

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0159

LIU Chunlong, LIU Fengyin, HUANG Sujuan, et al. Experimental study on mechanical properties and pore characteristics of the modified lime mortars under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6):1833-1841. [刘春龙, 刘奉银, 黄素娟, 等. 冻融循环作用下改良灰土力学特性与孔隙特征试验研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(6):1833-1841.]

冻融循环作用下改良灰土力学特性 与孔隙特征试验研究

刘春龙^{1,2}, 刘奉银², 黄素娟¹, 付争^{2,3}, 王锐⁴, 王松鹤²

(1. 平阳县交通运输局 公路与运输管理中心, 浙江 平阳 325400; 2. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048;
3. 西安特变电工电力设计院, 陕西 西安 710119; 4. 东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 石灰土作为路基填料代替宕渣是一种较为经济的方案,但灰土初始强度低、硬化速率慢、碳化时间长,不利于快速施工,需要进行改良研究。利用偏高岭土与石灰发生火山灰反应的原理改良灰土,通过单轴压缩试验和三轴压缩试验,分析改良灰土冻融循环条件下力学参数变化规律,利用图像处理技术提取改良灰土图像表面孔隙,建立孔隙率与强度的关系,并通过研究龄期、石灰含量和含水率变化规律,分析偏高岭土改良灰土的机制。结果表明:偏高岭土能够有效提高灰土材料反应速率,改善灰土力学特性;偏高岭土在一定程度上能够恢复冻融循环导致的灰土力学性能损失,降低冰晶体产生的孔隙;灰土强度达到最优后,其强度随着石灰的增加而降低,而经偏高岭土改良后其强度将继续增加;火山灰反应比灰土碳化过程消耗更多的水分,有效提高了灰土的抗冻性能。

关键词: 冻融循环; 强度; 孔隙率; 改良灰土; 图像处理

中图分类号: TU44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)06-1833-09

0 引言

实际工程中利用石灰加固土应用较为广泛,尤其是固化湿土效果更显著^[1],主要是石灰在土体中发生一系列化学和物理化学作用,包括离子交换、结晶作用和碳化作用等^[2]。对于软土地区,路基填筑材料受宕渣资源紧缺和温差变化的影响,为实现就地取材,因地制宜,降低成本,将宕渣填筑变更为石灰土填筑是一个很好的选择,但灰土回填后碳化时间长、硬化速率慢、强度较低,因此,能够使灰土在不完全依靠碳化而快速形成强度,且对受温度影响小的改良灰土是值得研究的。偏高岭土是一种高活性矿物掺合料,其活性成分 SiO_2 和 Al_2O_3 与石灰发生火山灰反应^[3-4],该反应具有速度快,受环境影响小,水化产物强度高特点,且偏高岭土具有生产工艺简单、造价低等特点,成为目前改良灰土的

材料之一。我国多年冻土和季节冻土区占陆地国土面积的一半以上,冻融循环作用对工程建设和运营影响较大^[5]。因此,有必要研究改性灰土在冻融循环条件下的力学特性,以期更好地为实际工程服务。

目前,利用水泥以及化学试剂等对土进行固化的研究较多,但这些材料在生产上均存在一定污染。因此,高效、无污染的活性矿物如偏高岭土、硅灰、粉煤灰等逐渐走入科研工作者的视野。偏高岭土(AS_2)是由高岭土(AS_2H_2)经过适当温度煅烧后形成的人工火山灰材料,与熟石灰(CH)和水(H)发生火山灰反应,生成与水泥材料相似的水化产物,包括水化硅酸钙(CSH)、水化硅铝酸钙(C_2ASH_8)、水化铝酸四钙(C_4AH_{13})和水化石榴石($\text{C}_3\text{A}(\text{S})_{3-x}\text{H}_{2x}$)等,这些水化胶凝物粘结在土颗粒周围,在空间上形成强度骨架,增强灰土材料力学性能^[6-7]。国内外学者对火

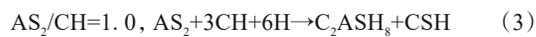
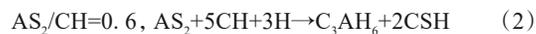
收稿日期: 2022-02-25; 修订日期: 2022-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(12072260;51679198)资助

