

肖桂元,代琳,王一名,等.水玻璃激发赤泥-粉煤灰-矿渣复合固化红黏土特性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(6):667-674.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250252

XIAO Guiyuan, DAI Lin, WANG Yiming, et al. Properties of red clay solidified by sodium silicate activated red mud-fly ash-slag composite[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(6): 667-674. DOI: 10.11956/j.issn. 1008-0562.20250252

水玻璃激发赤泥-粉煤灰-矿渣复合固化红黏土特性

肖桂元^{1,2}, 代琳¹, 王一名¹, 梁河婧¹, 潘嘉圆¹

(1. 桂林理工大学 土木工程学院, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为探究赤泥-粉煤灰-矿渣复合固化红黏土的效果, 以桂林市红黏土为研究对象, 采用水玻璃激发赤泥-粉煤灰-矿渣复合固化红黏土, 通过无侧限抗压强度试验、渗透试验、水稳性试验、X射线衍射(XRD)和电镜扫描(SEM)试验, 研究固化红黏土的强度、渗透性、耐水性及固化机理。研究表明: 复合固化剂能增大红黏土强度, 固化剂掺量为20%时, 固化效果最佳。随着固化剂掺量的增加和养护龄期的延长, 固化土的强度有所增大但脆性加剧。固化土渗透系数随固化剂掺量的增加线性增大。赤泥、粉煤灰、矿渣的质量比为3:6:1时, 固化土水稳性不足。固化反应生成的C-S-H、C-A-H胶凝物质可填充土体孔隙, 形成蜂窝状结构, 显著提高土体密实度, 增大土体强度。研究结论为工业固废改良红黏土提供理论参考。

关键词: 赤泥; 粉煤灰; 矿渣; 红黏土; 强度; 渗透性; 水稳性; 微观机制

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)06-0667-08

Properties of red clay solidified by sodium silicate activated red mud-fly ash-slag composite

XIAO Guiyuan^{1,2}, DAI Lin¹, WANG Yiming¹, LIANG Hejing¹, PAN Jiayuan¹

(1. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: To investigate the effect of red mud-fly ash-slag composite curing agent on red clay, taking Guilin red clay as the research object, sodium silicate was used to activate the red mud-fly ash-slag composite for curing red clay. Through unconfined compressive strength test, permeability test, water stability test, X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) test, the strength, permeability, water resistance and curing mechanism of the cured red clay were studied. The results show that the composite curing agent can enhance the strength of red clay, and the curing effect is optimal when the content of the curing agent is 20%. With the increase of the curing agent content and the extension of the curing age, the strength of the cured soil increases, but its brittleness is intensified. The permeability coefficient of the cured soil increases linearly with the increase of the curing agent content. When the mass ratio of red mud, fly ash and slag is 3:6:1, the water stability of the cured soil is insufficient. The cementitious substances such as C-S-H and C-A-H generated by the curing reaction can fill the pores of the soil, form a honeycomb structure, significantly improve the compactness of the soil, and increase the soil strength. The research conclusions provide a theoretical reference for the improvement of red clay with industrial solid waste.

Keywords: red mud; fly ash; slag; red clay; strength; permeability; water stability; micro-mechanism

收稿日期: 2025-06-08 修回日期: 2025-06-27 接受日期: 2025-07-07 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金项目(52169022)

作者简介: 肖桂元(1976-), 男, 湖南 衡阳人, 博士, 教授, 主要从事特殊土灾变机理方面的研究。E-mail: xiaoguiyuangit@163.com

0 引言

红黏土在中国南方地区普遍存在,其含水率较高、可塑性强、渗透能力较差,导致承载力不足、易变形、稳定性较差,在基础设施建设中应用受限。目前,主要采用物理、化学及生物方法来改良红黏土,其中,物理改良法主要通过向红黏土中添加砂^[1]或纤维^[2]等材料来改变土壤的物理结构,从而改善其工程性质。LIU等^[3]用聚乙烯醇和聚丙烯纤维来改善粉质黏土,通过直剪试验和一维冻胀试验,发现两者均能显著提高粉质黏土的强度,抑制冻胀作用。生物改良法包括微生物改良^[4]、微生物酶改良^[5]等。HE等^[6]利用生物炭改良红黏土并开展干燥开裂试验,研究发现盐浓度、生物炭用量会影响土体开裂程度。化学改良法常在红黏土中加入石灰^[7]、水泥^[8]和粉煤灰^[9],通过化学反应来改善红黏土的物理、化学性质。然而,石灰、水泥等传统固化材料较昂贵,在生产和施工过程中会污染环境,且将粉煤灰单独用于红黏土改良时,其自身胶凝活性激发不充分,改良效果不佳^[10]。寻找经济、环保且高效的改良材料是目前该领域的研究热点。

