

# 降雨入渗条件下炭质泥岩路堤动态稳定性

付宏渊<sup>1,2</sup>, 邱 祥<sup>1,2</sup>, 李光裕<sup>3</sup>, 曾 铃<sup>3</sup>, 刘新喜<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 3. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 湖南 长沙 410114)

**摘 要:**为了研究炭质泥岩路堤在降雨入渗条件下的稳定性,在分析路堤稳定性影响因素的基础上,结合饱和-非饱和渗流及稳定性分析基本理论,提出了一种能同时考虑路堤内部饱和度、孔隙水压力、渗透力、软化及非饱和效应的路堤稳定性分析方法,并利用该方法对降雨条件下路堤渗流场及稳定性的变化规律进行了数值计算。研究表明:提出的路堤稳定性动态计算方法具有较强的实用性,能够综合考虑多因素影响下的炭质泥岩路堤稳定性;降雨期间,炭质泥岩路堤内部地下水位逐渐抬升,饱和区渗透力合力先减小,后增大;降雨停止后,路堤内部地下水位迅速降低,饱和区渗透力合力逐渐减小;降雨条件下,炭质泥岩路堤坡面附近非饱和区土体的渗流速度与其孔隙水压力、饱和度变化成正比,饱和区土体沿路堤内部水平向外的渗流速度、渗透力与地下水位变化成正比,沿路堤上部竖直向下的渗流速度、渗透力与地下水位变化成反比;降雨过程中,炭质泥岩路堤安全系数先降低,再升高,后持续降低;降雨停止后,安全系数先迅速恢复,后趋于平缓;降雨初期,路堤饱和区塑性带先扩张,后消散,过坡脚的塑性带基本不变,降雨后期,路堤饱和区塑性带与过坡脚的塑性带均持续增加。降雨终止后,路堤饱和区塑性带与过坡脚的塑性带均逐渐消散。

**关键词:**道路工程;炭质泥岩路堤;降雨入渗;渗透力;软化效应;非饱和效应;稳定性分析

**中图分类号:**U416.12

**文献标志码:**A

## Dynamic stability of carbonaceous mudstone embankment under rainfall infiltration

FU Hong-yuan<sup>1,2</sup>, QIU Xiang<sup>1,2</sup>, LI Guang-yu<sup>3</sup>, ZENG Ling<sup>3</sup>, LIU Xin-xi<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Road Structure and Material of Ministry of Transport, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

**Abstract:** In order to study the carbonaceous mudstone embankment stability under the condition of rainfall infiltration, this paper analyzed the factors influencing the stability of embankment, and proposed a stability analyzing method that can consider the saturation, pore water pressure, seepage force, soften and unsaturation effect. Combing the saturated-unsaturated seepage and stability theory, this paper used the proposed method to calculate the changes of embankment seepage field and stability in rainfall condition. The results show that the dynamic stability

收稿日期:2016-08-17

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51578079,51508040,51678074,51378082);湖南省自然科学基金项目(2016JJ3010);湖南省研究生科研创新项目(kfj150305);长沙理工大学道路结构与材料交通行业重点实验室开放基金项目(CX2016B383)

**作者简介:**付宏渊(1965-),男,湖北随州人,教授,博士研究生导师,E-mail:Fuhy001@163.com。

calculation method presented in this paper has strong practicality, which can consider the stability of carbonaceous mudstone embankment influenced by multiple factors. During the period of rainfall, the underground water level inside the carbonaceous mudstone embankment rises gradually, the resultant force of penetration decreases first and increases later. After rain, the underground water level inside the embankment reduces rapidly, the resultant force of penetration decreases gradually. Under the condition of rainfall, the seepage velocity of soil in unsaturated zone near the carbonaceous mudstone embankment slope is directly proportional to the change of its pore water pressure and saturation, the seepage velocity and penetration force of soil in saturated zone along the inside of embankment horizontally outward is directly proportional to the change of the underground water level under embankment slope surface, the seepage velocity and penetration force of soil in saturated zone along the upper part of embankment vertically downward is inversely proportional to the change of the underground water level under embankment slope surface. In the process of rainfall, the stability safety factor of the carbonaceous mudstone embankment decreases first, then increases and continues to reduce again. After the rain, the stability safety factor first recovers quickly, then levels off. During the early period of rainfall, the plastic tape of saturated zone expands first and then dissipates, and the plastic tape over the slope foot keeps unchanging. During the later period of rainfall, the plastic tape of saturated zone and the plastic tape over the slope foot continue to expand. After the rain, the plastic tape of saturated zone and the plastic tape over the slope foot gradually dissipate. 1 tab, 15 figs, 22 refs.

**Key words:** road engineering; carbonaceous mudstone embankment; rainfall infiltration; seepage force; softening effect; unsaturated effect; stability analysis

## 0 引 言

降雨是导致边坡失稳的最常见和最重要的环境因素之一,特别是在降雨量较大的南方地区,降雨入渗条件下的边坡变形与稳定性问题已经引起了部分科研及工程技术人员的高度关注<sup>[1-2]</sup>。当前已有不少学者对降雨条件下影响边坡稳定性的因素进行了探讨。一般而言,降雨对边坡稳定性的影响主要体现在以下 3 个方面:①降雨会引起边坡内部非饱和区土体的饱和度增加,基质吸力丧失,在增加坡体自重应力的同时降低了土体的抗剪强度;②降雨会引起边坡内部饱和区土体的孔隙水压力增加,强度逐渐软化,土体的抗剪强度进一步降低;③降雨会引起边坡饱和区土体的渗透力发生变化,坡体的自重应力也随之改变。

现有文献中已经提出降雨条件下边坡稳定性的分析方法,可以根据考虑边坡稳定性影响因素归纳为以下 3 类:第 1 类,基于非饱和渗流计算原理,并结合土水特征曲线与非饱和抗剪强度理论,对降雨入渗条件下的边坡稳定性进行分析,此方法虽然考虑了土体的非饱和效应,但是忽略了边坡内部土体

