

# 石灰改良膨胀土工程主要特性试验研究—以广西南宁地区膨胀土路堤为例

王小芳<sup>1</sup>, 程谦恭<sup>2</sup>, 李俊<sup>1,3</sup>, 刘文方<sup>1</sup>

(1. 四川理工学院土木工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 成都 610031;  
3. 桥梁无损检测与工程计算四川省高校重点实验室, 四川 自贡 643000)

**摘要:**研究干湿循环作用下石灰改良膨胀土的工程主要特性对其工程应用具有重要意义。以广西南宁铁路枢纽动车运用所的石灰改良膨胀土路堤为研究对象,基于室内离心模型实验仪器,设计降雨-加热系统,通过三次干湿循环试验,分析路堤模型在干湿循环过程中土压力、吸力、含水率、温度等工程主要特性的变化规律。研究结果如下:(1)经过三次干湿循环后,路堤边坡并没有发生明显变形与破坏。(2)在加热蒸发阶段,土压力随时间减小、吸力随时间增加;在降雨入渗阶段,土压力随时间增大、吸力随时间降低。(3)含水率在蒸发阶段随时间减少,降雨阶段随时间增加;埋深越浅,含水率的变化幅度越大。(4)土层温度在加热蒸发阶段变化较大,降雨对其影响不大。(5)土水特征曲线显示吸力在蒸发阶段随含水率的降低而增加,在降雨阶段随含水率的升高而减小;脱湿和吸湿两阶段的土水特征曲线不重合。

**关键词:**石灰改良膨胀土;工程力学特性;离心模型试验;干湿循环

**中图分类号:**U416.1<sup>+</sup>67

**文献标志码:**A

## 引言

膨胀土路堤在降雨过程中遭浸泡后,土体产生体积膨胀,在表层出现一定厚度的蓬松层。在干燥季节,土体表层出现大量裂隙,当雨水通过裂隙渗入土体内部后,使土体膨胀湿软,造成路堤承载能力的丧失。石灰改良膨胀土路堤是指经石灰处治的非饱和土,其胀缩性、裂隙性和超固结性远远低于膨胀土路堤<sup>[1-4]</sup>。由于石灰改良膨胀土路堤具有以上优点,已被广泛应用于修

建铁路和高速公路路堤<sup>[5-9]</sup>。虽然有研究发现石灰改良膨胀土的工程特性和力学强度指标较未掺加石灰改良的膨胀土有较大幅度的提高,但是在反复的干湿循环作用下,其改良效果有所下降<sup>[10-12]</sup>。崔伟等人就干湿循环对石灰改良粘质土膨胀特性的影响进行研究,对高岭石膨胀土的混合物以及具有高塑性粘土的土样进行膨胀潜势和膨胀力的测试试验,并对添加了石灰的改良土样经过不同制备后进行同样的试验,发现在遭受干湿循环的作用后,石灰稳定膨胀土丧失了控制膨胀潜势的有利

收稿日期:2018-06-15

基金项目:国家自然科学基金(41530639,41372292);四川省安全生产科技项目(aj20170601105926)

作者简介:王小芳(1989-),女,四川泸州人,助教,硕士,主要从事地质工程方面的研究,(E-mail)2543811261@qq.com

通讯作者:李俊(1989-),男,四川乐山人,讲师,博士,主要从事岩土工程方面的研究,(E-mail)lijunxiaoyouxiang@163.com

效果<sup>[13-16]</sup>。Rao S. M 等人也发现干湿循环条件下,石灰改良土样丧失了部分有用的改良效果,在浸水压力作用下发生显著的崩塌<sup>[17-20]</sup>。

