及 FLAC<sup>3D</sup> 软件平台上实现的,通过在 FLAC<sup>3D</sup> 中编写用户子程序,将某一时刻饱和-非饱和和渗流计算所得到的孔隙水压力导入 FLAC<sup>3D</sup> 中,同时,将现场取样的岩石进行软化试验获得的不同饱水时刻的岩石力学强度参数赋值于对应时刻的暂态饱和区中。最终运用强度折减法对该时刻的边坡稳定性进行计算。计算流程如图 1 所示。

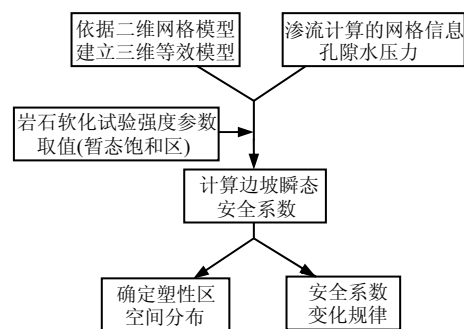


图 1 边坡稳定性计算流程

Fig.1 Slope stability calculation process

## 3 降雨入渗饱和-非饱和计算

### 3.1 计算模型及分析方案

湖南省郴州境内某高速公路 K59+060 处路堑边坡,边坡表层有 1 m 厚含碎石粉质黏土,其下为

粉砂质泥岩, 土黄色原岩结构清晰可辨, 长度为 5.9 m 岩芯呈土柱状夹块状。地下水类型主要有: 松散堆积层孔隙水、基岩裂隙水 2 大类型。由于该地区降雨量较大, 孔隙水直接受大气降水补给, 大气降水进入表层后, 大部分储积在表层的孔隙中, 其含水性、透水性较好, 其补给、排泄受地形条件及本身土体结构的控制, 总体上表现为顺坡向坡脚多向渗流, 部分以散流形式向地势较低处汇集排泄, 相当一部分通过裂隙下渗补给基岩裂隙水, 进行较深层的水循环。边坡剖面及初始水位线如图 2 所示。网格模型见图 3。计算网格单元数量为 7 036, 节点数量为 7 237。

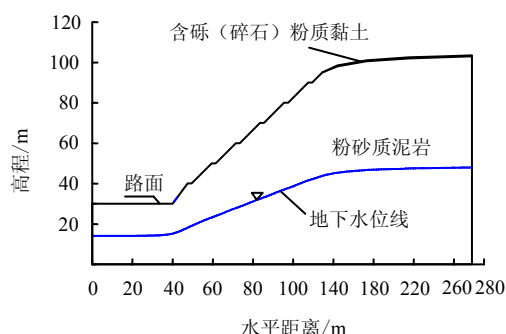


图 2 边坡典型剖面及初始地下水位  
Fig.2 Profile of typical slope and initial water level

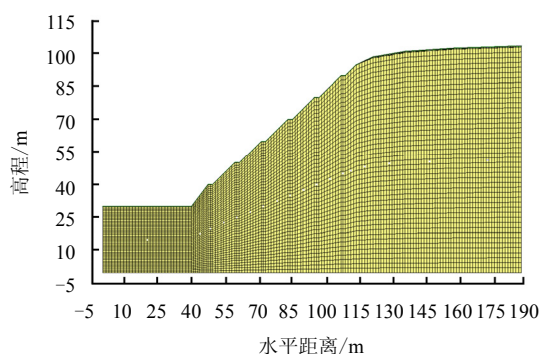


图 3 二维有限元计算模型  
Fig.3 2D finite element model

### 3.2 饱和-非饱和渗流计算原理

在降雨条件下软岩边坡渗流场分析中, 由于雨水入渗或者地下水位埋藏较浅, 饱和区与非饱和区的地下水的流动是相互联系的, 需将两者统一起来研究, 可将此表述为饱和-非饱和渗流问题, 所以以土-水势为因变量来建立统一的控制方程。饱和-非饱和渗流与饱和渗流一样, 满足达西定律土体内非恒定渗流, 其偏微分方程形式如下<sup>[10]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + w = m_w \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

