

降雨蒸发条件下膨胀土边坡的变形特征研究

陈建斌¹ 孔令伟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, 湖北武汉 430071;

2.广西大学, 广西南宁 530004; 3.桂林工学院, 广西桂林 541004)

摘要: 在典型膨胀土广泛分布的广西南宁地区建立缓坡、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 6 参数小型气象站、测斜管和沉降板, 跟踪测试边坡变形随气候变化的演化规律, 揭示在降雨蒸发下膨胀土边坡的变形特征。认为降雨是导致膨胀土边坡变形最直接的气候因素, 而蒸发效应是边坡变形破坏的重要前提之一; 蒸发效应所产生的土体裂隙, 使得吸湿条件下原位双环渗透试验获得的膨胀土水力特性具有与传统的非饱和土力学中的定义有相反的趋势, 这也是膨胀土边坡在降雨入渗时发生变形乃至破坏的内在机制之一; 通过对现场试验数据的拟合, 建立了符合膨胀土边坡变形的经验性预测模型, 其中边坡变形与土表净入渗量呈二次函数关系。

关键词: 膨胀土边坡; 变形特征; 变形预测模型; 降雨; 蒸发

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-131X (2007) 11-0070-08

Deformation characteristics of expansive soil slopes under precipitation and evaporation

Chen Jianbin¹ Kong Lingwei¹ Guo Aiguo¹ Zhao Yanlin^{2,3} Lü Haibo²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: A field monitoring system is set up to measure three types of expansive soil slopes, i.e. gentle slope, steep slope, and slope planted with grasses, in Nanning, Guangxi province, where expansive soils are extensive. Variations of the deformations of these three types of slopes with the climate are measured by a six-parameter mini-meteorological station, inclinometers and settlement plates, to reveal the evolutions of deformation characteristics, in which precipitation is regarded as the most direct factor and evaporation effect is an important precondition. Cracks due to evaporation make the hydraulic properties of the expansive soils obtained through in-situ double ring infiltrometer test have a wetting trend opposite to the traditional definition in unsaturated soil mechanics, which is also an important mechanism. Based on fitting the in-situ measured data, an empirical prediction model for the deformation of expansive soil slopes is established, in which the relationship between slope deformation and net infiltration of the soil surface is quadratic.

Keywords: expansive soil slope; deformation characteristics; prediction model of deformation; precipitation; evaporation

E-mail: c1j2b3@tom.com

引 言

边坡变形是非常复杂的问题, 它受各种地质与环境因素的制约, 是工程地质体受多种内外、动静因素

相互作用的结果, 同时也是滑坡灾害预报与预警的一个重要指标^[1]。许多学者为揭示边坡的变形机制与规律, 开展了一系列边坡现场人工降雨和天然降雨试验研究, Ng C.W.W.等^[2]通过现场人工降雨模拟试验, 揭示了降雨入渗所致的土-水相互作用机理; Tol D. G.^[3]通过分析人工降雨所致的滑坡, 得出了降雨强度、坡度及坡高与滑坡的内在关系。一般来说, 降雨是诱发边坡变形的主要因素, 研究由降雨引起的边坡变形机制与规律, 可得到变形与降雨量的确定性预测

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 (300631878530) 和中国科学院武汉岩土力学研究所领域前沿基金 (Q110301)

作者简介: 陈建斌, 博士, 工程师

模型，以及多种非确定性预测模型，如灰色系统预报、系统综合预报等^[4]，这些模型对降雨敏感型边坡的滑坡灾害预警预报具有指导意义^[5]。然而，对于超强水敏感、高塑性的膨胀土而言，由气候变化引起的膨胀土路堤和路堑滑塌、边坡失稳等工程问题比比皆是^[6-7]，其变形具有明显的节律性，主要由大气因素特征所决定。文献^[8]认为边坡对降雨过程的水力学及力学响应取决于蒸发所致的土层初始渗透性、降雨方式和降雨量。事实上，大气因素除降雨外，还包括与水量平衡紧密相关的蒸发量，而且降雨过程的径流量与大气作用下膨胀土水力特性的变化特征都对边坡的变形性状有重要影响。

本文在具有典型膨胀土广泛分布的广西南宁地区建立了膨胀土边坡的原位监测系统，采用小型气象站、测斜管和沉降板，跟踪测试了边坡变形随大气变化的演化规律，以及膨胀土在吸湿条件下的水力特性和降雨过程中的径流量特性，以揭示在降雨蒸发条件下膨胀土边坡的变形特征，并建立符合膨胀土边坡变形特征的预测模型。

1 试验场地基本条件

试验场地位于广西南宁市郊外广西农业科学院水牛研究所草场。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。

试验区由垄状低丘区缓坡上开挖的两个不同坡度边坡组成。其中坡 I 的坡度 16°，坡高 2.4 m。在坡 I 上分设裸土区和草皮覆盖区（见图 1），增设草皮区是为了考察植被覆盖对边坡变形和径流量等的影响规律，铺设草皮为马尼拉草，属于沟叶结缕草暖地型、禾本科；坡 II 的坡度 21°，坡高 2.6 m，无植被覆盖（见图 2），图 3 与图 4 分别为坡 I、坡 II 试验仪器平面布置图。