赤泥、粉煤灰和矿渣是工业生产过程中产生的典型固体废弃物,大量堆存既占用土地,又易造成环境污染,其资源化利用是行业研究的重点。其中,赤泥是铝土矿提炼氧化铝后的副产品,外观与赤色泥土相似,富含氧化铁、氧化铝和二氧化硅等^[11];粉煤灰是燃煤电厂废弃物,因具有潜在胶凝活性且来源广泛,常被用作固化材料^[12];矿渣是钢铁冶炼过程中产生的副产品,经过磨细处理后可作为优质的矿物掺合料^[13]。近年来,国内外学者致力于探究工业固体废弃物在土壤固化领域应用的可能性,并取得一定的研究成果。刘彦浩等^[14]以硅灰、矿渣为前驱体,电石渣为激发剂,通过BBD试验优化配合比,研究表明,硅灰-矿渣-电石渣复合胶凝材料对黄泛区粉土的固化效果优于水泥。ZHU等^[15]以电石渣和硅粉为原料,通过单掺与双掺试验确定二者最优复配比例,制备并研究新型复合固化剂对海洋有机软黏土的固化效果与机理。BEYGI等^[16]研究表明,将粒化高炉矿渣、石灰和硅酸钠复配后,可提高红黏土的抗压强度。

杨飞^[17]以粉煤灰、矿渣为主要原料,引入偏高岭土作为活性调节剂,通过调整原料配比制备不同类型的地质聚合物,研究它们对材料耐久性的影响,为矿渣粉煤灰基地质聚合物的配比优化及工程应用提供新方案。刘龙等^[18]研究表明,与水泥相比,赤泥-粉煤灰-矿渣碱激发胶凝材料在特定配比下力学性能和耐久性更优。上述研究均对固废改良土进行了有益探索,但缺乏对赤泥-粉煤灰-矿渣复合体系固化红黏土的系统性研究,特别是固化红黏土力学特性、渗透性、水稳性及改良微观机理方面,仍有待深入研究。

本文利用固废资源,通过无侧限抗压强度试验、渗透试验、水稳性试验、X射线衍射(XRD)和电镜扫描(SEM)试验,研究不同复合固化剂掺量下赤泥-粉煤灰-矿渣固化红黏土的物理力学性能,分析固化机理,以期红黏土地区工程建设提供可持续的绿色改良技术。

1 试验材料

红黏土取自桂林市,呈红褐色,质地细腻,黏性较强。依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[19]测试红黏土物理特性指标,确定其颗粒分布状况。红黏土级配曲线见图1,物理特性指标见表1,其中,最优含水率为质量分数。

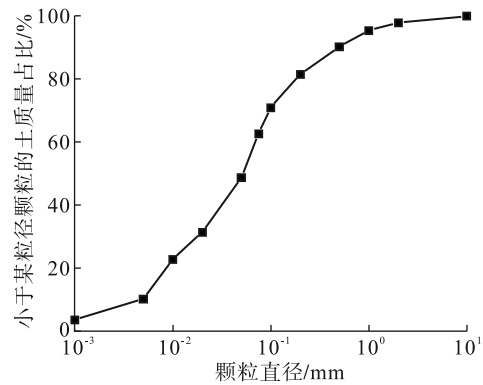


图1 红黏土级配曲线

Fig.1 red clay gradation curve

表1 红黏土基本物理特性指标
Tab.1 basic physical properties of red clay

最大干密度 (g·cm ⁻³)	塑限 W _p /%	液限 W _L /%	塑性 指数 I _p	最优含 水率/%	比重 G _s
1.53	3.31	60.75	25.46	28	2.74

采用烟台市某建材公司生产的拜耳法赤泥,

呈红褐色粉末状, pH 值为 9~10。采用郑州市恒信建材公司生产的二级粉煤灰, 呈灰色粉末状。采用郑州市某建材公司生产的 S105 粒化高炉矿渣

粉, 呈白色粉末状。通过 XRD 试验确定固化材料主要化学成分及质量分数, 分别见图 2 和表 2。

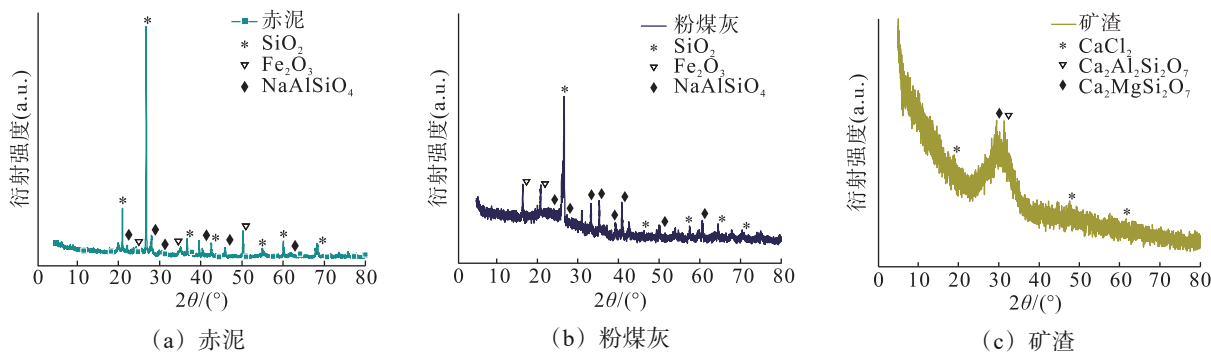


图2 固化材料XRD图谱

Fig.2 XRD pattern of solidified materials

表 2 固化材料主要化学成分质量分数
Tab.2 main chemical components and mass fractions of the solidified materials

