

DOI: 10.11779/CJGE2022S1043

石灰改良黄土土水特征拟合模型及微观特性

梁志超, 张爱军*, 任文渊, 王毓国, 胡锦涛, 韩婧文

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 黄土地区公路路基和建筑物的地基中往往要设置一定厚度的石灰改良黄土层, 俗称灰土层, 且该层土大部分处于非饱和状态。为了探究灰土层持水特性和微观特性, 利用非饱和土固结仪、滤纸法以及扫描电镜对石灰改良黄土进行土水特征试验和微观试验, 研究了不同压实度非饱和黄土的土水特征, 基于 V-G 模型对不同压实度的土水特征模型进行了修正, 提出考虑水-压实度耦合下的土水特征模型。同时, 分析了不同压实度下石灰改良黄土的微观特性。研究表明: 压实度对压实黄土和石灰改良黄土的土水特征曲线有一定影响, 随着压实度增大, 压实黄土和石灰改良黄土的进气值逐渐增大, 持水能力增强。不同压实度的石灰改良黄土的土水特征曲线可以分别统一用归一模型表达, 且模型能较好的描述其土水特征。通过扫描电镜试验, 从微观结构上验证了压实度对土水特征影响结果的准确性。

关键词: 石灰改良; 非饱和黄土; 灰土层; 土水特征模型; 微观结构

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2022)S1 - 0241 - 06

作者简介: 梁志超(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土试验与本构研究。E-mail: lzc2020@nwfufu.edu.cn。

Fitting model for soil water characteristics of lime-improved loess and its microscopic properties

LIANG Zhi-chao, ZHANG Ai-jun, REN Wen-yuan, WANG Yu-guo, HU Jin-fang, HAN Jing-wen

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: A certain thickness of lime-improved loess layer, commonly known as the lime soil layer, is often set in the foundation of highway subgrades and buildings in loess areas, and most of this layer of soil is in an unsaturated state. In order to explore the water-retention characteristics and microscopic properties of the lime-soil layer, the unsaturated soil consolidation instrument, the filter paper method and the scanning electron microscope are used to conduct the soil-water characteristic tests and the microscopic tests on lime-modified loess, and the soil-water characteristics of unsaturated loess with different compaction degrees are studied. Based on the V-G model, the soil-water characteristic model under different compaction degrees is revised, and a soil-water characteristic model considering the coupling of water and compaction degree is proposed. At the same time, the microscopic properties of the lime-modified loess under different compaction degrees are analyzed. The research shows that the compaction degree has a certain influence on the soil-water characteristic curves of the compacted loess and the lime-improved loess. With the increase of the compaction degree, the air-entry values of the compacted and lime-improved loess gradually increase, and the water-retention capacity increases. The soil-water characteristic curves of the lime-modified loess with different compaction degrees can be expressed by a unified model, and the model can describe the soil-water characteristics well. Through the scanning electron microscope tests, the accuracy of the results of the effects of the compaction degree on the soil-water characteristics is verified from the microstructure.

Key words: lime improvement; unsaturated loess; lime soil layer; soil-water characteristic model; microstructure

0 引言

西北地区黄土具有很强的水敏性和结构性等特征, 遇水会产生湿陷变形或者压缩变形。在公路、铁路路基和建筑物的地基中, 为了提高承载力、消除湿陷变形或者防渗, 常常设置掺加石灰的改良黄土层, 工程中俗称灰土层。灰土层已经在中国广泛使用很多年, 并积累了丰富的经验, 其较天然黄土在工程性能

方面有很大的改善。国内外许多学者通过室内外试验和理论分析已对石灰改良土进行了系列研究, 而石灰改良黄土大部分处于非饱和的工况下, 其持水特性影响灰土层以及整个路基和建筑物地基的沉降和稳定

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978572)

收稿日期: 2022 - 09 - 28

*通信作者(E-mail: zaj@nwsuaf.edu.cn)