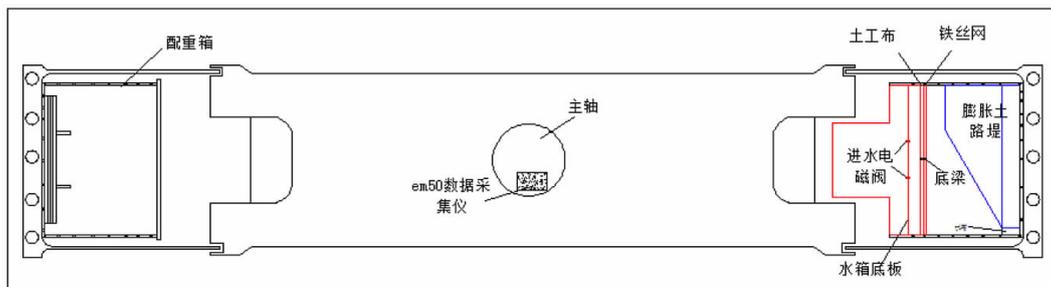
如何定性分析多次干湿循环作用下石灰改良膨胀土的工程主要特性是急需解决的重大工程问题。本文试以广西南宁铁路枢纽动车运用所的石灰改良膨胀土路堤为研究对象,以室内离心模型试验为研究手段,设计离心机加载过程中的降雨—加热系统,通过三次干湿循环试验,研究多次干湿循环作用下石灰改良膨胀土的土压力、含水率、吸力及温度等工程主要特性变化,分析影响石灰改良膨胀土路堤长期稳定性的因素,这对石灰改良膨胀土的工程应用具有重要价值。

## 1 试验材料和方法

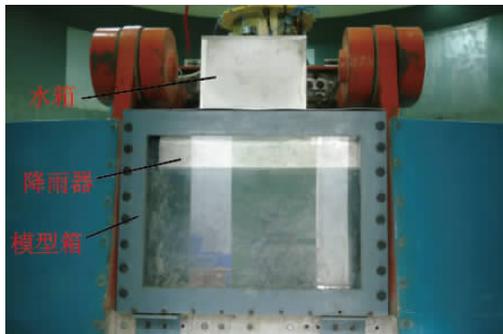
模型土样取自南宁屯里动车运用所的铁路路堑边坡上,土样与现场路堤土样一致。土样呈灰绿色、灰黄或棕红色,呈块状,内部掺杂有少量黑色结核。取土断面下部土层中夹杂厚度约为 10 cm 的黑色煤炭夹层。

土体表面发育有密集的网状裂隙。土体在干燥状态下较坚硬,遇水迅速软化。室内离心模型仅填筑半幅路堤,模拟原型半幅路堤内相关特性的变化情况。原型半幅路堤尺寸为:长 30 m × 宽 1 m × 高 12 m。根据模型箱的尺寸(长 0.8 m × 宽 0.7 m × 高 0.7 m)和原型的模拟条件,模型相似比尺确定为 1:40。路堤地基土层厚度为 10 cm,长度为 76.5 cm,路堤填筑高度为 30 cm,按 1:1.75 放坡,路堤顶面宽度为 24 cm。

取回的土料掺入 5% 石灰改良后,填筑模型路堤、进行离心模型试验。在制模过程中以原型路堤(即南宁铁路枢纽动车运用所膨胀土路堤)的填筑要求来控制模型填筑。离心模型试验的相似比尺  $N = 40$ 。模型的填料采用从工程施工现场运回的原地膨胀土,由于试验土料的颗粒较小,故不考虑粒径对试验的影响。离心模型试验构造图如图 1 所示,其中图 1(a)为离心机和路堤模型箱的平面图,图 1(b)为路堤模型箱降雨器装置,图 1(c)为带温控的硅胶加热装置。图 1(b)和图 1(c)组成的降雨—蒸发系统可模拟反复干湿循环条件。



