

DOI: 10.11779/CJGE2020S2005

非饱和石灰改良黄土的渗水系数预测

胡再强, 梁志超*, 郭 婧, 冯 哲, 王 凯, 折海成

(西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘 要: 针对黄土地区大部分黄土处于非饱和的状态, 采用石灰改良非饱和黄土以解决非饱和黄土渗透性的问题。利用非饱和固结仪测得压实黄土和石灰改良黄土的土水特征曲线, 采用 Van Genuchten 模型对试验数据进行拟合, 同时测得饱和压实黄土和石灰改良黄土的饱和渗水系数, 基于测得的土水特征曲线, 采用 Childs & Collis-George 预测非饱和石灰改良黄土的渗水系数的模型, 得到非饱和石灰改良黄土的体积含水率以及基质吸力和渗水系数之间的关系曲线, 并通过微观结构来分析验证其机理。结果表明: 压实度对非饱和石灰改良黄土土水特征曲线影响明显, 压实度越大, 进气值越大; 石灰改良黄土的饱和渗水系数小于压实黄土; 同一压实度, 非饱和石灰改良黄土的渗水系数随体积含水率的增大而增大, 随基质吸力的增大, 呈先迅速减小后趋于平衡的趋势, 吸力一定时, 压实度越大, 非饱和渗水系数越小; 且渗水系数与基质吸力可用幂函数表示。为石灰改良黄土地基和路基等工程提供数值计算基础和理论支持。

关键词: 非饱和土; 石灰改良黄土; 土水特征曲线; 渗水系数; 基质吸力

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)S2-0026-06

作者简介: 胡再强(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事黄土力学与工程研究工作。E-mail: huzq@xaut.edu.cn。

Prediction of permeability coefficient of unsaturated lime-improved loess

HU Zai-qiang, LIANG Zhi-chao, GUO-Jing, FENG-Zhe, WANG-Kai, SHE Hai-cheng

(Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In view of the fact that most loess in the loess regions is in an unsaturated state, lime is used to improve the unsaturated loess to solve the problem of permeability of unsaturated loess. The soil-water characteristic curves of the compacted loess and the lime-modified loess are measured by an unsaturated consolidation instrument, and the Van Genuchten model is used to fit the test data. The saturated permeability coefficients of the saturated compacted loess and the lime-modified loess are also measured. The obtained soil-water characteristic curve is modeled using the Childs & Collis-George model to predict the permeability coefficient of unsaturated lime-improved loess, and the relationship curves of the volumetric water content of unsaturated lime-improved loess, the matrix suction and the permeability coefficient are obtained so as to analyze the mechanism. The results show that the compaction degree has a significant effect on the soil-water characteristic curve of the unsaturated lime-modified loess. The larger the compaction degree, the larger the air intake value. The saturated permeability coefficient of the lime-modified loess is smaller than that of the compacted loess. Under the same compaction degree, the permeability coefficient of the lime-improved loess increases with the increase of the volumetric water content, and with the increase of the matrix suction, it first decreases rapidly and then tends to be equilibrium. When the suction is constant, the greater the compaction degree, the smaller the unsaturated permeability coefficient. The permeability coefficient and matrix suction can be expressed by a power function. The results may provide numerical calculation basis and theoretical support for lime-improved loess and roadbed projects.

Key words: unsaturated soil; lime-modified loess; soil-water characteristic curve; water permeability coefficient; matrix suction

0 引 言

黄土是一种典型的非饱和土, 广泛分布于我国的西北地区^[1]。非饱和黄土具有很强的大孔性、水敏性和结构性等特征。针对非饱和黄土的特殊性, 在工程中通常掺入一定量的石灰, 使其与黄土发生复杂的物

理化学反应以其改变其力学性能^[2]。同时, 由于地下水位升降和降雨等因素, 导致土体基质吸力的变化,

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2017JM5059); 陕西省黄土力学与工程重点实验室项目(13JS073)

