

# 偏高岭土改善灰土强度的试验研究

刘春龙<sup>1</sup>, 刘乃飞<sup>2,3</sup>, 刘奉银<sup>1</sup>, 杨珺琰<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;  
3. 西安建筑科技大学 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 灰土被广泛用作建筑物和构筑物的基础, 本文通过添加偏高岭土来进一步改善其力学性能, 以期为改性灰土的应用提供试验依据. 灰土强度受其组成原料如石灰含量、含水率和粘土性质的影响较大, 通过控制石灰和偏高岭土含量以及水固比等因素, 研究偏高岭土的加入对常规灰土材料抗压强度和软化系数的影响, 并通过对含水率变化分析和扫描电镜揭示其内在机理. 根据试验结果的对比分析, 发现偏高岭土不仅能改善灰土材料的强度, 明显缩短其强度形成时间, 而且明显的提高灰土试样的软化系数. 无论添加偏高岭土与否, 试样抗压强度随水固比、石灰含量和偏高岭土含量均存在一个最佳配比. 偏高岭土与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和水发生化学反应, 反应产物致使灰土试样的结构更加致密, 从而改善了试样的力学性能.

**关键词:** 偏高岭土; 灰土; 火山灰反应; 抗压强度; 细观结构

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)02-0206-06

## Study on the strength of lime-soil improved by metakaolin

LIU Chunlong<sup>1</sup>, LIU Naifei<sup>2,3</sup>, LIU Fengyin<sup>1</sup>, YANG Junlong<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering,  
Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The lime-soil is widely used as the foundation of buildings and structures. In this paper, the addition of metakaolin is used to further improve its mechanical properties, to provide experimental basis for the application of modified lime soil. The strength of lime soil is greatly affected by its constituent materials such as lime content, water content and clay properties. The effects of the addition of metakaolin on the compressive strength and softening coefficient of lime soil materials are studied by controlling the contents of lime and metakaolin and water-solid ratio. The intrinsic mechanism is revealed by analyzing the moisture content and scanning electron microscopy (SEM) photos. Regardless of the addition of metakaolin, the compressive strength of the sample has an optimal ratio with water-solid ratio, lime content and metakaolin contents. The reaction products of metakaolin and lime makes the structure of the lime soil sample more compact, in improving the mechanical properties of the sample.

**Key words:** metakaolin; lime-soil; pozzolanic reaction; compressive strength; meso-structure

石灰具有生产工艺简单、成本低廉等特点, 作为一种建筑材料在我国的土木工程建设中应用非常广泛<sup>[1-2]</sup>, 尤其是在加固土的使用方面<sup>[3-4]</sup>, 作为改良土体力学特性的材料广泛应用于构筑物的基层或者垫层<sup>[5]</sup>, 特别是用来加固过湿土效果尤为显著<sup>[6-7]</sup>. 土中掺入石灰后, 两者之间会产生强烈的相互作用, 主要为离子交换作用、碳化作用和水化作用<sup>[8]</sup>. 而灰土的强度主要来自于石灰与黏土

的水化作用, 由于黏土矿物中含有一定的活性  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 在常温潮湿条件下, 能与吸附在黏土颗粒表面的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  缓慢的发生化合反应. 初始产物为不定成分的胶凝物质, 而后逐渐形成胶合的水化硅酸钙(C-S-H), 再经过较长的时间, 形成结晶结构使土的强度和稳定性有所提高. 石灰虽然具有良好的加固效果, 但由于黏土中的活性  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量有限, 导致形成的灰土材料的硬

收稿日期: 2018-03-15 修改稿日期: 2019-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(41372304, 10872162), 西安建筑科技大学人才科技基金项目(RC1804), 西安建筑科技大学自然科学专项(ZR18017)

第一作者: 刘春龙(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土力学试验研究方面的工作. E-mail: lchlong1989@126.com