固化材料	化学成分质量分数/%				
	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	其他
赤泥	1.68	26.75	30.75	15.08	25.74
粉煤灰	5.60	23.00	2.50	43.00	25.90
矿渣	35.30	16.70	1.50	34.50	12.00

2 试验方案

将赤泥、粉煤灰、矿渣按 3 : 6 : 1 的质量比复配成固化剂。在水玻璃中掺入 NaOH, 将模数调整至 2.0, 冷却至室温后与超纯水混合制备碱激发剂。碱激发剂中水玻璃与水的质量比为 2 : 3^[20]。固化剂掺量 (质量分数) 分别取 0、8%、12%、16%、20% 和 24%。

试样制备步骤如下: 将过 2 mm 筛的红黏土颗粒与烘干的赤泥、粉煤灰、矿渣充分混合, 采用喷雾法均匀加入碱激发剂 (液固比为 0.35), 分别制备直径为 39.1 mm、高为 80 mm 的圆柱形试样及直径为 61.8 mm、高为 40 mm 的环刀试样。压实比取 0.96, 试样压实成型后, 用保鲜膜密封并置于标准养护箱, 养护温度为 (20±2) °C, 室内相对湿度大于等于 95%。

试样养护至规定龄期后, 依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[19]和《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024)^[21], 采用 CMT5105 电子万能试验机开展无侧限抗压强度试验, 加载速率为 1 mm/min。通过 XRD 和 SEM 试验分析赤泥-粉煤灰-矿渣固化红黏土的微观结

构, 探究其固化机理。

3 试验结果分析

3.1 无侧限抗压强度分析

(1) 固化剂掺量对土体无侧限抗压强度的影响

养护龄期为 3 d 条件下, 固化剂掺量对土体无侧限抗压强度的影响见图 3。可以看出, 随着固化剂掺量的增加, 土体无侧限抗压强度整体呈先增大后减小趋势。固化剂掺量为 20% 时, 土体无侧限抗压强度达到最大值, 为 1.05 MPa, 与素土 (固化剂掺量为 0 的土体) 相比, 强度增大了 932.3%, 固化效果最佳。

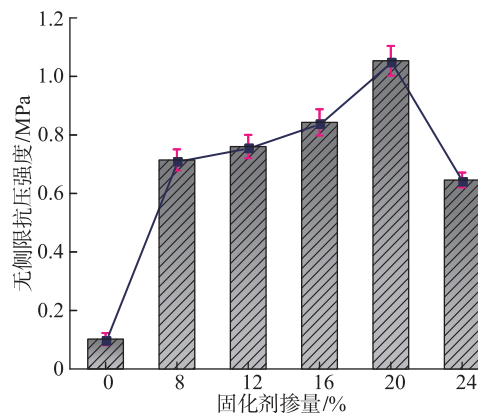


图3 固化剂掺量对土体无侧限抗压强度的影响

Fig.3 influence of curing agent content on unconfined compressive strength of soil

(2) 养护龄期对土体无侧限抗压强度的影响

固化剂掺量为 20% 条件下, 养护龄期对土体

无侧限抗压强度的影响见图4。可以看出,随着养护龄期的延长,素土、固化土无侧限抗压强度均逐渐增大,但素土强度增长相对缓慢,不同养护龄期下土体强度提升幅度较小。固化土强度增长幅度明显大于素土,这是由于固化土中的矿渣、粉煤灰与水发生水化反应,同时火山灰反应贯穿养护全程。随着时间推移,水化产物不断增多,胶凝物质有效填充土体孔隙,胶结作用增强,从而优化土体微观结构,增大土体强度^[18]。

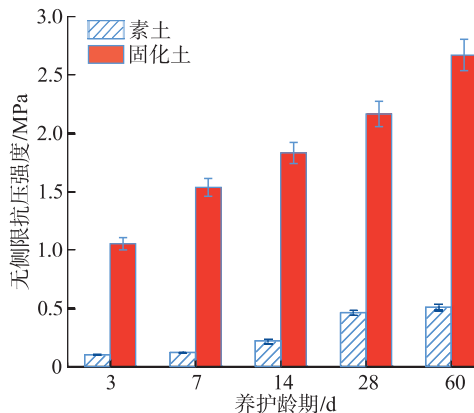


图4 养护龄期对土体无侧限抗压强度的影响

Fig.4 influence of curing age on unconfined compressive strength of soil

3.2 土体应力-应变曲线

不同固化剂掺量下土体应力-应变见图5。可以看出,固化剂掺量小于20%时,随着掺量的增加,土体峰值应力逐渐增大。掺量为20%时,土体峰值应力最大,脆性最强。掺量提升至24%时,土体峰值应力有所减小。

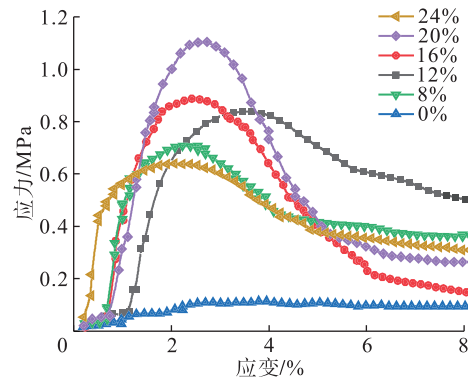
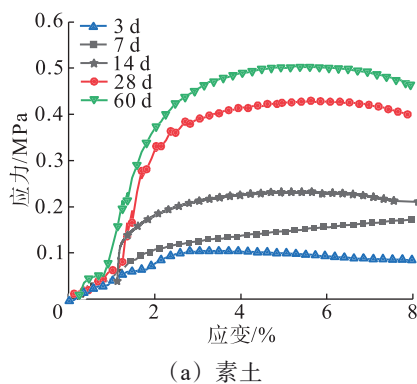


