

文章编号:1673-9469(2022)03-0016-07

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.03.003

## 稻壳灰固化红黏土的路用性能及微观机理

刘芟君<sup>1</sup>, 肖桂元<sup>1,2\*</sup>, 张祥宇<sup>1</sup>, 刘晓楠<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学 广西岩土力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 201804)

**摘要:** 为响应建设节约的发展思路, 向红黏土中掺入稻壳灰, 并通过一系列实验探讨稻壳灰对红黏土力学性能的影响, 分析稻壳灰对红黏土的微观作用机理。试验结果表明, 掺入稻壳灰后红黏土液塑限变化较小; 其最优含水率与渗透系数随稻壳灰掺量的增加而增高, 最大干密度降低; 掺入稻壳灰的红黏土抗压强度随掺量的增加呈先增后减的趋势, 当稻壳灰掺入量为 15%, 养护时间为 28 d 时达到最大值。电镜扫描试验发现: 稻壳灰表面覆盖大量的胶凝物质, 红黏土结构密实性相应提升。用稻壳灰改良红黏土能节约路基的建设成本, 同时也有利于保护环境, 实现资源的可持续利用。

**关键词:** 稻壳灰; 红黏土; 环保材料; 微观结构; 公路工程; 工程特性

中图分类号: TU42

文献标识码: A

## Road Performance and Micro Mechanism of Rice Husk Ash Modified Red Clay

LIU Wenjun<sup>1</sup>, XIAO Guiyuan<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Xiangyu<sup>1</sup>, LIU Xiaonan<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. College of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 201804, China)

**Abstract:** In response to the development idea of construction saving, rice husk ash is filled into red clay. The effect of rice husk ash on the road performance and micro mechanism of red clay is studied through a series of experiments. The results showed that the liquid plastic limit of red clay changed little with the addition of rice husk ash, the maximum dry density decreased with the increase of rice husk ash, and the optimal moisture content increased. The compressive strength of red clay mixed with rice husk ash increased first and then decreased with the increase of the content, and reached the maximum when the content was 15% and the curing time was 28 days. SEM test showed that the structural compactness of solidified red clay was improved, and in this process cementitious materials were produced. Using rice husk ash to improve red clay could be cost-effective in respect to roadbed stability, and can be beneficial in protecting the environment and realizing sustainable use of resources.

**Key words:** rice husk ash; red clay; environmental protection materials; microstructure; highway engineering; engineering characteristics.

红黏土是一种典型的水敏性土, 失水后强度衰减显著<sup>[1]</sup>, 因此红黏土常需要改良或是置换后才能进行路基填筑, 常用的改良剂有水泥、石灰、粉煤灰等<sup>[2-5]</sup>, 这些常用改良剂均会对环境造成一定污染, 价格也与日俱增, 也有研究表明, 由于红黏土具有弱酸性, 石灰改良后红黏土的强度会随

时间而衰减<sup>[6-7]</sup>。为此, 寻找一种价格低廉, 环保高效的改良剂尤为重要。水稻是世界上重要的粮食作物, 2017 年我国稻谷产量为  $1.69 \times 10^8$  t, 稻壳经电厂发电后获得稻壳灰。相关研究表明, 稻壳灰内含有大量无定型二氧化硅, 具有较强的火山灰性能, 与电石渣、水泥等二次胶结材料复合后形

收稿日期: 2022-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52169022)

作者简介: 刘芟君(1996-), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事防灾减灾等领域的科研工作。

