

不同温度的干湿循环对纤维-石灰改良 云南红土强度特性的影响

刘星^{1,2}, 肖桂元^{1,2}, 殷乐³, 王一鹏^{1,2}, 王浩鹏^{1,2}, 徐敬奎⁴

(1. 桂林理工大学土木工程学院, 广西桂林 541004; 2. 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西桂林 541004;
3. 中国烟草总公司广西壮族自治区公司, 广西南宁 530000; 4. 中建路桥集团有限公司, 河北石家庄 050021)

摘要:本研究探讨了不同干湿循环条件下玻璃纤维和石灰复合改良云南红土的效果及作用机理。通过无侧限抗压强度试验、直接剪切试验、X射线衍射及扫描电镜分析,确定了最佳纤维和石灰掺量,并分析了干湿循环次数和脱湿温度对红土及复合土强度和矿物组成的影响。结果显示:复合改良显著提高了红土强度;干湿循环次数增加导致红土抗剪强度下降,而复合土抗剪强度则呈现先升高后降低的趋势;红土的抗剪强度在不同温度下表现出显著差异,复合土抗剪强度则随着脱湿温度升高而增加;随着脱湿温度升高,红土中石英含量先降后升,复合土中碳酸钙含量增加;扫描电镜分析结果显示,玻璃纤维和石灰通过增强胶结力、抑制裂隙发展,改善了土体微观结构,弱化干湿循环的侵蚀作用,从而提升红土强度和抗干湿循环能力。

关键词:红土;石灰;玻璃纤维;干湿循环;脱湿温度;抗剪强度

中图分类号:TU446

文献标志码:A

Effects of drying-wetting cycles at different temperatures on the strength properties of fibre-lime improved Yunnan laterite

LIU Xing^{1,2}, XIAO Guiyuan^{1,2}, YIN Le³, WANG Yipeng^{1,2}, WANG Haopeng^{1,2}, XU Jingkui⁴

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

2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin 541004, China;

3. Guangxi Zhuang Autonomous Region Company of China National Tobacco Corporation, Nanning 530000, China;

4. Sino Road & Bridge Group Co. Ltd, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: This study explores the effect and mechanism of glass fiber and lime in improving Yunnan lateritic soil under different wetting-drying cycle conditions. Through unconfined compressive strength tests, direct shear tests, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM), the optimal fiber and lime contents were determined, and the effects of the number of wetting-drying cycles and drying temperature on the strength and mineral composition of the lateritic soil and composite soil was analyzed. The results show that the composite improvement significantly enhanced the strength of the lateritic soil. As the number of wetting-drying cycles increased, the shear strength of the lateritic soil decreased while the shear strength of the composite soil first increased and then decreased. The shear strength of the lateritic soil varied significantly across different temperatures while the shear strength of the composite soil increased with drying temperature. With rising drying temperatures, the quartz content in the lateritic soil first decreased and then increased while the calcium carbonate

收稿日期:2024-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52169022)

作者简介:刘星(1998—),男,云南昆明人,硕士研究生,主要从事环境岩土工程方面的研究。E-mail:liuxingsaturn@163.com
肖桂元(1976—),男,湖南衡阳人,教授,博士,主要从事特殊土路基及道路结构方面的研究,本文通信作者。
E-mail:xiaoguiyuangit@163.com

content in the composite soil increased. The SEM analysis reveals that the composite improvement by glass fiber and lime enhanced bonding strength, inhibited crack development, improved the microstructure of the soil, and mitigated the erosive effect of wetting-drying cycles, thereby improving the strength and resistance of the lateritic soil to wetting-drying cycles.

Key words: laterite; lime; glass fiber; drying-wetting cycles; drying temperature; shear strength

云南地区气候干湿明显且降雨集中,极端干旱加剧了干湿循环,显著影响了红土型路基的强度^[1]。云南红土具有高塑性、低密度、高孔隙比和高含水率等特点,工程特性较差^[2]。在干湿循环过程中,红土经历体积膨胀与收缩、密度变化、土颗粒重新排列等物理变化,以及矿物溶解、沉淀、氧化还原反应和水化反应等化学变化,均对工程性质产生重要影响。

为改善特殊土的工程特性,国内外学者广泛研究了不同改良剂对土体强度特性的改良效果。常用的改良剂包括水泥^[3]、粉煤灰^[4]、石灰^[5]和纤维^[6]等。这些改良剂可以单独或混合使用来改善土体在干湿循环作用下的工程特性。石灰作为一种传统的土体改良剂,在工程实践中得到了广泛应用。石灰改良土具有水稳定性好、承载能力高以及结构体本身自成板块等特点^[7],但会出现土体脆性破坏、路基表面坑洼、土体开裂等问题。为克服石灰改良的不足,研究者们探索了将石灰与纤维复合使用的改良方法。纤维不仅具有高抗拉强度和良好的抗腐蚀性,而且成本低廉,在减少土体开裂和降低工程造价方面表现出显著优势^[8]。范凌燕^[9]指出纤维和石灰复合改良土体能够互补彼此的不足,提高土体的延性和强度。Cai等^[10]进一步指出,纤维与石灰的复合使用不仅可以提高土体的强度,还能增强土体的塑性,减少石灰土的脆性破坏。

尽管聚丙烯纤维和聚酯纤维等高分子合成纤维在改良土体方面效果显著且成本较低,但这些材料易磨损,其微颗粒可能通过土体进入地下水,导致微塑料污染,对生态环境造成不良影响。玻璃纤维作为一种理想的绿色环保土体改良剂,其主要成分为 SiO_2 ,具有高强度、耐腐蚀、耐高温、抗裂等优异特性。而石灰作为一种传统的固化剂,多年来在建筑领域广泛应用,表现出优异的综合性能,也是理想的土体固化剂。针对红土在自然环境中经历的湿润与干燥交替过程(如季节性气温变化和昼夜温差),有必要研究这些改良剂在不同环境条件下的表现。

鉴于此,本研究通过无侧限抗压强度试验、直接剪切试验和X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析,对比红土及复合改良土的抗剪强度,并探讨干湿循环次数和脱湿温度对其矿物晶体的影响。同时,结合扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM),分析干湿循环前后红土及其复合改良土的微观结构变化,旨在揭示其微观改良机制。研究成果将为云贵高原红土地区在极端环境下的土体性能变化提供科学依据,并为相关工程的设计与施工提供参考。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