边坡土层剖面及其基本物理力学性质见表 1，由此可见，场地地面以下 0.30~1.85 m 为具有弱~强膨

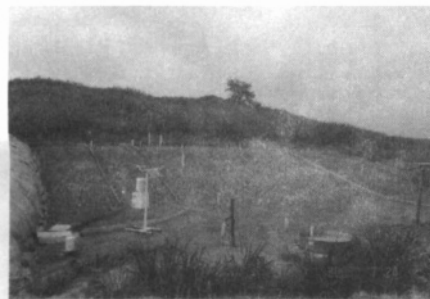


图 1 边坡 I 现场实物图
Fig. 1 Slope I in the field

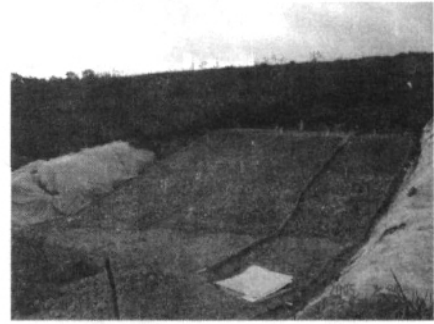


图 2 边坡 II 现场实物图
Fig. 2 Slope II in the field

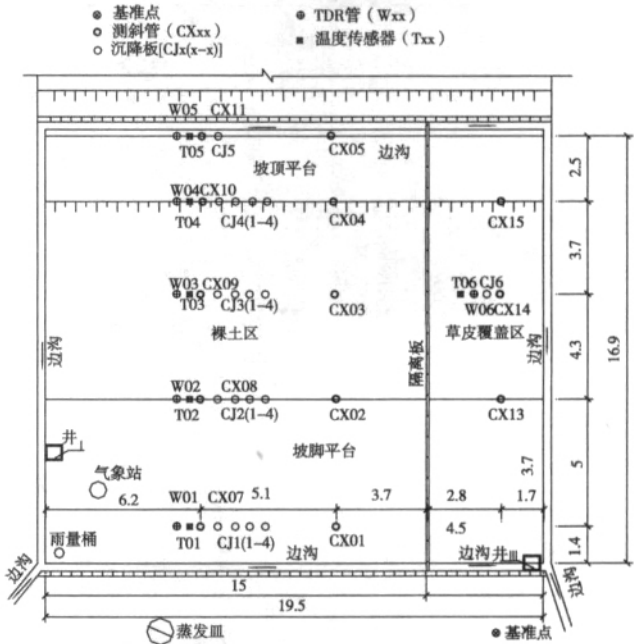


图 3 边坡 I 中试验仪器平面布置图
Fig. 3 Plan installation of instruments in the slope I

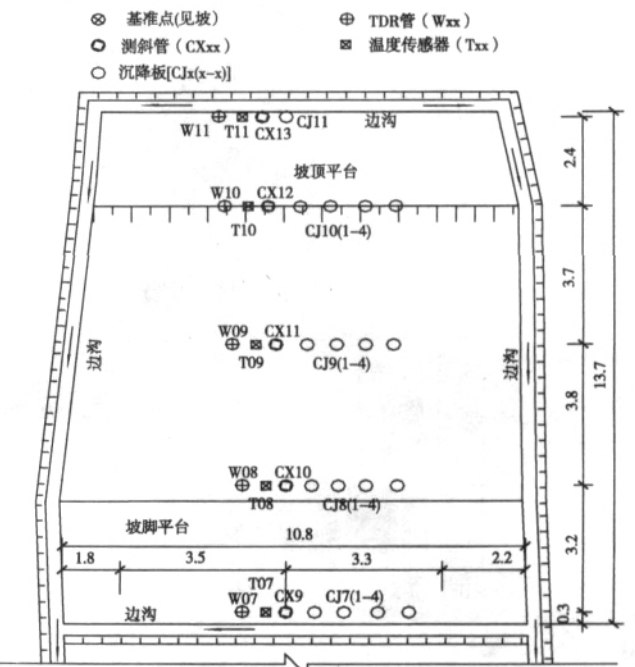


图 4 边坡 II 中试验仪器平面布置图
Fig. 4 Plan installation of instruments in the slope II

胀性的红褐色黏土与灰白色黏土，地基层泥岩为不透水层，仅存在量不大的裂隙水，往往承压。

2 试验场地测试仪器的安装和观测

试验场地分别安设了小型气象站、测斜管和多点分层沉降板，长期监测当地降雨量和潜在蒸发量等气象资料，定时定点测量边坡土体的变形和表层径流

量等，并采用双环渗透仪测试膨胀土在吸湿条件下的渗透系数，以此研究在当地多雨炎热气候环境下非饱和和膨胀土边坡的变形特征，并建立相应的变形预测模型。相关埋设的各类仪器及其细节见表 2，安设的位置见图 3 与图 4。2005 年 3 月 21 日开始现场施工、埋设仪器，从 2005 年 5 月 15 日到 2006 年 1 月 8 日为正式监测期，共 238 天，试验结果部分含有施工期所测数据。