\* 通讯作者: 肖桂元(1976-), 男, 湖南祁东人, 博士, 教授, 主要从事特殊土成灾机理及地下工程防灾的研究。

成一种类似传统水泥的胶凝材料,能固化土壤,理论上讲稻壳灰是良好的掺合料<sup>[8]</sup>。

近年来,国内外对此积累了大量的研究成果和经验<sup>[9-11]</sup>。Chindaprasirt 等<sup>[12]</sup>发现以普通硅酸盐水泥为原料,掺加稻壳灰和粉煤灰可以显著提高水泥砂浆的抗硫酸盐性能,同时由于稻壳灰的高比表面积,水泥的需水量增多。基于稻壳灰在水泥改良中的研究,部分学者认为稻壳灰是一种良性的火山灰材料,可与电石渣、水泥等混合后用于土壤的改良。Alhassan 等<sup>[13]</sup>向土中掺入梯度为2%、4%、6%、8%的稻壳灰水泥混合物,并测定改良土的 CBR 值,研究表明,当混合物掺量为4%~6%时达到峰值。刘宇翼<sup>[14-15]</sup>基于扫描电镜和 X 射线衍射试验分析了电石渣-稻壳灰改良土的硬化机制,稻壳灰被电石渣溶液溶解后生成 C-S-H 凝胶,C-S-H 凝胶的形态分别有薄片状、网络状和米粒状,C-S-H 凝胶和晶体状的水化产物共同构成牢固结合的整体,为固化土提供了很好的粘结强度。郭铄等<sup>[16]</sup>认为电石渣-稻壳灰混合物能抑制膨胀土膨胀,提高膨胀土的强度,且当稻壳灰和电石渣掺比为65:35,混合物掺量为15%时,能显著提高膨胀土的强度,其改良机理为火山灰效应、置换和离子交换。也有部分学者认为,稻壳灰可以单独作为改良剂。Jain 等<sup>[17]</sup>的研究结果表明,竖向固结系数与稻壳灰含量呈反比。余肖婷等<sup>[18-19]</sup>的试验结果显示,稻壳灰含量较低时,最优含水量与最大干密度变化不明显,在稻壳灰掺量为10%~15%比例下,抗剪强度达到峰值。

上述研究表明,稻壳灰能用于膨胀土的改良,但利用稻壳灰对红黏土改良的研究较少,也鲜有人对稻壳灰固化红黏土的微观机理作出分析,本文对此展开研究,意对绿色高速公路的设计和可持续建设提供理论指导。

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 红黏土

试验用的土样为广西桂林市临桂某工地上的红黏土,取土深度约5~7 m,土经过风干后过2 mm 筛,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[20]</sup>测得红黏土的物理性质指标如表1所示;测得其颗粒级配曲线如表2所示,属于高液限红黏土。

表1 红黏土的物理性质指标

Tab. 1 Characteristic index of red clay

名称	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	最优含水 率 $w/\%$	最大干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	比重 $G_s$
红黏土	79.90	33.90	26.00	1.56	2.58

表2 桂林红黏土粒组含量占比

Tab. 2 The granulometric composition of red clay

粒组名称	粒径范围/ mm	含量/ %
黏粒	<0.005	32.0
粉粒	0.005~0.075	66.4
砂粒	0.075~2.000	1.6

#### 1.1.2 稻壳灰

稻壳灰采用本地稻壳经马弗炉600℃高温下煅烧研磨过筛制得,干密度387 kg/m<sup>3</sup>,比表面积15 000 m<sup>2</sup>/kg,稻壳灰主要成分见表3。

表3 稻壳灰化学成分

Tab. 3 Chemical composition of rice husk ash

材料名称	化学成分/%						
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	其他
稻壳灰	84.2	3.3	1.6	1.5	1.2	1.9	6.3

## 1.2 试验方案

试验以探寻稻壳灰对红黏土液塑限、最优含水率、最大干密度、渗透系数、微观机理的影响为研究目的,向红黏土中掺入不同掺量(掺量按质量百分数分别为0%、5%、10%、15%、20%)的研磨稻壳灰,为了使稻壳灰与红黏土充分反应,将土样养护28 d后,再根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)对土样进行液塑限测定试验、击实试验、常水头渗透试验、SEM 电镜扫描试验。

由于养护龄期、稻壳灰掺量和稻壳灰的表面粗糙度都是影响红黏土的无侧限抗压强度的因素,因此为探寻养护龄期、稻壳灰掺量、稻壳灰研磨程度对红黏土无侧限抗压强度的影响规律,向红黏土中掺入不同掺量(掺量按质量百分数分别为0%、5%、10%、15%、20%)的两种稻壳灰(研磨过0.5 mm 筛和未研磨过筛的两种稻壳灰)后,养护相应天数(7、14、28 d),再进行无侧限抗压强度试验。试验整体方案如表4。

表4 试验方案设计

Tab. 4 Design of test scheme

试验名称	稻壳灰研磨度	掺入量/%	养护时间/d
界限含水率试验	研磨过筛	0.5、10、15、20	28
击实试验	研磨过筛	0.5、10、15、20	28
变水头渗透试验	研磨过筛	0.5、10、15、20	28
XRD/SEM	研磨过筛	0.5、10、15、20	28
无侧限抗压 强度试验	研磨过筛	0.5、10、15、20	7、14、28
	未研磨	0.5、10、15、20	7、14、28