(a) 离心机和路堤模型箱平面图



(b) 路堤模型箱降雨器装置



(c) 带温控的硅胶加热装置

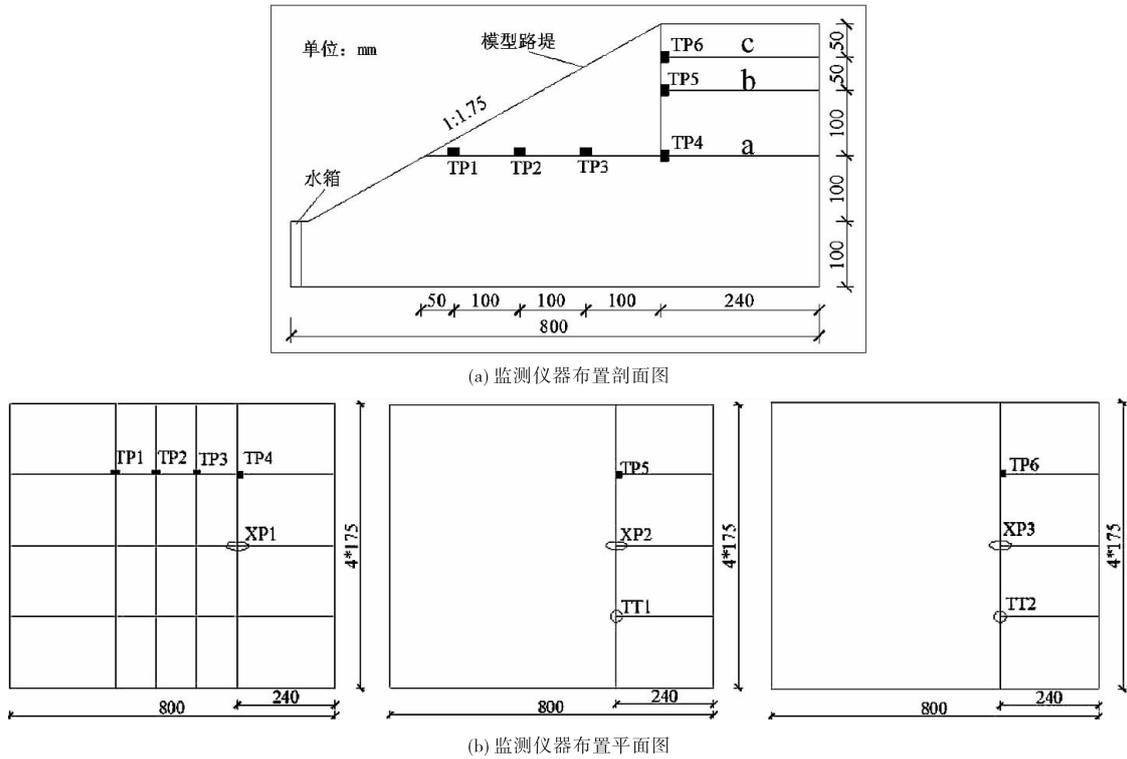
图 1 离心模型试验构造图

模型箱监测仪器布置图如图 2 所示,其中图 2(a)为剖面图,图 2(b)为平面图。模型箱监测仪器主要用于实时监测模型工程主要特性变化过程,如土压力、含水率、吸力和温度等的演化规律。模型削坡完成后进行监

测仪器埋设。各类仪器的埋设位置见图 2(b),其中 TP1 ~ TP6 为土压力盒编号,XP1 ~ XP3 为水势传感器编号,TT1 ~ TT2 为含水率传感器编号。仪器埋设步骤如下所述:(1)土压力盒埋设:当路堤填筑至埋设位置以上两层

