

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 不同龄期下石灰改良土持水特性的温度效应

靳奉雨<sup>1</sup>, 王叶娇<sup>1</sup>, 孙德安<sup>1</sup>, 曾玲玲<sup>2</sup>

(1. 上海大学 土木工程系, 上海 200444; 2. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108)

**摘要:**石灰改良是一种经济、有效的土质改良方法,在实际工程中,改良土由于长期暴露在复杂气候与环境,普遍存在长期强度衰减现象。土-水特征曲线是研究土体水分运移规律及其水力性能的重要途径。为研究温度和养护龄期对石灰改良土土-水特征曲线的影响规律,制备了未处理重塑土样和不同养护龄期(28、90 d)下的石灰改良土样,采用滤纸法测定不同温度(0~40 °C)下各土样的土-水特征曲线。结果表明:石灰改良、养护龄期和温度均影响土样的持水性能,并且这种影响会随含水率的下降而降低;温度效应随温度升高而减弱。最后,采用 VG 模型拟合土-水特征曲线,并探讨石灰改良、养护龄期和温度对于 VG 模型各项参数  $a$ 、 $n$ 、 $\theta_s$ 、 $\theta_r$  的影响。研究结果揭示了不同温度下(0~40 °C)石灰改良黄土持水特性的变化规律,为不同环境下石灰改良土水力特性的预测以及工程设计参数的选取提供依据。

**关键词:**石灰改良土;持水特性;滤纸法;温度效应;龄期

**中图分类号:** TU444      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2020)03-0024-08

## Temperature effect on the water retention curve of lime-treated soil during curing

Jin Fengyu<sup>1</sup>, Wang Yejiao<sup>1</sup>, Sun Dean<sup>1</sup>, Zeng Lingling<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, P. R. China)

**Abstract:** Lime treatment is an economical and useful soil improvement method. However, lime-treated soils in site always present a serious degradation in strength, since they are exposed to the long-term changes in climate and environment. Water retention curve is essential to study the pore water movement inside soils and their hydro-mechanical behavior. This paper investigates the influences of temperature and curing time on the water retention curve of lime-treated soil. In this test, untreated samples and lime-treated samples(28, 90 d) were statically compacted. The water retention curves of untreated and lime-treated samples were measured at different temperatures (0~40 °C). The results indicate that the water retention capacity of loess is effected by lime treatment, curing time and temperature changes. The effect decreased with the moisture content dropping. The temperature effect gradually weakens with the

**收稿日期:** 2019-12-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(41702306)

**作者简介:** 靳奉雨(1995-), 主要从事非饱和石灰土研究, E-mail: 18233162763@163.com。

王叶娇(通信作者), 博士, E-mail: yejiaowang@shu.edu.cn。

**Received:** 2019-12-24

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 41702306)

**Author brief:** Jin Fengyu (1995-), main research interest: unsaturated lime-treated soil, E-mail: 18233162763@163.com.

Wang Yejiao (corresponding author), PhD, yejiaowang@shu.edu.cn.

temperature increases. Besides, the VG model was applied to model the water retention curve of loess. And the effects of temperature and curing time on the parameters of  $a$ ,  $n$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$  are analyzed. The research results can provide useful information for engineering construction.

**Keywords:** lime-treated soil; water retention characteristic; filter paper method; temperature effect; curing time

中国西北黄土高原地区太阳辐射强,夏季炎热短促,冬季寒冷漫长,昼夜温差和季节性温差较大,存在大面积的多年冻土和季节性冻土。当温度大幅变化时,土体会产生冻胀融沉,对该地区的岩土构筑物造成一系列不容忽视的病害,如路基的不均匀沉降,严重影响道路的使用性能。为改良土体的工程性能,石灰被广泛应用于中国西北地区土质改良工程<sup>[1]</sup>。现场的石灰改良土长期暴露在复杂气候与环境中,产生明显的强度衰减现象。Le Runigo 等<sup>[2]</sup>对石灰改良粉砂土在不同浸水饱和时间(7、25、50、110 d)和水循环时间(110、200、320 d)下的强度耐久性进行了研究,结果表明,该改良土的强度耐久性与其渗透性相关,土体浸水后抗剪强度显著降低。马巍等<sup>[3]</sup>研究了冻融循环对石灰改良粉土剪切强度特性的影响,发现随冻融循环次数的增加,石灰改良粉土剪切强度逐渐衰减。在干旱、半干旱气候地区,上层土体通常处于非饱和状态。土-水特征曲线对于研究非饱和土的水力特性具有重要意义。Nguyen 等<sup>[4]</sup>通过对某路基现场测量发现,温度变化会导致基质吸力发生变化,引起土体内部水分迁移,进一步引起应力场和位移场的变化,使其工程性质发生改变。因此,有必要研究温度对改性黄土持水特性的影响。这对于不同环境下改性黄土工程力学特性的预测以及工程设计参数的选取具有重要指导意义。