试验所用红土采自云南东川海拔2 000 m以上,取土深度为地表以下2 m,颜色呈红色且质硬。将样品风干后碾碎,过2 mm筛^[11],测得其物理指标如表1所示。石灰的化学成分见表2,玻璃纤维的物理力学参数见表3。

表1 红土的物理性质

Table 1 Physical properties of laterite

天然含水率/%	最优含水率/%	最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限/%	塑限/%	比重
45.50	38.50	1.37	65.12	42.39	2.84

表2 石灰的化学成分

Table 2 Chemical composition of lime

成分	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	SO_3	%
含量	86.72	0.90	0.37	0.19	1.87	0.16	

表 3 玻璃纤维的物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of glass fibers

纤维直径/ μm	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	短切长度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	安全性
9~13	2.6	6	>1 800	80	无毒

土样共分为 3 类:红土、石灰土和复合土。定义红土与石灰混合后的土称为石灰土,红土与石灰和玻璃纤维混合后的土称为复合土。

1.2 试样制备

两类试样分别用于最佳掺量试验阶段和干湿循环试验阶段。

1) 最佳掺量试验阶段试样。将过 2 mm 筛的风干土与材料按比例充分混合,加水拌匀,密封 24 h 使水分迁移均匀。按式(1)计算直径 39.1 mm、高 80 mm、含水率为 38%、干密度 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的重塑试样所需总土质量,采用压实法制样。将试样用保鲜膜包裹密封,在标准养护条件(温度 $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度 95%)下养护 3 d。

$$m = (1 + 0.01\omega_0) \rho_d V \quad (1)$$

式中, m 为制备试样所需总土质量,g; ρ_d 为制备试样所要求的干密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; V 为制备试样所要求的体积, cm^3 ; ω_0 为风干含水率,%。

2) 干湿循环试验阶段试样。土样准备方法及养护条件同 1),试样尺寸为:直径 61.8 mm、高 20 mm。

1.3 试验方法

1.3.1 无侧限抗压强度试验

依据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》,参考文献[12-13]的研究,开展不同石灰和玻璃纤维掺量的无侧限抗压强度试验,确定复合土中石灰与玻璃纤维的最佳配合比。试验设计参数见表 4。

表 4 无侧限抗压强度试验设计参数

Table 4 Design parameters for unconfined compressive strength test

试样编号	试样名称	石灰掺量/%	玻璃纤维掺量/%
1	红土	0	0
2~6	石灰土	1, 2, 5, 8, 11	0
7~11	复合土	5	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5

1.3.2 干湿循环试验

对红土和最优复合掺量的复合土试样进行干湿循环试验,试验设计参数见表 5。

表 5 直剪试验设计参数

Table 5 Direct shear test design parameters

试样编号	土样名称	干湿循环次数	脱湿温度/ $^\circ\text{C}$	石灰掺量/%	纤维掺量/%
1~18	红土	0, 1, 2, 3, 4, 5	45, 75, 105	0	0
19~36	复合土	0, 1, 2, 3, 4, 5	45, 75, 105	5	0.3

1) 干湿循环方式及时间。将试样放入烘箱恒温脱湿 24 h。脱湿后包裹保鲜膜冷却至室温,再抽真空饱和 24 h,完成 1 次干湿循环,重复上述步骤实现多次干湿循环。每次脱湿与饱和后,立即使用高拍仪记录试样裂隙变化,以备后续分析。

2) 干湿循环次数及脱湿温度。参考已有研究^[14],将干湿循环次数设定为 0~5 次。基于文献[15-17]的研究,脱湿温度设置为 45、75 和 105 $^\circ\text{C}$,以模拟极端环境,探讨干湿循环次数和脱湿温度对土体的影响。

3) 直剪试验。每次干湿循环后,使用 ZJ 型四联直剪仪进行快剪试验,垂直压力(p)分别为 100、200、300、400 kPa,剪切速率为 0.8 mm/min,停机位移为 6 mm。

1.3.3 X 射线衍射试验

X 射线衍射分析用于确定试样的矿物成分及含量。通过分析干湿循环与脱湿温度对红土和复合土矿物成分的影响,可探讨土体矿物间的化学变化,并揭示其抗剪强度变化的原因。试验对未处理和经历 5 次干湿循环后的红土和复合土样品进行了 X 射线衍射分析。

2 试验结果

2.1 改良红土的最优配合比

图 1(a)展示了石灰掺量对石灰土无侧限抗压强度的影响。由图 1(a)可知,石灰的掺入可有效提高红土的无侧限抗压强度,且随着石灰掺量的增加,土体强度先增大后减小。石灰掺量为 5%时,强度值达到峰值,较红土提高了 128.78%。

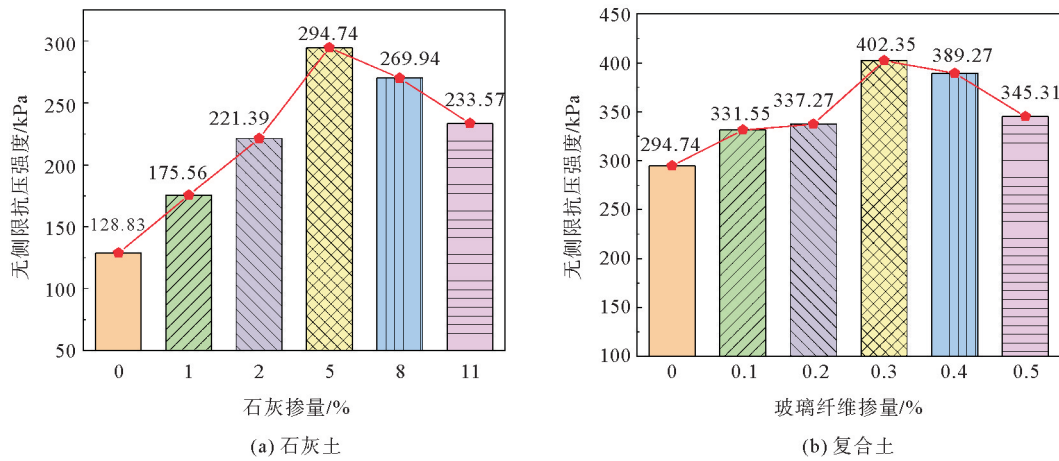


图 1 石灰土和复合土的无侧限抗压强度与改良剂掺量的关系

Fig. 1 Unconfined compressive strength of lime and composite soils as a function of amendment dosage

