

不同类型降雨边坡温湿耦合及稳定性数值模拟研究

徐翔

(江西省水利规划设计研究院, 江西南昌 330029)

摘要:为研究不同类型降雨条件下(平均型降雨, 前锋型降雨, 中锋型降雨以及后锋型降雨)广西南宁某地边坡温湿耦合特性以及边坡稳定性进行规律。利用加拿大著名岩土软件 Geo-slope2012 软件进行了有限元计算, 计算结果表明: 降雨条件下边坡表层孔压及体积含水量首先达到最大, 然后逐渐向边坡深部发展, 在降雨结束后, 边坡表层的孔压及体积含水量迅速减小; 在降雨过程中, 边坡土体表层的孔压及体积含水量大小顺序为: 后锋型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 前锋型降雨, 深层的孔压及体积含水量大小顺序为: 后锋型降雨 $\leq$ 平均型降雨 $\leq$ 中锋型降雨 $\leq$ 前锋型降雨; 在降雨结束后, 坡土体内部的孔压及体积含水量大小顺序为: 后锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 前锋型降雨; 边坡内部总的温度场与气候变化较为一致, 呈现先增大后减小的规律; 边坡内部的温度变化幅度要小于边坡表层, 同时, 下部监测面的温度变幅要小于上部监测面与中部监测面; 安全系数总体上随时间呈现在降雨过程中逐渐减小, 在降雨结束后保持不变的规律; 不同降雨类型在降雨前期的安全系数大小排序为: 后锋型 $\geq$ 平均型 $\approx$ 中锋型 $\geq$ 前锋型, 最终安全系数趋于一个定值。

关键词: 不同降雨类型; 温湿耦合; 边坡稳定; 数值模拟; Geo-slope

中图分类号: TU432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2018)05-0338-05

0 引言

降雨是诱发地质灾害的重要因素^[1,2], 根据相关的研究表明^[3]: 降雨诱发的地质灾害占总的地质灾害的90%。降雨对边坡的影响主要体现在以下几点: (1) 降雨导致边坡内部地下水位升高, 减小土体的有效应力以及土体的强度参数^[4,5]; (2) 降雨导致边坡的下滑力增加, 加剧边坡失稳^[6,7]。鉴于降雨对边坡的渗流特性以及稳定性的影响较大, 因此开展降雨下的边坡渗透稳定研究显得十分必要。

对于降雨条件下的边坡渗透稳定分析, 国内外已有很多研究, 如郁舒阳等^[8]对不同类型降雨条件下的边坡稳定性进行了分析; 王一兆等^[9]对浅层滑动面在降雨期和停雨期的渗透系数和孔隙水压力以及稳定特性进行了研究; 郭方琴等^[10]对降雨条件下的二维渗流和边坡稳定性进行计算。但是以上研究仅仅是针对不考虑蒸发条件下的降雨边坡稳定, 与实际情况存在一定的差异, 所得结论也不能较好的反映实际情况。对于考虑气候条件下的降雨边坡稳定性研究较少, 马少坤等^[11]

以南宁地区某边坡在温湿耦合下的边坡渗透稳定性进行了研究; 焦月红等^[12]对某工程中的某边坡在蒸发蒸腾作用下的边坡稳定性进行了研究, 但是这些研究并没有考虑不同类型降雨的影响, 事实上, 降雨可以由四种降雨类型(平均型, 前锋型, 中锋型以及后锋型)及其组合进行相应的表达, 因此, 研究在温湿耦合下的不同降雨类型对边坡的渗透稳定性的影响规律具有一定的实际意义。

本文以某边坡为例, 采用加拿大著名岩土有限元计算软件 Geo-slope2012, 根据广西南宁某地实测 15d 气候条件, 考虑不同降雨条件下的边坡温湿耦合的影响, 进行了边坡的渗透稳定性有限元数值模拟, 为相应工况下的边坡温湿耦合特性的认识提供了相应的参考。

1 计算理论

1.1 考虑蒸发-蒸腾作用的非饱和渗流场

土体中水的质量连续方程可以表达为:

$$\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} \left[D_v \frac{\partial P_v}{\partial x} \right] + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} \left[D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right] + \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial P}{\partial x} \right] +$$

收稿日期: 2018-08-01

作者简介: 徐翔(1988-), 男, 硕士, 工程师。

$$\frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial P}{\partial y} \right] + q_v = \lambda \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

式中: ρ_w 为土体中水的密度, g/cm^3 ; P_v 为土体上方的蒸汽压, kPa ; D_v 为气体的消散系数; g 为重力加速度, m/s^2 ; k_x 为 x 方向的渗透系数, cm/s ; k_y 为 y 方向的渗透系数, cm/s ; q_v 为边界上的水流量, m^3 ; P 为总的压力, kPa ; λ 为土水特征曲线的斜率; t 为计算时间, s 。

