



## 生石灰改良黄土的微观机制试验研究

谢潇, 王璐瑶, 邓乐娟, 张国伟

### 引用本文:

谢潇, 王璐瑶, 邓乐娟, 等. 生石灰改良黄土的微观机制试验研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(6): 193–199.

XIE Xiao, WANG Luyao, DENG Lejuan, et al. Study on the microscopic mechanism of the loess improved by quicklime[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(6): 193–199.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.023>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 黄土抗剪强度与耐崩解性能综合改良试验研究

Improvement of shear strength and anti-disintegration performance of compacted loess

*煤田地质与勘探*. 2021, 49(4): 221–233 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.04.027>

### 黏粒含量对黄土抗剪强度影响试验

Effect of clay content on shear strength of loess

*煤田地质与勘探*. 2019, 47(3): 179–185 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.03.028>

### 黄土渗透和强度性能的改良优化

Improvement and optimization of permeability and strength properties of loess

*煤田地质与勘探*. 2020, 48(6): 195–200 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.06.026>

### 基于温度路径的冻融作用下黄土强度及微观结构研究

Study on the strength and microstructure of loess under freeze-thaw based on temperature path

*煤田地质与勘探*. 2021, 49(4): 242–249 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.04.029>

### 冻结温度对原状黄土物理力学性质的影响

Influence of freezing temperature on the physical and mechanical properties of undisturbed loess

*煤田地质与勘探*. 2016, 44(4): 105–109 <https://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2016.04.020>



移动阅读

谢潇, 王璐瑶, 邓乐娟, 等. 生石灰改良黄土的微观机制试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(6): 193-199. doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.023  
XIE Xiao, WANG Luyao, DENG Lejuan, et al. Study on the microscopic mechanism of the loess improved by quicklime[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(6): 193-199. doi: 10.3969/j.issn.1001-1986.2021.06.023

## 生石灰改良黄土的微观机制试验研究

谢 潇<sup>1,2,3</sup>, 王璐瑶<sup>1,2,3</sup>, 邓乐娟<sup>4</sup>, 张国伟<sup>5</sup>

(1. 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710075; 2. 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安 710075; 3. 陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安 710075; 4. 西安市地质环境监测站, 陕西 西安 710068; 5. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 为探究石灰掺量对黄土强度的影响规律及其微观机制, 采用不同比例的生石灰对黄土进行改良。开展了直剪试验、压汞试验及扫描电镜测试, 定性和定量分析素黄土及不同石灰掺量改良黄土的强度特性和微观结构变化规律, 并对石灰改良黄土的微观机理进行较为深入的分析。结果表明: 石灰改良黄土的抗剪强度参数随着石灰掺量的增大出现先增大再减小的变化规律, 在石灰掺量约为 8% 时, 其黏聚力和内摩擦角达到最大值; 石灰的掺入使黄土骨架颗粒之间及其表面附着的胶结物逐渐增多, 孔隙被胶结物质填充, 土体中的不稳定孔隙逐渐减少, 整体性增强; 但当石灰掺量过大时, 多余的石灰会堆积于团粒之间, 影响团粒之间的胶结。石灰改良黄土强度提高的原因是石灰水化反应生成的胶结物质增强了土颗粒之间的胶结程度, 增大颗粒间的相互摩擦, 使土体结构更加稳定, 提高土体强度; 石灰掺量过高时, 改良黄土抗剪强度降低是因为过量的石灰影响了土颗粒之间的胶结作用。研究成果既是对黄土强度特性及微观结构理论研究的丰富与充实, 又可以为改良黄土工程设计的相关参数选取提供参考依据。

**关键词:** 黄土; 生石灰; 微观结构; 抗剪强度

**中图分类号:** U213.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2021)06-0193-07 **语音讲解**



### Study on the microscopic mechanism of the loess improved by quicklime

XIE Xiao<sup>1,2,3</sup>, WANG Luyao<sup>1,2,3</sup>, DENG Lejuan<sup>4</sup>, ZHANG Guowei<sup>5</sup>