石灰掺量固定为 5%,玻璃纤维掺量对复合土无侧限抗压强度的影响如图 1(b)所示。结果表明,复合土的无侧限抗压强度随着玻璃纤维掺量的增加同样呈现出先增大后减小的趋势。玻璃纤维掺量为 0.3%时,其强度值达到峰值(402.35 kPa),较 5%石灰土和红土分别提高了 36.51%和 212.31%。由此,复合土的最佳配合比为:石灰掺量 5%,玻璃纤维掺量 0.3%。

2.2 干湿循环作用下土体的抗剪强度特性

2.2.1 干湿循环次数和脱湿温度对土体抗剪强度的影响

图 2 展示了在垂直压力 p 为 200 和 400 kPa 条件下,红土的抗剪强度随干湿循环次数(N)和脱湿温度(T)的变化曲面图。由图 2 可知,脱湿温度不变时,红土的抗剪强度随着干湿循环次数的增加而逐渐减小;而在干湿循环次数不变时,抗剪强度(τ_T)随脱湿温度的增加呈现先减小后增大的趋势,整体表现为非线性关系: $\tau_{75^\circ\text{C}} < \tau_{45^\circ\text{C}} < \tau_{105^\circ\text{C}}$ 。以图 2(a)为例,脱湿温度为 45、75 和 105 $^\circ\text{C}$,红土经历 5 次干湿循环后,其抗剪强度较于未干湿处理的试样分别下降了 11.55%、16.10%和 1.01%。

如图 3 所示,复合土的抗剪强度随脱湿温度的升高而增加,表现出明显的正相关关系,顺序为 $\tau_{45^\circ\text{C}} < \tau_{75^\circ\text{C}} < \tau_{105^\circ\text{C}}$,这一趋势与红土的变化有所不同。此外,随着干湿循环次数的增加,复合土的抗剪强度先增加后减小。以图 3(a)为例,脱湿温度为 45、75 和 105 $^\circ\text{C}$,复合土经历 5 次干湿循环后,其抗剪强度较未干湿处理的试样,分别增大了 5.18%、2.69%和 19.33%。