作者简介: 刘春龙, 工程师, 主要从事岩土力学试验研究. E-mail: lchlong1989@126.com

通信作者: 刘奉银, 教授, 主要从事黄土力学与非饱和土力学研究. E-mail: liufy@xaut.edu.cn

山灰反应的水化产物进行了大量研究,发现反应产物受偏高岭土与石灰比例(主要是 Si/Ca),偏高岭土自身成分的 Si/Al 比,养护环境如 CO₂ 浓度、温度和湿度、养护时间等的差异而存在变化。Serry 等^[8]首先对偏高岭土与石灰水化产物进行研究,晶体相主要是水化硅铝酸钙(C₂ASH₈)。Comel^[9]对碱激发材料进行研究,发现常温条件下偏高岭土与石灰反应生成 C₂ASH₈ 和 CSH 的同时,伴随有 C₄AH₁₃ 或单碳铝化合物(C₄AC-CH₁₁)产生。偏高岭土与石灰发生火山灰反应的方程式可用式(1)~(3)表示。偏高岭土、粉煤灰、硅灰、煤矸石等工业固废价格较低。刘春龙等^[10]对偏高岭土改良灰土材料进行研究,发现加入 10% 的偏高岭土使灰土产生带状分布的凝胶物质,其力学性能较石灰土材料更优异。在此基础上,改性灰土的力学性能受温度影响的规律需要进一步探讨。目前,国内外学者对土体遭受冻融循环进行了大量研究,发现水分迁移及结构性发生变化是其强度弱化的根本原因,且这一过程的水-热-力-气变化极其复杂^[11-14]。综上所述,对灰土的改良及应用研究较多,其力学性能受低温影响需要进一步讨论,尤其是冻融循环次导致的内部孔隙率变化与强度的关系。



本文考虑灰土反应速率和冻融循环条件,拟从灰土的力学参数和孔隙率入手,研究偏高岭土改良灰土的可行性。首先分析偏高岭土改良灰土的力学参数与冻融循环次数的关系,然后利用数字图像

处理技术得出孔隙率与冻融循环次数的关系,在此基础上建立力学参数与孔隙率的关系,最后通过讨论龄期、石灰含量和含水率变化规律,分析偏高岭土改良灰土的机制。

1 试样制备及试验方案

1.1 试样制备

试验材料包括粉质黏土、石灰、偏高岭土和蒸馏水,其中粉质黏土的最大干密度为 1.63 g·cm⁻³,对应的最优含水率为 19.5%,粉质黏土物理性质见表 1。

表 1 粉质黏土的基本物理指标

Table 1 Basic physical parameters of silty clay

土性	比重 d_s	含水率 w /%	塑限 w_p /%	液限 w_L /%	塑性指数 I_p
粉质黏土	2.66	1.07	21.03	32.42	11.39

称取一定质量的粉质黏土(m_{sc}),分别掺入不同比例的石灰(L)和偏高岭土(MK),制备偏高岭土-灰土试样 Lm-MKn(m 为石灰含量, n 为偏高岭土含量),如表 2~3 所示。表 2 中 MK 含量分别为 0%、3%、7% 和 10%(MK 与 m_{sc} 比值),表 3 中 L 含量分别为 7%、10%、13% 和 16%(L 与 m_{sc} 比值),分别研究 MK 和 L 含量对试样强度的影响(A-1 组与 B-3 组相同)。试样中水固比为 30%(水与干燥固体粉末质量比值),按照《土工试验方法标准》^[15]制备 $\phi 39.1 \times 80.0$ mm 干密度为 1.52 g·cm⁻³ 的试样,将试样放入温度 20±0.1 °C、湿度为 95%±5% 的干燥器中,分别养护 3 d、7 d、14 d 和 28 d,进行无侧限抗压强度试验。

表 2 偏高岭土改性灰土试验方案(质量比)

Table 2 Test plan of metakaolin modified lime (mass ratio)

方案编号	试样名称	粉质黏土	石灰含量/%	偏高岭土含量/%	水固比/%	龄期/d			
A-1	L13-MK0	m_{sc}	13	0	30	3	7	14	28
A-2	L13-MK3	m_{sc}	13	3	30	3	7	14	28
A-3	L13-MK7	m_{sc}	13	7	30	3	7	14	28
A-4	L13-MK10	m_{sc}	13	10	30	3	7	14	28

表 3 石灰含量试验方案(质量比)

Table 3 Test plan of lime content (mass ratio)

方案编号	试样名称	粉质黏土	石灰含量/%	偏高岭土含量/%	水固比/%	龄期/d			
B-1	L7-MK0	m_{sc}	7	0	30	3	7	14	28
B-2	L10-MK0	m_{sc}	10	0	30	3	7	14	28
B-3	L13-MK0	m_{sc}	13	0	30	3	7	14	28
B-4	L16-MK0	m_{sc}	16	0	30	3	7	14	28

1.2 冻融循环试验方案

为研究冻融循环对 L_m - MK_n 强度和表面孔隙的影响, 另制备表 2 中 $\phi 39.1 \times 80.0$ mm 和 $\phi 70.0 \times 10.0$ mm 的试样, 养护 7 d 后, 将试样放置在 DWX-150-30 型恒温冷藏箱 (± 20 °C) 进行冻融循环试验。试验采用封闭不补水环境, 分别对冻融循环次数为 0、2、5、7、10、15 和 20 次的 $\phi 39.1 \times 80.0$ mm 试样进行无侧限抗压强度试验和三轴剪切试验, 对 $\phi 70.0 \times 10.0$ mm 试样进行表面观测。其中, 冻 8 h、融 8 h 为 1 次冻融循环周期, 如图 1 所示。