收稿日期: 2020-08-10

***通信作者:** (E-mail: 1315478559@qq.com)

表 1 黄土基本物理性质指标
Table 1 Basic physical parameters of loess

| 天然干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 天然含水率 $w/\%$ | 塑限 $w_p/\%$ | 液限 $w_L/\%$ | 塑性 指数 I_p | 土粒相 对密度 | 颗粒组成/% | | |
|---|-----------------|----------------|----------------|----------------|------------|-----------|----------------|-----------|
| | | | | | | <0.005 mm | 0.005~0.075 mm | >0.075 mm |
| 1.28 | 15.2 | 19.0 | 28.6 | 9.6 | 2.71 | 15.5 | 74.3 | 10.2 |

使得非饱和黄土的渗透系数变得更加难以测量。渗透系数是土的重要参数之一，对于饱和土而言，渗透系数是个常数，可以通过渗透试验，采用达西定律求得，而相反，非饱和土由于基质吸力的存在，渗透系数不是一个定值，直接测量非常困难。

目前针对非饱和土渗透系数的研究，总体分为直接法和间接法两种。直接法测定非饱和的渗透系数，国内外也有很多成果。陈正汉等^[3]系统全面地研究了非饱和土的渗透性。徐永福等^[4]测量了不同应力状态下非饱和土的渗透系数，测量结果可信且测量精度满足需求。李永乐等^[5]通过试验研究发现，非饱和土的渗透性与围压有关。目前，采用间接法测量非饱和土渗透系数也很成熟，Chiu 等^[6]对不同含水率的膨润土加砂混合材料进行了非饱和渗透系数测定。同时由 CCG 模型和 BCB 模型以及 V-G 模型和 Mualem 模型相结合建立的 VGB 模型，都可以对非饱和土的渗水系数进行预测^[7-9]。李萍等^[10]采用 Childs & Collis-Geroge 预测模型求得了非饱和黄土渗透系数与基质吸力的关系。高登辉等^[11]根据考虑净平均应力影响的广义土水特征曲线，应用间接方法预估了不同净竖向应力下的非饱和土渗水系数。目前，采用间接法测量非饱和土渗透系数也很成熟^[12]。然而，对于非饱和和石灰改良黄土的渗透系数却鲜有报道。

在实际工程中，大部分黄土地基处于非饱和的状态，准确快速地测得其非饱和渗透系数是实际工程中的一大难点，因此，采用土水特征曲线和非饱和土渗透模型来计算非饱和黄土渗透性可以减小实际工程中测量非饱和土渗透性的时间。

本文针对以上问题，采用非饱和固结仪对非饱和黄土以及石灰改良黄土进行土水特征曲线试验，并且对饱和压实黄土和石灰改良黄土进行渗透试验，采用 CCG 模型和 V-G 模型对非饱和和石灰改良黄土的渗水系数进行预测，并通过扫描电镜图像从微观上验证分析其不同压实度石灰改良黄土的非饱和渗水系数的变化规律。

1 试验方案与方法

1.1 试样制备与土样性质

试验土料取自陕西富平人民路某施工基坑，本次取土为基坑侧壁，取土深度大约为 6 m，满足规范要求。为确保尽可能减少原状土的扰动，从边坡上取出 20~30 cm 的立方土块后，立刻用黑色塑料袋和胶带

缠紧，包装过程中标记好土块上下面，运输过程中铺设棉被，路途中尽量减少颠簸。所取黄土为 Q₃ 黄土，颜色呈黄色，土质均匀，有少量的虫洞、动物甲壳及草根。通过室内试验，得到黄土的物理指标如表 1 所示。熟石灰采用工程用料钙质熟石灰粉，氧化钙含量大于 65%，属于一级灰，为保证均匀性，将熟石灰过 2 mm 筛，选用的石灰的钙镁含量分析结果如表 2 所示。

表 2 石灰主要化学成分

| Table 2 Main chemical composition of lime | | | |
|---|--------|------|--------|
| 化学成分 | 百分含量/% | 化学成分 | 百分含量/% |
| CaO | 72.12 | MgO | 3.90 |

