

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1744

偏高岭土协同石灰抑制红黏土收缩的行为与机制

谈云志¹, 胡 焱¹, 邓永锋², 曹 玲¹, 左清军¹, 明华军¹

(1. 三峡大学 特殊土土力学研究所, 湖北 宜昌 443002; 2. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 211189)

摘 要: 红黏土失水易收缩开裂而诱发工程灾害, 为抑制或缓减红黏土的收缩特征, 添加 4%偏高岭土和 5%石灰改善其水敏性。按照最优含水率制备压实试样, 养护 180 d 后抽真空饱和, 脱湿到预定含水率, 随后开展收缩、无侧限抗压强度、吸力和孔隙分析等试验。结果表明, 压实红黏土随着含水率降低, 其无侧限抗压强度呈现先增大后减少的变化规律, 这是脱湿导致的红黏土衍生微裂隙, 进而引起结构性损伤所致。红黏土掺入石灰, 尤其是掺入石灰-偏高岭土后, 虽然脱湿也会引起强度减小, 但接近完全干燥时, 其强度又会增大。由此说明, 偏高岭土协同石灰可以更加有效地抑制红黏土收缩效应, 提高其整体强度。究其原因, 是偏高岭土含有大量无定形硅、铝氧化物, 且呈现边-面“搭接”的独特结构形态, 使其能够快速捕获氢氧化钙溶液中的钙离子, 在红黏土团(颗)粒间形成了胶结性水化物。

关 键 词: 红黏土; 偏高岭土; 收缩; 微裂隙; 吸力

中图分类号: TU 446

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 11-4213-07

Behavior and mechanism of laterite shrinkage inhibition with lime and meta-kaolin mixture

TAN Yun-zhi¹, HU Yan¹, DENG Yong-feng², CAO Ling¹, ZUO Qing-jun¹, MING Hua-jun¹

(1. The Institute of Problematic Soils Mechanics, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China)

Abstract: The laterite is prone to shrinkage and crack due to dehydration, which may result numerous engineering disasters. Lime (5%) and meta-kaolin (4%) were added into laterite for mitigating their shrinkage behavior through improving moisture sensitivity. The samples were compacted at optimal water content and cured for 180 days. And then, samples were vacuumed and saturated immediately. After that, the saturated samples were dehydrated to predetermined moisture content for conducting a series of tests such as shrinkage, unconfined compressive strength, suction and pore analysis. The results showed that compressive strength of laterite increased at first and then decreased with moisture content reducing, which may be caused by micro-cracks derived ascribing to dehumidification. However, the strength of laterite adding with lime, especially lime and meta-kaolinite mixture, would increase with approaching to dry status, even if which has a slight reduction during drying process. This proved that meta-kaolin and lime were able to inhibit the shrinkage effect of laterite, and increase their overall strength. This may be ascribed to the following reasons, meta-kaolin contains lots of amorphous silicon and aluminum oxides and has an edge-surface contacted structure, both enable meta-kaolin to quickly capture calcium ions in calcium hydroxide solution and form cementation hydrates between grains or particles of laterite.

Keywords: laterite; meta-kaolin; shrinkage; microcrack; suction

1 引 言

红黏土是母岩经历炎热多雨气候作用后形成的风化产物, 除主要含有硅、铝氧化物外, 还含有

游离氧化铁等胶结质, 故外观上呈红色^[1]。我国红黏土的分布范围十分广泛, 据统计面积达 108 万平方千米, 主要集中在湖南、云南、贵州和广西等省(自治区)^[2]。红黏土最主要工程特征是降雨吸水

收稿日期: 2018-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.51579137); 湖北省优秀中青年科技创新团队计划项目(No.T201803); 中央财政支持地方高校发展专项(2016); 三峡大学学位论文培育基金项目资助(No.2019SSPY030)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China(51579137), the Youth Innovation Team Project of Hubei Province(T201803), the Special Program of Central Financial Ministry for Supporting Local College Development(2016) and the Research Fund for Excellent Dissertation of China Three Gorges University(2019SSPY030)。

第一作者简介: 谈云志, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 主要从事特殊土土力学方面的研究工作。E-mail: yztan@ctgu.edu.cn

