

# 不同气候条件下膨胀土路堤特征参数的室内模拟实验

罗文柯

湖南科技大学;煤矿安全开采技术湖南省重点实验室,湖南湘潭 411201

**摘要** 为了探索不同气候条件下膨胀土路基的含水量、土压力、温度、竖向胀缩变形等特征参数的基本变化规律,分别选取湖南省高速公路建设中经常遇到的弱膨胀土和中等膨胀土作为实验土样,按 90%的压实度填筑,在不同排水边界条件模拟路堤在 4 种不同气候条件下 2 组膨胀土路堤模拟实验,结果表明,膨胀土路堤中含水量、土压力、温度和胀缩变形等均受大气影响,且与路堤土的类型、密实度、排水边界条件关系密切:① 埋藏较浅,含水量的变化受大气影响越大,路基中含水量越高,受气候条件影响越明显;② 膨胀土路堤中的土压力变化是膨胀土路堤中含水率和气候条件综合作用的结果;③ 对路基温度变化影响最大的是日照,其次是降雨,阴天影响最小;④ 竖向胀缩变形主要发生在路堤基顶积水阶段。因此,在具体工程建设中,防渗保湿和合理设计排水系统是防治膨胀土路基遭受破坏的关键。

**关键词** 膨胀土;路堤;模拟实验;防渗保湿;土工格栅

**中图分类号** TU 443

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.100-7857.2011.06.006

## Indoor Simulation Test on Characteristic Parameters of Expansive Soil Embankment Under the Different Weather Conditions

LUO Wenke

Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines; Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan Province, China

**Abstract** In order to explore the basic laws of the characteristics parameters of expansive soil moisture, soil pressure, temperature, vertical expansion and contraction deformation in the different climatic conditions, the weak expansive soil and the medium expansive soil which frequently appears in highway construction in Hunan Province were selected as the test samples. According to 90% of the compaction degree to fill, in different drainage boundary conditions, two groups of expansive soil embank simulation experiment was taken in four different climate conditions, the results indicate that the water content, soil pressure, temperature, and swelling and shrinkage deformation of expansive soil embankment are all governed by atmospheric effects, and are close related to the embankment soil type, density, drainage boundary conditions: (1) The shallower subgrade buried, the greater impact of atmosphere on water content changes is. The higher water content, the clearer impact of climate conditions is. (2) The changes of earth pressure in expansive soil embankment are caused by the moisture content and expansive soils pressure in different climatic conditions and different moisture content. (3) The biggest infection factor is successive sunshine, followed by rain; cloudy day only has a minimal impact. (4) Vertical expansion and contraction change mainly occur in the top water phase of road embankment foundation. Thus, in specific construction projects, anti-seepage and moist maintenance and rational design of drainage system are the key technologies for the prevention and treatment of expansive soil damage.

**Keywords** expansive soil; embankment; simulation test; anti-seepage and moist keeping; geogrid

收稿日期:2010-01-06;修回日期:2010-01-21

基金项目:国家安全生产监督管理总局安全生产科技发展计划项目(08-203,HN08-19,HNMJ10-05);湖南省教育科学“十一五”规划课题(XJY08BGD027)

作者简介:罗文柯,副教授,研究方向为岩土工程、采矿工程、安全工程及技术,电子信箱:hkdixk@tom.com

## 0 引言

膨胀土是颗粒高度分散、成分以黏土矿物为主、对环境的湿热变化极为敏感的高塑性黏土,是一种吸水膨胀软化、失水收缩干裂的特殊土<sup>[1]</sup>。岩土工程界常称膨胀土为灾害性土,其吸水膨胀、失水收缩并反复变形的性质以及土体中随机分布的裂隙,对公路路基、路堑边坡等有潜在破坏作用<sup>[2-5]</sup>。建筑在膨胀土地基上和路基中的大多构造物,在膨胀土土压力的作用下容易损害,如桥台护坡不均匀下沉、开裂等;涵洞因自重荷载较轻,基础埋置较浅,地基膨胀土的不均匀胀缩变形,造成翼墙和端墙的不均匀变形和开裂;洞体因地基土不均匀胀缩变形而开裂破坏;涵渠盖板从接缝处断裂漏土、漏水,涵渠边坡沿砌缝断裂、错动,涵渠底板开裂、漏水,整座涵渠成环形裂纹<sup>[6]</sup>。膨胀土路基受气候条件的影响显著,气候条件的变化引起路基中温度、含水量、土压力、湿胀干缩的变化,因此,膨胀土路基中的温度变化是衡量膨胀土路基受气候条件影响的一个重要指标,同时,路基中温度的变化将导致路基中含水量的变化,引起膨胀土路基的风化,影响膨胀土路基的工程性质的变化,从而导致膨胀土路基的破坏等。

