

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.011

# 气候作用下红黏土边坡湿热迁移特性 及数值模拟分析

陈波<sup>1</sup>, 田慧会<sup>2</sup>, 孟祥传<sup>1</sup>, 杨周洁<sup>1</sup>, 张芹<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程学国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 红黏土边坡的湿热迁移特性对土体强度及整体稳定性具有重要影响。为此,在广西桂林市桂林理工大学雁山校区内建立了红黏土边坡现场监测系统,跟踪监测红黏土边坡含水率和温度随季节的变化规律。在此基础上,利用有限元分析软件 GeoStudio 进行有限元数值模拟。结果表明:红黏土边坡的湿热特性受大气作用影响显著,土体含水率和温度随季节的变化呈正弦波动变化。土体含水率主要受降雨和蒸发的影响,土体温度主要受大气温度和太阳辐射影响。温度的变化随着深度的增加呈现明显的滞后性,温度的变化可以间接反映土体水分的迁移特性,两者的耦合作用促使土体湿热发生迁移。

**关键词:** 气候作用;红黏土边坡,现场监测,温度;含水率

中图分类号: TU446

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)02-0061-07

## Moisture and Heat Transfer Characteristics and Numerical Simulation of Red Clay Slope Under Climate Impact

CHEN Bo<sup>1</sup>, TIAN Huihui<sup>2</sup>, MENG Xiangchuan<sup>1</sup>, YANG Zhoujie<sup>1</sup>, ZHANG Qin<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** Moisture and heat transfer characteristics of red clay slope is very important to the soil strength and its overall stability. Therefore, a red clay slope monitoring system has been established in Yanshan campus of Guilin University of Technology to track and monitor the seasonal variation of water content and temperature of red clay slope. On this basis, finite element analysis software Geostudio is adopted to carry out finite element numerical simulation. The results show that the moisture and heat characteristics of red clay slope have been significantly affected by atmospheric action, and the soil moisture content and temperature fluctuate sinusoidally with seasonal variation. Soil moisture content is mainly affected by rainfall and evaporation, and soil temperature is mainly affected by atmospheric temperature and solar radiation. Temperature changes show obvious hysteresis with the increase of depth. Temperature changes can indirectly reflect the characteristics of soil moisture migration. The coupling effect of the two factors promotes soil moisture and heat migration.

**Keywords:** climatic impact; red clay slope; field monitoring; temperature; moisture content

近年来,随着全球极端天气和全球气候变暖趋势的加剧,引发了一系列滑坡、泥石流等自然灾害,给人类的生命财产安全造成了重大损失。人类的生活生产活动和边坡有着密切的关系,边坡的整体强度和稳定性在大气作用下不断衰减,从而导致边坡

失稳,引发一系列的边坡灾害问题。

多年来,国内外学者对边坡问题进行了深入系统的研究,詹良通等<sup>[1]</sup>对非饱和膨胀土边坡建立了人工降雨条件下的原位监测系统,对降雨入渗条件下边坡失稳的机理进行了分析,Fredlund等<sup>[2-3]</sup>研

究了各种边坡稳定性极限平衡法,并进行了比较。Gasmó 等<sup>[4]</sup>在新加坡南洋理工大学开设了边坡试验场地,并建立了现场原位监测系统,研究了降雨条件下边坡水分与降雨量的关系及其对边坡稳定性的影响。张士林<sup>[5]</sup>考虑了降雨后湿润区土的饱和特性,研究了降雨条件下边坡的入渗规律。William 等<sup>[6]</sup>开发了能够调节模型边界相对湿度的模拟箱,采用离心机模拟了大气降雨入渗和蒸发的季节性变化对土工构筑物力学性能的影响。孔令伟等<sup>[7]</sup>在广西南宁不同类型边坡的原位监测系统,跟踪测试了边坡土体含水率和温度随季节的变化规律,结果表明降雨是诱发边坡产生灾害的直接原因,边坡的稳定性在大气作用下逐渐减弱。陈建斌等<sup>[8]</sup>运用数值模拟研究了膨胀土边坡在大气作用下的动态响应分析。陈颢等<sup>[9]</sup>利用离散元法和极限平衡法建立了一种新的边坡稳定性分析方法。另外,其他学者对边坡也进行了很入系统的研究<sup>[10-16]</sup>。