软化成泥,蒸发失水收缩开裂,属于一类水敏性极强的特殊土。而且,受大气降雨-蒸发等环境因素的长期交替作用,会导致出现地基承载力下降,边坡开裂溜塌等工程灾害^[3-4]。

如何弱化或抑制红黏土的水敏性特征,成为研究者关注的热点。红黏土的水敏性行为包括:吸水泥化和失水收缩两个方面^[5]。普遍认为,压实的非饱和土中,当土体含水率越低,其基质吸力越大,强度也就越高^[6-7]。因此,大多数学者都只关注土体的吸水泥化问题,认为只要防止水分迁移或渗入工程土体,就可以降低出现工程病害的可能性^[8]。但对于收缩性黏土而言,其收缩开裂的特征十分显著^[9-10],研究发现:压实红黏土失水收缩主要引起了团粒间孔隙的变化,而对团粒内孔隙影响不大^[11]。虽然,含水率减少基质吸力增大,但因含水率减少,出现了收缩开裂,导致结构性损伤。基质吸力增大和裂隙衍生会对强度发展产生对冲作用。显然,仅关注吸水泥化问题还远远不够,其失水收缩导致的开裂行为也应得到重视。目前,有学者通过增大初始压实度或初始填筑含水率,抑制红黏土失水收缩行为^[12];也有通过添加碎石等提高其抗裂能力^[13]。当然,掺入石灰后,黏土的收缩性亦能得到显著改善^[14-15],但是否能够达到预期的理想效果,还有待进一步验证。

偏高岭土是高岭土经过 500~700 °C 煅烧后形成的硅、铝氧化物,具有高火山灰反应活性。笔者前期开展了偏高岭土协同石灰稳定红黏土力学性能研究,发现偏高岭土可以快速提高其强度,但对其水敏性是否有抑制作用呢?对此,还没有取得定论。为此,论文以压实红黏土为对象,开展不同湿度状态下的强度以及收缩试验;同时,测定其吸力的变化特征;再结合细微观试验,揭示偏高岭土协同石灰抑制红黏土收缩的内在原因。

2 试验材料和方法

2.1 试验材料

红黏土试样取自广西桂林,利用 X 射线荧光光谱分析法(XRF)测得其硅、铝氧化含量高达 73.9%、氧化铁含量为 19.1%。红黏土风干后过 0.5 mm 筛,然后按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)^[16]测得的基本特性,见表 1,其液限大于 50%,属于高液限土。

风干红黏土过 5 mm 筛后,参考重型击实方法获得其最大干密度为 1.48 g/cm³,最优含水率为 30.2%。

表 1 红黏土试样的基本特性
Table 1 Basic properties of laterite

相对密度	液限 / %	缩限 / %	自由膨胀率 / %	最优含水率 / %	最大干密度 / (g/cm ³)
2.71	56.5	35.4	16.9	30.2	1.48

石灰购自江苏宿迁,氧化钙含量(CaO)为 98.34%、氧化铝含量为 0.57%,其相对密度为 2.32,初始含水率为 3.1%。偏高岭土购自壳牌公司,主要成分是 Al₂O₃ (46.2%) 和 SiO₂ (49.5%), 相对密度为 2.63, 初始含水率为 1.5%。

偏高岭土由高岭土经过 500~700 °C 高温煅烧脱去羟基而得到,煅烧后形成的偏高岭土含有大量无定形硅铝氧化物,结构更加无序,因而其火山灰活性得到极大提高^[17]。图 1 是偏高岭土和高岭土的热重曲线。其试验测试条件如下:美国 Ta 热重分析仪(SDT Q600),升温速率为 10 °C/min,氮气氛围,升温范围为 25~1 000 °C。

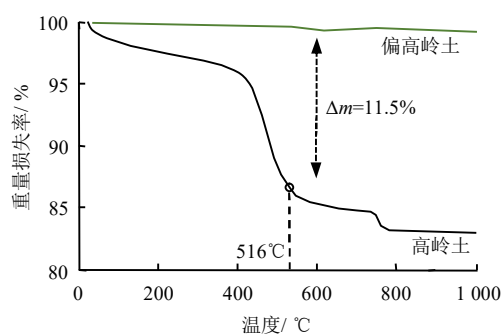


图 1 高岭土与偏高岭土的热重曲线
Fig.1 Thermal gravity curves of kaolin and metakaolin

结果表明,高岭土主要在 400~750 °C 的范围内失重,失重率 Δm 高达 11.5%;而偏高岭土的失重率不超过 1.0%,说明前期的煅烧作用下,偏高岭土已完成脱羟基过程。另外,高岭土在 400~516 °C 范围内的失重速率明显大于 516~750 °C 范围内的失重速率,这是由于处于硅氧四面体和铝氧八面体中间的羟基脱离后,不能跟处于表面的羟基一样快速逃逸,需要有一个缓慢的迁移过程。