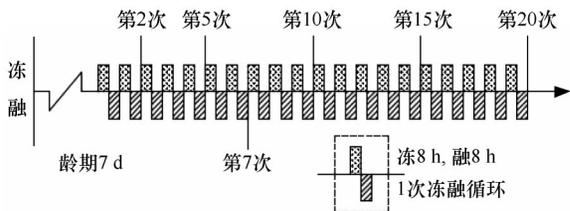


图 1 冻融循环时间历程

Fig. 1 Freeze-thaw cycle time history

1.3 数字图像处理方法

数字图像处理是将图像信号转换成数字信号并利用计算机对其进行处理的过程。目前, 数字图像的彩色信息表达方式常用 RGB 模型, 它是使用红、绿和蓝三原色亮度来定量表示彩色颜色。利用现有图像处理软件可以轻松实现图像的变换、编码压缩、分割、描述、增强和复原。许多学者利用数字图像处理技术对土体微观结构和宏观力学性质的定量关系进行了大量研究, 并建立了一定的关系^[16-17]。本文利用 MATLAB 软件识别微孔隙结构并计算孔隙率, 计算过程如下:

(1) 将经受冻融循环后的试样放置在带有固定卡槽的装置上, 保证对试样每次拍摄的位置相同。

(2) 使用 Photoshop 软件的圆形选区工具, 将拍摄好的照片去除背景, 只留下试样部分, 记录圆形选区的像素半径, 计算照片中的总像素值。

(3) 使用 MATLAB 将仅有试样部分的照片进行灰度处理, 其中 MATLAB 的命令函数为 `rgb2gray`。

(4) 使用 MATLAB 中的 `im2bw` 函数对灰度图像进行二值化, 图像阈值选择 `Graythresh` 函数, 它使用最大类间方差法, 能够自动找到图像一个合适的阈值。

(5) 利用 MATLAB 中的 `numel` 函数, 读取图片中的孔隙数量, 利用步骤(2)计算的总像素值计算

冻融循环后试样产生的孔隙率。

2 试验结果与分析

2.1 无侧限抗压强度与冻融循环次数的关系

根据表 2 的试验方案, 将龄期为 7 d 的灰土试样 (L13-MK0) 和偏高岭土灰土试样 (L13-MK3、L13-MK7、L13-MK10) 取出, 分别进行相应次数的冻融循环并测试试样的无侧限抗压强度, 试验结果如图 2 所示, 并对试验结果进行拟合, 拟合函数及各项系数如表 4 所示。

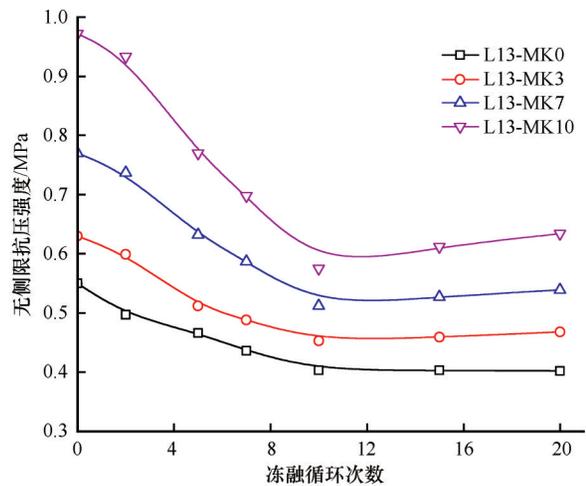


图 2 冻融循环次数与无侧限抗压强度的关系

Fig. 2 Relationship between freeze-thaw cycles and unconfined compressive strength

表 4 无侧限抗压强度与冻融循环次数关系的拟合公式

Table 4 Fitting formula of the relationship between unconfined compressive strength and freeze-thaw cycles

试样名称	$P_f = a_1 N^2 + b_1 N + c_1$ (kPa)			确定系数 R^2
	系数 a_1	系数 b_1	系数 c_1	
L13-MK0	0.643	-19.73	543.5	0.982
L13-MK3	0.953	-27.03	634.1	0.977
L13-MK7	1.269	-37.44	784.9	0.973
L13-MK10	1.987	-57.75	1 000.8	0.962

由图 2 可以看出, L13-MK0 试样 7 d 龄期的强度随冻融循环次数的增加而呈减小趋势, 冻融循环 10 次后强度基本不发生变化。加入偏高岭土的试样, 0 次冻融循环的强度明显高于 L13-MK0 试样, 且偏高岭土含量越多强度越大。随着冻融循环次数的增加, 强度逐渐降低, 但当冻融循环次数超过 10 次后, 强度有所回升, 且增加幅度与偏高岭土含量有关。这一特性在 L13-MK0 试样中不存在, 表明经偏高岭土改良过的灰土试样遭受冻融循环后强度已

恢复,这主要是7 d龄期的试样偏高岭土与石灰继续发生火山灰反应造成的。

2.2 三轴剪切试验结果与分析

与无侧限抗压强度的试验方法相同,对龄期为7 d、不同冻融循环次数的灰土试样(L13-MK0)

和偏高岭土灰土试样(L13-MK3、L13-MK7、L13-MK10)进行三轴剪切试验,围压分别为50、100、150和200 kPa,其黏聚力和内摩擦角与冻融循环次数的试验结果如图3所示,二次函数拟合结果见表5~6。