表 1 试验场地土层剖面及土体物理力学性质指标
Table 1 Profile and physical- mechanical properties of soils in the test field

| 土层 | 厚度 (m) | 年代成因 | 岩性描述 | 密度 (g·cm ⁻³) | 含水量 (%) | 液限 (%) | 塑性指数 (%) | 黏粒含量 <5μm | 自由膨胀率 (%) | 收缩系数 | 缩限 (%) | 50kPa 膨胀率 (%) | 饱和渗透系数 (m·s ⁻¹) |
|----|-----------|-------------------|---------------------------|--------------------------|---------|--------|----------|-----------|-----------|------|--------|---------------|-----------------------------|
| 1 | 0-0.5 | Q ^d | 根植土，含草根 | 1.99 | 14.7 | 34.3 | 15.9 | 22 | - | - | - | - | 4.33e-7 |
| 2 | 0.5-1.25 | Q ^{4+dl} | 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 | 5.87e-9 |
| 3 | 1.25-1.85 | Q ^{4+dl} | 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 | 1.27e-9 |
| 4 | 1.85-2.2 | Q ^d | 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 ^d | 泥岩，青灰色，强风化 | 2.13 | 19.6 | 34.4 | 18.1 | 24 | - | - | - | - | - |
| 6 | 2.8-5.5 | Q ^d | 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 |
|-----------------|--------|--------|----|------------------------|
| Monitor 小型自动气象站 | | | | |
| 1 | 翻斗式雨量桶 | 降雨量 | 1 | 0-508mm/hr |
| | 蒸发皿 | 水面蒸发量 | 1 | 0-200mm |
| 2 | 测斜管 | 水平位移 | 27 | Roctest 测斜仪: 0.01mm |
| 3 | 沉降板 | 垂直沉降 | 11 | Topcon 全站仪: 2mm+2ppm.D |
| 4 | 集水井 | 坡面径流量 | 3 | 水位计: 1mm |
| 5 | 双环渗透仪 | 原位渗透系数 | - | - |

3 现场试验成果分析

3.1 降雨和蒸发时程变化特征

小型气象站安设在边坡 I 裸土区左侧坡脚平台上 (见图 1)，测试的气象参数主要是与水量直接相关的降雨量和蒸发量，结果如图 5 所示。

从实测的降雨蒸发时程关系看，可将该地区的气象特征划为两个阶段，即从 5~9 月为降雨期，降雨集中，且强度大、持续时间长，总降雨量大于总蒸发量，平均蒸发量为 3.79 mm/d，平均降雨量为 7.488 mm/d，其中以 5、6 月份最为突出；10~12 月为蒸发期，总蒸发量大于总降雨量，平均蒸发量为 2.29 mm/d，平均降雨量为 1.11 mm/d，见图 6。

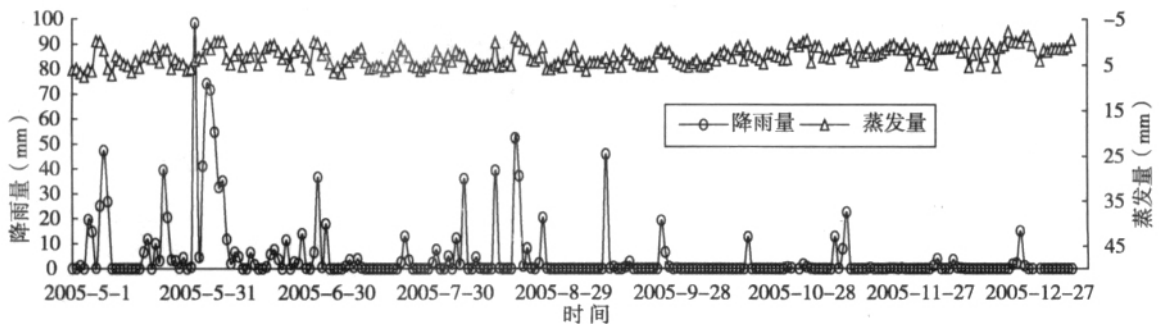


图 5 现场实测气象参数

3.2 吸湿条件下膨胀土的水力特性

在大气蒸发作用下，表层膨胀土失水收缩而形成张拉裂缝，裂隙为降雨入渗提供了便利通道。当处于低含水量高吸力状态时，膨胀土表现出极强的渗透性；而随着吸湿程度的增加，裂隙逐渐闭合，其渗透性呈下降趋势。因此，裂隙性对膨胀土的渗透性影响颇大，可以将其近似等同于土体初始含水量与渗透性之间的对应关系。为深入认识膨胀土在吸湿过程中的渗透特性，采用试坑注水法开展了不同初始含水量下表层膨胀土的原位渗透试验，双环渗透仪的内外环直径分别为 22.6 cm 和 45.2 cm，高 15 cm。