而热传导连续方程可以表示为:

$$L_v \frac{\partial}{\partial x} \left[D_v \frac{\partial P_v}{\partial x} \right] + L_v \frac{\partial}{\partial y} \left[D_v \frac{\partial P_v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_{thx} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_{thy} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + q_{vth} = \lambda_{th} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: L_v 为蒸汽的热量系数; λ_{thx} 为土体 x 方向的热传导率; λ_{thy} 为土体 y 方向的热传导率; q_{vth} 为计算边界的热量, $^\circ\text{C}$; T 为温度, $^\circ\text{C}$; λ_{th} 为总的热传导率。

而求解上述数学物理方程则需要知道土体的土水特征曲线, 根据 Fredlund & Xing 理论^[12]:

$$a = \varphi_i \quad (3)$$

$$m = 3.67 \ln \left(\frac{\theta_s}{\theta_i} \right) \quad (4)$$

$$n = \frac{1.31^{m+1}}{m\theta_s} 3.72s\varphi_i \quad (5)$$

$$\theta_w = C_\varphi \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\varphi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (6)$$

$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e_i^y} \theta(e_i^y)}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^y) - \theta_s \theta^0(e_i^y)}{e_i^y}} \quad (7)$$

式中: θ_w 为土体的体积含水量; C_φ 为函数的修正函数, e 为自然对数; φ 为负孔隙水压力, kPa ; a, m, n 为拟合参数, a 是体积含水量的拐点, 其值略大于进气值, m 控制了残余含水量, n 控制了体积含水量函数的斜率; φ_i 为曲线拐点对应的基质吸力, kPa ; s 为拐点处的斜率, k_w 为含水量或者负的孔隙水压力计算所得的渗透系数, m/s , k_s 为边坡土的饱和渗透系数, cm/s , y 代表负孔隙水压力算法的虚拟变量, i 为 j 到 N 之间的数值间距, j 为最终函数所描述的最小负孔隙水压力, kPa , N 为最终函数所描述的最大负孔隙水压力, kPa , ψ 对应于第 j 步的负孔隙水压力, kPa , θ^0 为方程的起始值。

1.2 坡面的蒸发与蒸腾

降雨入渗可以看成是边坡水分补给的过程, 而蒸发蒸腾作用却刚好相反, 实际的蒸发量的估算方程可以表

示为^[13]:

$$E = \frac{\Gamma Q + v E_a}{v A + \Gamma} \quad (8)$$

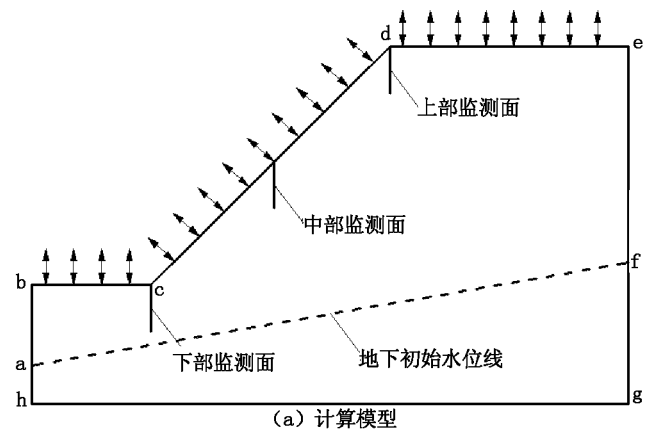
式中: E 为垂直于边坡表面的蒸发量, mm ; Q 为边坡表面的辐射量, mm ; v 为物化参数; A 为土壤的湿度系数。

1.3 非饱和抗剪强度理论

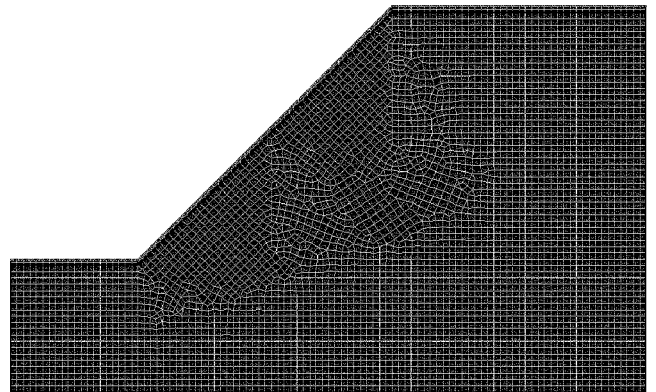
非饱和抗剪强度理论采用 Fredlund 双应力变量公式^[14]:

$$s = c' + \sigma_n \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (9)$$

式中: c' 与 φ' 为有效强度参数; σ_n 为法向总应力与孔隙气压力的差值, kPa ; u_a 为孔隙空气压力, kPa ; u_w 为孔隙水压力, kPa ; φ^b 表征由负孔隙水压力而提高的强度。