通讯作者: 刘乃飞(1985—), 男, 讲师, 主要从事低温裂隙岩体多场耦合方面的研究工作. E-mail: liunaifei1985@126.com

化速度慢, 强度不足<sup>[9]</sup>. 偏高岭土作为一种人工火山灰材料, 主要是以高岭土( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )为原料, 在适当温度下经脱水形成的无水硅酸铝( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , 简写为  $\text{AS}_2$ ), 从而有效的提高了活性  $\text{SiO}_2$  和活性  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量<sup>[10]</sup>, 在有水的条件下与石灰发生火山灰反应, 生成与水泥类似的水化产物水化硅酸钙( $\text{C-S-H}$ )<sup>[11]</sup>, 从而可以提高灰土的力学性能<sup>[12]</sup>.

目前, 国内外许多专家对火山灰反应的产物进行了大量的研究<sup>[13-15]</sup>. 通过粉晶衍射、红外光谱、拉曼光谱以及热分析等手段研究发现, 火山灰反应的产物主要包括托勃莫来石<sup>[16]</sup> ( $\text{CSH-I}$ )、水化钙铝黄长石( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ )、水化铝酸四钙( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ )和水化铝酸三钙( $\text{C}_3\text{AH}_6$ ), 其中托勃莫来石( $\text{CSH-I}$ )、水化钙铝黄长石( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ )对灰土材料的强度均有贡献<sup>[17]</sup>. 鉴于偏高岭土的这些优良性能, 其广泛应用于改善水泥砂浆或混凝土的性能. 王林浩等<sup>[18]</sup>研究表明, 偏高岭土能够显著提高水泥土的强度, 尤其是早期强度. 朱伶俐等<sup>[19]</sup>通过试验研究表明, 偏高岭土可以提高喷射混凝土的阻抗值. 姜广等<sup>[20]</sup>通过试验表明偏高岭土可以提高砂浆的抗压强度.

然而, 却鲜有学者开展偏高岭土对灰土材料力学性能影响的研究. 本文拟从力学试验角度, 研究添加偏高岭土的灰土材料, 在不同水固比和不同偏高岭土含量下的力学特性, 并通过对含水率变化的分析以及扫描电镜细观角度揭示其内在机理. 此外, 还以高岭土中添加石灰的灰土材料作为对照试验. 本研究一定程度上弥补了该领域的不足, 并可为实际工程应用提供理论依据.

# 1 试验方案

## 1.1 试验材料与试剂

高岭土购于石家庄辰星实业有限公司, 氧化钙(分析纯)购于天津市致远化学试剂有限公司, 偏高岭土(分析纯)购于天津市北辰方正试剂厂, 蒸馏水产自西安市东关蒸馏水厂.

高岭土和偏高岭土的颗分曲线如图 1 所示, 其中  $w_d$  为试验材料的质量百分数,  $d$  为试验材料的颗粒粒径.

高岭土颗粒的相对密度  $d_s$ 、天然含水率  $w$ 、塑限  $w_p$ 、液限  $w_L$ 、塑性指数  $I_p$  等如表 1 所示. 根据击实试验得出, 高岭土的最大干密度为  $1.63\text{ g/cm}^3$ , 对应的最优含水率为  $19.5\%$ . 偏高岭土的化学成分及质量分数如表 2 所示.

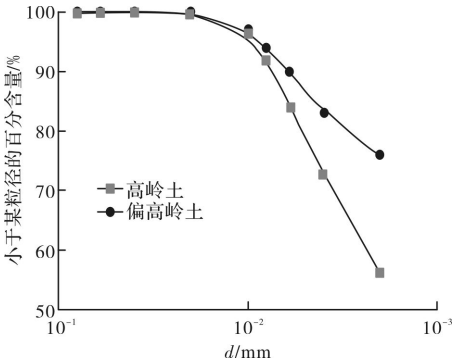


图 1 颗分曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves

表 1 高岭土的物理指标

Tab. 1 Physical parameters of kaolin clay

	$d_s$	$w$	$w_p$	$w_L$	$I_p$
高岭土	2.66	1.07%	21.03%	32.42%	11.39

表 2 偏高岭土化学成分(质量分数)

