

DOI: 10.11779/CJGE202112020

处治红黏土水-力性能的团粒尺寸效应

谈云志, 胡 焱, 占少虎, 刘 伟, 明华军

(三峡大学特殊土资源化利用宜昌市重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 红黏土因高黏粒含量和高含水率而易于成团, 当掺入石灰或水泥处治时, 会存在拌和不均的难题, 进而影响处治效果。选择4组红黏土, 其最大团粒尺寸 D_{\max} 为 5.0, 2.0, 1.0, 0.5 mm。按照干质量比, 偏高岭土: 石灰: 红黏土=5: 5: 90 配置试样。然后, 喷入蒸馏水增湿到含水率 33.2%; 最后, 压实成型养护至预定龄期, 再开展水-力性能和微观特性等试验。结果表明, 随着最大团粒尺寸变大, 处治红黏土线收缩率增大、无侧限抗压强度降低; 但掺入偏高岭土后, 相同团粒尺寸的处治土收缩性得到抑制, 强度也得到提升。究其原因, 红黏土团粒尺寸大, 石灰只能附着在团粒的表面, 仅形成团粒间的“桥接”, 不能形成包络状胶结; 偏高岭土含有大量无定形的硅、铝氧化物, 具有高“火山灰”活性, 可以快速捕捉水化石灰中的钙离子, 形成硅、铝酸钙等胶结物; 同时, 偏高岭土还充填了团粒间孔隙, 二者的联合作用增强了处治红黏土的水-力性能。

关键词: 红黏土; 团粒尺寸; 偏高岭土; 石灰; 水-力性能

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)12-2323-07

作者简介: 谈云志(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事特殊土方面的教学与科研工作。E-mail: yztan@ctgu.edu.cn。

Effects of aggregate sizes on hydro-mechanical performances of treated laterite

TAN Yun-zhi, HU Yan, ZHAN Shao-hu, LIU Wei, MING Hua-jun

(Yichang Key Laboratory of the Resources Utilization for Problematic Soils, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The laterite is prone to aggregates due to the possession of high-content clay and moisture. It may be difficult to mix uniformly when lime and/or cement is added into the laterite, and further influences the treated effects. Four groups of laterite are selected, with the aggregate sizes of 5.0, 2.0, 1.0 and 0.5 mm, respectively. The mixing ratio of metakaolin-lime-laterite is 5: 5: 90 in dry weight. Then, the mixtures are moistened to the predetermined water content of 33.2% using distilled water. Finally, the hydro-mechanical performances and microstructure tests on the laterite specimens are carried out after compacted and cured to predicted periods. The results show that the linear shrinkage increases and the unconfined compressive strength decreases with the increasing of the aggregate size of the treated laterite. However, the inhibition of the shrinkage and the enhancement of the strength appear after adding metakaolin into the treated laterite with the same aggregate size. This may be ascribed to the following reasons, lime just adheres to the surface of the laterite aggregates, which only forms “bridging” linkage between the aggregates, and does not develop enveloping cementation. The metakaolin, containing plenty of amorphous silicon and aluminum oxides, can quickly capture the calcium ions in calcium hydroxide solution and form cementation hydrate silicon and calcium aluminate owing to having high pozzolanic activity. Meanwhile, the metakaolin also play a role of filling into the inter-pores of soils. Both of them improve the hydro-mechanical performances of the treated laterite.

Key words: laterite; aggregate size; metakaolin; lime; hydro-mechanical performance

0 引 言

红黏土是碳酸盐类母岩受湿热多雨气候作用风化而成的高塑性黏土^[1]。中国境内主要分布于云南、贵州、湖南和广西等省或自治区, 呈现量大面广的区域分布特点^[2]。红黏土具有高天然含水率、高塑性指数、高孔隙比和易成团等特点^[3], 致使其用于公路路基等工程填筑时难以压实; 压实后也易受水分变动而发生收缩开裂或吸水泥化等病害^[4]。为了改善红黏土的水-

力性能, 主要采用两类方法: ①物理方法, 通过掺入砂等粗颗粒调控红黏土的级配, 优化压实工艺, 达到提高其强度等力学性能; ②化学方法, 使用水泥、石灰等胶凝材料, 提升红黏土的胶结能力, 钝化红黏土的水敏性^[5]。但受原材料供给限制, 主要以掺石灰或水泥等方法最为普遍。据此, 必然存在“灰-土”拌合

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51579137)

收稿日期: 2020-04-15

的施工环节。当前,现场施工拌和主要以“厂拌法”或“路拌法”为主,显然难以达到室内试验般精细化控制程度,石灰或水泥主要粘附于黏土团粒表面,客观上造成现场“灰-土”难以均匀拌合,由此诱发大量次生的工程病害问题。