式中:  $h$  为岩体裂隙中的总水头;  $k_x$  和  $k_y$  为  $x$  和  $y$  方向的渗透系数;  $w$  为源汇项;  $m_w$  为比水容量;  $\rho_w$  为水的密度;  $g$  为重力加速度;  $t$  为时间。

岩土体非恒定渗流有限元方程为

$$[K]\{H\} + [M]\{\dot{H}\} = \{Q\} \quad (5)$$

式中:  $[K]$  为单元特征矩阵;  $[M]$  为单元质量矩阵;  $\{Q\}$  为节点流量向量。

有限元方程求解结合以下边界条件进行:

$$h(x, y, t) = h_1, (x, y) \in S_1 \quad (6)$$

$$k \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{S_2} = q(x, y, t), (x, y) \in S_2 \quad (7)$$

式中:  $S_1$  为已知水头边界;  $S_2$  为已知流量边界。

非恒定渗流分析的初始条件为

$$h(x, y, 0) = h_0, (x, y) \in \Omega \quad (8)$$

在饱和-非饱和渗流数值分析中, 岩土体的渗透系数与单元的饱和度、孔隙水压力相关, 在缺乏现场试验资料的情况下较为常用的确定渗透系数的方法为利用经典公式 Van Genuchten<sup>[11]</sup>模型进行拟合, 模型表达式为

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[ 1 + |\alpha h|^n \right]^m} \theta_r \quad (m = 1 - \frac{1}{n}, 0 < m < 1) \quad (9)$$

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2 \quad (10)$$

式中:  $\theta$  为体积含水率;  $\theta_r$  为残余含水率;  $\theta_s$  为饱和含水率;  $H$  为负压;  $K_s$  为饱和渗透系数;  $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$  为土-水特征曲线形状参数。

### 3.3 计算参数、初始条件

全风化-中风化粉砂质泥岩饱和渗透系数选取现场压水试验 5 个试验孔的中平均值:  $1.0 \times 10^{-8}$  cm/s。粉质黏土饱和渗透系数根据现场取样进行室内渗透试验确定: 取  $1.0 \times 10^{-7}$  cm/s。饱和含水率则根据室内试验测得<sup>[12]</sup>, 粉质黏土取 0.2, 全风化-中风化粉砂质泥岩取 0.1。由于坡体内非饱和区渗透系数的大小由基质吸力及初始含水率共同确定, 本文中非饱和区渗透系数的大小采用前文所述 Van Genuchten 模型进行描述, 渗透系数及含水率随基质吸力变化如图 4、5 所示, 由图可知, 土体体积含水率和渗透系数都与基质吸力存在非线性关系, 基质吸力绝对值越大, 土体体积含水率与渗透系数越小。

雨水的入渗对初始渗流场较为敏感,因此,需要通过求解一个稳态的渗流场来获得瞬态渗流计算的初始条件。稳态渗流计算结果则作为饱和-非饱和和计算的初始渗流场。饱和-非饱和和计算过程中,边坡表面边界设置为单位流量边界  $q$  (根据降雨强度计算所得),其他边界设置为不透水边界 ( $Q=0$ )。

限于篇幅原因,初始状态下的渗流场示意图未列出。

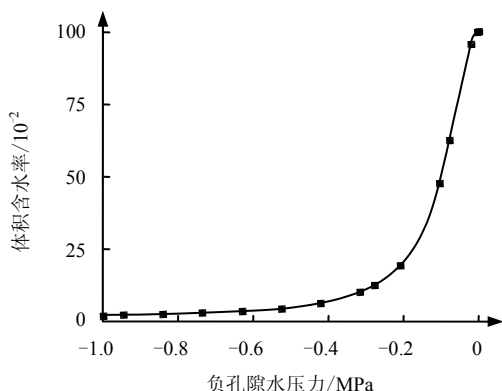


图4 体积含水率与负孔隙水压力关系曲线图 ( $\theta-p$  曲线)