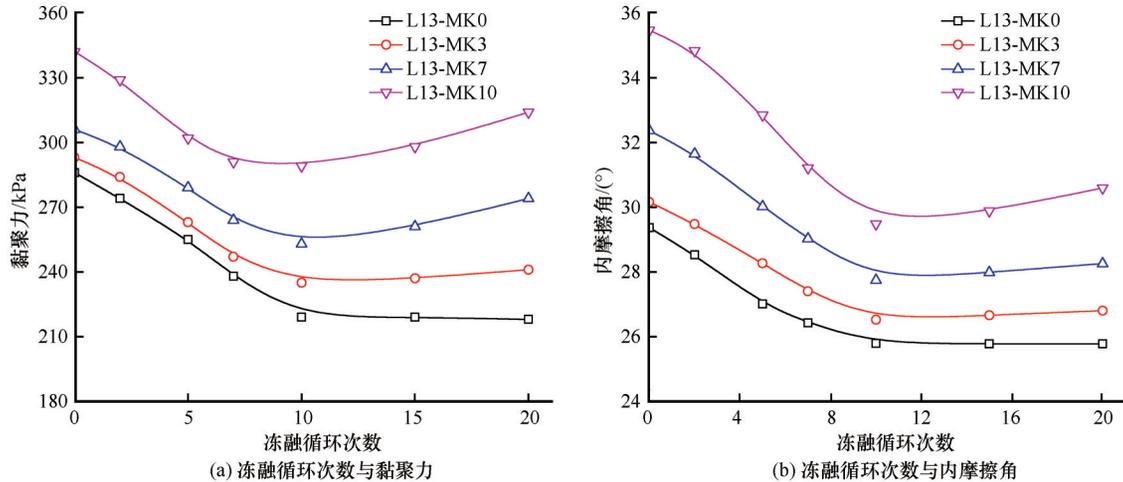


图3 冻融循环次数与黏聚力和内摩擦角的关系

Fig. 3 Relationship between freeze-thaw cycles and cohesion (a) and internal friction angle (b)

表5 冻融循环次数与黏聚力的拟合公式

Table 5 Fitting formula between freeze-thaw cycles and cohesion

试样名称	$P_2 = a_2 N^2 + b_2 N + c_2$ (kPa)			
	系数 a_2	系数 b_2	系数 c_2	确定系数 R^2
L13-MK0	0.281	-9.13	288.8	0.980
L13-MK3	0.300	-8.70	296.1	0.977
L13-MK7	0.343	-8.60	309.6	0.963
L13-MK10	0.487	10.58	343.6	0.960

表6 冻融循环次数与内摩擦角的拟合公式

Table 6 Fitting formula between freeze-thaw cycles and internal friction angle

试样名称	$P_3 = a_3 N^2 + b_3 N + c_3$ (kPa)			
	系数 a_3	系数 b_3	系数 c_3	确定系数 R^2
L13-MK0	0.018	-0.525	29.36	0.985
L13-MK3	0.018	-0.523	30.29	0.982
L13-MK7	0.023	-0.666	32.60	0.977
L13-MK10	0.031	-0.886	35.97	0.959

由图3可以看出,随着冻融循环次数的增加,L13-MK0试样的黏聚力和内摩擦角呈减小趋势,当冻融循环超过10次后,其力学参数变化不大。加入偏高岭土的试样,当冻融循环次数超过10次后,黏聚力和内摩擦角均有所回升,且随着偏高岭土含量

的增多增加幅度越大,这与无侧限抗压强度的试验结果基本一致。

3 孔隙特征与力学特性分析

3.1 冻融循环条件下试样表面的变化

通过数字图像处理技术,对冻融循环后灰土试样(L13-MK0)和偏高岭土灰土试样(L13-MK3、L13-MK7、L13-MK10)的照片进行二值化分析和孔隙参数提取,二值化处理结果和提取的试样孔隙参数如图4所示。其中,A图为0次冻融循环L13-MK0试样,B图为0次冻融循环L13-MK10试样,C图为20次冻融循环L13-MK0试样,D图为20次冻融循环L13-MK10试样。

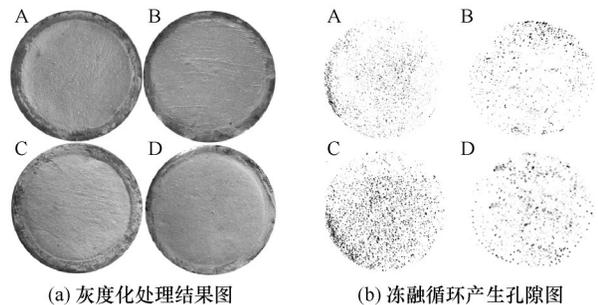


图4 养护7天冻融循环试样灰度结果与孔隙提取图
Fig. 4 Gray-scale results (a) and pore extraction diagram (b) of freeze-thaw cycle samples after curing for 7 days

由图4(a)可以看出,经历20次冻融循环后的L13-MK0试样表面变得较为粗糙,而L13-MK10试样表面变化不大。由提取的试样孔隙图4(b)可以看出,L13-MK0试样和L13-MK10试样在0次冻融循环时,其表面存在一定的天然孔隙,随着冻融循环次数的增多,孔隙逐渐增多。添加偏高岭土的灰土试样,在相同冻融循环次数下产生的孔隙数量均少于灰土试样,可以看出偏高岭土具有改善灰土表面结构的作用。