性,但目前针对此问题缺少系统及深入的研究。

在土水特征研究方面,近几年主要集中在不同外部因素对土水特征曲线(soil water characteristic curve, SWCC)的影响上^[1-2]。赵贵涛等^[3]、邹维列等^[4]研究了干湿、冻融循环对SWCC的影响规律,并基于土壤转换函数(PTF)预测了不同初始比土的SWCC。张爱军等^[5],王毓国等^[6]研究了不同含盐量对伊犁黄土土水特征的影响规律,并拟合得出考虑含盐量的土水特征模型。蔡国庆等^[7]考虑变形及滞回效应的影响,提出了三维土水曲面模型,并研究了全吸力范围红黏土干湿循环下的SWCC。在石灰改良土方面,王叶娇等^[8]根据冻结曲线,利用冻结温度降低法计算得到0℃附近石灰改良土的SWCC,并与滤纸法得到的SWCC进行了比较。

众所周知,灰土垫层在施工过程中,压实度是一个重要的参数。目前针对压实度对SWCC影响的研究具有丰富的成果。在压实度方面,刘奉银等^[9]研究发现干密度对压实非饱和黄土的土水特征有不可忽视的影响。李佳敏等^[10]对膨胀土进行了土水特征试验,发现饱和度一定时,总吸力与吸力都随干密度的增大而增大,同时干密度越大,排水越慢。从以上研究成果可以看出,针对天然土以及石灰改良土的SWCC研究考虑了各种外部因素,但对于实际施工过程中压实度对SWCC的影响研究却是空缺,因此,研究灰土不同压实度下持水特性具有实际工程价值和理论意义。

本文首先通过非饱和土固结仪和滤纸法测得了不同压实度下石灰改良黄土的SWCC。其次,提出水-压实度耦合作用下的土水特征模型,并验证了模型的可靠性。最后,从微观角度分析验证了不同压实度石灰改良黄土持水特性变化规律的准确性。研究结果对于灰土垫层实际工程和理论研究具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料及制备

(1) 试验用料

试验用土取自陕西富平某建筑基坑侧壁。取土深度为3~5 m。所取黄土系Q₄黄土,颜色呈黄色,土质中硬,质地均匀,有少量的虫洞及动物甲壳。室内试验得出黄土的基本物理指标如表1所示,土样颗粒分曲线如图1所示,将所取黄土定义为粉质黏土。

掺入黄土中的石灰采用钙质熟石灰粉,其氧化钙含量大于65%,属于一级灰,为保证均匀性,将熟石灰过孔径为0.5 mm筛。对未掺石灰和掺石灰9%(工程中常称为二八灰土)的黄土的进行室内轻型击实试验,灰土在进行击实试验时,采用现场配料,避免石

灰与土反应时间过长,影响击实试验结果。击实试验得出不掺灰黄土的最大干密度为1.72 g/cm³,最优含水率为16.5%,而掺入石灰9%黄土的相应值分别为1.65 g/cm³和22.0%。其中石灰掺量的计算公式如下所示:

$$M = \frac{m_1}{m_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中, M 为石灰掺量质量比, m_1 为石灰质量, m_s 为干土的质量。

表1 黄土的物理性质指标

Table 1 Indexes of physical properties of loess

干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	含水率 $w_0/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性 指数 I_P	相对质 量密度 G_s
1.28	15.2	28.6	18.0	10.6	2.71

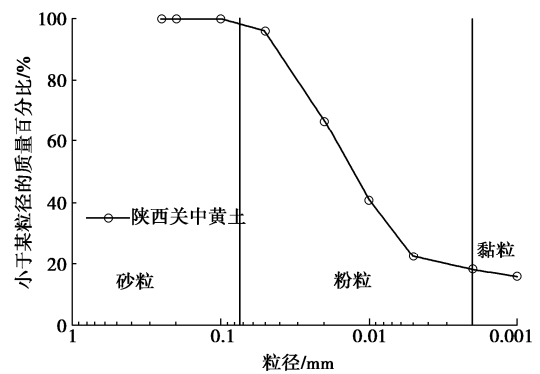


图1 黄土的颗粒分曲线

Fig. 1 Fractional curve of loess

(2) 试样制备与试验方法

将取回黄土烘干碾碎并过2 mm筛,未掺入石灰的黄土按设计干密度和含水率进行加水拌匀,在恒温恒湿环境下放置24 h,使其水分均匀。灰土的制备方法详细参考文献[2],在此不在赘述。试验所需试样均为环刀试样,尺寸为直径×高度=61.8 mm×20 mm。将制备好的灰土土样放在温度为20±2℃的恒温且湿度大于95%的恒温恒湿的养护箱中养护7 d。试验时,试验含水率大于最优含水率的试样,采用滴定法,小于最优含水率的试样,采用风干法。土水特征试验所用仪器为改装后的FGJ-20型非饱和土固结仪。