利用激光粒度分析仪测得红黏土、石灰和偏高岭土干燥状态下的粒度分布情况(见图 2)。可以看出,红黏土的团(颗)粒均大于石灰和偏高岭土,这为偏高岭土和石灰颗粒能够完全进入到红黏土团粒间发生火山灰反应提供了基础条件。

2.2 试样制备

红黏土和石灰等外添材料混合后,因红黏土与

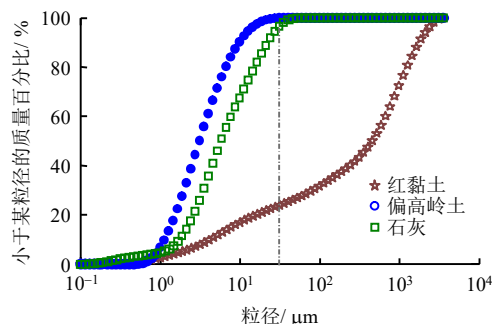


图 2 试验材料颗粒分布

Fig.2 Particle size distribution curves of testing materials

石灰、偏高岭土的相对密度不同, 故其混合物相对密度 G_m 应考虑石灰与偏高岭土掺入比的影响, 掺入石灰和偏高岭土的混合试样相对密度:

$$G_m = \frac{1}{\frac{1 - R_L - R_{MK}}{G_{La}} + \frac{R_L}{G_L} + \frac{R_{MK}}{G_{MK}}} \quad (1)$$

式中: G_{MK} 为偏高岭土相对密度; G_L 为石灰相对密度; G_{La} 为红黏土相对密度; R_{MK} 为偏高岭土掺入比, 即偏高岭土占试样总质量百分比; R_L 为石灰掺入比。

试样干密度 ρ_d 和初始孔隙比 e_0 的关系如下:

$$\rho_d = \frac{G_m}{1 + e_0} \quad (2)$$

根据 $R_L = 5.0\%$ 、 $R_{MK} = 4.0\%$ 、 $G_{La} = 2.71$ 、 $G_L = 2.32$ 和 $G_{MK} = 2.63$, 代入式 (1) 计算得到红黏土-石灰混合物 $G_{m-L} = 2.687$, 红黏土-石灰-偏高岭土混合物 $G_{m-L-MK} = 2.684$ 。

可以看出, 混合物相对密度不同, 即使初始干密度相同, 其孔隙比也不同; 为了后续试验结果具有可比性, 所有试样都按照相同的孔隙比控制初始压实状态。由于红黏土试样的初始干密度是 1.43 g/cm^3 , 其对应的初始孔隙比 $e_0 = 0.89$ 。所以, 按照该初始孔隙比, 结合混合物的相对密度, 代入式 (2) 计算出石灰-红黏土及偏高岭土-石灰-红黏土混合物所对应的制样干密度分别为 1.422 g/cm^3 和 1.420 g/cm^3 。

2.3 试验方案

为了说明偏高岭土具有促进石灰抑制红黏土收缩的能力, 配置了 3 类试样: 红黏土、红黏土+石灰以及红黏土+石灰+偏高岭土。试样的初始状态参数, 详见表 2。

所有试样压实完成后, 抽真空密封, 然后在 25°C 环境下养护 180 d。各试验过程简述如下:

表 2 试验方案
Table 2 Testing plan

序号	试验内容	试样种类	试样初始状态
1	收缩试验	红黏土, 简称 La	初始孔隙比 $e_0 = 0.89$
		红黏土+5%石灰, 简称 La+L	压实含水率 $w = 32\%$
		红黏土+5%石灰+4%偏高岭土, 简称 La+L+MK	环刀试样 ($\phi 61.8\text{mm} \times 20\text{mm}$)
		红黏土, 简称 La	初始孔隙比 $e_0 = 0.89$
2	无侧限抗压强度与吸力试验	红黏土+5%石灰, 简称 La+L	压实含水率 $w = 32\%$
		红黏土+5%石灰+4%偏高岭土, 简称 La+L+MK	圆柱试样 ($\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$)
3	直剪试验	红黏土, 简称 La	初始孔隙比 $e_0 = 0.89$
		红黏土+5%石灰, 简称 La+L	压实含水率 $w = 32\%$
		红黏土+5%石灰+4%偏高岭土, 简称 La+L+MK	环刀试样 ($\phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$)
4	孔隙分析试验	红黏土+5%石灰, 简称 La+L	初始孔隙比 $e_0 = 0.89$ 初始含水率 $w = 0\%$, 26% 边长为 1.5 cm 立方体
		红黏土+5%石灰+4%偏高岭土, 简称 La+L+MK	初始孔隙比 $e_0 = 0.89$ 初始含水率 $w = 0\%$, 28% 边长为 1.5 cm 立方体

(1) 收缩特性: 试样养护 180 d 后, 抽真空饱和, 再按照《公路土工试验规程》^[16]中收缩试验方法进行试验。

(2) 无侧限抗压强度 (UCS): 圆柱试样养护好后, 抽真空饱和。然后, 置于恒温恒湿箱 (55°C) 内脱湿, 通过不定期称量试样脱湿过程中的质量, 掌握其含水率状态, 当达到预定含水率后, 将试样抽真空密封, 放置于 25°C 恒温室内继续存放 2 个月, 以便试样内外湿度达到均匀分布。试样的预期含水率从 32% 开始, 按照 4% 幅度逐渐递减至 0%。完成无侧限抗压强度后, 选取 10~20 g 试样, 利用露点水势仪 (WP4C) 测量其吸力。

(3) 直剪强度: 试样养护 180 d 后, 抽真空饱和后后放置到 9 种饱和盐溶液缸内 (详见表 3), 控制恒定室温 25°C 。当达到吸力平衡时, 称量试样质量, 计算其含水率; 然后, 进行直剪试验, 其法向压力为 200 kPa, 剪切速率为 0.8 mm/min。

(4) 压汞 (MIP) 孔隙分析: 首先, 取无侧限抗压强度的同批次试样, 切成边长约 1.5 cm 的立方体; 经过液氮冷冻后, 快速放入真空冷冻干燥机干燥 24 h, 该方法可以回避传统烘干法引起的体缩问题。然后, 借助康塔孔隙压汞孔隙分析仪 (Pore Master 60GT) 获得 6 nm~100 μm 范围的孔隙分布。

表3 饱和盐溶液-吸力 (25℃)
Table 3 Suction of saturated salt solution (25℃)

溶液	吸力 / MPa	溶液	吸力 / MPa
K ₂ SO ₄	3.76	K ₂ CO ₃	115.15
KCl	23.59	MgCl ₂	152.94
NaCl	38.92	CH ₃ COOK	204.65
KI	51.11	LiCl	299.14
NaBr	75.68		

3 偏高岭土协同石灰抑制红黏土收缩的行为

3.1 压实土的失水收缩特征

压实红黏土 (La)、石灰-红黏土 (La+L) 以及偏高岭土-石灰-红黏土 (La+L+MK) 的收缩曲线, 见图 3。

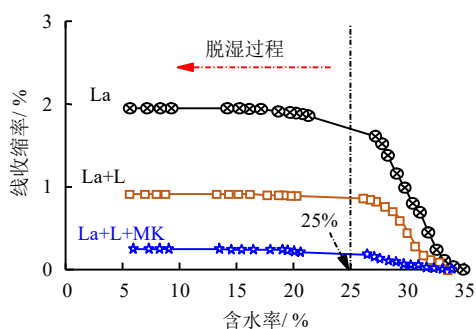


图3 红黏土稳定前后的收缩曲线

Fig.3 Shrinkage curves of treated and untreated laterite

可以看出, 所有试样的缩限值约为 25%。掺入石灰后, 红黏土的线收缩率由掺入前的 1.95% 降低到 0.91%; 而掺入偏高岭土和石灰的红黏土, 其线收缩率降到 0.25%, 降低了近 8 倍。由此可见, 偏高岭土能促进石灰抑制红黏土的收缩行为。