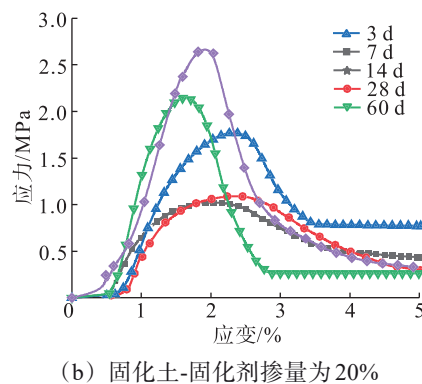
图5 不同固化剂掺量下土体应力-应变

Fig.5 stress-strain of soil under different curing agent dosages

不同养护龄期下,素土与固化土应力-应变曲线见图6。由图6(a)可知,各养护龄期内,素土的应力-应变曲线均呈现应变硬化特性,即随着应变逐渐增大,应力先增大后趋于稳定,曲线无明显峰值,与谢荣等^[22]的研究结论一致。由图6(b)可知,在加载初期,随着应变的增大,固化土应力迅速增大且上升速率快于素土,应力-应变曲线具有明显峰值;加载后期,应力发生骤降。产生这种现象有两方面原因:一方面,固化剂的掺入增强了土体颗粒之间的连接作用,使土体能够更高效地传递和承担载荷。固化土新生成的凝胶物质可显著提高土体密实度,增大土体强度,应力-应变曲线上出现明显的峰值应力。另一方面,随着养护龄期的延长,固化土内部水化反应加剧,生成较多的水化产物,土体在C-A-H、C-S-H等胶凝物质的作用下,形成蜂窝状结构,整体性强但韧性差。应力达到峰值后,土体应力出现骤降,呈明显的脆性破坏特征。



(a) 素土



(b) 固化土-固化剂掺量为20%

图6 不同养护龄期下土体应力-应变

Fig.6 stress-strain of soil under different curing ages

养护28 d的素土和养护28 d、固化剂掺量为20%的固化红黏土的XRD图谱见图7。可以看出,素土的矿物成分主要为黏土矿物(高岭石、斜绿

泥石、伊利石)、赤铁矿和石英。与素土相比,固化土的XRD图谱中出现了新的弱衍射峰,这是由于固化土中存在水化产物C-A-H和C-S-H。

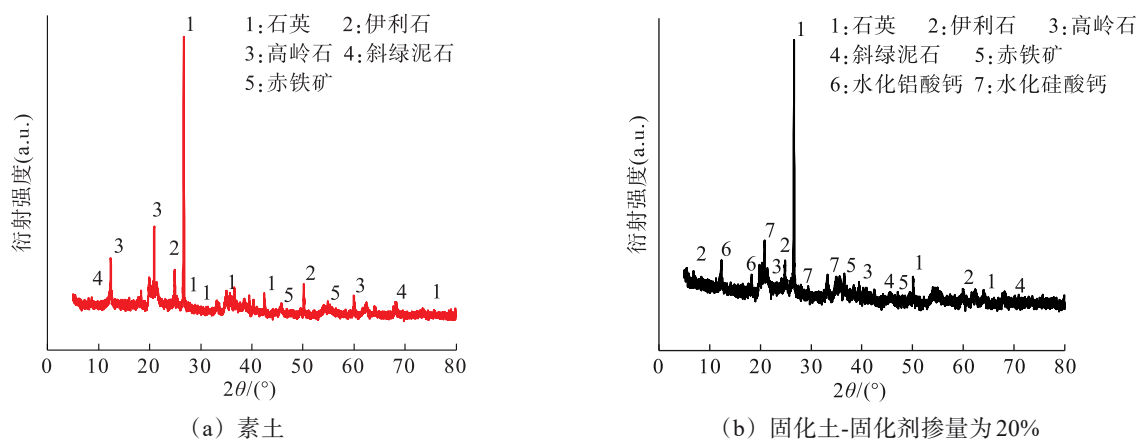


图7 素土和固化土XRD图谱

Fig.7 XRD of plain soil and solidified soil

素土及固化土SEM图见图8。可以看出,素土颗粒呈薄片状,以面-面接触为主。孔隙大小和形状均不规则,呈杂乱无章、松散堆积状态。大孔隙较多,连通性较好。固化土中有新生成的蜂窝