土水特征试验分为两部分。试验含水率大于等于最优含水率时($s < 500$ kPa)采用非饱和土固结仪通过轴平移技术测量,得到每级增湿含水率所对应的吸力值。试验含水率小于最优含水率时($s > 500$ kPa)采用滤纸法测量,滤纸试验采用国内制造的定量“双圈”牌NO.203型标准滤纸,滤纸的率定方程见式(2)。

$$\left. \begin{aligned} \lg s &= 5.257 - 0.07w_f \quad (w_f \leq 41\%) \\ \lg s &= 51.321 - 1.194w_f \quad (w_f > 41\%) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, s 为吸力(kPa), w_f 为滤纸含水率(%)。

1.2 试验方案

(1) 土水特征试验的组数与工况

为简化叙述, 将 $M=0\%$ 的黄土称为压实黄土 (compaction loess), 简称: CL。将 9% 的黄土称为石灰改良黄土 (lime improved loess), 简称: LIL。

土水特征试验的具体方案如表 2 所示, 试验方案设计中共计试验 6 组, 试验含水率设计为 10 级, 最优含水率以上为 7 级, 最优含水率以下为 3 级。

表 2 SWCCs 试验方案

Table 2 Test plans of SWCCs

石灰掺量 M	压实度 $K/\%$	试验含水率 $w_t/\%$
0, 9	80, 87, 95	$w_{opt}-6, w_{opt}-4, w_{opt}-2, w_{opt}, w_{opt}+2,$
		$w_{opt}+4, w_{opt}+6, w_{opt}+8, w_{opt}+10,$ w_{sat}

注: w_{opt} 表示最优含水率; w_{sat} 表示饱和含水率。

(2) 扫描电镜试验方案

对不同压实度的 CL 和 LIL 进行扫描电镜分析, 扫描试验所用的是 JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜。

2 试验结果及分析

图 2 为不同压实度下 CL 和 LIL 的 SWCC 试验值与拟合曲线, 不同压实度下的 SWCC 采用饱和度形式的 V-G 模型拟合。可以发现, 随着含水率向饱和含水率增大的过程中, 吸力逐渐减小, SWCCs 皆呈缓变陡在变缓的上升趋势, 不同压实度的土水特征曲线形状相似。

CL 和 LIL 的进气值 s_c 见表 3。可以看出, 压实度对 SWCC 有一定的影响, 主要反应在进气值 a 上, 随着压实度增大, 曲线向右上方移动, CL 和 LIL 的进气值逐渐增大, 且 LIL 明显大于 CL。同一种土进气值越大, 陡峭段越陡峭。究其原因是, 随着压实度的增大, 土样密度增大, 孔隙尺寸减小, 进气值增大, 在相同基质吸力下, 孔隙尺寸越小, 土样的自由水更不容易排出, 使得持水性明显增强, 因此可以认为压实度对 CL 和 LIL 的土水特征曲线的影响是通过进气值的变化来反应的。

通过 V-G 模型对试验点进行拟合, 其表达式为式 (3), 拟合结果见图 2。从图 2 中可看出, V-G 模型能较好拟合 CL 和 LIL 的土水特征曲线, 拟合 R^2 大于 0.97。

$$S_e = [1 + (as)^n]^{-m} \quad (3)$$

式中, S_e 为有效饱和度, s 为基质吸力, a, n, m 为模型参数。

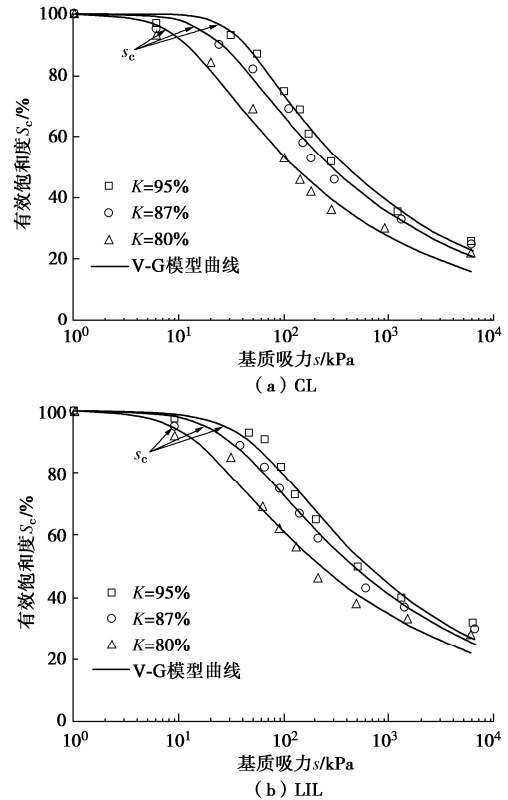


图 2 不同压实度下 CL 和 LIL 土水特征曲线

Fig. 2 Soil-water characteristics of CL and LIL under different compaction degrees

