

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.04.17

干湿循环下石灰改良膨胀土离心模型试验研究

李朝辉¹,程谦恭^{2,3},王艳涛³,王小芳⁴,蓝康文³,郭强⁵

- (1. 中铁二院工程集团有限责任公司,四川 成都 610031;2. 西南交通大学高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室,四川 成都 610031;3. 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川 成都 610031;4. 四川理工大学土木工程学院,四川 自贡 643000;
5. 河北建筑工程学院土木工程学院,河北 张家口 075000)

摘要:为研究南宁石灰改良膨胀土高速铁路堤在干湿循环作用下的工程特性,运用相似原理,以室内离心模型试验为主要手段,对路堤模型进行三次干湿循环试验,探究土压力、吸力、含水率、温度等随时间、深度及干湿循环次数变化的规律。研究表明:在离心模型试验中,自行推导建立的蒸发相似关系对蒸发时间和强度的控制适用可行,效果良好;路堤边坡变形与含水率变化密切相关,蒸发过程中产生少量裂缝,最大宽度不足2 mm,降雨过程裂缝消失;三次干湿循环后路堤整体变形不明显;土压力、吸力、含水率、温度随时间和深度等具有明显的变化规律,随深度增加大气影响减弱,试验测得其影响深度为8.0 m。研究结果可为现场石灰改良膨胀土高速铁路堤施工提供一定参考,具有良好的工程应用价值。

关键词:干湿循环;蒸发相似关系;离心试验;改良膨胀土

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)04-0111-07

A centrifugal model test study of lime-improved expansive soil under drying and wetting circles

LI Zhaohui¹, CHENG Qiangong^{2,3}, WANG Yantao³, WANG Xiaofang⁴, LAN Kangwen³, GUO Qiang⁵

- (1. China Railway Eryuan Engineering Group, Co Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology for High-Speed Railway Safety, Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 4. School of Civil Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong, Sichuan 643000, China; 5. School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou, Hebei 075000, China)

Abstract: In order to study the engineering properties of the expansive soil improved with lime of the Nanning high-speed railway embankment under drying and wetting circles, three times of centrifuge model tests under drying and wetting circles were carried out on the embankment model based on the similarity principle, and the effects of time, depth as well as drying and wetting circles on the variations of earth pressure, suction, moisture content and temperature were explored. The research results show that the established similarity relationship of evaporation is well feasible to the evaporation time and the intensity control during the centrifugal model test. The deformation of the embankment slope is closely related to the moisture content. A few cracks occurred in the process of evaporation with the maximal width of less than 2 mm, and the cracks

收稿日期: 2016-11-07; 修订日期: 2017-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41530639, 41372292)

第一作者: 李朝辉(1980-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地质灾害防治与工程方面研究。E-mail: zhori@qq.com

通讯作者: 程谦恭(1962-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质工程与岩土工程方面的研究。

E-mail: chengqiangong@home.swjtu.edu.cn

disappeared during the rainfall process. After three times of drying and wetting circles, the entire deformation was not obvious. The earth pressure, suction, moisture content and temperature show obvious changes with time and depth. The influence of the atmosphere decreases with the increasing depth, and the effect depth is 8.0 m. The results of this study can provide some suggestions for high railway embankment construction with lime-improved expansive soil. It is of certain engineering application value.

Keywords: drying and wetting circles; evaporation similarity relation; centrifugal test; improved expansive soil

膨胀土是一种典型非饱和土,主要由强亲水性矿物蒙脱石、伊利石、高岭石组成,裂隙多^[1],湿胀干缩特性明显,工程性质极差。

在导致膨胀土工程性质不良的众多因素中,气候变化作为其中之一,为现阶段工程界一研究热点。国内外学者对膨胀土在干湿循环条件下的工程特性进行了深入研究:Ng 等^[2]、孔令伟等^[3]通过现场试验分析了气候变化对膨胀土边坡的影响;Ahmed 等^[4]对膨胀土在干湿循环条件下的膨胀潜势、胀缩疲劳进行试验研究;肖杰等^[5]、黄震等^[6]研究了干湿循环条件下膨胀土的抗剪强度特征。这些研究均以常规干湿循环实验为主要手段,依托一定量的现场监测数据,但对膨胀土体内部的工程特性规律反应不全面,对工程实践的指导作用有待进一步研究验证。