状凝胶物质,它们将黏土颗粒包裹,填充土体内部孔隙,形成三维骨架结构,土体密实度更高,强度更大。

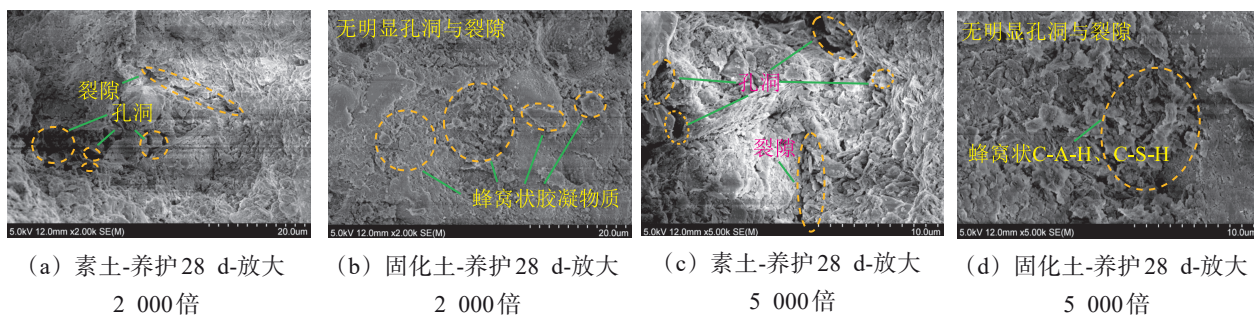


图8 素土及固化土SEM图

Fig.8 SEM images of plain soil and stabilized soil

3.3 土体破坏形态

土体破坏形态见图9。其中,固化土的固化剂掺量均为20%。可以看出,在单轴压缩过程中,素土内部被挤压,表面膨胀隆起,形成较多的径向裂纹,最终呈塑性膨胀型破坏模式。这是由于素土颗粒以面-面接触为主,呈松散堆积状态,受力时颗粒易发生相对滑动,产生较大的塑性变形,土体破坏时具有明显的局部塑性特征。固化剂掺量为20%的条件下,随着养护龄期的延长,在单轴压缩过程中土体破坏特征由最初表层剥落引发的类“V”形裂纹,逐渐演变为45°斜向裂缝,并

逐渐发展为沿轴向延伸的明显裂缝。这些裂缝更宽更深,且在外力作用下逐渐扩展,形成贯穿裂缝,土体沿预设裂缝轨迹发生破裂,呈脆性张拉断裂破裂模式。破坏模式发生转变的根本原因是固化土中的C-A-H、C-S-H等胶凝物质形成三维骨架结构,增强了土体整体性。随着养护龄期的延长,胶凝物质增多,三维骨架结构更稳固,土体脆性更显著,使破坏模式由局部表层剥落转变为整体脆性断裂,表明固化后土体已由松散结构转变为刚性结构。

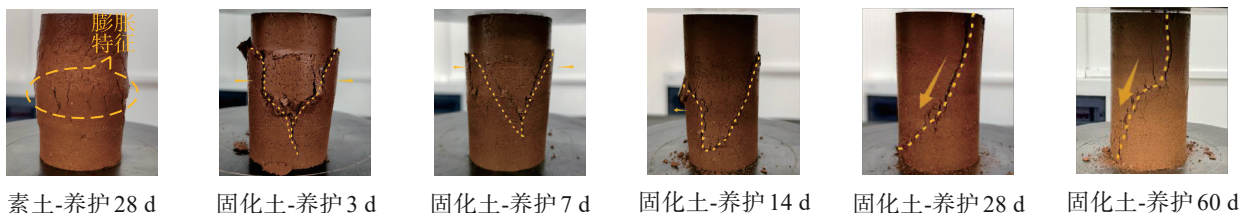


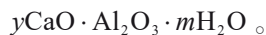
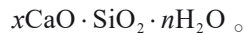
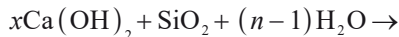
图9 土体破坏形态

Fig.9 failure patterns of soil mass

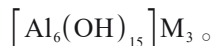
3.4 固化机理

赤泥-粉煤灰-矿渣主要通过火山灰反应、离子交换作用、絮凝作用来优化土体微观结构,实现红黏土固化。粉煤灰和矿渣中富含活性较高的 SiO_2 和 Al_2O_3 ,在碱性催化剂的激活下,活性物质与红黏土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应,生成水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)等具有胶凝特性的化合物。红黏土颗粒表面通常带有负电荷,赤泥、矿渣在水中电离产生的 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 等,可与红黏土颗粒表面的阴离子发生离子交换反应,改变土颗粒表面的电荷分布情况,从而减小土颗粒之间的静电斥力。金属离子能促使黏土颗粒发生絮凝,使细小的土颗粒团聚形成较大的团粒结构,从而改善土体颗粒级配,提高土体整体稳定性。固化剂与红黏土交互作用生成的胶凝物质,不仅能有效填充土体孔隙,还能在土颗粒表面形成胶膜,通过包裹土颗粒来增强连接力,使土体微观结构由松散杂乱状态变得更加紧密有序。碱激发体系中具体反应式^[23]如下,其中, x 、 y 、 n 、 m 均为化学计量数。

(1) 火山灰反应



(2) 离子交换及絮凝作用



赤泥-粉煤灰-矿渣固化红黏土微观机理示意图10。

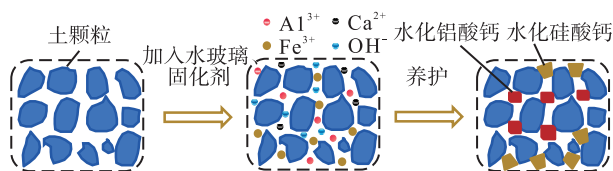


图10 赤泥-粉煤灰-矿渣固化红黏土微观机理示意

Fig.10 schematic of microscopic mechanism of red mud-fly ash-slag solidified laterite clay