表 3 SWCC 采用 V-G 模型拟合参数及进气值

Table 3 Parameters and air-entry values of SWCCs by V-G model

K / $\%$	CL				LIL			
	a	n	m	s_c /kPa	a	n	m	s_c /kPa
95	0.029	2.09	0.11	26	0.019	1.62	0.17	44
87	0.061	1.94	0.14	17	0.040	1.68	0.15	20
80	0.084	1.84	0.16	9	0.072	1.72	0.14	11

进气值 (见表 3) 与压实度的关系近似呈直线, 如图所示, 随着压实度增大进气值增大, LIL 的进气值明显大于 CL。从图 3 中明显可以发现参数 a 和压实度成线性关系, 而压实度对参数 n 和 m 影响很小, 可取平均值, 得 CL 和 LIL 的 n 和 m 平均值分别为 1.96, 0.14 和 1.67, 0.15。将参数 $a=eK+f$ 的线性关系代入式 (3) 可得到压实度-含水率耦合下的 V-G 模型, 如下所示:

$$S_e = \{1 + [(eK + f)s]^n\}^{-m} \quad (4)$$

式中 当为 CL 时, $e=-0.0032, f=0.332, n=1.96, m=0.14$; 当为 LIL 时, $e=-0.0031, f=0.311, n=1.67, m=0.15$ 。

将考虑压实度的 SWCC 模型与试验点绘于图 4 中, 可以发现式 (4) 与试验点吻合度较高, 可见式 (4) 可以统一表示不同压实度下石灰改良黄土的土水特征。

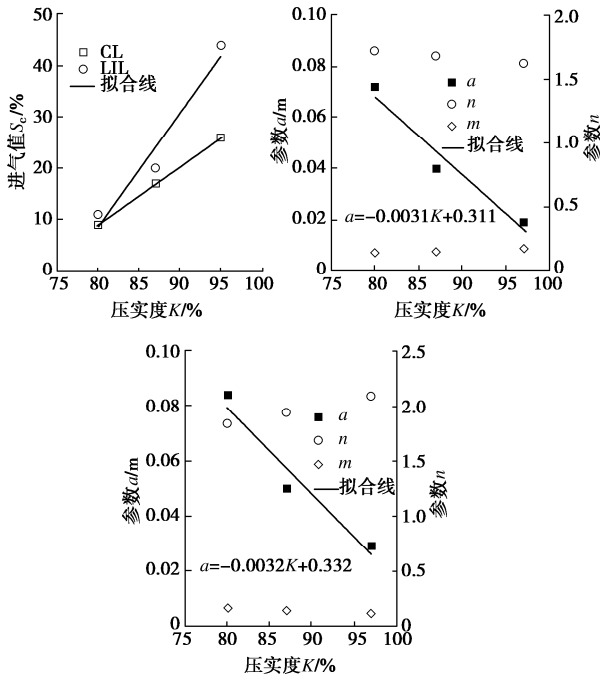


图3 不同压实度下黄土 V-G 模型拟合参数及进气值

Fig. 3 Fitting parameters of V-G model and air-entry values under different compaction degrees

3 模型验证

将文献[11]中不同压实度黄土的土水特征曲线值与本文提出的 SWCC 模型进行验证, 验证结果如图 5 所示, 从图 5 可以看出, 压实度为 75%, 80%, 90% 和 100% 时, 本文模型能较好的拟合文献中试验值, 吻合度高 ($R^2 > 0.90$)。说明式 (4) 能较好的描述不同压实度对压实黄土和石灰改良黄土的 SWCC 的影响。