Fig.4 Curve of volatile water content and negative pore water pressure

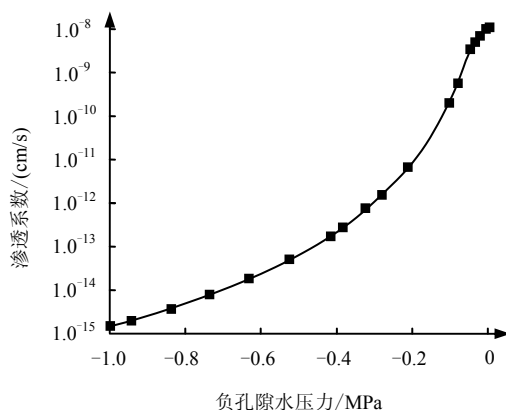


图5 渗透系数与负孔隙水压力关系曲线图 ( $k-p$  曲线)

Fig.5 Curve of conductivity and negative pore water pressure

### 3.4 计算方案

根据郴州气象局提供的气象资料显示,郴州地区近 50 a 来最大 21 d 降雨量为 1 556.67 mm,换算为单位降雨强度为  $q=3.23 \times 10^{-7}$  m/s,降雨历时 21 d,计算总时长为 30 d,单位时间步长为 1 h。

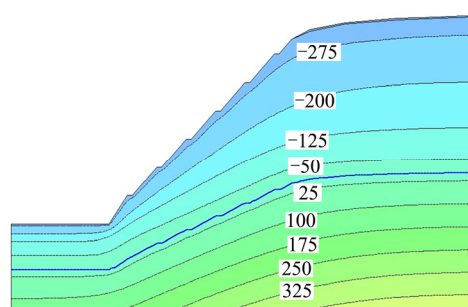
### 3.5 饱和-非饱和渗流计算结果分析

按照前文所述计算方法,运用二维有限元软件对边坡在降雨条件下的渗流场进行分析,由于本文主要考虑孔隙水压力的变化及暂态饱和区内岩石软

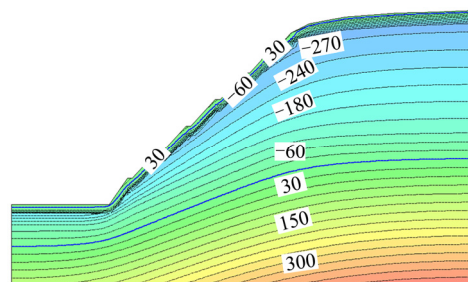
化对边坡稳定性的影响,故只对上述两个方面进行分析。

#### (1) 降雨入渗对孔隙水压力的影响

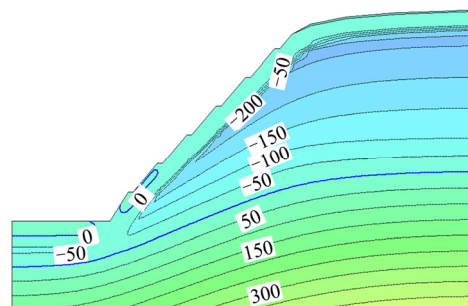
边坡体内孔隙水压力的大小及分布在降雨后发生了较大的变化,图 6 为边坡在整个降雨过程中及降雨结束后一段时间内的 3 个时刻的孔隙水压力分布情况。由图可知,边坡在降雨作用下边坡体内渗流场将发生明显的变化,变化主要发生在边坡表层。降雨 21 d 时入渗深度达到 5 m。降雨导致边坡表层非饱和区负孔隙水压力变为正值。降雨停止后由于雨水的继续入渗,正孔隙水压力区逐渐变小,最后完全消失,但过程缓慢。



(a)  $t=0$  时孔隙水压力等值线



(b)  $t=12$  d 时孔隙水压力等值线



(c)  $t=25$  d 时孔隙水压力等值线(降雨停止 4 d)

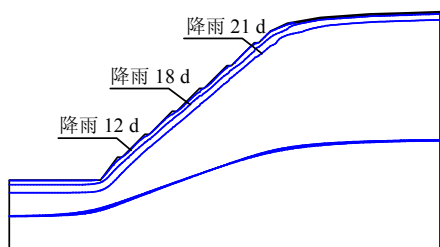
图6 孔隙水压力等值线 (单位: kPa)