(a) 计算模型



(b) 模型网格划分

图1 计算模型

2 计算模型及计算参数

2.1 计算模型及边界条件

本文选取的边坡计算模型如图1所示, 为粘土边坡, 坡度为 45° , 选取如图1(a)所示的3个监测面(上部

监测面,中部监测面以及下部监测面)来实时监测在降雨及蒸发蒸腾作用下的边坡内部孔隙水压力,体积含水量以及温度的变化规律。初始条件以图 1(a)所示的初始地下水位线所计算的渗流场作为初始条件,边界条件设置如下:(1)ah,gf 为零流量边界;(2)bcde 为降雨与蒸发的气候边界;(3)ab,ef,hg 视为不透水的零流量边

界。模型网格图如图 1(b)所示,一共剖分为 4 275 个单元,4 607 个节点。

2.2 计算参数及计算工况

2.2.1 降雨及气候边界

气候边界根据广西南宁某地的实际勘测资料,温度,湿度及风速随时间变化曲线见图 2。

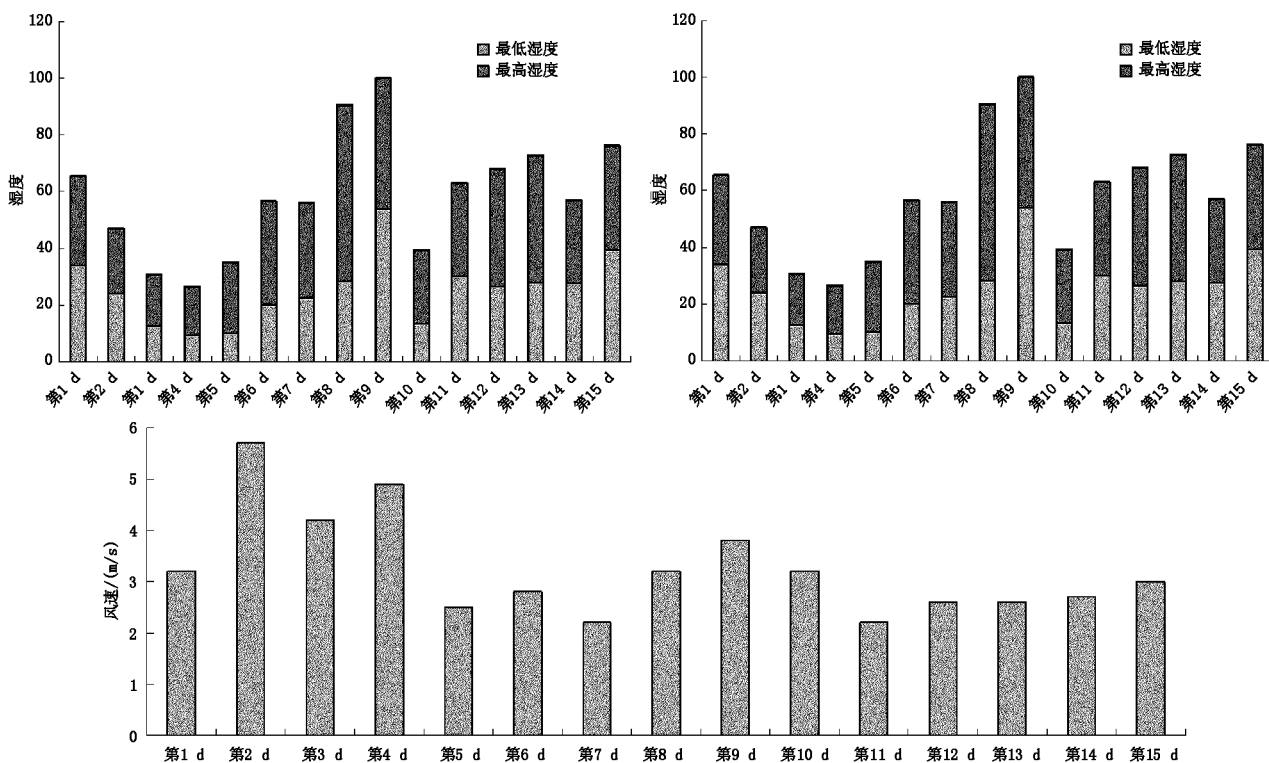


图2 温度、湿度及风速随时间变化曲线

降雨类型选择 4 种典型降雨类型,即平均型降雨,前锋型降雨,中锋型降雨以及后锋型降雨,降雨时程曲线见图 3,降雨 10 d,总降雨量为 1 000 mm,同时考虑降雨 5 d 的工况。

2.2.2 材料参数

材料的基础参数如下:土体饱和渗透系数 0.648 m/d;饱和含水量 $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$;残余含水量 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$;土体材料热系数 $1\,875 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;土体质量比热为 $0.000\,76 \text{ kJ}/\text{克}/^\circ\text{C}$,土体的土水特征曲线见图 4,导热系数与体积含水量的关系曲线、体积热容函数曲线见图 5。