国内外工程建设中都非常重视膨胀土问题的研究工作。如 D.G. Fredlund 和 H. Rahardio<sup>[7]</sup>对膨胀土的性质、理论和土压力实验进行了系统的论述和总结,通过引入土吸力和负的孔隙水压力概念,建立了相应的流动理论、抗剪强度理论、塑性与极限平衡理论、固结理论和体积变化理论;美国对膨胀土地区的公路修筑问题曾进行过多次研究,提出了换土、湿度控制、化学固化和土工合成材料加固等技术<sup>[8]</sup>。中国在相关工程建设标准与规范中,对膨胀土的工程特性、设计、施工、

工程处理做了相关规定<sup>[9]</sup>。

膨胀土及其工程病害问题一直是当今岩土工程和工程地质领域始终没能得到妥善解决的世界性技术难题,对工程建设造成了极为严重的社会影响、生态环境破坏和经济损失。2008年初,一场历史罕见的冰雪灾害奇袭湖南后引起的湖南省境内大量而严重的地质滑坡现象,人们至今记忆犹新。因此,对膨胀土路基取样在实验室内进行模拟实验有利于工程建设中综合治理方案设计提供科学合理依据,将对公路、铁道、房屋建设等具有重要的意义<sup>[10-11]</sup>。

## 1 实验室物理模拟

在公路路基施工中,膨胀土含水量是控制施工质量的重要参数之一,不同等级的膨胀土在施工中含水量的控制指标不同,确定最优含水量一直是工程界研究的重点。在实验室中探索不同等级的膨胀土在不同气候条件下的变化规律,将对工程施工作业具有重要指导作用。

### 1.1 实验目的

在室内进行膨胀土路堤相似模拟实验的目的是研究膨胀土路堤在干湿循环作用下水的入渗、蒸发,土中含水量、温度、胀缩变形、土压力沿不同深度变化规律等,以便研究膨胀土路堤的破坏类型及破坏过程。

### 1.2 模拟箱设计和测试设备

模型箱三面为混凝土,一面为有机玻璃观察面,2个临空面,其中1个为顶面,另1个为路堤边坡临空面,观察面的下部采用1cm厚竹胶板,上部为有机玻璃,竖向每隔30cm用钢管作横向支挡,确保有机玻璃不发生侧向变形,见图1(a)。