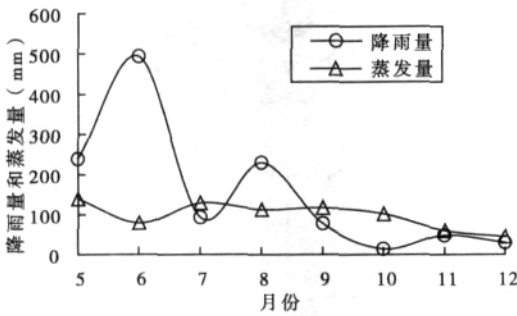


图 6 每月蒸发量和降雨量对比

Fig. 6 Comparison between total evaporation and precipitation

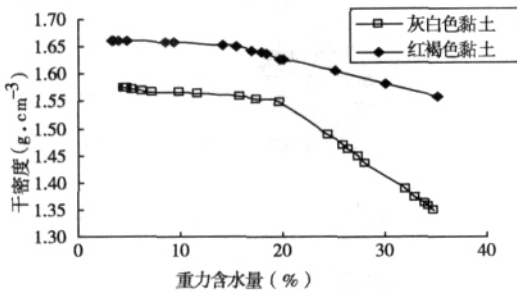


图 7 重力含水量与干密度的关系曲线

Fig. 7 Gravitational water content versus dry density curve

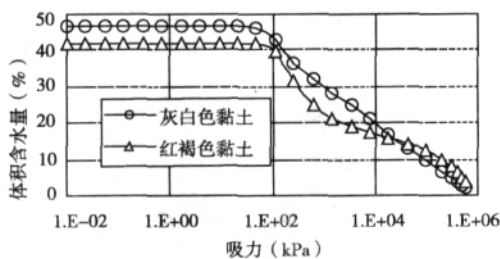


图 8 膨胀土室内土水特征曲线

Fig. 8 Laboratory soil-water characteristic curve of expansive soil

根据室内试验获得的重力含水量 - 干密度 - 体积含水量 - 吸力的对应关系 (见图 7、图 8)，即可建立不同初始状态膨胀土吸湿时的吸力与渗透系数之间的变化关系，结果如图 9 所示；同时，以室内土水特征曲线为基础 (见图 8)，采用 Fredlund & Xing 方

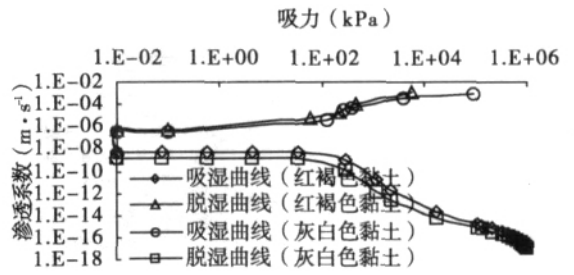


图 9 吸湿和脱湿条件下膨胀土渗透系数曲线

Fig. 9 Hydraulic coefficient curve of expansive soil under wetting and drying

法^[9]可预测膨胀土脱湿条件下渗透系数函数，类比关系见图 9。不难发现，该膨胀土高吸力下的含水量较低，分别为 6.3% 和 8.3%，因表面裂隙开裂现象严重，吸湿条件下渗透系数很大，基本为 0.001~0.0012 m/s，这与传统意义的非饱和土力学中脱湿条件下渗透特性具有相反的趋势^[10]，即吸力越大，初始渗透系数也越大。裂隙所致的强渗透性也是膨胀土边坡在降雨入渗时发生变形乃至破坏的内在机制之一。

3.3 膨胀土边坡的变形特性

边坡的变形包括水平变形和垂直沉降，水平变形以基岩以上土层顺坡向水平位移为主，而垂直沉降的测量主要关注边坡在地面以下 0.2 m、0.5 m、1.0 m 和 1.5 m 深度处的垂直沉降，所有沉降板的高程变化均以深埋钢管式水准基点为基准，以顺坡向向下水平变形和垂直上抬为正，反之皆为负，测点布置见图 3 和图 4。

从长达半年多观测结果来看，坡 I 裸土区、草皮区以及坡 II 的坡脚处垂直沉降和水平变形基本在毫米量级 (见图 10~图 13)，气候变化对边坡坡脚影响不大，但对边坡的坡中、坡顶变形影响显著，特别是坡中变形，主要表现为强降雨条件下边坡发生了两次较大的变形，具体分析如下：

边坡的第一次大变形发生在 2005 年 5 月 8~9 日，期间连续降雨 35 h，平均降雨率达 2.07 mm/h，之前的大气蒸发量达到了 3.29 mm/d。在该次强降雨过程中，坡 I 裸土区和坡 II 的坡中和坡顶均发生了较大的水平位移量。其中，边坡的水平位移速率由降雨前的 0.5~3.7 mm/d 突增至 5.8~7.5 mm/d，坡中变形更为明显，位移量可达数十毫米级；而草皮区的变形仍非常之小，仅为 0.79~2.3 mm (见图 10、图 11 和图 14)；对垂直沉降来说，降雨前后边坡表层各点的沉降速率和沉降量变化不大 (图 12、图 13 和图 15)，该次降雨导致边坡 II 发生了自开挖后的第一次滑坡，表现为滑裂带从坡 II 正面左侧中部开始，一直延伸到坡脚右侧为止，与坡面呈斜交状态，滑裂面较光滑，为灰白色膨胀土，具体形态如图 16 所示。