土体后,再回挖至目标位置进行土压力盒埋设。(2)含水率探头和水势传感器探头埋设:在模型路堤填筑完毕后,再开挖沟槽到埋设层,埋设含水率探头和水势传感

器探头,然后回填压实至路堤高度。由于含水率探头较薄,且水势传感器探头的陶瓷头较易碎,在埋设过程中应进行适当保护。



注:TP1 ~ TP6 为土压力盒编号,XP1 ~ XP3 为水势传感器编号,TT1 ~ TT2 为含水率传感器编号

图2 模型箱监测仪器布置图

现场监测石灰改良膨胀土路堤的固结时间约为1个月,根据离心机固结相似比尺,可计算出模型在离心试验中的固结时间为30 min。根据实际固结数据,分梯度设计了三次干湿循环试验,其中每次离心试验蒸发-降雨作用下固结时间分别为实际固结时间的2.6、2.7和3倍。以上设计确保三次干湿循环试验作用下土体能够充分固结,使试验具有代表性,得到的实验结果能代表多次干湿循环条件下的工程主要特性。本次离心模型试验中,第一次干湿循环加热30 min、降雨入渗60 min,相当于原型以1.95 mm/d的蒸发强度(以下同)连续蒸发11.3天后,以24.08 mm/d的降雨强度(以下同)连续降雨66.6天。第二次干湿循环加热40 min、降雨入渗60 min,相当于原型连续蒸发15天后,连续降雨66.6天。第三次干湿循环加热60 min、降雨60 min,相当于原型连续蒸发22.5天后,连续降雨66.6天。

## 2 工程主要特性试验结果分析

### 2.1 路堤边坡表面的变化

第一次干湿循环后,坡面并没有出现明显变形。第二次蒸发结束时,出现土体与有机玻璃脱离的现象,且在坡面上出现了较少的细小裂缝。第二次降雨后,裂缝消失。第三次蒸发结束后,坡面出现了贯通性较好的长裂缝,但开口宽度较小。由此说明经过三次干湿循环后,路堤边坡并没有发生明显变形损坏。

### 2.2 土压力的变化

三次干湿循环中,不同深度土压力时程曲线如图3所示。

从图3可知,土压力在加热蒸发阶段随时间降低,在降雨入渗阶段随时间增大,且两阶段的变化速率均先快后慢。蒸发阶段土压力的降低主要是由蒸发导致改良土含水率减小和湿密度降低所致;降雨入渗阶段土压

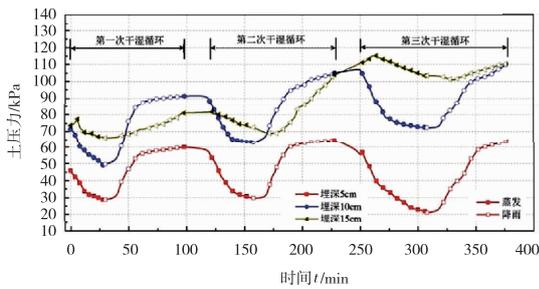


图3 不同深度土压力时程曲线

力的增大主要是由雨水渗入使改良土含水率增加、湿密度增大引起,同时雨水入渗导致膨胀土产生的膨胀力也使土压力增大。土压力的平均变化速率随着深度的增加而降低,这说明大气对石灰改良膨胀土路堤的影响具有局限性,测点越靠近路堤表面,受大气影响越剧烈。经三次干湿循环后,土压力在埋深5 cm处仅增大19.2 kPa,变幅值处较10 cm和15 cm处两个深度小,其原因主要是该处的土体离表面较近,受气候改变影响最大,降雨渗入的水在加热条件下容易被蒸发,又因土体厚度较小,膨胀力较小,故其土压力变化幅度不大;10 cm处土压力增大38.9 kPa,增幅为最大,其主要原因是雨水进入土体内部后,在蒸发阶段不能完全被蒸发,导致坡体的湿密度和土体重度增大,且雨水进入土体导致其膨胀力增大。15 cm处土压力的增幅为36.4 kPa,增幅大于5 cm处而小于10 cm,这是由于该处的土体受大气影响较前其他两处小,膨胀力影响小,但又因有一定雨水渗入且不易被蒸发而使得其湿密度和土体重度增加。