目前,非饱和土持水特性的温度效应研究多集中在未改良土。王铁行等<sup>[5]</sup>测量了不同温度下(5~35 ℃)黄土的土-水特征曲线,发现温度对基质吸力的影响并不显著,且在低含水率时温度影响较大。蔡国庆等<sup>[6]</sup>基于热力学理论,结合 Van Genuchten 土-水特征曲线模型,综合考虑温度对表面张力和浸润系数的影响,建立了一种预测温度影响的土-水特征曲线模型,并将模型计算结果与试验结果进行对比,发现两者基本吻合。王协群等<sup>[7]</sup>测量了不同温度下(10~50 ℃)黄土的土-水特征曲线,发现温度对持水特性的影响随含水率降低而增大。叶为民等<sup>[8]</sup>通过蒸汽平衡法和渗析法发现,相同吸力下

GMZ 膨润土-砂混合物的含水量随温度升高而减小,但温度的影响大小取决于吸力水平。谈云志等<sup>[9]</sup>研究了不同温度下(20~40 ℃)粉土的持水特性,结果表明,温度对持水特性的影响显著,温度的影响随基质吸力增大而减小。显然,温度对非饱和土持水效应的影响机理并没有形成统一认识,还需要进行深入研究。目前的研究不仅缺少对较低温度范围内(0~10 ℃)非饱和土持水特性的变化规律的关注,而且对于改性土持水特性的温度效应关注不足。

笔者采用滤纸法测量了不同温度下石灰改良黄土的持水特性曲线,并分析了温度对不同龄期下非饱和石灰改良黄土持水特性的影响规律,为不同工程设计参数的选取提供理论依据。另外,给出了低温下(接近 0 ℃)石灰处理土持水特性的变化规律,这对于处理冻土区工程问题具有重要的实际意义。

## 1 试验

### 1.1 试验仪器及土样

试验所用土样为甘肃兰州 Q4 黄土,其基本物理指标如表 1 所示,为低液限粘土。土样先在室温下风干 2 周,然后用土壤粉碎机粉碎,取粉碎后的土样进行测试,其颗粒级配曲线和击实曲线分别如图 1 和图 2 所示。

表 1 黄土的基本物理特性

Table 1 Basic physical properties of loess in Lanzhou

比重 $G_s$	液限 $w_L$ / %	塑限 $w_p$ / %	塑性指数 $I_p$	黏粒含量 / %
2.68	27.4	15.9	11.5	20.1

试验采用生石灰对土样进行改良。根据颗粒级配曲线可知,粒径小于 0.005 mm 的颗粒累计含量为 20%。依据 Hilt 等<sup>[10]</sup>提出的最佳石灰掺量计算公式,试验采用 2% 的石灰掺量,满足最佳石灰掺量要求。依据中国公路路基设计规范<sup>[11]</sup>,土质路基压实度大于 96% 时,可基本满足各种状况下的设计要求。试验选取压实度为 98%。根据图 2 中的击实

曲线,土样的制样重量含水率取为 17%,干密度为  $1.6 \text{ g/cm}^3$ 。试验中所使用土样的信息均列于表 2。

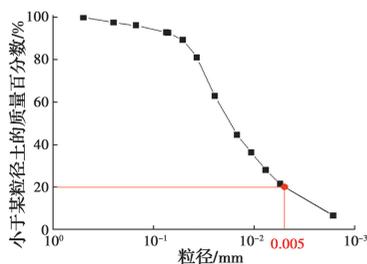
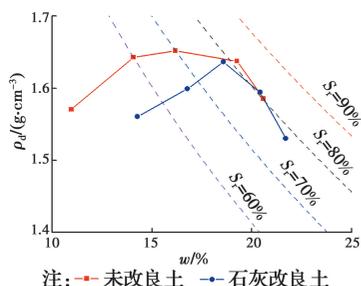