(1. Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 2. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710075, China; 3. Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center, Xi'an 710075, China; 4. Xi'an Geological Environmental Monitoring Station, Xi'an 710068, China; 5. China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To investigate the influence of lime content on loess strength and its microscopic mechanism, different proportions of lime were used to improve loess. Through direct shear test, mercury intrusion porosimetry and scanning electron microscopy, the strength characteristics and microstructure changes of compacted loess and modified loess with different lime contents were analyzed qualitatively and quantitatively, and the microscopic mechanism of lime-improved loess was analyzed in depth. The results show that the shear strength parameters of lime-improved loess increases first and then decreases with the increase of lime contents. The cohesive force and internal friction angle reach the maximum when the lime content is about 8%. The incorporation of lime gradually increases the cements between and on the surface of the skeleton particles. As the pores are filled with cements, the unstable pores gradually decrease, and the integrity is enhanced. But with too large lime content, the excess lime will accumulate between the agglomerates, which will affect the cementation. The reason for the increasing strength of lime-improved loess is that the cementing material generated by the lime hydration reaction enhances the degree of cementation between soil particles, resulting in a larger friction between the particles, a more stable soil structure, and greater soil strength. How-

ever, the excessive lime will reduce the cementation between soil particles, thus reducing the shear strength of the improved loess. The research results not only enrich the theoretical research on the strength characteristics and microstructure of loess, but also provide reference for the selection of engineering design parameters of improved loess.

**Keywords:** loess; quicklime; microstructure; shear strength

随着我国基础设施建设的迅速发展,在水利、交通、市政等工程建设中遇到与特殊土工程性质相关的问题也越来越多。通常情况下,原状土不能满足路基、地基等的强度和变形要求,需要对其进行改良加固,而化学改良是解决这一问题最经济的方法<sup>[1]</sup>。化学改良方法中,目前最常用的是石灰和水泥<sup>[2-3]</sup>。石灰来源广泛、易于就近取材、造价较低且环境友好,在世界各地软土等的工程性能改善方面都得到了广泛应用<sup>[4]</sup>。

迄今为止,石灰改良土方面的研究已取得很多重要成果。张玉等<sup>[5]</sup>对素黄土和粉煤灰-石灰改良黄土开展物理力学特性研究,探讨改良及压实黄土的应力-应变及强度的变化规律;杨爱武等<sup>[6]</sup>以石灰作为主剂对天津滨海软土进行改良,揭示了石灰固化土的宏观力学性质及其微观机理;张豫川等<sup>[7]</sup>对石灰改良黄土进行了抗剪强度和渗透性测试,结合微结构特征分析改良黄土渗透性改变的原因;王立峰等<sup>[8]</sup>在三轴试验的基础上分析了改良石灰土强度和变形破坏特征,并建立其本构关系模型,验证了模型的可靠性和适用性;D. O. A. Osula<sup>[9]</sup>提出石灰和水泥改良红土的改良效果受龄期的影响。石灰掺量较低时,石灰主要起稳定作用,会使土的塑性、膨胀性降低,初步具有水稳性,密实度和强度得到稳定。随着石灰掺量的增大,强度和稳定性均提高。但石灰掺量超过一定数量后,过多的石灰将沉积在土孔隙中而不参加反应,将导致石灰土强度降低<sup>[10]</sup>。从上述研究成果可见,石灰改良土的强度、变形、渗透性等都会发生明显改善。但石灰掺量并非越多越好,而是存在一个最优值。目前的研究主要集中在石灰对土性质的改良效果上,在石灰掺量对土性影响的微观机制方面有待深入研究。

土的微观结构是研究其宏观工程性质的基础<sup>[11-12]</sup>,研究不同石灰掺量对改良土微观结构的影响,及其与改良土工程性质之间的联系,有利于进一步认识石灰改良土的机理,并且为石灰改良土的工程应用提供理论依据。笔者以陕西省延安地区的黄土为研究对象,加入不同掺量石灰进行改良,对比分析改良黄土的抗剪强度特性,并借助扫描电镜和压汞试验定性和定量分析了改良黄土的微观结构变化规律,以期探究石灰改良黄土的微观作用机制,为黄土工程设计提供参考。

## 1 试验材料及试验方案

### 1.1 试验材料

实验黄土取自陕西省延安市宝塔区羊圈沟村,

为黄色粉土,按照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》<sup>[13]</sup>进行土样的基本物理指标实验。测得其土粒比重为 2.72,黏粒、粉粒、砂粒质量分数分别为 3.71%、66.96%、29.33%,液限为 27.3%,塑限为 12.9%,属于粉壤土。实验所用生石灰中氧化钙的质量分数在 80%左右。

### 1.2 试验样品制备

将土样风干过 2 mm 筛后,配制含水率为 13%(接近塑限),随后在其中分别掺入 2%、5%、8%、11%的石灰,控制干密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup>,利用液压千斤顶压实法进行试验样品的制备(图 1),压实样品的尺寸为  $\phi 61.8$  mm $\times$ 20 mm。将制好的土样用保鲜膜包裹,置于保湿器中养护 28 d,随后对土样分别进行压汞、扫描电镜及直剪试验。其中,扫描电镜试验的试样取干燥土样中间扰动最小的部分,切成横截面为 5 mm $\times$ 5 mm 的长方体,从中间掰开,将新鲜面作为观察面,其表面采取镀金处理。压汞试样是将土样削成直径 1 cm 以内、长度不超过 2.5 cm 的柱子并进行风干脱水处理。