3.5 渗透试验

取自来水作为渗透液,采用TST-55型渗透仪,通过水头法测定不同固化剂掺量下土体渗透系数,

见图11。可以看出,随着固化剂掺量的增加,土体渗透系数线性增大。固化剂掺量由0增至24%,土体渗透系数由 $4.43 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 增至 $4.58 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。这是由于随着固化剂掺量的增加,生成的C-S-H、C-A-H胶凝物质填充土体孔隙,形成蜂窝状结构;同时,胶凝物质相互交织形成的骨架结构搭建了更畅通的渗透通道,使孔隙连通性增强,土体渗透系数线性增大。拟合结果验证了固化剂作用下土体“微观结构-渗透性能”的协同演变规律。

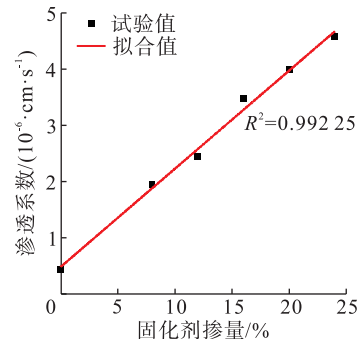


图11 固化剂掺量对土体渗透系数的影响

Fig.11 influence of curing agent content on the permeability coefficient of soil

3.6 水稳性试验

红黏土亲水性、分散性较强,遇水易发生膨胀、软化,导致土体抗压强度减小,严重时甚至完全丧失承载能力,影响结构稳定性,可见,水分侵蚀是影响红黏土固化效果的重要因素。水稳性通常用水稳系数 K 来表示,其计算式见式(1)。水稳系数越大,表明饱水状态下土体强度损失越小,耐水性越好。一般认为水稳系数大于0.85的材料耐水性较好。

$$K = \frac{R_1}{R_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: R_2 为标准养护条件下养护至规定龄期土体的无侧限抗压强度; R_1 为达到标准养护龄期前一天,在水中浸泡1 d后土体的无侧限抗压强度^[24]。

养护28 d,土体水稳性试验结果见图12。可以看出,素土浸水10 min即完全崩解。随着固化剂掺量的增加,土体耐水性逐渐增强。但即使固化剂掺量达到24%,浸水24 h后试件仍发生整体性结构失稳,无法开展抗压强度测试。产生这种现象一方面是由于红黏土溶胀性较强,耐水性差,赤泥、粉煤灰、矿渣的质量比为3:6:1时,固化反应生成的胶凝物质耐水性不足,难以抵抗水分渗透引发的结构破坏;另一方面,矿渣掺入量较小时,可能导致水化反应不充分,削弱土体的水稳性。后续研究中,可加入适当的离子型固化剂或聚