根据以往的研究,国内外学者对区域性特殊土边坡进行了大量的研究,但对于红黏土边坡的现场原位监测并不多见。为了获取红黏土边坡在大气作用下土体内温度、含水率的变化规律,研究炎热多雨气候条件下红黏土边坡土体的湿热性状,在桂林理工大学雁山校区内建立了红黏土边坡监测平台,及时获取当地气象数据及土体温度和含水率变化情况。为红黏土边坡地区地质灾害防治提供有效地参考价值。

## 1 试验场地介绍及试验方案

### 1.1 试验场地情况介绍

试验场地位于广西壮族自治区桂林市的桂林理工大学校园内的一处红黏土边坡,现场图如图 1 所示边坡表层有草皮覆盖,红黏土边坡坡脚  $30.7^\circ$ ,顺坡向长度 7.4 m,宽度 6.4 m。地处亚热带季风气候季风气候季风,该地区干湿季节分明,夏季炎热多雨,冬季干旱少雨。一年中平均气温为  $23^\circ\text{C}$  左右,年平均降雨量为 1 832 mm,年平均蒸发量在 1 700 mm 左右。根据现场勘察,边坡土体为红褐色的结核红黏土,土质较为均匀,且呈现出上硬下软的状态,其中夹杂着极少量的棕黄色黏土。

### 1.2 试验方案

为获取该边坡所处地区的气象数据以及该边坡土体温度和含水率等数据,在红黏土边坡的坡顶处搭建了小型气象站,用以监测降雨量、蒸发量、太阳辐射、相对湿度等气象数据。并且在边坡的坡顶、坡

中和坡脚的不同深度埋设了土体温度传感器和土体水分传感器,用以实时监测土体温度和含水率的变化情况。边坡传感器埋设位置及边坡纵向剖面图如图 2、图 3 所示。



图 1 边坡现场图

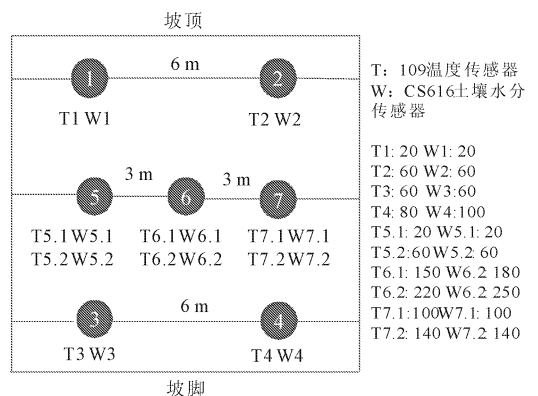


图 2 传感器埋设位置分布图

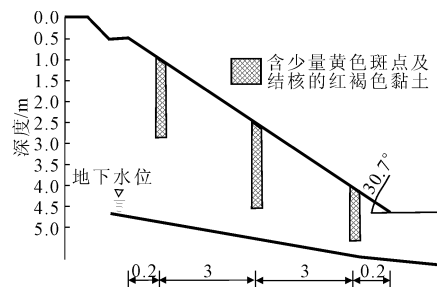


图 3 边坡纵向剖面图(单位:m)

## 2 试验成果及影响因素分析

### 2.1 气象成果分析

在边坡现场安装的小型气象站用以监测该地区的各个气象参数,图 4—图 7 分别为监测期内的大气温度、相对湿度、每日降雨量和蒸发量的监测数据。各气象参数随时间的变化遵循正弦函数变化。由监测数据可以看出,在监测期内大气相对湿度变化范围是  $15.2\% \sim 100\%$ ;日气温最大值为  $39.1^\circ\text{C}$ ;最小值为  $1.3^\circ\text{C}$ ,日平均蒸发量变化范围是  $0 \sim 75 \text{ mm}$ 。