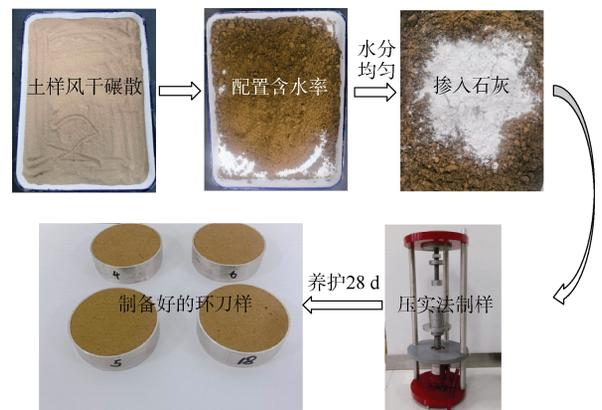


图 1 压实样品制备过程

Fig.1 Compacted specimens preparation procedure

### 1.3 试验方法

参考 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》<sup>[13]</sup>,在样品养护完成后,从土体直接剪切强度角度来研究石灰改良黄土的效果。每个石灰掺量选取 4 个环刀样,利用直剪仪进行抗剪强度试验,试验方法为快剪试验,剪切速率设定为 0.8 mm/min,分别施加竖向压力 50、100、200、400 kPa。待剪切盒与百分表接触后开始计数,每隔 10 s 测记一次,当百分表指针静止不变或者发生回弹时,即认为试样发生剪切破坏,可终止试验。

选取较为平整的试样断面,利用 FEI Quanta 400

FEG 型环境扫描电子显微镜系统进行显微观察, 拍摄放大倍数为 2 000 倍的显微结构照片。

采用 AutoPore V 9600 全自动压汞仪(孔径测量范围 0.003~1 100  $\mu\text{m}$ )进行土样的孔隙分布(MIP)测试。

### 2 石灰改良黄土的强度特征

图 2 为石灰改良黄土试样的典型剪应力-剪切位移曲线。从图 2 可以看出, 掺入石灰后, 改良黄土的剪应力-剪切位移曲线形状发生明显变化, 曲线上出现明显峰值点, 并且在峰值点后仍有较高的残余强度。说明石灰的掺入使改良土的脆性增强, 改良土的强度也有明显提高。由石灰改良黄土的抗剪强度指标(图 3)可以看出, 随着石灰掺量的增加, 黄土的抗剪强度参数黏聚力  $c$  及内摩擦角  $\varphi$  呈现先增大再减小的变化规律, 约在石灰掺量为 8% 时, 参数  $c$  及  $\varphi$  达到最大值, 即 266.68 kPa 和 37.89°, 较素黄土提高了约 5 倍。

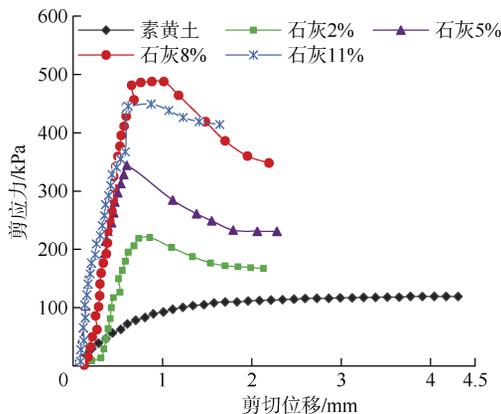


图 2 不同石灰掺量改良黄土试样的剪应力-剪切位移曲线

Fig.2 Shear stress-shear displacement curves of modified loess with different lime contents

### 3 石灰改良黄土的孔隙分布特征

压汞法的测试结果见表 1。通过压汞法的测试结果, 可利用孔隙密度分布曲线和孔隙累积分布曲线来描述孔隙的分布情况<sup>[14]</sup>。孔隙累积分布曲线表述的是大于某孔径的所有孔隙体积累加量与孔径之间的关系。据压汞仪的测试原理, 测试得到的汞累积压入体积表示大于某孔径的所有孔隙体积累加量<sup>[15]</sup>。通过对孔隙累积分布曲线进行求导, 可得到某一孔径对应的分布密度, 得到孔隙密度分布曲线<sup>[14]</sup>, 该曲线反映了不同孔径对应的孔隙体积大小。对压汞法测试数据进行处理得到不同石灰掺量黄土的孔隙累积分布曲线及孔隙密度分布曲线如图 4—图 5 所示。