为此,黏土团粒尺寸效应研究,也得到了很多学者的关注。Shi 等^[6]和蔡奕等^[7]研究了黏土团粒尺寸与强度参数(内摩擦角、黏聚力)的关系,发现二者呈负相规律;Wang 等^[8]利用石灰处治不同粒径的细粒土,结果表明:受处治后的细粒土压缩性明显降低,且粒径越小压缩性越低;谈云志等^[9]开展了红黏土承载比强度的土团尺寸效应研究,发现土团尺寸小于 5.0 mm 时强度最大;而超过 10.0 mm 后,尽管添加 5% 石灰也不能提高其承载能力;Tang 等^[10]指出,石灰处治细粒黏土的刚度主要受粒径影响,而含水率的影响则可以忽略不计。不难发现,团粒尺寸能够显著影响石灰处治红黏土的效果,对此已取得共识;但其影响机制及其消减方法还值得进一步探讨。

现行《公路路面基层施工技术规范》要求,现场“灰-土”拌和时最大黏土团粒尺寸 $D<15.0\text{ mm}$ ^[11],远大于室内制样时最大团粒尺寸控制标准($D<5.0\text{ mm}$)^[12]。受施工成本和技术限制,难以把红黏土团粒打散到理想的状态;且过于把黏土团粒打散,对其整体强度而言也是一种破坏。因此,选择合适的增效材料,对冲团粒尺寸的不利影响,自然就摆在了岩土力学工作者面前。

偏高岭土是高岭土历经 $600^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$ 高温煅烧后碾磨而成,富含大量的无定形硅、铝氧化物。由于偏高岭土颗粒极细,受碱性激发剂作用快速形成胶结,故被称之为“超级火山灰”^[13]。为此,拟选择偏高岭土来增强石灰处治团状红黏土的强度,对冲团粒尺寸的负面效应。论文以 4 种团粒尺寸的红黏土为对象,掌握其处治前后的收缩、压缩和强度等特性,分析团粒尺寸的影响规律和机制;结合处治红黏土微观特征,阐述偏高岭土增强石灰处治红黏土强度的内在原因,为红黏土的工程应用提供科学参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

(1) 红黏土

红黏土取自桂林市某高校教学大楼工地,埋深约为 5.0 m,属第四系坡残积层(Q^{el+dl})红黏土。其天然干密度为 1.24 g/cm^3 、天然含水率 40.5%。根据公路土工试验规程(JTG E40—2007)测得其基本特性,见表 1。经 X 射线荧光光谱分析法(XRF)测得硅、铝氧化物质量含量高达 73.9%、铁氧化物 19.1%。

表 1 红黏土基本性质

Table 1 Basic properties of laterite

液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	相对 密度	最优 含水 率/%	最大干 密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	自由 膨胀 率/%	线收 缩量 /%
56.5	35.0	21.5	2.71	30.2	1.48	16.9	1.94

(2) 偏高岭土

偏高岭土是德国巴斯夫(BASF)公司提供的产品,它由高岭土经过 $600^{\circ}\text{C}\sim 800^{\circ}\text{C}$ 下煅烧和研磨而成,主要氧化物种类和含量,见表 2。其中,氧化硅和氧化铝的含量占比极高,约占总质量的 92%,故具有极高的“火山灰活性”。

(3) 石灰

生石灰购自江苏宿迁,氧化钙(CaO)含量高达 97.3%,烧失量为 2.4%,相对质量密度 2.32。生石灰主要化学成分与颗粒分布情况,如表 3。

表 2 偏高岭土成分

Table 2 Chemical composition of metakaolin

成分	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	其它
含量/%	52	40	1.0	2.5	0.8	0.5	3.2

表 3 生石灰成分与颗粒分布

Table 3 Chemical composition and grain distribution of lime

化学成分/%				粒径分布/%		
CaO	MgO	CO_2	SO_3	$\leq 80\text{ }\mu\text{m}$	$\leq 200\text{ }\mu\text{m}$	$\leq 2\text{ mm}$
97.30	0.96	0.25	0.06	82.7	95.2	100.0

红黏土、石灰和偏高岭土干燥状态的粒度分布情况,由激光粒度分析仪(干法)获得,见图 1。激光粒度分析试验操作步骤,参考文献[14]。

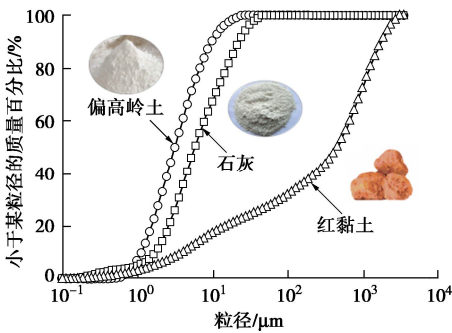


图 1 试验材料的粒度分布

Fig. 1 Grain-size distribution of test materials

1.2 试样制备

(1) 试样准备

红黏土试样风干后,选择 4 种孔径尺寸(D 为 5.0, 2.0, 1.0, 0.5 mm)的筛,筛出 4 组红黏土;则每组红黏土团粒的最大尺寸为 D_{max} 为 5.0, 2.0, 1.0, 0.5 mm,即为前文所指的 4 种团粒尺寸红黏土,其压实前后状态,见图 2。