软化、饱和度及渗透力变化的影响<sup>[3-6]</sup>,张玉和等结合土体抗剪强度和土水特征曲线参数对降雨入渗条件下案例边坡的瞬态稳定性进行了分析,验证了土体非饱和效应对边坡稳定性的影响<sup>[7-8]</sup>;第 2 类,通过将土体重度与渗透力进行增量离散,在第 1 类的基础上进一步考虑了土体饱和度及渗透力变化对边坡稳定性的影响,但仍没有考虑土体的软化效应<sup>[9-11]</sup>,张社荣等在分析降雨条件下高填方路堤饱和-非饱和渗流特性的基础上,结合非饱和抗剪强度理论对路堤稳定性进行了研究<sup>[12-13]</sup>;第 3 类,采用间接耦合法,将非饱和渗流计算结果与土体软化效应相结合,以此来分析土体软化对边坡稳定性的影响,该方法忽略了土体非饱和抗剪强度、饱和度及渗透力及变化的影响<sup>[14-15]</sup>,谢瑾荣等将边坡渗流与岩体软化效应相结合,提出了软岩边坡降雨-渗流-软化-灾变的数值分析方法<sup>[16-17]</sup>。以上 3 类边坡稳定性分析方法均是在探讨降雨条件下边坡稳定性影响因素的基础上提出的,由上述分析可知,已有的边坡稳定性分析方法大多只考虑了单一边坡稳定性影响因素,具有一定的局限性。

鉴于此,本文从降雨条件下预崩解炭质泥岩路

堤稳定性影响因素的实际情况出发,提出了一种能够综合考虑路堤内部饱和度、孔隙水压力、渗透力、软化及非饱和效应的路堤稳定性分析方法,并利用该方法探讨了降雨入渗条件下具有软化效应的炭质泥岩路堤稳定性变化规律及塑性区时空演化特征,以期对炭质泥岩地区路堤的修筑及其稳定性控制措施的制定提供参考。

## 1 降雨入渗条件下路堤渗流及稳定性分析基本理论与方法

### 1.1 饱和-非饱和渗流计算原理

降雨入渗条件下路堤内部水分的迁移过程属于典型的饱和-非饱和渗流过程。路堤中非饱和区的渗流与饱和区的渗流一样,总是自发地从水势高处向水势低处流动。因此,降雨入渗条件下剖面二维路堤内部的饱和-非饱和渗流过程仍满足达西定律及其连续性方程<sup>[18]</sup>

$$v = -k(s) \nabla H \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[ k(s) \frac{\partial H}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[ k(s) \frac{\partial H}{\partial Y} \right] + \omega = C(H) \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

式中: $v$ 为渗流速度; $k(s)$ 为土体水力渗透系数, $s = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ,为土体饱和度, $\theta$ 为土体体积含水率, $\theta_r$ 为土体残余体积含水率, $\theta_s$ 为土体饱和体积含水率; $H = h + Y$ ,为总水头, $h = u_w / \gamma_w$ ,为压力水头, $u_w$ 为孔隙水压力, $\gamma_w$ 为水的重度, $Y$ 为位置水头; $\omega$ 为源汇项; $C(H)$ 为容水度,且  $C(H) = \partial \theta / \partial H$ ;  $t$ 为时间。

饱和-非饱和渗流定解条件<sup>[19]</sup>:

(1) 初始条件

$$h(X, Y, t) |_{t=0} = h_0(X, Y), (X, Y) \in \Omega \quad (3)$$

(2) 边界条件

$$h(X, Y, t) |_{\Gamma_1} = h_0(X, Y, t), (X, Y) \in \Gamma_1 \quad (4)$$

$$R_n(t) |_{\Gamma_2} = -k(s) \nabla H n, (X, Y) \in \Gamma_2 \quad (5)$$

$$q_n(t) |_{\Gamma_3} = -\epsilon(t) n, (X, Y) \in \Gamma_3 \quad (6)$$

$$R_s(t) |_{\Gamma_3} = \begin{cases} q_n(t) |_{\Gamma_3} & q_n(t) |_{\Gamma_3} < R_n(t) |_{\Gamma_3} \\ R_n(t) |_{\Gamma_3} & q_n(t) |_{\Gamma_3} \geq R_n(t) |_{\Gamma_3} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $h_0(X, Y)$ 为全部域  $\Omega$  所对应的初始压力水头; $h_0(X, Y, t)$ 为水头边界  $\Gamma_1$  所对应的压力水头; $R_n(t)$ 为流量边界  $\Gamma_2$  所对应的入渗能力; $\epsilon(t)$ 为降雨强度; $n$ 为边界外法线单位向量; $q_n(t)$ 为降雨入渗边界  $\Gamma_3$  所对应的降雨入渗强度; $R_s(t)$ 为降雨入渗边界  $\Gamma_3$  所对应的实际降雨入渗量。

在非饱和渗流计算过程中,土体饱和度与基质吸力、水力渗透系数之间的关系采用 Van Genucht-

en 模型进行拟合<sup>[20]</sup>

$$\Psi = \frac{1}{\alpha} \left[ \left( \frac{1}{s} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

$$k(s) = k_s s^{\frac{1}{2}} \left[ 1 - \left( 1 - s^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (9)$$

式中: $\Psi = u_a - u_w$ ,为基质吸力, $u_a$ 为孔隙气压力,本文中孔隙气压力等于大气压力,即  $u_a = 0$ ;  $m, n, \alpha$  为模型拟合参数,且  $m = 1 - 1/n$ ;  $k_s$  为土体饱和水力渗透系数。

### 1.2 土的渗透力计算及重度修正

路堤饱和区内水的渗流会产生渗透力,渗透力的方向与渗流方向相同,且其大小与水头梯度成正比。因此,本文用式(10)、式(11)对路堤内部饱和区单元的渗透力进行计算<sup>[10]</sup>

$$G_{D_X} = \frac{\gamma_w v_X (H_a - H_b)}{|ab| \sqrt{v_X^2 + v_Y^2}} \quad (10)$$

$$G_{D_Y} = \frac{\gamma_w v_Y (H_a - H_b)}{|ab| \sqrt{v_X^2 + v_Y^2}} \quad (11)$$

式中: $G_{D_X}$ 为水平渗透力; $G_{D_Y}$ 为垂直渗透力; $v_X$ 为单元质心处沿  $X$  方向的渗流速度; $v_Y$ 为单元质心处沿  $Y$  方向的渗流速度; $|ab|$ 为过单元质心处且以  $(v_X / \sqrt{v_X^2 + v_Y^2}, v_Y / \sqrt{v_X^2 + v_Y^2})$  为方向向量的直线与单元边的 2 个交点  $a$  与  $b$  之间的距离; $H_a, H_b$  分别为根据交点  $a$  与  $b$  所在单元边的 2 个节点总水头线性插值得到的交点总水头。