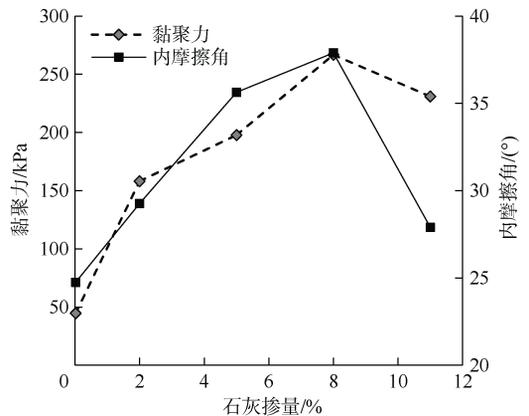


图 3 不同石灰掺量改良黄土的抗剪强度参数变化  
Fig.3 Changes of shear strength parameters of modified loess with different lime contents

从表 1 可以看出, 由压汞试验测得的孔隙率均小于土体的孔隙率, 且当石灰掺量较大(8%、11%)时, 两者相差较大。因土体内部存在一些汞无法压入的封闭孔隙以及微小孔隙等, 压汞试验推算得到的孔隙率应略小于土体实际孔隙率<sup>[16]</sup>。加入石灰后, 改良黄土的比表面积显著增大, 当石灰掺量为 2%~8% 时, 改良黄土比表面积的增加幅度较大。

表 1 压汞测试结果  
Table 1 Results of mercury intrusion porosimetry

石灰掺量/%	孔隙率/%	压汞法孔隙率/%	BET 比表面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	表观密度/( $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ )	平均孔径/nm
0	44.85	42.04	3.996	2.635 8	275.45
2	44.65	41.54	4.367	2.568 4	253.40
5	44.44	43.77	7.423	2.695 8	155.62
8	44.03	38.49	11.492	2.453 4	88.77
11	43.61	33.05	12.710	2.221 6	69.92

从图 4 的孔隙累积分布曲线可以看出, 约在孔径 1~20  $\mu\text{m}$  范围内, 随着孔径的减小, 汞的压入量变化显著, 说明素黄土及石灰改良黄土的孔径主要集中在该尺寸范围内, 也即素黄土及石灰改良黄土的孔隙分布为单峰孔隙结构。由图 4 还可以看出, 当石灰掺量为 2% 及 5% 时, 改良土与素黄土的孔隙累积分布曲线变化不大, 而当石灰掺量增大到 8% 及 11% 时, 孔隙累积分布曲线明显降低。

图 5 为素黄土及石灰改良黄土的孔隙密度分布曲线, 由图 5 可以看出, 其孔隙分布均为单峰孔隙结构。随着石灰掺量的增加, 改良黄土的孔隙平均直径减小, 孔径分布曲线的峰值点左移, 峰值对应的孔径大小分别为 8.9、7.2、7.2、6.0、3.1  $\mu\text{m}$ , 峰值对应的孔径分布密度分别为 0.392 2、0.482 9、0.482 4、0.303 4、0.255 7  $\text{mL/g}$ 。当石灰掺量为 8% 和 11% 时, 峰值对应的孔径分布密度明显降低。

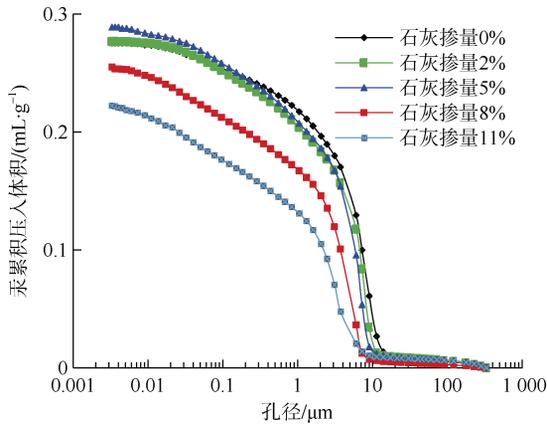


图 4 不同掺量石灰改良黄土的孔隙累积分布曲线  
Fig.4 Cumulative pore distribution curves of improved loess with different lime contents

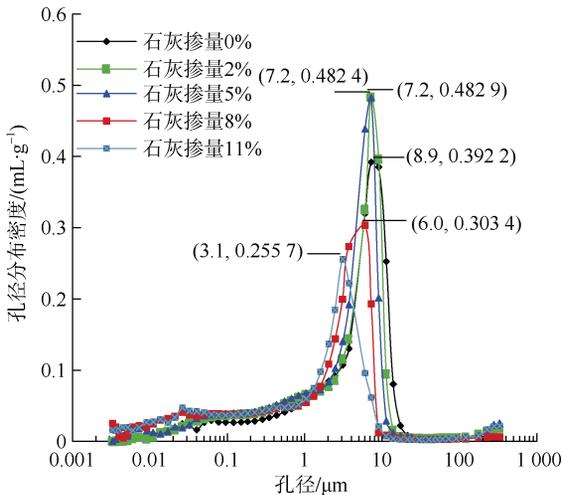


图 5 不同掺量石灰改良黄土的孔隙密度分布曲线  
Fig.5 Pore size distribution curves(PSD) of improved loess with different lime contents