Fig.6 Contours of pore water pressure (unit: kPa)

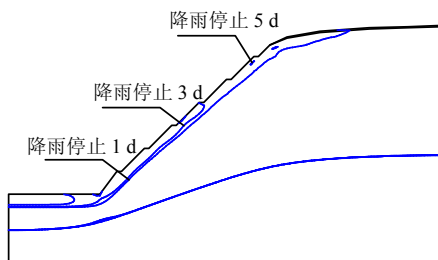
#### (2) 降雨入渗作用下暂态饱和区的变化规律

由图 7 可知,在降雨持续一段时间后,边坡表面出现暂态饱和区,其面积随着降雨历时的增长而逐渐扩大,在降雨停止一段时间后其面积开始减小。

通过研究暂态饱和区的面积大小与形成时间的关系，对于岩石饱和软化室内试验确定岩石饱水时间具有指导意义。



(a) 降雨过程中边坡暂态饱和区及地下水位的变化



(b) 降雨停止后边坡暂态饱和区及地下水的变化

图 7 暂态饱和区及地下水水位的变化

Fig.7 Change processes of transient saturated zone area and the movement of groundwater

## 4 软岩边坡稳定性分析

### 4.1 模型的建立与参数的取值

数值分析选择 K59+060 处典型剖面，以图 3 所示二维网格为基础进行准三维等效模型的建立。为了考虑暂态饱和区内岩石遇水软化的时效问题，边坡表层采用分层建模的形式，以此来准确地对暂态饱和区遇水软化后强度大小进行赋值。整个计算模型网格单元数为 7 036，节点数为 14 474。图 8 为数值计算网格图。

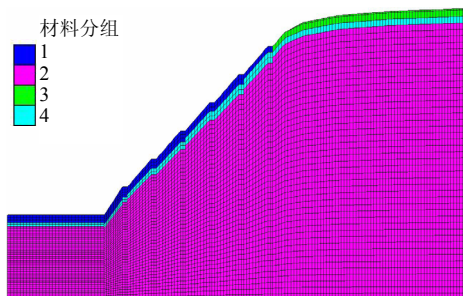


图 8 三维数值计算模型网格图

Fig.8 Mesh of 3D FEM

边界条件：铅直边界上施加水平位移约束；水平边界上施加铅直位移约束。

初始条件：为正确模拟岩体参数变化对边坡稳定性的影响，初始地应力场按自重应力场考虑，即首先采用弹性模型进行分析，然后将计算模型中的位移置 0，保留单元应力，再导入渗流计算网格节点信息（孔隙水压力）。图 9 为导入孔隙水压力后的孔隙水压力分布图（降雨 21 d）。

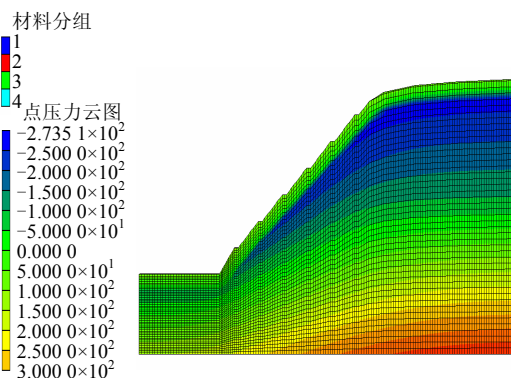


图 9 边坡内孔隙水压力分布图 ( $T=20\text{ d}$ )

Fig.9 Contours of pore water pressure of slope ( $T=20\text{ d}$ )

