

文章编号: 1002-0268 (2009) 07-0001-06

# 膨胀土堑坡变形的湿热耦合效应及其与降雨历时的关系

李雄威<sup>1,2</sup>, 孔令伟<sup>1</sup>, 郭爱国<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 常州工学院 土木建筑工程学院, 江苏 常州 213002)

**摘要:** 在广西南宁地区建立了不同开挖坡度的膨胀土边坡, 通过现场试验论证出堑坡变形与降雨历时的关系, 并分析其湿热耦合效应。历时两个雨季和一个旱季的试验结果表明, 坡面水平变形与降雨持续时间具有较好的相关性, 只有在一定雨强下持续的降雨过程才能使边坡产生较大的变形; 土体含水量变化是影响边坡变形的主要因素, 而温度变化是促进因素, 二者的耦合作用使得膨胀土边坡趋向不稳定; 在考虑膨胀土边坡的渗透特性后, 建立了堑坡变形与降雨历时的关系, 表达式可用于预测边坡总变形量, 也可换算成变形速率对陡坡的变形突变进行预警, 具有较强的工程适用性。同时, 监测结果也表明, 在采用植被防护后膨胀土边坡的变形迅速减小, 说明植被护坡是一种有效的堑坡防护方式。

**关键词:** 道路工程; 变形; 现场试验; 膨胀土路堑边坡; 湿热耦合

中图分类号: U416.1+67

文献标识码: A

## Moisture-heat Coupling Effect of Expansive Soil Cut Slope Deformation and Relationship between Deformation and Raining Time

LI Xiongwei<sup>1,2</sup>, KONG Lingwei<sup>1</sup>, GUO Aiguo<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Institute of Rock and

Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences Wuhan Hubei 430071, China

2 School of Civil Engineering & Architecture, Changzhou Institute of Technology, Changzhou Jiangsu 213002, China)

**Abstract:** Expansive soil cut slopes of different gradients were built up in Nanning, Guangxi, the relationship between deformation and the raining time was discussed, and the moisture-heat coupling effect of deformation was analyzed through the field test. The test result during one dry season and two rainy seasons in the monitoring period shows that (1) the correlation between horizontal deformation and raining time is well and only successive raining in certain intensity can induce large deformation; (2) the water content variety is the key factor to the slope deformation and the temperature variety may accelerate the deformation process, the coupling action makes the slope unstable. The relationship expression of deformation and the raining time was established on the basis of slope permeability analysis which is suitable to predict total deformation of the slope and converse deformation rate to warn the sudden change of deformation earlier. At the same time, the monitoring results show that the slope deformation decreases immediately with vegetation protected which illustrates that vegetation is an effective protection method for cut slope.

**Key words:** road engineering; deformation; field test; expansive soil cut slope; moisture-heat coupling

收稿日期: 2008-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10872210); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (kzcx2yw150); 交通部西部交通建设科技资助项目 (200631878530)

作者简介: 李雄威 (1976-), 男, 湖北十堰人, 博士, 从事非饱和土力学, 土质边坡和桩土共同作用方面的研究. (lixw@126.com)

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

## 0 引言

自然环境下的膨胀土常处于较坚硬的状态, 但是其强度特性对气候变化特别敏感, 吸湿会软化。大气影响下膨胀土性状的研究, 主要围绕水分的入渗和蒸发过程展开<sup>[1-2]</sup>, 而这一过程又会循环往复的发生。在蒸发和降雨的过程中, 大气与土壤之间水分和能量的交换极大地影响着非饱和土的行为和特性。膨胀土在这种湿热耦合的作用下性质逐渐发生变化, 强度不断衰减, 从而引发灾难性的工程问题, 造成生命财产的损失和环境的恶化<sup>[3-4]</sup>。

