

文章编号:1007-9629(2021)03-0648-08

石灰偏高岭土改良粉砂土强度特性与微观机理

李新明^{1,2}, 路广远^{1,2}, 张浩扬^{1,2}, 尹松^{1,2}, 任克彬³

(1. 中原工学院 建筑工程学院, 河南 郑州 450007; 2. 河南省环境岩土工程与地下工程灾害控制工程研究中心, 河南 郑州 450007; 3. 河南省文物建筑保护研究院, 河南 郑州 450002)

摘要:以河南地区典型粉砂土为研究对象,制备不同石灰及偏高岭土掺量下的改良粉砂土试样,对其进行无侧限抗压强度试验、扫描电镜(SEM)与X射线衍射(XRD)测试,并与水硬性石灰改良粉砂土进行对比分析。结果表明:随着偏高岭土掺量的增加,改良粉砂土破坏应变增大,无侧限抗压强度提高,但强度增长率呈现先增加后减小的规律,并在偏高岭土掺量为4%时达到峰值;当养护龄期从7 d增至28 d时,石灰偏高岭土改良粉砂土的强度增长率明显高于石灰改良粉砂土。采用6%石灰+4%偏高岭土、8%石灰+4%偏高岭土可分别有效替代8%、10%的水硬性石灰;偏高岭土掺入后形成的水化产物可联结土颗粒并填充于孔隙,使改良粉砂土微观结构更加密实,具有一定的水硬性。

关键词:土遗址;石灰-偏高岭土;水硬性石灰;强度特性;微观机理

中图分类号:TU599

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.028

Strength Characteristics and Micro-mechanism of Lime-Metakaolin Modified Silty Soil

LI Xinming^{1,2}, LU Guangyuan^{1,2}, ZHANG Haoyang^{1,2}, YIN Song^{1,2}, REN Kebin³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China; 2. Research Center of Environmental Geotechnical Engineering and Underground Engineering Disaster Control Engineering of Henan Province, Zhengzhou 450007, China; 3. Henan Provincial Architectural Heritage Protection and Research Institute, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Taking typical silty soil in Henan area as the research subject, modified silty soil samples with different lime and metakaolin contents were prepared. Unconfined compressive strength tests, scanning electron microscopy(SEM) and X-ray diffraction(XRD) tests were carried out, and the comparison analysis was made with the hydraulic lime modified silty soil. The results show that with the increase of metakaolin content, the failure strain and unconfined compressive strength of the modified silty soil increase, but the strength growth rate increases first and then decreases, which reaches the peak value when the metakaolin content is 4%. When the curing age increases from 7 d to 28 d, the strength growth rate of lime-metakaolin modified silty soil is significantly higher than that of lime modified silty soil. 6% lime + 4% metakaolin and 8% lime + 4% metakaolin can effectively replace 8% and 10% hydraulic lime respectively. The hydration products formed after the incorporation of metakaolin can bond soil particles and fill in the pores, which makes the microstructure of the improved silty soil more compact and has certain hydraulicity.

Key words: earthen site; lime-metakaolin; hydraulic lime; strength characteristic; micro-mechanism

收稿日期:2020-01-07; 修订日期:2020-04-22

基金项目:河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2019GGJS142, 2020GGJS136);国家自然科学基金资助项目(51509274);河南省科技攻关项目(202102310584);岩土力学与工程国家重点实验室开放基金项目(Z0190202);中原工学院基本科研业务费专项资金项目(K2018YY013, K2018YY012)

第一作者:李新明(1987—),男,河南修武人,中原工学院副教授,硕士生导师,博士. E-mail: xinmingli01@163.com

中原地区土遗址多为粉土或粉砂土夯筑,在长期自然环境作用下,其裂缝和坍塌等病害^[1]普遍,有些甚至逐渐消失,土遗址预防性保护十分紧迫,而保护土遗址的关键在于加固材料是否应用得当.目前,广泛应用于土遗址修复的无机材料有石灰、高模数硅酸钾溶液(PS)、水硬性石灰(NHL)等.其中石灰为气硬性材料,与古建筑兼容性较好,但其硬化速度较慢,强度低,耐水性能差^[2-3];PS材料等在西北干旱地区土遗址中已得到了广泛应用,显著提升了中国干旱地区土遗址保护水平,但其在干-湿交替环境显著的中原地区土遗址中应用效果尚不明确^[4];水硬性石灰自 20 世纪 70 年代以来在欧美发达国家土遗址保护中应用效果良好,而中国缺乏天然水硬性石灰,虽研制了类似水硬性石灰的替代材料(如烧阿嘎土^[5]等),但整体来说其修复土遗址成本较高,材料来源不够广泛,不利于推广应用^[6-8].因此,开发能够替代水硬性石灰的修复材料在土遗址保护相关领域具有重大需求.