本构模型：采用摩尔-库仑屈服准则的弹塑性本构模型。

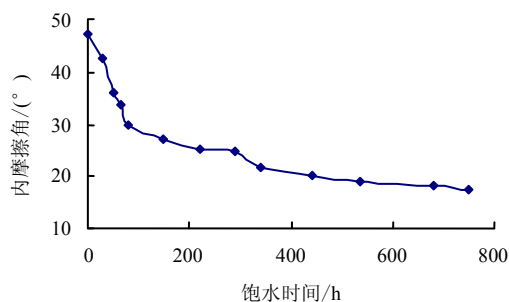
计算力学参数：根据边坡的地质勘探报告选取不考虑岩石遇水软化的边坡物理力学参数，取值见表 1。根据试验规范<sup>[13]</sup>将现场采取的粉砂质泥岩样制备成若干  $\Phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$  圆柱体试件进行不同饱水时间下的单轴压缩试验，得到单轴抗压强度，并在此基础上利用基于 GSI 法的广义 Hoek-Brown<sup>[14]</sup>准则来确定本试验试件的抗剪强度及相关计算参数随饱水时间的变化。粉砂质泥岩饱水软化试验所得主要物理力学性质参数及变化规律如表 1 和图 10 所示，由图可知，随着饱水时间的持续，其主要物理力学参数呈现下降趋势，饱水试验前期下降幅度大于试验后期。

计算方案：选取降雨持续 3、6、12、18、21 d、停止 4、7、9 d 为稳定性计算时间点，对边坡在降雨过程中的稳定性进行模拟，与此同时，考虑边坡表层暂态饱和区软岩力学参数软化效应对边坡稳定性的影响。总结出边坡在降雨条件下安全系数及塑性区变化规律。

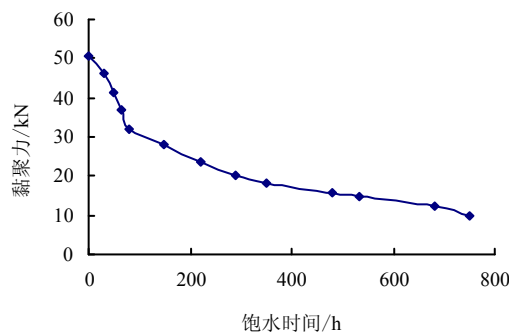
表 1 边坡岩体物理力学参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters list in calculation

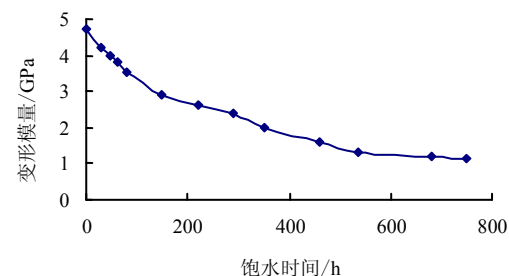
| 材料名称                | 密度<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 变形模量<br>/MPa | 泊松比  | 黏聚力<br>/kPa | 内摩擦角<br>/(°) |
|---------------------|-----------------------------|--------------|------|-------------|--------------|
| 粉质黏土<br>(材料 3)      | 1.9                         | 25           | 0.34 | 23          | 15           |
| 粉砂质泥岩<br>(材料 1、2、4) | 2.8                         | 4 600        | 0.25 | 50          | 45           |