降雨入渗条件下路堤内部单元的重度采用以下公式进行修正<sup>[11]</sup>

$$\gamma = \gamma_r + s(\gamma_s - \gamma_r) \quad (12)$$

式中: $\gamma$ 为修正后的土体重度; $\gamma_r$ 为土体残余体积含水率所对应的重度; $\gamma_s$ 为土体饱和体积含水率所对应的重度。

### 1.3 考虑软化与非饱和效应的摩尔-库仑破坏准则

大量工程实践表明,土体的破坏是由于其剪应力达到了自身的抗剪强度,从而导致土体沿着剪应力的方向产生剪切破坏。最早描述土体抗剪强度的是库仑于 18 世纪 70 年代提出的摩尔-库仑破坏准则

$$\tau = c + (\sigma + u_w) \tan(\varphi) \quad (13)$$

式中: $\tau$ 为土体抗剪强度; $c$ 为土体有效黏聚力; $\sigma$ 为剪切面上的法向总应力; $\varphi$ 为土体有效内摩擦角。

摩尔-库仑破坏准则虽然描述了土体抗剪强度与法向有效应力之间的关系,但是并没有体现软化与非饱和效应对土体抗剪强度的影响。为此,Ali 等总结出以饱水时间为自变量的土体强度软化数学表达式<sup>[21]</sup>,而 Vanapalli 等则提出以法向有效应力与基质

吸力为变量的非饱和土抗剪强度计算公式<sup>[22]</sup>

$$c=ae^{-bt_s} \tag{14}$$

$$\varphi=fe^{-gt_s} \tag{15}$$

$$\tau=c+(\sigma-u_a)\tan(\varphi)+(u_a-u_w)\tan(\varphi) \tag{16}$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $f$ 、 $g$  为拟合参数,且均为正数; $t_s$  为土体饱水时间。

将式(14)、式(15)代入式(16),并整理得到

$$\tau=ae^{-bt_s}-u_w\tan(fe^{-gt_s})+u_w\tan(fe^{-gt_s})+(\sigma-u_w)\tan(fe^{-gt_s})=c'+(\sigma-u_w)\tan(\varphi) \tag{17}$$

式中: $ae^{-bt_s}-u_w\tan(fe^{-gt_s})+u_w\tan(fe^{-gt_s})$ ,为同时考虑土体软化与非饱和效应的等效黏聚力,定义为  $c'$ 。

式(17)即为同时考虑软化与非饱和效应的摩尔-库仑破坏准则。

1.4 降雨入渗条件下路堤稳定性分析方法

降雨条件下预崩解炭质泥岩路堤动态稳定性计算流程如图 1 所示。首先,建立二维数值模型进行降雨入渗条件下路堤饱和-非饱和渗流计算。然后,在二维数值模型中导入降雨过程中不同降雨时刻所对应的节点孔隙水压力;同时,将单元摩尔-库仑材料中的有效黏聚力与有效内摩擦角分别按照式(17)中的  $ae^{-bt_s}-u_w\tan(fe^{-gt_s})+u_w\tan(fe^{-gt_s})$  与  $fe^{-gt_s}$  进行赋值;并根据单元的水平渗透力  $G_{Dx}$  设置单元的水平体积力,根据单元的垂直渗透力  $G_{Dy}$  与修正后的重度  $\gamma$  之和设置单元垂直体积力。最后,采用强度折减法对路堤稳定性进行计算,并确定其塑性区分布与稳定安全系数的变化规律。

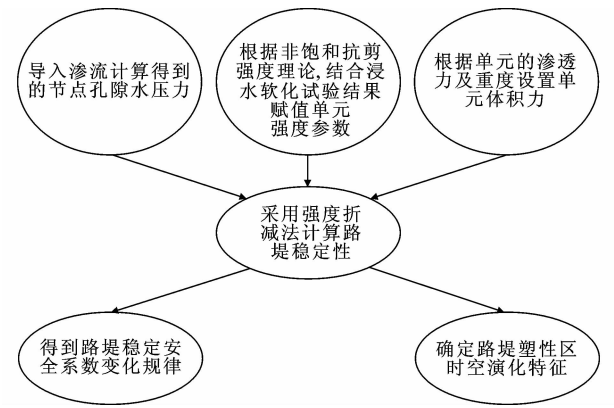


图 1 路堤稳定性计算流程  
Fig. 1 Calculation process of embankment stability

2 炭质泥岩路堤饱和-非饱和渗流特性分析

2.1 模型的建立及渗流参数

为研究预崩解炭质泥岩路堤在降雨入渗条件下

的渗流特性,本文以广西六寨—河池高速公路某典型路堤横断面的一半为研究对象,路堤典型横断面及初始地下水位线如图 2 所示。将路堤模型划分为 13 920 个单元与 14 197 个节点,并在 GF 右侧 1 m 处各设置 3 个特征点与 3 个特征单元,数值模型网格划分、特征点及特征单元如图 3 所示。

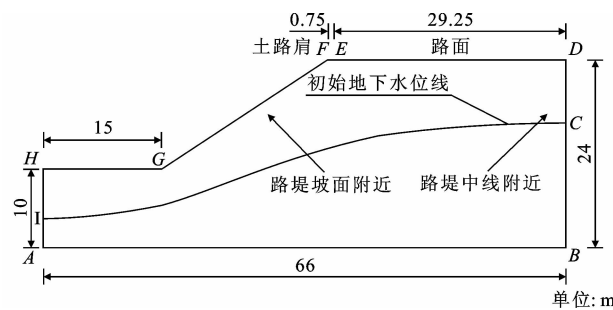


图 2 路堤典型横断面及初始地下水位线  
Fig. 2 Typical cross section and initial water level of embankment

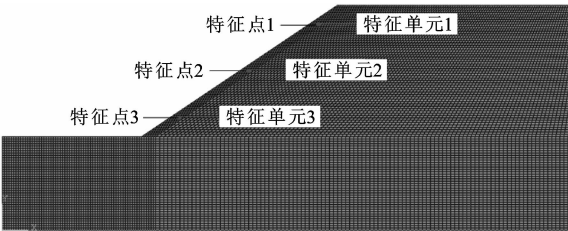


图 3 数值模型网格、特征点及特征单元  
Fig. 3 Grid, feature points and feature units of numerical model