石灰偏高岭土(L-MK)作为一种环境友好型材料,符合生态环境可持续发展战略^[9-11].国内外研究学者已经对水泥砂浆^[12-13]、淤泥土^[14]、黏性土^[15-16]等岩土材料在 L-MK 改良作用下的力学特性进行了较为系统的研究,可以发现土样类别是影响 L-MK 材料最优配比和力学性能的重要因素.然而,目前却鲜有学者开展 L-MK 材料对中原地区土遗址本体(粉砂土等)加固方面的研究.鉴于此,本文以河南地区典型粉砂土为研究对象,开展 L-MK 改良粉砂土的击实试验、无侧限抗压强度试验等,重点探究不同 L-MK 掺量下改良粉砂土强度特性的变化规律并确定最优 L-MK 掺量;通过 X 射线衍射(XRD)和扫描电镜(SEM),分析其水硬性效应的内在微观机理.

表 2 粉砂土、石灰、偏高岭土及水硬性石灰的化学组成
Table 2 Chemical compositions of silty soil, lime, MK and NHL

Material	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	SO ₃	Others
Silty soil	64.70	0.99	6.91	0.30	19.42	4.50	0.16		3.02
MK	46.73	1.72	2.23	1.56	41.18	0.17	0.13	0.09	6.19
NHL	8.33	68.36	1.60	0.14	2.62	0.99	4.16	0.67	13.13
L		95.60					0.96	0.06	3.38

1)文中涉及的含量、组成等除特别说明外均为质量分数.

1 试验

1.1 试验材料

粉砂土取自河南省郑州市苑陵故城附近,参照 WW/T 0040—2012《土遗址保护工程勘察规范》进行取样,其颗粒粒径级配曲线如图 1 所示.由图 1 可以看出,其砂粒($>0.075\text{ mm}$)、粉粒($0.075\sim0.005\text{ mm}$)、黏粒($<0.005\text{ mm}$)体积分数分别为 65.66%、32.48%、1.86%.粉砂土基本物性指标如表 1 所示.根据 SL237—1999《土工试验规程》,判定试验土样为粉砂土.

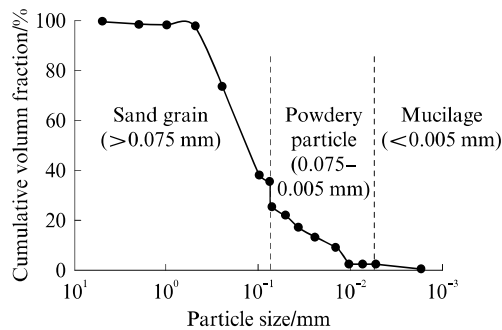


图 1 粉砂土颗粒粒径级配曲线
Fig. 1 Particle size distribution curve of silty soil

表 1 粉砂土的基本物性指标
Table 1 Basic physical parameters of silty soil

Liquid limit (by mass)/%	Plastic limit (by mass)/%	Plasticity index	Optimum water content (by mass)/%	Maximum dry density/ (g·cm ⁻³)
19.20	8.22	10.98	9.30	1.96

偏高岭土(MK):河南省郑州市巩义市辰义耐材磨料有限公司.天然水硬性石灰(NHL):上海市德赛堡建筑材料有限公司,强度等级为 NHL2(2~5 MPa).石灰(L):CaO 含量¹⁾大于 90%,选自江西新余惠灰实业有限公司.粉砂土、石灰、偏高岭土及水硬性石灰的化学组成见表 2.

w/%

1.2 试验方法

根据 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》和传统三七灰土、二八灰土、一九灰土(体积比)掺石灰量的要求,石灰掺量 w_L (石灰质量与总质量之比)分别取 6%、8%、10% 和 12%;偏高岭土掺量 w_{MK} (偏高岭土质量与总质量之比)分别取 0%、4%、8% 和 12%,制备 L-MK 改良粉砂土试样。同时制备单掺水硬性石灰的 NHL 粉砂土试样进行对比试验,水硬性石灰掺量 w_{NHL} 与 L-MK 改良粉砂土试样中的石灰掺量相同。为表述方便,材料均采用英文缩写方式,如 6%L+4%MK 为 6%石灰+4%偏高岭土。

参照 SL237—1999《土工试验规程》进行轻型击实试验,测定改良粉砂土的含水率 w 和干密度 ρ_d ,为后续试样制备提供相关参数。

试样采用 95% 压实度,直径和高度均为 5 cm 的圆柱体。试样制备完毕后,放入标准养护室(温度在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 之间,相对湿度控制在 $95\% \pm 2\%$)分

别养护 7、14、28 d,养护龄期最后 1 d 将其放入水中浸润 24 h。养护至相应龄期后,采用 YYW-2 型无侧限抗压强度仪测定试样无侧限抗压强度。

采用日本 Rigaku 公司的 D/max2550 VB3+PC 型 X 射线衍射仪进行 XRD 测试;采用德国蔡司公司的场发射扫描电镜 (FESEM) 进行 SEM 测试。

2 结果与分析

2.1 击实试验结果

图 2 为 L-MK 改良粉砂土的击实曲线,定义最大 ρ_d 对应的含水率为最优含水率。由图 2 可见:随着 MK 掺量的增加,击实曲线峰值点逐渐向右下方移动,即最大干密度减小,最优含水率增加;同时,峰值后击实曲线呈变缓趋势。表明 MK 能够有效抑制石灰改良粉砂土的水敏性,有利于现场施工。这是由于 MK 可协同石灰发生化学反应,从而促进改良粉砂土吸收更多的水分^[15]。