3.2 压实土失水收缩的力学响应

压实红黏土 (La)、石灰-红黏土 (La+L) 以及偏高岭土-石灰-红黏土 (La+L+MK) 的基质吸力随含水率的变化规律, 见图 4。

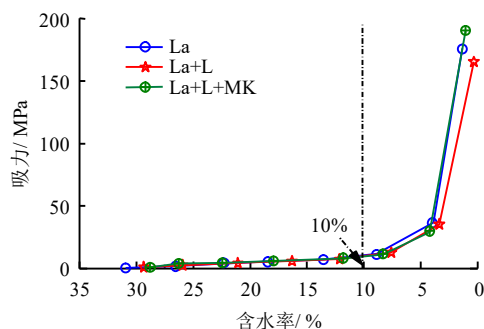


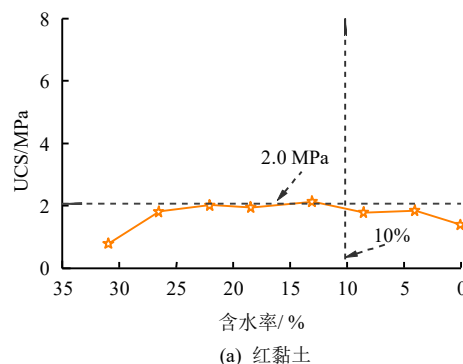
图4 吸力与含水率关系

Fig.4 Suction vs. moisture content

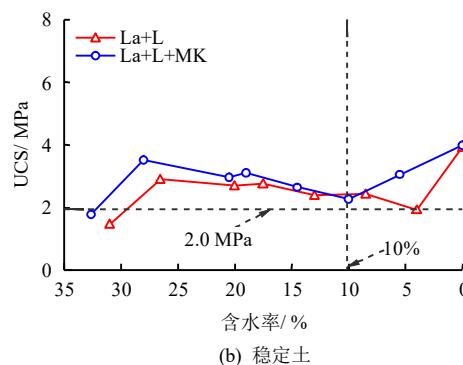
可以看出, 所有试样的吸力随含水率减少而逐渐增大, 尤其是当含水率低于 10% 时, 吸力陡然剧增。按照非饱和土力学观点, 基质吸力增大, 土体强度增大。但压实红黏土的无侧限抗压强度 (UCS), 当含水率降低到 25% 以后, 并没有持续增大, 而是稳定在 4.0 MPa, 随后反而降低, 见图 5(a)。

孔令伟等^[18]认为, 出现这种矛盾现象的原因是脱湿过程中试样衍生了微裂隙, 吸力的贡献与微裂隙发育引起的结构损伤发生抵消。

不过, 当添加石灰或偏高岭土和石灰后, 虽然脱湿也会引起强度降低, 但其强度整体大于 4.0 MPa; 特别是接近完全干燥时, 稳定土的强度又会增大 (见图 5(b)), 这表明掺入石灰和偏高岭土后可以有效提高红黏土干燥状态下的强度。



(a) 红黏土



(b) 稳定土

图5 无侧限抗压强度与含水率关系

Fig.5 UCS vs. moisture content

进一步观察直剪破坏强度随含水率的变化趋势, 如图 6 所示。可以看出, 直剪破坏强度随含水率降低, 先增大后减小, 脱湿到含水率 25% 时达到最大值; 而该含水率恰好是缩限值。它们与无侧限抗压强度的变化规律基本一致, 只不过当含水率小于 15% 时, 红黏土直剪破坏强度并非继续递减, 而是有增大的趋势, 这可能与红黏土失水收缩成强结合团粒, 且在上覆荷载 (200 kPa) 作用下, 充分发挥了团粒之间的摩擦作用所致。