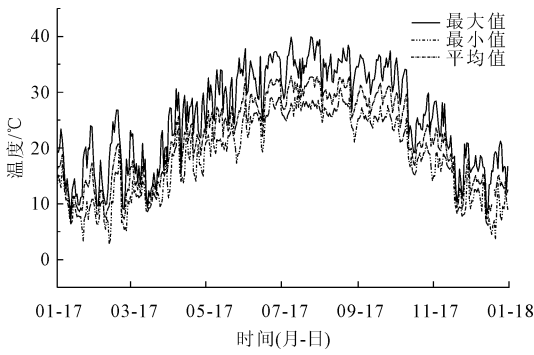


图 4 大气温度变化历程图

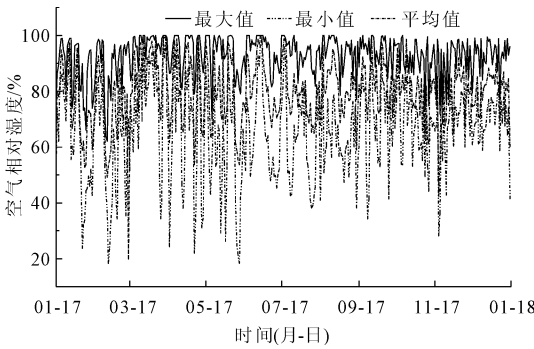


图 5 大气相对湿度变化图

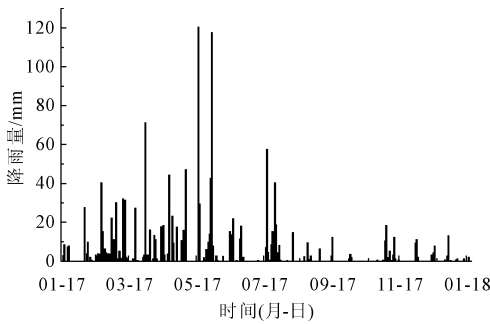


图 6 每日降雨量

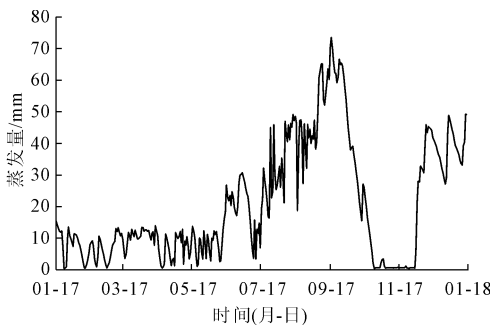


图 7 每日蒸发量

从每日降雨量图形来看,每日降雨量最大值为 121.1 mm,最小值为 0,降雨主要集中在 3 月份—8 月份,为雨季,9 月份—次年 2 月份降雨较少,为旱季。可以看出,各个气象数据的变化规律具有密切的关系,可以通过一项数据的变化来间接反映另一

项数据的变化,这也与桂林地区地处亚热带季风气候密切相关。

### 2.2 土体含水率成果分析

基于边坡土体含水率空间分布考虑,所以在边坡的不同位置处埋设了 TDR 土壤水分传感器,用以实时测量土体含水率的变化情况,具体埋设位置见图 2,埋设位置深度为:坡顶 20 cm、60 cm;坡中 20 cm、60 cm、100 cm、140 cm、180 cm、250 cm;坡脚 60 cm、100 cm 处。

图 8、图 9 分别为坡顶和坡中 20 cm 深度和坡顶、坡中和坡脚 60 cm 深度含水率变化曲线图。从图中可以看出,土体含水率随时间呈波动的不连续的变化,即边坡在大气作用下经历了干湿循环的作用,处于雨季时,含水率明显上升,当处于旱季时,土体的含水率下降,且不同深度的土壤含水率存在明显的滞后效应。坡脚处的含水率最大,坡中次之,坡顶处的含水率最小,这是因为坡脚处于雨水的汇集区,雨水最后汇集在坡脚处,因此含水率最大,而坡顶处与边坡的临空面,雨水来不及渗入土体,便流到了边坡的下处,而坡中处有草皮覆盖,在一定程度上阻碍了水分的流动。且坡顶处温度受大气作用含水率变化比坡中变化更为剧烈,这也归结于草皮的覆盖减小了大气对边坡的作用。