### 2.3 吸力的变化

三次干湿循环中,不同深度处吸力随时间变化曲线如图4所示。

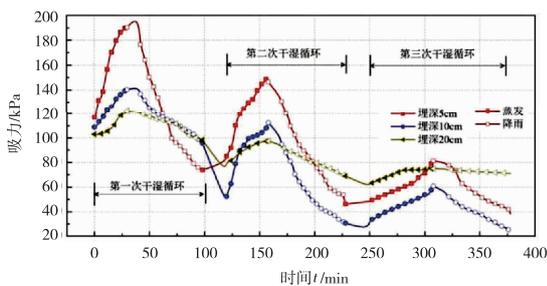


图4 不同深度吸力时程曲线

从图4可知,吸力在蒸发条件下随时间而增加,在降雨条件下随时间而降低。三个深度处吸力的起始值相差不大,这说明试验前路堤内部含水率分布较为均

匀。无论是蒸发阶段还是降雨阶段,吸力变化幅度随深度的增加而减小,5 cm处吸力的变化幅值和变化速率均比10 cm、20 cm处大,说明埋深越浅,受大气影响越大。吸力平均变化速率在第三次干湿循环时发生骤降,说明石灰改良膨胀土的特性变化主要发生在前两次干湿循环,而第三次干湿循环试验后,土体强度趋于稳定。上一次降雨结束到下一次蒸发开始时,5 cm处吸力均有所增加,而埋深10 cm、20 cm处吸力值却降低,这主要是因为5 cm处受大气影响较大,当停止降雨时,其土体开始蒸发,使含水率降低、吸力值增大,且由于降雨入渗具有滞后性,当停止降雨后,表层雨水继续往路堤内部渗入,使得10 cm、20 cm处的含水率继续增大、吸力持续降低。第三次加热蒸发试验结束后,三个深度的吸力值均比试验开始时小,这主要是在前两次干湿循环过程中,渗入路堤中的雨水不能完全被蒸发出来,使得含水率增加所引起的。试验结束后,三个深度处吸力值相差较大,20 cm处的吸力值最大,这是因为降雨入渗对其影响较小导致其吸力变化幅值较小,这说明外界条件对路堤内部影响程度随深度而减小。

### 2.4 含水率的变化

不同深度含水率随时间变化曲线如图5所示。

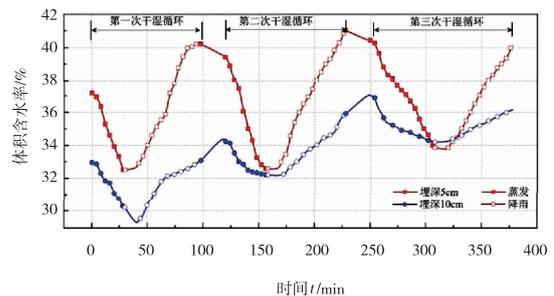


图5 不同埋深含水率时程曲线

从图5可知,含水率总是在蒸发阶段随时间而减少,降雨阶段随时间而增加。埋深5 cm处含水率时程曲线斜率均大于埋深10cm处,这说明随着深度的增加,含水率变化速率降低。在降雨阶段,两个深度含水率的平均变化速率随干湿循环次数的变化不一致。埋深5 cm处的含水率随干湿循环次数的增加而增加,而埋深10cm处的含水率随干湿循环次数的增加而减小。在上一次降雨结束到下一次蒸发开始时,5 cm处含水率会迅速降低,而埋深10 cm处含水率却先增大后再降低,这

主要是因为停止降雨时,5 cm处水分继续向下渗入,且受到外界环境的影响较大而使其土体蒸发,从而导致含水率降低,另一方面停止降雨后,表层雨水继续往路堤内部渗入,使得埋深10 cm处含水率会继续增大。

### 2.5 温度的变化

不同深度处温度随干湿循环变化曲线如图6所示。

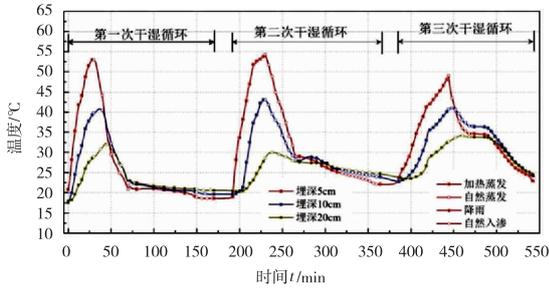


图6 不同深度温度时程曲线

从图6可知,路堤内部各处的温度变化趋势一致,均是在加热蒸发阶段升高,自然蒸发阶段降低。温度在降雨阶段的变化幅度较小,说明降雨对其影响较小。三次加热蒸发过程中,温度随深度减小,最大温度均出现