为更进一步分析石灰掺量对改良黄土孔隙分布情况的影响，根据马富丽等<sup>[17]</sup>的分类标准，将黄土孔隙根据孔径大小分为微孔隙(<2 μm)、小孔隙(2~5 μm)、中孔隙(5~20 μm)、大孔隙(>20 μm)4类，得到不同石灰掺量时改良黄土的各类孔隙占比变化，如图 6 所示。分析图 6 可发现，素黄土及石灰改良黄土的大孔隙占比极少，且其占比基本没有变化。随着石灰掺量的增加，改良黄土中的中孔隙减小，素黄土中孔隙占比为 43.77%，而当石灰掺量达到 11%时，改良黄土中的中孔隙占比仅为 5.49%，较素黄土减小了约 87%；改良黄土中的微孔隙和小孔隙占比增加，相较于素黄土，改良黄土中的微孔隙增加了 17%~84%，小孔隙增加了 28%~75%。这是因为石灰掺入黄土中，发生一系列物理化学反应，生成胶凝状结构物质，附着在颗粒表面或者填充部分孔隙，使中孔隙变成微小孔隙，导致改良黄土中的中孔隙占比减少，微小孔隙占比增加，孔径分布

趋于均匀。有研究发现<sup>[18]</sup>，材料的孔隙分布与其比表面积关系密切，不同孔径对比表面积的贡献不同，比表面积越大，孔径分布越窄，小孔隙和微孔隙越多，平均孔径越小。石灰改良黄土的比表面积和孔径分布也符合这一研究结果。

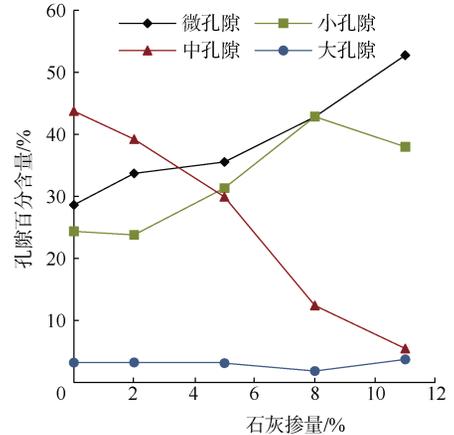


图 6 不同掺量石灰改良黄土的各类孔隙百分比变化  
Fig.6 Changes of percentage of various pores in improved loess with different lime contents

#### 4 扫描电镜结果分析

素黄土和不同石灰掺量改良黄土在放大 2 000 倍时的显微结构照片如图 7 所示。由图 7 可知，素黄土的骨架颗粒以单粒为主，颗粒之间的界限清晰，其骨架主体为粗粉粒，有少量的胶结物附着在土骨架颗粒之上，极少数位于孔隙中；素黄土可以观察到较多的镶嵌孔隙，且有一些结构极不稳定的支架孔隙，孔隙内的胶结物填充少，孔隙连通性好。

随着石灰的掺入，改良黄土的微结构发生明显变化。当石灰掺量较少时(2%)，这种变化尚不太明显，此时改良黄土土颗粒的轮廓仍比较清晰，孔隙连通性较好，骨架颗粒之间及其表面附着的胶结物略有增多，架空孔隙减少。当石灰掺量增大到 5%以上时，骨架颗粒的轮廓变得模糊；当石灰掺量达到 8%以上时，很难清楚地看到颗粒轮廓。从掺入石灰后的改良黄土微结构图片可以看出，土颗粒表面附着大量胶结物质，土颗粒被生石灰水化形成的胶结物质包裹，土体孔隙也多被胶结物质填充，架空孔隙逐渐消失，胶结物孔隙逐渐增多，同时孔隙的连通性逐渐变差。因而，当石灰掺量达到 8%及 11%时，由压汞法测得的孔隙率与土体实际孔隙率相差较多(表 1)。对比石灰掺量为 8%和 11% 的改良黄土微结构图片可以看出，当石灰掺量增大到 11%时，石灰水化形成的胶结物团聚程度增加，堆积于土颗粒表面及骨架颗粒中间，其厚度较大，有些甚至影响了土颗粒之间的胶结作用。