3 计算结果分析

3.1 孔压变化分析

不同降雨类型条件下边坡上部监测面、中部监测面

以及下部监测面的孔压变化规律见图 6。

对于上部监测面来说,同一种雨型下,边坡内部孔压变化规律为:在降雨过程中,边坡表层孔压首先达到最大,然后逐渐向边坡深部发展,在降雨结束后,边坡表层的孔压迅速减小,同时,边坡内部的孔压有一定的减小,边坡深部的孔压由降雨入渗的原因继续增大。对于不同类型降雨来说,孔压变化规律又有不同,在降雨过程中,以第 8 d 孔压为例,边坡土体表层(深度 2.00 m 以内),孔压大小顺序为后锋型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 前锋型降雨,在边坡土体深层(深度 4.00 m 以下),孔压大小顺序为后锋型降雨 $\leq$ 平均型降雨 $\leq$ 中锋型降雨 $\leq$ 前锋型降雨;在降雨结束以后,以第 15 d 为例,边坡土体表层孔压大小顺序为后锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 前锋型降雨,而深度 9.00 m 以下孔压几乎没有变化。

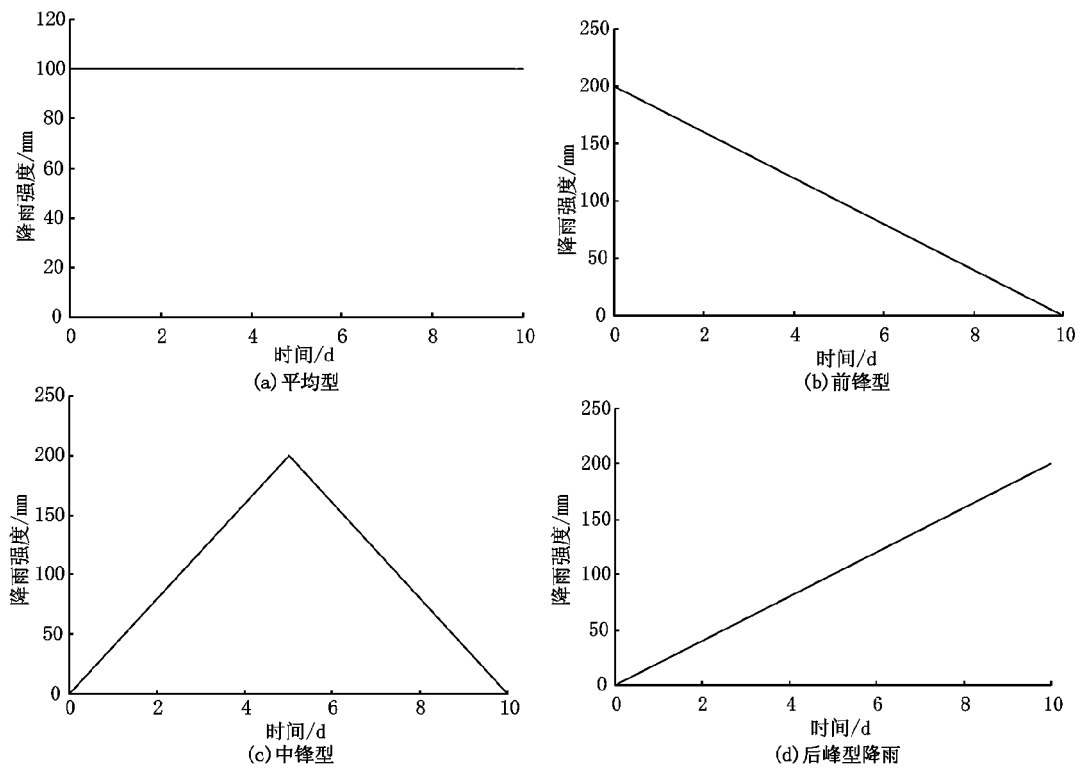


图 3 降雨历程曲线

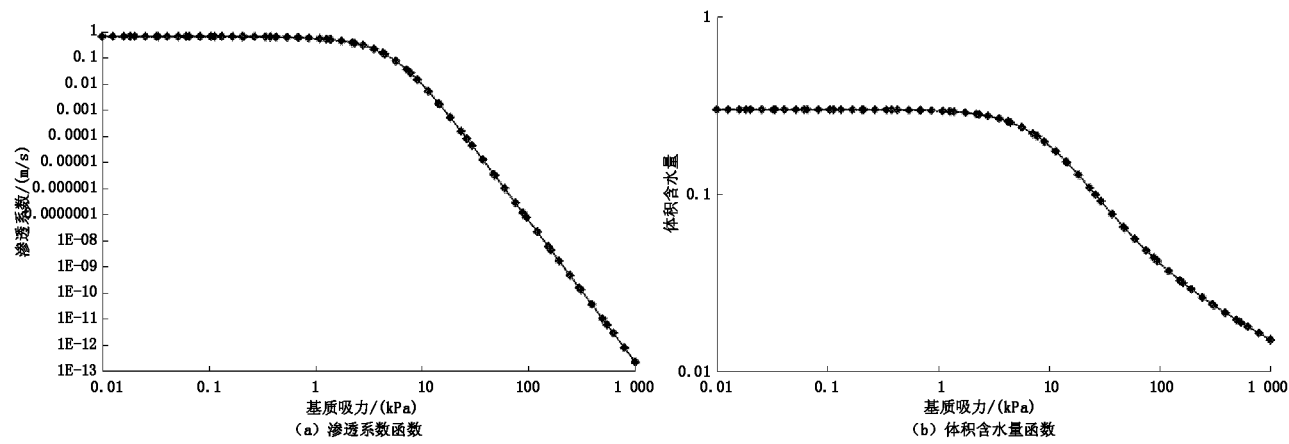


图 4 土水特征曲线

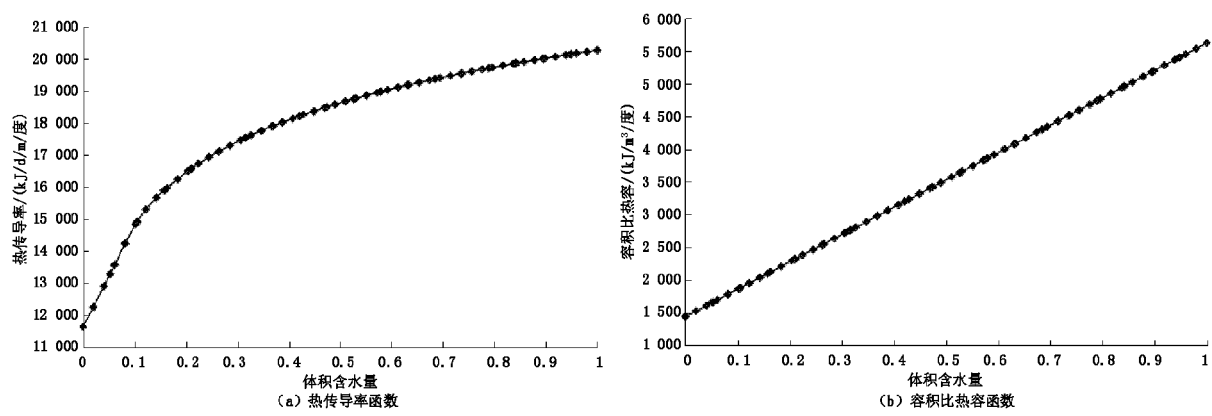


图 5 热传导率函数及容积比热容函数

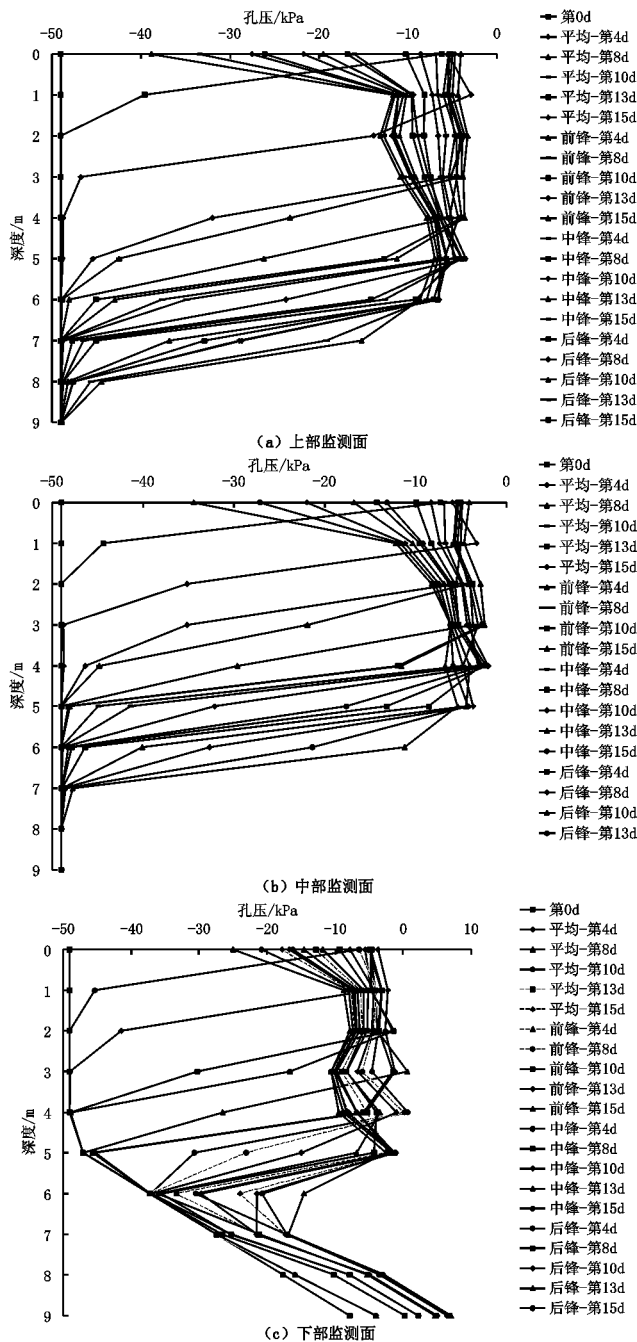


图6 不同监测面孔压变化规律

对于中部监测面来说,降雨影响深度较上部监测面要小,深度 7.00 m 以下孔压几乎不受影响,同一钟雨型下边坡内部的孔压变化规律与上部监测面较为一致,而对于不同类型降雨下的孔压规律略有不同,在降雨过程中,以第 8 d 孔压为例,边坡土体表层(深度 2.00 m 以内),孔压大小顺序为后锋型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 前锋型降雨,但是孔压差别较上部监测面明显减小,在边坡土体深层(深度 4.00 m 以下),孔压大小

顺序为后锋型降雨 $\leq$ 平均型降雨 $\leq$ 中锋型降雨 $\leq$ 前锋型降雨;在降雨结束以后,以第 15 d 为例,边坡土体表层孔压大小顺序为后锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 前锋型降雨,深度 7 m 以下孔压几乎没有变化。

对于下部监测面来说,孔压变化与上部监测面与中部监测面有较大的不同,同一种降雨类型下,边坡表层孔压迅速增大到最大,深部(深度为 2.00 ~ 6.00 m)孔压逐渐增大,而深度 6.00 m 以下因为处于地下水位之下,孔压增大缓慢,停雨后,表层孔压缓慢减小,深层孔压变化不大。对于不同类型降雨来说,在降雨过程中,以第 8 d 孔压为例,边坡土体表层(深度 2.00 m 以内),孔压大小顺序为后锋型降雨 = 平均型降雨 = 中锋型降雨 $\geq$ 前锋型降雨,而在边坡土体深层,孔压大小顺序为后锋型降雨 $\leq$ 平均型降雨 $\leq$ 前锋型降雨 $\leq$ 中锋型降雨,在深度 7.00 m 以下,孔压呈现线性增大的趋势。