国内外对于膨胀土的三性已展开了广泛的研究<sup>[5-7]</sup>, 但对于其在自然环境下的湿热耦合性状研究的较少。崔玉军等<sup>[8]</sup>从研究材料的温度效应出发, 提出了一个适合于饱和粘土的多功能热-力学模型, 谢云、陈正汉等<sup>[9]</sup>通过非饱和膨胀土温控三轴试验分析了温度对土体强度和变形的影, 这些分析主要是基于室内试验考虑温度的影响效应, 并未涉及水分的迁移。詹良通<sup>[10]</sup>进行了大型现场降雨入渗模拟试验和综合的室内试验研究, 探讨了非饱和膨胀土中土水相互作用对边坡稳定的影响, 但分析过程中没有考虑热效应, 与自然环境状态有所差异。可见, 从大气影响的角度出发对膨胀土堑坡湿热耦合效应和变形特性进行的研究分析较少, 所以进行相关研究, 同时建立边坡变形与气候特征的相关关系是有意义的。

文献 [11] 就降雨、蒸发条件下膨胀土边坡的变形特征进行了初步研究, 认为降雨是膨胀土边坡发生灾变最直接的外在因素, 蒸发效应是边坡灾变的重要前提条件, 但边坡监测历时只有半年, 时间较短, 许多问题无法做出深入分析。本文同样采用现场试验方法对边坡展开了 18 个月的监测, 在文献 [11] 研究成果的基础上, 结合现场试验获得的新信息, 对边坡

变形特性进行新的探讨与分析。

## 1 场地条件与试验方案

试验场地位于广西南宁市郊外。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。对原场地进行了现场开挖, 边坡分为 16° 缓坡坡 1 和 21° 陡坡坡 2, 其中缓坡分设为裸土区和植草区, 草皮覆盖区铺设的草皮为马尼拉草。边坡的土层剖面见图 1 和图 2, 地面以下 0.5~2.2 m 之间含有弱-强膨胀性的红褐色粘土和灰白色粘土, 泥岩是不透水层, 而在深部泥岩以下的粉细砂层呈现饱和状态。土体物理力学性质指标见表 1。

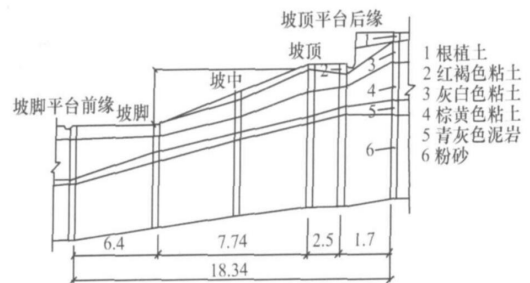


图 1 边坡 1 剖面 (单位: m)

Fig 1 The profile of slope 1 (unit: m)

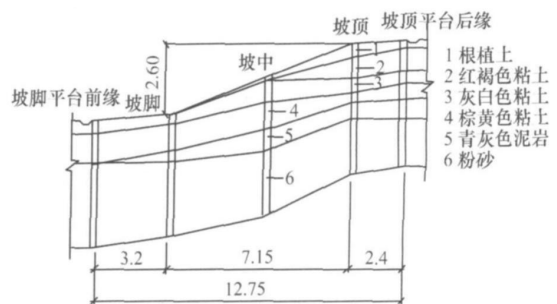


图 2 边坡 2 剖面 (单位: m)

Fig 2 The profile of slope 2 (unit: m)

表 1 试验场地不同土层土体物理力学性质指标

Tab 1 The field soil physical mechanic index of diferent strata

土层顺序	厚度/m	年代成因	岩性描述	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	含水量/%	液限/%	塑性指数/%	粘粒含量<5μm/%	自由膨胀率/%	收缩系数	缩限/%	50 kPa 膨胀率/%	饱和渗透系数/(m·s <sup>-1</sup> )
1	0~0.5	Q <sup>ud</sup>	根植土, 含草根	1.99	14.7	34.3	15.9	22	—	—	—	—	4.33e-7
2	0.5~1.25	Q <sup>ud+pl</sup>	粘土, 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 <sup>ud+pl</sup>	粘土, 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 <sup>el</sup>	粘土, 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 <sup>el</sup>	泥岩, 青灰色, 强风化	2.13	19.6	34.4	18.1	24	—	—	—	—	—
6	2.8~5.5	Q <sup>el</sup>	粉土~粉细砂, 青灰色, 饱和	2.11	18.6	—	—	—	—	—	—	—	—