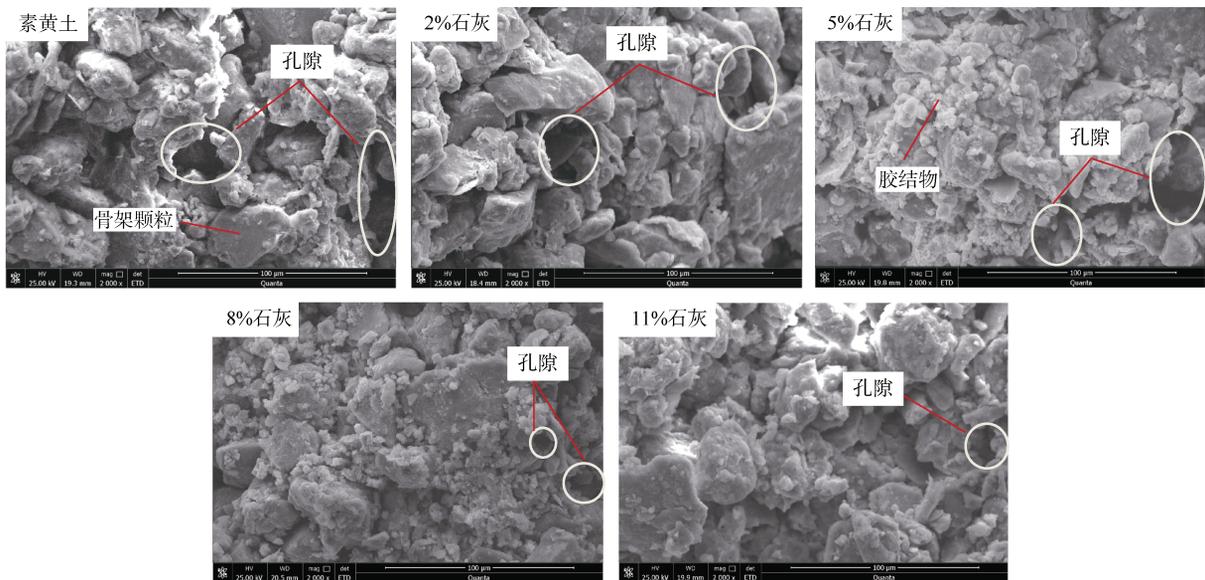


图 7 素黄土及石灰改良黄土显微结构

Fig.7 Microstructure of plain loess and lime-improved loess

## 5 石灰改良黄土的微观机制分析

土的工程性质与其矿物成分、结构、颗粒组成等因素密切相关<sup>[19-22]</sup>。加入生石灰后,生石灰在土中与水、CO<sub>2</sub>及土中的硅酸盐矿物等发生反应,改变土的颗粒、孔隙大小分布情况及土颗粒之间的连接方式<sup>[23-24]</sup>,使改良黄土的工程性质发生了变化。

由扫描电镜及压汞测试的结果可知,随着生石灰掺量的增大,土体中一些大中孔隙逐渐被胶结物质填充及包裹,不稳定的架空孔隙逐渐减少,大、中孔隙占比减少而小孔隙和微孔隙占比逐渐增加,土颗粒之间的排列趋于紧密,且由于石灰水化反应生成的胶结物质附着于土颗粒表面及填充在孔隙之间,使土颗粒之间的胶结程度增强<sup>[25]</sup>,提高了土的板体性,土的脆性增强。同时,由于胶结物的附着,土颗粒表面变得更加粗糙,增大了颗粒间的相互摩擦,使土体结构更加稳定,增强了土体的强度<sup>[5]</sup>。但当黄土中的石灰掺量达到 11%时,由于石灰掺量过多,一定程度上影响了土颗粒之间的胶结作用,反而使得改良黄土的抗剪强度略有降低。谈云志等<sup>[26]</sup>利用偏高岭土与石灰协同处置团状红黏土,通过不同掺量处置土的无侧限抗压强度及扫描电镜测试也得出过量偏高岭土会影响团粒的胶结,起到消极作用,导致处置土无侧限抗压强度反而降低的结论。

## 6 结论

**a.** 石灰的掺入提高了黄土的抗剪强度,但其并非随着石灰掺量的增加一直增大,而是在某个掺入量时强度达到峰值。当石灰掺量达到 8%左右时,改

良黄土的抗剪强度达到最大,此时黏聚力较素黄土提高约 5 倍。

**b.** 掺入石灰会对改良黄土的孔隙分布特征产生影响,随着石灰掺量的增加,改良黄土中的中孔隙减小,微孔隙和小孔隙占比增加,且比表面积显著增大。改良黄土中的中孔隙占比较素黄土最多减小了约 87%;相较于素黄土,改良黄土中的微孔隙增加 17%~84%,小孔隙增加 28%~75%。