将取回的黄土烘干碾碎过 2 mm 的筛子，按照预定的含水率将土样喷水预湿，静置至少 24 h，使其水分均匀，根据设计的干密度算出所需湿土的质量，环刀样规格为 61.8 mm×20 mm（测吸力试样）和 61.8 mm×40 mm（饱和渗水系数试验），制样完成后在保湿缸中养护达到所需养护时间。对压实黄土和石灰改良黄土进行击实试验（结果见图 1），得到压实黄土的最大干密度和最优含水率分别为 1.72 g/cm³ 和 16.5%，石灰改良黄土的最大干密度和最优含水率分别为 1.65 g/cm³ 和 22.0%。

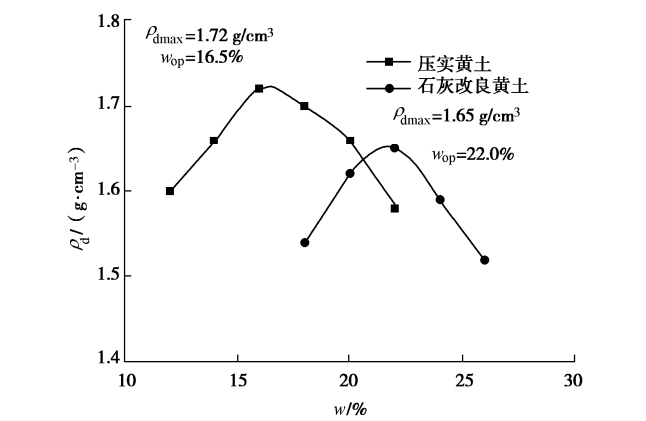


图 1 压实黄土和石灰改良黄土的击实曲线

Fig. 1 Compaction curves of compacted loess and lime-modified loess

1.2 试验方案

试验仪器为 FGJ-20 型非饱和土固结仪(仪器可见图 2)，测得无应力条件下压实度 $K=80\%$ ， 87% ， 95% 的压实黄土 ($\rho_d=1.38, 1.50, 1.64 \text{ g/cm}^3$) (石灰含量 0%) 和石灰改良黄土 ($\rho_d=1.32, 1.44, 1.57 \text{ g/cm}^3$) (石灰含量 9%) 在不同增湿含水率下的基质吸力，大于 500 kPa 的吸力采用滤纸法测量，试验采用国产“双

圈”牌 NO.203 型标准滤纸，滤纸的率定方程如下：

$$\begin{cases} \lg s = 5.257 - 0.07w_f (w_f \leq 47\%) \\ \lg s = 51.321 - 1.194w_f (w_f > 47\%) \end{cases}, \quad (1)$$

式中， s 为吸力 (kPa)， w_f 为滤纸含水率 (%)。



图 2 非饱和土固结仪

Fig. 2 Unsaturated soil consolidation instrument

2 非饱和土的土水特性

图 3 和图 4 分别为不同压实度非饱和压实黄土和石灰改良黄土的土水特征曲线。从图 3，4 看出，压实黄土和石灰改良黄土的体积含水率都随着基质吸力的增大而减小，随着基质吸力的增大由平缓段向陡峭段过度。

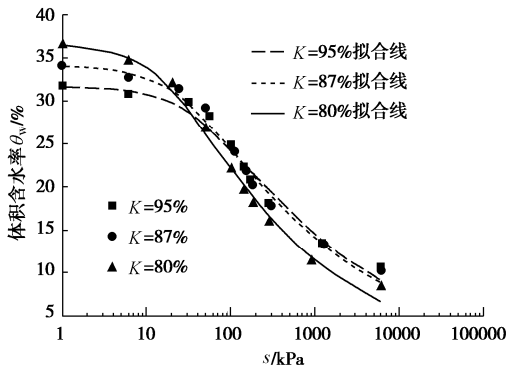


图 3 不同压实度非饱和压实黄土的土水特征曲线

Fig. 3 Soil-water characteristic curves of unsaturated compacted loess with different dry densities