渗流边界条件:AB、BD、DE、HA 设置为零流量边界;EF、FG、GH 设置为流量边界及降雨入渗边界。

渗流初始条件:DE、EF、FG、GH 的孔隙水压力设置为  $-80\text{ kPa}$ ,CI 的孔隙水压力设置为  $0\text{ kPa}$ ,IA、BC 的孔隙水压力设置为静水压力,而 CD、HI 的孔隙水压力则设置为在  $-80\sim 0\text{ kPa}$  中进行线性插值。并在此基础上进行稳态渗流计算,计算结果如图 4 所示,并以此计算结果作为初始时刻路堤孔隙水压力场。

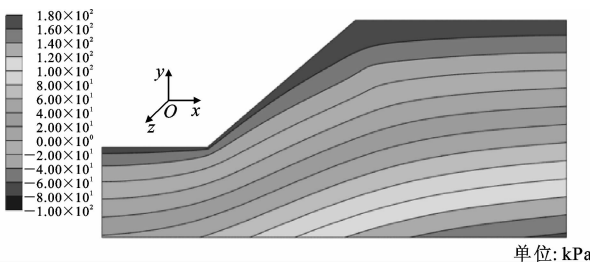


图 4 初始时刻路堤孔隙水压力  
Fig. 4 Initial pore water pressure of embankment

渗流计算水力学参数:在现场取原状土样进行

室内变水头试验,测得炭质泥岩的饱和水力渗透系数为  $4.74 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 。同时,采用体积压力板仪测量原状土样饱和度随基质吸力的变化规律,并用式(8)所示 Van Genuchten 模型进行拟合,得到炭质泥岩水力渗透系数、基质吸力与饱和度的关系曲线,如图 5 所示。根据广西河池地区气象资料可知,该地区有气象记录以来的最大 3 日降雨量为 1.44 m,即降雨强度为  $5.56 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。

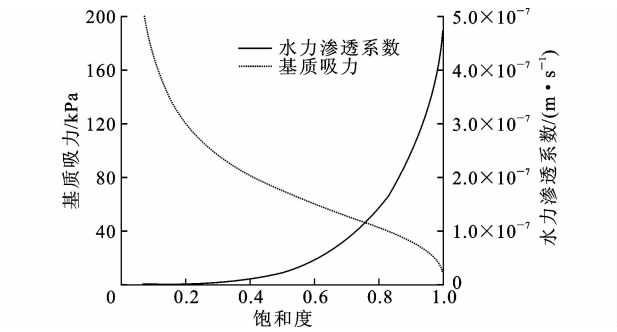


图 5 水力渗透系数、基质吸力与饱和度的关系曲线  
Fig. 5 Relationship curves between hydraulic permeability coefficient & matrix suction with saturation

2.2 路堤地下水位、孔隙水压力及饱和度变化规律

图 6、图 7 分别为降雨过程中与降雨停止后路堤内部地下水位变化示意图。由图 6、图 7 可知,降雨期间,路堤内部地下水位逐渐抬升,其抬升速率在地下水位超过坡脚以前越来越大,在地下水位超过坡脚以后越来越小;降雨停止后,路堤内部地下水位迅速降低,其降低速率越来越小。产生以上变化的原因是:在地下水位超过坡脚以前,土体的饱和度随着雨水的入渗不断增大,其入渗量也随之增大,导致地下水位抬升速率越来越大。在地下水位超过坡脚以后,坡面饱和和溢出边界的长度随着地下水位的抬升不断增长,经路堤坡面溢出的地下水也随之增大,导致地下水位抬升速率越来越小。降雨停止后,坡面饱和和溢出边界的长度随着地下水位的降低不断减少,导致地下水位的降低速率越来越小。

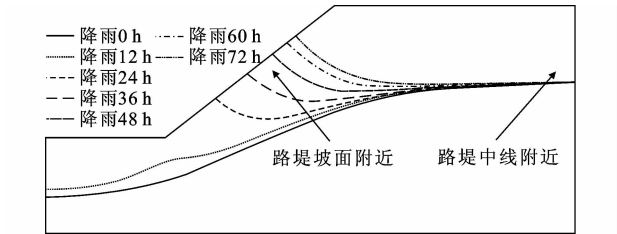


图 6 降雨过程中路堤地下水位变化  
Fig. 6 Change of underground watertable of embankment during rainfall

降雨条件下,路堤孔隙水压力场将随着地下水

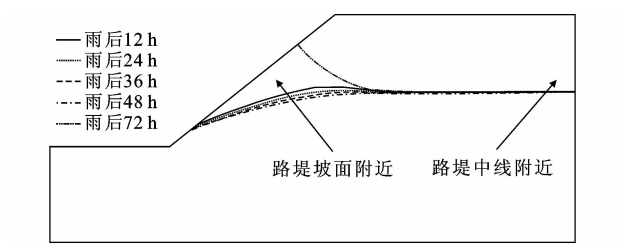


图 7 降雨停止后路堤地下水位变化  
Fig. 7 Change of underground watertable of embankment after rainfall

位的升降而变化,限于篇幅,本文仅列出了降雨停止时刻的路堤孔隙水压力场分布,如图 8 所示。由图 8 可知,降雨过程中,路堤坡面附近土体的孔隙水压力随着地下水位的抬升逐渐增大,路堤中线附近土体的孔隙水压力则由于其地下水位变化幅度较小而保持基本不变。为了探讨降雨条件下路堤饱和度与孔隙水压力的变化特征,本文将特征点 1~3 的饱和度与孔隙水压力的变化规律列于下页图 9 中。由图 9 可知,降雨过程中,路堤坡面附近土体的孔隙水压力与饱和度迅速增大,且其增大的幅度与特征点高程成反比;降雨停止后,路堤坡面附近土体的孔隙水压力与饱和度逐渐减小,且其减小的幅度与特征点高程成正比。产生此变化的原因是:降雨过程中,路堤坡面附近入渗的雨水会沿着重力的作用方向迁移,高程越小,其孔隙水压力与饱和度增长的幅度越大。降雨停止后,路堤坡面附近的地下水位迅速降低,高程越大,其孔隙水压力与饱和度降低的幅度越大。

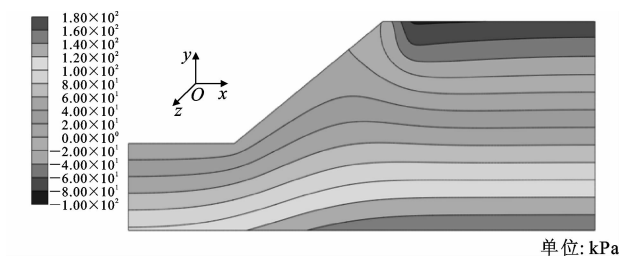


图 8 降雨停止时刻路堤孔隙水压力场  
Fig. 8 Pore water pressure of embankment in the moment of rain stop