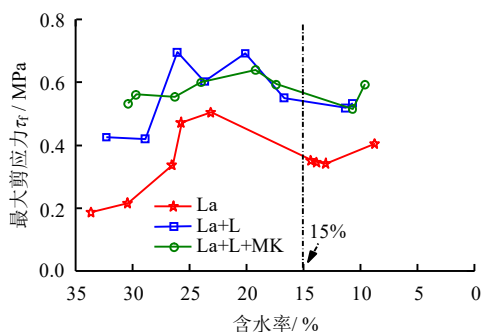
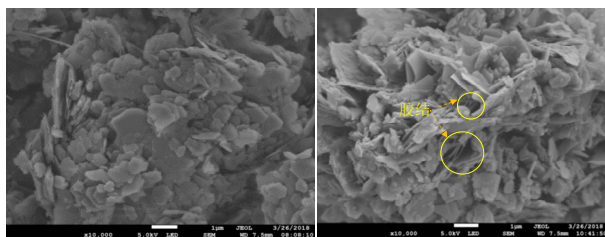


图 6 直剪破坏强度与含水率关系

Fig.6 Peaks of direct shear strength vs. moisture content

4 偏高岭土协同石灰抑制红黏土收缩的机制

偏高岭土能够协同石灰抑制红黏土收缩, 与偏高岭土的成分与结构紧密相关。图 7 是纯高岭土和纯偏高岭土中分别掺入 5% 石灰, 标准养护 28 d 后的微观形貌。



(a) 石灰-高岭土

(b) 石灰-偏高岭土

图 7 石灰-高岭土和石灰-偏高岭土的微观形貌

Fig.7 SEM of limed kaolinite and limed meta-kaolinite

高岭石是面-面“层叠”晶体结构, 经过煅烧后形成了偏高岭土边-面“搭接”无定形结构, 即火山灰活性更强, 故更容易快速捕获水化石灰溶液中的钙离子。从而, 相同养护时间条件下, 后者形成的胶结物很明显, 而前者并不显著。

从稳定红黏土中钙离子浓度变化情况, 也能发现偏高岭土具有更强捕获钙离子的能力。相同石灰掺入比 (5%), 添加偏高岭土的石灰稳定土, 其钙离子浓度含量明显小于石灰红黏土 (见图 8), 说明添加的偏高岭土快速捕获了溶液中的钙离子。

偏高岭土能够快速捕获溶液中钙离子的本质原因, 与偏高岭土的分子结构紧密相关。Konan 研究表明, 水化钙离子不仅被高岭土的“边”吸附, 而且会被“面”吸附^[19]。因为高岭土晶片是层叠, 当水化钙离子在黏土颗粒表面形成胶结物时, 会阻止黏土矿物进一步溶解^[20], 而偏高岭土成边-面“搭接”排列, 与石灰溶液接触界面更大, 且含有

大量无定形硅、铝氧化物, 从而能快速形成具有胶结能力的水化物, 使得红黏土团 (颗) 粒之间具有更强的结构性强度。

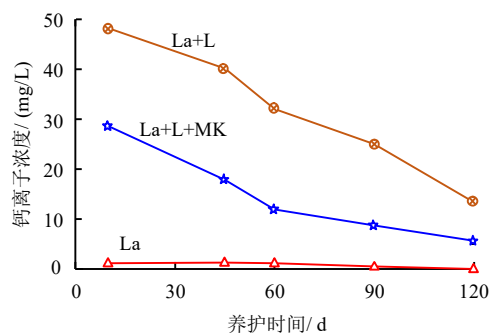
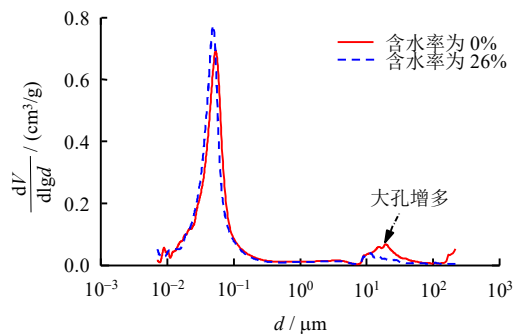