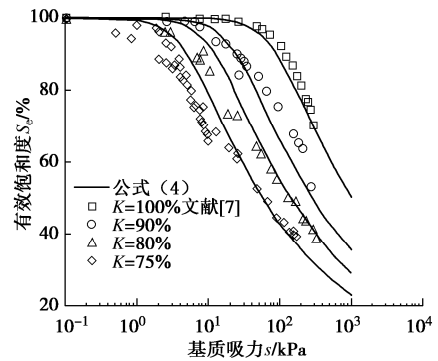


图5 不同压实度下式 (4) 的验证结果

Fig. 5 Verified results of Equation (4) under different compaction degrees

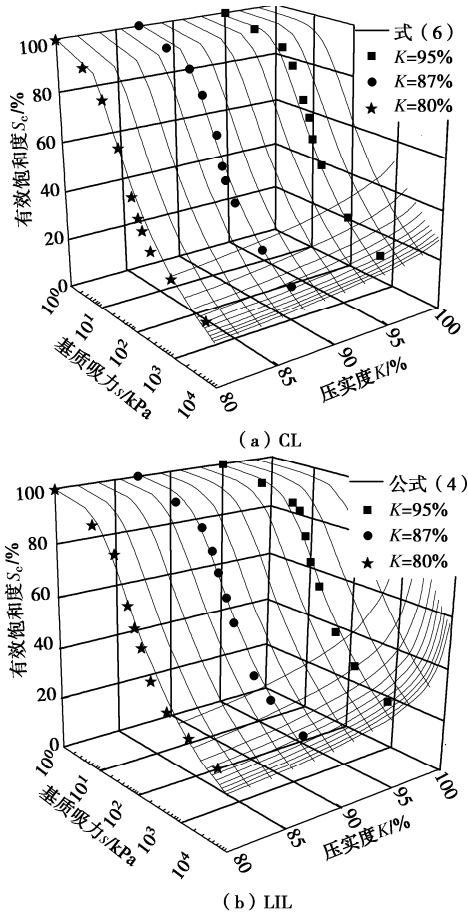


图4 不同压实度下 CL 和 LIL 土水特征曲面

Fig. 4 Soil-water characteristic surfaces of CL and LIL under different compaction degrees

4 讨论

为了进一步验证不同压实度的黄土土水特征试验及模型结果的准确性, 从微观的角度, 考虑孔隙尺寸对土水特性的影响, 通过扫描电镜图像, 对试验结果从定性和定量的角度对其进行分析验证。

4.1 定性分析

图 6 为不同压实度下的 CL 和 9%+LIL 的扫描电镜图像 (SEM) 放大 1000 倍的图像。从图 6 可看出, 对比 CL 和 LIL, LIL 颗粒与颗粒之间胶结作用比 CL 强, 使得 LIL 颗粒与颗粒之间的紧密接触, 孔隙通道和孔隙尺寸减小。对比加入石灰后, 未加入石灰的 CL 在压实度较小时, 大孔隙普遍存在, 随着压实度增大, 孔隙尺寸减小, 土体更加密实, 这也使得土体的持水性更强。间接的验证了随着石灰的加入和压实度的增大, 土体的持水能力增强的结论。同时从 LIL 的图像可以看出, 随着压实度增大, 石灰与土絮凝作用越强, 也证实了石灰改良黄土在压密状态下改良效果越好, 且持水性越强。

4.2 定量分析

从图 7, 8 中可看出, 随着孔径逐渐增大, 孔隙数量逐渐减少, 随着压实度的增大, CL 和 LIL 的微孔隙、小孔隙和中孔隙数逐渐增大, 对应的大孔隙数逐渐减少。LIL 的微孔隙数大于 CL, 其小、中以及大孔隙数量均小于 CL。孔隙面积的规律孔隙数量的规律相