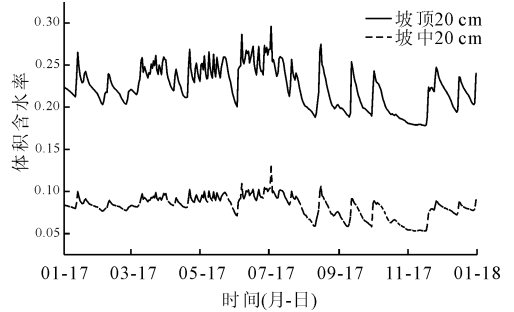


图 8 边坡不同位置 20 cm 深度含水率图

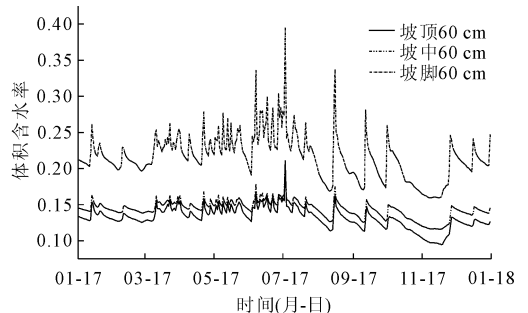


图 9 边坡不同位置 60 cm 深度含水率图

考虑到坡中处埋设的传感器较为密集,因此选用坡中位置来分析雨季和旱季土体含水率的变化规

律。如图 10 所示,表征了坡中不同深度处于雨季和旱季的含水率变化。

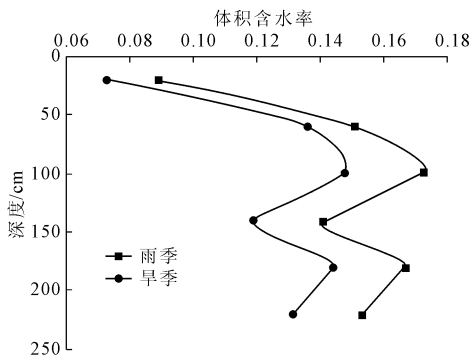


图 10 不同季节土体平均含水率变化图

从图 10 中可以看出,表层土体含水率随季节的变化波动最为剧烈,表层以下波动幅度较小,一方面,受降雨和蒸发的影响,水分的人渗存在滞后效应,导致土体含水率变动幅度随深度的增加而减慢,表层土体含水率高,因而土中的热量传播也快,水分的迁移使土中温度场发生重分布,温度的作用又促使水分发生迁移。对于边坡同一深度不同位置处也是同样的情况,因为坡底的含水率大于坡顶和坡中,所以热量的传递大于坡顶和坡中,两者的共同作用使土体含水率波动幅度较大,另一方面,由于周期性的天气变化对土体含水率影响较大,但其对土体的影响深度有限,表层土体含水率受大气作用较为明显,随着深度的增加,含水率受大气作用的影响逐渐减小,而且,由于边坡受大气影响,经过多次的反复干湿循环作用,加剧了表层土体裂缝的发展,为水分的入渗和热量的传递也起到很大的作用。

### 2.3 土体温度成果分析

和土体含水率一样,土体温度也呈空间分布,因此,在边坡的不同位置、不同深度埋设了温度传感器,具体埋设布置见图 2。

土体温度的变化与大气温度的变化直接相关,土体温度的变化规律与大气温度的变化规律趋于一致。图 11 表示了土体温度在不同季节时的变化规律,当处于雨季时,由于大气温度较高,因此土体的温度较高,且表层土体的温度变化较为剧烈,随着深度的增加,温度的变化逐渐减小,说明随着深度的增加,土体温度受大气影响逐渐减小;当处于旱季时,由于大气温度较低,因此土体温度相对也低,且深层土体温度大于表层土体温度,和雨季时正好相反。