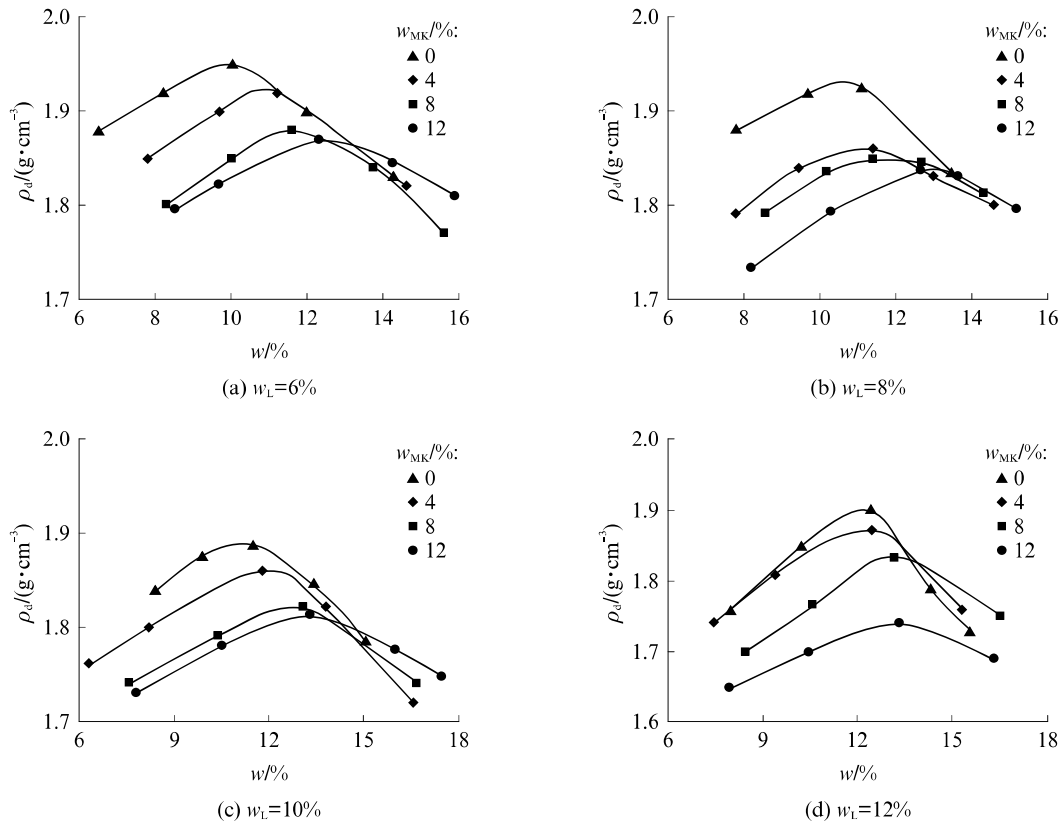


图 2 L-MK 改良粉砂土的击实曲线
Fig. 2 Compaction curves of L-MK modified silty soil

L-MK 改良粉砂土的最大干密度随着 MK 掺量的增加而递减。原因在于:(1)水化产物与粉砂土颗粒间的胶结作用使土样结构更加密实,从而导致最

大干密度逐渐减小;(2)在相同的击实条件下,掺入石灰可以降低土样的塑性,从而提高改良粉砂土的最优含水率,降低其最大干密度。

2.2 无侧限抗压强度试验结果

2.2.1 轴向应力-应变曲线

由于不同龄期和不同 L-MK 掺量下改良粉砂土的应力-应变曲线变化规律类似,因此仅列出 28 d

时的部分试样应力-应变曲线,见图 3. 由图 3 可以看出,L-MK 及 NHL 改良粉砂土应力-应变曲线均存在明显的峰值点,属于软化型。

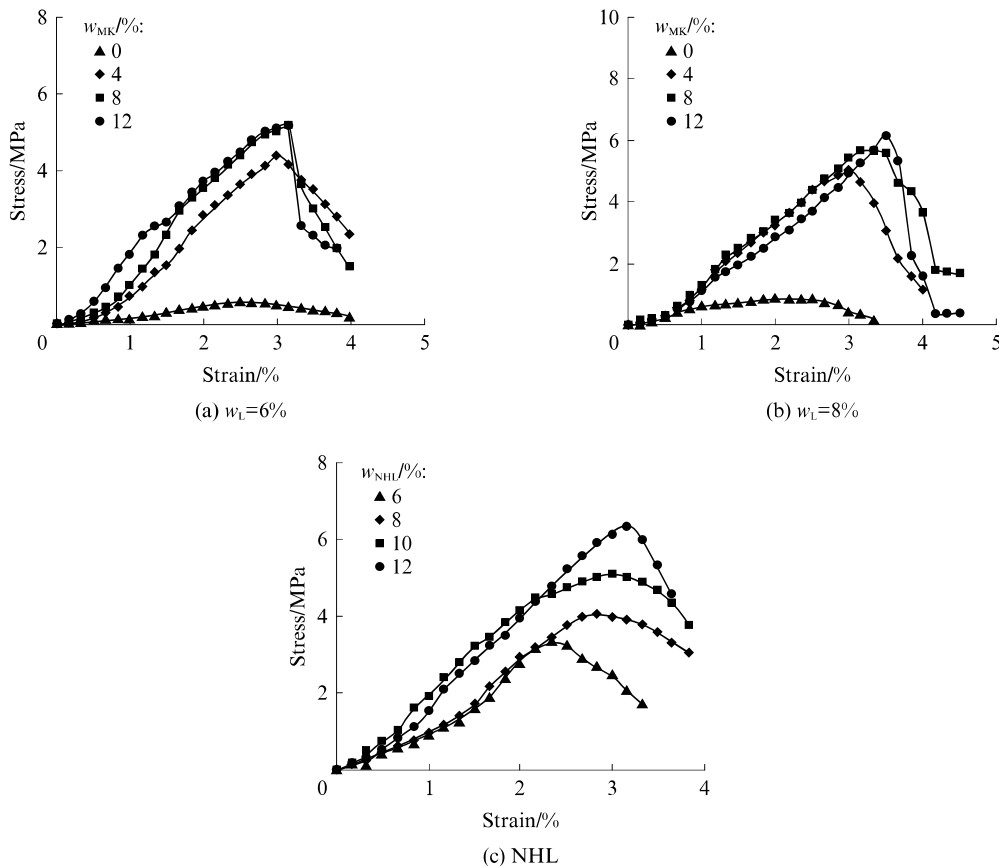


图3 试样应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of samples

L-MK 和 NHL 改良粉砂土应力-应变曲线呈现比较明显的 2 个阶段:(1)应力达到峰值前曲线近似呈直线增长;(2)达到峰值后曲线迅速下降,直至试样破坏,破坏后仅剩残余强度。前一个阶段属于应变硬化阶段,后一个阶段为应变软化阶段,表现出明显的脆性破坏特征。