Tab. 2 Chemical composition of metakaolin clay

成分	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MgO}$
含量/%	50.54	32.21	0.65	0.92	0.43	0.31

## 1.2 试件制备

本文所配制的灰土材料, 同时控制原料的石灰、偏高岭土和水固比 3 个因素, 分析三者对灰土力学性质的影响. 试验以高岭土材料为主要原材料, 高岭土质量用  $m_k$  表示, 偏高岭土含量用  $m_m$  表示, 石灰含量用  $m_l$  表示, 偏高岭土和石灰的含量, 用其与高岭土的质量比来表示. 根据该试验原料配合比的轻型击实试验确定的最大干密度为  $1.44\text{ g/cm}^3$ , 对应的最优含水率为  $27.9\%$ . 因此, 配制该试验的水固比  $m_w/m_s$  分别为  $0.26$ 、 $0.28$ 、 $0.30$  和  $0.32$ .

将试验原料称好后, 进行均匀搅拌, 放入自封袋中, 根据试样调配的水固比分别调至灰土膏浆样, 并不断搅拌灰土膏浆养护至 3 个小时, 根据计算称取一定质量的灰土膏浆注入  $\Phi 39.1\text{ cm} \times 80\text{ cm}$  的三瓣模中, 用制样器制样成型后, 放置在干燥器中养护, 分别测定试样的 3 d、7 d、28 d 抗压强度.

# 2 试验结果与分析

## 2.1 石灰含量对灰土强度的影响

为了研究添加偏高岭土的灰土材料的力学特性, 分别配置了干密度为  $1.52\text{ g/cm}^3$ 、水固比为  $0.28$  的不同石灰含量的灰土试件作为对照试验. 本试验中石灰含量  $m_l$  分别为  $8\%$ 、 $10\%$ 、 $13\%$  和

16%。试验所得不同石灰含量条件下试样在不同龄期时的无侧限抗压强度对比图如图2所示。

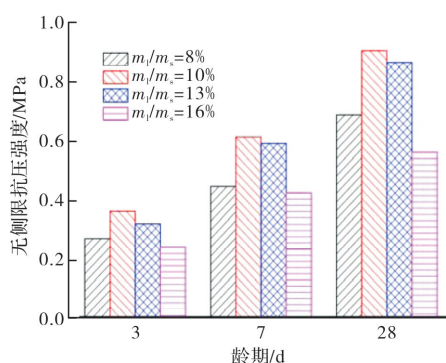


图2 不同石灰含量的灰土抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of lime-soil sample with different lime content

由图2可以看出,总体上灰土试样的无侧限抗压强度均随着养护龄期的增大而增强,但石灰含量 $m_l$ 对灰土试样的强度影响显著,随着石灰含量 $m_l$ 的增多,强度呈先增大后减小的趋势,当石灰含量 $m_l$ 为10%时,灰土试样的抗压强度最大。3 d龄期时,石灰含量为10%的试样强度(最大值)是石灰含量为16%的试样强度(最小值)的1.50倍;而当28 d龄期时,该值增大为1.62。说明石灰含量对灰土的后期强度影响较大。

## 2.2 水固比对灰土强度的影响

为了研究添加偏高岭土的灰土材料的力学特性,分别配置了相同石灰含量和干密度,不同水固比的灰土试样作为对照试验。分别配置水固比 $m_w/m_s$ 为0.26、0.28、0.30和0.32,石灰含量 $m_l$ 为10%的灰土试样,测定试样的3 d、7 d、28 d龄期时的无侧限抗压强度,试验结果如图3所示。