试验现场设置了小型气象站、土壤含水量测量系统 (TDR/钻孔取土烘干法)、热敏电阻温度传感器和测斜管, 长期监测现场的气象数据、边坡土体的温湿度场和边坡的水平向变形。测点位置分别位于坡脚、坡中和坡顶。由于膨胀土厚度基本在 2 m 以内, 而超过 2 m 基本为泥岩和粉细砂, 所以土体含水量和温度监测点均在 2 m 以内。2005 年 3 月 21 日开始在试验场地进行仪器埋设, 从 2005 年 5 月 15 日到 2006 年 11 月 15 日为监测期, 历时 18 个月, 期间试验场地经历了 1 个完整的旱季和 2 个完整的雨季。

## 2 试验结果分析

经过 18 个月的现场监测, 膨胀土堑坡的变形特性、变形过程中的湿热状态以及边坡变形和降雨历时的关系整理如下:

### (1) 膨胀土堑坡的变形特性

应用测斜仪对膨胀土堑坡的变形进行实时监测, 将气象数据与坡体变形过程进行对比分析, 其中, 坡 1 裸土区与植草区和坡 2 现场监测中坡面变形过程与降雨量的关系见图 3~图 6。

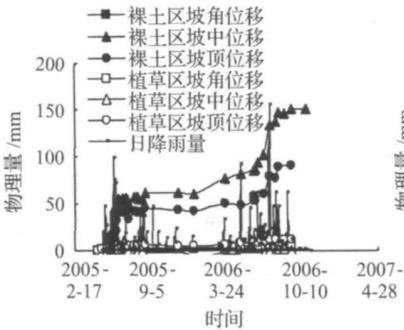


图 3 坡 1 坡面顺坡向水平位移与降雨量关系

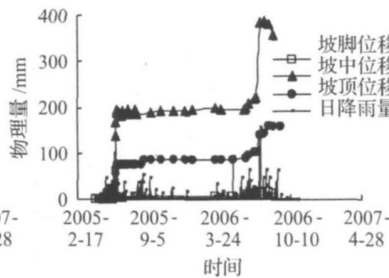


图 4 坡 2 坡面顺坡向水平位移与降雨量关系

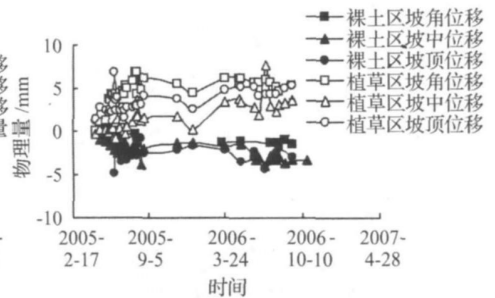


图 5 坡 1 坡面垂直坡向水平位移

Fig 3 The relationship between surface horizontal displacement and rainfall of slope 1

Fig 4 The relationship between surface horizontal displacement and rainfall of slope 2

Fig 5 The relationship between surface vertical displacement and rainfall of slope 1

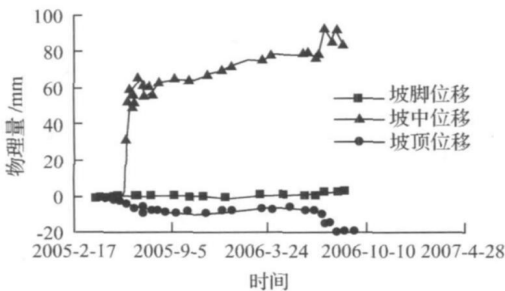


图 6 坡 2 坡面垂直坡向水平位移

Fig 6 The relationship between surface vertical displacement and rainfall of slope 2

从边坡变形的监测结果可以看出, 边坡发生的主要是顺坡向变形。坡 1 垂直坡向的变形非常小基本都是毫米级; 坡 2 坡顶和坡脚位置的垂直坡向位移也非常小, 坡中位置由于土层走向的原因在第 1 个雨季中发生了较大的垂直坡向变形但数值远小于顺坡向变形, 而在第 2 个雨季中坡中垂直坡向变形则比较小。以上分析结果表明, 对于本试验场地的膨胀土边坡主要考虑顺坡向的变形特性是符合边坡实际工作状态的。