2.3 路堤渗透力合力、渗流速度及渗透力动态变化特征

下页图 10 为降雨条件下路堤饱和区渗透力合力的变化曲线。由图 10 可知,降雨过程中,路堤饱和区渗透力合力在地下水位超过坡脚以前不断减小,在地下水位超过坡脚以后持续增大;降雨停止后,路堤饱和区渗透力合力逐渐减小。产生上述变化的原因是:在地下水位超过坡脚以前,路堤饱和区面积增大引起的渗透力合力增长的幅度小于地下水

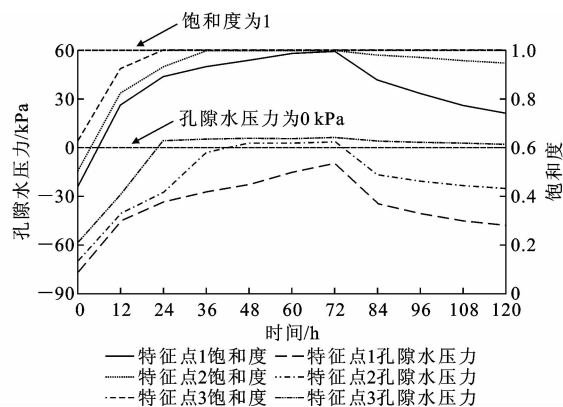


图 9 特征点饱和度、孔隙水压力变化曲线

Fig. 9 Change curves of saturation & pore water pressure of feature points

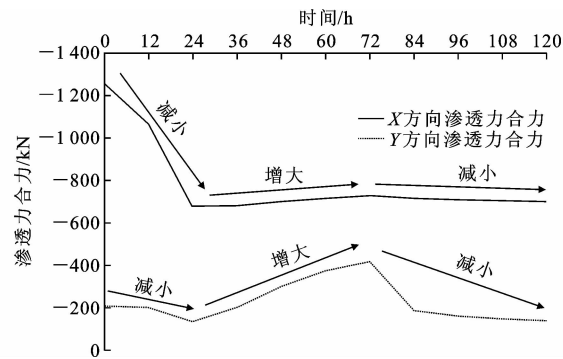


图 10 路堤饱和区渗透力合力变化曲线

Fig. 10 Change curves of penetration force of embankment saturated zone

位抬升引起的渗透力合力下降的幅度,导致饱和区渗透力合力不断减小;在地下水位超过坡脚以后,路堤饱和区面积增大引起的渗透力合力增长的幅度大于地下水位抬升引起的渗透力合力下降的幅度,导致饱和区渗透力合力持续增大;降雨停止后,路堤饱和区面积减小引起的渗透力合力下降的幅度大于地下水位降低引起的渗透力合力增长的幅度,导致饱和区渗透力合力逐渐减小。

图 11 为降雨停止时刻路堤的渗流速度矢量场分布,由图可知,在坡面饱和溢出边界的影响下,路堤坡面附近土体的渗流速度明显大于其他位置的渗流速度。图 12 为特征单元 1~3 质心处沿 X 与 Y 方向的渗流速度变化曲线,图 13 为特征单元 1~3 质心处沿 X 与 Y 方向的渗透力变化曲线。由图 12、图 13 可知,降雨开始后,坡面附近土体的饱和度随着雨水的入渗迅速增大,导致其渗流速度随之增大,渗流方向也由初始时刻沿第 2、3 象限渗出转变为沿第 4 象限渗入,其渗透力则由于坡面附近土体未达到饱和而保持为 0。随着地下水位的上升,坡

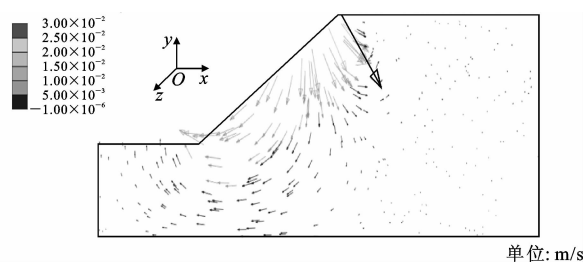


图 11 降雨停止时刻路堤渗流速度矢量场

Fig. 11 Vector field of seepage velocity of embankment in the moment of rain stop

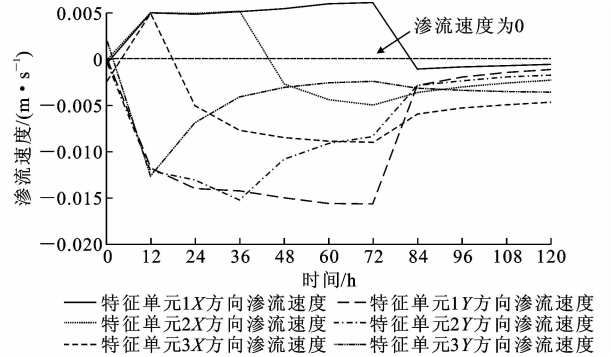


图 12 特征单元质心处渗流速度变化曲线

Fig. 12 Change curves of seepage velocity of centroid of feature cell

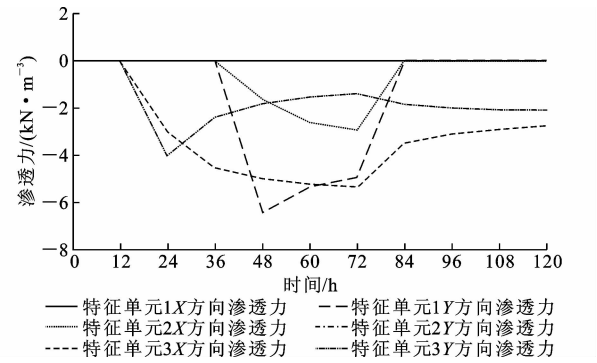


图 13 特征单元质心处渗透力变化曲线

Fig. 13 Change curve of penetration of centroid of feature cell

面附近土体依次达到饱和,饱和后,土体的渗流方向受坡面饱和溢出边界的影响,由沿第 4 象限渗入转变为沿第 3 象限渗出,并产生了沿第 3 象限的渗透力。此外,其沿 X 轴负方向的水头梯度与沿 Y 轴负方向的压力水头梯度也会随之增大。因此,坡面附近土体饱和后,其沿 X 轴负方向的渗流速度与渗透力会不断增大,沿 Y 轴负方向的渗流速度与渗透力会逐渐减小。降雨停止后,路堤坡面附近上部土体的渗流方向由沿第 4 象限渗入转变为沿第 3 象限渗出,路堤坡面附近中部与下部土体的渗流方向仍沿第 3 象限渗出,路堤坡面附近上部与中部土体沿 X、Y 轴负方向的渗流速度会随着饱和度的下降而减