在埋深5 cm处。进入自然蒸发阶段,5 cm处温度会立即降低,这说明此处土体受外界影响较大,能较直接反应外界气象条件的变化;而10 cm和20 cm处的温度均先有所增加后才慢慢降低,20 cm处温度上升时间较10 cm处长,这是由于在土体内部存在温度梯度,高温会向低温传递,因此出现加热停止后,这两处温度仍在一定时间内出现继续升高的现象。

### 2.6 吸力与含水率的关系分析

吸力与土体持水能力相关,进而影响土体强度和变形。吸力与含水率的关系即土水特征曲线能反映非饱和和土储水能力,对其进行分析对非饱和土工程特性的研究极为重要。

在距路堤表面5 cm和10 cm处分别埋设了水势传感器探头和含水率探头,对两个测点的吸力和含水率进行监测,得到吸力值和含水率值。以含水率为纵坐标、吸力为横坐标来制作两者的关系曲线,得到曲线图如图7、图8所示,两图分别为埋深5 cm、10 cm处吸力与含水率的关系曲线。

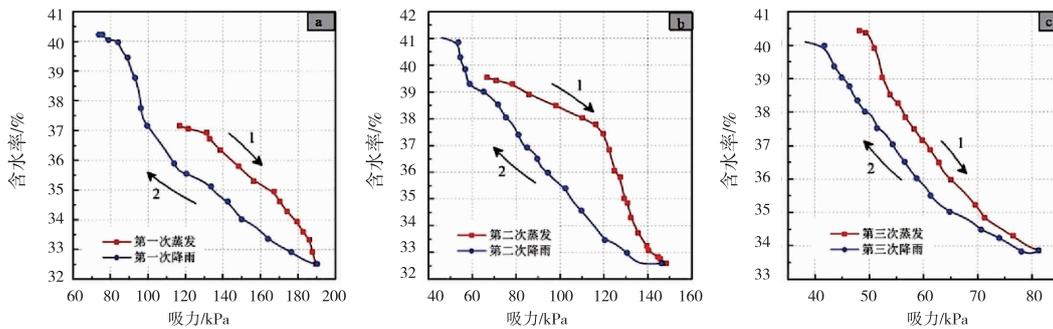


图7 埋深5 cm处吸力与含水率的关系曲线

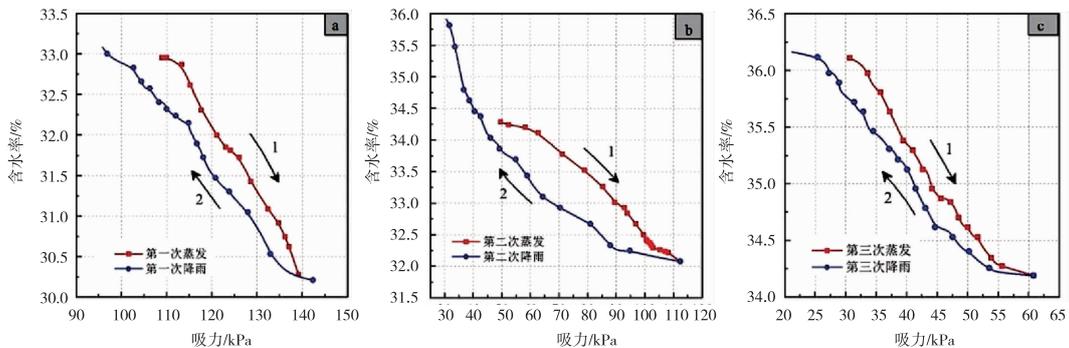


图8 埋深10 cm处吸力与水率关系曲线

从图7-图8可知,在各蒸发阶段,吸力均随含水率的降低而增加,变化速率先慢后快;在各降雨阶段,吸力

均随含水率的升高而减小,变化速率先慢后快。无论在干湿循环的哪一个阶段,吸力随含水率的变化曲线都存

在一个分界值,大于或小于这个分界值,曲线变化斜率发生变化。在一次完整的干湿循环试验中,脱湿和吸湿阶段形成的曲线不重合,表现为:相同的含水率对应不同的吸力;同一个吸力对应不同含水率,两者之间出现了较大的滞回圈,其主要原因是当土体从吸湿过程中的某一点开始脱湿,或者从脱湿过程中的某一点开始吸湿时,石灰改良膨胀土含水率与吸力的关系曲线将从这一点开始发生变化,重新形成新的关系曲线。在干湿循环的各个阶段形成的滞回圈大小不同,随着干湿循环次数的增加滞回圈逐渐减小,其主要原因是膨胀土的结构排列随着干湿循环次数的增加趋于稳定。

### 3 结 论

以南宁铁路枢纽动车运用所的膨胀土高速铁路路堤为研究对象,对气候影响下石灰改良膨胀土路堤的工程特性进行研究。试验以现场路堤填筑方法和工程处治技术为基础,采用现场膨胀土为模拟材料,运用相似原理,设计和制作石灰改良膨胀土路堤室内土工离心试验模型,研究改良土路堤在蒸发-降雨形成的干湿循环条件下的工程特性,结论如下:

(1)第一次干湿循环后,坡面并没有出现明显变形;第二次蒸发结束时,出现土体与有机玻璃脱离的现象,且在坡面上出现了较少的细小裂缝。第二次降雨后,裂缝消失;第三次蒸发结束后,坡面出现了贯通性较好的长裂缝,但开口宽度较小,说明经过三次干湿循环后,路堤边坡并没有发生明显变形破坏。

(2)在三次干湿循环过程中,石灰改良膨胀土路堤的土压力出现反复的增、减,在加热蒸发阶段随时间减小,降雨入渗阶段随时间增大。