**c.** 石灰掺入黄土中发生一系列物理化学反应,改变土颗粒之间的连接方式。素黄土颗粒骨架界限较为明显,但胶结连接少。当石灰掺量从 2%增大到 8%时,骨架颗粒之间及其表面附着的结晶胶结产物逐渐增多,土颗粒之间的孔隙被胶结物质填充,土体中不稳定孔隙逐渐减少,整体性增强。

**d.** 石灰改良土强度提高的原因是石灰水化反应生成的胶结物质增强了土颗粒之间的胶结程度,提高土的板体性,使土的脆性增强。由于胶结物的附着,土颗粒表面变得更加粗糙,增大了颗粒间的相互摩擦,使土体结构更加稳定,增强了土体强度。但石灰掺量过大会影响土颗粒之间的胶结作用,反而使得改良黄土的抗剪强度略有降低。

## 参考文献(References)

- [1] LATIFI N, RASHID A S A, SIDDIQUA S, et al. Strength measurement and textural characteristics of tropical residual soil stabilised with liquid polymer[J]. Measurement, 2016, 91: 46-54.
- [2] 杨爱武, 闫澍旺, 杜东菊, 等. 碱性环境对固化天津海积软土强度影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2930-2934. YANG Aiwu, YAN Shuwang, DU Dongju, et al. Experimental

- study of alkaline environment effects on the strength of cement soil of Tianjin marine soft soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9): 2930–2934.
- [3] DHAR S, HUSSAIN M. The strength and microstructural behavior of lime stabilized subgrade soil in road construction[J]. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 15(4): 471–483.
- [4] 王章琼, 白俊龙, 叶张颜. 过量石灰对细粒土改良效果“负效应”机理的宏-细观试验研究[J]. *武汉工程大学学报*, 2020, 42(3): 316–320.
- WANG Zhangqiong, BAI Junlong, YE Zhangyan. Mechanism of negative effect of excessive lime addition on improvement of fine grained soil by macro-microscopic test[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2020, 42(3): 316–320.
- [5] 张玉, 何晖, 曾志英, 等. 粉煤灰-石灰改良黄土与压实黄土强度特性对比分析[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(8): 3265–3273.
- ZHANG Yu, HE Hui, ZENG Zhiying, et al. Comparison of strength characteristics of fly ash-lime improved loess and compacted loess[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(8): 3265–3273.
- [6] 杨爱武, 王韬, 许再良. 石灰及其外加剂固化天津滨海软土的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2015, 23(5): 996–1004.
- YANG Aiwu, WANG Tao, XU Zailiang. Experimental study on lime and its additional agent to cure Tianjin marine soft soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(5): 996–1004.
- [7] 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(增刊 2): 170–176.
- ZHANG Yuchuan, YAO Yongguo, ZHOU Hong. Experimental study of shear strength and permeability of improved loess with long age[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(Sup.2): 170–176.
- [8] 王立峰, 谢锡荣, 王甜. 石灰改良土的力学特性及本构模型研究[J]. *科技通报*, 2019, 35(11): 187–192.
- WANG Lifeng, XIE Xirong, WANG Tian. Study on mechanical properties and constitutive model of remolding lime soil[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2019, 35(11): 187–192.
- [9] OSULA D O A. A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite[J]. *Engineering Geology*, 1996, 42(1): 71–81.
- [10] 杨广庆, 管振祥. 高速铁路路基改良填料的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(6): 682–685.
- YANG Guangqing, GUAN Zhenxiang. Experimental study on improved soil for high-speed railway subgrade[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(6): 682–685.
- [11] CUI Zhendong, JIA Yajie. Analysis of electron microscope images of soil pore structure for the study of land subsidence in centrifuge model tests of high-rise building groups[J]. *Engineering Geology*, 2013, 164: 107–116.
- [12] 罗浩, 伍法权, 常金源, 等. 马兰黄土孔隙结构特征: 以赵家岸地区黄土为例[J/OL]. *工程地质学报*, 2021: 1–7[2021-10-22]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2014-0392>
- LUO Hao, WU Faquan, CHANG Jinyuan, et al. Pore characteristics of Malan Loess: A case study of Zhaojia'an area loess[J/OL]. *Journal of Engineering Geology*, 2021: 1–7[2021-10-22]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2014-0392>
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration of Market Supervision and Administration. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [14] 谈云志, 喻波, 刘晓玲, 等. 压实红黏土失水收缩过程的孔隙演化规律[J]. *岩土力学*, 2015, 36(2): 369–375.
- TAN Yunzhi, YU Bo, LIU Xiaoling, et al. Pore size evolution of compacted laterite under desiccation shrinkage process effects[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(2): 369–375.
- [15] 井彦林, 王昊, 陶春亮, 等. 非饱和黄土的接触角与孔隙特征试验[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(5): 157–162.
- JING Yanlin, WANG Hao, TAO Chunliang, et al. Experimental study on contact angle and pore characteristics of unsaturated loess[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(5): 157–162.
- [16] WAI N C W, HAMED S, BELAL H S K, et al. Water retention and volumetric characteristics of intact and re-compacted loess[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 53(8): 1258–1269.
- [17] 马富丽, 白晓红, 王梅. 黄土微观结构与湿陷性的定量分析[C]//首届中国中西部地区土木建筑学术年会论文集: 建设工程安全理论与应用. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2011: 402–409.
- MA Fuli, BAI Xiaohong, WANG Mei. Quantitative analysis of microstructure and collapsibility of loess[C]//First Annual Conference on Civil Architecture in Midwestern China. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011: 402–409.
- [18] 刘煜, 孟令县. 多孔氧化钙孔结构特征的数学描述与分析[J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(7): 145–149.
- LIU Yu, MENG Lingxian. The mathematical description and analysis on the characteristics of pore structure of porous calcium oxide[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(7): 145–149.
- [19] 王淑云, 鲁晓兵, 时忠民. 颗粒级配和结构对粉砂力学性质的影响[J]. *岩土力学*, 2005, 26(7): 1029–1032.
- WANG Shuyun, LU Xiaobing, SHI Zhongmin. Effects of grain size distribution and structure on mechanical behavior of silty sands[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(7): 1029–1032.
- [20] 房营光. 土体力学特性尺度效应的三轴抗剪试验分析[J]. *水利学报*, 2014, 45(6): 742–748.
- FANG Yingguang. Experimental investigation on the size effect of soil mechanic characteristics by tri-axial shear test[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(6): 742–748.
- [21] 梁建勋. 矿物成分及粒径对土力学特性影响的试验与研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- LIANG Jianxun. Experiment and research on the influence of