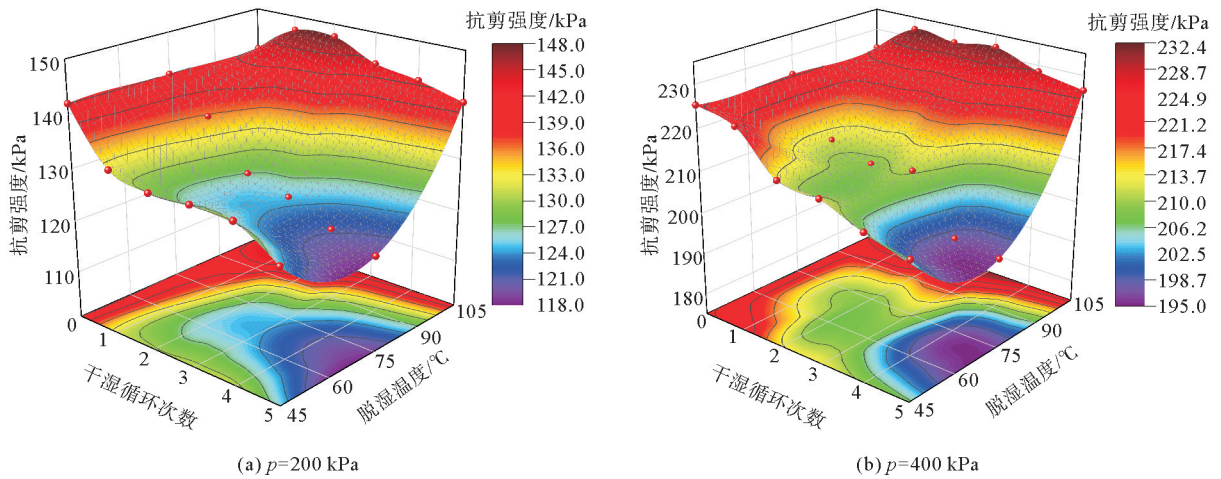


图 2 红土抗剪强度变化曲面图

Fig. 2 Surface plot of variation in shear strength of laterite

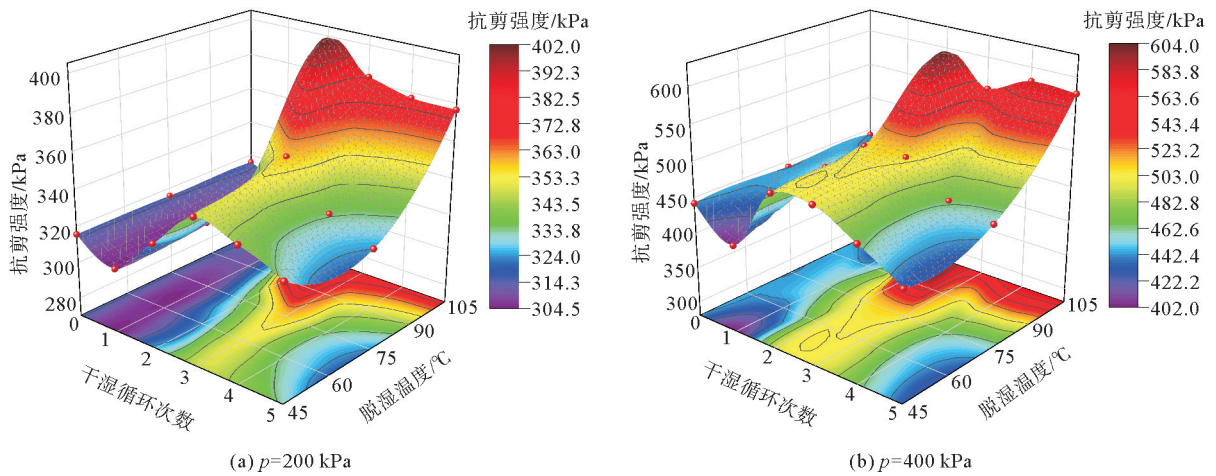


图 3 复合土抗剪强度变化曲面图

Fig. 3 Surface plot of change in shear strength of composite amended soil

2.2.2 抗剪强度指标

土体的抗剪强度是垂直压力的函数。根据库仑公式绘制不同脱湿温度下各干湿循环次数的土体抗剪强度与垂直压力的关系曲线。对曲线上各点进行线性拟合,得到直线的倾角即为内摩擦角,直线在纵坐标上的截距为土的黏聚力。图 4 展示了不同脱湿温度(T)下,红土和复合土的黏聚力与干湿循环次数的关系。从图 4 中不难发现:红土和复合土的黏聚力均随干湿循环次数的增大呈现减小的趋势。脱湿温度分别为 45、75 和 105 °C 时,整个干湿循环过程中,经历干湿循环的红土相较未干湿循环的红土,其黏聚力最大减小幅度分别为 42.86%、40.34%和 19.55%。同样地,经历干湿循环的复合土的黏聚力较未干湿循环的复合土,最大减小幅度分别为 28.52%、18.09%和 18.95%。由图 4(a)可知,第 1~2 次干湿循环中,红土的黏聚力受脱湿温度影响明显,随着脱湿温度的增大,其黏聚力依次增大。

由图 4(b)可知,复合土的黏聚力在 0~3 次干湿循环过程中,呈现先减小后增大的趋势。但脱湿温度对其的影响无明显规律。这是由于未完全反应的石灰粉末充填在土体中,起到一定的润滑作用,弱化了土体的力学性能^[14],导致第 1 次干湿循环后黏聚力和抗剪强度下降。第 2 次干湿循环后,石灰与水分持续发生水化反应生成胶结物质,填充于土颗粒间,使土体黏聚力增强。第 4 次干湿循环后,土体累积的损伤开始显现,导致复合土的黏聚力有所下降。

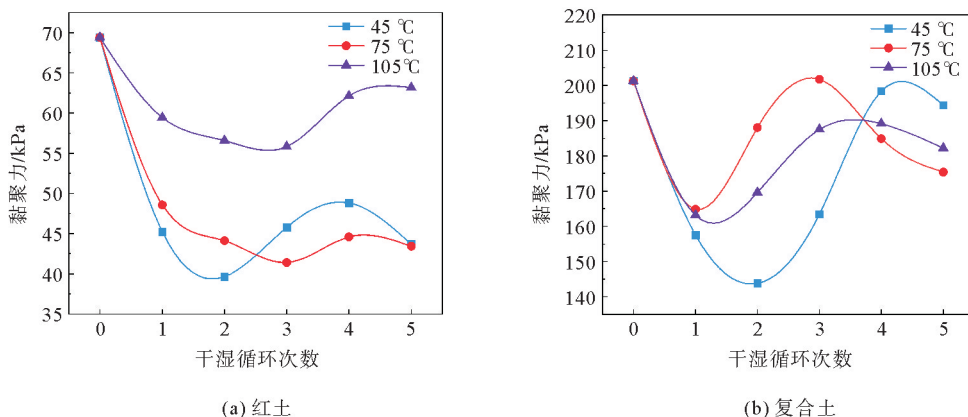


图 4 土体黏聚力与干湿循环次数的关系

Fig. 4 Relationship between soil cohesion and number of drying-wetting cycles

图 5 展示了不同脱湿温度下,红土和复合土的内摩擦角随干湿循环次数的变化关系。随着干湿循环次数的增加,两种土体的内摩擦角均呈现先增加后减小的趋势。干湿循环初期($N=0\sim 2$),随着循环次数的增加,红土的内摩擦角在不同脱湿温度(45、75 和 105 °C)下最大增幅分别为 10.51%、2.74%和 10.09%;复合土的内摩擦角也表现出相似的增长趋势,分别增大了 28.10%、19.23%和 47.83%。这种增大的趋势可归因于复合土体经历第 1~2 次干湿循环后,黏聚力降低导致土颗粒之间的吸附力和黏结力减小,使得颗粒之间更容易发生相对滑动和相互摩擦,从而导致内摩擦角的增大。然而,在干湿循环后期($N=3\sim 5$),红土和复合土的内摩擦角均明显下降。在 45、75 和 105 °C 脱湿温度下,红土的内摩擦角最大降幅分别为 7.91%、7.42%和 8.07%;而复合土的最大降幅分别为 18.74%、6.85%和 5.34%。这是由于随着干湿循环次数的增加,土颗粒之间的连接进一步遭到破坏,裂隙逐渐发育,土体逐渐破碎呈松散状态,导致颗粒间的咬合能力降低,咬合摩擦力减小。整体而言,复合土的内摩擦角普遍大于红土,但两种土随脱湿温度变化的规律性并不显著。

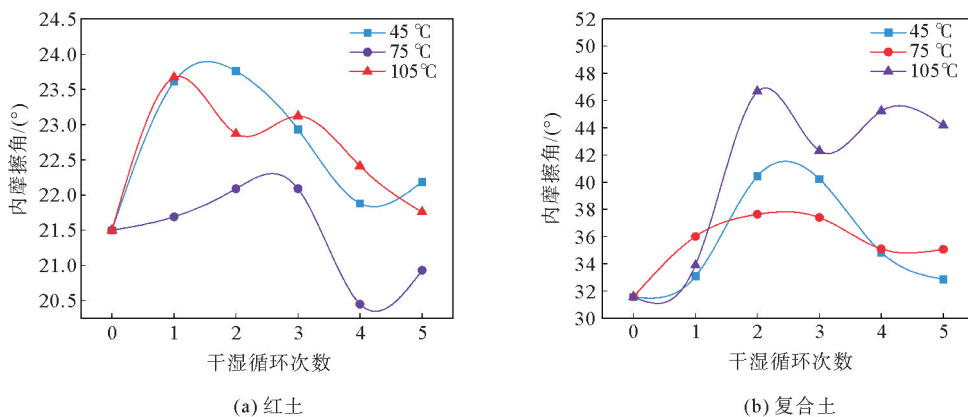


图 5 内摩擦角与干湿循环次数的关系

Fig. 5 Relationship between angle of internal friction and number of drying-wetting cycles

