

大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究

孔令伟¹, 陈建斌¹, 郭爱国¹, 赵艳林^{2,3}, 吕海波²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 广西大学土木建筑工程学院防灾减灾研究所, 广西 南宁 530004; 3. 桂林工学院土木工程系, 广西 桂林 541004)

摘要: 在广西南宁地区建立了缓坡、陡坡与坡面种草 3 种类型膨胀土边坡的原位监测系统。采用小型气象站、土壤含水率 TDR 系统、烘干法、温度传感器、测斜管和沉降板跟踪测试了边坡含水率、温度、变形等随气候变化的演化规律。认为降雨是膨胀土边坡发生灾变的最直接的外在因素, 蒸发效应是边坡灾变的重要前提条件, 而风速、净辐射量、气温和相对湿度是间接影响因素; 土温变化可间接反映边坡不同位置的含水率变化性状; 边坡变形主要集中在表层土体, 坡中变形最大, 其次是坡顶, 坡脚处变形最小, 陡坡在大气作用下发生了渐进性破坏; 草皮覆盖有利于保持边坡表层土体水分、降低坡面冲刷和径流量、抑制边坡变形, 且对土温有很好的削峰填谷作用。

关键词: 膨胀土边坡; 大气; 现场响应试验; 气象站; 蒸发量;

中图分类号: TU443 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2007)07-1065-09

作者简介: 孔令伟(1967-), 男, 湖北通山人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事特殊土的力学特性与灾害防治技术研究。E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn.

Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere

KONG Ling-wei¹, CHEN Jian-bin¹, GUO Ai-guo¹, ZHAO Yan-lin^{2,3}, LÜ Hai-bo²

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Research Institute of Preventing and Mitigating Disasters, College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Department of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: A field monitoring system for gentle slopes, steep slopes and gentle slopes with grass coverage was established in expansive soil of Nanning, Guangxi, and the development of the deformation, water content and temperature for expansive soil slopes with the local atmosphere was measured by the six-parameter mini-environmental station, TDR system, oven-drying method, temperature sensors, inclinometer and settlement plates. The rainfall was considered as the most direct external factor of slope disasters and the evaporation effect was one of the important premises, while the wind velocity, net solar radiation, air temperature and relative humidity were indirect factors. The variation of soil temperature could reflect the behaviors of water content in different positions of slopes. The slope deformations were mainly concentrated in the surficial soil, and the position of the maximum deformation of slopes was in the middle part. The progressive failure occurred in the steep slopes. Grass coverage could not only maintain the water content of slope surface and reduce the erosion of precipitation, runoff and deformation, but also play a role of peak clipping and valley filling for soil temperature.

Key words: expansive soil slope; atmosphere; field response test; environmental station; evaporation

0 引言

膨胀土作为一类具有裂隙性和胀缩性的高塑性黏土, 对气候变化极敏感, 常因经历反复干湿循环而发生不可逆的胀缩变形, 致使其强度不断衰减, 最终由于自身损伤积累导致强度失效而发生膨胀土灾害^[1-2]。国内外系统深入开展其相关性研究尚有诸多难点有待攻克, 当前现场试验研究多关注降雨入渗对边坡稳定性的影响^[3-5], 如 Rahardjo H 等^[6]通过对新加坡残积土边坡在现场人工和天然降雨影响下的原位监测, 建立

了降雨入渗量和径流量的关系以及孔隙水压力变化和含水率变化随降雨量的关系, Gasmo J 等^[7]为得到由于蒸发和入渗而引起土坡孔隙水压力的变化, 建立了残积土边坡孔压观测站, 考虑边坡的响应仅有孔压。在室内模型试验研究方面, William H 等^[8]开发了能调节

基金项目: 国家重大基础研究前期研究专项(2003CCA02200); 交通部西部交通建设科技项目(200631878530); 中国科学院武汉岩土力学研究所领域前沿基金项目(Q110301)

收稿日期: 2006-07-07

模型边界相对湿度的大气干湿循环模拟箱，用离心机模拟降雨入渗和蒸发蒸腾等气候效应对岩土构筑物的影响；杨果林等^[9]则开展了积水、阴天、日照和降雨等环境下不同排水与路基边坡坡度的膨胀土路基模型试验，得到膨胀土路基温度与土压力的变化规律。然而，室内试验所考虑的气象因素略显单一，气候对表土的影响作用主要表现为降雨入渗和蒸发蒸腾作用，这是一个多因素的、长期的和反复的过程^[10]，不仅要求全面考虑气象各个因素，而且需长期跟踪试验，以期得到在气候作用下膨胀土边坡灾害潜在发生、发展和扩延的全过程。

本文尝试积累膨胀土堑坡在多雨炎热环境下的性状第一手资料，通过在广西南宁典型膨胀土地段建立堑坡原位监测系统，采用小型气象站、土壤含水率TDR系统、烘干法、温度传感器、测斜管和沉降板，跟踪测试边坡含水率、温度与变形等随气候演化规律，以加深对膨胀土边坡灾变过程的认识。

1 试验场地选择及规划

1.1 试验场地地理位置及气候条件

试验场地位于广西南宁郊外广西农业科学院水牛所草场。该地区属于亚热带季风气候区，阳光充足，气候温和，雨量充沛，干湿季节分明。多年平均降雨量1318 mm，雨量分布不均，5~10月份降雨量约占全年80%，多年平均水面蒸发量1220 mm。