离心模型试验周期短,成本低,受外界条件影响小,对试验参量控制度高,广泛应用于膨胀土研究中。张敏等^[7]、钱纪芸等^[8]设计了满足离心试验特殊要求的降雨模拟系统,通过离心模型试验来模拟降雨条件下边坡破坏;王国利等^[9]、杨果林等^[10]研究了边坡土体离心模型试验中的蒸发问题。试验都取得了一定成果,但研究中土体的变形和破坏均在 1 g 条件下完成,未全面考虑干湿循环边界条件特征,忽略了离心加速度对土体工程特性的影响。

现阶段,国家高铁飞速发展,而高速铁路堤设计中对土压力、含水率、吸力和温度等均要求十分严格。国内对离心机技术研究起步较晚,依托这一技术在高速铁路堤设计方面的研究尚存不足。故采用这一技术研究改良土高速铁路堤在干湿循环作用下的工程特性变得十分迫切,具有良好的工程实践应用价值。本文以南宁膨胀土高速铁路堤为研究对象,以室内离心模型试验为研究手段,对石灰改良膨胀土路堤大气影响下的工程特性进行研究。

1 干湿循环系统

1.1 蒸发—降雨相似比尺

离心机模拟技术具有“缩时”与“缩尺”效应,利用离心机产生的 N 倍重力加速度,达到模型与原型重力

完全相等,保证模型和原型的应力应变相同、变形相似,具备配套的相似比尺关系。

降雨相似比尺:基于文[11~12],得到改进的一维流体质量连续方程为:

$$\frac{1}{\rho_w} \cdot D_v \cdot \frac{\partial P_v}{\partial z} + \frac{1}{\rho_w g} \cdot k \cdot \frac{\partial P}{\partial z} + q = \lambda \cdot z \cdot \frac{\partial P}{\partial t} \quad (1)$$

式中: P ——总压力/kPa;

P_v ——湿土蒸汽压/kPa;

ρ_w ——水密度/($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$);

D_v ——蒸气消散系数/($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{kN}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$);

g ——重力加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

k ——渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

q ——边界流量/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

t ——时间/s;

λ ——土水特征曲线的斜率/ kPa^{-1} ;

z ——某点距土表面距离/m。

假定只有在加热条件下产生蒸发,且土体接收的能量完全用于土体蒸发、液体渗流以及土体温度升高的消耗。则蒸发条件下的一维流体质量连续方程和一维热传导方程分别为:

$$q_z = \frac{1}{\rho_w} \cdot D_v \cdot \frac{\partial P_v}{\partial z} = \lambda \cdot z \cdot \frac{\partial P}{\partial t_z} \quad (2)$$

$$q_t - L_v D_v \frac{\partial P_v}{\partial z} - k_t \frac{\partial P}{\partial z} = z \lambda_t \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

式中: q_z ——蒸发强度边界热流量/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

q_t ——加热强度边界热流量/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$);

L_v ——水的汽化潜热/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$);

k_t ——土体的导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

λ_t ——体积比热/($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

T ——温度/ $^\circ\text{C}$;