2.3 X 射线衍射分析

对土体的 X 射线衍射图谱进行分析,由图 6(a)得到云南东川红土的主要矿物有石英、高岭石、赤铁矿、碳酸钙和其他矿物等;由图 6(b)可知,红土掺入石灰和玻璃纤维后,其矿物成分也是石英、高岭石、赤铁矿、碳酸钙和其他矿物等;两者的主要区别在于矿物的质量分数有所不同。

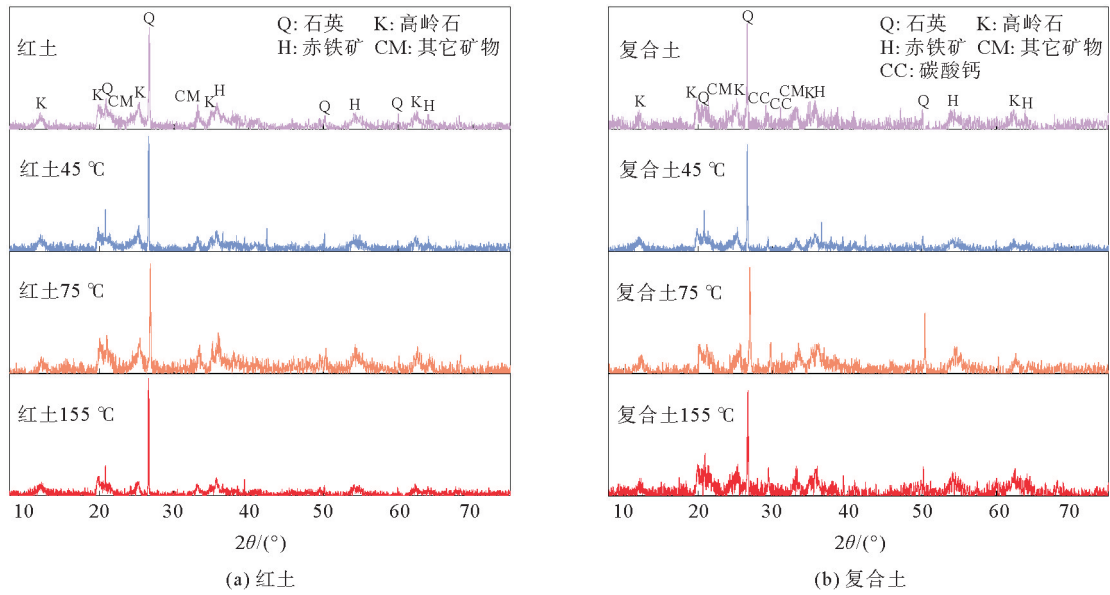


图 6 土体的 X 射线衍射图谱

Fig. 6 X-ray diffraction pattern of the soil

图 7 为 3 种脱湿温度下,红土和复合土样矿物成分半定量分析曲线图。需要说明的是,图 7 中横坐标为 0 的点($N=0$)代表土样未经历过干湿循环。由图 7(a)可知,红土矿物中石英、高岭石、赤铁矿和碳酸钙的质量分数随脱湿温度的改变有所变化。相较于未干湿处理的试样,脱湿温度为 45 °C 时,红土和复合土中的石英质量分数分别从 47.1% 和 47.2% 增加到 52.2% 和 48.5%;75 °C 时,石英质量分数分别降低至 43.9% 和 43.3%,其中红土试样下降尤为显著;105 °C 时,石英的质量分数又增加至 57.5% 和 44.2%。复合土中碳酸钙的质量分数始终高于红土,且随着脱湿温度升高而逐渐增加,从未干湿处理状态下的 8.8%,分别增大至 9.0%、12.6%、13.0%。

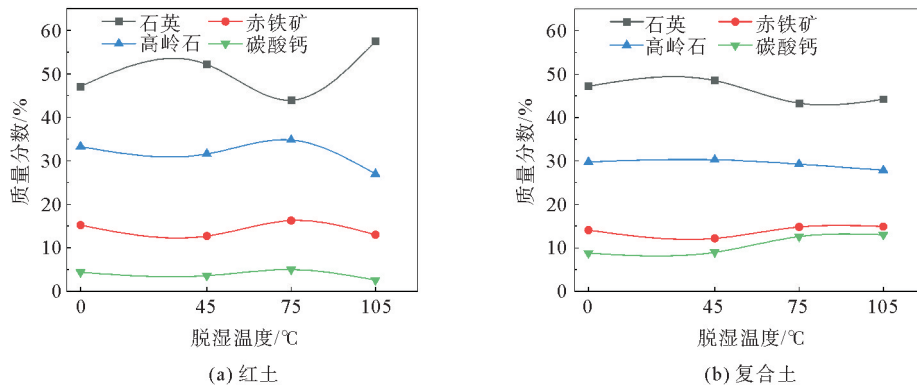


图 7 土体矿物半定量分析

Fig. 7 Semi-quantitative analysis of soil minerals

综上可得,红土中石英的质量分数(Q_t)在 45 °C 时有所增加,75 °C 时最低,105 °C 时达到最大值。其与脱湿温度的关系可表示为: $Q_{75\text{ °C}} < Q_{45\text{ °C}} < Q_{105\text{ °C}}$ 。这一趋势与上文中红土抗剪强度和脱湿温度间的关系($\tau_{75\text{ °C}} < \tau_{45\text{ °C}} < \tau_{105\text{ °C}}$)相对应。同理,由图 7(b)知,复合土中 CaCO_3 的质量分数(C_{at})与温度呈现 $C_{a45\text{ °C}} < C_{a75\text{ °C}} < C_{a105\text{ °C}}$ 的关系,这一趋势也与复合土抗剪强度与温度的关系($\tau_{45\text{ °C}} < \tau_{75\text{ °C}} < \tau_{105\text{ °C}}$)相一致。因此可初

步得出一个结论:脱湿温度会导致土体矿物晶体发生变化,红土中主要体现为石英质量分数的变化,复合土中主要体现为 CaCO₃ 质量分数的变化,宏观上表现为土体抗剪强度随脱湿温度发生变化。

3 分析与讨论

3.1 复合土强度增强机制与微观机理

对红土、掺量 5% 的石灰土和最优掺量的复合土(石灰 5%、玻璃纤维 0.3%)进行扫描电镜试验,观察 3 类土的微观形貌特点。如图 8(a)所示,红土内部孔隙发育,部分土体呈现松散状态;将石灰掺入红土后,土体间有明显的石灰土团聚和胶结现象,如图 8(b)所示;将玻璃纤维和石灰混合掺入红土后,玻璃纤维被周围的石灰土颗粒包围,形成石灰土颗粒和相邻纤维的土-筋胶结面结构,如图 8(c)所示。