(3)石灰改良膨胀土路堤的吸力在加热蒸发阶段随时间增大,在降雨入渗阶段随时间减小。同一深度的吸力变化幅度随干湿循环次数的增加而减小,说明在反复的干湿循环条件下膨胀土主要特性发生衰减。不同深度的吸力变化幅度随深度的增加而减小。

(4)含水率在蒸发阶段随时间减少,降雨阶段随时间增加、渐近饱和。埋深越浅,含水率的变化幅度越大。5 cm处含水率的变化受大气影响较大。受雨水入渗时效性和大气影响有限性的影响,使得降雨开始前期,10 cm处

含水率仍会继续降低,直至浸润线达到后,含水率才逐渐增大。第三次蒸发结束时,10 cm处的含水率较初始值大,说明在雨时渗入路堤内部的雨水不会被完全蒸发。

(5)温度在加热蒸发阶段变化较大,降雨对温度的影响不大。不同深度的温度在加热蒸发阶段迅速增大。而停止加热后,10 cm、20 cm处的温度先继续增大后再开始下降。

(6)吸力在蒸发阶段随含水率的降低而增加,变化率先慢后快;在降雨阶段随含水率的升高而减小,变化率先慢后快。在一次完整的干湿循环试验中,吸力与含水率的关系曲线在脱湿和吸湿阶段不重合,表现为相同的含水率对应不同的吸力,同一个吸力对应不同含水率,两者之间出现了较大的滞回圈。滞回圈大小在各阶段不同,随着干湿循环次数的增加而逐渐减小。

### 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.
- [2] 石坚,陈宝义,刘大军.高速公路路基膨胀土填料改性处理及应用[J].吉林地质,2002,21(4):64-68.
- [3] 汪明武,李健,徐鹏,等.膨胀土与石灰改良膨胀土胀缩性的云模型评价[J].东南大学学报:自然科学版,2014,44(2):396-400.
- [4] 张小平,施斌,陆现彩.石灰改良膨胀土微孔结构试验研究[J].岩土工程学报,2003,25(6):761-763.
- [5] 李朝辉,程谦恭,王艳涛,等.干湿循环下石灰改良膨胀土离心模型试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(4):111-117.
- [6] 李星,程谦恭,张金存,等.干湿循环下高速铁路基水泥改良膨胀土动力特性试验研究[J].铁道建筑,2016(6):99-103.
- [7] 汪明武,秦帅,李健,等.合肥石灰改良膨胀土的非饱和和强度试验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(s2):4233-4238.
- [8] 王艳涛,程谦恭,王小芳,等.石灰改良膨胀土高速铁路离心模型对比试验研究[J].工业建筑,2017,47(7):96-101.
- [9] 王悦.客运专线黄土路基填料石灰改良试验研究[J].四川理工学院学报:自然科学版,2012,25(6):57-60.