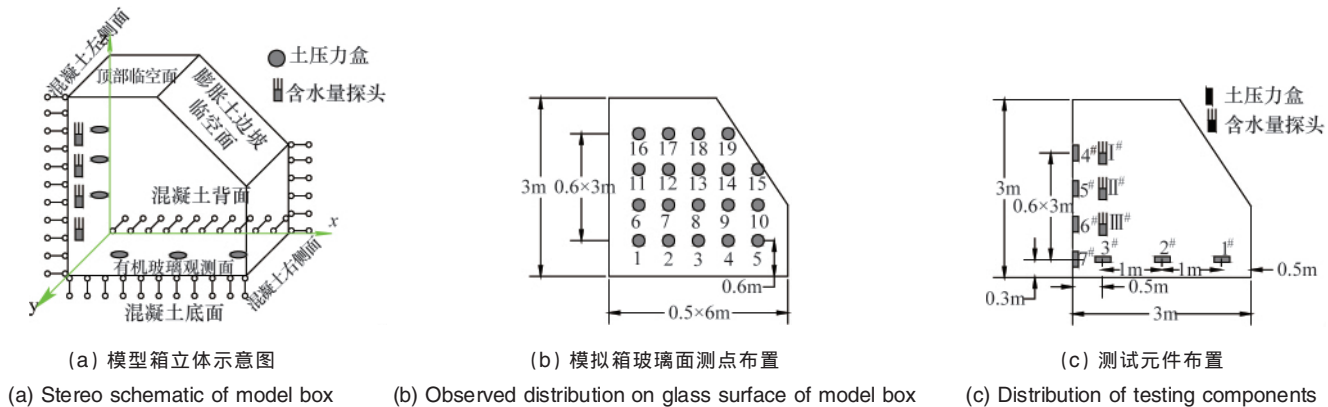


图1 实验模型箱立体示意图与测试元器件布局

Fig. 1 Stereo schematic of model box and the schematic of testing components

实验测试仪表采用江苏南通中天精密仪器有限公司的MG-2型高精度测墒仪、MS-2型FDR土壤水分探测器、长沙金码高科技公司JMZX-300监测仪以及ZX-506型带温度记忆的土压力盒,仪表埋设位置如图1(b)、(c)所示。

### 1.3 实验方案的制定

在道路工程建设中,以中等膨胀土和弱膨胀土居多,故实验土样为湖南省境内某高速公路的中等膨胀土和弱膨胀土作为模型实验用填料。在膨胀土路堤压实度90%、路堤边

坡坡度为1:0.75下分别模拟坡顶积水、阴天、日照和降雨4种不同气候条件,每种气候条件历时7~18d。研究膨胀土路堤在干湿循环作用下入渗、蒸发情况和土中含水量、温度、胀缩变形、土压力的变化规律。第1组实验在模拟箱底铺设一层细砂,以模拟透水边界条件;第2组实验在模拟箱底及其周边铺设一层二布一膜土工膜,为模拟不透水边界条件。模拟气候条件如表1所示。

(1) 坡顶积水:在膨胀土实验边坡坡顶不断浇水,使其始

表 1 模型实验设计方案

Table 1 Design scheme of simulation experiment box

实验组	实验条件				模拟气候设计(时间/d)
	膨胀土性质	密实度	路堤坡度	底部边界条件	
第 1 组	弱膨胀土	90%	1:0.75	排水	积水→阴天→日照→降雨(9→7→7→7)
第 2 组	中等膨胀土	90%	1:0.75	不排水	积水→阴天(18→5)

终保持坡顶积水状态。对弱膨胀土实验,模拟积水状态为 9d, 每天上午观测一次各含水量探头的数据。

(2) 日照气候:在实验室用 10 支 1kW 的碘钨灯(坡顶 4 支,坡面 6 支),每天对坡顶和坡面进行照射数小时,以膨胀土表面温度为 40°为宜。

(3) 降雨气候:在模拟箱上部安装 10 个淋喷头在路堤顶面和坡面进行喷洒,模拟室外降雨气候条件,每天模拟降雨约为 0.5mm,历时 1h 左右,安装淋喷头的架子可沿 x、y 方向移动,淋喷头本身可做 360°旋转,以保证洒水均匀。

(4) 阴天气候:对膨胀土实验边坡不施加其他任何外界

措施,在室内自然温度与湿度条件下,每天观测其参数探头的测试数据。弱膨胀土组观测 7d,中等膨胀土观测 5d。

(5) 排水边界条件模拟:在模拟箱底部铺设一层细砂,以模拟自然环境中排水状况良好的路基条件,即膨胀土土体中的裂隙渗流水渗透至底部时,由竹胶板渗流至箱底,研究其在排水状况良好条件下各参数的变化情况。如图 2(b)所示。

(6) 不排水边界条件模拟:在模拟箱底部及周边铺设一层二布一膜土工膜,模拟在自然环境中坡顶积水渗流后继续存留在膨胀土土体中时各参数变化情况,并与排水状况良好情况进行对比分析。如图 2(c)所示。