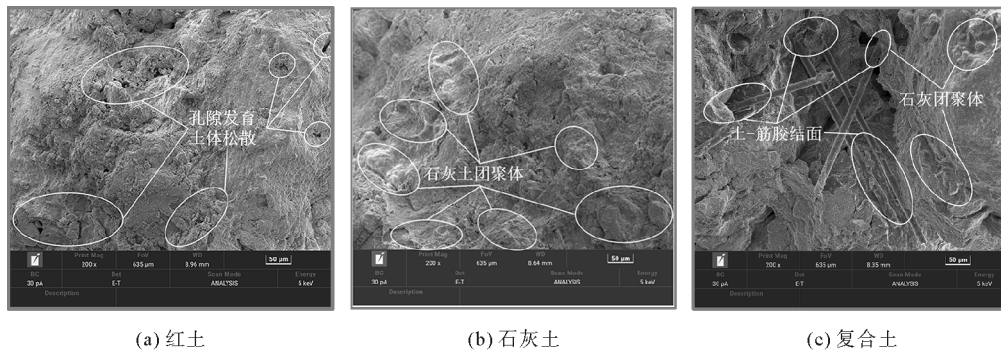
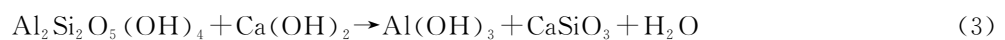


图 8 土体的 SEM 图

Fig. 8 SEM image of soil

纤维和石灰复合可有效提升红土强度特性。一方面,石灰与水分主要发生如式(2)所示的水化反应生成 Ca(OH)₂,填充土体孔隙;同时 Ca(OH)₂ 发生电离,使土颗粒周围游离的 Ca²⁺ 浓度增加, Ca²⁺ 与土颗粒之间的静电引力增强,平衡土颗粒表面负电荷所需要的阳离子数量减少,进而使扩散层厚度变薄,增加了土体的强度与稳定性。与此同时,土体内部发生如式(3)和式(4)的火山灰以及碳酸化作用,生成的 CaSiO₃ 和 CaCO₃ 等物质填充于土颗粒孔隙,或包裹在红土颗粒表面,与红土结合成灰土团聚体,如图 8(b)所示,增强了土颗粒间的黏结作用,有效提高了土体强度。另一方面,纤维与石灰土相互交织、咬合,形成土-筋胶结面,有助于土颗粒间拉应力的传递,使纤维“锚杆”作用得到加强,土-筋界面的咬合摩擦力增大,如图 8(c)所示,宏观上表现为土体抗压和抗剪强度得到增强^[14]。



3.2 干湿循环作用下土体抗剪强度变化的微观机理

3.2.1 红土

图 9 所示为不同脱湿温度下红土干湿循环 5 次后的扫描电镜图。对比图 9 与图 8(a)可知,红土经历 5 次干湿循环后,内部孔隙发育,裂隙增多,部分土颗粒呈松散状。由图 9(c)可知,脱湿温度为 105 °C 的红土相较于 45 和 75 °C 脱湿的红土,其内部孔隙和裂隙较少,土颗粒结构更加致密。此外,通过 Image-J 软件对上述试样 SEM 图像的孔隙变化进行定量分析,结果如表 6 所示。由表 6 可知,45 和 75 °C 脱湿红土的孔隙率分别比未经干湿循环处理的红土增加了 33.30% 和 45.58%,且均高于 105 °C 脱湿红土的孔隙率。此微观分析结果与 X 射线衍射试验结果一致,进一步解释了 105 °C 下处理的红土抗剪强度高于 45 和 75 °C 处理的原因。

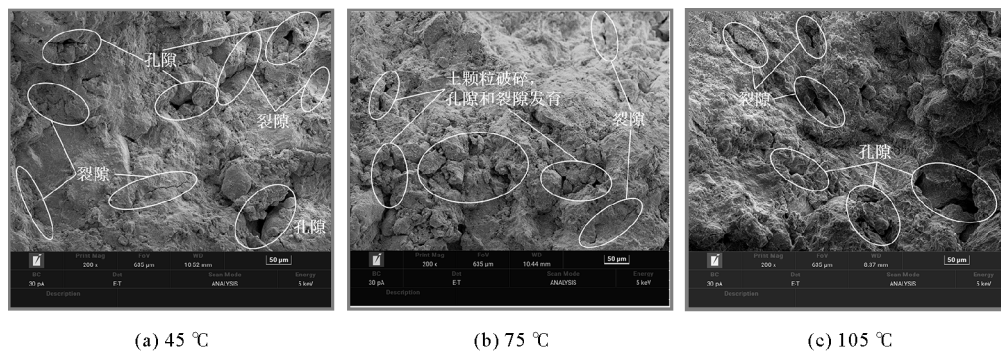


图 9 红土干湿循环 5 次的 SEM 图

Fig. 9 SEM images of laterite with 5 drying-wetting cycles

表 6 试样微观定量分析

Table 6 Quantitative microanalysis of specimens

试样类型	脱湿温度/ °C	干湿循环次数	孔隙总数/个	孔隙总面积/ μm^2	孔隙平均尺寸/ μm	截面孔隙率/%
红土	—	0	7 353	16 048.664	2.183	5.198
	45	5	7 635	23 734.205	3.109	6.929
	75	5	8 370	25 186.762	3.009	7.567
	105	5	5 500	16 980.607	3.087	5.102
复合土	—	0	3 991	15 636.109	3.918	4.947
	45	5	6 937	27 683.420	3.991	8.294
	75	5	4 768	14 802.147	3.104	5.748
	105	5	3 797	13 049.392	3.437	4.012

干湿循环过程中,土的抗剪强度会随着干湿循环次数的增加而逐渐降低。这是因为,经过多次干湿循环,土颗粒发生破碎和变形。土颗粒每次吸水膨胀,而后在不同温度下将水分蒸发。从微观角度看,这一过程使土颗粒间产生微观损伤,导致应力分布不均,进而形成微裂隙和疏松区域。如图 9 所示,土体内部颗粒破碎,裂隙和孔隙大量增加。宏观上则表现为试样表面裂隙显著增加,将土体划分成大小不等的独立区域(见图 10),最终降低了土的抗剪强度。