其他符号意义同前。

对式(2)和(3)分别运用量纲分析原理,并由相似原理得蒸发强度、蒸发历时的相似比尺:

$$q_{zr} = N, t_{zr} = N^{-2}; T_r/t_r = N^2, q_{tr} = N \quad (4)$$

式中: q_{zr} ——蒸发强度相似比尺;

q_{tr} ——加热强度相似比尺;

t_{zt} ——蒸发历时相似比尺；
 T_r ——相似准数；
 t_r ——加热历时的相似比尺；
 N ——相似比尺因子。

降雨相似比尺：根据文[13~14]，该研究中降雨强度 q 和降雨历时 t 的相似比尺取：

$$q_m/q_p = N, t_m/t_p = N^{-2} \tag{5}$$

主要物理量的相似比尺关系见表 1。

表 1 离心模型试验的相似比尺因子

Table 1 Similar scale factor of the centrifugal model test

模型量	线性尺度 L_m	面积 A_m	质量 m_m	力 F_m	能量 E_m	应力 δ_m	应变 ε_m	加速度 g_m	密度 ρ_m	渗透系数 k_m	温度 T_m	降雨强度 q_{jm}	时间 t_m	蒸发强度 q_{zm}	加热强度 q_{tm}
Ng 比尺	N^{-1}	N^{-2}	N^{-3}	N^{-2}	N^{-3}	1	1	N	1	N	1	N	N^{-2}	N	N
原型量	NL_m	N^2A_m	N^3m_m	N^2F_m	N^3E_m	δ_m	ε_m	$N^{-1}g_m$	ρ_m	$N^{-1}k_m$	T_m	$N^{-1}q_{jm}$	N^2t_m	$N^{-1}q_{zm}$	$N^{-1}q_{tm}$

1.2 干湿循环系统设计

基于前述建立的相似关系，自行设计一套干湿循环装置。其中降雨系统(图 1)主要由水箱、降雨器和坡面处理系统三部分组成，其工作原理为：在离心机运行过程中，水箱向降雨器注水，压力迫使水流通过土工布均匀降至边坡表面。加热系统主要采用带温控的硅胶加热板，其工作原理是通过温控开关来调节硅胶加热板的温度，从而实现对蒸发过程中加热强度的控制。

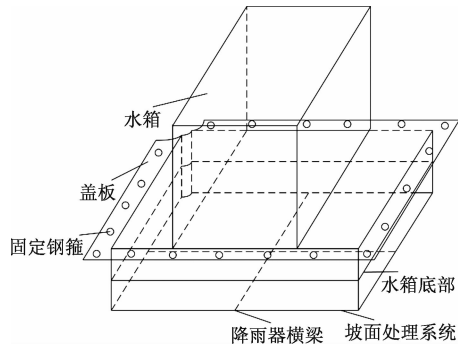


图 1 降雨系统设计图

Fig. 1 Design of rainfall system

2 试验方法及方案

试验土样取自南宁高铁路堤膨胀土边坡现场，基

本物理力学参数见表 2，由文[15]判定该土属于弱膨胀土。

(1)模型规格：模型箱尺寸为 0.8 m×0.7 m×0.7 m，模型相似比尺为 1:40。路堤地基土层厚度为 100 mm，长度为 765 mm，路堤填筑高度为 300 mm(图 2)。

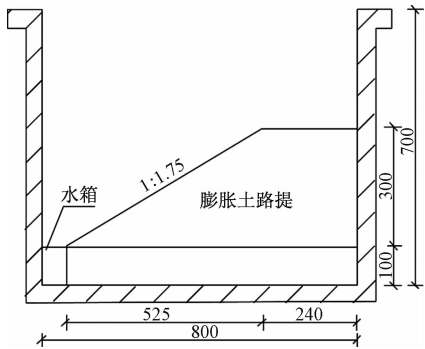


图 2 试验模型立面图(单位:mm)

Fig. 2 Elevation model test(mm)

(2)模型制备：将原状膨胀土样翻晒、夯碎、烘干后，过 10 号筛(直径 2 mm)，量测烘干土和石灰的含水率；按 5% 的掺灰比配置石灰改良膨胀土，并按 21% 的含水率对其进行配水，室外闷土 24 h 以上；采用分层填筑，控制压实厚度为 5 cm，对各层土体表面刮毛，逐层压实，直至模型填筑高度；按 1:1.75 进行削坡。