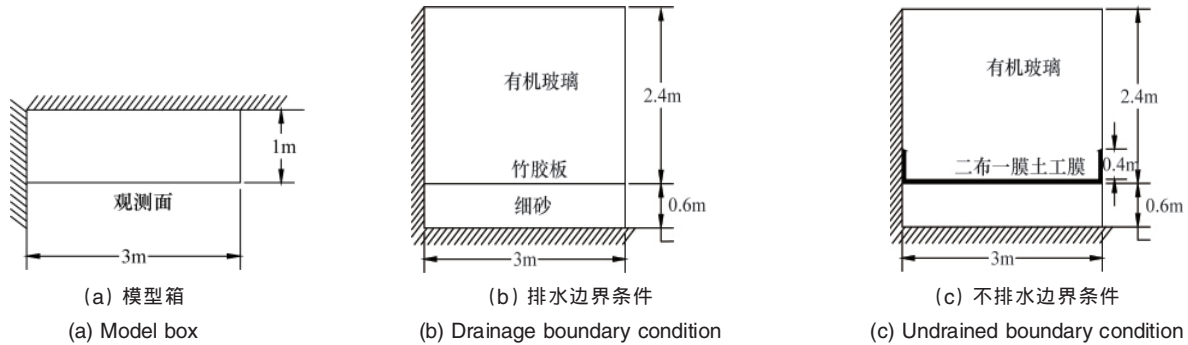


图 2 实验模型箱和边界条件示意

Fig. 2 Schemes of experimental model box and boundary condition

2 实验结果分析

2.1 含水量实验结果分析

膨胀土的含水量是膨胀土实际含水多少的指标,是影响膨胀土抗剪强度的主要因素之一,许多膨胀土路基的工程病害均因含水量变化所致。工程实践证明,黏土的抗剪强度与土含水量有关,膨胀土因富含亲水性黏土矿物成分,其抗剪强度与其含水量的关系尤为密切,即膨胀土的抗剪强度受含水量的影响特别敏感。

(1) 弱膨胀土实验组

第 1 组实验 I<sup>#</sup>,II<sup>#</sup> 和 III<sup>#</sup> 探头的坐标 x,y 值分别为 (0.0,2.1),(0.0,1.5),(0.0,0.9),单位均为 m。其测试结果如图 3(a)所示。可以看出:① 第一阶段,即积水阶段,I<sup>#</sup>、II<sup>#</sup>、III<sup>#</sup> 探头分别在 2,4,5d 后,含水量即达到饱和状态;② 第二阶段为阴天气候条件,膨胀土含水量降低较快,降幅为 3.6%~5.0%;③ 在第三阶段,即日照阶段,起始膨胀土含水量接近最佳含水量,尽管有 10 支 1kW 的碘钨灯照射 7d,每天照射 6h,保持土表面温度为 40℃左右,含水量降低的速率较第二阶段小,降幅仅为 0.7%~1.2%;④ 第四阶段为模拟降雨阶段,每天降雨 0.5h,含水量增大了 2.4%~4.3%;⑤ 相对而言,路基中含水

量越高,受气候条件影响越明显,水分越容易降低;在最优含水量时水分降低较慢;⑥ 在排水边界条件下,水的入渗速度随入土深度的增大而增大。

(2) 中等膨胀土实验组

第 2 组实验 I<sup>#</sup>,II<sup>#</sup> 和 III<sup>#</sup> 探头的坐标 x,y 值分别为 (0.0,2.1),(0.0,1.5),(0.0,0.9),单位均为 m。其测试结果如图 3(b)所示。可以看出,距坡顶 30cm 处的 I<sup>#</sup> 探头,含水量从积水阶段起始的 21.7%,在第 3 天后增大到 21.9%。积水 8d 后, I<sup>#</sup> 探头所测的含水量才达到相对稳定的阶段,含水量为 44.4%,水的入渗速度为 1.56mm/h。而 II<sup>#</sup> 和 III<sup>#</sup> 探头所测含水量基本上保持一条直线,无变化。I<sup>#</sup> 探头含水量在积水后含水量是逐渐上升趋势,随后缓慢上升到积水后第 12 天的 45.2%,随后保持在 45.2%。停止降雨后,含水量逐渐下降,到实验结束时,即停止降雨的第 5 天后含水量降到了 42.5%。

比较第 2 组与第 1 组实验,不同的是第二组实验在积水 2d 后水就渗透到最顶层的含水量探头位置,而第 2 组用了 8d 时间;第 1 组实验在积水 2d 后含水量发生突变,随后在模拟积水的过程中基本保持不变,而第 2 组实验在积水 8d 后含水量发生突变,最后才趋于稳定。