3.2 孔隙率与冻融循环次数的关系

利用MATLAB图像处理技术,可以计算出试样的孔隙数量,与试样的冻融循环次数的关系如图5所示,孔隙率与冻融循环次数关系的拟合公式见表7。

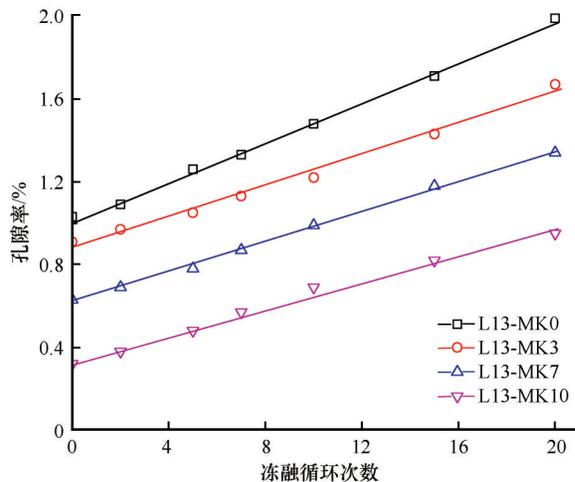


图5 孔隙率与冻融循环次数的关系

Fig. 5 Relationship between porosity and freeze-thaw cycles

表7 试样孔隙率与冻融循环次数的拟合公式

Table 7 Fitting formula between sample porosity and freeze-thaw cycles

试样名称	$R=dN+e$ (%)		
	系数 d	系数 e	确定系数 R^2
L13-MK0	0.048	1.008	0.997
L13-MK3	0.038	0.879	0.990
L13-MK7	0.037	0.618	0.998
L13-MK10	0.032	0.329	0.992

由图5可以看出,龄期为7d的试样未经历冻融循环,表面存在微孔隙,随着冻融循环次数的增加,孔隙率呈增大趋势。但偏高岭土的加入能够有效降低试样表面孔隙率,且随着偏高岭土含量的增多孔隙率明显降低,表明偏高岭土能够改善灰土微孔隙的产生。

3.3 孔隙率与黏聚力、内摩擦角以及抗压强度的关系

由上述研究结果可以看出,冻融循环次数对灰土试样的力学参数(黏聚力、内摩擦角和无侧限抗压强度)影响较大,其主要原因是冻融循环作用导致试样内冰晶体反复冻融,一定程度上破坏试样内部原有结构,使试样内部孔隙率增大,但冻融循环次数影响力学参数只是表象,其根本原因还是试样内部孔隙率决定。因此,将冻融循环次数作为中间变量,可以利用力学参数的拟合公式(表4~6)与孔隙率(表7)建立对应关系,结果如图6~7所示。

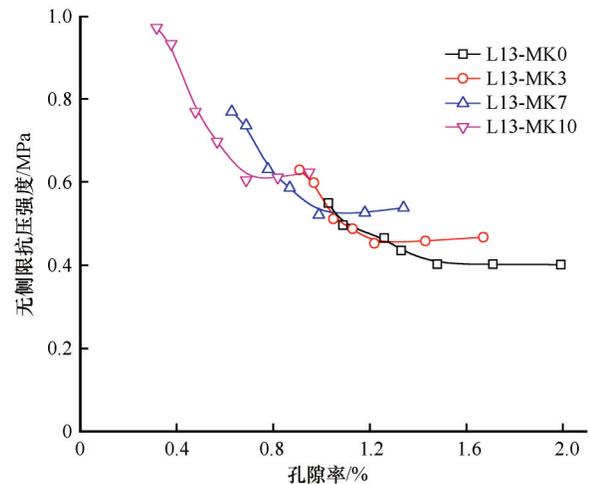


图6 孔隙率与无侧限抗压强度的关系

Fig. 6 Relationship between porosity and unconfined compressive strength

由图6~7可以看出,L13-MK0试样的力学参数随着孔隙率的增加而降低,而添加偏高岭土的L13-MK3、L13-MK7、L13-MK10试样,其力学参数呈先减小后增加的趋势,且产生的孔隙率随着偏高岭土含量的增多而明显降低,表明偏高岭土与石灰发生火山灰反应能够抵消冰晶体对灰土试样结构的破坏,增强灰土抗冻融循环的能力。

4 讨论

冻融循环导致L13-MK0和L13-MK10试样的力学参数降低,但两者的降低形式具有一定的区别。由图3中无侧限抗压强度与冻融循环次数的关系可以看出,L13-MK0试样随着冻融循环次数的增加,无侧限抗压强度(图3)、黏聚力和内摩擦角(图4)始终处于减小趋势,达到10次冻融循环后,其力学参数基本不发生变化,试样在冻结过程中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以晶体的形式粘结在土颗粒间。冻结过