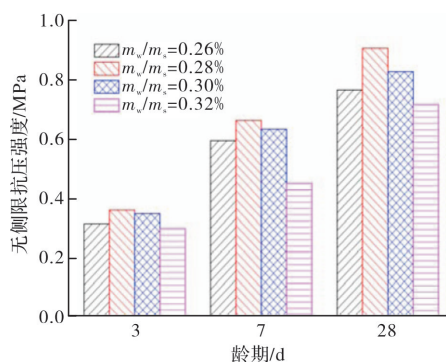


图3 不同水固比的灰土材料抗压强度

Fig. 3 Compressive strength of lime-soil sample with different water-solid ratios

由图3可以看出,总体上灰土试样的无侧限抗压强度均随着养护龄期的增大而增强,但水固比 $m_w/m_s$ 对灰土试样的抗压强度影响较大。同一龄期时,随着水固比 $m_w/m_s$ 的增加,灰土试样的抗压

强度先增大后减小。当水固比 $m_w/m_s$ 为0.28时,灰土试样的抗压强度最大。3 d龄期时,水固比为0.28的试样强度(最大值)是水固比为0.32的试样强度(最小值)的1.21倍;而当28 d龄期时,该值增大为1.27。说明水固比对灰土的后期强度影响较大。

## 2.3 偏高岭土含量对灰土强度的影响

根据前文的对比试验可知,灰土材料的强度受石灰的含量 $m_l$ 和水固比 $m_w/m_s$ 的影响明显,若向灰土中添加偏高岭土,必然导致最佳石灰含量 $m_l$ 和水固比 $m_w/m_s$ 发生变化,而偏高岭土 $m_m$ 的含量也必然存在最优含量。

### (1) 石灰含量对含偏高岭土的灰土强度的影响

根据2.1节的试验结果,可推断出添加了偏高岭土的灰土试样中,石灰含量应在图2曲线的上升区间至其延长线的一定范围内。据此,配置干密度为 $1.52 \text{ g/cm}^3$ ,水固比 $m_w/m_s$ 为0.3,偏高岭土 $m_m$ 含量为8%、10%、13%和石灰含量 $m_l$ 为8%、10%、13%、16%、20%的灰土试样15组,分别测定各试样在3 d、7 d和28 d龄期时的无侧限抗压强度。用于研究不同偏高岭土含量条件下,试样抗压强度随石灰含量的变化规律,试验结果如图4所示。

由图4可以看出,随着龄期的增长,添加偏高岭土的灰土试样强度均增大,偏高岭土含量 $m_m$ 的变化对灰土强度的影响较大。相同偏高岭土含量的灰土试样,石灰含量的变化同样会引起试样强度的改变。对比图4和图2可以看出,添加偏高岭土的灰土试样的强度明显高于同一时期的不含偏高岭土的灰土试样,其中偏高岭土的含量 $m_m$ 为10%,石灰的含量 $m_l$ 为13%的灰土试样28 d无侧限抗压强度最高,达到2.22 MPa,是相同干密度但不含偏高岭土的灰土试样最高强度的2.45倍(图2),是相同水固比和石灰含量但不含偏高岭土的灰土试样最高强度的2.70倍(图3)。图4(a)中,试样3 d龄期抗压强度高达0.75 MPa,是相同条件下无偏高岭土灰土试样的2.10倍,由此可见,通过在常规灰土试样中添加偏高岭土不仅可以提高灰土试样的后期强度,而且也极大的提高了灰土试样的早期强度。

### (2) 水固比对含偏高岭土的灰土强度的影响

通过前文研究可知,干密度为 $1.52 \text{ g/cm}^3$ ,偏高岭土含量 $m_m$ 为10%,石灰含量 $m_l$ 为13%时,灰土材料的无侧限抗压强度最高,因此本节在此基础上进一步研究水固比( $m_w/m_s$ 为0.26、0.28、