合物型固化剂,来增强胶凝物质耐水性及土体水稳性^[25],同时,适当调整固化剂中矿渣的比例^[26],使

水化反应更充分,从而增强胶凝物质的致密性与耐水性,使水稳系数满足工程应用要求。

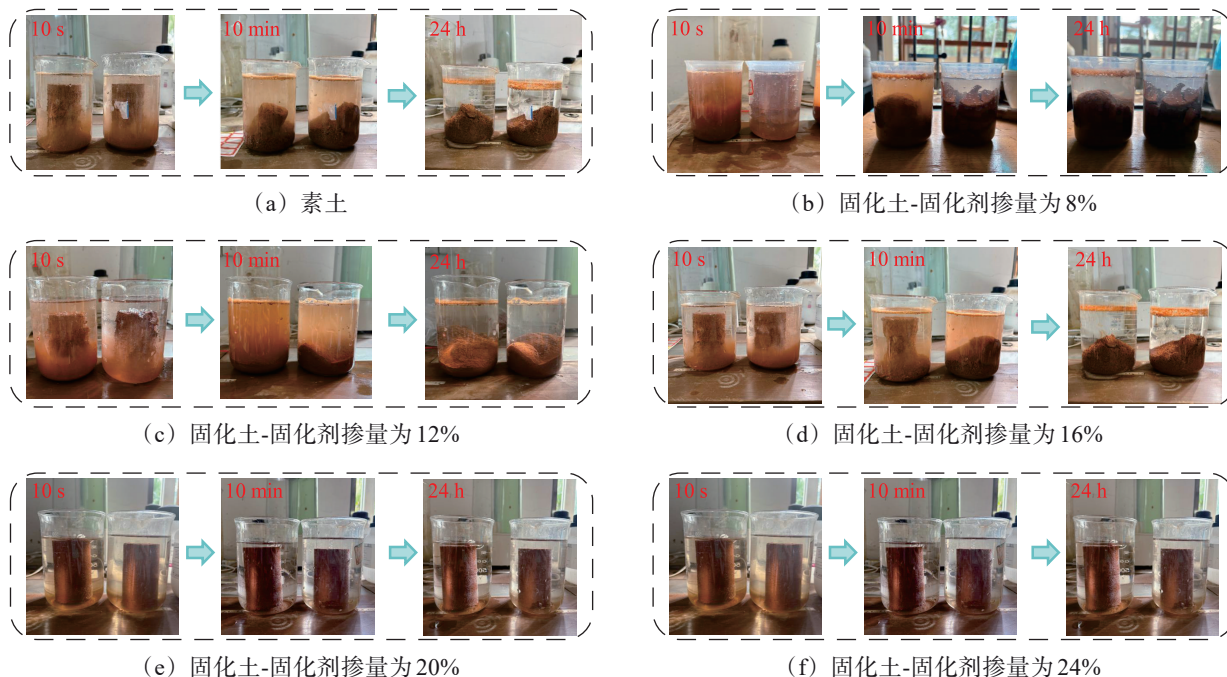


图 12 土体水稳性试验结果

Fig.12 test results of soil water stability

4 结论

(1) 赤泥-粉煤灰-矿渣复合固化红黏土的无侧限抗压强度随固化剂掺量的增加呈先增大后减小的变化趋势,固化剂最优掺量为20%。

(2) 随着养护龄期的延长和固化剂掺量的增加,生成的 C-S-H、C-A-H 胶凝物质形成三维骨架结构,导致固化土脆性增强。

(3) 随着固化剂掺量的增加, SiO_2 、 Al_2O_3 与红黏土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,生成较多的蜂窝状凝胶,搭建更畅通的渗透通道,孔隙连通性增强,固化土渗透系数线性增大。

(4) 赤泥、粉煤灰、矿渣的质量比为 3 : 6 : 1 时,固化土的水稳性无法满足工程应用要求。在实际工程应用中,可加入适当的离子型固化剂或聚合物型固化剂来调整固化剂配比,改善土体水稳性。

参考文献(References):

- [1] 董薇,黄待望,王红英. 掺砂改良红黏土室内试验研究[J]. 能源与环境, 2018,40(11):157-162.
DONG Wei, HUANG Daiwang, WANG Hongying. Experimental studies on red clay improved with sand[J]. China Energy and Environmental Protection, 2018,40(11):157-162.
- [2] 吴鹏,刘瑾,车文越,等. 刺槐豆胶复合剑麻纤维改良红黏土力学性质及数值试验研究[J/OL]. 淮海大学学报(自然科学版), 2025: 1-

11. (2025-02-06). <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250206.0910.002>.

- WU Peng, LIU Jin, CHE Wenyue, et al. Reinforcement of red clay with locust bean gum composite and sisal fiber: mechanical properties and numerical testing[J/OL]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025: 1-11. (2025-02-06). <https://link.cnki.net/urlid/32.1117.TV.20250206.0910.002>.
- [3] LIU J K, TSAYBEL S, LIU X Q, et al. Experimental study on mechanical and frost heave behaviors of silty clay improved by polyvinyl alcohol and polypropylene fiber[J]. Research in Cold and Arid Regions, 2023,15(2):57-65.
- [4] 王连锐,陈筠,杨恒,等. 微生物对红黏土强度的改良效应及机理研究[J]. 长江科学院院报, 2022,39(5):125-131.
WANG Lianrui, CHEN Jun, YANG Heng, et al. Effectiveness and mechanism of improving strength of red clay by microorganism[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022,39(5): 125-131.
- [5] 李明东,张诗艾,杨远江,等. 植物脲酶诱导碳酸盐沉淀改良土体研究进展[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2024,45(1):1-9.
LI Mingdong, ZHANG Shiai, YANG Yuanjiang, et al. Research progress of soil improvement by plant urease induced carbonate precipitation[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2024,45(1):1-9.
- [6] HE Y, HUANG W J, ZHANG Z, et al. Effects of pore fluid salinity on desiccation cracking and microstructural behaviors of biochar-amended red clay[J]. Bulletin of Engineering Geology and the