个雨季中均发生了较大的变形, 2005 年雨季对应发生较大变形的时间为 2005 年 6 月 6 日, 2006 年雨季对应发生较大变形的时间为 2006 年 7 月 19 日, 在较大的变形发生前边坡均经历了较长的降雨过程。对比坡体变形与降雨量的关系可以看出, 陡坡的变形随着降雨的历时会发生突变, 在变形产生突变前, 边坡经历了一定时间的持续降雨, 期间坡体变形有一个缓变的过程; 而缓坡在降雨期间一直呈现缓变的过程。对于陡坡和缓坡, 缓变与历时关系的规律性相近。就单个坡体而言, 坡脚位移最小, 坡中位移最大, 说明边坡主要发生的是坡面的变形; 而对边坡变形的历时过程而言, 坡体变形呈现渐进的特征。同时, 对比坡 1 裸土区和植草区的变形可以看出植被的存在可有效降低坡体的变形。

从图 3~图 6 也可发现, 在无雨的时间段, 坡体变形很小, 这说明降雨入渗和水分蒸发、蒸腾是造成膨胀土堑坡变形与否的主要影响因素。

以往研究常将边坡变形直接与降雨量建立起经验的关系, 而陈建斌<sup>[1]</sup>从边坡变形的内在机制出发, 建立了降雨净入渗量和坡体变形的经验公式, 经验公式预测值与现场实测值吻合较好, 这说明降雨入渗后

坡体含水量分布特征决定了坡体的变形特性。图 3~图 6 中坡体变形与降雨量的关系表明, 连续降雨才会使边坡产生较大变形, 而边坡的变形和雨量净入渗量相关性较强, 同时膨胀土的渗透性又较差, 详见表 1, 这说明连续的降雨才会产生持续雨水入渗。针对雨季中 2 次较大的边坡变形过程, 现分析边坡的变形与降雨持续时间和降雨强度的关系。

由于植草区坡体的变形较小, 而裸土区坡中的变形最大, 所以针对坡 1 和坡 2 裸土地表的变形特性进行分析, 将雨季中坡中位置的坡面水平位移与相应的降雨持续时间整理对比, 如图 7 所示 (由于坡 2 水平变形会发生突变, 所以坡 2 的位移为坡面位移发生突变前的位移)。

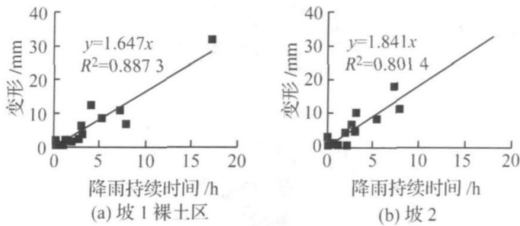


图 7 坡中顺坡向水平位移与降雨持续时间关系  
Fig 7 The relationship between surface horizontal displacement and raining time at the middle of slope

可见坡面水平变形与降雨持续时间的相关性较好, 对于缓坡, 每小时的降雨会产生 1.647 mm 的坡体位移, 略小于陡坡, 陡坡每小时的降雨会产生 1.841 mm 的位移。说明在相同降雨历时的情况下, 坡度会对边坡稳定性产生较大影响。由相关关系和前文对比分析可以看出持续的降雨是造成坡体较大变形的的主要原因。

边坡坡中顺坡向水平变形速率与降雨强度的关系如图 8 所示, 可见, 高强度的降雨并不能使边坡变形速率有效增加, 反而不大的雨强会造成膨胀土边坡较大的变形速率, 说明边坡的变形并不是由降雨强度控制, 只有在一定雨强下持续的降雨过程才能使边坡

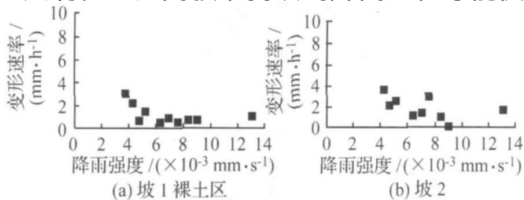


图 8 坡中顺坡向水平变形速率与降雨强度关系  
Fig 8 The relationship between surface horizontal displacement rate and rainfall intensity at the middle of slope