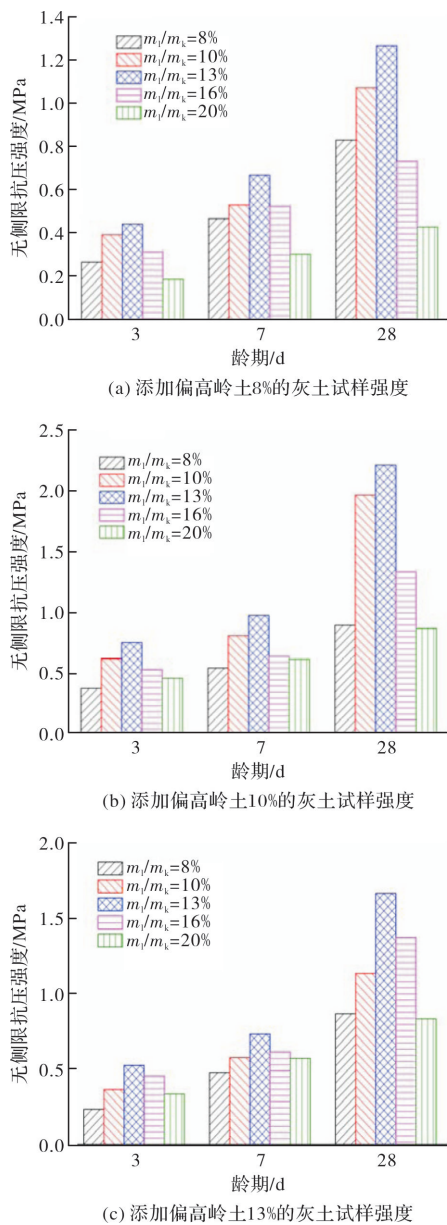


图 4 不同石灰含量的灰土抗压强度  
Fig. 4 Compressive strength of lime-soil sample with differentlime content

0.30、0.32 和 0.34)对含偏高岭土灰土试样无侧限抗压强度的影响, 试验结果如图 5 所示.

由图 5 可以看出, 水固比  $m_w/m_s$  对添加了偏高岭土的灰土试样的强度影响较大, 与图 3 的结果相类似, 随着水固比  $m_w/m_s$  的增加, 试样的强度呈先增大后减小的趋势, 当水固比为 0.3 时, 试样的抗压强度最大. 对比图 3 的试验结果, 添加偏高岭土  $m_m$  的试样最高强度所对应的水固比  $m_w/m_s$  比未添加偏高岭土的灰土试样略大, 初步推断应该是因为灰土中添加了偏高岭土后, 试样会发生火山灰反应, 所需要的含水量有所增加所致.

2.4 偏高岭土含量对灰土软化系数的影响

本文中软化系数是指试件吸水饱和后的无侧

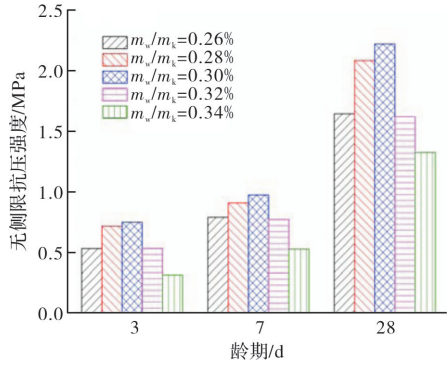


图 5 不同水固比的灰土抗压强度  
Fig. 5 Compressive strength of lime-soil sample with different water-solid ratios

限抗压强度与试件干燥状态下的无侧限抗压强度之比. 软化系数越大, 表明材料的耐水性越好. 本节主要分析水固比  $m_w/m_s$  为 0.3, 石灰含量为 13% 的灰土试样和相同条件下的添加 10% 偏高岭土灰土试样在 3 d、7 d、28 d 龄期的软化系数, 试验结果见表 3.

表 3 灰土材料的软化系数

Tab. 3 Softening coefficient of lime soil material

试样	3 d	7 d	28 d
灰土试样	0.74	0.83	0.81
偏高岭土试样	0.81	0.88	0.84

由表 3 可以看出, 无论是常规灰土材料试样还是添加了偏高岭土的试样, 其软化系数均随养护龄期的增加而增大. 但添加了偏高岭土后, 试样的软化系数整体上高于无偏高岭土的情况. 特别的, 含偏高岭土的灰土试样其软化系数随龄期的变化相对较小, 可见偏高岭土可以显著改善灰土材料的软化性能.