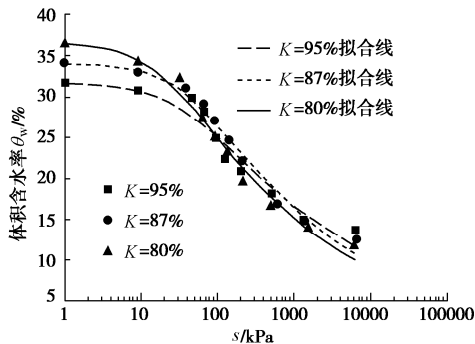


图 4 不同压实度非饱和石灰改良黄土的土水特征曲线

Fig. 4 Soil-water characteristic curves of unsaturated lime-modified loess with different dry densities

Van Genuchten 模型方程如下：

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[(1 + s/a)^b \right]^{(1-1/b)}} \quad (2)$$

式中 θ_r 为残余体积含水率； θ_s 为饱和体积含水率； s 为基质吸力； a 是和进气值有关的参数，其值近似等于进气值； b 是和土样排水有关的参数。

Van Genuchten 模型拟合值如表 3 所示，由拟合结果可以看出拟合效果较好，从表中数据可以看出， a 值随着压实度增大而增大，即压实黄土和石灰改良黄土的进气值都随着压实度的增大而增大，且压实黄土的进气值大于石灰改良黄土。从残余含水率可看出，压实度越大，残余含水率 θ_r 越大，说明，孔隙比越小，土体的持水能力越强，相反，孔隙比越大，土体持水能力较差。

表 3 非饱和石灰改良黄土 V-G 模型土性参数

Table 3 Soil parameters of V-G model for unsaturated lime-modified loess

| 土类 | 压实度 $K/\%$ | $\theta_s / \%$ | $\theta_r / \%$ | a | b | R^2 |
|------|---------------|-----------------|-----------------|-------|------|-------|
| 压实黄土 | 95 | 31.74 | 12.84 | 45.46 | 1.25 | 0.978 |
| | 87 | 34.13 | 12.21 | 31.57 | 1.25 | 0.985 |
| | 80 | 36.62 | 10.73 | 20.16 | 1.30 | 0.993 |
| 石灰黄土 | 95 | 31.74 | 10.70 | 51.62 | 1.24 | 0.973 |
| | 87 | 34.13 | 10.27 | 42.93 | 1.23 | 0.986 |
| | 80 | 36.62 | 8.00 | 21.00 | 1.21 | 0.974 |

3 非饱和土的渗水系数预测分析

饱和土的渗水系数通过室内试验，利用 Darcy 定律即可得到，且认为渗水系数是一个定值。针对非饱和土，假定水只能通过水的孔隙通道流动，无法通过占有空气的孔隙中流动，当土体中孔隙逐渐被气体充满时，水的流动通过逐渐减小，相对于饱和土而言，渗水系数小很多。针对上述问题，目前对于非饱和土渗水系数的直接测量方法不仅时间长，操作还很复杂因此，间接测量非饱和土的渗水系数具有一定的应用价值。Childs&Collis-George 利用充水孔隙空间的形状建议一种渗水系数函数 $k_w(\theta_w)$ 。具体方法是将试验得到的每条土水特征曲线沿体积含水率轴分为 m 等分，然后得到每一等分中点的基质吸力，根据式 (3)，(4)，(5) 计算渗水系数 $k_w(\theta_w)$ [10]。

$$k_w(\theta_w)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} A_d \sum_{j=1}^m \left[(2j+1-2i)(u_a - u_w)_j^{-2} \right] \quad (i=1,2,\dots,m), \quad (3)$$

$$A_d = \frac{T_s^2 \rho_w g \theta_s^p}{2\mu N^2}, \quad (4)$$

$$k_{sc} = A_d \sum_{j=1}^m \left[(2j+1-2i)(u_a - u_w)_j^{-2} \right] \quad i=0,1,2,\dots,m. \quad (5)$$