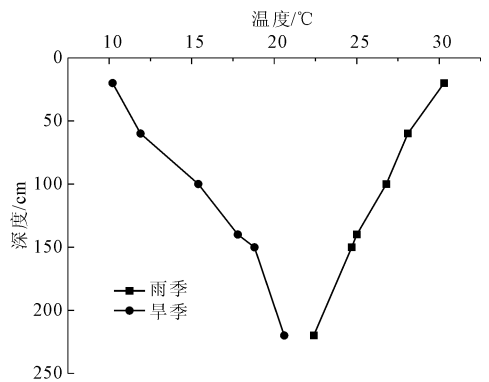


图 11 不同季节土体平均温度变化图

在 220 cm 深处,雨季和旱季的温度相差甚小,再一次说明了大气温度对深层土体影响甚小。旱季时,浅层土体温度变化比雨季时大,这是因为当处于雨季时,雨量较多,土体含水率增加,因为土体导热系数和含水率具有直接关系,水分的增加导致导热系数迅速增加。一方面,导热系数相对较大的水分代替了导热系数相对较小的空气;另一方面,水分的增加在土颗粒表面形成结合水膜,使土颗粒之间的有效接触面积大大增加,进而促使导热系数增加;第三方面,水分入渗的过程中,在土体内部产生了对流潜热效应,增加了热量的传递方式,促使热量向深处传递,使深层土体温度和浅层温度相差不大。而旱季和雨季正好相反,土体导热系数相对较小,且对流换热效应不显著,热量传递相对较慢,综合各种方面使得浅层土体和深层土体温差较大。

土体温度的变化还和太阳辐射值密切相关,同季节、某一天的不同时间段太阳的辐射值都不相同,为了研究一天中土体温度的变化规律,选取了春、夏、秋、冬四个季节一天中太阳辐射值最具代表性的时间段,分别为早上 7 点,中午 12 点和晚上 9 点。从图 12 中可以看出:不管在什么季节,早上土体温度最低,晚上次之,而中午最高,这是因为中午太阳辐射值最大,土体温度随大气温度的升高逐渐升高,夜晚大气温度较低,由于滞后性的存在,因此早上土体温度最低。且春、夏、秋三个季节表层土体比深层土体温度要高,而冬季时表层土体温度比深层土体温度要低,说明大气温度和太阳辐射值对表层土体温度影响剧烈,而对深层土体影响较小。秋冬季节浅层土体和深层土体温差较大,而春夏两个季节相对较小,这是因为秋冬季节处于旱季,雨量较小,春夏季节处于雨季,雨量较多,这与前面得出的结论一致。

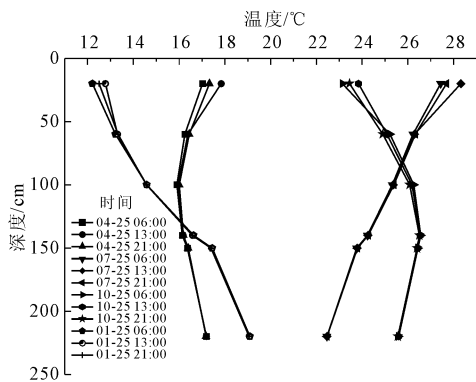


图 12 边坡坡中土体温度分布图

另外,土体温度还与边坡的位置有关,不同的位置土体温度存在一定的差异,图 13 显示了边坡在不同季节、不同位置处表层土体温度梯度的变化情况。可以看出,坡顶的温度梯度最大,坡脚最小,表明坡顶温度变化大,坡脚最小,这是因为坡顶处较为空旷,受大气作用更为显著,而雨水都汇集到坡脚处,相比坡顶土体含水率更大。

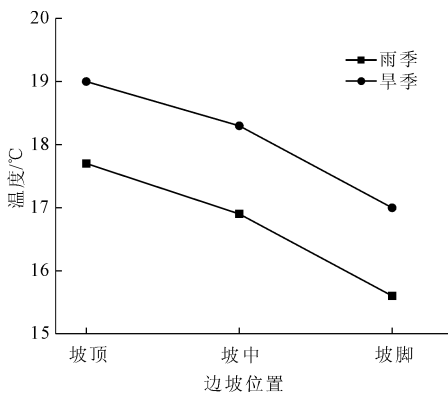


图 13 边坡不同位置表层温度梯度对比图

事实上,热量在土中的传递与土体含水率密切相关,含水率越高,土体热导率越大,热量传递的也就越快,使得深层土体温度梯度较小,温度变化幅度不大。相反,土体温度梯度越大,温度场分布越不均匀,从而加快水分在土中的迁移,水分的迁移又使得土体温度场发生重分布,温度场、湿度场两者的耦合作用促使土体温度、湿度趋于均一化,因此,土体温