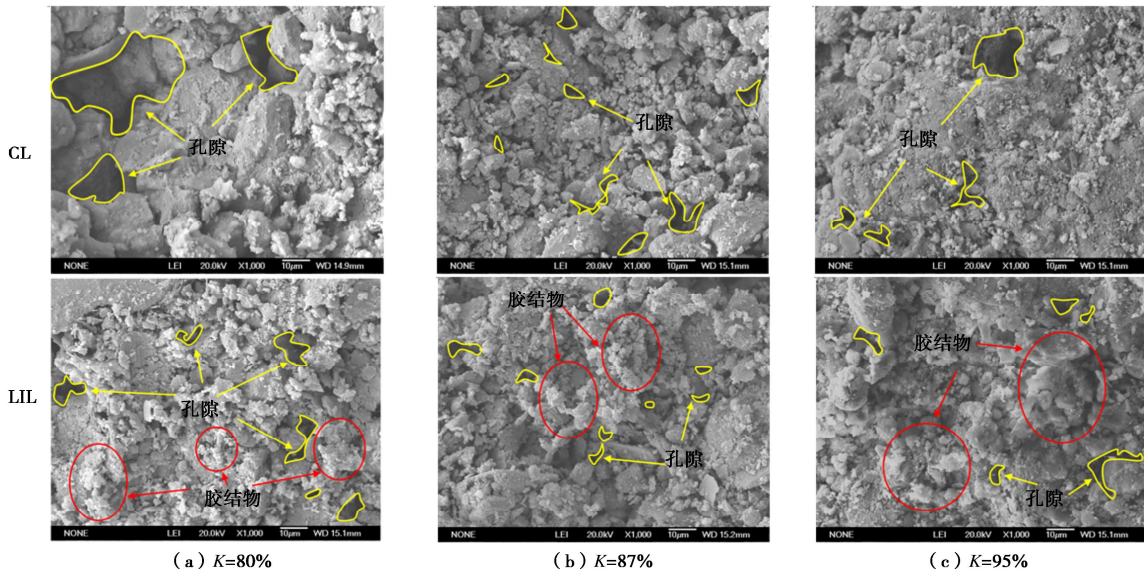


图 6 不同压实度 CL 和 LIL 放大倍数为 1000 倍的 SEM 图像

Fig. 6 SEM images of CL and LIL under different compaction degrees with magnification of 1000 times

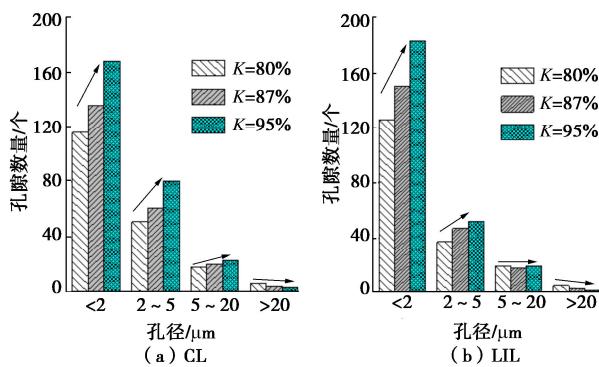


图 7 不同压实度 CL 和 LIL 各粒径的颗粒数

Fig. 7 Number of particles of Cl and LIL under different compaction degrees

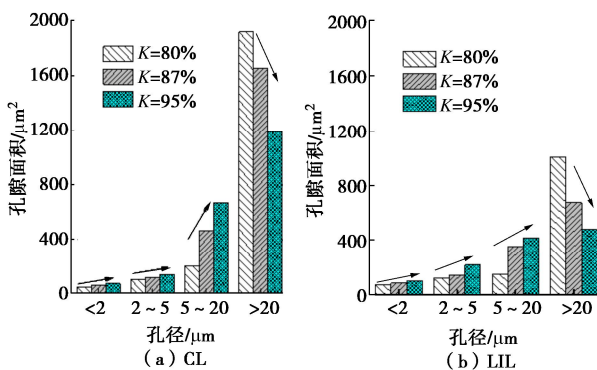


图 8 不同压实度 CL 和 LIL 各粒径的孔隙面积

Fig. 8 Areas of pores of Cl and LIL under different compaction degrees

反, 微、小和中孔隙随着压实度增大逐渐增大, 而大孔隙随着压实度增大减小。并且发现加入石灰后孔隙面积小于压实黄土的, 说明掺加石灰可以有效增加土中微孔隙的数量, 减少中、小和大孔隙数量, 同时可

以有效减小孔隙面积, 使得土体更加密实, 土体持水性增强。

5 结 论

(1) 由非饱和土固结仪和滤纸法得到不同压实度石灰改良黄土土的土水特征曲线, 发现压实度对灰土的土水特征曲线有一定的影响, 石灰的加入使得黄土的持水能力更强。随着压实度增大, 灰土的进气值明显增大, 持水能力增强。同时, 采用V-G模型对土水特征曲线进行拟合, 基于V-G模型建立引入压实度因子的石灰改良黄土的土水特征曲线模型, 模型与试验结果符合较好。