3 机理研究

本章拟通过分析含偏高岭土的灰土试样含水率的变化规律和采用扫描电镜 (SEM) 观察其微观结构来研究偏高岭土改善常规灰土材料力学性能的内在机理.

3.1 含水率变化

灰土试样的含水率变化, 在一定程度上可以间接反映试样内部火山灰反应的程度, 以水固比  $m_w/m_s$  为 0.3, 石灰含量  $m_l$  为 13% 的灰土试样作为参照试验, 分析具有相同干密度、水固比和石灰含量但添加 10% 偏高岭土的灰土试样的含水率变化规律. 以试件成型时的含水率作为初始重量  $\omega_0$ , 然后分别测定不同龄期的常规灰土试样和添加偏高岭土的灰土试样的含水率  $\omega_t$ ,  $t$  分别为 3 d、

7 d、28 d, 试样含水率变化规律如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 在干燥器中养护的常规灰土试样和添加 10% 偏高岭土的灰土试样的含水率, 随着龄期的增长总体上呈减小趋势。对比图 6 中的两条曲线可以看出, 水固比相同的常规灰土试样和添加了偏高岭土的灰土试样的初始含水率略有不同, 这是由于偏高岭土的加入使相同条件下石灰含量小于常规灰土试样中所含的石灰量, 而石灰遇水产生大量的热量, 带走了一部分水分。

对于常规灰土试样, 随着龄期的增长, 试样的含水率先呈减小趋势, 至 7 d 后灰土试样的含水率几乎不发生变化, 这主要是因为试样中的石灰随着龄期的增长逐渐发生反应, 吸收了一定数量的水分, 而后灰土试样的反应吸水与干燥器中的水分补充达到平衡。添加了偏高岭土的灰土试样其含水率变化呈先减小后增大最后略有减小的趋势, 且 3 d 龄期时的含水量变换斜率明显高于灰土试样的斜率, 主要是因为偏高岭土与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和水发生化学反应, 需要较多的水分参与所致, 反应完全后试样又吸收了干燥器中的水分导致式样的含水率有所增加, 随着龄期的增长, 含水率趋于稳定。

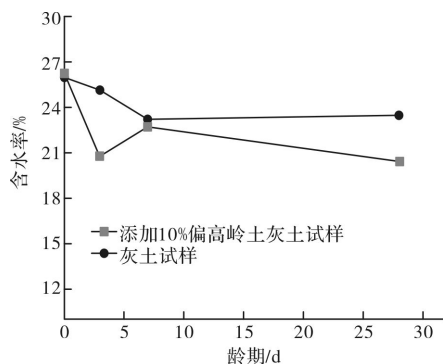


图 6 灰土材料的含水率变化曲线

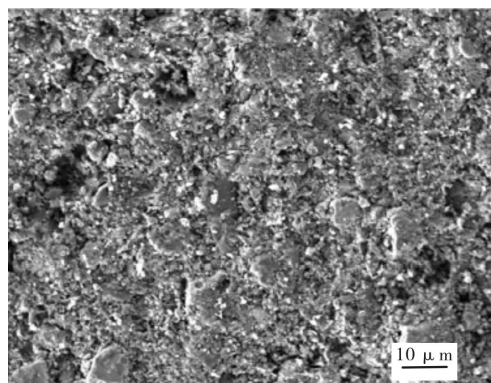
Fig. 6 Water content of lime-soil sample