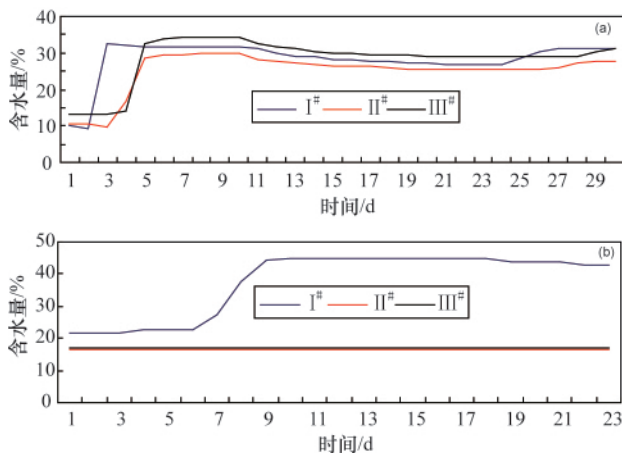


图3 弱(a)与中等(b)膨胀土在不同气候条件下含水量随时间变化曲线

Fig. 3 Curves of moisture changing with time for weak (a) and medium (b) expansive soil under the different climates conditions

2.2 土应力实验结果分析

第1组、第2组室内模拟实验中土压力盒测试结果如图4所示。

(1) 中等膨胀土实验组

侧壁土压力变化见图4(a)。处于最顶层的4#土压力盒,当路基顶面积水4d后到达该位置,由于自重和膨胀土膨胀,与侧壁产生摩擦力,土压力增大较快,由0MPa增大到0.018MPa,随后土压力逐步下降,由0.018MPa减小到实验结

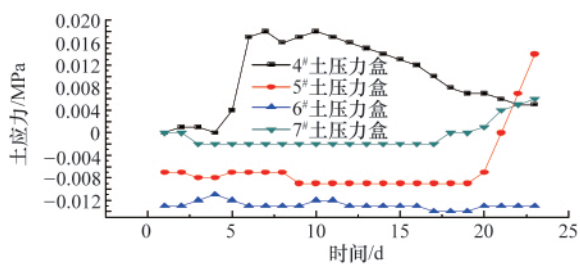
束时的0.005MPa。处于第二层的5#土压力盒,当路基顶面积水20d后到达该位置,由于自重和膨胀土膨胀,与侧壁产生水平向内摩擦力,使侧壁土压力增大较快,5#土压力盒由实验开始时的-0.007MPa增大到实验结束时的0.014MPa,增大了0.021MPa。

底层土压力变化见图4(b)。1#土压力盒,由于整个实验过程中路基顶的水未入渗到该位置,土压力变化很小,开始一段时间内几乎没有变化,直到模拟降雨后的第17天,土压力才逐步上升,由实验开始时的0MPa增大到实验结束时的0.006MPa。2#、3#土压力盒在整个实验期间土压力变化不明显。

(2) 弱膨胀土实验组

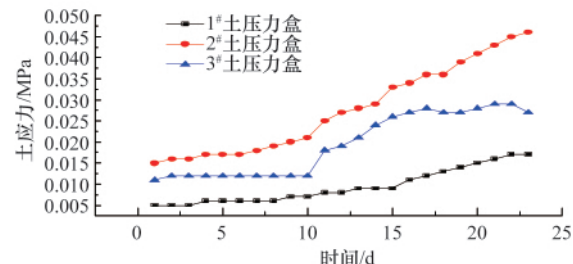
侧壁土压力变化见图4(c)。积水阶段,因坡顶积水向膨胀土中渗透,土压力随水的入渗自重增大膨胀土水平侧向膨胀,与侧壁产生了向内的水平摩擦力,使得侧壁的土压力增大。从下向上分别增大了0.016,0.032,0.045,0.007MPa。侧向土压力变化最大值发生在距基底约1/3H处。坡顶积水完全入渗到整个膨胀土体后,在随后的第二、三、四阶段,由于含水量变化相对较小,自重变化不大,此时,由于膨胀土已完成了膨胀变形,膨胀力变化很小,侧向土压力变化不大,膨胀土自重及侧壁水平摩阻力变化很小,所以在第二、三、四阶段土压力变化很小,大多在±0.001MPa范围内变化。