1.2 试验场地的地形、地貌及试验规划

试验区地处南宁盆地边缘垄岗状地貌的小丘面西向缓坡上，属垄状低丘区，坡度为10°~14.5°，覆盖层为2~5 m厚第三系湖相泥岩的风化残积物，其中30~50 cm为根植土，下卧层为第三系湖相泥岩。通过现场开挖，设置2个坡度的边坡试验区，坡I的坡角16°、坡高2.4 m，在该区分设裸土区和草皮覆盖区（见图1，2），以考察植被覆盖对边坡土体含水率、温度与变形的影响，种植草种为马尼拉草，属优良的草坪植物种类，其茎叶密集且具匍匐茎和根状茎。坡II的坡角21°、坡高2.6 m，无植被覆盖（见图3，4）。



图1 边坡I现场实物图
Fig. 1 Slope I in the field

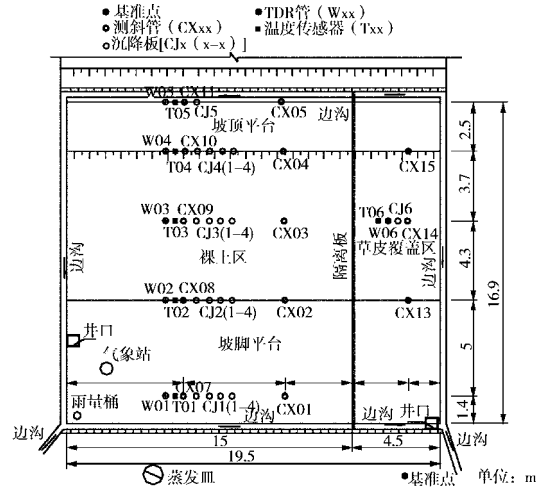


图2 边坡I中试验仪器平面布置图
Fig. 2 Installation of instruments in the slope I



图3 边坡II现场实物图
Fig. 3 Slope II in the field

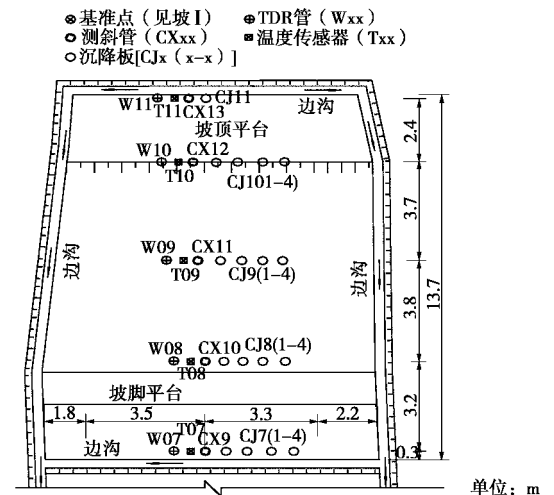


图4 边坡II中试验仪器平面布置图
Fig. 4 Installation of instruments in the slope II

1.3 试验场地工程和水文地质条件

试验场地土层剖面与基本物理力学性质见表1，地面以下0.5~1.85 m为弱-强膨胀性的红褐色黏土和灰白色黏土。泥岩为不透水层，仅存在少量的裂隙水，往往承压，而在深部泥岩以下的粉细砂层呈现饱和和状态，含有承压水，水头较高。

表 1 试验场地土层剖面及土体物理力学性质指标

Table 1 Soil profile and the physico-mechanical properties of soil in the test field

土层	厚度 /m	年代成因	岩性描述	密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	含水率 /%	液限 /%	塑性指数 /%	黏粒含量 <5 μm /%	自由膨胀率 /%	收缩系数	缩限 /%	50 kPa 膨胀率 /%	饱和渗透系数 /($m \cdot s^{-1}$)
1	0~0.5	Q ^{pd}	根植土, 含草根	1.99	14.7	34.3	15.9	22					4.33×10^{-7}
2	0.5~1.25	Q ^{al+pl}	黏土, 红褐色, 可塑, 裂隙发育, 弱膨胀性	1.97	25.2	45.6	23.2	40	55	0.16	15.8	-0.44	5.87×10^{-9}
3	1.25~1.85	Q ^{al+pl}	黏土, 灰白色, 裂隙发育, 可塑, 中强膨胀性	1.89	32.8	77.8	48.7	64	98	0.30	19.5	-0.62	1.27×10^{-9}
4	1.85~2.2	Q ^{el}	黏土, 棕黄色, 含分散铁锰结核, 硬塑状, 局部有裂隙水	1.97	26.6	49	26.9	46	70	0.56	16.1	-1.48	
5	2.2~2.8	Q ^{el}	泥岩, 青灰色, 强风化	2.13	19.6	34.4	18.1	24					
6	2.8~5.5	Q ^{el}	粉土~粉细砂, 青灰色, 饱和	2.11	18.6								

表 2 监测仪器一览表

Table 2 Listing of monitoring instruments

序号	仪器类型	监测项目	数量	测量手段、范围及精度
1	Monitor 小型自动气象站			
	翻斗式雨量桶	降雨量	1	0 ~ 508 mm/h
	蒸发皿	水面蒸发量	1	0 ~ 200 mm
	太阳辐射传感器	太阳净辐射量	1	0 ~ 2000 W/m ²
	风速传感器	风速	1	0 ~ 40 km/s
	相对湿度传感器	相对湿度	1	0 ~ 100%
	空气温度传感器	气温	1	-20 ~ +60
2	热敏电阻传感器	土温	11	Fluke 万用表: 0.1
3	TRIME 系列 TDR 剖面土壤含水率测量系统			
	T3 管式探头及 TECANT 探管	剖面体积含水率	11	在含水率 0 ~ 40% 时为 $\pm 2\%$; 在 40% ~ 60% 时为 $\pm 3\%$
	P3 表层式水分探头	表层体积含水率	1	0 ~ 70% 的体积含水率, 测量精度为 1%
4	测斜管	水平位移	27	Roctest 测斜仪: 0.01mm
5	沉降板	竖直沉降	11	Topcon 全站仪: 2mm + 2ppm.D
6	集水井	坡面径流量	3	水位计: 1mm