(2) 确定掺入比 R_{MK} 与养护时间 T

选择 D_{max} 为 5.0, 0.5 mm 的红黏土为代表,保持石灰:红黏土=5:95 的干质量比不变,再分别掺入偏高岭土 1%, 3%, 5%, 7%。然后增湿到含水率 33.2%,

压实控制干密度为 1.42 g/cm^3 。标准养护后, 开展无侧限抗压强度 (UCS) 试验, 得到偏高岭土掺入比和龄期的变化关系, 由此确定了最优干质量掺入比, 即偏高岭土: 石灰: 红黏土=5: 5: 90 (图 3); 合适的龄期 120 d (图 4)。

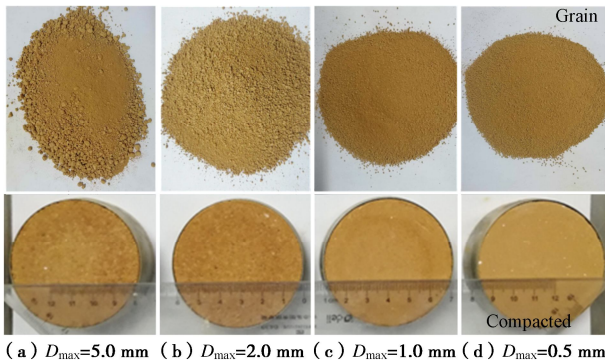


图 2 红黏土

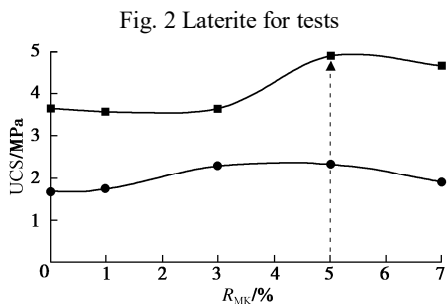


图 3 UCS 与 MK 掺入比的关系

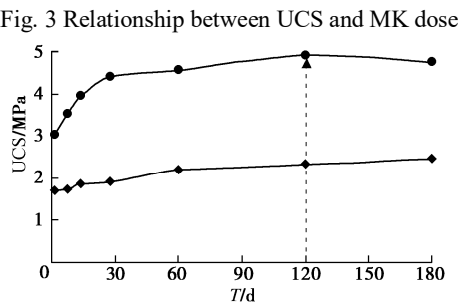


图 4 UCS 与养护龄期的关系

Fig. 4 Relationship between UCS and curing period

(3) 混合试样

4 组团粒尺寸的红黏土, 按照上述确定的掺入比, 即石灰: 红黏土=5: 95、偏高岭土: 石灰: 红黏土=5: 5: 90, 混合均匀。然后, 按照预定含水率 33.2% 增湿试样。为防止红黏土偏湿时, 掺入偏高岭土和石灰不能拌和均匀, 把预加的水分两次均匀喷洒到试样。第一次喷洒至低于含水率 27.2% 的湿度状态, 喷洒结束后用塑料袋密封焖料 5~6 d, 以期红黏土团粒内、外部达到均匀湿润; 焖料完成后, 再把偏高岭土和石灰按照掺比同时混入湿土中并再次拌和均匀。鉴于偏高岭土与石灰遇水后快速发生反应, 故需把预定的剩余加水量喷洒于灰-土混合物中, 并随即压实成型。

(4) 试样压实

按照恒体积法控制干密度, 利用特制的试样模具, 把试样压实成环刀试样 ($\varnothing 61.8\text{ mm}\times 20.0\text{ mm}$)

和圆柱试样 ($\varnothing 39.1\text{ mm}\times 80.0\text{ mm}$)。

因红黏土与石灰、偏高岭土的相对密度不同, 即使初始干密度相同, 其孔隙比也不同; 为了保证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, 具体计算方法参考文献[15]。试样初始孔隙比参照纯红黏土干密度 $\rho_d=1.42\text{ g/cm}^3$ (压实度 96%) 时的孔隙比确定, 即 $e_0=0.935$ 。

1.3 试验方案

试样的初始状态与开展试验种类, 如表 4。所有试验都包含两种试样类型: ①石灰: 红黏土=5: 95, 简称“L-红黏土”; ②偏高岭土: 石灰: 红黏土=5: 5: 90, 简称“MK-L-红黏土”。

表 4 试验方案

Table 4 Testing plan

序号	试验名称	试样初始参数
1	收缩特性	D_{\max} 为 5, 2, 1, 0.5 mm
		$e_0=0.935$
		压实含水率 $w_0=33.2\%$
2	直剪强度	同上
3	压缩特性	同上
4	无侧限抗压强度	D_{\max} 为 5.0, 0.5 mm
		$e_0=0.935$
5	扫描电镜	压实含水率 $w_0=33.2\%$
		圆柱试样 ($\varnothing 39.1\text{ mm}\times 80\text{ mm}$)