- Environment,2023,82(12):438.
- [7] 林新.石灰改良红黏土试验及路基填筑技术分析[J].全面腐蚀控制,2024,38(12):52-54.
LIN Xin.Experimental study on lime modified red clay and analysis of roadbed filling technology[J].Total Corrosion Control, 2024,38(12):52-54.
- [8] 韦秉旭,吴佳雪,陈楚方.水泥改良高液限红黏土抗拉强度试验研究[J].公路,2024,69(10):330-335.
WEI Bingxu,WU Jiaxue,CHEN Chufang.Experimental study on the tensile strength of cement modified high liquid limit red clay[J].Highway,2024,69(10):330-335.
- [9] 刘之葵,郭彤,王剑.粉煤灰和二灰对桂林红黏土力学性质的影响[J].水文地质工程地质,2017,44(3):86-92.
LIU Zhikui,GUO Tong,WANG Jian.Effect of the fly ash and lime fly ash on the mechanical properties of red clay in Guilin[J].Hydrogeology & Engineering Geology,2017,44(3):86-92.
- [10] 马鹏传,李兴,温振宇,等.粉煤灰的活性激发与机理研究进展[J].无机盐工业,2021,53(10):28-35.
MA Pengchuan,LI Xing,WEN Zhenyu,et al.Research progress on activation and mechanism of fly ash[J].Inorganic Chemicals Industry,2021,53(10):28-35.
- [11] 岳秀鹏,陈忠平,董永泉,等.赤泥改性激发制备轻质土及固碱性能研究[J].公路,2025,70(5):347-353.
YUE Xiupeng,CHEN Zhongping,DONG Yongquan,et al.Study on preparation of light soil by red mud modification and its alkali fixation performance[J].Highway,2025,70(5):347-353.
- [12] 伍云,陈金霞,荣克明,等.粉煤灰-磷石膏协同固化淤泥土的力学性能研究[J].建材世界,2025,46(4):47-50.
WU Yun,CHEN Jinxia,RONG Keming,et al.Study on mechanical properties of fly ash-phosphogypsum co-solidified silt soil[J].The World of Building Materials,2025,46(4):47-50.
- [13] 李丽华,李金琳,徐梦倩,等.赤泥-高炉矿渣固化镉污染土强度及微观机理研究[J].有色金属(中英文),2025,15(6):1073-1080.
LI Lihua,LI Jinlin,XU Mengqian,et al.The strength and micro-mechanisms of red mud-GGBS solidification for cadmium-contaminated soil[J].Nonferrous Metals,2025,15(6): 1073-1080.
- [14] 刘彦浩,刘路路,刘涛,等.硅灰-矿渣-电石渣协同固化黄泛区粉土力学性能与微观机理研究[J].硅酸盐通报,2025,44(4):1513-1524.
LIU Yanhao,LIU Lulu,LIU Tao,et al.Mechanical properties and microscopic mechanisms of yellow floodplain silt solidified by silica fume-ground granulated blast furnace slag-carbide slag synergy[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2025, 44(4): 1513-1524.
- [15] ZHU J F,ZHENG Q Q,TAO Y L,et al.The curing mechanism and empirical model for the marine organic soft clay stabilized with calcium carbide residue and silica fume under the optimal ratio[J].Acta Geotechnica,2025,20(2):683-706.
- [16] BEYGI L,KHAZAEI J.Soft clay eco-friendly improvement by ground granulated blast furnace slag and quicklime[J].Geotechnical and Geological Engineering,2024,42(3):2061-2074.
- [17] 杨飞.矿渣粉煤灰地质聚合物耐久性能研究[J].粉煤灰综合利用,2025,39(2):33-36,59.
YANG Fei.Study on the durability of slag/fly ash-based geopolymer[J].Fly Ash Comprehensive Utilization,2025,39(2): 33-36,59.
- [18] 刘龙,黄莉美,王爱贞,等.赤泥-粉煤灰-矿渣碱激发胶凝材料性质的研究[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2012,22(1):13-20.
LIU Long,HUANG Limei,WANG Aizhen,et al.Property study of red mud-fly ash-slag alkali activated gel material[J].Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition),2012,22(1):13-20.
- [19] 交通运输部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S].北京:人民交通出版社,2020:106-213.
- [20] 潘荣祥,杨敏,袁宏.减水剂对赤泥-粉煤灰地质聚合物性能的影响[J].硅酸盐通报,2023,42(9):3212-3220.
PAN Rongxiang,YANG Min,YUAN Hong.Effects of water reducing agents on performance of red mud-fly ash based geopolymer[J].Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2023, 42(9): 3212-3220.
- [21] 中华人民共和国交通运输部.公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG 3441—2024[S].北京:人民交通出版社,2024: 103-106.
- [22] 谢荣,扈胜霞,李勇,等.废玻璃-水泥固化红黏土强度水理特性试验研究[J].铁道科学与工程学报,2025,22(6):2595-2609.
XIE Rong,HU Shengxia,LI Yong,et al.Experimental study on strength and water-physical property of red clay solidified by waste glass and cement[J].Journal of Railway Science and Engineering,2025,22(6):2595-2609.
- [23] 郭沁颖,李白云,丁建文,等.工业废渣改良泥水盾构渣土的路用性能试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2025,47(2): 66-75.
GUO Qinying,LI Baiyun,DING Jianwen,et al.Road performance investigation of slurry shield tunnel residue improved by industrial waste residues[J].Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025,47(2):66-75.
- [24] 谭鹏,谢振文,邓奇春,等.复合固化高液限土的力学及水稳性研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(5):1298-1308.
TAN Peng,XIE Zhenwen,DENG Qichun,et al.Mechanics and water stability of composite solidified soil with high liquid limit [J].Journal of Railway Science and Engineering,2022,19(5): 1298-1308.
- [25] 黄伟,项伟,刘清秉,等.离子固化剂改性蒙脱土水合-孔隙关联演化机制[J].岩土力学,2018,39(10):3631-3640.
HUANG Wei,XIANG Wei,LIU Qingbing,et al.Associated evolutionary mechanism of hydration-pore for montmorillonite modified by ionic soil stabilizer[J].Rock and Soil Mechanics,2018, 39(10):3631-3640.
- [26] 陈林,李彬,陈胜邦,等.碱激发矿渣加固淤泥的物理力学性能与机理[J].科学技术与工程,2024,24(2):789-796.
CHEN Lin,LI Bin,CHEN Shengbang,et al.Properties and mechanism of solidified silty sediment from alkali-activated slag [J].Science Technology and Engineering,2024,24(2):789-796.