2 试验仪器的安装和观测

试验区现场通过安装与埋设小型气象站、TDR 土壤含水率测量系统、测斜管、多点分层沉降板和热敏电阻温度传感器, 用以监测场地气温、相对湿度、风速、太阳净辐射量、降雨量和潜在蒸发量等气象资料, 定时定点观测边坡土体的含水率、土温、变形与表层径流量, 并辅助钻孔取土含水率烘干法对比, 以期揭示在当地多雨炎热气候环境下膨胀土边坡灾变过程的动态响应演化规律。测试仪器技术参数见表 2, 布设位置见图 2, 4, 2005 年 3 月 21 日开始现场施工, 监测期为 2005 年 5 月 15 日 ~ 2006 年 1 月 8 日, 跟踪监测历时 238 d。

3 现场试验成果分析

3.1 气象数据成果分析

小型气象站安设在边坡裸土区左侧坡脚平台上 (见图 1), 用于测试 6 个气象参数, 即降雨量、潜在蒸发量、气温、相对湿度、风速与净辐射量; 各气象参数在 1 d 之内的变动遵循正弦规律, 其波峰和波谷

为每天的最大值与最小值 (见图 5)。

由于影响膨胀土含水率的关键气象参数为降雨量与蒸发量, 按照降雨量与蒸发量的相对大小 (见图 6), 可将监测期的气候划分为 2 个阶段, 即 5 ~ 9 月为降雨期, 且 5 ~ 6 月最为突出, 该期降雨集中、强度大、持续时间长, 总降雨量大于总蒸发量, 平均降雨量与蒸发量分别为 7.49 mm/d、3.79 mm/d; 而 10 ~ 12 月为蒸发期, 该期总蒸发量大于总降雨量, 平均蒸发量与降雨量分别为 2.29 mm/d、1.11 mm/d。

事实上, 蒸发量与气温、相对湿度、风速和净辐射量等 4 个气象参数密切相关, 可用农业气象学的蒸发公式来表述其内在联系。现以常用的 Penman 蒸发公式^[11]为依据, 将每天采集的气温、相对湿度、风速与净辐射量作为输入参数来计算蒸发量, 并与实测潜在蒸发量相类比, 发现实测值与计算值之比均值为 0.667。为此, 通过乘以 0.667 的修正系数 K 对 Penman 公式进行校正, 则蒸发量表达式:

$$E = K \frac{\Gamma R_n + \eta E_a}{\Gamma + \eta B} \quad (1)$$

式中 E 为蒸发量, 潜在蒸发量 $E_a = f(u)(e_s - e_a)$, e_s 是

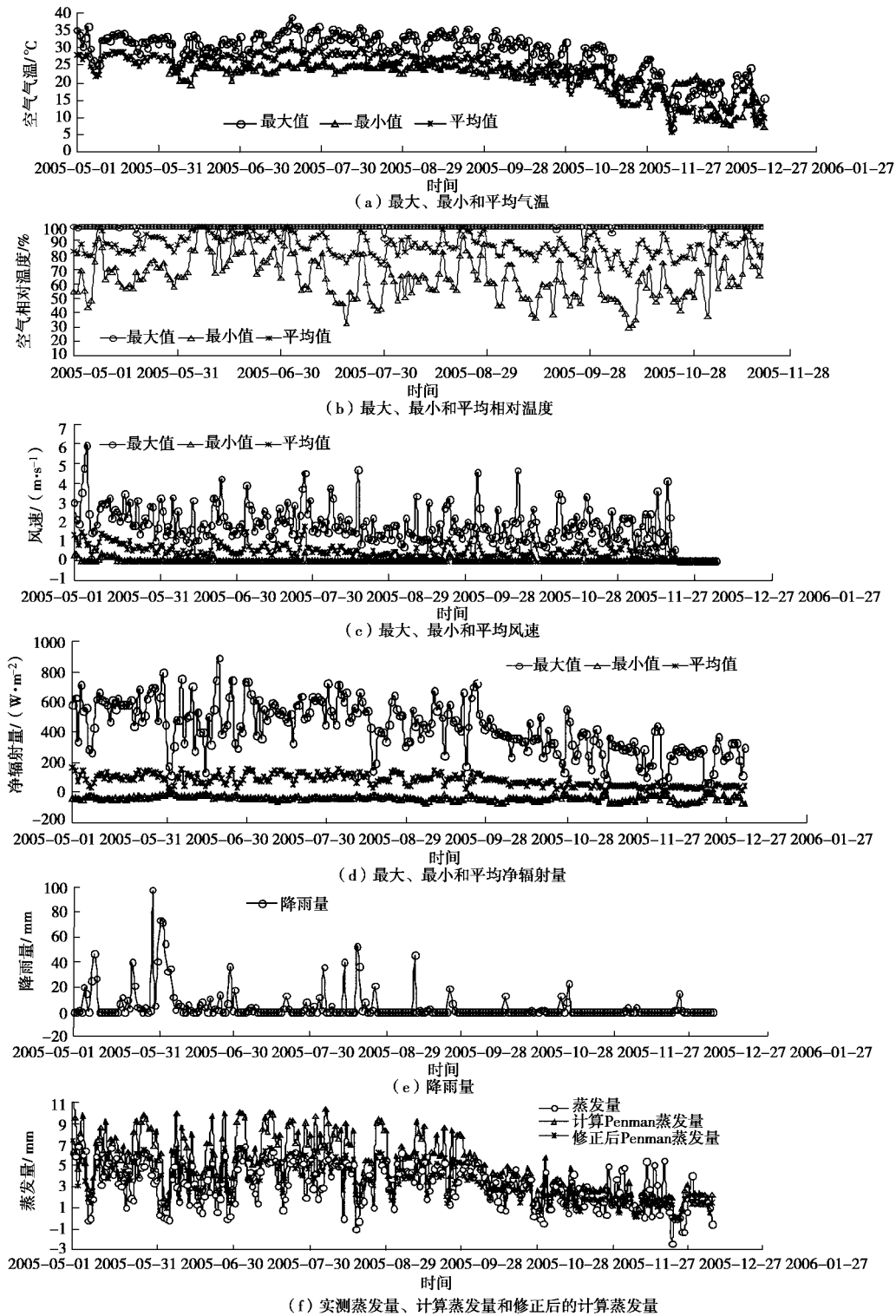


图 5 现场实测气象参数

Fig. 5 Measured climatic parameters in the field

水面饱和蒸汽压, e_a 是空气蒸汽压, $f(u)$ 是风函数, $f(u) = 0.35(1+0.15u)$, u 为风速, 为饱和蒸汽压和温度关系曲线的斜率; R_n 为土表面净辐射量; η 为湿度常数; B 为空气相对湿度的倒数。

图 5 (f) 为实测蒸发量、Penman 公式及修正公式计算蒸发量与时间关系, 通过统计分析 238 d 的气

象数据, 可得各气象参数的变动范围, 为类比气象参数影响蒸发量的敏感程度, 以式 (1) 为基础, 用自变量相对变动度描述气象参数变动程度, 即: 自变量相对变动度 = (计算参数 - 标准自变量参数) / 标准自变量参数。

在分析计算中, 气温、相对湿度、风速与净辐射

量的标准自变量参数分别为 31.7、99.99%、1.78m/s 与 154.37 W/m^2 , 各气象参数对蒸发量的影响如图 7 所示。可见, 蒸发量随气温与相对湿度变化而呈现出先增大后减小演化规律; 但随风速和净辐射量的增大呈线性递增关系, 且净辐射量尤为显著, 由于风速在每天内变化为一间断非连续函数, 计算采用的是每天平均风速, 在数值上与最大风速相差甚远, 它对蒸发量的影响并非不突出, 而是采用平均风速所致。

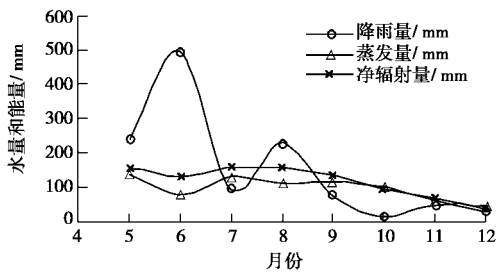


图 6 总蒸发量、降雨量和净辐射量对比

Fig. 6 Comparison among total evaporation, precipitation and net radiation

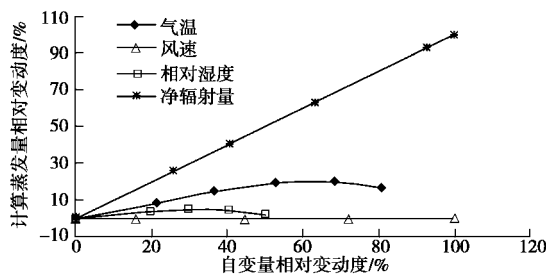


图 7 蒸发公式中气象参数对蒸发量的影响

Fig.7 Influence of climatic parameters in the evaporation formula on evaporation

3.2 土温数据成果分析

基于土温空间分布考虑, 11 个温度测点设置在坡脚前缘、坡脚、坡中、坡顶与坡顶后缘 (见图 2, 4), 温度传感器埋设各测点剖面地表下 10, 20, 30, 50, 80, 120, 160 和 200 cm 深度处。

地层温度的变化与净辐射量有关, 更与气温变化相符, 早晚最低而中午最高, 呈正弦波动, 图 8 为坡

中表层 10 cm 处温度时程曲线, 图 9, 10 为坡中各测点土温沿深度分布特性, 地面 50 cm 内日温变梯度较大, 达 $0.63 \sim 2.14 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{m} \cdot \text{h})$, 超过 50 cm 的土温变化较小, 但季节性影响深度超过 2.0 m。

从边坡表层温度变化范围及梯度看 (图 11, 12), 坡顶温变范围最大, 坡脚最小, 温度梯度分布规律亦如此, 其机制在于坡顶处于边坡的临空面, 受大气风化作用影响显著, 而坡脚为雨水汇集处, 其土体含水率常大于坡顶处。事实上, 热量传递与传导介质的导热系数密切相关, 含水率越高, 土体的导热系数越大, 热量传递也越快, 致使土层深度剖面温度梯度较小、温变幅度不大; 反之, 则剖面上温度梯度大, 则温变幅度也加大, 从而加快水分迁移, 进入加剧土体含水率不均匀分布。因此, 土温变化表征出土层的风化作用, 不同深度土温分布规律间接映射着边坡含水率的空间变化性状。

正如图 8, 11 和 12 所示, 草皮覆盖区边坡土层的温变范围和温度梯度均低于裸土区, 草皮覆盖的存在明显减缓温度梯度, 降低土壤高温, 提高土壤低温, 起到了对温度波动的削峰填谷作用, 缓和了土壤的增温和冷却过程, 起到了一定的调控作用。

3.3 含水率数据成果分析

边坡土体含水率的量测, 一方面采用 TDR 技术与 T3、P3 两种探头测定体积含水率, T3 探头用于确定深度剖面含水率, 间隔深度为 30 cm; P3 探头主要测试表层含水率; 另一方面, 采用钻孔取土烘干法测定质量含水率, 因气候对土层的影响随深度增加而衰减, 取土深度为地面下 0, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 150 和 200 cm 处。

在用 T3 探头测试体积含水率过程中, 因表层膨胀土具有较强的胀缩性, 土体脱水收缩时探管外壁与周围土易脱开, 影响了 TDR 测试的精度; 另外, 由于 TECANT 探管会随边坡发生一定的变形, 致使 T3 探头有时无法插入探管中, 所测结果与烘干法相比具有