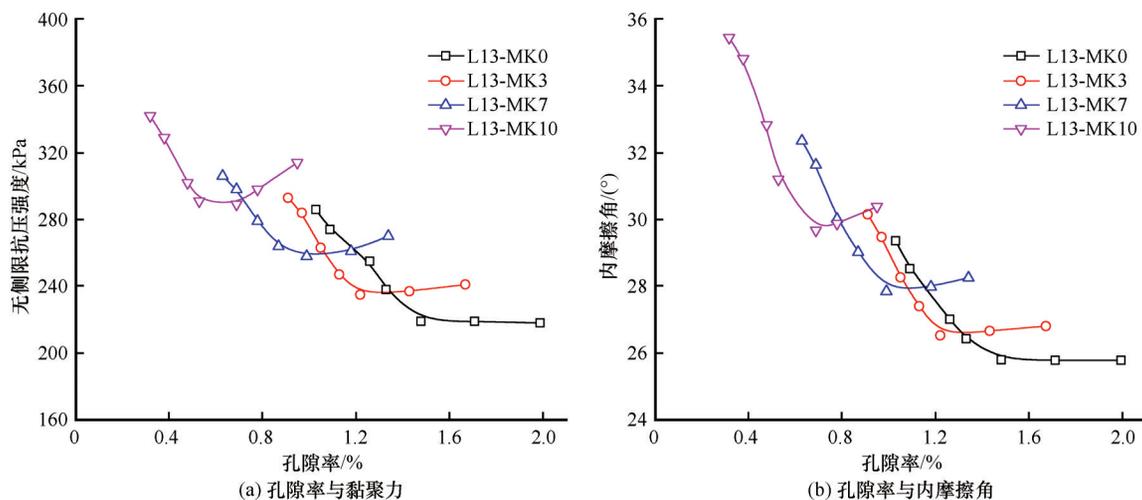


图7 孔隙率与黏聚力和内摩擦角的关系

Fig. 7 Relationship between porosity and cohesion (a) and internal friction angle (b)

程与碳化作用争夺水分,使灰土碳化较慢,且产生孔隙较多。偏高岭土的加入使灰土强度的形成不只依靠碳化作用,经历20次冻融循环的试样,其养护时长比经历10次冻融循环试样多80 h正温龄期,偏高岭土与石灰在正温条件下继续发生火山灰反应,这是随着冻融循环次数的增加力学性能略有恢复的原因,也是灰土材料所完全不具备的^[18-19]。

为进一步研究偏高岭土改良灰土力学性能的机理,分析试样龄期、石灰含量对灰土试样强度的影响及含水率变化规律,对表2中试验结果进行讨论。

4.1 龄期对偏高岭土改良灰土的影响

对表2中MK含量分别为0%、3%、7%和10%,养护龄期分别为3 d、7 d、14 d和28 d的试样进行无侧限抗压强度试验,试验结果如图8所示。

图8中L13-MK0试样养护14 d后强度基本不发生变化,但随着偏高岭土含量的增多,试样强度增长幅度增大,增加10%的偏高岭土,其3 d强度由0.34 MPa增大到0.75 MPa,28 d强度达到2.25 MPa,强度增长速率几乎不变,这就可以解释经历20次冻融循环的试样力学参数恢复的原因(图2~3、图6~7):其强度是冻融循环、碳化作用和火山灰反应三者综合作用的结果。

4.2 石灰含量对强度的影响

表2的试验方案是按照含量百分比制定的,试样总质量不变,但偏高岭土的加入,导致石灰的绝对含量发生变化。为了分析石灰变化的影响,需要进行石灰含量与灰土强度的试验(表3)。其中,L分别为7% (L7-MK0)、10% (L10-MK0)、13% (L13-

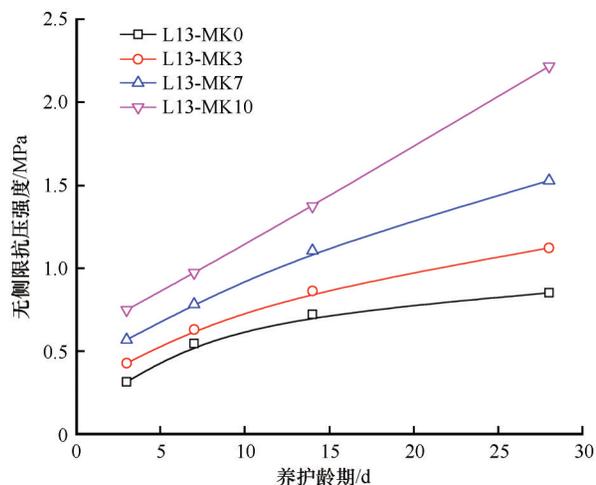


图8 无侧限抗压强度与养护龄期的关系

Fig. 8 Relationship between unconfined compressive strength and curing age

MK0)和16% (L16-MK0),龄期为3 d、7 d、14 d和28 d,试样无侧限抗压强度试验结果如图9所示。

由图9可以看出,3 d龄期的试样强度基本相等,此时灰土以离子交换和结晶作用为主,碳化反应对强度的贡献受石灰含量影响不大。随着龄期的增加,灰土试样强度逐渐增大,离子交换和结晶作用已经完成,碳化反应对强度的影响占主导地位。L含量为13%时强度达到最大(L13-MK0,该组试验与图8灰土试验相同),当L含量增加到16%时(图9,L16-MK0),相当于MK增加3%的试验组(图8,L13-MK3)。而两者的强度规律完全相反,即L16-MK0试样28 d强度相较L13-MK0试样降低了14.3%,L13-MK3试样却增大了31.7%,表明等量增加石灰的效果没有添加偏高岭土的效果好,见表8。