小,其渗透力保持为 0。路堤坡面附近下部土体由于一直处于饱和状态,其沿 X 轴负方向的水头梯度与沿 Y 轴负方向的压力水头梯度会随着坡面以下地下水位 的下降而减小,导致路堤坡面附近下部土体沿 X 轴负方向的渗流速度与渗透力缓慢减小,沿 Y 轴负方向的渗流速度与渗透力则逐渐增大。

### 3 炭质泥岩路堤动态稳定性分析

#### 3.1 计算模型与力学参数

本文根据降雨条件下预崩解炭质泥岩路堤内部土体饱和度、孔隙水压力、渗透力及抗剪强度动态变化的客观事实,在路堤稳定性计算模型中导入饱和-非饱和渗流计算结果中各个时刻的数值模型节点孔隙水压力,更新单元抗剪强度,修正单元体积力的基础上,采用强度折减法对预崩解炭质泥岩路堤动态稳定性进行分析。

稳定性计算边界条件:BD、HA 的水平位移设置为 0,AB 的垂直位移设置为 0。

稳定性分析相关参数:炭质泥岩强度软化数学表达式中的相关参数通过拟合不同浸水时间的炭质泥岩大三轴抗剪强度试验结果得到,其他物理力学性质则采用项目工地实验室提供的参数。炭质泥岩的物理力学参数见表 1。

表 1 炭质泥岩物理力学参数

Tab. 1 Physical & mechanical parameters of carbonaceous mudstone

岩性	饱和重度 $\gamma_s/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	残余重度 $\gamma_r/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	参数 $a/\text{kPa}$	参数 $f/(^\circ)$
炭质泥岩	23.28	17.53	42.57	28.24

岩性	参数 $b/$ $\text{s}^{-1}$	参数 $g/$ $\text{s}^{-1}$	变形模量/ MPa	泊松比
炭质泥岩	$-8.6 \times 10^{-4}$	$-4.3 \times 10^{-4}$	24.87	0.34

#### 3.2 路堤安全系数变化规律

降雨过程中及降雨停止后路堤安全系数的变化规律如图 14 所示。由图 14 可知,降雨过程中,路堤安全系数在地下水位超过坡脚以前表现为先降低,后升高,在地下水位超过坡脚以后表现为持续降低;降雨停止后,路堤安全系数先迅速恢复后缓慢升高。分析其原因是:在地下水位超过坡脚以前,路堤内部非饱和区土体的饱和度不断增加,基质吸力逐渐丧失,饱和区单元的孔隙水压力持续增大,有效黏聚力与有效内摩擦角不断降低,且其下降速率越来越小,渗透力合力逐渐减小,且其减小的速率越来越大。在降雨 12 h 内,由于非饱和区饱和度增加,基质吸力丧失,饱和区孔隙水压力增大,有效黏聚力与有效

内摩擦角降低引起路堤稳定下降的幅度大于饱和区渗透力合力降低引起路堤稳定增加的幅度,因此,路堤安全系数在此期间内逐渐降低。在降雨 12~24 h 内,由于非饱和区饱和度增加,基质吸力丧失,饱和区孔隙水压力增大,有效黏聚力与有效内摩擦角降低引起路堤稳定下降的幅度小于饱和区渗透力合力降低引起路堤稳定增加的幅度,因此,路堤安全系数在此期间内逐渐升高。在地下水位超过坡脚以后,路堤安全系数随着非饱和区饱和度增加,基质吸力丧失,饱和区孔隙水压力增大,有效黏聚力与有效内摩擦角降低及渗透力合力的增加持续降低。降雨停止后,路堤非饱和区的饱和度不断降低,基质吸力逐渐恢复,且其降低与恢复的速率越来越小,饱和区单元的孔隙水压力、有效黏聚力、有效内摩擦角及渗透力合力逐渐减小,且其减小的速率也越来越小。在降雨停止初期(雨后 12 h 内),由于非饱和区饱和度快速降低,基质吸力迅速恢复,饱和区孔隙水压力、渗透力合力大幅度减小引起路堤稳定增加的幅度远大于饱和区有效黏聚力与有效内摩擦角降低引起路堤稳定下降的幅度,因此,路堤安全系数在此期间内迅速恢复。在降雨停止后期(雨后 12~48 h 内),由于非饱和区饱和度降低,基质吸力恢复,饱和区孔隙水压力、渗透力合力减小引起路堤稳定增加的幅度基本等于饱和区有效黏聚力与有效内摩擦角降低引起路堤稳定下降的幅度,因此,路堤安全系数在此期间内趋于平缓。

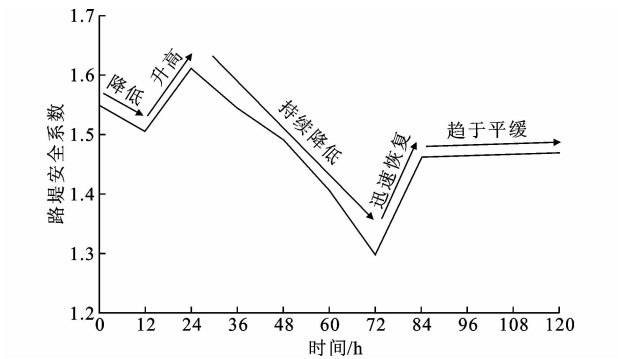


图 14 降雨条件下路堤安全系数变化曲线

Fig. 14 Change curve of safety factor of embankment under rainfall

#### 3.3 路堤塑性区时空演化特征

本文采用强度折减法,以路堤坡顶节点水平位移出现拐点所对应的折减系数作为路堤安全系数。得到降雨条件下路堤内部塑性区的时空演化特征,如下页图 15 所示(限于篇幅,本文仅列出了与降雨过程中及降雨停止后路堤安全系数拐点所对应时刻