表 2 土样基本物理力学参数

Table 2 Basic physical and mechanical parameters of soil samples

比重 G_s	天然含水率 $e/\%$	最优含水率 $e_0/\%$	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	最大干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	液限 $e_L/\%$	塑限 $e_p/\%$	塑性指数 I_p	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$
2.74	20.76	16	2.06	1.79	38.52	17.89	20.63	54.1

(3)监测仪器布设如图 3 所示：编号 TP1—TP6 处理设 LY-350 型应变式微型土压力盒，其中 TP1—TP3 号监测距路堤斜坡面分别为 5,10,15 cm 处的竖向土压力；TP4—TP6 号监测路堤顶面向下竖向埋深分别为 20,10,5 cm 处的侧向土压力。编号

XP1—XP3 处理设 MPS-2 电介质水势传感器，监测吸力和温度(5,10,20 cm)，使用时要在周围包裹湿土；编号 TT1—TT2 处理设 EC-5 土壤水分传感器，监测含水率(5,10 cm)；采用 Em-50 数据采集仪采集数据。

面,受大气影响越剧烈。试验后,改良土含水率减小,湿密度、重度降低,随深度增加,竖向土压力变幅递增;而随降雨入渗作用增强,改良土的含水率和湿密度均呈递增趋势,竖向土压力增加,膨胀力影响效果进一步加剧。

3.2.2 侧向土压力监测结果分析

建立侧向土压力、深度时程曲线,见图6。

同一深度处,侧向土压力随蒸发时间增大而降低,随降雨时间增大而增大,各阶段的变化速率均先快后慢。随干湿循环次数增加,侧向土压力总体增加,但增幅却不断减小,变化趋于稳定,这表明干湿循环次数对改良土影响具有局限性。而随深度增加,侧向土压力的变化速率不断降低。这表明改良土路堤侧向土压力受气候影响减弱,反映出大气对改良土具有一定的深度影响范围。

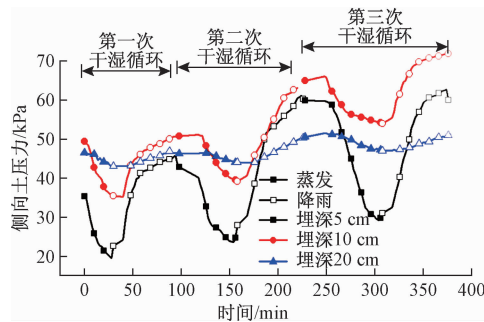


图6 侧向土压力、深度时程变化关系曲线

Fig. 6 Schedule curve of the lateral earth pressure and depth

3.3 吸力监测结果分析

建立吸力、深度时程变化曲线,见图7。

同一深度处,改良土吸力随蒸发时间增大而增大,随降雨时间增大而减小;随干湿循环次数增加,吸力变幅均递减。这表明反复的干湿循环作用使膨胀土的强度发生衰减。不同深度处,吸力起始值相差不大,反映出膨胀土路堤内含水均匀;每次干湿循环过程中,5 cm处吸力变幅、变化速率均较10,20 cm处大,这说明吸力受大气影响随深度减弱。三次干湿循环后,吸力变化速率发生骤减,反映出改良土的特性变化主要集中在前两次干湿循环。试验中,5 cm处吸力值有所增加,而埋深10,20 cm处吸力值却不断降低,这主要是5 cm处埋深浅,水分易于蒸发,含水率降低导致吸力增大;而由于降雨入渗的滞后性,深部路堤吸力降低。试验后,三个深度处吸力值相差较大,20 cm处吸力值最大,说明大气影响随深度增加而减弱,即反复的干湿循环作用具有一定深度影响范围,试验测得其影响深度为8.0 m。