所有试样压实完成后, 用密封袋抽真空封存, 放入 $20^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ 恒温箱中养护至预定龄期, 再开展相关试验, 各试验过程简述如下:

(1) 收缩、压缩与直剪试验

环刀试样养护至 120 d 后, 抽真空饱和, 再按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007) 开展收缩、直剪和固结压缩试验。

(2) 无侧限抗压强度试验

圆柱试样养护至 180 d 后, 将试样分别按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007) 的试验方法, 利用强度试验仪加载试验, 加载速率为 1.0 mm/min 。

(3) 扫描电镜试验

无侧限抗压强度试验同批次试样, 利用液氮冻干试样后, 立即放入真空冷冻干燥机内, 干燥 24 h, 将试样取出; 利用德国蔡司公司 Zeiss Ultra Plus 型场发射扫描电镜观察试样微观形貌。

2 处治红黏土水-力性能

2.1 收缩特性

4 种团粒尺寸的处治红黏土养护 120 d 后, 再抽真空饱和。按照收缩试验方法, 得到收缩曲线, 见图 5。

相同压实状态下, 纯红黏土的收缩率为 1.92% [11]。对比图 5 可知, 经过 120 d 养护后, 两种处治土的收缩率都小于 1.92% , 说明其收缩性得到抑

制,尤其是添加偏高岭土后,其收缩性变得更小,都小于0.9%。以 $D_{\max}=5.0\text{ mm}$ 团粒为例,与石灰处治红黏土相比,添加偏高岭土后,其收缩率由1.20%降低到0.85%。同时,两种处治红黏土的收缩率都随着团粒尺寸变小而降低;团粒尺寸越小,收缩性越低。

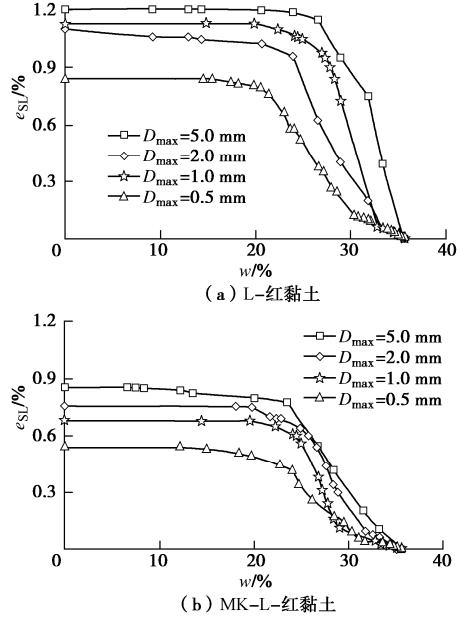


图5 处治红黏土收缩曲线
Fig. 5 Shrinkage curves of treated laterite

收缩曲线中,线性收缩段向残余收缩段拐点对应的含水率是缩限值,可以发现:L-红黏土缩限随团粒尺寸减小而减小,而MK-L-红黏土缩限则基本不随团粒尺寸变化而变化。再次说明,偏高岭土协同石灰更加有效抑制红黏土的水敏性。

另外,值得注意的是,团状的处治红黏土收缩曲线有两个线性收缩过程(图6),这与团粒收缩模式紧密相关。蒸发开始,以失去团粒间孔隙内水为主,所以团粒间开始相互靠拢;随后,以失去团粒内水分为主,团粒自身发生缩聚。因此,收缩曲线出现两个明显的线性变化阶段。

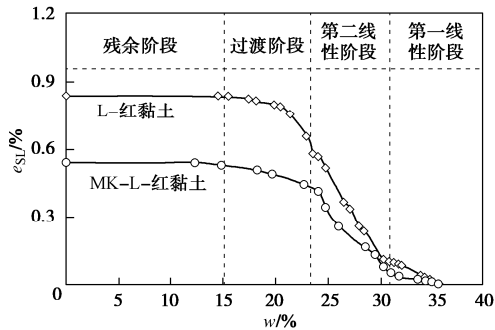


图6 $D_{\max}=0.5\text{ mm}$ 处治土收缩模式

Fig. 6 Shrinkage model of treated laterite with $D_{\max}=0.5\text{ mm}$

2.2 压缩特性

处治红黏土养护120 d后的压缩曲线,见图7。

图7表明,相同初始孔隙比的处治红黏土,随着压力增大,孔隙比逐渐减少;总体而言,团粒尺寸大,压缩性越强;团粒尺寸 D_{\max} 为5.0, 2.0, 1.0 mm

的处治红黏土压缩行为类似,而 $D_{\max}=5.0\text{ mm}$ 处治红黏土,当压缩应力大于800 kPa,其压缩量明显减少,这可能是由于团粒间的胶结强度逐渐发挥作用。压缩过程其实是团(颗)粒位置调整过程,团粒移(滚)动要克服它们之间的摩擦和胶结约束。因此,随着压缩应力增大,压缩行为会逐步减慢。