## 2 试验结果与分析

### 2.1 稻壳灰掺量对红黏土界限含水率的影响

将风干后红黏土以及稻壳灰分别碾碎过 0.5 mm 筛,按稻壳灰占红黏土重量百分比 0%、5%、10%、15%、20% 掺入红黏土中制成五种土样,每种土样按四分法取代表性土样 200 g,喷洒蒸馏水使土样吸湿,调制均匀,放入塑料袋闷料 28 d。将每种土样分成三份,依次放入乘土皿中,加入纯水,调整土样含水量,使土样依次达到接近液限、中间状态和塑限的含水量,放入塑料袋闷料 1 d 后采用液、塑限联合测定仪对土样依次进行液塑限测定,试验结果如图 1 所示。

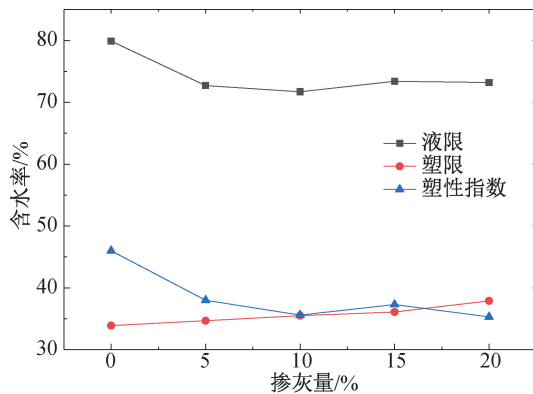


图 1 不同掺量稻壳灰对红黏土液塑限的影响  
Fig. 1 Effect of content of rice husk ash on liquid plastic limit of red clay

由图 1 可以看出:(1)由液限试验数据可得,改良红黏土土样的液限在 70%~80%之间,为高液限红黏土。不同掺量的稻壳灰均使红黏土液限降低;红黏土液限受稻壳灰掺量的变化影响较小,当掺入量为 10%时,液限最低为 71.7%。(2)由塑限试验数据可得,改良红黏土的塑限处于 33%~39%之间,属于高塑限黏土。随着稻壳灰掺量逐渐增大,改良红黏土的塑限增大,从 33.9%提高至 37.9%。当稻壳灰掺入量为 15%~20%时,塑限增高最多,从 36.1%上升到 37.9%,占总增量的 45%。(3)不同掺量的稻壳灰均使红黏土的塑限指数降低,随着稻壳灰掺入量的增加,红黏土塑性指数先降低后有增大的趋势再降低。当土样达到液限时,其含水量约为土样中弱结合水与少量自由水之和,液限的降低说明随着稻壳灰掺量的增加,改良红黏土中达到液限所需要的一部分自由水以及弱结合水被消耗,笔者认为由于稻壳灰的主要成分是活性  $\text{SiO}_2$ ,以及少量活性  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ ,当

加入稻壳灰后部分活性  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  与土中自由水发生水化反应,并发生阳离子交换,原本吸附在黏土粒表面的低价阳离子被置换出,扩散层变薄。但由于稻壳灰中  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  含量太低,即使稻壳灰掺量不断提高,仍无法显著改变红黏土的液塑限。

### 2.2 稻壳灰对红黏土最优含水率和最大干密度的影响

击实试验采用轻型标准击实仪进行,将风干红黏土碾碎过 5 mm 筛,稻壳灰碾碎过 0.5 mm 筛,按稻壳灰占红黏土重量百分比 0%、5%、10%、15%、20% 掺入至红黏土中制作五种土样各 5 kg,将每种土样准备 5 组 1 000 g 的土样,分别调成不同含水率(20%、22%、24%、26%、28%),混合均匀放入塑料袋中闷料 28 d 后进行击实试验,测得试验结果如图 2、图 3。

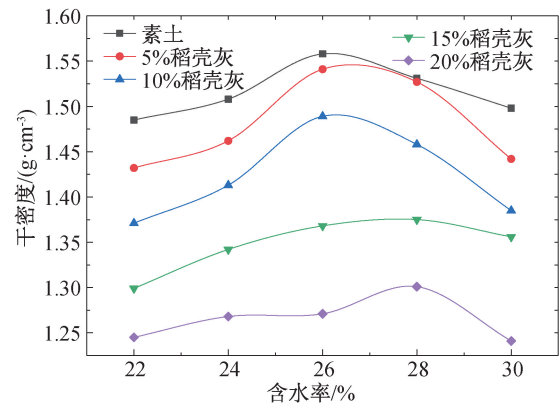


图 2 不同含水率下稻壳灰改良红黏土的干密度  
Fig. 2 Dry density of red clay modified by rice husk ash under different moisture contents