图 1 黄土颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of the loess



注:—未改良土 —石灰改良土

图 2 黄土击实曲线

Fig. 2 Compaction curve of loess

表 2 试验土样的基本信息

Table 2 Basic parameters of specimens used in the test

试样	干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	初始含 水率/%	石灰掺 量/%	养护时 间/d
未改良土	1.6	17		
养护 28 d 土样	1.6	17	2	28
养护 90 d 土样	1.6	17	2	90

采用滤纸法测定土样不同温度下的土-水特征曲线。滤纸法主要受到测试环境的温度稳定度、电子天平的精度和称量滤纸操作的快捷性的影响。试验所用仪器包括:恒温恒湿箱,温度波动  $\leq \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ;电子天平,精度为  $0.0001 \text{ g}$ ;烘箱,控制温度为  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。试验仪器如图 3 所示。



(a) 恒温恒湿箱 (b) 电子天平

图 3 试验所需仪器

Fig. 3 Experimental devices

## 1.2 试验步骤

1)称取一定质量的风干土,将干土与生石灰粉充分混合,并用喷雾器喷洒去离子水至重量含水率 17%并拌合。

2)将拌合后的土放入保鲜袋内密封保存 12 h,使土中水分分布均匀。

3)制样方法选择静态压实,并严格控制土样的最终干密度<sup>[12]</sup>。将拌合后的土装入制样模具中,用千斤顶将其压成高为 10 mm、直径为 61.8 mm 的圆饼状土样,静压 30 min,以减少卸载时的回弹。

4)土样从模具中取出后放入饱和水汽环境中,密封养护至目标龄期(28、90 d)。

5)将 Whatman No. 42 滤纸放入无盖铝盒中,在上方覆盖一张较大的非测试滤纸,以防止灰尘落在滤纸上,影响测试精度。将铝盒放入烘箱内,烘干 12 h。

6)将达到养护龄期(28、90 d)的土样取出,缓慢风干至目标含水率。

7)将土样放入保鲜盒中,并在上方覆盖塑料纱网。将烘干 12 h 的滤纸放置在塑料纱网上,扣紧保鲜盒,装入塑封袋中,放入恒温恒湿箱,并设置试验温度,为使滤纸中水分平衡,静置 7 d。

8)取出保鲜盒,按照 ASTM D5298<sup>[13]</sup>中规定的步骤测量滤纸含水率,并测量土样平衡后的实际重量含水率。

9)考虑试验过程中土样体积将发生变化,采用液体石蜡法测量土样体积,试验步骤与孙德安等<sup>[14]</sup>相同,并计算土样体积含水率。

10)利用表 3 中滤纸的率定曲线公式计算吸力值,从而得到该温度下的土-水特征曲线。

表 3 试验所用滤纸的率定曲线公式

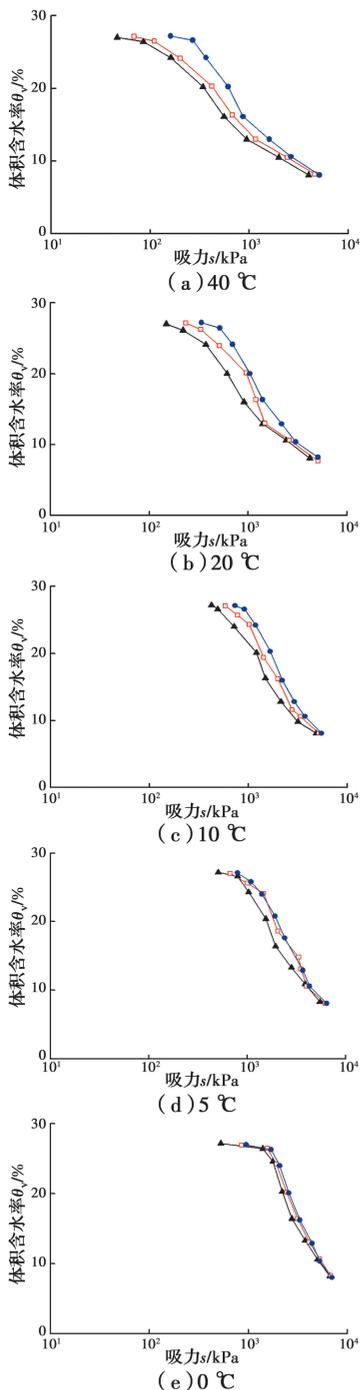
Table 3 Calibration relationships for the filter paper in suction measurement