公式中的各参数含义及取值可参考文献[13]中关

于用土水特征曲线测渗透系数的公式。本文中不再赘述。

为了得到非饱和黄土的渗水系数，首先应得到饱和和压实黄土和石灰改良黄土的渗水系数，表 4 为压实黄土和石灰改良黄土的饱和渗水系数。

表 4 非饱和压实黄土及石灰改良黄土饱和渗水系数

Table 4 Saturated permeability coefficients of unsaturated

compacted loess and lime-modified loess

| 压实黄土 | | 石灰改良黄土 | |
|---------------|--|---------------|--|
| 压实度 $K/\%$ | 渗透系数 $k_s/(10^{-5}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ | 压实度 $K/\%$ | 渗透系数 $k_s/(10^{-5}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ |
| 100 | 0.82 | 100 | 0.15 |
| 95 | 1.61 | 95 | 0.30 |
| 87 | 3.50 | 87 | 0.55 |
| 80 | 8.20 | 80 | 1.30 |

图 5 为饱和压实黄土和石灰改良黄土的渗水系数在半对数坐标中的曲线，从图中可看出，压实黄土和石灰改良黄土的渗水系数都随压实度的增大而减小。同时，相同压实度情况下，石灰改良黄土的渗水系数小于压实黄土，即石灰对黄土的渗水系数有明显的改良效果。

以压实度 $K=87\%$ 的石灰改良黄土为例，图 6 为其土水特征曲线，取 $m=20$ ，图中给出了每一等分中点的坐标，计算得 $N=32$ ， $A_d=4.1130\times10^{-4}(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{kPa}^2)$ ， $k_{sc}=6.78\times10^{-6}\text{m/s}$ ，将 20 个点代入式 (3) 中，计算得到非饱和渗水系数，见表 5。

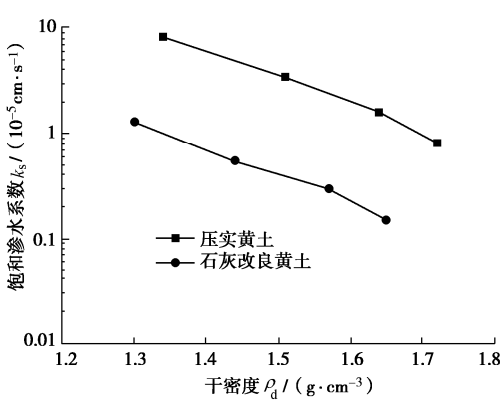


图 5 饱和压实黄土和石灰改良黄土的渗水系数曲线

Fig. 5 Curves of permeability coefficient of saturated compacted loess and lime-modified loess