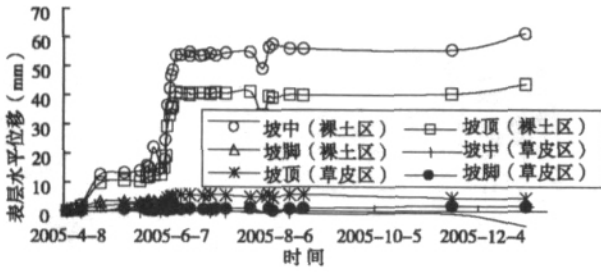


图 10 坡 I 表层水平位移

Fig. 10 Lateral surface deformation of slope I

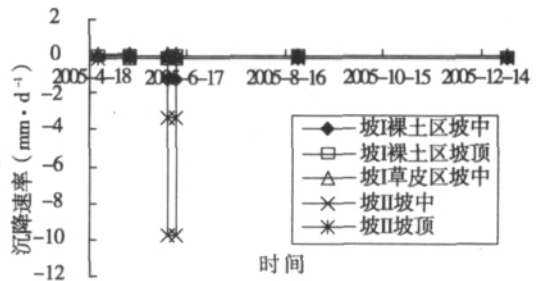


图 15 边坡垂直沉降速率

Fig. 15 Rate of vertical displacement of each slope

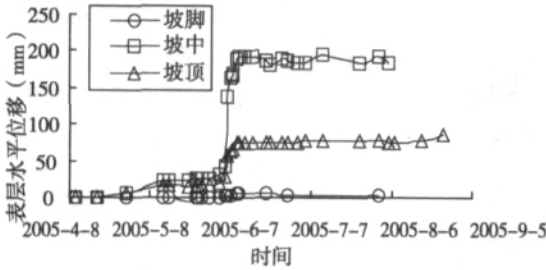


图 11 坡 II 表层水平位移

Fig. 11 Lateral surface deformation of slope II



图 16 坡 II 第一次滑坡破坏现象

Fig. 16 The first slope failure of slope II

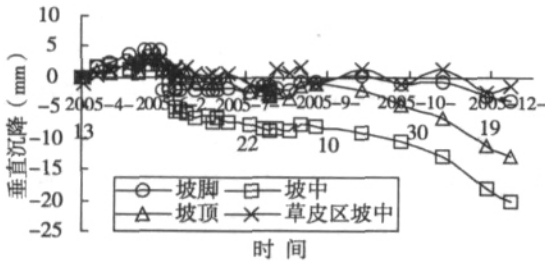


图 12 坡 I 表层 20cm 垂直沉降

Fig. 12 Vertical displacement of 20cm deep of slope I



图 17 坡 II 第二次滑坡破坏现象

Fig. 17 The second slope failure of slope II

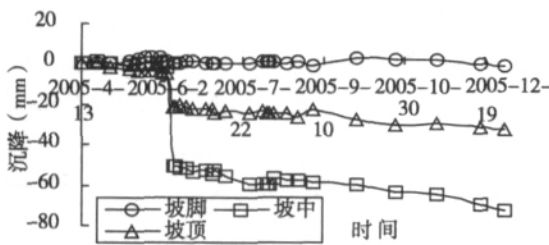


图 13 坡 II 表层 20cm 垂直沉降

Fig. 13 Vertical displacement of 20cm deep of slope II

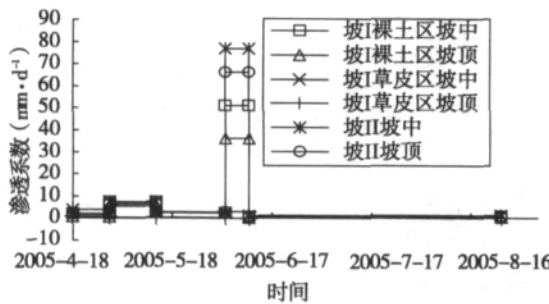


图 14 边坡水平变形速率

Fig. 14 Rate of lateral deformation of each slope

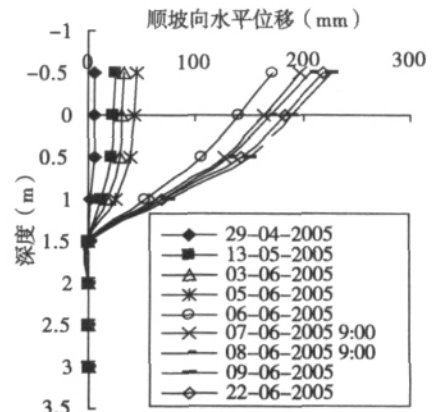


图 18 坡 II 坡中深度剖面上水平位移

Fig. 18 Lateral deformation along the depth in the middle part of slope II

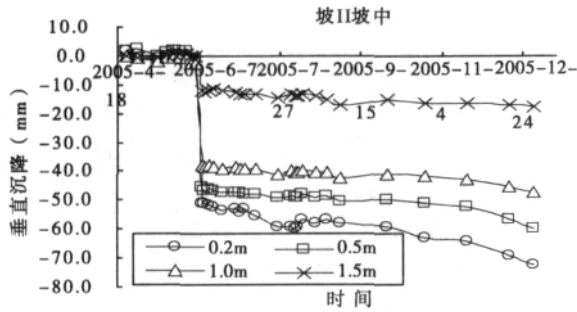


图 19 坡 II 坡中深度剖面上垂直沉降

Fig. 19 Vertical displacement along the depth in the middle part of slope II

第二次大变形发生在 2005 年 6 月 5~6 日, 期间持续降雨 32 h, 平均降雨率为 3.96 mm/h, 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。从图 10~图 15 可看出, 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; 且垂直和水平变形随深度加大而逐渐减小(见图 18 和图 19), 充分表明气候的影响程度随深度加大而减弱; 而坡 II 坡中的表层水平位移量高达 193.8mm, 表层垂直沉降为 50.8mm(见图 11 和图 13)。恰恰形成鲜明对比的是, 草皮区的位移速率仅为 0.6~3.3 mm/d。在降雨后的监测中, 边坡各部位的水平变形趋于稳定, 变形速率为 0.3~1.3 mm/d。此次强降雨导致边坡 II 再度发生典型渐进性滑坡, 滑裂带主要在坡中以上红褐色黏土层和根植土层交界处, 呈贯穿整个坡面弧线状, 弧顶基本在坡中测斜管上侧, 其滑裂形态见图 17。

3.4 膨胀土边坡变形特征和机制分析

对比膨胀土边坡各个部位的变形规律发现, 坡中变形最大, 其次是坡顶, 坡脚处变形最小, 而且随着深度增大, 边坡变形量逐渐减小。就坡 I 裸土区、草皮区和坡 II 3 种边坡坡中的表层变形而言, 陡坡变形最大, 其次是缓坡的, 草皮区基本不动。草皮的覆盖在一定程度上抑制土体的变形。