3.4 含水率监测结果分析

建立含水率、深度时程曲线,见图8。

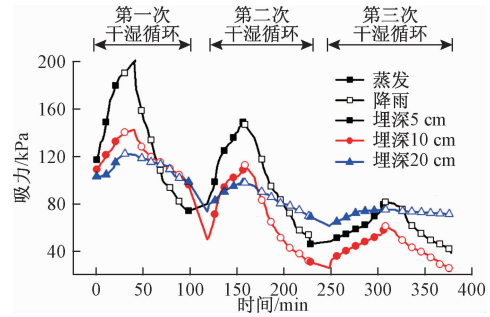


图7 吸力、深度时程变化关系曲线

Fig. 7 Schedule curve of the suction and depth

同一深度处,含水率总在蒸发阶段减小,降雨阶段增加;随干湿循环次数增加,含水率变幅和平均变化速率均减小;三次干湿循环后,含水率整体上升,说明路堤一定深度处,入渗的雨水并未完全蒸发。而随深度增加,含水率受大气影响减弱,变化速率降低;降雨阶段,埋深5 cm处含水率不断增加,10 cm处含水率却持续减小;蒸发阶段,5 cm处含水率会迅速降低,10 cm处含水率却先增大后降低。这是因为5 cm处水分会继续下渗、蒸发,深部土体含水率降低;由于降雨入渗的滞后性,埋深10 cm处含水率会持续增大。

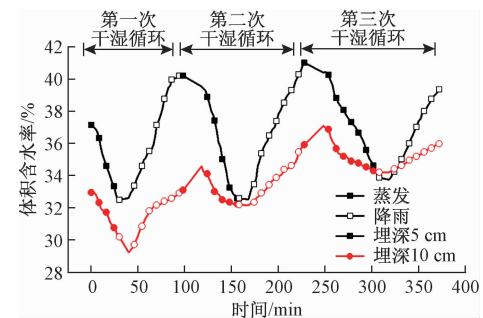


图8 含水率、深度时程变化关系曲线

Fig. 8 Schedule curve of moisture content and depth

3.5 温度监测结果分析

建立温度、深度时程曲线,见图9。

同一深度处温度均在加热阶段升高,自然蒸发阶段降低。加热对温度影响较大,在此阶段温度高达54℃;降雨对温度影响较小,在此阶段温度变幅仅1~2℃。加热蒸发过程中,温度均随深度增加而减小,其峰值都出现在5 cm处;自然蒸发阶段,由于浅部土体与大气间热量交换剧烈,外界对其影响较大,温度下降迅速。而由于深部体导热率较小,温度传递速率趋缓,10,20 cm处温度均先增加后降低,且20 cm处温度上升时间较10 cm处长,表现出显著的降温滞后现象。