(a) 内摩擦角与饱水时间的关系



(b) 黏聚力与饱水时间的关系



(c) 变形模量与饱水时间的关系

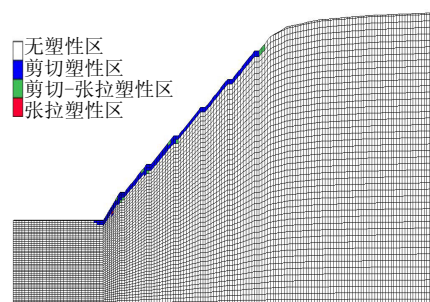
图 10 粉砂质泥岩饱水试验主要力学参数变化图

Fig.10 Experimental results of saturated silty mudstones

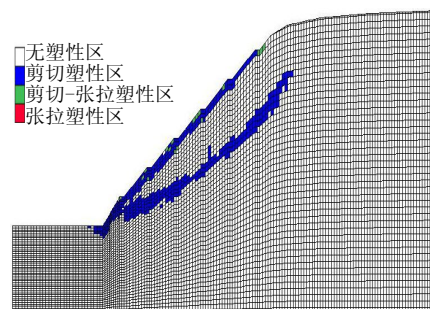
#### 4.2 边坡塑性区分布及发展规律分析

图 11 为考虑降雨及岩石软化共同作用下的边坡塑性区分布图。(限于篇幅,文中只列出了最具代表性的降雨 6 d、21 d、降雨停止 9 d 这 3 个时间点的边坡塑性区分布图)由图可知,降雨初期( $T=6$  d)塑性区主要集中在边坡表层,并随着降雨时间的持续沿着坡脚向上延伸。这是由于在降雨作用下,入渗雨水由于重力作用迅速向坡脚汇集,在边坡表层形成暂态饱和区。暂态饱和区内孔隙水负压力逐渐变为正孔隙水压力,且自重增大,从而使边坡表层岩体有效应力降低。与此同时,边坡表层岩体在雨水的软化作用下也进一步加速了表层岩体的塑性区的形成。这在实际工程中表现为软岩边坡表层局部分层坍塌。当持续降雨到 21 d 的过程中,边坡表层塑性区进一步沿坡面向上及向内延伸,塑性区面积及连通性进一步加大。在降雨入渗深度的进一步扩大所引起的入渗深度内,在基质吸力降低甚至消失

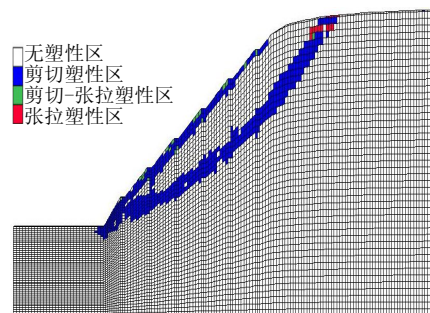
和岩土体重度增大的共同作用下,边坡内部出现了深层的、具有一定贯通性的塑性区分布,且塑性区在坡脚区域分布面积最大,这对边坡整体稳定性是极为不利的。降雨停止 9 d 时,由于边坡表层暂态饱和区内雨水向坡内继续入渗及排出坡外,使边坡表层塑性区面积有一定的扩大,但并不明显。由于雨水继续入渗的影响,边坡深层塑性区分布面积变化扩大,形成了具有贯通性塑性区分布带,这为边坡潜在滑动面的产生提供了客观条件。



(a) 降雨 6 d



(b) 降雨 21 d



(c) 降雨停止 9 d

图 11 边坡塑性区分布图

Fig.11 Distribution of plastic zone

#### 4.3 边坡瞬态安全系数变化分析

在对边坡在降雨条件下的塑性区分布及发展规律分析的基础上,结合强度折减法计算边坡瞬态安全系数。安全系数变化规律如表 2 所示。由表可知,随着降雨时间的持续,边坡整体安全系数有显著的降低,由 1.65 降为 1.15。且由计算可知,在降雨结束后仍然有一定的降低,但降低速率明显小于降雨

过程中安全系数的降低速率。这一现象说明: 降雨持续过程中, 暂态饱和区影响面积内暂态孔隙水压力的升高、边坡岩体自重的增大以及雨水对岩石的软化对软岩边坡稳定性是不利的; 降雨结束后, 由于暂态饱和区雨水的继续入渗, 使边坡内负压区进一步受到影响, 入渗区域内非饱和抗剪强度降低。同时, 暂态饱和区部分雨水由坡面排出, 这在一定程度上又减缓了岩石软化作用以及边坡自重对整体稳定性的影响, 因此, 在降雨结束后边坡安全系数仍有小幅降低。

表2 不同时刻软岩边坡安全系数  
Table 2 Different moments soft rock slope stability safety coefficient

| 时刻/d | 安全系数 | 时刻/d | 安全系数 |
|------|------|------|------|
| 0    | 1.65 | 18   | 1.26 |
| 3    | 1.61 | 21   | 1.15 |
| 6    | 1.57 | 24   | 1.11 |
| 9    | 1.50 | 27   | 1.09 |
| 12   | 1.44 | 30   | 1.06 |
| 15   | 1.35 |      |      |