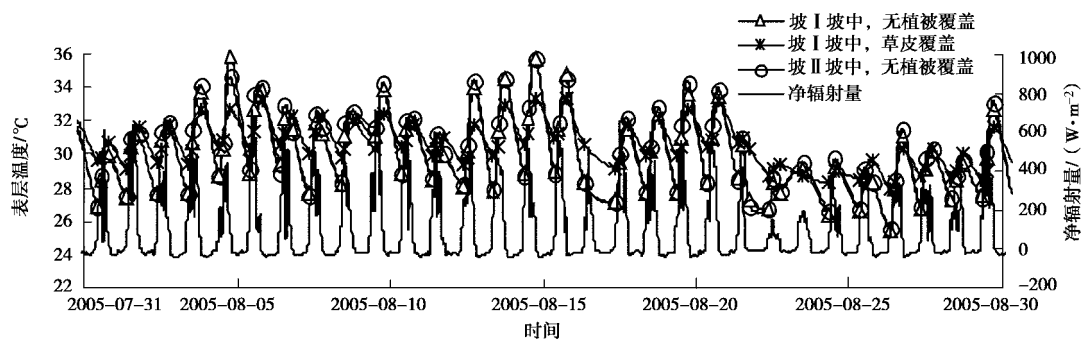


图 8 边坡坡中表层测点部分温度时程曲线对比

Fig. 8 Comparison of surface temperatures in the middle part of slopes

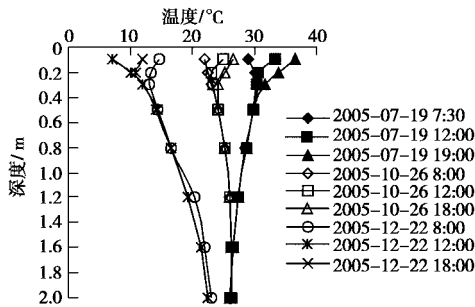


图9 坡I坡中深度剖面的温度变化

Fig. 9 Variation of temperature along the depth in the middle part of slope I

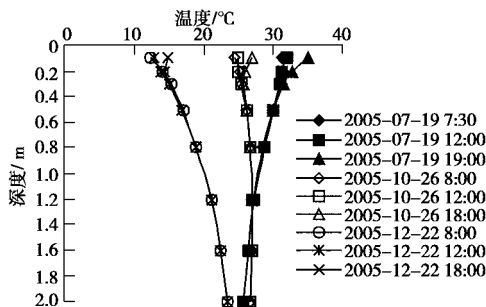


图10 坡I草皮区坡中深度剖面的温度变化

Fig. 10 Variation of temperature along the depth in the middle part of grassy slope I

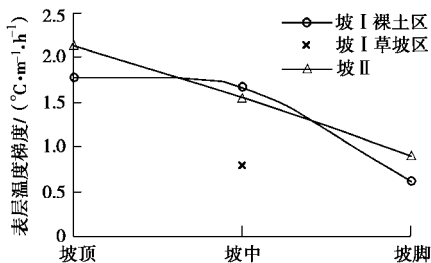


图11 边坡各部位表层温度变化范围对比

Fig. 11 Variation of surface temperature in the different parts of slopes

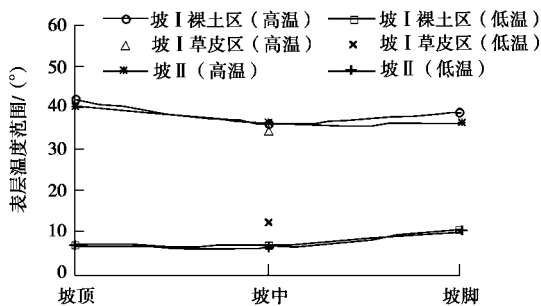


图12 边坡各部位表层温度梯度对比

Fig. 12 Comparison of surface temperature gradient in the different parts of slopes

较大的差异；而 P3 探头直接插入土层表面，所测含

水率变化趋势与烘干法比较接近，两者比值基本为一恒定值（见图 13）。为此，在含水率数据分析中，以烘干法获得的资料为主。虽然 TDR 技术测求土壤体积含水率在原理上是可行的，且在农学水分监测中效果较好，但以预埋易变形柔性管的形式来进行 TDR 测试，对于以考虑土体变形为主的岩土工程测试尚是有较大的缺陷。

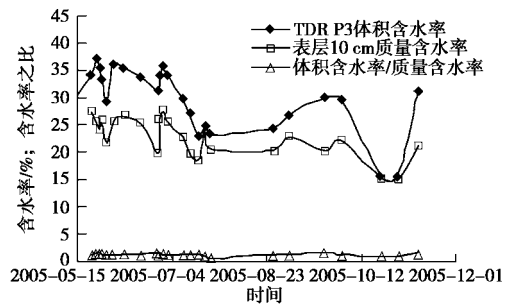


图13 坡I坡顶表层体积和质量含水率对比

Fig. 13 Comparison of volumetric water content and mass water content of surface soil at the top of slope I

图 14 为边坡 I 坡脚不同深度处含水率随时间变化曲线，各边坡不同测点在表层与 10 cm 处含水率变化关系见图 15, 16。可见，地表以下 40~60 cm 范围内含水率随气候变化而敏感增减，具有明显的波峰和波谷，但随深度增大，含水率的波动呈衰减趋势，表层以下 40~60 cm 可看成大气剧烈影响敏感深度。从边坡的各个部位看，坡脚含水率普遍大于其它部位，坡顶含水率最小；草皮覆盖对边坡含水率的变化影响较大，起到了一定的调控作用，具体表现为草皮区的重力含水率在降雨时要高于裸土区，而在蒸发时要小于坡 I 裸土区和坡 II。