温度 $t/^\circ\text{C}$	滤纸含水率 $w_f/\%$	吸力量率定曲线 公式 $s/\text{kPa}$
0	8.93~40.53	$\lg s = 5.30382 - 0.08481w_f$
5	9.20~37.31	$\lg s = 5.39952 - 0.09298w_f$
10	8.97~35.98	$\lg s = 5.44081 - 0.09867w_f$
20	7.97~29.79	$\lg s = 5.51401 - 0.11606w_f$
40	7.07~26.24	$\lg s = 5.50887 - 0.12543w_f$

## 2 试验结果

### 2.1 龄期对持水特性的影响

相同试验温度、不同养护龄期下,压实黄土的土-水特征曲线如图4所示。以20℃下测得的土-水特征曲线为例,在土样体积含水率从27%到8%的风干过程中,养护28d土样的土-水特征曲线



注:—▲—未改良土样 —■—养护28 d土样 —●—养护90 d土样

图4 不同养护龄期下压实黄土土-水特征曲线

Fig. 4 Water retention curves of compacted loess at different curing time

高于未改良土样的结果,说明土样在经过石灰改良并养护28d后持水能力升高。随着养护龄期的增加,吸力继续提高。当体积含水率均为27%时,未改良土样、养护28d的土样、养护90d的土样吸力分别为149、233和336 kPa。养护28d的土样和养护90d的土样吸力分别较未改良土样吸力提高了56%和125%。但当体积含水率为8%时,未改良土样、养护28d的土样、养护90d的土样吸力分别为4 201、4 707和5 110 kPa。此时,养护28d的土样、养护90d的土样吸力较未改良土样吸力的提升幅度降为12%和21%,表明压实黄土经石灰改良后,土样持水能力提高,并且持水能力随养护龄期增加而不断提高。另外,随着体积含水率降低,吸力增大,石灰改良和养护龄期的影响逐渐减弱。

### 2.2 测试温度对持水特性的影响

相同养护龄期、不同测试温度条件下,压实黄土的土-水特征曲线如图5所示。可以看到,在0℃→5℃→10℃→20℃→40℃的温度变化过程中,养护90d的土样在体积含水率为16%时对应的吸力变化路径为3 301 kPa→2 418 kPa→2 207 kPa→1 482 kPa→864 kPa,0℃下的吸力较40℃下的吸力增大了2 437 kPa,变化幅度约为73%,表明测试温度对土样的持水能力具有显著影响。随着测试温度升高,相同含水率下土样吸力逐渐降低,持水能力下降。同样在0℃→5℃→10℃→20℃→40℃的温度变化过程中,养护90d的土样在体积含水率为8%时对应的吸力变化路径为6 946 kPa→6 172 kPa→5 476 kPa→5 110 kPa→5 108 kPa,0℃下的吸力较40℃下的吸力增大了1 838 kPa,变化幅度为26%。可以看出,随着体积含水率降低,吸力增大,温度效应减弱。还可以观察到,在温度变化量相同时,初始状态相同的土样吸力变化值随温度升高而逐渐减弱,表明土样持水能力的温度效应在低温时更加显著,这与Villar等<sup>[15]</sup>的测试结果一致。

## 3 结果分析

### 3.1 龄期和测试温度对持水特性的影响

非饱和土内孔隙的大小和分布是影响土-水特征曲线的重要因素。养护过程中石灰改良土持水能力的提高可以归因于石灰改良土发生火山灰反应,产生了凝胶化合物。这些凝胶化合物会覆盖在土颗粒团聚体表面,逐渐填充团聚体间的孔隙,改变土内