## 5 结 论

(1) 本文提出的降雨条件下软岩边坡稳定性分析方法既能考虑到渗流作用下坡体内孔隙水压力的变化对边坡稳定性的影响, 又能将软岩遇水所存在的软化效应在边坡稳定性计算中较好地体现。为分析降雨条件下的软岩边坡稳定性提供了一种新的方法。

(2) 降雨开始后, 边坡表层非饱和区出现暂态正孔隙水压力。随着降雨历时的增长, 边坡表层开始出现暂态饱和区, 暂态饱和区面积开始从坡脚处沿着坡面向上延伸, 同时也朝着与坡面垂直的方向向边坡内部扩大。

(3) 边坡在降雨及岩石软化效应的共同作用下, 在降雨初期, 边坡表层率先出现塑性区, 表现为边坡表面局部分层坍塌; 随着降雨历时的增长, 边坡表层塑性区面积增大, 同时在边坡内部也出现具有贯通性的深层塑性区; 降雨停止后, 边坡内各位置塑性区面积还有所增加, 但增幅较小。

(4) 边坡在降雨过程中, 安全系数有显著降低, 这是边坡体内暂态孔隙水压力与岩石软化效应共同影响的结果。降雨停止后, 雨水由坡面缓慢排出及暂态孔隙水压力的逐渐降低对软岩边坡安全系数的继续降低具有一定的延缓作用。

## 参 考 文 献

- [1] NG CW, SHI Q. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage[J]. *Computers and Geotechnics*, 1998, 22(1): 1—28.
- [2] 孙广忠. 中国典型滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [3] 刘俊新, 刘育田, 胡启军. 非饱和地表径流-渗流和流固耦合条件下降雨入渗对路堤边坡稳定性研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(3): 903—910.
- LIU Jun-xin, LIU Yu-tian, HU Qi-jun. Stability of embankment slope subjected to rainfall infiltration considering both runoff-underground seepage and fluid-solid coupling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(3): 903—910.
- [4] 周家文, 徐卫亚, 邓俊晔, 等. 降雨入渗条件下边坡的稳定性分析[J]. *水利学报*, 2008, 39(9): 1066—1073.
- ZHOU Jia-wen, XU Wei-ya, DENG Jun-ye, et al. Analysis of slope stability under intensive rainfall[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(9): 1066—1073.
- [5] 吴长富, 朱向荣, 尹小涛, 等. 强降雨条件下土质边坡瞬态稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2008, 29(2): 386—391.
- WU Chang-fu, ZHU Xiang-rong, YIN Xiao-tao, et al. Analysis of soil slope' transient stability under intensive rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 386—391.
- [6] 张国, 朱济祥, 庄军, 等. 岩质边坡稳定性的渗流耦合分析[J]. *天津大学学报*, 1999, 32(5): 560—564.
- ZHANG Guo, ZHU Ji-xiang, ZHUANG Jun, et al. Rocky slope hydromechanical coupling analysis[J]. *Journal of Tianjin University*, 1999, 32(5): 560—564.
- [7] 戚国庆, 黄润秋, 速宝玉, 等. 岩质边坡降雨入渗过程的数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(4): 625—629.
- QI Guo-qing, HUANG Run-qiu, SU Bao-yu, et al. Numeric simulation on rainfall infiltration on rock slope[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(4): 625—629.
- [8] 周桂云, 李同春. 饱和-非饱和和非稳定渗流作用下岩质边坡稳定性分析[J]. *水电能源科学*, 2006, 24(5): 79—82.
- ZHOU Gui-yun, LI Tong-chun. The rock slope stability analysis under saturated-unsaturated seepage[J]. *Water Resources and Power*, 2006, 24(5): 79—82.
- [9] 毛昶熙, 段祥宝, 李祖贻. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.
- [10] 顾慰慈. 渗流计算原理及应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000.
- [11] VAN GENUCHTEN M T. A closed form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, 44(5): 892—898.
- [12] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [13] 中华人民共和国水利部. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规范[S]. 内蒙古: 内蒙古大学出版社, 2003.
- [14] HOEK E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1980, 106(9): 1013—1035.