表 1 红黏土土体基本物性参数

天然含水率 /%	孔隙比	饱和渗透系数 / $(m \cdot d^{-1})$	导热系数 / $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	比热容 / $(kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1})$	热扩散系数 / $(mm^2 \cdot s^{-1})$
24.5	0.68	0.00234	1.384	2760	0.547

### 3.3 模拟结果及分析

本文对一年内四个季节分别取一天所计算的结果见图 15—图 18 分布云图,这四个时间下的温度场

度的变化可以间接的反映出土体含水率的变化。而且,旱季时温度梯度大于雨季,这与前面得出的结论一致。

## 3 气候作用下数值模拟结果及分析

### 3.1 模型建立及网格化分

GeoStudio 是一套专业的岩土工程和环境岩土工程仿真分析软件,里面设置了不同的分析模块,为研究气候作用对边坡土体温度场的影响,利用软件中 Temp 模块进行研究。结合地区实际的地形地貌及地层分布,以所研究边坡为对象,建立如图 14 所示的边坡有限元数值模型。

为减小边界条件对模拟结果的影响,将模型适当的放大,边坡高度为 10 m,水平距离为 10 m,顶面宽 5 m,坡长为 6.7 m。然后对所建模型进行网格划分,GeoStudio 中所有网格均可自动生成,不必绘制单独的有限单元,本文基于实际情况考虑,全局单元尺寸为 0.4 m,共 1 248 个单元。

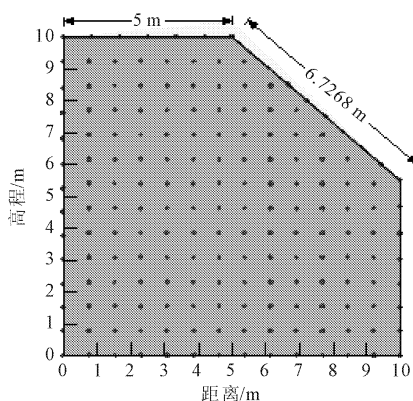


图 14 边坡模型图

### 3.2 初始条件及边界条件

根据常年土体温度和含水率的监测情况来看,地表以下 3 m 土体温度维持在 20°C 左右,因此,设置土体初始温度为 20°C,下边界也为恒温边界 20°C,土体体积含水率为 0.37,上边界采用气候边界,选取 2017 年全年所采集的气象数据。其他边界不与外界发生热交换。数值模拟计算参数如表 1 所示。