### 3.2 SEM 分析

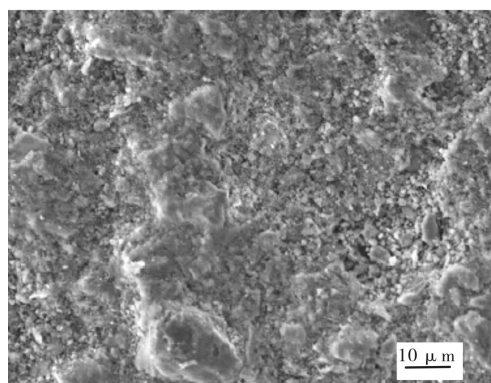
选取在干燥器中养护 28 d, 石灰含量为 13%、水固比为 0.3 的常规灰土试样和相同条件下添加 10% 偏高岭土的灰土试样, 在其断面喷金, 然后采用扫描电镜(SEM)进行观察, 结果如图 7 所示。

图 7(a)为养护 28 d 的常规灰土试样, 可以看出, 灰土试样内部结构较为致密, 高岭土颗粒以单个粉粒和黏胶微碎屑组成的颗粒集组成, 颗粒大小不均匀, 颗粒间多以面-面接触为主, 孔隙多表现为微小的颗粒间空隙。而添加了 10% 偏高岭土的灰土试样, 如图 7(b)所示, 图像中的颗粒沿着空间 3 个方向都有所生长, 颗粒间明显受到胶凝

黏结物联结而呈现团块状态, 与图 7(a)相比土中团粒显著增多, 因此强度提高。



(a) 28 d 常规灰土试样



(b) 28 d 添加偏高岭土的灰土试样

图 7 灰土材料的 SEM 照片

Fig. 7 SEM photographs of lime-soil material

## 4 结论

对灰土试样中添加偏高岭土后的力学性能进行了试验研究, 初步确定了灰土材料中偏高岭土、石灰的含量以及水固比与试样强度的关系, 并测定了试样的软化系数, 通过对试样含水率变化和试样细观结构的分析, 探讨了偏高岭土改善灰土力学性能的内在机理, 主要取得了以下结论:

(1) 在灰土中添加偏高岭土不仅可以提高灰土材料的后期强度, 而且可明显改善前期强度;

(2) 偏高岭土含量为 10%, 石灰含量为 13%, 水固比为 0.3 的灰土试样强度最高, 其 3 d 龄期抗压强度是相同条件下常规灰土的 2.1 倍, 28 d 龄期强度达到了 2.7 倍;

(3) 添加了偏高岭土的灰土试样的软化系数整体高于无偏高岭土试样, 偏高岭土可以显著改善灰土材料的软化性能;

(4) 偏高岭土与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和水发生化学反应, 使得含偏高岭土的灰土试样的含水率呈先减小后增大最后略有减小的趋势;