3.6 土压力与含水率关系分析

建立土压力、含水率曲线,见图10。

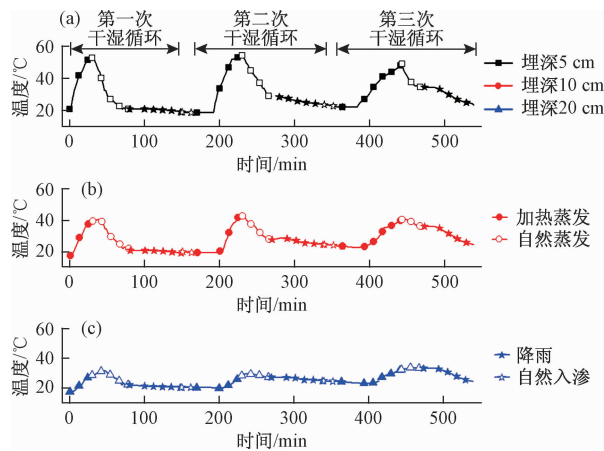


图9 温度、深度时程变化关系曲线

Fig. 9 Schedule curve of temperature and depth

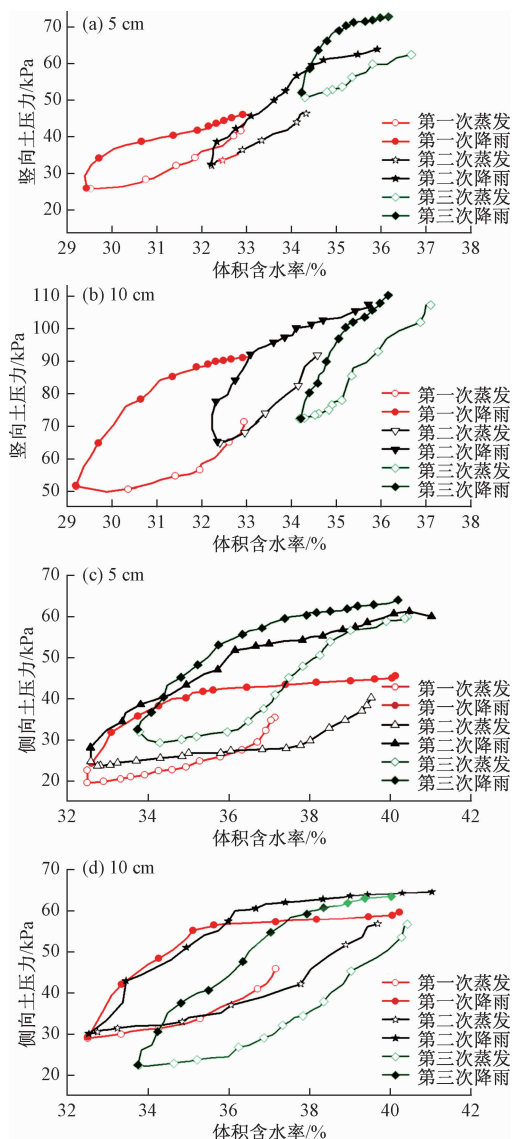


图10 5 cm、10 cm处土压力随含水率变化关系曲线

Fig. 10 Relationship of the earth pressure with moisture content in the places of 5 and 10 cm

同一深度处,土压力均随含水率降低而减小,随含水率升高而增大;其变化速率均先快后慢。随干湿循环次数增加,其变幅和变化速率均递减,这表明反复的干湿循环作用使改良土强度降低。不同深度处曲线的脱湿和吸湿过程不重合,存在较大差异,这是因为降雨引起含水率增加,滋生膨胀力,促使土压力增加。这表明改良土路堤中土压力并非仅由传统土压力构成,而是传统土压力与膨胀力的综合作用。

3.7 吸力与含水率的关系

建立吸力、含水率曲线,如图11。

蒸发阶段,同一深度处吸力随含水率增加而降低,变化速率均先慢后快;降雨阶段,吸力随含水率升高而减小,变化速率亦是先慢后快;曲线存在明显滞回圈,且随干湿循环次数增加,滞回圈不断减小。这是因为干湿循环作用使膨胀土颗粒结构排列趋于稳定,表明膨胀土吸力随含水率变化的不稳定性,它与土体含水率的变化路径密切相关。不同深度处吸力随含水率的变化曲线均存在一界限含水率,如第二次干湿循环中,埋深5 cm处土体界限含水率为38%,10 cm处为34.1%。一次完整的干湿循环中,脱湿和吸湿过程存在明显差异,主要表现为两曲线不重合,存在较大滞回圈,具有显著的水力滞后性。这是由于当吸湿和脱湿过程在土体中交替出现时,改良土吸力与含水率变化关系曲线从该点发生明显突变,以该点重新形成新曲线,依次形成典型滞回圈。

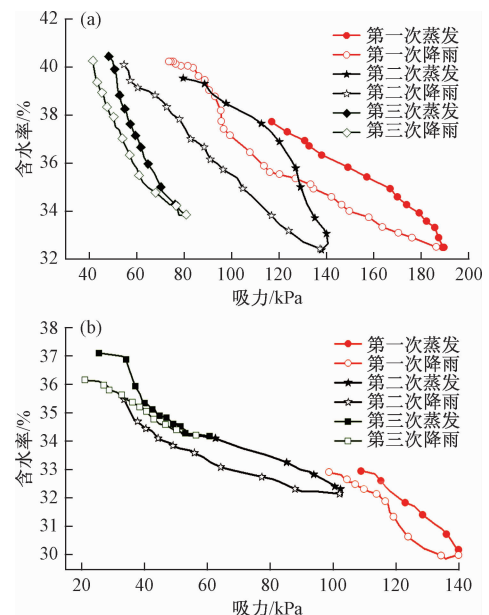


图11 5 cm(a)、10 cm(b)处吸力随含水率变化关系曲线

Fig. 11 Curve of suction with moisture content in the places of 5 cm (a) and 10 cm (b)