分布云图很好地反映了气候条件随红黏土边坡温度变化的影响,从图中可知,夏季核心温度带分布较浅,外界影响深度较大,冬季核心温度带分布深,外

界影响深度较浅。

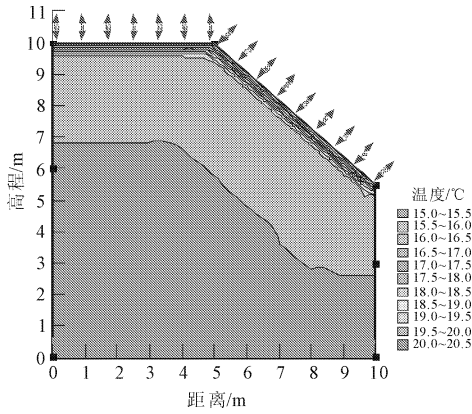


图 15 春季红黏土边坡温度分布云图

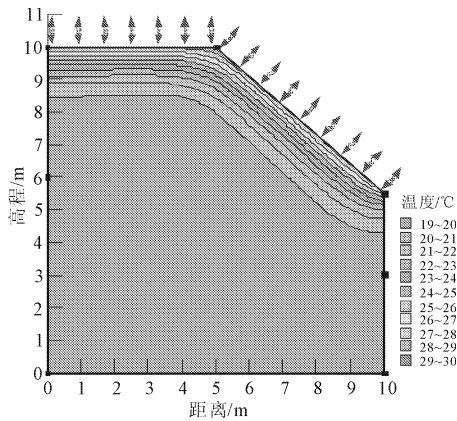


图 16 夏季红黏土边坡温度分布云图

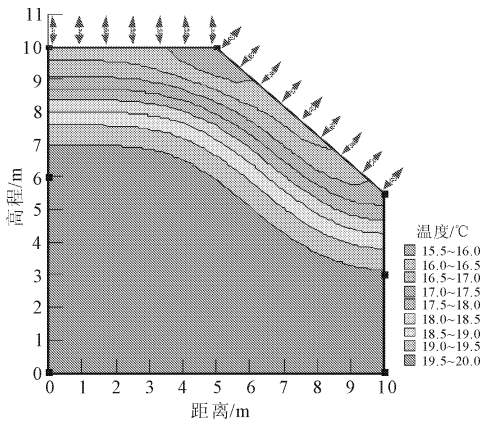


图 17 秋季红黏土边坡温度分布云图

由图可知,表层土体受气候影响最大,随气候的变化温度变化最大,在地表 1 m 范围内温度场等值线密集,而在地表 3 m 以下则受大气影响很小,随着四季的不断更替,土体温度也随着不断变化。在 1 月份—3 月份时由于大气温度较低,边坡表层土体温度小于地温温度;在 4 月份—10 月份,由于大气温度相对较高,表层土体温度逐渐升高,深层土体温

度远低于表层温度。在 11 月份—12 月份大气温度逐渐降低,表层土体受其影响,温度也逐渐降低,深层土体由于滞后效应,温度依旧呈缓慢的速率上升。

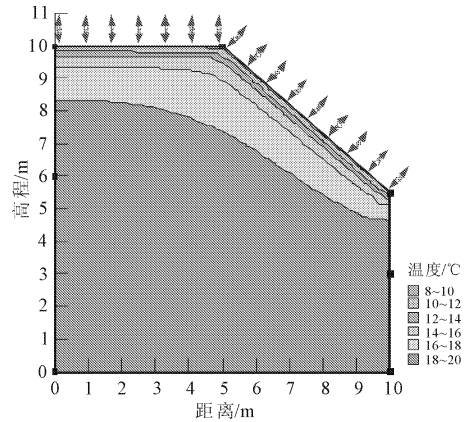


图 18 冬季红黏土边坡温度分布云图

图 19 和图 20 显示了温度随时间和深度的变化规律,温度的变化和上面图变化规律一致,冬季表层土体温度小,但模拟结果和实际监测数据有一定的误差,这是因为在建立模型时,忽略了不同深度土体温度的不同,假设土体整体温度为 20℃,忽略了地层的复杂多变性,假设为均一的红黏土层,且模型尺寸和实际边坡有一定的差别。

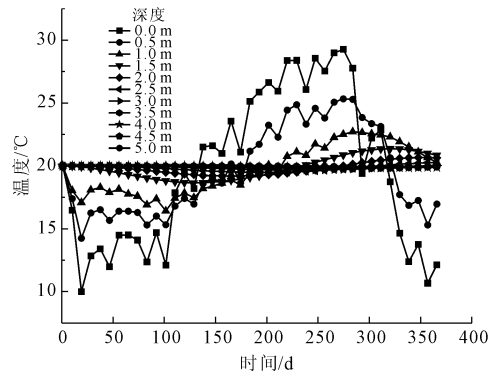


图 19 土体温度随时间的变化

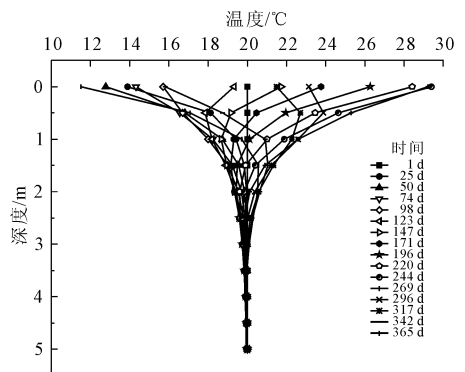


图 20 土体温度随深度的变化

## 4 结论

(1) 通过建立红黏土边坡现场监测系统平台,获取了边坡在气候作用下的湿热特性,边坡的湿热特性受大气作用影响显著,且随着深度的增加,对边坡的影响逐渐减弱。

(2) 边坡土体含水率的监测结果表明:土体含水率主要受降雨和蒸发的影响,边坡位置不同,其含水率也不同,坡脚处含水率大于坡顶和坡中。

(3) 土体温度主要受大气温度和太阳净辐射量的影响,温度的变化和大气温度及太阳辐射的变化趋于一致,且旱季比雨季时的温度变化幅度大,土温由表层到深层的迁移变化存在明显的滞后性,土体温度的变化可以间接反映土体含水率的变化。