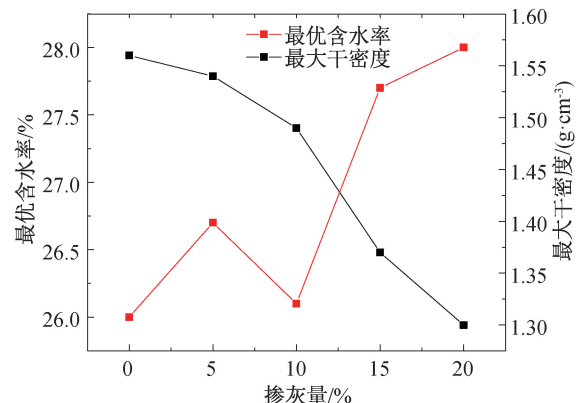


图 3 不同掺量稻壳灰下红黏土最大干密度和最优含水率  
Fig. 3 Maximum dry density and optimum moisture content of red clay under different contents of rice husk ash

从图 3 中可以看出:随着稻壳灰掺量的提高,稻壳灰改良红黏土的最大干密度逐渐降低,最优

含水率逐渐增大。当稻壳灰掺量为5%时,最大干密度变化不大,但随着稻壳灰掺量的逐渐增加,最大干密度降低速率加快。这是因为:(1)稻壳灰的相对体积质量远小于红黏土,且稻壳灰具有多孔的特性,部分红黏土被相对体积质量较小的稻壳灰代替;(2)在经过养护28 d后存在一定的火山灰作用,形成水化物改变了改良土的压实性能,在低掺入量下,这种改变不太明显,但在高掺入量条件下,最大干密度降低速率加快;(3)随着稻壳灰掺量的不断增加,水化反应需要的水也越来越多,所以最优含水率也随之增大。

### 2.3 稻壳灰掺量对改良土渗透系数的影响

渗透系数测试所用仪器为变水头渗透仪。将红黏土风干碾碎过5 mm筛,稻壳灰碾碎过0.5 mm筛,将不同比例(0%、5%、10%、15%、20%)的稻壳灰与红黏土混合。利用压样器制备压实度为0.92、直径为61.8 mm、高度为40 mm的渗透样。每组准备三个平行样,贴好标签后放入保鲜膜中,28℃室温下固化28 d。

图4显示了固化28 d后不同稻壳灰掺量下改良红黏土渗透系数的变化曲线。可以看出改良土的渗透系数随着稻壳灰含量的增加而增大。5种不同掺量改良土的渗透系数分别为 $3.05 \times 10^{-9}$ 、 $9.17 \times 10^{-9}$ 、 $4.92 \times 10^{-8}$ 、 $7.06 \times 10^{-8}$ 、 $1.22 \times 10^{-7}$  cm/s,与素土的渗透系数相比,掺入20%稻壳灰的改良土的渗透系数降低了2个数量级,使用allomtrial函数对曲线进行拟合,得到以下结果:

$$k = a \times C^b \quad (1)$$

式中: $a, b$ 是拟合常数; $a = 1.15 \times 10^{-9}$ ,  $b = 1.55$ ;  $k$ 为渗透系数; $C$ 为稻壳灰掺量。

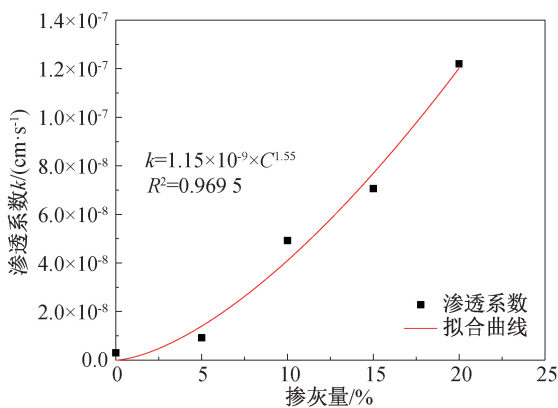


图4 不同掺量稻壳灰对红黏土渗透系数的影响

Fig. 4 Permeability coefficient of red clay under different contents of rice husk ash

稻壳灰掺入红黏土后,改良土的内部存在三

种孔隙:红黏土“集粒”内部的孔隙<sup>[21]</sup>,孔径较小为1~10 μm;红黏土集粒之间的孔隙,孔径较大;稻壳灰内部的孔隙。稻壳灰固化红黏土后,红黏土中的“集粒”被稻壳灰包裹,生成C-H-S凝胶,像“硬壳”一样覆盖在集粒上,“集粒”的尺寸变大,在土颗粒之间形成较大孔隙,加快了水的运移速度,此外,稻壳灰是一种疏水的高渗透性多孔材料,随着稻壳灰掺量的提高,土中黏粒被多孔的稻壳灰置换,土体中孔隙量增多,进而提高了改良土的渗透系数。