膨胀土边坡的变形破坏与气候变化密切相关, 其中强降雨是导致边坡变形陡变的主要因素, 而前期持续高达 3.29 mm/d 和 4.49 mm/d 的蒸发量, 促使了膨胀土水分丧失、土体开裂, 这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变形的重要前提之一。裂隙所致的强渗透性也是膨胀土边坡在降雨入渗时发生变形乃至破坏的内在机制之一。

4 边坡变形经验性预测模型

边坡的变形是与坡体水量变化息息相关的, 目

前, 在众多研究工作中, 均将边坡的变形直接与降雨量建立了经验性的关系^[1-3], 但是从边坡变形的内外机制而言, 导致其发生变形的水量不仅仅与降雨量有关, 还包括降雨时坡面径流量和蒸发时土表蒸发量。综合以上三者, 坡体水量变化可以表示为土表净入渗量, 表示如下:

$$\text{土表净入渗量 } q_{\text{ra}} = \text{降雨量} - \text{蒸发量} - \text{植物蒸腾量} - \text{径流量} \quad (1)$$

膨胀土边坡的变形应受控于土体本身的湿度状态, 显然与净入渗量有着更为直接的相关关系, 从这指导思想出发, 通过对现场实测径流量数据的分析与曲线拟合, 并结合实测的降雨量、蒸发量和坡体变形, 确定边坡的每月变形量和每月平均净入渗量的对应关系, 从而建立变形预测模型。

4.1 降雨时膨胀土边坡的径流量特性

现场试验采用容积法来测量降雨时各边坡坡面径流量, 集水井分别位于边坡坡脚平台处。

监测时间段内径流量的变化趋势可见图 20, 从图中可见, 陡坡的径流量要大于缓坡裸土区, 而草皮区的径流量均小于前两者, 这表明植被覆盖在一定程度上有截流降雨的作用。坡面径流量是与表层土体的类型、开裂程度、覆盖情况、坡度以及降雨量是有直接的关系, 这里为了更加明确降雨量和径流量的关系, 忽略其他因素的影响, 特将两者对应的关系曲线进行了拟合, 见图 21, 其中采用降雨强度来表征降雨量大小。拟合曲线的关系表达式如下:

$$\text{坡 I 裸土区: } q = 0.001 \cdot \ln(P_{\text{rain}}) + 0.0087, \quad \text{当 } P_{\text{rain}} > 0.000167 \text{ m/s}; \quad (2a)$$

$$q = 0 \quad \text{当 } P_{\text{rain}} \leq 0.000167 \text{ m/s}; \quad (2b)$$

$$\text{坡 II 裸土区: } q = 0.0027 \cdot \ln(P_{\text{rain}}) + 0.0163, \quad \text{当 } P_{\text{rain}} > 0.00239 \text{ m/s}; \quad (3a)$$

$$q = 0 \quad \text{当 } P_{\text{rain}} \leq 0.00239 \text{ m/s}; \quad (3b)$$

$$\text{坡 I 草皮区: } q = 0.0008 \cdot \ln(P_{\text{rain}}) + 0.0051, \quad \text{当 } P_{\text{rain}} > 0.0017 \text{ m/s}; \quad (4a)$$

$$q = 0 \quad \text{当 } P_{\text{rain}} \leq 0.0017 \text{ m/s}; \quad (4b)$$

统一表达式为:

$$q = A \cdot \ln(P_{\text{rain}}) + B \quad (5)$$

式中: P_{rain} 为降雨强度, mm/s; q 为径流量, mm/s; A 和 B 是与表土的类型、开裂程度、覆盖状态以及坡度有关的系数。通过以上 3 个表达式可以确定各个时段的降雨径流量。