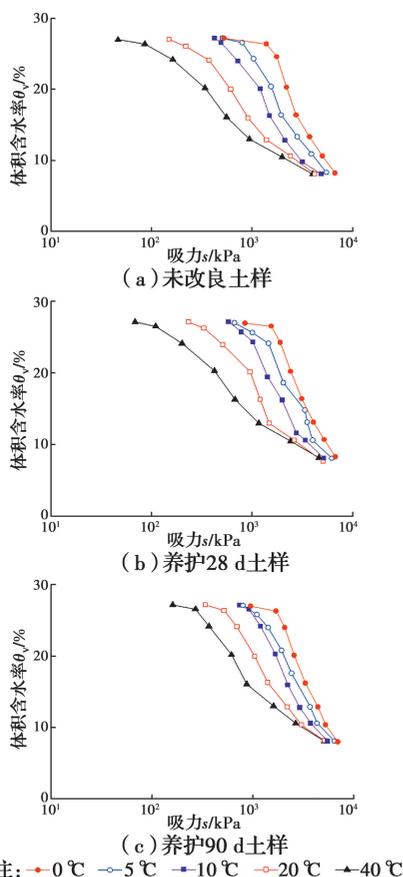


图5 不同温度下压实黄土的土-水特征曲线

Fig. 5 Water retention curves of compacted loess at different temperatures

孔隙的大小和连通性<sup>[16]</sup>。在这个过程中,某些团聚体内部孔隙的入口可能会被堵塞,增加了收缩孔和墨水瓶孔出现的可能性。随着土颗粒团聚体间孔隙逐渐减少以及孔隙间的连接口越来越狭窄,土体在去饱和过程中所需的吸力越来越高,这会导致在较高含水率时土样持水能力明显提高。但由于在团聚体内部孔隙中,火山灰反应产物较少,因此,在较低含水率时,土样持水能力提升并不明显。

火山灰反应随土样养护而持续进行。养护龄期为28 d时,石灰改良土的持水能力有一定程度的提升。随着养护龄期的增加,其持水能力不断提高。在养护时间较长的情况下,有更多的凝胶化合物产生,从而导致石灰改良土持水能力明显提高。但当温度较低时,气泡几乎未发生膨胀,孔隙水未被挤出,孔隙水大多存在于小孔隙中,去饱和过程所需的吸力较大。在这种情况下,即使孔隙结构存在一定差别,土-水特征曲线也会趋于一致<sup>[17-18]</sup>。

温度对土体持水能力的影响主要体现在温度影响毛细管内弯液面处表面张力<sup>[19-20]</sup>。随着温度的升

高,表面张力降低,相同含水率下吸力逐渐减小,土样持水能力下降。很多情况下,温度影响表面张力的观点不足以解释温度对持水特性的影响。非饱和土是由土颗粒、孔隙水和气体组成的三相混合物。因此,温度对吸力的影响还会受到孔隙气体和土颗粒表面双电层的影响。一般来说,气体具有一定的水溶性,孔隙水中将存在一定数量的封闭气泡。随着温度升高,孔隙水中的封闭气泡发生膨胀,气体体积增大,将孔隙水挤出<sup>[9]</sup>。另一方面,Hopmans等<sup>[21]</sup>发现孔隙水排出的同时,封闭气泡也会排出。随温度升高和吸力增大,土中封闭气泡体积逐渐减小,温度变化对持水曲线的影响逐渐减弱。土体孔隙中除了自由水之外,还存在一层吸附于土颗粒表面的结合水膜。双电层理论认为,土颗粒表面一般带有负电荷,这些负电荷会由吸附的阳离子进行中和,前者构成双电层的内层,后者形成双电层的外层,也就是结合水膜<sup>[22]</sup>。结合水含量会随温度升高而减少,并且趋势逐渐变缓<sup>[23]</sup>。当温度升高时,结合水分子运动加剧,当电荷之间的吸附力不足以束缚水分子时,外层的结合水就会转变为自由水,在土体干燥过程中容易被排出。随着温度进一步升高,结合水膜变薄,电荷之间的吸附力增长较快,转化为自由水排出的难度越来越大<sup>[24]</sup>。因此,随着温度升高,相同含水率对应的吸力逐渐下降,并且温度效应逐渐减弱。

### 3.2 养护龄期和测试温度对VG模型的影响

在现有的土-水特征曲线预测模型当中, Van Genuchten (VG)模型<sup>[25]</sup>是被应用最广泛的模型之一。同时,考虑到试验过程中土样体积的变化,采用体积含水率,所使用表达式为

$$\theta_v = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right)^{\frac{1-n}{n}}}$$