### 2.4 稻壳灰掺量、养护龄期及研磨度对红黏土无侧限抗压强度的影响

取代表性的风干红黏土用木槌碾碎,用2 mm筛子进行筛分,将研磨过0.5 mm筛以及未研磨过的两种稻壳灰分按质量百分数为0%、5%、10%、15%、20%掺入至红黏土中,制成含水率为27.0%的9种土样,放入塑料袋中闷料1 d。利用制样器制作压实度为0.92、直径39.1 mm和高80 mm的圆柱形标准试样。将土样分4层放入制样器中压实,层与层之间刮毛,每个平行试验组准备三个样。将制好的样标号后套上保鲜膜放入自制的套筒中,分别养护7、14、28 d,如图5。



图5 试样养护方法和试样保护装置

Fig. 5 Sample curing method and sample preparation device

图6为不同稻壳灰(研磨)掺量、不同养护龄期(7、14、28 d)下改良土无侧限抗压强度关系图。整个养护龄期内最大无侧限抗压强度出现在15%稻壳灰掺量养护至28 d时,为0.931 MPa,是素土的2.69倍。最小值为5%稻壳灰掺量养护7 d时,最小无侧限抗压强度为0.307 MPa,是素土的1.29倍。图7为不同稻壳灰(未研磨)掺量、不同养护龄期(7、14、28 d)下改良土无侧限抗压强度关系图。整个养护龄期内最大无侧限抗压强度出现在

15%稻壳灰掺量养护至28 d时,为0.817 MPa,是素土的2.36倍。最小值为5%稻壳灰掺量养护7 d时,最小无侧限抗压强度为0.317 MPa,是素土的1.33倍。

从图6和图7中可以看出,无论是研磨过的还是未研磨的稻壳灰,改良红黏土试验养护后期的无侧限抗压强度均大于养护初期的无侧限抗压强度,当稻壳灰掺量为0~15%时,强度不断提高,当掺量为15%时达到峰值,当掺量为20%时强度降低。这是因为:(1)大量活性 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 产生火山灰反应,生成不定型的水化胶凝物质C-S-H。稻壳灰产生的火山灰反应与水化反应周期很长,因此在养护初期,所形成的胶凝物质数量不足以将红黏土“集粒”覆盖,粘结成整体,强度较低,而在养护后期,形成大量胶凝物质,能够将红黏土“集粒”包裹起来,“集粒”之间的联结增强,强度提高。(2)稻壳灰的主成分为活性 $\text{SiO}_2$ ,以及少量活性CaO、MgO,当掺入稻壳灰后,其中的Ca离子、Mg离子与土中自由水产生水化反应,通过离子交换过程,置换出吸附在黏粒表面的低价阳离子,颗粒间扩散层厚度降低,土颗粒的间距被缩小,导致土颗粒相互之间吸引力增大,改良土中稻壳灰含量越高,参与水化反应的Ca离子、Mg离子越多,改良土强度就越高。(3)稻壳灰为粉粒,当掺入太多,置换大量的红黏土后,反而降低红黏土的粘结能力,因此当掺量为20%时,改良土强度降低。

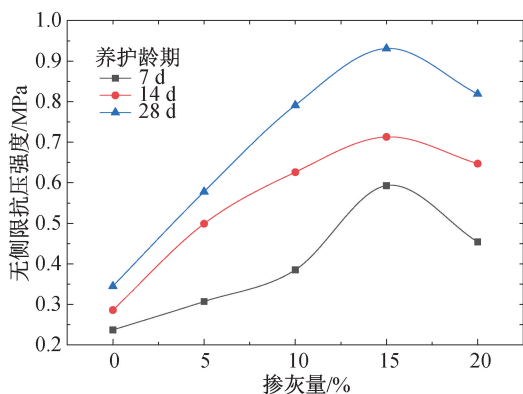


图6 无侧限抗压强度(研磨)

Fig. 6 Unconfined compressive strength (grounded)

图8—图10为不同研磨度稻壳灰固化土的无侧限抗压强度对比图(养护7、14、28 d)。可以看出,原状稻壳灰的改良效果明显低于研磨稻壳灰。在养护后期,掺入研磨稻壳灰试样的无侧限抗压强度增长率高于未研磨稻壳灰试样。这是因为:

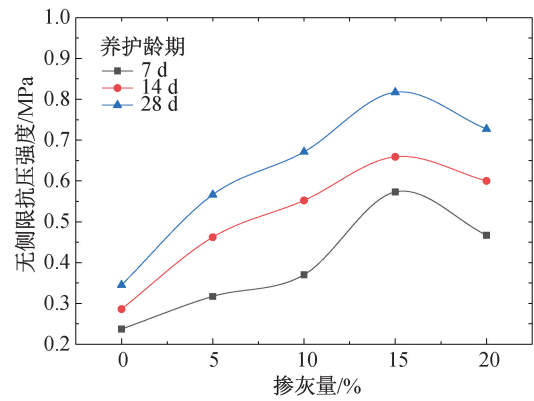


图7 无侧限抗压强度(未研磨)

Fig. 7 Unconfined compressive strength (ungrounded)

(1)稻壳灰经研磨后,其比表面积增大,活性增强,能更充分的参与反应,从而提高了试样的无侧限抗压强度;(2)粉末状的稻壳灰能充填入土壤的孔隙和裂缝中,使试样内部结构更紧密,其不规则的形状能提高土颗粒间的摩擦咬合;(3)原状稻壳灰为酥松多孔结构,表明光滑,掺入后劣化了试样内部的结构,形成孔隙,因此原状稻壳灰的改良效果明显低于研磨稻壳灰。无侧限抗压强度试验结果表明,稻壳灰能有效提升红黏土强度,同掺量、同养护龄期条件下,研磨稻壳灰无侧限抗压强度均大于未研磨稻壳灰的无侧限抗压强度。养护龄期越长,无侧限抗压强度越大,当研磨稻壳灰掺入量为15%,养护龄期为28 d时,无侧限抗压强度最高。

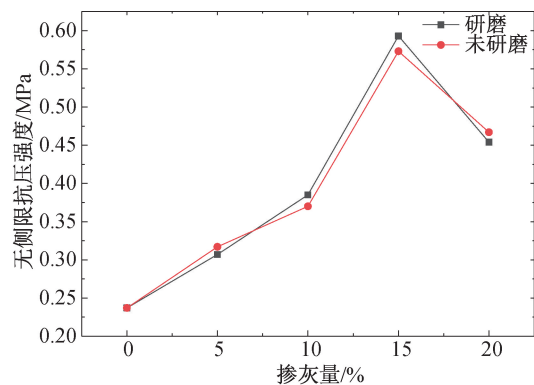


图8 无侧限抗压强度(养护7 d)

Fig. 8 Unconfined compressive strength (7 d)

## 2.5 电镜扫描试验

图11是稻壳灰的SEM图像,可以看出稻壳灰是双层管状结构,内外表面光滑,高温煅烧后,有机物被分解,残留下蜂窝状的硅骨架,结构间存在很多气孔,可见稻壳灰是典型的多孔结构,具有较高的表面积和活性。图12是红黏土的SEM图像,

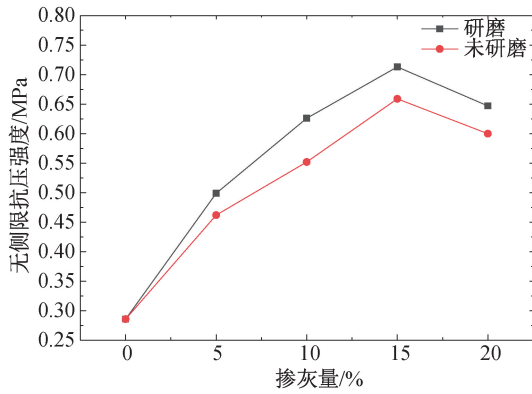


图 9 无侧限抗压强度(14 d)

Fig. 9 Unconfined compressive strength (14 d)

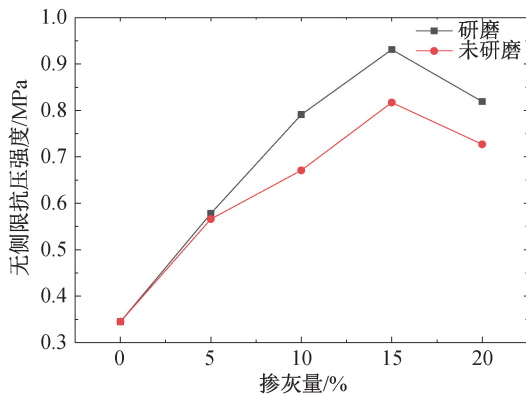


图 10 无侧限抗压强度(28 d)

Fig. 10 Unconfined compressive strength (28 d)