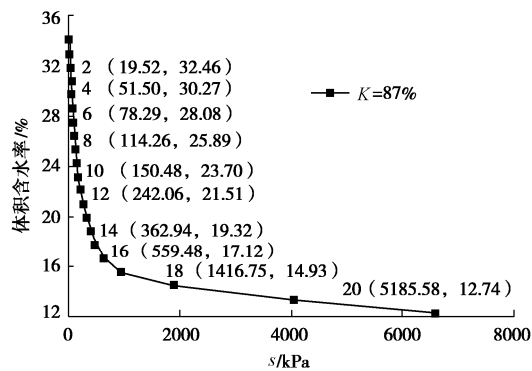


图 6 非饱和石灰改良黄土的土水特征曲线

Fig. 6 Soil-water characteristic curves of unsaturated lime-modified loess

表 5 非饱和石灰改良黄土渗水系数

Table 5 Permeability coefficients of unsaturated lime-modified loess

| i | $K=80\%$ | | $K=87\%$ | | $K=95\%$ | |
|-----|----------------|--|----------------|--|----------------|--|
| | s/kPa | $k_w(\theta_w)/(10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ | s/kPa | $k_w(\theta_w)/(10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ | s/kPa | $k_w(\theta_w)/(10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ |
| 1 | 21.98 | 6.77 | 22.43 | 2.74 | 15.00 | 1.37 |
| 2 | 35.45 | 4.24 | 26.80 | 1.84 | 24.00 | 0.50 |
| 3 | 50.06 | 2.88 | 42.70 | 1.30 | 41.79 | 0.30 |
| 4 | 64.27 | 2.01 | 59.08 | 0.96 | 51.50 | 0.20 |
| 5 | 77.64 | 1.41 | 63.90 | 0.71 | 60.41 | 0.13 |
| 6 | 94.96 | 0.97 | 69.24 | 0.51 | 78.29 | 0.09 |
| 7 | 102.96 | 0.64 | 81.07 | 0.37 | 96.19 | 0.06 |
| 8 | 119.59 | 0.39 | 93.14 | 0.26 | 114.26 | 0.04 |
| 9 | 139.72 | 0.22 | 105.78 | 0.18 | 133.12 | 0.03 |
| 10 | 180.65 | 0.12 | 118.05 | 0.12 | 150.48 | 0.02 |
| 11 | 217.61 | 0.06 | 146.10 | 0.08 | 187.17 | 0.01 |
| 12 | 319.58 | 0.03 | 169.43 | 0.05 | 242.06 | 6.03×10^{-3} |
| 13 | 429.95 | 0.02 | 193.84 | 0.03 | 297.9 | 3.49×10^{-3} |
| 14 | 563.59 | 0.01 | 220.06 | 0.02 | 362.94 | 1.89×10^{-3} |
| 15 | 681.91 | 6.96×10^{-3} | 285.90 | 7.77×10^{-3} | 437.21 | 9.27×10^{-4} |
| 16 | 809.1 | 3.43×10^{-3} | 376.11 | 3.22×10^{-3} | 559.48 | 3.89×10^{-4} |
| 17 | 1000.76 | 1.42×10^{-3} | 560.37 | 1.05×10^{-3} | 787.17 | 1.31×10^{-4} |
| 18 | 1535.34 | 4.33×10^{-4} | 998.17 | 2.48×10^{-3} | 1416.75 | 3.42×10^{-5} |
| 19 | 3215.28 | 9.02×10^{-5} | 1592.64 | 5.19×10^{-5} | 2965.08 | 7.52×10^{-6} |
| 20 | 4935.80 | 1.68×10^{-5} | 5543.13 | 3.43×10^{-6} | 5185.58 | 1.24×10^{-6} |

图 7 为不同压实度非饱和石灰改良黄土渗透系数与体积含水率之间的关系曲线,从图中可发现,不同压实度下非饱和石灰改良黄土的渗透系数都随体积含水率的增大而呈增大的趋势,压实度越大,相应的渗透系数越小。

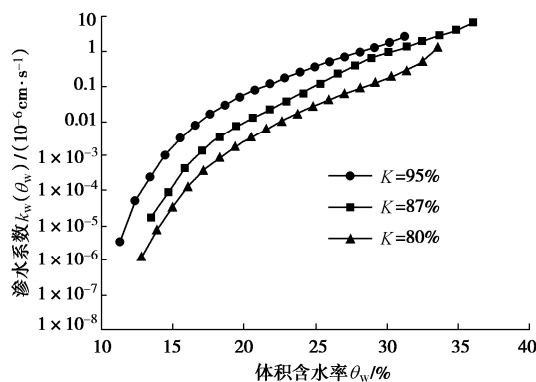


图 7 非饱和石灰改良黄土的渗透系数与体积含水率的关系曲线

Fig. 7 Curves of permeability coefficient and volumetric water content of unsaturated lime-modified loess

图 8 为不同压实度非饱和黄土渗透系数与吸力之间的关系曲线,从图中可看出,石灰改良黄土的渗透系数随着基质吸力的增大而减小,原因是,当吸力增大时,土体中气体逐渐取代孔隙中的水,导致土体中水的流动通道被气体挤占,从而使孔隙水流程的绕曲度增大。导致渗透系数减小。从图 8 还可以看出,随着压实度增大渗透系数逐渐小,因为随着压实度增大,土体大孔隙逐渐变小,水流通道缩小,故渗透系数随着压实度的增大而减小。