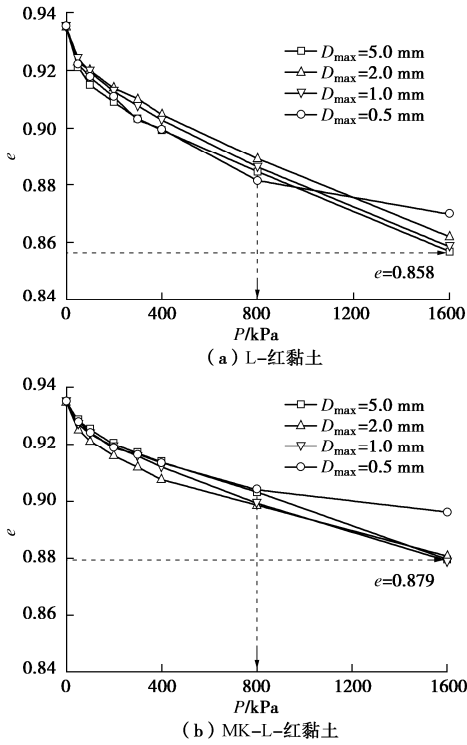


图7 处治红黏土压缩曲线

Fig. 7 Compression curves of treated laterite

对比掺入偏高岭土前后的压缩曲线,可以看出:偏高岭土可以有效提升石灰处治红黏土的抗压缩能力。以团粒尺寸 $D_{\max}=5.0\text{ mm}$ 处治红黏土为例,相同压缩应力(1600 kPa)作用下,掺入偏高岭土后,孔隙比 e 由0.858变成了0.879。因此,处治土的压缩性受团粒尺寸和处治方式的共同控制,掺入偏高岭土可以对冲团粒尺寸效应。

2.3 强度特性

处治红黏土养护120 d后的抗剪强度与法向应力关系,见图8。

4种团粒尺寸处治红黏土的强度参数,见表5。

表5 强度参数

Table 5 Strength parameters

D_{\max} /mm	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$		黏聚力 c/kPa	
	L-红黏土	MK-L-红黏土	L-红黏土	MK-L-红黏土
5.0	18.1	18.7	121.5	143.9
2.0	24.4	20.3	85.9	179.9
1.0	18.2	21.9	74.1	126.1
0.5	17.4	21.3	79.8	151.4

抗剪强度受控于内摩擦角和黏聚力两方面因素,它们既与团粒尺寸有关,又与处治效果有关。同时,处治效果又取决于团粒尺寸。因此,团粒尺寸效应与

石灰处治形成的胶结强度处于博弈状态。试验结果表明, 红黏土团粒尺寸 $D_{\max}=2.0\text{ mm}$ 时, 其处治效果最佳。整体而言, 掺入偏高岭土的石灰处治红黏土黏聚力比石灰处治红黏土的黏聚力高。

为进一步探讨处治红黏土强度的团粒尺寸效应, 图 9 展示了团粒尺寸 D_{\max} 为 5.0, 0.5 mm 处治红黏土的无侧限抗压强度。

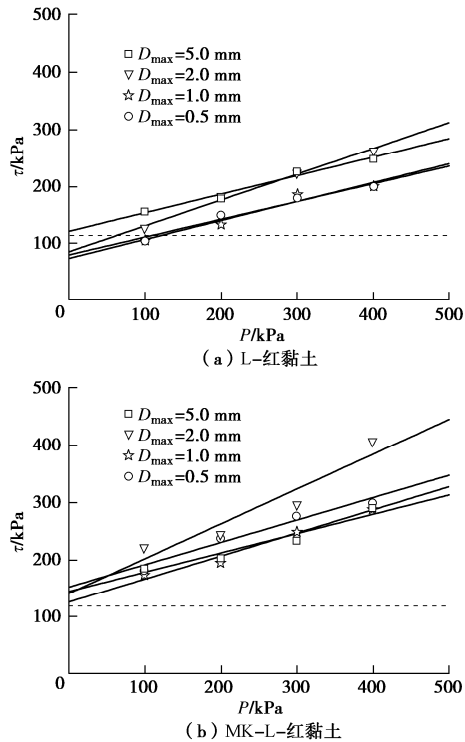


图 8 处治红黏土的剪切强度

Fig. 8 Direct shear strength of treated laterite

图 9 表明, $D_{\max}=0.5\text{ mm}$ 处治红黏土较 $D_{\max}=5.0\text{ mm}$ 处治红黏土强度高, 说明团粒尺寸越小, 强度越高。究其原因, 相同石灰和偏高岭土掺入比, 团粒尺寸越小, 比表面积越大, 石灰和偏高岭土分布越均匀, 因此形成的胶结效果更佳。仅掺入石灰处治, $D_{\max}=0.5\text{ mm}$ 的处治土强度较 $D_{\max}=5.0\text{ mm}$ 处治土提高 1.80 MPa; 而掺入偏高岭土后, 二者强度差值增大为 2.45 MPa, 由此说明, 偏高岭土能够提高处治效果, 有效抵消团粒尺寸的不利影响。