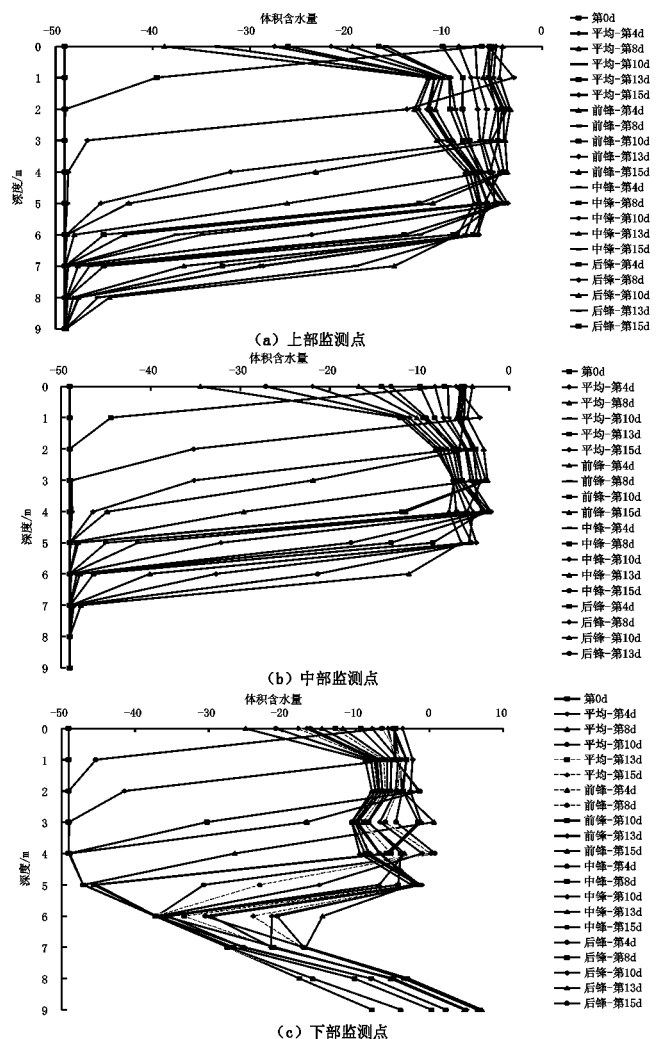


图7 不同监测面体积含水量变化规律

3.2 体积含水量变化规律

对于上部监测面来说,同一种雨型下,边坡内部体积含水量变化规律为:在降雨过程中,边坡表层体积含水量首先达到最大,然后逐渐向边坡深部发展,在降雨结束后,边坡表层的体积含水量迅速减小,而深部体积含水量逐渐增大,呈现“湿润锋”状。对于不同类型降雨来说,体积含水量变化规律又有不同,在降雨过程中,以第8d体积含水量为例,边坡土体表层(深度2.00 m以内),体积含水量大小顺序为后锋型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 前锋型降雨,在边坡土体深层(深度4.00 m以下),体积含水量大小顺序为后锋型降雨 $\leq$ 平均型降雨 $\leq$ 中锋型降雨 $\leq$ 前锋型降雨;在降雨结束后,以第15d为例,边坡土体表层体积含水量大小顺序为后锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 前锋型降雨,而深度9.00 m以下体积含水量几乎没有变化(见图7(a))。

对于中部监测面来说,同一种雨型下边坡内部的体积含水量变化规律与上部监测面较为一致,而对于不同类型降雨下的孔压规律略有不同,在降雨过程中,以第8d孔压为例,边坡土体表层(深度2.00 m以内),体积

含水量大小顺序为后锋型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 前锋型降雨,在边坡土体深层(深度4.00 m以下),体积含水量大小顺序为后锋型降雨 $\leq$ 平均型降雨 $\leq$ 中锋型降雨 $\leq$ 前锋型降雨;在降雨结束后,以第15d为例,边坡土体表层体积含水量大小顺序为后锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 前锋型降雨,深度7.00 m以下体积含水量几乎没有变化(见图7(b))。

对于下部监测面来说,与上部监测面与中部监测面较为不同,同一种降雨类型下,边坡表层体积含水量迅速增至最大,深部(深度为2.00~6.00 m)体积含水量逐渐增大,而深度6.00 m以下因为处于地下水位之下,体积含水量增大缓慢,停雨后,表层体积含水量缓慢减小,深层体积含水量变化不大。对于不同类型降雨来说,在降雨过程中,以第8d体积含水量为例,边坡土体表层(深度2.00 m以内),体积含水量大小顺序为后锋型降雨=平均型降雨=中锋型降雨 $\geq$ 前锋型降雨,而在边坡土体深层,体积含水量大小顺序为后锋型降雨 $\leq$ 平均型降雨 $\leq$ 中锋型降雨 $\leq$ 前锋型降雨,在深度7.00 m以下,体积含水量呈现线性增大的趋势(见图7(c))。

3.3 温度场变化分析

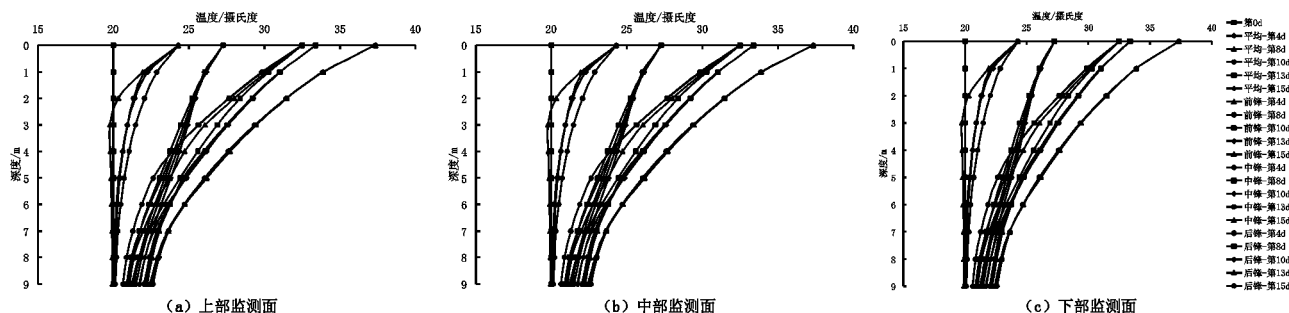


图8 不同类型降雨条件下温度场变化规律

由图8可知,总体上温度变化规律与该地区的温度变化较为一致,即总体温度随时间先增大后减小,同时,边坡内部的温度变化幅度要小于边坡表层,这是因为边坡表层受外界气候变化影响较大,下部监测面的边坡深部温度变化幅度较上部监测面与中部监测面要小,这是因为下部监测面的边坡深部处于水位线以下,水的比热容较大,因而在温度变化的情况下下部监测面的温度变幅较小。对于不同监测面来说,不同降雨类型对温度的变化存在一定的影响,即不同降雨类型对温度值的大小影响顺序为:后锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨=中锋型降雨 $\geq$