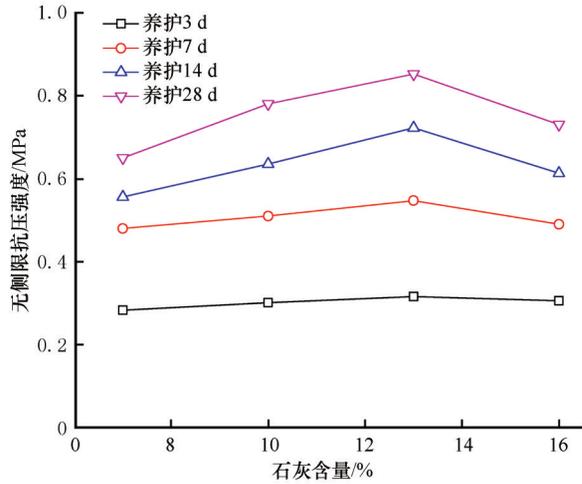


图9 无侧限抗压强度与石灰含量的关系

Fig. 9 Relationship between unconfined compressive strength and lime content

4.3 含水率的变化规律

含水率的变化对冻融循环条件下的试样强度

表8 偏高岭土改良灰土强度对比

Table 8 Strength comparison of metakaolin modified lime samples

方案编号	试样名称	粉质黏土	石灰含量/%	偏高岭土含量/%	水固比/%	无侧限抗压强度/MPa			
						3 d	7 d	14 d	28 d
B-4	L16-MK0	m_{sc}	16	0	30	0.306	0.490	0.613	0.730
B-3	L13-MK0	m_{sc}	13	0	30	0.316	0.547	0.722	0.852
A-1	L13-MK3	m_{sc}	13	3	30	0.428	0.631	0.863	1.122

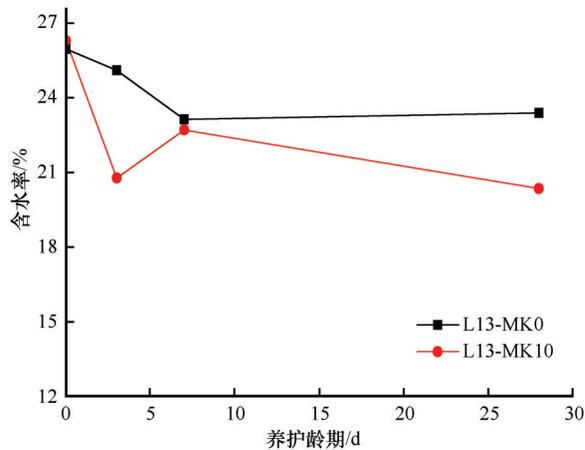


图10 含水率与养护龄期的关系

Fig. 10 Relationship between water content and curing age

5 结论

本文研究冻融循环条件下偏高岭土改良灰土的力学特性和孔隙特征与冻融循环次数的关系,讨论龄期、石灰含量和含水率的变化规律对偏高岭土

影响较大,冻融的本质是水-冰相变化的过程,因此,偏高岭土改良灰土除了增加火山灰反应形成强度骨架外,含水率变化是影响强度和表面孔隙率的另一个原因。表2中L13-MK0和L13-MK10试样的水固比均为30%,对2组试样的0 d、3 d、7 d和28 d含水率进行比较,结果如图10所示。

由图10可以看出,L13-MK0试样的含水率随着龄期增长先减小后不变,这主要是因为石灰离子交换和结晶作用吸收水分,使试样中的自由水含量降低,灰土碳化过程不再消耗水分。偏高岭土的加入使灰土在离子交换和结晶作用的基础上增加了火山灰反应,需要消耗大量的水分,随着反应的进行,火山灰反应产物的变化导致试样含水率回升(7 d龄期),但28 d的L13-MK10试样含水率明显低于L13-MK0试样,表明火山灰反应的最终产物明显降低了灰土试样的含水率,从而影响冻融循环试样的表面孔隙率。

改良灰土的影响机制。主要得出以下结论:

(1)偏高岭土能够提高灰土材料的反应速率,改善灰土材料的无侧限抗压强度、黏聚力和内摩擦角。

(2)冻融循环条件下,偏高岭土能够改善灰土力学性能变差的特点,降低冰晶体产生的孔隙率。

(3)石灰含量达到一定值后,增加3%的石灰将降低强度的8.5%,而同质量的偏高岭土强度增加34%。

(4)偏高岭土发生的火山灰反应,增加试样内部粘结力,且比灰土碳化过程消耗更多的水分,减少冻融循环条件下表面产生的孔隙率。

参考文献(References):

- [1] Wang Xuelang, Zhu Yanpeng. Theoretical analysis and test of the foundation of collapsible loess reinforced by lime piles[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2010, 42(2): 288-293. [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.]