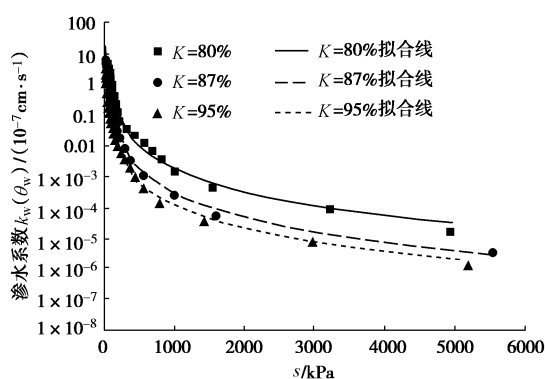


图 8 非饱和石灰改良黄土的渗透系数与吸力之间的关系曲线
Fig. 8 Relationship between permeability coefficient and suction force of unsaturated lime-modified loess

从图 8 还可以看出,非饱和渗透系数随基质吸力的增大而减小,并且随着基质吸力的增大,非饱和渗透系数呈先迅速减小后趋于稳定的趋势。在相同基质吸力下,压实度越大,渗透系数越小。

同时,在半对数坐标里,渗透系数与基质吸力之间可用幂函数表示,表达式为式(6),表 6 中给出了拟合参数 a 、 b 的值。

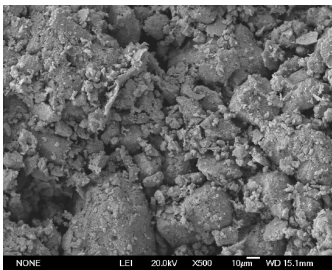
$$\ln(k_w(\theta_w)) = as^{-b} \quad (6)$$

式中 $k_w(\theta_w)$ 为渗透系数 (10^{-7} cm/s); s 为基质吸力 (kPa); a 、 b 为拟合参数。

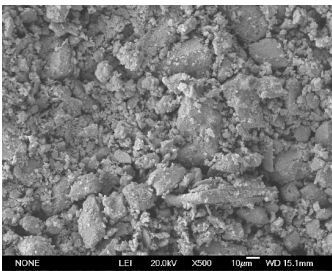
表 6 渗透系数与基质吸力关系曲线的拟合参数

| Table 6 Fitting values of permeability coefficient and matrix suction | | | |
|---|--|-------------|-------|
| 压实度 $K/\%$ | 压实度 $\rho_d/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | $a/10^{-3}$ | b |
| 80 | 1.32 | 4.48 | 2.466 |
| 87 | 1.44 | 3.13 | 2.669 |
| 95 | 1.57 | 3.07 | 2.771 |

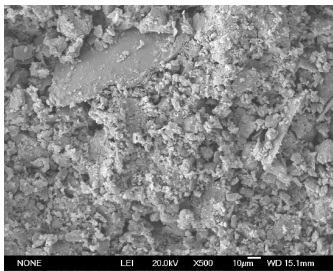
图 9 为非饱和石灰改良黄土在不同压实度下 SEM 图像,从图中可看出,随着压实度的增大,较大孔隙数量明显减小,较小孔隙数量增多,颗粒表面光滑度增强,颗粒与颗粒之间黏结得更好。对比压实度对石灰改良黄土非饱和渗透系数的影响,可以充分地解释,随着压实度的增大,孔隙减小,水流通过被阻碍,导致渗透系数减小。



(a) 压实度 $K=80\%$



(b) 压实度 $K=87\%$



(c) 压实度 $K=95\%$

图 9 不同压实度非饱和石灰改良黄土 SEM 图像

Fig. 9 SEM images of unsaturated lime-modified loess with different compaction degrees