3 分析与讨论

3.1 团粒尺寸的影响机制

红黏土易于成团, 主要有两方面原因: ①红黏土内含有大量无定形铁、铝氧化物, 使得具有天然胶结能力^[16-17]; ②黏粒 ($D<0.002\text{ mm}$) 含量高, 有的甚至高达 80%^[1], 遇水易于黏结成团。

图 10 是红黏土过 0.075 mm 孔筛后的两种团粒分布状态, 其中, 湿法是红黏土完全浸泡松散后的团粒分布, 而干法则是干燥状态下的团粒分布。

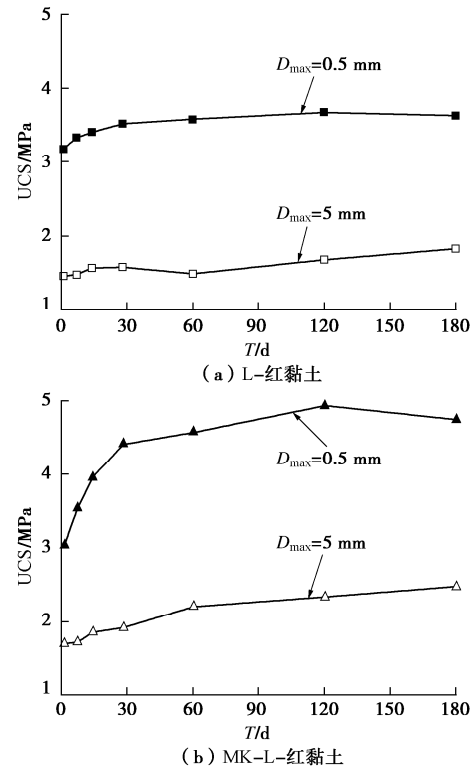


图 9 处治土红黏土的无侧限抗压强度

Fig. 9 UCS of treated laterite

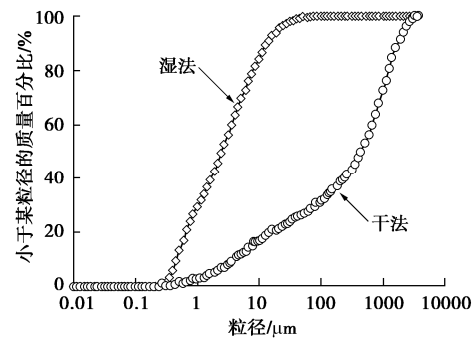


图 10 红黏土干-湿状态的团粒分布曲线

Fig. 10 Distribution of aggregate size of laterite in dry and wet states

可以看出, 浸泡后大部分团粒尺寸小于 $100\text{ }\mu\text{m}$, 与干燥状态下的团粒分布曲线相比, 发生明显的溶解行为, 也间接说明了红黏土易于成团。

红黏土成团带来的直接影响是灰土拌合不均, 石灰等胶凝材料只是粘附于团粒的表面, 只在黏土团粒之间形成了胶结作用, 团粒内部依然保持原始的状态。团粒尺寸小, 自身强度则大; 反之, 团粒尺寸大, 则自身强度小。假如团粒之间形成的胶结强度相同, 当受到外部荷载作用, 如: 剪切或压缩, 肯定优先从薄弱处屈服破坏, 其破坏路径可能有 3 种路径: 团粒内破坏、团粒边缘处和团粒间的胶结处(图 11)。

因此, 团粒尺寸大的处治红黏土, 抵抗外部荷载作用的能力偏弱, 从处治红黏土水-力性能随团粒尺寸的变化规律, 便可以得到充分佐证。

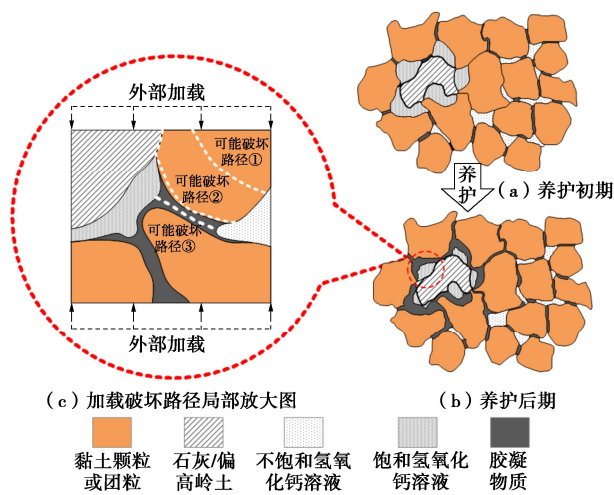


图 11 石灰-土的赋存状态

Fig. 11 Lime-soil state

3.2 偏高岭土增强机制

石灰处治黏土机理已基本取得了共识^[18-19]，其作用过程大致分为两个阶段，即短期作用和长期作用。其中，短期作用，是指石灰水化为氢氧化钙，进行离子交换作用，促进黏土颗粒（团粒）凝聚和絮凝的变化过程；长期作用，是指黏土颗粒表面发生离子交换作用后增大孔隙水 pH 值，强碱性环境下黏土矿物中的铝、硅氧化物发生溶解，然后与钙离子发生火山灰反应，生成水化铝酸钙、水化硅酸钙等胶结物。可以看出，石灰处治土的火山灰反应过程比较缓慢^[20]。