定义试样应力达到峰值时对应的应变为破坏应变 ϵ_f 。由图 3 可以看出,石灰改良粉砂土 ϵ_f 较小,随着偏高岭土掺量从 0% 增至 12%,L-MK 改良粉砂土 ϵ_f 呈略微增大趋势且明显大于单掺石灰的粉砂土。如单掺 6%、8% 石灰时,试样 ϵ_f 均为 2.50%,而复掺 4% 偏高岭土后,试样 ϵ_f 分别增至 3.03% 和 3.16%,与 8%、10% NHL 改良粉砂土的 ϵ_f 基本相同。汤怡新等^[17]认为土样的变形特征可用破坏应变来表征,破坏应变越大,土样韧性越强。由此说明,L-MK 改良粉砂土比石灰改良粉砂土具有更好的

韧性。

2.2.2 无侧限抗压强度

图 4 给出了 L-MK 改良粉砂土的无侧限抗压强度 f_{uc} 。由图 4 可以看出,7、14、28 d 龄期时,相同石灰掺量下,MK 的掺入极大提高了单掺石灰改良粉砂土的无侧限抗压强度。当石灰掺量为 6%,MK 掺量从 0% 增加至 12% 时,改良粉砂土的 7 d 无侧限抗压强度从 0.51 MPa 增加至 4.25 MPa。究其原因,水化反应产生的水化物不仅增加了土颗粒之间的黏结力,也增加了砂粒与土样之间的机械咬合力,从而提高了改良粉砂土的无侧限抗压强度^[18],这与彭小芹等^[13]研究结果一致。而从强度增长率结果(图 5)得出,7、14、28 d 无侧限抗压强度增长率并非随着 MK 掺量的增加而单调增加,而是呈现先增大后减小的变化规律,且在 MK 掺量为 4% 时达到峰值。当石灰掺量为 6%,MK 掺量从 0% 增加到 4%