(4) 通过有限元模拟软件进行数值模拟,得出气候作用下边坡土体温度场的影响,并与实际监测数据对比,在合理的范围内存在一定的误差,此有限元数值模型可用于桂林红黏土边坡的研究中。

### 参考文献:

- [1] 詹良通,吴宏伟,包承纲,等.降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J].岩土力学,2003,24(2):151-158.
- [2] Fredlund D C. State of the Art: Analytical methods for slope stability analysis [C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides. Toronto, 1984.
- [3] Fredlund D G, Krahn J. Comparison of slope stability analysis methods of analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1977, 14(3):439-439.
- [4] Gasmol J, Hrizuk K, Rahardjo H, et al. Instrumentation of

an unsaturated residual soil slope[J]. Geotechnical Testing Journal, 1999, 22(2):134-143.

- [5] 张士林.大气降雨强度下水入渗规律研究[J].岩土工程技术,2003(5):281-285.
- [6] Craig W H, Bujang B K H, Merrifield C M. Simulation of climatic conditions in centrifuge model tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 1991, 14(4):406-412.
- [7] 孔令伟,陈建斌,郭爱国,等.大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J].岩土工程学报,2007,29(7):1065-1073.
- [8] 陈建斌,孔令伟,郭爱国,等.大气作用下膨胀土边坡的动态响应数值模拟[J].水利学报,2007,38(6):674-682.
- [9] 陈颢,曾亚武.边坡稳定性分析的离散元极限平衡法研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(3):113-119.
- [10] 王百升,倪万魁,郭叶霞.多种因素作用下非饱和黄土边坡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(5):159-162.
- [11] 陈昌富,秦海军.考虑强度参数时间和深度效应边坡稳定性分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2009,36(10):1-6.
- [12] 干湿循环下非饱和压实粘土边坡响应的模型试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [13] 陈星,李建林,王家成.基于FLAC3D的边坡地震反应分析[J].中国农村水利水电,2010(1):59-62.
- [14] 郑颖人,叶海林,黄润秋,等.边坡地震稳定性分析探讨[J].地震工程与工程振动,2010,30(2):173-180.
- [15] 陈善雄,陈守义.考虑降雨的非饱和土边坡稳定性分析方法[J].岩土力学,2001,22(4):447-450.
- [16] 王忠福,李冬冬,万天同.基于滑坡变形分区的锁固型滑坡稳定性分析研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(6):35-40.

(上接第55页)

- [7] 杨才,王世君,丰土根.基于塑性区开展的边坡失稳判据研究[J].中国科技论文,2016(11):1461-1464.
- [8] 李博,王洪滨,姜彤,等.基于PIV技术的静压桩沉桩过程中桩周粉土位移场的试验研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(1):91-96.
- [9] 费康,张建伟.ABAQUS在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010:391-411.
- [10] 朱向荣,王金昌.ABAQUS软件中部分土模型简介及其工程应用[J].岩土力学,2004,25(S2):144-148.
- [11] 申明亮,廖少明,周小华,等.坑中坑基坑应力场的参数化分析[J].岩土工程学报,2010,32(S2):187-191.
- [12] 申明亮,廖少明,邵伟.考虑内坑影响的坑中坑基坑被动土压力叠加算法[J].上海交通大学学报,2012,46(1):79-83.

- [13] 李垠,苏凯,李杰. Mohr - Coulomb 等面积圆屈服准则在边坡稳定分析中的应用[J].大地测量与地球动力学,2009,29(1):135-139.
- [14] 丰土根,熊中华,余波.坑中坑开挖对悬臂式支护结构侧移的影响分析[J].岩土工程学报,2013,35(11):2053-2058.
- [15] 宋二祥.土工结构安全系数的有限元计算[J].岩土工程学报,1997,19(2):1-7.
- [16] 栾茂田,武亚军,年延凯.强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J].防灾减灾工程学报,2003,23(3):1-8.
- [17] 沈玉涛.软土地区深大基坑分区开挖力学效应数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2017,15(6):23-27.