4 结论

(1) 基于自行推导的蒸发相似关系, 由率定试验得加热装置的加热强度为 0.13 mm/min 。作为“小结构试验”, 尽管存在微小误差, 但对于研究改良土路堤在干湿循环条件下工程特性的演变规律影响甚小, 结果表明用此加热强度来控制离心试验中蒸发时间和蒸发强度效果良好。

(2) 路堤边坡变形极易受土体含水率变化的影响; 在膨胀土中掺入适量石灰进行土性改良, 有助于减小坡体胀缩变形, 提高其稳定性。

(3) 在干湿循环过程中, 试验监测的土压力是传统土压力与膨胀力的综合作用, 大气对石灰改良土影响随深度增加而减弱, 具有一定深度范围, 试验测的为 8.0 m ; 由于降雨入渗的滞后性, 土压力与含水率关系曲线不重合, 反映出膨胀力作用的重要性; 改良土路堤的土水特征曲线不重合, 存在较大滞回圈, 表明吸力与土体含水率变化路径密切相关, 反映出二者间变化的不稳定性。

(4) 加热蒸发对温度影响较大, 在此阶段土体最高温度达 54°C ; 降雨对温度影响较小, 在此阶段温度变幅仅 $1\sim 2^\circ\text{C}$ 。在干湿循环条件下, 温度传导具有时效性, 浅部路堤温度响应敏感, 上升迅速, 而深部路堤温度响应具有滞后性。

试验主要以南宁弱膨胀土作为研究对象, 成果显著, 但其结果对其他地区的膨胀土是否适用尚需进一步的研究。

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 T H. Expansive soil problems in engineering construction [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1997. (in Chinese)]
- [2] NG W W C, ZHAN L T, FREDLUND D G. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall in filtration [J]. Géotechnique, 2003, 53(2): 143 - 157.
- [3] 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 L W, CHEN J B, GUO A G, et al. Field response tests on expansive soil slopes under atmosphere [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1065 - 1073. (in Chinese)]
- [4] AHMED, ALY. Evaluation of drying and wetting cycles with soil cushion to mitigate the potential of expansive soil in upper Egypt [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 15(14): 1 - 11.
- [5] 肖杰, 杨和平, 王兴正, 等. 南宁外环膨胀土抗剪强度非线性特征及影响因素分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(10): 1 - 8. [XIAO J, YANG H P, WANG X Z, et al. The shear strength nonlinear characteristics and influence factors analysis of Nanning outerring expansive soil [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(10): 1 - 8. (in Chinese)]
- [6] 黄震, 陈斌. 改良膨胀土胀缩裂隙及与抗剪强度的关系研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 87 - 93. [HUANG Z, CHEN C. The relationship research between swell-shrink fissure and shear strength of improved expansive soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 87 - 93. (in Chinese)]
- [7] 张敏, 吴宏伟. 边坡离心模型试验中的降雨模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 53 - 57. [ZHANG M, WU H W. The centrifugal model test of slope rainfall simulation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Sup): 53 - 57. (in Chinese)]
- [8] 钱纪芸, 张嘎, 张建民. 降雨条件下土坡变形机制的离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 398 - 416. [QIAN J Y, ZHANG G, ZHANG J M. The centrifugal model test study on slope deformation mechanism under the condition of rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 398 - 416. (in Chinese)]
- [9] 王国利, 陈生水, 徐光明, 等. 干湿循环下膨胀土边坡稳定性的离心模型试验[J]. 水利水运工程学报, 2005(4): 6 - 10. [WANG G L, CHEN S S, XU G M, et al. The stability of expansive soil slope under dry-wet circulation centrifugal model test [J]. Journal of Waterway Transportation Engineering, 2005(4): 6 - 10. (in Chinese)]
- [10] 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, 32(3): 97 - 102. [YANG G L, WANG Y H. The temperature test of expansive soil roadbed under different weather conditions [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 32(3): 97 - 102. (in Chinese)]
- [11] Milly P C D. Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: A matric head-based formulation and a numerical model [J]. Water Resources Research, 1982, 18(3): 489 - 498.