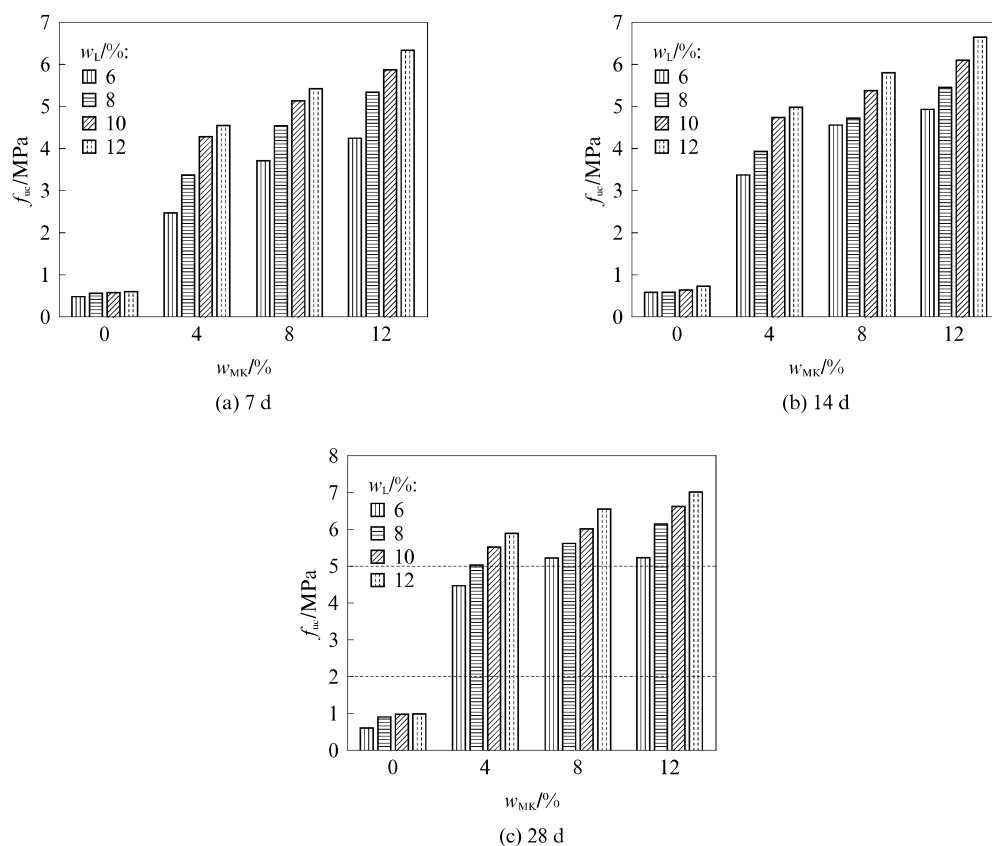


图4 L-MK 改良粉砂土的无侧限抗压强度
Fig. 4 Unconfined compressive strength of L-MK modified silty soil

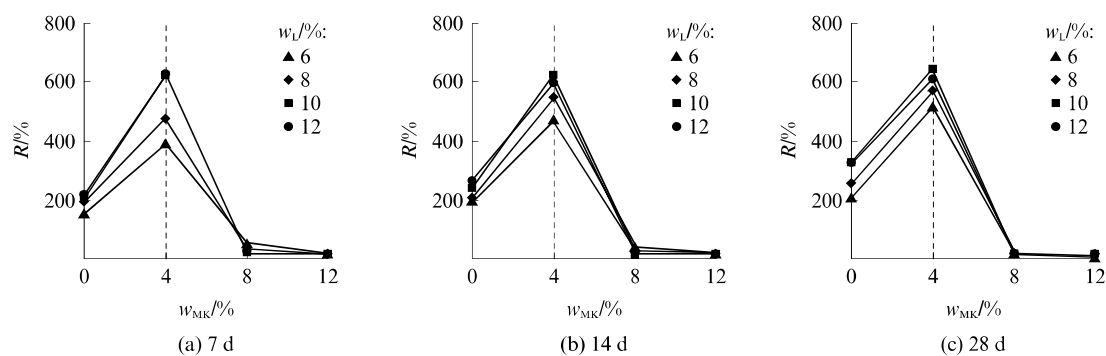


图5 L-MK 改良粉砂土强度增长率
Fig. 5 Strength growth rate of L-MK modified silty soil

时,强度增长率从 155% 提高至 394%,而当 MK 掺量继续从 4% 增加至 12% 时,强度增长率反而从 394% 降至 13.3%。其中,L-MK 改良粉砂土强度增长率 R 的表达式为:

$$R = \frac{f_{uc2} - f_{uc1}}{f_{uc1}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: f_{uc1} 为某龄期与石灰掺量下 L-MK 的无侧限抗压强度,MPa; f_{uc2} 为该龄期与石灰掺量下偏高岭土掺量增加一级后 L-MK 的无侧限抗压强度,

MPa。需要说明的是,当 MK 掺量为 0% 时, f_{uc1} 为粉砂土的无侧限抗压强度(0.2 MPa), f_{uc2} 为单掺石灰粉砂土的无侧限抗压强度。

相同石灰掺量下,在相对湿度 95% 的养护条件下,随着龄期的增加,L-MK 改良粉砂土的无侧限抗压强度明显高于单掺石灰改良粉砂土,说明前者“水硬性”显著增强。以 6% 石灰和 4% MK 掺量为例,单掺 6% 石灰时,龄期从 7 d 增至 28 d,其无侧限抗压强度从 0.51 MPa 提高至 0.62 MPa,而掺入 4% 偏

高岭土后,无侧限抗压强度从 2.52 MPa 提升至 4.45 MPa.