的路堤塑性区分布)。由图 15 可知,在地下水位超过坡脚以前,由于路堤非饱和区饱和度增加,基质吸力丧失引起过坡脚的塑性带的面积扩张的幅度较小,因此,过路堤坡脚塑性带的面积在此期间内表现为基本不变。路堤饱和区塑性带的面积与数量除受到非饱和区饱和度、基质吸力的影响外,还与饱和区内孔隙水压力、有效黏聚力、有效内摩擦角及渗透力合力密切相关。在降雨 12 h 内,由于非饱和区饱和度增加,基质吸力丧失,饱和区孔隙水压力增大,有效黏聚力、有效内摩擦角降低引起饱和区塑性带的面积扩张的幅度大于饱和区渗透力合力降低引起

饱和区塑性带的面积消散的幅度,因此,路堤饱和区塑性带的面积在此期间内表现为不断扩张。在降雨 12~24 h 内,由于非饱和区饱和度增加,基质吸力丧失,饱和区孔隙水压力增大,有效黏聚力、有效内摩擦角降低引起饱和区塑性带的面积扩张的幅度小于饱和区渗透力合力降低引起饱和区塑性带的面积消散的幅度,因此,路堤饱和区塑性带的面积在此期间内表现为逐渐消散。在地下水位超过坡脚以后,路堤饱和区塑性带与过坡脚的塑性带的面积随着非饱和区饱和度增加,基质吸力丧失,饱和区孔隙水压力增大,有效黏聚力与有效内摩擦角降低及渗透力合力的增加迅速扩张,路堤饱和区塑性带的数量也随之持续增加。在降雨停止初期(雨后 12 h 内),由于非饱和区饱和度快速降低,基质吸力迅速恢复,饱和区孔隙水压力、渗透力合力大幅度减小,引起路堤饱和区塑性带与过坡脚的塑性带消散的幅度远大于饱和区有效黏聚力与有效内摩擦角降低引起路堤饱和区塑性带与过坡脚的塑性带扩张的幅度,因此,路堤饱和区塑性带与过坡脚的塑性带的面积在此期间内迅速消散,路堤饱和区塑性带的数量逐渐减少。在降雨停止后期(雨后 12~48 h 内),路堤饱和区塑性带与过坡脚的塑性带的面积会随着非饱和区饱和度降低,基质吸力恢复及饱和区孔隙水压力、渗透力合力的减小持续消散,而饱和区塑性带的数量则随着饱和区有效黏聚力与有效内摩擦角的降低逐渐增加。

4 结 语

(1)本文提出了一种能同时考虑路堤内部饱和度、孔隙水压力、渗透力、软化及非饱和效应的路堤稳定性分析方法,并基于该方法对算例炭质泥岩路堤的渗流场及动态稳定性进行了分析,具有较强的实用性。

(2)降雨期间,炭质泥岩路堤内部地下水位逐渐抬升,其抬升速率先增大,后减小,饱和区渗透力合力先减小,后增大;降雨停止后,路堤内部地下水位迅速降低,其降低速率越来越小,饱和区渗透力合力逐渐减小。

(3)降雨条件下,炭质泥岩路堤坡面附近非饱和区土体的渗流速度与其孔隙水压力、饱和度变化成正比,饱和区土体沿路堤内部水平向外的渗流速度、渗透力与地下水位变化成正比,沿路堤上部竖直向下的渗流速度、渗透力与地下水位变化成反比。

(4)降雨过程中,路堤安全系数在地下水位超过

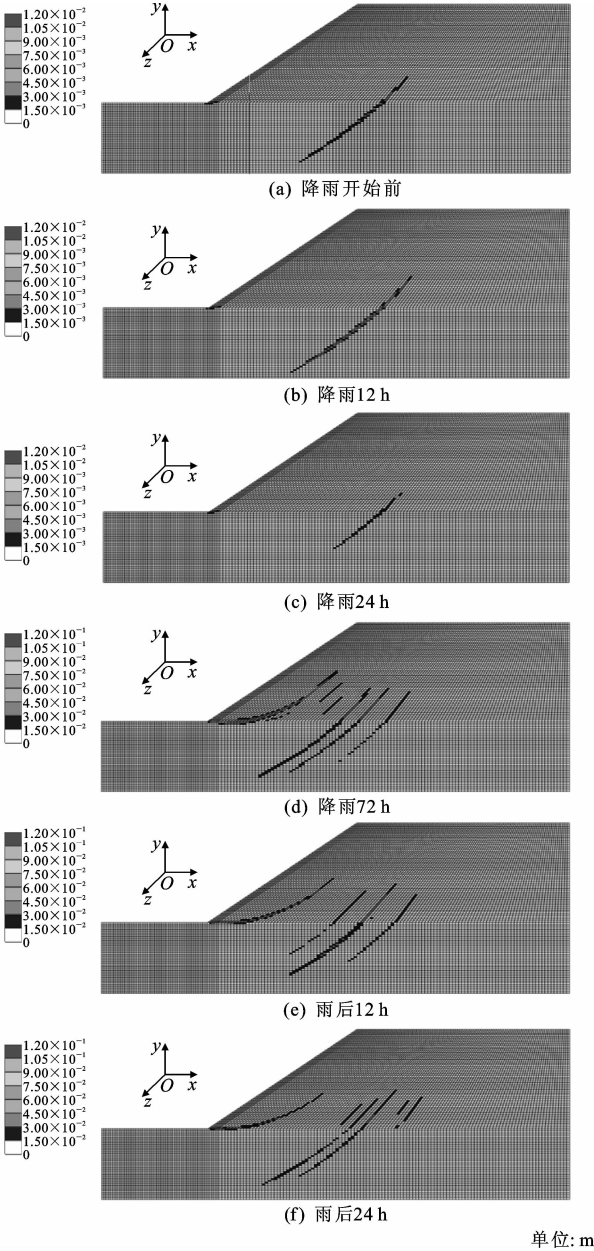


图 15 降雨条件下路堤塑性区分布  
Fig. 15 Distribution of plastic zone of embankment under rainfall



坡脚以前先降低,后升高,在地下水位超过坡脚以后持续降低;降雨停止后,路堤安全系数先迅速恢复,后趋于平缓。

(5)地下水位超过坡脚前,路堤饱和区塑性带先扩张,后消散,过坡脚的塑性带基本不变,地下水位超过坡脚后,路堤饱和区塑性带与过坡脚的塑性带均持续增加;降雨停止后,路堤饱和区塑性带与过坡脚的塑性带均逐渐消散。

(6)预崩解炭质泥岩在浸水条件下不仅具有软化特征,还会产生后续崩解,进而影响炭质泥岩抗剪强度;此外,其土水特征曲线也会随之发生变化。在后续研究中可以进一步考虑浸水条件下炭质泥岩强度损伤及土水特征曲线变化对路堤渗流特征及稳定性的影响。