4 结 论

(1) 利用非饱和固结仪, 测得压实黄土和石灰改良黄土的土水特征曲线, 体积含水率随基质吸力的增大而减小; 得到压实度对压实黄土和石灰改良黄土随着压实度的增大, 进气值越大。

(2) 采用 CCG 模型和 V-G 模型计算了不同压实度非饱和石灰改良黄土的渗水系数。压实黄土和石灰改良黄土的饱和渗水系数都随压实度的增大而减小, 且石灰改良黄土小于压实黄土。同一压实度下, 随着体积含水率的增大, 非饱和渗水系数增大; 随着基质吸力的增大, 非饱和渗水系数呈先迅速减小后趋于稳定的趋势, 两者可用幂函数关系表示。

(3) 通过扫描电镜图像从微观上分析了随着压实度的逐渐增加, 大孔隙减小, 小孔隙增多, 导致非饱和和渗水系数减小。

参考文献:

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1997. (LIU Zu-dian. Mechanics and Engineering of Loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [2] 胡再强, 梁志超, 吴传意, 等. 冻融循环作用下石灰改性黄土的力学特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊 1): 211 - 217. (HU Zai-qiang, LIANG Zhi-chao, WU Chuan-yi, et al. Experimental study on mechanical properties of lime modified loess under freeze-thaw cycle[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1): 211 - 217. (in Chinese))
- [3] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. 岩土工程学报, 1993(3): 9 - 20. (CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, WANG Yong-sheng. Experimental studies of lows of fluid motion suction and pore pressures in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993(3): 9 - 20. (in Chinese))
- [4] 徐永福, 兰守奇, 孙德安, 等. 一种能测量应力状态对非饱和土渗透系数影响的新型试验装置[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 160 - 164. (XU Yong-fu, LAN Shou-qi, SUN De-an, et al. New apparatus for measurement of stress effect on permeability of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 160 - 164. (in Chinese))
- [5] 李永乐, 刘翠然, 刘海宁, 等. 非饱和土的渗透特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3861 - 3865. (LI Yong-le, LIU Cui-ran, LIU Hai-ning, et al. Testing study on permeability characteeistics of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3861 - 3865. (in Chinese))
- [6] CHIU C F, NG C W W. A state-dependent elasto-plastic model for saturated and unsaturated soils[J]. Géotechnique, 2003, 53(9): 809 - 829.
- [7] SAMINGAN A S. Mechanical and hydraulic properties of compacted tropical residual soils[J]. Polymer Korea, 2009, 33(33): 97 - 103.
- [8] GARG N K, GUPTA M. Assessment of improved soil hydraulic parameters for soil water content simulation and irrigation scheduling[J]. Irrigation Science, 2015, 33(4): 247 - 264.
- [9] KUNZE R J, UEHARA G, GRAHAM K. Factors important in the calculation of hydraulic conductivity[J]. Soil Science Society of America Proceedings, 1968, 32(6): 760 - 765.
- [10] 李 萍, 李同录, 王 红, 等. 非饱和黄土土-水特征曲线与渗透系数 Childs & Collis-Geroge 模型预测[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 184 - 189. (LI Ping, LI Tong-lu, WANG Hong, et al. Soil-water characteristic curve and permeability perdition on Childs & Collis-Geroge model of unsaturated loess[J]. Soil and Rock Mechanics, 2013, 34(S2): 184 - 189. (in Chinese))
- [11] 高登辉, 陈正汉, 邢义川, 等. 净平均应力对非饱和重塑黄土渗水系数的影响[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 1): 51 - 56. (GAO Deng-hui, CHEN Zheng-han, XING Yi-chuan, et al. Influence of net mean stress on permeability coefficient of unsaturated remolded loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S1): 51 - 56. (in Chinese))
- [12] 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: 892 - 898.
- [13] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil water characteristic curve[J]. Can Geotech J, 1994, 31: 521 - 532.
- [14] FREDLUND D G, RAHARDJO. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. Wiley, 1993.

(编校: 明经平)