底层土压力变化见图4(d)。在填筑完路堤后进入积水阶段,因坡顶积水向膨胀土体中渗透,土压力随水的入渗,由于自重增大和膨胀土向上膨胀,与侧壁产生了向下摩擦力,



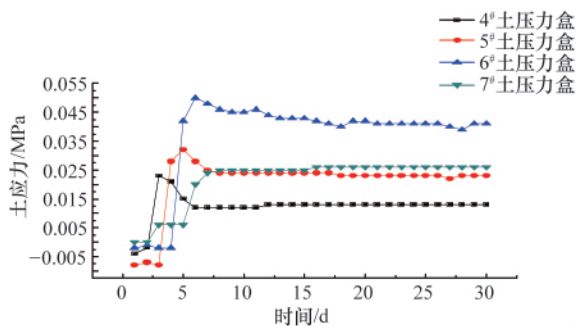
(a) 中等膨胀土侧壁土压力

(a) Lateral medium expansive soil pressure changing with time



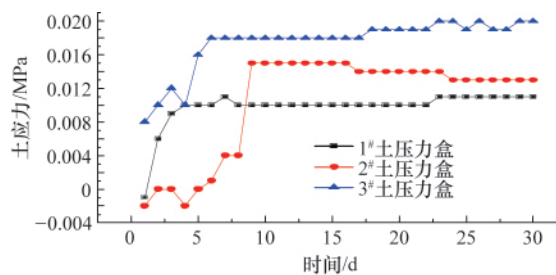
(b) 中等膨胀土底层土压力

(b) Bottom medium expansive soil pressure changing with time



(c) 弱膨胀土侧壁土压力

(c) Lateral weak expansive soil pressure changing with time



(d) 弱膨胀土底层土压力

(d) Bottom weak expansive soil pressure changing with time

图4 弱膨胀土与中等膨胀土在不同气候条件下土压力随时间变化曲线

Fig. 4 Curves of soil pressure changing with time for weak and medium expansive soil under the different climates conditions

使得底层的土压力增大。从坡脚向路基中心分别增大了0.011,0.017,0.010MPa。当坡顶积水完全入渗到整个膨胀土体后,在随后的第二、三、四阶段,由于含水量变化相对较小,膨胀土已完成了膨胀,膨胀土自重及侧壁的摩阻力变化很小,所以在第二、三、四阶段土压力变化很小,变化范围为±0.001MPa。

2.3 温度实验结果分析

第1、2组模拟实验中土压力盒中的温度曲线如图5所示。可以看出,①弱膨胀土实验组在积水阶段,土中温度降低

最大值为2.5℃;在阴天气候条件下温度变化较小,最大降温1.0℃;在日照条件下,温度升高2.5℃;在降雨阶段,温度最大降低2.0℃。说明膨胀土路基均在大气影响深度范围内,土中温度直接受外部气候条件的影响,温度变化幅度在2.5℃以内。②中等膨胀土实验组土压力盒所测温度均逐渐上升。4#,5#,6#及7#4个土压力盒的埋设为由浅到深,其所测得的温度变化量分别为3.5,3,2.5和2℃,可以看出,随着埋设深度的增加,温度变化量减小。同样,3#,2#和1#土压力盒从里向外埋设,温度变化分别为2,2.5和3℃。

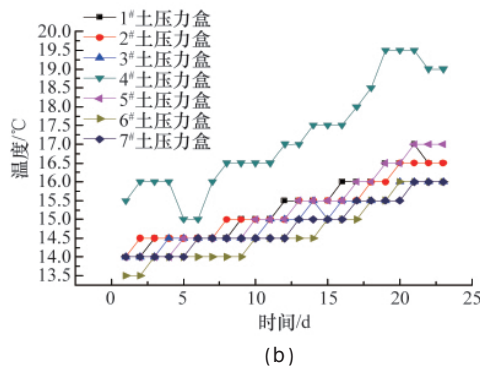
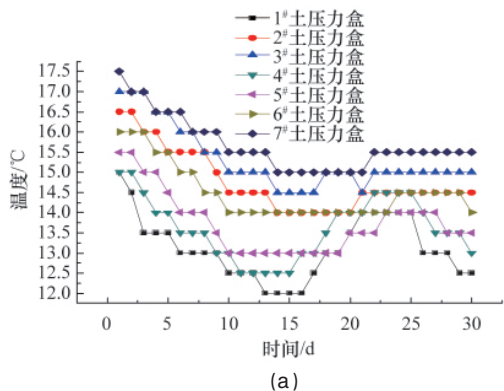


图5 弱(a)与中等(b)膨胀土在不同气候条件下温度随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of temperature changing with time for weak (a) and medium (b) expansive soil under the different climates conditions