的净入渗量不断增加。

累计降雨时间和边坡累计变形的关系见图 9, 对于缓坡累计降雨时间和累计变形量基本成线性关系, 而且 2 个雨季中曲线的规律基本一致。而对于陡坡, 2 个雨季初始阶段坡体变形与降雨累计时间的关系基本一致, 但当降雨累计到 28 h 左右时, 坡体变形均会发生突变。可见降雨量的累计使坡体变形量逐渐累计, 当这种渐进过程达到一定程度就会造成边坡的突然垮塌。

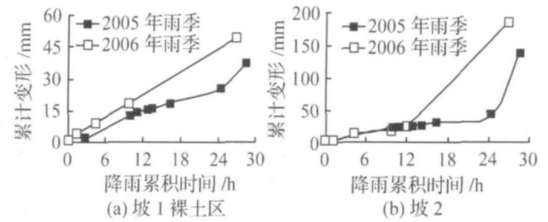


图 9 累计降雨时间和坡中累计变形的关系  
Fig 9 The relationship between accumulative raining time and accumulative displacement at the middle of slope

(2) 膨胀土壅坡灾变破坏的湿热状态坡 1 裸土区、坡 2 在 2005 年 6 月 6 日前和 2006 年 7 月 19 日前的连续降雨期间均发生了持续的变形, 这段时间里坡中位置深度方向土体平均含水量整理见图 10, 缓坡土体含水量沿深度方向分布较均匀, 且都在 30% 左右, 陡坡在浅层处土体含水量略低于深部, 0.3 m 以下土体含水量分布也较为均匀并且也都在 30% 左右, 可以看出, 在坡体变形突变前的持续变化期间, 土体含水量分布有一个均化的过程。

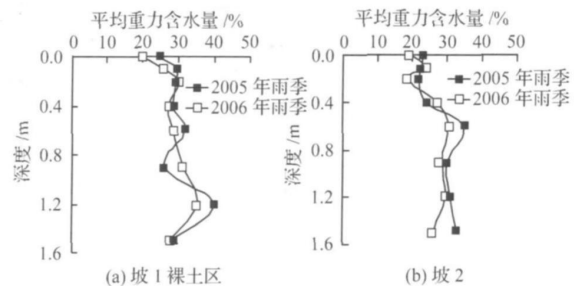


图 10 坡中位置土体沿深度方向平均重力含水量分布  
Fig 10 The average water content distribution along the depth at the middle of slope

持续降雨过程中, 坡中土体温度沿深度方向的分布见图 11、图 12, 坡 1 裸土区和坡 2 温度变化的趋势相同, 随着降雨持续发生, 浅层土体温度逐渐减小, 深部土体温度逐渐增加, 温度沿深度方向的梯度逐渐降低, 浅层土体温度与深部土体温度趋于一致。

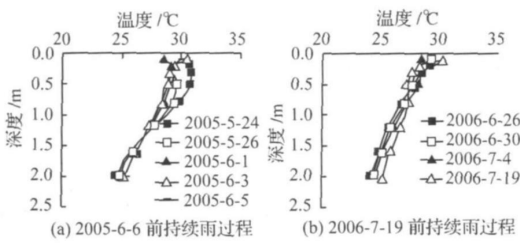


图 11 坡 1 裸土区持续降雨过程中坡中土体深度方向日平均温度

Fig 11 The average daily temperature distribution along the depth at the middle of bare slope 1 during continuous rainfall

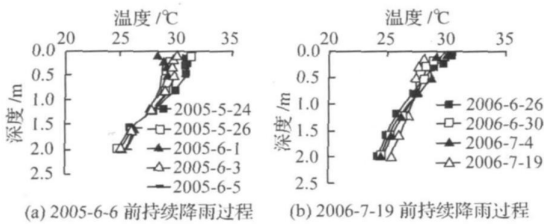


图 12 坡 2 持续降雨过程中坡中土体深度方向日平均温度

Fig 12 The average daily temperature distribution along the depth at the middle of slope 2 during continuous rainfall