图 6 给出了 NHL 改良粉砂土的无侧限抗压强度.由图 6 可以看出,NHL 改良粉砂土的无侧限抗压强度随着 NHL 掺量的增加而显著增大.对比图 4、6 可发现,当掺入 6%L+4%MK 时,试样的 7 d 无侧限抗压强度为 2.52 MPa,且其 28 d 无侧限抗压强度(4.45 MPa)达到了欧洲标准 BS EN459-1;2015《Building lime》对 28 d 龄期水硬性石灰 NHL2 的强度等级,高于 8%NHL 改良粉砂土的 28 d 无侧限抗压强度(4.07 MPa);当石灰掺量从 6%增至 8%时,试样 28 d 无侧限抗压强度达到 3.40 MPa,高于 10%NHL 改良粉砂土的 28 d 无侧限抗压强度(2.78 MPa).结合相同强度等级下改良粉砂土的破坏应变(见图 3)发现,当龄期为 28 d,6%L+4%MK、8%L+4%MK 改良粉砂土的破坏应变分别与

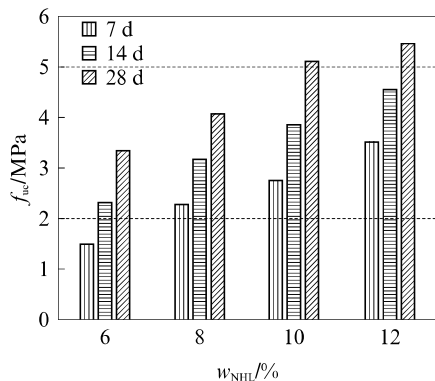


图 6 NHL 改良粉砂土的无侧限抗压强度
Fig. 6 Unconfined compressive strength of NHL modified silty soil

8%、10%NHL 改良粉砂土相当.因此,从试样破坏应变和无侧限抗压强度 2 个角度考虑,掺入 6%L+4%MK、8%L+4%MK 能够有效替代 8%、10%NHL.综上,在土遗址保护工程实际应用中,建议石灰的最优掺量为 6%~8%;MK 的最佳掺量为 4%.

3 微观机理

Pavlik 等^[9]研究发现,L-MK 的固化过程主要是水化反应、碳化反应以及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶析出共同导致的结构硬化.石灰的水化反应生成了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,同时释放出大量的热量,会消耗大量的水分; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中的 CO_2 发生碳化反应生成 CaCO_3 ;水化后的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 电离出大量的 Ca^{2+} 和 OH^- ,电离出的离子与偏高岭土中的主要成分 SiO_2 和 Al_2O_3 发生水化反应生成非结晶态的水化硅酸钙(CSH)、结晶态的水化铝酸四钙(C_4AH_{13}).

3.1 XRD 分析

图 7 为改良粉砂土的 XRD 图谱.由图 7 可以看出,与单掺石灰改良粉砂土相比,MK 的掺入改变了石灰改良粉砂土的水化产物类型.由于石灰与 MK 的水化作用,生成了一系列与 NHL 相类似的水化产物,包括 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、CSH 和 C_4AH_{13} 等,说明石灰与 MK 发生了硬化、离子交换与火山灰等反应,使得粉砂土颗粒间的黏结力增强.由于 XRD 检测不出非结晶态的水化产物,因此未能发现 CSH,但通过后文的 SEM 发现其存在于微观结构中.需要说明的是,在 XRD 衍射试验中,仅针对影响无侧限抗压强度的主要水化产物进行了分析,其他矿物成分不在此赘述.

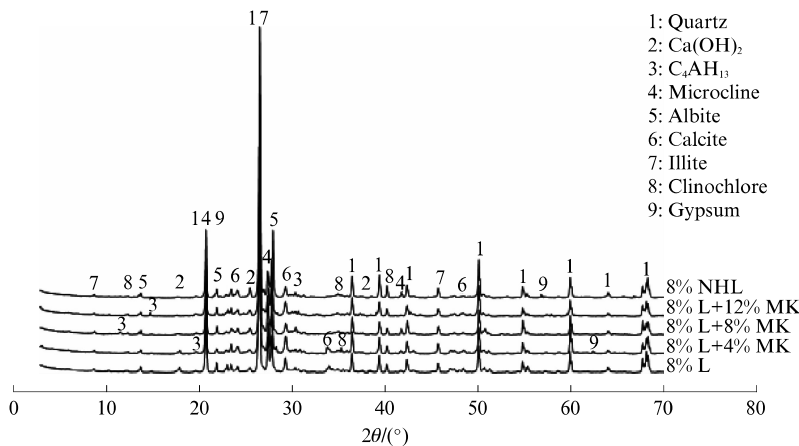


图 7 改良粉砂土的 XRD 图谱
Fig. 7 XRD patterns of modified silty soil

3.2 SEM 分析

图 8 为 8%L+MK 和 8%NHL 改良粉砂土的

SEM 照片.由图 8 可以看出:8%L 改良粉砂土中未发现明显的结晶态水化产物生成,且结构较为疏松;

当 MK 掺量为 4%~12% 时,试样中出现了针状的钙矾石、六方板片状的 C_4AH_{13} 。这也与 XRD 试验结果相互印证。

由图 8(b)可知,当 MK 掺量为 4% 时,试样中 C_4AH_{13} 等水化产物较少,微观结构较 8%L 改良粉砂土更加密实,水化产物以少量的六方板片状 C_4AH_{13} 和针状钙矾石为主,这表明石灰与 MK 的反应是一种缓慢过程。随着 MK 掺量的增加,结晶态以及无规则的水化产物数量逐渐增多,同时可见少