4.2 膨胀土边坡变形预测模型的建立

由于边坡坡脚处及草皮区的变形非常之小, 故仅考虑坡 I 裸土区和坡 II 的坡中、坡顶部位的水平和垂直变形。根据现场蒸发量、降雨量、边坡径流量经验

式(2~5)、土表净流量式(1)和前述边坡表层变形数据,建立边坡的每月变形量和每月平均净入渗量的对应关系,如图22和图23所示。

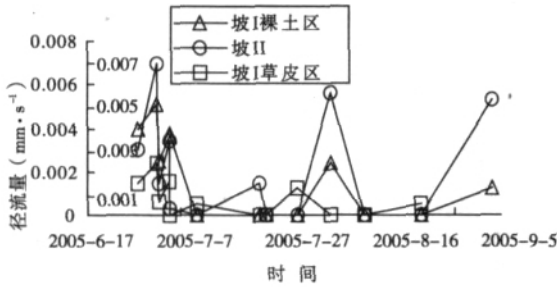


图20 各边坡降雨时径流量

Fig. 20 Runoff of each slope during precipitation

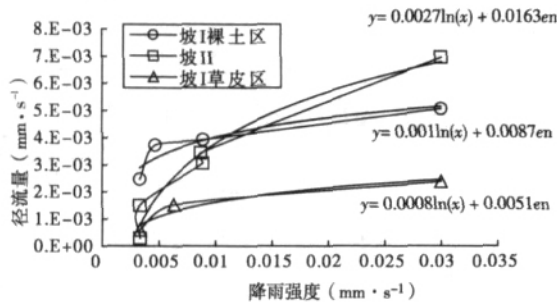


图21 边坡实测径流量数据拟合

Fig. 21 Data-fitting of measured runoff of each slope

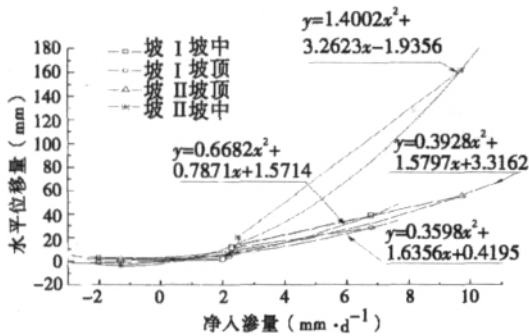


图22 边坡水平位移与净入渗量的关系

Fig. 22 Relationship between lateral displacement and net infiltration of slope

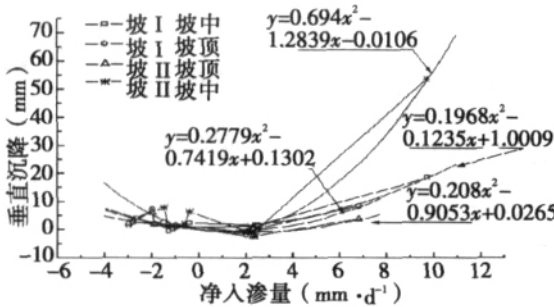


图23 边坡垂直沉降与净入渗量的关系

Fig. 23 Relationship between vertical displacement and net infiltration of slope

通过回归拟合,得到如下边坡变形预测模型公

式:

坡I裸土区水平位移:

$$\text{坡中 } X_{\text{dsp}} = 0.6882q_{\text{net}}^2 + 0.7871q_{\text{net}} + 1.5714 \quad (6a)$$

$$\text{坡顶 } X_{\text{dsp}} = 0.3598q_{\text{net}}^2 + 1.6356q_{\text{net}} + 0.4195 \quad (6b)$$

坡II水平位移:

$$\text{坡中 } X_{\text{dsp}} = 1.4002q_{\text{net}}^2 + 3.2623q_{\text{net}} - 1.9356 \quad (7a)$$

$$\text{坡顶 } X_{\text{dsp}} = 0.3928q_{\text{net}}^2 + 1.5797q_{\text{net}} + 3.3162 \quad (7b)$$

坡I裸土区垂直沉降:

$$\text{坡中 } Y_{\text{dsp}} = 0.2779q_{\text{net}}^2 - 0.7419q_{\text{net}} + 0.1302 \quad (8a)$$

$$\text{坡顶 } Y_{\text{dsp}} = 0.208q_{\text{net}}^2 - 0.9053q_{\text{net}} + 0.0265 \quad (8b)$$

坡II垂直沉降:

$$\text{坡中 } Y_{\text{dsp}} = 0.694q_{\text{net}}^2 - 1.2839q_{\text{net}} - 0.0106 \quad (9a)$$

$$\text{坡顶 } Y_{\text{dsp}} = 0.1968q_{\text{net}}^2 - 0.1235q_{\text{net}} + 1.0009 \quad (9b)$$

统一表达式为:

$$X_{\text{dsp}} (Y_{\text{dsp}}) = A_1q_{\text{net}}^2 + A_2q_{\text{net}} + A_3 \quad (10)$$

式中: X_{dsp} 是水平位移, mm; Y_{dsp} 是垂直沉降, mm; q_{net} 是净入渗量, mm/d; A_1 、 A_2 和 A_3 为拟合系数, 与边坡坡度、边坡部位、气候条件等相关。