2.4 胀缩变形实验结果分析

实验箱有机玻璃观测面的实际观测结果见表2和图6。由表2可以看出,弱膨胀土的竖向胀缩变形表现为如下3个特征。①膨胀土路堤竖向变形主要发生在路堤基顶积水阶段。在竖向存在一个临界深度,此处膨胀土不发生竖向胀缩变形。在临界深度以上的膨胀土向上发生膨胀,膨胀量最大达0.8cm。②在阴天气候条件下,膨胀土路堤可发生0.1~

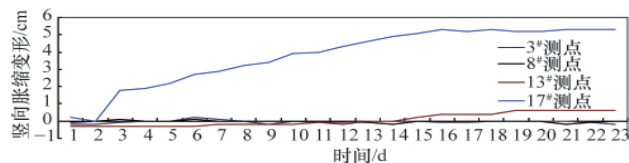


图6 中等膨胀土路基胀缩变形时间曲线

Fig. 6 Deformation time curves of roadbed of expansion and contraction for medium expansive soil

表2 弱膨胀土模型实验不同位置测点的竖向胀缩测试结果分析

Table 2 Test result analysis on expansion and contraction in vertical direction at different positions for weak expansive soil

竖向胀缩变形观测点		2#	9#	12#	18#	22#	27#	28#
测点坐标	x/cm	101.5	204.0	101.5	150.3	101.5	101.5	101.5
	y/cm	74.0	102.8	133.5	163.0	194.0	223.5	254.0
模拟积水 9d	路堤筑完模拟积水	14.1	42.3	73.8	103.1	134.2	163.7	194.1
	模拟积水结束	13.0	41.5	72.8	102.3	134.0	164.2	194.9
	前后胀缩变形差	-0.9	-0.8	-1.0	-0.9	-0.2	+0.5	+0.8
模拟阴天 7d	模拟阴天开始	13.0	41.3	72.8	102.4	134.0	164.3	194.9
	模拟阴天结束	13.0	41.2	72.8	102.4	133.9	164.0	194.9
	前后胀缩变形差	0.0	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.3	0.0
模拟日照 7d	模拟日照开始	13.0	41.3	72.8	102.4	133.9	164.0	194.9
	模拟日照结束	13.0	41.3	73.0	102.3	134.0	164.0	194.9
	前后胀缩变形差	0.0	0.0	+0.2	-0.1	+0.1	0.0	0.0
模拟降雨 7d	模拟降雨开始	13.0	41.3	73.0	102.3	134.0	164.1	194.9
	模拟降雨结束	13.0	41.2	73.0	102.4	134.0	164.0	194.9
	前后胀缩变形差	0.0	-0.1	0.0	+0.1	0.0	-0.1	0.0

注:胀为正值,缩为负值。

Notes: Expansion is positive, contraction is negative.

0.3cm 的收缩量。③当膨胀土已充分胀缩变形后, 其后的干湿循环胀缩变形量均在 $\pm 0.2\text{cm}$  范围内。由图 6 可以看出, 中等膨胀土距基顶越近, 胀缩变形量越大, 如 17# 测点, 其余测点变化量小。

## 2.5 路基破坏形式分析

明确干湿循环作用下水对膨胀土路基表层土体会产生的破坏形式, 有利于工程施工过程中防治技术的选择, 因此, 本文全面观察了实验中每个阶段的路基表层土体特征, 列于表 3。

表 3 膨胀土室内模拟实验路基表层土体破坏特征

Table 3 Destruction features of expansive soil subgrade indoor simulation tests

土类型	气候条件模拟	表层土体破坏特征描述
弱膨胀土	路基坡顶积水 9d	积水第 2 天, 松开坡面挡板, 出现两条长 7~8cm, 宽 3cm 的垂直裂缝
	阴天气候 7d	阴天第 2 天, 坡面出现一横向通长裂缝, 并水平膨胀 2cm, 坡顶出现网裂
	模拟日照气候 7d	开始大量水蒸气蒸发, 相继坡面坡顶出现细裂缝, 后为不规则方形网裂
	模拟自然降雨 7d	水沿裂缝向坡面冲刷, 开裂块体脱落, 坡面形成沟槽, 局部出现崩塌
中膨胀土	坡顶积水直渗坡底 18d	数天后坡顶边缘出现数条竖向裂缝
	模拟无日照和降雨 5d	坡面向里处出现裂缝, 并连接起来形成滑动面, 土体有向下滑动趋势