量絮凝状的水化产物(见图 8(c)、(d)),根据吴子龙等^[10,14] 对非结晶态 CSH 的微观形态描述并结合 SEM 试验结果,推测其为 CSH。CSH 填充于结构孔隙,使试样微观结构更加密实,具有优越的强度和韧性^[19]。从图 8(e)可以看出,L-MK 反应生成与 NHL 类似的水化产物。从改良粉砂土整体微观结构角度分析,掺入 MK 后的结构要比掺 NHL 的试样更加致密和均匀,这与前述的无侧限抗压强度试验结论一致。

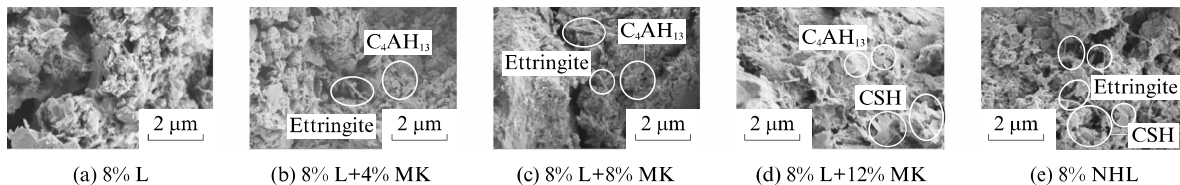


图 8 8%L+MK 和 8%NHL 改良粉砂土的 SEM 照片

Fig. 8 SEM micrographs of 8%L+MK and 8%NHL modified silty soil

4 结论

(1)偏高岭土的掺入提高了石灰改良粉砂土的最优含水率,降低了其最大干密度;随着偏高岭土掺量的增加,石灰偏高岭土改良粉砂土的击实曲线在峰值后呈逐渐变缓的趋势,有利于现场施工。

(2)在相同石灰掺量下,当偏高岭土掺量从 0% 增至 12% 时,改良粉砂土的破坏应变增大,无侧限抗压强度提高。但当偏高岭土掺量大于 4% 后,改良粉砂土无侧限抗压强度增长率出现下降趋势。养护龄期从 7 d 增至 28 d 时,石灰偏高岭土改良粉砂土的无侧限抗压强度增长率明显高于石灰改良粉砂土。

(3)综合分析试样破坏应变、无侧限抗压强度及其增长率,以及欧洲标准 BS EN459-1:2015 对水硬性石灰 NHL2 的强度要求,建议采用 6% 石灰+4% 偏高岭土、8% 石灰+4% 偏高岭土分别替代 8%、10% 的水硬性石灰用于土遗址修复。

(4)偏高岭土协同石灰发生水化反应,形成的水硬性胶凝物质,增加了粉砂土颗粒间的黏结力和机械咬合力,从而增加了其微观结构的整体性和密实性,改善了其力学性能。

(5)本文仅从强度特性角度对石灰偏高岭土改良粉砂土替代水硬性石灰的可行性进行了初步探索,其耐久性等还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 任克彬,王博,李新明,等.毛细水干湿循环作用下土遗址的强

度特性与孔隙分布特征[J].岩土力学,2019,40(3):962-970.

REN Kebin, WANG Bo, LI Xinming, et al. Strength properties and pore-size distribution of earthen archaeological site under dry-wet cycles of capillary water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 962-970. (in Chinese)

[2] ARIZZI A, VILES H, CULTRONE G. Experimental testing of the durability of lime-based mortars used for rendering historic buildings[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 807-818.

[3] 张云升,王晓辉,肖建强,等.古建水硬性石灰材料的制备与耐久性能[J].建筑材料学报,2018,21(1):143-149.

ZHANG Yunsheng, WANG Xiaohui, XIAO Jianqiang, et al. Preparation and durability of hydraulic lime used as repairing materials for architectural heritage[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(1): 143-149. (in Chinese)

[4] 李最雄,赵林毅,孙满利.中国丝绸之路土遗址的病害及 PS 加固[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5):1047-1054.

LI Zuixiong, ZHAO Linyi, SUN Manli. Deterioration of earthen sites and consolidation with PS material along silk road of China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(5): 1047-1054. (in Chinese)

[5] 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. (in Chinese)

[6] MARAVELAKI K P, BAKOLAS A, KARATASIOS I, et al. Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(8): 1577-1586.