式中: $\theta_v$ 为体积含水率; $\theta_s$ 为饱和含水率; $\theta_r$ 为残余含水率; $s$ 为吸力值,kPa; $a$ 、 $n$ 为待定参数。

通常认为,参数 $a$ 表示土-水特征曲线中的进气值,参数 $n$ 则代表土-水特征曲线过渡段的斜率,将未改良土样、养护28 d的土样、养护90 d的土样在不同温度下测得的土-水特征曲线的数据代入VG模型中,得到不同温度下的模型参数,列于表4中。由于制样含水率在最优含水率左侧,土样的孔隙结构分布为双峰结构,土-水特征曲线主要由土颗粒集

聚体内和集聚体间孔隙控制,也会出现双峰结构。根据双峰孔隙结构分布的特征,可将土-水特征曲线分为对应集聚体间和集聚体内的两孔隙段,可利用预测模型分别进行拟合<sup>[26]</sup>。该试验依据风干过程测得的土-水特征曲线及其拟合参数很可能代表的是集聚体内孔隙段土-水特征曲线的模型参数。此时, $\theta_s$  代表的是集聚体内孔隙饱和时的含水率。

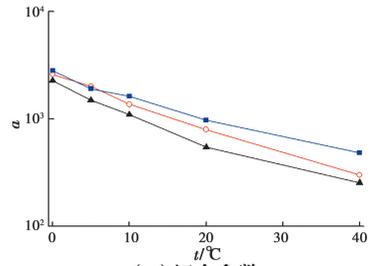
表 4 拟合参数

Table 4 Regression parameters

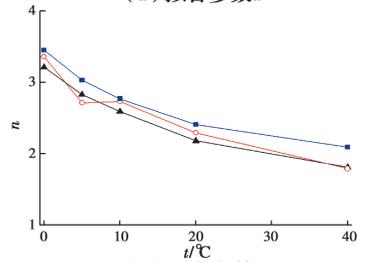
土样	温度/℃	$a$	$n$	$\theta_s/\%$	$\theta_r/\%$	$R^2$
未改良土样	40	255.0	1.81	27.62	6.25	0.999
	20	542.5	2.18	27.91	6.63	0.999
	10	1 096.6	2.59	28.06	6.43	0.996
	5	1 496.9	2.83	28.10	6.66	0.997
	0	2 266.1	3.21	27.81	6.71	0.994
养护 28 d 土样	40	299.7	1.79	27.82	6.08	0.999
	20	794.6	2.29	27.78	5.83	0.995
	10	1 364.9	2.73	28.45	5.96	0.997
	5	2 006.3	2.71	27.81	5.75	0.989
	0	2 586.0	3.36	28.01	6.37	0.995
养护 90 d 土样	40	482.5	2.09	28.64	6.10	0.996
	20	971.6	2.41	28.45	6.19	0.997
	10	1 620.6	2.77	28.86	5.60	0.999
	5	1 908.8	3.03	28.49	6.35	0.993
	0	2 802.4	3.45	28.03	6.18	0.995

拟合参数  $a, n, \theta_s, \theta_r$  随温度及养护龄期的变化趋势如图 6 所示。试验结果表明,除个别离散数据点之外,整体可以得出温度对 VG 模型参数( $\theta_s, \theta_r, a, n$ )的影响规律一致,即对于同一种土样而言,随着温度升高, $a, n$  有减小的趋势,而  $\theta_s, \theta_r$  变化较小,该结果与王铁行等<sup>[5]</sup>结论一致。另外,养护龄期对 VG 模型参数的影响为:在相同温度下,石灰改良土样与未改良土样相比,石灰改良土样的  $\theta_s, a, n$  增大, $\theta_r$  减小,并且  $\theta_s, a, n$  随养护龄期增长而增大, $\theta_r$  几乎不随龄期变化。 $\theta_s, a, n$  的变化可以归因于火山灰反应随时间持续进行,产生了更多的胶凝化合物,将土颗粒集聚体胶结起来,减小了集聚体间孔径,使小孔隙增多。同时,某些团聚体内部孔隙的入口可能被胶凝化合物堵塞,增加了收缩孔和墨水瓶孔的可能性。 $\theta_r$  的变化可能与土的比表面积变化有关。土样经石灰改良后,土颗粒发生絮凝和团聚,比表面