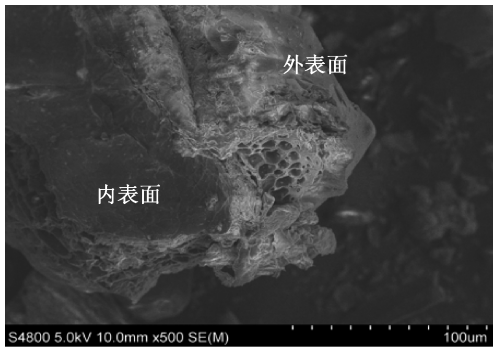


图 11 稻壳灰微观结构图(500 倍)

Fig. 11 Microstructure of rice husk ash (500 times)

图 13—图 15 为改良土(稻壳灰掺量为 15%)养护 28 d 后的 SEM 图,通过对比,可以发现稻壳灰和土颗粒胶结在一起,改良土与普通红黏土相比,结构稳定性更强,表面覆盖有片状物,粒团连结性强。从图 13 可以看到原本光滑的稻壳灰的表面变得粗糙,表面覆盖一层水化形成的胶结物质——C-S-H 凝胶。从图 14、图 15 可以看出改良土表面有片状的 C-H-S 凝胶,该胶结物质覆盖在土颗粒表面,将土体骨架粒团之间孔隙填充,形成更为密

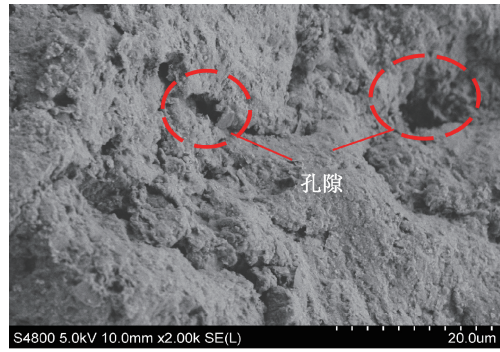


图 12 红黏土微观结构图(2 000 倍)

Fig. 12 Microstructure of red clay (2 000 times)

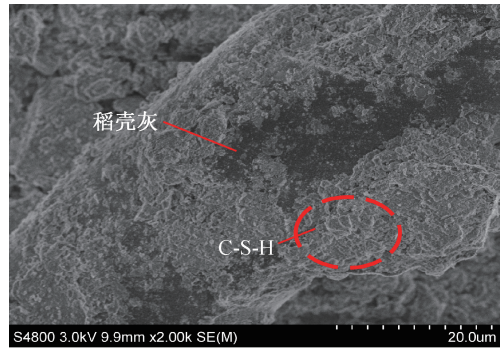


图 13 固化土微观结构图(2 000 倍)

Fig. 13 Microstructure of modified clay (2 000 times)

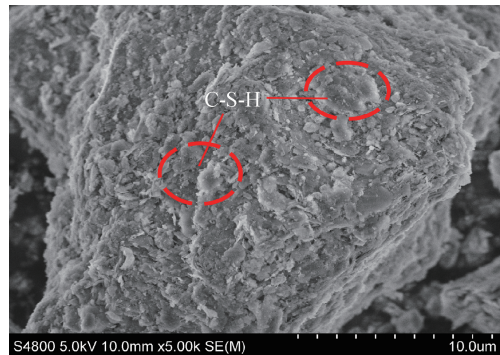


图 14 固化土微观结构图(5 000 倍)

Fig. 14 Microstructure of modified clay (5 000 times)

实的内部结构,同时将稻壳灰与粒团连结在一起,构成粒团间的稳固连结。通过微观结构分析可得,稻壳灰对红黏土的改良主要表现为与土颗粒的胶结。结合宏观试验结果可以得出稻壳灰改良红黏土的机理有:(1) 稻壳灰内活性 SiO<sub>2</sub> 与红黏土发生反应,生成大量 C-S-H 凝胶附着在红黏土颗粒上,强化了颗粒间的胶结;(2) 研磨后的稻壳灰填充了土体内部骨架间的孔隙,优化试样的结构;(3) 稻壳灰为粉粒,掺量较低时,不规则的稻壳灰能与土颗粒相互摩擦,提高土体的强度。

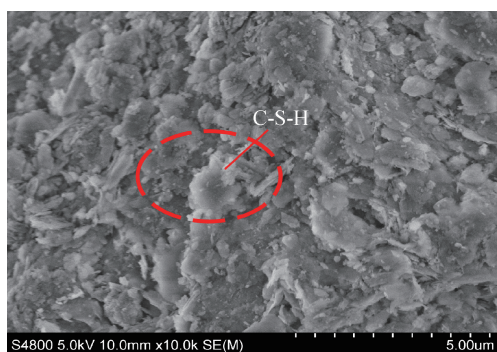


图 15 固化土微观结构图(10 000 倍)