- [7] SILVA B A, FERREIRA PINTO A P, GOMES A. Natural hydraulic lime versus cement for blended lime mortars for restoration works [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 94:346-360.
- [8] 朱绘美,徐德龙,刘文欢.古建筑修复用熟石灰性能优化及机理研究[J].*建筑材料学报*,2017,20(6):902-908.
ZHU Huimei, XU Delong, LIU Wenhuan. Properties optimization of hydrated lime used in ancient building restoration and its mechanism[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20(6):902-908. (in Chinese)
- [9] PAVLÍK V, UŽÁKOVÁ M. Effect of curing conditions on the properties of lime, lime-metakaolin and lime-zeolite mortars [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 102:14-25.
- [10] 吴子龙,朱向阳,邓永锋,等.掺入钢渣与偏高岭土水泥改性土的性能与微观机制[J].*中国公路学报*,2017,30(9):18-26.
WU Zilong, ZHU Xiangyang, DENG Yongfeng, et al. Behavior and micro-mechanism of cement-based modified compaction soil composed of steel slag and metakaolin [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(9):18-26. (in Chinese)
- [11] 宋彦军,周振君.石灰-偏高岭土修复性砂浆的研究进展[J].*世界科技研究与发展*,2017,39(1):39-44.
SONG Yanjun, ZHOU Zhenjun. Research progress of lime-metakaolin restoration mortars [J]. *World Sci-Tech R & D*, 2017, 39(1):39-44. (in Chinese)
- [12] GAMEIRO A, SILVA A S, VEIGA R, et al. Hydration products of lime-metakaolin pasters at ambient temperature with ageing [J]. *Thermochimica Acta*, 2012, 553(9):36-41.
- [13] 彭小芹,曹春鹏,季晓丽,等.防水剂对石灰-偏高岭土修补砂浆性能的影响[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,2016,43(6):83-88.
PENG Xiaoqin, CAO Chunpeng, JI Xiaoli, et al. Effect of water-repellent admixtures on repair mortars made of lime and metakaolin [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2016, 43(6):83-88. (in Chinese)
- [14] 谈云志,柯睿,陈君廉,等.偏高岭土-石灰增强水泥固化淤泥的耐久性研究[J].*岩土力学*,2020,41(4):1146-1152.
TAN Yunzhi, KE Rui, CHEN Junlian, et al. Enhancing durability of lime-cement solidified sludge with metakaolin [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4):1146-1152. (in Chinese)
- [15] 刘春龙,刘乃飞,刘奉银,等.偏高岭土改善灰土强度的试验研究[J].*西安建筑科技大学学报(自然科学版)*,2019,51(2):206-211.
LIU Chunlong, LIU Naifei, LIU Fengyin, et al. Study on the strength of lime-soil improved by metakaolin [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science)*, 2019, 51(2):206-211. (in Chinese)
- [16] 谈云志,胡焱,曹玲,等.偏高岭土协同石灰钝化红黏土水敏性的机制[J].*岩土力学*,2020,41(7):2207-2214,2282.
TAN Yunzhi, HU Yan, CAO Ling, et al. Mechanism of metakaolin and lime modification of water sensitivity for compacted laterite [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(7):2207-2214, 2282. (in Chinese)
- [17] 汤怡新,刘汉龙,朱伟.水泥固化土工程特性试验研究[J].*岩土工程学报*,2000,22(5):549-554.
TANG Yixin, LIU Hanlong, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(5):549-554. (in Chinese)
- [18] 赫文秀,申向东.掺砂水泥土的力学特性研究[J].*岩土力学*,2011,32(增刊1):392-396.
HAO Wenxiu, SHEN Xiangdong. Mechanical behavior of soil-sand-cement admixture [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32 (Suppl 1):392-396. (in Chinese)
- [19] 乔春雨,倪文,王长龙.较大偏高岭土掺量下偏高岭土-水泥硬化浆体性能与微观结构[J].*建筑材料学报*,2015,18(3):393-399.
QIAO Chunyu, NI Wen, WANG Changlong. Properties and microstructure of metakaolin (MK)-cement hardened slurry with high use level of MK [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(3):393-399. (in Chinese)

(上接第 647 页)

- [9] 陈少锋,谢建良,邓龙江.DSC法研究聚异氰酸酯/环氧树脂胶粘剂的固化反应动力学及固化工艺[J].*四川化工*,2006(2):1-4.
CHEN Shaofeng, XIE Jianliang, DENG Longjiang. Study on curing reaction kinetics and curing process of polyisocyanate/epoxy resin adhesive by DSC [J]. *Sichuan Chemical Industry*, 2006(2):1-4. (in Chinese)
- [10] 王成忠,王连毅,付晓琦,等.耐高温异氰酸酯/环氧树脂固化历程与性能[J].*宇航材料工艺*,2015(3):28-33.
WANG Chengzhong, WANG Lianyi, FU Xiaoqi, et al. Curing process and properties of high temperature resistant isocyanate/epoxy resin [J]. *Aerospace Materials Technology*, 2015 (3):28-33. (in Chinese)
- [11] 王海军.环氧树脂/含氮阻燃固化剂体系的研究[D].兰州:西北工业大学,2006.
WANG Haijun. Study on epoxy resin/nitrogen containing flame retardant curing agent system [D]. Lanzhou: Northwest University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [12] KUDO K, FUSE S, FURUTANI M, et al. Imidazole-type thermal latent curing agents with high miscibility for one-component epoxy thermosetting resins [J]. *Journal of Polymer Science Part A-Polymer Chemistry*, 2016, 54(17):2680-2688.