- [2] Zhang Dengliang. The principle of soil improvement[M]. Beijing: China Communications Press, 1990. [张登良. 加固土原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.]
- [3] Song Yanjun, Zhou Zhenjun. Research progress of lime-metakaolin restoration mortars[J]. World Science and Technology Research and Development, 2017, 39(1): 39-44. [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.]
- [4] Peng Hui, Chen Zhikun, Cui Chao, et al. Influencing mechanism of curing temperature on synthesis of metakaolin-based geopolymer[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(3): 379-384. [彭晖, 陈治坤, 崔潮, 等. 偏高岭土基聚物合成的固化温度影响机理[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3): 379-384.]
- [5] Ma Wei, Wang Dayan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 625-640. [马巍, 王大雁. 中国冻土力学研究 50 年回顾与展望[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 625-640.]
- [6] de Silva P S, Glasser F G. Phase relation in the system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ relevant to metakaolin-calcium hydroxide hydration[J]. Cement and Concrete Research, 1993, 23(3): 627-639.
- [7] Gameiro A L, Silva A S, Veiga M R, et al. Lime-metakaolin hydration products: a microscopy analysis[J]. Materials and Technology, 2012, 46(2): 145-148.
- [8] Serry M A, Taha A S, El-Hemaly S A S, et al. Metakaolin-lime hydration products[J]. Silicates Industries, 1984, 79: 103-110.
- [9] Comel M M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals III: influence of calcination process of kaolinite on mechanical strengths of hardened metakaolinite[J]. Cement and Concrete Research, 1983, 13(5): 631-637.
- [10] 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 Edition), 2019, 51(2): 206-211. [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.]
- [11] Edwin J C, Anthony J G. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979, 13(1/2/3/4): 73-92.
- [12] Biermans M B, Dijkema K M, Devries D A. Water movement in porous media towards an ice front[J]. Journal of Hydrology, 1978, 37(1/2): 137-148.
- [13] Song Cunniu. A review on the theory and models about coupled heat-moisture-stress interaction during soil freezing and thawing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(5): 982-988. [宋存牛. 冻融过程中土体水热力耦合作用理论和模型研究进展[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 982-988.]
- [14] Jin Dewu, Niu Fujun, Chen Zhixin, et al. Coupled mechanism for seepage, stress, temperature field of permafrost during freezing-thawing process[J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(5): 40-42. [靳德武, 牛富俊, 陈志新, 等. 土体冻融过程中渗流场-应力场-温度场耦合作用机理研究[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(5): 40-42.]
- [15] Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. [土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版, 2019.]
- [16] Zhang Lizhong, Hu Ruilin, Li Xiangquan, et al. Soil microstructure quantitative analysis system and its application[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(1): 108-112. [张礼中, 胡瑞林, 李向全, 等. 土体微观结构定量分析系统及应用[J]. 地质科技情报, 2008, 27(1): 108-112.]
- [17] Liu Bing, Lu Yi, Liu Chun, et al. Extraction technology of microstructure of sandy soil in compression processes[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 968-974. [刘兵, 卢毅, 刘春, 等. 砂土压缩过程中微观结构提取技术研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 968-974.]
- [18] Cabrera J, Frías M. Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20 °C[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(4): 519-527.
- [19] Gameiro A, Santos Silva A, Veiga R, et al. Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing[J]. Thermochimica Acta, 2012, 535: 36-41.

Experimental study on mechanical properties and pore characteristics of the modified lime mortars under free-thaw cycles

LIU Chunlong^{1,2}, LIU Fengyin², HUANG Sujuan¹, FU Zheng^{2,3},
WANG Rui⁴, WANG Songhe²

(1. Center of Highway and Transportation Management, Pingyang County Traffic and Transportation Bureau, Pingyang 325400, Zhejiang, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Xi'an TBEA Electric Power Design Institute, Xi'an 710119, China; 4. School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: It is an economical solution to replace slag using lime mortars as subgrade filler. However, lime mortars has low initial strength, slow hardening rate, and long carbonization time, which is not conducive to rapid construction. In this paper, the pozzolanic reaction between metakaolin and lime is used to improve lime mortars. Through uniaxial compression testing and triaxial compression testing, the mechanical parameters of improved lime mortars under freeze-thaw cycles is analyzed. The surface porosity of improved lime mortars image is extracted by image processing technology, and the relationship between porosity and strength is established. The mechanism of improved lime mortars in metakaolin is analyzed by studying the age, lime contents and moisture contents. The results show that: metakaolin can effectively increase the reaction rate and mechanical properties of lime mortars; metakaolin can restore the loss of mechanical properties of lime mortars caused by freeze-thaw cycle to a certain extent, and reduce the pores caused by ice crystals; after reaching the optimum strength, the strength of lime mortars will decrease with the increase of lime, while it will continue to increase after being improved by metakaolin; the pozzolanic reaction consumes more water than the carbonation process of lime mortars, and effectively improves the frost resistance of lime mortars.

Key words: freeze-thaw cycle; strength; porosity; modified lime mortars; picture processing

(责任编辑: 温智)