偏高岭土是以高岭土（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）为主要原料，经过 $600^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 温度煅烧后脱水形成的无水硅酸铝（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ）。碾磨后偏高岭土粒度可细达 $0.2 \sim 18 \mu\text{m}$ ，是普通水泥颗粒大小的 $1/10$ ^[21]。极易和石灰等碱性物质发生反应，石灰反应值达 $1200(\text{mg Ca(OH)}_2/\text{g})$ ^[13]。因此，偏高岭土增强石灰处治土强度的主要原因是缩短了“溶蚀”黏土矿物过程，提供无定形硅、铝氧化物，直接与钙离子结合生成了胶结物。

图 12 是两种处治红黏土中自由钙离子的浓度对比情况。相同养护时间内，MK-L-红黏土中钙离子浓度比 L-红黏土的浓度低，后者养护 180 d 后的浓度，相当于前者养护 90 d 时的浓度，证实了偏高岭土具有快速捕获钙离子的能力。

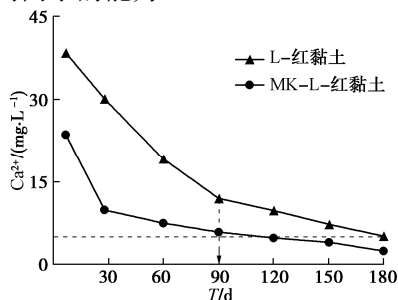


图 12 处治土的钙离子浓度

Fig. 12 Ca^{2+} concentration of treated laterite

偏高岭土除了生成胶结物外，还起到充填团粒间孔隙的作用（图 13），使得抵抗荷载作用能力增强。

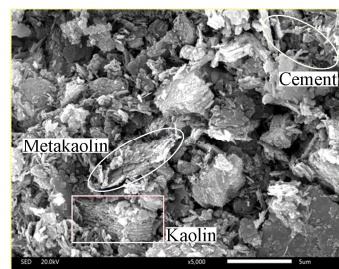


图 13 MK-L-红黏土微观形貌

Fig. 13 SEM of ML-L-laterite

图 14 是处治土压实后未养护时的孔隙分布情况。

图 14 表明，MK-L-红黏土的进汞曲线位于 L-红黏土的曲线下方，且后者的孔隙分布曲线有明显的峰值，说明该大孔径范围内 L-红黏土的孔隙数量多，孔隙体积大；反之，则说明偏高岭土对大孔隙具有明显的充填作用，使其没有明显的大孔径体积分布。

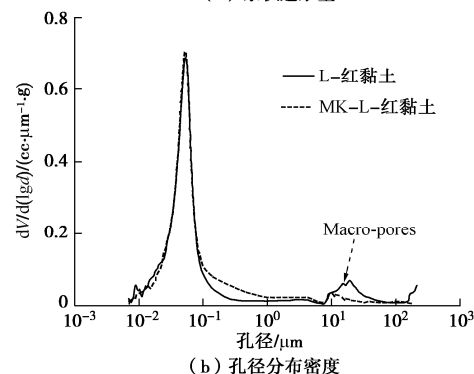
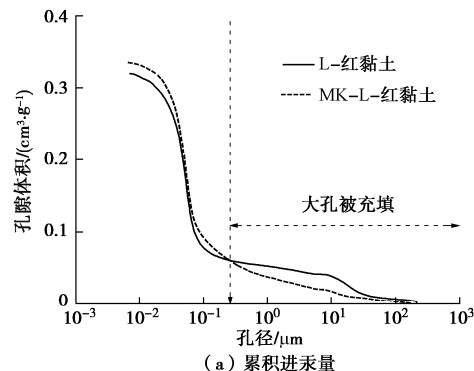


图 14 处治土的孔隙分布

Fig. 14 Distribution of pore size of treated laterite

4 结 论

（1）处治红黏土的水-力性能受控于红黏土的团粒尺寸和处治方式；团粒尺寸大，水敏感性强、强度提升效果不佳；掺入偏高岭土，能够显著增强石灰处治红黏土的水-力性能。

（2）红黏土团粒尺寸越小，比表面越大，相同的石灰和偏高岭土掺入比下，可以更加均匀地分布于团粒表面，增大“灰-土”的接触面，从而加快“火山灰反应”。

（3）偏高岭土具有直接捕获钙离子能力，能迅速与石灰发生火山灰反应，缩短了石灰与红黏土缓慢的溶蚀过程；同时，偏高岭土还能够填充团粒间孔隙，二者联合作用增强了处治红黏土的水-力性能。