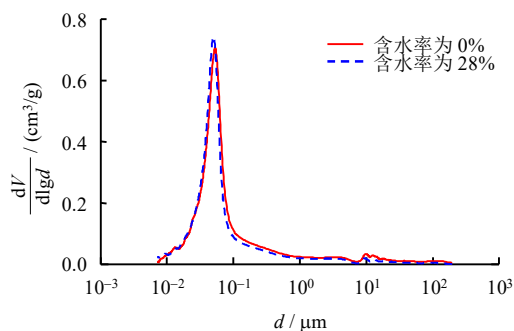
图 8 钙离子浓度与养护时间关系

Fig.8 Calcium concentration vs. curing time

对比石灰稳定土掺入偏高岭土前后的孔隙分布规律, 也能进一步佐证上述结论。不难发现, 如果红黏土中仅掺入石灰, 脱湿引起孔径在 10~100 μm 范围的孔隙明显增多, 见图 9(a), 即团粒间孔隙增大; 然而, 如果掺入石灰+偏高岭土, 则该孔径范围的孔隙变化不明显, 见图 9(b), 图中 d 为直径, V 为压入贡的体积。说明偏高岭土能够增强石灰稳定土的结构性, 从而抑制红黏土的收缩效应, 有效预防微裂隙发育。



(a) 掺入石灰



(b) 掺入石灰-偏高岭土

图 9 稳定土孔隙分布密度曲线

Fig.9 Pore size distribution of treated soils

5 结 论

(1) 高岭土经过高温煅烧后, 不仅使得羟基脱离, 而且改变了 Si-O-Si 和 Si-O-Al (Mg) 等的空间排列结构。

(2) 压实红黏土脱水后吸力会增大, 但由于脱湿引起了微裂隙衍生, 导致其强度会降低; 添加石灰和偏高岭土后, 不仅能提高红黏土的整体强度, 更能抑制其收缩效应。

(3) 偏高岭土具有大量无定形硅、铝氧化物, 因呈现边-面“搭接”的结构形态, 更容易捕获石灰溶液中的钙离子, 从而可以更加快速形成具有胶结性能的水化物。

参 考 文 献

- [1] GIDIGASU M D. Laterite soil engineering: pedogenesis and engineering principles[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.
- [2] 王毓华. 红黏土定义论证[C]//第二届全国红土工程地质研讨会. 贵州: 贵州科技出版社, 1991.
WANG Yu-hua. Definition and demonstration of laterite[C]//The Second National Symposium on Laterite Engineering and Geology. Guizhou: Guizhou Science and Technology Press, 1991: 11—20.
- [3] 杨华舒, 魏海, 杨宇璐, 等. 碱性材料与红土坝料的互损劣化试验[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(1): 189—192.
YANG Hua-shu, WEI Hai, YANG Yu-lu, et al. Deterioration reaction between alkali materials and laterite dams[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(1): 189—192.
- [4] 穆坤, 孔令伟, 张先伟, 等. 红黏土工程性状的干湿循环效应试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2247—2253.
MU Kun, KONG Ling-wei, ZHANG Xian-wei, et al. Experimental investigation on engineering behaviors of red clay under effect of wetting-drying cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(8): 2247—2253.
- [5] 汪东林, 栾茂田, 杨庆. 非饱和重塑黏土干湿循环特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1862—1867.
WANG Dong-lin, LUAN Mao-tian, YANG Qing. Experimental study on unsaturated remoulded clay subjected to drying and wetting cycle paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1862—1867.
- [6] 刘小文, 常立君, 胡小荣. 非饱和红土基质吸力与含水率及密度关系试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3302—3306.
LIU Xiao-wen, CHANG Li-jun, HU Xiao-rong. Experimental research of matric suction with water content and dry density of unsaturated laterite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3302—3306.
- [7] 申春妮, 方祥位, 王和文, 等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1347—1351.
SHEN Chun-ni, FANG Xiang-wei, WANG He-wen, et al. Research on effects of suction, water content and dry density on shear strength of remolded unsaturated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1347—1351.
- [8] 卢海锋, 陈盼, 韦昌富. 脱湿条件下黏性土吸力强度演化规律及其微观机制[J]. 岩土力学, 2017, 38(增刊 2): 145—150.
LU Hai-feng, CHEN Pan, WEI Chang-fu. Evolution of suction strength of clayey soil under drying conditions and its microscopic mechanism[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(Suppl.2): 145—150.
- [9] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1992, 29(2): 263—277.
- [10] TANG C, SHI B, LIU C, et al. Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils[J]. **Engineering Geology**, 2008, 101(3—4): 204—217.
- [11] 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 Yun-zhi, YU Bo, LIU Xiao-ling, et al. Pore size evolution of compacted laterite under desiccation shrinkage process effects[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(2): 369—375.
- [12] 陈开圣. 压实红黏土收缩变形特性[J]. 公路, 2015, (2): 25—29.
CHEN Kai-sheng. The shrinkage properties of compacted laterite[J]. **Highway**, 2015, (2): 25—29.
- [13] 文松霖, 任佳丽, 姜志全, 等. 碎石桩红黏土复合地基的实例分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 302—305.
WEN Song-lin, REN Jia-li, JIANG Zhi-quan, et al. Case analysis of red clay gravel pile composite foundation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Suppl.2): 302—305.
- [14] BELL F G. Lime stabilization of clay minerals and