Fig. 15 Microstructure of modified clay (10 000 times)

### 3 结论

1) 随着稻壳灰掺量的增加,红黏土的液限降低,塑限逐渐增加,塑限增加的幅度小于液限降低的幅度。

2) 改良红黏土的最优含水率与渗透系数随稻壳灰掺量的增加而增加,最大干密度与稻壳灰掺量呈负相关,且随着稻壳灰掺量的增加,最大干密度的降低幅度提高。

3) 稻壳灰能够单独提高红黏土的路用性能,根据无侧限抗压试验结果分析,当稻壳灰掺量为 15%,养护时间为 30 d 时强度最高。研磨稻壳灰改良红黏土效果强于未研磨稻壳灰。

4) 电镜扫描表明,随着稻壳灰的掺入,胶结物质可以填充土体骨架粒团内部的孔隙,加强土颗粒之间的联结,使结构更加稳固。

#### 参考文献:

- [1] 龚 琰,陈浩锋. 红黏土研究现状综述[J]. 路基工程, 2019(01):47-53.
- [2] 胡文华,刘超群,刘中启,等. 水泥或石灰改良红黏土的力学强度特性试验研究[J]. 路基工程,2017(05):11-14+19.
- [3] 赵涵洋,雷学文,陈亿军. 活性 MgO 改性红黏土试验研究[J]. 公路,2020,65(11):314-319.
- [4] 李佳明,陈学军,黄 翔,等. 纳米膨润土改良红黏土力学特性机理分析[J]. 广西大学学报:自然科学版, 2020,45(01):147-154.
- [5] 张金利,蒋正国,杨 钢. 聚丙烯纤维红黏土力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(S1):427-432.
- [6] 杨志强,郭见扬. 石灰处理土的物理力学性质及其微观机制的研究[J]. 岩土力学,1991,12(3):11-23.
- [7] 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(07):2207-2214+2282.
- [8] 肖陆飞,金本能,梁建军,等. 稻壳灰应用研究进展[J]. 化学世界,2020,61(07):457-464.
- [9] BUI D D. Rice Husk Ash as A Mineral Admixture for High Performance Concrete[D]. Delft:Delft University,2001.
- [10] KATE J M. Strength and Volume Change Behavior of Expansive Soils Treated with Fly Ash[J]. Innovations in Grouting and Soil Improvement, ASCE Special Publication,2005:1-15.
- [11] YENER H B, HELVACI S S. Effect of Synthesis Temperature on the Structural Properties and Photocatalytic Activity of TiO<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub> Composites Synthesized Using Rice Husk Ash as a SiO<sub>2</sub> Source[J]. Separation & Purification Technology,2015,140:84-93.
- [12] CHINDAPRASIRT P, KANCHANDA P, SATHONSA-OWAPHAHAK A, et al. Sulfate Resistance of Blended Cements Containing Fly Ash and Rice Husk Ash[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(6): 1356-1361.
- [13] ALHASSAN M, MUSTAPHA A M. Effect of Rice Husk Ash on Cement Stabilized Laterite [J]. Leonardo Electronic Journal of Practices & Technologies,2007,6(11): 47-58.
- [14] 刘宇翼. 电石渣-稻壳灰基胶凝材料固化膨胀土机理及其物理力学特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
- [15] 刘宇翼,李雄威,余跃心,等. 电石渣-火山灰材料复合固化土研究进展[C]//《环境工程》2018 年全国学术年会论文集(上册),2018:252-258.
- [16] 郭 铎. 稻壳灰和电石渣改性膨胀土力学性能及作用机理研究[J]. 公路工程,2020,45(03):210-215.
- [17] JAIN A, PURI E N. Consolidation Characteristics of Highly Plastic Clay Stabilised with Rice Husk Ash[J]. International Journal of Soft Computing & Engineering, 2013,2(6):2231-2307.
- [18] 余肖婷. 土工合成材料加筋稻壳灰填料土力学性能研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.
- [19] 李丽华,余肖婷,肖衡林,等. 稻壳灰加筋土力学性能研究[J]. 岩土力学,2020,41(07):2168-2178.
- [20] GB/T 50123—2019,土工试验方法标准[S].
- [21] 周远忠,刘新荣,张 梁,等. 红粘土微观结构模型及其工程力学效应分析[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(4):726-731,835.

(责任编辑 王利君)