对比以上湿度和温度的分析可见, 在持续的降雨过程中, 土体的含水量增加, 土体的导热系数和体积热容都逐渐增加, 使得土体热量更容易向土体深部传递, 而热量的传递过程又会促进土体湿度场的均一化。所以土体的温度场和湿度场会发生耦合, 这种作用的结果使土体温度和湿度趋于均一化。均一化的湿度场会使边坡大面积土体的强度降低<sup>[12]</sup>, 长期的湿化过程也会改变土体的强度, 从而引发边坡的连续变形。

可见土体水量变化是边坡变形的主要影响因素, 而温度变化是促进因素, 二者的耦合作用使得膨胀土边坡趋向不稳定。

### (3) 膨胀土塑坡变形与降雨历时的关系

陈建斌<sup>[11]</sup> 在现场实测降雨量、蒸发量和坡体变形以及拟合的径流量经验公式的基础之上, 建立了边坡每月变形量和每月平均净入渗量的对应关系, 经验公式中需要知道降雨量、蒸发量、径流量从而换算土体的净入渗量, 应用时需要获得径流数据和完备的气象数据, 不便于实际应用, 因此有必要直接建立起坡体变形与气象参数间的关系。通过对图 7~图 9 的分析发现边坡变形量与降雨持续时间具有较好的相关

性, 而与雨强的相关性较差。所以降雨持续时间也基本反映了膨胀土边坡的雨水入渗特性, 由此建立的膨胀土边坡变形预测方法如下。

缓坡坡 1: 第 1 个雨季,  $x_{disp_1} = 1.192 2t$ ,

第 2 个雨季,  $x_{disp_2} = 1.821 9t$ 。

缓坡的变形呈现渐变特性, 取 2 个雨季的平均值得到缓坡的变形预测式:

$$x_{disp} = 1.507 1t. \quad (1)$$

陡坡坡 2: 第 1 个雨季,  $x_{disp_1} = 1.952 7t$ ,

第 2 个雨季,  $x_{disp_2} = 2.131 t$ 。

陡坡的变形初始呈现渐变特性, 当变形累计到一定值时, 坡体变形会发生突变。取 2 个雨季的平均值得到陡坡的变形预测模型:

$$x_{disp} = 2.041 9t \quad t < 28 \text{ h}, \quad (2)$$

式中,  $x_{disp}$  为相关性较差;  $t$  为降雨持续时间。当  $t = 28 \text{ h}$  时, 坡体变形会发生突变。降雨持续时间基本反映了膨为边坡坡中顺坡向水平位移。

用降雨累计时间对累计变形进行预测的结果和监测数据对比见图 13, 可见效果较好。新的边坡变形预测方法中只有降雨持续时间 1 个参数, 可以预测边坡总变形量, 也可换算成变形速率, 还可对陡坡变形的突变进行预警, 对于工程有较好的适用性。

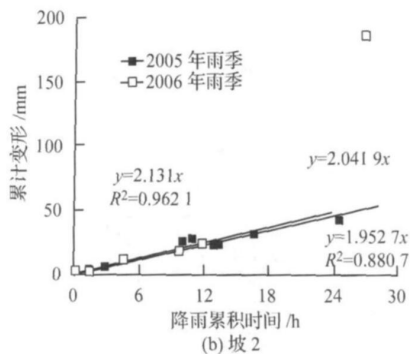
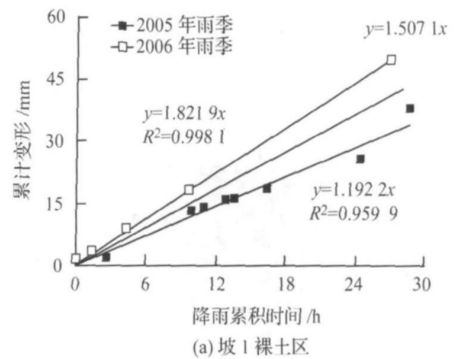


图 13 用降雨累计时间对累计变形的预测

Fig 13 The accumulative displacement forecast on the basis of accumulative raining time