前锋型降雨。

3.4 边坡稳定性分析

由图9可见,安全系数总体上随时间呈现在降雨过程中逐渐减小,在降雨结束后保持不变的规律,不同降雨类型影响了在降雨过程中的边坡安全系数大小,不同降雨类型在降雨前期的安全系数大小排序为:后锋型 $\geq$ 平均型 $\approx$ 中锋型 $\geq$ 前锋型,而在降雨结束后不同类型降雨对边坡安全系数的影响一致,即最终安全系数趋于一个定值。

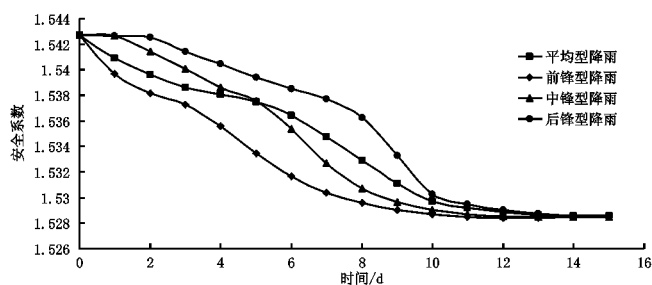


图9 安全系数随时间变化规律

4 结 论

降雨条件下边坡表层孔压首先达到最大,然后逐渐向边坡深部发展;在降雨过程中,边坡土体表层的孔压大小顺序为:后锋型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 前锋型降雨,深层的孔压大小顺序为:后锋型降雨 $\leq$ 平均型降雨 $\leq$ 中锋型降雨 $\leq$ 前锋型降雨;在降雨结束后,坡土体内部的孔压大小顺序为:后锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 前锋型降雨。

在降雨过程中,边坡土体表层的体积含水量大小顺序为:后锋型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 前锋型降雨,深层的体积含水量大小顺序为:后锋型降雨 $\leq$ 平均型降雨 $\leq$ 中锋型降雨 $\leq$ 前锋型降雨;在降雨结束后,坡土体内部的体积含水量大小顺序为:后锋型降雨 $\geq$ 平均型降雨 $\geq$ 中锋型降雨 $\geq$ 前锋型降雨。

边坡内部总的温度场与气候变化较为一致,呈现先增大后减小的规律;边坡内部的温度变化幅度要小于边坡表层,同时,下部监测面的温度变幅要小于上部监测面与中部监测面。

安全系数总体上随时间呈现在降雨过程中逐渐减小,在降雨结束后保持不变的规律;不同降雨类型在降雨前期的安全系数大小排序为:后锋型 $\geq$ 平均型 $\approx$ 中锋型 $\geq$ 前锋型,最终安全系数趋于一个定值。

参考文献:

- [1] 翁新海,王家鹏. 降雨入渗对非饱和边坡稳定性影响分析研究[J]. 科技通报,2018(02):188~191.
- [2] 刘广宁,黄波林,陈小婷,等. 降雨和库水位升降对岩质岸坡的影响[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(3):353~358.
- [3] Zhang L L, Zhang J, Zhang L M, et al. Stability analysis of rainfall - induced slope failure: a review [J]. Geotechnical Engineering, 2011, 164 (164):299~316.
- [4] 唐栋,祁小辉,蒋水华,等. 不同前期降雨与土 - 水特征曲线对边坡稳定的影响[J]. 岩土工程学报,2015,37(s1):148~155.
- [5] 曾铃,李光裕,史振宁,等. 前期降雨对非饱和覆盖层边坡性状及稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018(1):238~246.
- [6] 黄涛,盛建龙,翟明洋. 考虑降雨入渗 - 重分布的边坡稳定性分析[J]. 矿业研究与开发,2018(2):123~127.
- [7] 陈洪江,韩珠峰,周春梅,等. 降雨条件下黄土路堑高边坡稳定性分析[J]. 公路,2017(2):6~11.
- [8] 郁舒阳,张继勋,任旭华,等. 降雨类型对浅层深层滑坡渗流及稳定性的影响[J]. 水电能源科学,2018(3).
- [9] 王一兆,隋耀华. 降雨入渗对边坡浅层稳定性的影响[J]. 长江科学院院报,2017,34(4):122~125.
- [10] 郭方琴,刘伟平,汪和清. 降雨条件下土体边坡稳定性分析[J]. 南昌大学学报(工科版),2017,39(1):55~60.
- [11] 马少坤,童唯峰,冯野,等. 极端气候下互层边坡的温湿耦合特性及稳定性分析[J]. 长江科学院院报,2017,34(8):72~78.
- [12] Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil - water characteristic curve [J]. Revue Canadienne De Géotechnique, 1994, 31(4):521~532.
- [13] Wilson G W, Fredlund D G, Barbour S L. Coupled soil - atmosphere modelling for soil evaporation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(2):151~161.
- [14] CALGARY, ALBERTA. GEO - SLOPE International Ltd. Seepage modelling with SEEP/W 2007. [M]. Canada: Geo - Slope International Ltd. , 2010.

编辑:张绍付

(下转第372页)