## 参考文献:

## References:

- [1] NG C W W, 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] 刘建华, 查旭东, 付宏渊, 等. 考虑降雨入渗条件下岩质边坡稳定性分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 33-37, 43.  
LIU Jian-hua, ZHA Xu-dong, FU Hong-yuan, et al. Analysis of rock slope stability under rainfall infiltration condition[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(10): 33-37, 43.
- [3] OH S, LU N. Slope stability analysis under unsaturated conditions: case studies of rainfall-induced failure of cut slopes [J]. Engineering Geology, 2015, 184: 96-103.
- [4] WEI Z, HUANG X M, XUE Y Q. Research on the numerical simulation analysis of slope stability under rainfall infiltration[C]//ASCE. Second International Conference on Sustainable Construction Materials: Design, Performance, and Application. Reston: ASCE, 2012: 105-120.
- [5] 刘新喜, 夏元友, 蔡俊杰, 等. 降雨入渗下强风化软岩高填方路堤边坡稳定性研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1705-1709.  
LIU Xin-xi, XIA Yuan-you, CAI Jun-jie, et al. Study on stability of high-filled embankment slope of highly weathered soft rock under rainfall infiltration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1705-1709.
- [6] 李 涛, 付宏渊, 周功科, 等. 降雨入渗条件下粗粒土路堤暂态饱和区发展规律及稳定性研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 74-80.  
LI Tao, FU Hong-yuan, ZHOU Gong-ke, et al. A study of development law and stability of transient saturated areas of coarse-grained soil embankment under rainfall infiltration [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(5): 74-80.
- [7] 张 玉, 徐卫亚, 邹丽芳, 等. 降雨条件下大型滑坡体渗流稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 833-841.  
ZHANG Yu, XU Wei-ya, ZOU Li-fang, et al. Analysis of seepage stability of large-scale landslide under rainfall condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 833-841.
- [8] 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. Stability analysis of slope under the condition of rainfall infiltration [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9): 1066-1073.
- [9] 吴李泉, 张 锋, 凌贤长, 等. 强降雨条件下浙江武义平头村山体高边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1193-1199.  
WU Li-quan, ZHANG Feng, LING Xian-zhang, et al. Stability analysis of high slope subjected to heavy rainfall in Pingtou Village of Wuyi County, Zhejiang Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1193-1199.
- [10] 荣 冠, 王思敬, 王恩志, 等. 强降雨下元磨公路典型工程边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 704-711.  
RONG Guan, WANG Si-jing, WANG En-zhi, et al. Stability analysis of Yuanmo highway slope under intensive rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 704-711.
- [11] 曾 铃, 付宏渊, 何忠明, 等. 饱和-非饱和渗流条件下降雨对粗粒土路堤边坡稳定性的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(10): 3614-3620.  
ZENG Ling, FU Hong-yuan, HE Zhong-ming, et al. Impact of rainfall on stability of granular soil embankment slope considering saturated-unsaturated seepage [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(10): 3614-3620.
- [12] 张社荣, 谭尧升, 王 超, 等. 强降雨特性对饱和-非饱和边坡失稳破坏的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增2): 4102-4112.  
ZHANG She-rong, TAN Yao-sheng, WANG Chao, et al. Influence of heavy rainfall characteristics on sat-

- urated-unsaturated slope failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4102-4112.
- [13] CAREY J M, PETLEY D N. Progressive shear-surface development in cohesive materials; implications for landslide behavior[J]. Engineering Geology, 2014, 177: 54-65.
- [14] 蒋中明, 曾 铃, 付宏渊, 等. 极端久雨条件下软岩边坡动态稳定性分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(2): 27-34.  
JIANG Zhong-ming, ZENG Ling, FU Hong-yuan, et al. Dynamic stability analysis of soft rock slope due to extremely prolonged rainfall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 27-34.
- [15] 付宏渊, 曾 铃, 王桂尧, 等. 降雨入渗条件下软岩边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2359-2365.  
FU Hong-yuan, ZENG Ling, WANG Gui-yao, et al. Stability analysis of soft rock slope under rainfall infiltration[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2359-2365.
- [16] 谢瑾荣, 周翠英, 程 晔. 降雨条件下软岩边坡渗流-软化分析方法及其灾变机制[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 197-203, 210.  
XIE Jin-rong, ZHOU Cui-ying, CHENG Ye. Method of seepage-softening analysis and disaster mechanism in soft rock slope under rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 197-203, 210.
- [17] DAHAL R K, HASEGAWA S, YAMANAKA M, et al. Comparative analysis of contributing parameters for rainfall-triggered landslides in the Lesser Himalaya of Nepal[J]. Environment Geology, 2009, 58(3): 567-586.
- [18] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.  
MAO Chang-xi. Seepage computation analysis & control[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2003.
- [19] 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.  
GU Wei-ci. Seepage calculation principle and application[M]. Beijing: China Building Material Press, 2000.
- [20] GENUCHTEN M T V. A closed form equation for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(44): 892-898.
- [21] ALI M M Y, KUWANO J. The behaviour of embankment soil with time[J]. Geotechnical Special Publication, 2012(225): 432-441.
- [22] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(3): 379-392.
- (上接第 23 页)
- [15] SIMPSON A L. Measurement of a rut[J]. Preprint, 2003(1607): 12-16.
- [16] 王 迪. 基于多点激光检测技术的车辙深度算法对比及横向偏移误差研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.  
WANG Di. Point-based laser rut detection technology on depth algorithm contrast and offset error research [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [17] AASHTO PP69—2010. Standard practice for determining pavement deformation parameters and cross slope from collected transverse profiles[S].
- [18] LI F. A methodology for characterizing pavement rutting condition using emerging 3D line laser imaging technology[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2012.
- [19] TSAI Y C, WANG Z H, LI F. Assessment of rut depth measurement accuracy of point-based rut bar systems using emerging 3D line laser imaging technology[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 23(3): 322-330.
- [20] AASHTO. AASHTO guide for design of pavement structures[M]. Washington DC: AASHTO, 1993.
- [21] THOMAS F. Automated road segmentation using a Bayesian algorithm[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(8): 591-598.
- [22] 曾 峰. 沥青路面预防性养护决策方法的研究与技术应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
ZENG Feng. Study of decision method and technical application of asphalt pavement preventive maintenance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [23] TSAI Y C, LI F, WU Y C. A new rutting measurement method using emerging 3D line-laser-imaging system [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2013, 6(5): 667-672.