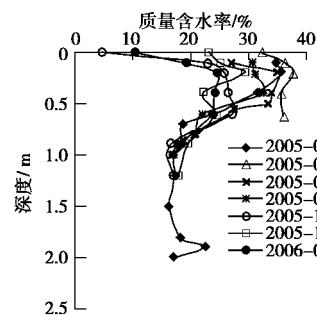


图14 坡I坡脚深度剖面上质量含水率

Fig. 14 Comparison of mass water content along the depth at the toe of slope I

3.4 变形数据成果分析

边坡变形监测布置方案见图 2, 4, 水平变形是以顺坡向水平位移为主，而竖直沉降主要关注边坡在地面下 20, 50, 100 和 150 cm 深度处，沉降板高程变化

以深埋钢管式水准基点为基准, 顺坡向向下水平变形和垂直上抬为正, 反之皆为负。

中及坡顶变形完全与坡脚不同, 变形均很大, 尤其是坡中, 且在强降雨的夏季, 边坡发生了两次大变形, 出现了明显的溜坍与失稳。

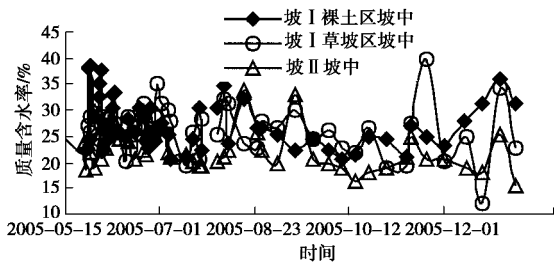


图 15 各边坡坡中表层质量含水率对比

Fig. 15 Comparison of mass soil water content of surface in the middle part of slopes

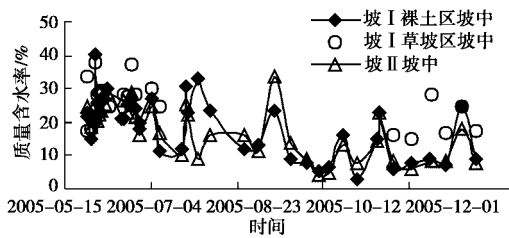


图 16 各边坡坡中 10 cm 深度处质量含水率对比

Fig. 16 Comparison of mass water content at 10 cm deep in the middle part of slopes

从图 17 ~ 20 半年多的观测结果看, 坡 I 裸土区、草皮区以及坡 II 的坡脚处竖直沉降和水平变形基本处于毫米量级, 表明在南宁当地气候与季节变化条件下, 气候环境对边坡坡脚的影响不大。

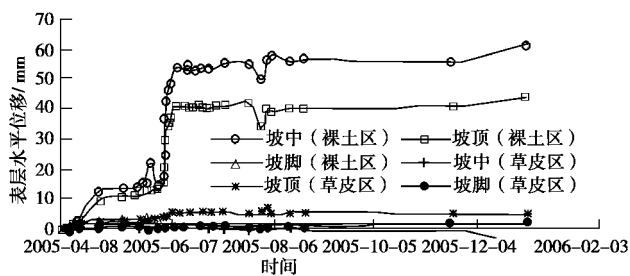


图 17 坡 I 表层水平位移

Fig. 17 Lateral surface deformation of slope I

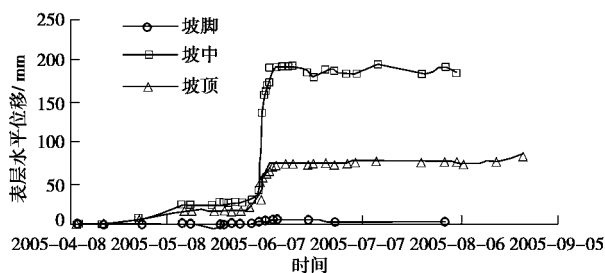


图 18 坡 II 表层水平位移

Fig. 18 Lateral surface deformation of slope II

值得关注的是, 从图 17 ~ 20 可明显类比出边坡坡

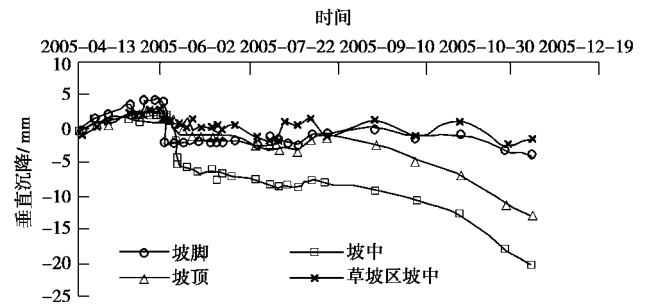


图 19 坡 I 表层 20 cm 处竖直沉降

Fig. 19 Vertical displacement at 20 cm deep of slope I

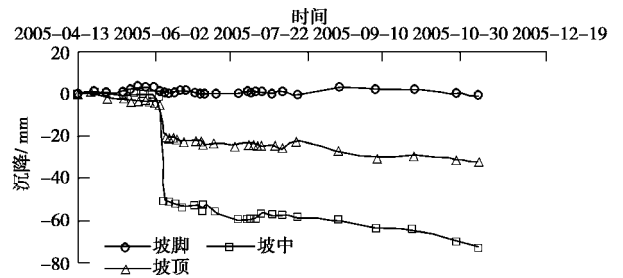


图 20 坡 II 表层 20 cm 处竖直沉降

Fig. 20 Vertical displacement at 20cm deep of slope II

边坡第一次大变形发生在 2005 年 5 月 8 ~ 9 日, 当地连续降雨 35 h, 平均降雨率达 2.07 mm/h, 而在此之前大气蒸发量达 3.29 mm/d。强降雨使坡 I 裸土区和坡 II 坡中与坡顶水平位移急剧增大, 变形速率由降雨前的 0.5 ~ 3.7 mm/d 增至 5.8 ~ 7.5 mm/d, 坡中变形更为明显, 位移量达数十毫米级, 但草皮区的变形很小, 仅为 0.79 ~ 2.3 mm (见图 17, 18, 21)。然而, 边坡竖直沉降在降雨前后的沉降速率和沉降量却变化不大 (见图 19, 20, 22)。正因如此, 边坡 II 因强降雨诱发了自开挖后的第一次滑坡, 滑裂带从坡 II 正面左侧中部一直延伸到坡脚右侧, 并与坡面呈斜交, 滑裂面较光滑, 为灰白色膨胀土, 具体形态如图 23 所示。