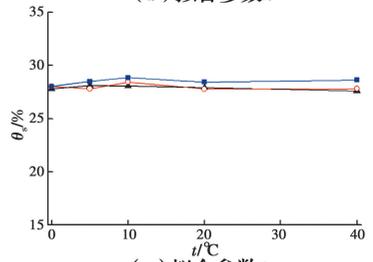
积下降<sup>[27]</sup>。这种现象主要发生在石灰改良前期,因此, $\theta_r$  在土样养护龄期超过 28 d 的情况下几乎不发生变化。



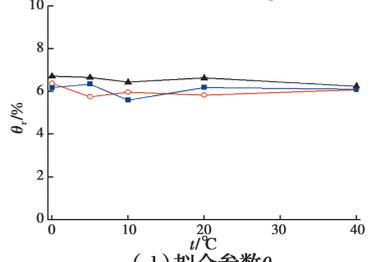
(a) 拟合参数  $a$



(b) 拟合参数  $n$



(c) 拟合参数  $\theta_s$



(d) 拟合参数  $\theta_r$

注:  $\blacktriangle$  未改良土样  $\circ$  养护 28 d 土样  $\blacksquare$  养护 90 d 土样

图 6 VG 模型参数的温度效应

Fig. 6 Temperature effects on Parameters for VG model

## 4 结论

1) 温度变化对黄土持水能力有一定影响。对于同种土样而言,土样持水能力随温度升高而下降,曲线逐渐趋于平缓,温度效应减弱。当不同土样温度和体积含水率相同时,土样持水能力随石灰改良和养护龄期增加而提高。随着体积含水率降低,吸力增大,石灰改良、养护龄期和温度变化对黄土持水能力的影响逐渐减弱。

2) VG 模型中的参数会受到石灰改良、养护龄

期和温度变化的影响。石灰改良后,  $\theta_r$  减小,  $a$  变大,  $\theta_s$ 、 $n$  变化不大。其中,  $\theta_s$ 、 $a$ 、 $n$  会随着养护龄期增长而增大。对于同种土样而言, 随温度升高,  $\theta_s$ 、 $\theta_r$  几乎不发生变化, 但  $a$ 、 $n$  都有减小的趋势。

3) 孔隙水中封闭气泡的存在和吸附结合水量的变化是影响黄土持水特性的重要原因。其中, 孔隙水中封闭气泡对持水特性的影响随体积含水率降低而减弱。

### 参考文献:

[1] 张豫川, 姚永国, 周泓. 长龄期改良黄土抗剪强度与渗透性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(Sup2): 170-176.  
ZHANG Y C, YAO Y G, ZHOU H. Experimental study of shear strength and permeability of improved loess with long age [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup2): 170-176. (in Chinese)

[2] LE RUNIGO B, FERBER V, CUI Y J, et al. Performance of lime-treated silty soil under long-term hydraulic conditions [J]. Engineering Geology, 2011, 118(1/2): 20-28.

[3] 马巍, 徐学祖, 张立新. 冻融循环对石灰粉土剪切强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 158-160.  
MA W, XU X Z, ZHANG L X. Influence of frost and thaw cycles on shear strength of lime silt [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(2): 158-160. (in Chinese)

[4] NGUYEN Q, FREDLUND D G, SAMARASEKERA L, et al. Seasonal pattern of matric suctions in highway subgrades [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(3): 267-280.

[5] 王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 1-5.  
WANG T H, LU J, YUE C K. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess considering temperature and density effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 1-5. (in Chinese)

[6] 蔡国庆, 赵成刚, 刘艳. 非饱和土土-水特征曲线的温度效应[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1055-1060.  
CAI G Q, ZHAO C G, LIU Y. Temperature effects on soil-water characteristic curve of unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1055-1060. (in Chinese)

[7] 王协群, 邹维列, 骆以道, 等. 考虑压实度时的土-水特征曲线和温度对吸力的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 368-372.  
WANG X Q, ZOU W L, LUO Y D, et al. SWCCs and influence of temperature on matrix suction under different compaction degrees [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 368-372. (in Chinese)