- [10] 郑桂兰.掺加石灰处理膨胀土做路基填土的应用[J].山东交通科技,2002(2):46-47.
- [11] 谢长征,吴巍.石灰改良膨胀土强度影响因素研究[J].路基工程,2017(2):106-109.
- [12] 郭志勇.膨胀土改性试验及动力特性[J].长安大学学报:自然科学版,2003,23(4):18-21.
- [13] 崔伟,李华鑫,穆乃敏.石灰改性膨胀土工程性质的试验研究[J].岩土力学,2003,24(4):606-609.
- [14] AL-MHAIDIB A I,AL-SHAMRANI M A.Swelling characteristics of lime-treated expansive soils[J].South Asian Geotechnical Society,1996,27(2):37-53.
- [15] TONOZ M,GOKCEOGLU C,ULUSAY R.A laboratory-scale experimental investigation on the performance of lime columns in expansive Ankara (Turkey) Clay[J].Bulletin of Engineering Geology & the Environment,2003,62(2):91-106.
- [16] GUNAY Y,SARI D,CETIN M,et al.Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil[J].Building & Environment,2007,42(2):681-688.
- [17] RAO S M,REDDY B V V,MUTTHARAM M.The impact of cyclic wetting and drying on the swelling behaviour of stabilized expansive soils[J].Engineering Geology,2001,60(1):223-233.
- [18] 陈爱军,张家生,刘君.石灰改良膨胀土无侧限抗压强度试验[J].桂林理工大学学报,2011,31(1):91-95.
- [19] 周葆春,孔令伟,郭爱国.石灰改良膨胀土的应力-应变-强度特征与本构描述[J].岩土力学,2012,33(4):999-1005.
- [20] 阮志新,蓝日彦,陈宏飞.石灰改良膨胀土填筑路基的施工工艺及质量控制[J].中外公路,2012,32(2):8-11.

## Study on the Engineering Mechanical Properties of Lime-modified Expansive Soil Under the Wetting-drying Cycles

WANG Xiaofang<sup>1</sup>, CHENG Qiangong<sup>2</sup>, LI Jun<sup>1,3</sup>, LIU Wenfang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China; 2. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Sichuan Province University Key Laboratory of Bridge Non-destruction Detecting and Engineering Computing, Zigong 643000, China)

**Abstract:** It is of great significance to study the engineering characteristics of lime-modified expansive soil under dry and wet circulation. Taking the lime-modified expansive soil embankment of Guangxi Nanning Railway Hub Station as the research object, based on the laboratory centrifuge model experimental instrument, the rainfall heating system is designed, and through three dry and wet cycle tests, the variation law of soil pressure, suction, moisture content and temperature during dry and wet circulation of embankment model is analyzed. The research results are shown as follows: (1) After three dry and wet cycles, there is no obvious deformation and failure of embankment slope. (2) In the heating evaporation stage, the earth pressure decreased with time, while the suction increased. At the stage of rainfall infiltration, the earth pressure increased with time, while the suction decreased. (3) The moisture content decreased with time in evaporation stage and increased in rainfall stage; The shallower the buried depth, the larger the variation range of water content is. (4) The temperature changed greatly in the stage of heating and evaporation, but rainfall has little effect on it. (5) The soil-water characteristic curve showed that the suction increased with the decrease of water content in evaporation stage and decreased with the increase of it in rainfall stage. The characteristic curves of soil-water in the two stages of dehumidification and moisture absorption did not coincide.

**Key words:** lime-modified expansive soil; engineering mechanical properties; centrifugal model test; wetting-drying cycles