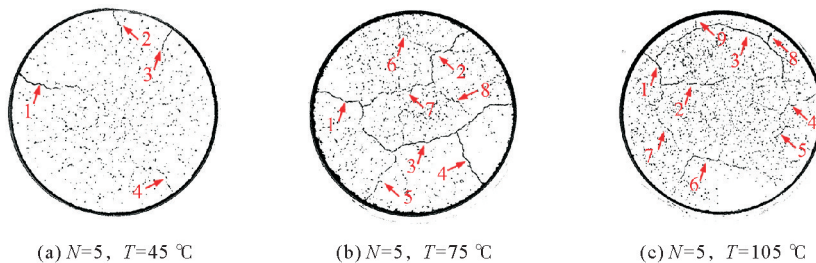


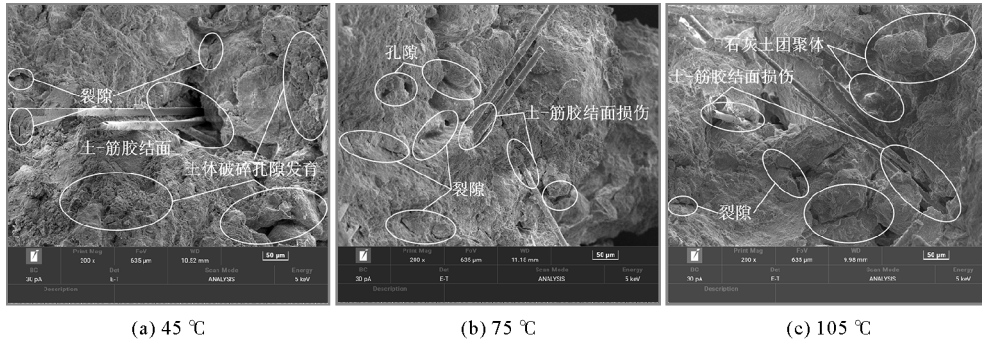
图 10 红土试样的裂隙二值化图像

Fig. 10 Fracture binarisation images of laterite specimens

3.2.2 复合土

复合土的抗剪强度随干湿循环次数增加呈现先增后减的趋势。由图 11 与图 8(c)对比可见,经历 5 次干湿循环后,土颗粒间的胶结物质逐渐溶解,导致土颗粒间的胶结力减弱,孔隙和裂隙发育,引发疲劳损伤,

进而破坏土体结构和颗粒团聚性,增强土体分散性,最终导致黏聚力降低^[18]。此外,由于周期性的湿润与干燥使复合土的孔隙率发生变化,土-筋界面裂隙发育,进一步损伤界面强度,导致土体抗剪强度降低。

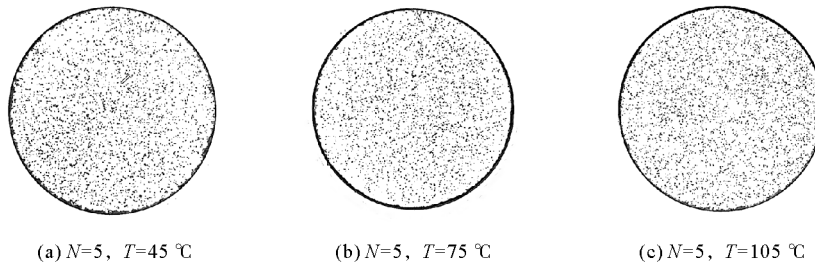


(a) 45 °C (b) 75 °C (c) 105 °C

图 11 复合土干湿循环 5 次的 SEM 图

Fig. 11 SEM images of composite soil with 5 drying-wetting cycles

由图 11 可知,复合土的裂隙和孔隙的数量随脱湿温度的升高而减少。如图 11(c)所示,与 45 和 75 °C 脱湿的复合土相比,105 °C 脱湿的复合土中裂隙和孔隙数量更少,土体更为密实,结构整体性未受到明显破坏。从宏观角度看,如图 12 所示,不同脱湿温度下复合土表面光滑,无明显裂隙。这是由于干湿循环过程中,纤维形成的网状结构有效抑制了裂隙发育,Ca(OH)₂、CaSiO₃、CaCO₃ 的胶结作用增强了结构密实性。二者共同作用减少了土体的收缩与膨胀,抑制了宏观裂隙的形成,使孔隙与裂隙发育主要集中在微观层面。此外,表 6 所示的微观定量分析表明,随着温度的增加,复合土的孔隙率逐渐减小,105 °C 处理后的孔隙率均低于 45 和 75 °C。这是因为较高的脱湿温度加速了复合土内部的水化反应和碳酸化反应,Ca(OH)₂ 和 CaCO₃ 等胶结性物质迅速生成,使土体结构更加紧密,最终表现为强度提升。这与 XRD 的分析相一致,即 CaCO₃ 的质量分数随脱湿温度的升高而增加,且在 105 °C 下达到最大值。



(a) N=5, T=45 °C (b) N=5, T=75 °C (c) N=5, T=105 °C

图 12 复合土试样的裂隙二值化图像

Fig. 12 Fissure binarisation images of composite amended soil specimens

4 结论

1) 红土的抗剪强度随脱湿温度的不同而变化,75 °C 时的抗剪强度低于 45 °C 时,而 105 °C 时的抗剪强度最高,即 $\tau_{75\text{ °C}} < \tau_{45\text{ °C}} < \tau_{105\text{ °C}}$ 。复合土的抗剪强度与脱湿温度正相关,即随着温度的升高,抗剪强度依次增加, $\tau_{45\text{ °C}} < \tau_{75\text{ °C}} < \tau_{105\text{ °C}}$ 。红土的抗剪强度随干湿循环次数的增加而逐渐减小;复合土的抗剪强度随干湿循环次数的增大呈现先增大后减小的趋势。

2) 脱湿温度的变化会导致土体内矿物的质量分数发生变化。经 XRD 分析,红土主要体现为石英质量分数的变化,复合土主要体现为碳酸钙质量分数的变化。红土中石英质量分数(Q_i)随温度变化呈现 $Q_{75\text{ °C}} < Q_{45\text{ °C}} < Q_{105\text{ °C}}$ 的关系,即在 75 °C 时最低,45 °C 时有所增加,105 °C 时达到最大值。相反,复合土中碳酸钙质