从以上关系式可知,边坡的变形与其净入渗量呈二次函数关系。采用以上关系式,在获知当地气候条件以及径流量的条件下,可以预测边坡的变形发展规律。从图24和图25可以看出,采用变形预测模型计算所得边坡表层水平位移和垂直沉降与现场实测值非常吻合,从而验证了该变形预测模型的准确性。

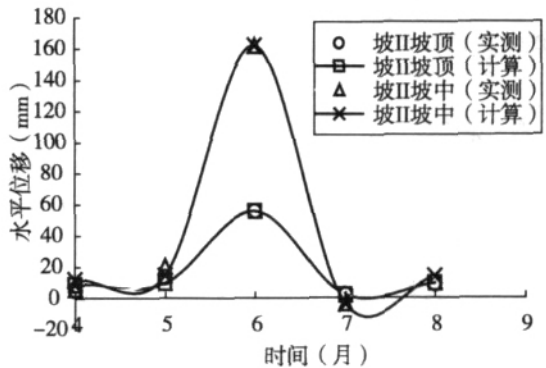


图24 边坡水平位移计算和实测值对比

Fig. 24 Comparison of calculated and measured lateral displacements of slope

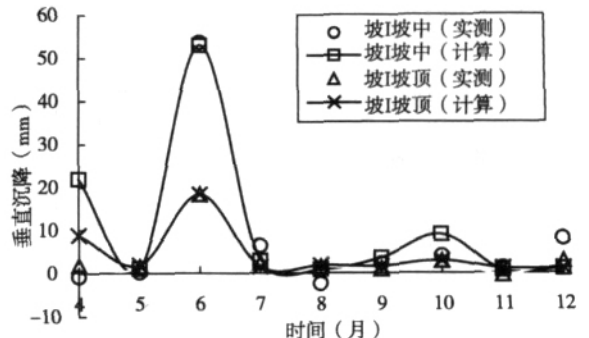


图25 边坡垂直沉降计算和实测值对比

Fig. 25 Comparison of calculated and measured vertical displacements of slope

5 结 论

(1) 降雨是导致膨胀土边坡变形最直接的气候因素,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。这表明蒸发效应是膨胀土边坡变形破坏的一个重要前提条件;

(2) 吸湿条件下原位双环渗透试验结果表明,蒸发效应所产生的土体裂隙,使得吸湿条件下膨胀土的水力特性具有与传统的非饱和土力学中的定义有相反的趋势,即吸力越大,初始渗透系数也越大。这也是膨胀土边坡在降雨入渗时发生变形乃至破坏的内在机制之一;

(3) 在降雨蒸发条件下,膨胀土边坡的坡中部位变形量最大,坡脚变形仅限于表层部位,而且随着深度增大,边坡变形量逐渐减小;陡坡变形大于缓坡,草皮覆盖条件下边坡的变形量均小于裸土区;

(4) 陡坡的径流量要大于缓坡裸土区,而草皮区的径流量均小于前两者,通过拟合现场实测径流量数据,建立了各个边坡的径流量随降雨量变化的经验性公式;

(5) 在实测降雨量、蒸发量、边坡变形和径流量经验公式的基础之上,建立了土表净入渗量与边坡坡中和坡顶的表层水平和垂直变形的关系式。认为边坡变形与土表净入渗量呈二次函数关系,从而建立了符合膨胀土边坡变形的经验性预测模型。通过计算和实测值对比,验证了模型的准确性。

参 考 文 献

[1] 戚国庆,黄润秋.降雨引起的边坡位移研究 [J].岩土力学,

2004, 25 (3): 379- 382 (Qi Guoqing, Huang Runqiu. Study on slope displacements due to rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (3): 379- 382 in Chinese)

[2] Ng C W W, Zhan L T, Bao C G, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration [J]. Geotechnique, 2003, 53 (2): 143- 157

[3] Toll D G. Rainfall-induced landslides in Singapore [C] // Proceedings of the institution of civil engineers-geotechnical engineering. 2001, 149 (4): 211- 216

[4] 刘汉东. 边坡失稳时预报理论与方法 [M]. 郑州:黄河水利出版社, 1996

[5] 孙广忠. 中国典型滑坡 [M]. 北京:科学出版社, 1998

[6] 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

[7] 孔令伟,郭爱国,等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26 (6): 727- 732 (Kong Lingwei, Guo Aiguo, 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)

[8] 徐则民,杨立中. 成渝线典型路基边坡对降雨过程的响应模拟 [J]. 西南交通大学学报 (自然科学版), 2000, 35 (1): 23- 27 (Xu Zemin, Yang Lizhong. A simulation of the hydraulic and mechanical response to the rainfall process of the typical subgrade slope in Chengdu—Chongqing railway [J]. Journal of Southwest Jiao Tong University, 2000, 35 (1): 23- 27 in Chinese)

[9] Fredlund D G, Xing A, Huang S Y. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31: 533- 546

[10] 弗雷德隆德,拉哈尔佐,著. 非饱和土土力学 [M]. 陈仲颐,等,译. 北京:中国建筑工业出版社, 1997