根据边坡的特点,坡脚和坡顶也可以依据以上方法建立相应的变形预测公式,从而可以从整体上掌握坡体变形与气候变化的关系。

### 3 结论

(1) 膨胀土堑坡坡面变形与降雨持续时间具有较好的相关性,只有在一定雨强下持续的降雨过程才能使边坡产生较大的变形,同时,坡度会对边坡的变形过程产生较大影响。

(2) 在持续的降雨过程中,土体的温度场和湿度场会发生耦合作用,结果使得土体温度和湿度趋于均一化。均一化的湿度场会使边坡大面积土体的强度降低,长期的湿化过程也会改变土体的强度,从而引发边坡的连续变形。在边坡变形过程中,土体含水量变化是主要影响因素,而温度变化是促进因素,二者的耦合作用使得膨胀土堑坡趋向不稳定。在采用植被防护后膨胀土边坡的变形迅速减小,可见,植被护坡是除工程护坡外又一种有效的防护方式。

(3) 在考虑膨胀土边坡的渗透特性后,边坡变形的预测方法中只有降雨持续时间1个参数,计算结果可以预测边坡总变形量,也可换算成变形速率,还可对陡坡的变形突变进行预警,对于工程有较强的适用性。

需要说明的是,由于膨胀土具有典型的裂隙性、胀缩性,且土体渗透系数较低,工程性质受湿热影响大,所以本文研究成果主要适应于膨胀土,特别是湿热多雨的地区,而对于气候特征不明显的地区,膨胀土边坡的灾变特性还有待深入探讨。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 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.  
KONG Lingwei, CHEN Jianbin, GUO Aiguo, et al. Field Response Tests on Expansive Soil Slopes under Atmosphere [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (7): 1065—1073.
- [2] 王年香, 章为民, 顾行文, 等. 膨胀土地基浸水膨胀变形模型试验研究 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (5): 51—55.  
WANG Nianxiang, ZHANG Weimin, GU Xingwen, et al. Model Test on Irrudation Swelling Deformation of Expansive Soil Foundation [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (5): 51—55.
- [3] BLIGHT G E. Interaction between the Atmosphere and the Earth [J]. Geotechnique, 1997, 42 (4): 715—766.
- [4] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 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, 27 (6): 727—732.  
KONG Lingwei, GUO Aiguo, ZHAO Yingwen, et al. Water Stability of Xiangjing Expansive Soils and Their Mechanical Effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 27 (6): 727—732.
- [5] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils [M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [6] NING LU, WILLIAM J, LIKOS. Unsaturated Soil Mechanics [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [7] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
TAN Luorong, KONG Lingwei. Soil Property for Special Geotechnical Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [8] 崔玉军, 叶为民. 饱和粘土热-力学体积变形特征模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (21): 3903—3910.  
CUI Yujun, YE Weimin. On Modeling of Thermo-mechanical Volume Change Behavior of Saturated Clays [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (21): 3903—3910.
- [9] 谢云, 陈正汉, 李刚. 温度对非饱和膨胀土抗剪强度和变形特性的影响 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27 (9): 1082—1085.  
XIE Yun, CHEN Zhenghan, LI Gang. Research of Thermal Effects on Shear Strength and Deformation Characteristics of Unsaturated Bentonite Soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27 (9): 1082—1085.
- [10] 詹良通. 非饱和膨胀土边坡中土水相互作用机理 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40 (3): 494—500.  
ZHAN Liangtong. Study on Soil-water Interaction in Unsaturated Expansive Soil Slopes [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2006, 40 (3): 494—500.
- [11] 陈建斌, 孔令伟, 郭爱国, 等. 降雨蒸发条件下膨胀土边坡的变形特征研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 40 (11): 70—77.  
CHEN Jianbin, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Deformation Characteristics of Expansive Soil Slopes under Precipitation and Evaporation [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (11): 70—77.
- [12] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国, 等. 考虑水化状态影响的膨胀土强度特性 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (12): 3193—3198.  
LI Xiongwei, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Strength Characteristics of Expansive Soil Considering the Effect of Hydrus State [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (12): 3193—3198.