参考文献:

- [1] GIDIGASU M D. Laterite Soil Engineering-pedogenesis and Engineering principles[M]. Amsterdam: Elsevier, 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, 1991, 贵阳. (WANG Yu-hua. Definition and demonstration of laterite[C]// The Second National Symposium on Laterite Engineering and Geology, 1991, Guiyang. (in Chinese))
- [3] 谭罗荣, 孔令伟. 特殊岩土工程土质学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Problematicsoil Engineering Pedology[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [4] 谈云志. 压实红黏土的工程特征与湿热耦合效应研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009. (TAN Yun-zhi. Study on Engineering Characteristics and Moisture-heat Coupling Effect of Compacted Laterite Soil[D]. Beijing: Graduate College of Chinese Academy of Science, 2009. (in Chinese))
- [5] 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 Yun-zhi, 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))
- [6] SHI B, MURAKAMI Y, WU Z S. Orientation of aggregates of fine-grained soil: quantification and application[J]. Engineering Geology, 1998, **50**(1/2): 59 - 70.
- [7] 蔡奕, 施斌, 刘志斌, 等. 团聚体大小对填筑土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(12): 1482 - 1486. (CAI Yi, SHI Bin, LIU Zhi-bin, et al. Experimental study on effect of aggregate size on strength of filled soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(12): 1482 - 1486. (in Chinese))
- [8] WANG Y J, CUI Y J, TANG A M, et al. Effects of aggregate size on the compressibility and air permeability of lime-treated fine-grained soil[J]. Engineering Geology, 2017, **228**: 167 - 172.
- [9] 谈云志, 郑爱, 吴翩, 等. 红黏土承载比的土团尺寸效应研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1242 - 1246. (TAN Yun-zhi, ZHENG Ai, WU Pian, et al. Effect of aggregate soil size on California bearing ratio values of laterite soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(5): 1242 - 1246. (in Chinese))
- [10] TANG A M, VU M N, CUI Y J. Effects of the maximum soil aggregates size and cyclic wetting-drying on the stiffness of a lime-treated clayey soil[J]. Géotechnique, 2011, **61**(5): 421 - 429.
- [11] 公路路面基层施工技术规范: JTJ034—2000[S]. 2000. (Technical Guidelines for Construction of Highway Roadbases: JTG 034—2000[S]. 2000. (in Chinese))
- [12] 公路土工试验规程: JTG E40—2007[S]. 2007. (Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG E40—2007[S]. 2007. (in Chinese))
- [13] AMBROISE J, MAXIMILIEN S, PERA J. Properties of Metakaolin blended cements[J]. Advanced Cement Based Materials, 1994, **1**(4): 161 - 168.
- [14] 王伟鹏, 刘建立, 张佳宝, 等. 基于激光衍射的土壤粒径测定法的评价与校正[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(22): 163 - 169. (WANG Wei-peng, LIU Jian-li, ZHANG Jia-bao, et al. Evaluation and correction of measurement using diffraction method for soil particle size distribution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, **30**(22): 163 - 169. (in Chinese))
- [15] 谈云志, 胡焱, 邓永锋, 等. 偏高岭土协同石灰抑制红黏土收缩的行为与机制[J]. 岩土力学, 2019, **40**(11): 4213 - 4219. (TAN Yun-zhi, HU Yan, DENG Yong-feng, et al. Behavior and mechanism of laterite shrinkage inhibition with lime and meta-Kaolin mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(11): 4213 - 4219. (in Chinese))
- [16] 孔令伟, 罗鸿禧, 袁建新. 黏土有效胶结特征的初步研究[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(5): 42 - 47. (KONG Ling-wei, LUO Hong-xi, YUAN Jian-xin. Preliminary study on the effective cementation characteristics of the red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(5): 42 - 47. (in Chinese))
- [17] 张先伟, 孔令伟. 氧化铁胶体与黏土矿物的交互作用及其对黏土土性影响[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 65 - 74. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei. Interaction between iron oxide colloids and clay minerals and its effect on properties of caly[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(1): 65 - 74. (in Chinese))
- [18] OSULA D O A. Lime modification of problem laterite[J]. Engineering Geology, 1991, **30**(2): 141 - 154.
- [19] INGLESOH. Soil Stabilization: Principles and Practices[M]. New York: Wiley, 1973.
- [20] 杨志强, 郭见扬. 石灰处理土的物理力学性质及其微观机理的研究[J]. 岩土力学, 1991, **12**(3): 11 - 23. (YANG Zhi-qiang, GUO Jian-yang. The Physio-mechanical properties and Micro-mechanism in Lime-soil system[J]. Rock and Soil Mechanics, 1991, **12**(3): 11 - 23. (in Chinese))
- [21] MURRAY H H. Overview—clay mineral applications[J]. Applied Clay Science, 1991, **5**(5/6): 379 - 395.