## 3 结论

通过膨胀土室内模拟实验, 研究了在不同气候条件(模拟)下, 如积水、阴天、日照、和降雨时膨胀土路基土体内特征参数含水量、土应力、温度、胀缩变形和坡面破坏特征的规律。

(1) 膨胀土中的含水量、土压力、温度和胀缩变形受土体埋深的影响较大, 埋深越浅, 含水量、土压力、温度和胀缩变形的变化越大; 用同种土作为路堤填料, 在模拟不排水边界条件下, 水在膨胀土路堤中的入渗速率随路堤深度的增大而减小; 路堤中含水量越高, 受气候条件的影响越明显, 水分越容易蒸发; 在最优含水量时水分变化相对较慢。因此, 在膨胀土的路堤和路堑边坡施工中, 做好排水设施, 是确保膨胀土路基不受或少受气候影响的首要措施。

(2) 膨胀土路堤的竖向胀缩变形主要发生于路堤基顶积水。在竖向存在一个临界深度, 此处不发生竖向胀缩变形, 在临界深度以上的膨胀土层发生向上膨胀。因此在路基基顶应利用土工格栅或土工布做好防渗保湿工作。

(3) 不同干湿循环的循环顺序对膨胀土路基的破坏作用不同。日照将引起水分蒸发及产生网状裂缝; 降雨将产生坡面流的侵蚀及水的径流冲刷破坏。最不利的干湿循环顺序是长期暴晒后的暴雨, 膨胀土路基在暴晒之后出现较大裂缝, 暴雨将沿裂缝产生水的大量入渗和坡面流的侵蚀及水的径向冲刷破坏作用。

(4) 在降雨期间, 雨水沿裂缝向坡面冲刷, 出现局部蚀穴, 坡面脱落及细小颗粒被水冲刷带走, 坡面出现冲沟。膨胀土路基坡度的大小、已有冲沟的深浅、宽窄、弯曲程度等均会影响雨水冲刷作用的强烈程度。

(5) 将室内模拟实验结果运用至工程建设中, 关键技术是合理设计排水系统与防渗保湿措施。

### 参考文献 (References)

[1] 陈善雄. 膨胀土工程特性与应用技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学,

2006.

Chen Shanxiang. Research for expansive soil engineering properties and application technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.

[2] 罗文柯, 杨果林. 膨胀土处治技术在高速公路路基中的工程应用[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2006, 28(1): 121-126.

Luo Wenke, Yang Guolin. *Natural Science Journal of Xiangtan University*, 2006, 28(1): 121-126.

[3] Jones D E, Holtz W G. Expansive soils—the hidden disaster [J]. *Civil Eng ASCE*, 1973, 43(8): 49-51.

[4] Nelson J D, Miller D J. Expansive soils: Problems and practice in foundation and pavement engineering[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1992.

[5] 杨果林, 刘义虎. 膨胀土路基含水量在不同气候条件下的变化规律模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(24): 4524-4533.

Yang Guolin, Liu Yihu. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(24): 4524-4533.

[6] 杨果林, 黄向京. 不同气候条件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 Guolin, Huang Xiangjing. *Chinese Journal Geotechnical Engineering*, 2005, 27(8): 948-955.

[7] Fredlund D G, Rahardio H. Soil mechanics for unsaturated soil [M]. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1993.

[8] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.

Liao Shiwen. *The expansive soil and the railway engineering*[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984.

[9] 中华人民共和国交通部. JTJ013-95 公路路基设计规范 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.

Ministry of the People's Republic of China. JTJ013-95 the design standard of highway roadbed[M]. Beijing: China Communications Press, 1996.

[10] 罗文君, 罗家国, 罗光. 南友路膨胀土(岩)路堑边坡滑坡规律与特征 [J]. 公路与汽运, 2005, 108(3): 73-75.

Luo Wenjun, Luo Jianguo, Luo Guang. *Highways and Automotive Applications*, 2005, 108(3): 73-75.

[11] 杨果林, 王永和. 不同气候条件下膨胀土路基中温度变化规律试验 [J]. 水文地质工程地质, 2005(3): 97-102.

Yang Guolin, Wang Yonghe. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2005(3): 97-102.

(责任编辑 代丽)