- soils[J]. **Engineering Geology**, 1996, 42(6): 223—237.
- [15] 刘磊, 董薇, 李秉宜. 消石灰改良红黏土室内试验研究[J]. **人民珠江**, 2017, 38(3): 25—28.
- LIU Lei, DONG Wei, LI Bing-yi. Studies on improved red clay mixed with lime[J]. **People Pearl River**, 2017, 38(3): 25—28.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG E40—2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: People's Communication Press, 2007.
- [17] SHVARZMAN A, KOVLER K, GRADER G S, et al. The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite[J]. **Cement and Concrete Research**, 2003, 33: 405—416.
- [18] 孔令伟, 赵颖文, 郭爱国, 等. 原状红黏土脱湿过程的工程性状与机制分析[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议. 北京: 清华大学出版社, 2003: 424—427.
- KONG Ling-wei, ZHAO Ying-wen, GUO Ai-guo, et al. Analysis of engineering characters and mechanism of the dehumidification process of undisturbed laterite[C]//9th Academic Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, China Civil Engineering Society. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 424—427.
- [19] KONAN K L, PEYRATOUT C, et al. Comparison of surface properties between kaolin and metakaolin in concentrated lime solutions[J]. **Journal of Colloid and Interface Science**, 2009, 339(1): 103—109.
- [20] KONAN K L, PEYRATOUT C, et al. Surface properties of kaolin and illite suspensions in concentrated calcium hydroxide medium[J]. **Journal of Colloid and Interface Science**, 2007, 307(1): 101—108.
-
- 上接第 4212 页
- [20] 刘石, 许金余, 白二雷, 等. 基于分形理论的岩石冲击破坏研究[J]. **振动与冲击**, 2013, 32(5): 163—166.
- LIU Shi, XU Jin-yu, BAI Er-lei, et al. Research on impact fracture of rock based on fractal theory[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2013, 32(5): 163—166.
- [21] 齐庆新, 彭永伟, 李宏艳, 等. 煤岩冲击倾向性研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(增刊 1): 2736—2742.
- QI Qing-xin, PENG Yong-wei, LI Hong-yan, et al. Study of bursting liability of coal and rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(Suppl.1): 2736—2742.
- [22] 姜福兴, 刘懿, 翟明华, 等. 基于应力与围岩分类的冲击地压危险性评价研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2017, 36(5): 1041—1052.
- JIANG Fu-xing, LIU Yi, ZHAI Ming-hua, et al. Evaluation of rock burst hazard based on the classification of stress and surrounding rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(5): 1041—1052.
- [23] 刘保县, 黄敬林, 王泽云, 等. 单轴压缩煤岩损伤演化及声发射特性研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(增刊 1): 3234—3238.
- LIU Bao-xian, HUANG Jing-lin, WANG Ze-yun, et al. Study on damage evolution and acoustic emission character of coal-rock under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Suppl.1): 3234—3238.
- [24] 刘向峰, 汪有刚. 声发射能量累积与煤岩损伤演化关系初探[J]. **辽宁工程技术大学学报(自然科学版)**, 2011, 30(1): 1—4.
- LIU Xiang-feng, WANG You-gang. Investigation into law of AE energy accumulation and damage evolution on coal and rock[J]. **Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)**, 2011, 30(1): 1—4.
- [25] 王云飞, 黄正均, 崔芳. 煤岩破坏过程的细观力学损伤演化机制[J]. **煤炭学报**, 2014, 39(12): 2390—2396.
- WANG Yun-fei, HUANG Zheng-jun, CUI Fang. Damage evolution mechanism in the failure process of coal rock based on mesomechanics[J]. **Journal of China Coal Society**, 2014, 39(12): 2390—2396.