(2) 对提出的引入压实度的土水特征模型进行了验证, 验证结果表明该模型能较好描述压实度的土水特征曲线。

(3) 通过微观角度, 从定性和定量讨论了压实度对石灰改良黄土的持水特性影响结果的准确性和可靠性。

参考文献:

[1] 谌文武, 贾全全, 童艳梅. 莫高窟壁画地仗土 - 水特征曲线的测定与拟合[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1483 - 1491. (CHEN Wen-wu, JIA Quan-quan, TONG Yan-mei. Measurement and curve fitting for soil-waterer characteristic curve of mural plaster at Mogao Grottoes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1483 - 1491. (in Chinese))

[2] 梁志超, 胡再强, 郭 婧, 等. 非饱和石灰黄土土水特征与压缩湿陷特性研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(3): 66 - 75.

- (LIANG Zhi-chao, HU Zai-qiang, GUO Jing, et al. Study on soil-water characteristics and compressive collapsibility of unsaturated lime loess[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, **39**(3): 66 - 75. (in Chinese))
- [3] 赵贵涛, 韩仲, 邹维列, 等. 干湿、冻融循环对膨胀土土-水及收缩特征的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(6): 1139 - 1146. (ZHAO Gui-tao, HAN Zhong, ZOU Wei-lie, et al. Influences of drying-wetting-freeze-thaw cycles on soil-water and shrinkage characteristics of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(6): 1139 - 1146. (in Chinese))
- [4] 叶云雪, 邹维列, 袁斐, 等. 基于土壤转换函数(PTF)预测不同初始孔隙比土的土-水特征曲线[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(12): 2305 - 2311. (YE Yun-xue, ZOU Wei-lie, YUAN Fei, et al. Predicating soil-water characteristic curves of soils with different initial void ratios based on a pedotransfer function[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(12): 2305 - 2311. (in Chinese))
- [5] 张爱军, 王毓国, 邢义川, 等. 伊犁黄土总吸力和基质吸力土水特征曲线拟合模型[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(6): 1040 - 1049. (ZHANG Ai-jun, WANG Yu-guo, XING Yi-chuan, et al. Fitting models for soil-water characteristic curve of total and matrix suctions of Yili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(6): 1040 - 1049. (in Chinese))
- [6] WANG Y G, ZHANG A J, REN W Y, et al. Study on the soil water characteristic curve and its fitting model of Ili loess with high level of soluble salts[J]. Journal of Hydrology, 2019, **578**: 124067.
- [7] 蔡国庆, 田京京, 李舰, 等. 考虑变形及滞回效应影响的三维土-水特征曲面模型[J]. 土木工程学报, 2019, **52**(11): 97 - 107. (CAI Guo-qing, TIAN Jing-jing, LI Jian, et al. A three-dimensional soil water characteristic surface model considering deformation and hysteresis effect[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, **52**(11): 97 - 107. (in Chinese))
- [8] 王叶娇, 王有为, 靳奉雨, 等. 石灰改良土的土水特征曲线及其冻结特征曲线[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, **40**(6): 967 - 973. (WANG Ye-jiao, WANG You-wei, JIN Feng-yu, et al. Soil-water characteristic curve and freezing characteristic curve of lime improved soil[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, **40**(6): 967 - 973. (in Chinese))
- [9] 刘奉银, 张昭, 周冬, 等. 密度和干湿循环对黄土土-水特征曲线的影响[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 132 - 136, 142. (LIU Fengyin, ZHANG Zhao, ZHOU Dong, et al. Effects of initial density and drying-wetting cycle on soil water characteristic curve of unsaturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 132 - 136, 142. (in Chinese))
- [10] 李佳敏, 马丽娜, 张戎令, 等. 饱和度及干密度对弱膨胀土土水特征曲线影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, **42**(4): 142 - 148. (LI Jiamin, MA Lina, ZHANG Rongling, et al. Analysis of influence of saturation and dry density on soil characteristic curve of weak expansive soil[J]. Journal of southwest university (Natural Science Edition), 2020, **42**(4): 142 - 148. (in Chinese))
- [11] 王来才. 不同压实度重塑黄土持水特性和渗透特性试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. (WANG Lai-cai. Experimental Study on Water Retention Characteristics and Permeability Characteristics of Remolded Loess with Different Degree of Compaction[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)