量分数(C_{ar})随着温度的升高呈现明显的正相关关系: $C_{a45^{\circ}\text{C}} < C_{a75^{\circ}\text{C}} < C_{a105^{\circ}\text{C}}$ 。

3) 微观定性与定量分析表明,试样在不同温度下经历干湿循环后,孔隙结构发生显著变化。孔隙率主要受脱湿温度影响,干湿循环次数影响较小,且孔隙率变化与抗剪强度呈现相反趋势。

4) 脱湿温度对土体抗剪强度的影响可能比干湿循环次数的影响要大。建议在实际工程中需要着重考虑温度对改良红土强度的影响。

参考文献:

- [1] 杨恒,黄英,周丹,等. 干湿循环对云南红土渗透性的影响[J]. 科学技术与工程,2019,19(27):289-297.
YANG Heng, HUANG Ying, ZHOU Dan, et al. The effect of drying-wetting cycle on the permeability of Yunnan laterite [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(27): 289-297.
- [2] 田俊,张祖莲,谢道春. 云南红土的工程特性研究综述[J]. 中国水运(下半月),2023,23(1):101-103.
- [3] WASSERMANN A, ABDALLAH A, CUISINIER O. Impact of wetting and drying cycles on the mechanical behaviour of a cement-treated soil[J/OL]. Transportation Geotechnics, 2022, 36. DOI:10.1016/j.trgeo.2022.100804.
- [4] SENGUL T, AKRAY N, VITOSOGLU Y. Investigating the effects of stabilization carried out using fly ash and polypropylene fiber on the properties of highway claysoils[J/OL]. Construction and Building Materials, 2023, 400. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2023.132590.
- [5] YING Z, BENAHMED N, CUI Y J, et al. Wetting-drying cycle effect on the compressibility of lime-treated soil accounting for wetting fluid nature and aggregate size[J/OL]. Engineering Geology, 2022, 307. DOI:10.1016/j.enggeo.2022.106778.
- [6] BU F, LIU J, MEI H, et al. Cracking behavior of sisal fiber-reinforced clayey soil under wetting-drying cycles[J/OL]. Soil and Tillage Research, 2023, 227. DOI:10.1016/j.still.2022.105596.
- [7] 薛勇刚. 低剂量石灰稳定土的路用性能及其应用研究[D]. 郑州:郑州大学,2012:3-4.
XUE Yonggang. Pavement performance of lime-stabilized soil with small lime content and its application[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012: 3-4.
- [8] 王伟,王中华,曾媛,等. 聚丙烯纤维复合土抗裂补强特性试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(3):703-708.
WANG Wei, WANG Zhonghua, ZENG Yuan, et al. Experimental study of anti-cracking and reinforcement behaviors of polypropylene fiber composite soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 703-708.
- [9] 范凌燕. 基于FLAC^{3D}纤维石灰土路基边坡稳定性分析[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(9):2258-2262.
FANG Lingyan. Stability analysis on embankment improved by fiber and lime based on FLAC^{3D}[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(9): 2258-2262.
- [10] CAI Y, SHI B, NG C W W, et al. Effect of polypropylene fibre and lime admixture on engineering properties of clayey soil [J]. Engineering Geology, 2006, 87(3): 230-240
- [11] 吴燕开,王浩,苗盛瑶,等. 钢渣粉水泥改良膨胀土干湿循环下力学性能及机理分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2021,40(2):41-50.
WU Yankai, WANG Hao, MIAO Shengyao, et al. Mechanical properties and mechanism of expansive soil modified by steel slag powder cement under dry-wet cycles[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 40(2): 41-50.
- [12] 肖庆一,孙立东,封仕杰,等. 石灰改良云南红粘土路基路用性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(10):79-84.
XIAO Qingyi, SUN Lidong, FENG Shijie, et al. Road performance of lime-modified Yunnan red clay roadbed[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, 39(10): 79-84.
- [13] 阮波,彭学先,马超,等. 玻璃纤维加筋石灰土无侧限抗压强度试验研究[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(9):2246-2251.
RUAN Bo, PENG Xuexian, MA Chao, et al. Experimental study on unconfined compressive strength of glass fiber reinforced lime soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(9): 2246-2251.
- [14] 郝建斌,张焕,李耕春,等. 粉煤灰-剑麻纤维复合改良膨胀土强度及裂隙发育特性[J]. 铁道科学与工程学报,2022,19(9):2620-2628.

- HAO Jianbin,ZHANG Huan,LI Gengchun,et al. Strength and cracking characteristics of expansive soil improved by fly ash and sisal fiber[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2022,19(9):2620-2628.
- [15] 黄震,边林林,刘莹,等. 牡蛎壳粉改良膨胀土的工程特性及微观机理研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(5):1729-1739.
- HUANG Zhen,BIAN Linlin,LIU Ying,et al. Engineering characteristics and microscopic mechanism of expansive soil improved by oyster shell powder[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2023,20(5):1729-1739.
- [16] 张竞,李骏. 干湿循环下橡胶-尾砂充填体能量损耗本构关系研究[J]. 矿业研究与开发,2023,43(7):19-26.
- ZHANG Jing,LI Jun. Study on the constitutive relation of energy loss of rubber-tailings filling body under dry-wet cycle[J]. Mining Research and Development,2023,43(7):19-26.
- [17] 刘新荣,缪露莉,袁文,等. 化学溶液和干湿循环作用下砂岩 I / II 复合型断裂韧性劣化特性研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(10):2148-2155.
- LIU Xinrong,MIAO Luli,YUAN Wen,et al. Degradation characteristics of I/II mixed-mode fracture toughness of sandstone under action of chemical solution and drying-wetting cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(10):2148-2155.
- [18] 梁谏杰,张祖莲,黄英,等. 干湿循环作用下加砂对红土抗剪强度及微结构特性的影响[J]. 山地学报,2019,37(6):848-857.
- LIANG Jianjie,ZHANG Zulian,HUANG Ying,et al. Effect of sand adding on shear strength and microstructure characteristics of laterite under dry-wet cycling condition[J]. Mountain Research,2019,37(6):848-857.

(责任编辑:吕海亮)