(下转第123页)

- [11] 夏红春. 矿物成分对土力学特性影响的试验研究[J]. 中国煤炭, 2015(4): 56 - 61. [XIA H C. Experimental research on the effects of mineral composition on soil mechanical characteristics [J]. China Coal, 2015(4): 56 - 61. (in Chinese)]
- [12] ZHANG Z, ROMAN LT, MA W, *et al.* The freeze-thaw cycles-time analogy method for forecasting long-term frozen soil strength [J]. Measurement, 2016, 92: 483 - 488.
- [13] 张泽, 马巍, 张中琼, 等. 球形模板压入仪在冻土长期强度测试中的应用[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3516 - 3520. [ZHANG Z, MA W, ZHANG Z Q, *et al.* Application of spherical template indenter to long-term strength tests for frozen soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3 516 - 3 520. (in Chinese)]
- [14] 周泓, 张豫川, 张泽, 等. 冻融作用下冻结黄土黏聚力长期强度变化规律[J]. 岩土力学, 2014(8): 2 241 - 2 246. [ZHOU H, ZAHNG Y C, ZHANG Z, *et al.* Changing rule of long-term strength of frozen loess cohesion under impact of freeze-thaw cycle [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(8): 2 241 - 2 246. (in Chinese)]
- [15] 杨成松, 何平, 程国栋, 等. 冻融作用对土体干容重和含水量影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊2): 2 695 - 2 699. [YANG C S, HE P, CHENG G D, *et al.* Testing study on influence of freezing and thawing on dry density and water content of soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (Sup2): 2 695 - 2 699. (in Chinese)]
- [16] 许雷, 鲁洋, 宗佳敏, 等. 冻融循环下南阳膨胀土直剪试验[J]. 南水北调与水利科技, 2015(5): 922 - 925. [XU L, LU Y, ZHONG J M, *et al.* Direct shear test on expansive clay in Nanyang under freeze thaw cycles [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015(5): 922 - 925. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华

(上接第 117 页)

- [12] Wilson G W, Fredlund D G, Barbour S L. Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(2): 151 - 161.
- [13] Fugfsang L D, Oveson N K. The Application of the theory of modeling to centrifuge studies [J]. Centrifuge in Soil Mechanics, 1988.
- [14] LautP. Application of centrifugal model test in connection with studies of flow patterns of contaminated water in soil structures [J]. Geotechnique, 1975(25): 401 - 406.
- [15] TB10042—1995. 铁路工程地质膨胀土勘测规则[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995. [TB10042 - 1995. The rules of railway engineering geological survey of expansive soil [S]. Beijing: China Planning Press, 1995. (in Chinese)]
- [16] 钱纪芸, 张嘎, 张建民. 离心场中边坡降雨模拟系统的研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 838 - 842. [QIAN J Y, ZHANG G, ZHANG J M. The development and application of slope rainfall simulation system in centrifugal field [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 838 - 842. (in Chinese)]
- [17] 陈建斌, 孔令伟, 赵艳林, 等. 蒸发蒸腾作用下非饱和土的吸力和变形影响因素分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1767 - 1773. [CHEN J B, KONG L W, ZHAO Y L, *et al.* The suction and deformation influencing factors analysis of unsaturated soils under the action of evapotranspiration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1767 - 1773. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华