[8] 叶为民, 申森, 陈宝, 等. 温控高压实 GMZ01 膨润土-砂混合物土-水特性[J]. 工程地质学报, 2013, 21(3): 385-390.  
YE W M, SHEN M, CHEN B, et al. Water retention characteristics of highly compacted sand-gmz01 bentonite mixtures at fixed temperatures [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(3): 385-390. (in Chinese)

[9] 谈云志, 胡新江, 喻波, 等. 粉土持水性能的温度效应研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(Sup1): 121-126, 140.  
TAN Y Z, HU X J, YU B, et al. The water holding capacity of silt under temperature effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup1): 121-126, 140. (in Chinese)

[10] HILT G H, DAVIDSON D T. Lime fixation in clayey soils: RB Bulletin No. 262 [S]. Highway Research Board, National Research Council, 1960: 20-32.

[11] 公路路基设计规范: JTG D30—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.  
Specifications for design of highway subgrades: JTG D30-2015 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015. (in Chinese)

[12] JOTISANKASA A. Collapse behavior of a compacted silty clay [D]. London: Imperial College, 2005.

[13] Standard test method for measurement of soil potential using filter paper: ASTM D5298-94 [S]. ASTM International, 1992.

[14] 孙德安, 张俊然, 吕海波. 全吸力范围南阳膨胀土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1839-1846.  
SUN D A, ZHANG J R, LÜ H B. Soil-water characteristic curve of Nanyang expansive soil in full suction range [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1839-1846. (in Chinese)

[15] VILLAR M V, GOMEZ-ESPINA R. Effect of temperature on the water retention capacity of FEBEX and MX-80 bentonites [C]//Proceedings of the first

- European Conference on Unsaturated Soils, 2008; 257-262.
- [16] WANG Y J, CUI Y J, TANG A M, et al. Changes in thermal conductivity, suction and microstructure of a compacted lime-treated silty soil during curing [J]. *Engineering Geology*, 2016, 202: 114-121.
- [17] 高游, 孙德安, 张俊然, 等. 考虑孔隙比和水力路径影响的非饱和土土-水特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(12): 2191-2196.
- GAO Y, SUN D A, ZHANG J R, et al. Soil-water characteristics of unsaturated soils considering initial void ratio and hydraulic path [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(12): 2191-2196. (in Chinese)
- [18] 蔡国庆, 刘祎, 徐润泽, 等. 全吸力范围红黏土干湿循环土-水特征曲线[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(Sup2): 13-16.
- CAI G Q, LIU Y, XU R Z, et al. Experimental investigation for soil-water characteristic curve of red clay in full suction range [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(Sup2): 13-16. (in Chinese)
- [19] GRANT S A, SALEHZADEH A. Calculation of temperature effects on wetting coefficients of porous solids and their capillary pressure functions [J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(2): 261-270.
- [20] BACHMANN J, HORTON R, GRANT S A, et al. Temperature dependence of water retention curves for wettable and water-repellent soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(1): 44-52.
- [21] HOPMANS J W, DANE J H. Temperature dependence of soil hydraulic properties [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(1): 4-9.
- [22] MITCHELL J K, KENICHI S. *Fundamentals of soil behavior* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- [23] 邵玉娴, 施斌, 刘春, 等. 黏性土-水理性质温度效应研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(10): 1576-1582.
- SHAO Y X, SHI B, LIU C, et al. Temperature effect on hydro-physical properties of clayey soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(10): 1576-1582. (in Chinese)
- [24] 马田田, 韦昌富, 周家作, 等. 土体的冻结特征曲线和持水特性[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(Sup1): 172-177.
- MA T T, WEI C F, ZHOU J Z, et al. Freezing characteristic curves and water retention characteristics of soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(Sup1): 172-177. (in Chinese)
- [25] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [26] 高游, 孙德安. 单峰和双峰土-水特征曲线基本参数的确定[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(10): 1884-1891.
- GAO Y, SUN D A. Determination of basic parameters of unimodal and bimodal soil water characteristic curves [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(10): 1884-1891. (in Chinese)
- [27] 严旭德, 张帆宇, 梁收运, 等. 石灰固化黄土的比表面积和离子交换能力研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2014, 53(5): 149-154.
- YAN X D, ZHANG F Y, LIANG S Y, et al. Characteristics of special surface area and cation exchange capacity of lime-stabilized loess [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2014, 53(5): 149-154. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)