- mineral composition and particle size on soil mechanical properties[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [22] 粟华忠, 和法国, 邓津, 等. 兰州新区黄土微观参数与剪切强度  $c$ 、 $\varphi$  关联拟合分析[J]. 地震工程学报, 2020, 42(2): 521–528.  
SU Huazhong, HE Faguo, DENG Jin, et al. Relationship between microscopic parameters and shear strength  $c$ ,  $\varphi$  of loess in Lanzhou new district[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 521–528.
- [23] 徐实, 杨有海, 耿焯, 等. 石灰改性黄土的强度特性试验研究[J]. 兰州交通大学学报(自然科学版), 2006, 25(6): 97–100.  
XU Shi, YANG Youhai, GENG Xuan, et al. Experimental study on strength property of lime improved loess[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University(Natural Sciences), 2006, 25(6): 97–100.
- [24] 王章琼, 高云, 沈雷, 等. 石灰改性红砂岩残积土工程性质试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 416–421.  
WANG Zhangqiong, GAO Yun, SHEN Lei, et al. Engineering properties of lime-modified red sandstone residual soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 416–421.
- [25] 祝艳波, 李红飞, 巨之通, 等. 黄土抗剪强度与耐崩解性能综合改良试验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 221–233.  
ZHU Yanbo, LI Hongfei, JU Zhitong, et al. Improvement of shear strength and anti-disintegration performance of compacted loess[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 221–233.
- [26] 谈云志, 占少虎, 胡焱, 等. 石灰-红黏土互损行为与偏高岭土减损机制[J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 104–112.  
TAN Yunzhi, ZHAN Shaohu, HU Yan, et al. Behavior of lime-laterite interaction and anti-erosion mechanism of Metakalinite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1): 104–112.

(责任编辑 周建军)

## (上接第 192 页)

- [20] 耿琳, 唐浩, 罗军, 等. 掺煤矸石高速铁路路基填料冻胀特性试验研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(2): 41–45.  
GENG Lin, TANG Hao, LUO Jun, et al. Experimental study on frost-heaving characteristics of high speed railway subgrade fillers mixed with coal gangue[J]. Railway Engineering, 2019, 59(2): 41–45.
- [21] 杨闯, 唐朝晖, 柴波, 等. 煤矸石击实特性试验[J]. 地质科技情报, 2017, 36(3): 230–234.  
YANG Chuang, TANG Zhaohui, CHAI Bo, et al. Compaction characteristics of coal gangue[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(3): 230–234.
- [22] 杨果林, 高礼, 杜勇立. 不同掺土量格宾网加筋煤矸石的残余强度试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(12): 5060–5067.  
YANG Guolin, GAO Li, DU Yongli. Test study on residual strength characteristics between coal gangue and gabion mesh mixed with different qualities of soil[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(12): 5060–5067.

(责任编辑 周建军)