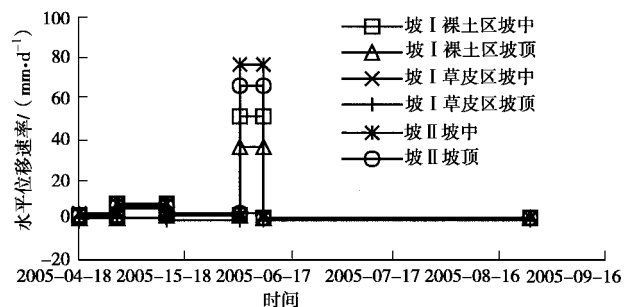


图 21 边坡水平变形速率

Fig. 21 Rate of lateral deformation of slopes

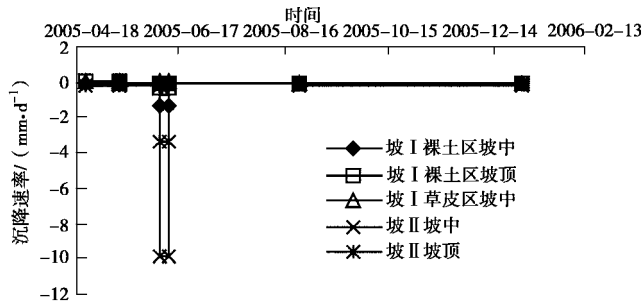


图 22 边坡竖直沉降速率

Fig. 22 Rate of vertical displacement of slopes



图 23 坡 II 第一次滑坡破坏现象

Fig. 23 The first slope failure of slope II



图 24 坡 II 第二次滑坡破坏现象

Fig. 24 The second slope failure of slope II

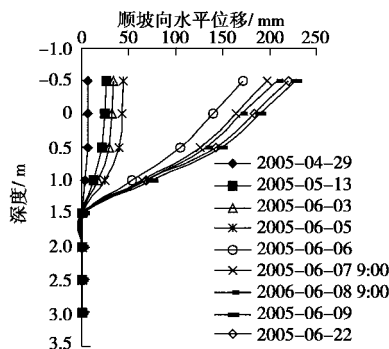


图 25 坡 II 坡中深度剖面上水平位移

Fig. 25 Lateral deformation along the depth in the middle part of slope II

边坡第二次大变形发生在 2005 年 6 月 5~6 日, 降雨持续 32 h, 平均降雨率 3.96 mm/d, 而前期蒸发量达到 4.49 mm/d。强降雨再次导致坡 I 裸土区和坡 II 的坡顶和坡中产生大变形 (见图 21, 22), 水平位移速率由降雨前的 0.3~1.3 mm/d 突增至 23.4~77.1

mm/d, 垂直变形增至 -0.24~-9.8 mm/d, 且随深度加大, 变形减小 (见图 25, 26); 边坡 II 的坡中水平位移量达到 193.8 mm, 表层竖直沉降为 50.8 mm (见图 18, 20), 但草皮区边坡的位移速率仅为 0.6~3.3 mm/d。在降雨后的监测中, 边坡各部位水平变形趋于稳定, 变形速率为 0.3~1.3 mm/d。此次强降雨导致边坡 II 再次发生典型渐进性破坏, 滑裂带主要在坡中以上红褐色黏土层和根植土层交界处, 呈弧线状贯穿于整个坡面, 弧顶基本在坡中测斜管上侧, 其滑裂形态如图 24 所示。

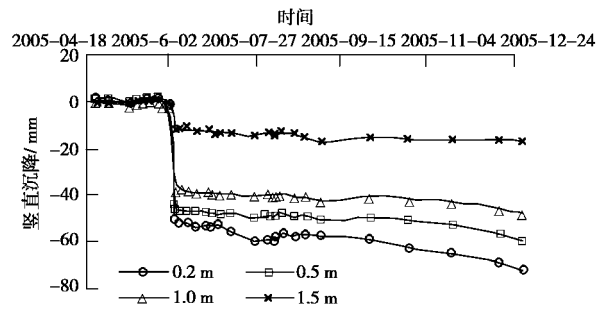


图 26 坡 II 坡中深度剖面上竖直沉降

Fig. 26 Vertical displacement along the depth in the middle part of slope II

由此可见, 边坡的变形破坏与气候的变化相关, 当地强降雨是导致边坡变形陡升的主要因素, 而前期持续高达 3.29 mm/d 和 4.49 mm/d 的蒸发量, 促使膨胀土水分丧失与开裂, 为降雨入渗提供了方便之门, 导致土体强度衰减而发生滑坡, 这表明蒸发效应是膨胀土边坡发生灾变的重要前提之一。通过类比边坡各个部位的变形量, 发现坡中变形最大, 其次是坡顶, 坡脚处变形最小, 且随着深度增大, 变形量逐渐减小; 坡 I 裸土区、草皮区和坡 II 三种边坡坡中的表层变形量亦可看出, 陡坡变形最大, 其次是缓坡, 草皮区基本不动, 草皮的覆盖缓解了雨水入渗的程度, 包括草皮叶片对降雨的截留作用, 从而有效抑制土体的变形和增强坡体稳定性。