(5) 添加偏高岭土的灰土试样的结构明显比常



规灰土试样的结构致密,添加偏高岭土的灰土试样,在土体内部产生了水化硅酸钙(C-S-H),从而改善了试样的力学性能。

## 参考文献 References

- [1] 李黎,赵林毅,王金华,等.我国古代建筑中两种传统硅酸盐材料的物理力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10):2120-2127.  
LI Li, ZHAO Linyi, WANG Jinhua, et al. Research on physical and mechanical characteristics of two traditional silicate materials in Chinese ancient buildings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2120-2127.
- [2] 唐晓武,林廷松,罗雪,等.利用桐油和糯米改善黏土的强度及环境土工特性[J].岩土工程学报,2007,29(9):1324-1329.  
TANG Xiaowu, LIN Tingsong, LUO Xue, et al. Strength and geoenvironmental properties of clay improved by tung oil and sticky rice juice[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2007, 29(9): 1324-1329.
- [3] 王雪浪,朱彦鹏.灰土挤密桩处理湿陷性黄土地基理论分析及试验[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2010,42(2):288-293.  
WANG Xueliang, ZHU Yanpeng. Theoretical analysis and test of the foundation of collapsible loess reinforced by lime piles [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2010, 42(2): 288-293.
- [4] MODMOLTINC, LU J, ONITSUKA K. Influence of humic acid and salt concentration on lime-stabilized arid clays and microstructure research [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 281-286.
- [5] 张倩,韦华威,王永兵,等.水泥冷再生灰土试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2012,44(5):632-636.  
ZHANG Qian, WEI Huawei, WANG Yongbing, et al. Study on cement stabilized cold recycling lime-treated soil [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2012, 44(5): 632-636.
- [6] 杜延军,刘松玉,魏明俐.电石渣改良路基过湿土的微观机制研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1278-1285.  
DU Yanjun, LIU Songyu, WEI Mingli, et al. Micro-mechanism of overwet clayey soils stabilized by calcium carbide residues[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1278-1285.
- [7] Bell F. G. Lime stabilization of clay minerals and soils [J]. Engineering Geology, 1996, 42(4): 223-237.
- [8] Mckinley J. D. THOMAS H. R. WILLIAMS J. M. et al. Chemical analysis of contaminated soil strengthened by the addition of lime[J]. Engineering Geology, 2001, 60(1): 181-192.
- [9] SILVA B A, PINTO A P, GOMES A. Influence of Natural Hydraulic Lime Content on the Properties of Aerial Lime-based Mortars [J]. Construction and Building Materials, 2014, 72(72): 208-218.
- [10] 宋彦军,周振君.石灰-偏高岭土修复性砂浆的研究进展[J].世界科技研究与进展,2017,39(1):39-44.  
SONG Yanjun, ZHOU Zhenjun. Research progress of lime-metakaolin restoration mortars [J]. World Science And Technology Research And Development. 2017, 39(1): 39-44.
- [11] SABIR B B, WILD S, BAI J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete; a review [J]. Cement and Concrete Composites, 2001, 23(6): 441-454.
- [12] PAVLIK V, UZAKOV A M. Effect of curing conditions on the properties of lime. Lime-metakaolin and lime-zeolite mortars [J]. Construction and Building Materials, 2016, 102(1): 14-25.
- [13] FEMNDEZ R, NEBRED A B, VILLA R V, et al. Mineralogical and chemical evolution of hydrated phases in the pozzolanic reaction of calcined paper sludge [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(10): 775-782.
- [14] FURUKAWA Y, REED A H, ZHANG G. Effect of organic matter on estuarine flocculation; a laboratory study using montmorillonite, humic acid, xanthan gum, guar gum and natural estuarine flocs [J]. Geochemical Transactions, 2014, 15(1): 1-9.
- [15] 刘仍光,丁士东,阎培渝.水泥-矿渣复合胶凝材料硬化浆体的微观结构[J].硅酸盐学报,2015,43(5):610-618.  
LIU Rengguang, DING Shidong, YAN Peiyu. Micro-structure of hardened complex binder pastes blended with slag [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(5): 610-618.
- [16] MLEZA Y, HAJAJI M. Microstructural characterization and physical properties of cured thermally activated clay-lime blends [J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 226-232.
- [17] RICHARDSON I. G. Tobermorite/jennite and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C-S-H: applicability to hardened pastes of tricalcium silicate,  $\beta$ -dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag, metakaolin, or silica fume [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(9): 1733-1777.
- [18] 王林浩,徐晓东,刘剑平,等.偏高岭土对水泥土强度影响的试验研究[J].非金属矿,2016,39(2):59-61.  
WANG Linhao, XU Xiaodong, LIU Jianping, et al. Effect of Metakaolin on Strength of Cemented Soil [J]. Non-Metallic Mines. 2016, 39(2): 59-61.
- [19] 朱伶俐,赵宇.偏高岭土提高喷射混凝土性能的实验研究[J].硅酸盐通报,2014,33(5):1169-1173.  
ZHU Lingli, ZHAO Yu. Experimental research on the properties improvement of shotcrete with metakaolin [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 33(5): 1169-1173.
- [20] 姜广,戎志丹,孙伟.偏高岭土对高性能水泥砂浆性能的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2015,45(1):121-125.  
JIANG Guang, RONG Zhidan, SUN Wei. Effects of metakaolin on properties of high performance mortar [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2015, 45(1): 121-125.

(编辑 沈波)