3.5 径流量数据成果分析

降雨时各边坡坡面径流量采用容积法量测, 集水井设在位于边坡坡脚平台处, 在量测径流量中, 同步测试了集水井中径流水量的含泥量。为方便分析, 将单位体积径流水中干土重量定义为侵蚀量, 用于表征降雨对坡面的冲刷程度, 监测时间段内径流量与侵蚀量的变化趋势如图 27, 28 所示。

从图 27, 28 容易看出, 陡坡的径流量明显大于缓坡裸土区, 而草皮区的径流量则最小; 降雨冲刷对陡坡的影响也要略大于缓坡裸土区, 草皮区的侵蚀量则小得多。因此, 草皮既发挥了吸收水分的作用, 同时也具有缓解边坡表层侵蚀冲刷的功能。

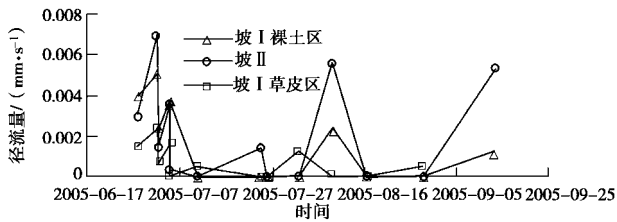


图 27 各边坡降雨时径流量

Fig. 27 Runoff of slopes during the rain

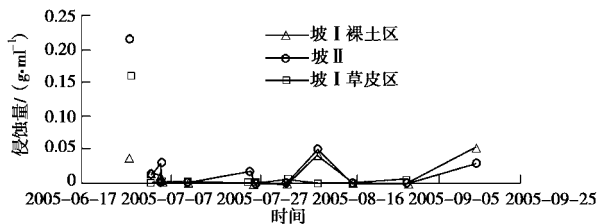


图 28 各边坡降雨时坡面侵蚀量

Fig. 28 Surface erosion of slopes during the rain

4 结 论

(1) 降雨量、蒸发量、风速、净辐射量、气温与相对湿度等气象参数均对膨胀土的含水率有不同程度的影响, 但降雨量和蒸发量是制约土体含水率最直接的因素, 对膨胀土边坡的变形和破坏模式影响甚大; 风速、净辐射量、气温和相对湿度则是通过影响蒸发调控土体的水量平衡, 是间接的影响因素, 而相对影响显著的气象参数为净辐射量。

(2) 土温的变化一般来说是与净辐射量有关, 它的波动形态与气温保持一致, 且含水率越高, 土温波动越小, 温度梯度也小。因此, 土体温度变化是反映土层风化作用的一个标志, 可间接反映边坡不同位置的含水率变化性状。

(3) 有无草皮覆盖和不同坡度下的膨胀土边坡在相同气候影响下有不同程度的响应。草皮覆盖不仅有利于保持表层土体的水分、降低降雨对坡面冲刷和径流量, 而且对土温有很好的削峰填谷作用。就边坡的变形部位而言, 边坡坡中的变形量最大, 坡脚变形仅限于表层部位; 就边坡的坡度而言, 陡坡的坡面径流量和冲刷程度较大, 而且比缓坡变形更容易, 并发生了典型的渐进性破坏现象; 而草皮覆盖区的变形量均小于裸土区。

(4) 降雨是导致膨胀土边坡失稳最直接的气候因素, 而且前期持续蒸发导致膨胀土水分丧失、土体开裂等, 也为降雨入渗提供了方便之门, 导致土体强度衰减而发生渐进性破坏, 这也表明蒸发效应是膨胀土边坡发生灾变的一个重要前提条件。

参考文献:

- [1] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Te-hong. Expansive soil in the engineering construction[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997. (in Chinese))
- [2] 孔令伟, 郭爱国, 等. 荆门膨胀土的水稳性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727 - 732. (KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Water stability of Xiangjing expansive soils and their mechanical effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 727 - 732. (in Chinese))
- [3] 柯尊敬, 黄绍铨. 膨胀土工程性质的研究总报告[R]. 南宁: 广西大学, 1995. (KE Zun-jing, HUANG Shao-keng. Report of research on the engineering properties of expansive soil[R]. Nanning: Guangxi University, 1995. (in Chinese))
- [4] 詹良通, 吴宏伟, 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. (ZHAN Liang-tong, NG Wang-wai, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 151 - 158. (in Chinese))
- [5] LI A G, YUE Z Q, Tham L G, et al. Field-monitored variations of soil moisture and matric suction in a saprolite slope[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(1): 13 - 26.
- [6] RAHARDJO H, LEE T T, LEONG E C, REZAUR R B. Response of a residual soil slope to rainfall[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 340 - 351.
- [7] GASMO J, HRIZUK K J, RAHARDJO H, LEONG E C. Instrumentation of an unsaturated residual soil slope[J]. Geotechnical Testing Journal, 1999, 22(2): 134 - 143.
- [8] WILLIAM H, CRAIG, B K, HUAT BUJANG, CAESAR M MERRIFIELD. Simulation of climatic conditions in centrifuge model tests[J]. Geotechnical Testing Journal, 1991, 14(4): 406 - 412.
- [9] 杨果林, 黄向京. 不同气候条件下膨胀土路堤土压力的变化规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 948 - 955. (YANG Guo-lin, HUANG Xiang-jing. Study on earth pressures in expansive soil roadbed under weather influence[J]. Chinese of Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 948 - 955. (in Chinese))
- [10] BLIGHT G E. Interaction between the atmosphere and the earth[J]. Geotechnique, 1997, 42(4): 715 - 766.
- [11] PENMAN H L. Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass[C]// Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1948, 193: 120 - 146.